

Witold ILEWICZ, Damian BERESKA, Aleksander NAWRAT
Politechnika Śląska

KOREKCJA TEMPERATUROWA WSKAZAŃ 3-OSIOWYCH CZUJNIKÓW PRZYSPIESZENIA W MODUŁACH IMU

Streszczenie. Na podstawie wyników badań temperaturowych 18 czujników przyspieszenia w 6 modułach IMU, przeprowadzonych w komorze klimatycznej w zakresie temperatur -10°C do $+60^{\circ}\text{C}$ wyznaczono charakterystyki temperaturowe zera i wzmocnienia testowanych czujników. Przedstawiono algorytm kompensacji wpływu temperatury na wskazania czujników z zastosowaniem wyznaczonych charakterystyk. Przeanalizowano możliwości aproksymacji charakterystyk temperaturowych za pomocą wielomianów różnych stopni.

TEMPERATURE CORRECTION OF MEASUREMENT RESULTS OF 3-AXIS ACCELEREMETERS IN IMU MODULES

Summary. On the basis of results of temperature tests of 18 acceleration sensors in 6 IMU modules, conducted in a climate chamber at a temperature range of -10°C to $+60^{\circ}\text{C}$, temperature characteristics of zeros and gains of tested sensors were obtained. An algorithm for temperature compensation for the sensor readings using these characteristics is presented. Effectiveness of temperature characteristics approximation by polynomials of various degrees was analyzed.



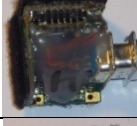



1. Wprowadzenie

Jednym z najistotniejszych czynników mających wpływ na dokładność pomiarów wykonywanych z zastosowaniem czujników przyspieszenia wykonanych w technologii MEMS (ang. *microelectromechanical system*) jest temperatura. Stąd przy produkcji modułów IMU (ang. *inertial measurement unit*) z tego typu czujnikami istnieje potrzeba badań wpływu zmian temperatury na wskazania oraz wprowadzania do firmware'u modułów programu korekcji od temperatury [3,4,5,6]. W niniejszej pracy wykorzystano wyniki badań temperaturowych parametrów 3-osiowych czujników przyspieszenia zastosowanych w modułach IMU skonstruowanych w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej. Badania przeprowadzono z zastosowaniem komory klimatycznej, w której umieszczono 6 modułów IMU zawierających różne czujniki, wraz z odpowiednim oprzyrządowaniem. Testy temperaturowe obejmowały zakres temperatur od -10°C do $+60^{\circ}\text{C}$, co 10°C . Wyznaczono wpływ temperatury na zmianę wartości zer ($\Delta Z_{acc}(T)$ – zmiana położenia zera czujnika względem zera w temperaturze odniesienia) i wzmocnień ($\delta W_{acc}(T)$ – względna

zmiana wzmocnienia czujnika, odniesiona do wzmocnienia w temperaturze odniesienia) testowanych czujników, zebrano dane do korekcji wpływu temperatury. Szczegółowy opis badań temperaturowych i sposób wyznaczenia charakterystyk temperaturowych zer $\Delta Z_{acc}(T)$ i wzmocnień $\delta W_{acc}(T)$ testowanych czujników przedstawiono w [1,2]. W tabeli 1 przedstawiono dane czujników zastosowanych w testowanych modułach IMU.

Tabela 1

Parametry czujników w testowanych modułach IMU

Nazwa modułu	Typ czujników przyspieszenia, rozdzielczość przetwornika A/C	Wygląd (obudowa)
IMU 1	ADXL203, 16bitów	
IMU 2	ADXL203, 16bitów	
IMU 3	ADXL203, 16bitów	
IMU 4	ADXL203, 16bitów	
IMU 5	LSM303DLM, 12bitów	
IMU6	LSM303DLM, 12bitów	

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badania zmian wzmocnienia testowanych czujników przyspieszenia w funkcji temperatury.

Tabela 2

Charakterystyki temperaturowe zmian wzmocnień czujników przyspieszenia δW_{acc} , ppm. Temperatura odniesienia $T_0=20^\circ\text{C}$

Moduł	Oś	Temperatura, °C							
		-10	0	10	20	30	40	50	60
IMU1	X	-498	-268	-115	0	153	306	402	383
	Y	-692	-442	-231	0	231	346	442	577
	Z	-575	-268	-115	0	192	192	422	441
IMU2	X	-379	-227	-152	0	76	76	-38	-379
	Y	762	209	-57	0	990	1143	-1486	-1676
	Z	-615	-288	-154	0	-77	-346	-653	-615

