

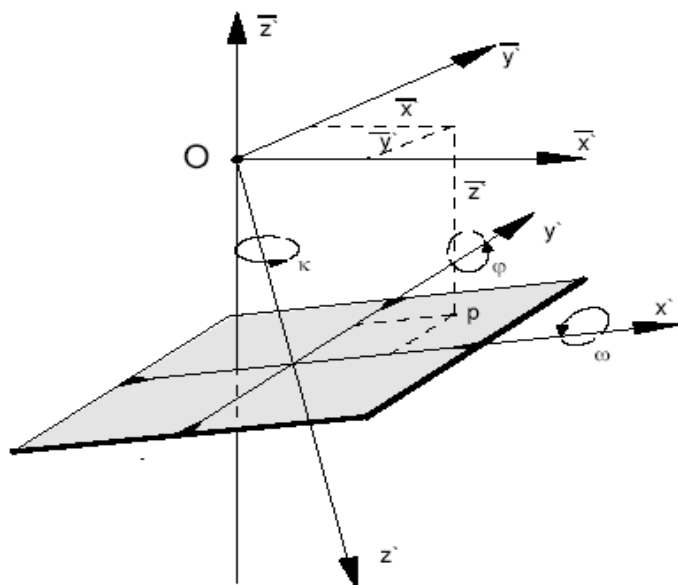
UTILIZACIÓN DE OBSERVACIONES GNSS/INS en VUELOS FOTOGRAMÉTRICOS. NECESIDAD DE PUNTOS DE CONTROL

Contenido

1	Introducción	3
2	Sistemas GNSS/INS.....	5
	• Calibración del Sistema	6
	○ Medición de los lever arms	7
	○ Cálculo del Boresight Missalignment	8
3	Estudios de diferentes tipos de vuelo	10
	• Utilización de Observaciones GNSS únicamente. Modos de cálculo	10
	○ Sin GPS	12
	○ GNSS Relativo	13
	○ GNSS Absoluto	14
	• Utilización de Observaciones GNSS/INS	15
	○ Utilización de Observaciones GNSS/INS con transversales y solape de 60%/60%.....	16
	○ Utilización de Observaciones GNSS/INS sin transversales y solape de 60%/20%.....	17
	• GNSS/INS en vuelos de traza o corredor.....	18
4	Georeferenciación Directa	20
	• Georeferenciación Directa en diferentes cámaras.....	21
	○ UltraCam Lp.....	22
	○ UltraCam Xp	23
	○ UltraCam xp Wide Angle.....	24
	○ UltraCam Eagle de focal 80 mm	25
	• Otras consideraciones sobre la Georeferenciación Directa.....	26

1 Introducción

El objeto de la aerotriangulación es calcular los parámetros de orientación externa de las imágenes que constituyen el vuelo, es decir las coordenadas X, Y, Z y los ángulos Ω, Φ y K en el momento de la toma:



Para obtener estos valores se pueden seguir varios procedimientos:

MÉTODO INDIRECTO (Fotogrametría tradicional)

Con puntos de fotocontrol (llamados también puntos de apoyo) en el terreno y puntos en la imagen que nos conectan las fotos y las pasadas entre ellas (son los puntos de paso y de enlace).

MÉTODO DIRECTO O GEOREFERENCIACIÓN DIRECTA

Con datos GPS/INS; esto es, el avión durante el vuelo lleva un receptor GPS bifrecuencia que registra las coordenadas X, Y, Z del centro de proyección de la cámara en el momento de la toma de la imagen, y un IMU o INS (Instrumento de medida inercial) que va pegado o dentro de la cámara y nos permite registrar los ángulos Ω, Φ, K de cada imagen en el momento de la toma. Es decir registramos directamente las orientaciones externas por lo que no necesitaríamos aerotriangulación.

ISO (INTEGRATED SENSOR ORIENTATION)

La traducción al español podría ser algo como “Orientación integrada con sensores”. Es decir es una mezcla de los dos métodos anteriores, utilizaríamos tanto las mediciones GPS/INS provenientes del receptor GPS y del IMU, así como puntos de apoyo en el terreno y puntos en la imagen.

La imagen derecha muestra un equipo completo del sistema aerocontrol de la empresa IGI con el receptor GPS y el IMU o instrumento de medida inercial.

Según diversos estudios realizados, se puede estimar aproximadamente que para un tamaño de píxel de aproximadamente 20 cm o 30 cm no sería necesario utilizar puntos de apoyo en el terreno ya que la precisión del sistema GPS/INS nos garantiza esa precisión. Esto lógicamente depende del tipo de sistema GPS/INS así como de la altura de vuelo, escala....



El presente documento describe como se utilizan las observaciones GPS/INS en combinación con puntos de apoyo o sin ellos. Se hará un estudio de diferentes configuraciones de bloques.

El vuelo utilizado en los distintos cálculos es el mismo, así como también se utiliza la misma nube de puntos de paso, generada en modo automático.

Las variaciones de resultados son atribuibles exclusivamente al modelo de solución empleada, así como a los distintos componentes auxiliares de orientación externa empleados.

2 Sistemas GNSS/INS

Todas las cámaras son perfectamente compatibles con sistemas GPS/INS.

A continuación se muestran dos imágenes de la ULTRACAM con el sistema GNSS/INS instalado. Como se aprecia en la imagen, el IMU se sitúa dentro de la cámara. El receptor GPS bifrecuencia está en el techo del avión y no aparece en la imagen.



Las cámaras analógicas también permiten la utilización de sistemas GPS/INS durante el vuelo.

En la imagen siguiente se puede ver la RMKTOP. En las cámaras analógicas, el sistema medidor inercial se sitúa pegado a la cámara en la mayor parte de los casos.

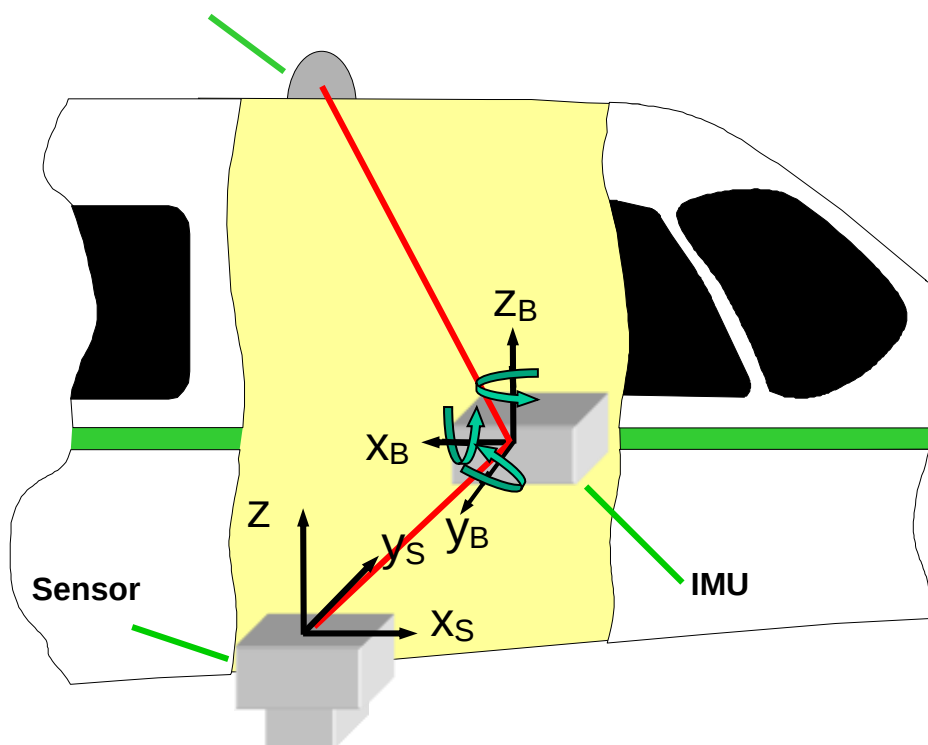


• *Calibración del Sistema*

Durante el vuelo, el avión lleva a bordo un sistema formado por la cámara (sensor), el receptor GPS bifrecuencia que suele situarse en el techo del avión, y el IMU que como hemos visto en las imágenes anteriores puede ir tanto dentro como fuera de la cámara.

