

## WYKORZYSTANIE JEDNOSTKI IMU TYPU MEMS DO OKREŚLENIA PRZYBLIŻONYCH ELEMENTÓW ORIENTACJI ZDJĘĆ NAZIEMNYCH

### DETERMINATION OF APPROXIMATED EXTERIOR ORIENTATION PARAMETERS OF TERRESTRIAL IMAGES USING MEMS IMU

Jakub Kolecki

AGH w Krakowie,  
Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

SŁOWA KLUCZOWE: MEMS, IMU, geo-referencja wprost, systemy mobilnego kartowania, fotogrametria naziemna

STRESZCZENIE: Opisane w niniejszej pracy badania dotyczą wykorzystania mikro elektromechanicznych sensorów inercyjnych i magnetycznych do bezpośredniego wyznaczania elementów orientacji zewnętrznej zdjęć pomiarowych. Na początku opisano rolę jaką obecnie jednostki inercyjne typu MEMS odgrywają w kontekście technologii pozyskiwania informacji przestrzennej oraz przedstawiono podstawowe zależności matematyczne obrazujące związek pomiędzy pomiarami inercyjnymi a elementami orientacji sensorów optycznych w szczególności kamer cyfrowych. Pomiary testowe przeprowadzono wykorzystując prototyp systemu fotogrametrycznego zbudowany z aparatu cyfrowego, zestawu GPS oraz jednostki IMU typu MEMS. W ramach prowadzonych prac zrealizowano pomiary w warunkach statycznych oraz dynamicznych. Pomiary inercyjne posłużyły następnie do wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć. Uzyskane wyniki pokazują, że błędy uzyskane dla azymutu osi kamery są znacznie wyższe niż dla pozostałych dwóch kątów parametryzujących macierz obrotu. Wskazano na potencjalne źródła błędów związane głównie z niedoskonałością konstrukcji systemu oraz ze zmiennością pola magnetycznego. Podniesienie uzyskiwanych dokładności możliwe jest dzięki integracji pomiarów inercyjnych z pomiarami fotogrametrycznymi oraz pomiarami GNSS. Dalszy rozwój technologii MEMS może stworzyć możliwość konstrukcji jeszcze dokładniejszych sensorów inercyjnych, tak że wkrótce mogą one znaleźć zastosowanie jako składniki komercyjnych systemów mobilnego kartowania.

## 1. WSTĘP

### 1.1. Rozwój technologii pomiarów inercyjnych w kontekście metod pozyskiwania informacji przestrzennej

Lata 80 i 90 były przełomowe dla wykorzystania sensorów inercyjnych w fotogrametrii za sprawą pojawienia się żyroskopów laserowych i światłowodowych. Jednostki inercyjne bazujące na tego typu sensorach optycznych cechuje nie tylko niższa waga i gabaryty, ale też znacznie niższa niż w przypadku sensorów mechanicznych cena.

Rozwój sensorów inercyjnych bazujących na technologii optycznej był jedynie początkiem obecnie obserwowanego, dynamicznego rozwoju urządzeń opartych na układach mikro elektromechanicznych ( MEMS - ang. *Micro-Electro Mechanical Systems*). Tanie, inercyjne sensory MEMS wykorzystywane są obecnie w takich urządzeniach jak tablety czy smartfony, gdzie znajdują zastosowanie w licznych aplikacjach (kompas, gry).