IMU3	X	-382	-229	-38	0	76	191	191	38
	Y	-687	-439	-229	0	76	-248	-439	-573
	Z	-496	-267	-153	0	-38	-38	-248	-343
IMU4	X	-1153	-769	-423	0	192	192	269	538
	Y	-723	-418	-190	0	0	38	-114	-304
	Z	-459	-172	-96	0	96	440	650	1243
IMU5	X	-606	-273	61	0	667	667	-637	-2001
	Y	7655	5217	2284	0	-2346	-4352	-7655	-10495
	Z	-1379	-1379	-1199	0	-600	-450	-1289	-3238
IMU6	X	-2166	-879	-534	0	502	502	-1193	-2417
	Y	11490	7516	3758	0	-3265	-6500	-9088	-12384
	Z	1084	361	301	0	-903	-3132	-6354	-9727

W tabeli 3 przedstawiono zmierzone zależności położenia zera testowanych czujników w funkcji temperatury.

Tabela 3

Charakterystyki temperaturowe zmian zera czujników przyspieszenia
 ΔZ_{acc} . Temperatura odniesienia $T_0=20^\circ\text{C}$

Moduł	Oś	Temperatura, °C							
		-10	0	10	20	30	40	50	60
IMU1	X	-71,5	-46,5	-22,5	0,0	19	38	56,25	75
	Y	5	4,75	3	0,0	-2	-1,5	0,75	1,5
	Z	57,5	37,5	22,5	0,0	-17,5	-17,5	-57,5	-75,75
IMU2	X	-217	-124	-37	0,0	20	20	58,5	80
	Y	47,5	38,5	17,25	0,0	10,5	-5,5	-98	-117,5
	Z	80	47,75	23	0,0	-22	-43,5	-70,5	-94
IMU3	X	-86	-50	-24,5	0,0	19	37,5	59,5	81,5
	Y	-24	-14,25	-6	0,0	8	17,75	26,25	40,5
	Z	-15,5	-8,5	-4	0,0	2,5	2,5	12,75	20,5
IMU4	X	28	22	12,5	0,0	-10,5	-10,5	-26,5	-45
	Y	-26,5	-14,5	-6,5	0,0	5	8,5	17,5	25
	Z	-57	-32,25	-12,25	0,0	14,25	33,75	51	67,25
IMU5	X	-145	-104,25	-45,5	0,0	63,5	63,5	167,25	181,5
	Y	544	342	168,5	0,0	-136	-245	-395	-495
	Z	172	106,5	48	0,0	-22	-40,25	-41,75	5
IMU6	X	1071	662	310	0,0	-205	-205	-605	-630
	Y	1648	1044	512	0,0	-337	-592	-729	-822
	Z	-375	-252	-101	0,0	107	203	291	342

2. Korekcja temperaturowa wskazania przyspieszenia

Po wzorcowaniu w temperaturze odniesienia ($T_0=20^\circ\text{C}$) charakterystyka liniowego czujnika przyspieszenia ma postać:

$$a = b_0 + b_1 \cdot ACC(T_0), \quad (1)$$

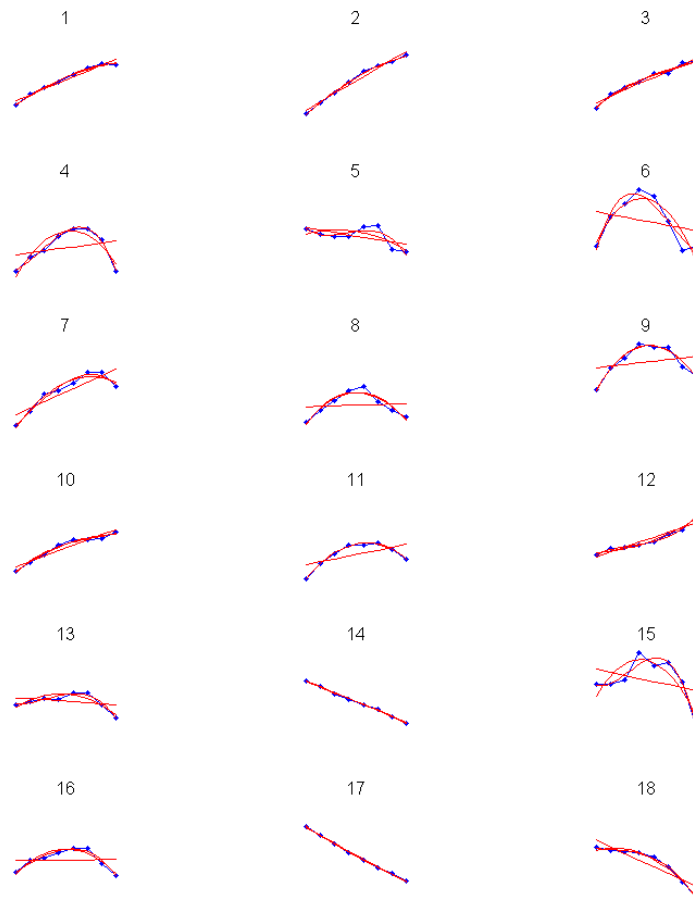
gdzie a – zmierzona wartość przyspieszenia; b_0, b_1 – współczynniki modelu liniowego czujnika wyznaczone w temperaturze odniesienia; ACC – surowe wskazanie czujnika w temperaturze odniesienia (wartość słowa kodowego z przetwornika A/C). Wskazania tak wzorcowanego czujnika są poprawne (z dokładnością do błędów procedury wzorcowania) w temperaturze odniesienia. Na skutek zmian temperatury wartość surowego odczytu z czujnika zmieni się wg zależności:

