

Sterowniki Robotów

Sensory i filtry

Wojciech Domski

Katedra Cybernetyki i Robotyki,
Politechnika Wrocławska



Wrocław University
of Science and Technology



Plan prezentacji

- 1 Wprowadzenie
- 2 Wykrywanie kontaktu
- 3 Pomiar pozycji/prędkości kątowej
- 4 Pomiar orientacji
- 5 Pomiar położenia
- 6 Pomiar odległości
- 7 Pomiar prędkości ruchu/wykrywanie ruchu
- 8 Popularne czujniki scalone
- 9 Filtracja i fuzja danych



Wrocław University
of Science and Technology



Sensor

Czujniki to urządzenia, które pozwalają na pomiar pewnej wielkości fizycznej. Pozwalają one na transformację jednej wielkości fizycznej (mierzonej) w drugą wielkość fizyczną jak na przykład napięcie, czy prąd.



Klasyfikacja ze względu na interfejs (1/2)

Można wyróżnić następujące typy interfejsów:

- binarny, 0 lub 1,
- analogowy (np. napięcie 0 - 12V, prąd 4-20mA),
- sygnał czasowy (PWM),
- szeregowy (RS232),
- równoległy (LPT).



Klasyfikacja ze względu na interfejs (2/2)

Inny rodzaj klasyfikacji dotyczy typu pomiaru. Wówczas można rozróżnić czujniki:

- lokalne,
- globalne.

W przypadku, gdy weźmie się pod uwagę co jest mierzone:

- wewnętrzne,
- zewnętrzne.

Jeśli sensor wywiera wpływ na środowisko:

- aktywne,
- pasywne.



Rodzaje sensorów stosowanych w robotach (1/2)

Ogólna klasyfikacja	Rodzaj czujnika	W/Z	A/P
Czujniki dotykowe	przełączniki, zderzaki	Z	P
	bariery optyczne	Z	A
	czujniki zbliżeniowe	Z	A
Czujnik obrotu	potencjometry	W	P
	enkodery optyczne	W	A
	enkodery magnetyczne	W	A
	resolvery	W	A
	prądnice tachometryczne	W	P
Czujnik orientacji	kompasy	Z	P
	żyroskopy	W	P
	inklinometry	Z	A/P



Rodzaje sensorów stosowanych w robotach (2/2)

Ogólna klasyfikacja	Rodzaj czujnika	W/Z	A/P
Globalne pozycjonowanie	GPS	Z	A
	znaczniki optyczne	Z	A
	znaczniki radiowe	Z	A
	znaczniki ultradźwiękowe	Z	A
	znaczniki odbiciowe	Z	A
	wizja	Z	P
Czujniki odległości	czujnik ultradźwiękowy	Z	A
	czujnik odbiciowy	Z	A
	dalmierz laserowy	Z	A
	optyczna triangulacja	Z	A
	stereowizja	Z	P
Czujniki ruchu/prędkości	efekt Dopplera	Z	A
	akcelerometr	Z	P
	optical flow	Z	P



Typowe parametry czujników (1/3)

- zakres pomiarowy (z ang. *range*) – zbiór wartości wielkości mierzonej, w którym pomiar dokonywany jest z ustalonym błędem,
- rozdzielczość (z ang. *resolution*) – najmniejsza zmiana wartości wielkości mierzonej, którą czujnik jest w stanie wykryć,
- dokładność (z ang. *accuracy*) – różnica pomiędzy zmierzoną a prawdziwą wartością wielkości mierzonej,
- czułość (z ang. *sensitivity*) – wielkość zmiany sygnału wyjściowego w zależności od jednostkowej zmiany wartości wielkości mierzonej,
- przesunięcie zera (z ang. *zero offset*) – wartość sygnału wyjściowego dla zerowej wartości wielkości mierzonej,



Typowe parametry czujników (2/3)

- liniowość (z ang. *linearity*) – zakres maksymalnego odchylenia aktualnej charakterystyki czujnika od charakterystyki odniesienia,
- dryf zera (z ang. *zero drift*) – zmiana w stosunku do zera sygnału wyjściowego w pewnym przedziale czasu dla zerowej wartości wielkości mierzonej,
- czas odpowiedzi (z ang. *response time*) – opóźnienie sygnału wyjściowego względem sygnału pomiarowego,
- pasmo przenoszenia (z ang. *bandwidth*) – zakres częstotliwości, w którym tłumienie sygnału jest nie większe niż 3 dB,
- częstotliwość rezonansowa (z ang. *resonance*) – częstotliwość przy której następuje gwałtowna zmiana wartości sygnału wyjściowego nieodpowiadająca prawdziwej wartości wielkości mierzonej,

