

Determinação da posição e atitudes de VANT por fotogrametria

Sidney Andrade de Lima^{1,2}
Leandro Roberto^{1,2}
Elcio Hideiti Shiguemori¹
Hermann Johann Heinrich Kux²
Jorge Luis Nunes e Silva Brito³

¹ Instituto de Estudo Avançados - IEAv
Caixa Postal 6044 - 12.228-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil
{sidneysal, leandrolr, elcio}@ieav.cta.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12.227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{sidney.lima, leandro.roberto}@inpe.br, hermann@dsr.inpe.br

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, 20.550-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
jsilvabr@gmail.com

Abstract. This paper describes the concepts of positioning by photogrammetry for Unmanned Aerial Vehicle (UAV), in the frame of project Processing of Images in Real-Time (PITER) developed at the Institute for Advanced Studies (IEAv). This project intends to navigate using georeferenced orbital or aerial images compared to photographs taken during the flight. In order to enable navigation through images, this technique is very important for the autonomous flight of a UAV, since usually these aircraft navigate using the Global Navigation Satellite System (GNSS) associated with an Inertial Navigation System (INS), however, The GNSS system is subject to jamming and spoofing interference, which at any time can be enabled to degrade the accuracy of the system. Due to that, it is impossible to navigate because the INS is a standalone system that during navigation time degrades position accuracy, to accumulate errors in measurements of acceleration and speed of the UAV. Because of that, the INS has its coordinated corrected from time to time by GNSS, in this case the navigation system is dependent on GNSS. However, to perform this replacement it is necessary to calculate the coordinates and attitudes of the perspective center of the camera and its respective accuracies, using control points to appear as well defined in geo-referenced image, the image taken by the onboard camera and performing the correlation between respective points in real time, in order to perform the replacement when the INS coordinate accuracy is smaller than the coordinate obtained by photogrammetry. In this context, the replacement of the GNSS allows the autonomous navigation of UAV.

Palavras-chave: positioning, photogrammetry, UAV, spatial resection, remote sensing, posicionamento, fotogrametria, VANT, ressecação espacial, sensoriamento remoto.

1. Introdução

Para que um VANT chegue, de forma autônoma, num local desejado, inicialmente deve-se conhecer em que posição ele se encontra, em um determinado tempo, para poder comandar atitude e acelerações neste veículo. Assim o posicionamento de uma aeronave é uma informação de grande importância para a navegação, pois sem ela não é possível navegar de forma automática.

Uma aplicação que merece destaque é a navegação de VANT, ou também conhecidos por Drones ou Aeronaves Remotamente Pilotada (ARP), por reconhecimento automático de imagem, ou seja, determinação de sua posição exclusivamente a partir de feições em imagens geradas por um sensor a bordo conforme Shiguemori *et al* (2008).

Para a navegação de um VANT são necessárias as coordenadas tridimensionais e os ângulos de Euler ou de atitude, sendo que usualmente estas informações são obtidas, respectivamente, através do GNSS e do INS. Os sistemas inerciais são autônomos e determinam sua posição no espaço através de acelerômetros e giroscópios. No entanto, com o passar do tempo o cálculo da posição e da atitude utilizando somente o INS tornam-se imprecisas, pois o INS acumula erros conforme Ambrósio (2010).

Uma das abordagens para navegação autônoma é o emprego de técnicas de reconhecimento automático do terreno em imagens obtidas por sensores ópticos embarcados e gerando informações de posicionamento em substituição aos sistemas GNSS. Este projeto é alinhado com a política nacional de defesa do Ministério da Defesa brasileiro, que prevê independência tecnológica no setor aeroespacial.

As coordenadas dos VANT são usualmente corrigidas através do GNSS. Quando as coordenadas do INS em um dado tempo possuem uma incerteza maior do que as coordenadas informadas pelo GNSS, o INS é reinicializado com as coordenadas do GNSS. No entanto, isso faz com que o VANT seja dependente do GNSS, perdendo seu objetivo inicial de ser autônomo. Essa solução é resolvido com filtro de Kalman, conforme Gemael (1994).