$$ACC(T) = (1 + \delta W_{acc}(T)) \cdot ACC(T_0) + \Delta Z_{acc}(T) \quad (2)$$

Znajomość charakterystyk $\delta W_{acc}(T)$ oraz $\Delta Z_{acc}(T)$ pozwala wyznaczyć poprawnie wartość przyspieszenia na podstawie surowego wskazania czujnika $ACC(T)$ w temperaturze T odbiegającej od T_0 wg wzoru:

$$a = b_0 + b_1 \cdot \frac{ACC(T) - \Delta Z_{acc}(T)}{1 + \delta W_{acc}(T)} \quad (3)$$

Przedstawiona procedura korekcji nie wymaga ponownego wyznaczania współczynników modelu liniowego czujnika b_0, b_1 – wzorcowanie czujnika wystarczy przeprowadzić jednokrotnie, w temperaturze odniesienia.



Rys. 1. Kształty charakterystyk temperaturowych zmian wzmocnienia w funkcji temperatury $\delta W_{acc}(T)$ oraz ich aproksymacje wielomianami 1 i 2 i 3 stopnia. Ilustracja do danych z tabeli 4

Eksperymentalne wartości charakterystyk $\delta W_{acc}(T)$ oraz $\Delta Z_{acc}(T)$ znane są w dyskretnych punktach w dziedzinie temperatury T (-10°C do 60°C co 10°C), tak jak przedstawiono w tabelach 2 i 3. W celu zastosowania procedury określonej wzorem 9 należy podać sposób odtworzenia wartości tych charakterystyk dla punktów w dziedzinie temperatury położonych pomiędzy węzłami o znanych wartościach. Najczęściej dokonuje się tego poprzez aproksymację danej charakterystyki temperaturowej wielomianem odpowiedniego stopnia, takiego, aby błąd nie przekraczał zadanej wartości.

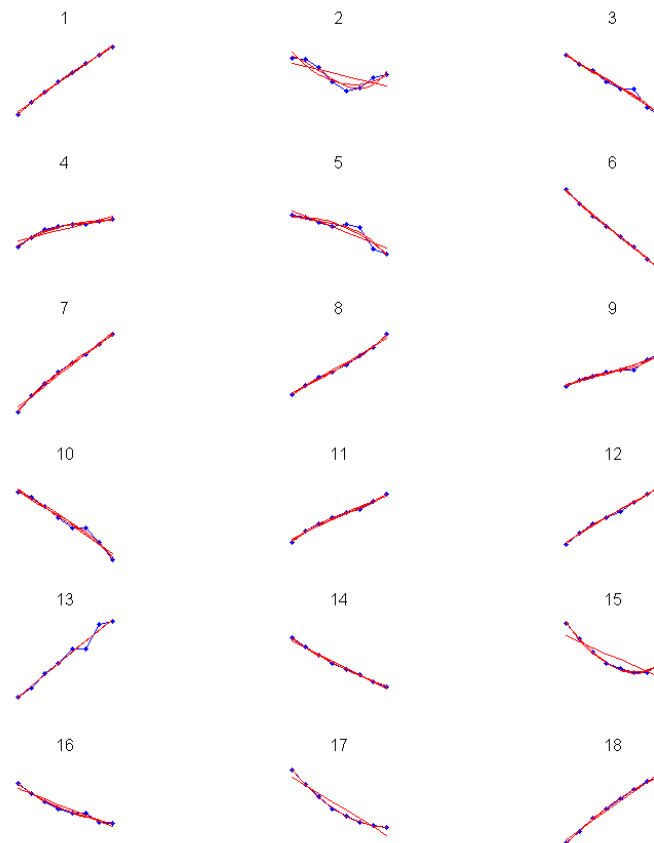
Tabela 4

Maksymalny błąd aproksymacji charakterystyk temperaturowych $\delta W_{acc}(T)$ badanych sensorów dla wielomianów 1, 2 i 3 stopnia, wyrażony w % zakresu $\delta W_{acc}(T)$

