

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

PRINCÍPIOS DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS ESPACIAIS



Blucher

Daniel Rodrigues dos Santos
Henrique Cândido Oliveira

PRINCÍPIOS DE AQUISIÇÃO
E PROCESSAMENTO DE DADOS ESPACIAIS

Princípios de aquisição e processamento de dados espaciais

© 2022 Daniel Rodrigues dos Santos e Henrique Cândido Oliveira

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Coordenação editorial Jonas Eliakim

Produção editorial Lidiane Pedroso Gonçalves

Preparação de texto Ana Lúcia dos Santos

Diagramação Tarso Boudet Caldas

Revisão de texto Maurício Katayama

Capa Leandro Cunha

Imagem da capa iStockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4° andar

04531-934 — São Paulo — SP — Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme

6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua*

Portuguesa, Academia Brasileira de Letras, julho

de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por

qualquer meios sem autorização escrita da

editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard
Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação da Publicação
(CIP) Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Santos, Daniel Rodrigues dos

*Princípios de aquisição e processamento de dados
espaciais* / Daniel Rodrigues dos Santos, Henrique Cândido
Oliveira— São Paulo: Blucher, 2022.

366 p.: il.

Bibliografia

ISBN 978-65-5506-559-6 (impresso)

ISBN 978-65-5506-556-5 (eletronico)

1. Fotogrametria 2. Sensoriamento remoto 3. Dados geoespaciais I. Título II. Oliveira, Henrique Cândido

22-1023

CDD 526.8

Índices para catálogo sistemático:

1. Fotogrametria

CONTEÚDO

AGRADECIMENTOS	ix	
PREFÁCIO	xi	
1	SENSORES DE IMAGEAMENTO	1
1.1	Sensores de imageamento passivo	2
1.2	Sensores de imageamento ativo	66
1.3	Sensores de imageamento RGB-D	79
1.4	Exercícios	82
2	GERAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS E ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS	85
2.1	Geração de nuvens de pontos fotogramétrica	86
2.2	Ortorretificação de imagens digitais	143
2.3	Exercícios	163
3	CALIBRAÇÃO E AJUSTAMENTO DE FAIXAS LiDAR	165
3.1	Calibração dos parâmetros de montagem de um sistema RPAbaseado em LiDAR	167

3.2	Ajustamento de faixas LiDAR	218
3.3	Exercícios	250
4	REGISTRO E CLASSIFICAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS LiDAR	251
4.1	Registro de nuvens de pontos LiDAR	252
4.2	Classificação de objetos em nuvens de pontos LiDAR	276
4.3	Exercícios	298
5	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE NUVENS DE PONTOS LiDAR	299
5.1	Avaliação da acurácia posicional de nuvens de pontos LiDAR	300
	APÊNDICE	307
A.1	Elementos fotogramétricos	307
A.2	Resolução radiométrica, espectral e temporal de imagens digitais	312
A.3	Sistemas referenciais	315
A.4	Feições geométricas e transformações matemáticas	319
A.5	Conceito de paralaxe	331
A.6	Planejamento de voo	334
A.7	Controle de qualidade de produtos fotogramétricos	340
A.8	Quatérnios	343
	SOBRE OS AUTORES	345
	REFERÊNCIAS	347

CAPÍTULO 1

SENSORES DE IMAGEAMENTO



Figura 1.1 – Lançado no XIX Congresso ISPRS de Amsterdã, nos Países Baixos em Julho de 2000, o sensor digital aerotransportado, da LH Systems, inicia uma nova era da fotogrametria digital, no início do novo milênio. Fonte: Sandau, 2010

Os últimos vinte anos foram marcados por grandes avanços nos campos da física óptica e da eletrônica, tornando possível a aquisição de dados espaciais com o emprego de sensores de imageamento de alta resolução geométrica, radiométrica e espectral, podendo ser baseados em princípios ativos ou passivos de registro da energia eletromagnética. Os sensores de imageamento passivo são capazes de registrar a energia eletromagnética refletida dos objetos, enquanto os sensores de imageamento ativo são responsáveis por transmitir radiação eletromagnética e medir o sinal refletido, a partir do seu próprio sensor. Como exemplo de sensores de imageamento passivo, pode-se citar as câmeras digitais. Já no sistema LiDAR aerotransportado/terrestre, as câmeras de distância 3-D, os sensores RGB-D e os radares são considerados sistemas de imageamento ativo.

Usando dados espaciais, tanto o cidadão comum como os usuários do Google Maps ou usuários específicos são capazes de executar suas tarefas de forma precisa e eficiente, propiciando qualidade na tomada de decisões em projetos de estrada e rodagem, de

monitoramento de áreas costeiras, de modelagem tridimensional (3-D) de ambientes urbanos, em inspeção de barragens, em estudos e modelagem de linhas de transmissão, em estudos de impactos ambientais, movimento de rochas e deslizamento de terras, em detecção de mudanças, detecção e parametrização de objetos industriais, em navegação, vigilância e operações forenses, realidade aumentada, estabelecimento de rotas de fuga para situações de emergência, ensaios climatológicos, entre outros.

De acordo com a empresa *Markets and Markets*, o valor de mercado dos sensores de imageamento passivo e ativo está avaliado em, aproximadamente, 15 bilhões de reais¹.

Estima-se, ainda, que haja um crescimento médio anual desse valor em torno de 9 % para os próximos cinco anos. A principal razão da especulação de valor agregado aos sensores de imageamento é a sua capacidade de registrar informações sobre o ambiente físico, sem o contato direto com a superfície a ser mapeada, de forma rápida e precisa, tanto para projetos de pequena e média escala quanto para projetos de larga escala. Contudo, a decisão pelo sensor mais adequado depende de alguns fatores, como os requisitos do projeto, o recurso financeiro disponível, a densidade média de pontos/m² esperada e o grau de confiabilidade do produto compilado a ser alcançado.

1.1 SENSORES DE IMAGEAMENTO PASSIVO

As câmeras digitais podem ser classificadas como de pequeno formato (tamanho da imagem de até 15 megapixels), de médio formato (15 megapixels < tamanho da imagem < 40 megapixels) e de grande formato (tamanho da imagem > 40 megapixels). Esses sensores são capazes de recobrir a superfície física da Terra de forma quadro a quadro, por varredura por espelho (*whiskbroom*) ou por varredura linear (*pushbroom*), como apresentado na Figura 1.2.



Figura 1.2 – Formas de aquisição de dados espaciais usando-se sensores passivos: (a) quadro a quadro; (b) *whiskbroom*; (c) *pushbroom*.

Sensores de imageamento passivo baseados em sistemas quadro a quadro ainda são os mais empregados no processo de gravação de dados espaciais sobre a superfície física da Terra, principalmente por seu baixo custo e sua maior flexibilidade, podendo ser

¹<https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/geotechnical-instrumentation-monitoring.asp>. Acessado em 11 de novembro de 2021

usados para fins de mapeamento, entretenimento, monitoramento e inspeção, entre outros. Vale notar que o marco inicial da evolução das câmeras aéreas quadro a quadro se deve ao desenvolvimento do processo fotográfico e, posteriormente, à invenção das aeronaves. A Figura 1.3 apresenta um breve histórico da evolução das câmeras aéreas destinadas para fins de mapeamento.



Figura 1.3 – Evolução das câmeras aéreas destinadas para fins de mapeamento.

De maneira breve, pode-se dizer que as câmeras aéreas tiveram sua primeira funcionalidade na I Guerra Mundial, para estratégia militar. Em 1918, foi desenvolvida a câmera do tipo *handheld*, estritamente empregada pelos militares para fins de reconhecimento. Em 1922, surgiu a primeira câmera RMK C1, da Zeiss, com dispositivos mecânicos mais avançados e um sistema de lentes superior ao da câmera *handheld*. Com o avanço gradual da tecnologia, foram obtidas grandes melhorias nos sistemas de lentes e nos dispositivos de acionamento das câmeras, inclusive no que tange à sua qualidade geométrica e radiométrica. Após décadas de pesquisa e desenvolvimento, na Semana Fotogramétrica de 1999 (*Photogrammetric Week*), em Stuttgart, foi anunciado o lançamento da primeira câmera digital de arranjo matricial, elaborada pela DMC-Z/I. No entanto, sua inserção no mercado de mapeamento se deu apenas em 2002. No XIX Congresso da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS), em 2000, nos Países Baixos, foi lançada a câmera digital ADS40, cujo princípio de aquisição de dados é baseado em uma abordagem por varredura linear. A ADS40 foi desenvolvida pela LH Systems, em cooperação com o Centro Aeroespacial Alemão, tornando-se o primeiro sistema comercial de câmeras digitais de varredura linear disponível no mercado. Em 2016, uma nova geração da câmera ADS, o sistema ADS100, foi apresentada no XXIII Congresso da ISPRS, na Tchécua. Vale ressaltar que, na “idade de ouro” em que se encontra o desenvolvimento tecnológico, sem dúvidas, nos próximos 10 anos, haverá sistemas sensores hiperspectrais de diferentes

tamanhos, formas e capacidades de registrar a energia radiante incidida na superfície física da Terra.

Nesta obra, porém, serão brevemente apresentados apenas os sensores baseados em sistemas quadro a quadro, em arranjo matricial (ITT: Geospatial System; DIMAC: Dimac Systems; DMC Z/I: Intergraph; Ultracam-D e Ultracam-X: Vexcel; STARIMAGER-TLS: Starlabo), também conhecido como multicâmeras; e aqueles baseados em varredura linear (HRSC-AX e HRSC-AXW: DLR; JAS 150: Jena Optronik, ADS40 e a 2ª geração ADS80; Leica, 3-DAS-1 e 3-OC: Wehril Associates-USA e Geosystems-Ukraine).

1.1.1 CÂMERAS DIGITAIS BASEADAS EM AQUISIÇÃO QUADRO A QUADRO

Câmeras digitais com sistemas sensores do tipo quadro a quadro são capazes de recobrir um quadro de área do terreno em cada tomada de imagem em um dado instante de tempo. Isso requer que as lentes forneçam uma cobertura angular adequada para que a porção da área de interesse seja devidamente registrada pelo sensor. A Figura 1.4 apresenta um esquema gráfico de uma câmera de quadro fotográfico.

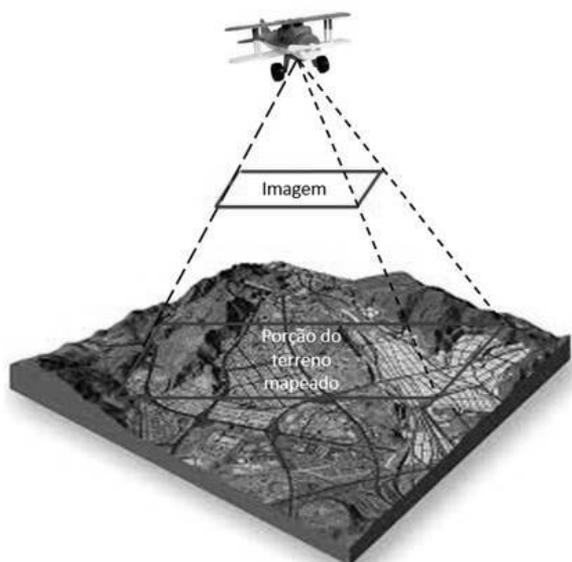


Figura 1.4 – Quadro de área no terreno registrado por um sensor do tipo quadro a quadro.

