FERNANDO TEUBL FERREIRA

UM SISTEMA DE MULTIPROJEÇÃO ESCALÁVEL

São Paulo
2011

FERNANDO TEUBL FERREIRA

UM SISTEMA DE MULTIPROJEÇÃO ESCALÁVEL

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Professor Doutor Marcelo Knörich Zuffo

São Paulo
2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 6 de setembro de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferreira, Fernando Teubl

**Um sistema de multiprojeção escalável / F.T. Ferreira. --
ed.rev. -- Paulo, 2011.
200 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrô-
nicos.**

**1. Realidade virtual 2. Visão computacional 3. Programação
paralela 4. Sistemas integrados em larga escala I. Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
de Sistemas Eletrônicos II. t.**

DEDICATÓRIA

*À minha esposa Carolina de Melo Teubl Gagliato
e aos meus pais, Neto e Rosa.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Marcelo Knörich Zuffo, por toda a dedicação, paciência e por todos os ensinamentos.

Agradeço também a toda equipe da Caverna Digital da USP, tanto em virtude da ajuda direta quanto do auxílio indireto para a conclusão desta pesquisa.

Agradeço, enfim, a todos os demais amigos e colegas que embora não tenham ajudado diretamente nesta pesquisa, foram essenciais para minha formação acadêmica e profissional.

FINANCIAMENTO

Este projeto contou com o apoio e financiamento das seguintes instituições e projetos:

- LSI-TEC – Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico;
- FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos;
 - “Elaboração e desenvolvimento de soluções de RV de baixo custo”.
 - Convênio 01.08.0206.00.
- FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo;
 - “Projeto Kyatera”.
 - Processo 08327-7.
- Rede Galileu (Petrobrás).
 - “Desenvolvimento e Implantação de um Sistema de Projeção Imersivo de Baixo Custo”.
 - Número do projeto 1822-05.

A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original.

(Albert Einstein)

RESUMO

Sistemas de multiprojeção podem oferecer alta resolução e grande quantidade de brilho por fundamentarem-se no uso de aglomerado de projetores e podem proporcionar uma qualidade visual superior aos sistemas de projeção tradicionais compostos por um projetor de alto desempenho. Considerando o custo elevado dos projetores de alto brilho e resolução, o uso de projetores convencionais em sistemas de multiprojeção pode representar uma redução sensível no custo de implantação sem comprometer a qualidade visual. Esta tese propõe a pesquisa e o desenvolvimento de um sistema de multiprojeção escalável com o objetivo de atingir resoluções nos limites do sistema de percepção visual humano. Este sistema é denominado como resolução retina. Para tanto, foi realizada a pesquisa e a proposta de um sistema de multiprojeção escalável inovador. A viabilidade deste sistema foi comprovada através do desenvolvimento do sistema de multiprojeção chamado Fast Fusion que – dentre vários recursos – permite a calibração automática dos projetores através de câmeras. Na implementação da biblioteca Fast Fusion, foram realizados aprimoramentos de algoritmos conhecidos na literatura tais como os algoritmos de calibração de projetores utilizando matrizes de homografia, além da proposta de uma arquitetura inédita para suportar grande quantidade de projetores, com centenas ou até mesmo milhares de projetores e computadores gráficos. O sistema de multiprojeção desenvolvido nesta tese foi utilizado na implementação de várias aplicações de realidade virtual nas áreas de aprendizagem, treinamento, simulação, entretenimento e turismo. Por fim, este trabalho apresenta uma análise de desempenho visual e computacional do sistema proposto.

Palavras-Chave: Sistema de Multiprojeção. Realidade Virtual. Visão Computacional.

ABSTRACT

Multi-projector systems offer both higher resolution and brightness by using a cluster of projectors, providing better visual quality when compared to traditional systems using a single high performance projector. When we consider the high cost associated with high-end projectors, the use of multiple low cost projectors can reduce considerably the cost of such installation. The goal of this thesis is to research such alternatives using clusters of projects to develop a scalable multi-projector system capable of achieving a high resolution display comparable to that of a human eye. We call such display the “retina display”. We proved the viability of such system through the development of a multi-projector system called Fast Fusion which automatically calibrates casually aligned projectors to properly blend different projections using cameras. Our Fast Fusion system improves known algorithms in the literature for projector calibration and blending using homographic matrices. Additionally, we propose a new architecture that supports a higher number of projectors than previous approaches - our solution supports hundreds or thousands of projectors to be used together, powered by a graphics cluster. The multi-projector system developed in this thesis has been validated on several virtual reality solutions by developing applications in diverse areas such as learning, training, simulation, entertainment and tourism. Finally, this thesis presents a thorough analysis of the visual and computational performance of our system.

Keywords: Multi-projector System. Virtual Reality. Visual Computer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparativo de resoluções.....	29
Figura 2 – Nove monitores em grade (extraído de Ball e North (2005)).....	30
Figura 3 – Sistema com 15 projetores (extraído de Schikore <i>et al.</i> (2000))	32
Figura 4 – Projetor com suporte regulável de alta precisão (extraído de Hereld <i>et al.</i> (2000)).....	34
Figura 5 – Estrutura de multiprojeção com alinhamento mecânico (extraído de Hereld <i>et al.</i> (2000)).....	35
Figura 6 – Sistema de multiprojeção baseado em câmera (adaptado de Majumder e Brown (2007)).....	37
Figura 7 – Padrão de mapeamento baseado em círculos dispostos em grade (6x8).....	39
Figura 8 – Sequência de padrões baseados em círculos dispostos em grade (6x8)	41
Figura 9 – Segmentação dos trechos de mapeamento lineares	44
Figura 10 – Mapeamento projetor↔câmera com múltiplas câmeras (adaptado de Majumder e Brown (2007)).....	46
Figura 11 – Tela não paramétrica	48
Figura 12 – Tela paramétrica linear.....	50
Figura 13 – Tela paramétrica não linear.....	51
Figura 14 – Tela cilíndrica com quatro projetores (extraído de Harville <i>et al.</i> (2006))	52
Figura 15 – Antes e depois da correção em telas cilíndricas (extraído de Harville <i>et al.</i> (2006)).....	53
Figura 16 – Uso de duas câmeras para estimar a superfície da tela	54
Figura 17 – Olho humano (extraído de Majumder e Brown (2007))	55
Figura 18 – Reflexão e refração da superfícies lambertianas (baseado na figura 19.1 de Ackermann e Eichler (2007)).....	57
Figura 19 – Tela lambertiana e não lambertiana.....	58
Figura 20 – Telas não lambertianas em sistemas de multiprojeção.....	59
Figura 21 – Telas não lambertianas em sistema de multiprojeção com projetores próximos.....	59
Figura 22 – Imagem sem mistura de borda (extraído de Bourke(2004)).....	64
Figura 23 – Mapa de contribuições (extraído de Bourke (2004))	67
Figura 24 – Imagem gerada pelo projetor com atenuação na sobreposição (extraído de Bourke (2004))	67
Figura 25 – Imagem final sem ajuste de mistura (extraído de Bourke (2004))	67
Figura 26 – Imagem final com ajuste de mistura (extraído de Bourke (2004)).....	69
Figura 27 – Intersecção de espaço de cor (extraído de Majumder e Brown (2007)).	70
Figura 28 – Processamento gráfico centralizado e distribuído	74
Figura 29 – Projeção concentrada em um único computador gráfico	75
Figura 30 – Processamento gráfico e projeção distribuída	77
Figura 31 – Conteúdo distribuído	78
Figura 32 – Área de sobreposição (grade com dimensão 2x3).....	82
Figura 33 – Relação entre a distância e a largura de projeção	85
Figura 34 – <i>Pixel Compositor</i> (extraído de Yang <i>et al.</i> (2007)).....	89
Figura 35 – Abstração dos projetores pela biblioteca de multiprojeção	95
Figura 36 – Exemplo de relacionamento de câmeras e projetores	98

Figura 37 – Exemplo de agrupamento de projetores	98
Figura 38 – Diagrama de classe.....	103
Figura 39 – Diagrama de sequência: Servidor	104
Figura 40 – Diagrama de sequência: Gerenciador.....	105
Figura 41 – Diagrama de sequência: Câmera.....	106
Figura 42 – Diagrama de sequência: Janela.....	108
Figura 43 – Diagrama de tempo: calibração completa	110
Figura 44 – Diagrama de tempo: calibração simplificada	112
Figura 45 – Padrão baseado em círculos em degradê dispostos em grade 6x8.....	114
Figura 46 – Diferença de imagem	115
Figura 47 – Segmento de círculo	117
Figura 48 – Malha de correção geométrica.....	121
Figura 49 – Sequência do processo de calibração com oito projetores em grade 2x8	123
Figura 50 – Participação de cada projetor.....	125
Figura 51 – Mapa de contribuição	126
Figura 52 – Exemplo de aplicação de correção de brilho e cor.....	129
Figura 53 – Limites de tela	131
Figura 54 – Mapeamento da tela.....	132
Figura 55 – Calibração por referências na projeção.....	132
Figura 56 – Organização dos componentes para análise da correção geométrica.....	138
Figura 57 – Imagem obtida para medição do erro de calibração	140
Figura 58 – Estimativa da distância entre dois pixels	140
Figura 59 – Ambiente de teste para a análise de brilho e cor	144
Figura 60 – Imagens obtidas na análise de projetor e tela.....	146
Figura 61 – Sistema de multiprojeção (grade 2x2) sem correção de brilho e cor....	148
Figura 62 – Imagens de sistema de multiprojeção	149
Figura 63 – Interferência do <i>black offset</i> em imagens escuras	151
Figura 64 – Distribuição dos feixes de luz num sistema de projeção simples e num sistema com multiprojetores.....	154
Figura 65 – Sala de videoconferência do prédio TPN da Petrobrás.....	160
Figura 66 – Autoridades do governo e da Petrobrás durante a inauguração	160
Figura 67 – Montagem do simulador de dirigível em Johannesburg	162
Figura 68 – Simulador de dirigível com quatro projetores	162
Figura 69 – Simulador de dirigível sobre a cidade do Rio de Janeiro	163
Figura 70 – Sala de visualização do Simulador Passadiço	164
Figura 71 – Sistema de multiprojeção do Simulador Passadiço.....	164
Figura 72 – Planta do Passeio Digital do Museu Catavento Cultural e Educacional (extraído de Teubl <i>et al.</i> (2009))	165
Figura 73 – Sistema com oito projetores do Passeio Digital (extraído de Teubl <i>et al.</i> (2009))	166
Figura 74 – Exemplo de arquitetura do FastDesktop	183
Figura 75 – Exemplo do FastDesktop	183
Figura 76 – Exemplo da demonstração “Fresnel” do Ogre3D	185
Figura 77 – TuxRacer.....	187
Figura 78 – Tipos de distorção	193
Figura 79 – Lente de Fresnel e lente convencional.....	194

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Estimativa da relação do custo de projeção e da resolução total	23
Gráfico 2 – Variação de luminância de um mesmo projetor (extraído de Majumder e Stevens(2004))	61
Gráfico 3 – Variação da cromaticidade de um mesmo projetor (extraído de Majumder e Gopi (2005))	61
Gráfico 4 – Luminância entre projetores (extraído de Majumder e Gopi (2005))	62
Gráfico 5 – Cromaticidade entre projetores (extraído de Majumder e Gopi (2005))	63
Gráfico 6 – Transição em áreas de sobreposição	65
Gráfico 7 – Funções de transição de sobreposição	66
Gráfico 8 – Função gama	68
Gráfico 9 – Função de transição de sobreposição final	69
Gráfico 10 – Variação de brilho da imagem em diferentes pontos de vista	147
Gráfico 11 – Gráfico de luminância sem correção de brilho e cor	148
Gráfico 12 – Variação de luminância em sistemas multiprojeção	150
Gráfico 13 – Corte horizontal (2/3 da altura)	150
Gráfico 14 – Variação de brilho de um sistema multiprojeto (2x2) em diferentes pontos de vista	152
Gráfico 15 – Diferença entre projeção simples e multiprojeção	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resolução máxima vs. percentagem de sobreposição	83
Tabela 2 – Perda efetiva da área de projeção decorrente da sobreposição	83
Tabela 3 – Resolução da câmara de captura.....	139
Tabela 4 – Erros geométricos	142
Tabela 5 – Relação erro máximo e densidade	143
Tabela 6 – Desempenho entre a aplicação gráfica com a biblioteca de multiprojeção desabilitada e habilitada	155
Tabela 7 – Distribuição de processamento interno da biblioteca Fast Fusion.....	156

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Cálculo de centro de círculo	118
Algoritmo 2 – Atualização da lista de círculos	119
Algoritmo 3 – Obtenção da calibração geométrica	120
Algoritmo 4 – Aplicação da correção geométrica	122
Algoritmo 5 – Cálculo de contribuição	126
Algoritmo 6 – Correção por pixel	127
Algoritmo 7 – Geração de textura para correção de brilho e cor	128
Algoritmo 8 – Aplicação da textura para correção de brilho e cor	129
Algoritmo 9 – Integração da biblioteca de multiprojeção com a aplicação	134
Algoritmo 10 – Integração avançada da biblioteca de multiprojeção com a aplicação	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAVE	<i>Cave Automatic Virtual Environment</i>
COTS	<i>Commercial, Off-The-Shelf</i>
CPD	<i>Cycle Per Degree</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DVI	<i>Digital Visual Interface</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
FPS	<i>Frames Per Second</i>
GNU	<i>GNU's not Unix</i>
GPL	<i>General Public License</i>
HD	<i>High Definition</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
KVM	<i>Keyboard, Video and Mouse switch</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LGPL	<i>Lesser General Public License</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
NEF	<i>Nikon Electronic Format</i>
PPI	<i>Pixel Per Inch</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>
RV	<i>Realidade Virtual</i>
SDL	<i>Simple DirectMedia Layer</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
WOL	<i>Wake-On-Lan</i>
WXGA	<i>Wide EXtended Graphics Array</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Hipótese	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Justificativa.....	19
1.4	Motivação.....	21
1.5	Contexto histórico.....	24
1.6	Contribuições	26
1.7	Estruturação da tese	27
2	Sistemas de multiprojeção	28
2.1	Grade de monitores e projetores.....	28
2.2	Calibração em sistemas multiprojetores.....	33
2.2.1	Calibração mecânica	34
2.2.2	Calibração automática baseada em câmeras.....	36
2.3	Multiprojeção em larga escala.....	72
2.3.1	Geração de conteúdo	72
2.3.2	Sistema de coordenação de calibração	78
2.3.3	Planejamento e organização dos projetores.....	80
2.4	Pesquisas correlatas	88
2.4.1	O sistema PixelFlex	88
2.4.2	As contribuições de Adit Majumder	89
2.4.3	O sistema iLamps	90
2.4.4	O sistema Pluribus.....	90
2.4.5	A empresa Scalable Display Technologies.....	91
2.4.6	O projeto Lighttwist	92
2.5	Síntese do Capítulo.....	92
3	Proposta e implementação do Fast Fusion	94
3.1	Motivação do desenvolvimento do Fast Fusion	94
3.2	Conceitos e características	95
3.2.1	Transparência com a aplicação	95
3.2.2	Escalabilidade.....	97
3.3	Descrição da arquitetura	100
3.3.1	Diagrama de classe	100
3.3.2	Diagrama de sequência	103
3.3.3	Diagrama de tempo	109
3.4	Técnicas e implementações	113
3.4.1	Calibração geométrica	113
3.4.2	Calibração de brilho e cor	124
3.4.3	Mapeamento da tela	130

3.4.4	Integração com a aplicação gráfica	133
3.5	Síntese do Capítulo	135
4	Análise de desempenho	136
4.1	Análise visual	136
4.1.1	Análise de calibração geométrica	136
4.1.2	Análise de variação de brilho e cor	142
4.2	Desempenho computacional	154
4.2.1	Impacto na aplicação gráfica	154
4.2.2	Escalabilidade	155
4.3	Síntese do Capítulo	157
5	Aplicações e análises qualitativas	158
5.1	Rede Galileu – Sala de projeção Petrobrás (2008-2010)	158
5.2	Casa Brasil em Johannesburg – Copa do mundo (2010)	160
5.3	Simulador Passadiço – Marinha (2008-2010)	162
5.4	Museu Catavento – Passeio Digital (2007-2009)	164
5.5	Síntese do Capítulo	166
6	Conclusão	167
6.1	Contribuições obtidas	168
6.2	Aprimoramentos previstos	170
6.3	Trabalhos futuros	170
6.4	Considerações finais	171
	Referências	172
Apêndice A	Desenvolvimentos complementares	179
a)	Ferramenta auxiliares	179
b)	Geradores de conteúdo	180
c)	Modificações de bibliotecas de motores gráficos	183
d)	Outras adaptações	185
e)	Síntese	186
Apêndice B	– Projetores	187
a)	Generalidades	187
b)	Elementos ópticos	191
c)	Lâmpadas de projeção	194
d)	Tecnologias de projeção	195
Apêndice C	– Telas de projeção	197
Apêndice D	– Esteroscopia	198
a)	Estereoscopia ativa	198
b)	Estereoscopia passiva	198

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de multiprojeção consiste na utilização de dois ou mais projetores conectados a um ou mais computadores gráficos para compor a mesma imagem. Do ponto de vista da percepção humana, um sistema de multiprojeção deve apresentar uma projeção contínua e uniforme, fazendo com que os observadores não percebam que a imagem gerada é composta por múltiplos projetores.

Os principais benefícios que podem ser proporcionados por um sistema de multiprojeção escalável são: (a) permitir o uso de projetores convencionais, o que diminui o custo de aquisição de equipamentos, (b) suportar quantidades massivas de projetores, provendo alto brilho e resolução, (c) prover modularidade, (d) permitir flexibilidade de projeção, (e) possibilitar investimento incremental e (f) minimizar custo de manutenção.

Do ponto de vista de pesquisa e desenvolvimento, sistemas de multiprojeção apresentam vários problemas que devem ser superados, tais como alinhamento geométrico dos projetores, ajuste de brilho e cores, distribuição e execução dos processamentos gráficos e confiabilidade operacional.

1.1 HIPÓTESE

Um sistema de multiprojeção escalável que utiliza técnicas de calibração baseado em realimentação por câmeras permite a concepção e viabilização de sistemas de exibição de imagens com definição retina¹.

¹ O termo “definição retina” será melhor detalhado no capítulo 2. De forma genérica, a definição retina refere-se à construção de sistemas de exibição de imagens com definição visual próxima ou superior aos limites de percepção da visão humana.

1.2 OBJETIVOS

Esta tese propõe a pesquisa e o desenvolvimento de um sistema de multiprojeção escalável que supostamente permitirá a construção de sistemas de realidade virtual com quantidade elevada² de projetores e computadores gráficos.

Do ponto de vista de custo financeiro, o sistema de multiprojeção escalável proposto utiliza técnicas de calibração e processamento de imagem que possibilita o uso de equipamentos convencionais (câmeras, projetores e computadores). O uso de tecnologias convencionais – COTS – proporciona um menor custo de aquisição dos equipamentos. A implementação do sistema considera um investimento progressivo com um custo linearmente proporcional à qualidade de projetores empregados em vez do custo exponencial relacionado à capacidade de um único super projetor³.

A originalidade desta proposta encontra-se em romper os atuais paradigmas em realidade virtual. Um destes paradigmas é a redução do custo de investimento, sem o comprometimento da qualidade. Outro paradigma é possibilitar a concepção de sistemas de realidade virtual com características compatíveis à percepção do sistema visual humano.

O procedimento complementar necessário para realizar a calibração e os ajustes dos projetores do sistema de multiprojeção proposto não deverá interferir significativamente no desempenho da aplicação gráfica, o que permitirá utilizar este sistema de multiprojeção em aplicações de realidade virtual complexas, como – por exemplo – em simuladores interativos de tempo real.

O sistema de multiprojeção proposto considera uma arquitetura com suporte mais eficiente para calibração e distribuição gráfica entre os computadores, o que permitirá desenvolver sistemas com quantidades massivas de projetores e computadores.

Este trabalho visa a ruptura dos paradigmas atuais em sistemas de realidade virtual, e possibilitará – por exemplo – a criação de um sistema tipo CAVE⁴ composto por dezenas ou centenas de projetores, atingindo alta resolução, de modo a alcançar o limite perceptível pelo olho humano.

² Considera-se aqui uma quantidade de projetores e computadores que pode chegar a centenas ou milhares.

³ Utiliza-se o termo “super projetor” para referir-se aos projetores de alto desempenho disponíveis no mercado cujo custo de aquisição encontra-se entre dezenas e centenas de milhares de dólares.

⁴ Sistema de RV altamente imersivo com 4, 5 ou 6 telas de projeção perpendiculares.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em 1965, o então vice-presidente da Intel – Gordon Moore – publicou um artigo científico (MOORE, G. E., 1965) segundo o qual a complexidade dos circuitos integrados iria duplicar a cada ano com um custo constante⁵. A Lei de Moore – como ficou conhecida a afirmação de Moore – projetou a evolução dos circuitos integrados e a sua afirmação é aceita até a atualidade (ANDREWS, E., 2009).

Diversas outras tecnologias – tais como memória primária e secundária (disco rígido), velocidade de comunicação de dados, dentre outras – embora não tenham acompanhado precisamente a taxa de crescimento dos microprocessadores, tiveram um crescimento exponencial significativo, próximo ao proposto por Moore.

Contudo, a evolução da resolução dos monitores e projetores evoluiu do padrão VGA⁶ para *FullHD*⁷ nos últimos 25 anos. Do ponto de vista da resolução, esta evolução não é expressiva comparado-se com os demais dispositivos eletrônicos, que apresentaram uma evolução bem mais significativa (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007).

A discrepância entre o poder de processamento gráfico e a resolução das tecnologias de exibição de imagem vem aumentando ao longo dos anos, e embora haja um aumento significativo na qualidade visual proporcionada pelas novas técnicas de síntese de imagem (e.g. *shaders*), a qualidade visual limita-se ao problema da resolução dos monitores e projetores.

Para amenizar os efeitos serrilhados devido à baixa resolução dos monitores e projetores, as placas gráficas modernas utilizam técnicas de antisserrilhamento (*antialiasing*) para representar ambientes de alta resolução em telas de baixa resolução, suavizando a transição entre os pixels adjacentes.

Particularmente no caso das tecnologias de exibição de imagens baseadas em projetores, quanto maior a tela de projeção, maior a distância do projetor em relação à tela e, portanto, maior o tamanho de cada pixel. Assim, mesmo considerando um projetor de alta resolução, um projetor *FullHD* exibindo em uma tela de $16m \times 9m$, a distância horizontal entre os pixels é de aproximadamente $\frac{9m}{1080} = 0,83cm$.

Considerando que um olho humano saudável tem uma resolução espacial para

⁵ Em 1975, Moore revisou a sua previsão para dobrar a cada dois anos (MOORE, G. E., 1975).

⁶ VGA (*Video Graphics Array*), com resolução de 640x480 e aspecto 4:3 ($\approx 0,3$ Megapixel).

⁷ *FullHD* 1080p, com resolução de 1920 x 1080 e aspecto 16:9 ($\approx 2,1$ Megapixel).

luminância de 50 CPD (*cycle per degree*) (RUSS, J. C., 2007, p. 94), equivalente a um pouco mais de um minuto de grau (ou minuto de arco), significa que para um pixel com diagonal de $0,83cm \times \sqrt{2} = 1,17cm$, o observador precisaria ficar a uma distância mínima aproximada de $\frac{1,17cm}{\tan(1/50)} \cong 34m$ para visualizar a imagem com resolução retina, ou seja, atingindo a máxima capacidade perceptível pelo olho humano.

A quantidade de pixels por polegadas (PPI – *Pixel Per Inch*) – ou densidade de pixels – de uma tela deve ser proporcional à distância do observador: quanto menor a distância do espectador em relação à tela, maior deverá ser a densidade de pixels. Importante ressaltar que quanto maior a distância do projetor em relação à tela, menor será o brilho da imagem, demandando uma ambientação apropriada do local de projeção para impedir a influência de iluminação externa.

Por fim, projeções tradicionais são limitadas a telas planares⁸, que não são capazes de cobrir todo o campo visual humano. O uso de telas curvas pode cobrir melhor o campo visual dos espectadores, aumentando a imersão e, assim, a experiência visual (SAJADI, B.; MAJUMDER, A., 2010).

Os sistemas de multiprojeção – como o próprio nome sugere – utilizam múltiplos projetores para representar as imagens para os usuários, beneficiando-se da soma da resolução e do brilho de cada projetor. Desta forma, o uso de multiprojeção pode possibilitar a projeção em telas com grandes dimensões sem comprometer o brilho e a resolução da imagem gerada.

No que concerne à flexibilidade de projeção, muitos sistemas de multiprojeção são capazes de distorcer as imagens projetadas por cada projetor em tempo de execução, possibilitando o uso de tais sistemas em diversos tipos de telas, tais como telas côncavas, cilíndricas, esféricas, domos, ou qualquer outro tipo de superfície arbitrária contínua. Estes tipos de telas podem proporcionar uma melhoria significativa na experiência visual por cobrir melhor o campo visual dos usuários.

No presente trabalho busca-se estudar diversas técnicas de multiprojeção e propor uma nova arquitetura escalável que poderá ser utilizada em sistemas com

⁸ Existem lentes especiais de projetores para o uso de telas não planares, as quais distorcem a projeção para adequarem-se à tela. Porém, estas lentes não poderão ser utilizadas em outros formatos de telas, incluindo as planares, pois são lentes construídas especificamente para um único tipo de superfície.

quantidades massivas de projetores. Esta arquitetura permite um investimento incremental da projeção, de acordo com os recursos e as necessidades.

1.4 MOTIVAÇÃO

Sistemas com amplas áreas de projeção têm ganhado cada vez mais espaço em ambientes como jogos, videoconferências, visualizações científicas, dentre muitas outras aplicações. Em aplicações avançadas que necessitam de alto grau de qualidade de imagem visual, são exigidos sistemas complexos de projeção com desempenho computacional elevado e projetores de alta resolução.

Para projetar tais imagens são necessários projetores com resoluções elevadas e de alto custo e, mesmo assim, deve haver equilíbrio entre o tamanho da tela, distância dos espectadores e resolução adotada.

O investimento de sistemas gráficos de alto desempenho para tais aplicações avançadas – nas quais são exigidos cálculos geométricos complexos e visualização de modelos de alta definição, contraste e níveis de cor – é muito elevado, o que restringe a implantação de tais sistemas.

Além disso, mesmo adotando o mais sofisticado computador de processamento gráfico monolítico disponível, este ainda pode não ser capaz de processar tais modelos complexos em resoluções elevadas.

Em outros campos da computação, um supercomputador gráfico monolítico pode ser substituído por um aglomerado de computadores gráficos conectados por uma rede de alta velocidade, na qual cada computador individualmente tem uma capacidade de processamento inferior ao supercomputador gráfico monolítico, porém, todos juntos superam o poder gráfico deste computador monolítico.

Cada um destes computadores torna-se responsável pelo processamento gráfico de um determinado grupo de objetos. O conjunto de todas estas partes calculado por cada computador gráfico compõe a imagem final. Este processo é conhecido como processamento gráfico distribuído (SOARES, L. P., 2005).

A pesquisa em aglomerados (*cluster*) computacionais gráficos considera dois problemas: (a) como distribuir a computação gráfica entre cada computador e, (b) como reagrupar a contribuição de cada computador para reconstruir a imagem

final. Uma das soluções mais aplicadas para resolver este problema é o uso de bibliotecas especiais de processamento gráfico distribuído, tais como o Chromium (HUMPHREYS, G. *et al.*, 2002) e o TechViz Turbo⁹ que atua como um mediador (*middleware*) entre a aplicação gráfica e a biblioteca OpenGL.

O Chromium substitui a biblioteca OpenGL, intercepta as chamadas gráficas feitas pela aplicação e distribui o processamento gráfico entre os demais computadores cooperativos da rede. Uma das maiores vantagens do Chromium é a desnecessidade de alteração do código da aplicação, ou seja, é possível utilizar aplicações proprietárias, sem o código fonte.

Outra forma de promover o processamento gráfico distribuído é considerar que cada computador está conectado a um projetor e todos estes projetores, juntos, formam visualmente uma única imagem. Assim, cada computador colabora naturalmente com uma região da imagem total, e não é necessário reconstruir a imagem final. Porém, os projetores devem estar precisamente alinhados para reproduzir uma imagem contínua, na qual os usuários não percebam a existência deste grupo de projetores.

Um sistema de multiprojeção pode favorecer não apenas a distribuição gráfica entre computadores, mas também oferecer um ambiente de alta resolução e desempenho gráfico com um custo reduzido. De acordo com a Lei de Grosch (EIN-DOR, P., 1985), o desempenho de um processador aumenta proporcionalmente à potência do seu custo¹⁰. Na ocasião, Herbert Grosch encontrou a potência de aproximadamente 0,5, ou seja, o custo computacional aumenta proporcionalmente ao quadrado do seu desempenho. Embora não exista nenhuma aplicação da Lei de Grosch em relação à resolução e ao brilho dos projetores na literatura científica, observa-se que a relação entre resolução/brilho e custo não é linear. Apenas a título exemplificativo, o projetor SRX-T420 da Sony¹¹ tem 4096x2160 pixels de resolução e 21.000 lumens, e com valor estimado de U\$ 146.308,05¹². Nove projetores VPLFE40¹³ da Sony, com 1400x1050 pixels de resolução e 4.000 lumens, com valor aproximado de

⁹ Disponível em <http://www.techviz.net/>, acessado em 10 de Março de 2011.

¹⁰ $c = f(w^a)$, onde c é o custo, w é a capacidade do processador e a é a potência.

¹¹ Disponível em <http://pro.sony.com/bbsc/ssr/cat-projectors/cat-ultrahires/product-SRXT420/>, acessado em 10 de Março de 2011.

¹² Valor obtido em http://unitedbroadcast.com/product.php?id_product=5879 em 10 de Março de 2011.

¹³ Disponível em <http://pro.sony.com/bbsc/ssr/app-commandandcontrol/cat-projectors/product-VPLFE40/>, acessado em 10 de Março de 2011.

US\$ 6.440,00¹⁴ cada, totalizariam 4200x3150 pixels de resolução e 36.000 lumens, ou seja, uma configuração superior, mas com um investimento aproximado de apenas US\$ 58.500,00, menos da metade do preço do projetor de alto desempenho. O gráfico 1 ilustra a relação do custo de projeção entre o sistema de projeção única e de multiprojeção escalável. Além disso, o custo de manutenção dos equipamentos, como reparos e trocas de lâmpadas também é significativamente inferior.

Esta relação de custo também se aplica para o processamento gráfico, cuja máquina monolítica de alto desempenho pode ser substituída por um aglomerado de computadores mais simples, reduzindo o custo do sistema (SOARES, L. P., 2004). Em função do sistema de multiprojeção favorecer o uso de aglomerados gráficos, o valor total do sistema (projeção mais processamento) tende a ser linear, proporcionando um custo muito inferior a um sistema monolítico equivalente, composto por um único projetor e processador gráfico de alto desempenho.

Além do custo, uma grande vantagem do uso de aglomerados gráficos – juntamente com a técnica de multiprojeção – é a escalabilidade: para aumentar o desempenho do sistema, basta adicionar novos pares de computadores e projetores. Ademais, em ambientes que necessitam de alta disponibilidade, como casas de shows e museus, o custo para estocar equipamentos e peças de reserva é inferior.

Por fim, sistemas avançados de multiprojeção permitem a projeção em telas arbitrárias, oferecendo novas possibilidades de projeção, como a sua utilização em fachadas de prédios, caverna em forma de iglu, projeção em estádios, dentre muitos outros.

¹⁴ Valor obtido em <http://b2b.sony.com/Solutions/product/VPLFE40> em 10 de Março de 2011.

É importante salientar que sistemas de multiprojeção podem suportar projeção com estereoscopia (tanto passiva quanto ativa), ou seja, podem ser empregados em aplicações de visualizações científicas tridimensionais, cinemas 3D, sistemas tipo CAVE ou quaisquer outras aplicações de realidade virtual.

1.5 CONTEXTO HISTÓRICO

Diversos sistemas baseados em multiprojeção são estudados desde a década de 70. Na época, um sistema de simulação de voo que utilizava três projetores foi comercializado pela Evans & Sutherland¹⁵. O sistema era difícil de calibrar e não havia nenhuma técnica de mistura de borda (*edge blending*), além de ser extremamente oneroso. Os projetores eram muito caros e o processamento gráfico era monolítico, com custo extremamente elevado.

Para alinhar os projetores e apresentar uniformidade nas imagens geradas, diversos estudos foram realizados acerca de alinhamento de projeção, correção de distorção geométrica e variações fotométricas. Inicialmente, todos os ajustes eram mecânicos, com acertos manuais para cada projetor, tornando as estruturas altamente complexas e difíceis de operar, exigindo muito tempo de pessoas altamente especializadas para realizar todos os ajustes necessários. Ainda, estes ajustes deveriam ser periódicos, geralmente após a troca das lâmpadas, limpeza ou manutenção.

No início do século XXI, os preços das placas gráficas começaram a diminuir significativamente e começaram a surgir os primeiros aglomerados de computadores gráficos, permitindo a substituição das máquinas monolíticas de processamento gráfico caras por um grupo de máquinas convencionais, diminuindo sensivelmente o custo de processamento sem impactar na qualidade final (SOARES, L. P., 2005; SOARES, L. P.; CABRAL, M. C.; BRESSAN, P. A.; FERNANDES, H. G. *et al.*, 2002; SOARES, L. P.; CABRAL, M. C.; BRESSAN, P. A.; LOPES, R. D. *et al.*, 2002; STOLL, G. *et al.*, 2001; ZUFFO, J. A. *et al.*, 2001).

¹⁵ Evans & Sutherland: www.es.com, acessado em 24 de Maio de 2011.

A partir do uso de aglomerados gráficos, as aplicações tornaram-se mais escaláveis e com grande capacidade de processamento gráfico, além de serem muito mais atrativas financeiramente.

No mesmo período, os preços dos projetores também diminuíram seguindo a tendência das placas e computadores gráficos e diversas pesquisas acerca de multiprojeção surgiram em diferentes grupos, todos buscando flexibilidade e redução de custo, além de prover alta resolução e brilho (CHEN, Y. *et al.*, 2000; HERELD, M. *et al.*, 2000; HUMPHREYS, G.; HANRAHAN, P., 1999; LI, K. *et al.*, 2000; RASKAR, R. *et al.*, 1999; SAMANTA, R. *et al.*, 1999; SCHIKORE, D. R. *et al.*, 2000; SURATI, R. J., 1999; YANG, R. G. *et al.*, 1999).

Após diversas publicações sobre técnicas de calibração em multiprojeção em telas planares, diversos grupos nos anos de 2003 a 2005 apresentaram soluções de correções geométricas em telas não planares, como, por exemplo, telas curvas (BAAR, J. V. *et al.*, 2003; RASKAR, R.; BAAR, J. V., 2005; RASKAR, R.; BAAR, J. V.; RAO, S. *et al.*, 2004; RASKAR, R.; BAAR, J. V.; WILLWACHER, T. *et al.*, 2004) e superfícies não contínuas (BIMBER, O. *et al.*, 2005; DIETZ, P. *et al.*, 2004).

Após estas publicações, as pesquisas em multiprojeção tiveram o seu foco em correção de brilho e cor (HARVILLE, M. *et al.*, 2006; MAJUMDER, A.; IRANI, S., 2007; MAJUMDER, A.; STEVENS, R., 2005; SAJADI, B. *et al.*, 2009), distribuição do controle e calibrações assíncronas (BHASKER, E. S. *et al.*, 2006), dispositivos dedicados de calibração e correção, sistemas de multiprojeção de alta resolução (DAMERA-VENKATA, N. *et al.*, 2007; JIANG, Z. *et al.*, 2007) e superamostragem de pixels em áreas de sobreposição (DAMERA-VENKATA, N.; CHANG, N. L., 2007a, b, 2009).

Os grupos de pesquisa têm atualmente explorado a capacidade de calibração contínua durante o tempo de execução do programa, tanto em superfícies planas (RAIJ, A.; POLLEFEYS, M., 2004) quanto em superfícies arbitrárias (COTTING, D. *et al.*, 2004; COTTING, D. *et al.*, 2005; JOHNSON, T.; FUCHS, H., 2007; JOHNSON, T. M., 2009; SAJADI, B.; MAJUMDER, A., 2010; ZHOU, J. *et al.*, 2008; ZOLLMANN, S. *et al.*, 2007), juntamente com a modularização dos conjuntos formados pelos projetores, computadores gráficos e câmeras, permitindo a adição destes módulos durante a apresentação (JOHNSON, T. *et al.*, 2009) e acerto da pirâmide quadrangular (*frustum*) de acordo com a posição dos projetores (THIBAUT, W. C., 2010). Também existem trabalhos recentes sobre simuladores de baixo custo

(SHIFENG, M.; DANXIA, W., 2010) e interatividade em ambientes multiusuários em sistemas de multiprojeção (ROMAN, P. *et al.*, 2010). Até o presente momento não foram encontradas pelo autor pesquisas e publicações acerca de sistemas com quantidades massivas de projetores em multiprojeção.

Na última década, diversos trabalhos acerca de multiprojeção foram publicados e comercializados.

1.6 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho tem como contribuição a pesquisa, o planejamento, o desenvolvimento e a análise de um sistema de multiprojeção denominado Fast Fusion, com calibração automatizada baseado em câmeras, altamente escalável, o que, se espera, possibilitará a elaboração de sistemas com resolução retina com alta qualidade e desempenho gráfico. Previsto para utilizar componentes convencionais, demonstra-se que o Fast Fusion proporciona um baixo custo aquisitivo.

O conceito fundamental do Fast Fusion está sintetizado na hipótese deste trabalho, e será demonstrado experimentalmente de forma qualitativa e quantitativa.

Também há contribuições referentes às técnicas e algoritmos de calibração de projetores aprimorados pelo autor nesta tese, utilizado na concepção do Fast Fusion. Serão apresentados, ainda, resultados sobre a qualidade e o desempenho do sistema de multiprojeção proposto, com algumas considerações inéditas na literatura.

Este trabalho proporciona subsídios para a concepção de sistemas de realidade virtual com resolução retina, quebrando paradigmas no desenvolvimento de ambientes de realidade virtual.

Esta tese fornece insumos para o estudo, o entendimento e a implantação de sistemas de multiprojeção de grande porte em diferentes áreas, disseminando o uso de multiprojeção da realidade virtual em universidades e empresas nacionais.

