SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito: 14.02.2005

Assinatura: *Ana Paula Jampai J. J. J.*

SciaGeo – Um sistema de captura de imagens aéreas georeferenciadas

Luís Fernando Curci Chavier

Orientador: *Prof. Dr. Onofre Trindade Júnior*

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Computação e Matemática Computacional.

USP – São Carlos
Fevereiro/2005

Aluno: Luis Fernando Curci Chavier

A Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Onofre Trindade Junior

Onofre Trindade

Prof. Dr. Luis Gustavo Nonato

Luis Gustavo Nonato

Prof. Dr. Valentin Obac Roda

Valt Obac Roda

*A Deus,
à minha esposa Danielle
e aos meus pais Dalila e Chavier.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à minha esposa, aos meus pais e às minhas tias Lia e Jurema pelo incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Onofre Trindade Júnior, pela orientação, apoio, e por todo o conhecimento que me transmitiu neste período.

Ao pesquisador Lúcio André de Castro Jorge, pelo processamento das imagens, extremamente importante para a conclusão e validação do trabalho.

Ao colega Luciano de Oliveira Neris, pela grande ajuda técnica no desenvolvimento deste trabalho.

À Fazenda Campo Bom, por ceder as áreas de teste e pelo apoio na realização do imageamento.

A todos os funcionários do ICMC e a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Organização do Texto	3
2	Contexto	4
2.1	Sistemas de Informação Geográfica	5
2.1.1	Componentes de um SIG	6
2.1.2	Aplicações de SIGs	7
2.2	Dispositivos de Captura de Imagens	9
2.2.1	Câmeras Fotográficas	9
2.2.2	Câmeras Fotográficas Digitais	14
2.2.3	Câmeras Filmadoras	16
2.3	Fotografia Aérea	17
2.3.1	Acrofotogrametria	17
2.3.2	Fotografia Aérea Digital e de Pequeno Formato	21
2.3.3	Fotografia Aérea com Aeronaves do Tipo Ultraleve	23
2.4	GPS	24
2.4.1	Princípio de Funcionamento do GPS	24
2.4.2	Estrutura dos Sinais GPS	26
2.4.3	Segmentos do Navstar-GPS	28
2.4.4	Interface com Receptores GPS	30
2.4.5	Precisão do Sistema GPS	31
2.4.6	GPS Diferencial (DGPS)	32
2.5	Georeferenciamento de Imagens Aéreas	34
2.5.1	Georeferenciamento Indireto	34
2.5.2	Georeferenciamento Direto	35

2.5.3	Amostragem Aérea Pontual	36
2.6	Considerações Finais	37
3	Análise de Requisitos e Especificação do SciaGeo	38
3.1	Introdução	38
3.2	Requisitos Funcionais	38
3.3	Requisitos Não Funcionais	39
3.4	Diagramas de Blocos	40
3.5	Diagrama de Fluxo de Dados — DFD	43
3.6	Considerações Finais	44
4	Projeto e Implementação — Hardware	45
4.1	Introdução	45
4.2	Interfaces	46
4.3	Seleção de Dispositivos para Implementação	47
4.3.1	Processador Principal	47
4.3.2	Câmera Fotográfica	48
4.3.3	Filmadora	48
4.3.4	Receptor GPS	49
4.3.5	Palmtop	49
4.4	Descrição Detalhada do Hardware Desenvolvido	50
4.4.1	Módulo Controlador de Câmera	50
4.4.2	Conversor de Níveis Lógicos RS232/TTL	51
4.4.3	Fonte de Alimentação	51
4.4.4	Modem de 2400bps	52
4.5	Testes	52
4.6	Montagem	52
4.7	Considerações Finais	53
5	Projeto e Implementação — Software	55
5.1	Introdução	55
5.2	Interfaces	55
5.3	Software do Palmtop	56
5.4	Software do Processador Principal	57

5.5	Software do Controlador de Câmera	58
5.6	Software de Extração de Coordenadas e Quadros de Vídeo	59
5.7	Ambiente de Implementação	60
5.7.1	Processador Principal	60
5.7.2	Controlador de Câmera	61
5.7.3	Palmtop	62
5.7.4	Software de Extração de Imagens e Coordenadas	62
5.8	Testes Modulares e de Integração	62
5.9	Considerações Finais	62
6	Instalação e Operação do SciaGeo	63
6.1	Introdução	63
6.2	Instalação do Equipamento	63
6.3	Operação Pré-Vôo	64
6.4	Operação Durante o Vôo	64
6.5	Operação Pós-Vôo	65
6.6	Considerações Finais	66
7	Resultados	67
7.1	Introdução	67
7.2	A Missão na Fazenda Campo Bom	67
7.3	Instalação do Equipamento	68
7.3.1	Câmeras, Lente e Filme Utilizados	68
7.3.2	Fixação do Equipamento na Aeronave	68
7.4	Área Monitorada	69
7.5	Operação do SciaGeo	69
7.6	Dados Resultantes da Missão	70
7.6.1	Análise Visual das Imagens	73
7.6.2	Processamento Computacional das Imagens	76
7.6.3	Integração dos Dados em um SIG	79
7.7	Considerações Finais	80
8	Conclusões	81
8.1	Introdução	81

8.2	Contribuições	81
8.3	Dificuldades Encontradas	82
8.4	Trabalhos Futuros	82
8.4.1	Planejamento de Missões	83
8.4.2	Auxílio à Navegação	83
8.4.3	Disparo Automático de Fotografias	83
8.4.4	Outros Trabalhos	84
A	Diagramas Esquemáticos	89
B	Protocolos de Comunicação	92
B.1	Pacote de Dados de Posicionamento	92
B.1.1	Pacote de Disparo de Fotografia	93
B.1.2	Pacote de Controle da Filmadora	93
B.1.3	Pacote de Confirmação de Disparo de Fotografia	94
B.1.4	Pacote de Confirmação de Controle da Filmadora	94
C	Formato do Arquivo de Coordenadas	95

Lista de Figuras

2.1	Estrutura geral de um Sistema de Informações Geográficas [CAM 96].	6
2.2	Principais componentes de uma câmera fotográfica (adaptado de [HED 79]).	9
2.3	Formação de imagens por uma lente de uma câmera [JAC 88].	11
2.4	Ângulo de visão [JAC 88].	12
2.5	Diafragma em forma de íris [HED 79].	12
2.6	Tipos de obturador de uma câmera fotográfica [HED 79].	13
2.7	Filtro de Bayer [NIC 03].	15
2.8	Tipos de fotografias aéreas segundo o eixo ótico da câmera (adaptado de [MAR 90]).	19
2.9	Projeções central e ortográfica.	20
2.10	Como variações no relevo podem afetar a escala em uma fotografia [WAR 96].	21
2.11	Princípio básico de operação do GPS (adaptado de [LOG 92]).	25
2.12	Aquisição do código C/A [KAP 96].	27
2.13	Constelação dos satélites GPS [KAP 96].	28
2.14	Diagrama de blocos simplificado de um receptor GPS [KAP 96].	29
2.15	Sistema DGPS básico [KAP 96].	33
3.1	Diagrama de blocos do <i>hardware</i> embarcado na aeronave.	40
3.2	Diagrama de blocos do <i>hardware</i> de extração de dados em solo.	42
3.3	Diagrama de fluxo de dados do sistema como um todo.	44
4.1	Distribuição física dos componentes do sistema.	53
4.2	Montagem mecânica e integração dos módulos de <i>hardware</i> em um encapsulamento comum.	54
5.1	Diagrama de fluxo de dados do <i>software</i> executado no <i>palmtop</i>	56
5.2	Telas capturadas do <i>palmtop</i> - tela de controle da câmera fotográfica (a) e tela de dados do GPS (b).	57

5.3	Diagrama de fluxo de dados do <i>software</i> do processador principal.	58
5.4	Diagrama de fluxo de dados do <i>software</i> do controlador de câmera.	59
5.5	Diagrama de fluxo de dados do <i>software</i> de extração e coordenadas e quadros de vídeo.	60
5.6	Captura de tela da interface do extrator de coordenadas e imagens.	61
7.1	Detalhe da montagem do SciaGeo na aeronave.	69
7.2	Mapa da região indicando os talhões monitorados.	70
7.3	Piloto e operador do SciaGeo a bordo da aeronave com o <i>hardware</i> do SciaGeo acoplado (no canto inferior esquerdo da imagem).	71
7.4	Detalhe de um veículo visto em solo por meio de imagens de baixa (a) e alta (b) resolução	72
7.5	Imagens em escala reduzida de soja sem problemas (a) e com falhas de plantio (b)	73
7.6	Imagens em média escala de soja sem problemas (a) e com falhas de plantio (b)	74
7.7	Imagens em grande escala de soja sem problemas (a) e com falhas de plantio (b)	74
7.8	Imagens em escala reduzida de milho sem (a) e com (b) presença de plantas invasoras.	75
7.9	Imagens em grande escala de milho sem (a) e com (b) presença de plantas invasoras.	75
7.10	Nematóides em área de soja - imagens original (a) e segmentada (b).	77
7.11	Falha de plantio em área de soja - imagens original (a) e segmentada (b).	77
7.12	Doença em área de milho - imagens original (a) e segmentada (b).	78
7.13	Cobertura de solo em área de algodão - imagens original (a) e segmentada (b).	78
7.14	Mapa indicando a porcentagem da área contendo solo nu nos pontos de amostragem.	79
A.1	Diagrama esquemático da placa do conversor de níveis lógicos RS232/TTL.	89
A.2	Diagrama esquemático da fonte de alimentação chaveada utilizada pelo SciaGeo.	90
A.3	Diagrama esquemático do modem de 2400bps utilizado para modulação e demodu- lação dos sinais digitais no canal de áudio da filmadora.	90
A.4	Diagrama esquemático da placa controladora de câmera.	91

Lista de Tabelas

2.1	Elementos de orientação de uma fotografia aérea [GRA 86].	19
-----	---	----

Resumo

Fotografias aéreas possuem aplicações nos mais variados tipos de atividades. Como exemplos, pode-se citar agricultura, vigilância, mapeamento e planejamento urbano, levantamento de malha rodoviária, levantamento topográfico e atividades militares, entre outras. É de grande importância a associação de imagens aéreas às coordenadas geográficas do local onde são obtidas. Esse tipo de associação é chamado de georeferenciamento, e é necessário para que seja possível utilizar, de forma satisfatória, os dados contidos nas imagens. Recentemente, o avanço da tecnologia na área de posicionamento global tem fornecido sensores capazes de determinar coordenadas geográficas em tempo real com grande precisão. Isso permite a criação de sistemas que automatizam o processo de georeferenciamento das imagens a um baixo custo. Além disso, o uso de equipamentos de fotografia aérea de pequeno formato associado ao uso de aeronaves do tipo ultraleve como plataforma também tem permitido uma significativa redução no custo de obtenção de imagens aéreas. Neste trabalho de mestrado foi desenvolvido o SciaGeo, um sistema para aquisição automática de imagens aéreas georeferenciadas utilizando aeronaves do tipo ultraleve. Foram obtidos bons resultados com o SciaGeo, por meio de testes em campo, realizados em uma região agrícola, sobre culturas de soja e milho. Esses testes geraram imagens georeferenciadas de boa qualidade, permitindo a extração de informações importantes da cultura por meio de processamento digital de imagens.

Abstract

Aerial photographs can be applied in a wide variety of activities. For example, they can be applied to agriculture, surveillance, urban mapping and planning, road survey, topographic mapping and military activities. There is a need for the connection of aerial imagery to the geographic coordinates of the location where the images were acquired. This type of connection is called georeferencing, and it is required for the efficient use of the information extracted from the images. Recently, technology advances in global positioning systems have provided sensors that are able to fix positions in real time with great accuracy. This allows the development of systems that automate image georeferencing at a low cost. Furthermore, the use of small format photography in conjunction with ultralight aircraft has allowed a cost reduction in aerial image acquisition. This work relates to the development of SciaGeo, an automatic system for aerial image acquisition and georeferencing using ultralight aircraft. Good results were achieved with SciaGeo in field tests. These tests were done in agricultural locations, over soya and sweet corn fields. Good quality georeferenced images were obtained from the field tests, making it possible to extract information from them using digital image processing techniques.

Capítulo 1

Introdução

O grande avanço tecnológico verificado nos últimos anos na área de posicionamento global tem permitido a obtenção de dados georeferenciados de forma cada vez mais acessível. Uma das maneiras mais comuns de se obter esses dados é por meio de imagens aéreas, devido à sua abrangência geográfica e à facilidade de locomoção de uma aeronave no espaço.

A fotografia aérea vem sendo usada há bastante tempo, porém o equipamento tradicional para obtenção das imagens é complexo e exige um investimento muito alto, tornando o seu uso inviável para determinados tipos de aplicação. A diminuição do custo de sistemas de aquisição de imagens digitais (câmeras fotográficas digitais, por exemplo) e de posicionamento global tem aberto novas possibilidades.

Imagens aéreas georeferenciadas possuem aplicações em vários ramos de atividade, como, por exemplo: agricultura [TOR 00] [Tri 00], planejamento urbano [FRè 98] [VAN 98], levantamento de malha rodoviária [NET 96] [BAR 93], análise de tráfego [ANG 02] [BEC 89], arqueologia [RIC 01] e operações militares, entre outras.

Uma das atividades que geram demanda por essas imagens atualmente é a agricultura de precisão. A essência da agricultura de precisão é a obtenção contínua de informações espacialmente detalhadas da cultura, seguida da utilização adequada dessas informações para otimizar o manejo. Com a agricultura de precisão, define-se como aplicar no local correto, e no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas.

No solo, o teor de nutrientes, o teor de matéria orgânica, o pH, a umidade, a profundidade de camadas compactadas, entre outros parâmetros, apresentam variações que podem atingir até uma ordem de grandeza de um local para outro ou de uma data para outra, na mesma área de produção. Toda a prática agrícola convencional está baseada em tratar o campo como homogêneo,

ignorando tais variações. A obtenção desses parâmetros em um determinado ponto a partir de imagens aéreas, com uma determinada precisão, pode fornecer os dados necessários para que o tipo de manejo seja definido de maneira diferenciada para cada ponto da cultura.

Para que a aquisição das imagens se torne economicamente acessível, o equipamento utilizado deve ser de pequeno formato (filmes fotográficos de 35mm), em contraste ao equipamento utilizado na fotografia aérea tradicional de grande formato, que possui um custo muito elevado. No caso de aquisição digital de imagens, a resolução do equipamento geralmente não é suficiente para que uma única imagem cubra uma área muito grande. Um sistema com baixo custo de operação deve produzir um grande número de imagens que, individualmente, cobrem uma pequena área do solo, e em conjunto, cobrem uma área maior.

A obtenção de imagens aéreas georeferenciadas de forma manual pode se tornar bastante custosa, principalmente quando o número de imagens é grande. Nesses casos, o trabalho torna-se inviável, exigindo um esforço muito grande. Para a agricultura de precisão, em particular, o tempo necessário para o processamento das imagens pode se tornar um problema, uma vez que a adoção de práticas de manejo deve ser feita imediatamente após a detecção do problema.

Um problema ainda maior quanto à obtenção de imagens aéreas de pequeno formato é a velocidade requerida para o georeferenciamento direto das imagens. Aeronaves de asa fixa (como ultraleves, por exemplo), possuem uma velocidade mínima de voo; essa velocidade mínima de voo implica um tempo mínimo para o georeferenciamento das imagens, já que isso deve ser feito em tempo real. A frequência de obtenção de imagens de pequeno formato em voo é grande o suficiente para que se torne impossível registrar manualmente a coordenada geográfica no momento em que a imagem é obtida.

Pelos motivos citados acima, pode-se notar que a automatização da aquisição e do georeferenciamento das imagens se torna bastante útil no caso de imagens aéreas de pequeno formato.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver o SciaGeo (Sistema de Captura de Imagens Georeferenciadas), um sistema que visa a aquisição de imagens aéreas de pequeno formato georeferenciadas automaticamente, com foco na sua aplicação à agricultura de precisão. Essas imagens devem passar, posteriormente, por um processamento para a extração de características relevantes para o planejamento das atividades agrícolas.

Um dos objetivos do SciaGeo é a possibilidade de utilização em aeronaves de pequeno porte, inclusive do tipo ultraleve. Essas aeronaves possuem um custo muito baixo de operação em relação às aeronaves utilizadas na fotografia aérea convencional. Utilizando esse tipo de aeronave, o sistema pode ser utilizado em uma maior gama de aplicações e por diversos tipos de usuários.

1.1 Organização do Texto

Esta dissertação está dividida em oito capítulos. No segundo capítulo, é apresentada uma revisão da literatura, na qual são abordados diversos assuntos relacionados à obtenção de imagens aéreas, como Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), dispositivos para captura de imagens, fotografia aérea convencional e de pequeno formato, sistema de posicionamento global GPS e sistemas de georeferenciamento de imagens aéreas.

O terceiro capítulo destina-se a apresentar uma análise de requisitos e uma especificação geral do SciaGeo, incluindo os requisitos funcionais e não funcionais do sistema, com diagramas gerais de *hardware* e *software*.

O quarto capítulo aborda com detalhes o projeto e implementação do *hardware* do SciaGeo, apresentando aspectos relativos às interfaces de *hardware* utilizadas, seleção de equipamento, desenvolvimento de *hardware* específico, metodologia de testes e montagem mecânica do equipamento.

No quinto capítulo são descritos o projeto e a implementação dos módulos de *software* do SciaGeo. São apresentadas descrições textuais e diagramas de fluxo de dados dos módulos, bem como aspectos das interfaces de comunicação e metodologia de testes.

O capítulo seis descreve como o sistema deve ser operado, desde a instalação até a recuperação dos dados resultantes.

No capítulo sete são apresentados os resultados obtidos na execução de uma missão real com o SciaGeo em uma propriedade rural. São avaliadas a viabilidade operacional do equipamento em condições reais e a qualidade dos dados gerados na missão.

Finalmente, o capítulo oito apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho, incluindo as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento e sugestões de trabalho futuros baseados no SciaGeo.

Capítulo 2

Contexto

Neste capítulo é realizada uma revisão da literatura relacionada a este trabalho. Na seção 2.1, é apresentado um breve estudo sobre os conceitos associados a sistemas de informação geográfica (SIGs), sua descrição, funcionamento e aplicações. A seção 2.2 aborda o tema da aerofotogrametria, incluindo conceitos de fotografia em geral e de aerofotogrametria convencional e de pequeno formato. A seção 2.3 apresenta alguns dos tipos de dispositivos usados para captura de imagens, tanto digitais quanto analógicos, acompanhados de uma descrição de seu funcionamento. Alguns tópicos relacionados ao sistema de posicionamento global GPS são apresentados na seção 2.4, incluindo um breve histórico da evolução de sistemas de navegação e uma explicação detalhada do funcionamento do sistema GPS. Na seção 2.5, é feito um estudo sobre sistemas de georeferenciamento direto de imagens, incluindo os problemas, vantagens e desvantagens associados à sua utilização. A seção 2.6 trata de sistemas de planejamento de missões de fotografia aérea. Finalmente, na seção 2.7 são apresentadas algumas considerações finais sobre o capítulo.

