

Estymacja chwilowego przemieszczenia obiektu z wykorzystaniem czujników inercyjnych

Tomasz Ursel, Michał Olinski

*Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny,
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych K61W10D07,
ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, e-mail: tomasz.ursel@pwr.edu.pl*

Streszczenie: Czujnik inercyjny IMU (Inertial Measurement Unit) jest układem składającym się z dwóch sensorów inercyjnych (trójosiowego akcelerometru i żyroskopu). Obecnie jedynie informacje o położeniu kątowym układu IMU mają dostatecznie dobrą korelację z rzeczywistym ruchem, by stosować je jako zmienne sterujące, a pomiar przemieszczeń liniowych nastręcza nadal wielu problemów obliczeniowych. W niniejszej pracy podjęto problem zastosowaniu czujnika IMU, a dokładniej zawartego w jego zespole akcelerometru, do wyznaczenia chwilowego przemieszczenia liniowego obiektu w ruchu. W ramach prac zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe z napędzanym układem przemieszczenia liniowego, układem zawieszenia czujnika oraz enkoderem. Przeprowadzono doświadczenia polegające na zadaniu kontrolowanego przemieszczenia liniowego układu z czujnikiem i określeniu stopnia poprawności odwzorowania przemieszczenia przy zastosowaniu autorskiego algorytmu filtracji sygnałów w dziedzinie czasu oraz całkowania rekurencyjnego.

Słowa kluczowe: mechatronika, stan stacjonarny, IMU, akcelerometr, podwójne całkowanie

Estimation of objects instantaneous displacement using inertial sensors

Abstract: The IMU sensor (Inertial Measurement Unit) is a system consisting of two inertial sensors (triaxial accelerometer and gyroscope). The need to use sensor fusion within the IMU is dictated by the characteristic features of measurement errors originating from individual sensor components that prevent obtaining a satisfactory navigation result in space. Currently, only information about the angular position of the IMU system has a sufficiently good correlation with the actual movement to be used as control variables and the measurement of linear displacements still poses a computational challenge. This study is focused on the application of IMU sensor, specifically the accelerometer contained in the IMU board, to determine the instantaneous linear displacement of an object in motion. As part of the work, a test stand with a driven linear displacement system, sensor suspension system and encoder was designed and built. Experiments were carried out consisting in imposing a preplanned linear displacement of the system with the sensor and determining the degree of correctness of the displacement estimation applying the new and original signal filtering algorithm in the time domain and recursive integration.

Keywords: mechatronics, stationary state, IMU, accelerometer, double integration

1. Wstęp

W otaczającej nas rzeczywistości, gdzie coraz więcej niegdyś prostych przedmiotów zyskuje nowe funkcjonalności i zastosowania, sterowanie ruchem obiektów oraz jego rejestracja znajduje zastosowania pozwalające na redefinicję dawnych cech przedmiotów. Przykładem zastosowania rejestracji ruchu do sterowania obiektem mechatronicznym są np. systemy wspomagania lądowania wielowirnikowych bezałogowych statków powietrznych (UAV – unmanned aerial vehicle) [1]. W trakcie podejścia do przyziemienia kontrolowana jest orientacja kątowna statku powietrznego oraz translacja w dwóch poziomych wymiarach przestrzennych, jak również wysokość nad podłożem. Przemieszczenia poziome rejestrowane są przez niskorozdzielczą kamerę umieszczoną w korpusie drona, natomiast wysokość nad podłożem oceniana jest na podstawie wskazań dalmierzy ultradźwiękowych lub laserowych jak w przypadku drona DJI Mavic. W urządzeniach UAV stosuje się również czujniki inercyjne (IMU - Inertial Measurement Unit) [2]. Czasami łączy się ich zastosowanie z globalnymi systemami nawigacji satelitarnej (GNSS wśród nich np. GPS). System nawigacji integrujący IMU oraz GNSS (rys. 1) wykorzystywany jest między innymi do mapowania lotniczego i fotogrametrii [3]. Zastosowania takich systemów są jednak znacznie szersze i obejmują również monitorowanie miejsc katastrof oraz stabilizację kamer. Kolejnymi przykładami wykorzystania czujników inercyjnych jest analiza ruchów ludzkiego ciała [4] jak również zastosowanie informacji o rotacji pilota do sterowania kursorem myszki na ekranie (rys. 2) [5].