Para resolver este problema de autonomia, uma das abordagens é o emprego de imagens georreferenciadas de sensores orbitais ou aerotransportadas da região de interesse e compará-las com imagens obtidas no momento do voo. Ao se encontrar pontos em comum nas duas imagens, pode-se determinar a posição do VANT de forma autônoma.

Neste caso para a determinação das coordenadas tridimensionais e dos ângulos de atitude do VANT são necessárias a utilização dos conceitos de fotogrametria, que através das equações de colinearidade e ajustamento por Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), pode-se obter as coordenadas e a atitude do VANT e suas respectivas acurácias, que são necessárias para se determinar em que momento as coordenadas obtidas pelas imagens serão utilizadas para corrigir o INS.

Este artigo pretende apresentar a modelagem matemática necessária para a resolução das equações de colinearidade e conseqüentemente a determinação das coordenadas e atitude, com suas respectivas acurácias, das coordenadas do centro perspectivo de uma câmara fotográfica embarcada num VANT, assim como seus ângulos de atitude, no momento da tomada de uma imagem aérea.

2. Metodologia de Trabalho

Uma imagem se comporta com uma matriz, onde são definidas linhas, colunas e conteúdo informativo para a interseção de cada uma destas linhas e colunas, que são chamados de “pixels”. Assim uma matriz se comporta como um sistema cartesiano e o “pixel” como um ponto, associado a valores de tons de cinza.

2.1 O Problema das Distorções Geométricas em Imagens Fotográficas.

Há inúmeras fontes de erro em imagens fotográficas. Tais fontes são devidas tanto às condições ambientais, quanto ao sensor. Em fotogrametria utiliza-se um modelo matemático para interligar três sistemas de coordenadas, a saber: da imagem digital (linha e coluna), das marcas fiduciais, relativo à calibração da câmara (milímetros), e o sistema de coordenadas de terreno (E, N, Z), expresso em metros.

A complexidade do modelo matemático deve ser compatível com a precisão requerida para o trabalho fotogramétrico. No entanto, uma imagem bruta contém distorções geométricas decorrentes da influência de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos ao sensor. Assim, para obtenção de informações métricas confiáveis a partir de imagens é recomendável que o sensor seja calibrado. Segundo Mikhail (2001), a principal tarefa no processo fotogramétrico é

estabelecer uma rigorosa relação geométrica entre a imagem e o objeto, para extrair informações do objeto unicamente através da imagem

2.2 Linearização de Funções

Para a resolução de sistemas de equações por matrizes é necessária a determinação da matriz dos coeficientes (A). No caso das equações não-lineares, para a determinação de tal matriz, é necessária linearização do modelo matemático. Esta linearização é feita com a utilização das aproximações por séries de Taylor.

Dada uma função não linear $f(X)$, a linearização por série de Taylor consiste em calcular por iterações, um valor para as correções aos valores iniciais do vetor das incógnitas. A solução inicia-se por uma aproximação de $f(X)$ no ponto $X = X_0$. Para tanto, calcula-se a $f(X_0)$, ou coeficiente linear da equação da reta, somado-o a uma primeira aproximação pela reta tangente, que é a derivada primeira $f'(X_0)$, ou ainda o coeficiente angular da equação da reta. Este valor deve ser multiplicado por $(X - X_0)$, conforme ilustra a Figura 2.2.

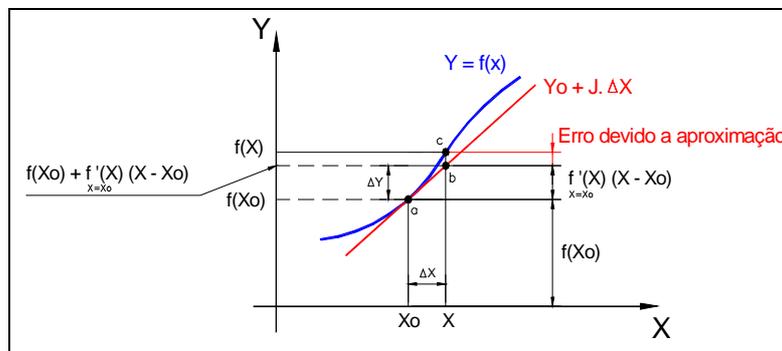


Figura 01 – Representação gráfica da linearização de uma função de um parâmetro aproximação por série de Taylor.