2.1 Sistemas de Informação Geográfica

O geoprocessamento pode ser entendido como sendo a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação sobre objetos ou fenômenos geograficamente identificados. O geoprocessamento tem sido empregado numa gama muito grande de aplicações em diversas áreas da Ciência, e tem contribuído para estudos de planejamento urbano e rural, meios de transporte, comunicações e energia, entre outros. As ferramentas utilizadas para aplicar o geoprocessamento compõem um conjunto denominado Sistema de Informação Geográfica (SIG), muitas vezes chamado de GIS, do inglês *Geographic Information System*, ou ainda de Sistema de Informação Espacial [MOR 01].

O campo de atuação dos SIGs é caracterizado por uma grande diversidade de aplicações. SIGs são sistemas de integração que unificam idéias desenvolvidas em várias áreas do conhecimento, como agricultura, botânica, computação, economia, matemática, fotogrametria, zoologia e geografia, entre outros. Por ser largamente utilizado por um grupo heterogêneo de usuários, o termo SIG é relativamente difícil de ser definido. Um outra dificuldade na definição do termo SIG deriva do fato de que muitas pessoas acreditam que o foco central é o conjunto de *hardware* e *software*, enquanto que outros argumentam que o elemento chave é o processamento da informação ou mesmo as aplicações [MAG 91].

Uma das definições mais utilizadas para o termo SIG é a de Burrough *apud* [MAG 91]: “um poderoso elenco de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real”.

Em um SIG, a realidade é representada como uma série de características definidas de acordo com dois elementos de dados: o elemento geográfico e o atributo. O elemento de dados geográfico é usado para fornecer uma referência para o atributo. Por exemplo, fronteiras administrativas, redes hidrográficas e localizações de picos no relevo são elementos geográficos utilizados para fornecer uma referência para, respectivamente, censo, fluxo de água e elevação do terreno. Em SIGs, o elemento geográfico é visto como mais importante do que o atributo, e é uma das principais características que diferenciam os SIGs de outros sistemas de informação [MAG 91].

Na subseção 2.1.1 são apresentados os componentes básicos de um SIG. Algumas aplicações de SIGs são citadas na seção 2.1.2.

2.1.1 Componentes de um SIG

Numa visão abrangente, pode-se dizer que um SIG é composto de cinco componentes independentes, porém interligados uns aos outros através de funções específicas. Os componentes do SIG são: entrada e integração de dados, funções de consulta e análise espacial, visualização e plotagem, e banco de dados geográfico (figura 2.1). Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa esses componentes de forma distinta, mas todos estão usualmente presentes em um SIG [CAM 96].

Figura 2.1: Estrutura geral de um Sistema de Informações Geográficas [CAM 96].

Interface

A interface é composta de um conjunto de funções que serve como suporte de entrada e integração dos dados. Em sistemas atuais, as funções relacionadas à interface são acionadas geralmente através de menus.

Entrada e Integração de Dados

A entrada refere-se a todos os aspectos de aquisição de dados espaciais contidos em mapas, fotografias aéreas, imagens de satélites, dados de campo, dados digitalizados, etc. Como os dados provêm de várias fontes, quase sempre é necessário converter esses dados para um único formato que possa ser interpretado pelo SIG.

Funções de Processamento

As funções de processamento são naturalmente dependentes dos tipos de dados envolvidos. A análise geográfica engloba funções como superposição, ponderação, medidas (área, perímetro), mapas de distância, tabulação cruzada, dentre outras. O processamento digital de imagens envolve funções como retificação, contraste, filtragem, realce e classificação. Modelos numéricos de terreno permitem a geração de mapas de declividade e aspecto, cálculo de volumes, análise de perfis, além da própria geração do modelo a partir de pontos esparsos ou linhas, entre outras funções. Operações sobre redes incluem caminhos ótimos, caminhos críticos e ligação topológica. Já as consultas aos bancos de dados podem ser espaciais ou não.

Visualização e “Plotagem”

Este componente, como o próprio nome diz, é utilizado para visualizar e “plotar” os dados, sejam espaciais ou alfanuméricos. Para auxiliar nesta tarefa empregam-se monitores de vídeo, impressoras e *plotters*.

Banco de Dados Geográfico

Um banco de dados é, basicamente, um conjunto de dados estruturados de forma a facilitar o acesso a determinadas informações que descrevem determinadas entidades do mundo real. Podemos citar, como exemplo, um banco de dados de funcionários de uma empresa que contém três tipos de dados: dados pessoais (nome, endereço, dados de documentos, etc), dados funcionais (cargo, data de admissão, etc) e dados para pagamento (salário base, faixa salarial, etc).

Um banco de dados geográficos (BDG) difere de um banco de dados convencional por armazenar dados sobre a localização das entidades. No exemplo anterior, o banco de dados convencional pode ser transformado em BDG se for introduzido dados que associem cada funcionário a uma localização geográfica do local onde mora ou onde trabalha. Neste caso, foi necessário introduzir uma referência geográfica em termos de pares de coordenadas geográficas [MOR 01].

Tradicionalmente, os SIGs armazenavam os dados geográficos em arquivos internos. Este tipo de solução vem sendo substituído pelo uso cada vez maior de Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD).

2.1.2 Aplicações de SIGs

Entre as áreas de aplicação de SIGs, pode-se citar [LAU 92]:

- Sistemas de sensoriamento remoto;
- *Design* apoiado por computador (CAD — *Computer Aided Design*);
- Mapeamento temático;
- Cartografia marítima;
- Modelagem de superfícies;
- Modelagem ambiental;
- Agricultura de precisão;
- Gerenciamento de recursos;
- Planejamento de transportes;
- *Geomarketing*;
- Arqueologia;
- Exercícios militares.

O domínio de aplicações em SIG está se ampliando cada vez mais, acompanhando a evolução dos dispositivos de coleta e as facilidades computacionais em geral.

Um fenômeno geográfico pode ser analisado de forma e com precisão diferentes, dependendo do objetivo da aplicação. Dessa forma, um mesmo conjunto de dados armazenados pode ter tratamentos distintos. Por exemplo, dados pluviométricos coletados em um conjunto de estações pluviométricas ao longo do tempo podem ser interpolados para determinar a distribuição de chuvas em certas regiões durante um período, visando planejar atividades de plantio. Os mesmos dados podem ser combinados com informações sobre a bacia hidrográfica das regiões, declividade e permeabilidade do solo, para auxiliar estudos de erosão.

2.2 Dispositivos de Captura de Imagens

Nesta seção são apresentados conceitos relacionados a dispositivos de captura de imagens. Na subseção 2.2.1 são considerados os aspectos gerais de uma câmera fotográfica. A subseção 2.2.2 trata de câmeras fotográficas digitais. Finalmente, na seção 2.2.3 são descritos aspectos de funcionamento de câmeras filmadoras.

2.2.1 Câmeras Fotográficas

Componentes de uma Câmera Fotográfica

A figura 2.2 apresenta os principais componentes encontrados em uma câmera fotográfica típica. Esses componentes são importantes porque influem diretamente na formação da imagem final. São eles:

- Lente;
- Diafragma;
- Obturador;
- Filme.

Figura 2.2: Principais componentes de uma câmera fotográfica (adaptado de [HED 79]).

Esses componentes e sua função na obtenção da imagem são apresentados nas subseções seguintes.

Lente

Uma lente convergente posicionada na parte frontal da câmera transmite os raios de luz vindos de cada parte da cena e focaliza-os em uma superfície plana. Raios de luz das partes superior e inferior e direita e esquerda da cena são focalizadas em pontos diametralmente opostos na superfície plana. Isso produz uma imagem invertida, bem definida e detalhada da cena [LAN 78].

Uma lente pode ser simples ou composta. Uma lente simples é formada por um único bloco de vidro com forma semelhante a um disco, enquanto que uma lente composta é formada por várias lentes simples alinhadas sobre um mesmo eixo, o *eixo ótico*. As lentes utilizadas em câmeras fotográficas são geralmente compostas, para gerar imagens melhores, com poucas distorções e aberrações.

Desconsiderando-se os detalhes de construção, as lentes de câmeras fotográficas são, em essência, semelhantes a lentes convexas simples em suas propriedades de formação de imagens [JAC 88]. Se um objeto está próximo à lente, a posição e o tamanho da imagem podem ser determinados considerando-se a refração da luz vinda de dois pontos extremos do objeto. Na figura 2.3, isso é apresentado para uma lente simples.

Por aproximação, pode-se considerar que um determinado objeto suficientemente distante se encontra no infinito; todos os raios de luz vindos de algum ponto do objeto são considerados paralelos. Imagens de objetos posicionados dessa forma são formadas sobre um plano chamado *plano focal principal*, que intercepta o eixo ótico no *foco*. A distância do foco até a lente é chamada de *distância focal* (vide figura 2.3 (a)).

Como imagens de objetos a diferentes distâncias são formadas em planos diferentes, muitas câmeras possuem controles que permitem variar a distância entre a lente e plano de formação da imagem (plano do filme fotográfico). Imagens formadas em planos distantes do plano do filme aparecem borradas na imagem. A menor distância praticável entre a lente e o plano do filme é igual à distância focal. Quando ajustada dessa forma, a câmera pode focalizar objetos distantes, e diz-se que ela está *focada no infinito*. Em câmeras simples, que não possuem controle de foco, o foco geralmente é ajustado para o infinito.

A *escala da imagem* (ou *aumento*) é definida como a relação entre o tamanho do objeto real fotografado e o tamanho da representação do objeto na imagem gerada. A escala da imagem depende diretamente da distância focal da lente da câmera. Para objetos distantes, e quando a câmera está focada no infinito, a escala da imagem é dada por

$$S = \frac{f}{D}$$

Figura 2.3: Formação de imagens por uma lente de uma câmera [JAC 88].

onde S é a escala da imagem, f é a distância focal da lente e D é a distância do objeto em relação à câmera.

A distância focal da lente também determina o *ângulo de visão* para um determinado formato de filme. O ângulo de visão é definido como o ângulo projetado pela diagonal do filme com relação à lente, quando a câmera está focada no infinito (figura 2.4). O ângulo de visão θ é dado pela fórmula:

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{K}{2f} \right)$$

onde K é a diagonal do filme e f é a distância focal da lente.

Vale notar que existem lentes de câmeras com distância focal variável. Essas lentes são chamadas de *varifocais* ou lentes com *zoom*.

Figura 2.4: Ângulo de visão [JAC 88].

Diafragma

A intensidade da luz que passa por uma lente fotográfica é limitada pelo diafragma. Em algumas câmeras, a abertura do diafragma é fixa; em outras o diafragma consiste de um disco contendo vários orifícios de diferentes aberturas. A maioria das lentes, no entanto, utiliza um diafragma em forma de íris, que possui lâminas (folhas) que podem ser movidas de modo a formar uma abertura circular de diâmetro variável, conforme pode ser visto na figura 2.5 [JAC 88].

Figura 2.5: Diafragma em forma de íris [IIED 79].

Aberturas de diafragma são ajustadas em função de frações da distância focal da lente, chamadas de *f-stops*. Uma abertura de f8 significa que a razão entre o diâmetro da abertura e a distância focal da lente é de $1/8$. Os *f-stops* são organizados em uma sequência padrão que começa em f1, passando por f1.4, f2, f2.8, f4, f5.6, f8, f11, f16, f22, e atingindo aberturas ainda menores.

Além de clarear ou escurecer a imagem, variações na abertura do diafragma possuem um outro efeito importante: elas afetam a *profundidade de campo*, que é a área satisfatoriamente nítida atrás e à frente do objeto focado [HED 79].

Um outro fator importante afetado pela abertura do diafragma é a *distância hiperfocal*, que corresponde à menor distância que um objeto pode estar da câmera e ainda aparecer nítido na imagem, quando a câmera está focada no infinito. A distância hiperfocal DH pode ser calculada da seguinte maneira [WAR 96]:

$$DH = 1000 \times \frac{f}{A}$$

onde f é a distância focal da lente e A é a abertura do diafragma. Por exemplo, com uma lente de distância focal de 35mm e uma abertura de diafragma de f16, a distância hiperfocal é de

$$\frac{1000 \times 35mm}{16} = 2,2m$$

Obturador

Existem dois tipos básicos de obturador. O primeiro é localizado na lente da câmera e consiste de lâminas de metal que formam uma barreira à luz e giram de forma a permitir a exposição (vide figura 2.6 (a)). O segundo tipo de obturador é localizado próximo ao plano focal, e é composto de duas barreiras com aberturas retangulares que, com movimentos combinados, liberam a passagem de luz por um determinado tempo (vide figura 2.6 (b)).

Figura 2.6: Tipos de obturador de uma câmera fotográfica [HED 79].

Além de controlar o momento exato da exposição do filme à luz, o obturador é responsável por regular a duração da exposição. Uma velocidade menor do obturador torna o tempo de exposição mais longo, o que implica em uma imagem mais clara, pois mais luz atinge o filme. Analogamente, velocidades maiores do obturador implicam em imagens mais escuras.

O tempo de exposição determina também como objetos em movimento aparecem na imagem. Com maior tempo de exposição, eles aparecem borrados, enquanto que tempos de exposição menores congelam a ação.

Filme

O filme em uma câmera fotográfica convencional é uma película contendo material químico sensível à luz. Após a exposição, o filme é processado (revelado) para gerar a imagem final.

Os dois parâmetros básicos relativos a um filme colorido são o tamanho e a sensibilidade. O tamanho deve ser compatível com a câmera fotográfica utilizada e é normalmente dado em função da largura do filme. O filme mais comum é o de 35mm (largura), com dimensões da imagem de 36 x 24mm.

A sensibilidade do filme é geralmente dada na escala padrão ISO. O número ISO é proporcional à sensibilidade do filme. Por exemplo, um filme ISO 200 é duas vezes mais sensível do que um filme ISO 100. A determinação da sensibilidade do filme deve ser feita em função das condições de iluminação da cena e da velocidade e abertura desejada para a exposição.

2.2.2 Câmeras Fotográficas Digitais

Câmeras fotográficas digitais possuem a mesma estrutura básica de uma câmara fotográfica convencional. A principal diferença se encontra no mecanismo de registro da imagem. Em vez de um filme químico, câmeras digitais utilizam um dispositivo de estado sólido (*sensor de imagem*), para registro da imagem. Os sensores de imagem são *chips* de silício que contêm milhões de diodos foto-sensíveis chamados fotocélulas. Cada uma das fotocélulas reage à luz que a atinge acumulando uma carga; quanto maior a intensidade da luz, maior a carga. Essa carga então é convertida para dados numéricos em formato digital, que são processadas para exibição em uma tela ou então impressas.

Atualmente existem dois tipos de sensores de imagens, quanto ao processo de fabricação: CCD ou CMOS. Ambos são baseados no conceito de fotocélulas. Sensores CCD são mais caros e oferecem melhor qualidade de imagem. Sensores CMOS possuem um processo de fabricação mais simples e barato e são de mais fácil integração, porém apresentam imagens de pior qualidade se comparados aos sensores tipo CCD. O recente aprimoramento dos sensores CMOS vem reduzindo gradualmente as suas desvantagens em relação aos sensores CCD. Para uso em câmeras fotográficas digitais, os sensores do tipo CCD são mais comuns atualmente [LIT 01] [BLA 99].

Uma fotocélula captura apenas a intensidade da luz incidente, e é incapaz de determinar a cor da luz. A maneira mais utilizada para registrar cor em câmeras digitais é com o uso de filtragem. Nessa técnica, um filtro é colocado sobre cada fotocélula para adquirir cores diferentes. O padrão de filtros mais utilizado é o de Bayer. Esse padrão alterna entre uma linha de filtros vermelhos e verdes e uma linha de filtros azuis e verdes (figura 2.7). Existem mais filtros verdes porque o olho humano não é igualmente sensível a todas as cores.

Figura 2.7: Filtro de Bayer [NIC 03].

A saída de um sensor com um filtro de Bayer é um mosaico de *pixels* vermelhos, verdes e azuis de intensidades diferentes. As câmeras digitais utilizam um algoritmo de interpolação para converter o mosaico de cores separadas em um mosaico de cores reais com o mesmo tamanho. A cor verdadeira de um *pixel* é determinada por uma média dos valores dos *pixels* mais próximos [NIC 03].

Uma das principais características de uma câmera fotográfica digital é a sua resolução. Geralmente, a resolução é dada em função do número de fotocélulas no sensor de imagem da câmera. No entanto, a resolução em *pixels* das imagens resultantes é sempre menor do que a resolução do sensor, pois algumas fotocélulas da borda do sensor não são utilizadas para obtenção da imagem.

Sensores de imagem em câmeras digitais também são classificados usando números equivalentes à escala ISO de filmes químicos. Algumas câmeras possuem sensores com valores ISO variáveis. Em situações de baixa luminosidade, é possível aumentar o valor ISO do sensor amplificando o seu sinal (aumentando o ganho).

A função do obturador em uma câmera digital pode ser realizada por três tipos de mecanismos [CUR 03]:

- Sensores bloqueados eletronicamente: esses sistemas utilizam o próprio sensor para controlar eletronicamente o tempo de exposição;
- Obturadores eletro-mecânicos: são dispositivos mecânicos controlados eletronicamente;
- Obturadores eletro-óticos: são dispositivos controlados eletronicamente posicionados na frente do sensor de imagem que alteram a opacidade do meio percorrido pela luz.

As câmeras fotográficas digitais necessitam de dispositivos de armazenamento dos dados obtidos pelo sensor de imagens. Para isso, as câmeras atuais utilizam cartões de memória Flash (disponíveis em diversos padrões), disquetes, discos rígidos compactos ou mesmo CDs regraváveis.

Câmeras digitais atuais de alta resolução geram uma quantidade de dados muito grande, e tendem a utilizar dispositivos de armazenamento cada vez menores. Apesar do constante aumento de densidade das mídias de armazenamento, muitas vezes é necessário que as imagens passem por algum algoritmo de compressão antes de serem gravadas. O algoritmo mais utilizado para compressão em câmeras digitais é o JPEG, com diferentes níveis qualidade.