Atualmente, os sensores passivos de imageamento são dotados de um sistema complexo de lentes, um obturador e um dispositivo de registro da energia radiante, como um sensor de tecnologia CCD (*charge-coupled device*) ou um sensor de tecnologia CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*). Esses sensores são constituídos por uma superfície sólida, sensível à energia eletromagnética², dotados de circuitos que, além de registrarem a energia incidente no sistema de lentes da câmera digital, também permitem ler, eletronicamente, imagens digitais.

²A energia eletromagnética pode ser derivada de uma fonte de luz artificial ou natural, por exemplo, a luz do sol.

Em uma câmera digital baseada em aquisição quadro a quadro, o CCD é um elemento sensor formado por um conjunto de circuitos eletrônicos, um sistema de refrigeração e um suporte mecânico. Um sensor CCD comum consiste em um semiconductor formado por uma placa retangular de silício, na qual é implantada uma rede de eletrodos ou capacitores, que capturam e quantificam os elétrons (carga negativa) gerados na placa de silício pelo efeito fotoelétrico. Este consiste na emissão de elétrons por um material — no caso, o silício (matéria-prima básica para a construção de sensores CCD) —, quando exposto à radiação eletromagnética. A Figura 1.4 mostra um esquema simplificado do efeito fotoelétrico.

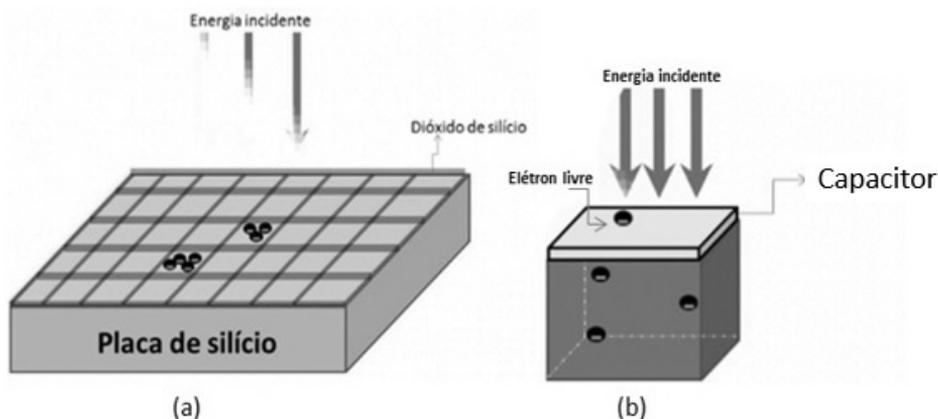


Figura 1.5 – Esquema simplificado do efeito fotoelétrico em sensores: (a) placa de silício e colunas que separam eletronicamente os capacitores; (b) capacitor e o elétron livre.

Conforme a Figura 1.5, quando uma quantidade de energia radiante incide sobre o material semiconductor (placa de silício, Figura 1.5 (a)), ocorre uma absorção de fótons, e os elétrons livres abandonam suas órbitas (Figura 1.5 (b)), por serem atraídos pela carga positiva contida no capacitor. Os capacitores são dispostos em colunas, de modo a cobrirem todo o sensor CCD (linhas vermelhas na Figura 1.5 (a)). As diferentes colunas são isoladas entre si por um material que gera um potencial negativo permanente ao entrar em contato com a placa de silício, evitando a contaminação entre os capacitores e reduzindo os efeitos sistemáticos que podem provocar borrramento na imagem. Cada capacitor é uma peça fundamental do detector CCD e corresponde a um elemento da imagem digital a ser gerada, designado por pixel, cujo tamanho físico é variável.

O arranjo básico do efeito fotoelétrico é repetido várias vezes até que a energia eletromagnética não seja mais incidida sobre a placa de silício (obturador da câmera é fechado), obtendo, como informação, cargas de energia acumulada (círculos azuis na Figura 1.6), que é proporcional à energia radiante incidida sobre o capacitor. Ao final do processo de registro e gravação da energia eletromagnética, a quantidade de energia acumulada em cada capacitor deve passar por uma transferência de carga acumulada. A Figura 1.6 ilustra o esquema simplificado de transferência de carga acumulada.

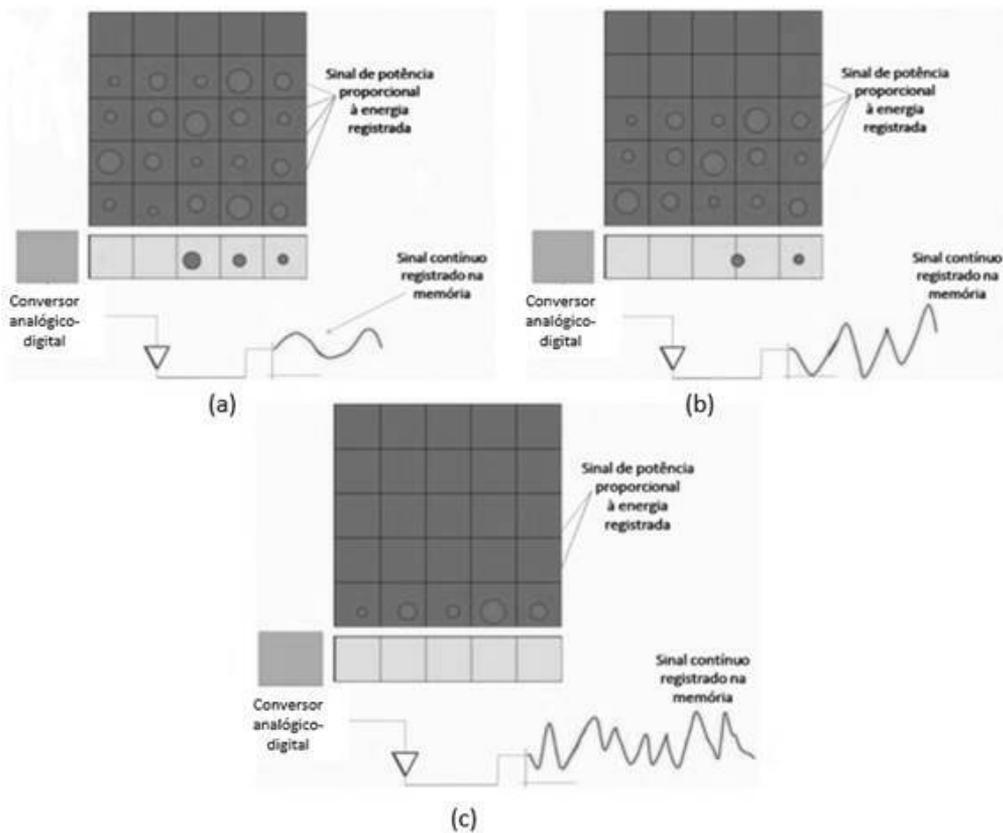


Figura 1.6 – Esquema simplificado de transferência de carga acoplada. (a), (b) e (c): sequência de transferência de carga.

Após o registro da energia eletromagnética, os sinais de potência de cada eletrodo são modificados, e a carga é transferida verticalmente de um eletrodo para o outro, até alcançar o registro de deslocamento, como mostra a Figura 1.6. A partir do registro de deslocamento, a carga acumulada é transferida horizontalmente para um amplificador de saída, que, posteriormente, converte o sinal analógico (voltagem) em sinal digital (ver linhas vermelhas na Figura 1.6), formando, enfim, a imagem digital. A Figura 1.7 mostra uma imagem digital colorida e um exemplo de representação dos valores de cinza.

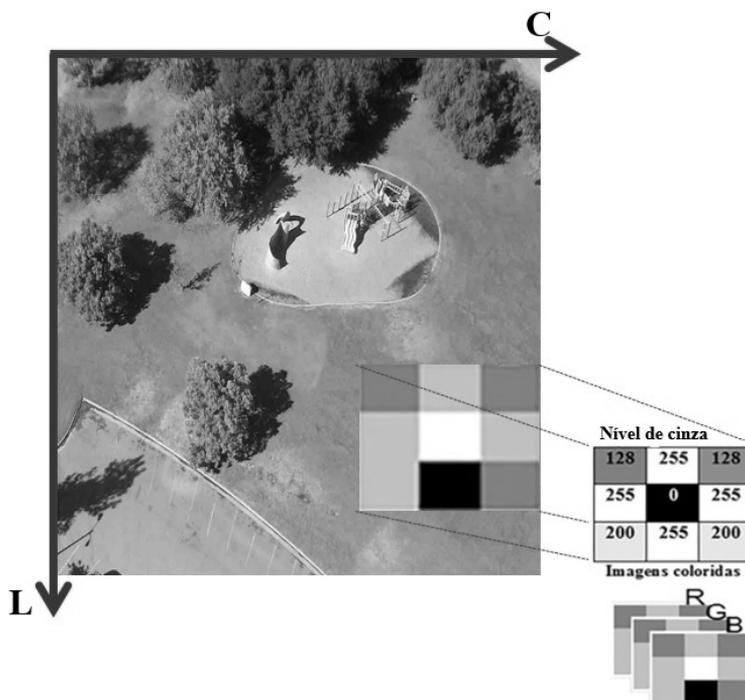


Figura 1.7 – Imagem digital colorida e um exemplo de sua representação em níveis de cinza.

A imagem digital é formada por um conjunto de elementos (pixels — picture \times elements) espacialmente ordenados em um arranjo matricial de colunas (C) e linhas (L), sendo atribuído para cada pixel um valor de cinza. No caso de imagens coloridas, há uma combinação de três componentes, isto é, a componente R (*Red*), a componente G (*Green*) e a componente B (*Blue*). Como pode ser visto na Figura 1.7, uma porção da imagem digital (3×3) mostra que os valores digitais (128, 255, 0 e 200) expressam os valores de cinza contidos em cada posição da imagem. O número máximo de valores de cinza que pode ocorrer na imagem é 2^n bits (dígitos binários).

Com a popularização dos sensores digitais, câmeras métricas convencionais entraram em desuso, e as medidas (ou observações) passaram a ser feitas diretamente na imagem, referenciadas ao sistema digital. O sistema referencial digital (ver Figura 1.8) é definido na forma que segue:

- Origem (O') — centro do pixel superior esquerdo;
- Eixo $O'C$ — direção horizontal e sentido positivo para a direita;
- Eixo $O'L$ — rotacionado 90° em relação ao eixo $O'C$, sentido horário (torna o sistema levogiro);
- C, L — coluna e linha, respectivamente.

A Figura 1.8 mostra o sistema referencial digital.

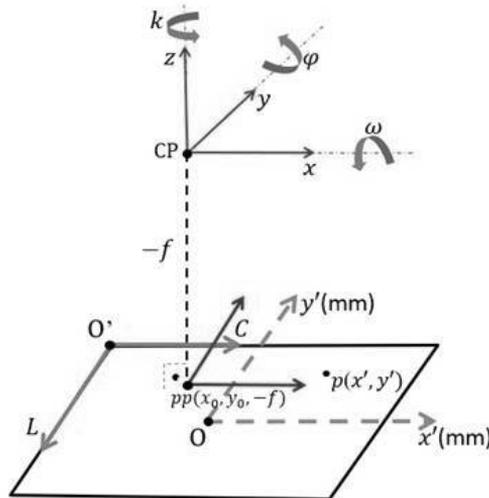


Figura 1.8 – Sistemas referenciais digital (O'), com origem no centro da imagem (O), e fotogramétrico (CP).

