

Stanisław POPOWSKI
Witold DĄBROWSKI

POMIAR PARAMETRÓW RUCHU NA OBIEKTACH MOBILNYCH

STRESZCZENIE: *W badaniach eksperymentalnych różnych obiektów latających, pływających i jeżdżących zachodzi konieczność pomiaru podstawowych parametrów tego ruchu. Do najczęściej mierzonych parametrów zalicza się: prędkości kątowe w wybranym układzie współrzędnych, przyspieszenia liniowe, kąty orientacji, prędkości liniowe względem ośrodka i ziemi, położenie oraz inne wielkości w zależności od typu obiektu. Aby określić wymienione parametry ruchu należy dokonać odpowiednich pomiarów oraz obliczeń. Na etapie obliczeń można wykorzystać metody integracji pomiarów (np. filtrację) w celu zwiększenia wiarygodności otrzymanych wyników. W referacie przedstawiono wybrane metody pomiarowe parametrów ruchu obiektów mobilnych oraz przykładowe konfiguracje takiego system w zależności od rodzaju obiektu.*

Słowa kluczowe: *układy pomiarowe, orientacja przestrzenna, filtracja sygnałów, dynamika ruchu*

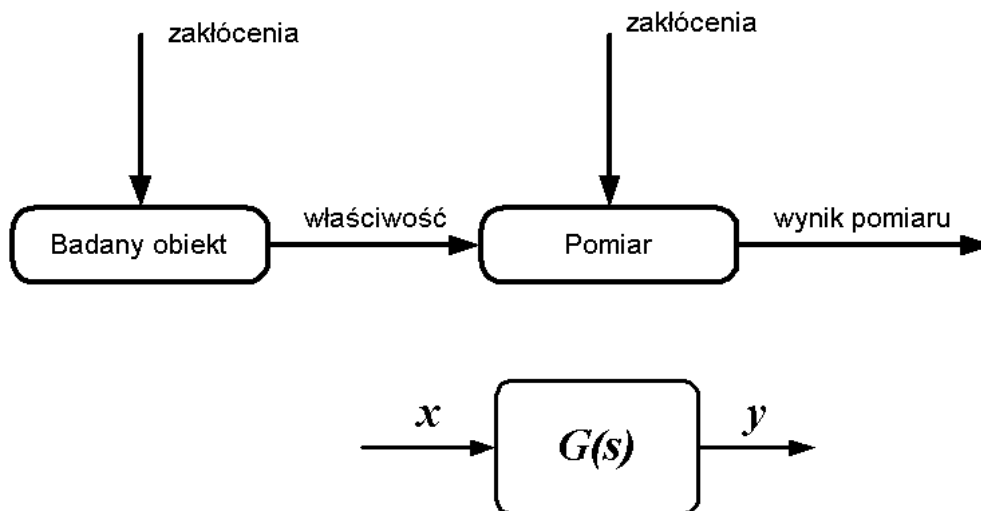
1. WPROWADZENIE

Do identyfikacji dynamiki badanego obiektu niezbędne są pomiary i rejestracje parametrów ruchu rzeczywistego obiektu podczas wykonywania różnych wybranych manewrów.

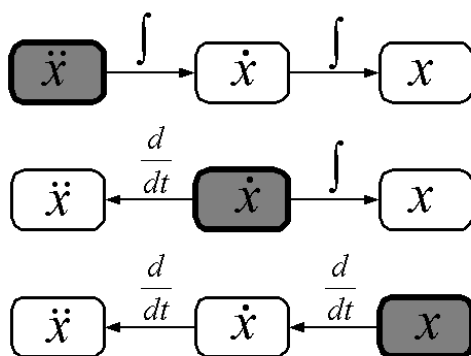
dr inż. Stanisław POPOWSKI
popowski@ilot.edu.pl