1.7 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

Esta tese está estruturada da seguinte forma: no segundo capítulo, será apresentada a revisão da literatura acerca de multiprojeção. Serão abordadas as técnicas de calibração geométrica e os ajustes de brilho e cor. Também serão analisados os conceitos para a elaboração de um sistema de multiprojeção em larga escala e pesquisas correlatas.

No terceiro capítulo, serão descritas a arquitetura e as características do sistema de multiprojeção Fast Fusion – proposto nesta tese – destacando seus algoritmos, diferenciais, vantagens e limitações. De modo complementar, o apêndice A apresentará os desenvolvimentos auxiliares e as aplicações gráficas desenvolvidas ou modificadas para o desenvolvimento, a demonstração e a validação do Fast Fusion.

No quarto capítulo, será analisado o desempenho visual e computacional da biblioteca de multiprojeção Fast Fusion utilizando métodos quantitativos.

No quinto capítulo, serão apresentados os resultados qualitativos de aplicações de realidade virtual utilizando a biblioteca de multiprojeção proposto.

Enfim, o sexto capítulo concluirá a tese.

De forma a complementar este capítulo, o apêndice B explora as principais características dos projetores, o apêndice C descreve elementos referentes a telas de projeção, e o apêndice D documenta as principais técnicas de estereoscopia adotadas em sistemas de realidade virtual. A leitura destes apêndices é recomendada para uma melhor compreensão dos sistemas de multiprojeção.

2 SISTEMAS DE MULTIPROJEÇÃO

Técnicas de multiprojeção envolvem diversos conceitos nas áreas de ciências da computação e engenharia, tais como estrutura de dados, redes de interconexão, processamentos gráficos e distribuídos, visão computacional, interface de controle, geometria analítica, engenharia de controle, arquiteturas de projeção, dentre outros.

Cada elemento que compõe um sistema de multiprojeção já é um sistema complexo por si só e, ao reunir todos eles, é necessário aprofundar individualmente cada segmento que compõe um sistema de multiprojeção para compreender e arquitetar estes sistemas. Este capítulo visa ao estudo de insumos necessários para planejar e desenvolver sistemas de realidade virtual utilizando técnicas de multiprojeção.

Neste capítulo é apresentado o conceito de grade de monitores e projetores, utilizados para prover sistemas de multiprojeção com grandes dimensões e altas resoluções. Logo após, são revisadas as técnicas e arquiteturas dos sistemas de multiprojeção, arrolando técnicas pertinentes de calibração geométrica, brilho e cor. São discutidas técnicas para criação de sistemas de multiprojeção com quantidades massivas de computadores e projetores. Enfim, são apresentadas pesquisas correlatas encontradas na literatura.

2.1 GRADE DE MONITORES E PROJETORES

A resolução de um monitor ou projetor é definida pela quantidade de pixels horizontais e verticais. O termo “alta definição” refere-se a dispositivos cuja resolução é superior à resolução convencional. Atualmente, é dito que um monitor ou projetor é de alta definição se for capaz de apresentar 1080 linhas (1920x1080 pixels). A figura 1 compara alguns padrões de resoluções da Televisão Digital.

Contudo, mesmos os monitores com as maiores resoluções comercializados – tal como utilizado no iMAC 27”¹⁶ da Apple, com 2560x1440 pixels de resolução –

¹⁶ Computador comercializado pela Apple, disponível em <http://www.apple.com/imac/specs.html>, acessado em 10 de Março de 2011.

podem ser insuficientes para as aplicações que exigem representações de imagens de alta definições, tais como visualização de imagens médicas e científicas.

Em diversas aplicações, não apenas a alta resolução, mas também telas com amplas dimensões são desejáveis, principalmente em aplicações de entretenimento ou com grande quantidade de espectadores. Amplas telas de visualização podem aumentar a imersão e, assim, a experiência visual dos espectadores.

Figura 1 – Comparativo de resoluções

Mesmo se considerados os maiores monitores comercializados, contendo até 152 polegadas (aproximadamente 3,36 metros de largura por 1,89 metros de altura), estes podem não ser suficientes para atender determinadas aplicações. Diante da limitação das dimensões dos monitores em ambientes que necessitam tanto de resolução quanto de tamanho, pode ser adotado o uso de grade de monitores.

O uso de grade de monitores pode oferecer tanto amplas dimensões quanto alta resolução. A figura 2 apresenta um sistema composto por nove monitores (resolução de 1280x1024 pixels cada) em uma configuração em grade de tamanho 3x3, totalizando uma resolução de 3840x3072 pixels (ou 11.796.480 pixels). A grade de monitores oferece mais informações para os usuários, melhorando sensivelmente a qualidade do sistema (BALL, R.; NORTH, C., 2005).

Figura 2 – Nove monitores em grade (extraído de Ball e North (2005))

Porém, o uso de grade de monitores enfrenta dois problemas: suporte a múltiplos canais de vídeo e degradação da qualidade visual devido à espessura da borda (DAVALATH, M. *et al.*, 2010).

O sistema precisa suportar múltiplos canais de vídeo, pois o sistema é composto por múltiplos monitores. Assim, é preciso fornecer uma imagem exclusiva para cada monitor de acordo com a sua posição. As principais soluções para prover suporte a múltiplos monitores são:

- a) Adicionar múltiplos canais de vídeo em um único computador, de acordo com a quantidade total de monitores do sistema;
- b) Adicionar mais computadores, nos quais cada um alimente um ou mais monitores. Neste caso, é necessário adotar técnicas de distribuição e sincronização de conteúdo entre os computadores;
- c) Utilizar um dispositivo dedicado responsável pela distribuição do sinal de vídeo, capaz de dividir este sinal em múltiplos sinais de forma que cada sinal apresente uma parte da imagem original.

Porém, mesmo suprimindo a demanda de canais gráficos necessários, ainda há o problema concernente ao aspecto visual, devido à espessura das bordas de cada

monitor. Este efeito, conhecido como efeito moldura (*bezel effect*), pode afetar significativamente a sensação de imersão devido à quebra da continuidade da imagem entre os monitores adjacentes. Mesmo com a adoção dos produtos mais sofisticados e avançados existentes no mercado, tal como o NSL-4601¹⁷ comercializado pela empresa BARCO, com a dimensão de 46", resolução WXGA (1366x768) e apenas 0,67cm de borda (0,264"), a experiência visual ainda restará afetada em razão da percepção do efeito moldura.

Ademais, pode haver variação de brilho e cor entre os monitores do sistema, mesmo que estes monitores sejam do mesmo modelo e lote de fabricação. A divergência de brilho e cor ocorre devido às variações intrínsecas do processo de fabricação e montagem e esta divergência pode afetar a qualidade final da imagem.

Em contrapartida, um dos principais benefícios do uso de grade de monitores é o alto brilho fornecido pelo conjunto, o que possibilita o seu uso em ambientes onde a iluminação não é controlada, tais como estádios, shows, museus, dentre muitos outros. Além disso, o sistema é relativamente compacto, e não exige nenhum espaço adicional de projeção para o seu funcionamento.

Alternativamente, é possível substituir a grade de monitores por um projetor para atingir grandes dimensões. O uso de projetores pode facilmente atingir grandes proporções de projeção bastando apenas afastar fisicamente o mesmo da tela: a distância do projetor à tela é proporcional à área da imagem projetada na tela. Desta forma, o uso de projetores é amplamente utilizado em ambientes com grande número de espectadores, como cinemas, auditórios e salas de aula.

O uso de projetores enfrenta problemas, tais como carência de brilho em ambientes claros e pouca densidade de pixels em projeções em telas amplas. Projetores de alta resolução e brilho são extremamente caros e podem não ser suficientes para atender determinadas demandas.

Da mesma forma que os monitores, é possível adotar grade de projetores para estender a capacidade do sistema, tanto em brilho quanto em resolução. Um dos principais benefícios da utilização de múltiplos projetores em relação a múltiplos monitores é que a imagem projetada por projetores na tela não possuem bordas. Ainda, é possível sobrepor imagens dos projetores adjacentes, suavizando a transição entre eles.

¹⁷ Disponível em <http://www.barco.com/en/product/2145>, acessado em 06 de Março de 2011.

Outro benefício de utilizar múltiplos projetores em relação à grade de monitores é que a densidade de pixels pode ser facilmente ajustada de acordo com a distância dos projetores em relação à tela: basta aproximar o conjunto de projetores em direção à tela para aumentar a densidade de pixels.

Um sistema de multiprojeção é geralmente composto por um aglomerado de projetores organizados em forma de grade, fixados em prateleiras ou estruturas especiais.

A figura 3 apresenta um sistema de multiprojeção do LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*) composto por 15 projetores organizados em grade 3x5, com resolução de 1280x1024 cada. O sistema atinge uma resolução total de 6400x3072 pixels em uma tela de 4,87 metros x 2,44 metros (16 pés x 8 pés). Neste sistema, a equipe utilizou dois supercomputadores SGI Onyx2¹⁸ para gerar as imagens dos 15 projetores.

Figura 3 – Sistema com 15 projetores (extraído de Schikore *et al.* (2000))

Da mesma forma que ocorre com a grade de monitores, podem haver variações de brilho e cor entre os projetores, mesmo que eles sejam do mesmo modelo e lote de fabricação. Além disso, o alinhamento entre os limites de cada projetor deve ser cuidadosamente ajustado para apresentar aos usuários uma imagem única e contínua.

¹⁸ SGI Onyx2 é um sistema visual desenvolvido e fabricado pela SGI, lançado em 1996 como sucessor da Onyx.

Os sistemas de multiprojeção devem prover alinhamento geométrico dos projetores e realizar ajustes de brilho e cor, principalmente nas áreas de intersecção. Para Damera-Venkata, Chang e DiCarlo (2007) existem cinco premissas que devem ser consideradas em um sistema de multiprojeção:

- a) **Flexibilidade:** suporte a configuração arbitrária de projetores e telas;
- b) **Escalabilidade:** escalar não somente em número de projetores, mas também nas dimensões (brilho, resolução, aspecto, tolerância a falha);
- c) **Automatização:** o sistema deve ser capaz de realizar todo o processo de calibração sem a interferência do usuário;
- d) **Tempo Real:** os algoritmos devem ser desenvolvidos de forma eficiente, sem comprometer o desempenho da aplicação gráfica;
- e) **Vívido:** prover para o usuário alta qualidade na imagem final, sem percepção de transições ou descontinuidades entre os projetores.

2.2 CALIBRAÇÃO EM SISTEMAS MULTIPROJETORES

Em sistemas de multiprojeção é essencial calibrar os projetores para que possam apresentar uma imagem geometricamente alinhada e contínua. Existem diversas técnicas de calibração propostas na literatura (ASHDOWN, M. *et al.*, 2004; BROWN, M. S.; SCALES, W. B., 2002; CHEN, H. *et al.*, 2002; CHEN, Y. *et al.*, 2000; COTTING, D. *et al.*, 2005; HARVILLE, M. *et al.*, 2006; JOHNSON, T. *et al.*, 2009; RAIJ, A. *et al.*, 2003; RASKAR, R. *et al.*, 1999; STAADT, O. G. *et al.*, 2006; SURATI, R. J., 1999; YANG, R. *et al.*, 2001; YANG, R.; WELCH, G., 2001; ZHOU, J. *et al.*, 2008).

Além do alinhamento geométrico entre os projetores, é desejável realizar a homogeneização de brilho e cor entre os projetores. Em sistemas de multiprojeção com sobreposição, é essencial realizar a mistura de borda nas áreas de intersecção para suavizar as transições entre os projetores.

Este tópico tem como objetivo abordar todos os aspectos referentes à calibração em sistemas de multiprojeção. As correções podem ser aplicadas de forma mecânica (manual) ou automatizada. Ambos serão abordados a seguir.

2.2.1 Calibração mecânica

A calibração mecânica consiste no ajuste manual da posição de cada projetor em relação aos projetores adjacentes. Em sua concepção mais simples, todos os projetores deverão ser manualmente alinhados em uma estrutura de prateleiras. Este tipo de alinhamento manual proporciona resultados pouco satisfatórios. Entretanto, diversos projetores oferecem ajustes avançados que auxiliam em seu alinhamento – tais como deslocamento de lentes (*lens shift*), ajuste trapezoidal (*keystone*) e zoom – o que oferece melhor precisão nos ajustes entre os projetores. Em uma concepção mais elaborada, os projetores são fixados em suportes reguláveis de alta precisão, o que permite o ajuste fino e individual de cada projetor em até seis graus de liberdade¹⁹.

A figura 4 ilustra um mecanismo de ajuste de projetores individual de alta precisão proposto por Hereld, Judson e Stevens (2000).

Figura 4 – Projetor com suporte regulável de alta precisão (extraído de Hereld et al.(2000))

¹⁹ Seis graus de liberdade: rotação e translação nos três eixos ortogonais x, y e z.

A figura 5 apresenta a estrutura completa elaborada por este mesmo autor em um sistema de multiprojeção composto por seis projetores em grade (2x3). Esta estrutura oferece ajustes precisos para todos os projetores. A estrutura também oferece um mecanismo físico para delimitar as projeções nas bordas de intersecção, impedindo que o brilho de um projetor interfira nos projetores adjacentes.

Figura 5 – Estrutura de multiprojeção com alinhamento mecânico (extraído de Hereld *et al.* (2000))

A principal vantagem do alinhamento mecânico é a ausência do uso de bibliotecas de correções nos computadores gráficos. Cada projetor colabora com um retângulo específico da imagem, não sendo preciso utilizar nenhum software auxiliar para prover a calibração dos projetores.

Entretanto, a estrutura para acomodar os projetores com os suportes reguláveis de alta precisão é complexa e pesada, impedindo a sua mobilidade. Ademais, exige-se muito tempo de pessoas especializadas para realizar todos os ajustes necessários para o alinhamento geométrico dos projetores. Todas as correções de brilho e homogeneização de cor entre os projetores devem ser providas pelos próprios projetores, sendo necessária a aquisição de projetores com regulagens sofisticadas para um resultado mais satisfatório.

Por fim, são necessários ajustes periódicos decorrentes de fatores tais como vibração, decaimento da vida útil da lâmpada, desalinhamentos involuntários durante limpezas e troca de lâmpadas, consumindo muito tempo de pessoas especializadas e encarecendo o custo de manutenção do sistema.

Atualmente, as soluções de calibração manual são restritas a poucos projetores de alta capacidade, com recursos de mistura de borda e ajustes finos para alinhamento geométrico oferecidos pelos próprios projetores. Um exemplo desta solução é o sistema MegaCADWall²⁰ oferecido pela empresa BARCO, com suporte para até seis projetores em grade 2x3 (normalmente são vendidos com dois projetores alinhados horizontalmente). Este sistema é extremamente caro, tanto para aquisição quanto para manutenção, o que limita a sua implantação a poucas instituições.

Motivadas pelo alto custo decorrente da complexidade dos projetores e as dificuldades para efetuar a calibração manual, surgiram diversas pesquisas buscando a calibração automatizada baseada em câmeras, que pode oferecer uma maior flexibilidade, mobilidade e escalabilidade nos sistemas de multiprojeção.

2.2.2 Calibração automática baseada em câmeras

A calibração automática dos projetores baseada em câmeras consiste em sistematizar o processo de alinhamento das imagens e ajustes de brilho e cor dos projetores sem a intervenção do operador. O objetivo dos métodos de calibração automatizados é minimizar o esforço dos operadores e prover correções sofisticadas além dos suportados pelos projetores convencionais.

A seguir, serão apresentadas as classificações e os métodos para realizar o alinhamento geométrico dos projetores de forma automatizada e, em seguida, serão descritas as técnicas para ajustar o brilho e a cor em sistemas de multiprojeção baseados em câmera.

²⁰ Sistema tipo *PowerWall* com estereoscopia e alta definição desenvolvido pela empresa BARCO (www.barco.com).

2.2.2.1 Alinhamento geométrico

Em um sistema de multiprojeção, cada projetor colabora com uma região da imagem e, desta forma, é essencial que a imagem projetada esteja geometricamente alinhada entre os projetores. A transição de um projetor para o outro adjacente não deve apresentar descontinuidades.

Para auxiliar a compreensão do processo de calibração geométrica, a figura 6 apresenta um exemplo típico de um sistema de multiprojeção automático baseado em câmera.

Figura 6 – Sistema de multiprojeção baseado em câmera (adaptado de Majumder e Brown (2007))

Neste exemplo, o sistema é composto por quatro projetores dispostos em grade de tamanho 2x2. Cada projetor contribui com uma porção da imagem e está conectado a um computador gráfico, sendo que todos os computadores gráficos estão interconectados por uma rede de alta velocidade. Estes computadores gráficos são responsáveis por gerar as imagens e devem atuar de forma sincronizada para não

haver inconsistências temporais nas imagens geradas. Neste exemplo, os computadores gráficos são gerenciados pelo servidor, também conectado à rede. O servidor contém uma câmera e é responsável por gerenciar todo o processo de calibração.

O conceito básico do processo de calibração é realizar o mapeamento dos projetores em relação à imagem. Para obter o mapeamento dos projetores P_n para a imagem I , são necessários dois passos: (a) mapeamento dos projetores P_n em relação à câmera C , e (b) mapeamento da câmera C em relação à imagem I .

Ao obter a função $P_n(x,y) \rightarrow C(u,v) \rightarrow I(s,t)$, a imagem gerada por cada projetor P_n é mapeada para a imagem I em tempo de execução. Neste processo, cada pixel do projetor P_n deve ter as suas coordenadas convertidas para as coordenadas da imagem I .

O próximo tópico irá discutir os métodos para realizar o mapeamento dos projetores P_n em relação à câmera C e, logo após, será discutido o mapeamento da câmera C para a imagem I .

I) **Mapeamento projetor↔câmera**

O mapeamento projetor↔câmera é o passo mais importante no processo de calibração geométrica, pois esta é a etapa responsável por identificar com exatidão a posição de cada projetor em relação à câmera, o que possibilita uniformizar as coordenadas de todos os projetores.

Para calcular o mapeamento projetor→câmera, é preciso relacionar as coordenadas do projetor $P_n(x,y)$ com as da câmera $C(u,v)$. O projetor deve desenhar padrões conhecidos para que sejam detectados pela câmera e, desta forma, correlacionar os pares de coordenadas $P_n(x,y) \rightarrow C(u,v)$.

Existem diversas técnicas conhecidas na literatura para correlacionar a posição dos projetores (BROWN, M. *et al.*, 2005; CHEN, H. *et al.*, 2002; RAIJ, A. *et al.*, 2003; RASKAR, R. *et al.*, 1999; ZHOU, J. *et al.*, 2008). Será explorada a técnica de detecção de círculos dispostos em grade, um método flexível que proporciona excelentes resultados (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007, pg. 65).

Neste método, cada câmera calibra um projetor por vez. Enquanto um projetor emite os padrões de calibração, os demais projetores devem apresentar apenas imagem escura para não interferir na calibração.

No método de círculos dispostos em grade, o projetor que está sendo calibrado deve projetar círculos brancos organizados em grade de tamanho $i \times j$ em um fundo escuro. A figura 7 exemplifica um padrão de grade de círculos de tamanho 6 x 8.

Figura 7 – Padrão de mapeamento baseado em círculos dispostos em grade (6x8)

A câmera – conectada ao servidor – obtém uma amostra da tela, e um algoritmo de processamento de imagem identifica o centro de cada círculo desenhado pelo projetor. Após a câmera obter as coordenadas dos círculos, é possível associar as coordenadas dos círculos capturados pela câmera com as coordenadas dos círculos desenhados pelo projetor.

O método de círculos dispostos em grade não permite a identificação imediata de qual círculo desenhado do projetor é referente ao capturado pela câmera, pois todos os círculos são idênticos. Caso o projetor esteja de ponta cabeça ou invertido (devido a uma projeção de teto ou traseira), não é possível descobrir qual a orientação do projetor.

Uma possível solução é projetar um círculo de cada vez. Desta forma, mesmo que o projetor esteja em uma orientação não usual, é possível associar exatamente cada

círculo capturado pela câmera com o círculo desenhado pelo projetor, obtendo o mapeamento $P_n(x,y) \rightarrow C(u,v)$.

Porém, se considerarmos a quantidade de círculos apresentados na figura 7 (grade 6×8), têm-se $6 \times 8 = 48$ amostras por projetor para realizar todo o mapeamento. E se a quantidade de círculos for maior, a quantidade de amostras sobe proporcionalmente, fazendo com que o processo de calibração fique extremamente demorado.

Uma solução para reduzir a quantidade de padrões que devem ser apresentados e, conseqüentemente, diminuir o tempo total necessário para obter o mapeamento projetor $\rightarrow$ câmera, é estabelecer uma identificação binária única para cada círculo. Tendo com base o exemplo de grade 6×8 apresentado na figura 7, a identificação de cada círculo é:

000001 (01)	000010 (02)	000011 (03)	000100 (04)	000101 (05)	000110 (06)	000111 (07)	001000 (08)
001001 (09)	001010 (10)	001011 (11)	001100 (12)	001101 (13)	001110 (14)	001111 (15)	010000 (16)
010001 (17)	010010 (18)	010011 (19)	010100 (20)	010101 (21)	010110 (22)	010111 (23)	011000 (24)
011001 (25)	011010 (26)	011011 (27)	011100 (28)	011101 (29)	011110 (30)	011111 (31)	100000 (32)
100001 (33)	100010 (34)	100011 (35)	100100 (36)	100101 (37)	100110 (38)	100111 (39)	101000 (40)
101001 (41)	101010 (42)	101011 (43)	101100 (44)	101101 (45)	101110 (46)	101111 (47)	110000 (48)

Após o recebimento de uma identificação por cada círculo, o projetor irá apresentar um padrão para cada casa binária que identifica os círculos. No exemplo dado, será preciso apresentar seis padrões, pois esta é a quantidade de bits necessários para representar todas as identificações dos círculos (de 000001 (1) a 110000 (48)).

Os círculos que serão apresentados em cada etapa irão variar de acordo com a sua identificação: no primeiro padrão, serão mostrados apenas os círculos cuja identificação tem o valor 1 na sua primeira casa decimal (da direita para esquerda). No segundo padrão, serão mostrados apenas os círculos que tem o valor 1 na segunda casa decimal e assim sucessivamente.

A figura 8 ilustra a sequência dos padrões para uma grade 6×8 (o mesmo exemplo apresentado na figura 7). Para a câmera obter a identificação de cada círculo capturado, basta atribuir para cada bit o valor 1 – caso este círculo exista na respectiva sequência – ou o valor 0 – caso o círculo não tenha aparecido. Os valores são atribuídos do bit menos significativo para o mais significativo (direita para a esquerda).

Figura 8 – Sequência de padrões baseados em círculos dispostos em grade (6x8)

Como exemplo, ao seguir o círculo destacado com o quadrado vermelho apresentado na figura 8, o círculo destacado é mostrado apenas nos padrões 1, 3 e 5, formando o número binário 010101, o que representa 21 em decimal. Esta é a identificação deste círculo. Utilizando este mesmo processo para os demais círculos, é possível obter a identificação de cada um. O grande benefício deste método é que são necessárias apenas $\lceil \log_2(n \times m + 1) \rceil$ iterações para obter as coordenadas e as identificações de todos os círculos.

Após identificar o conjunto de coordenadas que relaciona a câmera com o projetor, o próximo passo é encontrar uma função que converta qualquer coordenada do projetor para a coordenada da câmera: $P_n(x, y) \rightarrow C(u, v)$.

Existem diversos métodos para obter a função de conversão. Neste texto, será estudada a matriz de homografia (STAADT, O. G. *et al.*, 2006): dado um conjunto de coordenadas $P(x, y)$ e $C(u, v)$, é possível estimar uma matriz de homografia H tal que traduza as coordenadas $P(x, y)$ para $C(u, v)$, conforme representado na eq. 1.

$$P(x, y) = H \cdot C(u, v) \quad (1)$$

Adotando sistema de coordenadas homogêneas, a eq. 1 pode ser reescrita pela eq. 2.

$$\begin{pmatrix} xw \\ yw \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h1 & h2 & h3 \\ h4 & h5 & h6 \\ h7 & h8 & h9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Onde w é uma escala arbitrária. Da eq. 2, os valores xw , yw e w podem ser obtidos através da eq. 3.

$$\begin{cases} xw = u \cdot h1 + v \cdot h2 + h3 \\ yw = u \cdot h4 + v \cdot h5 + h6 \\ w = u \cdot h7 + v \cdot h8 + h9 \end{cases} \quad (3)$$

A eq. 4 apresenta as coordenadas x e y normalizadas.

$$\begin{cases} x = \frac{x.w}{w} \\ y = \frac{y.w}{w} \end{cases} \quad (4)$$

Como a matriz de homografia é definida por uma escala arbitrária (w) que posteriormente será normalizada (eq. 4), pode-se considerar o valor $h9$ sendo igual a 1. Assim, substituindo a eq. 3 na eq. 4, obtém-se a eq. 5.

$$\begin{cases} x = \frac{x.w}{w} \rightarrow x = \frac{u \cdot h1 + v \cdot h2 + h3}{u \cdot h7 + v \cdot h8 + 1} \rightarrow x \cdot u \cdot h7 + x \cdot v \cdot h8 + x = u \cdot h1 + v \cdot h2 + h3 \\ y = \frac{y.w}{w} \rightarrow y = \frac{u \cdot h4 + v \cdot h5 + h6}{u \cdot h7 + v \cdot h8 + 1} \rightarrow y \cdot u \cdot h7 + y \cdot v \cdot h8 + y = u \cdot h4 + v \cdot h5 + h6 \end{cases} \quad (5)$$

Enfim, simplificando a eq. 5, obtém-se a eq. 6.

$$\begin{cases} x = u \cdot h1 + v \cdot h2 + h3 - x \cdot u \cdot h7 - x \cdot v \cdot h8 \\ y = u \cdot h4 + v \cdot h5 + h6 - y \cdot u \cdot h7 - y \cdot v \cdot h8 \end{cases} \quad (6)$$

Tendo N correlações $(x_i, y_i) \rightarrow (u_i, v_i)$ tal que $1 \leq i \leq N$, da eq. 6, podemos gerar um sistema linear, conforme apresentado na eq. 7.

$$\begin{cases} x_1 = u_1 \cdot h1 + v_1 \cdot h2 + h3 - x_1 \cdot u_1 \cdot h7 - x_1 \cdot v_1 \cdot h8 \\ y_1 = u_1 \cdot h4 + v_1 \cdot h5 + h6 - y_1 \cdot u_1 \cdot h7 - y_1 \cdot v_1 \cdot h8 \\ x_2 = u_2 \cdot h1 + v_2 \cdot h2 + h3 - x_2 \cdot u_2 \cdot h7 - x_2 \cdot v_2 \cdot h8 \\ y_2 = u_2 \cdot h4 + v_2 \cdot h5 + h6 - y_2 \cdot u_2 \cdot h7 - y_2 \cdot v_2 \cdot h8 \\ \vdots \\ x_N = u_N \cdot h1 + v_N \cdot h2 + h3 - x_N \cdot u_N \cdot h7 - x_N \cdot v_N \cdot h8 \\ y_N = u_N \cdot h4 + v_N \cdot h5 + h6 - y_N \cdot u_N \cdot h7 - y_N \cdot v_N \cdot h8 \end{cases} \quad (7)$$

Adotando notação matricial, a eq. 7 pode ser reescrita pela eq. 8.

$$\begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 \cdot u_1 & -x_1 \cdot v_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -y_1 \cdot u_1 & -y_1 \cdot v_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 \cdot u_2 & -x_2 \cdot v_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & 1 & -y_2 \cdot u_2 & -y_2 \cdot v_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_N & v_N & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_N \cdot u_N & -x_N \cdot v_N \\ 0 & 0 & 0 & u_N & v_N & 1 & -y_N \cdot u_N & -y_N \cdot v_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h1 \\ h2 \\ h3 \\ h4 \\ h5 \\ h6 \\ h7 \\ h8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ \vdots \\ x_N \\ y_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

Da eq. 8, observa-se que é necessário no mínimo quatro relações não colineares entre $(x_i, y_i) \rightarrow (u_i, v_i)$ para obter os valores $\{h1 \dots h8\}$. Considerando quatro relações, obtém-se o sistema linear apresentado na eq. 9.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 \cdot u_1 & -x_1 \cdot v_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -y_1 \cdot u_1 & -y_1 \cdot v_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 \cdot u_2 & -x_2 \cdot v_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & 1 & -y_2 \cdot u_2 & -y_2 \cdot v_2 \\ u_3 & v_3 & 1 & 0 & 0 & 1 & -x_3 \cdot u_3 & -x_3 \cdot v_3 \\ 0 & 0 & 0 & u_3 & v_3 & 1 & -y_3 \cdot u_3 & -y_3 \cdot v_3 \\ u_4 & v_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4 \cdot u_4 & -x_4 \cdot v_4 \\ 0 & 0 & 0 & u_4 & v_4 & 1 & -y_4 \cdot u_4 & -y_4 \cdot v_4 \end{pmatrix}}_{A_{8 \times 8}} \underbrace{\begin{pmatrix} h1 \\ h2 \\ h3 \\ h4 \\ h5 \\ h6 \\ h7 \\ h8 \end{pmatrix}}_{X_{8 \times 1}} = \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{pmatrix}}_{B_{8 \times 1}} \quad (9)$$

Quando se encontra a matriz inversa $A_{8 \times 8}^{-1}$, é possível obter pela eq. 10 todos os coeficientes do sistema linear.

$$A_{8 \times 8} \cdot X_{8 \times 1} = B_{8 \times 1} \rightarrow X_{8 \times 1} = A_{8 \times 8}^{-1} \cdot B_{8 \times 1} \quad (10)$$

Encontrados os valores $\{h1 \dots h8\}$ da matriz de homografia, ao substituir a eq. 3 na eq. 4, é possível calcular os valores x e y através de u e v , demonstrado na eq. 11.

$$\begin{cases} x = \frac{u \cdot h1 + v \cdot h2 + h3}{u \cdot h7 + v \cdot h8 + h9} \\ y = \frac{u \cdot h4 + v \cdot h5 + h6}{u \cdot h7 + v \cdot h8 + h9} \end{cases} \quad (11)$$

Um dos grandes benefícios da adoção da matriz de homografia é que a função inversa é facilmente obtida apenas por calcular a matriz de homografia inversa, conforme demonstrado na eq. 12.

$$\begin{pmatrix} xw \\ yw \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h1 & h2 & h3 \\ h4 & h5 & h6 \\ h7 & h8 & h9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} uw \\ vw \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h1 & h2 & h3 \\ h4 & h5 & h6 \\ h7 & h8 & h9 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Observa-se que o valor da escala arbitrária w pode ser atribuída tanto em (x, y) quanto em (u, v) , pois esta será normalizada no final.

Como o uso de matrizes de homografia é uma transformação linear, ela não é capaz de corrigir aberrações provocadas – por exemplo – pela distorção da lente do projetor (efeito olho de peixe). Além disso, quando se tem mais de quatro relações $P(x, y) \rightarrow C(u, v)$, é necessário utilizar algum método de aproximação – como o método dos mínimos quadrados²¹ – para encontrar os valores $h1..h8$ que proporcionam o menor erro, uma vez que haverá mais equações do que variáveis.

Uma forma de utilizar o mapeamento baseada em matrizes de homografia em regiões não lineares é segmentar o conjunto de coordenadas (obtidas pelos círculos) que relaciona o projetor com a câmera em trechos (YANG, R. *et al.*, 2001). Tendo como base o exemplo ilustrado na figura 7 (grade 6x8), é possível fragmentar o conjunto de coordenadas em 35 trechos lineares, conforme destacado em vermelho na figura 9.

Figura 9 – Segmentação dos trechos de mapeamento lineares

Cada trecho é delimitado por quatro círculos e através de suas coordenadas calcula-se uma matriz de homografia deste segmento. Ao realizar o mapeamento $P(x, y) \rightarrow C(u, v)$ de uma coordenada, o sistema deve verificar a qual trecho esta coordenada pertence e, então, calcular as coordenadas utilizando a matriz de homografia do trecho referente.

Neste método, não é possível estabelecer os trechos dos cantos dos projetores, pois não há referências (círculos) nas bordas para definir os segmentos e suas matrizes

²¹ O método dos mínimos quadrados é uma técnica de maximização matemática que busca encontrar o melhor conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados.

de homografia. O mapeamento das coordenadas nestas regiões externas é estimado pela matriz de homografia do trecho mais próximo. Adicionalmente, a grade de círculos pode ser redimensionada de forma que as bordas dos círculos externos encostem na borda de projeção, aumentando, assim, a área coberta dos segmentos e, conseqüentemente, melhorando a precisão destas coordenadas periféricas.

O uso de matrizes de homografia dos trechos (segmentos) mais próximos em regiões sem informações de mapeamento (segmentos) permite realizar o mapeamento mesmo em situações em que o processo de calibração não consiga obter todos os segmentos devido à impossibilidade de obter as coordenadas de determinados círculos. A incapacidade de capturar todos os círculos pode ocorrer devido à interferência luminosa, à obstrução da câmera durante o processo de calibração ou à impossibilidade da câmera cobrir toda a área de projeção. Os trechos não identificados serão estimados pelos trechos reconhecidos mais próximos, o que torna o sistema de calibração mais robusto e tolerante a falhas.

Conforme demonstrado, as matrizes de homografia são fáceis de inverter, o que possibilita o mapeamento bidirecional das coordenadas entre a câmera e o projetor. Esta capacidade possibilita a inclusão de novas funcionalidades ao sistema de multiprojeção, como suporte a múltiplas câmeras, conforme será visto em seguida.

a) Múltiplas câmeras

O uso de múltiplas câmeras para realizar a calibração projetor→câmera tem sido apresentado na literatura nos últimos anos (CHEN, H. *et al.*, 2002; MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007). O uso de múltiplas câmeras visa à ampliação da área de cobertura sobre a tela de projeção e ao aumento da precisão durante o processo de calibração dos projetores.

A figura 10 ilustra um exemplo de sistema de multiprojeção e multicâmera composto por seis projetores e cinco câmeras, todos na disposição lado-a-lado.

Para realizar a calibração da imagem, cada câmera deverá conhecer a sua posição em relação à tela. Considerando que a câmera só captura uma fração da tela, o sistema deve ser apto a descobrir a posição e a área de cobertura de cada câmera, caso contrário, a calibração será individualizada para cada câmera.

Figura 10 – Mapeamento projetor↔câmera com múltiplas câmeras (adaptado de Majumder e Brown (2007))

O processo de encontrar a posição exata de cada câmera em relação à tela e, consequentemente, a sua posição em relação às demais câmeras pode ser obtido na hipótese de haver compartilhamento da área de projeção de um projetor entre duas ou mais câmeras. No exemplo apresentado na figura 10, ambas as câmeras $C1$ e $C2$ cobrem parte do projetor $P2$.

Do mesmo modo adotado no procedimento de calibração geométrica com a utilização de apenas uma câmera, é possível obter ambos os mapeamentos $C1(u,v) \leftrightarrow P2(x,y)$ e $C2(u,v) \leftrightarrow P2(x,y)$. Conforme visto previamente, o uso de matrizes de homografia permite o mapeamento bidirecional (mesmo com o método de segmentação), ou seja, obtém-se tanto a relação projetor→câmera quanto câmera→projetor. Desta forma, é possível ter uma relação entre as câmeras $C1$ e $C2$ com a relação de mapeamento indireto simples: $C1(u,v) \leftrightarrow P2(x,y) \leftrightarrow C2(u,v)$.

A relação entre duas câmeras que não compartilham nenhuma área de cobertura comum pode ser obtida por múltiplos mapeamentos consecutivos. No exemplo ilustrado na figura 10, para relacionar as câmeras $C3$ e $C5$, é necessário realizar um mapeamento indireto duplo: $C3(u,v) \leftrightarrow P4(x,y) \leftrightarrow C4(u,v) \leftrightarrow P5(x,y) \leftrightarrow C5(u,v)$.

Quanto maior a distância entre as câmeras, maior a quantidade de passos necessários para obter o relacionamento. Considerando que há uma margem de erro em cada mapeamento e que o erro provocado entre cada passo é acumulativo, quanto maior a distância, maior será a imprecisão.

Após conhecer a posição de cada projetor e câmera em relação à tela, é possível realizar a calibração geométrica. Neste processo, em regiões de projeção com intersecção de cobertura de duas ou mais câmeras, é possível utilizar as informações de mais de uma câmera para estimar a matriz de homografia dos fragmentos, adotando, por exemplo, a técnica dos mínimos quadrados. Esta técnica permite aumentar a precisão do processo de calibração geométrica do sistema.

Além disso, se duas ou mais câmeras cobrem uma mesma região, é possível criar uma imagem com definição superior a das próprias câmeras utilizadas. Esta técnica é conhecida como reconstrução de imagem de super resolução (PARK, S. C. *et al.*, 2003) e pode ser empregada para aumentar a precisão das imagens utilizadas no processo de calibração.

Por fim, observe-se que em alguns casos é inviável para uma única câmera capturar toda área de projeção, como em telas multifacetadas, cilíndricas de 180° e ambientes tipo CAVE.

II) Mapeamento câmera↔imagem

O mapeamento projetor→câmera – discutido no tópico anterior – embora essencial para o alinhamento dos projetores não estima a posição, superfície e limites da tela em relação às projeções. Mesmo com telas planares não é possível estimar os quatro cantos extremos da tela, o que acarreta o não preenchimento exato da área física da tela, pois a correção projetor→câmera apenas ajusta as projeções para o ponto de vista da câmera.

O mapeamento câmera→imagem deve definir a geometria e as dimensões exatas da tela de projeção, completando o mapeamento final projetor→câmera→imagem. Existem dois tipos de mapeamento câmera→imagem: (a) não paramétrico e (b) paramétrico. Ambos serão detalhados a seguir.

a) Tela não paramétrica

O sistema não paramétrico não geometriza a tela e o processo de alinhamento dos projetores é realizada do ponto de vista da câmera. Apenas os limites de projeção são estabelecidos para que a imagem gerada não ultrapasse os limites da tela de projeção. Como resultado, a imagem final é perfeitamente alinhada do ponto de vista da câmera. Conforme o observador se afasta da câmera, poderá notar desigualdades na imagem projetada. A figura 11 exemplifica este efeito.

Figura 11 – Tela não paramétrica

Para o ponto de vista da câmera C , a imagem está geometricamente uniforme em função do mapeamento projetor→câmera. Entretanto, a imagem projetada pode não estar homogênea ao longo da tela: os observadores (Observador 1 e Observador 2) visualizarão uma imagem não coerente com as suas posições em relação à tela. Embora a figura 11 destaque apenas a distorção horizontal, o mesmo efeito ocorre

na vertical: se uma câmera de calibração é fixada no teto, os usuários abaixo desta câmera notarão que os objetos inferiores são maiores.