Moduł	Oś	Nr	Wielomian 1 stopnia	Wielomian 2 stopnia	Wielomian 3 stopnia
IMU1	X	1	7,3	4,8	3,9
	Y	2	8,7	3,3	3,1
	Z	3	8,5	5,4	6,7
IMU2	X	4	42,6	16,1	8,3
	Y	5	54,3	44,3	25,5
	Z	6	50,3	23,2	14,1
IMU3	X	7	18,6	9,9	9,1
	Y	8	50,9	17,2	18,3
	Z	9	41,7	7,9	8,2
IMU4	X	10	15,2	6,3	5,4
	Y	11	32,1	4,0	4,0
	Z	12	17,1	6,8	5,3
IMU5	X	13	41,0	24,5	10,4
	Y	14	3,7	3,3	1,9
	Z	15	34,8	15,0	15,9
IMU6	X	16	43,6	21,1	13,0
	Y	17	3,0	1,4	1,2
	Z	18	19,5	5,5	3,2

3. Aproksymacja charakterystyk temperaturowych funkcjami wielomianowymi

Kształty charakterystyk dla poszczególnych sensorów przyspieszenia (połączona kropkowana linia), na podstawie danych z tabeli 2 i 3 przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Numery 1-3 oznaczają czujniki przyspieszenia w module IMU1, odpowiednio w osi X, Y i Z, numery 4-6 oznaczają czujniki przyspieszenia w module IMU2, itd. Przedstawione charakterystyki temperaturowe zostały aproksymowane wielomianami 1, 2 i 3 stopnia. W celu wizualnej oceny jakości aproksymacji przebiegi wyznaczonych wielomianów aproksymujących zostały naniesione (kolorem czerwonym, ciągłą linią) na wykresy charakterystyk na rysunkach 1 i 2. Wartości maksymalnych błędów aproksymacji wyrażone w % zakresu zmienności danej charakterystyki przedstawiono w tabelach 4 i 5.



Rys. 2. Kształty charakterystyk temperaturowych zmian zera $\Delta Z_{acc}(T)$ w funkcji temperatury oraz ich aproksymacje wielomianami 1 i 2 i 3 stopnia. Ilustracja do danych z tabeli 5

4. Dyskusja wyników

Obserwacja wyników na rysunkach 4 i 5 pozwala stwierdzić, że temperaturowe charakterystyki błędu zera i wzmocnienia są nieliniowe. Można wyróżnić 3 typy takich charakterystyk. Po pierwsze – część charakterystyk jest prawie liniowa (np. charakterystyki nr 14 i 17 z rysunku 1 lub charakterystyki 1 i 6 z rysunku 2). Maksymalne błędy aproksymacji tych charakterystyk wielomianem 1 stopnia mają wartość około 3-4% zakresu ich wartości, a stosowanie wielomianów 2 i 3 stopnia w niewielkim stopniu poprawia dokładność aproksymacji. Po drugie – charakterystyki lekko nieliniowe, dla których błąd aproksymacji wielomianem 1 stopnia zawiera się w przedziale 7-20% (np. charakterystyki 7 i 10 z rysunku 1). Dla takich charakterystyk aproksymacja wielomianem drugiego i 3 stopnia prowadzi do znacznego spadku błędu aproksymacji w porównaniu do wielomianu 1 stopnia. Po trzecie, część charakterystyk ma przebieg silnie nieliniowy, o błędzie aproksymacji wielomianem 1 stopnia przekraczającym 30% zakresu, przy czym widoczne jest, że silna nieliniowość występuje znacznie częściej w przypadku temperaturowych charakterystyk wzmocnienia (8 przypadków) w porównaniu do charakterystyk zmian zera (2 przypadki).