mgr inż. Witold DĄBROWSKI
dabrowski@ilot.edu.pl
Instytut Lotnictwa

Proces pomiaru i obliczania wielkości fizycznych takich jak przyspieszenie, prędkość liniowa, przemieszczenie, przyspieszenie kątowe, prędkość kąto-
wa, orientacja kąto-
wa, realizowany jest poprzez układ pomiarowy (rys. 1), gdzie na wejściu mamy wielkość fizyczną mierzoną (x), a na wyjściu otrzymujemy w wyniku przekształcenia $G(s)$ wielkość będącą pomiarem. Czynnikiem utrudniającym pomiary, który ogranicza dokładność ich wykonania są zakłócenia. Proces pomiaru wybranej wielkości może przebiegać zgodnie z zamieszczonym poniżej schematem (rys. 2). Można wybrane wielkości zmierzyć bezpośrednio, co symbolicznie przedstawiono w postaci bloków z tymi wielkościami na wyróżnionym tle. Tworzą one przekątną prezentowanej struktury. Można je również obliczyć korzystając z operacji całkowania i różniczkowania.



Rys. 1. Proces pomiaru i elementarny układ pomiarowy



Rys. 2. Wybór pomiaru wielkości pierwotnej i sposoby wyznaczania wielkości pochodnych

Wybór pierwotnej, mierzonej wielkości i sposób wyznaczania wielkości z nią związanych jest najważniejszym etapem projektowania systemu pomiarowego. Niewłaściwie dobrana struktura systemu nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości pomiarowych użytych czujników. Powodować może ponadto małą odporność na działające czynniki zakłócające np. wibracje, zmiany temperatury otoczenia, duże prędkości kąto-
we, znaczące pochylenia i przechylenia itp.

Operacja całkowania powoduje efekt podobny do działania filtra dolno-przepustowego. Stałe i wolnozmiennie zakłócenia zostają wzmocnione w procesie całkowania. Szybkozmiennie symetryczne przebiegi w procesie całkowania ulegają wygładzeniu. Odwrotnie, operacja różniczkowania powoduje efekt działania filtra górnoprzepustowego; stałe zakłócenia dają zerowy sygnał wyjściowy, a szybkozmienne dają duże wartości przyrostów w czasie. Proces różniczkowania generuje szумы, a całkowanie powoduje narastanie wolnozmiennych błędów.

Poniżej zostaną przedstawione systemy pomiarowe wykorzystane na pokładzie poduszkowca ratowniczo – patrolowego PRP-560 "Ranger" oraz śmigłowca badawczego, w których zastosowano bardzo tanie, i mało dokładne czujniki pomiarowe. Systemy te zbudowano raz w tradycyjny sposób z całkowaniem mierzonych prędkości kątowych, oraz w taki sposób aby uniknąć operacji całkowania z wykorzystaniem pomysłu pseudoorientacji [2].

2. OBIEKTY BADAŃ

Zdjęcie poniżej (rys.3) przedstawia dwa obiekty, na których prowadzono badania. Poduszkowiec oraz model doświadczalny śmigłowca. Poduszkowiec typu PRP-560 „Ranger” wyprodukowano w Instytucie Lotnictwa. Podstawowe dane techniczne są następujące:

- masa pustego pojazdu: 1000 kg;
- napęd: jeden silnik spalinowy o mocy: 96 kW ,
- wysokość pokonywanych przeszkód: 0,3 m;
- prędkość maksymalna (na wodzie): 15 m/s;
- prędkość maksymalna (na lodzie): > 20 m/s.



