

CONSULTA
FD-3095

São Paulo
2002

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
RAINBOW RANGE FINDER**

LEIJI NISHIDA

OK

2002

São Paulo

Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

Orientador:

Engenharia Mecatrônica

Área de Concentração:

Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo para a obtenção do

Politécnica da Universidade de

Dissertação apresentada à Escola

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
RAINBOW RANGE FINDER**

LEIJI NISHIDA

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Oswaldo Horikawa por suas sábias orientações nos momentos de dificuldades e dúvidas que inevitavelmente acompanharam todo processo de pesquisa. Aos meus pais pelo constante apoio, incentivo e compreensão. Aos colegas de laboratório e a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Esta dissertação descreve a implementação de um sistema *rainbow range finder* capaz de medir a forma de objetos tridimensionais. A medição é baseada em triangulação ativa, onde uma luz estruturada em forma de pseudo-arco-íris é usada para codificar o espaço de interesse. Equipamentos de baixo custo, disponíveis comercialmente, são usados para mostrar a flexibilidade do sistema. São propostas novas técnicas na modelagem da geometria de triangulação, onde um plano é posicionado por trás do objeto de forma a servir de referência para a medição. Uma transformação bidimensional sobre a imagem obtida é apresentada como forma de simplificar as equações envolvidas, além de adaptar a imagem de forma conveniente para o processamento digital. Um sistema de calibração responsável pela determinação dos parâmetros que caracterizam a configuração do sistema *range finder* é desenvolvido com o uso de algoritmo genético iterativo. A calibração é feita com base apenas em imagens de objetos de dimensões conhecidas. Ao final, são mostrados resultados de análises feitas sobre imagens artificiais e reais, incluindo comparações entre os dois casos. Os erros médios obtidos são de 1,5mm com desvio padrão de 0,6mm em objetos de dimensões 300x200x60mm.

RESUMO

ABSTRACT

This work describes an implementation of a rainbow range finder capable of measuring the three-dimensional shape of objects. The measurement is based on active triangulation, where a structured light in the shape of a pseudo rainbow is used to encode the space. Commercially available, low cost equipments are used to show the flexibility of the system. New techniques on the modeling of the triangulation geometry are proposed, with the use of a reference plane for the measurement, positioned behind the object. A two-dimensional image transform is presented as a method to simplify equations and to conveniently reshape the captured images for digital processing. A calibration system responsible for determining the variables that uniquely identify each configuration of the range finder system is developed with the use of a genetic iterative algorithm. The calibration is carried based only on images of objects with known dimensions. At the end, results of the analysis made based on artificial and real images are shown, including comparisons between the two cases. Average errors of 1.5mm with standard deviation of 0.6mm were attained measuring objects of dimensions 300x200x60mm.

ERRATA

Página	Linha	Onde se lê	Leia-se
7	3ª	subjetividade	complexidade
7	22ª	Para superar as dificuldades das	Como forma de auxiliar as
9	17ª	correlação	correspondência
10	3ª	correlação	correspondência
10	9ª	correlação	correspondência
10	17ª	correlação	correspondência
14	3ª	objetivo global	objetivo
14	3ª	estudo de todos os aspectos	estudo dos aspectos
14	6ª	grande objetivo	objetivo
14	8ª	objetivos	tópicos
17	16ª	para esta finalidade.	para esta finalidade. (ver [1]-[2])
17	18ª	simples e com baixo custo	simples
72	13ª	Figura A-3	Figura A-1

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO..... 1

2. VISÃO GERAL DOS MEDIDORES DE FORMAS

TRIDIMENSIONAIS..... 4

2.1. Técnicas por contato..... 5

2.2. Técnicas sem contato (*range finders*)..... 5

2.2.1. Técnicas *time of flight*..... 5

2.2.2. Técnicas *range image*..... 5

2.2.2.1. Técnicas passivas..... 6

2.2.2.2. Técnicas ativas..... 7

2.2.3. Visão estéreo..... 8

2.2.4. Visão estéreo ativa..... 10

3. ESCOPO DO TRABALHO..... 14

3.1. Objetivos do trabalho..... 14

14	3.2. Restrições da cena medida.....
16	4. SISTEMA RAINBOW RANGE FINDER.....
17	5. LUZ ESTRUTURADA – PADRÃO EM PSEUDO-ARCO-IRIS.....
17	5.1. A escolha do padrão em pseudo-arco-iris.....
19	5.2. Considerações sobre a não linearidade dos filmes.....
21	5.3. Utilização de padrões repetitivos.....
22	5.4. Margens para segmentação.....
24	6. DISPOSIÇÃO FÍSICA, MODELAGEM E EQUACIONAMENTO.....
24	6.1. Disposição física dos equipamentos.....
25	6.2. Modelo de câmera.....
25	6.3. Modelagem do sistema e equacionamento.....
33	6.4. Transformação geométrica perspectiva.....
38	7. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E OBTENÇÃO DOS RANGE IMAGES.....
39	7.1. Processamento das imagens.....
42	7.2. Triangulação.....
44	7.3. Calibração.....
48	8. SIMULAÇÃO – DESCRIÇÃO, RESULTADOS E ANÁLISES.....
48	8.1. Descrição do simulador.....
50	8.2. Análise de ruído e erro.....
54	8.3. Análise da densidade de reconstrução.....

8.4. Análise do sistema de calibração..... 55

9. OBJETOS REAIS – RESULTADOS E ANÁLISES..... 58

9.1. Descrição dos objetos utilizados 58

9.2. Apresentação e análise dos resultados 59

9.3. Comparação ilustrativa de objetos..... 62

10. CONCLUSÕES 64

10.1. Conclusões sobre o *rainbow range finder* 64

10.2. Sugestões para trabalhos futuros 66

ANEXO A – O SISTEMA DE CORES HSI 67

A.1. Conversão de RGB para HSI 69

A.2. Conversão de HSI para RGB 72

A.3. Operador de média 72

ANEXO B – ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DO MODELO DE

CÂMERA PINHOLE 74

B.1. Comparação das câmeras pinhole e convencional 74

B.2. Análise do problema de foco sobre o *rainbow range finder* 77

LISTA DE REFERÊNCIAS..... 80

4	Figura 2-1 Taxonomia com as principais técnicas de medição tridimensional
6	Figura 2-2 <i>Range image</i> e respectivo modelo tridimensional de uma calota esférica
8	Figura 2-3 Calota esférica com projeção de padrão em xadrez
9	Figura 2-4 Configuração para visão estéreo
10	Figura 2-5 Projeção de plano de luz
11	Figura 2-6 Trecho de sequência PN
12	Figura 2-7 Sequência de padrões temporais
12	Figura 2-8 Padrão para codificação por intensidade luminosa
13	Figura 2-9 Padrão em pseudo-arco-iris com variação uniforme de matiz
18	Figura 5-1 Espectro com variação contínua da componente matiz
18	Figura 5-2 Gráfico da componente matiz correspondente à Figura 5-1
19	Figura 5-3 Imagem real da projeção de pseudo-arco-iris sobre um plano
20	Figura 5-4 Gráfico da componente matiz correspondente à Figura 5-3
20	Figura 5-5 Padrões com matizes rotacionadas de n°
20	Figura 5-6 Imagem final após processamento das imagens capturadas
21	Figura 5-7 Gráfico da componente matiz correspondente à Figura 5-6
21	Figura 5-8 Padrão repetitivo de pseudo-arco-iris
22	Figura 5-9 Imagem real de pseudo-arco-iris e respectiva imagem de saturação
22	Figura 5-10 Forma final dos padrões em pseudo-arco-iris
24	Figura 6-1 Esquema com a disposição física dos equipamentos e respectiva vista ilustrativa
25	Figura 6-2 Modelo de câmara <i>pinhole</i>
26	Figura 6-3 Modelo óptico geométrico do sistema

LISTA DE FIGURAS

29	Figura 6-4 Imagem com aspecto trapezoidal devido à perspectiva.....
33	Figura 6-5 Geometria das bordas da imagem no plano π' (domínio da transformação).....
33	Figura 6-6 Geometria das bordas da imagem no plano π (imagem da transformação).....
38	Figura 7-1 Imagens artificiais de uma cena contendo uma calota esférica.....
39	Figura 7-2 Fluxo de operações do processamento de imagens.....
39	Figura 7-3 Esquema de detecção dos vértices.....
40	Figura 7-4 Imagens da cena com a calota esférica após a transformação perspectiva.....
40	Figura 7-5 Imagem da cena com a calota esférica após a operação de média.....
41	Figura 7-6 Gráfico da componente matiz da linha central horizontal da imagem da Figura 7-5.....
41	Figura 7-7 Gráfico após a conversão em função monoômica referente à Figura 7-6.....
41	Figura 7-8 Representação em escalas de cinza da matriz de códigos referente à cena com a calota esférica.....
42	Figura 7-9 Gráfico sobreposto da linha central da matriz de códigos e da amostra do plano de referência.....
44	Figura 7-10 Reconstrução da cena com a calota esférica.....
44	Figura 7-11 Paralelepípedo com altura conhecida.....
48	Figura 8-1 Representação em escalas de cinza dos <i>range images</i> de paralelepípedo, esfera, pirâmide e escada com degraus exponenciais.....
49	Figura 8-2 Resultado da projeção do padrão de cores sobre um paralelepípedo.....
49	Figura 8-3 Resultado da captura da imagem da Figura 8-2.....
50	Figura 8-4 Reconstrução do paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels.....
51	Figura 8-5 Gráfico representativo da linha central do modelo do paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels.....
54	Figura 8-6 Imagem capturada de uma pirâmide de altura 200 pixels.....
54	Figura 8-7 Reconstrução da pirâmide de altura 200 pixels.....
55	Figura 8-8 <i>Range image</i> do modelo da Figura 8-7 com indicação de falhas.....
58	Figura 9-1 Objetos usados na análise de casos reais.....
59	Figura 9-2 Imagens capturadas dos paralelepípedos de dimensões 160x100x30mm e 160x100x60mm.....

Figura 9-3	Reconstruções dos paralelepípedos de dimensões 160x100x30mm e 160x100x60mm	60
Figura 9-4	Gráfico representativo de um corte no modelo reconstruído do paralelepípedo de dimensões 160x100x30mm	61
Figura 9-5	Gráfico representativo de um corte no modelo reconstruído da simulação com inclusão de erro de alinhamento	61
Figura 9-6	Modelos reconstruídos de pirâmides real e simulado	63
Figura 9-7	Modelos reconstruídos de escada com degraus exponenciais real e simulado	63
Figura A-1	Representação espacial do sistema HSI	67
Figura A-2	Disco do plano de intensidade $\frac{1}{2}$ do sistema HSI	68
Figura A-3	Gráficos HxR, HxG e HxB	69
Figura A-4	Componentes RGB da cor rosa escuro	70
Figura B-1	Esquema de captura de imagem de uma câmera pinhole	74
Figura B-2	Esquema de captura de imagem de uma câmera convencional	75
Figura B-3	Esquema de câmera convencional com lente fora de foco	76
Figura B-4	Gráfico de variação de matiz da imagem em foco	77
Figura B-5	Gráfico de variação de matiz da imagem fora de foco	78
Figura B-6	Simulação de foco de imagem sobre degrau	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 8-1 Resultados quantitativos sobre o modelo do paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels	51
Tabela 8-2 Resultados quantitativos sobre os modelos de paralelepípedos em diferentes resoluções	52
Tabela 8-3 Resultados quantitativos sobre os modelos de paralelepípedos de diferentes alturas	53
Tabela 8-4 Comparativo da quantidade de pontos válidos e falhos do <i>range image</i> da Figura 8-8....	55
Tabela 8-5 Comparativo dos valores dos parâmetros obtidos da calibração e dos valores reais	56
Tabela 9-1 Dimensões dos objetos usados na análise de objetos reais	59
Tabela 9-2 Resultados quantitativos sobre os modelos dos paralelepípedos de dimensões 160x100x30mm e 160x100x60mm.....	60
Tabela A-1 Equações usadas na conversão do sistema RGB para o sistema HSI	71
Tabela A-2 Equações usadas na conversão do sistema HSI para o sistema RGB	72
Tabela B-1 Cálculo do <i>depth of field</i> da câmera fotográfica utilizada.....	76

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos *range finders* (medidores de distâncias e formas tridimensionais) têm se tornado um fator importante nos avanços recentes da tecnologia. Estas técnicas possibilitam a modelagem digital de objetos e relevos de formas irregulares, sendo usadas como ferramentas com utilizações tão variadas quanto os campos da atividade humana. Só para citar alguns, tem-se a indústria como um todo, a robótica, a medicina, a ergonomia, a arqueologia e os ramos da estética e do entretenimento.

Logicamente, as técnicas desenvolvidas para cada uma destas finalidades são diferentes, de forma a se adaptar a cada aplicação. O *rainbow range finder*, implementado e descrito nesta dissertação, utiliza-se de codificação por projeção de luz estruturada com forma semelhante a um arco-íris para a obtenção de mapas de profundidade, prezando pela alta resolução e velocidade. Isto é possível pois a aquisição dos dados é feita por imagens digitais completas, onde todos os pixels podem ser analisados.

Alguns *rainbow range finders* podem ser encontrados em literatura. Tajima [1] foi o primeiro a utilizar o padrão de arco-íris em um *range finder*, decodificando o espectro através de filtros de cores. Smutny e Pajdla [2] reimplimentaram o sistema alterando a decodificação para um processo computacional, sem o uso de filtros. Sato e Kitayama [3] descrevem um sistema que foi desenvolvido com o objetivo de medir os pontos de contato na base de circuitos integrados com encapsulamento BGA.

O sistema elaborado neste trabalho possui uma linha de raciocínio diferente dos já desenvolvidos, tendo como características principais a portabilidade

e o baixo custo dos equipamentos através da utilização de projetores e câmeras disponíveis comercialmente. Além disso, a aquisição das imagens é desacoplada do sistema de processamento, podendo as imagens serem adquiridas de forma isolada com uma necessidade local de equipamentos reduzida, sendo o processamento, incluindo a calibração do sistema, feito posteriormente em um ambiente mais adequado.

Tecnicamente, uma abordagem mais simples da triangulação é estudada, levando em consideração alguns elementos do contexto de processamento de imagens. Um plano físico com posição fixa em relação ao projetor é utilizado, servindo como referência para as medições e para o processamento. Assim, as imagens capturadas contra uma vista completa do padrão de luz projetado, podendo as margens deste padrão serem identificadas e usadas num processo que simplifica o modelo.

Foi desenvolvido também um sistema de calibração que se utiliza de um algoritmo genético, capaz de determinar valores de constantes do sistema de forma iterativa, apenas com base em imagens de objetos com dimensões conhecidas.

Inicialmente, imagens geradas artificialmente são usadas para verificar o funcionamento geral do sistema em condições bem controladas. Com estas simulações, pôde-se analisar as capacidades do sistema de forma rápida e eficaz, sem a influência de ruídos externos.

Um conjunto de testes com objetos e imagens reais foram feitos em seguida para uma verificação das influências de ruídos externos e também para uma avaliação comparativa com os resultados das simulações.

Esta dissertação pode ser dividida em três partes. A primeira parte é compreendida por esta introdução, pela seção 2 que contém informações de aspecto geral sobre os medidores tridimensionais para uma contextualização do sistema desenvolvido e pela seção 3 que define os objetivos específicos deste trabalho. A segunda parte, composta pelas seções 4 a 7, descreve os detalhes do desenvolvimento do sistema *rainbow range finder*, incluindo uma descrição dos equipamentos, a modelagem utilizada e o equacionamento. A última parte apresenta os resultados obtidos e também as conclusões, sendo que a seção 8 contém os dados relativos à

simulação com imagens artificiais e a seção 9, os dados dos testes com objetos reais. A seção 10 conclui este trabalho com alguns comentários úteis para desenvolvimentos futuros deste sistema.

O anexo A possui informações relevantes sobre o sistema de cores HSI, utilizado na confecção dos padrões em pseudo-arco-íris e o anexo B faz uma análise do modelo de câmera pinhole sobre o qual o sistema foi baseado.

2. VISÃO GERAL DOS MEDIDORES DE FORMAS TRIDIMENSIONAIS

A medição de formas tridimensionais é um campo de pesquisa muito amplo, onde a diversidade de áreas de aplicação faz com que técnicas peculiares a cada necessidade sejam desenvolvidas. Assim, torna-se interessante agrupar estas técnicas segundo algumas características, de forma a facilitar a visualização da estrutura funcional de cada uma delas. A Figura 2-1 mostra uma taxonomia englobando as principais técnicas existentes. Uma caracterização simples destas técnicas será apresentada nos tópicos que se seguem.

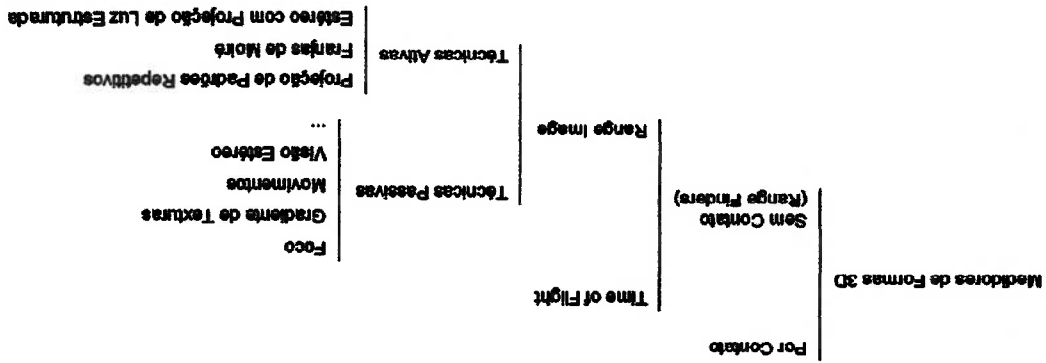


Figura 2-1 Taxonomia com as principais técnicas de medição tridimensional.

São apresentados como referência os textos de Shirai [4] e Jarvis [5], assim como a obra de Inokuchi e Sato [6], que trazem maiores detalhes sobre estas técnicas, especialmente nos aspectos de implementação, sendo o último mais específico para *range finders* ativos.

2.1. Técnicas por contato

Fazem parte deste grupo, os equipamentos conhecidos como medidores de coordenadas. Estes equipamentos possuem um conjunto de eixos e articulações que fornecem a posição tridimensional de uma ponta de prova conectada em sua extremidade. Equipamentos modernos possuem boa precisão, na ordem de micrômetros, mas os tempos de medição são elevados, pois a forma de um objeto é adquirida ponto-a-ponto, apalpando-se extensivamente a superfície. Estes equipamentos são utilizados principalmente nas indústrias para a inspeção de moldes e matrizes.

2.2. Técnicas sem contato (*range finders*)

2.2.1. Técnicas *time of flight*

As técnicas do tipo *time of flight* (tempo de voo) se utilizam de fontes de ondas energéticas, tais como ondas eletromagnéticas, ondas sonoras (ultra-som) e luz (*laser*) para obter a distância efetiva entre o ponto medido e um ponto de referência – geralmente o próprio emissor de ondas. O cálculo da distância é feito tomando-se a velocidade de propagação da onda e o tempo levado pela onda, desde a emissão, seguido pela reflexão no ponto de medição e a detecção.

Grças as peculiaridades de cada modalidade de onda, estes medidores são usados em uma variedade de campos, desde a engenharia de alta precisão, com medições na ordem de nanômetros usando feixes de laser até radares meteorológicos para a medição de grandezas na ordem de centenas de quilômetros. Apesar desta flexibilidade, estas técnicas ainda apresentam problemas de velocidade pois as medições são feitas ponto-a-ponto, tal como nos medidores de coordenadas.

2.2.2. Técnicas *range image*

Estas técnicas se caracterizam por utilizar imagens digitais para a medição de objetos e ambientes. Usualmente, as imagens são tomadas a partir de uma câmera,

sendo o resultado da medição, uma topografia do ambiente na forma como é vista por esta câmera. Por conveniência, os resultados destas medições são fornecidos na forma de *range images*.

Range images (mapas de profundidade) são matrizes bidimensionais utilizadas para representar dados topográficos tridimensionais. Assim, cada elemento (x,y) da matriz armazena a informação de elevação daquele ponto sob a forma $z=f(x,y)$ [6]. Esta representação é útil, pois um *range image* é facilmente convertido em uma imagem digital convencional, podendo ser visualizado e interpretado de forma intuitiva, como o exemplo da Figura 2-2 que apresenta um *range image* de uma calota esférica ao lado do respectivo modelo tridimensional.

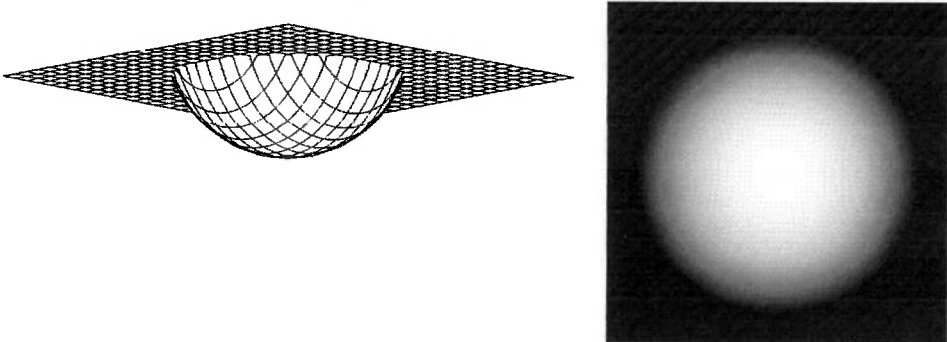


Figura 2-2 *Range image* e respectivo modelo tridimensional de uma calota esférica.