Jednostki inercyjne typu MEMS znalazły również zastosowanie w fotogrametrii. Dobrym przykładem są tu bezzałogowe systemy latające (BSL). Pozyskiwanie obrazów z tego typu platform wymaga realizacji zaplanowanej trajektorii lotu. Jest to możliwe dzięki układom sterowania wykorzystujących nie tylko odbiorniki GNSS ale również sensory inercyjne. Niski koszt sensorów MEMS oraz ich niewielka waga (kilka, maksymalnie kilkadziesiąt gram) sprawiają, że nadają się one doskonale do obsługi statków bezzałogowych, stanowiąc ważny czynnik stymulujący rozwój platform UAV. Dane nawigacyjne mogą być odczytywane z systemu sterownia i wykorzystywane do nadawania geo-referencji rejestrowanym obrazom. Powstają również naziemne systemy fotogrametryczne, w których zastosowanie jednostki inercyjnej typu MEMS wspólnie z odbiornikiem GNSS pozwala na wyznaczanie w drodze pomiaru wszystkich elementów orientacji zewnętrznej zdjęć, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej masy systemu, tak że całe urządzenia może być przenoszone i obsługiwane przez jednego operatora (Ellum, El-Sheimy 2001; Haala, Böhm 2003; Coppa et al. 2007). Problemem jest wciąż niska dokładność sensorów mikro elektromechanicznych. Ulega ona jednak ciągłej poprawie. Uważa się, że pod względem dokładności jednostki inercyjne typu MEMS zaczynają już dorównywać inercyjnym jednostkom światłowodowym.

## 1.2. Wyznaczanie elementów orientacji zewnętrznej w systemach MMS – podstawowe zależności

Pomiary inercyjne zapewniają informację o położeniu i o orientacji kątowej jednostki inercyjnej. Jeżeli jednostka inercyjna wykorzystywana jest do nadawania geo-referencji obrazom cyfrowym pozyskiwanym przez system pomiarowy (system mobilnego kartowania), należy przeprowadzić jego kalibrację. Na parametry kalibracji systemu składają się:

- kalibracyjna macierz obrotu ( $B$ ) (ang. *boresight rotation matrix*)
- wektor  $l$  (ang. *lever arm*): początek układu jednostki – początek układu kamery

Znajomość wyżej wymienionych wielkości pozwala na obliczenie elementów orientacji zewnętrznej każdego ze zdjęć, korzystając z zależności:

$$R_{CAM} = R_{IMU} B \quad (1)$$

$$X_{CAM} = X_{IMU} + R_{CAM} l \quad (2)$$

gdzie:

$R_{CAM}$  – macierz obrotu kamery (przestrzenny układ tłowy) w układzie terenowym

$X_{CAM}$  – współrzędne środka rzutu w układzie terenowym

$R_{IMU}$  – macierz obrotu jednostki inercyjnej (jej układu wsp.) w układzie terenowym

$X_{IMU}$  – współrzędne początku układu jednostki inercyjnej w układzie terenowym

$B, l$  – parametry kalibracji systemu, wektor  $l$  podany w układzie kamery

Jeżeli system wyposażony jest w większą ilość kamer, każda z nich musi posiadać swoje parametry kalibracji. Jedną z wielu metod kalibracji systemu opisuje Bayoud (2006, od strony 91). W nawigacji inercyjnej macierz obrotu  $R_{IMU}$  parametryzowana jest za pomocą sekwencji obrotów yaw ( $\psi$ ) – oś Z, pitch ( $\theta$ ) – oś Y, roll ( $\phi$ ) – oś X. (Titterton, Weston 2004, strona 411; Kolecki 2012, strona 9). Na podstawie równania (2) widać, że dokładność wyznaczenia współrzędnych zależy również od dokładności wyznaczenia kątów, a więc również od dokładności pomiarów inercyjnych.

## **2. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POMIARÓW INERCYJNYCH W FOTOGRAMETRII**

Obecne w równaniach (1) i (2) wielkości  $R_{IMU}$  oraz  $X_{IMU}$  w systemie mobilnego kartowania obliczane są między innymi na podstawie pomiarów inercyjnych. Sposób ich wyznaczania może być różny w zależności od dokładności jednostki inercyjnej oraz od dynamiki i środowiska pracy systemu pomiarowego. Poniżej opisano wybrane sposoby wyznaczania przede wszystkim orientacji kątowej jednostki inercyjnej z wykorzystaniem pomiarów jednostki inercyjnych typu MEMS.