Assim, dado um X próximo de X_0 , tem-se que o valor tenderá a convergir para $f(X)$. São então feitas interações, até que o valor inicial X_0 seja igual ao valor final X , dentro de uma determinada precisão.

$$f(X) = f(X_0) + f'(X_0).(X - X_0) \quad (01)$$

2.3 Resolução de Sistemas de Equações não Lineares

O estudo da resolução de sistemas de equações não lineares é de grande importância para o entendimento do cálculo dos parâmetros de transformação de um sistema de coordenadas cartesianas para outro qualquer, conhecendo-se apenas coordenadas de pontos homólogos em ambos os sistemas de origem e destino. Por exemplo, podem-se calcular os parâmetros de transformação entre o espaço imagem e objeto, para mais informações vide Lima (2006).

Quando o número de equações for maior do que o número de incógnitas, há um sistema possível e indeterminado. Para resolver este tipo de sistema, utiliza-se o MMQ, que estima um valor para as incógnitas de modo a minimizar a soma dos quadrados dos desvios ou resíduos em relação à média. Podendo ser resolvido pelo método matricial, conforme as equações matriciais abaixo, para mais informações vide Gemael (1994).

$$\Delta X = (J^T.P.J)^{-1}.J^T.P.L \quad (02)$$

$$X_{chp} = X_0 + \Delta X \quad (03)$$

$$\Sigma X_{chp} = \sigma_{chp} . (J^T.P.J)^{-1} \quad (04)$$

onde “ ΔX ” é o vetor dos valores que somados ao valor inicial aproxima do valor das incógnitas; “ L ” é o vetor dos valores observados no espaço objeto; “ P ” é a matriz dos pesos

das observações; “ X_o ” é o vetor dos valores iniciais aproximados das incógnitas; “ X_{chp} ” é o vetor dos valores das incógnitas ajustados; “ ΣX_{chp} ” é a matriz variância covariância dos parâmetros ajustados e; “ σ_{chp} ” é a variância da unidade de peso a posteriori. Mais detalhes podem ser encontrados em Gemael (1994).

Considerando a teoria de aproximação por séries de Taylor e a resolução de sistemas não lineares pelo MMQ, pode-se construir a matriz Jacobiana, que é a matriz das derivadas parciais da função em relação a cada parâmetro que se deseja determinar (equação 05). Nesse caso são os ângulos de atitude “ ω ”, “ ϕ ”, “ κ ”, ou seja, as rotações em torno dos eixos X , Y , Z respectivamente. “ E_o ”, “ N_o ”, “ Z ” são as coordenadas aproximadas do centro perspectivo da câmara, calculadas para $X \cong X_o$.

$$J := \begin{pmatrix} \frac{d}{d\phi} F1(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\omega} F1(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\kappa} F1(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \dots & \dots & \dots \\ \frac{d}{d\phi} G1(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\omega} G1(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\kappa} G1(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \dots & \dots & \dots \\ \frac{d}{d\phi} F2(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\omega} F2(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\kappa} F2(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{d}{d\phi} F6(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\omega} F6(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\kappa} F6(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \dots & \dots & \dots \\ \frac{d}{d\phi} G6(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\omega} G6(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \frac{d}{d\kappa} G6(\phi, \omega, \kappa, E_o, N_o, Z_o) & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (05)$$

2.4 Equações de Colinearidade

A transformação projetiva é uma transformação com três dimensões. Esta transformação geométrica leva um sistema de coordenadas tridimensionais em outro e vice-versa. O modelo matemático que traduz esta transformação é denominado de equação de colinearidade Wolf (1974).