Quando se coleta um pixel na imagem digital, é necessário transformar as coordenadas do pixel p para o sistema referencial métrico que corresponde ao com origem no centro da imagem, como mostra a Figura 1.8. Por definição, O é a origem do sistema referencial, que parte do centro da imagem; o eixo Ox' é orientado positivamente na direção do sentido da plataforma; e o eixo Oy' é perpendicular ao eixo Ox' , tornando o sistema dextrogiro, como mostra a Figura 1.8.

Para transformar um ponto $p(C, L)$, observado na imagem digital (sistema referencial digital), para $p(x', y')$ — sistema referencial com origem no centro da imagem —, deve ser aplicada a seguinte transformação matemática:

$$\begin{aligned} x' &= \left(C - \frac{NTC-1}{2} \right) Tp \\ y' &= - \left(L - \frac{NTL-1}{2} \right) Tp' \end{aligned} \quad (1.1)$$

sendo NTC o número total de colunas na imagem; NTL , o número total de linhas da imagem; e Tp , o tamanho do pixel.

Note que, na Equação (1.1), a transformação entre os sistemas referencial digital e com origem no centro da imagem é feito baseado em duas translações $\left(\frac{NTC}{2}, \frac{NTL}{2} \right)$, um fator de escala (Tp , que representa o tamanho do pixel no sensor CCD/CMOS) e uma reflexão no eixo L para y' . A operação de reflexão é facilmente aplicada multiplicando-se y' por -1 . A Equação (A.5), anexa, mostra como calcular o valor de Tp .

Ainda na Figura 1.8, o leitor pode identificar o referencial fotogramétrico, que é um sistema cartesiano tridimensional com origem no CP da câmera e dextrogiro. A orientação dos eixos CPx e CPy é paralela aos eixos Ox' e Oy' do referencial, respectivamente,

com origem no centro da fotografia, enquanto o eixo CPz coincide com o eixo óptico da câmera, sendo sentido positivo para o zênite e negativo, para o nadir. Como a coordenada z é constante e igual à distância focal da câmera, utiliza-se um referencial plano, cuja origem é o ponto principal de autocolimação (pp). O pp é o ponto de intersecção formado pela projeção ortogonal do CP da câmera no plano da imagem, com coordenadas $(x_0, y_0, -f)$.

Por simplificação matemática, o sistema complexo de lentes de um sensor passivo é representado por um ponto que denota o centro de incidência dos feixes de raios de luz perspectivos que incidem no sistema de lentes da câmera. Em outras palavras, esse ponto é uma abstração pontual do sistema de lentes e é denominado de CP (centro perspectivo) da câmera (ver Figura 1.8). Vale ressaltar que o CP não existe fisicamente no sistema de lentes, servindo apenas como um parâmetro para o sistema referencial fotogramétrico.

Devido às imperfeições na construção de lentes esféricas e no alinhamento dos eixos ópticos das lentes que compõem o sistema de lentes, dois tipos principais de distorções são provocados na imagem: a distorção radial simétrica e a distorção descentrada (com uma componente radial e outra, tangencial). Essas distorções provocam deslocamentos no plano da imagem que são considerados como erros sistemáticos. As Equações polinomiais que modelam a distorção radial, decomposta nas componentes em x , y , são as que seguem:

$$\partial x = (x' - x_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6]; \quad (1.2)$$

$$\partial y = (y' - y_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6], \quad (1.3)$$

sendo k_1, k_2, k_3 os coeficientes de distorção radial simétrica; x, y , as coordenadas do ponto no espaço imagem não corrigidas da distorção radial da lente;

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2};$$

x_0 e y_0 , as coordenadas do ponto principal com relação ao centro geométrico da imagem; e $\partial x, \partial y$, as coordenadas corrigidas da distorção radial do sistema de lentes.

Já as equações polinomiais que modelam a soma da componente radial e da componente tangencial, da distorção descentrada, decompostas nas componentes em x e em y , são escritas da seguinte forma:

$$\delta_{dx} = P_1 \left(r^2 + 2(x' - x_0)^2 \right) + 2P_2 (x' - x_0) (y' - y_0); \quad (1.4)$$

$$\delta_{dy} = P_2 \left(r^2 + 2(y' - y_0)^2 \right) + 2P_1 (x' - x_0) (y' - y_0), \quad (1.5)$$

sendo P_1, P_2 os coeficientes de distorção descentrada. Para mais detalhes, sugere-se a leitura de D. C. Brown, 1971.

Dessa forma, as fotocoordenadas, corrigidas dos efeitos sistemáticos e transformadas para o referencial fotogramétrico, são obtidas da seguinte forma:

$$x'_c = x - x_0 - (\partial x + \delta_{dx}); \quad (1.6)$$

$$y'_c = y - y_0 - (\partial y + \delta_{dy}), \quad (1.7)$$

sendo x'_c, y'_c as fotocoordenadas do ponto p no sistema referencial fotogramétrico corrigidas das distorções das lentes.

Também é importante lembrar que, para câmeras digitais, devem ser considerados os parâmetros de afinidade (A, B), que representam um fator de escala e um fator de não ortogonalidade entre os eixos do sistema referencial digital, principalmente para câmeras de pequeno formato, também chamadas de câmeras *off-the-shelf*. Os coeficientes k_0, k_1, k_2, k_3 e P_1, P_2 , bem como as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) , devem ser determinados por meio de um processo conhecido como *calibração de câmeras*, que será apresentado nesta obra mais adiante.

Na Figura 1.8, em torno de cada um dos eixos cartesianos, há um ângulo de rotação associado, isto é, os ângulos de Euler (ω, φ, k) são aplicados em torno do terno x, y, z , respectivamente. Com isso, pode ser formada uma matriz de rotação R , que representa, na verdade, a composição das três rotações citadas, como segue:

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \text{sen}(\omega) \\ 0 & -\text{sen}(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\text{sen}(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} \cos(k) & \text{sen}(k) & 0 \\ -\text{sen}(k) & \cos(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

Uma das formas de se obter R é por:

$$R = R_k R_\varphi R_\omega. \quad (1.11)$$

Como o produto de matrizes não é comutativo, o mapeamento entre ângulos de Euler e matrizes de rotação 3-D não é único. Para obtê-los a partir de uma matriz de rotação, sem ambiguidade, é necessário conhecer a ordem como foi definida a multiplicação das matrizes, que podem ser de até $3!$ formas. Como rotações também podem ser definidas de duas formas — intrínsecas ou extrínsecas —, aumentam-se para 12 as possibilidades de mapeamento entre ângulos de Euler e matrizes de rotação. Deixa-se a cargo do leitor realizar esse estudo.

Já a formação de cores em imagens digitais é baseada no princípio do filme colorido. Películas (filtros) matricialmente arranjadas sobre o sensor CCD, denominado *filtro de Bayer*, são usadas para capturar as componentes do vermelho (R), verde (G) e azul (B) da luz incidida sobre o sistema de lentes da câmera digital. O filtro de Bayer forma uma malha de quadros sobre o sensor, composta por 25 % de filtro vermelho, 25 % de filtro azul e 50 % de filtro verde, como mostra a Figura 1.9.

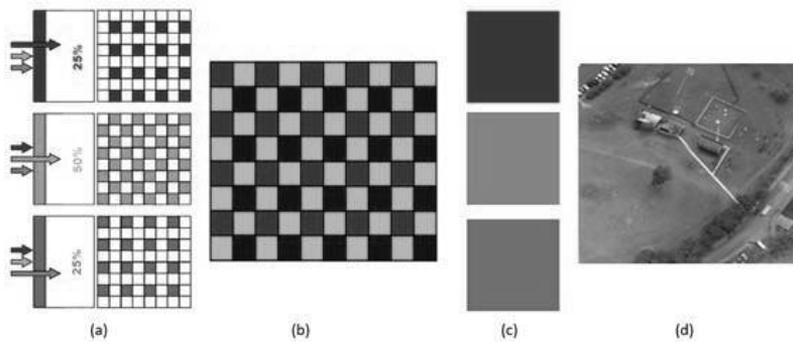


Figura 1.9 – Filtro de Bayer: (a) arranjo das cores do filtro de Bayer em uma matriz de pixels; (b) composição dos arranjos do filtro de Bayer; (c) filtro R, G e B; (d) imagem colorida resultante.

Como pode ser notado nas Figuras 1.9 (b), 1.9 (c) e 1.9 (d), a função do filtro (ou película) é transmitir a componente correspondente ao filtro que sobrepõe um dado capacitor do arranjo matricial do sensor e absorver os demais componentes. Por exemplo, na Figura 1.9 (a), o filtro correspondente ao R cobre um capacitor qualquer do CCD, deixando a luz no comprimento de onda do vermelho ser registrada no sensor, enquanto a energia radiante, nos comprimentos de onda G e B, é consistentemente absorvida pela película.

Para gerar uma imagem com três camadas (no caso, RGB), com um tom de cinza em cada pixel, é necessário que os valores não registrados nas regiões de descontinuidade sejam interpolados com emprego de alguma técnica, por exemplo, vizinho mais próximo ou bilinear.

1.1.2 CÂMERAS DIGITAIS BASEADAS EM AQUISIÇÃO POR VARREDURA LINEAR

A ideia de recobrimento por varredura linear surgiu em uma tese de doutorado da Universidade de New Brunswick, no Canadá. Logo em seguida, o autor da tese patenteou o sistema concebido como conceito de câmeras digitais por varredura linear. Como descrito anteriormente, no XIX Congresso da ISPRS, foi apresentada à comunidade científica a câmera ADS40. A Figura 1.10 mostra uma câmera desse tipo instalada no interior de uma aeronave.



Figura 1.10 – Câmera ADS40 instalada no interior de uma aeronave. Fonte: Sandau, 2010

A câmera ADS40 foi o primeiro dispositivo imageador digital aerotransportado com desempenho compatível com as câmeras aéreas analógicas (filmes com formato 23 cm × 23 cm e resolução melhor do que 100 linhas por milímetro), em termos de resolução e capacidade de recobrimento. Essa câmera possui um conjunto de sensores lineares que registram energia eletromagnética no modo pancromático (estéreo) e de três a sete sensores multiespectrais (RGB e infravermelho); e realiza a amostragem da superfície física da Terra por meio de varreduras contínuas, obtidas por um conjunto de sensores com visada anterior, visada nadiral³ e visada posterior, podendo a varredura linear ser também acompanhada de sensores multiespectrais com sensibilidade controlada por filtros RGB e infravermelho, localizados próximo ao sensor com visada nadiral. A Figura 1.11 apresenta a varredura contínua e o esquema de varredura para cada tipo de sensor (modo pancromático e multiespectral).