### **2.1. Wyznaczanie kątowych elementów orientacji zewnętrznej w warunkach statycznych**

Jeżeli jednostka inercyjna znajduje się w stanie spoczynku, akcelerometry jednostki rejestrują jedynie siłę powstrzymującą jednostkę przed swobodnym spadkiem. Jest ona skierowana przeciwnie do kierunku siły ciężkości. Korzystając jedynie z pomiarów akcelerometrycznych możliwe jest wyznaczenie kątów  $\theta$  i  $\phi$  opisujących pochylenie jednostki inercyjnej. Trzeci z kątów ( $\psi$ ) jest jednak niewyznaczalny. Jeżeli jednostka inercyjna znajduje się w spoczynku możliwe jest zarejestrowanie odpowiednio dużej ilości odczytów wskazań akcelerometrów co powinno podnieść dokładność estymowanych kątów wychylenia. Zależność pomiędzy wartościami kątów  $\theta$  i  $\phi$  a odczytami akcelerometrów ( $a_x, a_y, a_z$ ) przedstawia równanie (3) (Salhuana 2012).

$$\tan \theta = \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}, \quad \tan \phi = \frac{a_y}{a_z} \quad (3)$$

Jeżeli jednostka MEMS wyposażona jest również w magnetometry, kąt ( $\psi$ ) może być wyznaczony z wykorzystaniem realizowanych przez nie pomiarów oraz uprzednio wyznaczonych kątów  $\theta$  i  $\phi$ . Podobnie jak w przypadku akcelerometrów można dokonać większej ilości odczytów magnetometrów. Pomiar magnetometryczny wykonywane w pobliżu ferromagnetyków (np. we wnętrzach budynków) mogą być obciążone znacznymi błędami. Wpływ ferromagnetyków wchodzących w skład systemu pomiarowego (np. kamera) może być wyznaczony w procedurze kalibracji a następnie skompensowany. Zależność pomiędzy wartościami odczytów magnetometrów, kątami  $\theta$  i  $\phi$  a wartością kąta  $\psi$  wyrażają równania (4) i (5) (Caruso 1997):

$$\begin{aligned} M_X &= m_x \cos \theta + m_y \sin \phi \cos \theta + Z \cos \phi \sin \theta \\ M_Y &= m_y \cos \phi - m_z \sin \phi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\tan \psi = \frac{M_Y}{M_X} \quad (5)$$

gdzie:  $M_X$  i  $M_Y$  - składowe poziome natężenia pola magnetycznego.

Wyznaczając orientację jednostki inercyjnej w wybranym państwowym układzie współrzędnych należy uwzględnić deklinację magnetyczną oraz wartość zbieżności południków.

## 2.2. Wyznaczanie kątowych elementów orientacji zewnętrznej w warunkach dynamicznych

Jeżeli jednostka inercyjna znajduje się w ruchu, poza siłą ciężkości działają na nią inne siły będące źródłem ruchu. W takim przypadku odczyty akcelerometrów jednostki nie mogą posłużyć do wyznaczenia kątów  $\theta$ ,  $\phi$  zdjęcia. Wyznaczenie tych kątów odbywa się z udziałem żyroskopów (Titterton, Weston 2004, strona 39).

Pomiary żyroskopowe jednostki MEMS cechują znaczne błędy co przekłada się na znaczny dryft wyznaczanych kątów. W celu redukcji dryftu stosowany może być filtr Kalmana bazujący na następującym założeniu: sumaryczne wartości przyspieszeń związanych z ruchem, w pewnym okresie czasu są równe zero (Xsens 2009). Oznacza to, że w każdej epoce  $t$  mogą być obliczone wartości kątów  $\theta$ ,  $\phi$  zapewniające spełnienie powyższego warunku. Kąt  $\psi$  natomiast może być dodatkowo obliczony z wykorzystaniem wskazań magnetometrów. Kąty te mogą być wykorzystywane jako obserwacje na etapie korekcji w czasie realizacji filtru Kalmana, w celu poprawy wartości wyznaczonych z udziałem żyroskopów.