Czujnik IMU jest układem składającym się z dwóch sensorów inercyjnych (trójosiowego akcelerometru i żyroskopu) oraz dodatkowo mogącym zawierać magnetometr, barometr, a także urządzenie GPS [6]. W podstawowej postaci służy określaniu orientacji kątownej obiektu, na którym jest zamontowany. Konieczność integracji wskazań kilku sensorów [3, 7] w obrębie IMU jest podyktowana charakterystycznymi cechami błędów pomiarowych poszczególnych czujników. Uniemożliwiają one otrzymanie zadowalającego wyniku nawigacji w przestrzeni. Akcelerometr określa orientację czujnika względem ziemskiego pola grawitacyjnego i pozwala uzyskać dobry wynik gdy obiekt pozostaje w bezruchu lub zmienia swoją orientację i pozycję z niewielkimi prędkościami. Mierzone przyspieszenie jest obciążone wysokoczęstotliwościowym szumem i małą odpornością na drgania akustyczne. Żyroskop określa zmianę orientacji względem pozycji startowej i umożliwia uzyskanie lepszego niż akcelerometr wyniku w czasie gdy pozycja ulega nagłym zmianom. Wynik z żyroskopu obciążony jest jednak brakiem możliwości określenia pierwotnej pozycji oraz szumem niskoczęstotliwościowym. Powodują one dryft, czyli zmianę wskazywanej przez żyroskop pozycji kątownej nawet gdy nie ma to odzwierciedlenia w sytuacji rzeczywistej, np. podczas zatrzymania po wcześniejszym ruchu.



Rys. 1. System inercyjno- nawigacyjny xNAV firmy OxTS zamontowany na UAV [3]



Rys. 2. Pilot zdalnego sterowania wykorzystujący czujniki inercyjne [5]

Należy zwrócić uwagę na fakt, że tylko informacje o położeniu kątowym układu IMU mają dostatecznie dobrą korelację z rzeczywistymi wartościami przemieszczeń kątowych. Pozwala to

stosować je jako zmienne sterujące. Określanie przemieszczeń liniowych na podstawie pomiarów z IMU nastęrcza nadal wielu problemów obliczeniowych. Jedną z najczęściej stosowanych metod wyznaczania przemieszczenia liniowego jest zastosowanie podwójnego całkowania sygnału przyspieszenia obiektu. Metoda obarczona jest jednak wadą obecności dryftu położenia liniowego [8]. Wada spowodowana jest niesymetrycznym względem osi czasu przebiegiem przyspieszenia prowadzącym do wykrycia niezerowej prędkości po zatrzymaniu obiektu, a w efekcie do liniowego dryftu położenia. Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być zastosowanie idealnego układu (nieistniejącego w rzeczywistości) mierzącego przyspieszenie lub przekazanie do algorytmu całkującego informacji o tym, kiedy układ w rzeczywistości przyspiesza, a kiedy zwalnia. Inną możliwością jest zastosowanie detekcji zerowej prędkości [9, 10] wykorzystując analizę efektów towarzyszących poruszaniu się obiektu materialnego.

Kolejną trudnością jest precyzyjne odjęcie wartości stałej przyspieszenia ziemskiego [8] od wskazań akcelerometru. Wraz ze zmianą orientacji czujnika zmienia się rzut wektora grawitacji na jego osie pomiarowe, co prowadzi do powstania błędu którego charakter jest przedstawiony w tab. 1 i wynika z błędnego oszacowania (określenia) przyspieszenia śledzonego obiektu. Błąd ten prowadzi do wzrostu, mającego charakter wykładniczy, szacowanej pozycji obiektu podczas gdy w rzeczywistości pozostaje on nieruchomy.

W niniejszej pracy podjęto problem metody wykorzystania sygnału z akcelerometru w celu poprawnego określenia przemieszczenia liniowego przy zastosowaniu autorskiego algorytmu. Uzyskane wyniki będą mogły między innymi pomóc w pracach nad systemem śledzenia pozycji pieszego w pomieszczeniach zamkniętych [11].