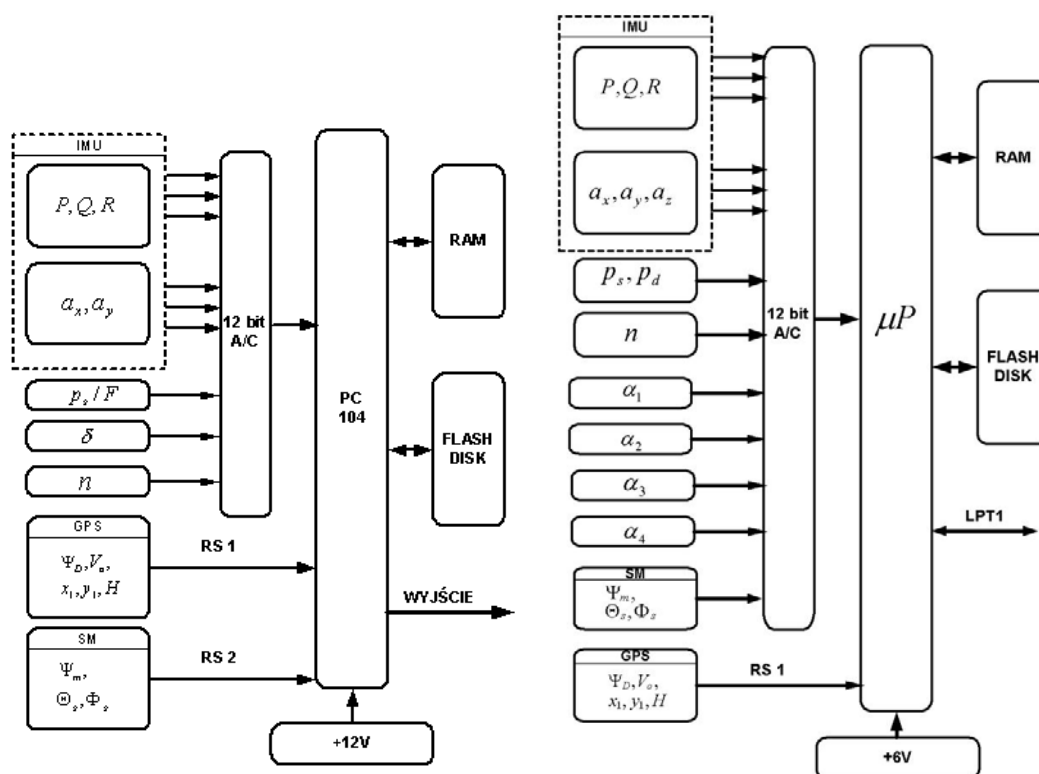
Rys. 3. Obiekty badań: poduszkowiec PRP-560 "Ranger" i model śmigłowca

Badania eksperymentalne przeprowadzono również na pokładzie doświadczalnego śmigłowca wykorzystywanego do badania wpływu pierścienia wirowego na bezpieczeństwo manewrów [3]. Napęd śmigłowca stanowi silnik spalinowy o mocy 1.3 kW, a średnica wirnika wynosi 1780 mm.

2. MIERZONE PARAMETRY – UKŁADY POMIAROWE

Na pokładzie poduszkowca mierzono podstawowe parametry ruchu jak: prędkości kątowe, przyspieszenia liniowe, prędkość podróży, kąt drogi, zmiany położenia środka masy poduszkowca oraz prędkość obrotowa silnika w danej próbie i położenie urządzeń sterowych (położenie steru kierunku). Po przeprowadzeniu próby rejestrowano mierzone parametry oraz obliczano orientację kątową oraz inne parametry wyznaczone w sposób pośredni [1], [3].

Pomiary na poduszkowcu oraz na śmigłowcu przeprowadzono za pomocą systemów pomiarowych przedstawionych na rys. 4.



