



PORTFOLIO

(na wniosek firmy F16)

Analiza i raport z badań nad zoptymalizowanymi procedurami zliczania pozycji i ułożenia kąтового w elektronicznych modułach orientacji przestrzennej.

Autor: Michał Turek

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



KAPITAŁ LUDZKI
INICJATYWA INICJATYWA



AGH



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ ROZWOJU

Wstęp

Celem prac jest przeprowadzenie eksperymentów stwierdzających celowość użytkowania cyfrowych trójwymiarowych akcelerometrów, kompasów i żyroskopów do wspierania akwizycji pozycji trójwymiarowej urządzenia mobilnego. Obecnie wspomniane komponenty sprzętowe stosowane są w urządzeniach mobilnych powszechnie. Liczne implementacje rozmaitej funkcjonalności nadbudowywanej nad takimi sensorami w systemach operacyjnych dla urządzeń mobilnych pozwalają na pobieranie gotowych danych o ułożeniu kątowym lub akceleracji. Dane obarczone są jednak wadami (wpływ środowiska, zaszumienie, błędy precyzji pomiaru, opóźnienia, rozmaite ograniczenia narzucone przez warstwę pośredniczącą). Wady takie nie stanowią problemu przy prostych zastosowaniach (np. na potrzeby interfejsu HID w aplikacji mobilnej) - często ograniczonych do traktowania ułożenia kąтового urządzenia jako jedynej istotnej informacji. Jednak gdy wymagania rosną (np. w przypadku konieczności zliczania drogi przebytej przez urządzenie) - ułożenie kątowe jest tylko między-wynikiem koniecznym do określenia innych wielkości - tu wektora przyspieszenia i pozycji 3D urządzenia. W przeprowadzonych badaniach założono wykorzystanie surowych danych z sensorów bez jakiegokolwiek wstępnej obróbki. Pozwoliło to na ustalenie faktycznych wad poszczególnych sensorów i ewentualne przeciwdziałanie ich występowaniu. Uzyskanie miarodajnych wyników będzie wymagało sporej ilości obliczeń (np. związanych z konwersjami strumienia próbek pochodzących z kalibrowanych sensorów ułożenia kąтового do postaci pozwalające na określenie wartości ułożenia kąтового czy przyspieszenia), jednak pozwoli to na sprawdzenie szeregu cech sensorów i w konsekwencji - polepszenie wyników pomiaru.

Trójwymiarowy akcelerometr cyfrowy, jako standardowy sensor w urządzeniu orientacji przestrzennej, dostarcza informacje o wektorze przyspieszenia, jednak łącznie z odczytem przyspieszenia ziemskiego, jakie działa na urządzenie. Aby było możliwe uzyskanie lokalnego wektora przyspieszenia - konieczne jest usunięcie wektora przyspieszenia ziemskiego z wyników.

W doświadczeniach używane jest urządzenie firmy Phidgets: Spatial 3/3/3 model 1056 [1] (rys. 1). Wykorzystane zostanie także API tego producenta umożliwiające programowanie sensorów i odczyt próbek. Konieczne jest tu napisanie oprogramowania, które przy wykorzystaniu wspomnianego API pozwalającego na:

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl

- kalibrowanie kompasu cyfrowego na podstawie macierzy poprawek dla pola magnetycznego w sąsiedztwie urządzenia (macierz trzeba wygenerować innymi środkami)
- ustawienie przesunięć żyroskopu cyfrowego (kalibrowanie żyroskopu)
- konfigurowanie częstotliwości próbkowania poszczególnych sensorów
- odczyt wyników z sensorów

Dużą zaletą wybranego urządzenia jest to, możliwe jest zaprogramowanie częstotliwości próbkowania sensorów - przy czym proces odmierzenia czasu jest wspierany sprzętowo i funkcjonuje poprawnie nawet w przypadku wystąpienia opóźnień w odbieraniu danych przez oprogramowanie. Jak się okazało - częstotliwości próbkowania w wielu sytuacjach wpłyną na jakość jednostkowego pomiaru, więc zagwarantowanie stałych interwałów czasowych pomiędzy pomiarami wpłynie korzystnie na stabilność wyników pomiarów.