Esto puede venir representado por la siguiente figura:

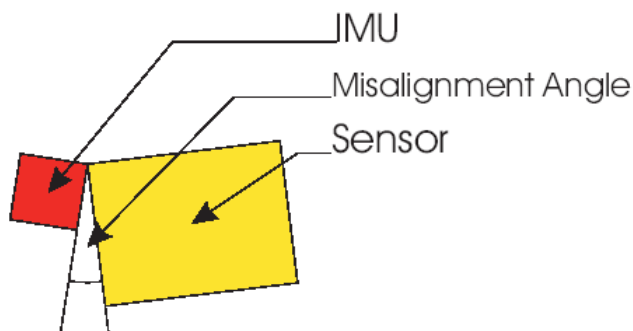
GPS Antenna



Cuando hacemos un vuelo fotogramétrico lo que nos interesa es registrar los parámetros de orientación externa (X, Y, Z , Ω , Φ , κ) en el centro de proyección de la cámara en el momento de la toma. Sin embargo, como vemos en el esquema anterior, el GPS se sitúa en el techo del avión y el IMU ya sea pegado a la cámara o dentro de ella, tampoco se sitúa en el centro de proyección, es decir hay unas distancias entre ellos que hay que controlar perfectamente, es lo que se llama *lever arms*. Normalmente la cámara suele ir montada sobre una plataforma giroestabilizada o *mount* por lo que tendríamos un cuarto elemento. El objetivo de dicha plataforma es mantener la cámara lo mas vertical posible a pesar de los lógicos movimientos que pueda tener el avión durante el vuelo.

Por otra parte, el eje vertical del IMU nunca va a ser paralelo al eje vertical de la cámara, ya que el montaje del IMU en la cámara no se puede hacer con tanta precisión. Es decir, siempre va a existir un ángulo entre la vertical de la cámara y la vertical del IMU, es lo que se llama *Boresight Missalignment* o desalineación de la antena.

Debido a esta desalineación, los ángulos medidos por el IMU no son los que verdaderamente tiene la cámara. Por tanto los ángulos que nos proporciona el IMU hay que corregirlos del error que produce la mencionada desalineación.



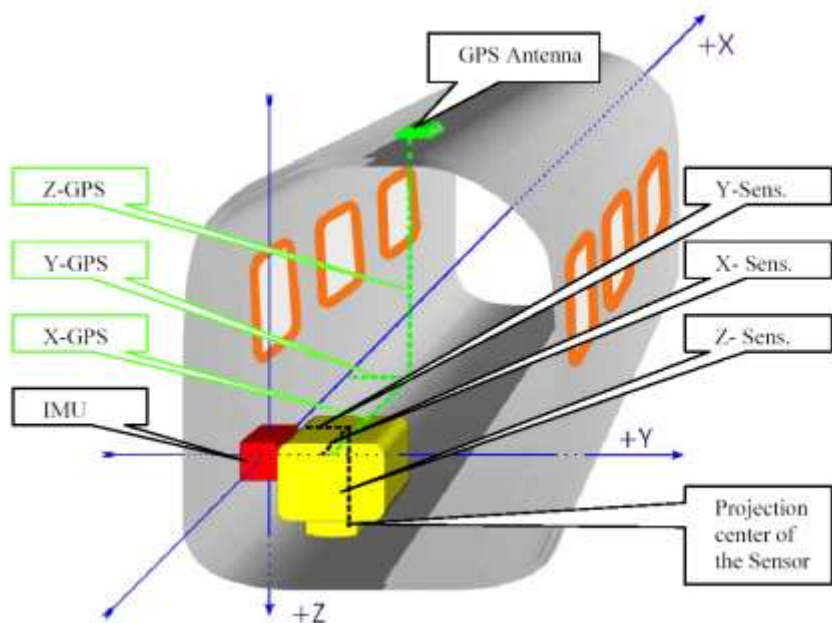
Se entiende por calibración del sistema:

- Medición de los *level arms*, esto es las distancias entre los tres elementos del sistema (cámara, GPS e IMU)
- Cálculo de la desalineación de la antena o *Boresight Misalignment*

○ *Medición de los lever arms*

Se utiliza el IMU como centro del sistema por lo que tendremos:

- Distancia GPS-IMU: Se mide con un teodolito con el avión parado. Tendremos tres distancias en los ejes x,y,z tal y como aparece en la figura inferior. Como podemos ver, en la mayoría de los casos el valor de Z es negativo ya que el eje positivo apunta hacia abajo.
- Distancia IMU-Cámara: En el caso de las cámaras digitales el IMU se introduce dentro de la cámara y tiene una posición fija por lo que generalmente este desplazamiento es conocido y proporcionado por el fabricante.
- Distancia IMU-mount. Se mide con un teodolito.



En este punto es importante señalar que estas distancias que se miden con el avión parado en el aeropuerto varían durante el vuelo. Por ejemplo la distancia Zgps de la figura anterior modificará su valor según la parte delantera del avión esté hacia arriba o hacia abajo.

Estas variaciones pueden ser importantes y hay que tenerlas en cuenta. Algunas plataformas giro estabilizadas permiten registrar los ángulos que se están corrigiendo y estos se utilizarán para aplicar esas correcciones. Es decir, durante el vuelo el avión lógicamente tendrá variaciones en los ángulos OMEGA, PHI, KAPPA y las distancias medidas en el aeropuerto serán por tanto diferentes.

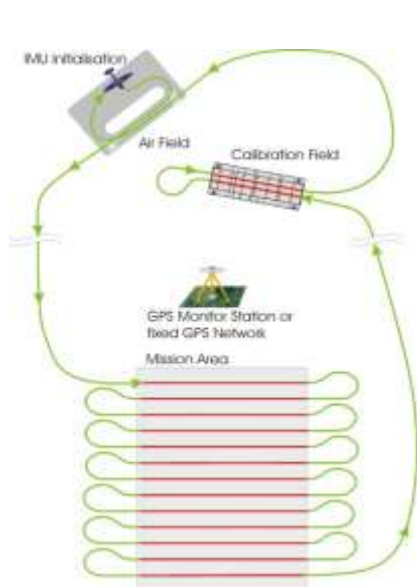
Si llevamos una plataforma giro estabilizada ocurrirá que esta tenderá a mantener la cámara en posición lo mas vertical posible, de manera que aunque el avión tenga unos ángulos OMEGA, PHI, KAPPA grandes, la cámara y por tanto los ángulos registrados por el IMU tendrán unos ángulos pequeños.

Existen plataformas giro estabilizadas que permiten guardar y utilizar los ángulos que está corrigiendo. Estos ángulos junto con las distancias medidas en el aeropuerto introducidas en el software de postproceso del GPS, nos permitirán calcular las posiciones GPS correctas exentas de los errores producidos por los offsets entre los diferentes elementos del sistema.

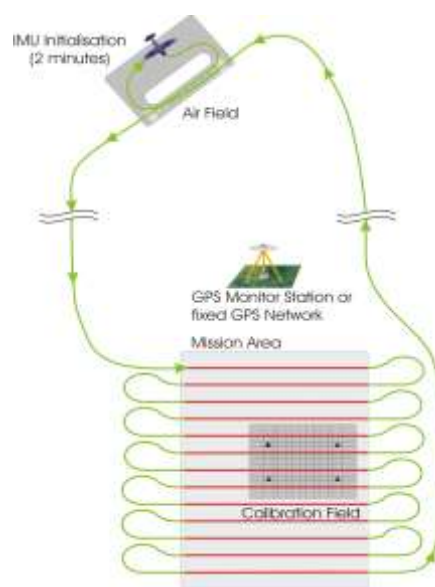
○ *Cálculo del Boresight Missalignment*

Para realizar el cálculo de la desalineación de la antena, es decir como afecta la no coincidencia de las verticales de la cámara y del IMU, se realiza una aerotriangulación de un bloque pequeño de no muchas pasadas y con puntos de fotocontrol o apoyo.

Esta pequeña aerotriangulación puede hacerse dentro de la zona de proyecto o bien en una zona totalmente independiente cercana al aeropuerto por ejemplo.