Rys. 4. Układy pomiarowe zastosowane na pokładzie poduszkowca (z lewej) i doświadczalnego śmigłowca (z prawej)

Przedstawione systemy pomiarowo-rejestrujące umożliwiają jednoczesny pomiar i rejestrację następujących parametrów (dla śmigłowca):

- trzech ortogonalnych składowych prędkości kątowych w układzie obiektu ($\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$),
- trzech ortogonalnych składowych przyspieszeń liniowych ($\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$),
- wartości ciśnienia statycznego i dynamicznego (p_s, p_d),
- kąta drogi (Ψ_D),
- prędkości podróżnej (\mathbf{V}_o),
- współrzędnych geograficznych (x_1, y_1),
- wysokości bezwzględnej (H),
- kursu magnetycznego (Ψ_m),
- kątów pochylenia i przechylenia (Θ_s, Φ_s),
- kątów głowicy wirnika ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$).

Powyżej przedstawiony system został dostosowany do potrzeb pomiarowych na pokładzie poduszki. Najważniejsze zmiany w stosunku do systemu pracującego na bezzałogowym śmigłowcu to:

- wykorzystanie uniwersalnego komputera PC-104 do obsługi systemu (na śmigłowcu wykonano specjalizowany przelicznik mikroprocesorowy),
- wprowadzenie toru pomiaru siły (\mathbf{F}) oraz prędkości obrotowej silnika i wychylenia steru kierunku,
- zastosowanie większych akumulatorów ołowiowych, o dużej pojemności (zwiększyło znacząco czas pomiarów i rejestracji),
- wykorzystanie monitora (podgląd mierzonych wartości) jak i klawiatury w trakcie prowadzenia badań.

Pomiary wartości siły (\mathbf{F}) dokonano za pomocą potencjometrycznego czujnika siły o zakresie 800 N. Czujnik ten pozwalał na rejestrowanie wartości siły zewnętrznej oddziaływującej na poduszkowca i jednoczesną rejestrację pozostałymi czujnikami zachowania się poduszkowca. Takie pomiary pomocne są przy identyfikacji modelu poduszkowca, np. do określenia jego momentu bezwładności.

Podobnie w przypadku pomiarów na śmigłowcu. pomiary dokonywano w trakcie charakterystycznych manewrów, a wyniki rejestrowano. w przypadku, gdy ważne było zarejestrowanie konfiguracji całego manewru, dodatkowo wykonywano rejestrację filmową.

W oparciu o te pomiary wyliczana była między innymi orientacja przestrzenna obiektu, która była również rejestrowana.

4. WYZNACZENIE KĄTÓW ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ

Jednym z ważniejszych parametrów wyliczanych jest orientacja przestrzenna, na którą składają się trzy kąty: pochylenia, przechylenia i odchylenia. Podstawowa informacja umożliwiająca wyznaczenie tych kątów pochodzi z giroskopów i przyspieszeniomierzy. Informacji pomocniczych dostarczają: sonda magnetyczna, czujniki ciśnieniowe oraz odbiornik GPS. Najczęściej spotyka się następujące metody wyznaczania orientacji:

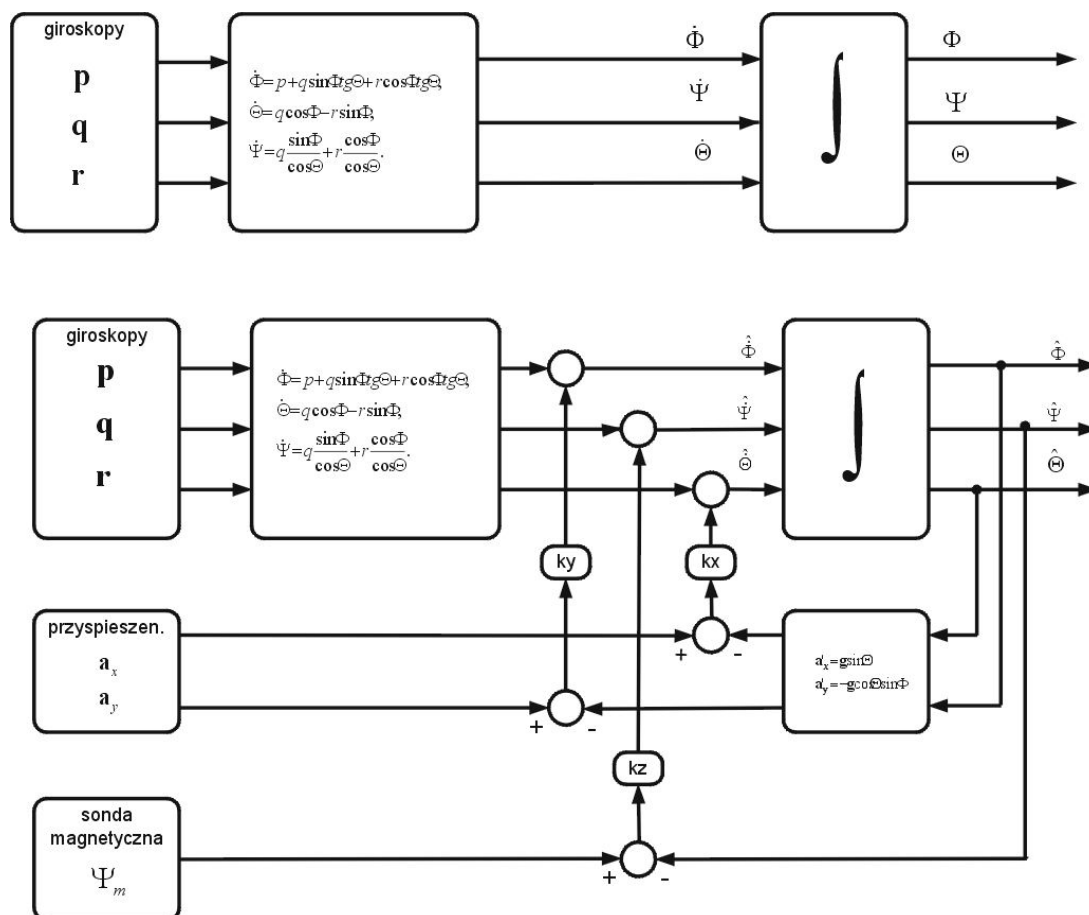
- poprzez całkowanie sygnałów giroskopów prędkościowych,
- na podstawie pomiarów składowych przyspieszenia grawitacyjnego,
- na podstawie pomiaru składowych pola magnetycznego,
- na podstawie pomiarów składowych prędkości liniowych przy pomocy czujników ciśnieniowych,
- na podstawie pomiarów składowych prędkości liniowych przy pomocy odbiornika GPS (tzw. pseudo-orientacja),
- przy pomocy wielo - antenowego odbiornika GPS,
- poprzez analizę obrazu w świetle widzialnym i podczerwonym,
- poprzez integrację wyżej wymienionych metod.

Na rysunku 5 (u góry) przedstawiono schemat wyznaczania kątów orientacji poprzez całkowanie sygnałów z giroskopów prędkościowych z wykorzystaniem równań kinematycznych (1), a nieco poniżej – schemat wyznaczania tych kątów na podstawie pomiarów przyspieszeń grawitacyjnych i pola magnetycznego, zintegrowany z układem wyznaczającym orientację przez całkowanie.

$$\begin{aligned}\dot{\Phi} &= p + q \sin \Phi \operatorname{tg} \Theta + r \cos \Phi \operatorname{tg} \Theta; \\ \dot{\Theta} &= q \cos \Phi - r \sin \Phi; \\ \dot{\Psi} &= q \frac{\sin \Phi}{\cos \Theta} + r \frac{\cos \Phi}{\cos \Theta}.\end{aligned}\tag{1}$$

Zmierzone na pokładzie samolotu prędkości kątowe (p, q, r) oraz orientacja kątowna (Φ, Θ) z poprzedniego kroku umożliwiają w drodze całkowania równań (1) otrzymanie aktualnej orientacji kątownej (rys. 5). Cechą niekorzystną takiego systemu są punkty osobliwe pojawiające się dla pochylenia równego ± 1.57 rad. W przypadku użycia do pomiaru prędkości kątownej tanich czujników

o dużym dryfie, można się również liczyć z błędami szybko narastającymi w czasie. Jest to efekt uboczny całkowania. Dlatego też, system oparty o całkowanie powinien być uzupełniony układem korekcyjnym, pozwalającym na korekcje kątów orientacji i kompensację dryfów giroskopów.