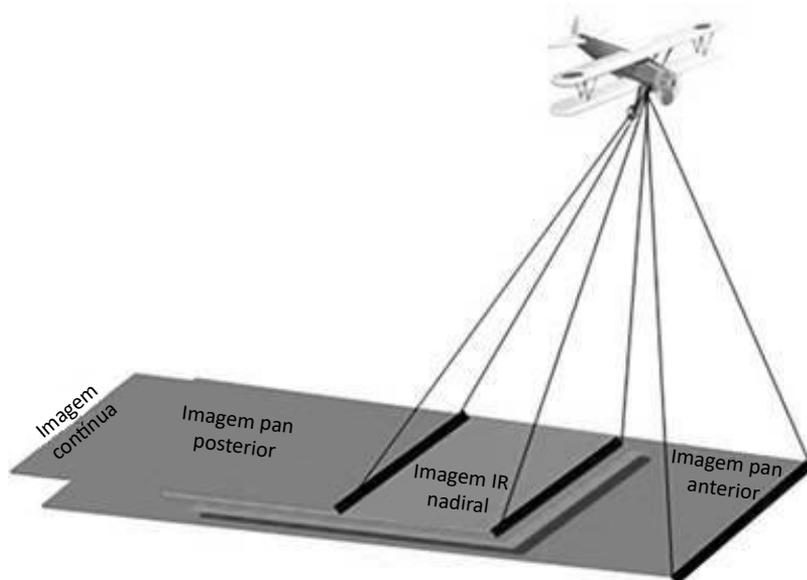


Figura 1.11 – Exemplo de visadas anterior, nadiral e posterior, ambas realizadas pela câmera digital ADS40.

A inclinação do sensor com visada anterior (modo pancromático) é de, aproximadamente, 28°, enquanto o sensor de visada posterior, também no modo pancromático, é de, aproximadamente, -14°, sendo ambas as inclinações relacionadas à visada nadiral. Isso faz com que se tenha uma imagem estereoscópica, o que possibilita a visualização tridimensional dos objetos contidos na cena, desde que empregados equipamentos visuais específicos, como os óculos 3-D. Já para os sensores multiespectrais, o ângulo de visada do sensor infravermelho posterior é de -2°, e a visada RGB anterior é em torno de 16°. Cada sensor contém duas matrizes de 12 mil pixels, separadas por uma distância de 3,5 µm, com pixels de dimensão 6,5 µm.

³Nadir é o ponto no terreno formado pela projeção ortogonal do centro perspectivo da câmera na superfície física da Terra.

O sistema óptico digital da ADS40 possui uma lente telecêntrica de distância focal 62,5 mm, FOV⁴ de 64°, diafragma com abertura f:4, uma faixa espectral entre 428 e 887 nanômetros (R: 608–662 nm; G: 533–587 nm; B: 428–492 nm; NIR1: 703–757 nm e NIR2: 833–887 nm), resolução de 150 linhas por mm, precisão geométrica de 1 μm, medida dinâmica de 12 bits, resolução radiométrica de 8 bits, capacidade de armazenamento de dados de 200 a 500 GB, estabilização térmica e barométrica de alta precisão, distorção radial simétrica em torno de 3 %, filtros de bandas e de interferência metálica, além de filtros para bandas RGB, mantendo a qualidade do campo visual do sensor. A Figura 1.12 mostra o sistema óptico digital da câmera ADS40.

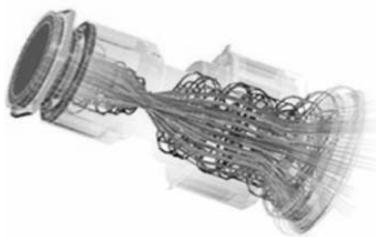


Figura 1.12 – Sistema óptico digital da câmera ADS40, com base em Sandau, 2010

Um sistema de divisão de feixes (filtro) do tipo tricoide foi desenvolvido pela *LH Systems* especialmente para a câmera ADS40. Esse sistema foi concebido com uma perda mínima de energia e garante que a energia eletromagnética refletida pelos objetos na superfície física seja detectada por três arranjos lineares sensíveis ao RGB, enquanto outro sensor disposto no plano focal da câmera captura as ondas eletromagnéticas correspondentes ao infravermelho próximo. A Figura 1.13 mostra o sistema de filtros tricoide desenvolvido para a câmera ADS40.

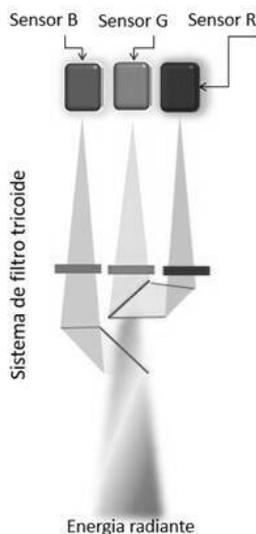


Figura 1.13 – Sistema de filtros tricoide desenvolvido para a câmera ADS40.

⁴Field of view. Corresponde ao ângulo de abertura do sensor.

Como a ADS40 gera imagens de faixas contínuas ao longo de cada linha de voo (sem emendas entre as informações registradas pelas diferentes visadas) e em diferentes perspectivas centrais, como resultado, é obtida uma imagem com projeção quase ortogonal. A Figura 1.14 mostra uma imagem digital obtida com a câmera ADS40 e a geometria perspectiva de cada visada do sensor.

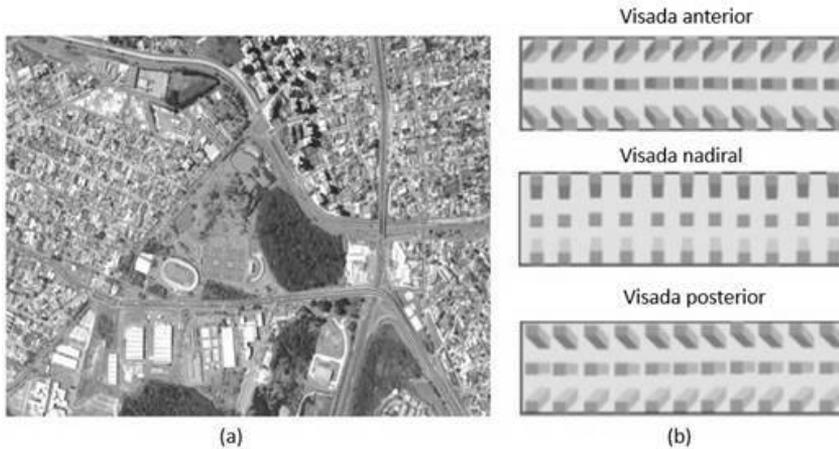


Figura 1.14 – Características da câmera ADS40: (a) imagem digital com projeção quase ortogonal; (b) efeito da perspectiva central por visada do sensor. Fonte: Esteio Engenharia e Aerolevamentos S.A. (cortesia).

Para os sensores de varredura linear, o sistema referencial da imagem tem o eixo x positivo na direção da Linha da imagem, e o eixo z coincide com o eixo óptico da câmera. A Figura 1.15 mostra o sistema referencial do sensor de varredura linear (*pushbroom*). Ainda para estabelecer um alinhamento entre a imagem e o sistema referencial da plataforma, o eixo z (z_r , na Figura 1.15) será paralelo, mas em direção oposta, ao eixo Z_p da plataforma.

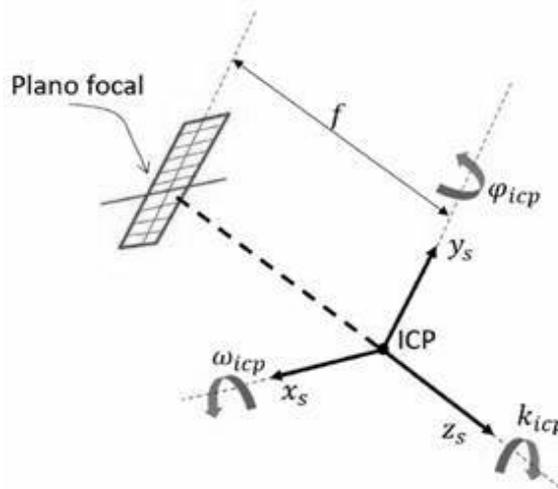


Figura 1.15 – Sistema referencial do sensor de varredura linear.

No sensor de varredura linear, os objetos contidos na superfície física da Terra são registrados por um sensor linear formado por uma linha de pixels dispostos no plano focal da câmera. A distância focal em unidade de pixels é calculada usando-se o valor máximo do ângulo de varredura (θ_{\max}) e o número total de pixels (N) em uma linha de varredura, como mostra a Figura 1.16.

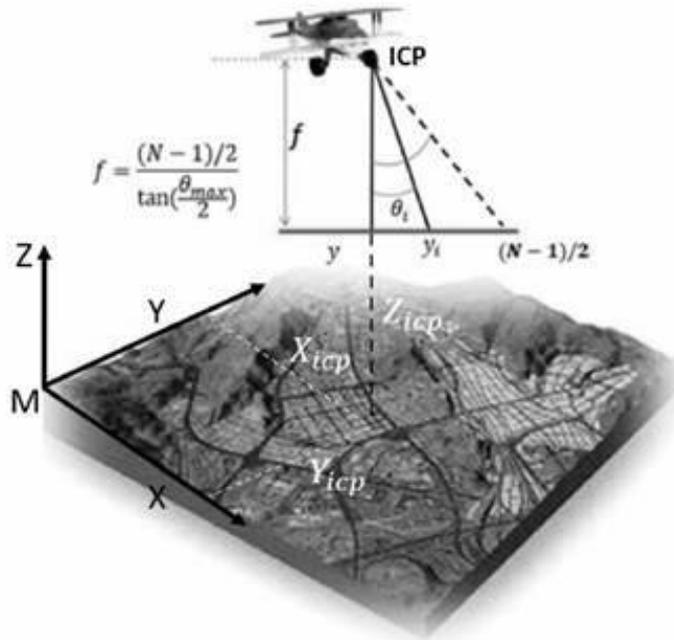


Figura 1.16 – Modelagem do sensor de varredura linear.

As coordenadas em pixel para uma linha do sensor de varredura linear são obtidas da forma que segue:

$$y_i = -\frac{N-1}{2} + i; x_i = 0, \text{ para } i = 0, \dots, N-1, \quad (1.12)$$

e a distância focal em unidade de pixels é dada por:

$$f = \frac{\frac{N-1}{2}}{\tan \frac{\theta_{\max}}{2}}. \quad (1.13)$$

A origem do sistema referencial do sensor de varredura linear (SCS) (x_s, y_s, z_s) é o centro perspectivo instantâneo (ICP) da câmera, como mostra a Figura 1.17. Dado que cada linha no terreno é registrada pelo sensor em um instante de tempo diferente (t), cada linha da imagem tem um ICP distinto, representado pelos parâmetros de orientação exterior ($X_{icp}(t), Y_{icp}(t), Z_{icp}(t), k_{icp}(t), \varphi_{icp}(t), \omega_{icp}(t)$). Em outras palavras, em sensores de varredura linear, uma faixa fotogramétrica é representada por linhas consecutivas, cada qual com seu próprio conjunto de parâmetros de posição e atitude do sensor.

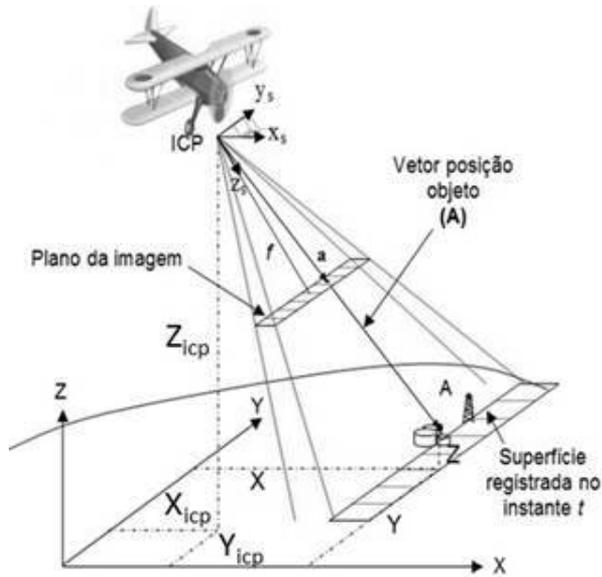


Figura 1.17 – Geometria de aquisição de dados do sensor *pushbroom*.