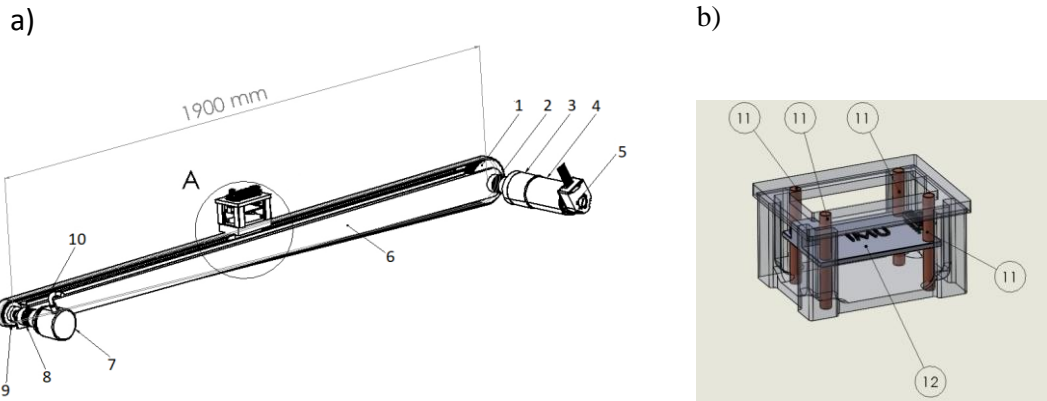
Tab. 1. Wartości błędów szacowanego przemieszczenia wynikających z niedokładnego określenia orientacji kątowej akcelerometru w ziemskim polu grawitacyjnym [8].

Błąd orientacji akcelerometru [°]	Błąd przyspieszenia [m/s ²]	Błąd prędkości [m/s]	Błąd przemieszczenia [m] w pierwszych 10s	Błąd przemieszczenia [m] w pierwszej 1 min	Błąd przemieszczenia [m] w pierwszych 10 min	Błąd przemieszczenia [m] w pierwszej 1h
0,1	0,017	0,17	1,7	61,2	6120	2,2 * e ⁵
0,5	0,086	0,86	8,6	309,6	30960	1,1 * e ⁶
1	0,17	1,7	17	612	61200	2,2 * e ⁶
1,5	0,256	2,56	25,6	921,6	92160	3,3 * e ⁶
2	0,342	3,42	34,2	1231,2	123120	4,4 * e ⁶
3	0,513	5,13	51,3	1846,8	184680	6,6 * e ⁶
5	0,854	8,54	85,4	3074,4	307440	1,1 * e ⁷

2. Materiały i metody

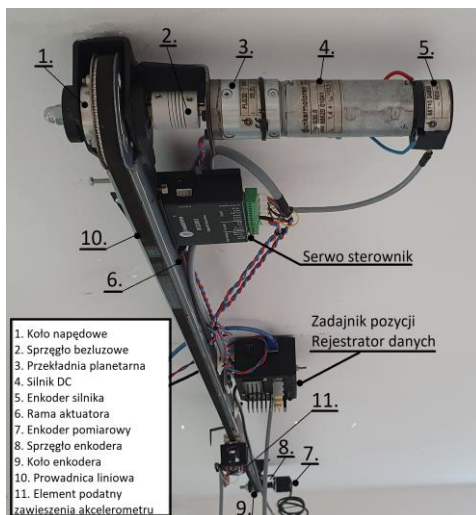
W celu zbadania możliwości wykorzystania akcelerometru jako urządzenia przydatnego do nawigacji w przestrzeni, zaprojektowano (rys. 4) i zbudowano stanowisko testowe (rys. 5). Miało ono za zadanie przemieszczać badany czujnik w linii prostej zgodnie z zadaniem ruchem. Stanowisko wyposażone w prowadnicę liniową firmy IGUS jak również układ sterujący i układ akwizycji danych oparty na mikrokontrolerze ATSAM3X8E z 32 bitowym rdzeniem Cortex M3 i sprzętową jednostką zmiennoprzecinkową. W celu uzyskania założonego i powtarzalnego ruchu posłużono się aktuatorem liniowym (rys. 4) wyposażonym w napęd zrealizowany przy pomocy serwomechanizmu, napędzającego cichobieżną przekładnię pasową. Układ napędowy zbudowany jest ze sterownika Leadshine DCS 303, silnika z enkoderem