2.2.1. Técnicas passivas

As técnicas passivas possuem como principal característica a capacidade de medição de objetos e cenas com imagens tomadas apenas com a iluminação ambiente.

Devido à simplicidade de comparação e à pré-existência de modelos, a maioria destas técnicas possuem uma forte ligação com propriedades psico-físicas da percepção visual humana. A medição tridimensional é processada com base em informações do foco, do gradiente de texturas, da perspectiva por tamanho, dos efeitos de oclusão, da continuidade de contornos, dos movimentos e da visão estereo (perspectiva binocular) [5]. No caso biológico, muitas destas informações, se não todas, são usadas para se obter a melhor interpretação do ambiente observado pelos olhos. Já no caso dos *range finders*, principalmente devido à incapacitação

computacional, apenas algumas, e usualmente apenas uma das técnicas é usada por vez para se obter os *range images*:

O grande problema encontrado nas técnicas passivas é a subjetividade da teoria envolvida. O sistema visual do ser humano é constituído meramente como uma forma de auxiliar as atividades físicas do corpo, não tendo uma capacidade para a metrologia. Além disso, a percepção humana é desenvolvida por um longo processo de aprendizado, sendo baseado muitas vezes em propostas pré-concebidas da realidade. Da mesma forma, os *range finders* passivos necessitam que uma cena contenha informações que possam servir de referência, tal como texturas de alto contraste, ou que haja um pré-conhecimento das características da cena medida.

Em casos onde tais situações são atendidas é possível obter resultados expressivos. Já em situações usuais, as informações que se obtêm são em geral qualitativas com a identificação de alguns poucos pontos ou de meras posições relativas entre objetos.

Por estas razões, as técnicas passivas são usuais em casos com grandes restrições de forma ou textura, usualmente em âmbito laboratorial, ou em sistemas de sensoramento robótico, onde a própria natureza do ambiente força a necessidade da utilização destes sistemas.

A teoria da visão estereo forma a base para o sistema desenvolvido nesta dissertação, sendo seus detalhes tratados à parte na seção 2.2.3.

2.2.2.2. Técnicas ativas

Para superar as dificuldades das técnicas passivas, especialmente no que se refere a cenas com baixo contraste, foram propostos sistemas onde uma iluminação com características conhecidas é projetada para servir de referência ao processamento. Este tipo de iluminação é conhecido como luz estruturada.

A projeção de padrões repetitivos, a utilização de franjas de Moiré e a visão estereo ativa são as principais técnicas encontradas nesta categoria. Em essência, todas estas técnicas são iguais, pois se utilizam dos efeitos causados pelo uso de um projetor de luz estruturada e uma câmera em posições diferentes. A

categorização é feita devido às diferenças técnicas em nível de análise e processamento.

A técnica com projeção de padrões repetitivos se aproxima de um sistema monocular, dado que a posição do projetor não é considerada no processamento. Figura 2-3 mostra o resultado da projeção de um padrão em xadrez, não havendo a usada para a recuperação apenas da forma do objeto observado, não havendo a intenção de determinar a sua posição.

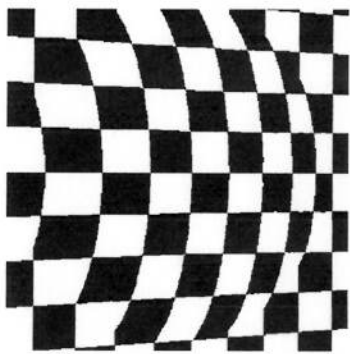


Figura 2-3 Calota esférica com projeção de padrão em xadrez.

As técnicas com utilização de franjas de Moiré são uma forma alternativa de observar a medição ótica. As franjas de Moiré possuem uma relação com a codificação espacial por transformadas de Fourier e se formam quando um padrão em grade é projetado sobre uma cena e esta é observada através da mesma grade a partir de um ponto deslocado em relação ao projetor. A interferência entre as grades formam curvas de nível que podem ser isoladas por técnicas de processamento de imagens e então utilizadas na reconstrução da cena.

As técnicas ativas da visão estereo serão tratadas com maiores detalhes na seção 2.2.4, por se tratarem do tema deste trabalho.

2.2.3. Visão estereo

A visão estereo é um dos principais mecanismos que a visão biológica se utiliza para obter informações tridimensionais do ambiente. Quando se usam os dois olhos para analisar uma determinada cena, obtêm-se duas imagens ligeiramente diferentes, uma em cada olho. O cérebro processa as imagens, sabendo que ambas

correspondem a uma mesma região de observação, e então tira conclusões com relação à disposição tridimensional do ambiente.

No caso dos *range finders*, esta situação é reproduzida com o uso de duas câmeras que são posicionadas como na Figura 2-4. Nesta configuração, são obtidas duas imagens distintas do mesmo campo de observação que são processadas para reconstruir a cena.

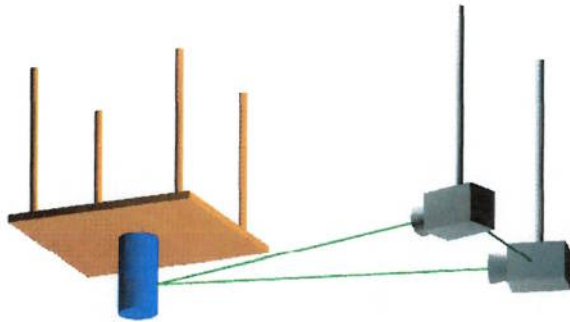


Figura 2-4 Configuração para visão estereóscópica.

Matematicamente, o processo usado na reconstrução da visão estereóscópica é conhecido por triangulação. Na Figura 2-4 esta é indicada por um triângulo formado pelas duas câmeras e um ponto sobre a cena. Este triângulo fica determinado pela posição relativa entre as câmeras e os ângulos das linhas de observação. Com isso, a distância do ponto observado pode ser determinada através de um simples cálculo geométrico.

A posição relativa entre as câmeras pode ser determinada por simples medição. Existem também diversas técnicas mais precisas de calibração por imagens desenvolvidas para este fim [7]-[8].

A determinação dos ângulos das linhas de observação constitui um problema de ordem superior, não sendo ainda conhecida uma solução definitiva. O processo fundamental envolvido, conhecido por correlação, consiste em identificar pontos nas imagens, que correspondam a um mesmo ponto sobre a cena. Desta forma, conhecendo-se a geometria da câmera, pode-se determinar a direção relativa do ponto observado. Diversas técnicas estão sendo estudadas, tais como a programação dinâmica, a integral *fuzzy* e a técnica *coarse to fine* (variação de resolução), mas todas apresentam problemas de incerteza ou de complexidade computacional.

2.2.4. Visão estereo ativa

Uma das soluções mais eficazes encontradas para o problema da correlação na visão estereo é a sua forma ativa. Neste caso, uma das câmeras é substituída por um projetor de luz estruturada que marca a cena a trivialisar o processo de identificação dos pontos na imagem.

Existem diversas formas de luz estruturada já utilizadas em visão estereo. A forma inicial consistia na projeção de um raio de *laser* que marca um único ponto sobre a cena. Este ponto com cor e intensidades conhecidas pode ser facilmente rastreado na imagem, não havendo qualquer problema de correlação. O problema nesta abordagem é o tempo de aquisição e processamento dos dados, já que para cada ponto projetado, é necessário capturar e processar uma imagem inteira.

Para agilizar a aquisição de dados, foi proposto a utilização de uma plano vertical de luz, que quando projetado, forma uma lista sobre a cena [9]-[10]. Assim, o rastreamento vertical pode ser suprimido, aumentando a velocidade do processo (Figura 2-5).

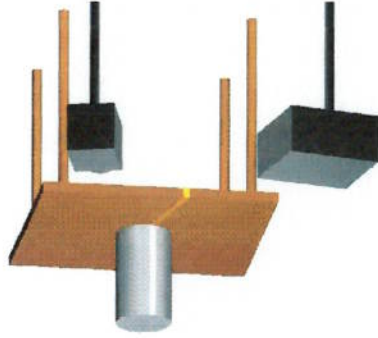


Figura 2-5 Projeção de plano de luz.

Uma evolução neste sistema nos leva à projeção de múltiplas listras simultâneas para suprimir também o rastreamento horizontal. Porém, neste caso, o problema da correlação volta a ocorrer, já que não há formas triviais de identificar as diferentes listras. Algumas técnicas foram propostas para possibilitar a diferenciação das listras, sendo notáveis a utilização de listras com larguras e espaçamentos variados, listras segmentadas e listras coloridas [11].

A forma final da evolução das luzes estruturadas envolve o conceito de codificação do espaço. Agora, a cena não é mais somente marcada, para que os pontos sejam rastreáveis, mas uma forma extensiva de códigos são projetados para que os diferentes planos de luz sejam imediatamente identificados. As principais formas já apresentadas para a codificação do espaço são as codificações bidimensional, temporal, por intensidade luminosa e por cores.

A codificação bidimensional atribui características locais de forma à luz estruturada usando um código espacial geométrico. Um exemplo pode ser observado na Figura 2-6, onde a luz estruturada é codificada por um padrão conhecido por sequência PN. Neste caso o código é vinculado às conexões entre os pontos uniformemente distribuídos. Desta forma, cada janela de 2×3 pontos detectam uma coluna vertical de forma única. Morano et al. [12] apresentaram uma otimização usando matrizes com células multi-valor (tons de cinza, cintilante temporal ou cor) para um aumento na densidade dos códigos.

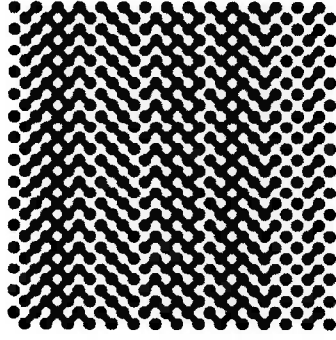


Figura 2-6 Trecho de sequência PN.

Na codificação temporal, cada plano de luz é diferenciado por uma sequência binária de intensidades luminosas que formam códigos ao longo do tempo. Uma sequência como a da Figura 2-7 faz com que 2^n códigos sejam criados com apenas n padrões. Vários autores [13]-[15] apresentam uma forma de otimizar estes padrões usando escalas de cinza e cor para reduzir o número de padrões necessários sem reduzir o total de códigos.

A codificação por intensidade luminosa, proposta por Miyasaka et al. [16] entre outros, utiliza-se de uma iluminação com variação gradual da intensidade como a da Figura 2-8. O código é vinculado à intensidade luminosa de cada plano de luz.

Deve-se observar que diferente das duas técnicas anteriores, neste caso, a cena é codificada de forma extensiva, gerando uma grande densidade de códigos em uma só imagem.

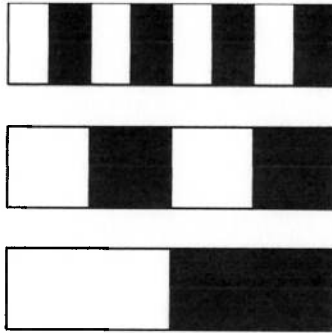


Figura 2-7 Sequência de padrões temporais.

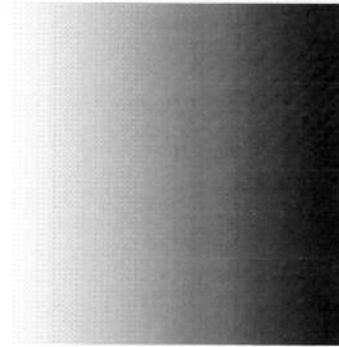


Figura 2-8 Padrão para codificação por intensidade luminosa.

Finalmente, a codificação por cores, tema da presente dissertação, é apresentada. Esta técnica foi desenvolvida inicialmente por Tajima [1], que se utilizou de um prisma e de uma fonte de luz branca para projetar sobre a cena um padrão de arco-íris. O código, vinculado ao comprimento de onda de cada cor, possibilita uma codificação extensiva e de alto contraste. Tajima se utilizou da razão de resposta da câmera a dois filtros de cores distintos para identificar os planos de luz. Esta técnica foi batizada como *rainbow range finder* por este autor.

Uma reimplimentação desta técnica foi feita por Smutny e Pajdla [2]. Neste caso, o padrão é projetado através de uma placa de vidro com uma camada de metal vaporizado de espessura variável. A decodificação das cores é feita sem o uso de filtros, por um processo computacional que analisa as componentes RGB obtidas

da imagem. Uma análise da metodologia de decodificação mostra que, em essência, o processo efetua uma conversão das cores para um código baseado em matiz.

Sato e Kitayama [3] desenvolveram um sistema que trabalha diretamente com o conceito de matiz, sendo a projeção do padrão feita por filmes coloridos de forma artificial com pseudo-arco-iris (Figura 2-9). A recuperação tridimensional da cena é feita com base em comparações diretas dos níveis de matiz, considerando paralelismo nas projeções. Este sistema foi implementado com o uso de projetores específicos e utilizado na medição de pontos de contato na base de circuitos integrados com encapsulamento BGA.

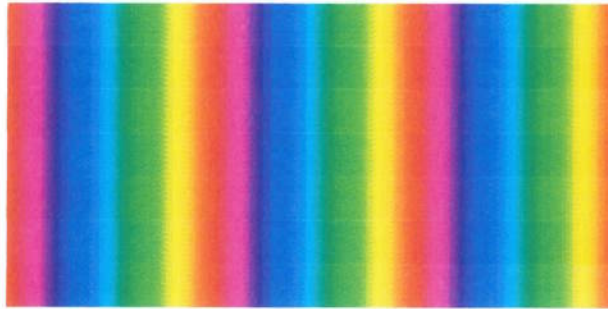


Figura 2-9 Padrão em pseudo-arco-iris com variação uniforme de matiz.

3. ESCOPO DO TRABALHO

3.1. Objetivos do trabalho

O objetivo global deste trabalho é o estudo de todos os aspectos necessários para a implementação de um sistema *rainbow range finder*, desde a captura das imagens até a obtenção do modelo da cena de interesse. Dentro deste grande objetivo se inserem os estudos de diversos aspectos localizados que são desenvolvidos para o sistema que será apresentado.

Pode-se considerar como objetivos de escopo específico, o estudo da simplificação do modelo da triangulação através do uso de um plano de referência, assim como a inclusão de conceitos de processamentos de imagens para a análise da triangulação.

Uma nova técnica de calibração também é estudada, tendo o intuito de verificar a possibilidade de uso de algoritmos genéticos para este fim.

3.2. Restrições da cena medida

Algumas restrições quanto às características das cenas medidas serão definidas, devido às necessidades impostas pela própria teoria envolvida no sistema e também para manter o escopo do trabalho dentro dos limites dos objetivos propostos.

A primeira restrição, necessária e comum a quase todos os sistemas que se usam da projeção de luz estruturada, diz respeito às características de superfície da cena medida. Uma vez que o padrão de luz projetado deve ser visto pela câmera independente da forma da cena, é necessário garantir que as superfícies visíveis reflitam a luz em todas as direções.

O conceito de superfícies lambertianas é geralmente usado em sistemas com projeção de luz estruturada. Neste caso, estas superfícies refletem a luz em todas as direções de forma uniforme. Porém, no presente estudo, o conceito de superfícies lambertianas será relaxado, não sendo necessário que a reflexão seja uniforme, bastando que haja uma reflexão em todas as direções mantendo um mínimo de intensidade compatível com a foto-sensibilidade da câmera.

A segunda restrição decorre das características de cor usadas em *rainbow range finders*, de forma que as cenas medidas devem ter coloração clara uniforme para que não interfiram na detecção das cores projetadas.

Usualmente, é imposto o uso de cores brancas em sistemas que fazem uso do valor absoluto da cor refletida pela cena. Novamente, esta característica pode ser relaxada, devido ao uso do plano de referência, desde que este plano seja da mesma cor da cena, já que as cores são usadas de forma comparativa. Mesmo neste caso, a coloração deve possuir saturação baixa de forma que nenhuma das cores projetadas seja refletida com intensidade inferior à foto-sensibilidade da câmera.

4. SISTEMA RAINBOW RANGE FINDER

Conforme já mencionado na seção 2.2.4, os sistemas *rainbow range finder* são um tipo específico de sistemas de visão estereó ativa, onde os componentes físicos característicos para a execução do processo de triangulação são o projetor de luz estruturada, o dispositivo de captura de imagens e o sistema de processamento e armazenamento das informações.

A escolha dos equipamentos para este trabalho foi feita de forma a mostrar a adaptabilidade do sistema a qualquer equipamento comercial, sendo usados dispositivos que podem ser considerados genéricos em suas categorias. A seguir serão dadas as descrições de cada equipamento utilizado.

Para a projeção da luz estruturada foi utilizado um projetor de *slides* da marca IEC, modelo MA-150 com lentes de 85mm. O *slide* no padrão 35mm, foi gerado por um equipamento fotográfico especializado a partir de imagens digitais geradas por computador.

O dispositivo de captura de imagens utilizado foi uma câmera fotográfica da marca Olympus, modelo Infinite Stylus Zoom 115 DLX, com lentes de 38~115mm, carregada com filme colorido ASA400. Os filmes negativos obtidos foram digitalizados por um *scanner* da marca Canon, modelo CanoScan D 660U com resolução ótica de 1200x1200dpi.

O sistema de processamento e armazenamento de informações é um computador padrão PC com processador Intel Pentium III a 800Mhz, com 640Mbytes de memória RAM. Os softwares foram desenvolvidos em ambiente DOS/DPMI, em linguagem C++ com o compilador GNU DJGPP v2.

5. LUZ ESTRUTURADA – PADRÃO EM PSEUDO-ARCO-IRIS

5.1. A escolha do padrão em pseudo-arco-iris

O objetivo final de um sistema *range finder* por visão estereó ativa é obter observados na cena devem ser identificáveis de forma a possibilitar o processamento o mapa de profundidades de uma cena tridimensional. Para isso, todos os pontos da triangulação.

A codificação do espaço é a técnica que tenta se encaixar nesta descrição de forma direta. Idealmente, todos os pontos de uma cena devem ser identificados com um código atribuído pela luz estruturada. Desta forma, torna-se interessante o uso de padrões que possibilitem uma codificação contínua do espaço.

O arco-iris é a forma natural que pode ser usada para esta finalidade. O seu espectro é constituído pela difração de uma fonte de luz branca que forma uma sequência de cores ordenadas conforme o comprimento de onda. Esta sequência nos fornece uma codificação que se insere de forma implícita nas cores dos planos de luz.

Porém, a projeção controlada de um arco-iris natural só é possível pela construção de um dispositivo próprio para esta finalidade. Para manter a flexibilidade do sistema desenvolvido, esta opção deve ser desconsiderada.

A forma mais simples e com baixo custo de se efetuar uma projeção de luz estruturada é através de projetores de *slides*. Isto pode ser dito principalmente pela existência de equipamentos que fazem a transferência de imagens digitais para *slides* de forma automática. Assim, a alternativa seria criar uma imagem digital de um padrão em arco-iris.

Infelizmente, o sistema usual de representação de cores usado em imagens digitais, o sistema RGB, não permite que um padrão em arco-íris seja criado de forma simples. Por outro lado, existem diversos sistemas de cores que podem ser convertidos de forma simples para o sistema RGB e um deles possui propriedades interessantes que devem ser estudadas.

A Figura 5-1 mostra um espectro com a variação da componente matiz (*Hue*) do sistema HSI. É fácil observar a semelhança deste espectro com um arco-íris, sendo este um indicio de que o sistema pode ser usado na confecção do padrão de codificação.

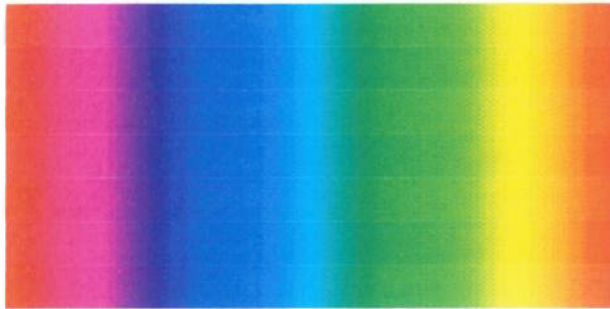


Figura 5-1 Espectro com variação contínua da componente matiz.

Apesar da semelhança, este não é um arco-íris real e o comprimento de onda deixa de ser uma codificação interessante. Em compensação o valor da componente matiz pode ser usado na codificação, como mostra a Figura 5-2. Este gráfico de variação uniforme de matiz corresponde ao espectro da Figura 5-1.

