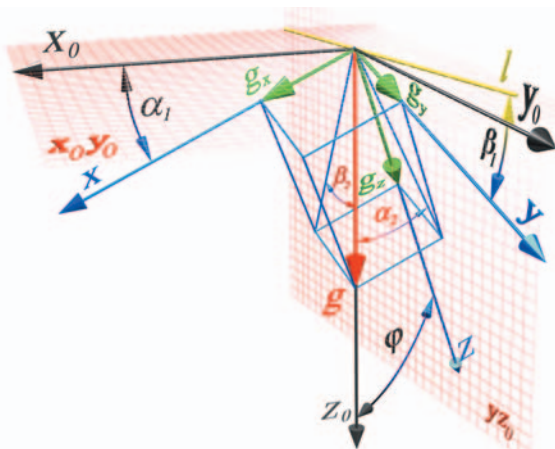


Pomiary odchylenia od pionu z użyciem akcelerometrów MEMS

Sergiusz Łuczak

Wykorzystanie akcelerometrów typu MEMS (*Micro-Electromechanical Systems*) do pomiaru odchylenia od pionu daje możliwość zbudowania czujnika o miniaturowych wymiarach, zakresie pomiarowym równym pełnemu kątowi bryłowemu, błędzie pomiarowym rzędu kilku dziesiątych stopnia i niskiej cenie. Autor przedstawia sposób wyznaczania odchylenia od pionu na podstawie sygnałów wyjściowych akcelerometrów MEMS, omawia też najważniejsze ich wady i zalety.

Konieczność mierzenia odchylenia od pionu pojawia się w wielu różnych urządzeniach (np. mikro-robotach mobilnych). Jednym ze sposobów wyznaczania odchylenia od pionu jest pomiar składowych wektora przyspieszenia grawitacyjnego. Jeśli składowe te przypiszemy do ruchomego układu współrzędnych xyz (sztywno związanego z czujnikiem pomiarowym), to przy kątowym odchyleniu tego układu od pionu zmieniają się ich wartości. Przedstawiono to na rys. 1, gdzie dowolny kąt odchylenia od pionu φ został rozłożony na dwa kąty składowe α i β (pochylenie i przechylenie). Warto tu nadmienić, że według norm dotyczących terminologii używanej w lotnictwie przechylenie definiowane jest nieco inaczej – jako kąt pomiędzy prostą l a osią y_0 , będący funkcją kątów α i β .



Rys. 1. Kąty składowe odchylenia od pionu gdzie: g – przyspieszenie grawitacyjne; g_x, g_y, g_z – składowe przyspieszenia grawitacyjnego na osiach x, y, z ; (indeksy dolne kątów α i β na rys. 1 oraz w przytaczanych wzorach umożliwiają rozróżnienie funkcji wykorzystanych do ich obliczenia)

Na podstawie rys. 1 można określić zależności między kątami odchylenia od pionu a składowymi przyspieszeniami ziemskiego (por. prace [1, 2]):

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{g_x}{g} \quad (1)$$

$$\beta_1 = \arcsin \frac{g_y}{g} \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \quad (4)$$

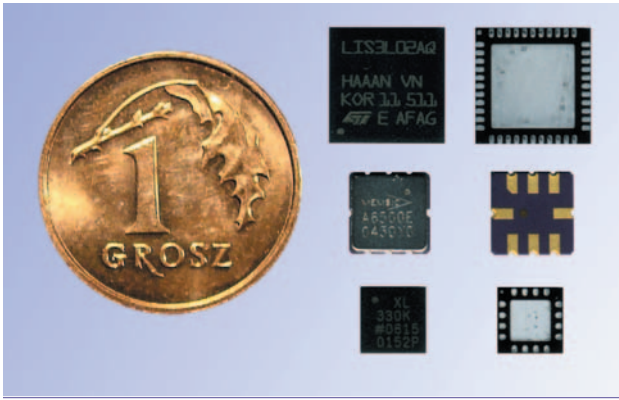
Do budowy dwuosiowego czujnika odchylenia od pionu najkorzystniej jest zastosować jeden akcelerometr trzyosiowy (ewentualnie dwa dwuosiowe, trzy jednoosiowe lub jeden wieloosiowy). Ze względu na miniaturowe wymiary oraz bardzo niską cenę (rzędu kilkudziesięciu złotych), najkorzystniej jest wykorzystać do tego celu akcelerometry typu MEMS.

