

8. Georreferenciação semi-directa: Aerotriangulação com apoio GNSS

Devido ao custo da componente de determinação do apoio geodésico ser ainda muito elevado no processo de produção cartográfica por fotogrametria, investiu-se durante décadas na tentativa de reduzir tais custos. Surgiu então a ideia de tentar determinar directamente os parâmetros de orientação espacial das fotos através de dados suplementares adquiridos durante o voo fotográfico. Várias técnicas foram ensaiadas ao longo dos tempos, sobretudo com o intuito de poupar a determinação de PFs altimétricos (por ex. câmara de horizonte, estatoscópio, registo de perfis, altimetria de radar, distanciómetro de laser), mas todas elas se mostraram não fiáveis, muito complexas, ou muito caras para virem a ser operacionais. O distanciómetro de laser, no entanto, começou recentemente a ser integrado na produção cartográfica (produção de MDT por LIDAR) mas não com o mesmo objectivo das primeiras tentativas.

Só com o aparecimento da técnica de posicionamento cinemático por GPS, especialmente após o segmento espacial do GPS estar completo (1994), é que se conseguiu finalmente testar procedimentos durante e após o voo que permitiram obter boas precisões das coordenadas dos centros de projecção das fotografias após processamento. Começou-se então a enveredar por esta técnica e a torná-la operacional.

Estando os centros de projecção coordenados no sistema de coordenadas objecto, poderiam desempenhar o papel de PFs espaciais (acima do terreno) e assim, o ponto principal de cada fotografia teria coordenadas terreno conhecidas. As rotações entrariam no programa de aerotriangulação com valores aproximados (ω e ϕ iguais a zero e κ em função do rumo de voo) e seriam por fim determinadas pelo próprio ajustamento.

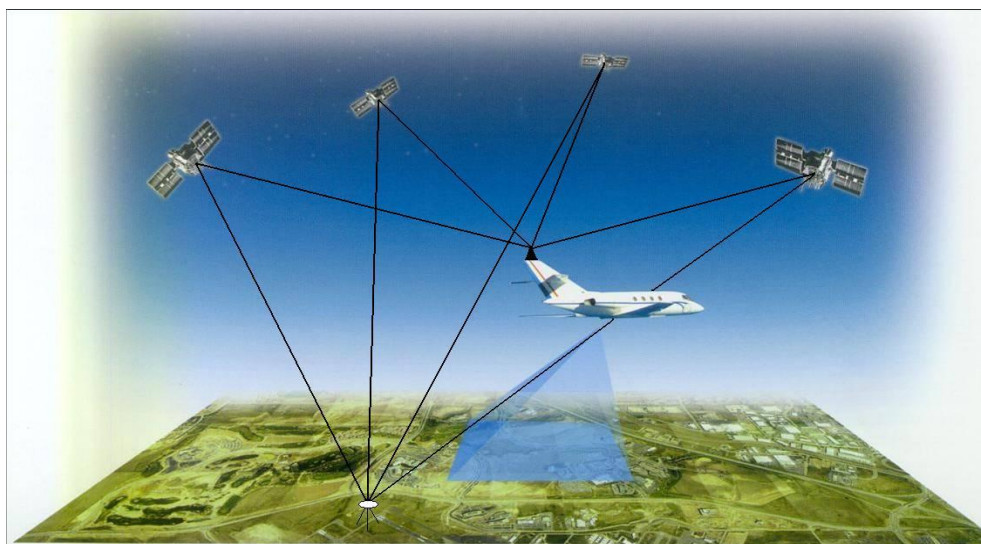


Figura 8.1. Voo fotográfico com apoio GNSS

Com tantos PFs espaciais disponíveis, não haveria teoricamente necessidade de determinar PFs no campo, o que era o objectivo inicial. Pelo facto de o GNSS ter um

referencial próprio que nem sempre é o mesmo referencial em que se pretendem as coordenadas objecto (terreno), há frequentemente necessidade de transformar as coordenadas obtidas por GNSS para as coordenadas (cartográficas) que se pretendem utilizar no processo de produção cartográfica.