## 2.3. Określanie współrzędnych

Estymowana macierz obrotu jednostki inercyjnej może posłużyć do transformacji rejestrowanego wektora przyspieszeń z układu jednostki do przyjętego układu odniesienia. Podwójne całkowanie składowych przyspieszeń pozwala na określenie współrzędnych. Niska dokładność pomiarów akcelerometrycznych a błędy pomiarów żyroskopowych powodują bardzo szybką kumulację błędów wyznaczania pozycji. Błędy pomiarów inercyjnych mogą być jednak znacznie ograniczone w drodze filtracji pomiarów w trakcie opracowania kameralnego, a także, jeżeli jest to możliwe, z wykorzystaniem procedury ZUPT (ang. zero velocity update) (El-Sheimy 2009). Procedura ta wykorzystuje warunek zerowej prędkości w momencie postoju w celu korekcji dryftu pozycji (Popowski 2007). Przykładowo Haala (Haala *et al* 2011) wykorzystuje procedurę ZUPT do nadawania przybliżonej geo-referencji danym pozyskiwanym wewnątrz budynku za pomocą platformy sensorów optycznych. Dalszy spadek błędów wyznaczenia pozycji osiągnany jest dzięki

Wykorzystanie jednostki IMU typu MEMS do określenia przybliżonych elementów orientacji zdjęć naziemnych.

integracji pomiarów inercyjnych z pomiarami GNSS. Wyznaczana dla jednostki inercyjnej macierz obrotu może również posłużyć do przeliczenia współrzędnych punktu ARP anteny GNSS na współrzędne środka rzutu zdjęcia lub centrum emitera skanera laserowego zgodnie z równaniami (1) i (2).

### 3. POMIARY TESTOWE

W celu oceny możliwych do osiągnięcia dokładności wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej, wykonano pomiary testowe w statycznych i dynamicznych warunkach pracy. Do wykonania pomiarów użyto prototypu przenośnego systemu fotogrametrycznego (Kolecki 2012). Pomiary wykonano na polu testowym uzbrojonym w fotopunkty.

#### 3.1. Prototyp przenośnego systemu fotogrametrycznego

Prototyp przenośnego systemu fotogrametrycznego (rys. 1) zbudowany jest z zestawu GPS serii Leica 1200, aparatu cyfrowego Nikon D80 oraz jednostki inercyjnej typu Xsens MTi (www: Xsens) wyposażonej w procesor przetwarzania sygnałów, umożliwiający obliczanie kątowej orientacji urządzenia w czasie rzeczywistym. Jednostka ta wyposażona jest w 3 żyroskopy, 3 akcelerometry oraz 3 magnetometry wykonane w technologii MEMS. Zgodnie ze specyfikacją producenta podczas pomiaru dynamicznego dokładność określania kątów  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  wynosi odpowiednio  $2^\circ$ ,  $0.5^\circ$  i  $0.5^\circ$ . Dokładność pomiaru RTK (RT-2) GPS zgodnie ze specyfikacją odbiornika wynosi 1 cm dla współrzędnych X i Y. Dla współrzędnej Z dokładność ta może być nieco gorsza (1 – 3 cm).



Rys. 1. Po lewej: aparat fotograficzny i jednostka AHRS zamontowane na tyczce anteny GPS. Po prawej: prototyp systemu podczas wykonywania pomiarów na obiekcie testowym

System jest skalibrowany. Umożliwia on bezpośredni pomiar elementów orientacji zewnętrznej wykonywanych w terenie zdjęć. Zarówno wartości pomiarów inercyjnych oraz kątowe elementy orientacji są odczytywane przez emulowany na porcie USB port szeregowy. Aparat obsługiwany jest przez połączenie USB. Pomiary GPS zapisywane są na karcie CE. Do obsługi pracy aparatu i jednostki inercyjnej służy autorski program

komputerowy umożliwiające wykonanie zdjęcia z poziomu komputera z jednoczesną rejestracją danych z jednostki IMU.

### 3.2. Pole testowe

Pole testowe stanowiła fasada budynku uzbrojona w sygnalizowane fotopunkty (rys. 2). Część sygnałów rozlokowano na słupach oświetleniowych. Współrzędne fotopunktów wyznaczono w układzie „2000”. Wysokości odniesiono do elipsoidy WGS 84.