Caso A



Caso B

Como se ve en las figuras anteriores, tenemos dos casos típicos:

- Caso A: La empresa de vuelo tiene una zona cercana al aeropuerto con puntos de fotocontrol medidos. Antes o después de cada proyecto se sobrevuela esa zona (Calibration Field) y se hace la aerotriangulación para calcular la desalineación de la antena.
- Caso B: Dentro del proyecto a volar se selecciona una zona pequeña donde medimos unos cuantos puntos de fotocontrol y posteriormente calculamos la desalineación.

En ambos casos las correcciones calculadas de desalineación se aplicarían a todo el proyecto y podríamos entonces utilizar la georeferenciación directa sin aerotriangulación.

La zona de calibración ya sea externa o interna al proyecto no debe tener mas de 3 o 4 pasadas.

3 Estudios de diferentes tipos de vuelo

En los siguientes casos se considera que el sistema está perfectamente calibrado, esto es, las coordenadas se corresponden con el centro óptico de la cámara y los ángulos han sido corregidos de la desalineación de la antena o boresight missaligmnet.

- **Utilización de Observaciones GNSS únicamente. Modos de cálculo**

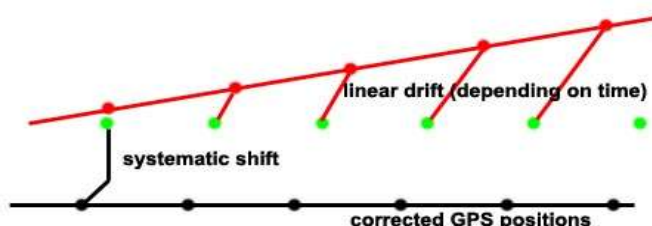
Antes de empezar el estudio, debemos considerar que existen varias formas de calcular las observaciones GPS del avión para obtener las coordenadas X,Y,Z del momento de la toma.

GPS diferencial.

Se basan en la utilización de estaciones en tierra. Es decir, es necesario que haya una estación de referencia en el momento del vuelo, por lo que si no existe ninguna, sería necesario desplazar alguna. La precisión depende sobre todo de la distancia a dicha estación de referencia.

Es el método mas preciso pudiendo alcanzarse precisiones del orden de los 5 cm.

Este tipo de cálculo viene afectado por los siguientes errores:



Shift: Es el error constante y puede deberse no solo al GPS en sí, sino también a otros factores que no se hayan tenido en cuenta correctamente como por ejemplo la no consideración del desplazamiento de la antena GPS con respecto a la cámara o un DATUM incorrecto.

Drift: Es el error dependiente del tiempo. Como consecuencia de este error, el GPS nos da unas posiciones que son correctas en relativa pero no lo son en posición absoluta.

En los casos en los que la estación de referencia se encuentre a mas de 30 Km aproximadamente, deberemos corregir estos errores con la ayuda de puntos de control. En este caso, hablaremos de posicionamiento relativo.

Si por el contrario, disponemos de estaciones de referencia a menos de 30 Km de la zona de proyecto, no necesitaremos corregir estos errores y hablaremos de posicionamiento absoluto.

GPS diferencial en tiempo real.

Se basan en el cálculo en tiempo de real de las órbitas y correcciones de reloj de los satélites. Para ello es necesario utilizar las redes permanentes de estaciones distribuidas a lo largo y ancho del planeta de sistemas como Omnistart o Star Fire. No haría falta por tanto tener estaciones en tierra en la zona de proyecto como en el caso anterior.

Permite alcanzar precisiones del orden de 15 cm, pero en tiempo real. Es decir, no necesita post-proceso.

PPP (Precise Point Positioning).

No necesita estaciones de referencia en tierra, el cálculo se basa en utilizar las efemérides precisas de los satélites.

La precisión es similar al caso anterior, pero no obtenemos los resultados en tiempo real, debemos de esperar unas 24-48 horas a que estén publicadas las efemérides precisas y realizar el post-proceso.

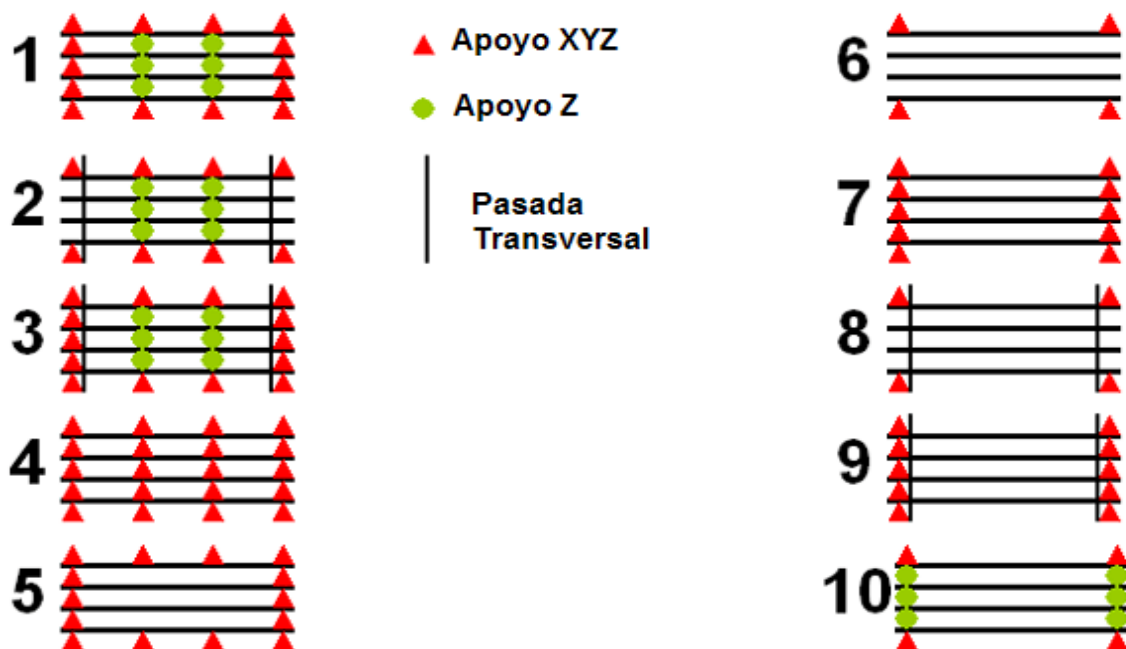
Se van a estudiar distintas configuraciones de un mismo bloque, cómo se muestra en la figura de mas abajo.

Por GPS Absoluto se entiende que ha sido calculado:

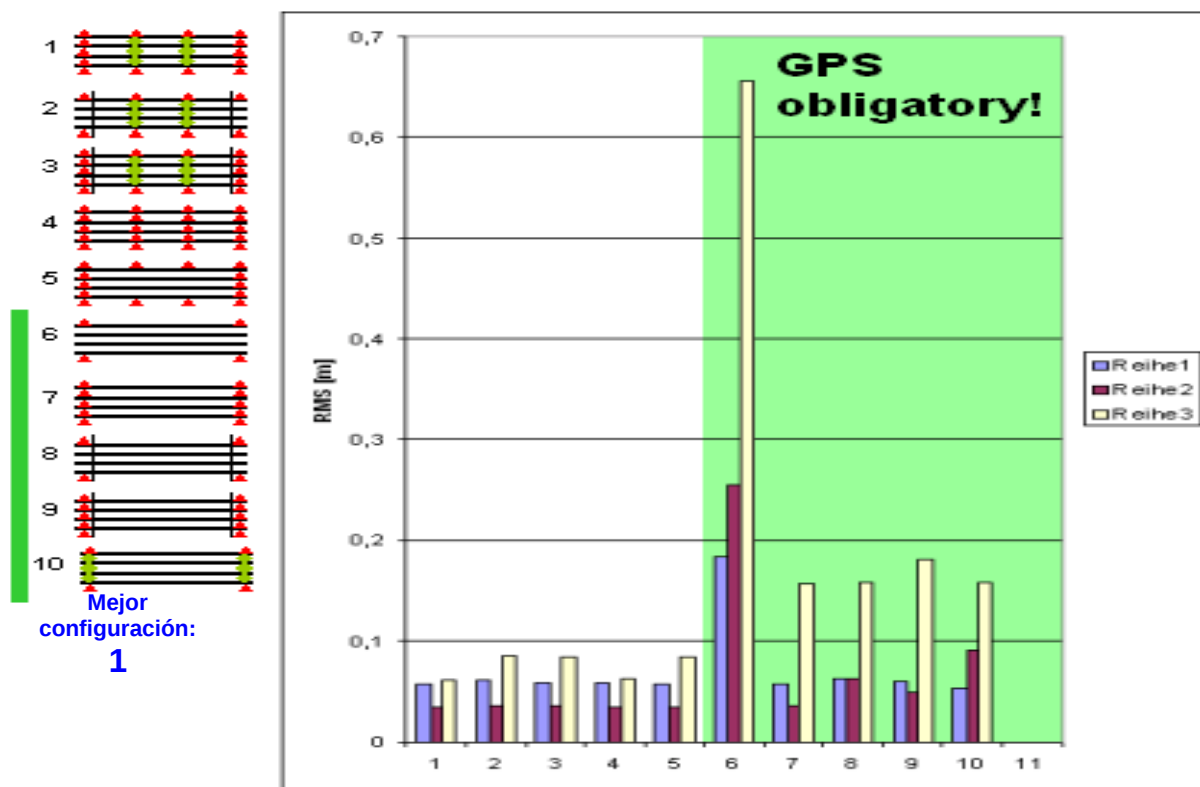
- GPS diferencial con estaciones en tierra a menos de 30 Km aproximadamente
- GPS diferencial en tiempo real
- PPP

Por GPS Relativo se entiende que ha sido calculado:

- GPS diferencial con estaciones en tierra a mas de 30 Km aproximadamente.



○ Sin GPS



El primer estudio realizado es analizar los resultados del calculo de las diferentes configuraciones, sin utilizar ningún tipo de observación GPS-INS, es decir solamente utilizando puntos de apoyo como en la fotogrametría tradicional.

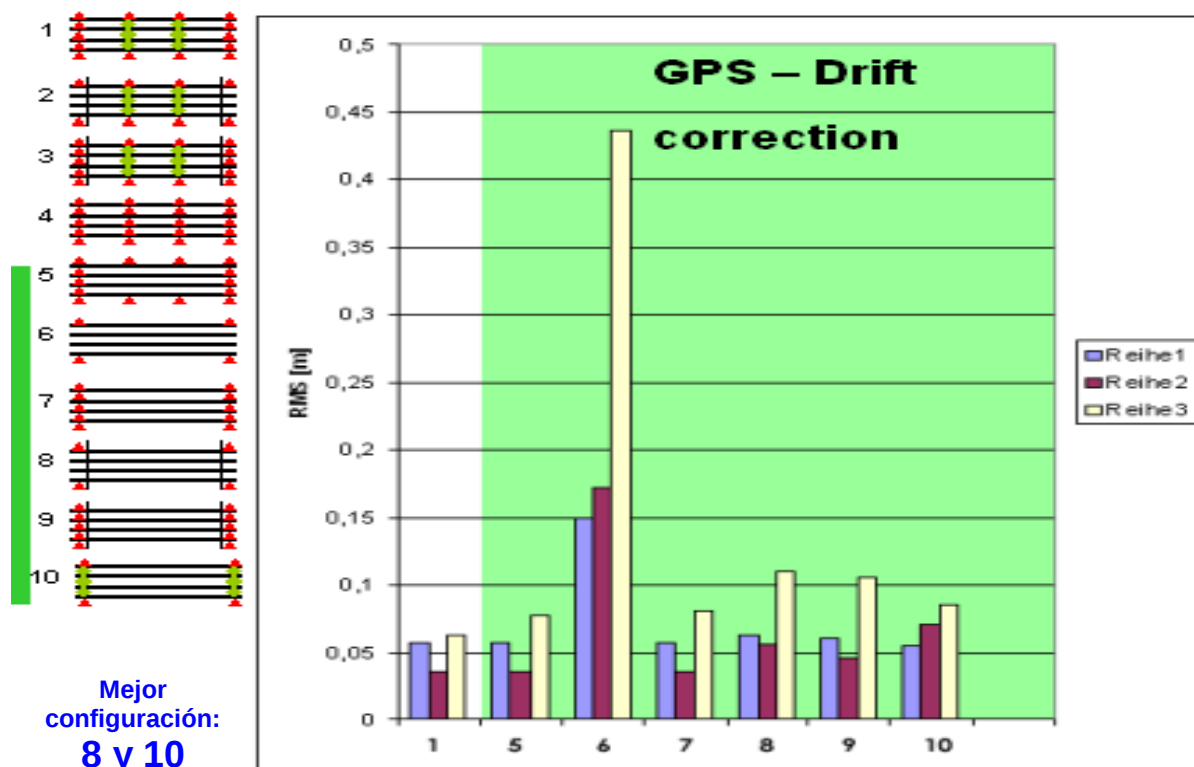
Los resultados arrojan que a partir de la configuración 6 en adelante la solución (sobre todo en Z) empeora enormemente, mientras que la distribución "tradicional" de apoyos (apoyo total en X,Y,Z en los bordes y solo Z en las partes centrales) es la que mejor resultado final nos da (configuración 1)

Esto se debe lógicamente a la ausencia de puntos de apoyo en las zonas centrales del bloque en las configuraciones 6,7,8,9 y 10. Es decir, si el vuelo se realiza sin GPS aerotransportado necesitamos una distribución de puntos de apoyo homogénea que cubra todo el bloque.

Generalmente se adopta la solución de un punto de apoyo por cada 3 o 4 modelos para un solape estándar de 60% - 30%.

Es importante reseñar también que en este caso la utilización de pasadas transversales no aporta ninguna mejora significativa.

○ *GNSS Relativo*



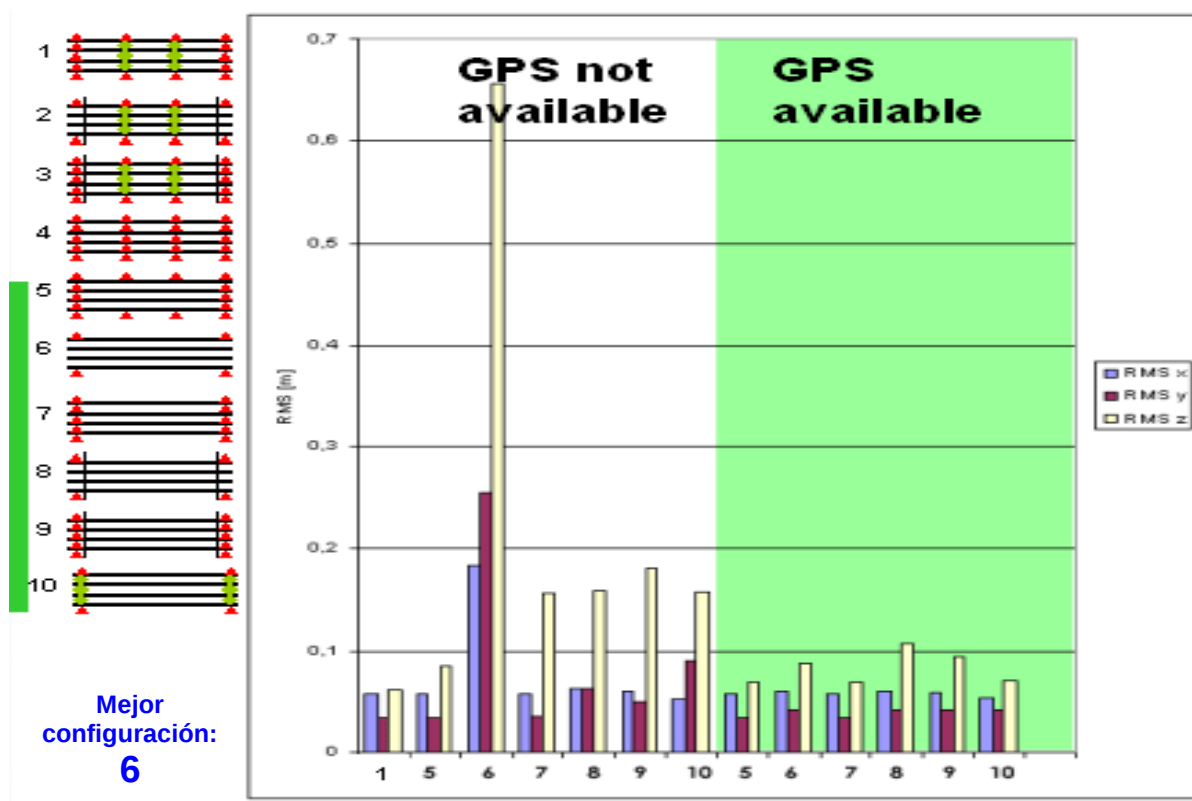
Si utilizamos observaciones GPS Relativo, necesitamos lógicamente aplicar la corrección de deriva (drift correction).