Vejamos então como se faz actualmente a aerotriangulação com apoio GNSS. Este tipo de aerotriangulação, difere do habitual nos seguintes aspectos:

1. equipamento utilizado para aquisição dos dados fotográficos:

- avião com um receptor GNSS e uma câmara aérea que registe os instantes das exposições
- um receptor GNSS em terra num ponto de coordenadas conhecidas (DATUM)

2. vôo fotográfico:

- as voltas entre fiadas devem ser mais largas de modo a que o avião não incline muito as asas para não perder o sinal dos satélites GNSS (mínimo 4 simultâneos).
- terminado o varrimento da zona a levantar por fiadas paralelas, fazem-se duas fiadas transversais a rematar o bloco sobre as primeiras e as últimas fotos de cada fiada (fig.8.2.).
- caso a dimensão do bloco o justifique, a fiada transversal deve ser repetida de 30 em 30 bases.

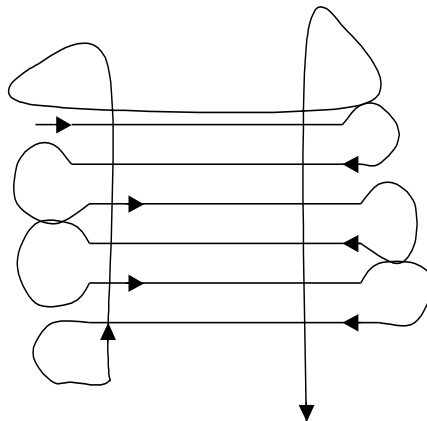


Figura 8.2. Traçado de voo com apoio GNSS

3. apoio geodésico necessário:

- dois PFs completos no início e no fim de cada fiada transversal, mas na zona de sobreposição com as fiadas normais.
- os restantes pontos de apoio à restituição (de passagem e de ligação) devem apresentar a disposição mínima habitual (6 PP por modelo, 2 PL entre modelos de fiadas diferentes).

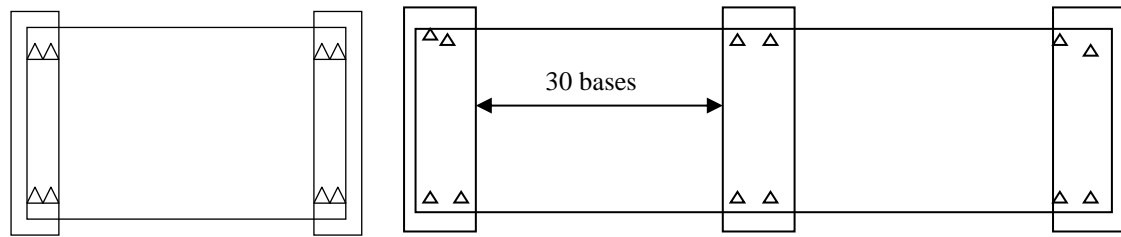


Figura 8.3. Distribuição de PFs num voo feito com apoio GNSS

4. modelo para aerotriangulação:

- é acrescentado ao modelo matemático da aerotriangulação por feixes perspectivos um conjunto de equações de observação para cada centro de projecção (para cada foto onde foi determinado directamente), que traduzem a seguinte situação: as coordenadas GNSS recebidas pelo receptor do avião, após o processamento, são as coordenadas geodésicas da antena do avião. A câmara, nomeadamente o centro óptico da sua objectiva, que se admite ser o centro de projecção do qual pretendemos as coordenadas, encontra-se noutra posição. A posição espacial do CP varia em relação à posição espacial da antena de momento para momento, em função da variação da atitude do avião. É por isso necessário considerar o vector espacial antena-câmara. Este é normalmente medido directamente (por técnicas topográficas) dentro do avião antes do voo, e é expresso pelas suas três componentes espaciais dx , dy e dz no sistema de coordenadas da câmara.