2.2.3 Câmeras Filmadoras

Câmeras filmadoras (ou simplesmente filmadoras) possuem a mesma estrutura básica de câmeras fotográficas digitais. A diferença principal é a de que câmeras filmadoras capturam e armazenam imagens a uma taxa rápida e constante, do modo a criar uma seqüência de vídeo. Geralmente as imagens capturadas possuem menor resolução se comparadas a imagens de câmeras fotográficas digitais, devido a limitações de capacidade de armazenamento do vídeo.

Existem câmeras filmadoras analógicas e digitais. A diferença entre elas se dá apenas quanto à maneira como os dados são armazenados durante a gravação. Todo o processo de aquisição da imagem é semelhante para os dois tipos.

Quanto à parte ótica, muitas câmeras filmadoras possuem ajustes de foco e de abertura de diafragma automáticos. Como as filmadoras são utilizadas para capturar objetos em movimento e em diferentes condições de luminosidade, o ajuste manual desses parâmetros é inviável. Algumas câmeras filmadoras também possuem ajuste automático de velocidade do obturador. A maior parte das filmadoras possui ajuste de distância focal (*zoom*). Além das imagens, as filmadoras são também projetadas para capturar e armazenar som, seja de forma analógica ou digital [HAR 03].

2.3 Fotografia Aérea

Nesta seção são apresentados conceitos relacionados a fotografias aéreas. Na subseção 2.3.1 são citados conceitos de aerofotogrametria. A subseção 2.3.2 apresenta um estudo sobre fotografia aérea digital e de pequeno formato, e sua comparação com a fotografia aérea convencional. Na subseção 2.3.3 é feita uma breve pesquisa sobre o uso de aeronaves do tipo ultraleve como uma plataforma para fotografia aérea.

2.3.1 Aerofotogrametria

A palavra *fotogrametria*, derivada de três palavras de origem grega, tem o seguinte significado: luz, descrição e medidas. Ela pode ser definida como a ciência e a arte de se obter medidas dignas de confiança por meio de fotografias. O comprimento de um aeroporto, de uma rua, a posição de uma auto-estrada, o traçado de curvas de nível, a determinação da elevação de uma queda d'água e a posição relativa de dois automóveis depois de uma colisão são alguns exemplos da quase ilimitada aplicação da fotogrametria [MAR 90].

As principais aplicações da fotogrametria são a confecção de mapas topográficos, temáticos e mosaicos. O mapa assume características especiais segundo a finalidade para a qual é elaborado; em função desses propósitos diretos, define-se a escala da fotografia, o tipo de câmera, o tipo do filme, etc. [PAR 86]

A fotogrametria é freqüentemente dividida em categorias. De acordo com o tipo, pode-se dividi-la em dois tipos básicos [MAR 90]:

- Fotogrametria terrestre: utiliza fotografias tiradas da Terra, com o eixo ótico da câmera na direção horizontal;
- Fotogrametria aérea: utiliza fotografias obtidas com câmeras montadas em aeronaves.

Devido ao avanço da tecnologia, essa classificação básica pode ser estendida incluindo-se um terceiro tipo: a fotogrametria espacial. Nela, são utilizadas imagens obtidas a partir de plataformas localizadas no espaço, como satélites artificiais, por exemplo [PAR 86].

Neste trabalho são abordados apenas os conceitos relacionados à fotogrametria aérea, ou aerofotogrametria, visto que o SciaGeo visa auxiliar a aquisição de imagens georeferenciadas a bordo de aeronaves.

A primeira grande guerra mostrou a importância da fotografia aérea não só para fins militares, mas também para mapeamento e observações de caráter geral. Depois da guerra, com a

experiência adquirida por militares e civis, foram criados nos Estados Unidos muitos departamentos de fotogrametria, onde o mapeamento e a interpretação das imagens constituíam o principal objetivo.

Tipos de Fotografia Aérea

Segundo a posição do eixo ótico da câmera, a fotografia aérea pode ser vertical, oblíqua alta ou oblíqua baixa:

- **Fotografia Vertical:** é tirada com o eixo ótico da câmera coincidindo com a linha vertical ou a direção da força da gravidade. Na prática, considera-se ainda verticais as fotografias cujo eixo ótico possui inclinação de até cinco graus [WAR 96] [GRA 86] (figura 2.8 (a));
- **Fotografia Oblíqua Alta:** apresenta o eixo ótico com um grande desvio em relação à linha vertical, de modo que a linha do horizonte aparece na imagem final (figura 2.8 (b));
- **Fotografia Oblíqua Baixa:** apresenta o eixo ótico com um pequeno desvio em relação à linha vertical, de modo que a linha do horizonte não aparece na imagem final (figura 2.8 (c)).

A figura 2.8 ilustra os tipos de fotografia aérea citados, juntamente como a representação de como uma grade regular sobre o solo seria representada na fotografia.

Geometria da Fotografia Aérea

Como a fotografia é baseada em projeções centrais, um fator importante a ser considerado é a localização do centro da fotografia. Existem três pontos associados a uma fotografia aérea [WAR 96]:

- **Ponto principal:** é o centro geométrico da fotografia, que coincide com a interseção das linhas traçadas entre cantos opostos;
- **Nadir:** é o ponto verticalmente abaixo da aeronave;
- **Isocentro:** é ponto médio do segmento de reta que vai do ponto principal até o nadir.

Em uma fotografia aérea perfeitamente vertical, o ponto principal, o nadir e o isocentro são coincidentes.

No total, existem nove elementos que determinam a orientação de uma fotografia aérea (tabela 2.1). Seis elementos estão associados à orientação da câmera no espaço, e incluem três posições da câmera em relação ao solo (X , Y , Z) e três rotações da câmera (ϕ , ω , κ). Esses seis

Figura 2.8: Tipos de fotografias aéreas segundo o eixo ótico da câmera (adaptado de [MAR 90]).

Tabela 2.1: Elementos de orientação de uma fotografia aérea [GRA 86].

Orientação Externa	
Três Posições	Três Rotações
X, Y, Z	ϕ, ω, κ
Orientação Interna	
Distância Focal	Posição do ponto principal

elementos constituem a orientação externa da fotografia. Os outros três elementos estão relacionados à geometria interna da câmera e são a distância focal, e as posições x e y do ponto principal na fotografia. Esses três elementos constituem a orientação interna da fotografia [GRA 86].

Escala de uma Fotografia Aérea

Deve-se notar que uma fotografia não é um mapa, pois um mapa possui uma escala comum, enquanto que uma fotografia aérea não. Isso significa que todos os objetos em um mapa possuem a mesma escala, enquanto que objetos em uma fotografia aérea possuem escalas diferentes. Isso deriva do fato de que a fotografia aérea é produto de uma projeção central ou perspectiva, enquanto que um mapa é produto de uma projeção ortográfica, conforme ilustrado na figura 2.9 [WAR 96].

Figura 2.9: Projeções central e ortográfica.

A escala em fotografias e mapas é definida como a razão entre a distância entre dois pontos na fotografia (ou mapa) e a distância entre os pontos correspondentes no solo. Em outras palavras, escala é uma expressão que denota que uma unidade de distância em uma imagem representa um número específico de unidades na distância real no solo [WAR 96].

Há dois tipos de escala: escala pontual e escala média. Quando se fala em uma escala desejada para uma missão de fotografia aérea, refere-se à escala média. A escala média em um projeto é raramente idêntica para todas as imagens, pois cada uma possui características próprias que influenciam a escala: diferenças na orientação da câmera, mudanças na altitude de voo e variação do terreno.

Em uma situação hipotética onde o terreno é completamente plano e a fotografia é perfeitamente vertical, temos uma escala constante ao longo de toda a fotografia; porém, isso raramente acontece. Só é possível obter uma escala precisa quando se trabalha com um único ponto a uma determinada altitude. Para uma câmera focada no infinito, temos a escala pontual S_p :

$$S_p = \frac{f}{H}$$

onde f é a distância focal da lente e H é a altura em relação ao solo.

Distorções e Deslocamentos

Distorções são definidas por [WAR 96] como mudanças na posição da imagem em uma fotografia que alteram as características de perspectiva da imagem. Já deslocamentos são definidos como mudanças na posição da imagem que não alteram as características de perspectiva da imagem.

Como causas de distorção, temos: variações de tamanho do filme fotográfico, refração dos raios de luz na atmosfera, aberrações da lente e movimentação da imagem. Como causas de deslocamento, temos: a curvatura da Terra, desvio da câmera (*tilt*) e variações no relevo.

Do ponto de vista do usuário de equipamento fotográfico, de todos os fatores citados, a maioria depende do uso de equipamento mais sofisticado ou pode ser desprezada. Assim, os maiores problemas a serem tratados são as variações no relevo (figura 2.10) e desvios da câmera, que afetam a escala das imagens de maneira mais significativa [WAR 96].

Figura 2.10: Como variações no relevo podem afetar a escala em uma fotografia [WAR 96].

2.3.2 Fotografia Aérea Digital e de Pequeno Formato

O uso de fotografia aérea de pequeno formato em mapeamento aéreo vem sendo estudado e experimentado já há algum tempo [WAR 96]. Apesar das limitações de resolução desse tipo de fotografia, o baixo custo das câmeras e filmes utilizados e a possibilidade de uso de aeronaves menores o fazem

uma alternativa viável para uma gama maior de aplicações, quando comparado à fotografia aérea convencional.

Segundo [PAR 86], as câmeras a serem utilizadas na aerofotogrametria devem possuir algumas características específicas, dentre elas:

- Lentes de alto padrão geométrico, isentas de aberrações e distorções, e com alto poder de resolução;
- Distância focal fixa e calibrável;
- Obturador de alta velocidade e alto rendimento;
- Grande capacidade de armazenamento de filme;
- Formato grande, com lados precisos;
- Filme de alta sensibilidade;
- Uso de dispositivos especiais como o intervalômetro (utilizado para disparar as fotografias no momento adequado).

Por muito tempo, essas características só estavam disponíveis em câmeras especiais, desenvolvidas especificamente para a obtenção de fotografias aéreas. Pode-se notar, entretanto, que com o avanço da tecnologia na área de fotografia, muitas dessas características são hoje encontradas em câmeras fotográficas convencionais (não específicas para aerofotogrametria). Características como distância focal calibrável, obturador de alta velocidade (até 1/4000 de segundo) podem ser encontradas em câmeras profissionais, com um custo relativamente baixo em relação às câmeras específicas para fotografia aérea.

Com o advento de câmeras digitais de alta resolução, a necessidade de filmes químicos de grande formato e alta sensibilidade vem se tornando cada vez menor. A capacidade de armazenamento de imagens digitais nessas câmeras, em relação ao seu tamanho, também tem aumentado bastante com o aparecimento de mídias densas para armazenamento digital.

Em muitas aplicações de fotografia aérea, não se necessita de uma grande quantidade de recursos disponíveis para aplicação em equipamentos especiais, ou não se justifica um custo muito elevado para a obtenção das imagens. Além disso, muitas vezes essas aplicações não precisam da resolução e da qualidade oferecidas por equipamento específico. A utilização de câmeras convencionais (convencionais de pequeno formato ou digitais) pode então se tornar uma alternativa bastante viável e interessante.

2.3.3 Fotografia Aérea com Aeronaves do Tipo Ultraleve

Câmeras de pequeno formato têm sido usadas em UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles* – Veículos Aéreos Não Tripulados) [Tri 00] [JOH 96] e mesmo em pipas [ABE 02]. Já foram feitos alguns estudos sobre o uso de aeronaves do tipo ultraleve como uma plataforma para fotografia aérea [GRA 86] [BAR 88]. Essa plataforma se mostra adequada para aplicações onde um equipamento compacto pode ser utilizado e quando não existem muitos recursos financeiros. O uso de equipamentos aerofotogramétricos convencionais normalmente não é possível nessas aeronaves, devido a limitações de tamanho.

Uma outra vantagem de aeronaves do tipo ultraleve, quando comparadas a aeronaves de maior porte, é que elas necessitam de espaços menores para decolagem e pouso. Isso permite que sejam realizadas missões de fotografia aérea sobre áreas distantes de aeródromos convencionais, sem o inconveniente de voar o percurso de ida e volta até o local. Assim, é possível diminuir os gastos com manutenção e combustível. Os ultraleves podem ser levados até o local desmontados, transportados por meio de um automóvel, *pick-up* ou caminhão leve [GRA 86].

Em vários experimentos já realizados com o uso de ultraleves aplicados à fotografia aérea de pequeno formato foram obtidos bons resultados em baixas altitudes. Os ultraleves permitem vôos a baixa velocidade, possibilitando a obtenção de imagens livres de distorções atmosféricas e de distorções por movimento da imagem. Em contrapartida, as imagens geradas possuem menor escala, o que pode dificultar o mapeamento de grandes áreas.

Foi notado nos experimentos que a qualidade do produto fotográfico gerado em tais missões depende, em grande parte, do desempenho e eficiência do piloto, já que os ultraleves são aeronaves básicas e não possuem uma grande quantidade de instrumentos. Deve-se notar também que a pilotagem desse tipo de aeronave é difícil na presença de ventos fortes.

Pode-se concluir que, para certos tipos de aplicações, incluindo missões de baixa altitude com cobertura de áreas relativamente pequenas, as aeronaves do tipo ultraleve se mostram como uma alternativa viável e de baixo custo.

2.4 GPS

A idéia de se utilizar corpos celestes para navegação acompanha o homem desde os primórdios da humanidade. Ao que tudo indica, durante muito tempo, o homem continuará utilizando corpos celestes para se orientar. Nos dias atuais, entretanto, a orientação é feita com base em corpos dispostos convenientemente no espaço e sob seu inteiro controle.

Sistemas de navegação modernos que utilizam ondas de rádio possuem limitações: as ondas de rádio de alta frequência proporcionam navegação precisa, mas são influenciadas pelo relevo. As ondas de baixa frequência apresentam baixa precisão. Além disso, os equipamentos utilizados não são de fácil acesso para um usuário comum. Nas décadas de 60 e 70, o uso de satélites artificiais introduziu novos sistemas de navegação que resolveram alguns desses problemas. O primeiro sistema norte-americano de navegação por satélites foi o Transit Navigation Satellites. Este sistema não obteve sucesso devido à baixa altitude e ao pequeno número de satélites, o que o tornava indisponível em alguns pontos da Terra, em certos momentos. Fornecia a posição do veículo somente em duas dimensões, longitude e latitude.

O caminho para uma solução mais ampla foi dado através de pesquisas realizadas nas décadas de 70 e 80 pela Força Aérea dos Estados Unidos, que culminaram no desenvolvimento de um sistema de navegação por satélites denominado Navstar-GPS (*Navstar Global Positioning System*), também conhecido apenas como GPS. O GPS permite a qualquer usuário equipado com um receptor determinar sua posição na superfície da Terra, a qualquer hora do dia e em qualquer lugar. Tal sistema está disponível para qualquer usuário civil ou militar, porém com restrições de precisão para determinadas classes de usuários.

Na subseção 2.4.1 é apresentado o princípio de funcionamento do GPS. A seção 2.4.2 descreve a estrutura e o mecanismo de interpretação dos sinais GPS. Os três segmentos ou partes do sistema GPS são descritos na seção 2.4.3. Na seção 2.4.4 são abordados aspectos de interface com receptores GPS para aquisição dos dados. Na seção 2.4.5 é feita uma discussão sobre a precisão do sistema GPS. Finalmente, na seção 2.4.6 é apresentado o conceito de GPS diferencial (ou DGPS).

2.4.1 Princípio de Funcionamento do GPS

Um receptor GPS na terra, no mar ou no ar captura os sinais de quatro ou mais satélites do sistema Navstar-GPS, simultaneamente ou seqüencialmente, para determinar suas coordenadas em três dimensões: latitude, longitude e altitude. A figura 2.11 mostra como um receptor GPS típico encontra uma solução de navegação, usando os sinais de quatro satélites. Uma cadeia de pulsos

binários (0s e 1s) precisamente espaçados no tempo percorre o espaço do primeiro satélite até o receptor próximo ao solo. Isso leva cerca de 1/11 de segundo. O receptor então estima o tempo gasto pelo sinal para percorrer o trajeto subtraindo o tempo registrado em seu relógio interno do tempo de transmissão do satélite extraído do pulso recebido. O tempo do percurso do sinal é então multiplicado pela velocidade da luz para obter a distância estimada do satélite [LOG 92].

Se o relógio do receptor fosse perfeitamente sincronizado com os relógios a bordo dos satélites, três medições de distância como essa seriam suficientes para que o receptor determinasse a sua posição no espaço tridimensional. Porém, a maioria dos receptores de GPS utiliza osciladores de cristal de quartzo para medir o tempo. Esses osciladores de cristal não possuem uma sincronização perfeita com os relógios atômicos dos satélites GPS, que são muito mais estáveis e precisos.

Figura 2.11: Princípio básico de operação do GPS (adaptado de [LOG 92]).

Conseqüentemente, o receptor estima uma *pseudo-distância* de cada satélite. Todas as pseudo-distâncias são afetadas pelo mesmo erro de tempo gerado pelo relógio do receptor. Assim, a taxa de erro E pode ser eliminada matematicamente, medindo-se as pseudo-distâncias de quatro satélites, em vez de apenas três. Isso gera um sistema de quatro equações com quatro incógnitas:

$$\begin{aligned}
(X_1 - U_x)^2 + (Y_1 - U_y)^2 + (Z_1 - U_z)^2 &= (D_1 - E)^2 \\
(X_2 - U_x)^2 + (Y_2 - U_y)^2 + (Z_2 - U_z)^2 &= (D_2 - E)^2 \\
(X_3 - U_x)^2 + (Y_3 - U_y)^2 + (Z_3 - U_z)^2 &= (D_3 - E)^2 \\
(X_4 - U_x)^2 + (Y_4 - U_y)^2 + (Z_4 - U_z)^2 &= (D_4 - E)^2
\end{aligned}$$

Três das incógnitas são as coordenadas do usuário, U_x , U_y e U_z . A quarta incógnita é o erro do relógio, E . Os valores X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas do satélite i . As coordenadas de cada satélite são obtidas através das constantes de efeméride (elementos orbitais) codificadas no sinal transmitido. Essas constantes são utilizadas em cálculos algébricos e trigonométricos simples para determinar as coordenadas X_i , Y_i e Z_i do satélite no momento em que o pulso foi transmitido.

É imprescindível que os tempos enviados por cada satélite GPS estejam perfeitamente sincronizados entre si. Devido à alta velocidade do sinal eletromagnético, um erro de apenas um bilionésimo de segundo na medição do tempo gera um erro de posicionamento de cerca de 30 centímetros. Para que os objetivos de sincronização do sistema GPS sejam atingidos, os satélites são equipados com relógios atômicos muito precisos. Esses relógios são tão estáveis que podem gerar um erro de apenas um segundo em 160.000 anos. Ainda assim, estações de controle terrestres são utilizadas para enviar dados de correção de tempo para os satélites pelo menos uma vez por dia [LOG 92].