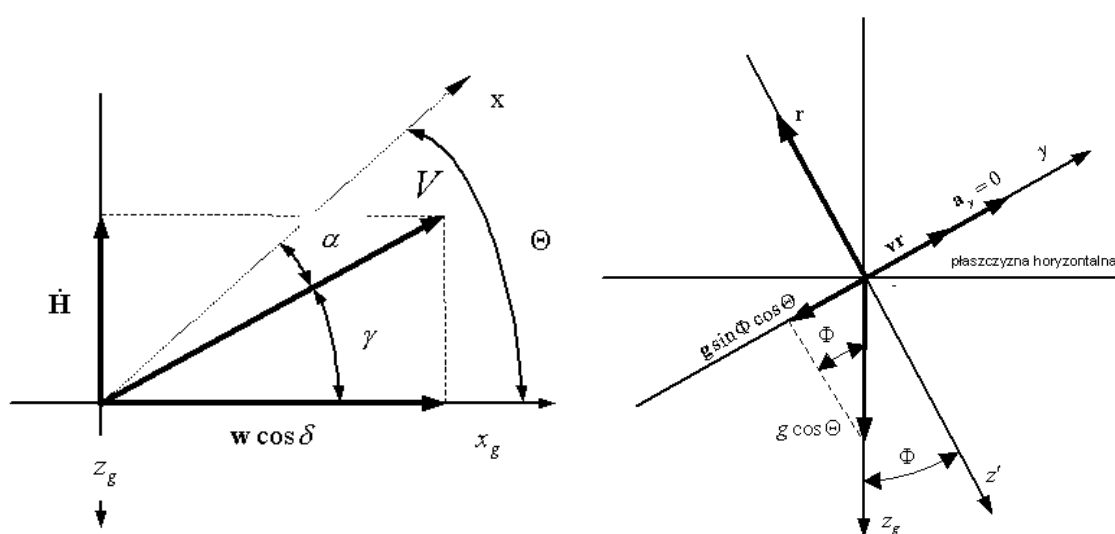


Rys. 5. Schemat układu do wyznaczania orientacji przestrzennej przez całkowanie prędkości kątowych (u góry) i układ zintegrowany z przyspieszaniem i sondą magnetyczną (u dołu).

Kąt kursu może być również wyznaczony z pomiarów kąta drogi (KD) za pomocą odbiornika GPS oraz oszacowania kąta znoszenia, jak to opisano w [3].

Podczas badań do określenia orientacji przestrzennej zastosowano dwie metody pomiaru. Pierwszy wariant zakłada obróbkę zmierzonych wielkości w tradycyjny sposób przy wykorzystaniu całkowania i integracji wyjściowych wielkości za pomocą filtrów komplementarnych (jak na rys. 5) [1]. Ten sposób sprawdził się w przypadku pomiarów na poduszku.

Drugi zastosowany sposób unika całkowania przez zastosowanie techniki wykorzystanej w pseudoorientacji [2]. Na rysunku 6 przedstawiono realizację pomiaru kąta pochylenia i kąta przechylenia. Kąt odchylenia jest wyznaczany jako wynik integracji kąta kursu otrzymanego z sondy magnetycznej i kąta drogi z odbiornika GPS po uwzględnieniu kąta znoszenia. Z kolei kąt znoszenia jest obliczany w wyniku porównania prędkości podróźnej otrzymanej z GPS i prędkości rzeczywistej względem powietrza otrzymanej z pomiaru ciśnienia dynamicznego [3].