O sistema de multiprojeção com mapeamento não paramétrico tem como benefício o suporte para projeções em telas não planares (independente de sua geometria, bastando apenas ter a superfície contínua), porém pode originar distorções de acordo com o ponto de vista da câmera de calibração e dos usuários, o que resulta em uma dependência de ponto de vista.

Na prática, o uso de telas planas com a câmera posicionada de forma perpendicular e centralizada à tela proporciona resultados satisfatórios.

b) Tela paramétrica

É dito que o mapeamento da tela é paramétrico quando existe uma função câmera→imagem que mapeia as coordenadas da câmera em relação à tela. Tal modo de mapeamento proporciona uma imagem uniforme ao longo da tela, oferecendo melhores resultados em sistemas com múltiplos pontos de vista.

Existem três principais formas para realizar a parametrização de uma tela: (a) parametrização linear para telas planares (mais comum e simples), (b) parametrização não linear para telas não planares (funções complexas e específicas) e (c) parametrização linear por trecho (mas flexível). As três formas serão discutidas a seguir.

i. Parametrização linear

A parametrização linear consiste no mapeamento das coordenadas da projeção para as coordenadas da tela independente do ponto de vista da câmera. A figura 12 ilustra uma parametrização linear, seguindo o mesmo exemplo apresentado na figura 11.

A imagem projetada na tela é uniforme, independente da posição da câmera. A câmera não necessariamente visualizará uma imagem geometricamente proporcional – conforme ocorre em tela não paramétrica (ver figura 11, página 48) – pois o último passo no processo de calibração transforma as coordenadas da câmera nas coordenadas da tela.

Figura 12 – Tela paramétrica linear

Para realizar a parametrização da tela de forma linear é possível que se utilize a matriz de homografia, conforme apresentado no mapeamento do projetor para câmera (ver tópico “Mapeamento projetor↔câmera”, página 38). Para obter as quatro coordenadas necessárias que relacionam a câmera com a tela – utilizadas para calcular a matriz de homografia – deve-se: (a) utilizar marcadores especiais na tela para que a câmera detecte automaticamente os quatro cantos através de reconhecimento de imagem, ou (b) permitir que o usuário indique manualmente os quatros cantos da tela.

ii. Parametrização não linear

A parametrização linear permite apenas a conversão das coordenadas de telas planares. Ao utilizar telas não planares, é necessário o uso de parametrização não linear. Como exemplo, se uma tela tem um formato cilíndrico, é necessária uma função de mapeamento câmera→imagem capaz de relacionar as coordenadas da tela em relação à câmera. A figura 13 ilustra este exemplo.

Figura 13 – Tela paramétrica não linear

A imagem projetada deve ser corrigida de modo que o mapeamento câmera→imagem considere a geometria desta tela. Se a câmera for fixada em uma distância maior do que o raio da tela, do ponto de vista da câmera, os objetos centrais devem estar mais largos do que os objetos dos cantos. Em outras geometrias de telas, como telas tipo domo ou esféricas, é necessário realizar tanto as correções horizontais quanto as verticais.

Considerando que o mapeamento das telas não planares não é linear, as matrizes de homografia são incapazes de realizar tal mapeamento. Para este fim, uma possível relação $C(u, v) \rightarrow I(s, t)$ pode ser representada por uma função polinomial (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007), conforme apresentado na eq. 13.

$$\begin{cases} s = a_0 + a_1 \cdot u + a_2 \cdot v + a_3 \cdot u \cdot v + a_4 \cdot u^2 + a_5 \cdot v^2 + a_6 \cdot u^2 \cdot v + a_7 \cdot u \cdot v^2 + a_8 \cdot u^3 + a_9 \cdot v^3 \\ t = b_0 + b_1 \cdot u + b_2 \cdot v + b_3 \cdot u \cdot v + b_4 \cdot u^2 + b_5 \cdot v^2 + b_6 \cdot u^2 \cdot v + b_7 \cdot u \cdot v^2 + b_8 \cdot u^3 + b_9 \cdot v^3 \end{cases} \quad (13)$$

Entretanto, o uso de funções não lineares enfrenta alguns problemas. Primeiramente, as funções são mais complexas e normalmente mais lentas para obter os seus coeficientes. O segundo problema é que não é possível inverter as

funções não lineares facilmente (ou até impossível de obter a função inversa). A restrição bidirecional do mapeamento pode impor restrição ao sistema como, por exemplo, não suportar o uso de múltiplas câmeras.

iii. Tela linear por trecho

O mapeamento linear por trechos consiste em segmentar a tela em pequenos quadriláteros e aplicar uma correção linear para cada um destes segmentos. Este método oferece dois benefícios: (a) é possível mapear qualquer formato de tela contínua, mesmo tendo uma superfície complexa e, (b) é possível calcular a função inversa, pois em cada trecho é aplicada uma transformação linear.

As quatro coordenadas que definem cada trecho linear podem ser obtidas de duas formas: (a) através da inserção na tela de marcadores especiais que serão reconhecidos pela câmera, o que possibilita a demarcação de todos os segmentos, ou (b) através da definição manual, pelo usuário (do ponto de vista da câmera), de cada trecho da tela individualmente.

A figura 14 apresenta um sistema de multiprojeção proposto por Harville *et al.* (2006) composto por quatro projetores horizontais. Nesta proposta foi utilizada uma tela cilíndrica, a qual foi parametrizada através de marcadores nas bordas superiores e inferiores (padrão tabuleiro de xadrez).

Figura 14 – Tela cilíndrica com quatro projetores (extraído de Harville *et al.* (2006))

Os marcadores posicionados na parte superior e inferior da tela são reconhecidos pela câmera, o que fornece todas as informações necessárias para segmentar a tela

em pequenos trechos verticais. A divisão da tela em trechos lineares permite compensar a curvatura da tela cilíndrica. O resultado deste processo é ilustrado na figura 15.

Figura 15 – Antes e depois da correção em telas cilíndricas (extraído de Harville *et al.* (2006))

c) **Uso de múltiplas câmeras para reconhecimento de superfícies**

O uso de múltiplas câmeras permite abranger uma área maior de cobertura e obter melhor precisão no processo de calibração geométrica, conforme visto em “Mapeamento projetor↔câmera”, página 38. Adicionalmente, o uso de múltiplas câmeras permite o reconhecimento espacial de objetos (CHEN, C.; SCHONFELD, D., 2010; FARSHIDI, F. *et al.*, 2009; KIM, T. *et al.*, 2009; QU, W. *et al.*, 2007). Em sistemas de multiprojeção, o uso de múltiplas câmeras permite reconstruir superfícies das telas (JOHNSON, T. *et al.*, 2009; JOHNSON, T. M., 2009; SAJADI, B.; MAJUMDER, A., 2010).

O conceito de reconstrução de superfícies de projeção consiste em identificar um conjunto de pontos no plano da tela por duas ou mais câmeras, o que possibilita estimar a posição tridimensional destes pontos. Através do conjunto destes pontos tridimensionais, é possível estimar uma malha virtual da superfície da tela.

Uma forma de obter a malha é projetar círculos dispostos em grade. Cada câmera captura as posições dos centros de cada círculo em seu respectivo ponto de vista. A figura 16(a) exemplifica este processo.

Figura 16 – Uso de duas câmeras para estimar a superfície da tela

Após as câmeras obterem as coordenadas dos círculos, é possível estimar a superfície de projeção de acordo com a posição de cada círculo em relação às câmeras. A figura 16(b) ilustra o processo de reconstituição da superfície.

O uso de múltiplas câmeras para estimar superfícies de projeção possibilita a parametrização de qualquer tipo de tela, sem a intervenção do usuário. A reconstrução de superfícies baseada em múltiplas câmeras permite flexibilidade e suporte para superfícies complexas de projeção.

2.2.2.2 Técnicas de suavização de brilho e cor

Após alinhar geometricamente os projetores, a imagem final gerada pelo sistema de multiprojeção pode apresentar efeito de ladrilho devido à variação de brilho entre os projetores. Caso haja sobreposição da projeção, as áreas de intersecções terão o brilho somado de dois ou mais projetores, o que evidenciará a presença do grupo de projetores e acarretará quebra da ilusão de uma única imagem.

As técnicas de mistura de bordas e correção de brilho e cor visam à homogeneização das projeções dos projetores para oferecer aos espectadores uma imagem contínua e uniforme.

Neste tópico serão descritas as técnicas para homogeneização de brilho e cor entre os projetores. Serão apresentados os principais aspectos relativos à percepção de cores, à biologia, às limitações do olho humano e às características das telas de projeção.

I) Considerações sobre correções de brilho e cor

Nesta seção serão conceituados os aspectos a serem considerados na concepção de um sistema de multiprojeção. Primeiramente, serão apresentadas algumas características da visão humana. O entendimento destas características é muito importante para a compreensão de algoritmos eficientes de correção de brilho e cor. Logo após, serão apresentadas algumas características de telas de projeção que podem interferir na distribuição do brilho.

a) **Percepção da visão humana**

O sistema visual humano é composto por dois tipos de sensores: cones e bastonetes (*rods*). Os cones são responsáveis por distinguir as cores e existem três tipos de cones: vermelhos, verdes e azuis. Os bastonetes são responsáveis por detectar a intensidade monocromática da luz e são cerca de cem vezes mais sensíveis à luz do que os cones. No sistema visual humano, existem cerca de 5 milhões de cones e 120 milhões de bastonetes.

As células ganglionares da retina conectam os cones e os bastonetes ao nervo óptico que, por sua vez, conduz os sinais visuais às células neurais. A figura 17 apresenta a estrutura do olho humano (figura 17(a)) e a distribuição dos cones e bastonetes ao longo do globo ocular (figura 17(b)).

Figura 17 – Olho humano (extraído de Majumder e Brown (2007))

A figura 17(a) destaca a fóvea, o ponto focal do olho humano. A fóvea é formada predominantemente por cones, o que proporciona grande nitidez visual. A fóvea é a região da retina mais dedicada à visão de alta resolução.

A figura 17(b) ilustra a distribuição dos cones e bastonetes ao longo do perímetro visual. Nota-se que os bastonetes são predominantes na visão periférica, enquanto os cones são predominantes na visão central. Na mesma figura, é destacado o ponto cego do olho (*blind spot*) ocasionado pelo nervo óptico. Neste ponto, nenhum estímulo de luz é captado.

Com base na distribuição e nas características dos cones e bastonetes, é possível identificar algumas peculiaridades e limitações da visão humana que deverão ser consideradas no desenvolvimento da correção de brilho e cor em sistemas de multiprojeção (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007). Abaixo são apresentadas algumas ponderações que podem auxiliar na elaboração de um sistema de multiprojeção:

- a) Considerando que o olho humano tem cerca de 24 vezes mais bastonetes do que cones, o sistema visual humano é muito mais sensível a luminância do que a cromaticidade;
- b) Quanto mais próximo à fóvea, maior a densidade de cones. Isto significa que a visão central tem muito mais nitidez do que a visão periférica;
- c) Quanto mais longe da fóvea, menor a quantidade de cones, proporcionando pouca sensibilidade de cor nas regiões periféricas. Variações suaves de tonalidade entre áreas distantes de uma imagem não são perceptíveis para a visão humana;
- d) Os bastonetes são muito mais sensíveis a luz que os cones. Assim, num ambiente com pouca iluminação, a percepção de cor fica altamente prejudicada. Da mesma forma, pela quase ausência de bastonetes na região da fóvea, a resolução na área focal fica muito prejudicada em ambientes quase escuros.

Com base nas características do olho humano, é possível beneficiar-se das peculiaridades visuais humanas, aperfeiçoando as correções necessárias em sistemas de multiprojeção para apresentar uma imagem uniforme, ao menos para o olho humano.

b) Características de telas

Embora aparentemente uma tela de projeção tenha a simples função de refletir ou refratar as imagens geradas pelos projetores, as telas podem alterar o comportamento dos raios luminosos e, assim, podem influenciar a experiência visual devido a modificações indesejáveis dos feixes de luz.

Em um sistema de multiprojeção, a característica mais importante da tela é o seu fator de ganho: o ganho é um número utilizado para comparar uma determinada tela em relação a uma tela lambertiana. A tela lambertiana reflete ou transmite a luz proporcionalmente para todas as direções. A figura 18 demonstra a reflexão e refração de superfícies lambertianas. O ganho de uma tela é definido pela intensidade perpendicular da luz em relação a uma tela lambertiana. Logo, o ganho de uma tela lambertiana é de 1,0.

Figura 18 – Reflexão e refração da superfícies lambertianas (baseado na figura 19.1 de Ackermann e Eichler (2007))

Tipicamente, as telas têm um ganho entre 0,6 e 2,0, sendo que os maiores ganhos resultam em maior dependência de ponto de vista, pois as imagens perdem o brilho conforme o aumento da angulação do usuário em relação ao ângulo perpendicular da tela.

Telas com ganhos elevados são utilizadas – por exemplo – em cinemas, já que a platéia se concentra na parte central da imagem, o que proporciona uma imagem com maior brilho. Já as telas de baixo ganho são utilizadas em ambientes em que os espectadores ficam próximos à tela, como em sistemas imersivos (*e.g.* CAVE). Telas de baixo ganho – embora ofereçam menos brilho nas regiões centrais – oferecem imagens mais uniforme, independente do ponto de vista (SOARES, L. P. *et al.*, 2010).

A figura 19 demonstra o efeito “bola de fogo” decorrente de telas de alto ganho observadas por usuários próximos à tela. Este efeito ocorre devido ao ângulo de refração e reflexão. Quanto maior o ângulo de refração/reflexão, menor a intensidade de brilho, fazendo com que o centro tenha um brilho superior ao brilho observado nas bordas.

Figura 19 – Tela lambertiana e não lambertiana

Em ambiente de multiprojeção, telas não lambertiana proporcionam diferentes brilhos dependendo da região da tela e do ponto de vista dos usuários. O uso de telas com ganhos elevados pode proporcionar piora significativa na qualidade visual. O problema surge em razão de, no sistema de multiprojeção, os projetores estarem afastados entre si. Assim, para um ponto comum na imagem entre os projetores (área de sobreposição), há diferentes ângulos de incidência dos raios de projeção, proporcionando intensidades diferentes para cada projetor de acordo com o ponto de vista dos usuários. A figura 20 demonstra este efeito para um sistema de multiprojeção composto por dois projetores horizontais.

Figura 20 – Telas não lambertianas em sistemas de multiprojeção

Em sistemas de multiprojeção, as melhores qualidades são obtidas em telas com ganhos entre 0,6 e 0,8. Em situações nas quais é impossível utilizar telas nesta faixa de ganho, uma forma de amenizar o problema de sobreposição em telas de alto ganho é aproximar todos os projetores. A figura 21 demonstra esta estratégia.

Figura 21 – Telas não lambertianas em sistema de multiprojeção com projetores próximos

Embora agrupar os projetores não impeça o efeito “bola de fogo”, conforme ilustrado na figura 19, o ângulo de incidência da luz entre os projetores em uma área comum (sobreposição) não diverge significativamente, conforme destacado na figura 20.

II) Regiões de correção

Existem três regiões que devem ser consideradas no processo de homogeneização de brilho e cor em um sistema de multiprojeção: intraprojetores, interprojetores e sobreposição. A seguir serão detalhadas estas áreas.

a) **Correção intraprojetores**

A correção intraprojetor é o ajuste do brilho e cor em diferentes áreas de um mesmo projetor. Normalmente, os projetores tendem a apresentar um brilho mais forte na região central da projeção e perdem a intensidade nas bordas. Esta desigualdade ocorre principalmente devido as aberrações esféricas proporcionadas pela lente óptica. Além disso, telas não lambertianas podem alterar a variação de brilho na imagem significativamente, de acordo com a posição do observador (conforme visto em “Características de telas”, página 57).

O trabalho publicado por Majumder e Stevens (2004) faz uma análise da variação espacial das luminâncias e crominâncias em um mesmo projetor. O gráfico 2 – demonstrado no artigo de Majumder e Stevens (2004) – apresenta a variação da luminância de um projetor. A luminância foi calculada pela interpolação de quatro pixels vizinhos capturados por uma câmera que utilizou uma transformação linear de RGB para YUV²² para obter a luminância. Note-se que neste experimento a variação final de luminância é influenciada tanto pelo projetor, quanto pela tela de projeção (conforme visto em “Características de telas”, página 57).

O gráfico 3 – publicado por por Majumder e Gopi (2005) – apresenta a variação de crominância para o canal de verde em um único projetor.

Importante observar que, embora a luminância tenha uma variação significativa, a crominância quase não sofre variações. Isto ocorre pelo fato de as cores não serem influenciadas significativamente pelas lentes dos projetores e tela de projeção.

A maioria das abordagens de multiprojeção não realiza correção intraprojetor, pois é necessário um cálculo computacional significativo para proporcionar um ganho visual muito pouco expressivo.

²² $Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$, onde Y é a luminância.

Resposta de luminância de um mesmo projetor

Gráfico 2 – Variação de luminância de um mesmo projetor (extraído de Majumder e Stevens(2004))

Resposta de cromaticidade de um mesmo projetor

Gráfico 3 – Variação da cromaticidade de um mesmo projetor (extraído de Majumder e Gopi (2005))

b) Correção interprojetores

A correção interprojetores consiste em homogeneizar o brilho e a cor entre os projetores, ou seja, uniformizar os tons gerados por cada projetor. Embora um sistema de multiprojeção normalmente utilize projetores idênticos, o tempo de vida das lâmpadas, assim como pequenas diferenças durante o processo de fabricação – principalmente das lâmpadas – podem proporcionar divergências de brilhos e cores entre os projetores, mesmo estes sendo do mesmo modelo e lote de fabricação.

A variação de brilho e cor entre projetores pode fazer com que a imagem apresente tonalidades diferentes em cada região, quebrando a ilusão de uma única imagem. O gráfico 4 apresenta o estudo de luminosidade – publicado por Majumder e Gopi (2005) – que demonstra a variação da luminância em um sistema de multiprojeção composto por quatro projetores em grade (2x2). O gráfico 4 apresenta a luminância do canal de verde dos quatro projetores.

Gráfico 4 – Luminância entre projetores (extraído de Majumder e Gopi (2005))

Como esperado, a área de intersecção entre os projetores apresenta uma luminância significativamente maior devido à soma das projeções. Porém, nas áreas exclusivas de cada projetor, nota-se uma pequena variação de luminância entre os

projetores. Parte destas variações de luminância pode ser atribuída pelas características da tela de projeção (telas não lambertianas).

Embora a variação de luminância seja bem representativa, a variação de cromaticidade sofre pouca variação, mesmo em áreas de intersecção. No mesmo artigo, Majumder e Gopi (2005) apresentaram a variação de cromaticidade para o mesmo sistema, conforme apresentado no gráfico 5.

Gráfico 5 – Cromaticidade entre projetores (extraído de Majumder e Gopi (2005))

Embora a variação de cromaticidade apresentada por Majumder e Gopi (2005) seja pouco significativa, o uso de diferentes marcas ou modelos de projetores, ou mesmo o uso de projetores idênticos com vida útil de lâmpadas diferentes, pode proporcionar uma diferença mais significativa na cromaticidade, quebrando a ilusão da projeção de uma imagem única.

A correção de luminância entre os projetores é ajustada usualmente por configurar individualmente o brilho dos projetores. Adicionalmente, o balanço de cor também pode ser ajustado para prover uma melhor uniformidade. Estes ajustes, embora simples, proporcionam resultados satisfatórios.

c) Correção de sobreposição

A correção de sobreposição consiste em suavizar a transição entre os projetores nas áreas de projeção comum, já que as áreas de intersecção apresentam a soma do brilho de cada projetor. Sem estas correções, haveria um brilho excessivo em todas as intersecções. A figura 22 apresenta o efeito de um sistema composto por dois projetores horizontais (geometricamente alinhados) sem a correção de sobreposição, publicado por Bourke (2004).

Figura 22 – Imagem sem mistura de borda (extraído de Bourke(2004))

Para realizar as compensações de brilho nas regiões de sobreposição, é necessário atenuar o brilho nas áreas de projeção dos projetores envolvidos. Entretanto, é necessário calcular a contribuição de cada projetor dentro da região de intersecção. A forma mais simples de calcular a contribuição de cada projetor na área de intersecção é calcular a quantidade de projetores dentro desta área. Se em uma região houver a projeção de quatro projetores – por exemplo – cada projetor contribuirá com 25% do brilho. Assim, espera-se que toda a imagem gerada pela multiprojeção tenha uma intensidade uniforme. Porém, devido à mudança drástica entre a área exclusiva de um projetor e a área de intersecção, a transição torna-se perceptível para os usuários (efeito ladrilho).

Outra abordagem mais elaborada é calcular a contribuição de cada pixel da intersecção de acordo com a participação proporcional de cada projetor: quanto mais ao centro do projetor, maior a sua colaboração, e quanto mais próximo à borda, menor a sua contribuição. Assim, a intensidade dos projetores nas áreas de sobreposição é gradativa e linear, ou seja, é linearmente proporcional à distância entre cada projetor e a sua borda. O gráfico 6 exemplifica estas duas abordagens,

apresentando a intensidade de cada projetor na área de transição de dois projetores horizontais adjacentes.

(a) Transição brusca

(b) Transição gradativa

Gráfico 6 – Transição em áreas de sobreposição

O eixo horizontal representa o corte horizontal da tela, apresentando a área exclusiva do projetor esquerdo (0 a 0,25), a área de transição (0,25 a 0,75) e a área exclusiva do projetor direito (0,75 a 1). O eixo vertical representa a intensidade luminosa dos dois projetores.

Embora a transição gradativa ofereça uma mudança menos brusca, os melhores resultados são obtidos por transições baseadas em funções senoidais (eq. 14) ou exponenciais (eq. 15).

$$f(x) = \frac{\sin(x \cdot \pi - \pi/2) + 1}{2} \quad (14)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0.5(2x)^p & \text{para } 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1 - 0.5(2(1-x))^p & \text{para } 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

Onde p é o fator que define a curvatura da função.

O gráfico 7 esboça algumas possíveis funções de contribuições. A vantagem de adotar uma função tipo senoidal ou exponencial para a transição de sobreposição consiste na suavização da transição, tornando esta menos brusca e aumentando a qualidade visual da imagem final.

Gráfico 7 – Funções de transição de sobreposição

Após a geração do mapa de contribuições, é necessário aplicar as correções de intensidade de cada pixel de cada projetor para cada quadro gerado, tudo em tempo de execução da aplicação. Esta correção é aplicada usualmente na própria placa gráfica para minimizar o impacto computacional, caso contrário, o tempo necessário para correção de toda a imagem poderia inviabilizar o seu funcionamento.

Para realizar o ajuste na placa gráfica, normalmente é utilizado o *shader*²³ ou a função de mistura. No último caso, o mapa de contribuições pode ser convertido em textura e, então, é aplicada uma função de mistura entre a imagem final gerada e a textura de contribuições. Em OpenGL, a função utilizada para promover a mistura é a `glBlendFunc()`.

O cálculo inicial do mapa de contribuições costuma ser computacionalmente exaustivo. Uma vez calculado o mapa de contribuição, a sua correção na projeção – realizada pela placa gráfica – é rápida, proporcionando um impacto pouco significativo no desempenho da aplicação.

Mantido o mesmo exemplo apresentado na figura 22 (página 64) – com dois projetores dispostos horizontalmente – o mapa de contribuições gerado é apresentado na figura 23, considerando a contribuição de acordo com o tom: branco com contribuição de 100%, preto com 0% e cinza variando entre 0% e 100%, de acordo com a intensidade.

²³ Conjunto de instrução processado pela própria placa gráfica estabelecido pela aplicação capaz de manipular os vértices e as cores da imagem.

Projeto esquerdo

Projeto direito

Figura 23 – Mapa de contribuições (extraído de Bourke (2004))

Ao aplicar o mapa de contribuições (figura 23) na figura 22, a imagem resultante de cada projetor é apresentada na figura 24.

Projeto esquerdo

Projeto direito

Figura 24 – Imagem gerada pelo projetor com atenuação na sobreposição (extraído de Bourke (2004))

Enfim, a imagem final composta pelos dois projetores é apresentada na figura 25.

Figura 25 – Imagem final sem ajuste de mistura (extraído de Bourke (2004))

Embora haja melhoria significativa na transição entre os projetores, ainda é possível notar a área de sobreposição, pois mesmo considerando que os projetores sejam idênticos e tenham a mesma intensidade de brilho, ainda é necessário aplicar a correção gama devido à imprecisão do controle da luz, ocasionado por fatores tais como o *black offset*²⁴ do projetor e a resposta de cada canal não ser linear, dentre outros fatores (MAJUMDER, A.; GOPI, M., 2005). A correção de gama é normalmente calculada pela função $(x) = x^{1/G}$, onde G é o gama. O gráfico 8 apresenta as funções gama com os pesos de $G = \{1,0; 1,5; 2,0; 3,0\}$.

Gráfico 8 – Função gama

O valor de gama varia de projetor para projetor ou até mesmo em configurações de imagens dos projetores diferentes, como aumento do brilho ou alteração do contraste. Caso a transição de sobreposição não seja linear (eq. 14 e 15), esta função de transição deverá ser aplicada sobre a função gama. O gráfico 9 apresenta a função de gama, a função de transição de sobreposição e a função final (transição sobre gama).

²⁴ Intensidade do brilho na cor preta devido à limitação das tecnologias dos projetores.

Gráfico 9 – Função de transição de sobreposição final

A figura 26 ilustra a imagem final gerada, com a função de transição e o coeficiente de gama ajustados.

Figura 26 – Imagem final com ajuste de mistura (extraído de Bourke (2004))

Todos os sistemas de multiprojeção provêem alguma forma de ajuste de brilho nas áreas de transição. Estas correções podem ser configuradas tanto manualmente pelo técnico – nesta hipótese por tentativa e erro – quanto de forma automatizada, com a possibilidade de utilização da própria câmera de calibração geométrica para estimar os coeficientes para o sistema.

III) Homogeneização de cores

Nesta seção, serão apresentados alguns conceitos e técnicas para homogeneizar as cores entre os projetores.

O processo de uniformização consiste em estabelecer um universo de cores $\mathcal{C}$ que contém todas as cores possíveis para serem projetadas por todos os projetores.

Para encontrar este espaço de cores $\mathcal{C}$, supomos um exemplo com apenas dois projetores (a mesma técnica pode ser utilizada para n projetores). O primeiro passo é identificar, através de um espaço tridimensional das cores primárias (vermelho, verde e azul) o maior volume de cores que um projetor G_1 consegue obter. O mesmo processo é realizado no projetor G_2 . A figura 27(a) demonstra este primeiro passo.

Figura 27 – Intersecção de espaço de cor (extraído de Majumder e Brown (2007))

Definido o universo de cor para cada projetor G_1 e G_2 , calcula-se a Intersecção $G_1 \cap G_2$, encontrando o universo de cores possíveis que podem ser representadas pelos dois projetores (ver figura 27(b)).

Uma vez encontrado o volume $G_1 \cap G_2$, é necessário obter o volume máximo interno cujas faces opostas sejam paralelas (ver figura 27(c)). Este volume – chamado de C – é o volume que contém todas as possíveis cores que podem ser representadas tanto por G_1 , quanto por G_2 (ver figura 27(d)).

Estabelecido o universo de cores C , é necessário encontrar uma função de tradução capaz de converter o universo de cor $G_i \xrightarrow{M} C$. A transformação M_i é representada geralmente por uma matriz. Uma vez encontrado os coeficientes da matriz M , as cores homogeneizadas (C) podem ser obtidas pela eq. 16.

$$G_i \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} C \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (16)$$

A transformação $G_p \xrightarrow{M} C$ pode ocorrer em três granularidades:

- a) **Projetor:** cada projetor deve ter uma matriz M_p , que é válida para todos os pixels deste projetor;
- b) **Trechos:** cada projetor é dividido em grades retangulares (dimensão $i \times j$), e cada área terá uma matriz $M_p^{i,j}$ individual;
- c) **Pixel:** para cada pixel de cada projetor, haverá uma matriz $M_p^{x,y}$.

Quanto menor a granularidade (por pixel), melhor a qualidade visual, porém o processamento computacional tende a ser mais exaustivo, tanto para a geração das matrizes, quanto para a aplicação das transformações nas imagens geradas pelos projetores. Para quaisquer granularidades, é desejável realizar o processo de homogeneização de cores pela placa gráfica para minimizar o impacto computacional.

2.3 MULTIPROJEÇÃO EM LARGA ESCALA

Em sistemas com quantidades massivas de projetores, espera-se uma imagem de alta resolução e brilho. Gerenciar todos estes projetores, assim como manusear o conteúdo de tal resolução, pode ser um processo computacionalmente exaustivo, o que pode tornar inviável o uso de grande quantidade de projetores.

Este tópico discutirá algumas arquiteturas de sistema de multiprojeção para admitir números massivos de computadores e projetores. Primeiramente, serão abordadas as técnicas de geração e distribuição de conteúdo de alta complexidade e, em seguida, as técnicas de gerenciamento dos projetores.

Ao final deste tópico, serão discutidos o planejamento e a organização dos projetores em ambiente com grande quantidade de projetores, sistemas com resolução retina e outras considerações sobre projeção em larga escala.

2.3.1 Geração de conteúdo

Sistemas de multiprojeção podem suportar conteúdos de alta resolução, entretanto, a aplicação gráfica deve gerar conteúdos em tais definições. A geração do conteúdo pode ser feita tanto por um único computador quanto por múltiplos computadores (aglomerado gráfico).

Embora o uso de aglomerados gráficos possa proporcionar uma redução de investimento sem comprometer a qualidade visual (SOARES, L. P., 2005; SOARES, L. P.; CABRAL, M. C.; BRESSAN, P. A.; FERNANDES, H. G. *et al.*, 2002; SOARES, L. P.; CABRAL, M. C.; BRESSAN, P. A.; LOPES, R. D. *et al.*, 2002; STOLL, G. *et al.*, 2001; ZUFFO, J. A. *et al.*, 2001), o objetivo deste tópico é apenas definir e classificar as arquiteturas monolíticas e distribuídas para geração de imagens em ambientes de multiprojeção.

1.1.1.1 Conteúdo centralizado

O conteúdo centralizado consiste na utilização de apenas um computador (instância) que detém e coordena as informações que serão apresentadas no sistema. Quando o conteúdo é centralizado, o processamento gráfico e a distribuição da projeção podem ser tanto centralizados quanto distribuídos, conforme será visto a seguir.

I) Processamento gráfico

Embora em um sistema de conteúdo centralizado apenas um computador contenha e gerencie o conteúdo gráfico, o processamento gráfico não precisa necessariamente ser centralizado também. A seguir serão descritos os conceitos de processamento centralizado e distribuído para sistemas de conteúdo centralizado.

a) Processamento centralizado

O modelo de conteúdo e processamento centralizado é caracterizado por haver apenas uma única máquina gráfica responsável pela geração da imagem. Como neste modelo toda a geração gráfica é imposta sobre um único computador, o mesmo deve possuir uma capacidade de processamento gráfico compatível com o conteúdo a ser mostrado.

Em sistemas de multiprojeção, é comum atingir projeção de alta definição e este tipo de solução monolítica pode tanto encarecer significativamente o sistema – por exigir máquinas sofisticadas – quanto não ser capaz de gerar imagens com definição equivalente ao provido pelo ambiente de multiprojeção.

Este tipo de arquitetura tem sido cada vez menos adotada por suas limitações orçamentárias e computacionais. Os trabalhos recentes referentes à multiprojeção de médio ou grande porte baseiam-se em uso de múltiplos computadores gráficos.

b) Processamento distribuído

Embora o conteúdo esteja concentrado em apenas uma máquina gráfica, é possível distribuir o processamento gráfico entre um grupo de computadores. Usualmente,

este procedimento ocorre na camada gráfica (OpenGL ou DirectX), na qual todas as chamadas a estas bibliotecas gráficas – realizadas pela aplicação – são interceptadas e distribuídas entre um ou mais computadores gráficos auxiliares. Após o processamento gráfico de cada computador gráfico auxiliar, a imagem é novamente reconstruída no computador gráfico principal. A figura 28 ilustra o modelo de processamento gráfico centralizado e distribuído.

Figura 28 – Processamento gráfico centralizado e distribuído

Existem ferramentas comerciais (e.g. TechViz Turbo²⁵) e gratuitas (e.g. Chromium (HUMPHREYS, G. *et al.*, 2002)) capazes de realizar esta distribuição gráfica. Existem diferentes técnicas para prover a distribuição do modelo gráfico, como o *sort-first* (divisão por trecho de imagens) e o *sort-last* (divisão por cenas) (SOARES, L. P. *et al.*, 2010). Contudo, o estudo aprofundado sobre técnicas de distribuição de processamento gráfico foge do contexto deste trabalho.

O grande benefício deste modelo de distribuição do processamento gráfico é que – além do aumento da capacidade gráfica – a aplicação não precisa ser adaptada ou modificada, sendo necessário apenas substituir a interface da biblioteca gráfica. Assim, o uso de aplicações proprietárias – nas quais não há acesso ao código fonte – é suportado.

²⁵ Disponível em <http://www.techviz.net/f/products/techviz-turbo/>, acessado em 07 de Março de 2011.

II) Distribuição da projeção

Em sistema de multiprojeção com conteúdo centralizado, seja com processamento centralizado ou distribuído, é preciso prover múltiplas saídas gráficas para alimentar cada projetor do sistema. As saídas gráficas que alimentam os projetores podem estar concentradas em um único computador gráfico ou distribuídas entre vários computadores. A seguir, serão descritas as formas de distribuição da projeção em sistemas de multiprojeção.

a) **Projeção centralizada**

A projeção centralizada consiste na existência de apenas um único computador gráfico para alimentar todos os projetores do sistema de multiprojeção. Este computador gráfico deve conter quantidade suficiente de saídas gráficas para prover sinais para todos os projetores deste sistema. A figura 29 demonstra todas as saídas de projeção conectadas em apenas um único computador gráfico.

Figura 29 – Projeção concentrada em um único computador gráfico

O grande benefício desta abordagem é a simplicidade do sistema que exige apenas uma única máquina e um conjunto restrito de projetores. Contudo, mesmo com a utilização de placas gráficas sofisticadas, como a Quadro Plex 2200 D2 da nVidia²⁶, que pode conter até dois módulos por máquina (totalizando 8 saídas gráficas), ou

²⁶ Disponível em http://www.nvidia.com/object/product_quadroplex_2200_d2_us.html, acessado em 06 de Março de 2011.

com a utilização de supercomputadores gráficos (contendo 16 saídas gráficas), pode não ser obtido o resultado desejado, por tais equipamentos não serem suficientes para atender sistemas de multiprojeção que necessitam de uma quantidade superior de projetores.

b) Projeção distribuída

A projeção distribuída consiste na utilização de um conjunto de computadores de projeção para aumentar a capacidade de projetores e, possivelmente, o desempenho computacional.

Existem duas hipóteses para distribuir a imagem gerada pelo computador gráfico entre os computadores de projeção: (a) enviar a área de trabalho do computador gráfico como uma sequência de imagem (*stream*) ou, (b) usar bibliotecas especiais para a distribuição do processamento e conteúdo.

No caso de envio da área de trabalho, o grande benefício é a total independência da aplicação, o que permite suportar qualquer tipo de conteúdo: vídeos, visualizações de modelos 3D, dentre outros. Porém, como é necessário transmitir para os computadores de projeção cada quadro da aplicação, a quantidade de informações que deve ser enviada pela rede pode comprometer o desempenho do sistema.

Como exemplo, se considerarmos uma aplicação com 1600×1200 pixels de resolução, com 32 bits (4 bytes) por pixel, transmitindo a 24 quadros por segundo, a banda necessária para o envio – considerado o uso de transmissão Multicast²⁷ (1-n) – será de pelo menos $1600 \times 1200 \times 32 \times 24 \cong 1,4 \text{ Gbps}$, além dos cabeçalhos e mensagens de controle. Mesmo com algum método de compressão (e.g. MPEG-2²⁸), este exigirá um processamento computacional adicional para efetuar a compactação e descompactação do conteúdo, além de proporcionar um atraso maior entre a geração da imagem e a sua apresentação no sistema de multiprojeção. Ainda, sistemas de multiprojeção podem atingir alta resolução e, desta forma, o volume de dados para a transmissão destes conteúdos de alta resolução também aumenta proporcionalmente.

Alternativamente, é possível adotar a técnica de distribuição de processamento gráfico, conforme discutido no tópico “Processamento distribuído”, página 73.

²⁷ Multicast IP é um protocolo de transmissão para múltiplos destinatários ao mesmo tempo.

²⁸ MPEG-2 é um padrão de codificação digital com compressão de vídeo e áudio, que permite armazenar e transmitir vídeos com tamanhos reduzidos.

Porém, em vez de centralizar as imagens geradas por cada computador auxiliar no computador gráfico principal – detentor do conteúdo – a imagem é projetada diretamente por cada computador de projeção, conforme apresentado na figura 30.

Figura 30 – Processamento gráfico e projeção distribuída

Da mesma forma do sistema de processamento distribuído (tópico “Processamento distribuído”, página 73), existem ferramentas comerciais (e.g. TechViz XL²⁹) e gratuitas (e.g. Chromium (HUMPHREYS, G. *et al.*, 2002)) capazes de realizar tanto a distribuição do processamento gráfico quanto da projeção e que utilizam uma banda de rede bem reduzida comparada com a transmissão da área de trabalho. O grande benefício desta técnica – além de prover a distribuição da projeção mais eficiente, com menor consumo de banda – é o melhor desempenho gráfico distribuído entre os computadores de projeção.

2.3.1.2 Conteúdo distribuído

Um sistema de conteúdo distribuído é baseado em aglomerado de computadores gráficos, e cada nó (computador) compartilha o mesmo conteúdo de apresentação,

²⁹ Disponível em <http://www.techviz.net/f/products/techviz-xl-driver/>, acessado em 06 de Março de 2011.

ou seja, existe uma instância da aplicação com o mesmo conteúdo em cada computador gráfico executado de forma sincronizada. Cada computador gráfico está conectado a um ou mais projetores e cada projetor colabora com uma porção da imagem. A figura 31 ilustra este modelo para um e dois projetores por computador gráfico.