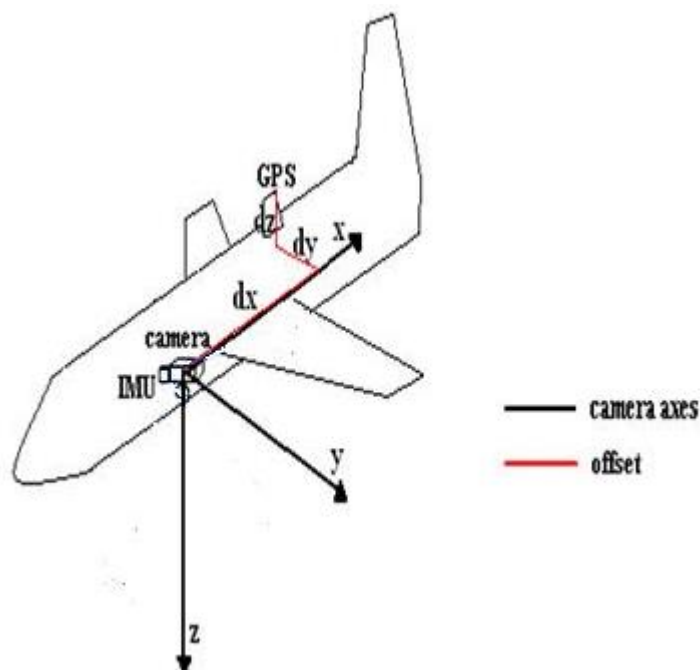


Figura 8.4. Componentes do vector antena câmara e sistema de coordenadas câmara

Equações de observação para cada centro de projecção j:

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} v_x^{GPS} \\ v_y^{GPS} \\ v_z^{GPS} \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{bmatrix} X_j^{CP} \\ Y_j^{CP} \\ Z_j^{CP} \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \end{matrix} - \begin{matrix} \begin{bmatrix} X_j^{GPS} \\ Y_j^{GPS} \\ Z_j^{GPS} \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{matrix} \end{matrix} + \begin{matrix} R\omega\phi\kappa \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 5 \end{matrix} \end{matrix} + \left(\begin{matrix} \begin{bmatrix} ax \\ ay \\ az \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix} + \begin{matrix} \begin{bmatrix} bx \\ by \\ bz \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 7 \\ 7 \\ 7 \end{matrix} \end{matrix} \cdot (t - t_0) \right)_k \begin{matrix} \\ \\ 8 \end{matrix}$$

- 1- correcções às coordenadas GNSS observadas durante o voo
- 2- coordenadas do centro de projecção j (para a fotografia j)
- 3- coordenadas GNSS observadas durante o voo para a fotografia j
- 4- matriz de rotação espacial do vector antena-câmara ($\omega\phi\kappa$ - ângulos da atitude do avião)
- 5- vector antena-câmara (medido no referencial da câmara)
- 6 e 7- parâmetros de deriva, função linear do intervalo de tempo (8), iguais em cada faixa k

Após o cálculo do ajustamento total, obtém-se os mesmos parâmetros que na aerotriangulação tradicional (orientações externas e coordenadas terreno dos pontos novos) e ainda os parâmetros a e b para cada faixa.

Mais recentemente as antenas GNSS a bordo do avião são instaladas na vertical do eixo fotográfico, quando ele é passível de ser materializado (caso das câmaras analógicas), diminuindo a influência de erros nas componentes do vector antena-câmara (offset) nos resultados posteriores.

As coordenadas GNSS da antena são interpoladas para o momento t de tomada de foto a partir da trajectória do avião definida pelos sucessivos pontos 3D coordenados em modo cinemático diferencial pela determinação da fase da onda portadora.

9. Georreferenciação directa: Voo fotográfico com apoio GNSS/IMU

O GNSS/IMU é um sistema que combina as técnicas de posicionamento inercial e de posicionamento por GNSS.