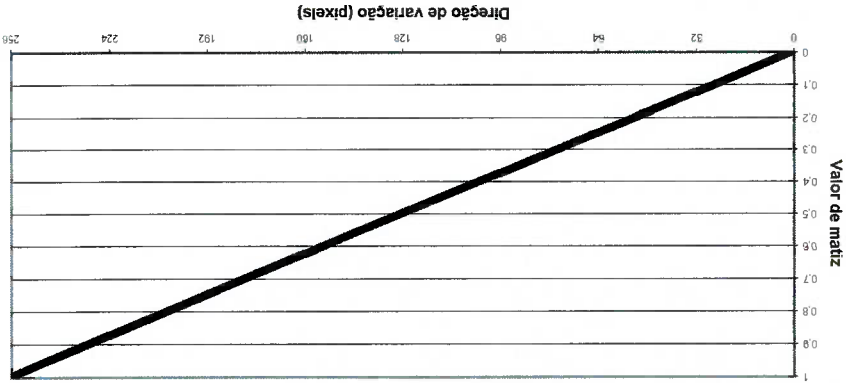


Figura 5-2 Gráfico da componente matiz correspondente à Figura 5-1.

É interessante observar que o espectro apresentado começa e termina pela cor vermelha, de acordo com o aspecto periódico da componente matiz do sistema HSL, característica esta que será usada mais adiante. Uma discussão detalhada sobre o sistema de cores HSL, assim como a formulação para a sua conversão para o sistema RGB e vice-versa, são discutidos no Anexo A.

5.2. Considerações sobre a não linearidade dos filmes

Uma vez confeccionado o *slide*, pode-se verificar a adequação do sistema de projeção e captura de imagens ao padrão em pseudo-arco-íris. A Figura 5-3 mostra uma imagem real obtida da projeção do padrão da Figura 5-1 sobre uma superfície plana. A Figura 5-4 mostra o gráfico da variação de matiz ao longo de uma das linhas desta imagem. A formação de degraus ocorre devido à não linearidade de resposta dos filmes, sendo neste caso uma composição da não linearidade tanto do *slide* como do negativo fotográfico. Apesar da codificação do espaço não exigir uma linearidade do código projetado, os códigos devem ser únicos para cada ponto. Neste caso, na região dos patamares, há a projeção de códigos (cores) iguais para pontos distintos. Esta situação obviamente é inadequada e deve ser corrigida.

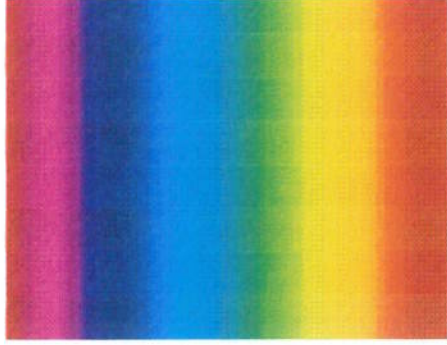


Figura 5-3 Imagem real da projeção de pseudo-arco-íris sobre um plano.

A correção é feita usando-se a característica periódica da componente matiz. Assim, são criados quatro padrões onde a matiz das cores são rotacionadas sequencialmente de $\pi/2$, resultando nos padrões da Figura 5-5.

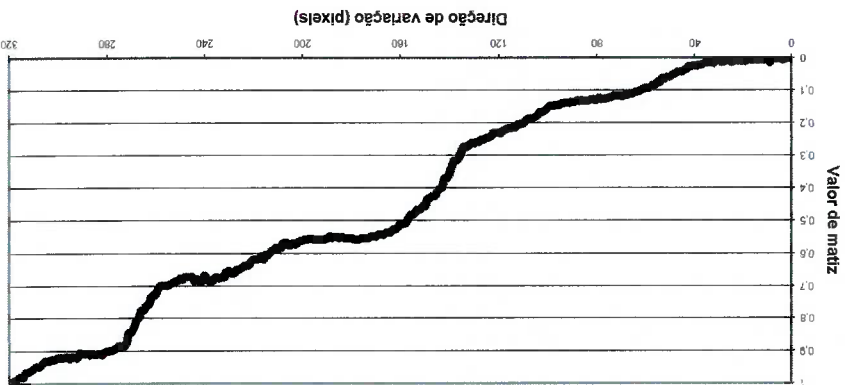


Figura 5-4 Gráfico da componente matiz correspondente à Figura 5-3.

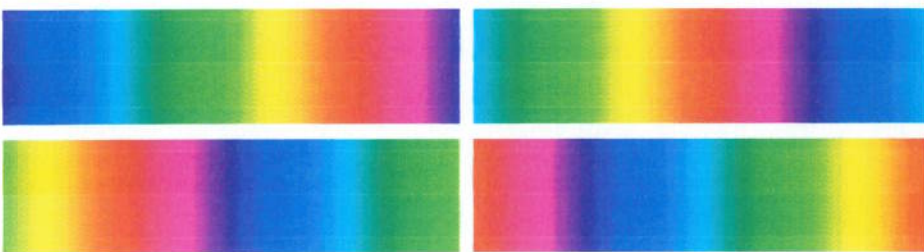


Figura 5-5 Padrões com matizes rotacionadas de $\pi/2$.

A mesma cena é então capturada sob a iluminação de cada padrão, sendo as cores das imagens obtidas, rotacionadas em sentido inverso para então serem combinadas aplicando-se um operador de média. A Figura 5-6 apresenta o resultado desta operação e a Figura 5-7 mostra o gráfico de matiz correspondente. Pode-se observar que, a menos do ruído, o gráfico é praticamente linear, sendo claro a atenuação dos efeitos de degrau conseguido por este método.

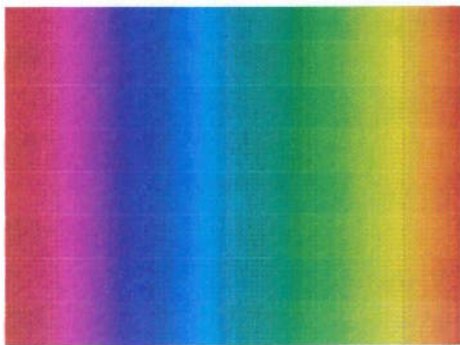


Figura 5-6 Imagem final após processamento das imagens capturadas.

5.3. Utilização de padrões repetitivos

Com o intuito de aumentar a densidade do padrão de cores, é proposto o uso da propriedade periódica da matriz para produzir um padrão repetitivo como o da Figura 5-8. Este aumento na densidade é interessante especialmente quando são tratadas imagens digitais, onde a discretização no nível de cores faz com que apenas um número limitado de matizes sejam representáveis.

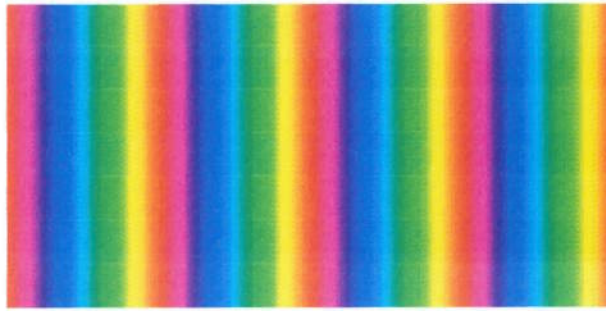


Figura 5-8 Padrão repetitivo de pseudo-arco-íris.

O único efeito negativo é a limitação na elevação que pode ser medida. Isto ocorre devido a problemas de correlação que podem ocorrer quando uma elevação excessiva faz com que ciclos vizinhos se sobreponham na imagem observada, impossibilitando a identificação correta de cada ciclo.

5.4. Margens para segmentação

Para simplificar o processamento das imagens, é necessário se preocupar com meios que possibilitem distinguir a área iluminada pelo padrão de cores da região circundante, operação esta conhecida por segmentação.

Sabe-se que a parte fora da região de interesse será formada pelas cores branca, que surge sob a iluminação das partes não usadas do *slide*, ou preta, que são as regiões sem iluminação. Por outro lado, a região de interesse é basicamente colorida a menos de algumas sombras que podem se formar.

A componente de saturação do sistema HSI define o quão próximo da escala de cinzas está uma determinada cor, sendo esta a forma mais apropriada para diferenciar um ponto colorido de um que seja preto ou branco.



Figura 5-9 Imagem real de pseudo-arco-íris e respectiva imagem de saturação.

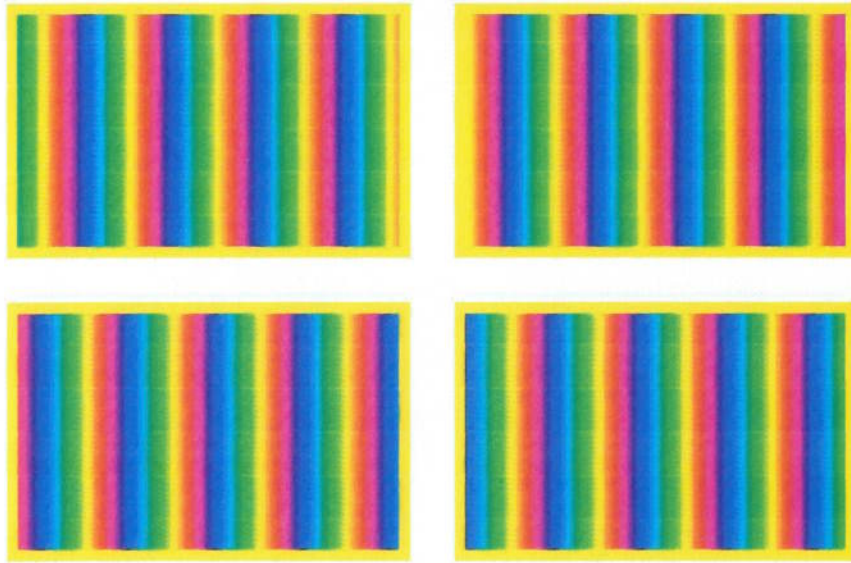


Figura 5-10 Forma final dos padrões em pseudo-arco-íris.

A Figura 5-9 apresenta lado a lado uma imagem real e seus níveis de saturação. Observa-se que a saturação não é uniforme, devido novamente à não linearidade dos filmes. Observa-se também que a cor amarela possui melhor resposta à saturação. Desta forma, uma margem amarela é usada para auxiliar o processo de segmentação que será usado mais adiante.

A Figura 5-10 mostra a forma final dos padrões em pseudo-arco-íris usados no sistema *range finder* desenvolvido.

6. DISPOSIÇÃO FÍSICA, MODELAGEM E EQUACIONAMENTO

6.1. Disposição física dos equipamentos

A disposição física dos equipamentos para a captura das imagens está mostrada na Figura 6-1. Pode ser observado a presença de um projetor, uma câmera fotográfica, um plano de referência e um objeto. A posição exata de cada equipamento não é definida podendo-se adaptá-la de acordo com as possibilidades locais, desde que obedecidas as seguintes restrições:

- O eixo central do projetor deve estar ortogonal ao plano de referência.
- A câmera e o projetor devem estar sobre o mesmo plano horizontal.

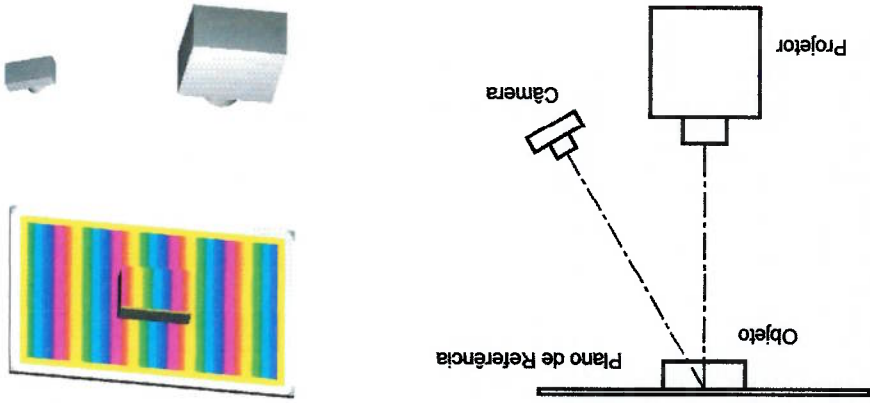


Figura 6-1 Esquema com a disposição física dos equipamentos e respectiva vista ilustrativa.

De forma prática, o posicionamento do projetor é feito medindo-se a forma do padrão projetado sobre o plano de referência, que devido à primeira restrição deve ser retangular. Já a câmera é posicionada alinhando-se os níveis dos centros das lentes do projetor e da câmera de forma visual e então verificando a

centralização da imagem no visor da câmera. De forma complementar, verifica-se a verticalidade da parte traseira da câmera, onde o filme negativo está apoiado internamente.

As restrições propostas são comuns em sistemas de visão estereo e serão usadas como hipótese na simplificação do equacionamento. Uma análise dos possíveis problemas decorrentes de desvios nos posicionamentos é feita na seção 9.2.

6.2. Modelo de câmera

O modelo de câmera selecionado para a modelagem do sistema é o de câmera *pinhole* (furo de alfinete), mostrado na Figura 6-2 com as suas principais características. A projeção da cena tridimensional sobre o plano da imagem é feita com base em um ponto focal. Este é o modelo mais utilizado em aplicações de visão computacional devido à simplicidade e à boa compatibilidade com câmeras reais.

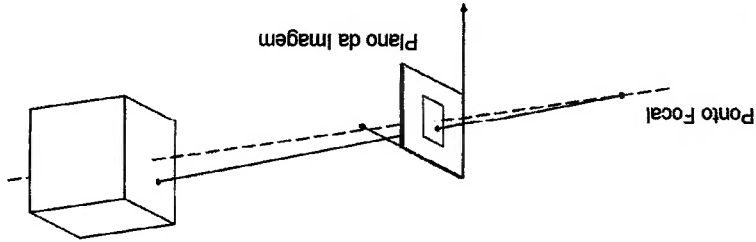


Figura 6-2 Modelo de câmera *pinhole*.

O sistema de coordenadas sobre a imagem é sinistrôgito devido à forma usual utilizada em imagens digitais, onde o canto esquerdo superior é a origem e os eixos x e y crescem para a direita e para baixo respectivamente.

Uma discussão mais detalhada sobre a adequação deste modelo às câmeras reais é feita no anexo B.

6.3. Modelagem do sistema e equacionamento

Com o modelo de câmera e as restrições de posicionamento já definidas, a modelagem do sistema como um todo é direta. A Figura 6-3 apresenta o esquema

óptico geométrico do sistema. Os pontos F e G representam respectivamente os pontos focais do projetor e da câmera. O plano π representa o plano de referência e o plano π' o plano de formação da imagem.

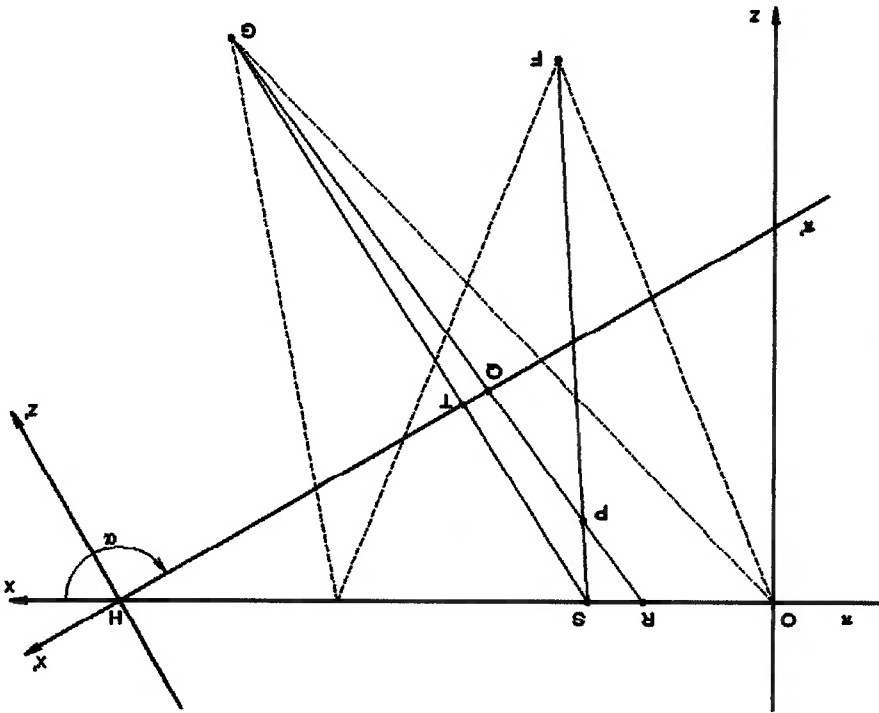


Figura 6-3 Modelo óptico geométrico do sistema.

O equacionamento será feito através de geometria analítica, sendo o objetivo final, encontrar as equações que relacionam a posição de um ponto P genérico às coordenadas dos pontos conhecidos ou que sejam determináveis por calibração. O *software* Mathcad foi utilizado para resolver as equações literais que seguem.

Inicialmente, será definida a nomenclatura utilizada no decorrer do equacionamento. As coordenadas cartesianas de todos os pontos serão representadas pelas letras x , y e z , sendo o subscrito indicativo do ponto ao qual a coordenada se refere. Assim, por exemplo, as coordenadas do ponto P serão representadas por x_P , y_P e z_P . Da mesma forma, retas e planos serão equacionados utilizando-se as variáveis x , y e z com subscritos indicativos dos entes geométricos a que se referem. Deve-se

Lembrar que todas as coordenadas são medidas em relação à origem, definida sobre o canto esquerdo superior do padrão projetado e os eixos utilizados são simétricos.

Serão considerados de posição conhecida para o equacionamento o ponto focal do projetor (ponto F), o ponto focal da câmera (ponto G) e também o plano π' definido pelo ponto H e pelo ângulo α . Na realidade, o conhecimento destas informações implica no conhecimento da posição do projetor e da câmera em relação ao plano de referência. As informações sobre o plano π' servem para determinar a direção em que a câmera está apontada. Já a direção do projetor é conhecida devido à primeira restrição apresentada na seção 5.1. Todos estes valores deverão ser encontrados através de calibração.

O primeiro passo no equacionamento é a determinação do ponto S , que é o ponto do plano de referência que recebe a projeção da mesma cor projetada sobre o ponto P . A distância horizontal visível pela câmera destes pontos servirá como principal referência na determinação da elevação do ponto P . O ponto S é determinado pela interseção da reta definida pelos pontos F e P com o plano π . As equações das retas FP e do plano π são

$$(6.1) \quad \begin{cases} x_{FP} = x_P + (x_P - x_P) \cdot \lambda \\ y_{FP} = x_P + (y_P - y_P) \cdot \lambda \\ z_{FP} = x_P + (z_P - z_P) \cdot \lambda \end{cases}$$

$$(6.2) \quad z_\pi = 0$$

Fazendo $z_{FP} = z_\pi$ calculando λ e substituindo em (6.1), obtêm-se o ponto S , cuja equação é

$$(6.3) \quad \begin{cases} x_S = \frac{x_P \cdot z_P - z_P \cdot x_P}{x_P \cdot z_P - z_P \cdot x_P} \\ y_S = \frac{y_P \cdot z_P - z_P \cdot y_P}{x_P \cdot z_P - z_P \cdot x_P} \\ z_S = 0 \end{cases}$$

O próximo passo é calcular a posição do ponto \hat{Q} , que é a projeção do ponto P sobre o plano π' . O conjunto de todos os pontos \hat{Q} forma a imagem da cena

capturada pela câmera. O ponto \tilde{Q} se encontra na interseção da reta formada pelos pontos G e F com o plano π . As equações da reta GF e do plano π são

$$(6.4) \quad \begin{cases} x_{GP} = x_G + (x_P - x_G) \cdot \lambda \\ y_{GP} = y_G + (y_P - y_G) \cdot \lambda \\ z_{GP} = z_G + (z_P - z_G) \cdot \lambda \end{cases}$$

$$(6.5) \quad x_{\pi'} \cdot \sin \alpha - z_{\pi'} \cdot \cos \alpha - x^H \cdot \sin \alpha = 0$$

Fazendo $x_{GP}=x_{\pi'}$, $e z_{GP}=z_{\pi'}$, calculando λ e substituindo em (6.4), obtêm-se o ponto \tilde{Q} , dado pela equação (6.6), mostrada na página 31.

De forma análoga, pode-se calcular o ponto T , projeção do ponto S sobre o plano π . O conjunto dos pontos T forma a imagem do plano de referência capturada pela câmera. A equação da reta GS é

$$(6.7) \quad \begin{cases} x_{GS} = x_G + \left[\frac{x_P \cdot z_P - z_P \cdot x_P}{z_P - z_P} \cdot x_P - x_G \right] \cdot \lambda \\ y_{GS} = y_G + \left[\frac{y_P \cdot z_P - z_P \cdot y_P}{z_P - z_P} \cdot y_P - y_G \right] \cdot \lambda \\ z_{GS} = z_G - z_G \cdot \lambda \end{cases}$$

e a equação do ponto T é mostrada em (6.8), na página 31.