No sensor de varredura linear, o CCS é o sistema referencial adotado para a imagem formada por meio da composição das inúmeras linhas obtidas durante a aquisição dos dados. Note que a direção da Coluna corresponde à direção em y da matriz de imageamento, que é perpendicular à direção da varredura em x . Isso explica por que esse modo de imageamento é chamado de varredura linear. Neste caso, a origem é definida no centro de cada pixel que tem valores inteiros tanto em Coluna (s) quanto em Linha (ℓ). A Figura 1.18 mostra a relação genérica entre os sistemas SCS e CCS.

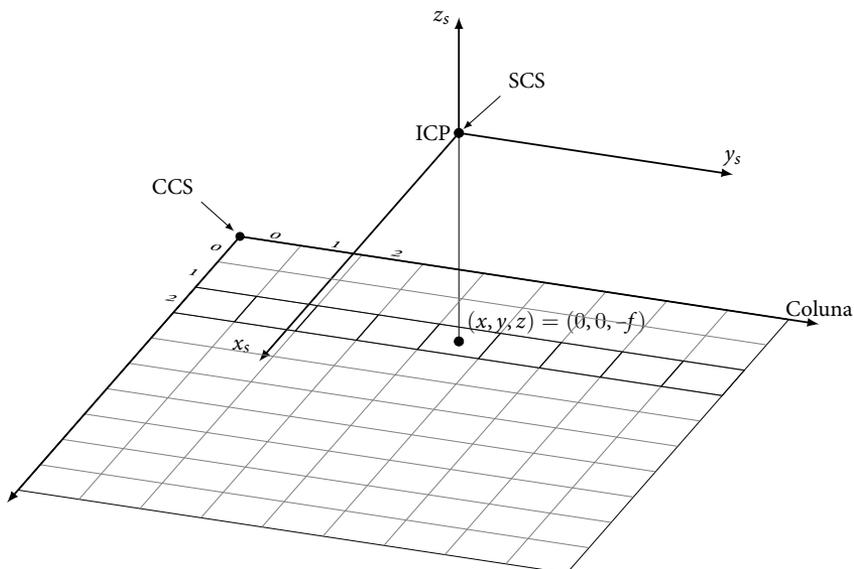


Figura 1.18 – Relação entre CCS e SCS.

Para transformar as coordenadas de um pixel coletado na imagem no sistema CCS para o sistema SCS, faz-se:

$$x_s(t) = \frac{\ell(t) - (td_x - (d_x/2))}{d_x} \quad (1.14)$$

$$y_s(t) = \left(s(t) - \left(\frac{d_y N_y}{2} \right) \right), \quad (1.15)$$

sendo $\ell(t)$, $s(t)$ Linha e Coluna em CCS, respectivamente, no instante de tempo (t) (iniciando com $\ell = 0$); d_x , dimensão linear do sensor CCD (tamanho do pixel na direção da varredura); d_y , tamanho do pixel na direção perpendicular à varredura; e N_y , o número de pixels na matriz.

Por exemplo, na Figura 1.18, se $d_x = 10 = d_y$, para $\ell(3)$, $s(3)$, a origem da linha de varredura é:

$$x_{s(3)} = 25 - \frac{3 \times 10 - \frac{10}{2}}{10} = \frac{25 - 25}{10} = 0$$

$$y_{s(3)} = 45 - 10 \times \frac{9}{2} = 45 - 45 = 0.$$

Mas, se o objeto medido corresponde ao pixel 9 para $t = 3$, com $\ell(3) = 28$, e $s(3) = 88$, então:

$$x_{s(3)} = 28 - 3 \times 10 - \frac{10}{2} = 0,3$$

$$y_{s(3)} = 88 - 10 \times \frac{9}{2} = 88 - 45 = 43.$$

Basicamente, o filtro de Bayer é uma solução muito comum em câmeras de pequeno e médio formato, resultando em imagens coloridas ou falsa-cor de 3–8 bits. Já para as câmeras digitais de grande formato, a questão da composição de cores é mais complexa. Elas registram imagens coloridas ou falsa-cor usando o sistema de calibração, enquanto as imagens virtuais pancromáticas são texturizadas com melhor resolução radiométrica, baseada no resultado da composição das cores. Por outro lado, as câmeras baseadas em aquisição por varredura linear produzem imagens coloridas a partir de sistemas de feixe óptico (por exemplo, o tricoide), que garantem uma coincidência perfeita das bandas no vermelho, verde e azul. Recentemente, foi lançado o sistema de feixes tetracoide, que é estendido para o espectro do infravermelho. No entanto, a menos que todos os comprimentos de onda sejam tratados rigorosamente dessa forma, o registro das imagens não pode ser alcançado até que o fluxo de trabalho atinja a etapa de geração de ortoimagens. As configurações mais recentes das câmeras ADS40 permitem que ortoimagens falsa-cor sejam geradas sem o uso das bandas pancromáticas. Em geral, há um consenso de que as imagens digitais fornecem resolução radiométrica melhor que os filmes fotográficos, em termos de relação sinal-ruído e resolução espectral, de modo que as especificações do produto final podem ser atendidas a partir de um tamanho de pixel maior do que seria exigido com fotografias digitalizadas.

1.1.3 CÂMERAS DIGITAIS BASEADAS EM AQUISIÇÃO POR ARRANJO

Por razões tecnológicas e econômicas, ainda não é possível criar sensores CCD/CMOS de tamanho e resolução apropriados para transferir a tecnologia de tomada de fotografias disponível nas câmeras analógicas, incluindo as questões do quadro focal de 23 cm × 23 cm e o alto grau de resolução espacial. Na prática, quanto maior o quadro focal da câmera, menor o número de imagens a serem adquiridas, melhor a resolução espacial da imagem e maior a área de cobertura da superfície física por tomada de imagem. Admitindo que vários sensores podem ser combinados para resolver o problema citado, algumas companhias passaram a construir sistemas de mapeamento aéreo baseados em aquisição por arranjo matricial ou multicâmeras, como o sistema DMC fabricado pela ZI e Intergraph. Os sistemas multicâmeras são formados por quatro ou mais sensores, que registram energia eletromagnética no modo pancromático e nos modos RGB e infravermelho. A Figura 1.19 mostra um exemplo de imageamento de uma câmera digital multissensor.

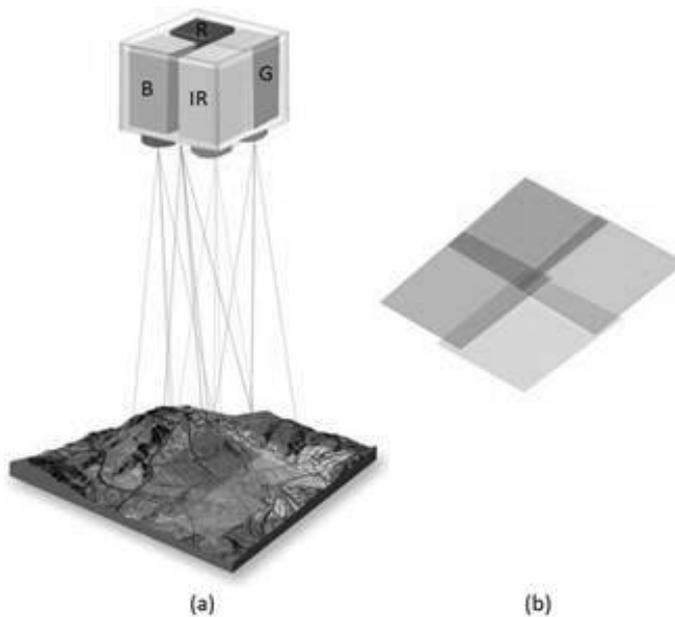


Figura 1.19 – Exemplo de aquisição de uma câmera digital multissensor: (a) esquema de aquisição multissensor; (b) resultado obtido.

Como pode ser notado na Figura 1.19 (a), um conjunto de sensores quadro a quadro registram, simultaneamente, a energia eletromagnética ao longo da trajetória de voo. O resultado é uma imagem digital (Figura 1.19 (b)) formada pela mosaicagem das imagens obtidas por meio de cada um dos sensores digitais ambarcados no sistema de mapeamento, que é capaz de cobrir uma porção maior da superfície imageada, quando comparado com os sistemas convencionais.

A imagem resultante é denominada imagem sintética e envolve três etapas: a etapa de calibração de câmeras com a estimativa dos parâmetros de montagem do sistema, a etapa de formação da imagem virtual e a etapa de balanceamento de cores.

Sem querer esgotar o assunto, ainda sugere-se a leitura dos seguintes trabalhos: Cramer, 2006; Eckardt et al., 2000; Fricker et al., 2001; Hinsken et al., 2002; Honkavaara e Markelin, 2007; Sandau et al., 2000; Zhu et al., 2004 e Tianen et al., 2003.

1.1.4 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS E ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE MONTAGEM

O problema de calibração de câmeras consiste na estimativa dos parâmetros de orientação interior ($f, x_0, y_0, k_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, A, B$), e ela deve ser executada por algum método de laboratório, usando-se goniômetros ou por meio de métodos fotogramétricos baseados em ajustamento por feixes de raios de luz perspectivo. O último propicia soluções mais robustas, uma vez que as lentes de uma câmera sofrem influências de mudança de pressão, temperatura, umidade, entre outros fatores que ocorrem durante a aquisição das imagens.

Como descrito anteriormente, os parâmetros de orientação interior (POI) representam a geometria interna da câmera no instante da aquisição da imagem e são obtidos com alto nível de acurácia. As câmeras métricas possuem a característica de alta estabilidade desses parâmetros, ao contrário das câmaras não métricas.

Na prática, o processo de calibração de um sistema multicâmeras também deve envolver a determinação dos parâmetros de orientação exterior das imagens (que correspondem à posição do CP X_0, Y_0, Z_0 no momento da tomada das imagens e às rotações ω, φ, κ entre o referencial fotogramétrico e o referencial de mapeamento no espaço objeto) e os parâmetros de montagem do sistema ($r_{Cr}^{INS}, R_{Cr}^{INS}, r_{ci}^{cr}, R_{ci}^{cr}$).

A relação funcional entre os parâmetros citados pode ser feita por meio das equações de colinearidade. As equações de colinearidade estabelecem que um ponto no espaço objeto $P(X, Y, Z)$, seu correspondente no espaço imagem $p(x', y')$ e o CP da câmera formam uma reta no espaço tridimensional, ou seja, devem ser colineares, como mostra a Figura 1.20

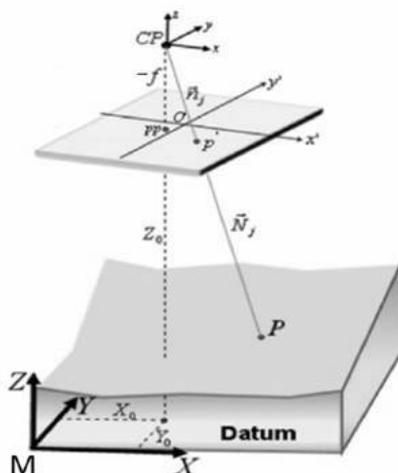


Figura 1.20 – Geometria do modelo de colinearidade.