Rys. 1 Phidgets Spatial 3/3/3

Wybór urządzenia spełnił podstawowe wymaganie: eksperymenty będą prowadzone na urządzeniu dostarczającym natywny sygnał bezpośrednio z sensorów - bez izolowania go warstwą oferowaną przez systemy operacyjne urządzeń mobilnych. Więc pozwoli to na precyzyjne rozpoznanie wad technologii pomiaru, opracowanie metod naliczania poprawek umożliwiających kompensację błędów generowanych przez kompas cyfrowy danymi pochodzącymi z żyroskopu, oraz odwrotnie.

Główną ścieżką poszukiwanego rozwiązania będzie opracowanie metody uzyskiwania ciągłych zliczeń wektora przyspieszenia lokalnego - z naliczeniem poprawki odejmującej od niego zintegrowany wcześniej wektor przyspieszenia ziemskiego. Aby było to możliwe - informacja o ułożeniu kątowym urządzenia (pozwalająca na usunięcie wektora przyspieszenia ziemskiego) musi być bardzo dokładna.

Stosowane pojęcia i symbole

Orientacją przestrzenną urządzenia będziemy nazywali porcję informacji wystarczającą do ustalenia pozycji tego urządzenia w przestrzeni trójwymiarowej oraz jednocześnie jego trójwymiarowego ułożenia kąтового w tej przestrzeni.

Postać danych zawierająca *wartości kątowe* - to dane pochodzące z sensorów orientacji przestrzennej (kompas cyfrowy lub żyroskop) przetworzone tak, iż zawierają wartości liczbowe pozwalające na jednoznaczne określenie trójwymiarowego ułożenia kąтового sensora w globalnym układzie współrzędnych. Dane wyrażone są w radianach, jednak ich wartości nie muszą mieścić się w przedziale $< 0..2\pi >$.

Symbolem **A** będą oznakowane wektory oraz ich składowe odpowiedzialne za akcelerację (przyspieszenie).

Symbolem **R** będą oznakowane wektory oraz ich składowe odpowiedzialne za rotację (ułożenie kątowe).

Pobieranie danych z sensorów będzie zachodziło periodycznie i w stałych interwałach czasowych. *Wartością chwilową* danej zmiennej będziemy nazywali wartość pochodzącą z pojedynczego (bieżącego) odczytu.

Sensor będzie przechodził proces kalibrowania i inicjalizacji. *Wartością początkową* danej zmiennej będziemy nazywali wartość pochodzącą z tego procesu.

Zastosowanie rachunku macierzy transformacji w obliczeniach

W celu sprawnego naliczania poprawek zliczonej pozycji przestrzennej zastosowany został rachunek macierzy transformacji 3D. Główną pobudką było utrzymanie kompatybilności z bibliotekami graficznymi umożliwiającymi renderowanie 3D, potrzebne do prowadzenia wizualizacji wyników (OpenGL, Direct3D). Konieczne było też uproszczenie procedury umożliwiającej:

- wielokrotne aktualizowanie rotacji (ułożenia kąтового) obiektu na podstawie odczytów z kompasu trójwymiarowego,

- sprawne korygowanie rotacji poprzez naliczania poprawki pochodzącej z akcelerometru,
- usuwanie dowolnie skierowanego wektora grawitacji - będącego składową odczytu z akcelerometru - przy znajomości w pierwszym wariancie jedynie długości i kąтового kierunku wektora, w drugim - składowych D_x , D_y , D_z wektora.

Macierze transformacji 3D zostały zaadaptowane do prowadzenia rachunku w inwersyjnym układzie współrzędnych (gdzie oś Z głębokości jest odwrócona) - także dla zachowania kompatybilności z bibliotekami 3D (taki układ współrzędnych jest natywny dla OpenGL i domyślny - choć tu opcjonalny - dla Direct3D).