Como se puede ver en la figura anterior las configuraciones de la 7 a la 10 mejoran bastante cuando utilizamos el GPS relativo. En esta ocasión, las configuraciones 7,8,9 y 10 serían prácticamente equivalentes a la 1, es decir podríamos eliminar los puntos de apoyo de la zonas centrales del bloque dejando solamente en los extremos, y el resultado sería similar.

Sin embargo vemos que la configuración 6 sigue estando bastante lejos de ser aceptable. Esto se debe a que para corregir de deriva necesitamos dos puntos de apoyo por pasada (al inicio y al final preferentemente) o en su defecto puntos en las esquinas y pasadas transversales tal y como ocurre en la configuración 8.

Por tanto si utilizamos GPS relativo y pasadas transversales podríamos calcular el bloque con solamente 4 puntos de apoyo situados en las esquinas, es decir reduciríamos enormemente el número de apoyo y obtendríamos un resultado equivalente al de la fotogrametría tradicional, en donde inevitablemente deberíamos gastar gran cantidad de tiempo y dinero en el apoyo de campo.

○ *GNSS Absoluto*



En esta ocasión podemos ver la comparación de resultados en el caso de no utilizar ningún tipo de medida GPS (Izq), o de utilizar posiciones GPS absoluto (Der)

En este caso de GPS absoluto (Der), todas las configuraciones arrojan un resultado similar. Es reseñable sobre todo que los resultados de la configuración 6 son en esta ocasión equivalentes a todos los demás resultados, mientras que en el caso anterior, con GPS relativo, era la que peor resultados nos daba.

Esto se debe a que en este caso no tenemos que aplicar corrección de deriva, ya que el GPS es absoluto y permite fijar la posición con precisión absoluta, y por tanto no necesitamos puntos de apoyo al inicio y al final de cada pasada, ni pasadas transversales. Es decir, podríamos calcular el bloque solamente con 4 puntos de apoyo en la esquinas y sin ninguna pasada transversal y el resultado sería muy parecido al que obtendríamos utilizando apoyo tradicional. Por tanto el ahorro al utilizar GPS absoluto se produce tanto en el apoyo de campo, como en la realización del vuelo, porque no necesitamos volar pasadas transversales.

Conclusiones:

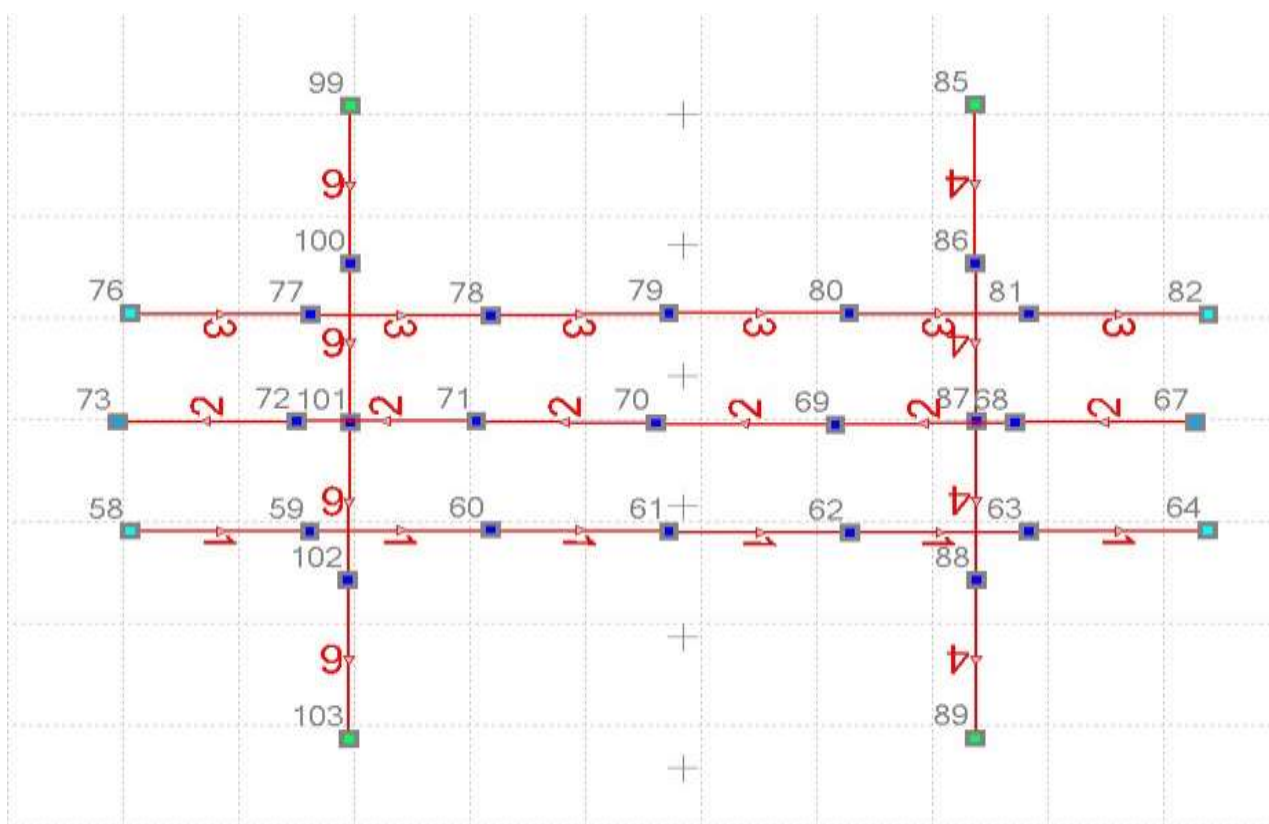
- El GPS nos evita el apoyo en las zonas centrales del bloque
- Si utilizamos GPS relativo necesitamos corregir de deriva y para ello debemos tener puntos de apoyo en los laterales del bloque, o en su defecto, pasadas transversales
- Utilizando GPS absoluto solamente necesitamos 4 puntos en las esquinas del bloque

• *Utilización de Observaciones GNSS/INS*

A continuación se hace un estudio de la utilización de observaciones GPS/INS, en combinación con puntos de apoyo.