Na Figura 1.20, f denota a distância focal calibrada da câmera; $WXYZ$ representa o referencial de mapeamento no espaço-objeto; \vec{n}_i é o vetor posição imagem; \vec{N}_i é o vetor posição no espaço-objeto; X_0, Y_0, Z_0 representam os parâmetros de translação do CP da câmera; p' é um ponto na imagem com fotocoordenadas referenciadas ao sistema com origem no centro da imagem x', y' ; e $P = [X, Y, Z]^T$ denota um ponto no espaço-objeto correspondente, ou seu homólogo p' no espaço imagem.

O vetor posição fotografia $\vec{n}_i = \overrightarrow{CPp'}$ (ver Figura 1.20) é dado pela expressão que segue:

$$\vec{n}_i = (x' - x_0, y' - y_0, -f). \quad (1.16)$$

As fotocoordenadas referenciadas no sistema fotogramétrico e corrigidas das distorções das lentes são obtidas por:

$$x'_c = x' - x_0 - (\partial x + \delta_{dx}) \quad (1.17)$$

$$y'_c = y' - y_0 - (\partial y + \delta_{dy}). \quad (1.18)$$

Os cossenos diretores obtidos por meio do vetor \vec{n}_i , normalizados, são expressos pela equação:

$$\vec{n}_i = \frac{x'_c}{d} \vec{k} + \frac{y'_c}{d} \vec{l} + \frac{(-f)}{d} \vec{m}, \quad (1.19)$$

sendo $d = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2 + (-f)^2}$.

Para que o vetor posição imagem \vec{n}_i (coordenadas no referencial fotogramétrico) seja paralelo ao vetor posição no espaço objeto \vec{N}_i (referenciado ao sistema de coordenadas do espaço objeto e transladado em relação a posição do CP), é necessário aplicar um fator de escala (λ) à matriz de rotação inversa ($R_{k\phi\omega}^{-1}$), como segue:

$$\vec{N}_i = \lambda R_{k\phi\omega}^{-1} \vec{n}_i, \quad (1.20)$$

sendo $\vec{N}_i = [X - X_0, Y - Y_0, Z - Z_0]^T$.

Dada a relação matemática entre os vetores posição no espaço imagem \vec{n}_i e no espaço objeto \vec{N}_i , a transformação inversa é dada por:

$$\vec{n}_i = \lambda^{-1} R_{k\phi\omega}^1 \vec{N}_i. \quad (1.21)$$

Sabendo-se que a matriz R é ortogonal, ou seja, $R_{k\phi\omega}^T = R_{k\phi\omega}^{-1}$, pode-se prosseguir com o desenvolvimento da equação de colinearidade na forma direta, como segue:

$$\vec{n}_i = \lambda^{-1} R_{k\phi\omega}^T \vec{N}_i \quad (1.22)$$

Matricialmente, a Equação (1.22) pode ser escrita por:

$$\begin{bmatrix} x' - x_0 - (\partial x + \delta_{dx}) \\ y' - y_0 - (\partial y + \delta_{dy}) \\ -f \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad (1.23)$$

sendo m_{11}, \dots, m_{33} os elementos da matriz $R_{k\phi\omega}^T$ dada em função dos ângulos de Euler (ω, φ, k) .

Desenvolvendo a Equação (1.23), escreve-se a seguinte relação:

$$\begin{cases} x' - x_0 - (\partial x + \delta_{dx}) = \lambda^{-1} [m_{11} (X - X_0) + m_{12} (Y - Y_0) + m_{13} (Z - Z_0)] \\ y' - y_0 - (\partial y + \delta_{dy}) = \lambda^{-1} [m_{21} (X - X_0) + m_{22} (Y - Y_0) + m_{23} (Z - Z_0)] \\ -f = \lambda^{-1} [m_{31} (X - X_0) + m_{32} (Y - Y_0) + m_{33} (Z - Z_0)] \end{cases} \quad (1.24)$$

Na Equação (1.24), o cálculo de λ^{-1} é inconveniente, pois introduz uma variável desnecessária, aumentando a ordem do sistema a ser solucionado. Por isso, pode-se eliminar a necessidade de normalizações manipulando algebricamente a Equação (1.24) e eliminando λ^{-1} por meio da divisão da 1ª Equação pela 3ª Equação, e da 2ª Equação pela 3ª Equação, resultando nas equações de colinearidade na forma direta com parâmetros adicionais, a saber:

$$\begin{cases} x' - x_0 - (\partial x + \delta_{dx}) = -f \frac{[m_{11} (X - X_0) + m_{12} (Y - Y_0) + m_{13} (Z - Z_0)]}{[m_{31} (X - X_0) + m_{32} (Y - Y_0) + m_{33} (Z - Z_0)]} \\ y' - y_0 - (\partial y + \delta_{dy}) = -f \frac{[m_{21} (X - X_0) + m_{22} (Y - Y_0) + m_{23} (Z - Z_0)]}{[m_{31} (X - X_0) + m_{32} (Y - Y_0) + m_{33} (Z - Z_0)]} \end{cases} \quad (1.25)$$

As equações de colinearidade na forma direta podem ser usadas em métodos de calibração de câmeras, isto é, no método de laboratório, no método de multicolimador, no método do goniômetro ou nos métodos de campos. A principal diferença entre os métodos de calibração citados está na forma como as imagens são obtidas e na forma como o espaço objeto é imageado.

Atualmente, é comum encontrar sistemas de mapeamento móvel, aerotransportado ou terrestre, que integram sensores de posicionamento do Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) e de navegação inercial (*Inertial Navigation System*, INS) para determinar, continuamente, o deslocamento espacial (posição) e a orientação (atitude) do sensor em relação ao sistema referencial de mapeamento (referencial terrestre).

Nesse caso, os POIs, os PoEs e os parâmetros de montagem do sistema (r_C^{INS} e R_C^{INS}) podem ser estimados simultaneamente usando-se os dados derivados da integração GNSS/INS. Essa técnica é conhecida como *orientação integrada de sensores*, e a equação de colinearidade modificada é o modelo empregado para estimativa dos parâmetros. O leitor deve perceber que as notações e regras usadas aqui para definir a relação espacial entre os referenciais do INS e da câmera são feitas da seguinte forma:

- $M_{\text{para}}^{\text{de}}$ — denota a matriz de transformação de um sistema referencial A (designado como “de”) para outro sistema referencial B (designado como “para”). Por exemplo, M_C^{INS} denota a matriz de transformação do sistema referencial da câmera para o sistema referencial do INS;

- as matrizes de transformação de coordenadas devem satisfazer a seguinte regra: $M_C^B M_C^A = M_C^A$, em que A , B e C representam diferentes sistemas referenciais.

O que realmente se quer dizer por uma matriz de transformação é que, se um vetor qualquer $v = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ é representado em um sistema referencial XYZ , e o mesmo vetor $u = [u_u \ u_v \ u_w]^T$ é representado em um sistema referencial UVW , tem-se que:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = M_{XYZ}^{UVW} \begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \end{bmatrix}. \quad (1.26)$$

A Figura 1.21 mostra a geometria do modelo de orientação integrada de sensores que são adotados para representar a relação de transformação entre o sensor INS e as câmeras de um sistema multicâmeras, sendo, nesse caso, dado um exemplo para um sistema de mapeamento com quatro câmeras integradas com os sensores GNSS/INS.

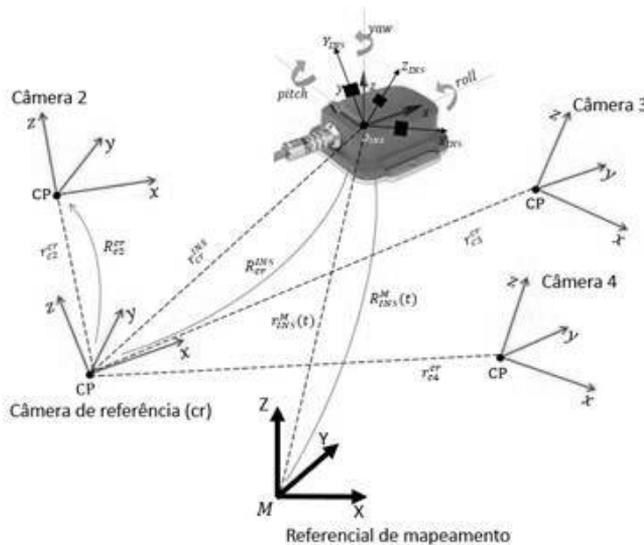


Figura 1.21 – Geometria do modelo de colinearidade modificado.

Na Figura 1.21, as coordenadas de um ponto (r_P^M) qualquer, no referencial de mapeamento terrestre (M), resultam da soma de três vetores após serem aplicadas as transformações necessárias para se compatibilizarem os sistemas referenciais, como segue:

$$r_P^M = r_{INS}^M(t) + R_{INS}^M(t) \left[r_{cr}^{INS} + R_{cr}^{INS} r_{ci}^{cr} + \lambda_i R_{cr}^{INS} R_{ci}^{cr} p'_i \right], \quad (1.27)$$

sendo, $r_{INS}^M(t)$ o vetor de coordenadas 3-D da origem do sistema referencial do INS, derivado do processo de integração GNSS/INS, levando-se em consideração a transformação entre a origem do sistema INS e o centro de fase da antena GNSS, $R_{INS}^M(t)$ é a matriz de rotação que relaciona o sistema de coordenada terrestre com o sistema de

coordenadas do INS (*yaw, pitch, roll*); r_{cr}^{INS} e R_{cr}^{INS} são os parâmetros de montagem de sistema que compreendem o deslocamento linear e a orientação relativa, respectivamente, entre a origem do sistema de coordenadas do INS e a origem do sistema referencial fotogramétrico da câmera de referência; r_{ci}^{cr} é o deslocamento linear entre a origem do sistema da câmera de referência e o CP da *i*-ésima câmera; R_{ci}^{cr} é a orientação relativa entre o referencial da câmera de referência e do sistema referencial da *i*-ésima câmera; e λ_i é o fator de escala, p'_i as fotocoordenadas no referencial com origem no centro da imagem.