O Inertial Measuring System, IMU, é um dispositivo constituído essencialmente por três acelerómetros que detectam acelerações lineares e três giroscópios que detectam acelerações (ou velocidades) angulares ao longo e em torno de três eixos perpendiculares de um corpo a que estão ligados, durante um movimento desse corpo. O sistema baseia-se nas leis de movimento de Newton e na de conservação do momento angular.

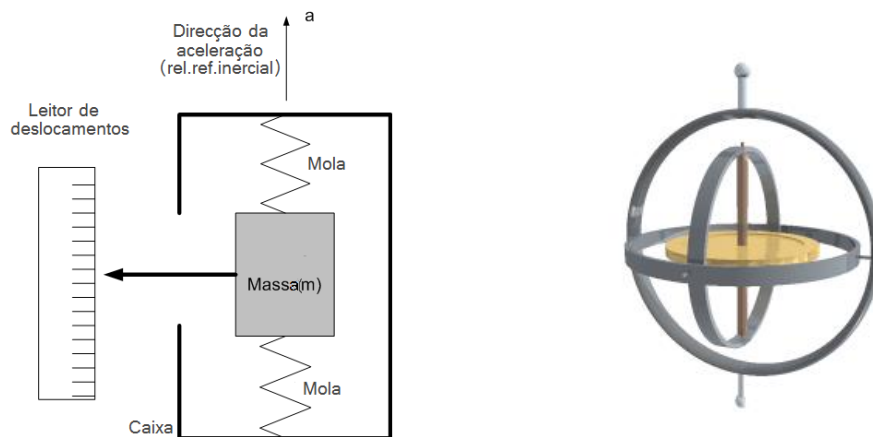


Figura 9.1. esquema de acelerómetro linear (esq.) e giroscópio mecânico (dir.)

Se o sistema estiver solidário com a câmara métrica que obtém a cobertura fotográfica de uma região durante um voo, o IMU fornece em cada momento do voo as acelerações (lineares e angulares) sofridas a partir de uma posição inicial. Calculando duas vezes o integral dessas acelerações em ordem ao tempo, por métodos numéricos, obtêm-se valores de posição X, Y, Z e de atitude ω, φ, κ do corpo nesse momento, relativas a um momento inicial.

O GNSS/IMU é então um duplo sistema de posicionamento, com a vantagem adicional de fornecer também informação sobre a atitude do avião (da câmara) no momento de cada exposição. Qual, então, o objectivo de usar um duplo sistema de posicionamento?

O funcionamento dos dois sistemas assenta em princípios físicos completamente diferentes e ambos apresentam falhas. O IMU é muito preciso momentaneamente, mas a sua deriva é muito grande ao longo do tempo. Ou seja, como é um sistema autónomo, após a inicialização as coordenadas calculadas são precisas, mas as que se sucedem baseiam-se nas anteriores, o que provoca, ao longo do tempo a deriva dos resultados, que é tanto maior quanto maior for o intervalo de tempo que passou desde a inicialização.

Intervalo de tempo		Precisão do sistema		
		alta	média	baixa
Posição	1 s	0.01 - 0.02 m	0.03 - 0.1 m	0.3 - 0.5 m
	1 min	0.3 - 0.5 m	0.5 - 3 m	30 - 50 m
	1 h	300 - 500 m	1 - 3 km	200 - 300 km
Inclinação	1 s	< 1''	10'' - 15''	30'' - 2'
	1 min	1'' - 2''	15'' - 20''	10' - 20'
	1 h	10'' - 30''	30'' - 3'	1° - 3°
Preço (US\$)		~1 000 000	~100 000	~10 000

Tabela 9.1. Classes de precisão de sistemas IMU. (Fonte: Kraus, K. Photogrammetry, 2nd Edition, de Gruyter, 2007)

O GNSS é mais estável no tempo, mas a recepção do sinal dos satélites (no min. 4 em simultâneo) é por vezes interrompida, tendo o sistema que ser reinicializado quando recupera o sinal, sem o que não poderá fornecer mais resultados a partir da interrupção. Num voo fotográfico isso significa deixar de haver informação posicional para as fotos posteriores à interrupção.