Wartość stosowanej macierzy transpozycji o wektor $[D_x, D_y, D_z]$ będzie następująca:

1	0	0	D_x
0	1	0	D_y
0	0	1	D_z
0	0	0	1

Wartość stosowanej macierzy rotacji kątowej o kąt R_x (wokół osi x):

$\cos(R_x)$	0	$\sin(R_x)$	0
0	1	0	0
$-\sin(R_x)$	0	$\cos(R_x)$	0
0	0	0	1

Wartość stosowanej macierzy rotacji kątowej o kąt R_y (wokół osi y):

1	0	0	0
0	cos(Ry)	-sin(Ry)	0
0	sin(Ry)	cos(Ry)	0
0	0	0	1

Wartość stosowanej macierzy rotacji kątovej o kąt Rz (wokół osi z):

cos(Rz)	-sin(Rz)	0	0
sin(Rz)	cos(Rz)	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

Macierze transformacji 3D będą wykorzystywane jako operandy (mnożniki) przy dokonywaniu korekty orientacji przestrzennej urządzenia. Złożenia tych operacji (poprzez mnożenie kolejnych macierzy przez siebie) pozwolą na sprawne naliczanie poprawek orientacji przestrzennej w jednej iteracji algorytmu. Pomnożenie wektora pozycji 3D urządzenia (po uzupełnieniu tego wektora czwartą składową równą 0) przez macierz transformacji da wtedy nowa jego wartość.

Podobnie - rachunek można będzie stosować do realizacji rotacji wektorów zawierających dane pochodzące z sensorów. Przykładowo po wytworzeniu macierzy rotacji M_x , M_y , M_z zawierających definicje operacji rotacji kolejno wokół trzech osi trójwymiarowego układu współrzędnych, obrót wektora V_g dookoła punktu $[0,0,0]$ (hipotetyczna pozycja sensora) będzie realizowany poprzez obliczenie:

$$V_g' = V_g * M_x * M_y * M_z$$

przy czym wektor V_g będzie definiowany w przestrzeni czterowymiarowej:

$$V_g = [dx, dy, dz, 0]$$

gdzie dx, dy, dz to dane odczytane z wybranego sensora, a 0 to uzupełnienie konieczne do prowadzenia rachunku transformacji 3D z użyciem macierzy o wymiarach 4×4 . Powyższe przekształcenie będzie realizowane poprawnie zarówno



dla wektora znormalizowanego (mającego długość równą 1) jak i natywnego (o treści bezpośrednio pobranej z sensora).

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Akcelerometry cyfrowe i identyfikacja wektora grawitacji ziemskiej

Jak już wspomniano - sygnał otrzymywany z cyfrowego akcelerometru trójwymiarowego posiada zasadniczą wadę, stanowiącą przeszkodę w identyfikacji toru przemieszczania się urządzenia mobilnego: akcelerometr jest w stanie dostarczyć informację o rejestrowanym przyspieszeniu chwilowym, jednak odczyty zawierają w sobie także zarejestrowane przyspieszenie ziemskie (stanowiące zasadniczą składową w tym sygnale). Aby usunąć tę składową i zidentyfikować faktyczny wektor przyspieszenia urządzenia, konieczne jest pozyskanie informacji o ułożeniu kątowym urządzenia względem wektora grawitacji - pochodzącej z innego źródła.

Zamontowany w urządzeniu akcelerometr produkuje wyniki wyrażone jednostką $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ (nie jest konieczna konwersja sygnału pochodzącego z próbkowania) [5]. Obróbka takiego sygnału będzie przedmiotem dalszych rozważań.

Zastosowana technika kalibrowania kompasu cyfrowego

Klasyczna procedura kalibrowania kompasu polega na pobraniu dużej ilości odczytów z tego urządzenia - powstałych w wyniku różnicowania ułożenia kąowego w globalnym układzie współrzędnych. Ma na celu nie tylko zniwelowanie wad (i w konsekwencji znormalizowanie odczytów do stałego przedziału wartości) lecz także uwzględnienie wpływu nietypowych czynników zewnętrznych - najczęściej znajdujących się w pobliżu kompasu urządzeń będących źródłami dodatkowego pola magnetycznego.

W doświadczeniach wykorzystano standardową procedurę kalibrowania kompasu oraz programowy generator poprawek (wartości poprawek podawano następnie w tworzonym oprogramowaniu doświadczalnym do warstwy obsługującej kompas i za pośrednictwem metod dostarczonych w API producenta). Pozwoliło to na operowanie na znormalizowanych odczytach z sensora i z wykorzystaniem pełnego zakresu wartości generowanych przez ten sensor (czyli maksymalnej precyzji pomiaru pola magnetycznego).