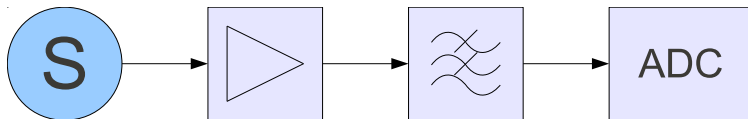


Typowe parametry czujników (3/3)

- zakres temperaturowy (z ang. *operating temperature*) – zakres temperatur w których gwarantowana jest poprawność działania czujnika,
- strefa martwa (z ang. *deadband*) – zakres wartości wielkości mierzonej, którym nie odpowiada zmiana sygnału wyjściowego,
- stosunek sygnału do szumu – (z ang. *signal to noise ratio, SNR*) – stosunek amplitudy wyjściowego sygnału użytecznego do amplitudy szumu,
- ...



Schemat blokowy układu pomiarowego



Konwersja sygnału analogowego na cyfrowy

- dyskretyzacja: $f : R \rightarrow R \Rightarrow f_d : I \rightarrow R$,
- kwantyzacja: $f : R \rightarrow R \Rightarrow f_i : R \rightarrow I$,
- sygnał cyfrowy: $q : I \rightarrow I$,
- twierdzenie o próbkowaniu (twierdzenie Shannona).



Wybrane skróty

- AHRS (z ang. *Attitude and Heading Reference System*) – system podający orientację obiektu, oparty na całkowaniu chwilowych prędkości zmian orientacji mierzonych przy pomocy żyroskopów oraz pomiarach z innych czujników
- MARG (z ang. *Magnetic, Angular Rate, and Gravity*) – system czujników wykorzystujący azymut magnetyczny oraz kierunek siły grawitacji jako pomiary bezwzględne, a także prędkości kątowe
- IMU (z ang. *Inertial Measurement Unit*) – urządzenie dostarczające pomiarów z czujników inercyjnych (akcelerometr i żyroskop = 6DOF + magnetometr = 9DOF + altimetr = 10DOF).

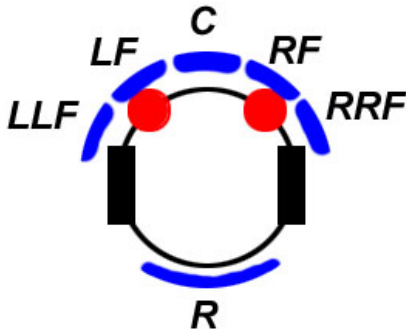


Czujniki dotykowe (1/2)

- umieszczone na obwodzie robota,
- binarne wyjście,
- odporna na udary konstrukcja mechaniczna,
- zdolność do absorpcji części energii zderzenia,
- prawie 100% skuteczność wykrywania kolizji.



Czujniki dotykowe (2/2)



1



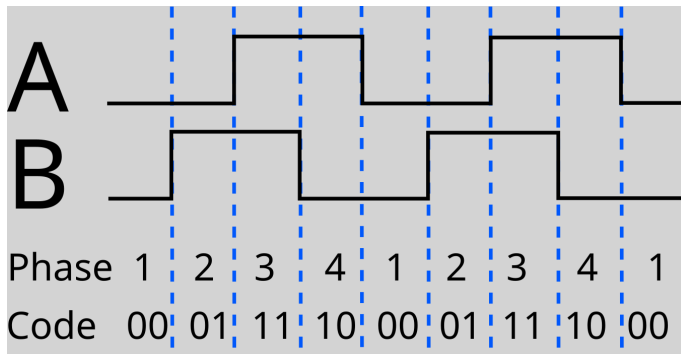
Enkodery (1/7)

Inkrementalne enkodery optyczne

- pomiar względny pozycji,
- pomiar prędkości obrotowej,
- wyjście kwadraturowe,
- rozdzielczość: [imp/obr],
- interfejs: dekodery kwadraturowy, step/dir
- produkowany w wielu odmianach,
- odporny na czynniki zewnętrzne,



Enkodery (2/7)



Enkodery (3/7)

Kierunek ruchu w przód:

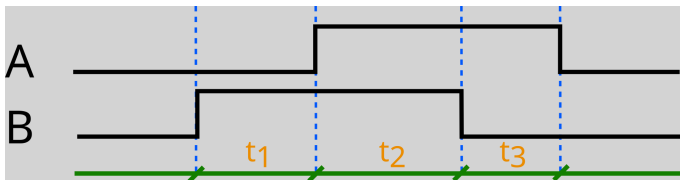
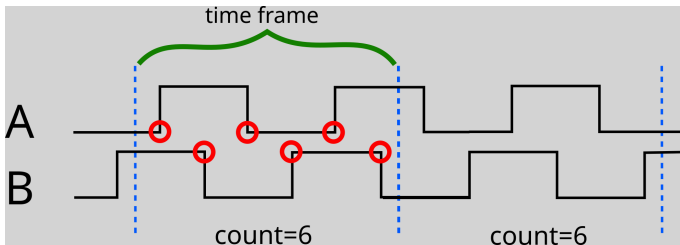
- **00** → 01 → 11 → 10 → **00**

Kierunek ruchu w tył:

- **00** → 10 → 11 → 01 → **00**



Enkodery (4/7)



Enkodery (5/7)

Absolutne enkodery optyczne

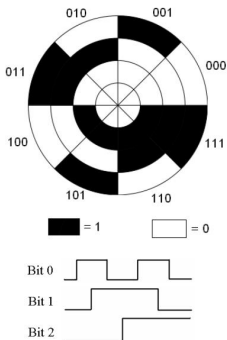
- pomiar bezwzględny pozycji,
- wyjście cyfrowe,
- rozdzielczość: [bit] ,
- interfejs równoległy, szeregowy (EnDat , BiSS, SSI, HIPERFACE DSL)
- produkowany w wielu odmianach,
- odporny na czynniki zewnętrzne,



Enkodery (6/7)

Rushi Vyas

Standard Binary Encoding



Angle	Binary	Decimal
0-45	000	0
45-90	001	1
90-135	010	2
135-180	011	3
180-225	100	4
225-270	101	5
270-315	110	6
315-360	111	7

2

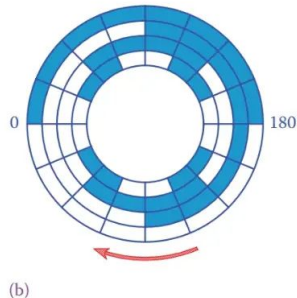
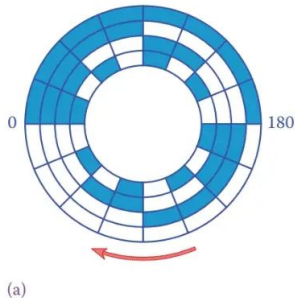


Wrocław University
of Science and Technology



Enkodery (7/7)

Absolute shaft encoder



3

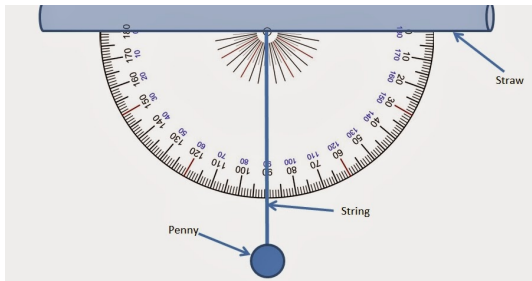


Inklinometry (1/2)

- pomiar wychylenia kąтового względem osi wyznaczonej przez siłę grawitacji ziemskiej.
- stosowane technologie: akcelerometr, pomiar pojemności cieczy, wykorzystujące elektrolit, wahadło,
- wyjście analogowe, cyfrowe (zależnie od konstrukcji),
- dostępny w hermetycznych obudowach,



Inklinometry (2/2)



4



Wrocław University
of Science and Technology



⁴ercmakerspace2013.blogspot.com



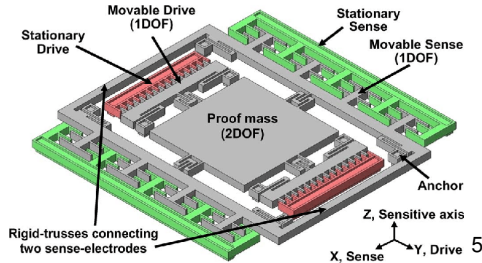
23/62

Żyroskopy (1/2)

- możliwy pomiar orientacji i/lub prędkości kątowej w trzech osiach,
- mechaniczne, optyczne, MEMS,
- mechaniczny – zasadę zachowania momentu pędu (efekt żyroskopowy)
- optyczne – efekt interferencji światła (z ang. *Sagnac effect*),
- MEMS – efekt Coriolisa oddziałujący na drgający element
- wyjście analogowe, cyfrowe (zależnie od konstrukcji)