HEDS 512 oraz przekładnią planetarną (1/20,25) firmy Buhler Motor. Koło napędowe przekładni pasowej posiada 68 zębów i jest sprzężone z osią serwomechanizmu za pomocą sprzęgła bezluzowego. Koło bierne posiada 32 zęby i jest sprzężone z osią enkodera inkrementalnego o rozdzielczości 720 impulsów na obrót co odpowiada przemieszczeniu akcelometru o 0,012 mm na impuls. Zastosowanie paska zębatego pozwala na osiągnięcie dużych przyspieszeń i prędkości wózka z akcelometrem na maksymalnym odcinku pomiarowym 1700 mm.

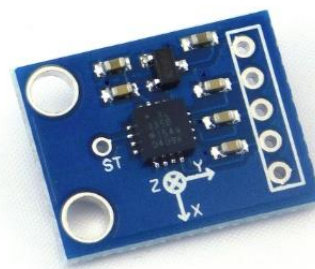


Rys. 4. Stanowisko testowe do pomiarów przemieszczeń liniowych z wykorzystaniem czujników inercyjnych a) oraz ich układem zawieszenia b)

Zbudowany układ pomiarowy został przedstawiony na rys. 5. W trakcie pomiarów przetestowano czujnik przyspieszenia ADXL (rys. 6) z interfejsem analogowym o zakresie 0-16 g, wykorzystując jego maksymalne możliwości szybkości odczytu przyspieszenia, częstotliwość 3570 Hz.



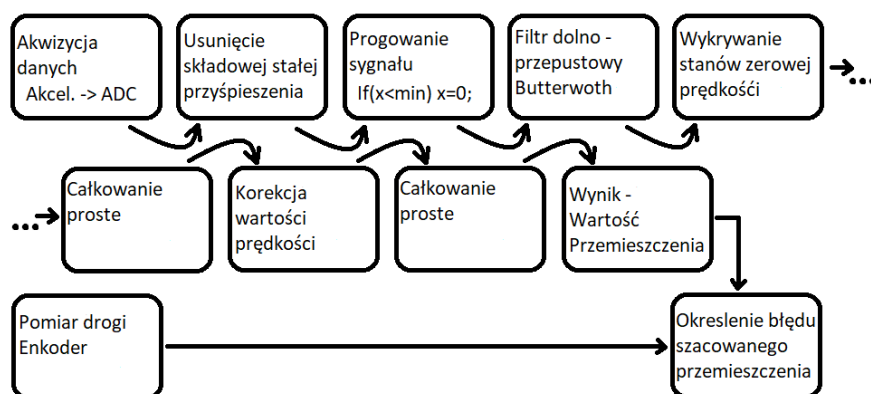
Rys. 5. Zbudowany układ pomiarowy



Rys. 6. Zdjęcie badanego akcelometru ADXL

Procedura pomiarowa obejmuje wykorzystanie płytki ewaluacyjnej z mikrokontrolerem Atmel ATSAM3X8EAU i zapis danych na karcie SD. Pomiary i obróbka danych były przeprowadzone zgodnie z procedurą przedstawioną na rys. 7, który zawiera również elementy odnoszące się do nowego autorskiego algorytmu estymacji przemieszczenia. Algorytm zakłada między innymi potrzebę realizacji następujących głównych operacji:

- usunięcie składowej stałej przyspieszenia pochodzącej od grawitacji ziemskiej,
- wykrycie stanów stacjonarnych (stan zerowej prędkości gdy obiekt nie porusza się),
- korekcja wartości prędkości po całkowaniu przyspieszenia.