2.4.2 Estrutura dos Sinais GPS

Cada satélite GPS transmite seus sinais nas mesmas duas frequências: L1, de 1575,42MHz, e L2, de 1227,60MHz. Dois códigos binários diferentes são transmitidos pelos satélites: o código C/A (*Coarse Acquisition*) e o código P (ou *P-code - Precision Code*). Esses dois códigos são sobrepostos na frequência L1, enquanto que na frequência L2, apenas o código P é transmitido [LOG 92].

Para cada satélite há um código C/A e um código P diferente. O código C/A apresenta uma taxa de 1 MBit/s e é repetido a cada 1023 bits (aproximadamente 1 ms). O código P é transmitido a uma taxa de 10 MBits/s e repetido aproximadamente a cada 6×10^{12} bits (aproximadamente sete dias). Esses códigos são chamados de pseudo-aleatórios, pois a cadeia de sinais é aparentemente aleatória. Na realidade, esses códigos são gerados por relações matemáticas precisas, e são completamente previsíveis.

Um receptor GPS detecta o sinal de um satélite específico utilizando a técnica de acesso múltiplo por divisão de código (CDMA - *Code Division Multiple Access*). Internamente, é gerada

no receptor uma cadeia de pulsos idêntica à do satélite que está sendo rastreado. Essa cadeia de pulsos é gradualmente deslocada no tempo até que esteja "casada" com a cadeia de pulsos enviada pelo satélite. Quando isso ocorre, a função de auto-correlação entre os sinais atinge um valor máximo. O tempo correspondente ao deslocamento realizado sobre o pulso gerado pelo receptor é então medido e utilizado no cálculo da pseudo-distância. O processo de aquisição do sinal C/A é ilustrado na figura 2.12.

Figura 2.12: Aquisição do código C/A [KAP 96].

Uma cadeia de bits, com taxa de 50 bits por segundo, é sobreposta aos sinais C/A e P, utilizando adição em módulo 2. Os dados contidos nessa cadeia de bits incluem [LOG 92]:

- Constantes de efeméride do satélite, definindo a sua órbita;
- Almanaque, descrevendo a posição de todos os satélites GPS;
- Fatores de correção do relógio do satélite;
- Condições de operação do satélite.

O código C/A está disponível a todos os usuários civis, enquanto que o código P é restrito apenas a usuários militares. Com o uso de um mecanismo denominado *anti-spoofing*, o código P é enviado de forma criptografada. Assim, apenas usuários autorizados podem ter acesso a um serviço de posicionamento mais preciso. Devido à sua mais alta taxa de transmissão, o código P permite menores erros na obtenção do tempo de propagação do sinal. Além disso, como o código

P é transmitido em ambas as frequências L1 e L2, o receptor pode usar os dados obtidos para eliminar erros causado pela refração ionosférica dos sinais [KAP 96].

2.4.3 Segmentos do Navstar-GPS

O Navstar-GPS pode ser dividido em três partes ou segmentos principais: espacial, de usuários e de controle.

Segmento Espacial

O segmento espacial consiste de 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, e com uma altitude aproximada de 20.200 km. Os planos orbitais são inclinados de 55 graus em relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Dessa forma, a posição dos satélites se repete, a cada dia, 4 minutos antes do que no dia anterior. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora [MON 00]. A figura 2.13 ilustra a constelação dos satélites GPS.

Figura 2.13: Constelação dos satélites GPS [KAP 96].

Segmento de Usuários

O segmento de usuários é constituído pelos receptores GPS. O objetivo desse segmento é processar as informações de tempo e posição de quatro ou mais satélites para a medição precisa de velocidade, posição e tempo [LOG 92].

Figura 2.14: Diagrama de blocos simplificado de um receptor GPS [KAP 96].

A maior parte dos receptores possui canais separados, de forma que cada canal rastreia a transmissão de um único satélite. Um diagrama de blocos simplificado de um receptor GPS genérico é apresentado na figura 2.14. Os sinais de rádio CDMA recebidos dos satélites geralmente passam por um filtro de modo a reduzir a interferência gerada por frequências fora da banda desejada. Esse filtro é normalmente seguido de um pré-amplificador. Em seguida os sinais são convertidos para uma frequência intermediária, amostrados por um conversor analógico-digital e passados para um processador digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processor*). O DSP possui N canais paralelos, sendo que cada um é responsável por extrair dados de navegação dos sinais, incluindo pseudo-distâncias, deslocamento Doppler e mensagens binárias codificadas no sinal (efemérides, almanaque, etc.). Um processador é utilizado para controlar a sequência operacional do receptor e calcular a solução de navegação com base nos dados medidos pelo DSP. Uma unidade de visualização e controle é responsável por exibir os dados para o usuário e captar dados de entrada. Um exemplo desse componente consiste de um *display* de cristal líquido acompanhado de um teclado simples [KAP 96].

Atualmente, há uma grande quantidade de receptores no mercado civil, para as mais diversas aplicações, muitas vezes integrados a outros dispositivos móveis como PDAs e *notebooks*.

Segmento de Controle

A função do segmento de controle é rastrear e monitorar os satélites do sistema GPS, atualizando as constantes de suas efemérides e o erro de seus relógios. Esse segmento é composto por 5 estações de monitoramento no solo, sem operadores, mais uma estação-mestre de controle. As estações de monitoramento são analisadas por métodos de posicionamento independentes do sistema GPS para

obtenção de suas coordenadas, e são equipadas com relógios atômicos muito precisos [LOG 92].

Quatro estações de monitoramento capturam sinais de um determinado satélite, ao mesmo tempo, calculando a que distâncias estão desse satélite. As pseudo-distâncias obtidas são transmitidas para a estação-mestre de controle. A estação-mestre processa as pseudo-distâncias obtidas pelas estações de monitoramento, para determinar as constantes orbitais e os fatores de correção nos relógios atômicos a bordo de cada satélite. Tais informações são atualizadas em cada satélite, uma vez ao dia, por antenas posicionadas ao redor da Terra.

A estação-mestre de controle é um computador operado pela Força Aérea dos Estados Unidos, situado no Consolidated Space Operations Center (CSOC). O CSOC, que também controla outros satélites militares, está localizado em uma área de segurança no Colorado [MON 00].

2.4.4 Interface com Receptores GPS

Muitos receptores GPS encontrados no mercado são voltados para o usuário final, possuindo dispositivos visuais, como tela de cristal líquido, para exibição dos dados de navegação. Entretanto, existem outros tipos de receptores direcionados para a integração de sistemas eletrônicos. Esses dispositivos possuem, geralmente, uma *interface* de comunicação serial padrão.

Os dados enviados pela maioria dos receptores GPS estão no formato padrão NMEA-0183 definido pela NMEA (*National Marine Electronics Association*). Os dados são enviados em cadeias de caracteres no formato ASCII pré-definidas. Um exemplo de sentença gerada por um receptor GPS é a seguinte:

```
$GPGLL,4250.5589,S,14718.5084,E,092204.999,A*2D
```

A sentença consiste, basicamente, de cadeias de caracteres separadas por vírgulas. A primeira cadeia é uma palavra de controle, que indica quais os tipos de dados contidos na sentença. As demais cadeias contêm os dados propriamente ditos. As sentenças enviadas por cada modelo de receptor GPS normalmente constam no manual de operação do receptor. A especificação completa de todos os tipos de sentenças pode ser obtida no documento de descrição do padrão NMEA-0183 vendido pela própria NMEA.

Alguns receptores, principalmente os que possuem altas taxas de atualização da posição, possuem interfaces binárias próprias.

Independentemente do tipo de interface utilizada, os dados mais relevantes fornecidos pelos receptores GPS são:

- Posição (latitude, longitude e altitude);

- Tempo;
- Velocidade (componentes X, Y e Z);
- Número de satélites utilizados;
- Dados dos satélites utilizados (posições, DOP, etc.)

2.4.5 Precisão do Sistema GPS

Existem vários fatores que influenciam na precisão de um receptor GPS, dentre eles:

- Disponibilidade seletiva
- Interferência ionosférica
- Geometria dos satélites
- Reflexão de sinais

Disponibilidade Seletiva (*Selective Availability*)

A disponibilidade seletiva foi um mecanismo utilizado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos para degradar a precisão de receptores GPS de uso civil. Com a sua ativação, erros eram introduzidos nos sinais enviados pelos satélites, de forma que apenas usuários autorizados pudessem eliminá-los nos receptores. A disponibilidade seletiva foi utilizada até o dia primeiro de maio de 2000. Desde então ela se encontra desativada.

Interferência Ionosférica

A ionosfera é uma camada da atmosfera da Terra que fica entre 80 e 400 Km acima da superfície. Quando os sinais provenientes dos satélites atravessam a ionosfera, eles sofrem uma curvatura e um atraso. O tempo total de atraso é inversamente proporcional ao quadrado da frequência de transmissão dos sinais. As duas frequências de transmissão dos satélites (L1 e L2) podem ser utilizadas para realizar uma compensação no atraso. Cada frequência resulta em um tempo de atraso diferente. Conseqüentemente, pode ser realizada uma simples correção matemática em um receptor de código P para extrair os atrasos ionosféricos. Já em receptores de código CA, que capturam somente sinais L1, não se pode utilizar esse método. Esses receptores modelam matematicamente o comportamento da ionosfera, usando um conjunto de coeficientes polinomiais

que corrigem o erro provocado pela ionosfera em até 50%, quando esses valores são comparados com aqueles não-corrigidos.

Geometria dos Satélites

A geometria dos satélites refere-se às posições dos satélites relativas ao posicionamento do usuário. A quantidade de erro introduzida pela geometria dos satélites é denominada DOP (Dilution of Precision). Existem vários componentes da DOP: vertical (VDOP), horizontal (HDOP), tempo (TDOP), posição (PDOP) e geometria (GDOP). Algumas posições de satélites garantem mais precisão. O receptor GPS calcula cada componente para cada combinação de quatro satélites e então utiliza os sinais provenientes dos quatro satélites que fornecem uma PDOP menor. Quanto maiores os valores numéricos dos fatores (PDOP, HDOP, VDOP, TDOP, GDOP), pior a precisão. Os valores para DOP que fornecem uma boa precisão variam entre 1 e 3. Quando o receptor calcula uma DOP maior que 6, ele nem tenta calcular a posição do usuário [LOG 92].

Reflexão de Sinais

Em condições ideais, os sinais provenientes dos satélites seguem um único caminho, diretamente para o receptor GPS. Se o sinal é refletido por alguma barreira, pode-se ter mais de um caminho até o receptor, provocando um efeito de retardo do sinal. Os sinais chegam: dos satélites e de reflexões em objetos como uma montanha. Atualmente, somente receptores especiais, pesados e de custo alto podem detectar e eliminar os sinais refletidos. O receptor comum não consegue diferenciar os sinais diretos dos sinais refletidos. Se o receptor utilizar os sinais refletidos para determinar a posição, esta será errada.

2.4.6 GPS Diferencial (DGPS)

A precisão fornecida por um sistema GPS não é satisfatória para alguns usuários civis, como pilotos de aviões e navios. A solução para uma melhor precisão é fornecida pelo sistema GPS diferencial (DGPS - Differential GPS) que garante uma precisão entre 2 cm e 15m.

O uso de DGPS melhora a precisão de receptores GPS operando em modo convencional corrigindo erros comuns a dois ou mais receptores utilizando os mesmos satélites. Na forma mais básica de DGPS, um dos receptores utilizados é chamado de estação monitora (ou estação de referência), cuja posição é determinada com grande precisão, seja por métodos convencionais de posicionamento ou por meio de um receptor GPS mais preciso. Os demais receptores são os usuários do sistema (figura 2.15). A estação de referência calcula pseudo-distâncias como um receptor GPS

comum, mas como sua posição precisa é conhecida, pode-se determinar os erros obtidos na medição da posição pelo GPS. Para aplicações de tempo real, a estação de referência transmite os valores desses erros para todos os usuários do sistema na área de cobertura. Para aplicações que não necessitam de dados corrigidos em tempo real, os erros podem ser armazenados na estação de referência e pós-processados em conjunto com as posições obtidas dos usuários.

Figura 2.15: Sistema DGPS básico [KAP 96].

A precisão obtida por sistemas DGPS decorre do fato de que usuários em uma determinada área estão sujeitos aos mesmos erros de medição. Quanto maior a distância entre a estação de referência e os usuários, menos correlacionados estão os erros. Dessa forma, a utilização de DGPS é restrita a uma determinada área de abrangência. Caso seja necessária a utilização de DGPS em maiores áreas, faz-se necessária a utilização de mais de uma estação monitora [KAP 96].

2.5 Georeferenciamento de Imagens Aéreas

O principal objetivo de se obter imagens aéreas no contexto deste trabalho é a associação de dados da imagem a coordenadas geográficas. O objetivo desse processo é, geralmente, a geração de mapas temáticos ou topográficos de uma determinada região. Ao processo de associação de coordenadas geográficas a pontos da imagem damos o nome de *georeferenciamento*.

O problema do georeferenciamento em imagens aéreas se resume à obtenção de parâmetros de orientação externa da câmera fotográfica no momento da exposição. No total, são seis os parâmetros que se deseja obter: três de posição (X , Y e Z) e três de atitude (ângulos de rolagem, guinada e arfagem). Uma vez obtidos esses dados, a associação de coordenadas geográficas a pontos da imagem torna-se um problema trivial.

O georeferenciamento pode ser feito de várias formas e com diferentes níveis de precisão. Basicamente, existem duas abordagens para o processo de georeferenciamento: indireta e direta [CRA 00].

2.5.1 Georeferenciamento Indireto

A abordagem indireta de georeferenciamento (georeferenciamento indireto) é a mais comumente utilizada em sistemas de fotografia aérea. Essa abordagem é baseada em pontos de controle terrestre cujas coordenadas geográficas são conhecidas, e na medição das coordenadas correspondentes a esses pontos na imagem. Com essas medidas e o conhecimento da geometria interna da câmera, a orientação externa pode ser estimada por um procedimento de ajuste [CRA 01].

Deve-se considerar que para aplicação de georeferenciamento baseado em pontos de controle terrestre, deve-se ter em mãos imagens nas quais seja possível identificar pontos específicos. Se a área fotografada é desprovida de pontos com características específicas que possam ser notadas, como uma floresta ou uma região agrícola, pontos de controle devem ser colocados propositalmente no local antes do voo.

Para sistemas atuais de fotografia aérea de pequeno formato ou de fotografia digital, o problema da associação de pontos de controle terrestres a pontos da imagem é ainda maior. Geralmente, nesse tipo de sistemas, a área de cobertura da imagem é pequena, gerando uma maior número de imagens, o que implica na necessidade de um maior número de pontos de controle. Esse número pode ser reduzido com o agrupamento de imagens lateralmente sobrepostas em blocos, utilizando métodos numéricos. Assim, os pontos de controle podem ser determinados para cada bloco, e não para cada imagem [WAR 96].

2.5.2 Georeferenciamento Direto

Na abordagem direta de georeferenciamento (georeferenciamento direto), os seis parâmetros de orientação externa da câmera são medidos diretamente por sensores acoplados a ela. Para isso, normalmente é utilizado um receptor GPS acoplado a uma unidade de medição inercial (UMI). O receptor GPS é responsável por fornecer os parâmetros de posição, enquanto que parâmetros de atitude e também de posição são fornecidos pela UMI.

Em sistemas que utilizam georeferenciamento direto, as funcionalidades do receptor GPS da unidade de medição inercial são complementares. Uma UMI é baseada na medição da velocidade angular de rotação em três eixos ortogonais, e da aceleração ao longo desses mesmos eixos. A aceleração pode ser integrada uma vez para se obter a velocidade e duas vezes para se obter a posição. A velocidade angular pode ser integrada uma vez para se obter a atitude. Todas essas medições são feitas a partir de um valor inicial. As integrações realizadas fazem com que os erros se acumulem ao longo do tempo. Para eliminar esses erros, uma alternativa é atualizar os valores iniciais com base em um outro dispositivo, como, por exemplo, um receptor GPS. Receptores GPS não fornecem dados a uma taxa muito alta, logo as medições de posição em curtos intervalos de tempo são feitas pela UMI. O receptor GPS é utilizado geralmente apenas para reajustar os valores iniciais da UMI [BUR 98] [CRA 00] [SKA 93].

O desenvolvimento de sistemas de georeferenciamento direto tem sido impulsionado em parte pelo desenvolvimento de *scanners* lineares para obtenção de dados em plataformas aéreas. Para esses dispositivos, a utilização de pontos de controle terrestres não se aplica, e a medição direta dos parâmetros de orientação externa é praticamente inevitável [CRA 99].

A precisão de sistemas de georeferenciamento direto depende diretamente da precisão do receptor GPS e da UMI utilizada. A utilização de GPS diferencial, por exemplo, pode melhorar significativamente os resultados desses sistemas.

Entre as vantagens do uso de georeferenciamento direto em relação a abordagens tradicionais pode-se citar:

- Uso em áreas de difícil identificação de pontos de controle;
- Não há esforço de processamento (automático ou não) de pontos de controle nas imagens;
- Não há a necessidade de agrupamento de imagens em blocos. O uso de blocos de imagens pode ser indesejável em aplicações que cubram pequenas áreas ou em que se deseje uma trajetória de voo linear (como inspeção de linhas de transmissão de energia, por exemplo).

A principal desvantagem encontrada nesses sistemas é o alto custo de receptores GPS e UMIs quando se deseja uma alta precisão nas medições.

2.5.3 Amostragem Aérea Pontual

Uma das técnicas utilizadas para aquisição de dados de imagens aéreas é a amostragem aérea pontual (AAP). Essa técnica não é baseada na cobertura fotográfica total da área pesquisada. Para cada imagem, um ou mais índices pontuais são calculados, com base em dados extraídos da imagem. Por exemplo, pode-se segmentar a imagem obtida de modo a amostrar o número de determinados objetos no local.

A resolução de amostragem pode ser variada com o número de imagens obtidas, e a proximidade entre elas. A técnica de amostragem aérea pontual pode ser interessante para missões com um grande número de imagens de grande escala, desde que obtidas com aeronaves de baixo custo de operação, como, por exemplo, ultraleves e pequenos veículos aéreos não tripulados.