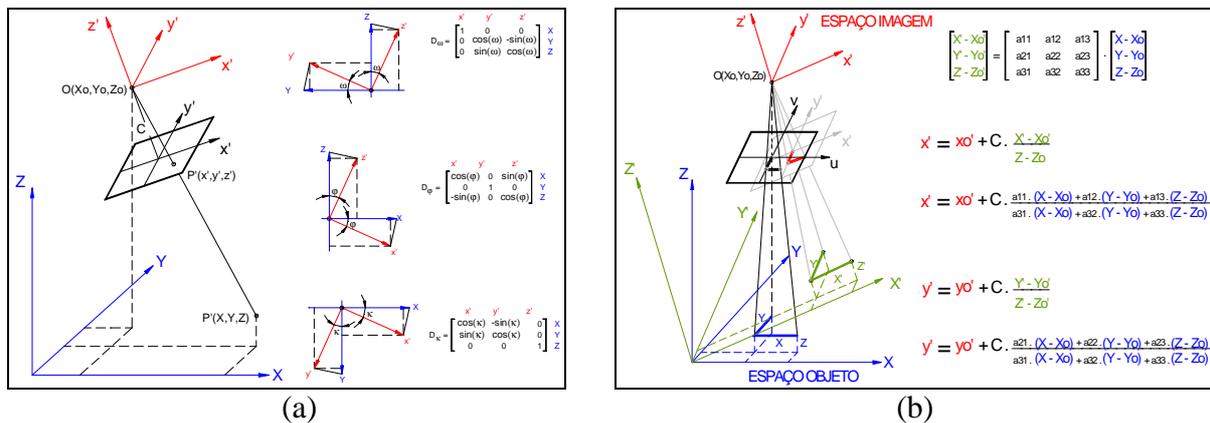


Figura 2 - a) Colinearidade entre o espaço-imagem e o espaço-objeto e as matrizes de rotação e b) Montagem das equações de colinearidade a 7 parâmetros: 1 escala, 3 rotações e 3 translações.

As equações de colinearidade fundamentam-se no conceito de que o espaço objeto, o centro perspectivo (objetiva da câmara) e o espaço imagem estão interligados por uma reta, como é demonstrado na Figura 2. O sistema de coordenadas fotogramétricas é definido da seguinte maneira: a origem coincide com o centro perspectivo; os eixos Ox e Oy são paralelos aos seus homônimos no sistema fiducial e orientado da mesma forma; e o eixo Oz é perpendicular ao plano do negativo e forma com os outros dois um sistema dextrógiro de coordenadas, vide Kraus (1993).

Pela Figura 2a) visualizam-se as 3 rotações existentes entre um sistema de coordenadas no espaço-imagem e do espaço-objeto. Estas rotações são definidas pelos parâmetros denominados *phi* (ϕ), *omega* (ω) e *kappa* (κ); sendo respectivamente as rotações em torno dos eixos X, Y e Z. Estas 3 rotações definem a matriz de rotação apresentada na Equação 05.

$$M = Rz(\kappa) \cdot Ry(\phi) \cdot Rx(\omega) = \begin{pmatrix} m11 & m12 & m13 \\ m21 & m22 & m23 \\ m31 & m32 & m33 \end{pmatrix} \quad (05)$$

Os elementos da matriz de rotação são calculados a partir da multiplicação matricial entre as matrizes de rotação, $Rz(\kappa)$, $Ry(\phi)$ e $Rx(\omega)$ apresentadas na Figura 2a), resultando nos elementos da matriz de rotação da apresentados na Tabela 01.

Tabela 01 - Elementos da matriz de Rotação

$m11 = \cos(\phi) \cdot \cos(\kappa)$	$m12 = \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\kappa)$	$m13 = \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\kappa)$
$m21 = -\cos(\phi) \cdot \sin(\kappa)$	$m22 = \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) - \sin(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\kappa)$	$m23 = \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\kappa)$
$m31 = \sin(\phi)$	$m32 = -\sin(\omega) \cdot \cos(\phi)$	$m33 = \cos(\omega) \cdot \cos(\phi)$