Figura 31 – Conteúdo distribuído

O maior benefício do sistema de conteúdo distribuído consiste na distribuição da carga computacional gráfica entre os computadores gráficos, o que permite alta escalabilidade (SOARES, L. P., 2005): cada nó gráfico irá contribuir apenas com uma parcela da imagem final, com uma resolução inferior. Nesta arquitetura, a rede de interconexão é pouco utilizada (apenas para sincronismo e mensagens de controle).

2.3.2 Sistema de coordenação de calibração

Em um sistema de multiprojeção, todos os projetores devem estar sincronizados para prover uma imagem uniforme. Isto significa que num sistema calibrado todos os projetores devem conhecer exatamente a sua contribuição em relação à tela, bem como as informações sobre os demais projetores do sistema para homogeneizar o brilho e as cores.

Para realizar a calibração dos projetores, é necessário executar um processo de calibração envolvendo todos os projetores do sistema. Tal processo demanda uma coordenação entre os computadores e projetores. Toda a responsabilidade da coordenação pode ser atribuída a uma única máquina ou distribuída entre cada computador do sistema de multiprojeção. A seguir, serão discutidas estas duas técnicas de coordenação.

2.3.2.1 Coordenação centralizada

Em um sistema de coordenação centralizada, o processo de alinhamento e ajuste dos projetores é coordenado por um único computador (ou instância). Este computador é responsável por coordenar cada passo do processo de calibração e os demais computadores gráficos apenas obedecem às ordens em um modelo mestre e escravo (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007; YANG, R. *et al.*, 2001).

No entanto, embora a coordenação seja efetuada por apenas um computador (ou instância), é possível desvincular algumas atividades computacionais do computador de coordenação para amenizar o impacto computacional necessário durante o processo de calibração. As atividades que podem ser desvinculadas da coordenação são:

- a) **Câmeras:** a câmera (ou câmeras) que captura as imagens utilizadas no processo de calibração não necessita estar conectada diretamente à instância do coordenador da calibração. No entanto, pode ser necessário enviar as informações capturadas pela rede, consumindo banda de rede;
- b) **Processamento dos coeficientes das funções de mapeamento:** para diminuir o processamento necessário na obtenção dos coeficientes de mapeamento de cada projetor, o computador de coordenação pode distribuir os cálculos matemáticos entre os computadores do sistema;
- c) **Ajustes de brilho e cor:** uma das tarefas mais exaustivas durante o processo de calibração é calcular os mapas de correção de cor e máscara de contribuição para cada projetor. Este processo pode levar minutos, dependendo da qualidade estabelecida e da capacidade computacional.

Normalmente, a distribuição do processamento é realizada de acordo com os computadores de interesse: cada computador de projeção recebe o processamento referente a seus projetores. Assim, além de realizar uma distribuição por igual entre os computadores envolvidos, há uma diminuição no uso da rede, uma vez que os cálculos de alinhamento dos projetores são realizados pelos respectivos computadores de projeção associados.

2.3.2.2 Coordenação distribuída

Outra abordagem para coordenar o processo de calibração consiste no trabalho cooperativo entre os computadores (ou instâncias) gráficos, de modo que não haja nenhum computador responsável por toda a coordenação das atividades.

A maior parte das soluções de coordenação distribuída consiste em construir módulos autossuficientes constituídos por um computador, uma ou mais câmeras e um ou mais projetores. Cada módulo deve descobrir a existência de outros módulos através da rede e calcular a sua participação perante a imagem final (JOHNSON, T. *et al.*, 2009; RASKAR, R. *et al.*, 2003).

O grande benefício deste tipo de sistema é que nenhum computador/instância é responsável por todo o processo de calibração, distribuindo naturalmente as atividades para cada computador/instância. Além disso, caso algum módulo (computador, projetor e câmera) apresente algum problema, o sistema poderá se ajustar automaticamente, aumentando a confiabilidade global da aplicação.

Entretanto, em sistemas com grandes quantidades de módulos (computadores, câmeras e projetores), a coordenação pode se tornar complexa e ineficiente.

2.3.3 Planejamento e organização dos projetores

Este tópico tem como objetivo apresentar os principais aspectos referentes à estrutura física de projeção que devem ser considerados na construção de sistemas de multiprojeção com quantidades massivas de projetores.

2.3.3.1 Resolução retina

Um sistema com resolução retina (*retina display*) é aquele que atinge o limiar da capacidade da visão humana. A visão humana tem uma resolução espacial para luminância de 50 CPD³⁰ (*cycle per degree*) (RUSS, J. C., 2007, p. 94) equivalente a pouco mais de um minuto de grau (ou minuto de arco), ou seja, a resolução retina deve ser calculada através da relação entre a distância do usuário e o tamanho da tela. A resolução retina pode ser calculada através da fórmula apresentada na eq. 17.

$$\text{resolução retina} = \frac{\text{dimensão}}{\text{distância_observador} \times \tan\left(\frac{1}{50}\right)} \cong \frac{2865 \times \text{dimensão}}{\text{distância_observador}} \quad (17)$$

Sabendo-se que a maior distância entre dois pixels ocorre na diagonal, a resolução retina horizontal/vertical é finalmente obtida na eq. 18.

$$\begin{cases} \text{resolução horizontal} = \frac{\text{largura tela} \times \sqrt{2}}{\text{distância observador} \times \tan\left(\frac{1}{50}\right)} \cong \frac{4051 \times \text{largura tela}}{\text{distância observador}} \\ \text{resolução vertical} = \frac{\text{altura tela} \times \sqrt{2}}{\text{distância observador} \times \tan\left(\frac{1}{50}\right)} \cong \frac{4051 \times \text{altura tela}}{\text{distância observador}} \end{cases} \quad (18)$$

Como exemplo, um sistema tipo CAVE com dimensão de $3m \times 3m \times 3m$, considerando que o usuário está localizado no centro da sala (distante 1,5m de cada tela), pela eq. 18, seria preciso uma resolução de $\frac{4051 \times 3m}{1,5m} \times \frac{4051 \times 3m}{1,5m} \cong 8103 \times 8103$ para atender a resolução do olho humano.

2.3.3.2 Sobreposição dos projetores

Um aspecto importante a se considerar na elaboração de um sistema de multiprojeção é a disposição dos projetores. Em telas planares, a configuração em grade proporciona o melhor aproveitamento da tela, motivo pelo qual é utilizada em quase todos os sistemas de multiprojeção presentes na literatura.

³⁰ Existe divergência entre os autores em relação à resolução espacial do sistema visual humano. Será considerada nesta tese a resolução espacial de 50 CPD.

Em sistemas de multiprojeção com mistura de borda (*edge blending*) deve haver uma área de sobreposição entre projetores adjacentes. A proporção da área de sobreposição varia de acordo com a quantidade dos projetores, a proporção da tela, a qualidade desejada da mistura de borda e a resolução total desejada. Para compreender o impacto da área da sobreposição dos projetores sobre a qualidade do sistema, a figura 32 ilustra um sistema de multiprojeção com 2x3 projetores em grade.

Figura 32 – Área de sobreposição (grade com dimensão 2x3)

Quanto maior a área de sobreposição, mais suave será a transição entre os projetores adjacentes em função da maior distância de intersecção. O aumento da área de sobreposição é recomendado para sistemas com grande variação de brilho e cor entre projetores adjacentes.

Quanto maior a área de sobreposição, menor a resolução total do sistema. A eq. 19 apresenta a relação entre a resolução do sistema e a percentagem da área de sobreposição.

$$\begin{cases} \text{Resolução Horizontal Total} &= rh \times (nph - sh \times (nph - 1)) \\ \text{Resolução Vertical Total} &= rv \times (npv - sv \times (npv - 1)) \end{cases} \quad (19)$$

A variável nph é o número de projetores na horizontal, npv é o número de projetores na vertical, rh é a resolução horizontal individual dos projetores, rv é a resolução vertical individual dos projetores, sh é a percentagem de sobreposição horizontal e sv é a percentagem de sobreposição vertical.

Pela eq. 19, considerado o exemplo de seis projetores em grade (2x3), conforme apresentado na figura 32, e que cada projetor tem a resolução de 1024x768, a resolução máxima do sistema em relação à percentagem de sobreposição é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Resolução máxima vs. percentagem de sobreposição

Percentagem de sobreposição	Sem sobreposição	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Resolução total	3072x1536	2969x1497	2867x1459	2764x1420	2662x1382	2560x1344	2457x1305
Aproveitamento da resolução	100% x 100%	97% x 98%	93% x 95%	90% x 93%	87% x 90%	83% x 88%	80% x 85%

Embora aparentemente a perda de resolução total devido à área de sobreposição não pareça significativa, quando utilizado muitos projetores tal perda poderá proporcionar um impacto significativo no custo e na qualidade do sistema. A tabela 2 apresenta a relação entre a quantidade de projetores (configurados em grade), a percentagem de sobreposição (considerando a sobreposição horizontal igual a vertical) e a respectiva resolução total efetiva em relação a um sistema sem sobreposição.

Tabela 2 – Perda efetiva da área de projeção decorrente da sobreposição

Quantidade de projetores		Percentagem de sobreposição (horizontal = vertical)					
Horizontal	Vertical	5%	10%	15%	20%	25%	30%
2	2	4,94%	9,75%	14,44%	19,00%	23,44%	27,75%
2	3	5,75%	11,33%	16,75%	22,00%	27,08%	32,00%
3	3	6,56%	12,89%	19,00%	24,89%	30,56%	36,00%
4	3	6,96%	13,67%	20,13%	26,33%	32,29%	38,00%
6	5	8,00%	15,67%	23,00%	30,00%	36,67%	43,00%
8	8	8,56%	16,73%	24,53%	31,94%	38,96%	45,61%

Como exemplo, se for adotado uma percentagem de sobreposição de 20%, em um sistema de multiprojeção pequeno formado por quatro projetores (2x2), haveria uma perda próxima de 20%. Porém, com a mesma percentagem de sobreposição aplicada em um sistema de multiprojeção composto por 64 projetores (8x8), a perda da resolução total seria de quase $\frac{1}{3}$.

Na prática, a perda devido à sobreposição seria um pouco maior do que apresentado nas tabelas 1 e 2 devido ao ajuste da área de projeção, de modo que a borda da projeção poderia ser desperdiçada para a imagem se adequar às dimensões exatas da tela. Além disso, os projetores poderiam não ficar exatamente perpendiculares em relação à tela, fazendo com que as bordas entre os projetores não fossem paralelas. Para manter a distância mínima de sobreposição entre dois projetores, a outra ponta de sobreposição precisaria ficar mais afastada,

aumentando mais ainda a área de sobreposição e, conseqüentemente, diminuindo a resolução total do sistema.

2.3.3.3 Quantidade de projetores

Ao obter a resolução ideal de um sistema (eq. 18), é possível estimar a quantidade mínima de projetores necessários para atender a resolução desejada isolando o número de projetores da eq. 19. A função inversa é apresentada na eq. 20.

$$\begin{cases} \text{Qtd de projetores ori zontal} &= \left\lceil \frac{R_h/r_h - sh}{1 - sh} \right\rceil \\ \text{Qtd de projetores Vertical} &= \left\lceil \frac{R_v/r_v - sv}{1 - sv} \right\rceil \end{cases} \quad (20)$$

Onde a variável R_h é a resolução horizontal total, R_v é a resolução vertical total, r_h é a resolução horizontal individual dos projetores, r_v é a resolução vertical individual dos projetores, sh é a percentagem de sobreposição horizontal e sv é a percentagem de sobreposição vertical.

Considerado o exemplo do sistema tipo CAVE com resolução retina e dimensão de $3m \times 3m \times 3m$ (o que representa uma resolução de 8103×8103 por tela, conforme visto na seção “Resolução retina”, página 81) e adotados projetores convencionas com resolução de 1280×720 cada (aspecto 16:9) e 20% de sobreposição, pela eq. 20, é necessário uma grade com $\left\lceil \frac{8103/1280 - 0,2}{1 - 0,2} \right\rceil \times \left\lceil \frac{8103/720 - 0,2}{1 - 0,2} \right\rceil = 8 \times 14 = 112$ projetores por tela para atender esta resolução.

2.3.3.4 Distância dos projetores

A diagonal (ou largura, ou altura) de projeção é linearmente proporcional à distância do projetor em relação à tela (considerando que a razão de tiro seja constante), ou seja, quanto menor a dimensão de projeção, menor a distância do projetor em relação à tela. A figura 33 exemplifica esta relação.

Figura 33 – Relação entre a distância e a largura de projeção

Definida a dimensão da área de projeção, quanto maior a quantidade de projetores no sistema, menor a área de projeção individual dos projetores e, assim, menor a distância dos projetores em relação à tela. Em um sistema de multiprojeção, a distância de cada projetor pode ser obtida pela eq. 21.

$$\text{distância} = \text{razão de tiro} \times \text{largura da tela} \times \frac{\text{resolução horizontal do projetor}}{\text{resolução horizontal total do sistema}} \quad (21)$$

A resolução horizontal total do sistema pode ser obtida pela eq. 19 (página 82).

Tomando o mesmo exemplo do sistema tipo CAVE com dimensões $3m \times 3m \times 3m$ e com resolução retina (8103×8103), composto por 112 projetores (8×14) com resolução de 1280×720 cada e razão de tiro de 1,8 (valor comum em projetores comerciais), ao projetar em uma tela planar com três metros de largura por três metros de altura, com uma área de sobreposição de 20%, a distância de cada projetor é de $1,8 \times 3m \times \frac{1280}{8103} \cong 85cm$.

A primeira consideração em sistemas com quantidades massivas de projetores é que a projeção deve ser realizada por trás da tela (*back projection*), uma vez que se os projetores estiverem a menos de um metro da tela, bloqueariam a visão dos observadores. Mesmo se adotados projetores com alta razão de tiro como, por exemplo, 8,0, a distância dos projetores em relação à tela seria de $3,8m$ ³¹, com a necessidade de fixar estes projetores no teto ou no chão para não bloquear a visão

³¹ $8,0 \times 3m \times \frac{1280}{8103} \cong 3,8m$.

dos usuários. Considerando que a tela tem três metros de largura e altura, a angulação entre os projetores e a tela seria elevada, o que poderia deteriorar significativamente a qualidade do sistema.

Por fim, mesmo se adotada uma tela de projeção por trás, devido à distância entre a grade de projetores e a tela, seria preciso verificar se a distância focal mínima do projetor é compatível com a distância necessária. Ainda, seria desejável a construção de um suporte de projetores móvel, para que os técnicos tivessem acesso tanto à parte frontal dos projetores quanto à tela.

2.3.3.5 Considerações sobre automação e controle

Quando são empregadas grandes quantidades de projetores em um sistema de multiprojeção, torna-se imprescindível um mecanismo automatizado para ligar, gerenciar e desligar todos os projetores, computadores e demais equipamentos do sistema.

Como exemplo, um sistema que utilize uma grade de projetores 8x14, e computadores que alimentem quatro projetores cada um, para uma simples inicialização do sistema seria necessário ligar 112 projetores e 28 computadores, além de inicializar e controlar todas as instâncias da aplicação gráfica, o que desperdiçaria muito tempo dos operadores.

Como alternativa, é desejável o desenvolvimento de um sistema de controle e automação que empregue tecnologias como o *wake-on-lan*³² para ligar todos os computadores e então coordená-los através de uma aplicação de controle, o que poderá inicializar, controlar e encerrar as aplicações gráficas em todos os computadores concomitantemente.

Além dos computadores, é necessário automatizar também os projetores para que eles possam ser ligados, desligados e controlados massivamente. A primeira e mais simples forma de controlar múltiplos projetores é utilizar o controle remoto e através deste controle é possível ligar e desligar todos os projetores simultaneamente. Porém, na prática, este método é pouco eficiente para sistemas com mais de quatro

³² *Wake-on-Lan*, abreviado como WOL, é um padrão para rede Ethernet que permite que um computador seja ligado através de uma mensagem de rede com um conteúdo especial.

projetores, pois ocasionalmente um comando enviado pelo controle não é captado por todos os projetores, causando confusão.

A melhor alternativa para o gerenciamento dos projetores é através de conexão de controle. Muitos projetores permitem acesso remoto através de portas de conexão, tais como RS-232 ou RJ-45, o que possibilita inicializar, configurar e desligar todos os projetores simultaneamente.

Infelizmente, não existe nenhum protocolo padrão entre os fabricantes de projetores. Destarte, o sistema de controle deve incorporar os protocolos proprietários de cada fabricante, e a cada mudança das marcas ou modelos dos projetores poderá ser necessário exigir modificações no sistema de controle.

2.3.3.6 Considerações sobre energia e refrigeração

Em sistemas de multiprojeção de grande porte, o fornecimento de energia para todos os computadores e projetores deve ser dimensionado. Considerando que um projetor padrão tem um consumo de $200W$, e cada máquina tem um consumo de $750W$, em um sistema formado por 112 projetores e 28 computadores, haveria um consumo total de $200W \times 112 + 750W \times 28 = 43,4K$, sem considerar outros dispositivos como *switch* de rede e *KVM switch*³³. Trata-se de consumo bem expressivo, que exigiria adequações especiais em toda a rede elétrica do ambiente.

Além disso, este consumo elevado de energia geraria muito calor, o que exigiria uma solução sofisticada de refrigeração para manter o sistema em operação. Seguindo a tendência mundial de adotar soluções mais ecológicas, as novas pesquisas, tais como projetores de LEDs, poderão reduzir significativamente o consumo de energia e calor gerado.

³³ *KVM switch (Keyboard, Video and Mouse Switch)* é um dispositivo de hardware que permite ao usuário controlar múltiplos computadores utilizando apenas um único teclado, mouse e monitor.

2.4 PESQUISAS CORRELATAS

Este tópico tem como objetivo apresentar os principais trabalhos correlatos na literatura. Embora não exista nenhum trabalho referente a sistemas de multiprojeção voltado para grandes quantidades de projetores – objetivo central desta tese – foram elencadas as principais referências utilizadas na elaboração deste trabalho.

2.4.1 O sistema PixelFlex

Ruigang Yang – pesquisador e professor do laboratório de Ciências da Computação da Universidade de Kentucky³⁴ – foi um dos primeiros pesquisadores a estudar e desenvolver soluções de multiprojeção com calibração automática, com publicações ainda no século passado (RASKAR, R. *et al.*, 1999).

Em 2001, apresentou à comunidade científica o PixelFlex (YANG, R. *et al.*, 2001), um sistema de multiprojeção automatizado. Em 2003, Raji *et al.* (2003) publicou um artigo sobre o PixelFlex2, o sucessor do PixelFlex, com melhoramentos na calibração geométrica com a inclusão de detecção de bordas e calibrações fotométricas baseadas em câmeras. Na ocasião, foi desenvolvido para ser incorporado ao Chromium (HUMPHREYS, G. *et al.*, 2002).

Nos anos posteriores, Ruigang Yang desenvolveu um dispositivo programado em FPGA denominado *pixel compositor* (YANG, R.; LASTRA, A., 2007; YANG, R. *et al.*, 2007), capaz de prover a calibração de quatro projetores por dispositivo, com a possibilidade de cascadear para até 16 entradas e 16 saídas. A figura 34(a) apresenta o desenho esquemático do dispositivo, a figura 34(b) apresenta a extensão do sistema para 16 entradas e 16 saídas utilizando 8 placas e, por fim, a figura 34(c) apresenta a imagem da placa.

³⁴ Disponível em <http://www.vis.uky.edu/~ryang/>, acessado em 08 de Março de 2011.

Figura 34 – *Pixel Compositor* (extraído de Yang *et al.* (2007))

Em 2010, Ruigang Yang e Anselmo Lastra patentearam esta solução, denominada “*Source and Output Device-Independent Pixel Compositor Device Adapted To Incorporate the Digital Interface (DVI)*” (YANG, R.; LASTRA, A., 2010).

2.4.2 As contribuições de Adit Majumder

Adit Majumder – professora e pesquisadora da Universidade da Califórnia³⁵ – é uma das principais referências na área de multiprojeção. Coautora do artigo PixelFlex2 (RAIJ, A. *et al.*, 2003), publicou diversos artigos sobre correções de brilho e cor (BHASKER, E. S. *et al.*, 2006; BROWN, M. *et al.*, 2005; MAJUMDER, A.; GOPI, M., 2005; MAJUMDER, A.; IRANI, S., 2007; MAJUMDER, A.; STEVENS, R., 2004). No final de 2010, Adit Majumder, juntamente com Gopi Meenakshisundaram e Sayed Sajadi, patentearam um método de processamento para balancear o brilho e cor em sistemas de multiprojeção (MAJUMDER, A. *et al.*, 2010).

A maior contribuição de Adit Majumder na comunidade científica foi a publicação do livro “*Practical multi-projector display design*” (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007). Este livro apresenta resumo dos seus trabalhos publicados e de outros autores e descreve diversas técnicas de multiprojeção. Esta obra é a principal referência desta tese.

³⁵ Disponível em <http://www.ics.uci.edu/~majumder/>, acessado em 08 de Março de 2011.

2.4.3 O sistema iLamps

Um dos primeiros pesquisadores na área de multiprojeção, Ramesh Raskar – atualmente Professor do MIT Media Labs³⁶ – participou dos primeiros trabalhos de sistemas de multiprojeção automatizados baseados em câmera, juntamente com o Professor Ruigang Yang (RASKAR, R. *et al.*, 1999). Em 2003, Raskar – pertencente ao grupo Mitsubishi Electric Research Labs (MERL) – publicou um artigo sobre o iLamps (RASKAR, R. *et al.*, 2003).

O iLamps é um sistema de projeção *ad-hoc* no qual cada componente contém um computador, um projetor e uma câmera. Cada módulo (computador, projetor e câmera) é capaz de ajustar a imagem de acordo com a superfície e suportar ajuste em duas paredes perpendiculares e domos (superfícies côncavas).

Os módulos também interagem e permitem a formação de aglomerados de projetores com calibração geométrica e mistura de bordas (*edge blending*) de forma automatizada.

Após a publicação do iLamps em 2003, Raskar apresentou diversos artigos sobre técnicas de parametrização de superfícies curvas (RASKAR, R.; BAAR, J. V., 2005; RASKAR, R.; BAAR, J. V.; RAO, S. *et al.*, 2004; RASKAR, R.; BAAR, J. V.; WILLWACHER, T. *et al.*, 2004) ainda pelo grupo MERL. Raskar não publicou nenhum artigo recente referente à multiprojeção.

2.4.4 O sistema Pluribus

O sistema Pluribus (DAMERA-VENKATA, N.; CHANG, N. L., 2007a, b, 2009; DAMERA-VENKATA, N. *et al.*, 2007) é um sistema de multiprojeção desenvolvido pela HP Labs³⁷, sob responsabilidade de Niranjana Damera-Venkata e Nelson L. Chang. Tal sistema tem como premissas prover flexibilidade (suporte a telas e arquiteturas arbitrárias), escalabilidade (suporte a grande quantidade de projetores e tolerância a falha), automação, tempo real e vívido (imagem de alta qualidade).

³⁶ Disponível em <http://web.media.mit.edu/~raskar/>, acessado em 08 de Março de 2011.

³⁷ Disponível em <http://www.hpl.hp.com/research/pluribus/index.htm>, acessado em 08 de Março de 2011.

As maiores contribuições do Pluribus são as publicações referentes à superamostragem das telas de projeção (*display supersampling*) decorrente da sobreposição dos projetores em sistema de multiprojeção (DAMERA-VENKATA, N.; CHANG, N. L., 2009). Esta técnica provê melhoria da imagem gerada por projetores de baixa resolução.

No final de 2010, Nelson L. Chang e Niranjan Damera-Venkata patentearam um método para reduzir a dependência de ponto de vista baseado em múltiplas câmeras para aumentar a qualidade visual em ambientes de multiprojeção (CHANG, N. L. A.; DAMERA-VENKATA, N., 2010).

2.4.5 A empresa Scalable Display Technologies

A Scalable Display Technologies³⁸ é uma empresa que comercializa produtos para realizar a calibração automática de múltiplos projetores. A empresa disponibiliza diversos produtos no mercado, tais como:

- a) **ScalableDesktop:** desenvolvido para ser utilizado no Sistema Operacional Microsoft Windows 7, o ScalableDesktop provê a calibração automática dos projetores conectados a esta máquina. O grande benefício desta solução é a possibilidade de rodar praticamente qualquer software, uma vez que as aplicações não precisam ser alteradas. Em contrapartida, o sistema não é escalável para mais de seis projetores;
- b) **EasyBlend:** é o motor que permite a calibração dos projetores. O EasyBlend Classic, com suporte apenas para telas planares, e o EasyBlendFX, com suporte também para telas em forma de domos, cilindros e toróides, são comercializados;
- c) **ScalableColor:** solução que permite uniformizar o balanço de cor entre os projetores de forma automatizada. Este ajuste é feito no próprio projetor, através da comunicação serial ou porta ethernet. Para utilizar esta solução, é necessário que o projetor tenha suporte para tais comandos remotos.

³⁸ Disponível em <http://scalabledisplay.com>, acessado em 08 de Março de 2011.

2.4.6 O projeto Lighttwist

O Lighttwist é um projeto criado no source forge³⁹, registrado em 9 de Abril de 2007, com o objetivo de desenvolver um sistema de multiprojeção com projeção de superfícies arbitrárias, correção de deformação de câmeras, correção de cor e mistura de bordas. O lighttwist deve manusear vídeos, imagens, modelos 3D, entre outros.

Previsto para ser desenvolvido em C/C++ e sob licença GPL e GLPv3, o projeto encontra-se vazio e sem atividade. Esta é a única iniciativa encontrada na literatura para desenvolver uma solução de multiprojeção eficiente de código aberto e gratuito.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas de multiprojeção baseadas em câmeras para a obtenção do sistema de coordenadas global utilizado para a calibração geométrica. Há diversos métodos e algoritmos de calibração geométrica utilizados para estimar as coordenadas geométricas de ambientes de multiprojeção. O presente capítulo apresentou o método de detecção de círculos dispostos em grade com registro baseado em matrizes de homografia (STAADT, O. G. *et al.*, 2006). Tal método é a base dos principais trabalhos de multiprojeção baseados em câmera presentes na literatura e proporciona excelentes resultados. Por tal razão, este método será a base do mapeamento geométrico do sistema de multiprojeção Fast Fusion, proposto nesta tese.

Foram apresentadas algumas técnicas para homogeneizar o brilho e a cor entre os projetores nas áreas interprojeto, intraprojeto e sobreposição. O estudo apresentado foi baseado nos trabalhos de Adit Majumder (2007) e Paul Bourke (2004). Embora a correção de brilho e cor não seja o objeto de estudo desta tese, em sistemas de multiprojeção com quantidade massiva de projetores, espera-se a utilização de uma ou mais telas de projeção com grandes dimensões e, possivelmente, diferentes formatos. Deste modo, é imprescindível o desenvolvimento de mecanismo de correção de brilho.

³⁹ Sourceforge.net: site de obtenção e desenvolvimento de softwares livres e de código fonte aberto.

Foram abordados também neste capítulo aspectos de multiprojeção em larga escala, tais como distribuição de processamento gráfico, técnicas de coordenação de calibração e organização dos projetores.

Este capítulo proporcionou os insumos essenciais para a apresentação do Fast Fusion, a biblioteca de multiprojeção escalável proposta nesta tese, a qual tem como principal característica prover uma arquitetura altamente escalável.

3 PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO DO FAST FUSION

Este capítulo apresenta o Fast Fusion, o sistema de multiprojeção escalável baseado em câmeras proposto nesta tese. O Fast Fusion foi concebido para atingir alta escalabilidade, apto a proporcionar uma mudança de paradigma em realidade virtual por viabilizar o desenvolvimento de sistemas de projeção com grandes dimensões e resoluções compatíveis com a visão humana.

Os próximos tópicos descreverão as motivações, os conceitos, as características, a arquitetura e as técnicas empregadas no Fast Fusion.

3.1 MOTIVAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO FAST FUSION

A motivação do desenvolvimento de uma nova biblioteca de multiprojeção deve-se à necessidade de testar e analisar novos conceitos na área de multiprojeção com foco na escalabilidade, na qualidade visual e na redução de custo. Embora sejam encontrados na literatura diversos sistemas de multiprojeção, a maior parte destas soluções são proprietárias com licenças comerciais ou com códigos não disponibilizados pelos autores.

Há uma carência de sistemas de multiprojeção – mesmo adotadas soluções comerciais – que suportam quantidades massivas de projetores, o que impede a construção de sistemas de realidade virtual de grande porte. A elaboração de uma biblioteca de multiprojeção escalável promoverá a quebra de paradigmas na área de realidade virtual como, por exemplo, a construção de um sistema tipo CAVE com resolução próxima do limiar da visão humana.

Por fim, o desenvolvimento de um sistema de multiprojeção escalável possibilita uma redução significativa de investimento, o que viabiliza a construção de sistemas de realidade virtual de alta qualidade em museus, escolas e laboratórios com menor poder aquisitivo, o que proporciona novas pesquisas na área de realidade virtual.

3.2 CONCEITOS E CARACTERÍSTICAS

Esta seção tem o objetivo de apresentar os principais conceitos e as principais características do sistema de multiprojeção Fast Fusion proposto nesta tese. As descrições destes conceitos são imprescindíveis para o entendimento da arquitetura e das técnicas adotadas.

3.2.1 Transparência com a aplicação

Uma aplicação de realidade virtual é complexa devido à interação com o usuário, à geração do conteúdo e efeitos 3D, à simulação física, dentre outros fatores, e, ao utilizar uma biblioteca de multiprojeção, pode-se aumentar a sua complexidade, dificultando o seu desenvolvimento, os testes e a manutenção. O sistema de multiprojeção Fast Fusion busca oferecer uma interface para a aplicação gráfica mais transparente possível.

A biblioteca Fast Fusion abstrai da aplicação gráfica as informações referentes à projeção, o que permite isentar a responsabilidade da aplicação gráfica em prover suporte a quantidade e disposição dos projetores. A figura 35 exemplifica a abstração da projeção da aplicação gráfica pelo sistema de multiprojeção.

Figura 35 – Abstração dos projetores pela biblioteca de multiprojeção

Todo o processo de calibração realizado pela biblioteca de multiprojeção é executado independentemente da aplicação gráfica: durante todo o processo de calibração, a aplicação gráfica continua a ser executada normalmente, porém a imagem gerada pela aplicação é descartada pelo Fast Fusion. Desta forma, a aplicação não precisa verificar se o sistema não está calibrado, está calibrando ou já

está calibrado. O usuário do sistema pode interagir com a biblioteca de multiprojeção sem interromper a aplicação gráfica.

Adicionalmente, a biblioteca Fast Fusion disponibiliza em sua interface um conjunto de funções que permite que a aplicação gráfica adquira informações de projeção e interaja com a biblioteca de multiprojeção. Desta forma, a aplicação gráfica pode – por exemplo – obter informações sobre a colaboração de cada projetor associado e gerar a imagem apenas nas áreas de interesse (que serão utilizadas pelos projetores), além de conhecer o estado atual do sistema (se está calibrado, por calibrar ou em processo de calibração). Estas informações são úteis para que a aplicação gráfica não gere informações que não serão utilizadas, poupando, assim, recursos computacionais.

Outra característica importante da biblioteca de multiprojeção proposta é que a entrada e a saída das instâncias gráficas podem ser realizadas em qualquer momento. Desta forma é possível adicionar ou remover aplicações gráficas durante a execução global do sistema, e cabe apenas à aplicação prover a mesma capacidade. Esta característica é extremamente importante em sistemas com grande quantidade de computadores e projetores, uma vez que se alguma instância apresentar algum problema, não comprometerá a execução global do sistema, bastando apenas reiniciar esta instância específica, o que aumenta a confiabilidade e robustez do ambiente de multiprojeção.

A biblioteca Fast Fusion realiza, ainda, toda a calibração sem quaisquer configurações relativas à organização dos projetores e das telas. Se fosse necessário qualquer tipo de configuração acerca da disposição física dos componentes, seria preciso realizar um processo extremamente exaustivo em ambientes com dezenas ou até centenas de computadores e projetores. Destarte, o Fast Fusion é capaz de identificar automaticamente toda a organização do sistema.

O estudo destas características é essencial para prover alta escalabilidade por facilitar a inclusão e a configuração do Fast Fusion nas aplicações gráficas. O próximo tópico descreverá a principal inovação da biblioteca proposta para prover alta escalabilidade.

3.2.2 Escalabilidade

Atingir alta escalabilidade é uma das principais premissas do Fast Fusion e em ambientes com quantidades massivas de projetores e computadores gráficos é desejável distribuir hierarquicamente o processamento e o gerenciamento. Foi elaborado um processo automatizado de agrupamento que permite o gerenciamento hierárquico do sistema de multiprojeção, o que minimiza os passos necessários para realizar a calibração dos projetores e auxilia na distribuição do processamento. Este processo é inédito na literatura.

O próximo tópico descreve a técnica para obter o agrupamento gráfico automatizado e, a seguir, será descrito como este agrupamento pode auxiliar no processo de calibração. Também serão discutidos os métodos para maximizar o desempenho computacional da aplicação gráfica baseado nestas informações de agrupamento.

3.2.2.1 Agrupamento gráfico automatizado

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion deve suportar dezenas e até centenas de projetores em um mesmo ambiente de multiprojeção. Além disso, é desejável que o sistema de multiprojeção suporte múltiplas câmeras para cobrir amplas áreas de projeção, o que possibilita o seu uso em ambientes multifacetados – como estruturas tipo CAVE. Ressalte-se que seria impossível para uma única câmera capturar toda a área de projeção.

O uso de múltiplas câmeras permite o desenvolvimento de um sistema de agrupamento automático de projetores de acordo com as posições destes componentes: cada câmera identifica e agrupa os projetores que colaboram em sua respectiva área de captura. A figura 36 ilustra exemplo formado por cinco projetores e três câmeras.

Figura 36 – Exemplo de relacionamento de câmeras e projetores

A primeira fase da calibração é relacionar quais projetores são capturados por quais câmeras. Neste processo, cada projetor deve emitir padrões e as câmeras deverão checar se este projetor – ou parte deste projetor – pertence à sua área de cobertura. No exemplo apresentado na figura 36, a câmera C1 captura as imagens dos projetores P1 e P2, a câmera C2 captura as imagens dos projetores P2, P3 e P4, e a câmera C3 captura a imagem dos projetores P4 e P5. Após a detecção da posição de cada projetor em relação às câmeras, o sistema de multiprojeção gera um grafo agrupando as câmeras com os projetores dentro da área de captura. A figura 37 ilustra o resultado deste agrupamento baseado no exemplo apresentado na figura 36.

Figura 37 – Exemplo de agrupamento de projetores

Após finalizado o agrupamento, estas informações podem ser utilizadas tanto para auxiliar o processo de calibração dos projetores, quanto para fornecer assistência na distribuição do processamento gráfico, conforme será apresentado nos tópicos subsequentes.

3.2.2.2 Calibração por grupos

Uma vez obtidas as informações de agrupamento das câmeras e projetores, é possível realizar a calibração por grupos de projetores, o que pode proporcionar uma redução significativa no tempo de calibração. Nesta hipótese, ao invés de realizar o processo completo de calibração, o Fast Fusion permite uma calibração simplificada: cada câmera calibra concomitantemente os seus respectivos projetores.

Retomando o exemplo apresentado na figura 36, após obter o agrupamento (figura 37), é possível reduzir a quantidade de passos para realizar a calibração dos projetores. A sequência de calibração abaixo ilustra os passos necessários para realizar a calibração simplificada do sistema de multiprojeção:

- **Passo 1:** calibrar os projetores P1, P3 e P5 com as câmeras C1, C2 e C3 respectivamente;
- **Passo 2:** calibrar o projetor P2 com as câmeras C1 e C2;
- **Passo 3:** calibrar o projetor P4 com as câmeras C2 e C3.

Logo, é possível realizar toda a calibração do sistema em apenas três passos, em vez de cinco passos esperados em um processo de calibração tradicional.

Em ambientes com quantidades massivas de projetores, esta técnica de calibração simplificada pode reduzir drasticamente o tempo de calibração dos projetores. Normalmente, um sistema de grande porte não sofre alterações significativas na organização dos computadores, projetores e câmeras e não exige calibrações completas periódicas. Os pequenos desalinhamentos ocasionados pelo uso podem ser corrigidos pela calibração simplificada, muito mais rápida.

Ainda, mesmo na calibração completa, a técnica de agrupamento pode minimizar o tempo total de calibração do sistema de projeção, pois após a fase de calibração geométrica, pode haver a correção de brilho e cor. Assim, as correções de brilho e cor podem ser desempenhadas concomitantemente, seguindo os mesmos passos da calibração simplificada.

3.2.2.3 Distribuição computacional

As informações de agrupamento do sistema podem ser utilizadas tanto pela biblioteca de multiprojeção quanto pela aplicação gráfica. As informações de agrupamento são disponibilizadas pela interface do Fast Fusion e permitem à aplicação gráfica conhecer a topologia do ambiente de multiprojeção. Isto possibilita – por exemplo – a geração de hierarquia para a sincronização de cada computador/instância gráfica, além de facilitar a distribuição e o gerenciamento dos processamentos. Esta hierarquia pode maximizar o desempenho computacional em ambientes compostos por muitos computadores gráficos.

3.3 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA

O Fast Fusion foi desenvolvido em C++ e empregou os conceitos de orientação a objeto e padrões de projeto de software (*Design Patterns*⁴⁰). Este tópico tem como objetivo apresentar e detalhar os diagramas do padrão UML⁴¹ utilizados para modelar o Fast Fusion.

3.3.1 Diagrama de classe

A biblioteca de multiprojeção é composta por quatro classes principais responsáveis pela interface com as aplicações do usuário:

- **Servidor:** esta classe é responsável por coordenar todas as conexões e todos os processos de calibração. Embora a coordenação do Fast Fusion seja centralizada, os processamentos matemáticos são distribuídos, o que possibilita o uso de dezenas, centenas ou até milhares de projetores;
- **Gerenciador:** permite que o usuário interaja com a biblioteca de multiprojeção. A classe `Gerenciador` pode tanto ser integrada à aplicação

⁴⁰ *Design Patterns*: Descreve soluções para problemas provenientes do desenvolvimento de software orientado a objeto.