Do kalibrowania kompasu użyto biblioteki compasscal.dll dostarczonej przez producenta urządzenia Phidgets Spatial 3/3/3. Biblioteka ta pozwala na rejestrowanie punktów odczytywanych z urządzenia w procesie kalibracji. Ilość

punktów powinna być znaczna - obejmując jak najwięcej rozmaitych ułożeń kątowych urządzenia. W wyniku analiz takich danych oszacowywane są następujące wartości:

- wartość podstawowa: gainAndTransform - macierz 3×3 przesunięć kątowych oraz wzmocnień pola nominalnego względem zmierzonego w procesie kalibracji. Macierz ta została wykorzystana do kalibrowania kompasu podczas eksperymentów (należy użyć jej jako mnożnika wektora pola magnetycznego otrzymanego z sensora).

- wartości pochodne:

- estimatedLocalField - obliczona na podstawie gainAndTransform wartość "siły dodatkowego źródła pola magnetycznego", które zostało "wykryte" w procesie kalibracji

- Vector3 offset - obliczona na podstawie gainAndTransform pozycja źródła tego pola

Wartości pochodne można wykorzystywać do zobrazowania źródła pola magnetycznego, które zakłóca pracę kompasu. Nie były potrzebne i używane w eksperymentach.

Procedura identyfikacji ułożenia kąтового w globalnym układzie współrzędnych

Podstawowym założeniem przyjętym przy obliczaniu początkowego ułożenia kąтового urządzenia w globalnym układzie współrzędnych jest posiadanie możliwości utrzymania urządzenia w bezruchu i pobrania wartości przyspieszenia chwilowego odpowiadającej początkowemu ułożeniu kąтового kompasu.

Wartości składowych wektora początkowego ułożenia kąтового urządzenia względem globalnego układu współrzędnych są następnie obliczane na podstawie:

- **wektora przyspieszenia chwilowego** (grawitacji) - z założeniem, że urządzenie nie przemieszcza się w tej chwili: $A_0 = [g_x, g_y, g_z]$

- **wektora początkowego ułożenia kąтового kompasu:**

$R_0 = [r_x, r_y, r_z]$

Wtedy wartość początkowego ułożenia kąтового urządzenia w globalnym układzie współrzędnych wynosi $R_{g0} = [R_x, R_y, R_z]$, gdzie:

$$R_x = \text{atan}(g_y/g_z)$$

$$R_y = \text{atan}(-g_x / (g_y * \sin(R_x) * g_z * \cos(R_x)))$$

$$R_z = \text{atan}((r_z * \sin(R_x) - r_y * \cos(R_x)) / \\ / (r_x * \cos(R_y) + r_y * \sin(R_y) * \sin(R_x) + r_z * \sin(R_y) * \cos(R_x)))$$

Wektor R_{g0} będzie wykorzystywany do precyzyjnego pomiaru zmiany ułożenia kąowego względem początkowego. Na podstawie powyższych formuł jest możliwe obliczenie kolejnego chwilowego ułożenia kąowego w globalnym układzie współrzędnych (już nie w chwili początkowej). Następnie - ustalenie wyrażonej w wartościach kąowych różnicy pomiędzy sytuacją początkową i bieżącą. To z kolei pozwala na wygenerowanie macierzy transformacji dla rotacji wokół osi X, Y, Z - co jest krokiem niezbędnym do usunięcia składowej związanej z grawitacją z pomiarów przyspieszenia chwilowego.

Usunięcie składowej związanej z grawitacją z pomiarów przyspieszenia chwilowego

Po otrzymaniu przesunięcia kąowego względem pozycji początkowej wygenerowano trzy macierze transformacji dla rotacji - kolejno wokół osi X, Y i Z: M_{drx} , M_{dry} , M_{drz} . Do macierzy podstawiono odpowiednie wartości kąowe przesunięć względem pozycji początkowej przekształcone na wartości wyrażone w radianach.