Na Figura 2b) visualizam-se 4 parâmetros, a saber: um fator de escala (C), e 3 translações ($X-X_0$), ($Y-Y_0$) e ($Z-Z_0$) entre os sistemas. Pode-se dizer que esta transformação é do tipo isogonal, pois possui uma única escala para os 3 eixos dos dois sistemas. Do exposto, montam-se as equações de colinearidade que ligam um sistema de coordenadas de 3 dimensões a outro também com 3 dimensões. Obtêm-se assim as equações 06 e 07, as quais são não-lineares. Mais informações estão disponíveis em Andrade e Wolf (1974).

$$x' = (x - x_0) = C \cdot \frac{m11(X - X_0) + m12(Y - Y_0) + m13(Z - Z_0)}{m31(X - X_0) + m32(Y - Y_0) + m33(Z - Z_0)} \quad (06)$$

$$y' = (y - y_0) = C \cdot \frac{m21(X - X_0) + m22(Y - Y_0) + m23(Z - Z_0)}{m31(X - X_0) + m32(Y - Y_0) + m33(Z - Z_0)} \quad (07)$$

Nas equações acima, “ x' ” e “ y' ” são as coordenadas ajustadas no sistema das marcas fiduciais; “ x ” e “ y ” são as coordenadas dos pontos de apoio no sistema de imagem analógica; “ x_0 ” e “ y_0 ” são as coordenadas ajustadas do centro perspectivo no sistema das marcas fiduciais; “ X ”, “ Y ” e “ Z ” são as coordenadas de terreno dos pontos de apoio; “ X_0 ”, “ Y_0 ” e “ Z_0 ” são as coordenadas ajustadas do centro perspectivo no sistema de terreno; “ C ” é a escala entre os sistemas; e “ m_{ij} ” são os elementos da matriz de rotação (Tabela 01).

2.5 Levantamentos de Dados

Para a realização dos testes foram utilizadas duas imagens, a primeira na cidade do Rio de Janeiro - RJ, na região do UERJ/Maracanã, conforme mostra a Figura 3a); a segunda imagem refere-se à cidade de São José dos Campos - SP, conforme pode ser visto na Figura 3b). A imagem de SJC foi obtida com o VANT DJI Phantom 4 e câmara modelo FC330.

Para a determinação dos pontos foram planejados o levantamento com GNSS dos pontos base, respectivamente, no terraço do prédio da UERJ e em SJC, no interior da área gramada, conforme apresentado na Figura 3. O posicionamento estático da base foi realizado para pós-processamento diferencial com as estações da RBMC. Assim, os pontos de controle puderam ser levantados por posicionamento estático no caso da UERJ e estático rápido no caso de SJC com pós-processamento em relação aos pontos base, obtendo-se em ambos os casos acurácia sub-centimétrica.

A imagem da Figura 3a) refere-se à cidade do Rio de Janeiro – RJ, na região do UERJ/Maracanã. Esta imagem foi obtida por uma câmara métrica convencional Zeiss RMK A

15/23 (Figura 4a), com distância focal calibrada de 153,528mm e quadro de 230mm x 230 mm. A imagem em questão foi digitalizada com resolução de 300DPI e 2895 x 2838 pixels. A imagem da Figura 3b) foi obtida de uma área em SJC com o VANT DJI Phantom 4 e uma câmera Sony modelo FC330, com distância focal nominal de 3,61mm e sensor de 6,16 mm x 4,62 mm, com resolução da imagens de 4000 x 3000 pixels. (Figura 4b).