Como o desalinhamento angular ($\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, $\Delta\kappa$) entre os eixos primário (X_{INS}), secundário (Y_{INS}) e terciário (Z_{INS}) do INS e da câmera digital de referência é considerado valor pequeno, pode-se utilizar a seguinte matriz de rotação:

$$R_{cr}^{INS} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa & -\Delta\varphi \\ -\Delta\kappa & 1 & \Delta\omega \\ \Delta\varphi & -\Delta\omega & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.28)$$

O mesmo raciocínio é válido para o desalinhamento angular ($\Delta\omega'$, $\Delta\varphi'$, $\Delta\kappa'$) entre os eixos primário, secundário e terciário da câmera digital de referência e a *i*-ésima câmera do sistema:

$$R_{ci}^{cr} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa' & -\Delta\varphi' \\ -\Delta\kappa' & 1 & \Delta\omega' \\ \Delta\varphi' & -\Delta\omega' & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.29)$$

Considerando-se que o deslocamento linear entre a origem do sistema de coordenadas do INS e a origem do sistema referencial fotogramétrico da câmera de referência (r_{cr}^{INS}), e o deslocamento linear entre a origem do sistema da câmera de referência e o CP da *i*-ésima câmera (r_{ci}^{cr}) são escritos da seguinte forma matricial:

$$r_{cr}^{INS} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}; \quad (1.30)$$

$$r_{ci}^{cr} = \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{bmatrix}, \quad (1.31)$$

a Equação (1.27) pode ser escrita na seguinte forma matricial:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_P^M &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{INS}^M (t) + \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}_{INS}^M (t) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa & -\Delta\varphi \\ -\Delta\kappa & 1 & \Delta\omega \\ \Delta\varphi & -\Delta\omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{bmatrix} \\ &+ \lambda_i \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa & -\Delta\varphi \\ -\Delta\kappa & 1 & \Delta\omega \\ \Delta\varphi & -\Delta\omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa' & -\Delta\varphi' \\ -\Delta\kappa' & 1 & \Delta\omega' \\ \Delta\varphi' & -\Delta\omega' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i - x'_o - (\partial_x^i + \delta_{dx}^i) \\ y'_i - y'_o - (\partial_y^i + \delta_{dy}^i) \\ -f_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.32)$$

sendo $f_i, x_o^i, y_o^i, \partial_x^i, \partial_y^i, \delta_{dx}^i, \delta_{dy}^i$ os POI de cada câmera envolvida no sistema e r_{11}, \dots, r_{33} , os elementos da matriz $R_{INS}^M(t)$ dada em função dos ângulos de físicos do INS (*roll, pitch, yaw*).

Novamente, com a finalidade de eliminar o fator de escala da Equação (1.32), foram divididas a 1ª Equação e a 2ª Equação pela 3ª Equação, resultando nas equações de colinearidade na forma direta modificada, a saber:

$$x'_i = x_o^i - f_i \frac{F_x(r_I^M, r_{INS}^M(t), R_{INS}^M(t), r_{cr}^{INS}, R_{cr}^{INS}, r_{ci}^{cr}, R_{ci}^{cr})}{F_z(r_I^M, r_{INS}^M(t), R_{INS}^M(t), r_{cr}^{INS}, R_{cr}^{INS}, r_{ci}^{cr}, R_{ci}^{cr})} + \left(\partial_x^i + \delta_{dx}^i \right) \quad (1.33)$$

$$y'_i = y_o^i - f_i \frac{F_y(r_I^M, r_{INS}^M(t), R_{INS}^M(t), r_{cr}^{INS}, R_{cr}^{INS}, r_{ci}^{cr}, R_{ci}^{cr})}{F_z(r_I^M, r_{INS}^M(t), R_{INS}^M(t), r_{cr}^{INS}, R_{cr}^{INS}, r_{ci}^{cr}, R_{ci}^{cr})} + \left(\partial_y^i + \delta_{dy}^i \right). \quad (1.34)$$

Como procedimento prático, sugere-se montar um bloco fotogramétrico com cinco faixas fotogramétricas sob um campo de calibração com variações abruptas do terreno com voos cruzados, pontos de controle bem distribuídos e imagens contendo sobreposições longitudinal e lateral de 80 % e 55 %, respectivamente, e em duas alturas de voo distintas, para se minimizar a correlação entre os POIs e os PoEs, como mostra a Figura 1.22

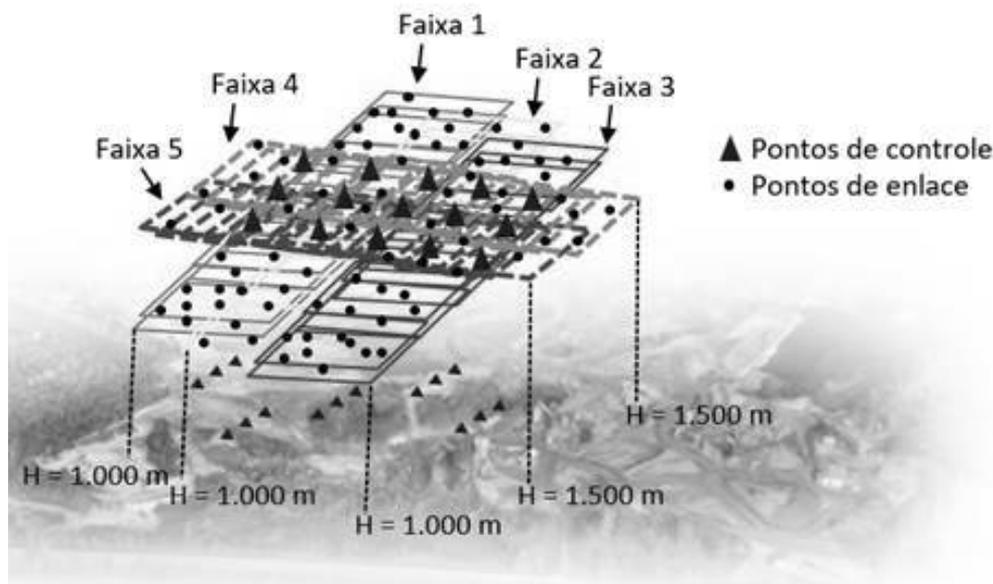


Figura 1.22 – Exemplo de configuração de voo para o processo de calibração em serviço.

No exemplo da Figura 1.22, é apresentado um conjunto de fotocoordenadas de n pontos de enlace, extraídos automaticamente no bloco de imagens de i câmeras, e m pontos de controle com coordenadas tridimensionais, coletados com GNSS, que devem ser usados para estimar os PoE do bloco de i imagens e as coordenadas tridimensionais, dos pontos de enlace no referencial de mapeamento adotado. Também devem ser estimados os POI das i câmeras e os parâmetros de montagem do sistema usando-se

o ajustamento por feixes de raio de luz perspectivo, junto com o modelo paramétrico do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), a saber:

$$X = - \left(A^T P A \right)^{-1} \left(A^T P L \right), \quad (1.35)$$

sendo X o vetor das correções dos parâmetros, A representa a matriz das derivadas parciais das observações em função dos parâmetros; L é calculado em função de L_0 (vetor das observações aproximadas) e L_b (vetor das observações); e P é a matriz dos pesos das observações.

Já a precisão estimada para cada parâmetro é obtida pela raiz quadrada do elemento correspondente da diagonal principal da matriz variância-covariância dos parâmetros Σ_X . Vale lembrar que, no emprego de tal formulação, não são atribuídos pesos, o que equivale a atribuir peso unitário (assim, arbitrado) a cada observação; dessa forma, a análise estatística está subordinada a tais pesos arbitrários. Essa matriz é calculada pela seguinte equação:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 \left(A^T P A \right)^{-1}, \quad (1.36)$$

sendo $\hat{\sigma}_0^2$ a variância a posteriori dada em função do número de observações e parâmetros envolvidos no procedimento.

Outra alternativa para se resolver o problema do fator λ_i na Equação (1.32) é aplicar a intersecção fotogramétrica em uma injunção de condição baseada em um modelo ponto a plano. Isso pode ser feito substituindo-se a Equação (1.27) na expressão a seguir:

$$\left[a_i \quad b_i \quad c_i \right]^T r_P^M - d = 0, \quad (1.37)$$

sendo a_i, b_i, c_i os parâmetros dos planos extraídos no espaço objeto, e d , a distância da origem do referencial de mapeamento ao plano.

Nesse caso, o modelo matemático apresentado na Equação (1.37) minimiza a discrepância dos feixes de luz correspondentes de cada ponto de enlace, injuncionando todos os pontos fotogramétricos que pertencem a uma superfície plana, como telhados de edificações imageados em um modelo digital de elevação (MDE) ou em uma nuvem de pontos 3-D.

O método combinado é aplicado em modelos funcionais que ajustam observações e parâmetros. Os modelos aplicados a esse método são formados por equações implícitas do tipo, como apresentado na Equação (1.37), a saber:

$$F(X_a, L_a) = 0. \quad (1.38)$$

O modelo combinado do MMQ é obtido por meio de linearização por expansão da série de Taylor, tomando-se apenas os dois primeiros termos da série, como segue:

$$AX + BV + W = 0, \quad (1.39)$$

sendo $A = \frac{\partial F}{\partial X_a} |_{X_0, L_b}$, $B = \frac{\partial F}{\partial L_a} |_{X_0, L_b}$, $W = F(X_0, L_b)$, $V = AX + L_b$, X é o vetor das correções, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados e L_b é o vetor em que são inseridas as observações.

Assim, tem-se a seguinte solução para as equações normais:

$$X = \left[A^T (B P B^T)^{-1} A \right]^{-1} A^T (B P B^T)^{-1} W. \quad (1.40)$$

Uma vez que os parâmetros de montagem do sistema estiverem em função do tempo (t), ou seja, considerando-se que um INS fornece dados na frequência de 100 Hz, então, serão medidas 100 observações por segundo, o que corresponde a 100 estimativas por segundo de $R_{\text{INS}}^M(t)$ e $r_{\text{INS}}^M(t)$. Na prática, para se obterem os valores de $R_{\text{INS}}^M(t)$ e $r_{\text{INS}}^M(t)$, é calculada a média do conjunto de medidas oriundas do INS, assim como seus desvios-padrão.

1.1.4.1 TRANSFORMAÇÕES ENTRE ÂNGULOS DE EULER (ω, φ, κ) E DE NAVEGAÇÃO (ROLL, PITCH, YAW)

Usualmente, os dados de posição, velocidade e orientação são obtidos usando-se sensores integrados GNSS/INS embarcados em plataformas móveis. O referencial de coordenadas da plataforma é definido em relação ao seu centro de navegação inercial, que é fixado na estrutura da plataforma. Os eixos do sistema da plataforma são definidos como: eixo primário x_b é positivo na direção de deslocamento da plataforma, que implica o movimento angular de rolagem (*roll*) da plataforma; o eixo secundário y_b é positivo na direção de estibordo (asa), implicando o movimento de arfagem (*pitch*) da plataforma, de tal modo que o plano $x_b y_b$ é horizontal quando a plataforma está estabilizada; e o eixo terciário z_b é positivo na direção do nadir, propiciando o movimento de deriva (*yaw*) do sensor, como mostrado na Figura 1.23.

Outro aspecto relevante é que dados espaciais adquiridos por sistemas móveis de mapeamento, embarcados com sensores integrados GNSS/INS, devem ser referenciados ao sistema terrestre adotado, que é estacionário e independente do tempo, conhecido como referencial geocêntrico, cuja origem é o centro de massa da Terra (ECEF), com o plano X-Y coincidindo com a Linha do Equador, onde o eixo X faz intersecção, na direção positiva, com o Meridiano de Greenwich; o eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra, com sentido positivo na direção ao Polo Norte; o eixo Y forma o plano Equatorial e é perpendicular ao eixo X, tornando o sistema dextrogiro (ver Figura 1.23).

O sistema *North-East-Down* (NED), ou Norte-Leste-baixo, é um referencial local que é definido por suas coordenadas *Earth-centered, Earth-fixed* (ECEF), ou seja, “centradas e fixadas na Terra”. Muitas vezes, esse sistema é fixado na plataforma e move-se com sua estrutura. O sistema NED é definido de tal forma que os eixos N e E formam um plano tangente à superfície da Terra em sua posição atual, assumindo um modelo *World Geodetic System 1984* (WGS84) da Terra. Como apresentado na Figura 1.23, o sistema NED contém três eixos ortogonais, nos quais o eixo N aponta para Norte verdadeiro; o eixo *Down* aponta para o interior da Terra; e o eixo E completa o sistema dextrogiro, apontando para Leste. A Figura 1.23 mostra os sistemas referenciais ECEF e NED.