Rys. 2. Pole testowe

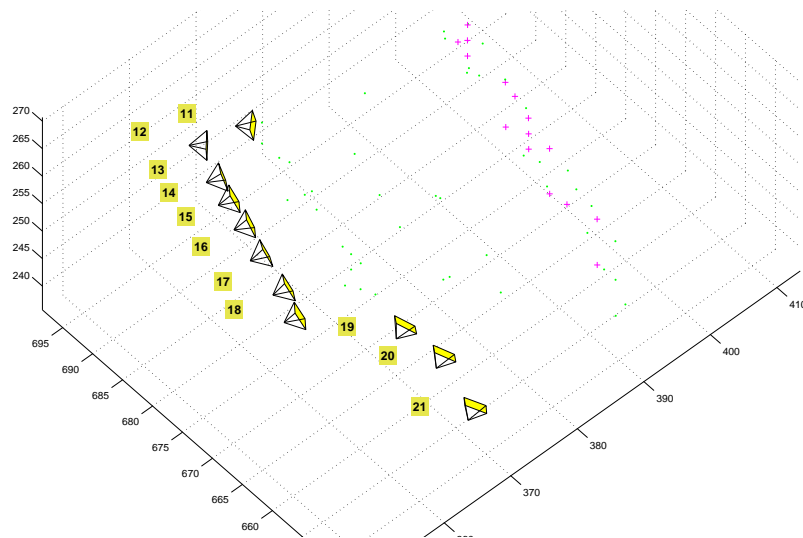
### 3.2. Wyznaczanie kątowych elementów orientacji w warunkach statycznych - bez wykorzystania pomiarów żyroskopowych

Przeprowadzony test miał na celu sprawdzenie dokładności wyznaczenia kątowych elementów orientacji zewnętrznej w warunkach statycznych – dla zdjęć wykonywanych ze statywu. W ramach testu na polu testowym (rys. 2) zrealizowano sieć 12 zdjęć. Dla każdego zdjęcia zarejestrowano 1500 odczytów z akcelerometrów i magnetometrów. Obliczone odczyty uśredniono a następnie korzystając ze wzorów (3), (4) i (5) obliczono kąty  $\psi$ ,  $\theta$  i  $\phi$  wyrażające obrót jednostki inercyjnej w układzie nawigacyjnym. Następnie uwzględniając parametry kalibracji systemu oraz wartości deklinacji magnetycznej i zbieżności południków obliczono kątowne elementy orientacji zewnętrznej zdjęć wyrażone w państwowym układzie współrzędnych geodezyjnych „2000”.

### 3.3. Wyznaczanie kątowych elementów orientacji w warunkach dynamicznych - z wykorzystaniem pomiarów żyroskopowych i filtru Kalmana

W celu oceny dokładności pomiaru kątowych elementów orientacji w warunkach dynamicznych na polu testowym (rys. 2) zrealizowano sieć 11 zdjęć widoczną na rysunku 3. Zdjęcia wykonywano „z ręki” z podparciem, w podobny sposób jak na rysunku 1. Do wyznaczenia kątowych elementów orientacji zewnętrznej wykorzystano bezpośrednio filtr

Kalmana jednostki inercyjnej działający zgodnie z zasadą opisaną w rozdziale 2.2. Wartości kątów odczytywano z portu szeregowego jednostki. Obliczenia w ramach filtra Kalmana wykonywane były zgodnie z algorytmem producenta zaimplementowanym na procesorze sygnałów urządzenia. Do wyznaczenia kątowych elementów orientacji wykorzystywane były zatem również pomiary prędkości kątowych wykonywane przez żyroskopy jednostki. Z portu szeregowego pobrano po pięć odczytów wartości kątów przed i po wykonaniu każdego ze zdjęć. Jako ostateczne wartości pomierzone dla każdego zdjęcia traktowano średnią z uzyskanych 10 odczytów. Podczas pomiaru dokonywano również rejestracji współrzędnych dla anteny GPS. Współrzędne środków rzutu obliczono korzystając z równania (2).



Rys. 3. Sieć zdjęć zrealizowana w trakcie pomiaru w warunkach dynamicznych.