⁴¹ *Unified Modeling Language*: Linguagem de modelagem que permite visualizar os produtos em diagramas padronizados.

gráfica quanto à aplicação exclusiva para o gerenciamento. Através desta classe, é possível iniciar, abortar e controlar o processo de calibração. Pode haver um ou mais gerenciadores em todo o sistema simultaneamente;

- **Câmera:** a classe `Câmera` é responsável por listar os dispositivos de captura presentes na respectiva máquina e registrá-los na classe `Servidor`. Pode haver uma ou mais classes `Câmera` no sistema e cada uma pode conter um ou mais dispositivos de captura. Esta classe pode ser incorporada e instanciada em qualquer parte do sistema, como na própria aplicação gráfica, no servidor ou em um binário dedicado;
- **Janela:** obrigatoriamente presente na aplicação gráfica, esta classe é responsável por realizar todos os ajustes de projeções necessários para apresentar ao usuário uma imagem contínua. A classe `Janela` instancia uma classe `Projektor` para cada saída de vídeo (projektor) e esta classe `Projektor` é responsável por conectar a classe `Servidor` e efetuar todas as modificações necessárias nas imagens geradas pela aplicação gráfica.

A figura 38 apresenta o diagrama de classe resumido de toda a biblioteca de multiprojeção, apresentando as principais classes, métodos e atributos.

A seguir, são descritas brevemente as classes secundárias:

- **Configuração:** carrega todas as informações contidas no arquivo de configuração e disponibiliza para quaisquer classes de interesse diversas informações sobre o sistema, tais como endereços do servidor, portas de acesso, chaves de segurança, entre outras informações;
- **GerenciadorDeMensagens:** é uma classe de abstração da camada de rede responsável por todas as trocas de mensagem entre as instâncias do sistema de multiprojeção. Esta classe permite tanto receber novas conexões (servidor) quanto conectar as demais classes `GerenciadorDeMensagem` e tem suporte de transmissão síncrona e assíncrona;
- **Mensagem:** estrutura utilizada para empacotar as informações a serem transmitidas, veiculadas pela classe `GerenciadorDeMensagem`. É composta por um cabeçalho (com o tipo de mensagem) e uma área de dados;

- **Dispositivo:** representa um dispositivo de captura de imagem (e.g. WebCAM e câmera fotográfica). Cada classe `Dispositivo` deve conectar-se e registrar-se ao `Servidor` e fornecer informações ao `Servidor` sempre que solicitada;
- **GerenciadorDeDispositivo:** busca e instancia todos os dispositivos de captura de imagem através da classe `Dispositivo`;
- **Imagem:** estrutura que contém a imagem capturada pelo dispositivo de captura;
- **Projeto:** gerenciada pela classe `Janela`, deve haver uma instância de classe `Projeto` para cada saída gráfica (projeto). A classe `Projeto` é responsável por realizar todas as transformações e modificações necessárias para prover uma imagem contínua e uniforme no ambiente de projeção. Cada classe `Projeto` conecta-se ao `Servidor` e registra-se nele e deve executar todas as ações requisitadas.
- **Textura:** estrutura que representa o conteúdo produzido em cada quadro da aplicação gráfica. Construído pela classe `Janela`, é enviada para as classes `Projeto` pelo método `Atualizar` que, por sua vez, deve aplicar todas as modificações necessárias;
- **Registro:** contém todas as informações referentes aos mapeamentos e correções de brilho e cor. Esta classe é associada com cada classe `Projeto` e as informações são obtidas durante o processo de calibração;
- **GerenciadorDeCalibração:** instanciada pelo `Servidor`, é responsável por gerenciar as conexões (`Projeto`, `Câmera` e `Gerenciador`) e coordenar todo o processo de calibração;
- **InfoProjeto:** associado com a classe `GerenciadorDeCalibração`, contém todas as informações referentes aos projetos registrados.

Figura 38 – Diagrama de classe

3.3.2 Diagrama de sequência

Este tópico tem como objetivo apresentar os principais diagramas de sequência do Fast Fusion. O diagrama de sequência é essencial para o entendimento da interação entre as classes da biblioteca de multiprojeção. Nas próximas subseções serão apresentados e descritos os diagramas de sequência das classes de interface.

3.3.2.1 Servidor

O `Servidor` tem como objetivo gerenciar as conexões e coordenar o processo de calibração. A figura 39 apresenta o diagrama de sequência das atividades da classe `Servidor`.

Figura 39 – Diagrama de sequência: Servidor

O `Servidor` é a classe de interface da aplicação e, após obter as configurações através da classe `Configuração`, instancia a classe `GerenciadorDeCalibração`. O método `Inicializar` da classe `GerenciadorDeCalibração` é assíncrono, o que permite à aplicação continuar a sua execução concomitantemente com as atividades da classe `GerenciadorDeCalibração`, que gerencia e coordena as classes `Câmera`, `Projetor` e `Gerenciador`.

A classe `GerenciadorDeCalibração` – embora gerencie e coordene todas as classes `Projektor`, `Câmera` e `Gerenciador` – não oferece nenhuma interface de controle para a aplicação. Todas as requisições para inicializar o processo de calibração, ajustar a área de projeção, entre outros comandos, devem ser solicitadas pela classe `Gerenciador`, conectada ao `Servidor`.

3.3.2.2 Gerenciador

A classe `Gerenciador` é a única classe capaz de inicializar e controlar todos os procedimentos de calibração. A classe `Gerenciador` é uma classe de interface que provê diversos métodos que permitem à aplicação interagir com o sistema de multiprojeção. A figura 40 apresenta o diagrama de sequência das atividades da classe `Gerenciador`.

Figura 40 – Diagrama de sequência: Gerenciador

A classe `Gerenciador` carrega a configuração do sistema através da classe `Configuração` e através dos métodos públicos disponibilizados para a aplicação, a classe `Gerenciador` interage com o `Servidor` através da classe `GerenciadorDeMensagens`.

3.3.2.3 Câmera

Figura 41 – Diagrama de sequência: Câmera

A classe `Câmera` é responsável por gerar e processar as imagens capturadas e utilizadas no processo de calibração. Deve existir ao menos uma instância de

Câmera para permitir o processo de calibração do sistema. A classe `Câmera` pode tanto ser instanciada no mesmo binário do servidor, quanto na aplicação gráfica ou até mesmo em um binário dedicado. A figura 41 apresenta o diagrama de sequência das atividades da classe `Câmera`.

A classe `Câmera` tem apenas dois métodos públicos principais: `Inicializar` e `Encerrar`. O primeiro método instancia a classe `GerenciadorDeDispositivo` que, por sua vez, instancia uma classe `Dispositivo` para cada dispositivo de captura disponível (*WebCam* ou câmera fotográfica). Cada classe `Dispositivo` conecta-se individualmente à classe `Servidor` através da classe `GerenciadorDeMensagens` e espera as ordens do mesmo. O segundo método (`Encerrar`) destrói a classe `Câmera`.

3.3.2.4 Janela

A classe `Janela` é a classe interface utilizada pela aplicação gráfica e é responsável por realizar todos os ajustes dos projetores associados para prover uma imagem final contínua e uniforme. A figura 42 apresenta o diagrama de sequência das atividades da classe `Janela`.

A classe `Janela` carrega a configuração do sistema e, em seguida, instancia uma classe `Projetor` para cada saída de vídeo. Cada classe `Projetor` conecta-se ao `Servidor` através do `GerenciadorDeMensagens`, ou seja, a classe `Janela` não tem a responsabilidade de conectar-se ao servidor. A classe `Projetor` é responsável tanto por aplicar as transformações necessárias para realizar a fusão das imagens, quanto por receber as instruções de calibração do servidor.

O principal método da classe `Janela` é o `Atualizar` e deve sempre ser chamado pela aplicação gráfica imediatamente antes do método `SwapBuffer`, também de responsabilidade da aplicação gráfica. Este método `Atualizar` da classe `Janela` invoca todos os métodos `Atualizar` das classes `Projetor` e passa o parâmetro (classe `Textura`) com o conteúdo gerado pela aplicação gráfica.

Figura 42 – Diagrama de sequência: Janela

3.3.3 Diagrama de tempo

Este tópico tem como objetivo apresentar o diagrama de tempo do processo de calibração, tanto para a calibração completa, quanto para a simplificada. Em cada caso, serão apresentadas as mensagens e a mudança de estados das principais classes durante o processo de calibração.

3.3.3.1 Calibração completa

Esta seção apresentará a interação entre as classes do Fast Fusion durante o processo de calibração completa, incluindo os estados das classes em cada uma das fases. A figura 43 apresenta o diagrama de tempo deste processo.

O processo de calibração é iniciado por uma requisição da classe `Gerenciador`. Após esta requisição, a classe `Servidor` solicita que todos os projetores do ambiente de multiprojeção entrem em modo calibração. Quando todos os projetores do sistema estiverem em modo calibração, cada projetor apresenta os padrões de calibração geométrica e todas as câmeras do sistema obtêm – se possível – as coordenadas deste projetor. Após o mapeamento do projetor, é gerada uma lista com todas as câmeras que contêm uma parte ou toda a área de projeção deste projetor.

Imediatamente após, o projetor em questão apresenta uma imagem sólida para cada canal de cor (vermelho, verde e azul) que é capturada por cada câmera de interesse (que contém este projetor, definido no passo anterior). Esta fase é opcional e é utilizada para obter os tons de cor de cada projetor para realizar as correções de brilho e cor intraprojetor e/ou interprojetor. Estas informações são calculadas e enviadas para os respectivos projetores após a finalização da medição de todos os demais projetores.

Figura 43 – Diagrama de tempo: calibração completa

Após esta primeira fase de calibração, a última fase consiste em ajustar a intensidade de brilho nas áreas de intersecção. Neste processo, todos os projetores – geometricamente calibrados – apresentam simultaneamente uma imagem sólida para cada canal de cor ou da cor branca e, então, as câmeras capturam esta imagem. Este processo mede as intensidades de brilho nas áreas de intersecção, que serão utilizadas para calcular os coeficientes da função de sobreposição, conforme visto em “Correção de sobreposição” (página 64). Alternativamente, esta fase pode ser substituída por um coeficiente padrão estabelecido manualmente pelo operador do sistema.

3.3.3.2 Calibração simplificada

Esta seção apresenta a interação entre as classes do Fast Fusion durante o processo de calibração simplificada e destaca as mensagens e os estados das principais classes em cada fase desta calibração. A figura 44 apresenta o diagrama de tempo da calibração simplificada.

Diferentemente do processo de calibração completa (tópico anterior), já existe uma relação de interesse entre as câmeras e os projetores. Desta forma, a calibração geométrica pode ser paralelizada entre as sequências independentes de calibração, conforme apresentado em “Agrupamento gráfico automatizado” (página 97). Para cada sequência independente, calcula-se concomitantemente os mapeamentos geométricos dos projetores. Nesta fase não é necessária a obtenção das imagens sólidas individuais dos projetores para realizar as correções interprojetores e intraprojetores, pois os valores já foram obtidos na calibração completa.

Por fim, a última fase de calibração, responsável pelo ajuste de brilho nas áreas de sobreposição, é idêntica a da calibração completa.

Figura 44 – Diagrama de tempo: calibração simplificada

3.4 TÉCNICAS E IMPLEMENTAÇÕES

Este tópico apresenta algumas técnicas e alguns algoritmos adotados na biblioteca de multiprojeção Fast Fusion. A seguir, será detalhado o processo de calibração geométrica e, em seguida, a correção de brilho e cor. Por fim, serão discutidos os mapeamentos de tela e as integrações com as aplicações.

3.4.1 Calibração geométrica

O sistema Fast Fusion tem como base o algoritmo de correção geométrica publicado por Yang *et al.* (2001) e foi aperfeiçoado para prover maior robustez, tolerância a falha, precisão e flexibilidade, conforme será apresentado a seguir. O princípio deste método foi descrito no tópico “Mapeamento projetor↔câmera” (página 38).

Este método foi escolhido devido à alta precisão do mapeamento, pois permite uma precisão subpixel mesmo com a utilização de câmeras de baixa resolução. Destarte, é possível utilizar uma ou poucas câmeras convencionais, mesmo em sistemas de multiprojeção com grande área de projeção.

Embora atualmente seja utilizado o método de círculos em grade, o Fast Fusion permitirá futuras implementações de padrão de mapeamento sem modificar a sua estrutura, o que possibilitará a inclusão de novas técnicas de calibração. Enfim, o Fast Fusion também suporta a inclusão de algoritmos que maximizam a precisão da calibração utilizando múltiplas câmeras, conforme visto em “Múltiplas câmeras”, página 45.

O processo de calibração com precisão subpixel é possível uma vez que o centro de cada círculo pode ser obtido através do cálculo do centro da massa luminosa. Os padrões de círculos não contêm uma cor branca sólida, mas sim um degradê do branco para o preto conforme se afasta do centro. Deste modo, quanto mais próximo do centro, maior a intensidade luminosa esperada. A figura 45 apresenta o padrão disposto em círculos que utiliza círculos degradê.

Figura 45 – Padrão baseado em círculos em degradê dispostos em grade 6x8

O tamanho de cada círculo é configurado de acordo com a resolução de captura dos segmentos dos círculos pela câmera. Na prática, quanto mais próxima a câmera estiver da tela, menor o círculo e, quanto mais distante, maior o círculo.

Já a quantidade de círculos irá variar de acordo com o formato da tela e do tipo de lente do projetor: se a tela for plana e a lente do projetor não proporcionar distorções significativas, poucos círculos (e.g. grade 3x4) proverão uma calibração mais rápida (precisa de menos passos para o mapeamento) com um resultado satisfatório. Na hipótese de telas não planares ou projetores que proporcionam distorções de imagem – comuns em lentes de tiro curto – será necessária uma quantidade maior de círculos (e.g. grade 8x8).

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion permite a configuração manual tanto do tamanho do círculo, quanto da quantidade. Ainda, possibilita futuras implementações para automatizar os valores de acordo com o ambiente.

Para detectar os círculos, foi desenvolvida para a biblioteca de multiprojeção uma técnica de diferença para diminuir ruídos na imagem capturada. Esta técnica de diferença consiste em obter primeiramente uma imagem de referência com todos os projetores em preto e, em seguida, cada projetor apresenta os seus padrões de círculos. Com estas duas imagens, uma terceira imagem é gerada pela subtração da intensidade da segunda imagem (padrão com círculos) com a primeira (imagem de

referência). Desta forma, é possível reduzir as interferências das fontes luminosas e destacar apenas os círculos projetados.

A figura 46 ilustra passo a passo o processo realizado pelo Fast Fusion na calibração de um sistema formado por oito projetores (em grade 2x4).

Figura 46 – Diferença de imagem

Neste exemplo, a figura 46(a) representa a disposição casual dos projetores, a figura 46(b) a imagem de referência, a figura 46(c) durante uma das etapas da calibração de um dos projetores e, enfim, a figura 46(d) representa a diferença da imagem “c” com a “b” da figura 46.

Este processo é muito eficiente e possibilita grande precisão mesmo em ambientes claros, ou seja, permite a calibração geométrica eficiente mesmo em ambientes com grande interferência luminosa.

O uso da diferença de imagens permite ao Fast Fusion ser mais eficiente em sistemas de grande porte, uma vez que quanto maior o ambiente, maior a probabilidade de sofrer interferências luminosas externas ao sistema. Como é

necessário obter apenas uma referência por calibração, o impacto no tempo total de calibração é pouco expressivo.

O primeiro passo no processo de mapeamento é detectar os segmentos que contêm um círculo. Cada segmento é representado pelo quadrado vermelho, destacado na figura 45. O processo de segmentação dos círculos é relativamente simples: o Fast Fusion agrupa os pixels de grande intensidade, definindo seus limites mínimos e máximos tanto na horizontal quanto na vertical. Para cada segmento encontrado são aplicados alguns filtros de verificação para descartar segmentos oriundos de interferência ou defeitos do dispositivo de captura observados durante a calibração.

O primeiro filtro verifica se a área deste segmento está dentro de um intervalo esperado. Este filtro evita tanto segmentos muito pequenos, ocasionados, por exemplo, por defeitos de fabricação do dispositivo de captura da imagem, quanto por segmentos muito grandes, ocasionados, por exemplo, por alguém passar na frente da câmera durante o processo de calibração.

Após a passagem do primeiro filtro, um segundo filtro calcula o aspecto horizontal e vertical de cada segmento, ou seja, verifica a razão entre a altura e a largura. Com a utilização de círculos como padrão de reconhecimento, espera-se que os limites dos segmentos aproximem-se de um quadrado e que segmentos muito finos e altos ou largos e baixos sejam provavelmente interferências, ocasionadas, por exemplo, por um pequeno deslocamento da câmera ou por um reflexo da borda da tela durante o processo de calibração.

Estes dois filtros aplicados durante o processo de segmentação – juntamente com a técnica da diferença de imagem – são muito eficientes e removem quase todos os ruídos gerados, aumentando significativamente a tolerância e a precisão da calibração.

Após a segmentação de cada círculo, calcula-se o centro deste círculo baseado no centro da massa luminosa. A figura 47 exemplifica o processo utilizado pelo Fast Fusion para calcular o centro de um círculo contido em um segmento capturado pela câmera.

Figura 47 – Segmento de círculo

Considerando que cada tom de cinza tem uma intensidade que varia entre 0 (preto) e 255 (branco), sendo que quanto mais branco, maior a probabilidade deste pixel estar no centro do círculo devido ao degradê (ver figura 45), atribui-se um peso para cada pixel capturado de acordo com a sua intensidade. Depois de atribuído o peso, calcula-se a intensidade total de cada linha e coluna (no exemplo apresentado na figura 47, são apresentadas apenas as somas das linhas horizontais). Em seguida, é calculada a intensidade acumulada de todas as linhas obtendo-se também a intensidade total do segmento com o círculo. Calcula-se, então, o valor médio da intensidade total. Enfim, para obter-se o centro horizontal do círculo, basta encontrar o ponto de intersecção entre o valor médio e a curva acumulada de cada linha. Para obter o centro vertical do círculo, executa-se o mesmo procedimento, porém na vertical (colunas).

O algoritmo 1 apresenta um pseudo algoritmo adotado no Fast Fusion para realizar o cálculo do centro de cada círculo com precisão subpixel.

Algoritmo 1 – Cálculo de centro de círculo

```

vetor_horizontal[ largura_total ] ← vetor_zero
vetor_vertical [ altura_total ] ← vetor_zero
acumulado ← 0

// Obtendo informações das linhas horizontais, verticais e acumulado:
Para x de 1 até largura_total, faça:
{
    Para y de 1 até altura_total, faça:
    {
        acumulado ← acumulado + ponto [ x, y ] // Tons de cinza
        vetor_horizontal[ x ] ← vetor_horizontal[ x ] + ponto[ x, y ]
        vetor_vertical [ y ] ← vetor_vertical [ y ] + ponto [ x, y ]
    }
}

// Calculando centro horizontal
média ← acumulado / 2
Para x de 1 até largura_total, faça:
{
    Se( vetor_horizontal[ x ] > média )
        centro.x ← ( x - 1 ) + ( média / vetor_horizontal[ x ] )
        Sair do laço!
    Senão
        média ← média - vetor_horizontal[ x ]
}

// Calculando centro vertical
média ← acumulado / 2
Para y de 1 até altura_total, faça:
{
    Se( vetor_vertical [ y ] > média )
        centro.y ← ( y - 1 ) + ( média / vetor_vertical [ y ] )
        Sair do laço!
    Senão
        média ← média - vetor_vertical [ y ]
}

```

Após o cálculo do centro de cada círculo, é preciso atualizar a lista de círculos, pois em cada iteração do projetor alguns círculos se repetem de acordo com o passo de reconhecimento (ver “Mapeamento projetor↔câmera”, página 38). Como não é possível reconhecer a identificação dos círculos no momento de sua captura, é preciso armazená-lo em uma lista e preencher a sua identificação de acordo com a sua posição e a máscara da sequência de padrões.

O Fast Fusion implementa um algoritmo capaz de identificar os círculos coincidentes de acordo com a sua posição e o seu raio estimado (baseado no tamanho do segmento que contém o círculo). Desta forma, para cada círculo detectado, é verificado se este círculo está na mesma posição de algum outro já detectado em padrões anteriores. Caso seja encontrado um círculo coincidente, o bit referente à sequência de padrões é sinalizado e, no final de todos os passos, a sua identificação é obtida.

O algoritmo 2 demonstra como a lista de círculos é atualizada e identificada.

Algoritmo 2 – Atualização da lista de círculos

```
// * lista_círculos: Lista dos círculos previamente detectados.
// * novos_círculos: Lista dos círculos detectados na sequência atual.
// * mascara: posição do bit usado para mostrar os círculos da sequência.
Função atualiza_lista_círculos( lista_círculos, novos_círculos, mascara )
{
    Para cada item de novos_círculos como n, faça:
    {
        achou ← falso;
        Para cada item de lista_círculos como c, faça:
        {
            Se  $c.x - c.raio \leq n.x \leq c.x + c.raio$  E
                $c.y - c.raio \leq n.y \leq c.y + c.raio$ , então:
            { // Encontrado círculo coincidente!
                // Assinalar bit de identificação!
                c.identificação ← c.identificação OU  $0x01 \ll (mascara - 1)$ 
                achou ← verdadeiro
                quebrar // Sair do laço "lista_círculos"
            }
        }
        Se achou = falso, então:
        { // Primeira ocorrência deste círculo, adicionar!
            lista_círculos.inserir( n )
        }
    }
}
```

Após a obtenção das coordenadas e da identificação de todos os círculos, o próximo passo é encontrar uma função que correlaciona as coordenadas do círculo projetados pelo projetor com as respectivas coordenadas capturadas pela câmera.

Utilizou-se o método de mapeamento linear por segmento, conforme descrito em “Mapeamento projetor↔câmera”, página 38. O mapeamento linear por segmento é inversível, permitindo tanto o mapeamento projetor→câmera quanto o mapeamento câmera→projetor.

Este método também tem como vantagem a habilidade do sistema realizar a calibração mesmo quando a câmera não for capaz de capturar toda a área do projetor. Para estimar as áreas de projeção não capturadas pela câmera, a biblioteca de multiprojeção extrapola os mapeamentos obtidos dos segmentos mais próximos. Esta característica torna o processo de calibração mais robusto por permitir perda de círculos, além de possibilitar a sua utilização em ambientes nos quais a câmera é incapaz de capturar toda a área de projeção.

O algoritmo 3 sumariza todo o processo de obtenção da calibração geométrica da biblioteca de multiprojeção Fast Fusion.

Algoritmo 3 – Obtenção da calibração geométrica

```

qtd_interação ←  $\log_2(i \times j) + 1$  // Onde i e j representam respectivamente as
                                // quantidades verticais e horizontais de
                                // círculos, dispostos em grade.
                                // A variável qtd_interação representa a
                                // quantidade de bits necessários para identificar
                                // unicamente cada círculo.

Para cada item de lista_projetores como p, faça:
{
    lista_círculos ← vazio
    imagem_ref ← webcam.obter_imagem() // Imagem com todos projetores em preto

    Para i de 1 até qtd_interação, faça:
    {
        enviar_requisito_para_desenhar_círculos( p, maskara )

        imagem ← webcam.obter_imagem() // Imagem com padrão de projeção
        imagem_sub ← subtrair( imagem, imagem_ref ) // Imagem com a diferença

        lista_segmentos ← obter_segmentos( imagem_sub )
        novos_círculos ← obter_centros( imagem_sub, lista_segmento )

        atualizar_lista_círculos( lista_círculos, novos_círculos )
    }

    mapeamento ← calcular_mapeamento( lista_círculos )
    enviar_mapeamento( p, mapeamento )
}

```

Após a obtenção do mapeamento geométrico, é preciso converter a projeção gerada pela aplicação de acordo com as informações obtidas no mapeamento geométrico. Esta conversão deve ser aplicada em cada quadro e, se o mapeamento fosse aplicado para cada pixel individualmente, poderia haver um impacto significativo no desempenho da aplicação.

Para realizar tal tarefa sem impactar significativamente o desempenho computacional, o Fast Fusion cria uma malha de tamanho $i \times j$, de acordo com a configuração do sistema (como padrão, o tamanho é de duas unidades a mais do que a quantidade de círculos utilizados). Esta malha é formada por polígonos de quatro lados e as coordenadas destes quadriláteros são estabelecidas de acordo com o mapeamento geométrico projetor→câmera.

Após a geração da malha de correção, toda a imagem gerada é transformada em textura e aplicada sobre esta malha. A figura 48 sumariza todo este processo.

Figura 48 – Malha de correção geométrica

Atualmente, o Fast Fusion utiliza a biblioteca gráfica OpenGL para a geração gráfica, podendo ser estendida futuramente para outras bibliotecas gráficas, tal como o DirectX. O processo de captura da textura da aplicação, assim como a geração da malha de correção geométrica são detalhados no algoritmo 4.

Algoritmo 4 – Aplicação da correção geométrica

```
// Esta função deve ser chamada logo antes do método "SwapBuffer()"
// da aplicação, ou seja, após todo o processo de renderização da aplicação,
// mas antes de atualizar a buffer de frente (que será enviado ao projetor).
Função Correção_Geométrica()
{
    glPushAttrib( GL_ALL_ATTRIB_BITS ) // Guardar todo o contexto

    // Selecionar a textura OpenGL preveamente criada
    glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, framebuffer )

    // Ler a buffer da aplicação e armazenar na textura selecionada
    glReadBuffer( GL_BACK )
    glCopyTexSubImage2D( GL_TEXTURE_2D, 0, 0, 0, 0, 0, largura, altura )

    // Limpar toda a imagem, utilizando o fundo preto
    glClearColor( 0, 0, 0, 0 )
    glClear( GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT )

    // Normalizar as coordenadas entre 0 e 1
    glMatrixMode( GL_PROJECTION ); glLoadIdentity()
    glOrtho( 0, 1, 0, 1, -1, 1 )

    // Criar os poligonos da malha de calibração
    glBegin( GL_QUADS );

    // Neste exemplo, a malha tem o tamanho 10x10
    Para i de 0 até 0,9 com passo de 0,1, faça:
    {
        Para j de 0 até 0,9 com passo de 0,1, faça:
        {
            // Criando e aplicando a textura de cada poligono...
            glTexCoord2f( i + 0,0 * largura, j + 0,0 * altura )
            x, y ← projetor_camera( i + 0,0, j + 0,0 )
            glVertex2f( x, y )

            glTexCoord2f( i + 0,0 * largura, j + 0,1 * altura )
            x, y ← projetor_camera( i + 0,0, j + 0,1 )
            glVertex2f( x, y )

            glTexCoord2f( i + 0,1 * largura, j + 0,1 * altura )
            x, y ← projetor_camera( i + 0,1, j + 0,1 )
            glVertex2f( x, y )

            glTexCoord2f( i + 0,1 * largura, j + 0,0 * altura )
            x, y ← projetor_camera( i + 0,1, j + 0,0 )
            glVertex2f( x, y )
        }
    }
    glEnd()

    glPopAttrib() // Restaurar todo o contexto da aplicação
} // Fim do processo da calibração geométrica
```

O processo demonstrado proporciona um baixo impacto no desempenho da aplicação, pois a geração, a cópia da textura da aplicação e todo o ajuste da textura na malha de correção são feitos na placa gráfica.

Em sua implementação, a biblioteca de multiprojeção proposta utiliza recursos mais avançados como o uso de `glCallList()` para maximizar o desempenho durante a correção geométrica. Ainda, o uso de *shader* pode ser incorporado futuramente para prover um melhor desempenho.

A figura 49 demonstra o processo de calibração do Fast Fusion. Neste exemplo, o sistema é formado por dois computadores com quatro projetores cada, totalizando oito projetores em grade 2x4. A figura 49(a) apresenta a disposição casual dos oito projetores, a figura 49(b) demonstra o resultado sem a calibração geométrica, a figura 49(c) mostra o processo de calibração baseado em grade de círculos e, enfim, a figura 49(d) apresenta a aplicação com a calibração geométrica concluída.

Figura 49 – Sequência do processo de calibração com oito projetores em grade 2x8

Por fim, a biblioteca de multiprojeção Fast Fusion prevê em sua arquitetura a utilização de múltiplas câmeras, possibilitando futuras funcionalidades como mapeamento de superfícies arbitrárias e melhor precisão na calibração, conforme visto na seção “Uso de múltiplas câmara”, página 53. Atualmente, o suporte para múltiplas câmeras provê apenas calibração em telas multifacetadas (e.g. CAVE), o

que permite calibrar as telas concorrentemente, conforme visto na seção “Escalabilidade”, página 97.

3.4.2 Calibração de brilho e cor

O processo de ajuste de brilho e cor é responsável por homogeneizar toda a imagem, oferecendo ao usuário a ilusão de uma única projeção contínua. A biblioteca de multiprojeção desenvolvida oferece tanto o ajuste de mistura de bordas (correção de sobreposição) quanto de cor. O processo de correção do brilho e da cor é realizado em duas etapas: (a) cálculo de participação dos projetores nas áreas de sobreposição e (b) correção de brilho e cor.

O cálculo de contribuição nas áreas de sobreposição é gerado logo após a correção geométrica e cada projetor obtém esta informação através de um mapa 2D com a contribuição de cada pixel do respectivo projetor. A correção de brilho e cor é processada em tempo de carregamento e execução da aplicação e utiliza as informações de contribuição nas áreas de sobreposição para auxiliar na correção.

A seguir, serão detalhadas as correções de sobreposição e cor desenvolvidas para a biblioteca de multiprojeção.

3.4.2.1 Cálculo de sobreposição

O cálculo de sobreposição não faz nenhuma correção por si só, ele é utilizado apenas para auxiliar o processo de correção de brilho e cor (a ser discutido mais adiante).

Para obter a participação de cada projetor em uma região de sobreposição, calcula-se a relação entre os pixels e a borda de cada projetor. Para facilitar a compreensão deste método, a figura 50 apresenta um pixel de intersecção e a sua distância para cada borda de cada projetor em um sistema formado por dois projetores horizontais.

Tela de Projeção $D(s,t)$

Figura 50 – Participação de cada projetor

Para obter o mapa de contribuição para cada pixel de cada projetor, a eq. 22 demonstra o cálculo matemático utilizado pela biblioteca de multiprojeção para obter a contribuição de cada pixel, gerando o mapa de contribuições. Este algoritmo tem como base o algoritmo utilizado por Yang *et al.* (2001) e foi aperfeiçoado para melhorar a distribuição de processamento e qualidade visual.

$$\frac{\min(d_{\text{superior}}^{\text{atual}}, d_{\text{inferior}}^{\text{atual}}, d_{\text{esquerda}}^{\text{atual}}, d_{\text{direita}}^{\text{atual}})}{\sum_{i=1}^{n_{\text{proj}}} \min(d_{\text{superior}}^i, d_{\text{inferior}}^i, d_{\text{esquerda}}^i, d_{\text{direita}}^i)} \quad (22)$$

Onde $d_{\text{borda}}^{\text{projetor}}$ é a menor distância entre o pixel e uma determinada *borda* do *projetor*. O n_{proj} é a quantidade máxima de projetores dentro da área de intersecção e a função $\min()$ retorna o menor valor.

Considerando que os projetores já estejam geometricamente alinhados e haja uma relação bidirecional entre projetor ↔ câmera, conforme descrito em “Mapeamento projetor ↔ câmera” (página 38), o algoritmo 5 demonstra a rotina desenvolvida para calcular o mapa de contribuição de cada projetor, tomando como base a eq. 22.

Algoritmo 5 – Cálculo de contribuição

```

Para cada item de lista_projetores como p, faça:
{
  Para cada coordenada x e y do projetor p, faça:
  {
    mínima_distância  $\leftarrow$  mínimo( x, p.largura - x, y, p.altura - y )
    soma  $\leftarrow$  mínima_distância
    (u,v)  $\leftarrow$  p.Projetor_para_Câmera(x,y)
    Para cada item de lista_projetores como p2, faça:
    {
      Se( p igual p2 )
      {
        continuar // Próximo projetor
      }
      (x2,y2)  $\leftarrow$  p2.Câmera_para_Projetor(u,v)
      Se(  $1 \leq \mathbf{x2} \leq \mathbf{p2.largura}$  e  $1 \leq \mathbf{y2} \leq \mathbf{p2.altura}$  ) // (x2,y2)  $\in$  p2
      {
        continuar // Próximo projetor
      }
      soma  $\leftarrow$  soma + mínimo( x2, p2.largura - x2, y2, p2.altura - y2 )
    }
    p.Mapa_Contribuição(x,y)  $\leftarrow$  mínima_distância / soma;
  }
}

```

Os mapas 2D gerados podem ser facilmente convertidos em imagem com tons de cinza, sendo que o branco representa 100% de contribuição e o preto representa 0% de contribuição. A figura 51 apresenta o mapa de contribuição gerado no exemplo apresentado na figura 49 (página 123).

Figura 51 – Mapa de contribuição

Adicionalmente, incorpora-se ao mapa – além da contribuição do projetor – a quantidade de projetores pertencentes a esta posição. Esta informação será utilizada no processo de correção de brilho e cor, discutido a seguir.

3.4.2.2 Correção de brilho e cor

Após o cálculo do mapa de contribuição, as informações são utilizadas por cada projetor para realizar a correção de brilho e cor. Para isso, o Fast Fusion aplica uma função para cada pixel da imagem gerada pela aplicação, conforme apresentado no algoritmo 6.

Algoritmo 6 – Correção por pixel

```

Para x de 1 até largura_tela, faça:
{
    Para y de 1 até altura_tela, faça:
    {
        imagem_final[ x, y ] ← Correção_Brilho_Cor( imagem_aplicação[ x, y ],
                                mapa_contribuição,
                                coeficientes )
    }
}

```

A função de `Correção_Brilho_Cor` irá utilizar as informações do mapa de contribuição e os coeficientes específicos deste projetor para calcular os novos valores de cor de cada pixel.

Atualmente, utiliza-se uma função exponencial para prover a suavização no trecho de transição (conforme apresentado no gráfico 7, página 66). Os coeficientes da função de transição são definidos individualmente para cada projetor. Além disso, uma função de gama (ver gráfico 8, página 68) individual para os três canais de cores (vermelho, verde e azul) também é configurada para cada projetor.

Uma terceira função polinomial corretora é aplicada durante a transição de sobreposição e utiliza a informação da intensidade luminosa, da quantidade de projetores e dos coeficientes variáveis para aprimorar a qualidade visual. O uso da quantidade de projetores é importante, uma vez que a intensidade de cada canal do projetor não é linear e as áreas de interseção com dois projetores apresentam resultados visuais diferentes em áreas de interseção com quatro projetores (estas geralmente mais escuras), mesmo adotando exatamente a mesma função de suavização.

Por fim, um último ajuste para cada canal de cor é aplicado em toda a imagem, independente das áreas de sobreposição, com objetivo de homogeneizar as cores entre os projetores. Estas informações são estabelecidas para cada projetor individualmente.

Atualmente, o processo de obtenção dos coeficientes de brilho e cor utilizados pelo Fast Fusion é manual. Contudo, está previsto em sua arquitetura a obtenção automática destes coeficientes.

Uma vez obtidas todas as variáveis de calibração, estas serão utilizadas para corrigir cada pixel da imagem projetada. Tais correções devem ser aplicadas a cada quadro e podem afetar significativamente o desempenho da aplicação em razão dos cálculos necessários para cada pixel da imagem.

Para amenizar o impacto computacional, foi empregada uma textura de mistura, a qual é combinada com a textura da aplicação. É necessário criar a textura de mistura apenas uma única vez por calibração e, desta forma, embora exista uma carga de processamento inicial, todos os cálculos restantes são executados pela placa gráfica, o que diminui o impacto na aplicação.

O algoritmo 7 demonstra o modo através do qual o Fast Fusion gera a textura de mistura utilizando as primitivas OpenGL.

Algoritmo 7 – Geração de textura para correção de brilho e cor

```

Função Geração_Textura()
{
    // Criando e selecionando a textura de mistura.
    glGenTextures( 1, textura_mistura )
    glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, textura_mistura )

    // Definir valores de mistura.
    Para x de 1 até largura_tela, faça:
    {
        Para y de 1 até altura_tela, faça:
        {
            buffer[ x, y ] ← Correção_Brilho_Cor( imagem_aplicação[ x, y ],
                                                    mapa_contribuição,
                                                    coeficientes )
        }
    }

    // Associando valores de mistura em textura de mistura
    glTexImage2D( GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGBA, largura, altura, 0,
                  GL_RGBA, GL_UNSIGNED_BYTE, buffer );
}

```

Após gerada a textura de mistura (uma única vez logo após ao processo de calibração), basta aplicá-la sobre a textura da aplicação. O algoritmo 8 demonstra este processo.

Algoritmo 8 – Aplicação da textura para correção de brilho e cor

```

Função Aplicar_Correção_Brilho_Cor()
{
    // Selecionando a textura de mistura.
    glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, textura_mistura )

    // Definindo função de mistura.
    glBlendFunc( GL_ZERO, GL_ONE_MINUS_SRC_COLOR )

    // Aplicando a textura de mistura.
    glBegin( GL_QUADS )
        glColor4f( 1, 1, 1, 1 );
        glTexCoord2f( 0, 0 ); glVertex2f( 0, 0 )
        glTexCoord2f( 0, 1 ); glVertex2f( 0, 1 )
        glTexCoord2f( 1, 1 ); glVertex2f( 1, 1 )
        glTexCoord2f( 1, 0 ); glVertex2f( 1, 0 )
    glEnd()
}

```

Embora esta técnica tenha pouco impacto sobre a aplicação, a função de mistura do OpenGL é linear, ou seja, não é possível aplicar funções complexas. Alternativamente, ainda pode ser desenvolvido um *shader* específico que suporta cálculos avançados de ajustes sem comprometer o desempenho. Está prevista a utilização de *shader* futuramente na biblioteca Fast Fusion.

A figura 52 apresenta o resultado do processo de correção do brilho e da cor final da biblioteca de calibração, seguindo o mesmo exemplo apresentado na figura 49 (página 123).

Figura 52 – Exemplo de aplicação de correção de brilho e cor

A figura 52(a) apresenta o resultado após a calibração geométrica e a figura 52(b) apresenta o resultado após a calibração geométrica e a correção de brilho e cor.

3.4.3 Mapeamento da tela

O mapeamento da tela é essencial, pois ao final da calibração, a imagem é redimensionada para se adequar à câmera e, raramente, os limites da tela coincidem com os da câmera. Além disso, caso a tela não seja planar, é necessário parametrizar a tela para adequar a imagem projetada à tela sem causar distorções (ver “Mapeamento câmera↔imagem”, página 47).

A parametrização de telas planares satisfaz todas as demandas de projetos e demonstrações atuais, uma vez que o custo e a complexidade da construção de telas não planares são elevados. Desta forma, a biblioteca Fast Fusion suporta atualmente apenas parametrização de telas planares. Porém, foi planejado em sua arquitetura incluir extensões para prover parametrização de outros tipos de telas além das planas.