Żyroskopy (2/2)



Wrocław University
of Science and Technology



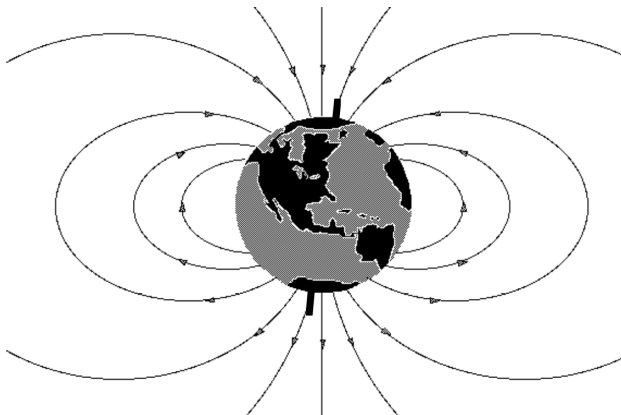
S. Alper, Y. Temiz and T. Akin, A Compact Angular Rate Sensor System Using a Fully Decoupled Silicon-on-Glass MEMS Gyroscope, 2009, pp. 1418 - 1429

Magnetometry (1/3)

- możliwy pomiar natężenia pola magnetycznego,
- wibracyjny, optyczny, MEMS,
- wibracyjny – zjawisko indukcji magnetycznej,
- optyczne – nieliniowe zjawisko Faradaya,
- MEMS – pomiar siły Lorentza, zjawisko efektu Halla,
- wyjście analogowe, cyfrowe (zależnie od konstrukcji)



Magnetometry (2/3)



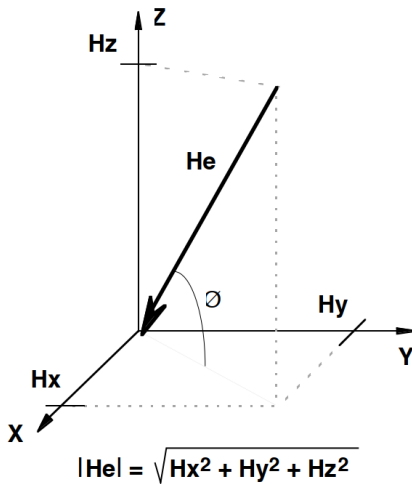
6



Wrocław University
of Science and Technology



Magnetometry (3/3)



7



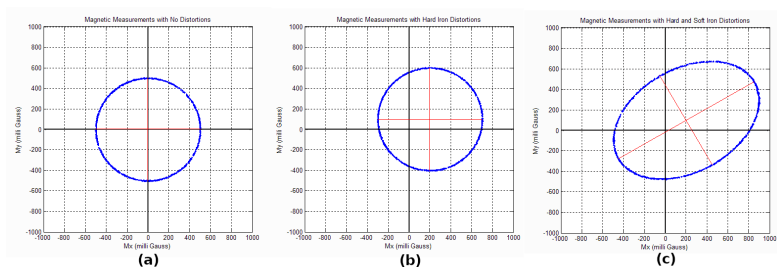
Magnetometry - kalibracja (1/3)

Kalibracja:

- Soft-Iron (skalowanie),
- Hard-Iron (przesunięcie).



Magnetometry - kalibracja (2/3)



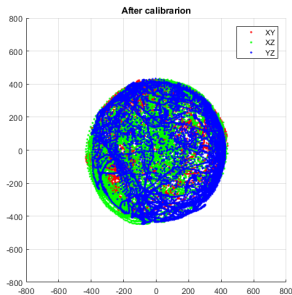
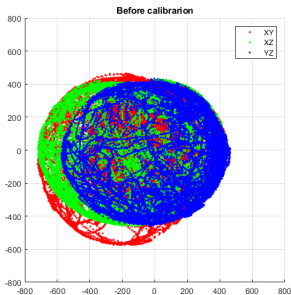
8



Wrocław University
of Science and Technology



Magnetometry - kalibracja (3/3)



9



Wrocław University
of Science and Technology

9
github.com



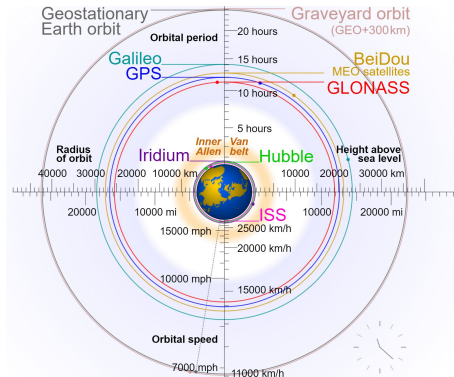
GPS (1/3)