Uma característica importante dessa técnica é que não é necessário saber a atitude da aeronave durante a aquisição da imagem. Como os dados de uma imagem são tratados como amostras pontuais, apenas os parâmetros de posição são necessários. Dessa forma, apenas um receptor GPS pode ser acoplado à câmera para obter os dados de georeferenciamento [WAR 96].

2.6 Considerações Finais

Neste capítulo, foi feito um estudo de conceitos básicos relacionados às ferramentas e equipamentos que devem ser utilizados na implementação do SciaGeo. O entendimento de princípios de fotografia em geral, fotografia aérea, posicionamento global e georeferenciamento é importante para a correta tomada de decisões durante a fase de desenvolvimento do SciaGeo. Foi possível, neste capítulo, analisar alguns aspectos que tornam este trabalho relevante, como a utilidade prática da fotografia aérea de pequeno formato e as vantagens no uso de aeronaves do tipo ultraleve como plataforma. Ainda foi possível notar a aplicabilidade da técnica de amostragem aérea pontual, que pode ser praticada com o auxílio do SciaGeo.

No próximo capítulo é apresentada uma análise de requisitos e uma especificação geral do SciaGeo, incluindo os requisitos funcionais e não funcionais do sistema, com diagramas gerais de *hardware* e *software*.

Capítulo 3

Análise de Requisitos e Especificação do SciaGeo

3.1 Introdução

Para o projeto SciaGeo, foi feita uma análise de requisitos para definir com clareza *software* e *hardware* a serem implementados. Neste capítulo são apresentados os requisitos definidos para a implementação do sistema, juntamente com diagramas de blocos e um diagrama de fluxo de dados geral do SciaGeo.

Inicialmente são descritos textualmente os requisitos do SciaGeo: na seção 3.2 são apresentados os requisitos funcionais e na seção 3.3 são apresentados os requisitos não funcionais. Na seção 3.4 são apresentados diagramas de blocos para o *hardware* embarcado e o *hardware* utilizado para extração das imagens em solo, juntamente com uma explicação dos diagramas. Finalmente, na seção 3.5 é mostrado um diagrama de fluxo de dados geral para o SciaGeo, com a respectiva explicação.

3.2 Requisitos Funcionais

A seguir são enumerados os requisitos funcionais do SciaGeo:

1. O SciaGeo deve ser um sistema capaz de capturar imagens aéreas e georeferenciá-las durante o voo;
2. O sistema deve possuir *hardware* que possa ser embarcado em aeronaves da categoria ultraleve;

3. O SciaGeo deve possuir uma interface com um operador que permita que ele dispare fotografias durante o voo;
4. Posição, altitude e velocidade obtidas do receptor GPS devem ser armazenadas e relacionadas a cada fotografia, no instante em que são disparadas pelo operador;
5. Quadros de vídeo devem ser associados a dados de posicionamento do receptor GPS a uma taxa constante durante a missão;
6. O eixo ótico das câmeras deve ser mantido na direção vertical pelo piloto da aeronave durante o sobrevoo da área monitorada;
7. Deve existir *software* para extração de quadros de vídeo e coordenadas associadas às imagens capturadas em voo;
8. O software de extração de quadros de vídeo deve gerar um arquivo de coordenadas em formato pré-definido e vários arquivos contendo as imagens correspondentes;
9. O software de extração de coordenadas das fotografias deve gerar um arquivo de coordenadas em formato pré-definido - as imagens devem ser obtidas manualmente da câmera fotográfica pelo usuário;
10. O sistema deve fornecer somente imagens e coordenadas em um padrão pré-definido. A interpretação e eventual conversão de dados para aplicação em um SIG deve ser feita pelo usuário.

3.3 Requisitos Não Funcionais

A seguir são enumerados os requisitos não funcionais do SciaGeo:

1. O sistema deve ser modular, flexível e de baixo custo;
2. O sistema deve possuir um receptor GPS básico (com taxa de atualização de 1Hz) como sensor principal;
3. O sistema deve possuir uma câmera fotográfica (convencional ou digital) como sensor de imageamento de alta resolução e baixa taxa de amostragem;
4. O sistema deve possuir uma câmera filmadora (analógica ou digital) como sensor de imageamento de baixa resolução e alta taxa de amostragem;

5. O sistema deve aceitar câmeras fotográficas e filmadoras de uso geral disponíveis para o consumidor comum, tendo em vista o seu baixo custo e alta disponibilidade para compra.

3.4 Diagramas de Blocos

Nesta seção são apresentados diagramas de blocos básicos do *hardware* embarcado na aeronave e em solo. A figura 3.1 mostra o diagrama de blocos geral do *hardware* embarcado do SciaGeo.

Figura 3.1: Diagrama de blocos do *hardware* embarcado na aeronave.

O elemento central da arquitetura do *hardware* embarcado é o módulo do processador principal. Ele é responsável por integrar todas as partes do sistema, coordenando a troca de informações entre elas. Em resumo, suas funções são:

- Receber e interpretar dados de posição enviados pelo receptor GPS;
- Receber e interpretar dados da bússola magnética, além de efetuar rotinas de calibração sobre a mesma;
- Receber comandos do usuário enviados pelo *palmtop*;

- Processar dados de posição do GPS e codificá-los para gravação na trilha de áudio da filmadora;
- Enviar comandos de acionamento das câmeras;
- Enviar dados de posição para registro das coordenadas das fotos no *palmtop*.

O *palmtop* funciona como um elemento de interação com o usuário, rodando uma interface gráfica capaz de receber comandos de acionamento das câmeras – iniciar gravação, parar gravação e disparar foto, por exemplo. Os comandos são codificados em um protocolo de comunicação serial para envio ao processador principal, usando um canal RS232.

A segunda função do *palmtop* no sistema é armazenar as coordenadas das fotografias. Optou-se por armazenar as coordenadas no *palmtop* e não no processador principal pelo fato de o primeiro possuir boa quantidade de memória disponível, além de evitar a sobrecarga do processador principal. As coordenadas são codificadas em um protocolo serial pelo processador principal e enviadas para o *palmtop* pelo canal RS232.

Ao processador principal estão acoplados sensores de posicionamento e de imageamento. Os sensores de posicionamento são um receptor GPS e uma bússola magnética. Seus dados são utilizados para georreferenciar os dados obtidos pelos sensores de imageamento. A interface com o receptor GPS é feita por um canal RS232 pelo qual são transmitidas as posições geográficas em formato ASCII (protocolo NMEA). A interface com a bússola magnética é serial síncrona com sinais de controle adicionais.

Os sensores de imageamento acoplados ao processador principal são uma câmera fotográfica (convencional ou digital) e uma câmera filmadora. Para o controle das câmeras é utilizado um módulo com interface serial (controlador de câmera). A função desse módulo é receber dados de acionamento das câmeras enviados pelo processador principal e acionar as câmeras utilizando o padrão específico de cada uma delas. Para o acionamento da câmera filmadora, é utilizado um protocolo desenvolvido pela Sony, o LANC, disponível na maioria das filmadoras dessa marca. Para acionar a câmera fotográfica é utilizado um interface de disparo com relé, que pode ser utilizada na maioria das câmeras SLR profissionais e semi-profissionais.

As imagens da câmera de vídeo têm os dados de posicionamento codificados e armazenados na trilha de áudio do filme. Assim, a sincronização das coordenadas e dos quadros de vídeo é feita naturalmente. Os dados de posicionamento são empacotados e enviados por um canal RS232 para um modem de 2400 bps, onde são modulados para um sinal analógico que é gravado na trilha de áudio para posterior extração.

O sistema embarcado é alimentado por uma bateria chumbo-ácida com capacidade de 7AH, acoplada a uma fonte chaveada com tensão de saída de 5V.

A figura 3.2 mostra o diagrama de blocos geral do *hardware* de extração de dados utilizado em solo após o voo.

Figura 3.2: Diagrama de blocos do *hardware* de extração de dados em solo.

Os dados gravados no *hardware* embarcado durante o voo devem ser extraídos, uma vez finalizado o voo, para posterior processamento e integração em um SIG. Os módulos que contêm os dados são o *palmtop*, a câmera fotográfica e a filmadora. O componente onde os dados são reunidos é um computador convencional modelo IBM-PC.

As fotografias devem ser digitalizadas com o uso de um *scanner* caso a câmera fotográfica utilizada seja convencional. Se for usada uma câmera digital, esse elemento é eliminado do sistema, e os dados são enviados para o computador diretamente, utilizando geralmente uma interface USB.

Para as imagens da câmera fotográfica, as coordenadas são extraídas do *palmtop* por meio do canal RS232 do mesmo, utilizando *software* específico para isso no computador.

Os quadros de vídeo da filmadora são transferidos diretamente para o computador por uma interface de captura de vídeo. As coordenadas gravadas na trilha de áudio são demoduladas para um sinal serial RS232 por um modem de 2400 bps, idêntico ao utilizado no *hardware* embarcado.

Dessa forma, é necessário que o computador utilizado possua as seguintes interfaces:

- Serial RS232, para comunicação com o *palmtop* e captura das coordenadas armazenadas na filmadora;
- USB ou paralela, para recuperação das fotografias;
- Captura de vídeo (analógico ou digital) compatível com a filmadora utilizada, para recuperação dos quadros de vídeo.

3.5 Diagrama de Fluxo de Dados — DFD

A figura 3.3 mostra o diagrama de fluxo de dados geral do *software* do SciaGeo. A metade superior do diagrama mostra o fluxo de dados do *software* embarcado. Esse fluxo pode ser dividido em duas frentes: a dos dados de posicionamento e a dos comandos do usuário.

As fontes dos dados de posicionamento são o receptor GPS e a bússola. Seus dados são processados pelo processador principal e armazenados nos dois destinos dos dados de posicionamento: a base de dados contida no *palmtop* e a trilha de áudio da filmadora.

No fluxo de comandos do usuário, a única fonte de dados é o próprio usuário. Seus dados são processados no *palmtop*, no processador principal e no controlador de câmera para serem enviados às câmeras. A integração entre o fluxo de comandos do usuário e o fluxo de dados de posicionamento é feita, no caso das fotografias, quando os comandos acionam o registro das coordenadas no momento do disparo.

A metade inferior do diagrama mostra o fluxo de dados do *software* de extração de dados executado em solo. Esse fluxo também pode ser dividido em duas partes: dados de vídeo e dados de fotografias. No fluxo de dados de vídeo, a filmadora é a fonte das imagens e a sua trilha de áudio é a fonte dos dados de posicionamento. No fluxo de dados de fotografias, as fontes são a câmera fotográfica, que contém as imagens, e o *palmtop*, que contém as respectivas coordenadas. O processamento em ambos os fluxos de dados é feito no *software* de extração executado no computador.

O destino final dos dados do sistema é a base de imagens gerada pelo *software* do computador, contendo as imagens de baixa resolução (filmadora) e de alta resolução (câmera fotográfica), associadas às respectivas coordenadas.

Figura 3.3: Diagrama de fluxo de dados do sistema como um todo.

3.6 Considerações Finais

Nesta seção foi apresentada uma análise de requisitos e um projeto preliminar de *hardware* e *software* do SciaGeo. Esses dados são utilizados nos capítulos 4 e 5 para a elaboração de um projeto detalhado e integração dos componentes de *hardware* e *software*, influenciando também nas decisões pontuais tomadas durante a implementação do sistema.

No próximo capítulo é apresentado o detalhamento do projeto de *hardware* e aspectos de sua implementação.

Capítulo 4

Projeto e Implementação — Hardware

4.1 Introdução

Uma particularidade deste trabalho de mestrado foi a necessidade de desenvolver um conjunto de *hardware* específico para o sistema. A integração entre *software* e *hardware* foi um requisito básico para o sucesso do trabalho. Alguns dispositivos *hardware* utilizados já estão disponíveis no mercado, como:

- Processador principal *Rabbit*;
- Câmera fotográfica;
- Filmadora;
- Receptor GPS;
- *Palmtop*.

O trabalho exercido sobre esses dispositivos esteve relacionado à sua interconexão e integração no contexto do sistema desenvolvido.

Porém, certas funcionalidades do sistema são muito específicas, e criaram a necessidade de desenvolvimento de circuitos eletrônicos específicos para as tarefas envolvidas. Algumas dessas funcionalidades já estavam presentes no Projeto ARARA, que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Computação de Alto Desempenho do ICMC-USP. Dessa forma, alguns módulos de *hardware* foram desenvolvidos e utilizados em conjunto com o Projeto ARARA — são eles:

- Módulo controlador de câmera;
- Conversor de níveis lógicos RS232/TTL;
- Fonte de alimentação chaveada de 5V.

O único módulo de *hardware* desenvolvido exclusivamente para o SciaGeo foi o modem de 2400bps utilizado para modulação e demodulação de sinais digitais no canal de áudio analógico da filmadora.

Na seção 4.2 é apresentada uma descrição das interfaces de *hardware* utilizadas na interconexão dos equipamentos, juntamente com justificativas para o seu uso. A seção 4.3 descreve os fatores que pautaram a seleção de dispositivos e componentes para a implementação do SciaGeo. Na seção 4.4 são abordados os aspectos relevantes na seleção dos módulos de *hardware* adquiridos para integração ao sistema. Na seção 4.5 são descritos com detalhes os módulos desenvolvidos no contexto deste trabalho e os fatores que direcionaram as decisões no seu projeto.

4.2 Interfaces

A comunicação entre o processador principal e os demais módulos do SciaGeo foram feitas utilizando-se interfaces padrão RS232, com níveis lógicos diferenciados em diversas partes do sistema, sendo eles padrão RS232 ou TTL. A utilização desse tipo de interface foi selecionada pelos seguintes fatores:

- Alta versatilidade;
- Diferentes velocidades de comunicação;
- Utilizada por muitos equipamentos no mercado;
- Disponível em vários modelos de processadores;
- Satisfaz todos os requisitos de comunicação do sistema.

As interfaces previstas para comunicação com as câmeras foram duas:

- Linha única para disparo de fotografia por relé;
- Canal serial RS232;
- Canal de comunicação com o protocolo LANC.

O linha de disparo da câmera fotográfica por chave ou relé é o meio até hoje mais utilizado pela maioria das câmeras fotográficas profissionais ou semi-profissionais, sejam elas digitais ou convencionais. Uma desvantagem dessa interface é a ausência de confirmação de disparo, podendo levar à perda de sincronização entre as coordenadas registradas e as imagens, no caso de um disparo não ter sido efetivamente realizado após o acionamento da chave. Essa interface foi desenvolvida para que o sistema pudesse aceitar uma maior gama de modelos de câmeras fotográficas.

Um canal serial RS232 é utilizado por algumas câmeras no mercado, por isso ele também está previsto no projeto. Sua utilização elimina o uso do módulo controlador de câmera, uma vez que a comunicação pode ser feita diretamente com o processador principal.

O protocolo LANC foi implementado por ser um dos poucos padrões de comunicação com câmeras filmadoras, utilizado por aparelhos da marca Sony, marca bastante difundida no mercado de filmadoras. A implementação dessa interface permite a operação da filmadora à distância, facilitando em alguns casos a operação do sistema, permitindo um maior controle do uso da fita de vídeo durante o voo. Isso possibilita a execução de missões mais longas, filmando apenas algumas regiões de interesse.

4.3 Seleção de Dispositivos para Implementação

Uma importante consideração a ser feita quanto à seleção dos dispositivos é que foi levada em consideração a disponibilidade desses equipamentos para uso no contexto desse trabalho. Apesar desse fato, os equipamentos foram selecionados satisfazendo os critérios julgados necessários para atender os requisitos do SciaGeo da melhor forma possível. Esses critérios são apresentados nas subseções seguintes.

4.3.1 Processador Principal

O processador principal do sistema selecionado foi o modelo Rabbit 2000, fabricado pela Rabbit Semiconductor. O Rabbit 2000 é um processador de 8 bits que é comercializado pelo fabricante isoladamente ou em módulos contendo memória *flash* e SRAM, além de circuitos básicos para operação do processador, como de geração de *clock*, por exemplo.

No SciaGeo foi utilizado o módulo RCM2300 comercializado pela Rabbit Semiconductor. Nesse módulo, o processador opera a uma velocidade de 22.1MHz. A memória disponível no módulo é de 256 e 128 kilobytes dos tipos *flash* e SRAM, respectivamente. O módulo possui 29 pinos de I/O, e disponibiliza 4 portas seriais assíncronas com níveis TTL. A tensão de alimentação do módulo é

de 5V, e o consumo nominal é de 108mA.

A escolha do RCM2300 para utilização como processador principal no SciaGeo se deu pelos seguintes fatores:

- Baixo custo;
- Boa quantidade de portas seriais;
- Boas ferramentas de desenvolvimento;
- Fácil integração do circuito no sistema;
- Desempenho atendendo os requisitos do SciaGeo.

4.3.2 Câmera Fotográfica

O SciaGeo foi projetado de forma a aceitar diferentes tipos de câmeras fotográficas. A categoria de câmeras fotográficas na qual o projeto foi focado foi a de câmeras profissionais e semi-profissionais de uso geral, particularmente as SLR (*Single Lens Reflex*), tanto convencionais quanto digitais. A opção por essa categoria de câmeras se deu pelos seguintes fatores:

- Baixo custo em relação a câmeras específicas para fotografia aérea;
- Melhor desempenho e qualidade de imagem em relação a câmeras de uso geral de outras categorias;
- Tecnologia avançando rapidamente, principalmente em câmeras digitais SLR;
- Boa relação entre o custo da câmera e a qualidade das imagens obtidas.

O modelo utilizado durante os testes foi um modelo Maxxum 5, fabricado pela Minolta. Essa é uma câmera SLR convencional profissional e foi utilizada devido a disponibilidade imediata para uso no projeto. O uso de uma câmera SLR digital seria desejável, mas não havia disponibilidade durante o desenvolvimento, em particular de modelos com resolução comparável à do modelo Maxxum 5.

4.3.3 Filmadora

O SciaGeo foi desenvolvido com o objetivo de ser utilizado com câmeras filmadoras convencionais compactas disponíveis no mercado (*camcorders*). De forma mais abrangente, qualquer equipamento, analógico ou digital, que capture dados de vídeo e áudio pode ser acoplado ao SciaGeo. As

filmadoras compactas apresentam uma facilidade de integração devido ao seu tamanho, e também apresentam uma boa qualidade de imagem no caso das filmadoras digitais (MiniDV, por exemplo). Adicionalmente, as filmadoras fabricadas pela Sony podem ser operadas de forma mais fácil com o uso do barramento LANC, conforme citado na seção 4.3.

A filmadora utilizada nos testes foi um modelo Sony PC110 digital MiniDV. Esse equipamento foi utilizado por estar disponível para utilização no projeto junto à Embrapa.