O mapeamento de telas desenvolvido para a biblioteca de multiprojeção permite ao usuário definir manualmente os quatros cantos extremos da tela em relação à câmera e, desta forma, calcula-se uma matriz de homografia que relaciona as coordenadas da câmera em relação à tela, conforme discutido em “Mapeamento câmera↔imagem” (página 47).

A motivação para a definição manual dos quatros extremos – adotado no Fast Fusion – dá-se em função da ausência da necessidade de adicionar marcadores ao redor da tela. Além disso, o uso de marcadores para a delineação automatizada dos limites da tela é complexo em sistemas multifacetados, nos quais o limite de uma tela coincide com o limite da tela vizinha (e.g. Sistemas tipo CAVE).

Para definir a área de projeção, o usuário deve selecionar na imagem capturada pela câmera de calibração os quatros pontos que representam os limites da tela. A figura 53 ilustra este processo utilizando a interface do gerenciador de calibração do Fast Fusion.

A figura 53(a) apresenta o gerenciador de calibração antes do processo calibração, a figura 53(b) demonstra o resultado após o processo de calibração, a figura 53(c) ilustra a delimitação da tela de projeção pelo usuário e, por fim, a figura 53(d) apresenta o resultado após a calibração e o ajuste de tela.

Figura 53 – Limites de tela

Após a seleção dos quatros pontos extremos da imagem pelo usuário, gera-se uma matriz de homografia que associa as coordenadas da câmera com as coordenadas da tela. Uma vez calculada a matriz de homografia, ela é incluída no processo de calibração geométrica, completando o mapeamento projetor→câmera→tela.

Observa-se que ao ajustar a área exata de projeção, os mapeamentos dos projetores para a câmera já existentes não são alterados e não há necessidade de recalibrar todos os projetores. Desta forma, após a configuração da área, o ajuste da projeção ocorre quase instantaneamente em tempo de execução da aplicação.

A figura 54 apresenta o resultado do mapeamento câmera→tela, finalizando todo o processo de calibração do Fast Fusion. A figura 54 ilustra o mesmo cenário apresentado nas figuras 49 e 52 (páginas 123 e 129 respectivamente). A figura 54(a) apresenta o resultado da calibração completa, enquanto a figura 54(b) apresenta o resultado final após o mapeamento da tela.

Figura 54 – Mapeamento da tela

Adotando o método de mapeamento câmera→tela através da imagem obtida pela câmera de calibração, surge um problema devido à necessidade de a câmera capturar toda a região da tela. Caso algum canto não seja coberto pela câmera, o usuário não poderá selecionar o canto da tela na imagem.

Para contornar esta limitação, foi desenvolvida uma segunda opção para a delimitação da área de projeção através de referências geradas pelos próprios projetores. Para utilizar esta funcionalidade, é necessário apenas que os projetores cubram os quatro cantos extremos da tela.

Para melhorar a compreensão deste método, a figura 55 apresenta passo a passo este processo de mapeamento de tela baseado em referência de projeção.

Figura 55 – Calibração por referências na projeção

A figura 55(a) apresenta o gerenciador de calibração no modo de calibração por referência de projeção. Ao entrar neste modo, quatro cruzeiros são apresentadas nos projetores já calibrados (figura 55(b)) e o usuário, através da interface de calibração, pode mover estas cruzeiros além da área capturada pela câmera, conforme apresentado na figura 55(c) e (d).

O processo de calibração câmera→tela desenvolvido para a biblioteca de multiprojeção tem como benefício facilitar a definição dos limites de tela sem a necessidade de incluir marcadores especiais ao redor da tela de projeção.

Além disso, para inverter a imagem em sistemas com projeção por trás (*back projection*), basta inverter horizontalmente a ordem da delimitação de tela.

Como limitação, a interface de calibração não suporta telas curvas. Em sua arquitetura foi previsto o mapeamento câmera→tela linear baseado em trechos (ver “Tela linear por trecho”, página 52). Nesta hipótese, em futuras versões, o usuário poderá adequar uma malha de tamanho arbitrário (em vez de apenas quatro pontos), atendendo qualquer tipo de superfície contínua.

Outra limitação do processo de calibração desenvolvido consiste na ausência de suporte a múltiplas câmeras na mesma tela de projeção (apenas em ambientes multifacetados). Porém, há a possibilidade de o sistema unificar em uma única imagem a contribuição de cada câmera. A unificação das imagens é possível graças ao mapeamento bidirecional entre as câmeras, as imagens e os projetores, conforme apresentado em “Múltiplas câmeras”, página 45.

3.4.4 Integração com a aplicação gráfica

A integração da aplicação gráfica com a biblioteca de multiprojeção Fast Fusion foi planejada para ser invasiva no menor nível possível, exigindo modificações mínimas na aplicação gráfica. Existem três modificações básicas necessárias para utilizar a biblioteca Fast Fusion:

- a) Incluir o cabeçalho da biblioteca de multiprojeção;
- b) Instanciar o objeto `display`;

- c) Chamar o método `update` do `display` imediatamente antes do método `SwapBuffer` da aplicação.

O algoritmo 9 apresenta um exemplo genérico de integração da biblioteca de multiprojeção com uma aplicação gráfica.

Algoritmo 9 – Integração da biblioteca de multiprojeção com a aplicação

```
#include <GL/gl.h>
#include <FastFusion/Display.h>

void main()
{
    fastfusion::display ff_disp( "arquivo_de_configuracao.conf" )

    // Inicialização do OpenGL.

    while( 1 ) // Laço principal da aplicação OpenGL.
    {

        /* RENDERIZAÇÃO DA CENA */

        ff_disp.Update() // Aplicação das correções de Multiprojeção.

        SwapBuffer() // Rotina de troca de memória gráfica do OpenGL.

    }
}
```

Não é preciso nenhuma modificação ou método especial na hipótese da aplicação utilizar *quadbuffer* para prover estereoscopia ativa. O Fast Fusion é capaz de reconhecer automaticamente o modo de estéreo ativo.

Algoritmo 10 – Integração avançada da biblioteca de multiprojeção com a aplicação

```
#include <GL/gl.h>
#include <FastFusion/Display.h>

void main()
{
    fastfusion::display ff_disp( "arquivo_de_configuracao.conf" )

    // Inicialização do OpenGL.

    while( 1 ) // Laço principal da aplicação OpenGL.
    {
        if( ff_disp.is_calibrating() ) // Evitar geração de imagem durante
        {                               // o processo de calibração.
            a ← ff_disp.area() // Obtendo área de colaboração

            SetFrustumCulling( a ) // Utilização da área de colaboração
                                // para evitar renderização desnecessária
            /* RENDERIZAÇÃO DA CENA */
        }

        ff_disp.Update() // Aplicação das correções de Multiprojeção.

        SwapBuffer() // Rotina de troca de memória gráfica do OpenGL.

    }
}
```

Alternativamente, a aplicação poderá utilizar informações obtidas pela biblioteca de multiprojeção para aprimorar o desempenho da aplicação, como obter a área de

colaboração da imagem para evitar geração de cenários desnecessários e não gerar imagens durante o processo de calibração. O algoritmo 10 demonstra um exemplo de integração mais invasiva, utilizando recursos de calibração da biblioteca de multiprojeção para maximizar o desempenho do sistema.

Importante salientar que todo o processo de conexão, gerenciamento e configuração da biblioteca Fast Fusion é abstraído da aplicação.

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou e detalhou todos os conceitos, as características, a arquitetura e as técnicas empregadas na biblioteca de multiprojeção Fast Fusion. Foram apresentados também diversos algoritmos e diagramas, os quais detalharam a biblioteca de multiprojeção proposta, assim como as justificativas das soluções adotadas e suas limitações.

O Fast Fusion tem como base os algoritmos empregados por Ruigang Yang (2001). Na calibração geométrica, houve melhoramentos nos seguintes quesitos: (a) aumento da robustez e tolerância a falhas durante a calibração geométrica, (b) maior flexibilidade de mapeamento e (c) melhor suporte para a distribuição de processamento. Na calibração de brilho e cor, não houve nenhum aprimoramento significativo no algoritmo, apenas a inserção de novas funções com parâmetros ajustados manualmente e alterações para facilitar a distribuição do processamento. Espera-se incorporar no Fast Fusion algoritmo de correção de brilho e cor mais avançados e automatizados, tais como publicados nos artigos de Adit Majumder.

A arquitetura do Fast Fusion é original, concebida para suportar quantidades massivas de projetores, com suporte a agrupamento automático de projetores e distribuição balanceada de processamento.

De forma complementar, o apêndice A apresenta os desenvolvimentos complementares realizados ao longo deste trabalho, tais como a biblioteca de sincronismo, as adaptações de bibliotecas de motores gráficos, o desenvolvimento de softwares de realidade virtual e as alterações de aplicações gráficas.

4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados científicos obtidos ao longo desta tese. Serão apresentados os resultados quantitativos da biblioteca de multiprojeção Fast Fusion obtidos através de métodos sistematizados, os quais possibilitaram a obtenção de valores empíricos para analisar o sistema proposto.

4.1 ANÁLISE VISUAL

A primeira análise refere-se ao aspecto visual. Para a obtenção de índices quantitativos da qualidade visual alcançada pelo sistema, os experimentos foram subdivididos em (a) análise geométrica e (b) análise de brilho e cor. Ambos os resultados serão apresentados a seguir.

4.1.1 Análise de calibração geométrica

Esta seção analisará a precisão da calibração geométrica da biblioteca Fast Fusion. Uma calibração geométrica eficiente – além de proporcionar melhor qualidade visual por prover melhor alinhamento entre os projetores – permite a obtenção de melhor relação entre a resolução da câmera e a área de projeção, o que pode interferir diretamente na arquitetura física do sistema e no seu custo.

4.1.1.1 Ambiente de teste

Para a obtenção dos índices dos erros geométricos, elaborou-se um ambiente de teste com intuito de analisar a influência da densidade de pixels da câmera de calibração e a precisão obtida com a mesma. Espera-se, encontrando esta relação,

prever a precisão do sistema baseado nas dimensões das projeções e na resolução da câmera de calibração.

Para obter a precisão do sistema, foi criado um ambiente de teste, conforme apresentado na figura 56.

Figura 56 – Organização dos componentes para análise da correção geométrica

O sistema de multiprojeção – composto por dois projetores alinhados verticalmente – foi ajustado para manter a máxima área de sobreposição nas áreas de projeção de cada projetor, aumentando, assim, a área de análise. Apoiado um projetor sobre o outro, a distância entre as duas lentes é de aproximadamente 12cm na vertical.

Os dois projetores utilizados nos testes foram o DepthQ – WXGA⁴² (tecnologia DLP), com 2.500 ANSI Lumens. A resolução de cada projetor é de 1280 × 720 e a área projetada por cada projetor é de 88cm × 50cm, ou seja, cada pixel de ambos os projetores utilizados tem dimensão aproximada de $\frac{88cm}{1280} \approx 0,69mm$ por $\frac{50cm}{720} \approx 0,69mm$.

Utilizou-se uma câmera fotográfica digital de alta resolução, modelo Nikon D90, com lente NIKON DX 18-105mm, para obter as imagens de análise dos testes e estimar os erros proporcionados, sendo que todas as imagens capturadas estão no formato NEF (sem compactação com perda) a fim de prover melhor nitidez na imagem.

A máquina fotográfica foi fixada num tripé perpendicular à tela e a sua altura foi ajustada na mesma altura que o centro da projeção, a 2,0m de distância. A abertura

⁴² Manual disponível em: <http://www.depthq.com/pdf/DepthQ-WXGA%20User%20Manual.pdf>, acessado em 14 de Março de 2011.

da lente foi calibrada para cobrir a tela em uma área de $1,0m \times 0,67m$, o suficiente para conter a área de projeção dos dois projetores (com projeção sobreposta). Como a resolução da câmera é de 4288×2848 pixels, cada pixel tem a dimensão aproximada de $\frac{1m}{4288} \approx 0,23mm$, ou seja, $\frac{1}{3}$ do tamanho dos pixels dos projetores.

A câmera de calibração foi posicionada perpendicularmente ao centro da tela, a $2m$ de distância, e a área de cobertura da câmera foi de $1,65m \times 1,24m$. Para alterar a densidade de pixels capturados na tela pela câmera de calibração, foram utilizadas oito resoluções diferentes, conforme ilustrado na tabela 3. A alteração da resolução foi efetuada através da biblioteca OpenCV⁴³ (método `cvResize`), a qual utiliza interpolação bilinear.

Tabela 3 – Resolução da câmera de captura

Resolução em pontos		Dimensão da área de		Dimensão de cada ponto
		Horizontal	Vertical	
640 px	480 px	1,65 cm	1,24 cm	2,578 mm
560 px	420 px			2,946 mm
480 px	360 px			3,438 mm
400 px	300 px			4,125 mm
320 px	240 px			5,156 mm
240 px	180 px			6,875 mm
160 px	120 px			10,313 mm
120 px	90 px			13,750 mm

O teste consistiu na calibração geométrica com diversas densidades de captura da câmera de calibração. A correção de brilho e cor foi desativada para não influenciar nas intensidades dos pixels de referência.

Após cada calibração, cada projetor apresentou uma imagem preta com 100 pixels em branco distribuídos em uma grade 10×10 . Supõe-se que estes pixels brancos gerados por ambos os projetores coincidam na tela. Eventuais desalinhamentos destes pixels evidenciariam os erros no processo de calibração.

Para mensurar o desalinhamento entre os dois projetores, a câmera fotográfica – com resolução três vezes maior do que a do projetor – capturou-se uma imagem no final de cada processo de calibração. A figura 57 ilustra uma das imagens obtidas após a calibração, destacando dois pixels desalinhados, um de cada projetor.

⁴³ OpenCV - *Open Source Computer Vision* – é uma biblioteca para visão computacional em tempo real.

Figura 57 – Imagem obtida para medição do erro de calibração

A partir das imagens obtidas pela câmera fotográfica, foi possível estimar o erro entre os dois pixels desalinhados (um de cada projetor) através da medição da distância entre o centro de um pixel ao outro, em pixels. Uma vez que a dimensão de cada pixel era conhecida, foi possível estimar a distância total entre os dois pixels. A figura 58 ilustra esta medição.

Figura 58 – Estimativa da distância entre dois pixels

4.1.1.2 Erros previstos

O processo de medição adotado na análise proporciona alguns erros. A seguir, são destacados os principais erros e as técnicas adotadas para minimizar os mesmos.

- a) **Distorções trapezoidais (*keystone*):** todos os projetores e todas as câmeras tiveram as suas posições, angulações e alturas ajustadas para minimizar a diferença entre a parte superior e a inferior (efeito trapezoidal). Através de medidas manuais, constatou-se que a variação entre a parte inferior e a superior foi menor que 2cm , o que representou uma variação menor que 4%;
- b) **Erro na medição das áreas de captura:** a medição das áreas de captura foi obtida através de quatro folhas pautadas e fixadas nos limites das áreas de captura. Por meio das imagens capturadas, foram identificados os limites exatos das câmeras, com um erro máximo aproximado de 1cm decorrente da graduação utilizada nas folhas (graduação de $0,5\text{cm}$ de cada lado). Desta forma, a variação máxima mostrou-se inferior a 2%;
- c) **Distorções esféricas provocadas pela lente da câmera fotográfica:** além de ter sido ajustada exatamente no centro da área de projeção, perpendicular à tela, a câmera foi afastada a 2m da tela para que a distância focal ficasse superior a 35mm , evitando o efeito “olho de peixe”. Adicionalmente, com a mesma distância focal utilizada nas medições, obteve-se foto de referência de uma folha quadriculada e, a partir da análise da foto obtida, não se detectou nenhuma distorção perceptível;
- d) **Medições entre os pixels de referência dos projetores:** a medição entre os pixels das imagens capturadas (demonstrada na figura 58) foi obtida pelo Photoshop CS4, com a ferramenta *Ruler Tool*. Embora as marcações dos centros dos pixels fossem visuais – suscetíveis à falha humana – os erros não foram expressivos, uma vez que a dimensão dos pixels da câmera mostrou-se $\frac{1}{3}$ menor do que a dimensão dos pixels dos projetores.

Em sistemas de multiprojeção, espera-se a elaboração de sistemas de alta resolução que atinjam o limiar da visão humana. Em tais condições, os erros

gerados no processo de medição, mesmo considerados os piores casos supra apresentados, não são superiores à dimensão de um pixel da câmera de captura ($\frac{1}{3}$ do tamanho do pixel de projeção). Assim, mesmo considerada a variação máxima de erro, tais erros não devem ser perceptíveis nestas condições.

4.1.1.3 Valores obtidos

Uma vez estabelecido o procedimento de análise do erro da calibração geométrica, foram realizadas três calibrações e medições para cada resolução estabelecida (ver tabela 3). Em cada teste, os projetores e a câmera de calibração foram sutilmente movimentados, evitando um cenário idêntico nas três calibrações.

Em cada imagem obtida foram analisados cinco pixels, quatro deles nos cantos extremos da imagem e um deles centralizado, sendo tais pixels comuns entre os dois projetores (dentro da área de sobreposição). Desta forma, a avaliação abrangeu uma grande área.

A tabela 4 apresenta as distâncias médias, máximas e o desvio padrão de cada região referente às três amostras. Não foi possível calcular algumas medições, uma vez que os pixels correspondentes estavam bem sobrepostos, o que inviabilizou a identificação visual do centro de cada pixel. Nestes casos, atribuiu-se o valor 0,00mm.

Tabela 4 – Erros geométricos

		Resolução							
		640x480	560x420	480x360	400x300	320x240	240x180	160x120	120x90
Superior Esquerdo	Amostra 1	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,30 mm	0,00 mm	0,40 mm	0,60 mm	0,45 mm
	Amostra 2	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,28 mm	0,75 mm	0,55 mm	0,72 mm
	Amostra 3	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,35 mm	0,23 mm	0,23 mm	0,50 mm	0,60 mm
Superior Direito	Amostra 1	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,40 mm	0,80 mm	0,96 mm	1,06 mm	1,72 mm
	Amostra 2	0,00 mm	0,00 mm	0,25 mm	0,64 mm	0,98 mm	1,04 mm	1,62 mm	0,65 mm
	Amostra 3	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,55 mm	0,20 mm	0,32 mm	1,78 mm	1,98 mm
Inferior Esquerdo	Amostra 1	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,14 mm	0,23 mm	0,65 mm	0,92 mm
	Amostra 2	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,12 mm	0,23 mm	0,44 mm	0,25 mm	0,72 mm
	Amostra 3	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,40 mm	0,52 mm	0,86 mm
Inferior Direito	Amostra 1	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,18 mm	0,18 mm	0,00 mm	0,23 mm	0,45 mm
	Amostra 2	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,15 mm	0,25 mm	0,27 mm	0,65 mm
	Amostra 3	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,23 mm	0,25 mm	0,23 mm	0,00 mm
Ponto Central	Amostra 1	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,15 mm	0,25 mm	1,25 mm	1,32 mm
	Amostra 2	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,17 mm	0,32 mm	0,82 mm	0,97 mm
	Amostra 3	0,00 mm	0,00 mm	0,00 mm	0,15 mm	0,23 mm	0,15 mm	0,95 mm	0,86 mm
Erro Médio		0,00 mm	0,00 mm	0,02 mm	0,18 mm	0,26 mm	0,40 mm	0,75 mm	0,86 mm
Desvio Padrão		0,00 mm	0,00 mm	0,06 mm	0,22 mm	0,27 mm	0,29 mm	0,49 mm	0,50 mm
Erro Máximo		0,00 mm	0,00 mm	0,25 mm	0,64 mm	0,98 mm	1,04 mm	1,78 mm	1,98 mm

Considerados os índices obtidos, conforme tabela 4, conclui-se que há aumento significativo do erro à medida que a densidade de pixels da câmera de calibração diminui. A tabela 5 relaciona o erro máximo de calibração com a dimensão do pixel da câmera de captura. A utilização do erro máximo em vez do erro médio dá-se em função de se buscar a análise dos piores casos.

Tabela 5 – Relação erro máximo e densidade

Resolução		Dimensão de cada pixel	Erro Máximo	Relação erro máximo / Dimensão pixel
Horizontal	Vertical			
640 px	480 px	2,58 mm	0,00 mm	0,00%
560 px	420 px	2,95 mm	0,00 mm	0,00%
480 px	360 px	3,44 mm	0,25 mm	7,27%
400 px	300 px	4,13 mm	0,64 mm	15,50%
320 px	240 px	5,16 mm	0,98 mm	18,99%
240 px	180 px	6,88 mm	1,04 mm	15,11%
160 px	120 px	10,32 mm	1,78 mm	17,24%
120 px	90 px	13,76 mm	1,98 mm	14,39%

Ao analisar a relação entre o erro máximo e a dimensão da câmera de calibração foi possível observar que o erro máximo gerado pelo sistema mostrou-se inferior a 20% da dimensão do pixel da câmera de captura. Assim, a calibração geométrica subpixel – com o erro máximo inferior à dimensão do pixel do projetor – pode ser alcançada utilizando uma câmera de calibração na qual cada pixel de captura seja 25 vezes menor ($\frac{1}{5}$ da dimensão horizontal ou vertical).

Esta análise permite concluir que, tomando-se como exemplo um sistema tipo CAVE com dimensão $3m \times 3m \times 3m$ e com resolução retina, o que representa a resolução de 8103×8103 , conforme apresentado no tópico “Resolução retina”, página 81, é necessário uma câmera com resolução mínima de $(8103 \times 8103) \times 20\% \approx (1620 \times 1620)$, ou seja, uma câmera de captura de aproximadamente 2,6 Megapixel é suficiente para realizar a calibração subpixel deste sistema com resolução retina.

4.1.2 Análise de variação de brilho e cor

Este tópico tem como objetivo analisar o resultado decorrente do ajuste de brilho e cor da biblioteca Fast Fusion. Inicialmente, será descrito o ambiente de teste utilizado para a análise e, em seguida, serão apresentados os resultados obtidos.

4.1.2.1 Ambiente de teste

Os testes foram realizados na tela principal da CAVERNA Digital da USP (ZUFFO, J. A. *et al.*, 2001). Utilizou-se tal tela em função de sua alta qualidade e de seu baixo ganho, o que é adequado para sistemas tipo CAVE e sistemas de multiprojeção (ver “Características de telas”, pg. 57).

As imagens utilizadas nas análises foram obtidas em três localizações distintas, geradas através de dois sistemas: o primeiro formado por um único projetor, e o segundo composto por quatro projetores (grade 2x2), utilizada a biblioteca de multiprojeção Fast Fusion.

A figura 59 ilustra todas as dimensões e os posicionamentos estabelecidos durante os testes.

Figura 59 – Ambiente de teste para a análise de brilho e cor

O projetor utilizado nos testes foi o DepthQ – WXGA de tecnologia DLP (*single chip*), com resolução de 1280x720 à 60Hz e com 2.500 ANSI Lumens. Tanto no sistema de projeção simples quanto no sistema de multiprojeção, foi utilizado o zoom mínimo do projetor, com razão de tiro de 1,59 (diagonal).

Na projeção simples, o projetor foi fixado a 3,7 metros de distância, o que proporcionou numa imagem de 2,0m x 1,125m, a 1m do chão. Já no sistema de multiprojeção (grade 2x2), foram fixados dois pares de projetores a uma distância de 2,5m da tela. Neste último caso, foi gerada uma imagem total de 2,25m x 1,35m, a qual foi ajustada posteriormente pela biblioteca de multiprojeção para a mesma dimensão e posição do sistema de projeção simples. O sistema de multiprojeção utilizou uma sobreposição horizontal de 35% e vertical de 25%.

A câmera foi posicionada a 4,5m do centro da tela, variando apenas o ângulo em relação à tela, conforme apresentado na figura 59. A altura da máquina fotográfica foi ajustada para adequar-se ao centro da imagem projetada. Utilizou-se, novamente, a câmera Nikon D90. A imagem em formato NEF com resolução de 4288x2848 e 12bit de profundidade por canal foi obtida a partir de configuração totalmente manual da máquina a fim de não causar nenhuma variação entre as amostras obtidas. Os parâmetros utilizados foram: tempo de exposição de $\frac{1}{10}s$ e abertura de $f/3.5$. Posteriormente, a imagem foi convertida para o formato JPG sem compactação (sem perda).

Das imagens obtidas pela câmera fotográfica, extraiu-se a área exata da projeção (tela), a qual foi convertida para um mapa de intensidade com resolução de 800x600, sendo que cada índice tem o valor médio da luminância (Y) da região correspondente. A intensidade de luminância varia de 0 a 255. A luminância (Y) foi obtida através da imagem RGB, onde $Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$. Este mesmo processo foi empregado por Majumder e Gopi (2005). Utilizou-se o software GNU Octave⁴⁴ para converter, calcular e gerar os gráficos apresentados neste tópico.

⁴⁴ GNU Octave é uma linguagem de alto nível intencionada para computação numérica, muito similar ao Matlab. Disponível em <http://www.gnu.org/software/octave/>.

4.1.2.2 Análise da tela e do projetor

A primeira análise refere-se à variação de brilho na área de projeção composta por apenas um projetor. Esta variação é oriunda das aberrações esféricas da lente do projetor e da característica de tela. Esta análise é de extrema importância para a compreensão de determinadas anormalidades durante a análise de variação de brilho em sistema com múltiplos projetores.

Neste teste, projetou-se um padrão sólido branco, capturado pela câmera fotográfica. A figura 60 apresenta as três imagens obtidas em diferentes posições, de acordo com a figura 59.

Figura 60 – Imagens obtidas na análise de projetor e tela

O gráfico 10 apresenta o mapa de luminância (Y) gerado a partir das três imagens capturadas (figura 60).

Os gráficos 10(a, b e c) apresentam o mapa de intensidade de luminância (Y) do ponto de vista das posições 1 (esquerda), 2 (centro) e 3 (direita), respectivamente. De acordo com estes gráficos, observa-se que independentemente do ponto de vista, a região central tem mais brilho do que as regiões periféricas. Este efeito é decorrente (a) da distorção radial (aberração esférica) presente na lente do projetor, (b) da maior distância dos pontos externos da área de projeção em relação ao projetor e (c) da variação do ângulo de incidência: quanto mais distante da região central, maior o ângulo de incidência do feixe de luz em relação à tela.

Embora a tela de teste seja de baixo ganho, há uma variação de brilho de acordo com o ângulo do observador em relação ao eixo perpendicular da tela: quanto maior o ângulo, menor o brilho esperado.

O gráfico 10(d) apresenta a subtração da luminância (Y) gerada pela imagem da posição 3 (direita) com a posição 1 (esquerda). Neste gráfico é possível evidenciar a diferença de brilho entre estes dois pontos de vista: quanto mais à esquerda da área

de projeção, maior o brilho para o ponto de vista esquerdo (posição 1) e menor o brilho para o ponto de vista direito (posição 3). A afirmação inversa também é válida. Este efeito é decorrente da característica de tela, conforme visto em “Características de telas”, página 57.

Gráfico 10 – Variação de brilho da imagem em diferentes pontos de vista

4.1.2.3 Multiprojeção sem ajuste de brilho e cor

Nesta seção analisa-se o sistema de multiprojeção sem a correção de brilho nas áreas de intersecção. Os objetivos desta análise são: (a) compreender a importância das correções nas áreas de sobreposição, (b) analisar a variação individual de cada projetor fora das regiões sem sobreposição e (c) observar o efeito da sobreposição

em imagens isentas de cor em projetores DLP devido ao *black offset*. A figura 61 apresenta as duas imagens de referência utilizadas nesta avaliação.

Figura 61 – Sistema de multiprojeção (grade 2x2) sem correção de brilho e cor

O gráfico 11 apresenta os dois gráficos gerados a partir das imagens apresentadas na figura 61, obtidas no ponto de vista 2 (centro).

Gráfico 11 – Gráfico de luminância sem correção de brilho e cor

O gráfico 11(a) ilustra a notável variação de brilho em regiões de sobreposição. Importante observar a existência de uma variação de brilho em regiões sem sobreposição do mesmo projetor, conforme observado na análise “Análise da tela e do projetor” (página 145).

O gráfico 11(b) destaca a existência de uma variação de brilho nas regiões de intersecção em projeções com ausência de imagem (fundo preto). Este fato ocorre devido à tecnologia dos projetores DLP, os quais contêm baixo contraste e emitem brilho mesmo na ausência de cor (*black offset*).

4.1.2.4 Variação de brilho e cor em multiprojeção

Este tópico tem como objetivo apresentar a variação de brilho e cor no sistema de multiprojeção com calibração e ajuste de brilho e cor. Neste teste, foi analisada a variação de cada canal de cor (Vermelho, Verde e Azul), assim como a variação da imagem branca. No fim deste tópico, será apresentada avaliação referente à variação de brilho em imagens escuras.

A figura 62 apresenta as imagens capturadas pela câmera fotográfica utilizada neste teste.

Figura 62 – Imagens de sistema de multiprojeção

A partir das imagens obtidas (figura 62), o gráfico 12 apresenta os resultados das variações de brilho. Da mesma forma que nos sistemas de projeção simples (“Análise da tela e do projetor”, página 145), observa-se que as intensidades das áreas centrais são mais elevadas em comparação com as regiões periféricas. Porém, devido à distância horizontal entre os projetores, observa-se que existem duas regiões com maior índice de brilho. O gráfico 13 apresenta a luminância gerada em um corte horizontal em $\frac{2}{3}$ da altura da imagem ($y=400px$).

Gráfico 12 – Variação de luminância em sistemas multiprojeção

Gráfico 13 – Corte horizontal (2/3 da altura)

Ressalte-se a evidência de dois picos no gráfico de luminância, diferente do sistema com um único projetor, o qual apresenta apenas um pico no centro da imagem (gráfico 10(b), página 146). As duas saliências são ocasionadas pela grade 2x2 de projetores, sendo que cada par de projetores está a uma distância horizontal de

75cm. Como cada projetor aponta para uma região diferente da tela e, sabendo-se que quanto mais perpendicular e central à projeção, maior será a intensidade desta região, conforme visto em “Análise da tela e do projetor” (página 145), em um sistema com múltiplos projetores teremos mais de um centro de maior intensidade. A variação de brilho em regiões de sobreposição em trechos escuros sofre com o baixo contraste e a ausência de brilho mesmo em regiões escuras (preto), conforme observado no gráfico 11(b), apresentado no tópico anterior. A figura 63(a) apresenta a projeção de uma imagem toda em preta e a figura 63(b) ilustra o gráfico de luminância para esta imagem, ambas com correção de brilho e cor habilitada.

Figura 63 – Interferência do *black offset* em imagens escuras

Infelizmente, devido à tecnologia dos projetores adotados nos testes (DLP), estes emitem luz mesmo em imagens escuras (*black offset*). Desta forma, não há como suavizar, por software, a transição entre os projetores. Na figura 63(b) é possível identificar exatamente as áreas de intersecção, mesmo com o ajuste de brilho em áreas de intersecção (*edge blending*) habilitado.

Uma possível solução é – além de suavizar as áreas de intersecção – intensificar as áreas sem intersecção em cores escuras, homogeneizando a intensidade mais escura (preto) pelas regiões com maior intersecção (no caso, a região central, com quatro projetores). Porém, embora esta solução possibilite uma imagem mais homogênea, reduz o contraste da imagem por elevar a intensidade das áreas escuras. Atualmente, a biblioteca Fast Fusion não provê nenhum tipo de correção para áreas escuras.

4.1.2.5 Multiprojeção em múltiplos pontos de vista

Conforme a análise de projeção simples apresentada no tópico “Análise da tela e do projetor” (página 145), este tópico tem como objetivo analisar a distribuição de luminância em um sistema de multiprojeção de acordo com o ponto de vista do usuário.

Os gráficos 14(a, b e c) apresentam a distribuição da luminância (Y) nas três posições indicadas na figura 59 (página 143). Da mesma forma que num sistema de projeção simples (gráfico 10, página 146), não se observa nenhuma alteração significativa de acordo com o ponto de vista (lembrando que a tela utilizada é de baixo ganho).

Gráfico 14 – Variação de brilho de um sistema multiprojeto (2x2) em diferentes pontos de vista
Entretanto, ao subtrair o ponto de vista da direita com o da esquerda, existe uma variação de luminância, conforme apresentado no gráfico 14(d). A justificativa desta

variação é a mesma apresentada na análise com um único projetor (“Análise da tela e do projetor”, página 145).

O gráfico 15 (a, b e c) apresenta a subtração das imagens obtidas no sistema de multiprojeção em relação às imagens obtidas no sistema de projeção simples. Nesta análise, é possível notar que o sistema de multiprojeção tem uma luminância (Y) superior nos centros de cada projetor, o que evidencia melhor distribuição de brilho na tela.

Gráfico 15 – Diferença entre projeção simples e multiprojeção

O gráfico 15(d) apresenta a diferença entre a imagem direita com a esquerda dos sistemas de multiprojeção e projeção simples (subtração do gráfico 14(d) com o gráfico 10(d)). De acordo com este gráfico, conclui-se que um sistema de multiprojeção proporciona uma distribuição de luminância mais eficiente, uma vez que os ângulos de incidência dos feixes luminosos são mais perpendiculares do que em sistemas de projeção simples nas regiões mais distantes. A figura 64 exemplifica esta afirmação.

Figura 64 – Distribuição dos feixes de luz num sistema de projeção simples e num sistema com multiprojetores

Conforme observado na figura 64, nas áreas com projeção perpendicular há melhor distribuição em sistemas de multiprojeção, homogeneizando melhor o brilho da imagem final gerada.

Ressalte-se que dependendo das características de tela, a distância entre os projetores – embora ajude na distribuição da projeção – pode provocar deterioramento das áreas de sobreposição em razão da dependência do ponto de vista, conforme apresentado no tópico “Características de telas”, página 57. Como a tela utilizada nos teste é de baixo ganho, não foi observado este efeito.

4.2 DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Esta seção tem como objetivo analisar o desempenho computacional da biblioteca proposta, tanto no aspecto de impacto na aplicação gráfica, quanto no aspecto escalabilidade.

O computador utilizado nos testes foi o AMD Opteron Dual Core com quatro CPU's, memória de 3,5 GB, duas placas de vídeo NVidia Quadro FX 5600, totalizando quatro saídas de vídeo, rede gigabit e sistema operacional Windows XP Professional (*Service Pack 2*). Foram utilizados quatro projetores com resolução 1280x720 e as aplicações desempenharam na resolução 2560x1440.

4.2.1 Impacto na aplicação gráfica

Este tópico tem como objetivo analisar o impacto computacional nas aplicações gráficas com a inclusão da biblioteca de multiprojeção. Para estes testes, diversos aplicativos foram utilizados, tendo como métrica de comparação a taxa de quadros por segundo gerada. Este método já foi utilizado na literatura para medir desempenho em sistemas de multiprojeção (RAIJ, A. *et al.*, 2003).

A tabela 6 apresenta as medidas obtidas para diferentes aplicações, indicada a taxa de quadros por segundo com e sem a biblioteca de multiprojeção (MP).

Tabela 6 – Desempenho entre a aplicação gráfica com a biblioteca de multiprojeção desabilitada e habilitada

Executável	Quadros por segundo	
	Sem MP	Com MP
Ogre - Demo Fresnel	62,5 fps	51,4 fps
Ogre - Demo Grass	51,5 fps	47,6 fps
Ogre - Demo Ocean	65,6 fps	58,9 fps
Ogre - Demo Terrain	71,1 fps	64,7 fps
OpenSceneGraph - osgview cesnafire.osg	60,0 fps	60,0 fps
OpenSceneGraph - osgview spaceship.osg	60,0 fps	60,0 fps
TuxRacer	80,0 fps	80,0 fps
Simulador Passadiço (Baseado em Ogre)	54,0 fps	49,7 fps
Simulador Dirigível (Baseado em SDL e OpenSceneGraph)	21,5 fps	19,1 fps

Conforme demonstrado nos testes, é notável o impacto computacional gerado com a habilitação da biblioteca de multiprojeção. Em face do impacto provocado pela habilitação da biblioteca de multiprojeção, foi efetuada uma análise interna da biblioteca com o objetivo de identificar as atividades mais onerosas computacionalmente. A tabela 7 sumariza os dados obtidos nesta avaliação.

Tabela 7 – Distribuição de processamento interno da biblioteca Fast Fusion

Tarefa	%
Cópia do framebuffer (glCopyTexSubImage2D)	16,67%
Correção geométrica (glCallList)	62,50%
Correção de brilho e cor	20,83%

Embora, num primeiro momento, pareça que a obtenção da imagem (*framebuffer*) seja a tarefa mais demorada, a mesma é realizada pela placa de vídeo, o que é muito rápido. Mesmo em resoluções altas (2560x1440), este processo teve o impacto menos significativo.

O processo mais demorado foi a aplicação da correção geométrica. Tal processo, sumarizado no algoritmo 4, página 122, mesmo com o `glCallList`, mostrou-se lento em razão da aplicação da textura de alta resolução nos polígonos utilizados para efetuar a correção geométrica.

Versões futuras do Fast Fusion poderão executar a correção geométrica através de *vertex shader*, com a possibilidade de ganhos expressivos de desempenho.

A correção de brilho e cor (explicada no tópico “Correção de brilho e cor”, página 127) também produziu impacto computacional na aplicação gráfica, porém em escala menos expressiva. Considerando que a correção de cor é aplicada em todo projetor uniformemente, a correção mais elaborada da cor em áreas ou pixels pode proporcionar significativo impacto na aplicação gráfica.

Com a adoção do *pixel shader* pode-se minimizar os impactos computacionais ocasionados pelas correções de brilho e cor.

4.2.2 Escalabilidade

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion não apresenta limitação na escalabilidade da aplicação gráfica, pois atua individualmente sobre cada projetor, independente da

quantidade total de projetores existentes no sistema. A escalabilidade depende exclusivamente da aplicação gráfica, tendo como única influência o impacto computacional em cada instância gráfica devido ao uso da biblioteca, conforme estudado no tópico anterior. Entretanto, o tempo de processamento necessário para realizar a calibração dos projetores é influenciado pela quantidade de projetores existentes no sistema.

A biblioteca Fast Fusion propõe método inovador que proporciona melhoria significativa no processo de calibração quando utilizadas várias câmeras, apresentado no tópico “Escalabilidade”, página 97. Porém, devido à indisponibilidade de equipamentos para testes em larga escala, não foi possível realizar testes para obter valores quantitativos de escalabilidade.