Rys. 6. Pomiar kąta pochylenia, kąta wznoszenia (z lewej) oraz kąta przechylenia (z prawej)

Kąt wznoszenia określony jest związkiem (rys. 6):

$$\gamma = \arctg\left(\frac{\mathbf{H}}{\mathbf{V}_0 \cos \delta}\right). \quad (2)$$

Kąt pochylenia różni się od kąta wznoszenia wartością kąta natarcia:

$$\Theta = \alpha + \gamma. \quad (3)$$

Dla małych wartości kąta pochylenia można przyjąć uproszczenie:

$$\Theta \approx K_p \gamma = K_p \arctg\left(\frac{\mathbf{H}}{\mathbf{V}_0 \cos \delta}\right). \quad (4)$$

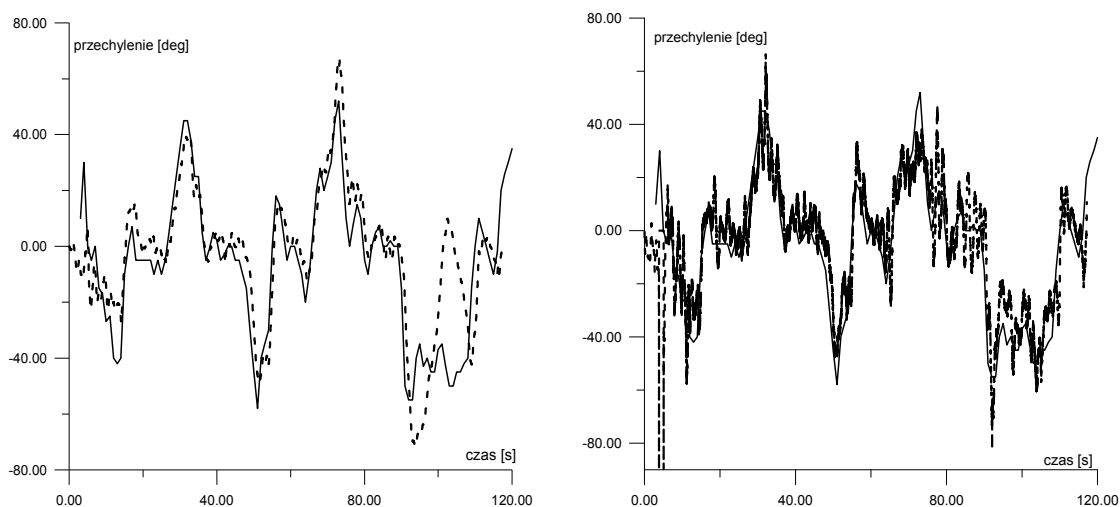
W przypadku pomiaru kąta przechylenia podczas wykonywania zakrętu można skorzystać z zależności (rys. 6):

$$\Phi = \arcsin\left(\frac{\mathbf{a}_y - \mathbf{v}\mathbf{r}}{\mathbf{g} \cos \Theta}\right). \quad (5)$$

Pomiary baz całkowania dały dobre wyniki dla długich czasów pomiaru dla śmigłowca przy silnych zakłóceniach spowodowanych wibracjami i przeciążeniami liniowymi.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI Z BADAŃ

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki określenia kąta przechylenia, w ograniczonym do dwóch minut czasie, przy wykorzystaniu dwóch metod: z całkowaniem wg schematu z rys. 5 oraz bez całkowania wg zależności (5). Obliczone przebiegi przedstawiono linią przerywaną na tle przebiegu wzorcowego narysowanego linią ciągłą. Wzorcowy kąt przechylenia otrzymano z analizy obrazu zarejestrowanego z kamery umieszczonej na obiekcie ruchomym.