Rys. 7. Schemat blokowy toru pomiarowego

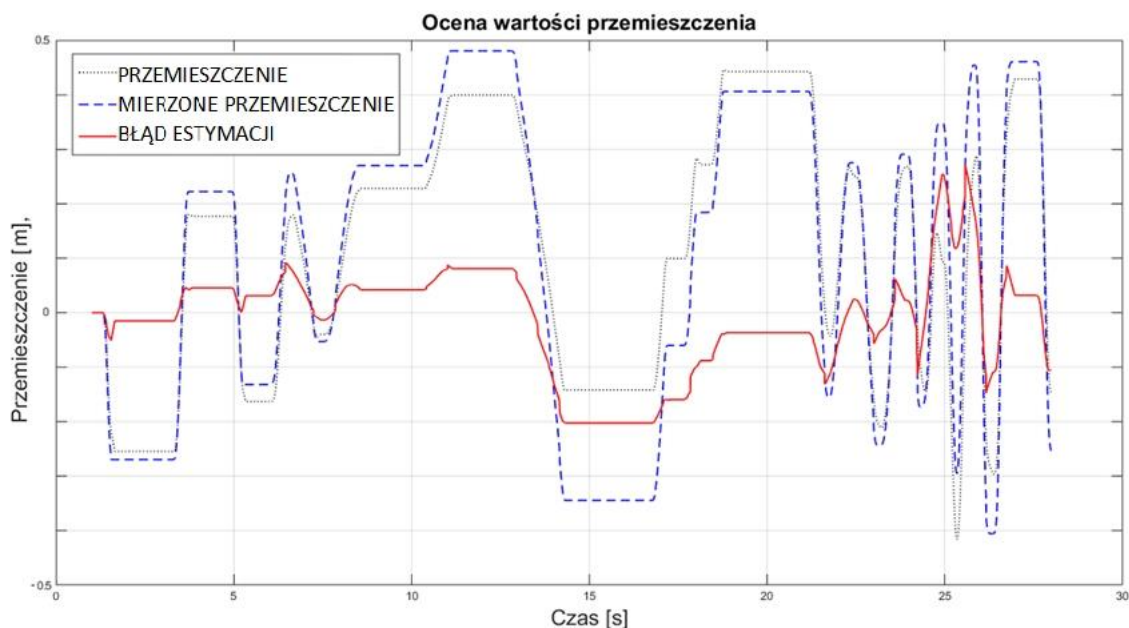
Podczas działania dowolnego układu mechanicznego każda pracująca para kinematyczna jest źródłem szumu mechanicznego wynikającego z efektów adhezji znanych jako Slipstick oraz tarcia nieidealnych geometrycznie powierzchni. Kolejnym źródłem szumu są elementy przekładni okresowo stykające się ze sobą z niezerową prędkością co prowadzi do generacji drgań o częstotliwościach charakterystycznych dla budowy pary kinematycznej, np. ząbienie. Wszystkie te efekty generują sygnał zakłócający pomiar przyspieszenia przez akcelerometr. Istotne może okazać się więc określenie częstotliwości szumu pomiarowego, w celu określenia jego źródła. Między innymi z tych powodów zastosowano prowadnicę liniową wykonaną z materiału samoślizgowego IGLIDUR. Pozwoliło to w znacznym stopniu wyciszyć układ w porównaniu do prowadnic zawierających elementy toczne. Miało to pozytywny wpływ na wartość szumu dochodzącego do akcelerometru.