Następnie kolejno:

- odwrócono zwrot początkowy wektor przyspieszenia chwilowego (zawierający jedynie odczyt grawitacji początkowej)

$$A_{p'} = [-A_{xp}, -A_{yp}, -A_{zp}, 0]$$

- dokonano obrotu tego wektora kolejno wokół os X, Y, Z:

$$A_{p''} = A_{p'} * M_{drx} * M_{dry} * M_{drz}$$



tym samym identyfikując spodziewany wektor grawitacji ziemskiej przy bieżącym ułożeniu kątowym urządzenia, obliczonym na podstawie danych z kompasu

- policzono różnicę bieżącego wektora przyspieszenia chwilowego i A_p'' osiągając wartość chwilowego przyspieszenia ziemskiego, czyli wartość poszukiwaną.

Otrzymana wartość wektora przyspieszenia chwilowego urządzenia będzie mogła stanowić podstawę do obliczania prędkości chwilowej tego urządzenia, a w konsekwencji - jego pozycji w globalnym układzie współrzędnych.

Problem opóźnienia kompasu

Po przeprowadzeniu szeregu prób okazało się, że pomiary pochodzące z kompasu są dostatecznie dokładne, jednak sam sensor reaguje z opóźnieniem (znacznie większym niż hipotetyczne opóźnienie akcelerometru). Konieczne było oszacowanie wartości tego opóźnienia. W tym celu urządzenie umieszczono w uchwycie umożliwiającym jego obracanie wokół kolejnych osi układu współrzędnych z jednoczesnym zapewnieniem jego stałej pozycji w globalnym układzie współrzędnych (obrót bez przemieszczania). Dodatkowo - uchwyt wyregulowano tak, aby akcelerometr znajdował się dokładnie w osi obrotu (aby nie rejestrował przemieszczenia, a jedynie zmianę kierunku grawitacji ziemskiej). Następnie, stosując bufor cykliczny dla wcześniejszych odczytów z akcelerometru, powtarzano procedurę obliczania wartości przyspieszenia chwilowego opisaną w poprzednim podrozdziale. Za każdym razem zwiększano przesunięcie czasowe pomiędzy zastosowanym odczytem z akcelerometru i kompasu. Przesunięcie to wyrażone było liczbą próbek (z bufora cyklicznego pobierano każdorazowo inną, wcześniejszą wartość przyspieszenia chwilowego). Poszukiwano przy tym wartości przyspieszenia lokalnego o najniższej wartości (gdy urządzenie jedynie obracano, nie przesuwano). Doświadczenia powtórzono dla odstępów z przedziału 1..40 próbek przy częstotliwości próbkowania 2 ms. W najlepsze wyniki osiągnięto przy przesunięciu 6 i 7, co sugeruje optymalną wartość poprawki uwzględniającej opóźnienie kompasu na poziomie 12-14 ms. Istnieją tu jednak obawy, czy wartość ta nie jest jedynie specyficzna dla używanego urządzenia. Tak czy inaczej - po oszacowaniu tej poprawki możliwe będzie kontynuowanie doświadczenia z zastrzeżeniem, że dla innego rodzaju sprzętu oszacowania zapewne będzie trzeba powtórzyć.

Analiza zakłóceń sygnału pochodzącego z żyroskopu cyfrowego

Przy doświadczeniach dotyczących żyroskopu stosowano długość chwili czasowej dla próbkowania kolejno o wartościach 2 ms, 10 ms, 20 ms. Szum we wszystkich przypadkach był znaczny (około 0,3 stopnia po przeprowadzeniu konwersji odczytów do wartości kątowych).

Początkowo został wprowadzony prosty system odszumiania sygnału z żyroskopu - bazujący na użyciu 10 pozycyjnego bufora cyklicznego dla poszczególnych



odczytów. Na bazie wartości z bufora (10-ciu ostatnich odczytów) obliczano wartość średnią, którą przekształcano na trójwymiarowy wektor ułożenia kąowego urządzenia. Aby uzyskać taki wektor i użyć go następnie do zorientowania kąowego całego urządzenia (i w

konsekwencji zidentyfikowania wektora grawitacji dla akcelerometru) należało znów posłużyć się rachunkiem macierzy transformacji. Dodatkowym powodem jest brak jakiegokolwiek gwarancji zbieżnego zorientowania kąтового tych dwóch sensorów w globalnym układzie współrzędnych (sensory mogą być montowane bądź kalibrowane w urządzeniu mobilnym w dowolny sposób). Jediną dostępną techniką postrzegania orientacji przestrzennej takiego urządzenia jest analiza zmian odczytów z żyroskopu, a nie analiza ich wartości bezwzględnych (początkowych).