Os pontos \tilde{Q} e T foram encontrados com relação ao sistema de coordenadas $Oxyz$ da Figura 6-3. Como a imagem capturada pela câmera é formada no plano π , é interessante expressar as equações (6.6) e (6.8) no sistema de coordenadas Hx^Hy^z . Para tal, a matriz de conversão

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

é usada juntamente com a translação

$$\begin{bmatrix} x^H \cdot \sin \alpha \\ 0 \\ -x^H \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}$$

Neste momento, tem-se as equações necessárias para a triangulação. Bastaria efetuar a operação $\Delta x = x'_Q - x'_T$, cujo valor de Δx pode ser conhecido pela comparação das imagens obtidas da cena sob análise e do plano de referência, e então calcular o valor de z_P pela inversão apropriada das equações. Apesar disso, as equações (6.9) e (6.10) são bastante complexas e possuem o agravante de se referirem a imagens como a mostrada na Figura 6-4. O problema aqui é o aspecto trapezoidal do padrão capturado, que ocorre devido aos efeitos de perspectiva. Desta forma, o processamento deveria ser feito ao longo de linhas inclinadas (como as mostradas na figura), que são desfavoráveis à geometria matricial das imagens digitais.

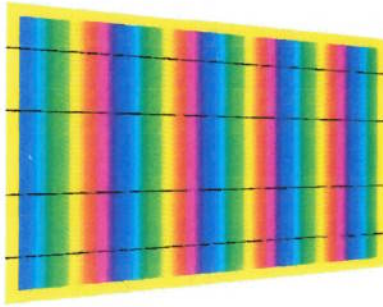


Figura 6-4 Imagem com aspecto trapezoidal devido à perspectiva.

Para simplificar este processo, uma transformação geométrica foi desenvolvida, levando-se em consideração a geometria da Figura 6-3. Esta transformação é processada diretamente sobre a imagem, de forma bidimensional, mas o seu resultado é equivalente à projeção de um ponto do plano π' sobre o plano π a partir do ponto focal G . O desenvolvimento desta transformação é detalhada na próxima seção.

Através da transformação, os pontos \tilde{Q} e T são convertidos nos pontos R e S . O ponto S já é conhecido, sendo que a transformação simplesmente faz o caminho inverso da equação (6.10). O ponto R pode ser calculado como a interseção entre a reta GP e o plano π , cujas equações são dadas por (6.4) e (6.2) respectivamente.

Fazendo $z_{GP} = z_n$, calculando λ e substituindo em (6.4), obtêm-se o ponto R

dado por

$$(6.11) \quad \left\{ \begin{aligned} z^R &= 0 \\ y^R &= \frac{z^p - z^G}{z^p \cdot y^G - z^G \cdot y^p} \\ x^R &= \frac{z^p \cdot x^G - z^G \cdot x^p}{z^p - z^G} \end{aligned} \right.$$

Não é difícil notar que as equações dos pontos R e S são muito mais simples que as equações dos pontos \tilde{Q} e T , sendo importante comentar que nas equações (6.3) e (6.11) não aparecem os termos referentes ao plano π , ficando as informações necessárias embutidas no ato da transformação geométrica. Além disso, a imagem resultante da transformação fica em forma retangular, facilitando o processamento digital. Assim, serão usados os pontos R e S , no lugar dos pontos \tilde{Q} e T para efetuar a triangulação.

O passo seguinte é o cálculo do termo $\Delta x = x^R - x_S$, que resulta

$$(6.12) \quad \Delta x = \frac{z^R \cdot x^G \cdot z^p - x^R \cdot z^G \cdot z^p + z^R \cdot z^G \cdot x^R \cdot z^p - z^R \cdot x^R \cdot z^p}{z^p \cdot z^R - z^G \cdot z^R \cdot z^G}$$

Em seguida as equações (6.12) e (6.11) são invertidas para se obter as equações para o ponto P ,

$$(6.13) \quad \left\{ \begin{aligned} z^p &= \frac{\Delta x \cdot z^R \cdot z^G}{\Delta x \cdot z^R \cdot z^G + z^G \cdot x^R - x^G \cdot z^R - z^G \cdot x^R + z^R \cdot x^R} \\ x^p &= \frac{z^G}{z^G \cdot x^R + z^p \cdot x^G - z^p \cdot x^R} \\ y^p &= \frac{z^G}{z^G \cdot y^R + z^p \cdot y^G - z^p \cdot y^R} \end{aligned} \right.$$

Estas são as equações necessárias para a obtenção do range a partir das imagens obtidas pela câmera.

$$\begin{aligned}
 x_Q &= \frac{X_G \cdot z_P \cdot \cos \alpha - z_G \cdot x_P \cdot \cos \alpha + X_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha - x_P \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{X_G \cdot \sin \alpha - x_P \cdot \sin \alpha - z_G \cdot \cos \alpha + z_P \cdot \cos \alpha} \\
 y_Q &= \frac{Y_G \cdot z_P \cdot \cos \alpha - y_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha - Y_G \cdot x_P \cdot \sin \alpha + y_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha + Y_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha - y_P \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{X_G \cdot \sin \alpha - x_P \cdot \sin \alpha - z_G \cdot \cos \alpha + z_P \cdot \cos \alpha} \\
 z_Q &= \frac{X_G \cdot z_P \cdot \sin \alpha - z_G \cdot x_P \cdot \sin \alpha + z_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_P \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{X_G \cdot \sin \alpha - x_P \cdot \sin \alpha - z_G \cdot \cos \alpha + z_P \cdot \cos \alpha}
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned}
 x_T &= \frac{z_F \cdot x_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot x_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_P \cdot x_F \cdot x_H \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha} \\
 y_T &= \frac{z_F \cdot y_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot y_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot y_P \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_P \cdot y_F \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_F \cdot y_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha + z_P \cdot y_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha} \\
 &\quad + \frac{z_P \cdot y_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot y_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha} \\
 z_T &= \frac{z_F \cdot x_P \cdot z_G \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot z_G \cdot \sin \alpha + z_P \cdot z_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_F \cdot z_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha}
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned}
 x'_Q &= \frac{z_P \cdot x_G - z_G \cdot x_P + z_G \cdot x_H - z_P \cdot x_H}{X_G \cdot \sin \alpha - x_P \cdot \sin \alpha - z_G \cdot \cos \alpha + z_P \cdot \cos \alpha} \\
 y'_Q &= \frac{Y_G \cdot z_P \cdot \cos \alpha - y_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha - Y_G \cdot x_P \cdot \sin \alpha + y_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha + Y_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha - y_P \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{X_G \cdot \sin \alpha - x_P \cdot \sin \alpha - z_G \cdot \cos \alpha + z_P \cdot \cos \alpha}
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

$$\begin{aligned}
 x'_F &= \frac{z_F \cdot x_P \cdot z_G - x_F \cdot z_P \cdot z_G + z_P \cdot z_G \cdot x_H - z_F \cdot z_G \cdot x_H}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha} \\
 y'_F &= \frac{z_F \cdot y_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_P \cdot y_F \cdot x_H \cdot \sin \alpha - z_F \cdot y_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha + z_P \cdot y_G \cdot x_H \cdot \sin \alpha}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha} + \\
 &\quad \frac{z_P \cdot y_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot y_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha + z_F \cdot x_P \cdot y_G \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot y_G \cdot \sin \alpha}{z_F \cdot z_G \cdot \cos \alpha - z_P \cdot z_G \cdot \cos \alpha + z_F \cdot x_P \cdot \sin \alpha - x_F \cdot z_P \cdot \sin \alpha + z_P \cdot x_G \cdot \sin \alpha - z_F \cdot x_G \cdot \sin \alpha}
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

6.4. Transformação geométrica perspectiva

Nesta seção, será detalhado as etapas seguidas para se chegar à transformação geométrica que resulta na simplificação do equacionamento da triangulação, como mencionado na seção anterior.

Esta transformação faz a projeção perspectiva da imagem do plano π' sobre o plano π , a partir do ponto focal da câmera (ponto G), como indicado na Figura 6-3. A transformação é bidimensional, ou seja, é uma função onde tanto o domínio como a imagem são planos. Além disso, apesar de a teoria se basear em uma projeção tridimensional, a transformação é processada apenas com informações contidas na imagem.

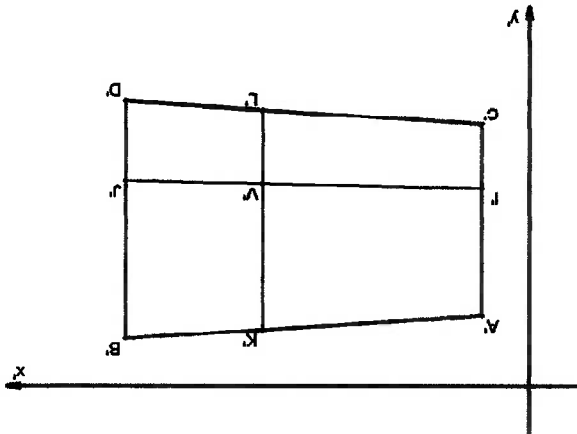


Figura 6-5 Geometria das bordas da imagem no plano π' (domínio da transformação).

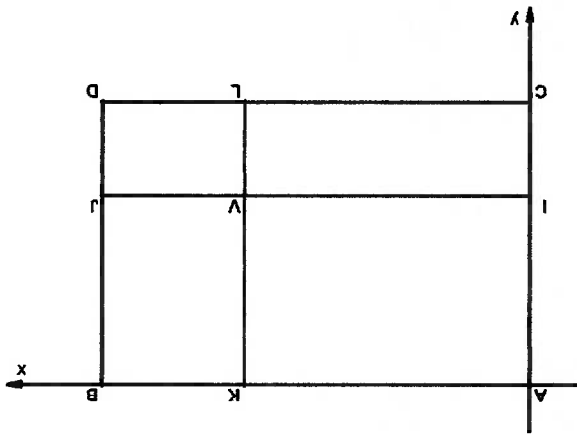


Figura 6-6 Geometria das bordas da imagem no plano π (imagem da transformação).

O principal ponto a se observar, é a existência das restrições da seção 6.1, onde o projetor é posicionado de forma a garantir que o padrão projetado tenha a forma retangular e a câmera é posicionada de forma a obter uma imagem trapezoidal simétrica do padrão projetado. Desta forma, as imagens domínio e imagem da transformação podem ser representadas como nas Figuras 6-5 e 6-6, respectivamente. A partir destas representações, deve-se procurar as relações existentes entre os pontos correspondentes.

Na Figura 6-6, pode-se considerar conhecidos os pontos A, B, C e D . Para tal, basta medir a largura e a altura do padrão projetado durante o posicionamento do projetor. O ponto V é um ponto genérico no interior do retângulo, cuja posição correspondente na Figura 6-5 deve ser procurada. Os pontos I, J, K e L são pontos auxiliares, correspondentes às projeções do ponto V sobre os lados do retângulo. Na prática, apenas as componentes das coordenadas dos pontos A, D e V serão representados, sendo os outros pontos definidos pela geometria do retângulo. Assim, têm-se

$$\begin{aligned}
 &A(x_A, y_A), B(x_D, y_A), C(x_A, y_D), D(x_D, y_D) \\
 &I(x_A, y_V), J(x_D, y_V), K(x_A, y_A), L(x_A, y_D) \\
 &V(x_V, y_V)
 \end{aligned}$$

É necessário agora determinar as relações entre estes pontos com os pontos correspondentes na Figura 6-5. Para tal, os pontos serão projetados no plano π , através da equação (6.9), obtendo-se as relações que seguem,

$$\left. \begin{aligned}
 x^V &= \frac{x^A \cdot \sin \alpha + z^G \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^V + y^A \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^D + z^G \cdot \cos \alpha + y^V \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^A + x^D \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^D + z^G \cdot \cos \alpha} \\
 y^V &= \frac{x^A \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^V + y^A \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^D + z^G \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^V + y^A \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^D + z^G \cdot \cos \alpha + y^V \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^A + x^D \cdot \sin \alpha \cdot \gamma^D + z^G \cdot \cos \alpha}
 \end{aligned} \right\}$$

$$(6.14) \quad \text{distância} = |P^1 P^2| = \sqrt{(x^{p1} - x^{p2})^2 + (y^{p1} - y^{p2})^2}$$

A partir destas equações pode-se encontrar relações de distância entre os pontos no plano π . A distância entre dois pontos é calculada pela equação

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^G \cdot \sin \alpha + z^G \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^G \cdot \sin \alpha + z^G \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^G \cdot \sin \alpha + z^G \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^G \cdot \sin \alpha + z^G \cdot \cos \alpha} &= \gamma^G \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha} &= \gamma^D \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha} &= \gamma^V \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha} &= \gamma^D \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha} &= \gamma^V \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^D \cdot \sin \alpha + z^D \cdot \cos \alpha} &= \gamma^D \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha} &= \gamma^A \\ \frac{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha}{x^A \cdot \sin \alpha - x^V \cdot \sin \alpha + z^V \cdot \cos \alpha} &= \gamma^V \end{aligned} \right\}$$

sendo que os resultados encontrados para os pontos em estudo serão suprimidos do texto devido à insuficiência de espaço. O *software* Mathcad, ou outro qualquer que tenha capacidade de resolver equações literais poderá mostrar os resultados. As relações de distâncias, de maior interesse neste momento, são mostradas a seguir.

$$(6.15) \quad \frac{|AK'|}{|BD'|} \cdot \frac{|A'C'|}{|A'J'|} = \frac{|IV'|}{|B'D'|} \cdot \frac{|A'C'|}{|CT'|} = \frac{|LD'|}{|B'D'|} \cdot \frac{|A'C'|}{x^p - x^q}$$

$$(6.16) \quad \frac{|AI'|}{|IC'|} = \frac{|KV'|}{|B'J'|} = \frac{|JL'|}{|JD'|} = \frac{|Y^p - Y^q}{Y^p - Y^q}$$

As relações (6.16) são diretas e poderiam ser encontradas até mesmo por semelhança de triângulos, já que os segmentos $A'C'$, $K'L'$ e $B'D'$ são paralelos. As relações (6.15) são menos óbvias, mostrando que as razões devem ser corrigidas por um fator dado pela razão entre os lados desiguais do trapézio.

Para simplificar o equacionamento, serão definidas as razões r_h e r_v como sendo,

$$(6.17) \quad r_h = \frac{x^p - x^q}{x^p - x^q}$$

$$(6.18) \quad r_v = \frac{Y^p - Y^q}{Y^p - Y^q}$$

Assim, através das relações (6.15) e (6.16), pode-se chegar às relações equivalentes no plano π' ,

$$(6.19) \quad r_h' = \frac{r_h \cdot |A'C'|}{r_h \cdot |A'C'| - r_h \cdot |B'D'| - |B'D'|}$$

$$(6.20) \quad r_v' = r_v$$

Os passos a serem seguidos para a transformação efetiva da imagem no plano π' para a imagem no plano π são descritos a seguir.

Primeiro, deve-se encontrar as coordenadas dos pontos A' , B' , C' e D' da imagem capturada pela câmera, que deve ter uma forma trapezoidal como na Figura 6-5. Em seguida, deve-se definir uma imagem com largura e altura iguais, ou em

escala, com relação às dimensões do padrão projetado no plano de referência. Assim, para cada ponto V na imagem definida, deve-se proceder os seguintes cálculos:

- Calcular r_h e r_v pelas equações (6.17) e (6.18)
- Calcular r_h' e r_v' pelas equações (6.19) e (6.20)
- Calcular as coordenadas de I' e J' pelas equações

$$(6.21) \quad \begin{cases} x'_I = x'_A + x'_C \cdot r_v - x'_A \cdot r_v \\ y'_I = y'_A + y'_C \cdot r_v - y'_A \cdot r_v \end{cases}$$

$$(6.22) \quad \begin{cases} x'_J = x'_B + x'_D \cdot r_v - x'_B \cdot r_v \\ y'_J = y'_B + y'_D \cdot r_v - y'_B \cdot r_v \end{cases}$$

- Calcular as coordenadas de V' pela equação

$$(6.23) \quad \begin{cases} x'_V = x'_I + x'_J \cdot r_h - x'_I \cdot r_h \\ y'_V = y'_I + y'_J \cdot r_h - y'_I \cdot r_h \end{cases}$$

Desta forma, têm-se as coordenadas dos pontos V' , correspondentes a cada ponto V procurado, definindo o processo de mapeamento entre as imagens. O processamento desta transformação é bastante conveniente e como já demonstrado, simplifica as equações da triangulação.

7. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E OBTENÇÃO DOS *RANGE IMAGES*

Capturadas as imagens, conforme descrito na seção 6.1, deve-se processá-las para a obtenção dos *range images*. O processamento é dividido em três partes – o processamento das imagens, a calibração e a triangulação – sendo cada parte descrita nas seções que se seguem. A calibração será discutida por último pois envolve conceitos das outras duas partes.

A Figura 7-1 mostra as imagens que serão usadas na descrição das etapas. Estas são imagens artificiais que simulam uma cena contendo uma calota esférica. O simulador desenvolvido é detalhado na seção 8.1.

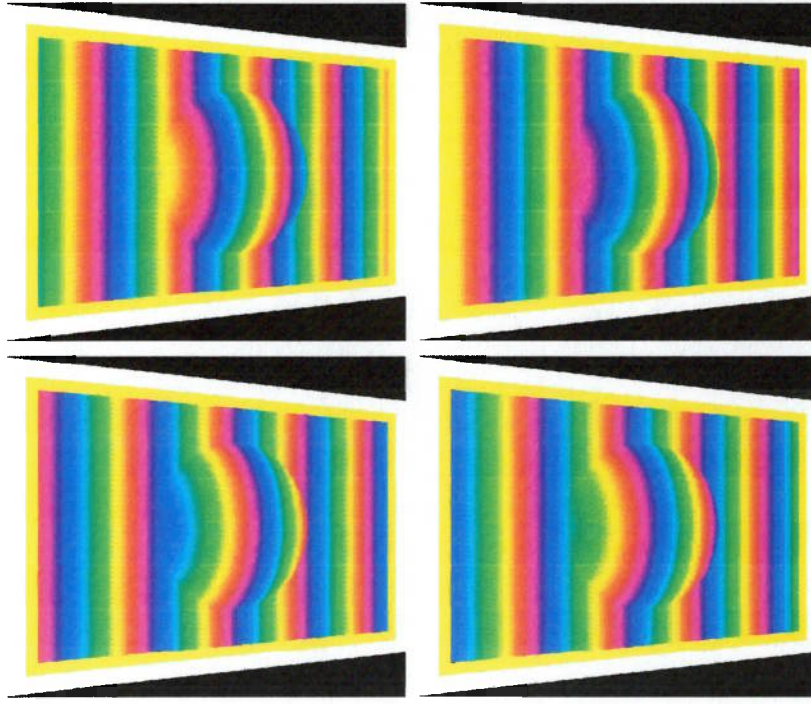


Figura 7-1 Imagens artificiais de uma cena contendo uma calota esférica.

7.1. Processamento das imagens

A Figura 7-2 mostra o fluxo das operações a serem executadas.

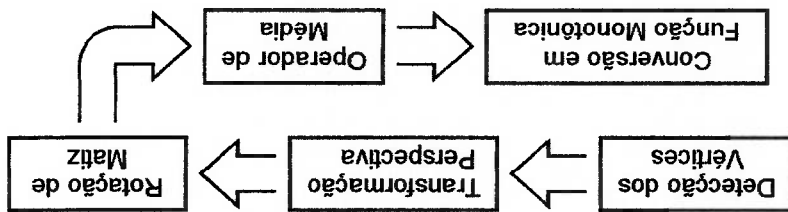


Figura 7-2 Fluxo de operações do processamento de imagens.

A primeira operação consiste na detecção dos vértices das margens do padrão projetado, que servirá como base na transformação perspectiva. Como já mencionado na seção 5.4, os níveis de saturação são usados na separação das regiões, sendo a alta saturação correspondente à região colorida e a baixa saturação à região branca ou preta.

Os vértices são detectados pela procura dos pontos de alta saturação (coloridos) que estão à menor distância dos vértices da própria imagem. A Figura 7-3 esquematiza a geometria deste processo.

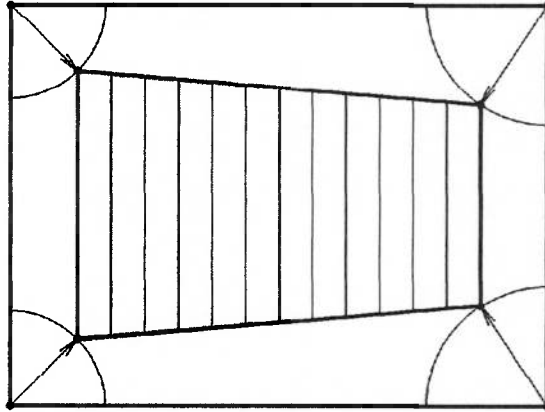


Figura 7-3 Esquema de detecção dos vértices.

Usando as coordenadas dos vértices detectados, a transformação perspectiva é processada conforme descrito na seção 6.4. A Figura 7-4 apresenta as imagens da Figura 7-1 após a transformação.