Wzorcowanie czujnika odchylenia od pionu

W wielu przypadkach stosowanie akcelerometrów typu MEMS wymaga wcześniejszego ich wywzorcowania, umożliwiającego przypisanie konkretnych wartości przyspieszenia ich napięciowym sygnałom wyjściowym. Przykładem mogą być tutaj trzyosiowe sensory LIS3L 02AQ firmy ST Microelectronics, MXR9500 firmy MEMSIC lub ADXL 330 firmy Analog Devices (pokazane kolejno od góry na rys. 2).

Akcelerometry najlepiej jest wzorcować już po wbudowaniu w mechaniczną konstrukcję czujnika odchylenia od pionu. Można wtedy wyznaczyć dwa istotne parametry analogowych sygnałów wyjściowych, generowanych przez akcelerometr: składową stałą oraz wzmacnienie (amplitudę). Wzorcowanie czujnika odchylenia od pionu najlepiej jest realizować, pochylając

dr inż. Sergiusz Łuczak jest adiunktem w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej



Rys. 2. Przykładowe trzyosiowe akcelerometry typu MEMS (widok od strony zewnętrznej i od strony złącz wyprowadzeniowych)

go co kilka stopni wokół jednej osi czułości [obowiązuje wtedy zależność (1)] przy zachowaniu zerowej wartości kąta przechylenia, a następnie przechylając go co kilka stopni wokół drugiej osi czułości [obowiązuje wtedy zależność (2)], przy zachowaniu zerowej wartości kąta pochylenia i zapisując odpowiednie wskazania czujnika. Uzyskane w tym procesie charakterystyki można opisać wzorami zaczerpniętymi z pracy [3]:

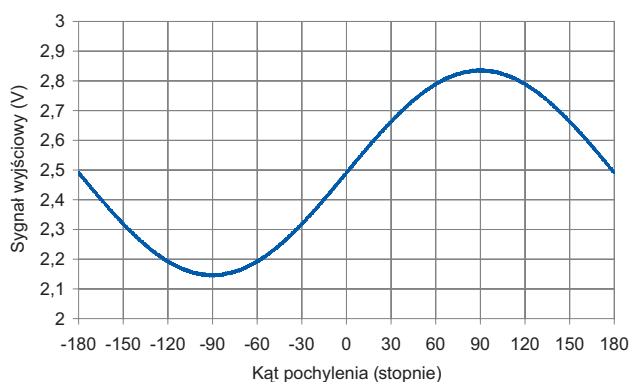
$$U_x = a_x + b_x \sin \alpha_1 \quad (5)$$

$$U_y = a_y + b_y \sin \beta_1 \quad (6)$$

$$U_z = a_z + b_z \cos \alpha_1 = a_z + b_z \cos \beta_1 \quad (7)$$

gdzie: $U_{x...z}$ – sygnał napięciowy przypisany do osi $x...z$; $a_{x...z}$ – składowa stała sygnału przypisanego do osi $x...z$; $b_{x...z}$ – amplituda sygnału przypisanego do osi $x...z$.

Wartości stałych $a_{x...z}$ oraz $b_{x...z}$ (a także niepewność ich wyznaczenia) można obliczyć wykorzystując oprogramowanie do statystycznej obróbki danych (np. Statgraphics, Statistica). Jeżeli nie zależy nam na dużej dokładności czujnika, stałe te można wyznaczyć odczytując sygnały czujnika w trzech położeniach (poziomym, pionowym w płaszczyźnie kąta przechylenia oraz pionowym w płaszczyźnie kąta pochylenia). Typowy przebieg wyznaczony dla jednego z sygnałów wyjściowych czujnika zbudowanego z dwóch akcele-



Rys. 3. Sygnał wyjściowy akcelerometru typu MEMS

rometrów ADXL 202E firmy Analog Devices przedstawiono na rys. 3.