4. Wyniki

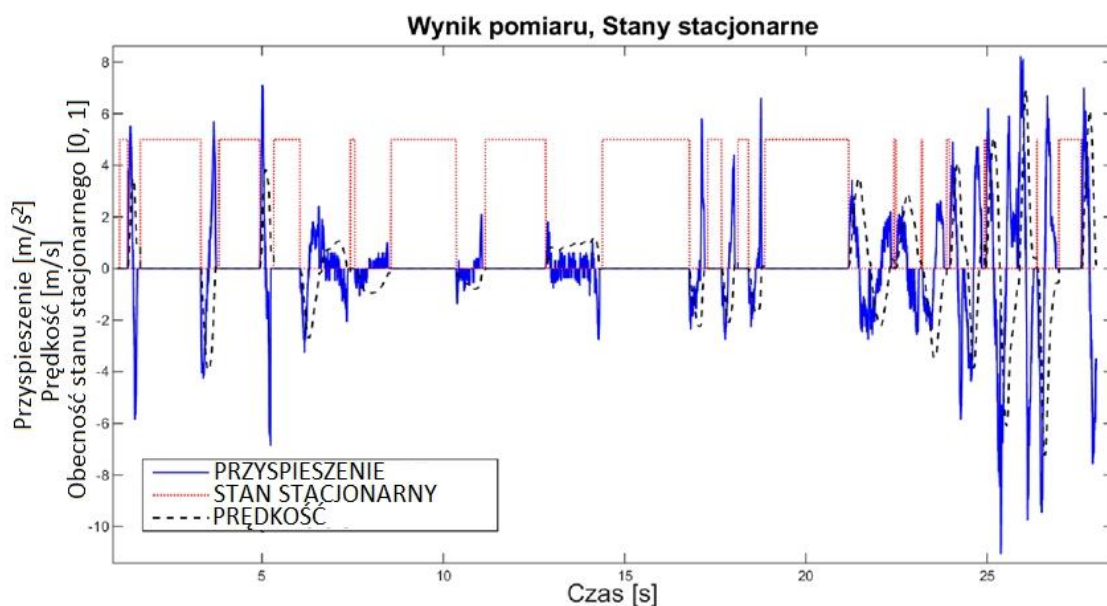
Celem przeprowadzanych pomiarów jest określenie dokładności odwzorowania (estymacji) przemieszczenia akcelerometru na podstawie zmierzonego przyspieszenia. Wyniki pomiaru przyspieszenia i przemieszczenia przedstawiono poniżej na wykresach rys. 8 i rys. 9. Podczas testów zadbano o przypadkowy charakter zadawanego przemieszczenia. Istotne jest to, że dzięki napędowi liniowemu wymagany ruch określany był za pomocą zadajnika. Pozwoliło to całkowicie wyeliminować wpływ zewnętrznych zakłóceń np. nacisku ludzkiej ręki na zawieszenie akcelerometru. Dzięki czemu orientacja czujnika przyspieszenia względem ziemskiego pola grawitacyjnego pozostawała niezmienna.

Istotną cechą autorskiego algorytmu jest stabilność długookresowa uzyskiwanej wartości przemieszczenia po przeprowadzeniu operacji podwójnego całkowania. Chodzi o sprawdzenie przez jaki czas algorytm jest w stanie poprawnie określać przemieszczenie bez korekcji z zewnątrz. Uzyskane wyniki charakteryzują się dobrą stabilnością w stosunkowo długim czasie badania. Błąd oszacowania położenia po upływie 28 s od chwili rozpoczęcia pomiaru zawiera się w granicy 10% wartości maksymalnego przemieszczenia akcelerometru (rys. 8). Potwierdza to, że uzyskane z czujnika dane mogą pozwolić na estymację zmian położenia w czasie.

Stabilność długookresowa przemieszczenia może być uzyskana dzięki wykrywaniu stanów stacjonarnych - przedziałów czasowych, w których akcelerometr nie porusza się (rys. 9). Podczas badania przedziały te są odnajdywane dzięki obserwacji wartości przyspieszenia. Założono, że obiekt badany nie porusza się gdy wartość przyspieszenia osiąga poziom zerowy. Znajduje to odzwierciedlenie w rzeczywistości, gdyż zawsze gdy obiekt jest w ruchu, w parach kinematycznych aktuatora liniowego generowany jest szum odbierany przez układ pomiarowy.



Rys. 8. Przebieg wartości estymowanego przemieszczenia akcelerometru odniesiony do rzeczywistego przemieszczenia mierzonego za pomocą enkodera oraz błąd estymacji przemieszczenia



Rys. 9. Uzyskane wartości przyspieszenia, obliczona i skorygowana wartość prędkości akcelerometru oraz zaznaczone przedziały czasowe wykrycia stanu stacjonarnego, w którym układ nie poruszał się

5. Wnioski

W artykule przedstawiono badania prowadzone pod kątem zastosowania autorskiego algorytmu do estymacji przemieszczeń obiektu za pomocą czujników inercyjnych, a dokładniej akcelerometru. Zbudowano niezbędny układ pomiarowy eliminujący wpływ czynników zakłócających pomiar takich jak zmiana orientacji czujnika podczas jego ruchu oraz niedokładność referencyjnego pomiaru przemieszczenia. Przeprowadzono eksperyment

pozwalający na ilościową ocenę błędu estymacji przemieszczenia akcelerometru na podstawie jego wskazań.