A integração dos dois sistemas permite que:

- o IMU seja reinicializado constantemente, à taxa de recepção do GNSS, com os valores de posição fornecidos por este, o que reduz significativamente a deriva dos resultados;
- caso o GNSS falhe, durante a sua ausência existem os dados posicionais do IMU para as fotos realizadas nesse intervalo de tempo. Além disso, quando se recupera o sinal dos satélites, o sistema é reinicializado com os últimos dados do IMU.

A integração dos dados dos dois sistemas é realizada por meio de filtros de Kalman.

Teoricamente, um voo fotográfico realizado com GNSS/IMU dispensa pontos fotogramétricos e, além disso, dispensa a etapa da aerotriangulação, visto que o sistema é capaz de fornecer, em cada momento de exposição, X_o , Y_o , Z_o do centro de projecção e ω , ϕ , κ da câmara, que são os elementos de orientação externa da fotografia no momento em que foi obtida.

De posse desses elementos pode-se, como é sabido, determinar coordenadas terreno a partir de coordenadas foto (em duas fotos) de qualquer ponto por intersecção directa espacial (eq. de colinearidade). Pode-se, caso se pretenda, determinar a orientação absoluta de um modelo a partir das coordenadas terreno, de pelo menos três pontos, determinadas pelo método anterior (transf. espacial de semelhança). Pode-se orientar cada foto no espaço objecto independentemente (orientação externa), podendo prosseguir com a orto-rectificação.

A determinação da orientação externa das fotografias sem aerotriangulação usando dados GNSS/IMU denomina-se **georreferenciação directa**.

Na prática, para determinados produtos fotogramétricos de grande escala, a georreferenciação directa ainda não atinge a precisão exigida, podendo no entanto satisfazer os requisitos de muitas outras aplicações.

Existem vários tipos de sistemas GNSS/IMU no mercado que se distinguem pela sua precisão, custo e portabilidade, podendo ser aplicados em diversas áreas. Os sistemas mais precisos incluem giroscópios de fibra óptica que detectam velocidades angulares em vez de acelerações (caso dos mecânicos).