Poprawka dla akcelerometru była naliczana w następujący sposób:

- inicjalizacja urządzenia z założeniem, że znajduje się ono w stanie spoczynku (akcelerometr odbiera wyłącznie wektor grawitacji)
- odczytanie trzech składowych wektora grawitacji
- normalizacja odczytanego długości wektora grawitacji
- odczytanie początkowej wartości wektora ułożenia kąowego urządzenia z akcelerometru i konwersja do postaci ułożenia kąowego wyrażonego w radianach
- rozpoczęcie próbkowania w pętli, a w niej:
 - odczytanie chwilowej wartości wektora ułożenia kąowego urządzenia z akcelerometru. Zamieszczenie jej w buforze cyklicznym. Obliczenie wartości odsumionej (metodą opisaną powyżej).
 - odczytanie chwilowej wartości wektora przyspieszenia z akcelerometru (łącznie z grawitacją, którą należy usunąć). Zamieszczenie tej wartości w drugim buforze cyklicznym (służącym do składowania wcześniejszych wartości wektora grawitacji).
 - pobranie z tego bufora wartości historycznej akceleracji chwilowej najlepiej odpowiadającej ułożeniu kąowemu. Przyjęto tu założenie, że skoro procedura odsumiania sygnału z żyroskopu bazuje na 10 ostatnich (historycznych) odczytach - najbardziej właściwą wartością przyspieszenia chwilowego będzie ta, która dotyczy chwili czasowej z połowy tego przedziału (5 próbek wcześniej)

Zalety zastosowanej metody:



- posługiwanie się precyzyjnym odczytem akceleracji chwilowej bez odsumiania, więc zaniedbywania jakichkolwiek odczytów

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



Wady metody (także odkryte w czasie eksperymentów):

- użycie narzuconej ogólnie wielkości bufora cyklicznego - więc tym samym jednej wartości opóźnienia
- opóźnienie w czasie wyniku końcowego: wynoszące $5 \cdot$ czas pomiędzy poszczególnymi odczytami z sensorów. W przypadku stosowania wysokiej częstotliwości próbkowania nie stanowi to jednak dużego problemu.

Eksperymenty:

Żyroskop urządzenia znajdującego się w stanie spoczynku ma tendencję do rozsynchronizowania (*gyroscope drift*)[4]. Siła tego zjawiska została w eksperymentach oszacowana jako 0,04 - 0,06 stopnia/sek. Producent gwarantuje tu wartość: 4 stopnie/min [5]. Osiągnięto zatem wyniki nieco lepsze, lecz może to być jedynie skutkiem użycia posiadanych egzemplarzy urządzenia (pomiaru prowadzono na dwóch identycznych egzemplarzach urządzenia). Ciekawym jest fakt, że prędkość narastania błędu odczytu jest stała w czasie. Nie zależy także od ułożenia kąтового urządzenia. Pozwala to teoretycznie na oszacowanie poprawki dla *gyroscope drift* i wzięcie jej pod uwagę przy obliczeniach. Poprawka będzie jednak specyficzna dla konkretnego modelu urządzenia, więc próby wykorzystania systemu poprawek w rozwiązaniu uniwersalnym będą problematyczne. Dodatkowo - błąd żyroskopu powiększał się, gdy urządzenie znajdowało się w ruchu - powodując błędy pomiaru uniemożliwiające naliczanie poprawek do odczytów z akcelerometru. Eksperymentalnie dokonano transformacji odczytu przyspieszenia chwilowego analogicznej jak w przypadku danych z kompasu cyfrowego. Jednak dalszy ciąg poprzednio stosowanej procedury - uzależni wyniki ściśle od wartości parametru *gyroscope drift*, będącego specyficznym dla konkretnego urządzenia. Uniemożliwia to wypracowanie uniwersalnej procedury mającej na celu osiągnięcie wyniku optymalnego. Z drugiej strony - *gyroscope drift* można szacować jako stałą poprawkę charakterystyczną dla urządzenia - przy trafnym oszacowaniu uzyskując wyniki obiecujące. W ciągu dalszym rozważań celowe wydaje się jeszcze przeprowadzenie eksperymentów sprawdzających zależność precyzji pomiaru żyroskopem od przyspieszeń chwilowych. Prawdopodobnie zaburzenia pomiarów wstrząsami wyłyną na wyniki negatywnie.