Wyniki badań potwierdziły iż opracowany autorski algorytm pozwala z dużą dokładnością i w stosunkowo długim przedziale czasu estymować zmiany położenia liniowego. Czynnikiem znacznie poprawiającym estymację zmian położenia jest możliwość wykrycia stanów stacjonarnych, w których błąd oszacowania prędkości może zostać usunięty. Wykrywanie tych stanów możliwe jest w sytuacji gdy akcelerometr przemieszcza się będąc w kontakcie z innym ciałem, co generuje szum wysokoczęstotliwościowy, który sprawdza się z dobrym efektem jako wyznacznik niezerowej prędkości akcelerometru.

Przyszłe prace powinny skupić się na usprawnieniu algorytmu oceny występowania stanów stacjonarnych przez poszukiwanie innych cech sygnału mających korelację z prędkością akcelerometru. Istotną cechą szumu powstającego gdy akcelerometr przemieszcza się będąc w kontakcie z innym ciałem jest zależność jego częstotliwości od chwilowej prędkości akcelerometru. Cecha ta może pozwolić na rozszerzenie informacji o prędkości badanego obiektu również na chwile gdy prędkość ta jest stała i niezerowa. Obecny algorytm prowadziłby w takim przypadku do powstania błędu polegającego na wykryciu w tej sytuacji stanu stacjonarnego. Dodatkowo istotne jest wyłonienie możliwie dobrego akcelerometru, którego wskazania pozwolą uzyskać jak najdokładniejszy wynik przemieszczenia. Istotną jego cechą powinna być liniowość wartości mierzonego przyspieszenia niezależna od częstotliwości ruchu. Ponadto, uzyskanie wartości prędkości chwilowej obiektu pozwoliłoby na znaczną poprawę otrzymywanych wartości przemieszczenia. Użycie „czujnika prędkości liniowej” wyeliminowałoby wpływ błędu powstającego w trakcie podwójnego całkowania przyspieszenia. Nawet stosunkowo rzadkie oszacowanie prędkości pozwoliłoby stroić algorytm wykorzystujący przyspieszenie do szacowania przemieszczeń.

Literatura

- [1] <http://52ebad10ee97eea25d5e-d7d40819259e7d3022d9ad53e3694148.r84.cf3.rackcdn.com/Acal-BFi-OxTS-INS-Case-Study.pdf>
- [2] Kiwała S. et al.: Fast trajectory planning and programming of a robotic manipulator using RobotStudio software for inertial sensor testing. IJES, vol. 4, (nr 1), pp. 56-64, 2016.
- [3] <https://www.oxts.com/products/xnav/>
- [4] Qiu, S. et al.: Ambulatory estimation of 3D walking trajectory and knee joint angle using MARG Sensors. IEEE 978-1-4799-4233-6/14, 2014.
- [5] <https://www.lg.com/pl/lg-magazine/novosci/magic-remote-pilot-tv>
- [6] Olinski M., Ceccarelli M. et al.: An experimental characterization of human knee joint motion capabilities, Springer cop., Mech. and Machine Science, 43, New Trends in Mech. and Machine Science, Theory and Ind. App., Editors: P. Wenger et al, pp. 411-419, 2017.
- [7] Moreno, J.C., et al.: Wearable robot technologies. In: Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2008.
- [8] ChRobotics. <http://www.chrobotics.com/library/accel-position-velocity>
- [9] Skog I., Handel P., Nilson J., Rantakokko J.: Zero-Velocity Detection - An Algorithm Evaluation. - IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol.57, pp.2657-2666, 2010.
- [10] Ma M., Song Q., Gu Y., Li Y., Zhou Z.: An Adaptive Zero Velocity Detection Algorithm Based on Multi Sensor Fusion for a Pedestrian Navigation System. - IEEE Sensors (Basel) pp.3261, 2018.
- [11] Zhang R., Hoflinger F., Reindl L.: Inertial Sensors Based indoor Localization and monitoring system for emergency responders. IEEE Sensors J. 2013;13:838-848.