4.3.4 Receptor GPS

O desenvolvimento do SciaGeo foi voltado para o uso de receptores GPS de baixo custo, particularmente os que possuem taxa de atualização de 1Hz. A utilização de receptores de maior taxa de atualização é possível, e melhora a precisão de georeferenciamento, porém esses receptores normalmente apresentam um custo muito alto.

O receptor GPS é mais um item que pode ser trocado do sistema sem alterações no *software* e com poucas ou nenhuma alteração no *hardware*. A comunicação com o SciaGeo é feita por meio de um protocolo bem conhecido (sentenças NMEA) e utilizado por virtualmente todos os receptores GPS do mercado. Assim, a troca desse dispositivo depende apenas de fiação e conectorização do novo receptor.

O receptor GPS utilizado nos testes foi um modelo Garmin GPS35, com precisão aproximada de 15m e taxa de atualização de 1Hz. Esse modelo foi utilizado nos testes por estar disponível junto ao Projeto ARARA.

4.3.5 Palmtop

O *palmtop* selecionado para uso no SciaGeo foi o Palm Vx, com memória de 8Mb, fabricado pela Palm Inc.. O software pode ser executado também em outros modelos que operem com o sistema operacional PalmOS, que satisfaçam os requisitos de armazenamento de memória e possuam um canal de comunicação serial para comunicação com o SciaGeo. A escolha de modelos baseados no sistema operacional PalmOS se deu pelos seguintes fatores:

- Boa disponibilidade no mercado, notadamente no mercado nacional;
- Baixo custo se comparado a *palmtops* baseados em outros sistemas operacionais;
- Atendem às necessidades do SciaGeo com um custo baixo.

4.4 Descrição Detalhada do Hardware Desenvolvido

Nesta seção é apresentada uma descrição funcional dos módulos de *hardware* desenvolvidos no âmbito deste trabalho:

- Módulo controlador de câmera;
- Conversor de níveis lógicos RS232/TTL;
- Fonte de alimentação chaveada de 5V;
- Modem de 2400bps.

Além da descrição funcional, são apresentados os fatores que pautaram as decisões de projeto no desenvolvimento dos módulos. Como complemento à descrição contida nesta seção, no Apêndice A são apresentados os diagramas esquemáticos dos módulos citados.

4.4.1 Módulo Controlador de Câmera

O módulo controlador de câmera é responsável por processar os comandos de disparo enviados pelo processador principal, acionando as câmeras no momento adequado. No caso da câmera fotográfica, o acionamento é feito por meio de um relé. Para a filmadora, os comandos são enviados pelo barramento LANC.

O módulo consiste de um microcontrolador fabricado pela Microchip Inc., integrante da família PICMicro, modelo PIC16F628. Esse é um microcontrolador de 8 bits, com tecnologia RISC, e opera com uma frequência de clock de até 20MHz. Os controladores da família PICMicro utilizam uma organização de memória do tipo Harvard, com instruções e dados armazenados em espaços de endereçamento de memória diferentes. O modelo PIC16F628 possui, integrados no *chip*, memória de programa *flash* com capacidade para 2048 instruções, memória de dados SRAM com capacidade de 224 bytes e memória de dados EEPROM com capacidade para 128 bytes.

Além dos componentes básicos de um microcontrolador, o PIC16F628 possui, entre outros, os seguintes recursos:

- 3 *timers* (2 de 8 bits e 1 de 16 bits);
- 1 porta serial universal (síncrona/assíncrona);
- *Watchdog timer*;
- 2 comparadores analógicos;

- Capacidade para programação *in-circuit*;
- Um pino de saída com coletor aberto.

A família PICMicro foi selecionada para utilização no módulo controlador de câmera pelos seguintes motivos:

- Possui como periférico uma porta serial implementada por hardware;
- Alta velocidade;
- Alta disponibilidade;
- Boas ferramentas de desenvolvimento de *software* e de gravação do *chip*;
- Fácil programação em linguagem *assembly* com instruções RISC;
- Possui um pino de saída com coletor aberto para uso no barramento LANC.

A porta serial do microcontrolador é conectada ao processador principal e o relé de disparo da câmera contido na placa de circuito impresso é conectado ao soquete de disparo da câmera. O pino de coletor aberto do microcontrolador é conectado ao barramento LANC da câmera fotográfica. A placa ainda possui saídas adicionais para acionar a fonte de alimentação das câmeras.

4.4.2 Conversor de Níveis Lógicos RS232/TTL

O conversor de níveis lógicos é utilizado para condicionar os sinais seriais utilizados pelos diferentes subsistemas do SciaGeo. Equipamentos como o receptor GPS e a câmera fotográfica utilizam níveis lógicos no padrão RS232, enquanto que os processadores utilizados trabalham com sinais seriais com níveis TTL.

O conversor possui dois canais e é inserido na linha de comunicação serial entre os componentes em questão. A conversão dos níveis lógicos é feita por um circuito integrado MAX232, fabricado pela Maxim-IC, inserido na placa de circuito impresso.

4.4.3 Fonte de Alimentação

O circuito é alimentado externamente por uma bateria chumbo-ácida selada de 12V com capacidade nominal de 7Ah. A tensão gerada por essa bateria é regulada por uma fonte chaveada, com tensão de saída de 5V, que é utilizada para alimentar todo o *hardware* do SciaGeo, com exceção do receptor GPS, que possui uma entrada de alimentação de 12V.

4.4.4 Modem de 2400bps

Como mencionado na seção 4.2, os dados de georeferenciamento dos quadros de vídeo são gravados no canal de áudio da fita de vídeo. As coordenadas são representadas em formato digital, e precisam ser moduladas em um sinal analógico que possa ser gravado na trilha de áudio.

Para modular e demodular os dados de georeferenciamento, foi desenvolvido um modem simples de 2400bps. Essa taxa se mostrou suficiente para armazenar os dados de georeferenciamento com uma frequência de 2Hz na trilha de áudio. O método utilizado é o de frequência modulada (FM). O circuito integrado que realiza a modulação e demodulação do sinal é o modelo MX614 fabricado pela MX-COM.

A placa do modem ainda possui ajustes de amplitude da portadora. É necessário fazer esse ajuste para cada modelo diferente de filmadora utilizado, utilizando um osciloscópio, para que os picos e vales da forma de onda da portadora não sejam distorcidos pela filmadora.

4.5 Testes

Os testes realizados para validação do *hardware* podem ser classificados em duas categorias:

- Testes modulares
- Testes de integração

Os testes modulares foram realizados com o objetivo de validar os módulos individualmente, com o uso de *software* auxiliar (tanto externo quanto interno ao módulo) desenvolvido especificamente para isso. Nessa etapa foram utilizados também equipamentos eletrônicos de medição convencionais, como multímetro e osciloscópio. Nessa etapa também foram realizados eventuais ajustes e/ou calibrações de *hardware* nos módulos testados. Os testes consistiram em estimular as entradas dos subsistemas, avaliando por meio de medições a saída gerada.

Após os módulos terem sido testados individualmente, foi iniciada uma etapa de testes de integração, onde todos os módulos foram interconectados e seu funcionamento conjunto foi testado, juntamente com a funcionalidade do *software* final.

4.6 Montagem

As últimas etapas no desenvolvimento do *hardware* foram a montagem dos módulos em um encapsulamento comum e a interconexão entre os módulos, incluindo fiação e conectorização. A figura 4.1 mostra a distribuição física dos componentes do sistema.

Figura 4.1: Distribuição física dos componentes do sistema.

Um único encapsulamento mecânico foi utilizado para agrupar as placas eletrônicas desenvolvidas. Esse encapsulamento foi denominado “módulo eletrônico”. A figura 4.2 mostra o detalhe do resultado da integração e montagem mecânica do módulo eletrônico do SciaGeo.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a sequência de desenvolvimento do *hardware* do SciaGeo, desde o projeto até a montagem final. Foram abordados ainda as interfaces de *hardware* utilizadas, a seleção de equipamento, o desenvolvimento de módulos específicos e a metodologia de testes utilizada para validação dos subsistemas e do sistema integrado.

No quinto capítulo são descritos o projeto e a implementação dos módulos de *software* do SciaGeo. São apresentadas descrições textuais e diagramas de fluxo de dados dos módulos, bem como aspectos das interfaces de comunicação e metodologia de testes.

Figura 4.2: Montagem mecânica e integração dos módulos de *hardware* em um encapsulamento comum.

Capítulo 5

Projeto e Implementação — Software

5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um panorama completo do desenvolvimento de *software* do SciaGeo. Na seção 5.2 são abordadas as interfaces de *software* utilizadas. As seções 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 descrevem cada módulo de *software* desenvolvido: do *palmtop*, do processador principal, do controlador de câmera e de extração de coordenadas e imagens, respectivamente. É dada uma descrição textual de cada módulo, juntamente com o respectivo diagrama de fluxo de dados. Na seção 5.7 é apresentada a metodologia de testes utilizada.

5.2 Interfaces

Uma característica do SciaGeo é o alto nível de modularidade do sistema. Isso implica em uma alta necessidade de desenvolvimento de protocolos e *software* de comunicação entre os módulos presentes no sistema. Os protocolos foram definidos tomando por base conceitos importantes de sistemas distribuídos, como *character stuffing* e verificação de erros por CRC. A utilização desses métodos possibilitou o desenvolvimento de protocolos robustos e pouco sujeitos a perda de sincronização ou transmissão de dados incorretos.

Outro fato a ser notado quanto às interfaces é que, devido à necessidade de armazenamento de dados na trilha de áudio da filmadora, surgiu a preocupação de que não fosse especificado um protocolo que utilizasse pacotes muito grandes para transmissão de dados do GPS. Pacotes muito grandes ou com dados pouco relevantes eventualmente sobrecarregariam o canal de comunicação e forçariam a utilização de uma taxa mais baixa de transmissão das coordenadas.

A especificação dos protocolos de comunicação desenvolvidos para o SciaGeo é apresentada

no Apêndice B.

5.3 Software do Palmtop

O principal objetivo do *palmtop* no SciaGeo é fazer a interface entre o operador e o sistema. A principal função do *software* é a de criar uma interface visual consistente, exibindo dados da missão para o operador, e transformar os comandos gerados pelo operador em dados que possam ser enviados e tratados pelo processador principal.

Com a funcionalidade atual desenvolvida no SciaGeo, os comandos de entrada de dados pelo operador correspondem apenas ao acionamento da câmera fotográfica e da filmadora. Os dados exibidos para o operador incluem a posição geográfica atual e as coordenadas das fotografias disparadas. A figura 5.1 mostra um diagrama de fluxo de dados do *software* embarcado no módulo do processador principal.

Uma outra função desempenhada pelo *software* do *palmtop* é o armazenamento em memória das coordenadas das fotografias e sua posterior recuperação e envio para um PC. Na figura 5.2 são apresentadas duas telas da interface desenvolvida no *palmtop*.

Figura 5.1: Diagrama de fluxo de dados do *software* executado no *palmtop*.

Figura 5.2: Telas capturadas do *palmtop* - tela de controle da câmera fotográfica (a) e tela de dados do GPS (b).

5.4 Software do Processador Principal

O *software* embarcado no processador principal exerce um papel de integração entre diferentes componentes presentes no sistema: receptor GPS, controlador de câmera, *palmtop* e filmadora (trilha de áudio).

Os dados providos do receptor GPS são filtrados e formatados de modo a gerar um conjunto de dados conciso para armazenamento na trilha de áudio da filmadora e envio para o *palmtop*. Os comandos de controle das câmeras recebidos do *palmtop* são processados para verificação de erros e enviados para o controlador de câmera. O mesmo ocorre no caminho inverso, com os comandos de *status* vindos do controlador de câmera.

O processador principal do SciaGeo encontra-se de certa forma subutilizado em relação a capacidade de processamento (o que não ocorre quanto a entradas e saídas). Isso permite a expansão futura do sistema, incluindo funcionalidades como, por exemplo, gerenciamento de missão e disparo

automático de fotografias.

Foi desenvolvido *software* para processar os pacotes recebidos pelo *palmtop* e pelo controlador de câmera, com o desenvolvimento de rotinas de *character stuffing* e o uso rotinas de verificação de erros por *CRC*. Foi necessário também desenvolver rotinas de interpretação das sentenças NMEA enviadas pelo receptor GPS.

A figura 5.3 mostra um diagrama de fluxo de dados do *software* embarcado no módulo do processador principal.

Figura 5.3: Diagrama de fluxo de dados do *software* do processador principal.

5.5 Software do Controlador de Câmera

O *software* do controlador de câmera tem a função de interpretar os comandos enviados pelo processador principal e usá-los para acionar as câmeras. Comandos de disparo da câmera fotográfica devem gerar um disparo no relé presente na placa, e comandos para a filmadora devem ser traduzidos para envio pelo protocolo LANC. Além disso, devem ser gerados comandos de status (como confirmações, por exemplo) a partir dos dados recebidos das câmeras, e estes devem ser enviados para o processador principal.

Foi desenvolvido *software* para processar os pacotes recebidos pela porta serial. Para isso, foi necessário desenvolver rotinas de *character stuffing* e utilizar rotinas de verificação de erros por CRC.

A figura 5.4 mostra um diagrama de fluxo de dados do *software* embarcado no módulo controlador de câmera.

Figura 5.4: Diagrama de fluxo de dados do *software* do controlador de câmera.

5.6 Software de Extração de Coordenadas e Quadros de Vídeo

A função do *software* de extração de coordenadas em imagens é gerar um conjunto de dados digital a partir dos dados contidos na filmadora. Ao final da missão, na trilha de áudio, ficam armazenados os dados de posicionamento, modulados em frequência. A gravação é feita de forma sincronizada com os quadros de vídeo. Durante a extração, o áudio é demodulado pelo modem de 2400bps apresentado no capítulo 4, e os dados de saída são enviados para uma porta serial no computador. Quando um pacote contendo dados de posicionamento é completamente recebido através da porta serial, imediatamente a imagem corrente presente em uma janela de captura de vídeo é gravada em arquivo.

Os arquivos e as coordenadas gravadas são associados por índices sequenciais inseridos nos nomes de arquivo das imagens e no arquivo de coordenadas. As imagens são gravadas em arquivos de 320x240 pixels, no formato BMP de 24 bits. Um exemplo de arquivo de coordenadas

é apresentado no Apêndice C.

A figura 5.5 mostra um diagrama de fluxo de dados do *software* de extração de quadros de vídeo e de coordenadas da trilha de áudio.

Figura 5.5: Diagrama de fluxo de dados do *software* de extração e coordenadas e quadros de vídeo.

Na interface de extração de coordenadas e imagens existem controles disponíveis para selecionar o driver de captura de vídeo, iniciar e parar a extração. Deve-se inicialmente conectar a filmadora à entrada de vídeo do PC. Após isso, basta iniciar a reprodução na filmadora e, logo em seguida iniciar a extração de dados pressionando um botão na interface. A captura de uma tela da interface de extração de coordenadas e imagens é apresentada na figura 5.6.

5.7 Ambiente de Implementação

Nesta seção é descrito o ambiente de implementação utilizado para todos os componentes de *software* implementados neste trabalho. Essa descrição inclui linguagens, compiladores, *assemblers* e dispositivos de gravação dos processadores utilizados.

5.7.1 Processador Principal

O *software* do processador principal foi desenvolvido em linguagem C, com a utilização do compilador Dynamic C Premier 7.25P, comercializado pela Rabbit Semiconductor. As bibliotecas fornecidas pelo fabricante incluem rotinas de comunicação serial e verificação de erros por CRC, que foram bastante úteis no desenvolvimento.

Figura 5.6: Captura de tela da interface do extrator de coordenadas e imagens.

A gravação do processador Rabbit com o código implementado se deu com a utilização de um gravador construído conforme instruções fornecidas pela própria Rabbit Semiconductor.

O *software* Dynamic C Premier também possui a funcionalidade de depurador *in-circuit*, com a utilização do mesmo dispositivo de gravação citado no parágrafo anterior. Essa característica permite a análise de variáveis e posições de memória específicas durante a execução do programa no processador, bem como a colocação de pontos de parada (*breakpoints*) no código.

5.7.2 Controlador de Câmera

O *software* embarcado no módulo controlador de câmera foi desenvolvido em linguagem *assembly*, com a utilização do *assembler* gratuito MPLAB IDE fornecido pela Microchip Inc. Não foram utilizadas bibliotecas de terceiros, exceto pelas rotinas de verificação de erros por CRC, também fornecidas pela própria Microchip Inc.

O *hardware* utilizado para gravação do PIC16F628 foi o PicAll, juntamente com o *software* de gravação PicAllW. Não foram utilizados dispositivos de depuração *in-circuit*.

5.7.3 Palmtop

Foi utilizada a linguagem C com o compilador Metrowerks CodeWarrior versão 4.1.0.2 para implementação do *software* executado no *palmtop*. Foram utilizadas as bibliotecas fornecidas pelo fabricante para comunicação serial, componentes gráficos e armazenamento de registros em memória.

5.7.4 Software de Extração de Imagens e Coordenadas

Para o desenvolvimento do *software* de extração de coordenadas e imagens, foi utilizado o compilador Borland Delphi 6. Foram utilizados componentes de captura de vídeo de código aberto.

5.8 Testes Modulares e de Integração

Inicialmente, foram executados testes em bancada com cada módulo de *hardware* equipado com o *software* final. Após validada a operação de cada módulo e corrigidos os erros, foram realizados testes de integração onde puderam ser identificadas incompatibilidades entre os módulos, tanto de *hardware* quanto de *software*. Essas incompatibilidades foram corrigidas nessa etapa do projeto.

Após os testes preliminares de integração, foram realizadas curtas missões piloto em solo para validar todo o processo, desde a captura das imagens até a geração dos arquivos de coordenadas e de imagens digitalizadas.

5.9 Considerações Finais

Neste capítulo foi abordado o desenvolvimento de *software* realizado neste trabalho. Inicialmente, foram descritos os métodos utilizados no desenvolvimento das interfaces de comunicação. Vários os módulos de *software* foram implementados, e foram apresentadas neste capítulo descrições de cada um, juntamente com diagramas de fluxo de dados mostrando de forma clara o funcionamento de cada módulo. Foram apresentados também os ambientes de desenvolvimento utilizados e a metodologia de testes para validação dos subsistemas e do sistema integrado.

O próximo capítulo descreve como o sistema deve ser operado, desde a instalação até a recuperação dos dados resultantes.

Capítulo 6

Instalação e Operação do SciaGeo

6.1 Introdução

Neste capítulo são especificados os procedimentos a serem seguidos para a correta instalação e operação do SciaGeo. Os requisitos de instalação são apresentados na seção 6.2. Os procedimentos de operação podem ser divididos em três fases: pré-vôo, durante o vôo e pós-vôo. Essas fases são descritas nas seções 6.3, 6.4 e 6.5, respectivamente.