● - punkty wiążące, + - fotopunkty

#### 4. WYNIKI

W tabelach 1 i 2 podano różnice pomiędzy wartościami kątowych elementów orientacji zewnętrznej wyznaczonymi z wykorzystaniem pomiarów inercyjnych i magnetycznych a wartościami referencyjnymi. Wartości referencyjne wyznaczono w wyniku wyrównania sieci fotogrametrycznych metodą niezależnych wiązek. Porównanie kątowych elementów orientacji zewnętrznej przeprowadzono dla parametryzacji alfa-ni-kappa macierzy obrotu (Kraus 1997, strony 14-17). Dla pomiaru w warunkach dynamicznych podano również różnice otrzymane dla współrzędnych.

Tabela 1. Różnice pomiędzy wyznaczonymi a referencyjnymi kątowymi elementami orientacji zewnętrznej zdjęć – wyznaczenie bez udziału pomiarów żyroskopowych, w warunkach statycznych

zdjęcie	$\Delta\alpha$ [°]	$\Delta\nu$ [°]	$\Delta\kappa$ [°]	zdjęcie	$\Delta\alpha$ [°]	$\Delta\nu$ [°]	$\Delta\kappa$ [°]
11	0.095	-0.317	-0.118	17	-0.321	-0.401	-0.158
12	-0.006	-0.336	-0.221	18	-0.364	-0.352	-0.189
13	0.009	-0.361	-0.067	19	0.018	-0.359	-0.138
14	0.027	-0.319	-0.095	20	-0.217	-0.335	-0.198
15	0.038	-0.278	-0.115	21	-0.331	-0.301	-0.136
16	0.060	-0.476	-0.129	22	-0.538	-0.330	-0.204

Tabela 2. Różnice pomiędzy wyznaczonymi a referencyjnymi elementami orientacji zewnętrznej zdjęć – wyznaczenie kątów z udziałem pomiarów żyroskopowych i filtra Kalmana

zdjęcie	$\Delta X_0$ [mm]	$\Delta Y_0$ [mm]	$\Delta Z_0$ [mm]	$\Delta\alpha$ [°]	$\Delta\nu$ [°]	$\Delta\kappa$ [°]
11	21	11	-12	2.886	0.060	0.449
12	8	9	10	3.409	0.080	0.268
13	12	6	-1	2.504	-0.080	0.265
14	12	1	18	2.490	0.044	0.313
15	13	0	19	1.958	0.096	0.322
16	28	-3	25	2.363	0.150	0.420
17	18	8	20	2.298	0.052	0.307
18	8	-2	7	1.331	0.105	0.206
19	31	-16	6	-0.623	-0.045	0.403
20	20	-4	-13	1.160	0.078	0.363
21	14	-5	-12	0.500	0.238	0.222

W tabeli 3 przedstawiono statystyki przeprowadzonych pomiarów. Podano wartości średnich różnic, odchylenia standardowe obliczonych średnich oraz odchylenia standardowe próby po odjęciu średniej różnicy.

Tabela 3. Statystyki dla przeprowadzonych eksperymentów

parametr	pomiar 1			pomiar 2					
	kąt $\alpha$ [°]	kąt $\nu$ [°]	kąt $\kappa$ [°]	$X_0$ [mm]	$Y_0$ [mm]	$Z_0$ [mm]	kąt $\alpha$ [°]	kąt $\nu$ [°]	kąt $\kappa$ [°]
średnia różnica	-0.128	-0.347	-0.147	16.8	0.5	6.1	1.843	0.071	0.322
odch. stand. średniej	0.068	0.016	0.015	5.3	2.4	4.6	0.350	0.026	0.024
odch. stand.	0.224	0.054	0.050	17.5	7.8	15.2	1.162	0.086	0.080



Różnice uzyskane dla kątowych elementów orientacji zewnętrznej cechują znaczące składniki systematyczne. Przyczyny ich występowania mogą być różne. Dla kąta  $\alpha$ , którego wartość w przypadku zdjęć poziomych skorelowana jest bardzo mocno z wartością kąta  $\psi$ , systematyczne różnice wynikać mogą z chwilowych zakłóceń pola magnetycznego związanymi ze zmienną aktywnością magnetosfery, niedoskonałością kalibracji magnetycznej (Caruso 2000) systemu, obecnością materiałów ferromagnetycznych w pobliżu miejsca wykonywania pomiaru czy też w końcu niedoskonałości konstrukcji prototypu systemu, skutkującą brakiem stabilności parametrów jego kalibracji. Ostatnia z przyczyn odpowiadać może za występowanie systematycznych różnic w przypadku kątów  $\nu$  i  $\kappa$  (mocna korelacja z kątami  $\theta$  i  $\phi$ ). Konstrukcja systemu pomiarowego umożliwi odkręcenie aparatu od płytki ustalającej. Po ponownym przykręceniu, wzajemna orientacja jednostki i aparatu może już nie być taka sama.