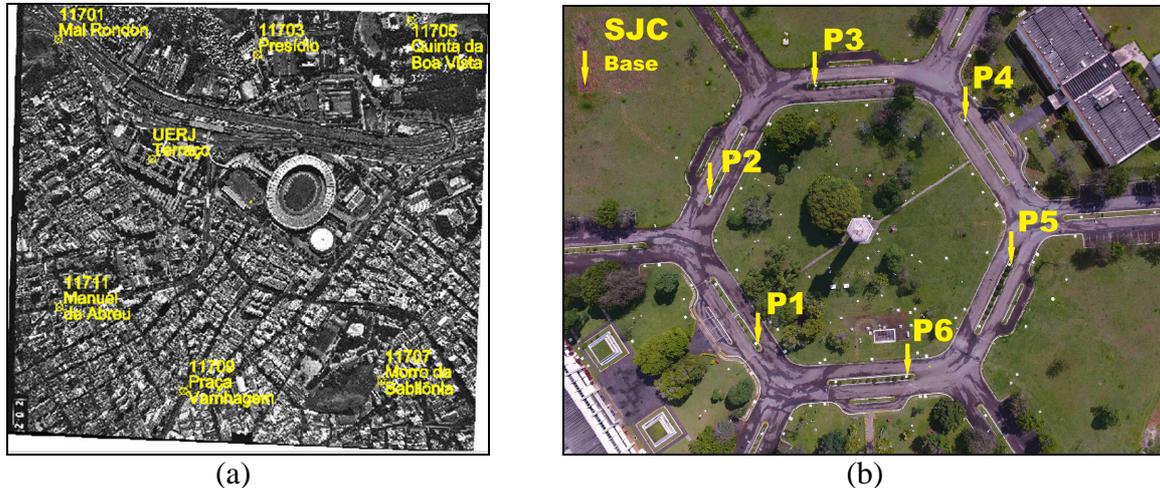


Figura 3. a) Imagem analógica da UERJ e b) Imagem digital de SJC obtida de com o VANT da DJI Phantom 4.

Como o objetivo deste trabalho é a determinação das coordenadas e dos ângulos de atitude da câmera no espaço, a distância focal (C) utilizada no caso da imagem da UERJ foi a distância focal calibrada, retirada do respectivo certificado de calibração da câmera. Para a imagem obtida pelo Phantom 4 foi utilizada a distância focal nominal informada pelo fabricante DJI.

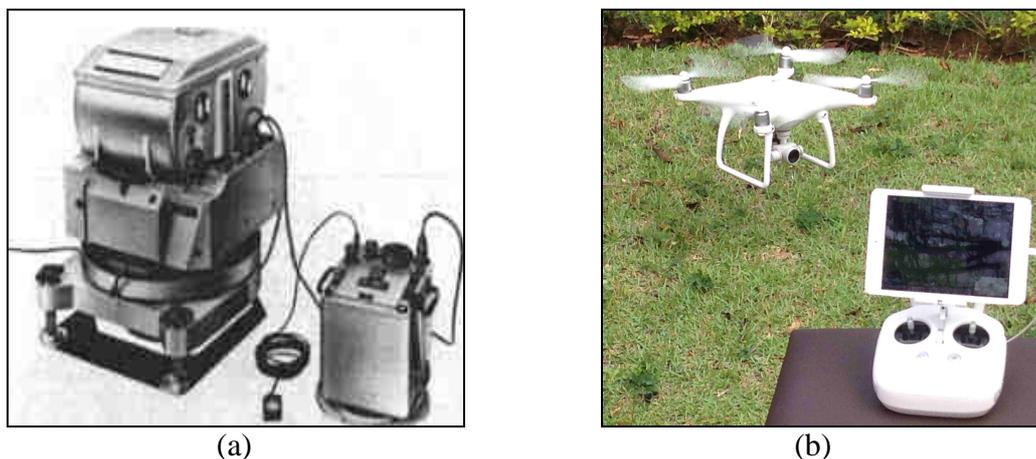


Figura 4. a) Câmera RMK A 15/23 da Carl Zeiss e b) Phantom 4 da DJI e câmera FC330.

O processamento diferencial dos pontos de controle, levantados com os receptores GNSS de dupla frequência L1 e L2, foram realizados na UERJ com o receptor Z12 da Ashtech e processado no software Ashtech Solutions, no modo estático. No IEAv utilizou-se o receptor GTR-G2 da TechGEO e o software GTR Processor v2.92 para o pós-processamento dos dados. Os cálculos da ressecção espacial e análises estatísticas foram feitos no software Mathcad 13 e Excel 2010.