Global Positioning System (GPS-NAVSTAR, GLONASS, Galileo, BeiDou-2 (dawniej COMPASS), and Iridium)

- obecnie dostępnych 29 satelit, konstelacja satelit zapewnia kontakt z 5–8 satelitami niezależnie od miejsca położenia na Ziemi,
- cztery sygnały GPS są używane do wyznaczenia położenia $\mathbb{R}^3$ i czasu,
- dokładność do 10m (pomiar względny DGPS do 0,5m),
- wymagana widoczność satelit (nie nadaje się nawigacji wewnątrz pomieszczeń),
- dokładne określenie pozycji wymaga długiego czasu pomiaru,



GPS (2/3)



10



GPS (3/3)

11



Wrocław University
of Science and Technology

¹⁰ [Glx, wikipedia.org](http://Glx.wikipedia.org)

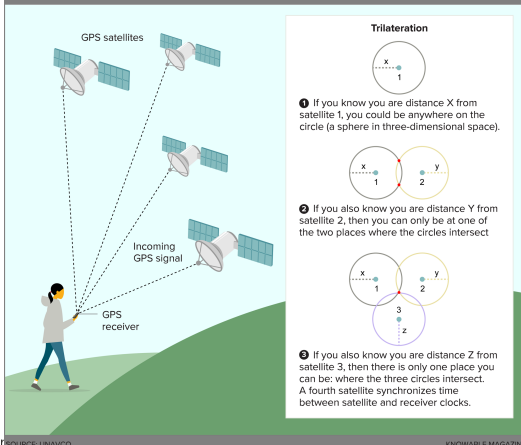
¹¹ [El.pak, wikimedia.org](http://El.pak.wikimedia.org)



Triangulacja

How GPS works

A GPS receiver, like the one in your smartphone, pinpoints its location on Earth's surface by analyzing its distance to three GPS satellites; a fourth satellite synchronizes clocks in the receiver and satellites.



12



Wrocław University
of Science and Technology

¹²scientificamerican.com



Protokół NMEA 0183

\$GPGGA,170834,N,41224.55000,08150.8500,W,1,05,1.5,280.2,M,-34.0,M,,,*75

ASCII	Hex	Dec	Znaczenie
\$	0x24	36	Znacznik początku sekwencji
!	0x21	33	Początek sekwencji z enkapsulacją (np. AIS)
,	0x2c	44	Separator pól danych
*	0x2a	42	Znacznik sumy kontrolnej
\	0x5c	92	Separator bloku TAG
^	0x5e	94	Separator kodu w reprezentacji heksadecymalnej
~	0x7e	126	zastrzeżony
<CR>	0x0d	13	Powrót karetki
<LF>	0x0a	10	Koniec linii, koniec sekwencji



Aktywne znaczniki (1/2)

- optyczne (IR), radiowe, ultradźwiękowe,
- zasada działania: triangulacja, trilateracja,
- bezwzględny pomiar pozycji,
- duża dokładność i szybkość pozycjonowania,
- wymaga instalacji wielu nadajników,
- wymagana widzialność znaczników (optyczne, ultradźwiękowe).



Aktywne znaczniki (2/2)