6.2 Instalação do Equipamento

A instalação do SciaGeo na aeronave é simples, mas devem ser satisfeitos alguns requisitos básicos. De forma resumida, são eles:

- Posicionamento do eixo das câmeras de forma perpendicular aos eixos de rolagem e arfagem da aeronave;
- Minimização da vibração nas câmeras;
- Fácil acesso do operador às câmeras durante o vôo.

A fixação da câmera fotográfica e da filmadora de forma perpendicular aos eixos de rolagem e arfagem deve ser feita visando a obtenção de imagens aéreas verticais durante um vôo nivelado da aeronave. Deve ser instruído ao piloto que seja executado um vôo nivelado quando a área de interesse estiver sendo sobrevoada. Não é necessário que esse procedimento de ajuste na instalação seja feito com instrumentos de precisão – um simples ajuste visual já é suficiente para obter um nível de verticalidade aceitável para as imagens.

Deve-se tomar o cuidado, durante a instalação, de utilizar algum material ou montagem que minimize a vibração nas câmeras. Toda aeronave produz algum tipo de vibração, notadamente a vibração proveniente do motor. Essa vibração pode deteriorar as imagens obtidas. Por mais rápido que sejam os obturadores das câmeras, esse detalhe da montagem deve ser observado com cuidado. Caso sejam notados problemas de vibração, deve-se utilizar montagens com borrachas cada vez mais macias para fixação das câmeras à aeronave, eventualmente aumentando a massa do sistema (no caso, as câmeras).

O SciaGeo permite, para missões longas, que o filme e/ou fita de vídeo das câmeras seja trocado durante o voo. Para isso, deve-se instalar as câmeras de forma que o operador tenha acesso manual a elas durante o voo.

6.3 Operação Pré-Voo

Após a instalação do SciaGeo na aeronave, os seguintes passos devem ser seguidos antes da decolagem:

1. Planejamento do voo de forma conjunta pelo operador e pelo piloto (detalhes na seção 6.4);
2. Carregar as baterias do sistema se necessário (câmeras e bloco eletrônico);
3. Carregar a filmadora com uma fita de vídeo apropriada e rebobinada;
4. Carregar a câmera fotográfica com o filme apropriado;
5. Ligar o bloco eletrônico;
6. Ligar o *palmtop*;
7. Ligar a câmera fotográfica e ajustar seus parâmetros;
8. Ligar a filmadora, ajustar seu parâmetros e iniciar a gravação.

Após a execução desses passos, o procedimento de decolagem da aeronave pode ser executado pelo piloto.

6.4 Operação Durante o Voo

Após a decolagem, o planejamento do voo citado na seção anterior deve ser seguido pelo piloto. Os seguintes cuidados devem ser tomados pelo piloto e pelo operador no planejamento do voo e durante o voo:

- Manter as asas da aeronave niveladas durante o sobrevôo das áreas de interesse
- Determinar um limite de velocidade com base no ajuste das câmeras e não excedê-lo durante o sobrevôo da área de interesse
- Determinar a altitude ideal em relação ao solo para obtenção das imagens

As asas devem ser mantidas niveladas para permitir a obtenção de imagens verticais. Um grande desvio do eixo das câmeras em relação à vertical pode comprometer a precisão do georeferenciamento, uma vez que a imagem obtida estaria deslocada no solo, não correspondendo à posição obtida pelo receptor GPS instalado na aeronave. Além disso, o processamento das imagens pode ser prejudicado por imagens oblíquas, uma vez que as medições efetuadas perderiam a uniformidade na área imageada.

Durante o voo, o operador deve disparar as fotografias nos locais de interesse e trocar o filme fotográfico quando necessário. A troca de filme ocorre de forma convencional, como se o operador estivesse operando a câmera manualmente.

A troca da fita de vídeo também deve ser feita pelo operador quando a mesma tiver sido esgotada. A troca também é feita de forma convencional, parando a gravação, trocando a fita e reiniciando a gravação, sem desligar o sistema.

O sistema pode ser operado pelo próprio piloto da aeronave, desde que a missão seja curta o suficiente para que não haja troca de filme ou fita de vídeo, restando apenas a tarefa de disparo das fotografias para ser executada. Para missões mais longas, é recomendável que haja um operador específico para o SciaGeo, uma vez que o piloto pode ficar sobrecarregado, comprometendo a segurança de voo.

6.5 Operação Pós-Voo

Após o pouso, deve se realizar os seguintes passos:

1. Desligar todos os equipamentos;
2. Desmontar o equipamentos da aeronave;
3. Recuperar as imagens da câmera fotográfica;
4. Recuperar as coordenadas das imagens de alta resolução;

5. Recuperar imagens de baixa resolução e as respectivas coordenadas utilizando o *software* de extração de quadros de vídeo.

A recuperação das imagens de alta resolução deve ser feita descarregando-se as imagens em um PC no caso de uma câmera digital e digitalizando as imagens reveladas ou os negativos no caso de uma câmera convencional. A associação das coordenadas às imagens fica a critério do usuário do sistema, que deve criar arquivos e associá-los logicamente às coordenadas da maneira que preferir.

Com a utilização de câmeras fotográficas convencionais, deve-se tomar o cuidado especial de organizar as imagens na ordem em que foram disparadas, para que as coordenadas extraídas do *palmtop* possam ser associadas às fotografias facilmente. Nesse caso, o sistema não possui recursos para fazer uma associação automática das coordenadas, e a falha do operador na organização das imagens pode inviabilizar a sua utilização.

No caso das imagens de baixa resolução, o próprio *software* de extração associa automaticamente as coordenadas às imagens, criando um arquivo de coordenadas imagens com ordenação pelo nome do respectivo arquivo. Resta ao usuário fazer a conversão para o formato aceito pelo SIG em que os dados serão inseridos.

6.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas instruções gerais sobre como o equipamento deve ser operado, incluindo os principais requisitos que devem ser satisfeitos pelos operadores do sistema. Foi descrita a instalação do sistema, que é muito simples e necessita apenas de um pequeno local de fixação na parte inferior da aeronave. As operações pré-vôo, durante o vôo e pós-vôo foram apresentadas em sequências de instruções simples, para facilitar o entendimento dos operadores e minimizar falhas. Estas sequências de instruções podem ser utilizadas como listas de checagem para as operações em campo.

No próximo capítulo pode ser vista a aplicação das instruções contidas nesse capítulo em uma missão real.

Capítulo 7

Resultados

7.1 Introdução

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos em uma operação real com o SciaGeo. Além dos testes realizados em bancada para validação do sistema, uma operação em campo foi realizada para validar o sistema nas condições reais de operação, tanto da integração física (ex.: instalação do equipamento na aeronave) quanto da interação entre o operador e o sistema.

Outro objetivo importante do teste em condições reais é gerar um conjunto de imagens da cultura monitorada que pode ser utilizado em trabalhos futuros de processamento de imagens. O desenvolvimento de tais trabalhos validaria o uso do sistema como um todo, incluindo os sensores utilizados, com resultados valiosos para o produtor rural.

Na seção 7.2 é dado um panorama geral da missão. Na seção 7.3 é citado como foi feita a instalação do equipamento. Na seção 7.4, é apresentada uma descrição de como o equipamento foi operado durante a missão. Na seção 7.5 são apresentados os dados de saída do sistema para a missão de teste. Finalmente, na seção 7.6, são apresentadas algumas considerações finais sobre a missão realizada.

7.2 A Missão na Fazenda Campo Bom

A missão de teste foi realizada na Fazenda Campo Bom, localizada nos estados de Mato Grosso do Sul e Goiás, com uma área cultivada de cerca de 20 mil hectares. O local específico em que foi operado o sistema situa-se próximo à cidade de Chapadão do Sul, no estado de Mato Grosso do Sul. A Fazenda Campo Bom possui como principais culturas a soja e o milho, e utiliza o método de plantio direto.

O plantio é realizado em talhões com cerca de 200 hectares cada um. Normalmente cada talhão é tratado de maneira uniforme quanto à aplicação de insumos. Com trabalhos de coleta de dados para agricultura de precisão, como no caso do SciaGeo, pretende-se tratar diferentes pontos de um mesmo talhão de forma diferenciada, aumentando a produtividade e minimizando o desperdício de insumos, como adubos e defensivos agrícolas.

7.3 Instalação do Equipamento

7.3.1 Câmeras, Lente e Filme Utilizados

As imagens de alta resolução foram obtidas usando uma câmera 35mm convencional, automática, SLR (*Single-Lens-Reflex*) da marca Minolta, modelo Maxxum 5. A lente utilizada possui distância focal de 50mm, com uma abertura de diafragma máxima de f1.8. O filme utilizado foi padrão ISO 400.

As imagens de baixa resolução foram obtidas com uma filmadora digital MiniDV da marca Sony, modelo PC110. As fitas MiniDV possuem capacidade para 90 minutos no modo LP (média qualidade) e 60 minutos no modo SP (qualidade padrão). A gravação foi feita no modo SP, e foram utilizadas duas fitas, totalizando duas horas de filmagem.

7.3.2 Fixação do Equipamento na Aeronave

A fixação do equipamento na aeronave foi realizada de forma bastante simples. Foi utilizada uma barra de aço fixada por tiras de nylon aos tubos de alumínio próximos ao trem de pouso. O detalhe da montagem pode ser observado na figura 7.1.

Mantas de borracha foram utilizadas sobre a barra para minimizar o efeito da vibração da aeronave sobre as câmeras, o que poderia comprometer a qualidade das imagens obtidas. Esse método de fixação mostrou-se eficiente, uma vez que as imagens apresentaram uma boa qualidade, sem efeitos de “borrão” por movimento da câmera.

O posicionamento do eixo das câmeras de forma perpendicular às asas da aeronave foi feito de forma visual. As câmeras foram facilmente posicionadas próximo ao operador do sistema para troca de filmes e fita de vídeo durante o voo.

Figura 7.1: Detalhe da montagem do SciaGeo na aeronave.

7.4 Área Monitorada

Quatro talhões da Fazenda Campo Bom foram selecionados para estudo, sendo dois plantados com milho e dois plantados com soja. Para cada tipo de cultura, uma área apresentava bom desenvolvimento e a outra apresentava algum nível de infestação por pragas, plantas daninhas ou falhas no plantio. Foram também obtidas algumas imagens isoladas de uma cultura de algodão próxima às áreas de soja e milho.

A figura 7.2 mostra um mapa da região monitorada, indicando os quatro talhões de soja e milho citados anteriormente, juntamente com as coordenadas geográficas dos vértices dos mesmos.

7.5 Operação do SciaGeo

A missão na Fazenda Campo Bom foi realizada dentro dos padrões esperados para a operação do SciaGeo. A missão foi realizada utilizando-se um aeronave do tipo ultraleve convencional, de asa alta e com capacidade para dois ocupantes. Foi alocado um funcionário da fazenda para a operação do sistema em voo, deixando para o piloto apenas a tarefa de controle e navegação da aeronave. A figura 7.3 mostra uma imagem do piloto e do operador na aeronave, com o *hardware* do SciaGeo

Figura 7.2: Mapa da região indicando os talhões monitorados.

instalado.

Foram selecionados previamente alguns pontos específicos da cultura que apresentavam problemas para que fossem obtidas as imagens de alta resolução. No momento em que tais áreas eram sobrevoadas (conforme identificado pelo operador), fotografias eram disparadas.

Nenhum evento fora do especificado foi notado durante a operação. Tudo ocorreu conforme planejado. O dia estava nublado, mas sem vento.

7.6 Dados Resultantes da Missão

Como resultado da missão, foi obtido um conjunto total de cerca de 300 imagens de alta resolução e 12000 imagens de baixa resolução. Com o auxílio de pesquisadores da Embrapa na área de agricultura de precisão e processamento de imagens, foi realizada a avaliação visual e segmentação por computador de algumas das imagens.

Foram utilizados durante a missão oito rolos de filmes fotográficos de 36 poses, padrão ASA 400, da marca Fuji. Cada rolo de filme resultou em 37 fotografias, em média. As imagens da câmera

Figura 7.3: Piloto e operador do SciaGeo a bordo da aeronave com o *hardware* do SciaGeo acoplado (no canto inferior esquerdo da imagem).

fotográfica foram reveladas e o processo de digitalização foi realizado a partir dos negativos das imagens, com o uso de um *scanner*. A resolução da digitalização foi ajustada para 2400 dpi. As imagens resultantes apresentavam escala de 1 a 2cm no solo para cada *pixel* da imagem digital.

As imagens digitalizadas de alta resolução apresentaram ótima qualidade, sem a presença de anomalias em relação movimento ou vibração. Gravadas no formato TIF, sem compactação, com profundidade de cor de 24 bits, as imagens finais apresentaram resolução de aproximadamente 3200x2200 *pixels*, ocupando um espaço em disco de 21364 *kilobytes*.

As imagens de baixa resolução foram obtidas da filmadora por meio de digitalização de vídeo analógico. As imagens foram digitalizadas com uma resolução de 320x240 *pixels*, uma vez que essa é a resolução nominal do sensor de imageamento da filmadora. As imagens foram gravadas no formato BMP, ocupando um espaço em disco de 226 *kilobytes* cada uma, sem compactação. A

escala apresentada pelas imagens foi de cerca de 10cm no solo para cada *pixel* da imagem.

Para efeito de comparação entre as imagens de diferentes resoluções, são apresentados na figura 7.4 detalhes de um veículo parado em solo, cujas imagens foram obtidas em uma passagem da aeronave sobre o mesmo.

(a)

(b)

Figura 7.4: Detalhe de um veículo visto em solo por meio de imagens de baixa (a) e alta (b) resolução

7.6.1 Análise Visual das Imagens

Algumas características importantes da cultura puderam ser identificadas por meio de uma análise visual, executada por um pesquisador da Embrapa. Tanto as imagens de alta resolução quanto as de baixa resolução permitiram uma análise visual satisfatória. As principais características observadas foram:

- Infestação por plantas invasoras;
- Infestação por pragas;
- Falhas no plantio.

A seguir, são apresentadas algumas imagens de baixa resolução obtidas pela filmadora. São mostradas imagens de regiões semelhantes, com e sem a presença dos problemas citados. Para efeito de comparação, as imagens foram obtidas em várias escalas diferentes, correspondendo a altitudes diferentes de voo. As figuras 7.5, 7.6 e 7.7 mostram imagens da cultura de soja com e sem falhas de plantio, em diferentes altitudes.

Além de falhas no plantio, pode-se observar também, nas figuras 7.9 e 7.8 a presença ou não de plantas invasoras na cultura, em diferentes escalas de imagem.

Figura 7.5: Imagens em escala reduzida de soja sem problemas (a) e com falhas de plantio (b)

Figura 7.6: Imagens em média escala de soja sem problemas (a) e com falhas de plantio (b)

Figura 7.7: Imagens em grande escala de soja sem problemas (a) e com falhas de plantio (b)

(a)

(b)

Figura 7.8: Imagens em escala reduzida de milho sem (a) e com (b) presença de plantas invasoras.

(a)

(b)

Figura 7.9: Imagens em grande escala de milho sem (a) e com (b) presença de plantas invasoras.

7.6.2 Processamento Computacional das Imagens

Além da análise visual das imagens, foi também realizada por pesquisadores da Embrapa uma análise computacional das imagens utilizando-se *software* específico para esta funcionalidade. Foram analisadas apenas as imagens de alta resolução, por apresentarem maior interesse agrônomo.

O *software* de processamento das imagens, baseado no uso de redes neurais artificiais, realizou a segmentação das imagens, possibilitando a quantização das características de interesse da cultura mencionadas na seção 7.6.1. O processamento se torna automático após o treinamento das redes neurais com um subconjunto das imagens representativo do conjunto completo. As características identificadas e isoladas pela segmentação das imagens foram as seguintes:

- Falhas no plantio;
- Presença de doenças;
- Nível de cobertura do solo.

Exemplos de segmentação das imagens são apresentados nas figuras 7.10, 7.11, 7.12 e 7.13. A figura 7.10 mostra uma região da cultura de soja infestada por nematóides. Na figura 7.11 é identificada uma falha de plantio na cultura de soja. A figura 7.12 indica a presença de uma região de doença na cultura de milho. A figura 7.13 mostra uma análise da cobertura do solo em uma cultura de algodão.

Figura 7.10: Nematóides em área de soja - imagens original (a) e segmentada (b).

Figura 7.11: Falha de plantio em área de soja - imagens original (a) e segmentada (b).

Figura 7.12: Doença em área de milho - imagens original (a) e segmentada (b).

Figura 7.13: Cobertura de solo em área de algodão - imagens original (a) e segmentada (b).

7.6.3 Integração dos Dados em um SIG

Para que os dados gerados na análise das imagens, seja ela visual ou por *software* de processamento de imagens, possam ser melhor avaliados, é necessário que sejam introduzidos em um SIG. É possível gerar mapas temáticos das áreas de interesse contendo as grandezas coletadas a partir das imagens, ou mesmo cruzar as informações coletadas.

A partir dos dados coletados na missão realizada com o SciaGeo na Fazenda Campo Bom, foram gerados mapas utilizando o *software* MapInfo. O MapInfo pode ser considerado um SIG simplificado, utilizado para geração e manipulação de mapas e tabelas contendo dados referenciados por coordenadas geográficas.

Na figura 7.14 é apresentado um mapa com as posições das imagens identificadas por pontos e mapeadas por cor. Nesse mapa é indicada a porcentagem de cobertura de solo nas áreas amostradas. Tons vermelhos indicam locais em que a cobertura do solo é baixa, e podem ter ocorrido falhas de plantio ou mau desenvolvimento da cultura.

Figura 7.14: Mapa indicando a porcentagem da área contendo solo nu nos pontos de amostragem.

7.7 Considerações Finais

Nesta seção foram apresentados os resultados obtidos durante uma missão real de utilização do SciaGeo como ferramenta de imageamento aéreo. Os resultados obtidos foram significativos, e pôde ser observada a utilidade real das imagens e dos dados delas extraídos para que o produtor tenha um maior conhecimento sobre as condições reais da cultura.

Durante a avaliação dos resultados, foi possível notar pontos onde existem dificuldades quanto à manipulação dos dados gerados. O controle e organização manual de fotografias em filme convencional é uma tarefa trabalhosa e bastante sujeita a falhas. A utilização de uma câmera fotográfica digital pode simplificar muito as tarefas pós-vôo.