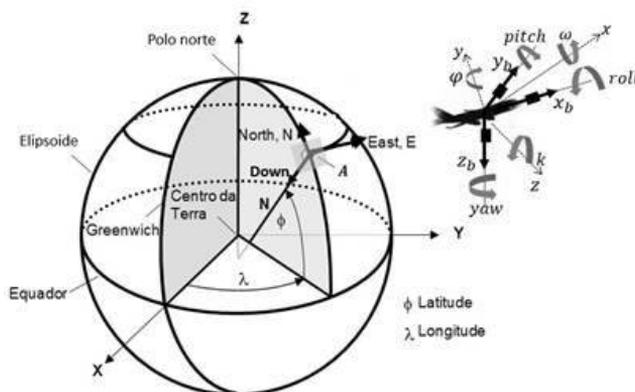


Figura 1.23 – Sistemas referenciais ECEF e NED, com base em Hull, 2007.

Como mostrado na Figura 1.23, os ângulos físicos de atitude da plataforma, obtidos pelo INS (*roll*, *pitch*, *yaw*), não coincidem com o sistema referencial fotogramétrico e com os ângulos de Euler (ω , φ , κ). Em outras palavras, o sistema do sensor INS pode não estar perfeitamente alinhado ao corpo da plataforma, e, por isso, exigirá uma rotação do sistema para alinhar os dois referenciais. Então, há a necessidade de se transformarem os ângulos físicos do INS para um sistema de ângulos matemáticos que podem ser definidos de formas distintas, isto é, o sistema BLUH e o sistema PATB. A escolha do sistema depende da maneira como o INS foi montado na plataforma. A Figura 1.24 mostra a diferença de orientação entre os dois sistemas.

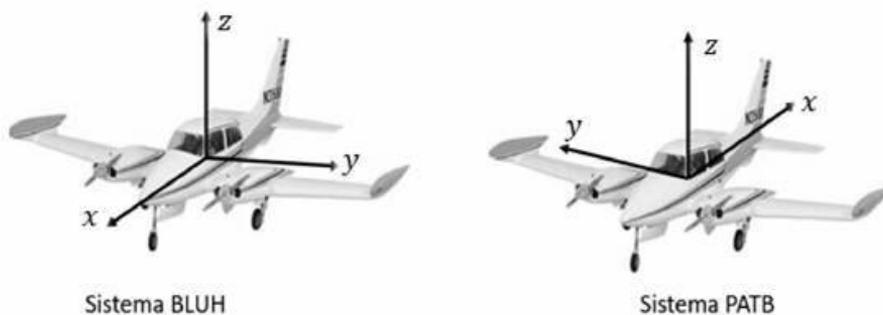


Figura 1.24 – Definição de orientação do sistema referencial para o sistema BLUH e PATB.

As transformações do sistema de navegação fornecidas pelo INS para o sistema referencial fotogramétrico, utilizando-se o sistema BLUH e o sistema PATB, são obtidas da forma como segue:

$$\begin{aligned}
 C_{E\text{BLUH}}^B &= R_z(\kappa) \times R_x(\omega) \times R_y(\varphi) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \kappa & \text{sen } \kappa & 0 \\ -\text{sen } \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen } \omega \\ 0 & -\text{sen } \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\text{sen } \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \\
 & \quad (1.41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{E \text{ PATB}}^B &= R_x(\omega) \times R_y(\varphi) \times R_z(\kappa) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\text{sen } \omega \\ 0 & \text{sen } \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \text{sen } \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\text{sen } \kappa & 0 \\ \text{sen } \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{1.42}$$

Dessa forma, há as seguintes matrizes de rotação para os sistemas BLUH e PATB, a saber:

$$C_{E \text{ BLUH}}^B = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \varphi + \text{sen } \kappa \text{sen } \omega \text{sen } \varphi & \text{sen } \kappa \cos \omega & -\cos \kappa \text{sen } \varphi + \text{sen } \kappa \text{sen } \omega \cos \varphi \\ -\text{sen } \kappa \cos \varphi + \cos \kappa \text{sen } \omega \text{sen } \varphi & \cos \kappa \cos \omega & \text{sen } \kappa \text{sen } \varphi + \cos \kappa \text{sen } \omega \cos \varphi \\ \cos \omega \text{sen } \varphi & -\text{sen } \omega & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \tag{1.43}$$

$$C_{E \text{ PATB}}^B = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\text{sen } \kappa \cos \varphi & \text{sen } \omega \\ \cos \omega \text{sen } \kappa + \text{sen } \omega \text{sen } \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \text{sen } \omega \text{sen } \varphi \text{sen } \kappa & -\text{sen } \omega \cos \varphi \\ \text{sen } \omega \text{sen } \kappa - \cos \omega \text{sen } \varphi \cos \kappa & \text{sen } \omega \cos \kappa + \cos \omega \text{sen } \varphi \text{sen } \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}. \tag{1.44}$$

Conhecendo-se os ângulos fornecido pelo INS, a transformação pode ser calculada utilizando-se os elementos da matriz $C_{E \text{ BLUH}}^B$ para o sistema BLUH, e os elementos da matriz $C_{E \text{ PATB}}^B$ para o sistema PATB. A Tabela 1.1 apresenta a formulação necessária para se executarem tais transformações.

Tabela 1.1 – Ângulos de Euler obtidos com as matrizes de rotação BLUH e PATB

Sistema BLU	Sistema PATB
$\varphi = \text{arctg } \frac{c_{31}}{c_{33}}$	$\varphi = \text{arctg } \frac{c_{13}}{\sqrt{c_{23}^2 + c_{33}^2}}$
$\omega = \text{arctg } \frac{-c_{32}}{\sqrt{c_{12}^2 + c_{22}^2}}$	$\omega = \text{arctg } \frac{-c_{23}}{c_{33}}$
$\kappa = \text{arctg } \frac{C_{12}}{C_{22}}$	$\kappa = \text{arctg } \frac{-c_{12}}{c_{11}}$

Na Tabela 1.1, c_{11}, \dots, c_{33} são elementos das matrizes de rotação $C_{E \text{ BLUH}}^B$ ou $C_{E \text{ PATB}}^B$. Ainda para se converterem os ângulos *roll*, *pitch*, *yaw* para os ângulos de Euler ω, φ, κ , devem ser considerados diferentes sistemas de coordenadas e rotações.

Devido à diferença de orientação dos eixos dos sistemas de coordenadas do INS e da câmera, duas matrizes de rotação adicionais são necessárias para se obterem sistemas de orientação equivalentes:

$$T_{b \text{ BLUH}}^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, T_{b \text{ PATB}}^B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, T_n^E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \tag{1.45}$$

sendo as matrizes $T_{b \text{ BLUH}}^B$ e $T_{b \text{ PATB}}^B$ usadas para se aplicar a transformação do sistema INS para o sistema referencial fotogramétrico, e vice-versa.

A matriz T_n^E é usada para a transformação do sistema de navegação (sistema local) para o sistema referencial de mapeamento, e vice-versa. No caso de não ser utilizado um sistema de coordenadas local para o sistema referencial de mapeamento, deve ser empregada uma matriz de rotação adicional para compensar os efeitos da curvatura terrestre e do desvio de meridiano:

$$C_n' = \begin{bmatrix} 1 & e_v & -e_e \\ -e_v & 1 & e_n \\ e_e & -e_n & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.46)$$

sendo $e_n = -(\lambda_i - \lambda_o) \cos \varphi$, $e_e = (\phi_i - \phi_o)$ e $e_v = (\lambda_i - \lambda_o^{\text{UTM}}) \text{sen } \phi$, λ_i e ϕ_i coordenadas geográficas; λ_o e ϕ_o coordenadas geográficas da origem do sistema UTM (Universal Transversa de Mercator); e λ_o^{UTM} , o meridiano central do sistema UTM.

Dessa forma, para cada imagem (i), as seguintes matrizes devem ser calculadas para os ângulos de atitude *roll*, *pitch*, *yaw*, para as coordenadas geográficas (λ_i e ϕ_i) e para as coordenadas geográficas da origem do sistema plano (λ_o e ϕ_o):

$$C_b^{n_i} = f(\phi_i, \theta_i, \psi_i) C_e^{n_o} = f(\phi_o, \lambda_o) C_e^{n_i} = f(\phi_i, \lambda_i) \quad (1.47)$$

$$C_n' = F(\phi_i, \lambda_i, \phi_o, \lambda_o, \lambda_o^{\text{UTM}}). \quad (1.48)$$

Portanto, haverá cinco transformações, a saber:

1. $C_b^e = \left(C_e^{n_i}\right)^T C_b^{n_i}$: Transformação do sistema b para o sistema e
2. $C_b^e = \left(C_e^{n_i}\right)^T C_b^{n_i}$: Transformação do sistema b para o sistema n_o
3. $C_b^{n_o} = C_e^{n_o} C_b^e$: Transformação do sistema b para o sistema n'
4. $C_b^{n'} = C_n' C_b^{n_o}$: Transformação do sistema n para o sistema B
5. $C_E^B = T_n^B \left(T_n^E\right)^T$: Transformação do sistema E para o sistema B

Combinando todas as matrizes de transformação, tem-se a seguinte expressão:

$$C_E^B = T_b^B \left(C_n' C_e^{n_o} \left(C_e^{n_i} \right)^T C_b^{n_i} \right)^T \left(T_n^E \right)^T \quad (1.49)$$

Com a Equação (1.49), é possível calcular os ângulos de Euler ω , φ , κ de cada imagem. Além dos sistemas de coordenadas do INS e da câmera terem definições diferentes, os eixos desses sistemas de coordenadas devem ser montados quase paralelamente um ao outro.

1.1.4.2 FORMAÇÃO DA IMAGEM VIRTUAL

Admitindo-se que o conjunto de POEs do bloco de i imagens e de POIs das i câmeras, bem com o conjunto de parâmetros de montagem do sistema, foram devidamente estimados pelo MMQ, pode-se formar a imagem virtual que representará o conjunto de imagens do sistema de mapeamento móvel em cada posição de aquisição dos dados.

Esta obra se destina a ser um material o qual aborda conceitos das principais técnicas de aquisição de dados espaciais, que usam sensores de imageamento e alguns algoritmos de processamento de imagens e nuvens de pontos 3D.

Projetado a fim de atender profissionais das ciências exatas e da terra, este livro é útil, também, para pesquisadores das áreas de engenharia, arquitetura, geografia e a outros especialistas que se debruçam sobre disciplinas que exploram aplicações práticas de mapeamento.

Os pré-requisitos para o uso conveniente deste livro são relativamente modestos: que o leitor tenha alguma familiaridade com elementos de álgebra linear, ajustamento de observações e linguagem de programação. Certos capítulos e algoritmos exigem algum conhecimento de conceitos mais avançados de álgebra linear ou de quatérnios, contudo, o texto é estruturado de forma que o leitor compreenda o seu conteúdo sem depender de uma fundamentação teórica mais avançada.



www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

Princípios de Aquisição e Processamento dos Dados Espaciais

Daniel Rodrigues dos Santos, Henrique Cândido de Oliveira

ISBN: 9786555065596

Páginas: 336

Formato: 24 x 17 cm

Ano de Publicação: 2022