Obserwowane błędy przypadkowe, pozostające na poziomie 3 - 5 minut dla kątów  $\nu$  i  $\kappa$  wynikać mogą błędów pomiarów akcelerometrów. Najprawdopodobniej jednak są one skutkiem pracy migawki aparatu, która powoduje dość silne drgania konstrukcji systemu w momencie wykonania zdjęcia. Chwilowe zmiany rejestrowanego przyspieszenia sięgały w momencie pozyskania obrazu wartości nawet 10% g. Obserwowane błędy przypadkowe są mniejsze dla pomiarów wykonywanych w warunkach statycznych.

Błędy uzyskane dla współrzędnych środków rzutu są zgodne z dokładnością pomiaru RTK GPS. Estymowana z wykorzystaniem pomiarów inercyjnych i magnetycznych macierz obrotu jednostki IMU pozwala zatem na przeliczenie współrzędnych z punktu ARP na współrzędne środka rzutu bez zauważalnego spadku dokładności.

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone prace pokazują istotny potencjał wykorzystania niedrogich sensorów typu MEMS w pomiarach fotogrametrycznych. Pomiary inercyjne i magnetyczne mogą być źródłem przybliżonych kątowych elementów orientacji zewnętrznej zdjęć. Przeprowadzone eksperymenty pokazują, że uzyskiwane dla kątów  $\nu$  i  $\kappa$  wartości nie odbiegają od tych prawdziwych o więcej niż  $0.5^\circ$ , przy czym znaczną część obserwowanych różnic stanowi czynnik systematyczny. Wskazane w rozdziale 4 potencjalne źródła błędów są prawdopodobnie w znacznej mierze możliwe do kompensacji poprzez modyfikację konstrukcji systemu pomiarowego. Uzyskane dla azymutu osi kamery dokładności są jednak wyraźnie gorsze. Wynika to faktu wykorzystania pomiarów magnetometrycznych do jego wyznaczenia. Uzyskanie lepszych dokładności jest bardzo problematyczne ze względu na charakter pola magnetycznego oraz jego zakłócenia. Podobne problemy obserwowane są także w innych pracach badawczych (Ellum, El-Sheimy 2001; Kolecki 2012). Rozwiązaniem mogło by być wykorzystanie pomiarów żyroskopowych do określania kąta  $\psi$ , jednak wiąże się ono z koniecznością zastosowania dużo droższych sensorów, bazujących na technologii optycznej. Żyroskopy mikro elektromechaniczne cechują błędy pomiaru skutkujące znacznym dryftem wyznaczanych kątów.

Poprawie uzyskanych dokładności może służyć również integracja obserwacji inercyjnych z obserwacjami fotogrametrycznymi i obserwacjami GNSS (Kolecki 2012). Obserwacje fotogrametryczne mogą być realizowane bez udziału operatora dzięki

zastosowaniu detektorów i deskryptorów punktów homologicznych stanowiących w sieciach zdjęć punkty wiążące. Wyznaczone z wykorzystaniem pomiarów inercyjnych i GNSS elementy orientacji zewnętrznej mogą być wykorzystywane jako obserwacje (Kolecki 2012) lub mogą posłużyć do estymacji parametrów transformacji wewnętrznie zorientowanej sieci do układu globalnego (Bartelsen i Meyer 2010).