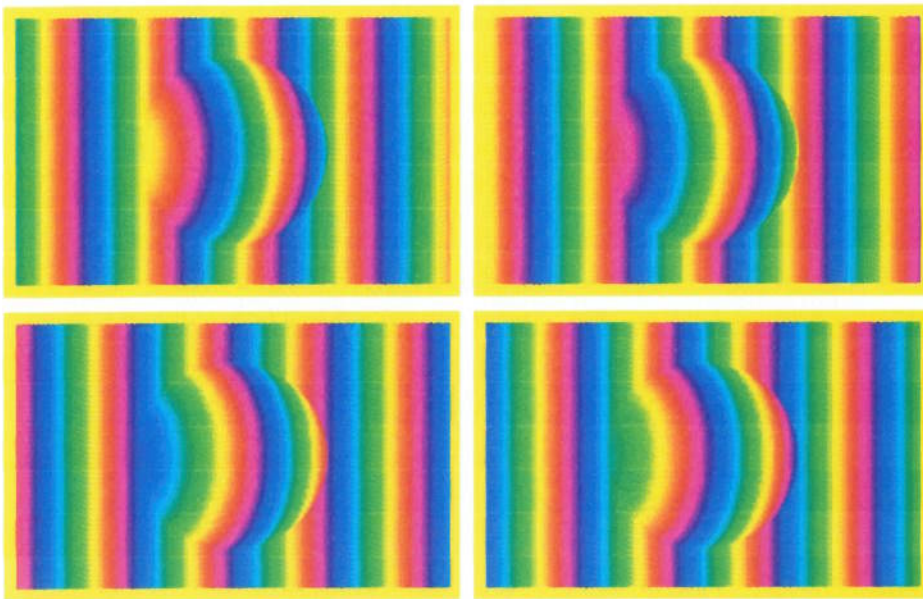


Figura 7-4 Imagens da cena com a calota esférica após a transformação perspectiva.

A próxima operação consiste na combinação das imagens. Para tal, a componente matiz das imagens são rotacionadas de forma a reverter a rotação aplicada durante a confecção dos padrões. As imagens resultantes são então combinadas através do operador de médias. Os detalhes de funcionamento deste operador são apresentados no Anexo A. A Figura 7-5 apresenta a imagem após a operação.

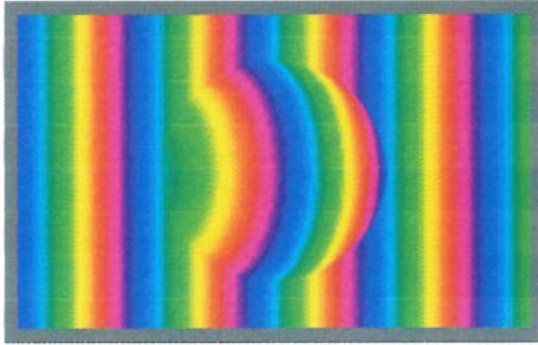
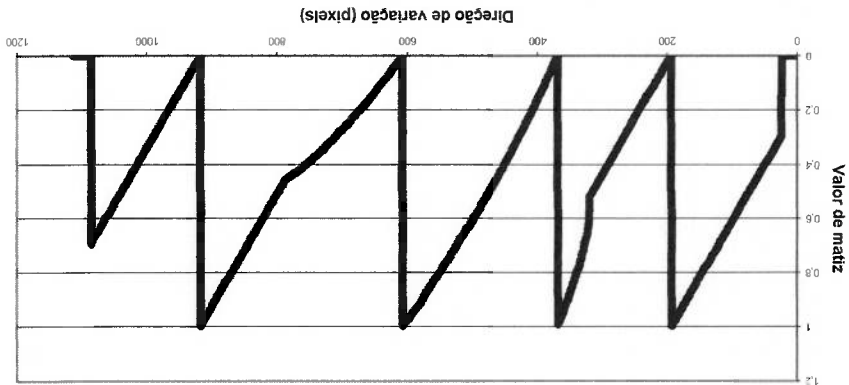


Figura 7-5 Imagem da cena com a calota esférica após a operação de média.

Em seguida deve-se observar a Figura 7-6 com o gráfico de variação de matiz da linha central horizontal da Figura 7-5. O padrão repetitivo usado para melhorar a resolução da codificação deve ser convertido em uma função monotónica para simplificar os processos da triangulação.

Figura 7-6 Gráfico da componente matiz da linha central horizontal da imagem da Figura 7-5.



A conversão é feita por uma análise sequencial em cada linha da imagem. Sabendo-se que as rampas são sempre crescentes, pode-se verificar as linhas da esquerda para a direita procurando por variações negativas. Sempre que estas são encontradas, todos os valores a partir daquele ponto são somados de uma unidade. O gráfico da Figura 7-7 apresenta o resultado da conversão referente à Figura 7-6.



Figura 7-7 Gráfico após a conversão em função monotônica referente à Figura 7-6.

Deve-se tomar um cuidado especial em casos onde há a formação de sombras. As sombras devem sempre ser desconsideradas da conversão através da análise dos níveis de saturação da imagem. Como as sombras são pretas, os pontos de baixa saturação devem ser desconsiderados.

Um outro ponto a observar é a possibilidade de verificação. Sabendo-se o número de ciclos usados na confecção dos padrões, é possível estimar com precisão

de 1 ciclo o valor do último código à direita de cada linha. Se o código obtido não estiver de acordo com o valor calculado, devido à influência de ruídos ou de sombras extensas, deve-se desconsiderar a linha inteira.

Por final, é necessário colocar que após a conversão, deixa-se de trabalhar com imagens propriamente ditas e passa-se a usar conjuntos matriciais de códigos monotônicos. Nesta representação, matrizes com as mesmas dimensões das imagens originais são usadas para armazenar os códigos em forma de números em ponto flutuante. A Figura 7-8 apresenta uma representação destas matrizes na forma de imagem em escalas de cinza. A imagem é o resultado da conversão da imagem da Figura 7-5.



Figura 7-8 Representação em escalas de cinza da matriz de códigos referente à cena com a calota esférica.

7.2. Triangulação

A triangulação é processada com base nas equações (6.13), repetidas aqui por conveniência.

$$(6.13) \quad \left. \begin{aligned} z_p &= \frac{\Delta x \cdot z_G + z_G \cdot z_f - x_G \cdot z_f - x_f \cdot z_G + z_f \cdot x_R}{\Delta x \cdot z_f \cdot z_G} \\ x_p &= \frac{z_G \cdot x_R + z_p \cdot z_G - z_p \cdot x_R}{z_G \cdot z_f + z_f \cdot z_p - z_f \cdot x_R} \\ y_p &= \frac{z_G \cdot y_R + z_p \cdot z_G - z_p \cdot y_R}{z_G \cdot z_f + z_f \cdot z_p - z_f \cdot x_R} \end{aligned} \right\}$$

Estas equações relacionam os elementos da matriz de códigos, obtida na seção anterior, com os pontos tridimensionais da cena em análise. Assim, cada célula da matriz é convertida em um ponto tridimensional.

Deve-se então analisar os termos presentes nas equações. Os parâmetros x_F e y_G são determináveis pela geometria do sistema, regidos pelas restrições da seção 6.1. Os seus valores são

$$x_F = \frac{w}{2}, \text{ onde } w \text{ é a largura da imagem e}$$

$$y_G = \frac{h}{2}, \text{ onde } h \text{ é a altura da imagem.}$$

Os parâmetros z_F , x_G e z_G serão considerados conhecidos neste momento, devendo os seus valores reais serem determinados pela calibração.

Desta forma, os parâmetros ainda não determinados são x_R , y_R e Δx . Observando-se a Figura 6-3, é possível ver que o ponto R nada mais é do que o elemento sob análise da matriz da Figura 7-8. Como a matriz é percorrida elemento-a-elemento, as próprias coordenadas do elemento que está sendo percorrido fornecem os valores de x_R e y_R .

O valor de Δx é determinado pela análise conjunta da cena contendo o objeto e o plano de referência.

Uma amostra do plano de referência é tomada pelas primeiras linhas da matriz, na região onde não se encontra o objeto. A média dos códigos encontrados nestas linhas é usado como referência na obtenção dos valores de Δx de toda a matriz. A Figura 7-9 mostra o gráfico sobreposto da linha central da matriz e da linha média das amostras tomadas do plano de referência. O Δx , conforme utilizado no equacionamento, é definido como a distância horizontal entre os gráficos no ponto em análise.

As equações (6.13) são assim processadas para toda a extensão da matriz de códigos. Os resultados formam uma representação tridimensional da cena em análise, completando-se o objetivo do sistema. A Figura 7-10 mostra uma reconstrução da cena obtida.

Existem basicamente dois tipos de sistemas de calibração – determinísticos e iterativos (um exemplo de cada um pode ser encontrado em [7] e [8] respectivamente). Os sistemas determinísticos se utilizam de equações que calculam os parâmetros procurados com base em imagens com pontos de posição conhecida no espaço. A principal característica destes sistemas é a baixa capacidade computacional necessária, uma vez determinadas as equações. Apesar disso, o caráter determinístico faz com que a influência de ruídos externos ou mesmo de erros de arredondamento durante o processo de digitalização das imagens não sejam

A calibração neste sistema consiste na obtenção dos valores dos parâmetros z_F , x_G e z_G que fazem parte das equações (6.13). Estes são parâmetros que evidenciam a disposição física dos equipamentos (Figura 6-3).

7.3. Calibração

Figura 7-10 Reconstrução da cena com a calota esférica.

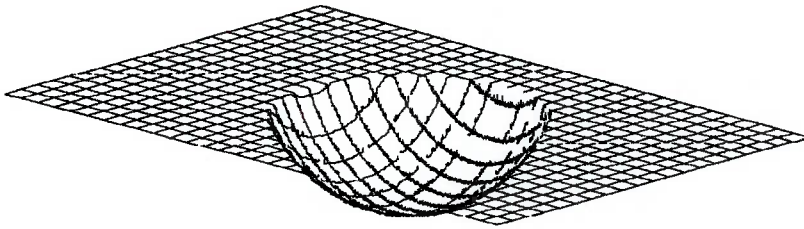
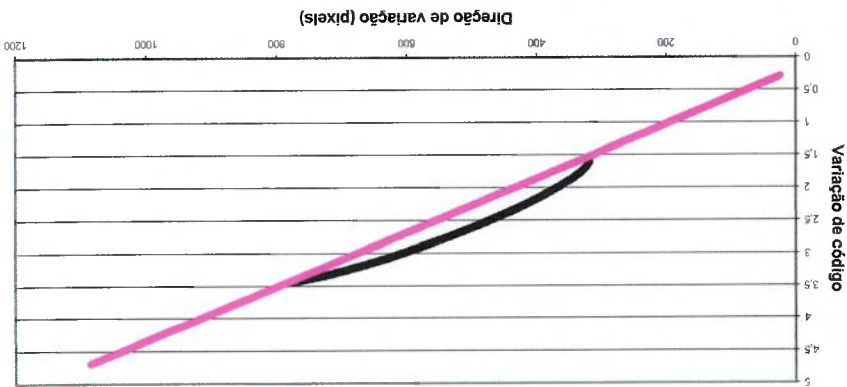


Figura 7-9 Gráfico sobreposto da linha central da matriz de códigos e da amostra do plano de referência.



devidamente tratados. Por outro lado, os sistemas iterativos possuem uma forma intrínseca de tratar a influência de tais problemas com a desvantagem da maior carga computacional necessária. No entanto, sendo o processo de calibração efetuado apenas uma vez para cada configuração dos sistemas *range finders*, a carga computacional pode ser considerado um problema secundário.

Para o presente sistema, uma nova técnica foi desenvolvida de forma experimental, com a intenção de verificar a utilização de uma teoria emergente na computação iterativa. O sistema é baseado em um processo numérico, com conceitos de algoritmo genético [17], que visa achar o melhor valor dos parâmetros quando usados na reconstrução de um objeto de dimensões conhecidas. Neste caso, o objeto utilizado é um paralelepípedo de altura conhecida, como o da Figura 7-11.

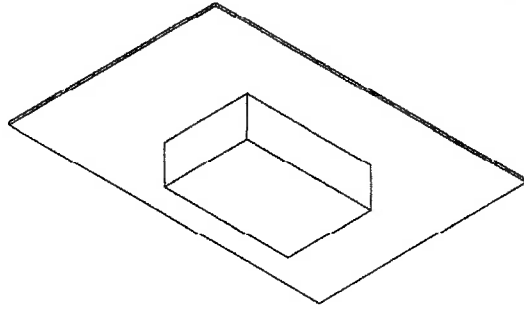


Figura 7-11 Paralelepípedo com altura conhecida.

Dado um conjunto de valores arbitrários para os parâmetros, pode-se reconstruir a região central do paralelepípedo, de acordo com os procedimentos apresentados na seção 7.2, e então verificar as coordenadas dos pontos encontrados. Estas coordenadas apresentarão erros, se comparados às dimensões reais do paralelepípedo, que deverão ser minimizados pela escolha coerente dos valores procurados.

O conceito de algoritmo genético se insere na escolha dos valores que serão usados nas análises. Algoritmos genéticos são algoritmos que se baseiam em características da evolução de seres biológicos, simulando a ocorrência de genótipos e fenótipos, a seleção natural e a mutação na geração de filhos a partir de um pai. Neste caso, pode-se considerar os parâmetros procurados como sendo genótipos do sistema, que se manifestam fisicamente (fenótipos) na forma de modelos

reconstruídos do objeto. Estes modelos são testados (seleção natural) e o melhor resultado é escolhido. A partir do melhor resultado (pai), são gerados novos conjuntos de valores (filhos) com pequenas diferenças em relação à escolha anterior (mutações). Estes novos valores são testados, sendo escolhido o melhor resultado, realimentando o ciclo.

O primeiro conjunto de valores é escolhido de forma arbitrária, levando-se em consideração algumas dimensões conhecidas, como a largura ou a altura da imagem analisada, para que não haja discrepâncias com relação à ordem de grandeza. No sistema desenvolvido, o valor inicial é escolhido de forma a posicionar o projetor e a câmera no centro da imagem analisada a uma distância equivalente à diagonal da imagem.

Os valores subsequentes são escolhidos com base em um passo que é somado ou subtraído dos parâmetros em todas as combinações possíveis. Assim, para cada conjunto de valores pai, são gerados 26 conjuntos filho. Este passo é reduzido pela metade sempre que todo um conjunto de filhos não consegue obter resultados melhores que o pai, fazendo com que o processo seja convergente. O passo inicial também é escolhido de forma arbitrária tomando-se o cuidado de não haver discrepâncias na ordem de grandeza. No sistema desenvolvido, o passo inicial utilizado é igual à diagonal da imagem.

A escolha da melhor solução em cada iteração é feita com base em um simples cálculo de distâncias. Como somente uma região central do paralelepípedo é analisada, pode-se considerar a região útil da cena como sendo um plano horizontal com altura conhecida. Assim, para cada ponto reconstruído, é possível calcular a distância deste ponto ao ponto real sobre o paralelepípedo, sendo estas distâncias acumuladas para todos os pontos reconstruídos. Logicamente, a solução que tiver menor acúmulo de distâncias, indicando uma maior proximidade com a solução ideal, será a solução escolhida.

As iterações continuam de forma indefinida até que se atinja um critério de parada. A escolha do critério de parada deve ser feita considerando-se a precisão a ser obtida e o tempo gasto. No sistema apresentado, as iterações são interrompidas quando o passo usado na geração dos filhos fica abaixo de um pixel, igualando a

máxima precisão que se consegue em algumas variáveis usadas durante a reconstrução do modelo do objeto, tal como o Δx .

Testes realizados com o sistema descrito mostraram que os resultados sofrem influências de ruídos, presentes inevitavelmente nas imagens. Estes ruídos fazem com que a solução escolhida tenha bons resultados na obtenção de pontos com alturas próximas ao plano sobre o paralelepípedo usado, ocorrendo erros crescentes nas demais alturas. Para reduzir tal influência, foram usados dois paralelepípedos com alturas diferentes no sistema final de calibração. Esta solução resulta em resultados coerentes em torno dos dois planos usados como referência, melhorando a resposta dos demais pontos por uma extensão interpolativa dos resultados.

8. SIMULAÇÃO – DESCRIÇÃO, RESULTADOS E ANÁLISES

8.1. Descrição do simulador

Uma análise inicial do funcionamento do sistema foi efetuada com o uso de imagens geradas artificialmente. Para tal, foram desenvolvidos sistemas para geração de objetos virtuais, juntamente com simuladores de projetor e câmera.

Para que um objeto virtual seja utilizado neste sistema, é suficiente que ele seja representado na forma de um *range image*, já que esta será a forma com que o sistema irá representá-lo após a reconstrução. Tendo isto em mente, foram desenvolvidos sistemas capazes de gerar *range images* dos objetos mostrados na Figura 8-1.

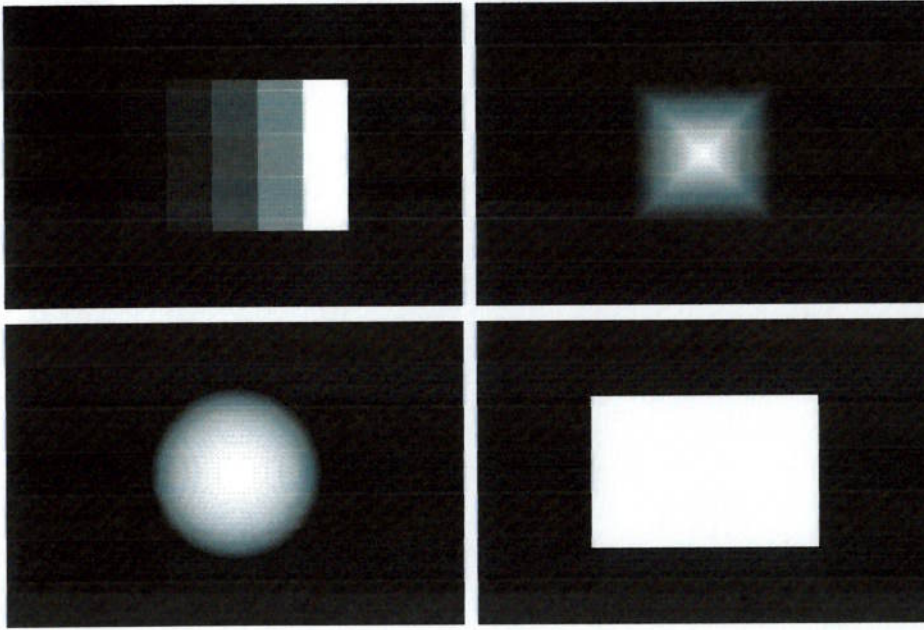


Figura 8-1 Representação em escalas de cinza dos *range images* de paralelepípedo, esfera, pirâmide e escada com degraus exponenciais.

O paralelepípedo é necessário para a calibração do sistema e é também utilizado na análise quantitativa efetuada mais adiante. Já os demais objetos foram escolhidos principalmente pela simplicidade das equações e também pela existência de objetos semelhantes usados nos testes com imagens reais.

Os padrões de cores ideais mostrados na Figura 5-10 são projetados sobre estes objetos, simulando um projetor pinhole, através das equações (6.3). Estas equações, baseadas no esquema da Figura 6-3, relacionam um ponto P tridimensional genérico ao ponto S correspondente sobre o plano de referência. Os pontos P são obtidos dos *range images* e os pontos S dos padrões de cores. Desta forma, pode-se relacionar cada ponto sobre o *range image* com a respectiva cor que deve ser projetada sobre ele. A Figura 8-2 mostra o mapeamento do padrão de cores sobre o *range image* de um paralelepípedo. É possível observar a formação de sombras em torno do objeto, que ocorrem devido à geometria da projeção.

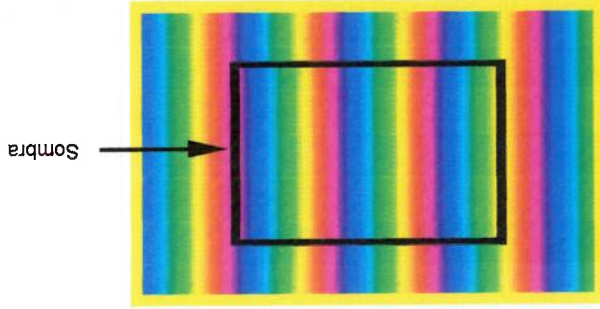


Figura 8-2 Resultado da projeção do padrão de cores sobre um paralelepípedo.

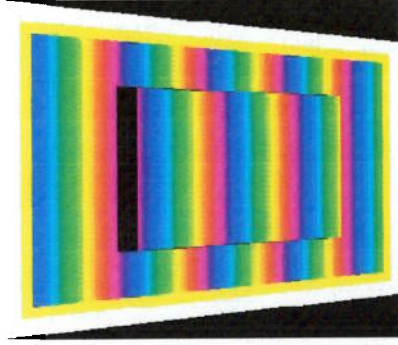


Figura 8-3 Resultado da captura da imagem da Figura 8-2.

A imagem projetada é capturada por uma câmera baseada nas equações (6.9). De forma semelhante ao projetor, estas equações relacionam os pontos

tridimensionais P , agora já mapeados por um padrão de cores, aos pontos Q sobre o plano de formação de imagens da câmera. A Figura 8-3 mostra o resultado obtido correspondente ao objeto da Figura 8-2.

Desta forma, tem-se um sistema completo de simulação dos equipamentos envolvidos, de acordo com o modelo de câmera pinhole.