Obliczanie wyników końcowych: pozycja urządzenia w globalnym układzie współrzędnych

Algorytm obliczania orientacji przestrzennej urządzenia sprowadza się do ustalania jego bieżącej lokalizacji w globalnym układzie współrzędnych. Więc po każdym odczycie i ustabilizowaniu wartości wektora lokalnego przyspieszenia chwilowego:

- długość wektora lokalnego przyspieszenia chwilowego (mierzona w m/s^2) dzielona jest przez 1000 i mnożona przez liczbę milisekund, jaka upłynęła od ostatniego odczytu (aby uzyskać wektor zmiany prędkości w ciągu chwili czasowej). Długości chwili czasowej dla prowadzonych eksperymentów to nadal 2ms, 10ms, 20ms
- utrzymywany jest wektor prędkości chwilowej urządzenia, do którego dodawany jest wektor zmiany prędkości w ciągu chwili czasowej (przyspieszenie chwilowe)
- finalnie: utrzymywany jest wektor pozycji urządzenia w globalnym układzie współrzędnych, do którego dodawany jest wektor prędkości chwilowej urządzenia.

Końcowa procedura ma zatem w prosty sposób umożliwić sprawdzenie jakości pomiaru i obranej metody. Rozbieżności wskazywanej pozycji urządzenia w globalnym układzie współrzędnych oraz pozycji faktycznej będą łatwe do zauważenia.

Wyniki

Pomiary prowadzono głównie pod kątem:

- czasu utrzymywania zbieżności wskazywanej pozycji urządzenia w globalnym układzie współrzędnych oraz pozycji faktycznej
- oceny stopnia stabilności (niezmienności) wskazania pozycji urządzenia w globalnym układzie dla urządzenia znajdującego się w spoczynku.

Wyniki wyglądają dość obiecująco, jednak osłabiane są skutkami błędów pomiaru samych sensorów: kompasu cyfrowego i akcelerometru. Przy dokonywaniu pomiarów co 2 milisekundy średni błąd wynosił około 8 cm/sek. Wzrastał jednak chwilowo do wartości 18-23 cm/sek. Wyniki dla 10 milisekund to odpowiednio 4 i 15-18 ms. podobnie kształtowały się wyniki dla czasu pomiędzy pomiarami wynoszącego 20 milisekund.

Duża częstotliwość pomiaru wpłynęła zatem negatywnie na stopień precyzji (jednostkowy błąd pomiaru dokonywanego przez sensor był większy). Dodatkowym wnioskiem jest więc to, iż jeśli czasy reakcji na zmianę orientacji przestrzennej urządzenia nie są krytyczne - bardziej korzystne jest zmniejszenie częstotliwości próbkowania danych z sensorów.

Materiały źródłowe

[1] PhidgetSpatial 3/3/3, dokumentacja urządzenia http://www.phidgets.com/products.php?category=5&product_id=1056

[2] Implementacja filtra Kalmana (C++) <http://kalman.sourceforge.net/index.php>

[3] *Hendri Maja Saputra, Zainal Abidin, Estiko Rijanto*, "IMU application in measurement of vehicle position and orientation for controlling a pan-tilt mechanism", *Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology* 04 (2013) 41-50

[4] Gyroscope Primer, http://www.phidgets.com/docs/Gyroscope_Primer

[5] Gyroscope Primer, Drift, http://www.phidgets.com/docs/Gyroscope_Primer#Drift

[6] Accelerometer Primer http://www.phidgets.com/docs/Accelerometer_Primer