O voo sobre a UERJ foi realizado a uma altura média de 1.300m, com Elemento de Resolução no Terreno (ERT) ou *Ground Sample Distance* (GSD) médio de 0,67m. O voo do

IEAV foi realizado a uma altura média de 120m, com GSD médio de 0,037m. Nos dois casos foram utilizados 06 pontos de controle GNSS para o cálculo da ressecção espacial, vide Equações 02 e 03.

Com 3 pontos não colineares conhecidos no terreno já é possível resolver o sistema de equações de colinearidade, já que se conhece a distância focal das câmaras e para cada ponto temos duas equações para a construção do sistema, ou seja, temos um sistema possível e determinado de 6 equações e 6 parâmetros, a saber: ϕ , ω , K , E_o , N_o e Z_o , conforme pode ser visto nas Equações 6 e 7. No entanto, para se calcular a variância desses parâmetros é necessário um número maior do que 3 pontos e assim poder realizar um ajustamento por MMQ. Por esse motivo, foram levantados os 6 pontos e o sistema foi resolvido conforme as Equações 02, 03 e 04. Para maiores informações, vide Gemael (1994).

Para a aproximação inicial das coordenadas E_o , N_o e Z_o foram utilizadas as médias das coordenadas dos 06 pontos e no caso da altitude foram somadas à altura média de vôo como estimativa inicial. Posteriormente, foram realizadas as aproximações por séries de Taylor, onde em cada interação o valor dos parâmetros se aproxima do valor real, sendo, o valor calculado substituído pela estimativa inicial e o procedimento das interações repetido até que a coordenada calculada fique igual à coordenada de estimativa inicial aproximada.

3. Resultados e Discussão

Para a solução do sistema de equações utilizando aproximação por séries de Taylor foram necessárias 04 interações no caso da área-teste da UERJ e 06 interações no caso de SJC. O resultado da solução do sistema de equações com as coordenadas em metros e ângulos de atitude em graus decimais, com suas respectivas variâncias (σ), conforme Tabela 02.

Tabela 02 – Coordenadas e ângulos de atitude das fotografias da UERJ e de SJC.

Foto	E_o (m) σE_o (m)	N_o (m) σN_o (m)	Z_o (m) σZ_o (m)	ϕ° $\sigma \phi^\circ$	ω° $\sigma \omega^\circ$	K° σK°
UERJ	681.318,939 3,459	7.465.080,007 4,064	1.318,226 1,115	-0,8749° 0,1228°	0,7208° 0,1376°	-1,7824° 0,0481°
IEAv	412.387,381 0,290	7.428.326,906 0,287	802,066 0,058	0,5832° 0,1244°	-0,3217° 0,1230°	-52,9589° 0,0271°

Com base nos resultados dos cálculos pode verificar-se que na área-teste de SJC obteve-se acurácia maior do que com o cálculo da imagem sobre a UERJ. Isto se deve principalmente pela diferença entre o GSD das duas imagens, que é função da resolução da câmara e da altitude de vôo. Portanto verifica-se que quanto melhor o GSD da imagem melhor é a acurácia do posicionamento da câmara. No entanto, para os ângulos de atitude da câmara, foi constatado que os dois casos não ocorreram grandes variações na acurácia.

Com o intuito de verificar o erro das coordenadas informadas pelo Phantom 4 da DJI e as coordenadas calculadas a partir da imagem do IEAv, usando os conceitos de fotogrametria, foi realizada a diferença entre esses dois conjuntos de coordenadas, obtendo-se os seguintes valores: $\Delta E_o=10,05m$; $\Delta N_o=4,24m$; e $\Delta Z_o=53,39m$. As coordenadas informadas pelo Phantom 4 da DJI são as informações obtidas do sistema de posicionamento embarcado no VANT, as quais não informam sua acurácia. Como o GPS do Phantom 4 não tem correção diferencial e as coordenadas calculadas por fotogrametria possuem um desvio padrão baixo, conforme apresentado na Tabela 02, é esperado que esta diferença seja proveniente do sistema de posicionamento do Phantom 4.