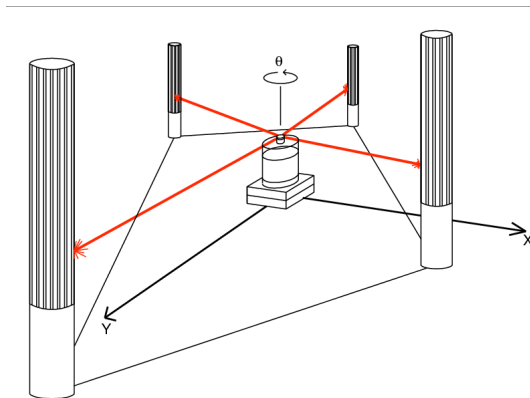


Figure 6.16: The TRC Beacon Navigation System calculates

13



Wrocław University
of Science and Technology

J. Borenstein et al., "Where am I?" sensors and methods for mobile robot positioning, 1996

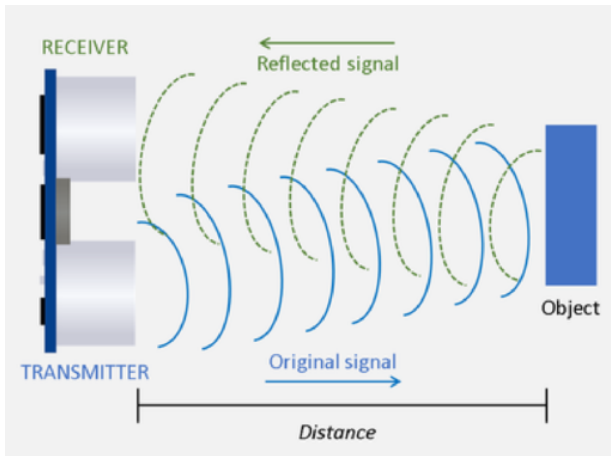


Pomiar czasu powrotu (1/4)

- dalmierze ultradźwiękowe, optyczne, skanery laserowe, kamery TOF (MESA Imaging),
- pośredni pomiar odległości poprzez pomiar czasu powrotu sygnału,
- pomiar wymaga zastosowania nadajnika i odbiornika,
- nadany sygnał musi wrócić do odbiornika,
- problem wielokrotnych odbić, absorpcji, ruchu obiektu bądź robota,
- czas pomiaru zależny od zakresu pomiarowego.
- szerokość wiązki, strefa martwa,



Pomiar czasu powrotu (2/4)



14



Wrocław University
of Science and Technology



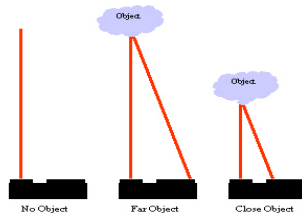
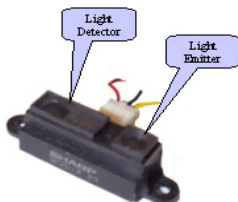
Pomiar czasu powrotu (3/4)

Optyczna triangulacja

- czujniki podczerwone, laserowe, wykorzystujące kamery,
- pośredni pomiar odległości poprzez pomiar kąta odbicia sygnału,
- duża dokładność pomiaru oraz przyzwoita rozdzielczość (dla małych odległości)
- dostępne czujniki na różne zakresy pomiarowe od [μm] do [m],
- połączenie źródła światła strukturalnego (projekcja znanego wzoru, siatki) z systemem wizyjnym pozwala na pomiar odległości w dwóch wymiarach.



Pomiar czasu powrotu (4/4)



15



Wrocław University
of Science and Technology

iautomatyka.pl

15 howmuchsnow.com

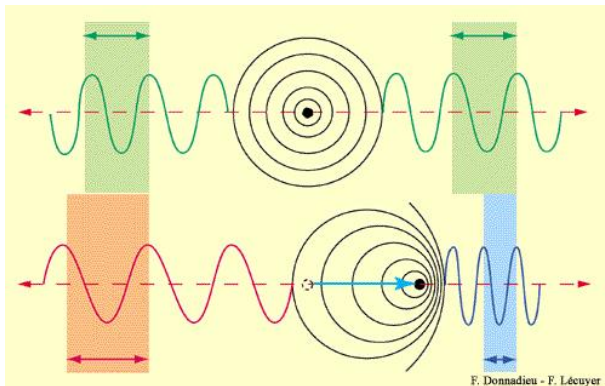


Efekt Dopplera (1/2)

- czujniki wykorzystujące fale dźwiękowe lub elektromagnetyczne,
- pomiar prędkości względnej,
- efekt Dopplera polega na zmianie częstotliwości fali odbieranej przez obserwatora wywołanej ruchem źródła fali lub obserwatora względem ośrodka przenoszącego falę,
- pomiar wymaga zastosowania nadajnika i odbiornika,
- nadany sygnał musi wrócić do odbiornika,
- szeroki zakres pomiarowy, pomiar z dużej odległości



Efekt Dopplera (2/2)



16



Wrocław University
of Science and Technology

¹⁶groupe3r.ch

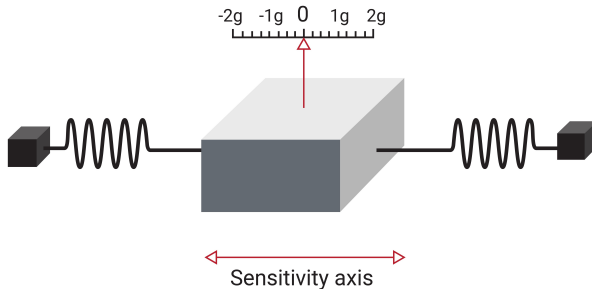


Akcelerometr (1/2)