Foram realizados testes de desempenho de calibração individual de projetores com apenas uma câmera de calibração, com resolução VGA 640x480. Neste cenário, o tempo de captura por amostra (padrão de calibração) foi de 0,93s, com desvio padrão de 0,19s, variando de acordo com a luz e a posição da câmera. Este é o tempo necessário para enviar a requisição para os projetores, aguardar a confirmação de projeção do padrão solicitado de calibração, solicitar a imagem da câmera, reconhecer as coordenadas dos círculos e transmiti-las pela rede.

Considerando que o padrão da biblioteca é uma grade de círculo de 5x6, é preciso $\lceil \log_2(n \times m + 1) \rceil = \lceil \log_2(5 \times 6 + 1) \rceil = 5$ amostras por projetor, o que representa um tempo total gasto para a calibração de 4,65s por projetor. Em notação Grande-O⁴⁵, a complexidade pode ser definida como $O(n \times m + r)$, onde n é a quantidade de projetores, m a quantidade de amostras por projetor e r o tempo de captura da imagem de referência, utilizado para subtrair as imagens capturadas. Como o tempo de obtenção da imagem de referência é constante (0,65s), pode ser desconsiderado na análise da complexidade.

O tempo de processamento para calcular a máscara de contribuições e gerar o mapa de ajuste de brilho e cor é de 2,25s, com desvio padrão de 0,137s. Cada instância é responsável pelo cálculo da calibração de brilho e cor de seus respectivos projetores, o que proporciona uma complexidade $O(1)$, utilizando a notação Grande-O.

⁴⁵ A notação do Grande-O ou notação assintótica (em inglês: *Big-O Notation*) é uma notação matemática utilizada para analisar o comportamento assintótico de uma função.

Como exemplo, num sistema tipo CAVE com dimensão $3m \times 3m \times 3m$ e com resolução retina (8103×8103), composto por 112 projetores por tela com resolução de 1280×720 cada, dispostos em grade 8×14 , seria preciso $4,65s \times 112 = 8m\ 40,8s$ para realizar a calibração de cada tela. Considerando que exista uma câmera de calibração por tela, as telas podem ser calibradas concomitantemente.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou e discutiu os resultados obtidos pela biblioteca desenvolvida nesta tese no âmbito científico. A análise da precisão da calibração geométrica dos projetores mostrou-se eficiente, com alinhamentos subpixel dos projetores mesmo utilizando câmeras de calibração contendo uma fração da resolução do sistema de projeção. Desta análise, estima-se a viabilidade de desenvolver sistemas de multiprojeção com resolução retina.

As análises obtidas a partir das variações de brilho e cor na imagem de projeção em ambientes de multiprojeção evidenciaram as dificuldades em estabelecer correções eficientes devido a fatores como características de tela (fator de ganho) e deficiência nas tecnologias de projeção (presença de brilho em imagens escuras – *black offset*). Foi realizada uma análise de distribuição de brilho entre sistemas de multiprojeção e sistemas de projeção simples. Os sistemas de multiprojeção mostraram-se mais eficientes neste aspecto.

O impacto computacional proporcionado pela inclusão do sistema de multiprojeção na aplicação gráfica não foi expressivo, mas evidenciou a importância de futuros aprimoramentos. Constatou-se, ainda, que a biblioteca de multiprojeção não interfere na escalabilidade da aplicação gráfica, mas o tempo gasto no processo de calibração é influenciado pela dimensão do sistema. Esta tese apresentou um novo conceito de agrupamento de projetores baseado em câmeras, de modo a possibilitar a redução do tempo total de calibração em grandes ambientes de multiprojeção.

5 APLICAÇÕES E ANÁLISES QUALITATIVAS

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion – desenvolvida ao longo desta tese – auxiliou ou até mesmo viabilizou diversos projetos de realidade virtual. Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir alguns destes projetos e destacar os impactos alcançados no âmbito científico e social decorrentes da pesquisa realizada nesta tese.

5.1 REDE GALILEU – SALA DE PROJEÇÃO PETROBRÁS (2008-2010)

Trata-se de projeto surgido de iniciativa conjunta do CENPES/PETROBRÁS (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello) e de centros de excelência em pesquisa COPPE/UFRJ, USP, PUC/RJ, UFAL e ITA. A Rede Galileu tem como objetivo desenvolver soluções em visualização científica, modelagem computacional e computação de alto desempenho dirigidas para os problemas da indústria de óleo e gás.

Como participante da rede, a USP detém diversos subprojetos nas áreas de computação científica, simulação e visualização em ambientes virtuais. O sistema de multiprojeção proposto nesta tese originou-se, em parte, em função da necessidade de desenvolver sistemas de realidade virtual de custo reduzido com as mesmas qualidades de sistemas avançados de alto poder aquisitivo. O interesse da rede Galileu nesta pesquisa surgiu pela necessidade da implantação de centros de realidade virtual em todas as instituições da rede temática Galileu. Contudo, a implantação de todos estes centros de realidade virtual apresenta custo proibitivo com a adoção de tecnologias convencionais.

O subprojeto número 1822-05 denominado “Desenvolvimento e Implantação de um Sistema de Projeção de Baixo Custo” foi proposto e aprovado para prover sistemas de realidade virtual de baixo custo para as instituições participantes da rede Galileu. Este projeto subsidiou grande parte das pesquisas e dos equipamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

O Sistema de Projeção de baixo custo viabiliza a disseminação das tecnologias de realidade virtual para os centros de pesquisa da rede Galileu sem a necessidade de realizar gastos elevados com soluções proprietárias de alto custo. O primeiro centro de visualização que utilizou a tecnologia de multiprojeção proposta neste trabalho foi o laboratório de Tanque de Provas Numérico (TPN), localizado na Escola Politécnica da USP, inaugurado no dia 01 de Dezembro de 2009. A figura 65 apresenta a sala de conferência montada para esta inauguração.

Figura 65 – Sala de videoconferência do prédio TPN da Petrobrás

Figura 66 – Autoridades do governo e da Petrobrás durante a inauguração

Nesta ocasião, diversas autoridades do governo e da Petrobrás visitaram a sala de conferência com o sistema de multiprojeção (figura 66), composto por quatro

projetores dispostos em grade (2x2). Foram apresentados, no dia da inauguração, um vídeo 3D e visualização 3D em tempo real da plataforma MonoBR.

Graças aos resultados alcançados neste projeto – obtidos pelo desenvolvimento do sistema de multiprojeção proposto nesta tese – diversos projetos relativos à construção de sistemas de grande porte (com telas de até 15 metros), assim como sistemas tipo CAVE, estão atualmente em prospecção na Petrobrás.

5.2 CASA BRASIL EM JOHANNESBURG – COPA DO MUNDO (2010)

A Casa Brasil é uma parceria entre os Ministérios do Esporte, do Turismo, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio, da Ciência e Tecnologia e das Relações Exteriores, Apex⁴⁶, Embratur⁴⁷, FINEP⁴⁸, SECOM⁴⁹, o comitê organizador local da Copa FIFA de 2014 no Brasil e as doze cidades sede brasileiras. O espaço tem mais de três mil metros quadrados e convida a um passeio pela história do futebol brasileiro, pelas tecnologias inovadoras desenvolvidas no país, artes, música, natureza, arquitetura, gastronomia e a alegria do povo brasileiro.

O projeto 14 Bis foi financiado pela FINEP e montado dentro da Casa Brasil em Johannesburg, África do Sul. O projeto 14 Bis teve como objetivos encantar, surpreender e emocionar o mundo para a Copa de 2014 no Brasil e apresentou diversas demonstrações tecnológicas no Pavilhão Brasileiro na África do Sul. Diversas autoridades mundiais visitaram a Casa Brasil, incluídos o presidente da FIFA, o presidente da CBF e o presidente da República do Brasil na ocasião, Luis Inácio Lula da Silva, além de inúmeros turistas de diversas nacionalidades.

A USP desenvolveu e apresentou uma das principais demonstrações da Casa Brasil: um sistema de realidade virtual que simula passeios aéreos pelos principais pontos turísticos da cidade do Rio de Janeiro (uma das cidades-sede da Copa de 2014 no Brasil). O passeio virtual sobre a cidade do Rio de Janeiro consistiu na construção de um ambiente de realidade virtual que simula voos sobre a cidade do Rio de Janeiro através de dois módulos de voo independentes e interativos: Paraglider e Dirigível.

⁴⁶ APEX: Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos.

⁴⁷ Embratur: Instituto Brasileiro de Turismo.

⁴⁸ FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos.

⁴⁹ SECOM: Secretaria de Comunicação da Presidência da República.

Os passeios foram ambientados em um sistema imersivo com elementos cenográficos, caracterizados pelas temáticas de cada módulo. A figura 67 apresenta a montagem realizada pela equipe da USP em Johannesburg, África do Sul.

Figura 67 – Montagem do simulador de dirigível em Johannesburg

Na construção do simulador de dirigível, utilizou-se uma tela de 3,20m de largura por 1,80m de altura. Devido à distância do usuário em relação à tela (aproximadamente 1,5m), foi essencial uma projeção de alta resolução, caso contrário, a baixa resolução comprometeria significativamente a qualidade da simulação. Além disso, devido à falta de espaço, seria inviável para um único projetor cobrir toda a tela de projeção, uma vez que a distância de tiro era bem restrita (ver figura 67).

Com a biblioteca de multiprojeção Fast Fusion, foi possível utilizar quatro projetores em grade 2x2 e apresentar uma imagem de alta definição para os usuários do simulador de dirigível. A figura 68 apresenta a estrutura montada com quatro projetores e a tela de projeção.

Figura 68 – Simulador de dirigível com quatro projetores

Durante os 30 dias de funcionamento (de 11 de Junho até 11 de Julho de 2010), o simulador ficou em operação seis horas por dia, sete dias por semana. Durante este período, inúmeros usuários de todo o mundo puderam desfrutar do simulador com tecnologia totalmente nacional. Neste período, a biblioteca de multiprojeção mostrou ser robusta e prática, pois havia a necessidade de calibrar o sistema periodicamente devido à precariedade da estrutura dos projetores (ver figura 68).

Tanto a calibração geométrica quanto a correção de brilho e cor criaram uma imagem tal que havia a ilusão de existir um único projetor. A figura 69 ilustra a interação dos usuários (autor à esquerda e crianças africanas à direita) com o simulador.

Figura 69 – Simulador de dirigível sobre a cidade do Rio de Janeiro

Entre os dias 17 e 23 de Janeiro de 2011, este simulador foi apresentado na feira Campus Party, realizada em São Paulo. O simulador foi apresentado na área do Banco do Brasil.

5.3 SIMULADOR PASSADIÇO – MARINHA (2008-2010)

A CAVERNA Digital, em parceria com o Centro de Adestramento Almirante Marques de Leão da Marinha do Brasil (CAAML), utilizados recursos da FINEP, desenvolveram um projeto de construção do Simulador Passadiço do navio porta aviões São Paulo. A equipe da Caverna Digital da USP foi responsável por tais tarefas: (a) criação do ambiente virtual, (b) programação do software de visualização e (c) automação dos mecanismos de interação.

A figura 70 apresenta a sala de Simulação do Passadiço, inspirada no passadiço real do navio porta aviões São Paulo. O simulador foi instalado na base da Marinha na cidade do Rio de Janeiro com o objetivo de complementar o treinamento aplicado aos operadores de navegação.

Figura 70 – Sala de visualização do Simulador Passadiço

O Simulador Passadiço utiliza a biblioteca proposta nesta tese e é composto por três telas perpendiculares com dimensões de 3,5m, 6m e 3,5m de largura respectivamente, e 2,4m de altura. Devido à ampla dimensão da tela frontal e à proximidade dos usuários em relação à tela (ver figura 70), foram utilizados dois projetores para gerar a imagem da tela frontal. A figura 71 mostra a estrutura da tela e os dois projetores utilizados na tela frontal.

Figura 71 – Sistema de multiprojeção do Simulador Passadiço

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion não impactou o desempenho do simulador significativamente. O Simulador Passadiço exige cálculos avançados e projeção sofisticada do cenário e navios modelados a fim de proporcionar uma sensação realista dentro da sala do Simulador.

5.4 MUSEU CATAVENTO – PASSEIO DIGITAL (2007-2009)

Figura 72 – Planta do Passeio Digital do Museu Catavento Cultural e Educacional (extraído de Teubl *et al.*(2009))

O Governo do Estado de São Paulo inaugurou, no dia 27 de Março de 2009, o Museu Catavento Cultural e Educacional⁵⁰ no Palácio das Indústrias, situado no Centro de São Paulo. Dentre as atrações do Museu, a CAVERNA Digital da USP desenvolveu um passeio virtual pela cidade do Rio de Janeiro através de sistema imersivo de realidade virtual.

⁵⁰ <http://www.cataventocultural.org.br>

A aplicação proporciona ao visitante a sensação de sobrevoar a cidade do Rio de Janeiro e seus diversos pontos turísticos, como o Estádio do Maracanã, o Pão de Açúcar, o Cristo Redentor e a Praia de Copacabana.

O sistema é composto por um sistema tipo CAVE de 3 lados, com duas telas laterais de 3,5 metros de largura por 2,40 de altura e uma tela frontal de 6 metros por 2,40, cobrindo 270 graus do campo de visão dos visitantes. A figura 72 apresenta a planta de instalação do sistema de realidade virtual no museu.

Na construção da aplicação foram utilizados quatro pares de projetores com estereoscopia passiva (polarização linear), sendo um par de projetores em cada lado, e dois pares na tela frontal. A figura 73 apresenta a estrutura de projeção do Passeio Digital.

Figura 73 – Sistema com oito projetores do Passeio Digital (extraído de Teubl *et al.*(2009))

Na época da implantação, desenvolveu-se uma biblioteca de multiprojeção precursora da biblioteca de multiprojeção Fast Fusion para prover calibração geométrica na tela frontal. O sistema de multiprojeção, na época, era calibrado manualmente e suportava apenas dois projetores horizontais. Embora simples, gerou bons resultados visuais (TEUBL, F. *et al.*, 2009).

Este projeto teve grande importância para o desenvolvimento da biblioteca de multiprojeção Fast Fusion e gerou conhecimentos essenciais para a concepção e a elaboração da nova arquitetura de multiprojeção proposta nesta tese.

5.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou e discutiu os resultados qualitativos obtidos pela biblioteca desenvolvida nesta tese no âmbito tecnológico.

Foram apresentados os resultados obtidos em diversos projetos que utilizaram esta biblioteca. Constatou-se, através destes projetos, a flexibilidade do sistema de multiprojeção, o qual foi incorporado em diversos tipos de aplicações gráficas. Demonstrou-se, também, a robustez do sistema de multiprojeção proposto, pois diversos projetos demandaram bastante tempo de operação.

6 CONCLUSÃO

Sistemas de multiprojeção utilizam múltiplos projetores para apresentar o conteúdo da aplicação gráfica. O uso de multiprojeção pode trazer inúmeros benefícios ao ambiente de realidade virtual, tais como:

- a) Aumento da resolução e do brilho da projeção decorrente da somatória das contribuições dos projetores;
- b) Suporte a superfícies arbitrárias de projeção, desde que a biblioteca de multiprojeção seja capaz de ajustar geometricamente a imagem gerada pela aplicação gráfica;
- c) Redução do investimento para aquisição dos equipamentos, pois é possível o emprego de componentes convencionais de menores custos sem comprometer a resolução e o brilho;
- d) Menor custo de manutenção na hipótese de empregar projetores convencionais;
- e) Facilidade na distribuição do processamento gráfico, considerando que os computadores – conectados aos projetores – já colaboram naturalmente com regiões específicas da tela, sem a necessidade de reconstruir o conteúdo pelo software;
- f) Permite o investimento gradativo do sistema de realidade virtual devido a sua alta escalabilidade.

Os sistemas de multiprojeção devem prover algoritmos eficientes de calibração para iludir os usuários e fazê-los acreditar na ausência dos múltiplos computadores e projetores. Além disso, o sincronismo entre as instâncias gráficas presentes no sistema não deve apresentar desigualdades temporais entre as imagens geradas por cada projetor.

Esta tese desenvolveu, propôs e analisou os resultados da biblioteca de multiprojeção Fast Fusion com o objetivo de viabilizar sistemas de multiprojeção com

quantidade massiva de computadores e projetores, o que proporcionará quebras de paradigmas em sistemas de realidade virtual.

Foram apresentados nesta tese a motivação do tema, a revisão da literatura, os conceitos e as técnicas empregadas em multiprojeção e a arquitetura do sistema proposto, assim como a descrição das ferramentas e aplicações auxiliares utilizadas na validação do Fast Fusion.

Também foram expostos e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa, com análises quantitativas e qualitativas da biblioteca de multiprojeção proposta. Por fim, foram arrolados os projetos que adotaram o sistema Fast Fusion, o qual aprimorou ou até mesmo viabilizou o desenvolvimento dos sistemas de realidade virtual destes projetos.

6.1 CONTRIBUIÇÕES OBTIDAS

Através desta pesquisa, foi possível estudar, desenvolver e implantar soluções de realidade virtual baseadas em multiprojeção. Diversas contribuições foram alcançadas, tanto no âmbito científico – através das arquiteturas e dos algoritmos propostos – quanto tecnológico – através da viabilização de projetos de grande impacto social.

Podem ser destacadas as seguintes contribuições científicas:

- a) Adaptação de algoritmos e técnicas de calibração consolidados na literatura, tanto para alinhamento geométrico dos projetores quanto para o ajuste de brilho e cor;
- b) Modelo de agrupamento de projetores/computadores baseado em câmeras, o que permite a reconstrução hierárquica e a automatizada dos componentes do sistema com o objetivo de facilitar o balanceamento de processamento gráfico (tanto pela biblioteca de multiprojeção quanto pela aplicação gráfica) e minimizar o tempo necessário de calibração;
- c) Proposta de uma arquitetura escalável, o que viabiliza o desenvolvimento de sistemas de multiprojeção em larga escala como, por exemplo, a concepção

de um sistema tipo CAVE com resolução retina, composto por centenas de computadores e projetores;

- d) Procedimentos para análises quantitativas de sistemas de multiprojeção, tanto para qualidade visual (calibração geométrica e ajuste de brilho e cor) quanto para desempenho computacional (impacto na aplicação gráfica e escalabilidade).

As contribuições tecnológicas e sociais foram:

- a) Impacto social, com o desenvolvimento de diversos projetos de grande relevância que utilizaram a biblioteca proposta, tal como o sistema de realidade virtual composto por três telas implantado no museu Catavento Educacional e Cultural – que recebe centenas de visitantes diariamente – e o simulador de dirigível apresentado na África do Sul durante a Copa do Mundo de 2010 que recebeu a visita de diversas autoridades mundiais, incluindo presidentes, governadores, ministros, diretores, dentre outros;
- b) Viabilização de projetos nacionais, como o projeto do simulador passadiço desenvolvido para a marinha do Brasil, cujas dimensões de tela só foram possíveis devido à biblioteca de multiprojeção Fast Fusion;
- c) Redução de custo para aquisição e instalação de sistemas de realidade virtual, em especial para o projeto Petrobrás (rede Galileu) em razão de suas necessidades para a multiplicação de ambientes de realidade virtual nos centros de pesquisa e desenvolvimento.

Há a previsão de diversos outros projetos que utilizarão a biblioteca proposta nesta tese, tal como a atualização da CAVERNA Digital da USP, o que permitirá o aprimoramento da biblioteca a partir de estudos e desenvolvimentos a serem realizados por diversos pesquisadores.

6.2 APRIMORAMENTOS PREVISTOS

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion teve como principal foco atender às demandas de projetos e viabilizar a criação de sistemas de realidade virtual de alta escala, com grande quantidade de projetores e computadores. Há diversas funcionalidades futuras para o Fast Fusion. Abaixo, são arroladas as principais funcionalidades não suportadas pela versão atual da biblioteca de multiprojeção:

- a) Uso de múltiplas câmeras para aumentar a área de cobertura e precisão de calibração geométrica. O suporte de múltiplas câmeras é suportado apenas para ambientes multifacetados com uma câmera de calibração por tela;
- b) Suporte a superfícies de projeção arbitrárias, seja através de reconstrução de superfícies com multicâmeras, seja através da parametrização manual da superfície;
- c) Calibração completamente automatizada de brilho e cor, sem necessidade de intervenção humana;
- d) Uso de *shader* para maximizar o desempenho computacional, tanto na correção geométrica quanto na correção de brilho e cor dos projetores, minimizando o impacto computacional nas aplicações gráficas.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

Além das implementações complementares expostas no tópico anterior, poderão ser desenvolvidos diversos recursos avançados de multiprojeção, como a extensão do Fast Fusion, que permitirá a elaboração de aplicações gráficas inéditas. Este tópico arrola algumas possíveis aplicações.

Em uma projeção frontal, poderá ser possível aumentar as intersecções entre os projetores, ou até mesmo duplicá-las, de forma que a câmera possa detectar a posição dos usuários e compensar as sombras ocasionadas pelo bloqueio dos raios de projeção. Espera-se que sempre que o usuário esteja na frente de um projetor, outro projetor compense o brilho automaticamente, possibilitando o uso de projeção frontal em locais em que os usuários permaneçam muito próximos à tela.

É possível o desenvolvimento, ainda, de ajuste de mistura de borda de acordo com a posição do usuário a fim de possibilitar o uso de múltiplos projetores em telas de alto ganho. Para tal ajuste, o sistema deverá rastrear o ponto de vista do usuário e corrigir a variação de brilho dos projetores nas áreas de intersecção.

Ainda, poderão ser desenvolvidos métodos de calibração contínua com parametrização automática de superfícies utilizando múltiplas câmeras, o que permitirá a projeção em superfícies complexas e em movimento, tais como numa bandeira tremulando (alterando o seu conteúdo dinamicamente), num manequim ou em pessoas (projeção de modelos de vestuário), em maquetes (para apresentar informações aos usuários) e em muitos outros.

Enfim, poderá ser desenvolvido um sistema tipo CAVE composto por milhares de projetores e computadores, com resolução retina e de alto processamento gráfico, capaz de apresentar ambientes virtuais ultrarealistas.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas de multiprojeção envolvem diversas áreas da ciência da computação e da engenharia, desde processamento de imagens, redes de interconexão, processos gráficos e álgebra avançada, até tecnologias de projetores e composição de telas. Esta tese apresentou grande parte dos desafios e das soluções na área de multiprojeção, em especial, os sistemas de calibração automatizados baseados em câmera.

Evidenciou-se, ao longo desta pesquisa, a importância acerca do tema, e graças às soluções providas pelos sistemas de multiprojeções existentes na literatura, foi possível quebrar diversos paradigmas no âmbito de realidade virtual.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, G.; EICHLER, J. **Holography: A Practical Approach**. Wiley-VCH, 2007.

ANDREWS, E. Moore's Law: Standing the Test of Time. In: **Intel IDF**. Intel Corporation, Santa Clara, CA 95052-8119, 2009. Disponível em: <http://download.intel.com/pressroom/kits/events/idffall_2009/pdfs/Moores_Law_Backgrounder.pdf>. Acesso em: 25 de Maio de 2011.

ASHDOWN, M., FLAGG, M., SUKTHANKAR, R., REHG, J.M. A Flexible Projector-Camera System for Multi-Planar Displays. In: **Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, v. 2 p. 165-172. 2004. Disponível em: <<Go to ISI>://000223605500023>. Acesso em: 25 de Maio de 2011.

BAAR, V., WILLWACHER, T., RAO, S., RASKAR, R. Seamless Multi-Projector Display on Curved Screens. In: **Proceedings of the workshop on Virtual environments**, p. 281-286. ACM, Zurich, Switzerland, 2003.

BALL, R.; NORTH, C. Effects of Tiled High-Resolution Display on Basic Visualization and Navigation Tasks. In: **CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems**, p. 1196-1199. ACM, Portland, OR, USA, 2005.

BHASKER, E. S., SINHA, P., MAJUMDER, A. Asynchronous Distributed Calibration for Scalable and Reconfigurable Multi-Projector Displays. In: **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 12 n. 5 p. 1101-1108. Sep-Oct, 2006. Disponível em: <<Go to ISI>://000241383300057>. Acesso em: 25 de Maio de 2011.

BIMBER, O, WETZSTEIN, G., EMMERLING, A., NITSCHKE, C. Enabling View-Dependent Stereoscopic Projection in Real Environments. In: **Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality**, p. 14-23. IEEE Computer Society, 2005.

BOURKE, P. **Edge Blending Using Commodity Projectors**. The University of Western Australia, 2004. Disponível em: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/texture_colour/edgeblend/>. Acesso em: 16 de Junho de 2010.

BRENNESHOLTZ, M. S.; STUPP, E. H. **Projection Displays**. 2. ed. Hoboken, NJ: J. Wiley and Sons, 2008. (Wiley Series in Display Technology).

BROWN, M., MAJUMDER, A., YANG, R. Camera-Based Calibration Techniques for Seamless Multiprojector Displays. In: **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 11 n. 2 p. 193-206. 2005.

BROWN, M. S.; SCALES, W. B. A Practical and Flexible Tiled Display System. In: **10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Proceedings**, p. 194-203. 2002. Disponível em:<<Go to ISI>://000179050900020>. Acesso em: 25 de Maio de 2011.

CHANG, N. L. A.; DAMERA-VENKATA, N. **Method for Reducing View-Dependent Artifacts in Multi-Projector System, Involves Estimating View-Dependent Projection Parameters and Computing Rendering Parameters for Each Projector, Using Computer to Reduce View-Dependent Artifact.** WO2010138128-A1, 2 de Dezembro, 2010.

CHEN, C.; SCHONFELD, D. Pose Estimation from Multiple Cameras Based on Sylvester's Equation. In: **Computer Vision and Image**, v. 114 n. 6 p. 652-666. 2010.

CHEN, H., SUKTHANKAR, R., WALLACE, G., LI, K. Scalable Alignment of Large-Format Multi-Projector Displays Using Camera Homography Trees. In: **Vis 2002: IEEE Visualization 2002, Proceedings**, p. 339-346 583. 2002. Disponível em:<<Go to ISI>://000179397800041>. Acesso em: 25 de Maio de 2011.

CHEN, Y., CLARK, D.W., FINKELSTEIN, A., HOUSEL, T.C., LI, K. Automatic Alignment of High-Resolution Multi-Projector Display Using an Un-Calibrated Camera. In: **IEEE Visualization**. 2000.

COTTING, D., NAEF, M., GROSS, M., FUCHS, H. Embedding Imperceptible Patterns into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display. In: **Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality**, p. 100-109. IEEE Computer Society, 2004.

COTTING, D., FUCHS, H., ZIEGLER, R., GROSS, M.H. Adaptive Instant Displays: Continuously Calibrated Projections Using Per-Pixel Light Control. In: **Computer Graphics Forum**, v. 24 p. 705-714. Setembro, 2005.

DAMERA-VENKATA, N.; CHANG, N. L. On the Resolution Limits of Superimposed Projection. In: **2007 IEEE International Conference on Image Processing, Vols 1-7**, p. 2625-2628 3371. 2007a. Disponível em:<<Go to ISI>://000253487202055>. Acesso em: 20 de Maio de 2011.

_____. Realizing Super-Resolution with Superimposed Projection. In: **2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vols 1-8**, p. 3504-3511. 2007b. Disponível em:<<Go to ISI>://000250382807015>. Acesso em: 18 de Maio de 2011.

_____. Display Supersampling. In: **Acm Transactions on Graphics**, v. 28 n. 1 p. -. Jan, 2009. Disponível em:<<Go to ISI>://000263565100009>. Acesso em: 18 de Maio de 2011.

DAMERA-VENKATA, N., CHANG, N., DICARLO, J. A Unified Paradigm for Scalable Multi-Projector Displays. In: **IEEE Transactions on Visualization and Computer**

Graphics, v. 13 n. 6 p. 1360-1367. Nov-Dec, 2007. Disponível em:<<Go to ISI>://000250401100040>. Acesso em: 10 de Março de 2011.

DAVALATH, M., SANFORD, M., AGANA, A., MCNAMARA, A., PARKE, F. Evaluating Performance in Immersive Displays. In: **ACM SIGGRAPH 2010 Posters**, p. 1. ACM, Los Angeles, California, 2010.

DIETZ, P., RASKAR, R., BOOTH, S., BAAR, J.V., WITTENBURG, K., KNEP, B. Multi-Projectors and Implicit Interaction in Persuasive Public Displays. In: **Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces**, p. 209-217. ACM, Gallipoli, Italy, 2004.

EIN-DOR, P. Grosch's Law Re-Revisited: Cpu Power and the Cost of Computation. In: **Communications of the ACM**, v. 142-151 n. 2. Fevereiro, 1985.

FARSHIDI, F., SIROUSPOUR, S., KIRUBARAJAN, T. Robust Sequential View Planning for Object Recognition Using Multiple Cameras. In: **Image Vision Comput.**, v. 27 n. 8 p. 1072-1082. 2009.

HARVILLE, M., CULBERTSON, B., SOBEL, I., GELB, D., FITZHUGH, A., TANGUAY, D. Practical Methods for Geometric and Photometric Correction of Tiled Projector. In: **Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW)**, p. 5. IEEE Computer Society, 2006.

HERELD, M., JUDSON, I., STEVENS, R. Introduction to Building Projection-Based Tiled Display Systems. In: **Ieee Computer Graphics and Applications**, v. 20 n. 4 p. 22-28. Jul-Aug, 2000. Disponível em:<<Go to ISI>://000087793500007>. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2011.

HUMPHREYS, G.; HANRAHAN, P. A Distributed Graphics System for Large Tiled Displays. In: **IEEE Visualization**. 1999.

HUMPHREYS, G., HOUSTON, M., NG, R., FRANK, R., AHERN, S., KIRCHNER, P.D., KLOSOWSKI, J.T. Chromium: A Stream-Processing Framework for Interactive Rendering on Clusters. In: **Acm Transactions on Graphics**, v. 21 n. 3 p. 693-702. Jul, 2002. Disponível em:<<Go to ISI>://000176671100060>. Acesso em: 25 de Novembro de 2010.

JIANG, Z., LUO, X., MAO, Y., ZANG, B., LIN, H., BAO, H. Interactive Browsing of Large Images on Multi-Projector Display Wall System. In: **Proceedings of the 12th international conference on Human-computer interaction: interaction platforms and techniques**, p. 827-836. Springer-Verlag, Beijing, China, 2007.

JOHNSON, T.; FUCHS, H. Real-Time Projector Tracking on Complex Geometry Using Ordinary Imagery. In: **IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**. 2007.

JOHNSON, T., WELCH, G., FUCHS, H., FORCE, E.I., TOWLES, H. A Distributed Cooperative Framework for Continuous Multi-Projector Pose Estimation. In:

Proceedings of the 2009 IEEE Virtual Reality Conference, p. 35-42. IEEE Computer Society, 2009.

JOHNSON, T. M. **A Cooperative Approach to Continuous Calibration in Multi-Projector Displays**. 2009. 127 p. - Computer Science, The University of North Carolina, Chapel Hill, 2009. Disponível em:<<http://proquest.umi.com/pqdlink?did=1945358571&Fmt=7&clientId=61611&RQT=309&VName=PQD>>. Acesso: 25 de Maio de 2011.

KIM, T., SEO, D.W., CHAE, H.U, JO, K.H. Auto-Surveillance for Object to Bring in/out Using Multiple Camera. **In: Proceedings of the 5th international conference on Emerging intelligent computing technology and applications**, p. 595-604. Springer-Verlag, Ulsan, South Korea, 2009.

LI, K., CHEN, H., CHEN, Y., CLARK, D.W., COOK, P., DAMIANAKIS, S., ESSL, G., FINKELSTEIN, A., FUNKHOUSER, T., HOUSEL, T., KLEIN, A., LIU, Z., PRAUN, E., SAMANTA, R., SHEDD, B., SINGH, J.P., TZANETAKIS, G., ZHENG, J. Early Experiences and Challenges in Building and Using a Scalable Display Wall System. **In: Computer Graphics and Applications**. 2000.

MAJUMDER, A.; BROWN, M. S. **Practical Multi-Projector Display Design**. Wellesley, Mass.: A K Peters, 2007. 239 p.

MAJUMDER, A.; GOPI, M. Modeling Color Properties of Tiled Displays. **In: Computer Graphics Forum**, v. 24 n. 2 p. 149-163. 2005. Disponível em:<<Go to ISI>://000230343400003>. Acesso em: 13 de Abril de 2011.

MAJUMDER, A.; IRANI, S. Perception-Based Contrast Enhancement of Images. **In: Acm Transactions on Applied Perception**, v. 4 n. 3 p. -. Nov, 2007. Disponível em:<<Go to ISI>://000207052200004>. Acesso em: 25 de Março de 2011.

MAJUMDER, A., MEENAKSHISUNDARAM, G., SEYED, S. **Color Seamlessness Across Tiled Multi-Projector Display**. WO2010129361-A2, 11 de Novembro, 2010.

MAJUMDER, A.; STEVENS, R. Color Nonuniformity in Projection-Based Displays: Analysis and Solutions. **In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 10 n. 2 p. 177-188. Mar-Apr, 2004. Disponível em:<<Go to ISI>://000188810600007>. Acesso em: 21 de Dezembro de 2010.

_____. Perceptual Photometric Seamlessness in Projection-Based Tiled Displays. **In: ACM Trans. Graph.**, v. 24 n. 1 p. 118-139. 2005.

MOORE, G. E. Cramming More Components onto Integrated Circuits. **In: Eletronics**, v. 38 n. Eletronics. 19 de Abril, 1965.

_____. Progress in Digital Integrated Eletronics. **In: IEEE International Electron Devices Meeting**, p. 11-13. 1975.

PARK, S.C., PARK, M.K., KANG, M.G. Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview. **In: IEEE Signal Processing Magazine**, v. 20 n. 3 p. 21-36. May, 2003. Disponível em:<<Go to ISI>://000182495400006>. Acesso em: 13 de Janeiro de 2011.

QU, W., SCHONFELD, D., MOHAMED, M. Distributed Bayesian Multiple-Target Tracking in Crowded Environments Using Multiple Collaborative Cameras. **In: EURASIP J. Appl. Signal Process.**, v. 2007 n. 1 p. 21-21. 2007.

RAIJ, A., GILL, G., MAJUMDER, A., TOWLES, H., FUCHS, H. Pixelflex2: A Comprehensive, Automatic, Casually-Aligned Multi-Projector Display. **In: IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems**. 2003.

RAIJ, A.; POLLEFEYS, M. Auto-Calibration of Multi-Projector Display Walls. **In: International Conference on Pattern Recognition**, v. 1. 2004.

RASKAR, R.; BAAR, J. V. Low-Cost Multi-Projector Curved Screen Displays. **In: International Symposium Society for Information Display (SID)**. Boston, Massachusetts, 2005.

RASKAR, R., BROWN, M., YANG, R., CHEN, W.C., WELCH, G., TOWLES, H., SEALES, B., FUCHS, H. Multi-Projector Displays Using Camera-Based Registration. **In: IEEE Visualization**. 1999.

RASKAR, R., BAAR, J.V., RAO, S., WILLWACHER, T. **Multi-Projector Imagery on Curved Surfaces**. Serie Editor. MERL. 2004.

RASKAR, R., BAAR, V., WILLWACHER, T., RAO, S. Quadric Transfer for Immersive Curved Screen Displays. **In: Eurographics**, v. 23 p. 451-460. 2004.

RASKAR, R., BAAR, J., BEARDSLEY, P., WILLWACHER, T., RAO, S., FORLINES, C. Ilamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors. **In: Acm Transactions on Graphics**, v. 22 n. 3 p. 809-818. Jul, 2003. Disponível em:<<Go to ISI>://000184291700073>. Acesso em: 12 de Janeiro de 2011.

ROMAN, P., LAZAROV, M., MAJUMDER, A. A Scalable Distributed Paradigm for Multi-User Interaction with Tiled Rear Projection Display Walls. **In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 16 n. 6 p. 1623-1632. Novembro e Dezembro, 2010. Disponível em:<<Go to ISI>://000283758600085>. Acesso em: 22 de Maio de 2011.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. 5. ed. Boca Raton: CRC/Taylor and Francis, 2007. 817 p.

SAJADI, B., LAZAROV, M., GOPI, M., MAJUMDER, A., Color Seamlessness in Multi-Projector Displays Using Constrained Gamut Morphing. **In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 15 n. 6 p. 1317-1325. Novembro e Dezembro, 2009. Disponível em:<<Go to ISI>://000270778900060>. Acesso em: 21 de Maio de 2011.

SAJADI, B.; MAJUMDER, A. Scalable Multi-View Registration for Multi-Projector Displays on Vertically Extruded Surfaces. In: **Computer Graphics Forum**, v. 29 n. 3 p. 1063-1072. 2010. Disponível em:<<Go to ISI>://000280991300030>. Acesso em: 20 de Maio de 2011.

SAMANTA, R., ZHENG, J., FUNKHOUSER, T., LI, K., SINGH, J.P. Load Balancing for Multi-Projector Rendering Systems. In: **Eurographics Workshop on Graphics Hardware**. 1999.

SCHIKORE, D.R., FISCHER, R.A., FRANK, R., GAUNT, R., HOBSON, J., WHITLOCK, B. High-Resolution Multiprojector Display Walls. In: **Ieee Computer Graphics and Applications**, v. 20 n. 4 p. 38-44. Jul-Aug, 2000. Disponível em:<<Go to ISI>://000087793500009>. Acesso em: 20 de Maio de 2011.

SHIFENG, M.; DANXIA, W. Implementation of a Flight Control Tower Simulator Using Commercial Off-the-Shelf Hardware. In: **Simulation**, v. 86 n. 2 p. 127-135. 2010.

SOARES, L. P. **Aglomerados De Computadores Convencionais Para Aplicações Da Realidade Virtual Imersiva: Um Estudo De Caso Caverna Digital**. Curitiba: Serie Editor. 2004.

_____. **Um Ambiente De Multiprojeção Totalmente Imersivo Baseado Em Aglomerados De Computadores**. 2005. 123 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SOARES, L.P., CABRAL, M.C., BRESSAN, P.A., FERNANDES, H., LOPES, R.D.L., ZUFFO, M.K. Management of Commodity Computer Cluster Oriented to Virtual Reality Applications. In: **Proceedings of V Symposium on Virtual Reality**, p. 158-168. Fortaleza, Brasil, 2002.

SOARES, L.P., CABRAL, M.C., BRESSAN, P.A., LOPES, R.D.L., ZUFFO, M.K. Powering Multiprojection Immersive Environments with Cluster of Commodity. In: **1º SIACG**. Guimarães, Portugal, 2002.