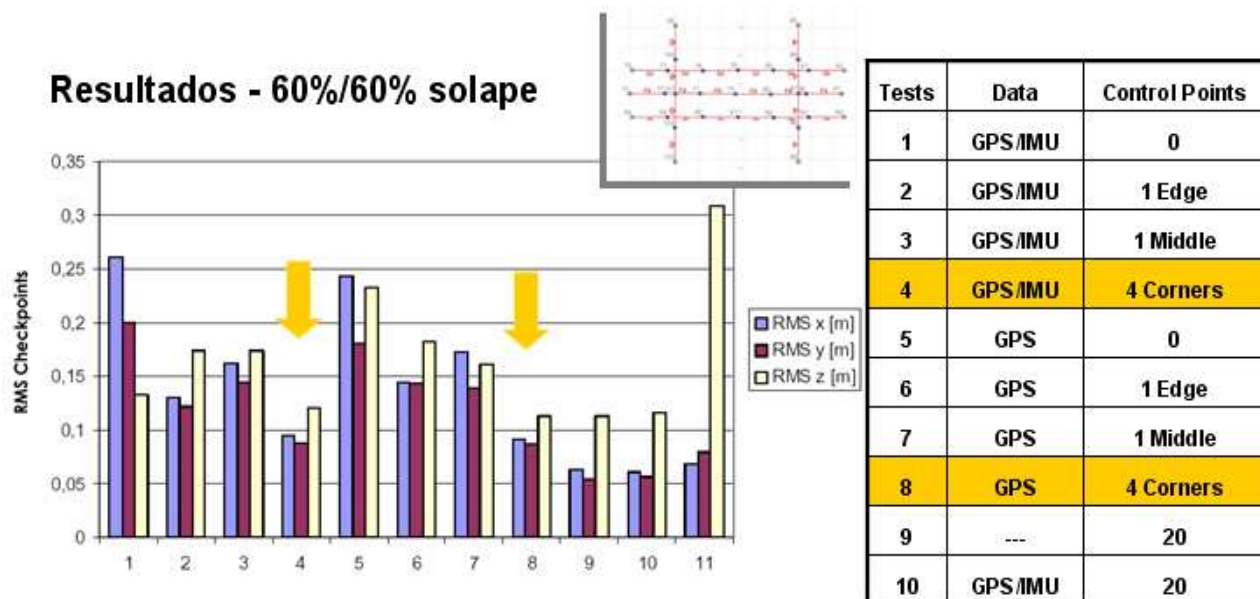
Es importante señalar que las observaciones inerciales siempre vienen acompañadas de observaciones GPS. De hecho para el cálculo de dichas observaciones necesitamos también las posiciones GPS. Por tanto siempre que tengamos observaciones inerciales estas vendrán acompañadas de posiciones GPS.

El bloque utilizado en esta ocasión fue encargado por la Universidad de Stuttgart en un campo de pruebas cercano con las características expresadas a continuación:



- GPS(xyz) = 0.1m;
- IMU (omega, phi, kappa) = 0.01 deg
- Puntos de control xy/z = 0.18/0.27 feet
- Resolución de escaneo 14 μ m; Escala 1:13000; focal 150 mm
- 47 puntos de control, 37 puntos de chequeo
- Posiciones GPS absolutas en todos los fotogramas

○ *Utilización de Observaciones GNSS/INS con transversales y solape de 60%/60%*

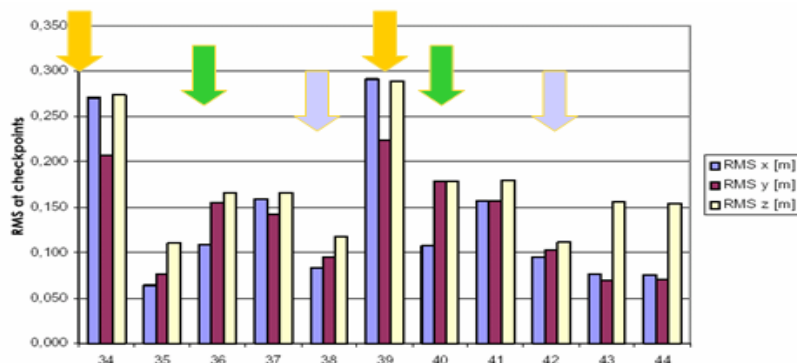


Mirando los gráficos anteriores podemos ver:

- Sin utilizar puntos de control (configuraciones 1 y 5) los resultados mejoran con la incorporación del IMU (sobretudo en Z).
- Las configuraciones 4 y 8 son las más favorables, ya que con 4 puntos de control solamente, nos dan un resultado equivalente a la utilización de 20 puntos de control.
- Comparando las configuraciones con idéntica distribución de apoyos pero variando los datos de entrada (solo GPS, o GPS/INS) vemos como la utilización del IMU no tiene una aportación significativa en términos de precisión. Esto lo podemos ver comparando las configuraciones 2 y 6, 3 y 7 y 4 y 8.
- Utilizando solamente un único punto de control, el resultado mejora si este está en la zona central del bloque.
- Cuanto mas puntos de control tengamos lógicamente menos influencia tiene la utilización de observaciones GPS/INS como se puede ver comparando la solución 9 y 10.

○ *Utilización de Observaciones GNSS/INS sin transversales y solape de 60%/20%*

60%/20% solape sin pasadas transversales



Tests	Data	Control Points
34	GPS/IMU	0
35	GPS/IMU	47
36	GPS/IMU	1 Edge
37	GPS/IMU	1 Middle
38	GPS/IMU	4 Corners
39	GPS	0
40	GPS	1 Edge
41	GPS	1 Middle
42	GPS	4 Corners
43	--	20
44	IMU	20

En esta ocasión se han eliminado las pasadas transversales y se ha disminuido el solape.
Las conclusiones que podemos extraer de estos resultados son:

Los resultados son parecidos al caso anterior con 60% - 60% de solape y pasadas transversales.
De nuevo con 4 puntos de control podemos obtener resultados equivalentes al obtenido con 20 puntos y la influencia de añadir al GPS las observaciones inerciales no es significativa, es decir los resultados con solo GPS o con GPS/IMU son equivalentes.
Sí puede observarse que al reducir el solape y las pasadas transversales, la influencia del IMU es algo más notable que en el caso anterior. Es decir cuanto "peores" sean las conexiones entre fotos (disminución de solape y eliminación de pasadas transversales) más notoria es la influencia de las observaciones INS.

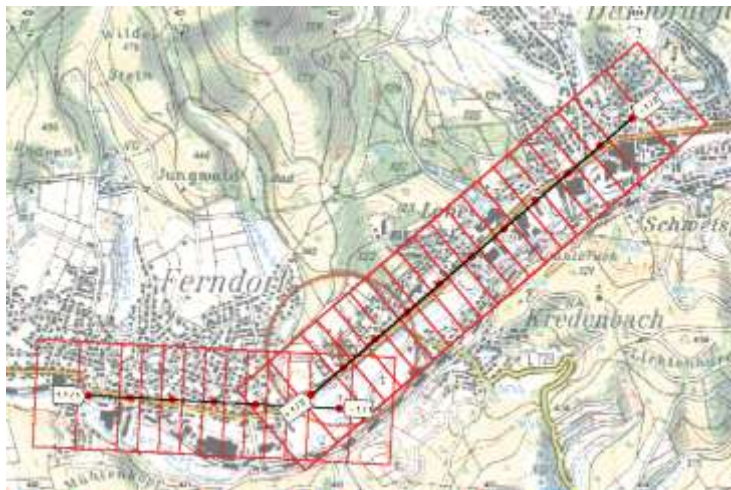
Podemos deducir que en bloques con muchas zonas de agua o de bosques en donde previsiblemente haya menos densidad de puntos de paso, y por tanto empeoran las conexiones entre fotos, la utilización del IMU es muy importante.

Conclusiones sobre ventajas en la utilización del IMU:

- La utilización del IMU en conjunto con GPS y puntos de control no supone una gran mejora en cuanto a precisión de los resultados
- Ofrece mejores valores aproximados de entrada en el ajuste, lo que hace que la generación automática de puntos de paso sea más rápida y precisa y que la medición de los puntos de control sea más sencilla
- En vuelos donde las conexiones entre fotos sean "peores", por ejemplo vuelos con poco solape, vuelos con extensas superficies de agua, vuelos con grandes zonas boscosas, etc la utilización del IMU "compensa" esta falta de conexiones y por tanto mejora el resultado.
- Si queremos aplicar Georeferenciación directa obviamente necesitamos recurrir a GPS/INS
- Vuelos en forma de traza, o en corredor (ver siguiente apartado)

- ***GNSS/INS en vuelos de traza o corredor***

Cuando hablamos de vuelos lineales o trazas nos referimos a vuelos como en el que aparece en la figura inferior y que generalmente son realizados en obras lineales como carreteras, líneas eléctricas, etc.



En estos casos, debido a la especial geometría de estas líneas, el ángulo kappa es fácil de obtener con precisión mediante puntos de apoyo al inicio y al final de la pasada, pero sin embargo no ocurre lo mismo con los ángulos phi y sobre todo omega y que son más difíciles de determinar.