Wartości stałych ($a_{x...z}$ oraz $b_{x...z}$), wyznaczonych w procesie wzorcowania czujnika, są niezbędne podczas jego normalnego działania. Korzystnie jest wtedy posługiwać się równaniami wynikającymi z uogólnionej zależności:

$$\frac{g_{x...z}}{g} = \frac{U_{x...z} - a_{x...z}}{b_{x...z}} = m_{x...z} \quad (8)$$

Teraz można wstępnie wyznaczyć wartości kątów odchylenia od pionu na podstawie wzorów, będących przekształceniem równań (3), (4):

$$\alpha_2 = \arctan \frac{m_x}{\sqrt{m_y^2 + m_z^2}} \quad (9)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{m_y}{\sqrt{m_x^2 + m_z^2}} \quad (10)$$

Wykorzystanie funkcji arcus tangens do obliczenia wartości składowych kątów odchylenia od pionu ma tę zaletę, że niezależnie od wartości wyznaczanego kąta, pomiar cechuje stała wartość czułości równa 0,017 mm/s² na stopień kątowy [2]. Natomiast przy korzystaniu z zależności typu arcus sinus [równania (1), (2)] lub arcus cosinus [1], mamy do czynienia ze zmiennością czułości w przedziale <0; 0,017> mm/s² na stopień kątowy.

Ponieważ zbiór wartości wykorzystywanych funkcji typu arcus to <-90°; 90°>, a zakres pomiarowy czujnika wynosi <-180°; 180°>, pozostaje jeszcze ustalić wartość mierzonych kątów odchylenia w zakresie kąta pełnego. Dla każdego z kątów możliwe są trzy przypadki:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_z > 0 \Rightarrow \alpha_3 = \alpha_2 \\ m_z < 0, \alpha_2 > 0 \Rightarrow \alpha_3 = 180^\circ - \alpha_2 \\ m_z < 0, \alpha_2 < 0 \Rightarrow \alpha_3 = -180^\circ - \alpha_2 \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_z > 0 \Rightarrow \beta_3 = \beta_2 \\ m_z < 0, \beta_2 > 0 \Rightarrow \beta_3 = 180^\circ - \beta_2 \\ m_z < 0, \beta_2 < 0 \Rightarrow \beta_3 = -180^\circ - \beta_2 \end{array} \right\} \quad (12)$$

Kąty α_3 i β_3 należy traktować jako ostateczną wartość pochylenia oraz przechylenia mierzonego za pomocą czujnika.

Warunki użytkowania czujnika

Sygnały wyjściowe czujnika odchylenia od pionu, bazującego na pomiarze składowych przyspieszenia ziemskiego są poprawne tylko wtedy, gdy na czujnik nie działają dodatkowe stałe przyspieszenia. Wynika to z faktu, że takie przyspieszenia dodają się z przyspieszeniem grawitacyjnym i wtedy suma geometryczna przyspieszeń składowych daje przyspieszenie o wartości

bezwzględnej różnej od g lub o kierunku odchylonym od pionu (przyspieszenia zmienne o częstotliwości powyżej kilku Hz można wyeliminować poprzez proste filtrowanie napięcia wyjściowego czujnika).

Jeśli mamy pewność, że na czujnik nie działają dodatkowe stałe przyspieszenia, należy przyjąć, że jego wskazania są poprawne. Jeśli takiej pewności nie ma, to po odczytaniu napięć wyjściowych czujnika można to sprawdzić. Niespełnienie poniższego układu nierówności, uwzględniającego niepewność napięć wyjściowych ΔU (którą można oszacować podczas wzorcowania czujnika) oznacza, że na czujnik działają dodatkowe stałe przyspieszenia i w związku z tym jego wskazania nie są poprawne:

$$1 - \Delta U < \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} < 1 + \Delta U \quad (13)$$

Należy podkreślić, że spełnienie nierówności (13) nie świadczy jeszcze o poprawności wskazań czujnika. Istnieje bowiem nieskończenie wiele przyspieszeń (o module z przedziału $\langle 0; 2g \rangle$ i zwrocie przeciwnym do zwrotu wektora przyspieszenia grawitacyjnego g), których wektor, sumując się z wektorem przyspieszenia ziemskiego, spełnia nierówność (13). Najprostszym przykładem może być tutaj przyspieszenie działające w kierunku pionowym, o zwrocie przeciwnym do przyspieszenia grawitacyjnego i module $2g$. Czujnik odchylenia od pionu wygeneruje wtedy sygnały odpowiadające wektorowi o module $1g$, działającemu pionowo, ale zwróconemu przeciwnie do wektora g .