- wiele rodzajów, najpopularniejsze MEMS,
- możliwy pomiar przyspieszeń oraz wychylenia w trzech osiach,
- najczęściej wykorzystuje się efekt wychylenia pod wpływem przyspieszenia, swobodnej masy zawieszanej na sprężynie,
- dostępne różne zakresy pomiarowe od pojedynczych do setek [g]
- czułość zależna od zakresu pomiarowego,
- wyjścia analogowe, cyfrowe,



Akcelerometr (2/2)



17



Wrocław University
of Science and Technology

17 vectornav.com



- MPU-9250 – IMU, accel+gyro+mag, I2C, SPI,
- BMP280 – barometr, I2C, SPI,
- AMS AS5040 – 10b czujnik położenia kąтового, inkrementalny/absolutny, interfejsy: SSI, ABI, UVW PWM
- ADXL345 – 10b/13b akcelerometr 3DOF, interfejsy: SPI, I2C
- L3GD20H – 16b żyroskop 3DOF, interfejsy: SPI, I2C
- LSM9DS0 – 16b IMU 9 DOF, interfejsy: SPI, I2C
- LSM6DS33 – 16b IMU 6DOF, interfejsy: SPI, I2C
- MMA7455 – 10b akcelerometr 3DOF, interfejsy: SPI, I2C
- FXOS8700 – 14b akcelerometr 3DOF, 16b magnetometr 3DOF, interfejs SPI



Filtry używane do pomiaru orientacji (1/2)

- Filtr Kalmana – iteracyjna estymacja procesu w układzie ze sprzężeniem zwrotnym; w każdym kroku wykonywane są naprzemiennie dwie operacje: estymacja stanu procesu (z ang. *prediction*) i sprzężenie zwrotne w postaci pomiarów zaburzonych szumem (z ang. *correction*)
- Filtr Madgwicka – oparty na kwaternionowej reprezentacji obrotów; zawiera kompensację zniekształceń dla magnetometru i kompensację dryfu żyroskopu; wykorzystuje różniczkowanie kwaternionu i metodę najszybszego spadku w celu wyznaczenia kierunku błędu żyroskopu



Filtry używane do pomiaru orientacji (2/2)

- Filtr komplementarny – kombinacja odfiltrowanych pomiarów z dwóch czujników, z których żaden nie jest idealny; jeden – zaburzony zakłóceniami szybkodziennymi (niezbędny filtr dolnoprzepustowy wprowadza do mierzonego sygnału opóźnienie; pomiary z drugiego – z błędem wolnoziemnym (dryf), są poddane filtracji górnoprzepustowej
- Filtr cząsteczkowy – iteracyjny probabilistyczny filtr oparty na metodzie Monte Carlo, estymacja położenia poprzez generowanie wielu próbek, które następnie są ewaluowane



Filtr Kalmana (1/5)

Opis modelu i opis systemu:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \quad (1)$$

gdzie macierz A wiąże stan układu w poprzednim stanie $k - 1$ z stanem układu w chwili k , B to macierz sterowania, w_{k-1} szum procesu.

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (2)$$

gdzie macierz H wiąże pomiar z wyjściem filtru z_k , a v_k to zakłócenia.

w_k oraz v_k reprezentują szum Gausa.



Wrocław University
of Science and Technology



Filtr Kalmana (2/5)

Filtr Kalmana składa się z dwóch cykli:

- 1 Aktualizacja czasu, krok predykcji.
- 2 Aktualizacja pomiaru, krok korekcyjny.



Filtr Kalmana (3/5)

Predykcja:

- 1 Predykcja kolejnego stanu

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}^- + Bu_{k-1} \quad (3)$$

- 2 Projektcja następnego błędu kowariancji

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4)$$

Dane są wartości estymat dla $\hat{x}_{k-1}^-$ i P_{k-1}



Filtr Kalmana (4/5)

- 1 Wyliczenie macierzy wzmocnienia Kalmana

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5)$$

- 2 Aktualizacja estymaty wykorzystując pomiar z_k

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \quad (6)$$

- 3 Aktualizacja błędu kowariancji

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (7)$$



Filtr Kalmana (5/5)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dt & \frac{dt^2}{2} \\ 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$x = \begin{pmatrix} \theta \\ \omega \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T \quad (10)$$