SOARES, L.P., RAPOSO, A., JORGE, J., ARAUJO, B., DIAS, M., CARVALHO, F. Multi-Projector Vr Systems. In: **Sibgrapi 2010 - Conference on Graphics, Patterns and Images**. Gramado - RS, 2010.

STAADT, O.G., AHLBORN, B.A., KREYLOS, O., HAMANN, B. A Foveal Inset for Large Display Environments. In: **Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications**, p. 281-288. ACM, Hong Kong, China, 2006.

STOLL, G., ELDRIDGE, M., PATTERSON, D., WEBB, A., BERMAN, S., LEVY, R., CAYWOOD, C., TAVEIRA, M., HUNT, S., HANRAHAN, P. Lightning-2: A High-Performance Display Subsystem for Pc Clusters. In: **Siggraph 2001 Conference Proceedings**, p. 141-148 600. 2001. Disponível em:<<Go to ISI>://000173048800014>. Acesso em: 19 de Maio de 2011.

SURATI, R. J. **Scalable Self-Calibrating Display Technology for Seamless Large-Scale Displays**. 1999. 1 p., Massachusetts Institute of Technology, 1999.

TEUBL, F., BELLOC, O., NAGAMURA, M., KONDO, M., CABRAL, M., DORETO, F., FERRAZ, R., ZUFFO, M., LOPES, R. Passeio Digital: Um Sistema De Multiprojecao De Baixo Custo Voltado as Aplicacoes Educacionais. In: **SVR - XI Symposium on Virtual and Augmented Reality**. Porto Alegre, 2009.

THIBAUT, W. C. Camera-Based Calibration for Scalable Immersive Rendering. In: **ACM SIGGRAPH Posters**, p. 1. ACM, Los Angeles, California, 2010.

YANG, R., GOTZ, D., HENSLEY, J., TOWLES, H. Pixelflex: A Reconfigurable Multi-Projector Display System. In: **Proceedings of the conference on Visualization**, p. 167-174. IEEE Computer Society, San Diego, California, 2001.

YANG, R.; LASTRA, A. Anywhere Pixel Compositor. In: **ACM SIGGRAPH 2007 posters**, p. 10. ACM, San Diego, California, 2007.

_____. **Source and Output Device-Independent Pixel Compositor Device Adapted to Incorporate the Digital Visual Interface (Dvi)**. United States. 18/02/2010, 2010.

YANG, R., RUDOLF, D.R., RAGHUNATHAN, V. Flexible Pixel Compositor for Plug-and-Play Multi-Projector Displays. In: **2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vols 1-8**, p. 3501-3502 3930. 2007. Disponível em:<<Go to ISI>://000250382807013>. Acesso em: 24 de Maio de 2011.

YANG, R.; WELCH, G. Automatic Projector Display Surface Estimation Using Every-Day Imagery. In: **In 9th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision**. 2001.

YANG, R., BROWNT, M.S., BRENT, W., FUCHS, S.H. Geometrically Correct Imagery for Teleconferencing. In: **Acm Multimedia 99, Proceedings**, p. 179-186 500. 1999. Disponível em:<<Go to ISI>://000084339900024>. Acesso em: 21 de Maio de 2011.

ZHOU, J., WANG, L., AKBARZADEH, A., YANG, R. Multi-Projector Display with Continuous Self-Calibration. In: **Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Workshop on Projector camera systems**, p. 1-7. ACM, Marina del Rey, California, 2008.

ZOLLMANN, S. LANGLLOTZ, T., BIMBER, O. Passive-Active Geometric Calibration for View-Dependent Projections onto Arbitrary Surfaces. In: **Journal of Virtual Reality and Broadcasting**, v. 4 n. 6. Outubro, 2007.

ZUFFO, J.A., SOARES, L.P., ZUFFO, M.K., LOPES, R.D. Caverna Digital - Sistema De Multiprojeção Esteroscópico Baseado Em Aglomerados De Pcs Para Aplicações Imersivas Em Realidade Virtual. In: **Proceedings of IV Symposium on Virtual Reality**. 2001.

APÊNDICE A DESENVOLVIMENTOS COMPLEMENTARES

Este apêndice apresentará todos os desenvolvimentos auxiliares realizados durante a elaboração desta tese. Nos próximos tópicos, serão discutidas as bibliotecas e ferramentas desenvolvidas para auxiliar o sistema de multiprojeção, os softwares de reprodução de conteúdo e as bibliotecas de motores gráficos adaptadas para suportar a biblioteca de multiprojeção proposta.

A) FERRAMENTA AUXILIARES

Esta seção apresenta as bibliotecas e ferramentas auxiliares essenciais para a elaboração do sistema de multiprojeção Fast Fusion.

A biblioteca FastTools

O FastTools é uma biblioteca auxiliar desenvolvida neste trabalho que provê diversas funcionalidades para a biblioteca de multiprojeção. Os recursos oferecidos são:

- a) Troca de mensagens síncronas e assíncronas;
- b) Compartilhamento de variáveis ou objetos remotos;
- c) Sincronização através de barreiras;
- d) Gerenciamento de *threads*;
- e) Semáforo para prover exclusão mútua em regiões críticas;
- f) Funções matemáticas com operações de matrizes, soluções para sistemas lineares, gerador de matrizes de homografia, dentre outras.

O FastTools foi desenvolvido em C++ utilizando conceitos de orientação a objeto e foi concebido para trabalhar em multiplataforma.

O Sistema de Demonstração

O sistema de demonstração é um software independente com objetivo de gerenciar as demonstrações. O sistema de Demonstração é capaz de ligar e desligar os computadores, executar, gerenciar e finalizar múltiplas aplicações em diferentes máquinas.

O Sistema de Demonstração foi desenvolvido em linguagem Java, permitindo o seu uso em múltiplas plataformas e para quaisquer tipos de aplicação. Ao ser instalado, é inicializado em plano de fundo (*background*) junto com o Sistema Operacional. Dotado de uma interface simples, permite a operação do sistema por usuários leigos.

O Sistema de Demonstração – embora não essencial – é altamente desejável em sistemas de multiprojeção compostos por muitos computadores gráficos.

B) GERADORES DE CONTEÚDO

A biblioteca de multiprojeção Fast Fusion apenas provê a fusão da imagem gerada pelos projetores, alterando a imagem gerada pela aplicação gráfica que, por sua vez, é responsável por gerar todo o conteúdo. Destarte, foram desenvolvidas diversas aplicações gráficas, tanto para testes e análises, quanto para demonstrações e demandas de projetos. As subseções seguintes apresentarão as principais aplicações desenvolvidas para serem utilizadas com o Fast Fusion.

O gerador de imagem

O gerador de imagem foi desenvolvido utilizando a biblioteca SDL⁵¹ e tem como objetivo abrir uma imagem estática e apresentá-la. Embora seja uma aplicação gráfica extremamente simples e pouco atrativa para demonstrações, esta foi a aplicação mais importante para o desenvolvimento da biblioteca de multiprojeção. Por gerar uma imagem estática, foi possível detectar e analisar todas as imperfeições.

Além de figuras, a aplicação também desenha grades de quaisquer dimensões e apresenta imagens de cores sólidas, o que é útil para analisar os resultados dos alinhamentos geométricos e as correções de brilho e cor.

O tocador de vídeo

O tocador de vídeo é uma aplicação que reproduz vídeos utilizando a biblioteca de multiprojeção. Para decodificar os vídeos, utilizou-se a biblioteca DirectShow⁵² com suporte a inúmeros formatos de vídeo. O tocador de vídeo suporta vídeos de alta resolução (acima de 1920x1080) e vídeos com estereoscopia em modos lado a lado ou dois arquivos independentes.

Além disso, esta aplicação suporta múltiplas instâncias, permitindo a sua utilização em sistemas compostos por múltiplas máquinas gráficas e grande quantidade de projetores. Para sincronizar os vídeos, utilizou-se a biblioteca FastTools (página 179).

A aplicação FastDesktop

A aplicação FastDesktop foi desenvolvida para possibilitar o uso de quaisquer aplicações no sistema de multiprojeção. Tal aplicação consiste em capturar a imagem da área de trabalho de um computador (mestre) e enviá-la a um ou mais computadores de projeção (escravos). Desta forma, qualquer aplicação pode ser apresentada no sistema de multiprojeção.

⁵¹ *Simple DirectMedia Layer*: biblioteca multiplataforma distribuída sob licença GNU LGPL 2 que provê acesso de baixo nível para áudio, teclado, mouse, joystick, 3D via OpenGL, vídeos 2D, entre outros. Disponível em <http://www.libsdl.org/>.

⁵² DirectShow: parte da API do DirectX desenvolvida pela Microsoft, utilizada para execução de acervos multimídia para a plataforma Windows.

A figura 74 demonstra exemplo de uma possível configuração composta por um computador gráfico (mestre) e dois computadores de projeção (escravos) com quatro projetores gráficos cada, totalizando oito projetores.

Figura 74 – Exemplo de arquitetura do FastDesktop

Um dos benefícios do FastDesktop é que o computador mestre (o que gera o conteúdo) não precisa estar conectado aos projetores, apenas à rede de conexão. Esta característica possibilita, por exemplo, a transmissão da área de trabalho de um computador portátil.

Mantido o mesmo exemplo apresentado na figura 74, a figura 75 demonstra a transmissão da área de trabalho de uma máquina mestre com resolução de 1920x1200 pixels para dois computadores de projeção escravos com quatro projetores cada, totalizando oito projetores em grade 2x4.

Figura 75 – Exemplo do FastDesktop

Embora o FastDesktop suporte qualquer aplicação – incluindo aplicações CAD, Jogos e ferramentas Office – há duas importantes restrições:

- a) A resolução máxima suportada pelo sistema é limitada pela resolução máxima que a máquina mestre é capaz de gerar. Desta forma, tal solução não pode ser utilizada em sistemas com grande quantidade de projetores, devido à discrepância entre a resolução do computador mestre e a resolução somada de todos os projetores;
- b) Considerando que toda a informação gerada na área de trabalho deve ser transmitida pela rede, existe uma sobrecarga da rede devido à quantidade de informações transmitidas. Nos testes de laboratório, a taxa de atualização por segundo ficou entre 5 e 12 quadros por segundo na resolução 1920x1200 e entre 15 e 25 para a resolução de 1024x768.

C) MODIFICAÇÕES DE BIBLIOTECAS DE MOTORES GRÁFICOS

Bibliotecas de motores gráficos são ferramentas que abstraem todo o processamento gráfico de baixo nível com intuito de oferecer aos desenvolvedores da aplicação gráfica um gerenciador de cenário com diversas funcionalidades e mais fácil de operar.

Neste tópico serão apresentadas algumas bibliotecas de motores gráficos alteradas para incluírem a biblioteca Fast Fusion a fim de permitir o uso de multiprojeção sem ter que alterar o código da aplicação gráfica.

A biblioteca Ogre3D

O Ogre3D é uma biblioteca de motor gráfico 3D multiplataforma desenvolvido em linguagem C++ baseado em orientação a objetos. O Ogre3D é uma biblioteca de código aberto, sob a licença GNU LGPL⁵³.

⁵³ LGPL (*Lesser General Public License*): escrita por Richard Stallman e Eben Moglen em 1991 e atualizada em 1999.

A biblioteca Ogre3D foi adaptada para operar conjuntamente com a biblioteca de multiprojeção Fast Fusion, sem a necessidade de alterar a aplicação gráfica, bastando apenas substituir os arquivos de biblioteca do Ogre3D pelos arquivos modificados. A versão do Ogre3D alterada foi a 1.6.4. e além da integração com a biblioteca de multiprojeção, foi adicionado suporte a estereoscopia ativa, ausente nesta versão.

A figura 76 apresenta uma demonstração da biblioteca Ogre3D chamada Fresnel, incluída no pacote de demonstração do próprio Ogre3D. Neste exemplo, foi apenas necessário substituir as bibliotecas do Ogre3D para utilizar o sistema de multiprojeção. O sistema de projeção neste exemplo é composto por quatro projetores em grade 2x2, com resolução de 1600x1200 pixels.

Figura 76 – Exemplo da demonstração “Fresnel” do Ogre3D

Caso o sistema seja composto por múltiplas instâncias gráficas – distribuídas em um aglomerado de computadores – é necessário apenas que a aplicação gráfica sincronize o conteúdo, uma vez que a biblioteca Fast Fusion já suporta múltiplas instâncias.

A biblioteca OpenSceneGraph

A biblioteca de motor gráfico OpenSceneGraph é uma biblioteca de código aberto e multiplataforma desenvolvida em C++ que disponibiliza um conjunto de ferramentas para o desenvolvimento de aplicações gráficas. A biblioteca OpenSceneGraph foi alterada para incorporar o sistema de multiprojeção proposto. A versão utilizada é a 2.8.2.

Da mesma forma que o Ogre3D, basta substituir as bibliotecas do OpenSceneGraph para prover multiprojeção, sem a necessidade de alterar o código da aplicação gráfica.

D) OUTRAS ADAPTAÇÕES

Este tópico apresentará outras aplicações que foram modificadas para incorporar a biblioteca de multiprojeção.

O jogo gráfico TuxRacer

O TuxRacer é um jogo gráfico multiplataforma e de código aberto desenvolvido em C e que utiliza a biblioteca gráfica OpenGL. Este jogo foi adaptado para utilizar a biblioteca de multiprojeção desenvolvido nesta tese. A versão do TuxRacer modificada é a 0.61.

Incluiu-se o suporte à biblioteca de multiprojeção ao jogo TuxRacer dada a necessidade de realizar análises quanto ao impacto da biblioteca de multiprojeção sobre uma aplicação interativa.

A figura 77 demonstra a execução do jogo TuxRacer modificado com quatro projetores em grade 2x2.

Figura 77 – TuxRacer

E) SÍNTESE

Este apêndice apresentou as ferramentas e aplicações desenvolvidas ou modificadas durante esta pesquisa. Foram descritas as ferramentas auxiliares elaboradas no desenvolvimento da biblioteca Fast Fusion, assim como as aplicações desenvolvidas e as bibliotecas de motores gráficos adaptadas para os testes e a validação do sistema de multiprojeção proposto.

As experiências obtidas nestes desenvolvimentos gráficos evidenciaram a facilidade da integração das aplicações ou motores gráficos com a biblioteca de multiprojeção Fast Fusion, no qual exigiu poucas alterações. Algumas integrações (e.g. Ogre3D e TuxRacer) exigiram modificações mais invasivas em virtude da inclusão da estereoscopia ativa e suporte a múltiplas saídas de vídeo, este último essencial na hipótese de utilizar mais de um projetor por máquina gráfica.

O impacto computacional provocado pela integração da biblioteca de multiprojeção é perceptível, mas não inviabilizou nenhuma aplicação.

APÊNDICE B – PROJETORES

Projetores são equipamentos essenciais em um sistema de multiprojeção. Neste apêndice apresentam-se alguns aspectos relevantes sobre projetores em sistemas de multiprojeção.

A) GENERALIDADES

Para escolher um projetor para compor um sistema de multiprojeção, diversos aspectos devem ser cuidadosamente analisados a fim de não prejudicar a qualidade final do sistema. Nos próximos subtópicos, serão apresentados os principais aspectos que devem ser considerados na especificação de um sistema de multiprojetores.

Brilho

O brilho é uma medida estimada da quantidade máxima de luz que um dispositivo consegue gerar. Usualmente, os fabricantes utilizam a medida *lumens* para definir esta quantidade de luz. Um *lumen*⁵⁴ é equivalente a quantidade luminosa produzida por uma *candela*⁵⁵ em um cone de um esferorradiano⁵⁶. Como referência, uma lâmpada incandescente de 65 *watts* gera aproximadamente 850 *lumens* e uma lâmpada incandescente de 100 *watts* gera aproximadamente 1700 *lumens* (MAJUMDER, A.; BROWN, M. S., 2007).

Alguns fabricantes consideram apenas o brilho central do projetor, pois em geral o brilho decai nas bordas. Para evitar divergências de medição de brilho entre fabricantes, o padrão ANSI *lumen*⁵⁷ considera a luminosidade média de nove pontos em diferentes áreas da projeção.

⁵⁴ Lumen: Símbolo “lm”. Unidade de medida de fluxo luminoso.

⁵⁵ Candela: Símbolo “cd”. Do latim “vela”, é uma unidade de medida básica do Sistema Internacional de Unidades (SI) para a intensidade luminosa.

⁵⁶ Esferorradiano: Símbolo “sr”. Unidade de medida no padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI) utilizada para quantificar ângulos sólidos.

⁵⁷ Definido pelo padrão IT7.215 em 1992.

Taxa de contraste

A Taxa de Contraste é definida como a razão da luminância do brilho de cor mais claro (branco) em relação ao mais escuro (preto) que o sistema é capaz de produzir. Como exemplo, um contraste 1000:1 significa que um ponto claro é mil vezes mais brilhante que um ponto escuro.

Um sistema com alto contraste produz imagens com maior amplitude de tons, principalmente em sombras, melhorando significativamente a percepção de profundidade das imagens geradas.

Black offset

Equivocadamente, muitas pessoas entendem que o pixel preto gerado pelos dispositivos visuais é nulo, ou seja, não há luz. Considerando esta afirmação verdadeira, o valor do menor brilho produzido seria zero, fazendo com que o contraste – razão entre o maior brilho e o menor brilho – seja infinito.

Contudo, os projetores – assim como quaisquer outros dispositivos visuais – geram algum tipo de brilho mesmo em pixels escuros. Este brilho indesejado nos pixels escuros é gerado tanto por vazamento da luz no sistema (bloqueio parcial do pixel luminoso por inviabilidade técnica), quanto por interferência (geralmente ocasionada por reflexões e refrações).

Esta intensidade mínima produzida em pixels pretos é conhecida como variação escura (*black offset*), o menor brilho possível gerado pelo projetor.

Em um sistema de multiprojeção com mistura de bordas (intersecção entre áreas de projeção de projetores vizinhos), o *black offset* pode quebrar a ilusão da imagem única e contínua, uma vez que o brilho da cor escura é somado nas interseções dos projetores e pode ser facilmente observado nestas imagens escuras.

Cor

A cor é a composição tridimensional do brilho unidimensional e a cromaticidade bidirecional. A cromaticidade é definida como o tom e a saturação de uma cor. O tom é definido como a quantidade relativa de diferentes comprimentos de onda presentes em uma cor, enquanto a saturação corresponde ao grau de pureza da cor pela quantidade de branco⁵⁸. Quanto menos cor branca, mais saturada a cor será. Como exemplo, a cor rosa é uma versão pouco saturada do vermelho.

⁵⁸ Considerando modelo de cor HSV, sendo que o modelo de cor HSL tem como grau de saturação a proporção da cor cinza médio.

O espaço de cor que um projetor pode representar define-se por um diagrama chamado *color gamut*. Infelizmente, raramente os fabricantes disponibilizam esta informação, porém, esta informação pode ser medida facilmente por um equipamento conhecido como radiômetro (*radiometer*).

Resolução

A resolução é definida como a quantidade de detalhes que um projetor pode oferecer, ou seja, a quantidade de pixels existentes em uma grade bidimensional. Usualmente, a resolução é representada pela quantidade de pixels por linha e coluna.

Diversos dispositivos visuais definem a sua resolução por densidade de pixels, ou seja, a quantidade de pixels sobre a área, usualmente na unidade pixels por polegada (PPI – *Pixel Per Inch*). Em projetores, esta media não pode ser aplicada, pois a densidade de pixels varia de acordo com a distância de projeção: quanto mais perto o projetor estiver da tela, menor a área e, portanto, maior a densidade de pixels.

Eficiência de luz

Em qualquer dispositivo de projeção, uma parte da luz gerada é inevitavelmente disseminada pelos componentes internos (absorvida pelas lentes, pelos prismas e por outros componentes), tendo como uma das consequências o aquecimento. A eficiência de luz é a percentagem da luz que efetivamente é utilizada na projeção final gerada.

Taxa de tiro de projeção

A taxa de tiro de projeção (*throw ratio*) é a relação entre a distância do projetor da tela e a dimensão projetada. Usualmente, a taxa de tiro de projeção é definida como a distância de um projetor perpendicular a uma tela e a largura de projeção. Como exemplo, um projetor com taxa de projeção 4:1 significa que um projetor a 4 metros de distância da tela projeta uma imagem de um metro de largura.

Um projetor com taxa de tiro baixa (e.g. 0,8:1) é usualmente utilizado em retroprojeção (*back projection*), capaz de projetar grandes áreas com pouca distância de tiro. Este tipo de lente pode provocar distorções na projeção. Já as lentes com taxa de tiro alta (e.g. 16:1) são usualmente utilizadas em projeções frontais (*front projection*), nas quais os projetores podem ser facilmente fixados na parte de trás dos auditórios.

Muitos projetores têm a opção “zoom”, ou seja, estes projetores são capazes de alterar a taxa de tiro de projeção.

Porém, é importante observar que o zoom pode ser aplicado de forma óptica ou via software. A melhor opção é o zoom óptico que utiliza o reposicionamento das lentes para mudar a taxa de tiro, porém, em geral, trata-se de dispositivo mais caro.

Proporção de tela

A proporção de tela (*aspect ratio*) é a razão entre as dimensões horizontais e verticais da imagem bidimensional. Esta razão é obtida dividindo a largura e a altura, e pode ser representada tanto em forma decimal (e.g. 1,33) quanto por fração (e.g. 4:3). A proporção mais comum é a 4:3 (comum na maioria dos monitores CRT), 16:10 (comum em monitores tipo *widescreen*) e 16:9 (comum em padrão HDTV⁵⁹).

Existem muitos projetores com suporte para mais de uma proporção de tela. Entretanto, o suporte, em sua totalidade, é feito via software, ou seja, sacrifica-se a resolução total para manter a proporção correta da imagem, uma vez que a interpolação da imagem pode deformá-la (achatá-la ou alongá-la).

A proporção de tela ideal para um projetor varia de acordo com as dimensões da tela e a quantidade de projetores (em caso de multiprojeção) do sistema.

Distância de foco

Os projetores podem ser restritos pela distância de projeção devido à insuficiência do foco. Os projetores podem ter restrição de distância mínima, restrição de distância máxima ou ambas. Em sistemas de multiprojeção com grande quantidade de projetores, é importante verificar se a distância entre os projetores em relação à tela satisfaz a distância mínima de foco.

Keystone

O *keystone* é uma função presente em quase todos os projetores, e serve para compensar as distorções verticais provocadas por telas não perpendiculares. Quando um projetor é fixado, por exemplo, no teto de uma sala, o eixo perpendicular ao centro da tela e a reta entre o centro da tela e o projetor formam um ângulo, o que distorce a imagem e a faz parecer trapezoidal.

No entanto, os projetores podem deformar a imagem projetada de forma que, ao projetar na tela, o efeito desta distorção seja anulado. A correção do *keystone* pode ser realizada opticamente ou por software. A correção óptica é realizada pela

⁵⁹ *Hight-definition Television*, usualmente disponível nas resoluções 1280x720p e 192x1080p.

movimentação das lentes, porém eleva o custo do projetor e, em alguns casos, pode resultar em outras distorções além da trapezoidal. A solução via software realiza um corte de pixel, reduzindo a área de projeção e diminuindo a resolução.

Lens shift

Um projetor com *lens shift* possui o recurso de, motorizadamente, transladar as lentes do projetor na vertical e na horizontal, o que previne ou minimiza o uso de *keystone* e é muito útil para alinhar projetores empilhados (estereoscopia passiva). Em sistemas de multiprojeção com calibração mecânica este recurso pode facilitar o alinhamento dos projetores.

Acesso remoto

Um sistema de multiprojeção é composto por múltiplos projetores e a tarefa de realizar ajustes coletivos pode ser exaustiva. Além disso, o processo de ligar e desligar os projetores é desgastante em sistemas com grande número de projetores. Diversos projetores fornecem o acesso remoto a suas funcionalidades, usualmente através de um protocolo proprietário com conexão RS-232 ou através de rede *ethernet*.

O acesso remoto é altamente recomendável num sistema de multiprojeção.

Loop-through

Projetores com suporte a *loop-through* possibilitam conectar um monitor em uma saída de vídeo do projetor com o mesmo sinal da entrada gráfica que alimenta o projetor.

B) ELEMENTOS ÓPTICOS

Todo projetor contém diversos componentes ópticos, como lentes, filtros, prismas, lâmpadas e outros. A qualidade destes elementos ópticos produz impacto direto na qualidade da imagem final.

Serão discutidas nesta sessão as principais características dos elementos ópticos, bem como suas implicações em sistemas de multiprojeção.

Lentes

A lente, um dos principais elementos ópticos do projetor, é responsável por algumas características dos projetores, como a distância de tiro, a razão de tiro e outras.

Porém, como as lentes são elementos não lineares, podem causar distorções geométricas e variação de cor. As principais distorções são o efeito barril (*barrel distortion*), o efeito almofada (*pincushion distortion*) e as aberrações cromáticas (*chromatic aberration*). Efeitos barril e almofada são distorções geométricas ocasionadas pela não uniformidade da imagem das bordas em relação ao centro, conforme apresentado na figura 78.

Figura 78 – Tipos de distorção

A aberração cromática (*chromatic aberration distortion*) é ocasionada pela curva da luz de acordo com os comprimentos das ondas que passam pela lente.

Lentes de Fresnel

A lente de Fresnel foi criada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel. Destinada originalmente para uso em faróis de sinalização marítima, seu desenho possibilita a construção de lentes de grande abertura e curta distância focal sem o peso e o volume do material observados numa lente convencional. As lentes de Fresnel são bem mais finas e leves do que as lentes convencionais, o que permite a passagem de mais luz de forma mais eficiente. A figura 79 ilustra a diferença entre a lente de Fresnel e a lente convencional.

Figura 79 – Lente de Fresnel e lente convencional

Espelhos

Espelhos são elementos ópticos que possibilitam as compactas arquiteturas dos projetores. Porém, as superfícies dos espelhos podem proporcionar fantasmas, a depender da qualidade do material do espelho, o que afeta a resolução efetiva da projeção.

Filtros

Os filtros são utilizados para dividir o espectro de luz nas cores primárias: vermelho, verde e azul. Esta divisão é fundamental em projetores que utilizam painéis de atenuação (*Light-Valve Technology*).

Existem basicamente três tipos de filtros: *absorptive*, *dichroic* e *electrically tunable*:

- **Absorptive**: absorve certas ondas de luz, permitindo que outras passem. O problema é que este tipo de filtro diminui muito a eficiência do projetor, pois absorve uma boa parcela das ondas de luz e provoca aquecimento. Este tipo de filtro é evitado em projetores.
- **Dichroic**: reflete certas ondas de luz e permite que outras passem. Este tipo de filtro é o mais utilizado em projetores. É capaz de separar os três canais de cor de uma fonte de luz branca utilizando dois filtros sequenciais: o primeiro reflete o azul, permitindo a passagem das luzes verde e vermelha, e o segundo filtro reflete o verde, deixando o vermelho passar. A grande vantagem do filtro *dichroic* consiste na sua utilização para recompor os canais vermelho, verde e azul, após passar pelos painéis de atenuação. Para fazer a recomposição, faz-se o caminho inverso da separação.

- **Electrically Tunable:** é utilizado para controlar a passagem de luz de acordo com a corrente elétrica presente no filtro: quando nenhuma corrente é aplicada, a luz branca passa pelo filtro sem alteração, quando se aplica uma corrente elétrica, alguns comprimentos de onda são bloqueados ou a luz é polarizada.

C) LÂMPADAS DE PROJEÇÃO

A lâmpada é o principal elemento do projetor. Usualmente, a lâmpada é acompanhada por um refletor que cerca toda a lâmpada, redirecionando toda a iluminação para a lente, para os prismas ou para os painéis, aumentando, assim, a eficiência da luz.

As principais características das lâmpadas são a potência, a eficiência e o espectro de luz gerada. Muitas lâmpadas emitem luz próxima do amarelo ou do azul, o que reduz a saturação do verde ou vermelho. Pequenas variações durante o processo de fabricação das lâmpadas podem alterar o seu espectro de luz. Mesmo que as lâmpadas sejam do mesmo modelo e lote de fabricação, elas podem apresentar diferenças em suas cores primárias.

Um dos principais problemas enfrentados é a durabilidade das lâmpadas. Em geral, uma lâmpada dura no máximo 10.000 horas e o seu espectro muda ao longo do seu uso. Assim, a lâmpada tem uma variação do espectro ao longo de sua vida útil.

Há, basicamente, quatro tipos de lâmpadas: xenon, haleta metálica, UHP (*ultra-high performance*) e *tungsten halogen*. Atualmente, projetores de LEDs são comercializados com cada vez mais potência. Os LEDs têm como característica a longevidade e não há variação do espectro.

D) TECNOLOGIAS DE PROJEÇÃO

Serão apresentadas nos próximos tópicos as tecnologias de projeção existentes.

Tecnologia CRT (*Cathode Ray Tube*)

A tecnologia CRT é usada nos televisores comuns. A tecnologia CRT funciona com a incidência de elétrons em uma tela tratada com íons de fósforo. Os elétrons excitam os íons de fósforo que emitem luz.

Os projetores CRT usam três tubos, um para cada cor RGB, e misturam as matrizes para formar a imagem colorida final.

Apesar de usar uma tecnologia antiga, os projetores CRT são capazes de reproduzir imagens com alta resolução. As principais deficiências desta tecnologia de projetores são: o tamanho dos aparelhos, a dificuldade de regulagem e o baixo brilho.

Para aplicações de realidade virtual, a maior vantagem desta tecnologia de projetores é o suporte para altas taxas de atualização, o que permite seu uso em projeções estereoscópicas ativas.

Tecnologia de atenuação de luz (*Light-Valve Technology*)

Consiste em dividir uma fonte de luz em três canais primários de cor: vermelho, verde e azul. Cada canal é filtrado por um painel que atenua a quantidade de luz para cada pixel. Os três canais são novamente unificados, produzindo a imagem. Para reduzir custo, algumas arquiteturas utilizam apenas um painel de atenuação e cada um dos três canais são multiplexados ao longo do tempo em uma frequência muito rápida, a ponto de ficar imperceptível para o sistema visual humano.

A seguir, serão apresentadas algumas tecnologias baseadas em matrizes de atenuação de luz.

Tecnologia DLP (*Digital Light Processing*)

A tecnologia DLP foi desenvolvida pela Texas Instruments e incorpora a tecnologia de semicondutores de dispositivos de microespelhos digitais. Nesta tecnologia, a luz branca é projetada em um filtro de cores com formato de disco, o qual gira e seleciona em cada revolução os canais azul, verde e vermelho, emitindo alternadamente estas cores primárias para os microespelhos (DMD, *Digital Micromirror Device*). Os microespelhos são posicionados de acordo com a

coordenada e a intensidade de cada canal de cor (vermelho, azul e verde) de cada pixel. No ponto de vista da visão humana, todo este processo é imperceptível.

Tecnologia LCD (*liquid crystal display*)

O cristal líquido tem a capacidade de mudar a polaridade da luz que incide sobre ele ou o atravessa. Ao aplicar uma corrente no cristal líquido, as características de polarização são alteradas. Utilizando uma matriz de cristal líquido (LCD), é possível ajustar a polaridade de cada pixel para formar a imagem. As matrizes de cristal líquido podem ser transmissivas (a luz passa por elas) ou refletivas (a luz incide sobre elas e é refletida).

Os projetores LCD podem conter uma ou três matrizes de LCD. Uma matriz de LCD é utilizada em projetores mais compactos e baratos e três matrizes são empregadas em projetores profissionais de alto desempenho.

Esta tecnologia apresenta duas desvantagens: a limitação à resolução nativa, com a reprodução fiel apenas de imagens que possuem a mesma resolução dos painéis de LCD, e o efeito quadriculado (*screen door*), que ocorre na hipótese de a imagem ser projetada em uma tela grande, evidenciando o intervalo entre os pixels da matriz de LCD.

Tecnologia LCOS (*Liquid crystal on silicon*)

A tecnologia LCOS pode ser considerada uma mistura entre as tecnologias LCD e DLP. Assim como a tecnologia LCD, a tecnologia LCOS utiliza cristal líquido, porém não é transmissiva como a LCD e sim refletora com semicondutores para reflexão, assim como a DLP.

Nesta tecnologia, a luz é filtrada por um polarizador para incidir sobre o cristal líquido que muda a polaridade da luz que o atravessa. Com corrente elétrica, a polaridade da luz é modulada de acordo com a imagem, assim como nos projetores LCD. Porém, de forma diversa dos projetores LCD, a luz é refletida e os raios de diferentes polaridades são filtrados por outro polarizador.

As maiores desvantagens deste tipo de tecnologia são: dimensão, pois normalmente os projetores são grandes e pesados, preço e intensidade luminosa.

APÊNDICE C – TELAS DE PROJEÇÃO

Tipo de projeção

As projeções podem ser feitas pela frente ou por trás da tela (*front* e *back projection*). Normalmente, em aplicações de realidade virtual, é mais utilizada a projeção por trás, pois além dos equipamentos serem ocultados do usuário, não há sombra de projeção caso o usuário esteja próximo à tela. Para especificar telas de projeção por trás, deve-se observar qual o fator de transmissão da tela, ou seja, quanto da potência luminosa será perdida através de interações dos feixes luminosos com a tela.

Fator e ganho

Quanto maior o ganho, menor o ângulo de visão tolerável, porém há maior brilho na região central. As telas de baixo ganho possibilitam maior ângulo de visão sem afetar significativamente o brilho. Telas com baixo fator de ganho são preferíveis para aplicações de realidade virtual e sistemas de multiprojeção.

Suporte a estereoscopia passiva

Importa observar o tipo de estéreo que será utilizado pelo sistema. Caso seja utilizada a estereoscopia passiva, deve-se analisar se a tela suporta este tipo de tecnologia de estereoscopia. De modo geral, as telas difundem a polarização da luz, o que inviabiliza o uso de estereoscopia passiva com filtros polarizados.

Telas rígidas e flexíveis

As telas podem ser classificadas com relação à rigidez. As telas podem ser rígidas ou flexíveis, sendo que as primeiras são preferíveis para instalações fixas dado que sua deformação ao longo do tempo é menor. Existem telas flexíveis que são laváveis e dobráveis, o que permite seu uso em sistemas móveis de projeção. Vale ressaltar que telas flexíveis demandam boa estrutura de fixação para que a tela mantenha-se esticada e sem deformações. As telas rígidas, de modo geral, possibilitam telas de melhor qualidade, principalmente com baixo fator de ganho e com suporte a estereoscopia passiva.

APÊNDICE D – ESTEROSCOPIA

Em razão da distância entre os olhos ser de aproximadamente 4 a 6 cm, cada olho possui ponto de vista ligeiramente diferente. As imagens formadas por tais pontos de vista são enviadas ao cérebro e a diferença entre elas é denominada paralaxe, o que fornece a noção de profundidade.

A projeção estereoscópica é baseada no mesmo princípio: duas imagens um pouco diferentes são projetadas em uma tela. O sistema responsável pela projeção deve permitir que o olho direito seja capaz apenas de enxergar a imagem direita e o olho esquerdo deve enxergar somente a imagem esquerda.

A) ESTEREOSCOPIA ATIVA

Os observadores utilizam óculos especiais que consistem em dois obturadores de luz LCD (*shutters*) controlados por infravermelho trabalhando em sincronia com o projetor. Quando o projetor exibe a imagem esquerda, os óculos fecham a passagem de luz para o olho direito, permitindo que a imagem referente ao olho esquerdo seja somente captada pelo olho esquerdo, e vice-versa. Esta inversão de imagem (imagem esquerda e direita) ocorre cerca de 120 vezes por segundo ou mais e não é perceptível pelo sistema visual humano (BRENNESHOLTZ, M. S.; STUPP, E. H., 2008, pg. 264).

B) ESTEREOSCOPIA PASSIVA

A projeção passiva é baseada em filtros de luz. O observador utiliza óculos com lentes que possuem filtros opostos. A luz de cada uma das duas imagens projetadas

(esquerda e direita) é filtrada e só pode passar pela lente correspondente. Em projeção estereoscópica passiva, pode ser utilizado um ou dois projetores.

Um único projetor

O projetor projeta alternadamente as informações do olho direito e as do olho esquerdo com uma taxa de atualização (*refresh rate*) dobrada. A polarização é feita por uma “Z-screen” colocada na frente da lente do projetor, de modo que a imagem referente a cada olho passe pelo respectivo filtro dos óculos estéreo passivo.

Dois projetores

Um projetor exibe a informação do olho direito enquanto o outro exibe a do olho esquerdo. Um filtro polarizador é colocado no caminho da luz de cada projeção e a informação correta passa pelo filtro correspondente nos óculos.

Tipos de filtro

Existem diversos tipos de filtro para obter-se a estereoscopia passiva. A seguir, serão apresentados os principais filtros.

Filtro polarizador

As ondas de um feixe de luz oscilam em todas as direções. Quando tal feixe atravessa um polarizador é dada uma direção preferencial às ondas. Se esta orientação for diferente para o olho esquerdo e para o olho direito, é possível definir qual informação chegará a cada um dos olhos e cria-se a noção de profundidade. O olho humano é praticamente insensível à polarização, ou seja, mudar a orientação de um feixe de luz praticamente não altera o que podemos enxergar. Porém, é necessário ressaltar que o ato de polarização nada mais é do que bloquear a parte do feixe luminoso que não está na mesma orientação do polarizador. Portanto ela é feita com perda de energia luminosa, ou seja, haverá menos brilho na imagem final, sendo normais perdas de mais de 50% da energia luminosa por filtro. Como são necessários dois filtros (um na projeção e outro nos óculos), apenas 25% da luminosidade é aproveitada (BRENNESHOLTZ, M. S.; STUPP, E. H., 2008, pg. 264).

A polarização linear é obtida orientando-se a luz em uma única direção (horizontal, vertical ou diagonal). Trata-se de tecnologia de excelente relação custo-benefício e que pode produzir ótima separação das imagens dos olhos esquerdo e direito para aplicações 3D. Contudo, a tela não pode alterar a polarização da imagem, de modo que são necessárias telas adequadas.

Tecnologia Infitec

A tecnologia *Infitec* fornece uma separação estérea com total liberdade de movimentos e independente da inclinação da cabeça do observador.

A diferenciação entre as imagens é obtida através de um filtro óptico *Infitec* colocado no caminho da luz entre o projetor e a tela. Este filtro separa o espectro das cores em duas partes: uma para as informações referentes ao olho esquerdo e outra para o olho direito. A informação estérea é obtida quando se projeta a informação referente ao olho esquerdo no projetor que possui o filtro correspondente, ocorrendo o mesmo para o olho direito.