Rys. 7. Przebiegi obliczonego kąta przechylenia przez całkowanie (lewy) i bez całkowania (prawy)

Przebieg kąta przechylenia obliczony przez całkowanie wykazuje tylko w ograniczonym czasie stosunkowo małe błędy (rys. 7 lewy). Po 90 s przebieg znacznie odbiega od wzorca. Im dłużej prowadzono obliczenia, tym błędy narastały.

Przebieg kąta z prawej strony obliczony bez całkowania wykazuje większe zaszumienie, ale wartość średnia niewiele odbiega od przebiegu wzorcowego. Taki przebieg utrzymuje się podczas całego lotu.

Powyższe przykłady pokazują, że przy wykorzystaniu tanich czujników pomiarowych można znaleźć strukturę układu pomiarowego, która umożliwi spełnienie założonej dokładności. Podstawową sprawą jest znajomość charakterystyk obiektu i unikanie procesu całkowania w przypadku użycia tanich czujników.

6. PODSUMOWANIE

Dla poduszkowca poruszającego się na amortyzującej poduszce powietrznej można stosować metody pomiaru parametrów ruchu oparte o całkowanie. Nawet, gdy użyte czujniki nie są bardzo dokładne, niski poziom zakłóceń powoduje bardzo wolne narastanie błędów. Zupełnie inaczej sprawa się przedstawia w sytuacji dużych zakłóceń na śmigłowcu. W tym przypadku preferowane są metody, które nie zawierają całkowania. Dzięki temu błędy w czasie nie narastają i nawet po długim okresie system jest w pełni sprawny.

Należy ponadto uwzględnić czynnik ekonomiczny przeprowadzenia pomiarów. Urządzeniem, które dzisiaj dostarcza wielu pomiarów, a którego cena cały czas spada jest odbiornik GPS. Jego największa wada, to ograniczone pasmo (w tanich odbiornikach). Z kolei przyrządy giroskopowe, które stanowią podstawę systemów opartych na całkowaniu nie są tak atrakcyjne pod względem dokładności i ceny. Dlatego w typowych systemach pomiarowych należy w pierwszej kolejności próbować stosować odbiornik GPS, a ewentualne rozszerzenie pasma pomiarowego osiągać na drodze integracji z systemami nie posiadającymi elementów całkujących. Dopiero na końcu należy sięgać po metody oparte na całkowaniu.

LITERATURA

1. Dąbrowski W., Popowski S.: Dobór konfiguracji systemu pomiarów parametrów lotu BSL-a w zależności od intensywności manewrów. Konferencja Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania i łączności, Gdynia 2003, ISBN 83-87280-60-7, tom 2, str. 349 – 356.

2. Kornfeld Richard P., Hansman R. John, Deyst John J.: The impact of GPS velocity based flight control on flight instrumentation architecture. Massachusetts Institute of Technology, June 1999.
3. Popowski S.: Pokładowy układ pomiarowo-rejestrujący w badaniach zjawiska pierścienia wirowego VI Forum Wiroplątowe, Warszawa, październik 2005.

Rękopis dostarczono, dnia 05.03.2007 r.

Opiniował: dr inż. Antoni Krahel

MEASUREMENT OF MOTION PARAMETERS ON MOVING OBJECTS

Stanisław POPOWSKI
Witold DĄBROWSKI

ABSTRACT *During the experimental investigations of several types of flying, water - or land - going objects, the necessity for measurement of the basic parameters of motion emerges. The list of most frequently measured parameters consists of angular velocity components, determined in selected system of coordinates, components of linear acceleration, attitude, components of linear velocity, related to the Earth or to the medium, position (three components) or other, depending on a kind of considered object. An appropriate measurements and computations have to be taken to obtain these parameters. During the computation phase some techniques of measurement integration (e.g. filtering) may also be used to improve the reliability of obtained results. Some selected methods for motion parameters measurement are considered in this paper depending on the type of moving object. Examples of measuring system configuration are also presented.*