Filtr komplementarny (1/2)

- Iteracyjne docałkowanie sygnału prędkości ω_n do aktualnej estymacji położenia α_{n-1} z zastosowaniem kombinacji wypukłej z aktualnym pomiarem położenia a_n

$$\alpha_n = (1 - \varepsilon)(\alpha_{n-1} + \tau\omega_n) + \varepsilon a_n$$

gdzie τ to okres próbkowania

- Przy małych prędkościach obrotowych ($\omega_n \rightarrow 0$)

$$\alpha_n = (1 - \varepsilon)\alpha_{n-1} + \varepsilon a_n$$

odpowiada filtracji dolnoprzepustowej pomiaru położenia a_n przez człon inercyjny o stałej czasowej



$$T = \frac{\tau}{\ln(1 - \varepsilon)}$$



Filtr komplementarny (2/2)

- Dla zadanej stałej czasowej T filtru można wyznaczyć parametr ε

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{\tau}{T}}$$

- Często wygodniej jest wyjść od częstotliwości granicznej

$$f = \frac{1}{2\pi T} = -\frac{\ln(1 - \varepsilon)}{2\pi\tau}$$

skąd otrzymujemy

$$\varepsilon = 1 - e^{-2\pi\tau f}$$



Filtr cząsteczkowy (1/3)

Działanie filtra cząsteczkowego zawiera się w krokach:

Zainicjuj cząstki losowo na całej mapie

while iter < max **do**

Przewiduj pozycje cząstek przy użyciu modelu ruchu:

$$x_t = f(x_{t-1}, u_t) + \varepsilon$$

Aktualizuj wagi na podstawie pomiarów z czujników:

$$w_t = p(z_t | x_t)$$

Przeprowadź ponowne próbkowanie cząstek na podstawie ich wag

end while

Wyjście - cząstka z najwyższą wagą jako oszacowane położenie



Filtr cząsteczkowy (2/3)

Generowanie losowych próbek.

$$\begin{cases} P_i \sim U(x^-, x^+) & i = 0 \\ P_i \sim N(\mu, \sigma) & i \geq 1 \end{cases}, \quad (11)$$

gdzie i to iteracja wywołania filtra cząsteczkowego.



Filtr cząsteczkowy (3/3)

Inicjalizacja wag

$$w = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}_{n \times 1}. \quad (12)$$

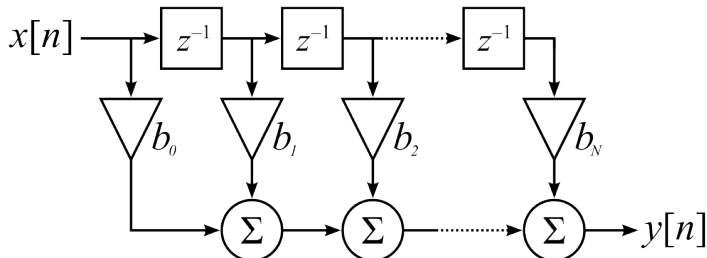
Wektor wag w musi być znormalizowany, nawet po ich aktualizacji

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (13)$$



Filtry cyfrowe (1/3)

FIR (z ang. *Finite Impulse Response*) – filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej

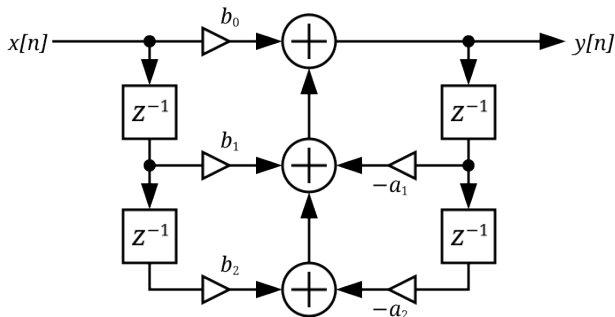


18



Filtry cyfrowe (2/3)

IIR (z ang. *Infinite Impulse Response*) – filtr o nieskończonej odpowiedzi impulsowej



19



Filtry cyfrowe (3/3)

Popularne filtry:

- średnia krocząca,
- medianowy,
- rekursywne, jednobiegunowe (z ang. *single pole*),
dwubiegunowe (z ang. *biquad*),
- Czebyszewa,
- Butterwortha



Wrocław University

of Science and Technology

Blanchard, wikipedia.org

19

Akilaa, wikipedia.org