8.2. Análise de ruído e erro

Um ponto é reconstruído pela determinação dos valores das componentes de sua coordenada cartesiana. Dentre estas componentes, a elevação, representando a distância do ponto ao plano de referência, é a que possui questões de precisão mais críticas, já que usualmente, uma determinada elevação causa uma deformação relativa menor na imagem obtida.

Desta forma, a reconstrução de uma imagem contendo um paralelepípedo é adequada para a análise de níveis de precisão de diversos pontos com elevação uniforme conhecida, possibilitando a comparação dos resultados e mostrando a capacidade geral do sistema apresentado.

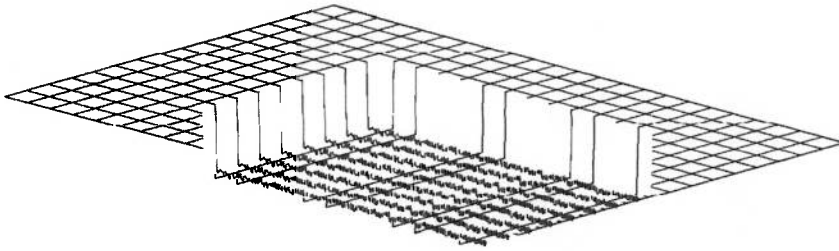


Figura 8-4 Reconstrução do paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels.

A Figura 8-3 mostra a imagem obtida de uma cena contendo um paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels, onde a região iluminada, incluindo o plano de referência, possui dimensões 600x400 pixels. Como já mencionado, além da imagem apresentada, existem mais três imagens com as cores projetadas rotacionadas. Após o processamento destas imagens e da calibração, feita com base

em paralelepípedos de alturas 25 e 75 pixels, obtêm-se o modelo reconstruído representado na Figura 8-4.

Qualitativamente, pode-se observar de imediato que o modelo retrata um paralelepípedo de forma clara.

A Figura 8-5 mostra um gráfico representativo da linha central do *range image* reconstruído para uma melhor visualização. Neste caso, os pontos pretos representam os pontos obtidos da reconstrução e a linha vermelha representa o objeto original. A Tabela 8-1 resume os valores quantitativos obtidos sobre o paralelepípedo.

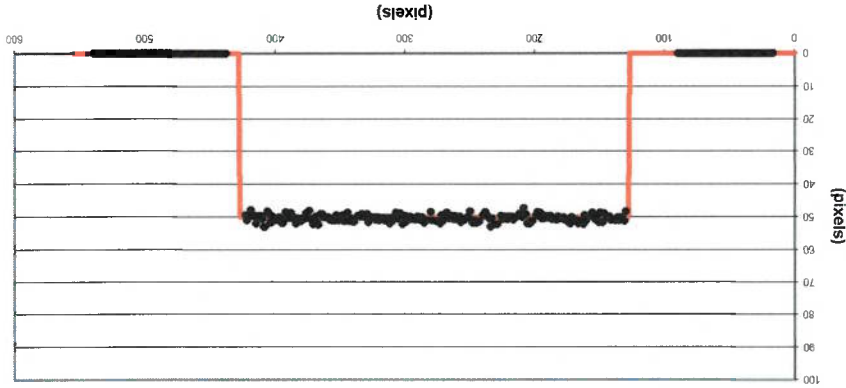


Figura 8-5 Gráfico representativo da linha central do modelo do paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels.

Tabela 8-1 Resultados quantitativos sobre o modelo do paralelepípedo de dimensões 300x200x50 pixels.

Média da elevação dos pontos	50,38 pixels
Desvio padrão da elevação dos pontos	1,01 pixels
Erro médio	0,38 pixels
Dimensões do paralelepípedo	294x195 pixels

Deve-se analisar estes resultados de duas formas distintas.

Primeiro, é necessário verificar a origem dos ruídos, quantificado pelo desvio padrão da elevação dos pontos sobre o paralelepípedo. Sendo este o resultado de uma simulação digital, virtualmente perfeita, pode-se afirmar que os ruídos são

decorrentes de imperfeições no modelo computacional. Especificamente, pode-se apontar os problemas de discretização digital das imagens durante a simulação do projetor e da câmera, assim como no ato da recuperação da forma do objeto.

Como visto, o equacionamento de todo o processo foi baseado em um modelo contínuo, usando o modelo de câmera pinhole. No momento da digitalização de tal conjunto de equações, as imagens, antes consideradas contínuas, passam a ser discretas na forma usual de matrizes de pontos. Assim, as diversas variáveis das equações que referenciam a posição de um ponto sobre uma imagem, passam a sofrer arredondamentos que se manifestam em forma de ruídos no modelo final.

Lembrando-se que o processo da triangulação é, de forma resumida, uma maneira de converter deformações horizontais da imagem em informações de altura, e que estas deformações são usualmente menores em escala do que as alturas que representam, é possível concluir que uma das origens dominantes dos ruídos é o arredondamento do valor da deformação medida sobre a imagem. Esta característica pode ser controlada pela alteração na resolução das imagens digitalizadas, fazendo com que as mesmas deformações sejam detectadas com um número maior de pixels. A Tabela 8-2 mostra o resultado obtido na reconstrução do mesmo paralelepípedo em diferentes resoluções, demonstrando a dominância deste fator na origem dos ruídos.

Tabela 8-2 Resultados quantitativos sobre os modelos de paralelepípedos em diferentes resoluções.

Resolução	Média da elevação dos pontos	Desvio padrão da elevação dos pontos
Resolução original	50,38 pixels	1,01 pixels
Resolução 1,5x	50,41 pixels	0,73 pixels
Resolução 2x	50,37 pixels	0,53 pixels

Agora, é necessário analisar a origem dos erros médios de posição dos pontos. A Tabela 8-3 contém os resultados de reconstruções de paralelepípedos de dimensões 300x200 pixels com alturas crescentes de 25, 50, 75 e 100 pixels, onde a calibração foi feita com base nos paralelepípedos de alturas 25 e 75 pixels. Os erros

médios obtidos mostram uma tendência concisa, onde os paralelepípedos de alturas 25 e 75, usados na calibração, possuem bons resultados, abaixo da unidade, assim como o de altura 50, posicionado na região intermediária. Já o paralelepípedo de altura 100, posicionado na região extrapolativa da calibração, possui erros mais expressivos. Desta forma, devido à clara relação existente, pode-se analisar a origem dos erros médios como sendo o processo de calibração.

Tabela 8-3 Resultados quantitativos sobre os modelos de paralelepípedos de diferentes alturas.

	Altura 25	Altura 50	Altura 75	Altura 100
Media da elevação dos pontos	25,53 pixels	50,38 pixels	74,77 pixels	98,43 pixels
Erro médio	0,53 pixels	0,38 pixels	0,23 pixels	1,57 pixels
Dimensões obtidas	297x197	294x195	292x192	288x189

Lembrando que o sistema de calibração é um processo iterativo, onde o critério de parada escolhido age exatamente sobre o erro médio, pode-se dizer que a escolha de um critério de parada mais rigoroso resultará em erros médios menores. Em contrapartida, o tempo de processamento da calibração, em torno de 300 segundos no equipamento utilizado, cresce de forma brusca, conforme testes realizados, onde o fato de se trabalhar no limiar de precisão de algumas variáveis, juntamente com a influência de ruídos, faz com que o refinamento das soluções se processe em passos de dimensões de sub-pixels, com reduções nos erros médios em centésimos de pixels.

A Tabela 8-3 mostra ainda as dimensões dos paralelepípedos sobre o plano $x-y$ (plano de referência). Neste caso, os erros são maiores conforme o aumento na altura dos objetos. Isto pode ser explicado pela observação das equações (6.13). As duas equações responsáveis pela determinação da posição dos pontos no plano $x-y$ recebem a influência da altura do respectivo ponto. Desta forma, quanto maior a altura e seu respectivo erro, maior será o erro obtido no seu posicionamento.

8.3. Análise da densidade de reconstrução

Uma das vantagens do *rainbow range finder* é a alta resolução das informações que podem ser obtidas. Em teoria, o conjunto das informações obtidas forma um modelo contínuo de pontos, com falhas apenas nas regiões com formação de sombras. Na prática, o processo de digitalização das imagens gera erros de arredondamento que fazem com que as informações possuam falhas generalizadas ao longo de todo o modelo. Apesar disso, a característica de alta resolução do sistema não é perdida, sendo apenas um pouco reduzida.

A Figura 8-6 mostra uma imagem capturada de uma pirâmide com base quadrada, lados inclinados a 45° e altura 200 pixels. A Figura 8-7 mostra o modelo obtido desta imagem, com a calibração feita com paralelepípedos de alturas 50 e 150 pixels. A Figura 8-8 mostra esta mesma pirâmide na forma de *range image*, onde os pixels vermelhos representam os pontos não encontrados, ou seja, pontos falhos. A Tabela 8-4 apresenta um comparativo da quantidade de pontos válidos e falhos desta *range image*.

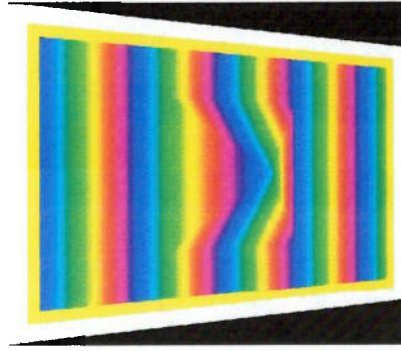


Figura 8-6 Imagem capturada de uma pirâmide de altura 200 pixels.

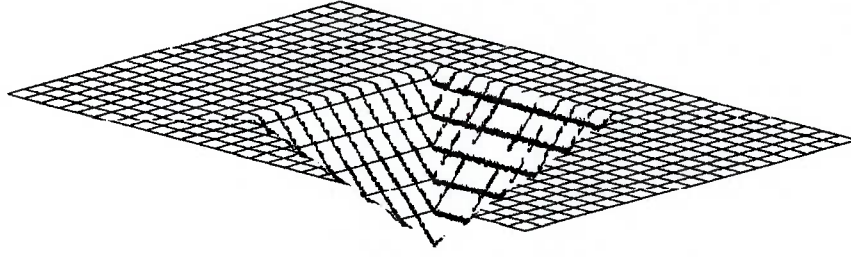


Figura 8-7 Reconstrução da pirâmide de altura 200 pixels.

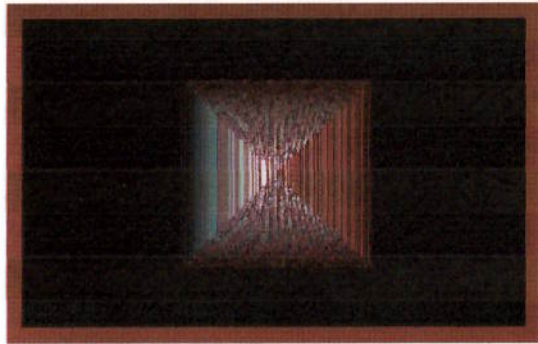


Figura 8-8 *Range image* do modelo da Figura 8-7 com indicação de falhas.

Tabela 8-4 Comparativo da quantidade de pontos válidos e falhos do *range image* da Figura 8-8.

Total de pontos	795.396
Total de pontos válidos	613.106 (77%)
Total de pontos falhos	182.290 (23%)

Apesar da grande quantidade de pontos falhos, percentualmente 77% de toda a superfície do modelo é quantificada, podendo-se dizer que este sistema possui uma real capacidade de alta resolução.

Uma análise mais local desta questão pode ser feita a partir da Figura 8-6 que mostra que a pirâmide foi capturada a partir de um ponto à direita do projetor, sendo as faces da pirâmide capturadas em diferentes densidades. Isto se reflete de forma concisa na Figura 8-8, onde a face à direita, capturada com maior densidade, possui maior quantidade de pontos válidos e a face à esquerda, capturada com menor densidade, possui menos pontos válidos. Isto é o resultado da limitação imposta pelo sistema regido por um processo de triangulação.

8.4. Análise do sistema de calibração

Nesta seção, uma análise com maiores detalhes das características do processo de calibração em si, é feita com o auxílio do simulador.

O sistema de calibração desenvolvido funciona com o objetivo de obter a posição do projetor e da câmera através dos parâmetros z_F , x_G e z_G , presentes nas equações (6.13). Estes parâmetros são otimizados sucessivamente de forma iterativa

para a obtenção do melhor resultado na reconstrução da cena, dentro dos critérios utilizados.

Devido a esta característica de ponderação através apenas dos resultados das reconstruções, os valores que são obtidos para os parâmetros procurados nem sempre são compatíveis com a posição real dos equipamentos.

A Tabela 8-5 reúne os valores para os parâmetros calibrados sobre paralelepípedos de dimensões 300x200 pixels com alturas de 25 e 75 pixels, ao lado dos valores reais usados durante o processamento da simulação. O erro médio se refere a um paralelepípedo de altura 50 pixels.

Tabela 8-5 Comparativo dos valores dos parâmetros obtidos da calibração e dos valores reais.

	Valor Calibrado	Valor Real
z_f	560,9	750
x_g	590,0	728
z_g	642,2	900
Erro Médio	0,38	0,16
Erro Médio Percentual	0,7%	0,3%

Apesar das grandes diferenças nos valores dos parâmetros, o erro médio está abaixo de um pixel em ambos casos. Em termos percentuais, considerando-se a altura de 50 pixels do paralelepípedo, tem-se erros médios de 0,7% e 0,3%, que podem ser considerados como uma diferença pouco expressiva.

A distância entre os valores obtidos e os valores reais surge em parte devido à influência dos ruídos digitais já discutidos, mas a maior parte é devido às características do posicionamento dos equipamentos e dos efeitos da transformação perspectiva.

Com a utilização da transformação perspectiva, as características observadas pela distância em que os equipamentos são posicionados a partir da cena são diluídos, exatamente pela eliminação dos efeitos da perspectiva. Desta forma, existem diversas posições dos equipamentos, essencialmente quando o projetor e a

câmera são movidos de forma coordenada em relação à cena, onde os erros médios na reconstrução sofrem pouca influência.

O nível de influência é ainda controlado pelo sistema de calibração, uma vez que o sistema iterativo faz uma análise global dos resultados, incluindo também a influência dos ruídos. Desta forma, as diferenças obtidas nos valores absolutos dos parâmetros calibrados não podem surgir efeitos maiores que os definidos no critério de parada.

9. OBJETOS REAIS – RESULTADOS E ANÁLISES

9.1. Descrição dos objetos utilizados

Para a análise de casos usando objetos reais, foram criados entes geométricos em papel cartolina, que possuem qualidades adequadas de reflexividade de superfície para esta aplicação.

Os objetos criados são apresentados na Figura 9-1, sendo os paralelepípedos usados para calibração e análise quantitativa, e a pirâmide e a escada com degraus exponenciais para uma comparação ilustrativa com os objetos simulados. As dimensões estão reunidas na Tabela 9-1.

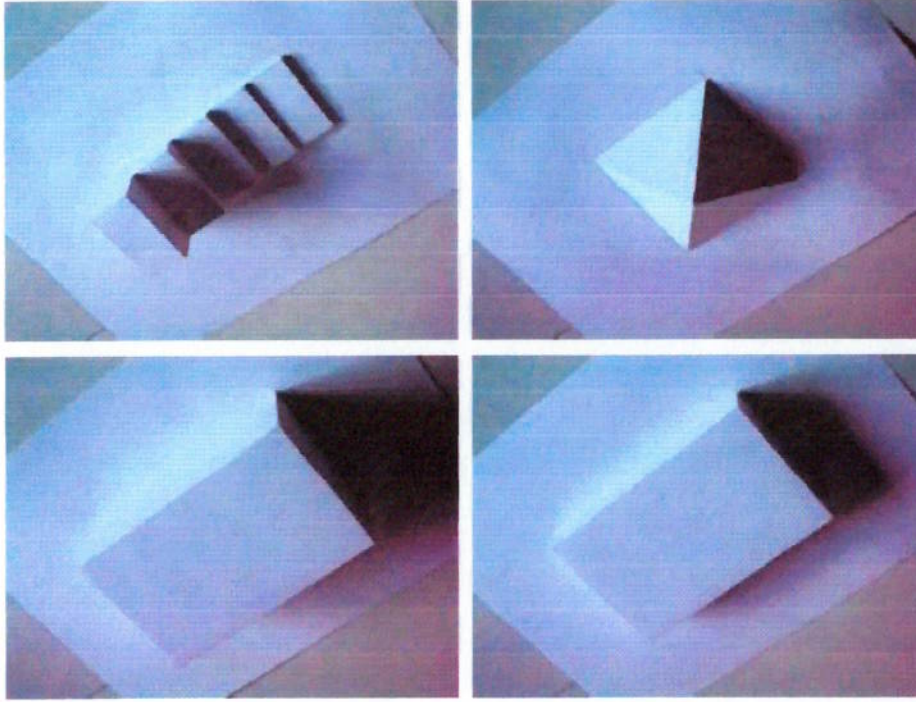


Figura 9-1 Objetos usados na análise de casos reais.

Tabela 9-1 Dimensões dos objetos usados na análise de objetos reais.

Objeto	Dimensões gerais	Dimensões específicas
Paralelepípedo baixo	160x100x60mm	
Paralelepípedo alto	160x100x30mm	
Pirâmide	100x100x50mm	Inclinação dos lados: 45°
Escala com degraus exponenciais	150x60x60mm	Degraus com alturas: 3,75 – 7,5 – 15 – 30 – 60mm

9.2. Apresentação e análise dos resultados

A Figura 9-2 mostra imagens capturadas dos paralelepípedos de alturas 30 e 60 mm. Estas imagens foram digitalizadas diretamente do filme negativo a uma resolução de 1200x1200dpi, evitando que eventuais correções e ruídos aplicados durante a sua fixação em foto interfiríssem no processamento.

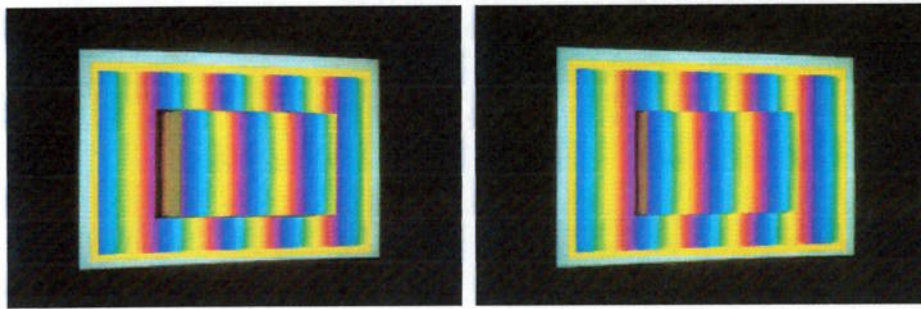


Figura 9-2 Imagens capturadas dos paralelepípedos de dimensões 160x100x30mm e 160x100x60mm.

As reconstruções foram feitas em uma escala de 3:1 (pixels:mm) com calibração baseada nestes mesmos paralelepípedos. A Figura 9-3 mostra o resultado das reconstruções destes paralelepípedos. A Tabela 9-2 resume os dados quantitativos com relação aos modelos obtidos.

Pode-se observar que os resultados acompanham as tendências discutidas na análise das simulações, como a independência da dimensão dos erros comparados com as dimensões dos objetos, assim como o acúmulo de erros dimensionais na direção do plano x-y, devido à influência dos erros das alturas dos respectivos pontos.

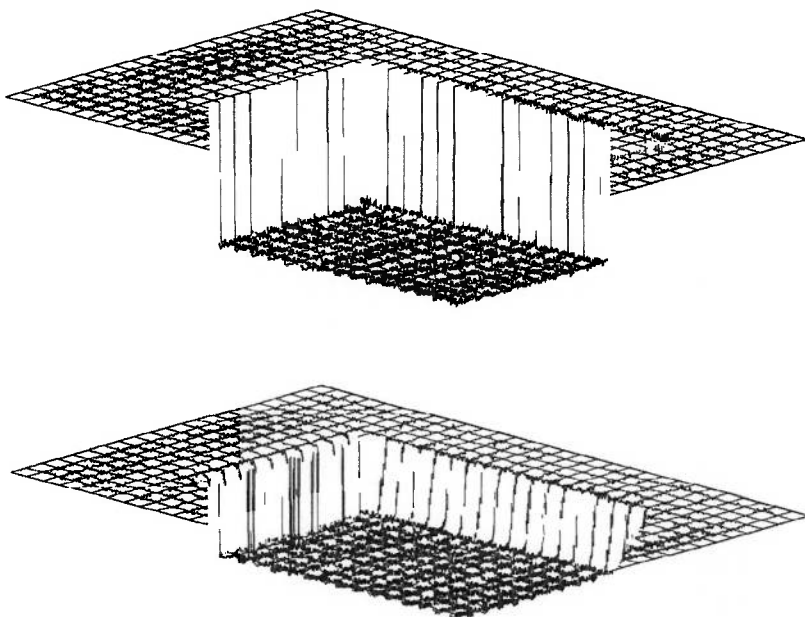


Figura 9-3 Reconstruções dos paralelepípedos de dimensões 160x100x30mm e 160x100x60mm.

Tabela 9-2 Resultados quantitativos sobre os modelos dos paralelepípedos de dimensões

160x100x30mm e 160x100x60mm.