Por tanto para una mejor determinación de Omega y Phi debemos optar por una de estas dos opciones:

- Añadir pasadas paralelas
- Añadir un gran número de puntos de apoyo.

Sin embargo, si recurrimos a la utilización combinada de GPS/INS podemos evitar tanto las pasadas paralelas adicionales como un elevado número de puntos de control, ya que el IMU nos determina Omega y Phi de forma muy precisa.

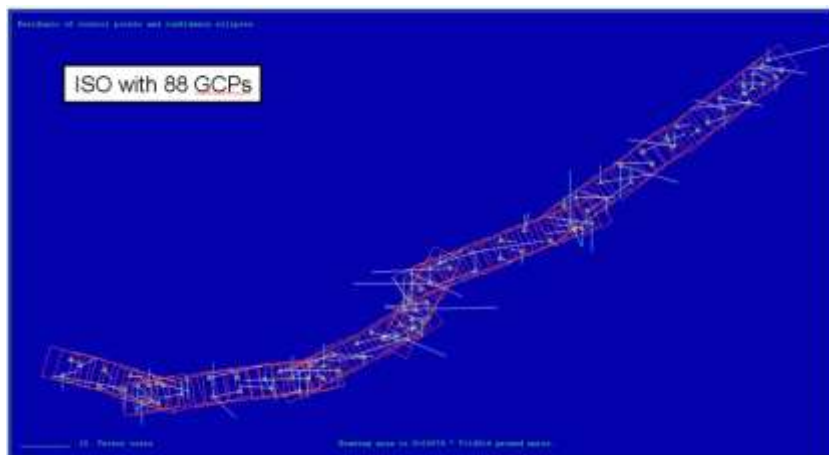
Por tanto utilizando GPS/INS + apoyo:

- GPS + apoyo = Buena determinación de X,Y,Z y ángulo Kappa
- INS = Buena determinación de ángulos Omega y Phi

Conclusión:

En proyectos lineales la utilización de observaciones inerciales es muy importante ya que complementa enormemente las observaciones GPS y los puntos de apoyo.

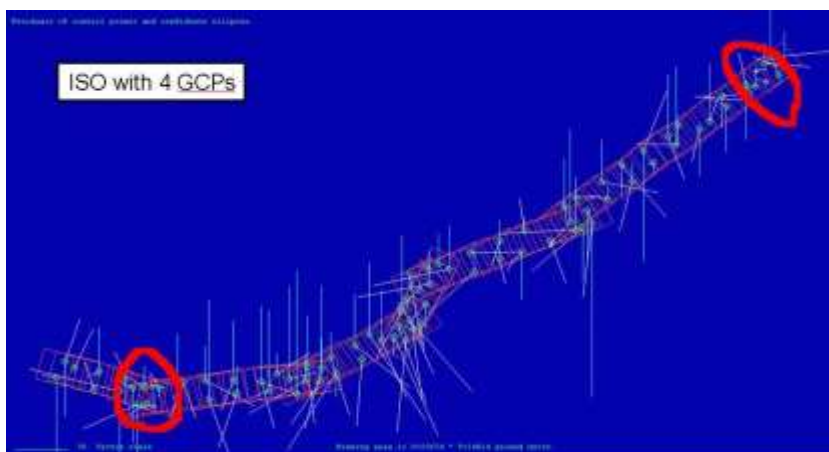
A continuación se muestra un ejemplo de un vuelo lineal calculado con GPS/INS con diferente cantidad de puntos de apoyo (con 88 puntos y con 4):



SIGMA 0 = 4.07 (1/1000)

Residuales en los puntos de control: 18. 6. 7. (1/1000)

Maximo residual en puntos de control: 49. 17. 27. (1/1000)



SIGMA 0 = 3.94 (1/1000)

Residuales en puntos de control: 12. 2. 7.

Residual máximo en puntos de control: 15. 2. 12.

Residuales en puntos de chequeo: 32. 38. 50.

En el primer caso, se calculó el bloque con 88 puntos de control, mientras que en el segundo caso se utilizaron solamente 4 puntos de control (en los círculos en rojo) utilizando los restantes 84 como puntos de chequeo.

Examinando los residuales proporcionados podemos concluir que los resultados son equivalentes y por tanto la combinación de GPS/INS + 4 puntos de control es perfectamente válida ahorrando la medición de un gran número de puntos de control.

4 Georeferenciación Directa

Cuando no se realiza aerotriangulación, y se utilizan directamente los datos de posición y actitud provenientes del sistema GNSS/INS, se dice que se está aplicando Georeferenciación Directa.

La pregunta que inmediatamente surge es: ¿Cuándo es posible aplicar Georeferenciación Directa? O lo que es lo mismo ¿Cuándo podemos prescindir de la aerotriangulación y de los puntos de control en campo?

La respuesta a esta pregunta es muy simple: Es posible utilizar la Georeferenciación directa cuando la precisión que nos proporcione sea inferior o igual a la que se quiera obtener en el producto fotogramétrico.

Así por ejemplo, si tenemos un vuelo digital con GSD 10 cm (Ground Sample Distance) significa que el pixel de la imagen ocupa en el terreno 10 cm y se puede decir que con una imagen de esas características es posible obtener una restitución a escala 1:1000.

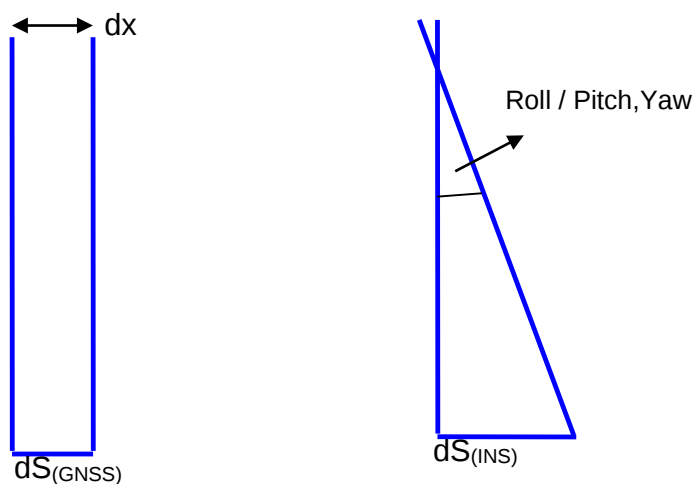
En ese caso, el error aceptado en una restitución de esa escala es aproximadamente 20 cm, por lo que si la precisión obtenida utilizando la Georeferenciación Directa es inferior a ese valor, podríamos prescindir de la Aerotriangulación y los puntos de control.

Por otra parte los errores que se produzcan en la Georeferenciación Directa dependerán de la precisión del GPS y de la precisión del IMU.

Al ser la precisión del IMU una medida angular, el error que se produzca en el terreno será mayor cuanto mayor sea la altura de vuelo, mientras que el error en el GPS tendrá una repercusión en el terreno que será independiente de la altura de vuelo

Hoy en día, con el equipamiento actual se pueden considerar valores aceptables de precisión los siguientes:

- GPS diferencia: En torno a 10 cm
- IMU: en torno a 0.005 grados sexagesimales



- ***Georeferenciación Directa en diferentes cámaras***

A continuación se estudia en diferentes cámaras cuales serían las consecuencias de aplicar la georeferenciación directa.