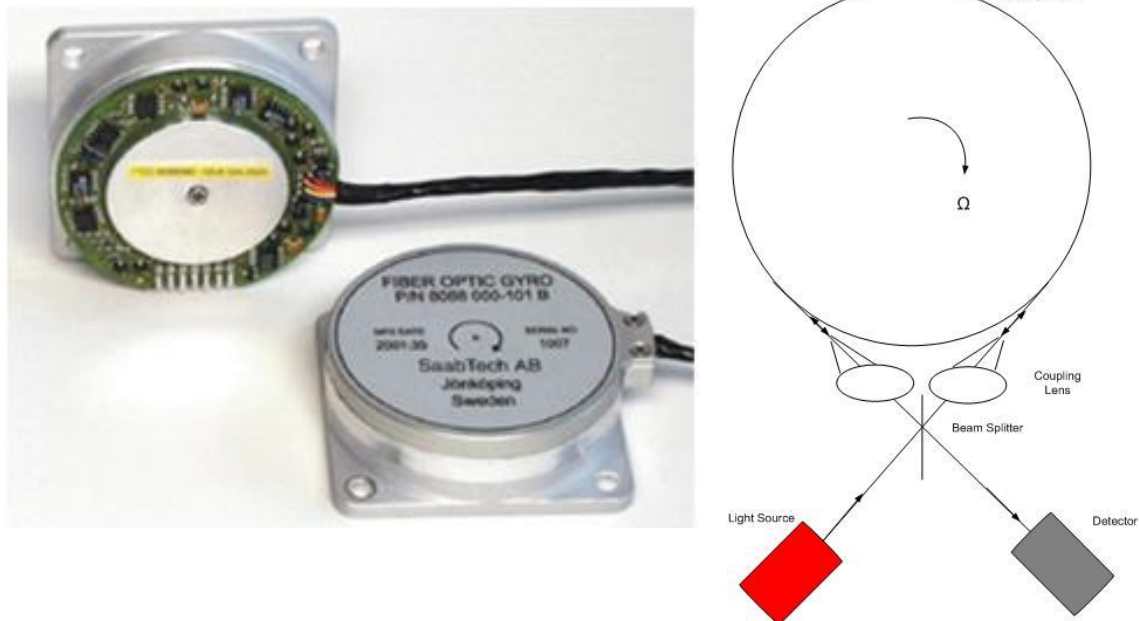


Figura 9.2. Giroscópio de fibra óptica e princípio de funcionamento

Para georreferenciação directa de fotografias aéreas de grande formato, um sistema IMU de média precisão associado a GNSS é suficiente. Mas no caso de câmaras aéreas digitais de sensores lineares (em que a orientação externa varia de linha para linha) e de levantamentos LIDAR (em que a orientação externa varia de ponto para ponto), os indispensáveis sistemas GNSS/IMU têm de ser de melhor precisão.

Os sistemas GNSS/IMU para fotogrametria devem ser regularmente calibrados para se poder relacionar os dados de navegação fornecidos pelo sistema com os parâmetros de orientação fotogramétrica de cada foto.

9.1. Calibração do sistema GNSS/IMU

Para calibrar o sistema tem-se seguido a estratégia que se descreve a seguir. Tendo um bloco a cobrir fotograficamente a uma escala M , realiza-se previamente um voo de uma pequena zona rectangular (área de calibração) no centro do bloco ou exterior a este, garantindo na área de calibração uma cobertura por PFs semelhante à existente em blocos aerotriangulados sem apoio GNSS, ou seja, de três em três bases. O voo de calibração inclui duas fiadas voadas em sentidos opostos.

Voa-se depois o bloco completo (área do projecto) à mesma escala M . Nesta área não há necessidade de existirem mais PFs (apenas o receptor GNSS em terra se não houver rede GNSS permanente com densidade suficiente), nem de manter uma configuração regular (necessária para a aerotriangulação clássica).

Seguidamente, realiza-se a aerotriangulação por feixes perspectivais apenas do pequeno bloco de calibração, da qual se obtêm os elementos de orientação externa de cada foto e as respectivas matrizes de rotação. Estes resultados são comparados estatisticamente com os dados de orientação GNSS/IMU fornecidos durante o voo do mesmo bloco de calibração e são determinadas as correcções a efectuar a esses dados (offset-translação das origens dos sistemas de coordenadas foto e IMU, e misalignment - desalinhamento dos eixos dos sistemas de coordenadas do IMU e da câmara).