A grande quantidade de imagens de baixa resolução geradas pelo SciaGeo também deve ser levada em consideração. É necessário o desenvolvimento de ferramentas específicas para seleção de imagens, pois muitas imagens da filmadora não têm utilidade — durante decolagem e pouso, por exemplo. O tratamento manual de coordenadas e arquivos se torna inviável para um número tão grande de imagens. Por esse mesmo motivo, a validação do processamento digital das imagens de baixa resolução deve ser realizado, pois o elevado número das imagens inviabiliza sua análise visual.

Uma constatação feita a partir da missão realizada foi a viabilidade operacional do equipamento. A instalação do SciaGeo na aeronave foi bastante simples e a operação do sistema em vôo se mostrou perfeitamente viável.

O resultado mais positivo obtido a partir da missão na Fazenda Campo Bom foi a constatação de que as imagens de alta resolução apresentam condições que permitem seu correto processamento digital. A segmentação das imagens pelo método de redes neurais desenvolvido pelos colaboradores da Embrapa mostrou resultados positivos, gerando dados importantes agronomicamente.

O próximo capítulo apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho, incluindo as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento e sugestões de trabalho futuros baseados no SciaGeo.

Capítulo 8

Conclusões

8.1 Introdução

O objetivo inicial deste trabalho era desenvolver um sistema de imageamento aéreo modular, flexível e principalmente com um baixo custo de aquisição e operação, que viabilizasse a sua utilização em uma ampla gama de atividades. Com base nos resultados obtidos e apresentados nesta dissertação, pode-se dizer que foi possível atingir esse objetivo. As principais contribuições deste trabalho são citadas na seção 8.2. Algumas dificuldades encontradas no desenvolvimento estão listadas na seção 8.3.

Apesar dos bons resultados obtidos, o sistema desenvolvido ainda dá espaço a uma série de melhorias. Alguns pontos que podem ser melhorados no SciaGeo são apresentados na seção 8.4, juntamente com sugestões de trabalhos posteriores baseados nos dados de saída do SciaGeo.

8.2 Contribuições

Pode-se dizer que a principal contribuição deste trabalho é a disponibilização de um sistema de captura de imagens que pode gerar dados de forma economicamente acessível e perfeitamente aplicável, conforme visto no capítulo 7. Além disso, este trabalho pode alavancar uma série de trabalhos de processamento de imagens utilizando os dados gerados pelo SciaGeo.

A partir das imagens obtidas, é possível identificar algumas características da cultura de forma abrangente, e que seriam vistas com maior dificuldade em avaliações terrestres. Além disso, sobrevoar uma área agrícola é bem mais rápido do que percorrê-la por via terrestre. Entre as características visualizadas nas culturas, pode-se citar:

- Falhas no plantio (áreas de solo nu);

- Presença de plantas indesejáveis competindo com a cultura (invasoras), com tonalidade de verde diferente;
- Presença de doenças;
- Presença de pragas.

A visualização desses eventos mostra ao produtor que existe margem para um melhor aproveitamento da área cultivada, e o auxilia na decisão sobre como devem ser investidos os seus recursos. A integração de dispositivos de aplicação de defensivos agrícolas com taxa variada, com base nos dados de saída do SciaGeo, também permitiria uma maior economia na aquisição dos mesmos, evitando desperdícios e aumentando o lucro do produtor.

Particularmente, os trabalhos combinados em processamento de imagens e agricultura de precisão prometem um grande avanço para a agricultura no Brasil, caso as técnicas em desenvolvimento sejam aplicadas efetivamente. O SciaGeo contribui para o avanço desses sistemas provendo dados amostrais das culturas agrícolas a um baixo custo, tornando essa tecnologia mais acessível ao produtor comum.

8.3 Dificuldades Encontradas

As principais dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho foram pontuais, e estão relacionadas principalmente ao processamento dos dados de saída. Mais especificamente, algumas dificuldade encontradas durante o desenvolvimento foram:

- Análise de um grande número de imagens sem ferramentas automatizadas;
- Grande força de trabalho utilizada no processamento manual de imagens em filme fotográfico;
- Dificuldade na captura das imagens de forma não-entrelaçada utilizando vídeo digital.

Nenhuma dificuldade técnica que prejudicasse significativamente o trabalho foi encontrada, tanto em nível de projeto de *software* quanto de *hardware*.

8.4 Trabalhos Futuros

As sugestões de trabalhos futuros ligadas mais diretamente ao desenvolvimento do SciaGeo são o planejamento de missões, auxílio à navegação e disparo automático de fotografias.

8.4.1 Planejamento de Missões

O planejamento de missões deve ser feito com a delimitação da área a ser sobrevoada e a definição de alguns parâmetros do voo, como altitude e configuração das câmeras e lentes. O desenvolvimento de *software* específico para esse fim permite ao operador do SciaGeo calcular melhor esses parâmetros, a partir das características da cultura e do problema a ser observado. A variação da altitude do voo e da distância focal das lentes, por exemplo, altera a resolução final das imagens, que deve ser adequada ao problema que se deseja visualizar. A definição de pontos de interesse no módulo de planejamento de missões também é um pré-requisito para desenvolver o auxílio à navegação, citado no próximo tópico.

8.4.2 Auxílio à Navegação

Como está atualmente, o SciaGeo depende da habilidade do piloto e/ou co-piloto para a navegação e identificação visual de áreas de interesse a serem imageadas. Sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de um módulo de *software* para o *palmtop* com uma interface gráfica de navegação por GPS.

O módulo de planejamento de missões citado anteriormente permitiria a definição de pontos de interesse onde devem ser obtidas as imagens. A função principal do módulo de navegação seria a de instruir o piloto sobre como atingir esses pontos de interesse na área imageada. Com a importação dos dados gerados no planejamento da missão para o módulo de auxílio à navegação, o piloto teria maior facilidade em cobrir a área monitorada, seguindo o curso indicado no *palmtop*. A interface de auxílio à navegação pode ser baseada apenas nos dados do receptor GPS, eventualmente utilizando outros sensores, como uma bússola magnética, por exemplo.

8.4.3 Disparo Automático de Fotografias

Outra funcionalidade que facilitaria a operação do SciaGeo em voo é o disparo automático de fotografias. O próprio software de auxílio à navegação poderia ser desenvolvido de modo a gerar um evento de disparo de fotografia, uma vez atingido o ponto de interesse. Isso eliminaria uma das tarefas a serem realizadas pelo piloto, permitindo que ele concentre sua atenção na navegação da aeronave, tornando a missão mais segura e efetiva.

O disparo automático de fotografias associado a um sensor de atitude garantiria também a obtenção de imagens com menor desvio do eixo vertical.

8.4.4 Outros Trabalhos

Há outras sugestões de trabalhos futuros, porém não tão relacionadas ao desenvolvimento do SciaGeo como as citadas acima, mas sim ao processamento dos dados de saída do sistema. São elas:

- Processamento das imagens geradas utilizando técnicas variadas de processamento de imagens digitais;
- Validação do processamento digital das imagens de baixa resolução;
- Desenvolvimento de ferramentas automáticas para seleção e processamento de um grande número de imagens de baixa resolução;
- Utilização de uma câmera fotográfica digital juntamente com a avaliação da facilidade de uso;
- Captura e processamento de imagens com o SciaGeo em diversos tipos de cultura agrícola.

Referências Bibliográficas

- [ABE 02] ABER, J. S.; ABER, S. W. Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large-scale, high-resolution, multiview-angle imagery. In: FIEOS 2002 CONFERENCE PROCEEDINGS, 2002. [s.n.], 2002.
- [ANG 02] ANGEL, A. et al. Methods of traffic data collection, using aerial video. In: PROC. IEEE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 2002. [s.n.], 2002. p.31-36.
- [BAR 88] BARTHOLOMÉ, E.; GREGOIRE, J. M. Small format air photo from ultralight aircraft as an aid for data collection of agricultural statistics in sahelian countries. In: PROCEEDINGS OF IGARSS'88 SYMPOSIUM, 1988. **Proceedings...** Edinburgh, Scotland:[s.n.], 1988.
- [BAR 93] BARZOHAR, M. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation. In: PROC. GEOSCIENCE COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 1993. [s.n.], 1993. p.459-464.
- [BEC 89] BECKER, U. J. Automatic traffic data collection using aerial video images. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TRAFFIC MONITORING, 1989. [s.n.], 1989. p.79-83.
- [BLA 99] BLANC, N. Ccd versus cmos - has ccd imaging come to an end? In: PHOTOGRAMMETRIC WEEK 1999, 1999. **Proceedings...** Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart, Germany:[s.n.], 1999. p.131-137.
- [BUR 98] BURMAN, H. Image orientation by gps and ins. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 1998. **Proceedings...** Ohio, US:[s.n.], 1998. v.32.

- [CAM 96] CAMARA, G. et al. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Unicamp, 1996.
- [CRA 99] CRAMER, M. Direct geocoding – is aerial triangulation obsolete? In: PHOTOGRAMMETRIC WEEK 1999, 1999. **Proceedings...** Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart, Germany:[s.n.], 1999. p.59–70.
- [CRA 00] CRAMER, M.; STALLMANN, D. Direct georeferencing using gps/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. **International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.l.], v.XXXIII, p.198–206, 2000.
- [CRA 01] CRAMER, M. On the use of direct georeferencing in airborne photogrammetry. In: PROCEEDINGS 3RD. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, 2001. **Proceedings...** Cairo:[s.n.], 2001.
- [CUR 03] CURTIN, D. P. **Digital Photography – The Textbook**. <http://www.photocourse.com>, 2003.
- [FRÈ 98] FRÈRE, D. et al. Automatic modelling and 3d reconstruction of urban buildings from aerial imagery. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM PROCEEDINGS. IGARSS'98, 1998. [s.n.], 1998. v.5, p.2593–2596.
- [GRA 86] GRAHAM, R. **Manual of Aerial Photography**. Focal Press, 1986.
- [HAR 03] HARRIS, T. **How Camcorders Work**. <http://www.howstuffworks.com/camcorder.htm>, 2003.
- [HED 79] HEDGECOE, J. **Introductory Photograpyh Course**. Mitchell Beazley, 1979.
- [JAC 88] JACOBSON, R. E.; RAY, S. F. **The Manual of Photography**. Focal Press, 2. ed., 1988.
- [JOH 96] JOHNSON, E. N. et al. The 1996 mit/boston university/draper laboratory autonomous helicopter system. In: PROCEEDINGS OF THE DIGITAL AVIONICS SYSTEMS CONFERENCE - 15TH AIAA/IEEE, 1996. [s.n.], 1996. p.381–386.
- [KAP 96] KAPLAN, E. D. **Understanding GPS – Principles and Applications**. Artech House Publishers, 1996.
- [LAN 78] LANGFORD, M. **The Step by Step Guide to Photography – A Complete Manual**. Ebury Press, 1978.

- [LAU 92] LAURINI, R. **Fundamentals of Spatial Information Systems**. Academic Press, 1992.
- [LIT 01] LITWILLER, D. Ccd vs. cmos: Facts and fiction. **Photonics Spectra**, [S.I.], January 2001.
- [LOG 92] LOGSDON, T. **The Navstar Global Positioning System**. Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [MAG 91] MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F. **Geographical Information Systems**, v.1. Longman Scientific and Technical, 1991.
- [MAR 90] MARCHETTI, D. A. B. **Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação**. Nobel, 1990.
- [MON 00] MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo Navstar-GPS**. Editora Unesp, 2000.
- [MOR 01] MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001.
- [NET 96] NETANYAHU, N. S. et al. Robust detection of road segments in noisy aerial images. In: PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 1996. [s.n.], 1996. v.2, p.151–155.
- [NIC 03] NICE, K. **How Digital Cameras Work**. <http://electronics.howstuffworks.com/digital-camera.htm>, 2003.
- [PAR 86] PAREDES, E. A. **Introdução à Aerofotogrametria para Engenheiros**, v.1. CNPq: Concitec, 1986.
- [RIC 01] RICETTI, E. Remotely sensed and geophysical data for nondestructive archaeological prospection. In: IEEE 2001 INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. IGARSS'01, 2001. [s.n.], 2001. v.7, p.3084–3086.
- [SKA 93] SKALLOUD, J. Direct georeferencing in aerial photogrammetric mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing: Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.I.], v.68, n.3, p.207–210, March, 1993.

- [TOR 00] TORRE, M. Agricultural-field extraction on aerial images by region competition algorithm. In: PROC. 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 2000. [s.n.], 2000. v.1, p.313–316.
- [Tri 00] Trindade Jr., O.; CARMO, M. S. Small aircraft for application in agriculture. In: PROCEEDINGS OF THE 2000 ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2000. **Proceedings...** Milwaukee, USA:[s.n.], 2000.
- [VAN 98] VANDEKERCKHOVE, J. et al. Semi-automatic modelling of urban buildings from high resolution aerial imagery. In: PROC. COMPUTER GRAPHICS INTERNATIONAL, 1998, 1998. [s.n.], 1998. p.588–596.
- [WAR 96] WARNER, W. S.; GRAHAM, R. W. **Small Format Aerial Photography**. Whittles Publishing, 1996.

Apêndice A

Diagramas Esquemáticos

Neste apêndice são apresentados os diagramas esquemáticos dos módulos de *hardware* utilizados pelo SciaGeo. A figura A.1 apresenta o diagrama do conversor de níveis lógicos RS232/TTL. Na figura A.2 é mostrado o esquema da fonte chaveada utilizada pelo sistema. O modem de 2400bps utilizado para modulação e demodulação dos sinais digitais no canal de áudio da filmadora é apresentado na figura A.3. Finalmente, a placa controladora de câmera tem o esquema apresentado na figura A.4.

Figura A.1: Diagrama esquemático da placa do conversor de níveis lógicos RS232/TTL.

Figura A.2: Diagrama esquemático da fonte de alimentação chaveada utilizada pelo SciaGeo.

Figura A.3: Diagrama esquemático do modem de 2400bps utilizado para modulação e demodulação dos sinais digitais no canal de áudio da filmadora.

Figura A.4: Diagrama esquemático da placa controladora de câmera.

Apêndice B

Protocolos de Comunicação

Neste apêndice são apresentados os protocolos de *software* especificados e implementados para o SicaGeo. Todos os protocolos utilizam a técnica de *character stuffing* na seção de dados do pacote (entre os pares DLE/STX e DLE/ETX). Todos os pacotes seguem o seguinte modelo:

Bytes	Tipo	Descrição
1	byte	DLE
1	byte	STX
N		Seção de dados
1	byte	CRC16 byte 1
1	byte	CRC16 byte 2
1	byte	DLE
1	byte	ETX

O código de verificação de erro CRC16 é calculado sobre a seção de dados do pacote. A seguir são especificadas as seções de dados de cada pacote em particular.

B.1 Pacote de Dados de Posicionamento

Este pacote é utilizado para envio de dados de posicionamento pelo processador principal. O pacote aqui definido é enviado tanto para o *palmtop* quanto para a trilha de áudio da filmadora.

Bytes	Tipo	Descrição
2	unsigned int	Velocidade (km/h)
2	int	Latitude (graus)
4	float	Latitude (minutos)
2	int	Longitude (graus)
4	float	Longitude (minutos)
2	int	Altitude em relação ao nível do mar (metros)
4	float	PDOP
4	float	HDOP
4	float	VDOP
1	byte	Número de satélites em vista
1	byte	Número de satélites em uso
1	byte	Data (dia)
1	byte	Data (mês)
1	byte	Data (ano)
1	byte	Hora (horas)
1	byte	Hora (minutos)
1	byte	Hora (segundos)

B.1.1 Pacote de Disparo de Fotografia

Este pacote é enviado do *palmtop* para o processador principal e deste último para o controlador de câmera.

Bytes	Tipo	Descrição
1	byte	0x00
1	byte	0x00

B.1.2 Pacote de Controle da Filmadora

Este pacote é enviado do *palmtop* para o processador principal e deste último para o controlador de câmera.

Bytes	Tipo	Descrição
1	byte	0x00
1	byte	0x01
1	byte	Comando LANC byte 1
1	byte	Comando LANC byte 2

B.1.3 Pacote de Confirmação de Disparo de Fotografia

Este pacote é enviado do controlador de câmera para o processador principal e do processador principal para o *palmtop*.

Bytes	Tipo	Descrição
1	byte	0x01
1	byte	0x00

B.1.4 Pacote de Confirmação de Controle da Filmadora

Este pacote é enviado do controlador de câmera para o processador principal e do processador principal para o *palmtop*.

Bytes	Tipo	Descrição
1	byte	0x01
1	byte	0x01

Apêndice C

Formato do Arquivo de Coordenadas

O SciaGeo gera como saída, além das imagens, um arquivo contendo os dados de posicionamento (coordenadas) das mesmas. O arquivo é gravado em texto padrão ASCII, com cada linha de texto contendo uma conjunto de dados de posicionamento de uma imagem. Os campos são delimitados por espaços em branco, e aparecem na seguinte ordem: índice da imagem, latitude (graus), latitude (minutos), latitude (norte/sul), longitude (graus), longitude (minutos), longitude (leste/oeste), altitude em metros, velocidade em km/h, PDOP, HDOP, VDOP, número de satélites em vista, número de satélites em uso, data (dd/mm/aa), hora (hh:mm:ss).

Um trecho de um arquivo de coordenadas é apresentado, como exemplo, abaixo:

```
000 18 44,183100 S 52 36,619100 W 873 79 1,500 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:47:57
001 18 44,183100 S 52 36,619100 W 873 79 1,500 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:47:57
002 18 44,189900 S 52 36,629700 W 873 79 1,600 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:47:58
003 18 44,189900 S 52 36,629700 W 873 79 1,600 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:47:58
004 18 44,206600 S 52 36,648700 W 874 81 1,600 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:48:00
005 18 44,206600 S 52 36,648700 W 874 81 1,600 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:48:00
006 18 44,206600 S 52 36,648700 W 874 81 1,600 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:48:00
007 18 44,215900 S 52 36,657300 W 876 81 1,600 0,900 1,400 11 10 24/01/04 18:48:01
008 18 44,215900 S 52 36,657300 W 876 81 1,600 0,900 1,400 11 10 24/01/04 18:48:01
009 18 44,225800 S 52 36,665200 W 878 81 1,500 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:48:02
010 18 44,225800 S 52 36,665200 W 878 81 1,500 0,800 1,300 11 10 24/01/04 18:48:02
011 18 44,236300 S 52 36,672100 W 879 81 1,600 0,800 1,400 11 10 24/01/04 18:48:03
012 18 44,236300 S 52 36,672100 W 879 81 1,600 0,800 1,400 11 10 24/01/04 18:48:03
013 18 44,236300 S 52 36,672100 W 879 81 1,600 0,800 1,400 11 10 24/01/04 18:48:03
```