Paralelepípedo de altura 30mm	Paralelepípedo de altura 60mm
Média da elevação dos pontos	31,72mm
Desvio padrão da elevação dos pontos	0,59mm
Erro médio	1,72mm
Dimensões do paralelepípedo	156,7x97,7mm
	151,7x94,3mm

Há porém um problema próprio de sistemas reais, onde planos com grandes inclinações, especialmente na direção vertical, tendem a retornar respostas falhas, como apresentado nas bordas do objeto na Figura 9-4. Neste caso, são visíveis dois tipos distintos de erros, uma em cada borda.

O erro na borda esquerda, foi de certa forma reproduzido em simulação quando introduzido um pequeno desalinhamento entre as imagens obtidas com a projeção dos slides de cores rotacionadas (Figura 9-5). Este desalinhamento, que ocorre em sistemas reais devido ao limite da precisão de confecção dos slides, faz

com que cores representativas do topo do paralelepípedo e do plano de referência adjacente, que aparecem lado-a-lado na imagem, sejam misturadas, gerando o efeito de rampa nos pixels influenciados.

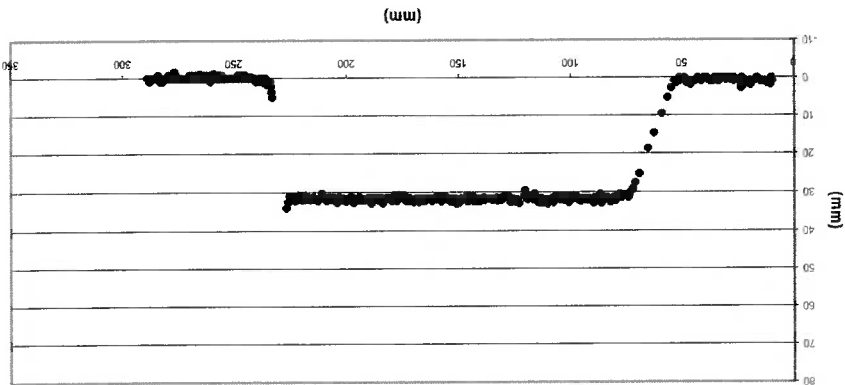


Figura 9-4 Gráfico representativo de um corte no modelo reconstruído do paralelepípedo de dimensões 160x100x30mm.

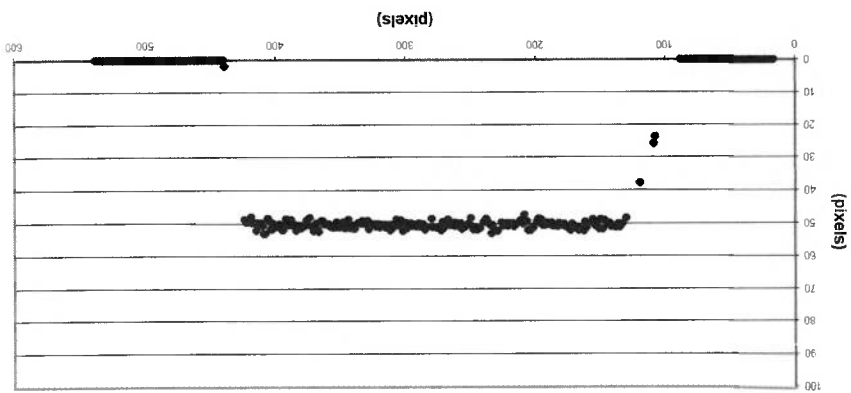


Figura 9-5 Gráfico representativo de um corte no modelo reconstruído da simulação com inclusão de erro de alinhamento.

O erro observado na borda direita do objeto da Figura 9-4, na forma de picos, deve-se provavelmente aos efeitos da inter-reflexão somado ao erro de alinhamento discutido. A inter-reflexão faz com que regiões teoricamente escuras, como as laterais do paralelepípedo, sejam iluminadas com cores refletidas de superfícies adjacentes, fazendo com que estas regiões sejam identificadas com cores impróprias.

Usualmente, estas regiões são mais escuras que as demais, devido à menor intensidade das luzes refletidas, podendo-se eliminar grande parte dos pontos falhos por um processo de eliminação de pontos de baixa intensidade. Apesar disso, quando estas regiões são sobrepostas com cores adjacentes de maior intensidade, devido aos erros de alinhamento, surgem pontos com cores imprevisíveis e com intensidades suficientemente altas que impedem a sua eliminação, gerando os erros observados.

Estes dois aspectos discutidos formam as principais causas de erros em casos com a utilização de imagens reais. Apesar disso, uma infinidade de outras fontes de erros podem ser encontradas causando erros em menor nível.

Uma possível fonte de erros que foi analisada com o auxílio do simulador são os erros no posicionamento dos equipamentos. Caso as restrições da seção 6.1 não sejam seguidas de forma exata, surgem erros dimensionais no padrão projetado que são detectados com precisão de $\pm 0,5\text{mm}$, no presente caso, devido ao uso de régua na medição das dimensões usadas na transformação perspectiva. Assim, considerando a resolução de 3:1 (pixel:mm) utilizada nas imagens reais, foi feita uma simulação onde a imagem original possui 6 pixels a mais na altura e na largura que a imagem analisada. O erro médio obtido para um paralelepípedo de dimensões $300 \times 200 \times 50$ pixels é de 0,49 pixels na altura, um pequeno aumento comparado com o erro de 0,38 pixels obtido em caso ideal. Já as dimensões do paralelepípedo obtido é de 291×192 pixels, não muito distante dos 294×195 pixels obtidos no caso ideal.

Outras possíveis fontes de erros existentes são eventuais falhas na superfície do material utilizado e ruídos causados pela presença de poeira sobre os slides ou sobre as lentes dos equipamentos. Estes erros são imprevisíveis e devem ser analisados de forma estatística em cada aplicação.

9.3. Comparação ilustrativa de objetos

A seguir são apresentados, lado-a-lado, modelos reconstruídos de objetos reais e modelos de objetos simulados, para uma comparação visual ilustrativa dos resultados do sistema *rainbow range finder* apresentado (Figuras 9-6 e 9-7).

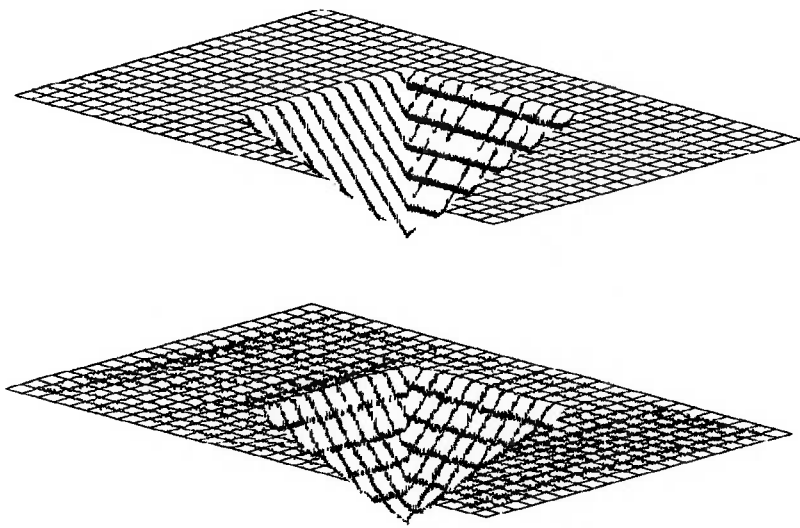


Figura 9-6 Modelos reconstruídos de pirâmides real e simulado.

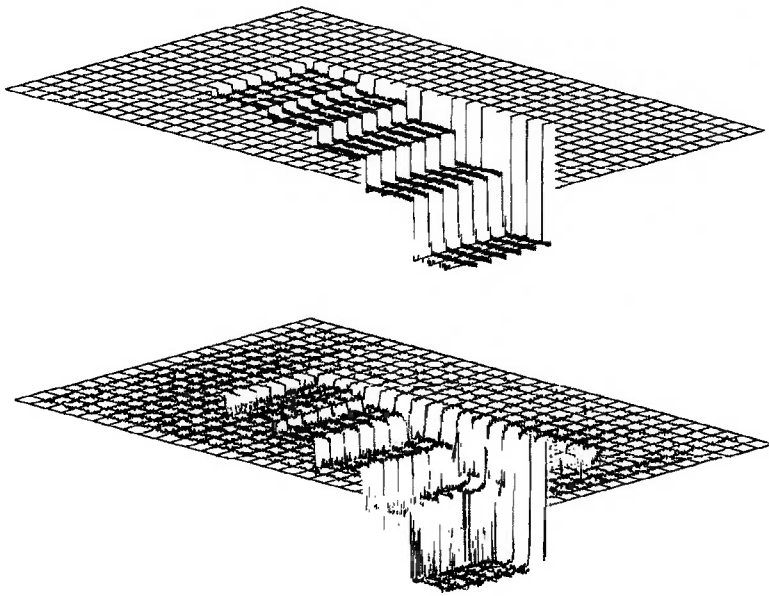


Figura 9-7 Modelos reconstruídos de escada com degraus exponenciais real e simulado.

Nestes dois exemplos, ficam claros os aspectos discutidos até aqui. A pirâmide, por não conter planos com inclinações extremas e bordas bruscas, resulta em reconstruções mais próximas do modelo simulado. Já a escada, apresenta grandes erros nas regiões de borda e em torno das regiões de sombras (atrás do último degrau). Mesmo assim, a forma geral pode ser bem identificada.

10. CONCLUSÕES

10.1. Conclusões sobre o *Rainbow Range Finder*

Este trabalho apresentou uma nova implementação de um sistema *rainbow range finder*, baseado em geometria estereó ativa, com o uso de luz estruturada colorida de variação contínua na forma de um pseudo-arco-íris. O uso de um padrão contínuo na codificação do espaço faz com que o sistema seja capaz de obter mapas de profundidade em alta resolução com base em apenas uma vista da cena tridimensional, o que resulta também em alta velocidade na aquisição de dados.

O sistema é composto por diversas partes, tendo sido necessário o estudo de tópicos variados para a sua implementação completa. Inicialmente, foi feito um estudo sobre a projeção do padrão de codificação, tendo em vista as características do equipamento projetor de *slides* utilizado, sendo considerado aspectos da não linearidade dos filmes e da geração digital do padrão em arco-íris. Como resultado, foi proposto o uso de padrões em pseudo-arco-íris gerado pela variação linear da componente matiz do sistema de cores HSI. Um conjunto de quatro padrões com as cores rotacionadas foi utilizado como forma de reduzir os efeitos da não linearidade dos filmes, além do uso de bordas amarelas, ideais para a segmentação da imagem capturada.

A modelagem da geometria do sistema foi descrita considerando-se o modelo de câmera *pinhole*. Uma análise comparativa com câmeras convencionais foi efetuada mostrando a adequação do modelo escolhido. O equacionamento do sistema foi feito de forma genérica, utilizando-se geometria analítica, sendo possível aplicar o sistema em configurações variadas, considerando-se apenas duas restrições bastante comuns em sistemas *range finder* no posicionamento dos equipamentos. Foi

definida uma transformação bidimensional que é aplicada sobre a imagem de forma a cancelar parcialmente os efeitos de perspectiva observados pela câmera. Esta transformação é capaz de simplificar as equações envolvidas e de adaptar a imagem para uma forma conveniente para o processamento digital.

A calibração do sistema apresentado envolve a determinação dos valores de três parâmetros que caracterizam a configuração dos equipamentos utilizados. Um novo sistema de calibração foi desenvolvido com este fim, utilizando-se de um algoritmo genético iterativo, onde a teoria da evolução darwiniana é adaptada ao processamento digital de forma a gerar o conjunto de valores das variáveis que melhor reproduz paralelepípedos de dimensões conhecidas. Este sistema é capaz de efetuar a calibração com base apenas em imagens dos paralelepípedos, de maneira que o processamento pode ser feito desacoplado do equipamento físico.

Simulações com imagens artificiais foram efetuadas para uma análise inicial do funcionamento do sistema. Foram verificados a existência de ruídos com origem na discretização das imagens e erros decorrentes da influência destes ruídos no processo de calibração. Resultados quantitativos mostram um erro médio em torno de 0,5 pixel, com desvio padrão de 1 pixel, em objetos de dimensões 600x400x50 pixels. Foi apresentado também uma cena contendo uma pirâmide que foi reconstruída em 77% de sua superfície, mostrando a capacidade de alta resolução do sistema.

Testes com objetos reais foram processados, mostrando resultados coerentes com os estudos efetuados nas simulações. Foram apenas detectados problemas nas bordas de objetos, decorrentes dos efeitos do desalinhamento das imagens e da inter-reflexão, fazendo com que cores adjacentes sejam sobrepostas gerando resultados imprevisíveis nos pixels influenciados. Os resultados mostram um erro médio em torno de 1,5mm com desvio padrão de 0,6mm em objetos de 300x200x60mm.

10.2. Sugestões para trabalhos futuros

Em sistemas range finder, a melhoria na precisão das medições será um eterno tema de pesquisa. No sistema apresentado, a escolha de equipamentos simples e de baixo custo foi feita com o intuito de reforçar a sua flexibilidade, o que resultou também em uma técnica capaz de desacoplar o processo de captura de imagens e o processamento digital. Apesar disso, é possível reduzir esta flexibilidade em prol do aperfeiçoamento na precisão.

O uso de projetores de cristal líquido é sugerido como alternativa na geração de luz estruturada, assim como o uso de câmeras CCD coloridas para a captura das imagens. Neste caso, estes equipamentos estarão conectados diretamente a um computador que será capaz de controlar o padrão em pseudo-arco-iris de forma a adaptá-lo às condições locais como características de superfície, complexidade da cena e resposta da câmera.

Para uma melhoria em menor escala, pode-se pensar nos diversos efeitos de deformações das imagens, provocadas pela imperfeição das lentes fotográficas existentes. Algumas destas deformações podem ser incluídas no modelo geométrico, com o agravamento na complexidade das equações, mas com uma melhoria da resposta do sistema a pontos distantes do centro das imagens, onde estas deformações costumam se acumular.

Por final, pode-se pensar em um sistema avançado de recuperação de formas, com a concatenação do sistema apresentado a um sistema capaz de modelar sólidos a partir de mapas de profundidades.

ANEXO A – O SISTEMA DE CORES HSI

As cores são usualmente representadas em sistemas digitais usando-se uma combinação variável de três cores assim chamadas primárias: vermelho, verde e azul. Esta forma de representação é chamada RGB (*red, green, blue*) e é usada como base na estrutura de arquivos de imagens, assim como em sistemas de visualização como a televisão e o monitor.

Apesar de sua ampla utilização, o sistema RGB não permite que processamentos baseados em cores sejam feitas de forma direta, já que a diferenciação de cores é feita geralmente com base nas características de matiz, saturação e intensidade. Desta forma, o sistema HSI (*hue, saturation, intensity*) foi proposto, tendo as vantagens de desacoplar a intensidade das informações de cor e representar as cores pela matiz e pela saturação, da mesma forma como os seres humanos percebem a cor. [18]

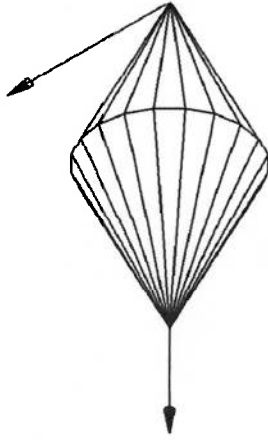


Figura A-1 Representação espacial do sistema HSI.

A Figura A-1 mostra a representação espacial do sistema HSI. Este modelo usa um sistema de coordenadas cilíndrico, sendo que todas as cores representáveis ficam no interior de um cone duplo. Os eixos representados são a matiz na direção angular, a saturação na direção radial e a intensidade na direção axial, sendo que a escala de cinzas fica sobre o eixo de intensidades. A Figura A-2 mostra o disco do plano de intensidade $\frac{1}{2}$, onde ficam as cores totalmente saturadas, com uma indicação das principais cores sobre o eixo da matiz.

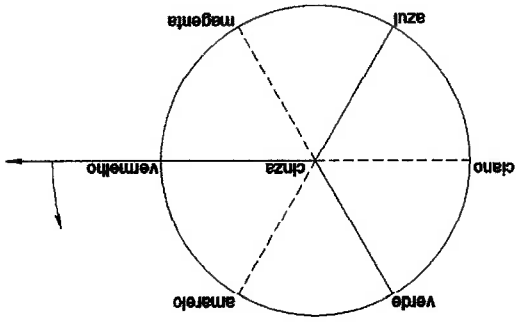


Figura A-2 Disco do plano de intensidade $\frac{1}{2}$ do sistema HSI.

A conversão do sistema RGB para o sistema HSI e vice-versa não é trivial, envolvendo diversos conceitos não lineares.

Gonzalez e Woods [18] apresentam uma forma de transformação baseada na geometria das representações espaciais dos dois sistemas, fazendo-se transformações geométricas mantendo os eixos comuns das escalas de cinza. Esta transformação envolve equações com o uso de arcos-cosseno e raízes quadradas que retardam qualquer processamento digital, além de apresentar resultados não concisos tal como a diferença na intensidade das cores saturadas vermelho, verde, azul e ciano, magenta, amarelo.

Sato e Kitayama [3] apresentam uma forma alternativa de representação da matiz, fazendo uma interpolação linear das cores vermelho, verde e azul nesta ordem. A saturação e a intensidade não são equacionadas, por não serem usadas no sistema desenvolvido por eles, deixando a transformação incompleta.

A seguir serão detalhadas as transformações RGB-HSI e HSI-RGB, desenvolvidas para o sistema apresentado, que têm como base a representação da

matiz do sistema de Sato e Kitayama com algumas modificações e uma nova forma de representar as componentes de saturação e intensidade.

A.1. Conversão de RGB para HSI

A conversão do sistema RGB para o sistema HSI é feita analisando-se os conceitos de cada componente HSI.

A componente matiz (H) representa a cromaticidade de uma cor. Observando-se a Figura A-2, a matiz indica a posição angular sobre o esquema, dando a coloração sobre o espectro contínuo de cores que passam pelas cores indicadas. As cores indicadas no esquema, com um espaçamento de 60°, são cores facilmente identificáveis no sistema RGB, sendo portanto usadas como marcos na segmentação das equações de transformação.

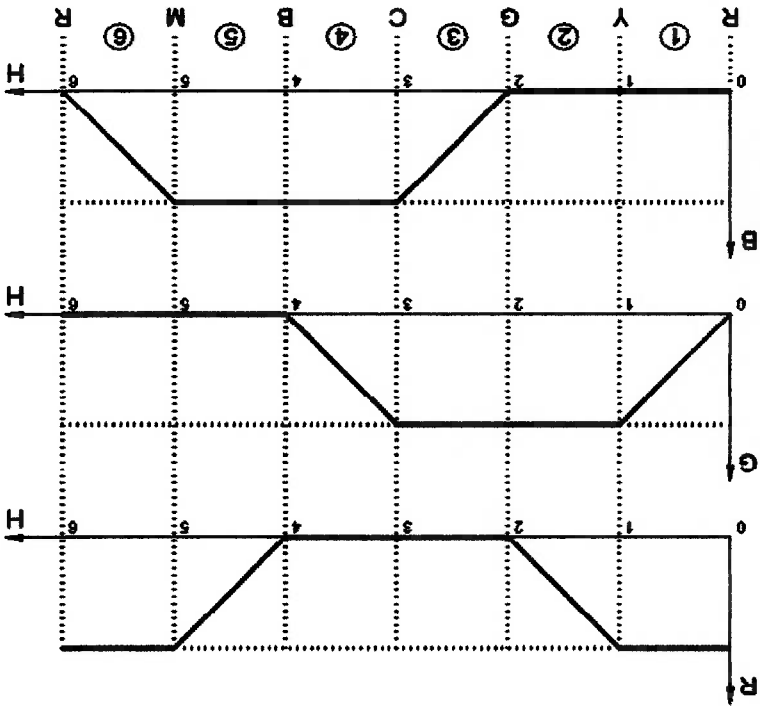


Figura A-3 Gráficos HxR, HxG e HxB.

A Figura A-3 mostra os gráficos de variação das componentes vermelho, verde e azul de acordo com a variação da matiz, considerando saturação máxima.

Estes gráficos podem ser divididos em seis regiões, onde as componentes apresentam características equivalentes.

O equacionamento para a obtenção da componente matiz faz uma interpolação linear das componentes RGB em cada região, conforme mostrado na figura. A matiz é quantificada no intervalo $[0,6]$ de forma a simplificar as equações. Estes valores podem ser convertidos linearmente para o intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$ de forma a se adequar ao sistema de coordenadas cilíndricas.

A componente de saturação (S) indica o fator de diluição de uma cor com a cor branca ou preta. Uma cor totalmente saturada é uma cor sem a adição de branco ou preto e uma cor não saturada é um tom de cinza. A Figura A-4 mostra as componentes RGB da cor rosa escuro (vermelho semi saturado), sendo indicado a quantidade de branco e preto que foram misturadas à cor.