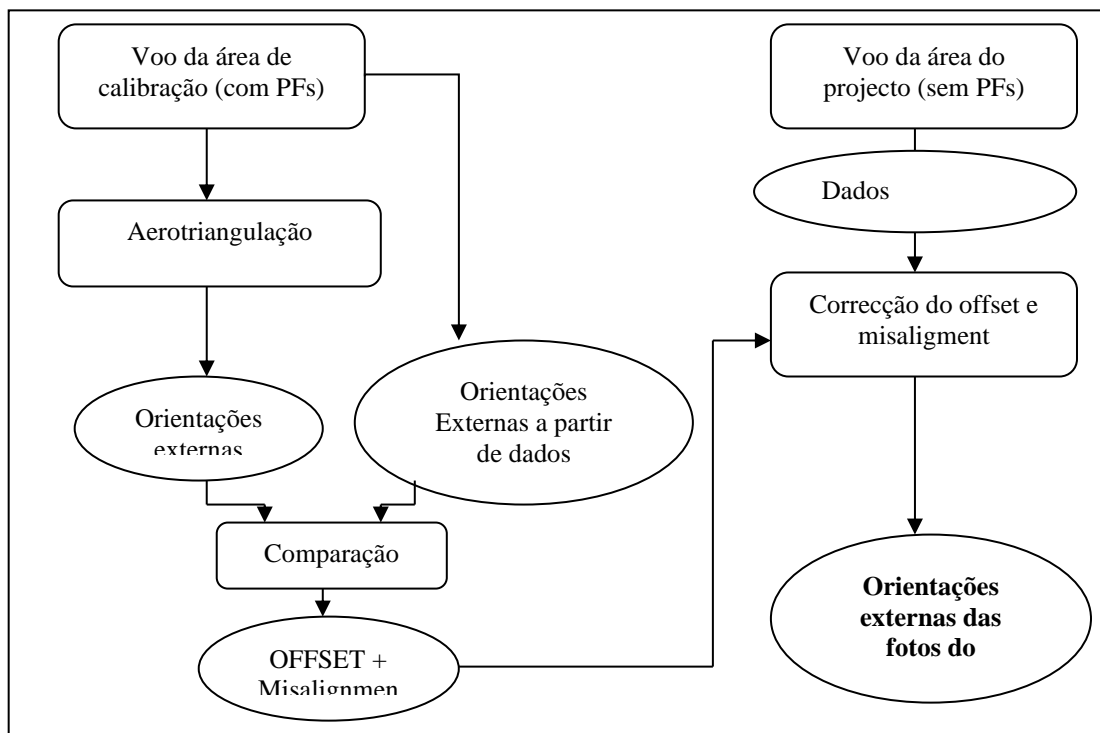


Figura 9.1.1. Esquema de calibração para georreferenciação directa

Essas correcções serão aplicadas aos dados de orientação externa fornecidos pelo sistema durante a cobertura do bloco do projecto. Nesta fase de calibração são também consideradas as transformações de datum entre o referencial do GNSS (WGS84) e o sistema de coordenadas objecto pretendido, eventuais correcções de convergência de meridianos para coordenadas cartográficas (obtidas por projecção cartográfica do elipsóide no plano) e as transformações para altitudes ortométricas por consideração da ondulação do geóide relativamente ao elipsóide de referência.

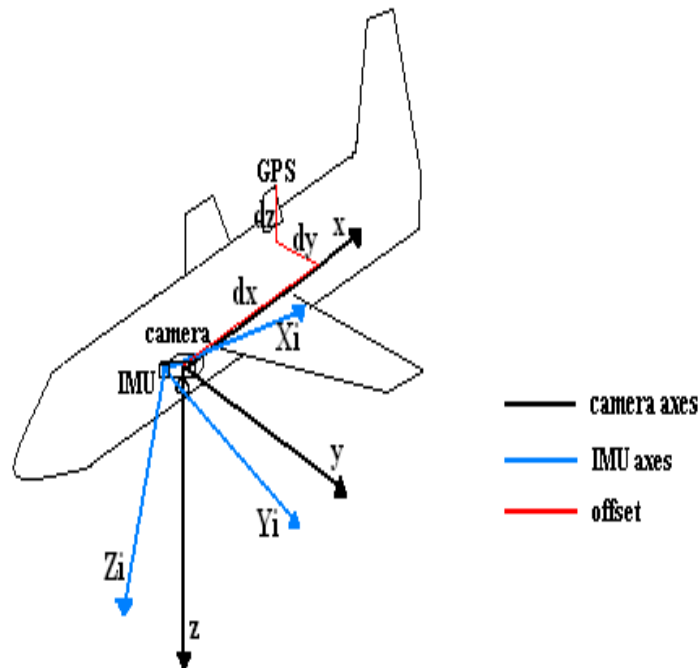


Figura 9.1.2. Avião com um sistema câmara/ GNSS/IMU. Offset e Misalignment.