Jeśli więc nie dysponuje się dodatkową wiedzą o przyspieszeniach oddziałujących na rozważany czujnik (lub o położeniu czujnika względem pionu), w ogólnym przypadku nie jest możliwe stwierdzenie, czy jego wskazania są poprawne. Można podać tu jeden wyjątek, a mianowicie przypadek, gdy znany jest kierunek ewentualnie działającego przyspieszenia. Wówczas możliwe jest zarówno wyznaczenie działającego przyspieszenia zewnętrznego jak i określenie kątów odchylenia od pionu, jak to przedstawiono np. w pracy [4].

Podsumowanie

W artykule został przedstawiony algorytm umożliwiający wyznaczenie kątów odchylenia od pionu na podstawie pomiaru trzech kartezjańskich składowych przyspieszenia grawitacyjnego. Algorytm zapewnia stałą wartość czułości, niezależnie od wartości mierzonych kątów. Można go opisać za pomocą następujących kroków:

1. Wprowadzenie danych uzyskanych podczas wzorcowania czujnika: $a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z, \Delta U$.
2. Odczyt wskazań czujnika: U_x, U_y, U_z .
3. Wyznaczenie wartości zmiennych $m_{x,z}$ [wzory wynikające z (8)].
4. Sprawdzenie warunku (13).
5. Obliczenie wstępnych wartości kątów pochylenia i przechylenia [wzory (9) – (10)].

6. Ostateczne ustalenie wartości kątów pochylenia i przechylenia [wzory (11) – (12)].

Przy zastosowaniu akcelerometrów typu MEMS największym problemem są dryfty czasowe i temperaturowe ich wskazań. W pracach [5, 6] przedstawiono kilka sposobów na wyeliminowanie tych niedogodności, a ponadto podano kilka propozycji zoptymalizowania pomiarów odchylenia od pionu, jeśli chodzi o miniaturyzację wykorzystywanego czujnika oraz zwiększenie dokładności pomiaru. Oba te czynniki są często bardzo istotnymi parametrami stanowiącymi o użyteczności czujnika w danej aplikacji.

Warto tu zauważyć, że zastosowanie do pomiaru odchylenia od pionu akcelerometrów MEMS zintegrowanych z zaawansowanymi układami elektronicznymi, znacznie upraszcza ich użytkowanie. Przykładem może być tu programowalny sensor ADIS 16201 lub ADIS 16203 firmy Analog Devices. Takiego sensora nie trzeba wzorcować, ma wbudowany czujnik temperatury umożliwiający korekcję błędów temperaturowych, generuje liniowe sygnały o odchyleniu od pionu, a jego pasmo częstotliwości można ustawiać za pomocą sygnału cyfrowego (wadą tego sensora są kilkukrotnie większe wymiary oraz znacznie wyższa cena). Przy wykorzystaniu takiego sensora, opisywany algorytm znacznie się upraszcza.

Możliwe jest też oczywiście zastosowanie rynkowych czujników odchylenia od pionu zbudowanych na bazie akcelerometrów MEMS (opisanych np. w katalogu [7]), trzeba tu jednak liczyć się ze znacznie większymi wymiarami gabarytowymi i wysokimi cenami.

Po wyeliminowaniu lub skorygowaniu błędów temperaturowych akcelerometrów MEMS, wykorzystanie przedstawionego algorytmu umożliwia ograniczenie błędu czujnika odchylenia od pionu do kilku dziesiątych stopnia, a przy tym stałej średniej wartości błędu w całym zakresie pomiarowym.

Bibliografia

1. S. Łuczak, W. Oleksiuk, M. Bodnicki, *Sensing Tilt with MEMS Accelerometers*, IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 6, 2006, s. 1669–1675.
2. *Tilt Sensing with Kionix MEMS Accelerometers*, Kionix, 2005.
3. S. Łuczak, *Experimental Studies of Miniature Tilt Sensors*, Elektronika 8-9, 2004, s. 215–218.
4. R. Dao, *Inclination Sensing of Moving Vehicle*, Application Note nr 3/12/03, MEMSIC Inc., 2003.
5. S. Łuczak, *On Improving Performance of MEMS Accelerometers in Tilt Sensing*, Machine Dynamics Problems, Vol. 30, No. 4, 2006, s. 37–47.
6. S. Łuczak, W. Oleksiuk, *Increasing Accuracy of Tilt Measurements*, Engineering Mechanics, Vol. 14, No. 3, 2007, s. 143–154.
7. *Sensors & Sensory Systems Catalog*, Crossbow, 2006, s. 61–71. ■