Cabe ressaltar que, para o cálculo das coordenadas e dos ângulos de atitude, o sistema deve ser capaz de identificar os mesmos alvos nas duas imagens. A primeira, que serve de referência, deve ser ortorretificada e georreferenciada, para que se possa obter as coordenadas com acurácia compatível; a ortoimagem deve ter o respectivo modelo numérico de elevações a ela associado, para que se possa obter as altitudes. A segunda, que é obtida no momento do

vôo, pode ter resoluções e contrastes diferentes, fato que dificulta o reconhecimento correto dos pontos de controle e, por sua vez, podem degradar a acurácia do cálculo.

4. Conclusões

Com base nos resultados pode-se constatar que é possível determinar, por ressecção espacial, as coordenadas e ângulos de atitude de uma câmara no espaço, com suas respectivas variâncias. Assim é possível navegar utilizando imagens com acurácia próxima à do GNSS, para tal deve-se configurar o sistema de navegação por imagem com características compatíveis com a acurácia necessária para o sistema de navegação requerido para cada projeto. Existem várias maneiras de se calcular a ressecção espacial, sendo que, para o propósito de navegação, deve ser escolhido o método que seja mais adequado para funcionar embarcado e em tempo real.

Assim, para obtenção de informações métricas confiáveis a partir de imagens, nas diversas aplicações, é essencial que o sensor seja calibrado geometricamente, ou seja, a câmara deve ter seus parâmetros conhecidos, a saber: distância focal e os parâmetros de distorção das lentes, bem como a defasagem do ponto principal, a não-ortogonalidade e afinidade do sensor, dentre outros. Com isso pode-se melhorar a acurácia do posicionamento. Conforme demonstrado neste artigo, é perfeitamente factível a substituição do sistema GNSS/INS por um sistema de navegação baseado em imagem integrado a um INS, de modo que o VANT possa navegar de forma autônoma.

Agradecimentos

Agradeço a minha esposa Cristiane, meus filhos Arthur e Sophia pela compreensão nas horas perdidas de lazer para confecção deste trabalho. Ao EMAER. Ao diretor do IEAv, o Cel Av Follador, na pessoa de quem agradeço aos demais orientadores do IEAv, por me incentivar na realização do mestrado. Ao meu orientador o professor Dr. Hermann, do INPE, por disponibilizar tempo na revisão deste trabalho e atenção na orientação das disciplinas do mestrado. Ao professor Ph.D. Nunes Brito, da UERJ, pelas excelentes aulas ministradas e a orientações que foram fundamentais para o desenvolvimento deste artigo.

Referências Bibliográficas

- Ambrósio, F. V. **Uma ferramenta para a simulação e validação de sistemas de navegação inercial**. p. 141. Dissertação (Mestrado Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba, 2010.
- Andrade, J.B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. cap. 01-06, p.01-200.
- Brito, J.L.N.S. e Coelho, L.C.T.F. **Projeto E-FOTO, Estação fotogramétrica Digital Educacional**. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte – MG, 2003.
- Brito, J.L.N.S.; Coelho, L.C.T.F. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. cap. 01-07.
- Gemael, C. **Introdução ao ajustamento de observações aplicações geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. cap.01-18, p.11-265.
- Kraus, K.; Waldhäusl, P. **Photogrammetry Fundamentals and Standard Processes**. Germany: Ferd. Dümmlers Verlag . Bonn, 1993. cap. 02, p.04-28.
- Lima, S.A. e Brito, J.L.N.S. **Estratégias para Retificação de Imagens Digitais**. In: COBRAC 2006 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 2006, UFSC, Florianópolis, Anais. Artigos, n. 90, p. 1-14, 2006.
- Mikhail, E.M.; Bethel, J.S.; McGlone, J.C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Hoboken: Wiley, 2001. 479p. ISBN 978-81-265-3998-7.
- Shiguemori, E.H.; Martins, M.P.; Medeiros, F.L.L.; Domiciano, A.P.; Monteiro, M.V.T. **Módulo de Visão Computacional do Projeto PITER: Aplicações à Navegação Aérea Autônoma por Imagens**. São José dos Campos, Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA, 2008.
- Wolf, P.R. **Elements of Photogrammetry**. United States of America: McGraw-Hill, 1974. cap. 01-20, p.01-614.