Jednostki inercyjne bazujące na technologii MEMS z pewnością zasługują na uwagę fotogrametrów. Stwarzają one możliwość uproszczenia i skrócenia czasu opracowania fotogrametrycznego stosunkowo niewielkim kosztem. Szybki rozwój sensorów MEMS skutkować powinien dalszą możliwych do osiągnięcia dokładności, stwarzając potencjał do rozwoju nowej klasy mniejszych i tańszych systemów mobilnego kartowania.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Bartelsen J., Mayer H., *Orientation of Image Sequences Acquired from UAVS and with GPS Cameras*, EUROCCow 2010, Castelldefels, Hiszpania, 2010.
- Bayoud, F.A., *Development of a Robotic Mobile Mapping System by Vision Aided Inertail Navigation: A Geomatics Approach*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerischen Geodätischen Kommission, 2006.
- Caruso M.J. *Application of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems*, Position Location and Navigation Symposium, San Diego, USA, strony 177-184, 2000.
- Caruso M.J. *Application of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*, Sensors and Actuators, SAE SP-1220, strony 15-21, 1997.
- Coppa U., Guarnieri A., Pirotti F., Vettore A., *A Backpack MMS Application*, The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Padua, 2007.
- Ellum C.M., El-Sheimy N., *A Mobile Mapping System for the Survey Community*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Kair, 2001.
- El-Sheimy N., *Emerging MEMS IMU and Its Impact on Mapping Applications*, Photogrammetric Week, Dieter Fritsche Ed., 2009.
- Grewal M. S., Weill L. R., Andrews A. P., *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*, Wiley-Interscience, 2007.
- Haala N., Böhm J., *A Multi-sensor System for Positioning in Urban Environments*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58(2003), strony 31-42, 2003.
- Haala N., Fritsch D., Peter M., Khosravani A. M., *Pedestrian Navigation and Modeling for Indoor Environments*, 7<sup>th</sup> International Symposium on Mobile Mapping Technology, Kraków, 2011.
- Kolecki J., *Wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej zdjęć naziemnych z wykorzystaniem obserwacji fotogrametrycznych, inercjalnych i satelitarnego systemu pozycjonowania*, Rozprawa doktorska, 2012.
- Popowski S., *Metody ograniczania błędów w nawigacji inercjalnej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika., 2007.
- Salhuana L., *Tilt Sensing Using Linear Accelerometers*, Freescale Semiconductor, Application Note, 2012.
- Titterton D. H., Weston J.L., *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Paul Zarchan, 2004.
- Xsens, <http://www.xsens.com/en/general/mti>, wejście: lipiec 2012.

Xsens, MTi and MTx User Manual and Technical Documentation, Xsens Technologies, 27 maja, 2009.

## **EVALUATION OF PHOTOSYNTH APPLICATION FOR DIGITAL RELIEFF MODELING**

KEY WORDS: MEMS, IMU, direct geo-referencing, mobile mapping systems, terrestrial photogrammetry

### **Summary**

This paper address the topic of application of MEMS inertial and magnetic sensors for direct determination of exterior orientation parameters of acquired images. First the role that MEMS inertial units currently play in the spatial information acquisition technology is characterized. Besides basic mathematical formulas describing the dependencies between inertial measurements and orientation parameters of optical sensors, especially cameras, are given. The test measurements were conducted using the photogrammetric system prototype consisted of the digital camera, GPS set and MEMS IMU. During the tests the measurements in static and dynamic conditions were carried out. Subsequently the inertial measurements were used to determine exterior orientation parameters of acquired images. The obtained results show that relatively high errors affect the determined azimuth of camera axis. The errors of other two angles, that parameterize the rotation matrix, are smaller. The potential sources of errors may be connected mainly with imperfections of system construction and instabilities of the Earth magnetic field. In order to improve the acquired accuracies, further integration of inertial measurements with photogrammetric and GNSS observation can be carried out. Further development of MEMS technology may provide the possibility of constructing more accurate sensors so that they can be shortly concerned as parts of commercial mobile mapping systems.

Dane autora:

Mgr inż. Jakub Kolecki  
e-mail: kolecki@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 39 93  
fax: 12 617 39 93

Praca zrealizowana w ramach badań nr: 15.11.150.132 – „grant dziekański”

Prace zrealizowano w ramach stypendium programu DOCTUS realizowanego przez Małopolskie Centrum Przedsiębiorczości. Część prac testowych związaną z pomiarem GPS zrealizowano w ramach pracy doktorskiej autora.