Tabela 5

Maksymalny błąd aproksymacji charakterystyk temperaturowych $\delta W_{acc}(T)$ badanych sensorów dla wielomianów 1, 2 i 3 stopnia, wyrażony w % zakresu $\delta W_{acc}(T)$

Moduł	Oś	Nr	Wielomian 1 stopnia	Wielomian 2 stopnia	Wielomian 3 stopnia
IMU1	X	1	3,0	0,8	0,6
	Y	2	36,6	21,4	19,8
	Z	3	12,3	11,3	8,8
IMU2	X	4	15,1	8,6	2,9
	Y	5	25,3	18,4	12,8
	Z	6	3,0	2,1	0,6
IMU3	X	7	4,1	2,1	0,6
	Y	8	6,1	3,1	1,7
	Z	9	9,4	5,8	4,8
IMU4	X	10	11,1	9,2	6,5
	Y	11	5,1	3,8	2,4
	Z	12	4,3	3,6	1,8
IMU5	X	13	7,5	7,6	7,5
	Y	14	5,5	2,3	1,5
	Z	15	31,8	4,7	3,2
IMU6	X	16	11,1	10,1	8,0
	Y	17	13,4	1,1	1,0
	Z	18	4,0	1,5	2,0

Charakterystyki temperaturowe pokazane na rysunkach 1 i 2 można również rozróżniać pod względem regularności kształtu. Część charakterystyk wydaje się nieregularna, co utrudnia poprawną aproksymację. Dotyczy to charakterystyk 5, 6 i 15 (rys. 1) oraz 2, 3, 5 i 13 (rys. 2). Przyczyną części nieregularności mogą być błędy pomiarowe podczas badań temperaturowych (np. 3 i 13 na rysunku 2) – w takim przypadku wątpliwe punkty należałoby usunąć z charakterystyki lub zastosować odporną metodę estymacji parametrów wielomianu. Charakterystyki typu 5 (rys. 1) i 2 (rys. 2) wymagają zastosowania wielomianów stopnia wyższego niż 3 lub wybrania innego typu funkcji aproksymującej (np. nieliniowej względem parametrów) w celu poprawy dokładności aproksymacji.

Przeprowadzone rozważania dotyczą charakterystyk temperaturowych, dla których zakresy zmienności są duże, bowiem przy niewielkich zakresach nawet duża nieliniowość nie ma istotnego wpływu na wyniki, a korekcja może nie być potrzebna.

5. Podsumowanie i wnioski

Współcześnie, gdy na rynku przeważają czujniki produkowane w oparciu o technologie półprzewodnikowe, korekcja wskazań od temperatury jest niezbędnym aspektem postępowania z tego typu czujnikami. Jako funkcji aproksymujących dla charakterystyk temperaturowych (na podstawie których przeprowadza się korekcję wskazań) w praktyce najczęściej używa się wielomianów, ze względu na prostotę ich

stosowania. Alternatywę stanowi możliwość zastosowania nieliniowych względem parametrów funkcji aproksymujących, co pozwoliłoby zmniejszyć liczbę parametrów modelu. Obserwuje się także narastanie tendencji do programowego korygowania wskazań czujników w układzie obliczeniowym dołączonym do czujnika razem z czujnikiem temperatury, w odróżnieniu od sprzętowej korekcji polegającej na włączaniu w obwód czujnika pasywnych lub aktywnych układów korygujących.

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu DOB-BIO/7/13/05/2015 "WIMA – a virtual mast as a platform for observation sensors to the needs of the Border Guard"

LITERATURA

1. Bereska D., Ilewicz W., Daniec K., Koterak R., Fraś S., Jędrasiak K., Nawrat A.: Badanie wpływu temperatury na wskazania 3-osiowych czujników przyspieszenia w modułach IMU. Automatykacja procesów dyskretnych. Teoria i zastosowania. Pod red. Andrzeja Świerniaka i Jolanty Krystek. Gliwice: Wydaw. Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, 2014, s. 33-40, ISBN 978-83-62652-68-6,
2. Daniec K., Ilewicz W., Bereska D., Koterak R., Fraś S., Jędrasiak K., Nawrat A.: Badanie wpływu temperatury na wskazania czujników prędkości kątowej w modułach IMU. Automatykacja procesów dyskretnych. Teoria i zastosowania. Pod red. Andrzeja Świerniaka i Jolanty Krystek. Gliwice: Wydaw. Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, 2014, s. 75-82, ISBN 978-83-62652-68-6
3. Gang D., Mei L., Xiaoping H., Lianming D., Beibei S., Wei S.: Thermal drift analysis using a multiphysics model of bulk silicon MEMS capacitive accelerometer, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 172, Issue 2, 2011, pp. 369-378.
4. Jedrasiak K., Daniec K., Nawrat A.: The low cost micro Inertial Measurement Unit, 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013, p. 403-408.
5. Nawrat A., Jedrasiak K., Daniec K., Koterak R.: Inertial Navigation Systems and Its Practical Applications, New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems, InTech, 2012.
6. Jaw-Kuen S., Chen-Xuan, Ming-Yu Ch.: Noise Characteristics of MEMS Gyro's Null Drift and Temperature Compensation, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 15, No. 3, 2012, p. 239-246