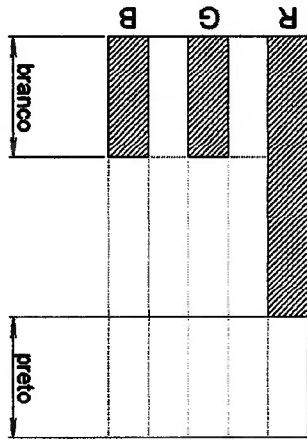


Figura A-4 Componentes RGB da cor rosa escuro.

Segundo a definição dada acima, a saturação pode ser quantificada pela região onde não há influência das cores branca ou preta, ou seja, neste caso, pela diferença entre os valores da componente vermelho e das componentes verde ou azul, ou num caso genérico, pela diferença entre a maior componente e a menor componente.

Esta correspondência pode ser usada de forma direta, resultando em uma quantificação da saturação no mesmo intervalo de quantificação das componentes RGB. Nos casos extremos, uma cor sobre a escala de cinza irá possuir todas as

componentes RGB iguais, sendo a saturação nula e uma cor totalmente saturada, irá possuir pelo menos uma componente em seu valor máximo e uma componente nula, resultando em uma saturação igual ao valor máximo da escala RGB.

Por fim, a componente intensidade (I) é analisada. A intensidade é a imagem colorida em uma imagem em escalas de cinza é feita usando-se a componente intensidade da imagem colorida. Desta forma, a cor preta (0,0,0)_{RGB} possui a menor intensidade e a cor branca (1,1,1)_{RGB}, a maior intensidade.

Tabela A-1 Equações usadas na conversão do sistema RGB para o sistema HSI.

Regra	Matiz (H)	Saturação (S)	Intensidade (I)
$R > G \geq B$	$\left(\frac{G-B}{R-B}\right)$	$(R-B)$	$\left(\frac{R+B}{2}\right)$
$G \geq R > B$	$\left(\frac{B-R}{G-B}\right) + 2$	$(G-B)$	$\left(\frac{G+B}{2}\right)$
$G > B \geq R$	$\left(\frac{B-R}{G-R}\right) + 2$	$(G-R)$	$\left(\frac{G+R}{2}\right)$
$B \geq G > R$	$\left(\frac{R-G}{B-R}\right) + 4$	$(B-R)$	$\left(\frac{B+R}{2}\right)$
$B > R \geq G$	$\left(\frac{R-G}{B-G}\right) + 4$	$(B-G)$	$\left(\frac{B+G}{2}\right)$
$R \geq B > G$	$\left(\frac{G-B}{R-B}\right) + 6$	$(R-G)$	$\left(\frac{R+G}{2}\right)$

A intensidade de uma cor colorida, como o rosa escuro da Figura A-4, pode ser dada pela relação entre as cores branca e preta que estão diluídas na cor. Assim, quanto mais branco diluído, maior a intensidade e quanto mais preto, menor a intensidade. Para quantificar esta relação, pode-se usar o ponto médio entre as regiões indicadas como branco e preto. Assim, a intensidade é dada pela média da maior e da menor componente RGB, sendo o intervalo de quantificação igual ao intervalo usado para as componentes RGB.

A Tabela A-1 mostra as equações para obtenção das componentes HSI usadas em cada região determinada na Figura A-3. As regras usadas na identificação das regiões também são mostradas.

A.2. Conversão de HSI para RGB

A conversão do sistema HSI para o sistema RGB consiste em uma simples inversão das equações da Tabela A-1. A Tabela A-2 mostra as equações resultantes, lembrando que as regiões agora são determinadas pelo valor da componente matiz.

Tabela A-2 Equações usadas na conversão do sistema HSI para o sistema RGB

Região	Matiz	Vermelho (R)	Verde (G)	Azul (B)
1	[0,1]	$I + \frac{S}{2}$	$H \cdot S + B$	$I - \frac{S}{2}$
2	[1,2]	$B - (H - 2) \cdot S$	$I + \frac{S}{2}$	$I - \frac{S}{2}$
3	[2,3]	$I - \frac{S}{2}$	$I + \frac{S}{2}$	$(H - 2) \cdot S + R$
4	[3,4]	$I - \frac{S}{2}$	$R - (H - 4) \cdot S$	$I + \frac{S}{2}$
5	[4,5]	$(H - 4) \cdot S + G$	$I - \frac{S}{2}$	$I + \frac{S}{2}$
6	[5,6]	$I + \frac{S}{2}$	$I - \frac{S}{2}$	$G - (H - 6) \cdot S$

A.3. Operador de média

A operação de média entre duas cores representadas no sistema HSI será definida como uma simples média sobre as coordenadas cilíndricas utilizadas. Assim, dadas duas cores definindo dois pontos A e B na região de cone duplo apresentado na Figura A-3, a cor média será dada pelo ponto médio do segmento AB .

A complexidade das equações se devem às conversões do sistema de coordenadas cilíndrico para o cartesiano e vice-versa de forma a possibilitar o cálculo geométrico do ponto médio. As equações resultantes são mostradas.

$$(A.1) \quad \left. \begin{aligned} \overline{S} &= \sqrt{\left[\frac{S_A \cdot m_A \cdot \cos H_A + S_B \cdot m_B \cdot \cos H_B}{m_A + m_B} \right]^2 + \left[\frac{S_A \cdot m_A \cdot \sin H_A + S_B \cdot m_B \cdot \sin H_B}{m_A + m_B} \right]^2} \\ \overline{H} &= \tan^{-1} \left(\frac{S_A \cdot m_A \cdot \cos H_A + S_B \cdot m_B \cdot \cos H_B}{S_A \cdot m_A \cdot \sin H_A + S_B \cdot m_B \cdot \sin H_B} \right) \end{aligned} \right\} \overline{I} = \frac{I_A + I_B}{2}$$

As equações (A.1) são na realidade equações de média ponderada, onde m_A e m_B são os pesos dados às cores dos pontos A e B. Estes pesos são necessários quando se pretende obter a média de mais de duas cores. Por exemplo, apresentadas três cores, C, D e E, pode-se utilizar as equações (A.1) com pesos unitários para se encontrar a média M dos pontos C e D. Então usam-se novamente estas equações para se obter a média das cores M e E, com pesos 2 ($m_C + m_D$) e 1 respectivamente. Utilizando-se deste raciocínio, pode-se calcular a média de qualquer número de cores, sem a necessidade de desenvolver novas equações para cada quantidade de elementos, o que seria inviável.

ANEXO B – ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DO MODELO DE CÂMERA PINHOLE

B.1. Comparação das câmeras pinhole e convencional

Uma câmera, como dispositivo de captura de imagem, possui a função de mapear uma cena tridimensional sobre um plano bidimensional.

A câmera pinhole executa esta operação através da definição de um ponto por onde passam todos os raios luminosos que serão capturados no plano da imagem. Neste caso, este ponto, conhecido por ponto focal, é um pequeno furo em uma placa opaca, como mostra a Figura B-1. Através deste furo, toda a luminosidade presente na cena observada se converte em um conjunto de raios de luz que são capturados pelo filme.

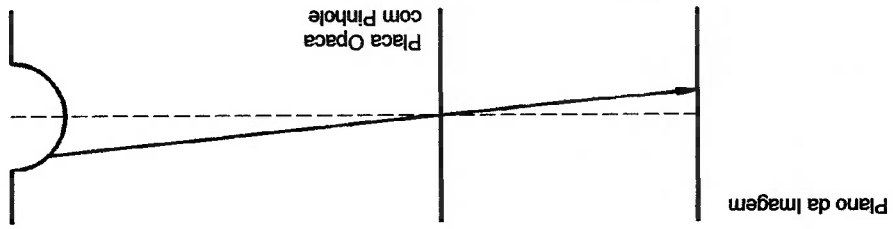


Figura B-1 Esquema de captura de imagem de uma câmera pinhole.

Este sistema de modelagem simples, quando construído, é capaz de produzir imagens comparáveis às câmeras convencionais. Há porém um problema de ordem prática que impede o uso real generalizado deste sistema. Toda a luminosidade utilizada para impregnar o filme passa por um pequeno furo, implicando em uma redução drástica na luminosidade útil se comparado com a

luminosidade presente na cena. Desta forma, o tempo de exposição do filme torna-se longo, reduzindo a gama de aplicações possíveis.

Para contornar este problema, as câmeras convencionais usam lentes de forma a otimizar o uso da luminosidade da cena. A Figura B-2 mostra um esquema mostrando a trajetória dos raios de luz que são projetados sobre o filme. Agora, cada ponto sobre o filme é iluminado por um cone de luz formado pela difração da lente. Logicamente, por razão da maior abertura na placa opaca – conhecida por diafragma nas câmeras convencionais –, a quantidade de luz incidindo sobre o filme é maior, sendo menor o tempo de exposição.

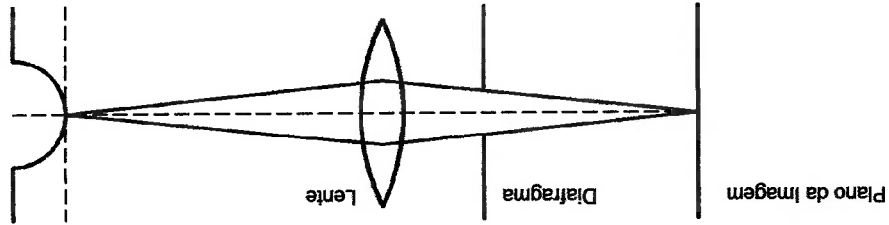


Figura B-2 Esquema de captura de imagem de uma câmera convencional.

Há porém uma desvantagem nesta configuração com relação à câmera pinhole. A lente utilizada para concentrar a luminosidade da cena têm um papel intrínseco de transformar o mapeamento tridimensional sobre bidimensional da câmera pinhole para um mapeamento bidimensional sobre bidimensional. Assim, como mostra a Figura B-3, caso a lente não esteja posicionada de forma correta, o ponto de convergência da luminosidade se forma fora da superfície do filme, fazendo com que a imagem seja gerada com uma aparência conhecida por fora de foco. O que realmente ocorre é que um ponto sobre a cena acaba sendo mapeado em um círculo onde o filme corta o cone convergente ou divergente de luz oriundo da lente. Este círculo é conhecido como *circle of confusion* (círculo de confusão) e o seu diâmetro define a qualidade do foco.

A partir do conceito de *circle of confusion*, é definida a distância *depth of field* (profundidade do campo) que quantifica a distância em torno do plano em foco onde o *circle of confusion* fica abaixo de um valor aceitável.

A equação a seguir é usada no cálculo do *depth of field*.

$$DOF = \frac{c \cdot N \cdot (1 + M)}{c \cdot N \cdot (1 + M)} + \frac{M^2 \cdot \left(1 + \frac{f \cdot M}{N \cdot c}\right)}{c \cdot N \cdot (1 + M)} \cdot \left(1 - \frac{f \cdot M}{N \cdot c}\right) \quad (B.1)$$

Neste caso, c é o diâmetro máximo do *circle of confusion*, f é a distância focal, N é o *f-number* definido como a razão entre a distância focal f e o diâmetro da abertura do diafragma e M é a amplificação da lente, definida como a razão entre as distâncias entre o filme e o ponto focal e o plano em foco e o ponto focal. [19]

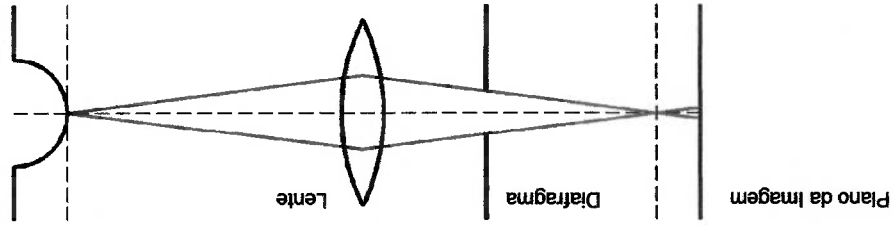


Figura B-3 Esquema de câmera convencional com lente fora de foco.

O cálculo do *depth of field* para a câmera usada é subjetiva, já que a distância focal e a abertura no momento da captura da imagem é definida de forma automática pela máquina, não sendo possível obter seus valores exatos. Desta forma um cálculo aproximado, com os valores médios da câmera, é feito de forma a obter o *depth of field* para um diâmetro de $0,02\text{mm}$ do *circle of confusion*. Este diâmetro é equivalente ao tamanho de um pixel na digitalização de um filme 35mm a 1200dpi . A Tabela B-1 resume os valores utilizados no cálculo e mostra o resultado obtido.

c, circle of confusion	0,02mm
f, distância focal	76,5mm
N, f-number	7,1
M, amplificação	0,1
Depth of Field	31,25mm

Tabela B-1 Cálculo do *depth of field* da câmera fotográfica utilizada.

Este resultado mostra que o problema de foco é imperceptível para objetos com elevação aproximada de 30mm, o que é pouco comparado com os objetos realmente utilizados nos testes. Assim, torna-se necessário uma análise específicas das implicações do foco sobre o sistema *rainbow range finder*.

B.2. Análise do problema de foco sobre o *rainbow range finder*

Uma imagem fora de foco é uma imagem onde cada um de seus pontos é convertido em círculos, sendo que a integral da intensidade luminosa incidente sobre cada círculo é equivalente à intensidade que seria projetada sobre o ponto em foco. No caso de um filme colorido, que é constituído de camadas fotossensíveis às cores vermelho, verde e azul, esta característica se manifesta em cada camada de forma independente.

Para a análise deste fenômeno, foi desenvolvido um simulador de foco que segue as características descritas, fazendo um mapeamento das componentes RGB de cada pixel de uma imagem digital em um círculo. Cada pixel do círculo recebe uma intensidade equivalente à intensidade do ponto original dividido pela área do círculo.

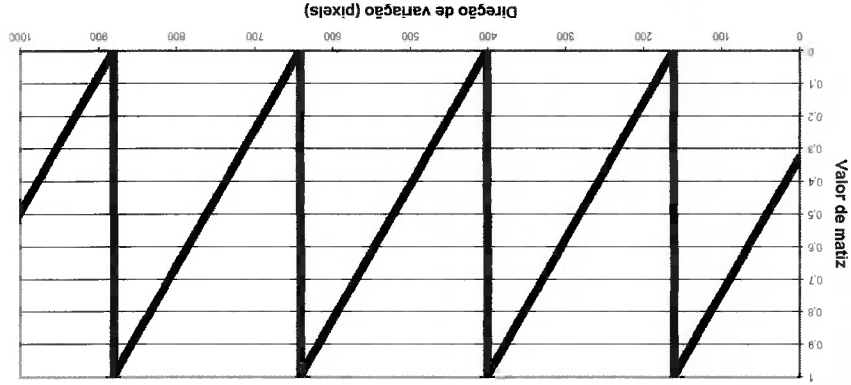


Figura B-4 Gráfico de variação de matriz de matriz da imagem em foco.

Este simulador foi aplicado ao padrão em pseudo-arco-iris desenvolvido, sendo os gráficos da matriz da imagem original e da imagem fora de foco

apresentados nas Figuras B-4 e B-5 respectivamente. O simulador de foco foi aplicado de forma a gerar um *circle of confusion* de diâmetro 11 pixels.

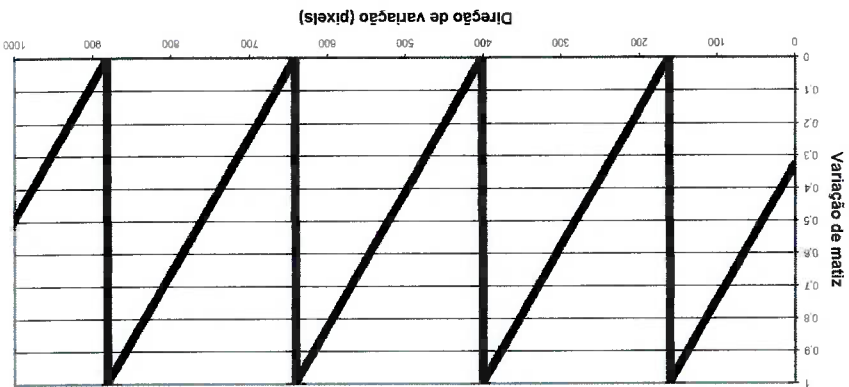


Figura B-5 Gráfico de variação de matriz de imagem fora de foco.

É notável a semelhança dos gráficos, que se justifica por uma diferença média numérica de apenas $5,6 \times 10^8$ pixels. Este resultado nos diz que o padrão utilizado é praticamente insensível ao problema de foco, devido à linearidade do código, mesmo com um *circle of confusion* de grandes dimensões.

A Figura B-6 mostra uma imagem simulando o foco de uma imagem tomada sobre um degrau. Neste caso, o *circle of confusion* utilizado tem diâmetro 5 pixels na metade superior, onde supostamente há um degrau de maior elevação, e 3 pixels na metade inferior.

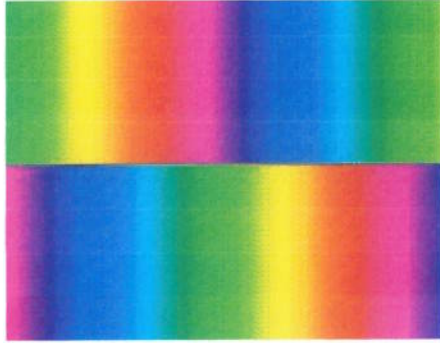


Figura B-6 Simulação de foco de imagem sobre degrau.

É possível observar a formação de uma estreita região no limite entre os degraus onde o padrão de cores sofre uma deformação indesejável, resultando em

uma provável falha no processo de medição. Felizmente, estas regiões são bastante estreitas, aproximadamente igual ao diâmetro do *circle of confusion*, com uma baixa saturação, sendo possivelmente descartados juntamente com as sombras.

Pode-se então concluir que o modelo de câmara pinhole é adequado à modelagem do sistema *rainbow range finder*, já que a principal incompatibilidade deste modelo se encontra na inexistência de foco e este fator possui baixa influência sobre o sistema, excetuando-se pequenas incongruências sobre bordas de degraus acentuados.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] TAJIMA, J. Rainbow Range Finder Principle for Range Data Acquisition. Proc. IEEE International Workshop on Industrial Application of Machine Intelligence, Seiken Symposium, p.381-386, 1987.
- [2] SMUTNY, V.; PAJDLA, T. Rainbow Range Finder and its Implementation at the CVL. [Research Report], Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Control Engineering, 1996. K335/96/130 13p.
- [3] SATO, T.; KITAYAMA, K. Measuring Shape with a Multispectral Pattern Projection Range Finder. Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, v.51, n.12, p.2133-2140, 1997. (em japonês)
- [4] SHIRAI, Y. *Three-Dimensional Computer Vision*. New York: Springer-Verlag, 1987.
- [5] JARVIS, R.A. A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.PAMI-5, n.2, p.122-139, 1983.
- [6] INOKUCHI, S.; SATO, K. *3D Imaging Techniques for Measurement*. Tokyo: Shokodo, 1992. (em japonês)
- [7] CHANG, M.; BOULT, T.E. A Public Domain System for Camera Calibration and Distortion Correction. [Technical Report], CUCS-038-95, Columbia University, Dept. of CS and Lehigh University, Dept. of BECS, 1995.
- [8] BATISTA, J.; ARAÚJO, H.; ALMEIDA, A.T. Iterative Multi-Step Explicit Camera Calibration. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.15, n.5, 1999.

- [9] PAJDLA, T. Laser Plane Range Finder – The Implementation at the CVL. [Technical Report], Prague: Czech Technical University, Computer Vision Laboratory, 1995. K335-1995-98.
- [10] SATO, Y.; KITAGAWA, H.; FUJITA, H. Shape Measurement of Curved Objects Using Multiple Slit-Ray Projections. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.PAMI-4, n.6, p.641-646, 1982.
- [11] BOYER, K.T.; KAK, A.C. Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.PAMI-9, n.1, p.14-28, 1987.
- [12] MORANO, R.A. et al. Structured Light Using Pseudorandom Codes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.20, n.3, p.322-327, 1998.
- [13] HORN, E.; KIRYATI, N. Toward Optimal Structured Light Patterns. *Image and Vision Computing*, 17, p.87-97, 1999.
- [14] YAMATANI, K. et al. Three-Dimensional Shape Measurement by LC Grating Pattern Projection Method – Development of Striped Liquid Crystal Grating – *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v.67, n.5, p.786-790, 2001. (em japonês)
- [15] CASPI, D.; KIRYATI, N.; SHAMIR, J. Range Imaging With Adaptive Color Structured Light. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.20, n.5, p.470-480, 1998.
- [16] MIYASAKA, T. et al. High Speed 3-D Measurement System Using Incoherent Light Source for Human Performance Analysis. In: **19th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)**, Commission V, Amsterdam, The Netherlands, p.65-69, 2000.
- [17] OBITKO, M. Introduction to Genetic Algorithms. Disponível em: <<http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/index.html>>. Acesso em: 11 de abr. de 2002.
- [18] GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Digital Image Processing**. [s.L.]: Addison-Wesley, 1992.
- [19] JACOBSON, D.M. Photographic Lenses Tutorial. Disponível em: <<http://www.graflex.org/lenses/photographic-lenses-tutorial.html>>. Acesso em: 11 de abr. de 2002.