Cada tabla contiene:

- Altura de Vuelo: Altura de vuelo sobre el terreno en metros
- GSD (cm). Ground Sample Distance, esto es, tamaño de pixel en el terreno.
- Escala de la imagen o escala de vuelo
- dS(GNSS) sería el error debido al GPS en cm
- dS(INS) sería el error angular del IMU proyectado al terreno en cm
- dS es la componente cuadrática de los dos errores anteriores

○ *UltraCam Lp*

		Tamaño de pixel (micras)	Focal (mm)
Cámara:	UltraCam Lp	6	70

		Precisión (cm)
Precisión GNSS:	GNSS diferencial	10

		Precisión (deg)
Precisión IMU:	IMU610	0,005

Altura de Vuelo	GSD CM	Escala Imagen	dS(GNSS) cm	dS(INS) cm	dS cm
500	4,29	7142,86	10,00	2,50	10,31
1000	8,57	14285,71	10,00	5,00	11,18
1200	10,29	17142,86	10,00	6,00	11,66
1400	12,00	20000,00	10,00	7,00	12,21
1600	13,71	22857,14	10,00	8,00	12,81
1800	15,43	25714,29	10,00	9,00	13,45
2000	17,14	28571,43	10,00	10,00	14,14
2200	18,86	31428,57	10,00	11,00	14,87
2400	20,57	34285,71	10,00	12,00	15,62
2600	22,29	37142,86	10,00	13,00	16,40
2800	24,00	40000,00	10,00	14,00	17,20
3000	25,71	42857,14	10,00	15,00	18,03
3200	27,43	45714,29	10,00	16,00	18,87
3400	29,14	48571,43	10,00	17,00	19,72
3600	30,86	51428,57	10,00	18,00	20,59
4000	34,29	57142,86	10,00	20,00	22,36

Si quisiéramos obtener cartografía a escala 1:1000 (es decir GSD 10 cm) deberíamos volar a unos 1200 m sobre el terreno y el error dS sería de unos 11 – 12 cm, por tanto inferior a los 20 cm que requiere esa escala y por tanto podríamos aplicar georeferenciación directa.

Como se puede observar en la tabla anterior a partir de una altura de unos 1400 m, el error obtenido en la Georeferenciación Directa es menor que el tamaño de pixel.

○ *UltraCam Xp*

		Tamaño de pixel (micras)	Focal (mm)
Cámara:	UltraCaM Xp	6	100

		Precisión (cm)
Precisión GNSS:	GNSS diferencial	10

		Precisión (deg)
Precisión IMU:	IMU610	0,005

Altura de Vuelo	GSD CM	Escala Imagen	dS(GNSS) cm	dS(INS) cm	dS cm
500	3,00	5000,00	10,00	2,50	10,31
1000	6,00	10000,00	10,00	5,00	11,18
1200	7,20	12000,00	10,00	6,00	11,66
1400	8,40	14000,00	10,00	7,00	12,21
1600	9,60	16000,00	10,00	8,00	12,81
1800	10,80	18000,00	10,00	9,00	13,45
2000	12,00	20000,00	10,00	10,00	14,14
2200	13,20	22000,00	10,00	11,00	14,87
2400	14,40	24000,00	10,00	12,00	15,62
2600	15,60	26000,00	10,00	13,00	16,40
2800	16,80	28000,00	10,00	14,00	17,20
3000	18,00	30000,00	10,00	15,00	18,03
3200	19,20	32000,00	10,00	16,00	18,87
3400	20,40	34000,00	10,00	17,00	19,72
3600	21,60	36000,00	10,00	18,00	20,59
4000	24,00	40000,00	10,00	20,00	22,36

En este caso, es a partir de unos 2800-3000 m cuando el error dS empieza a ser menor al tamaño de pixel.

Al igual que en el caso anterior, si tomamos por ejemplo una escala de restitución 1:1000 con GSD de 10 cm deberíamos volar a una altura sobre el terreno de unos 1800 m que produce un dS de 13-14 cm que sería también inferior a los 20 cm requeridos por lo que la Georeferenciación Directa sería posible.

○ *UltraCam xp Wide Angle*

		Tamaño de pixel (micras)	Focal (mm)
Cámara:	UltraCam Xp WA	6	70

		Precisión (cm)
Precisión GNSS:	GNSS diferencial	10

		Precisión (deg)
Precisión IMU:	IMU610	0,005

Altura de Vuelo	GSD CM	Escala Imagen	dS(GNSS) cm	dS(INS) cm	dS cm
500	4,29	7142,86	10,00	2,50	10,31
1000	8,57	14285,71	10,00	5,00	11,18
1200	10,29	17142,86	10,00	6,00	11,66
1400	12,00	20000,00	10,00	7,00	12,21
1600	13,71	22857,14	10,00	8,00	12,81
1800	15,43	25714,29	10,00	9,00	13,45
2000	17,14	28571,43	10,00	10,00	14,14
2200	18,86	31428,57	10,00	11,00	14,87
2400	20,57	34285,71	10,00	12,00	15,62
2600	22,29	37142,86	10,00	13,00	16,40
2800	24,00	40000,00	10,00	14,00	17,20
3000	25,71	42857,14	10,00	15,00	18,03
3200	27,43	45714,29	10,00	16,00	18,87
3400	29,14	48571,43	10,00	17,00	19,72
3600	30,86	51428,57	10,00	18,00	20,59
4000	34,29	57142,86	10,00	20,00	22,36

En este caso, es a partir de unos 1400-1500 m cuando el error dS y empieza a ser menor al tamaño de pixel.

Para realizar una restitución a escala 1:1000 habría que volar a unos 1200 m produciéndose un dS de 11,66 cm por lo que en ese caso sería posible también aplicar georeferenciación directa.

○ *UltraCam Eagle de focal 80 mm*

		Tamaño de pixel (micras)	Focal (mm)
Cámara:	Ultracam Eagle 80	5,2	80

		Precisión (cm)
Precisión GNSS:	GNSS diferencial	10

		Precisión (deg)
Precisión IMU:	IMU610	0,005

Altura de Vuelo	GSD CM	Escala Imagen	dS(GNSS) cm	dS(INS) cm	dS cm
500	3,25	6250,00	10,00	2,50	10,31
1000	6,50	12500,00	10,00	5,00	11,18
1200	7,80	15000,00	10,00	6,00	11,66
1400	9,10	17500,00	10,00	7,00	12,21
1600	10,40	20000,00	10,00	8,00	12,81
1800	11,70	22500,00	10,00	9,00	13,45
2000	13,00	25000,00	10,00	10,00	14,14
2200	14,30	27500,00	10,00	11,00	14,87
2400	15,60	30000,00	10,00	12,00	15,62
2600	16,90	32500,00	10,00	13,00	16,40
2800	18,20	35000,00	10,00	14,00	17,20
3000	19,50	37500,00	10,00	15,00	18,03
3200	20,80	40000,00	10,00	16,00	18,87
3400	22,10	42500,00	10,00	17,00	19,72
3600	23,40	45000,00	10,00	18,00	20,59
4000	26,00	50000,00	10,00	20,00	22,36

En este caso, es a partir de unos 2400 m cuando el error en la Georeferenciación Directa es menor que el tamaño de pixel.

Para realizar una restitución a escala 1:1000 habría que volar a unos 1600 m produciéndose un dS de 12.81 cm por lo que en ese caso sería posible también aplicar georeferenciación directa.

- ***Otras consideraciones sobre la Georeferenciación Directa***

A pesar de que como se ha visto en apartados anteriores es posible en algunas ocasiones prescindir de la aerotriangulación y los puntos de control, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Siempre es necesario disponer de algún tipo de control que asegure la calidad de l trabajo, por tanto es muy recomendable disponer de puntos de chequeo o al menos cartografía existente que permita proyectarse sobre las imágenes en 3D como comprobación
2. Cuando se toman directamente las coordenadas del GPS y la actitud obtenida con el IMU, no existe ninguna conexión entre las imágenes, es decir, las orientaciones son independientes unas de otras. Esto provoca que haya paralajes residuales entre las imágenes cuando se visualizan en estéreo, lo cual puede hacer imposible algunos procesos como la restitución.
3. Para eliminar estos paralajes residuales es necesario disponer de puntos de enlace entre pasadas e imágenes que hoy en día se generan de forma totalmente automática sin interacción por parte del usuario. Por tanto se recomienda lanzar un proceso de generación automática de puntos de paso incluso aunque no tengamos puntos de control.
4. Al aplicar la Georeferenciación Directa hay que asegurar que:
 - a. La calibración de la cámara sea estable y de precisión
 - b. Los lever arms se hayan medido con la máxima precisión y estén aplicándose en el software de post-proceso de las observaciones GNSS/INS
 - c. El GPS no tenga que ser corregido de drift ni de shift, es decir que sea GPS absoluto
 - d. Las correcciones del Boresight Misalignment hayan sido calculadas y aplicadas