



UNIWERSYTET
MIKOŁAJA KOPERNIKA
W TORUNIU

Wydział Fizyki, Astronomii
i Informatyki Stosowanej

Wybrane aspekty pojazdów autonomicznych

Czujniki

Rafał Szczepański

e-mail: szczepi@umk.pl

www.umk.pl/~szczepi

03.06.2024



Plan prezentacji

- Czujniki dotykowe
- Pomiar położenia
- Czujniki bezwładnościowe
- Pomiar odległości
- Analiza obrazu



Czujniki

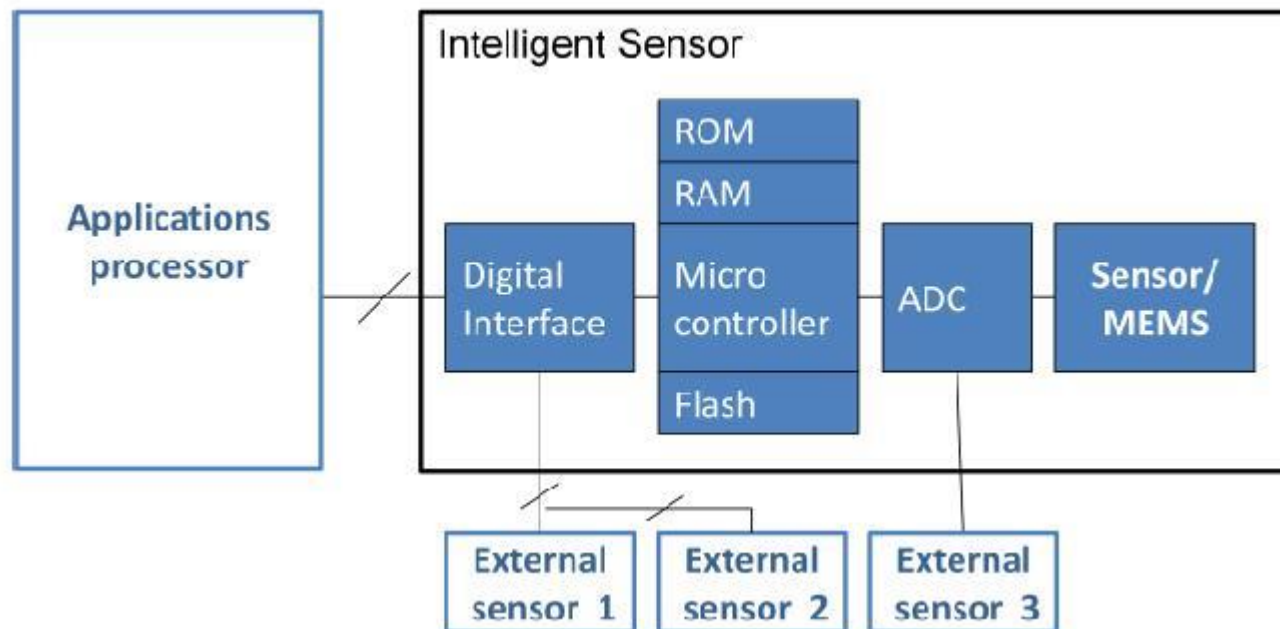
Podział czujników ze względu na **rodzaj mierzonej wielkości**:

- **wewnętrzne** – pomiar prędkości obrotowej koła, pomiar kąta wychylenia (steru lub kierownicy), pomiar głębokości, wysokości (czujniki ciśnienia); czujniki prędkości, wychylenia, przepustnicy są stosowane zarówno w regulacji niskiego poziomu jak i pomocniczo w nawigacji: pozwalają na analizę trakcji, poślizgu oraz obserwację charakterystycznych cech terenu; klasyfikowane jako prioproceptywne – rejestrują wewnętrzne czynniki wywoływane przez środowisko zewnętrzne oraz przez zachowanie pojazdu;
- **zewnętrzne** – bezwładnościowy zespół pomiarowy, inklinometry, kompas magnetyczny, GPS; dostarczają zintegrowane dane obejmujące: obserwacje położenia i orientacji pojazdu w absolutnym układzie odniesienia; zwykle klasyfikowane jako prioproceptywne;
- **środowiskowe** – radary, lidary, sensory elektro-optyczne (EO, IR), akustyczne; stosowane przez algorytmy percepcyjne do obserwacji i tworzenia mapy otoczenia w zakresie określonego widma; wyboru czujnika dla danej funkcji lub akcji dokonują algorytmy percepcyjne; klasyfikowane jako zewnętrzne – odbierają czynniki nie podlegające kontroli pojazdu;

Czujniki

Podział czujników ze względu na **stopień integracji**:

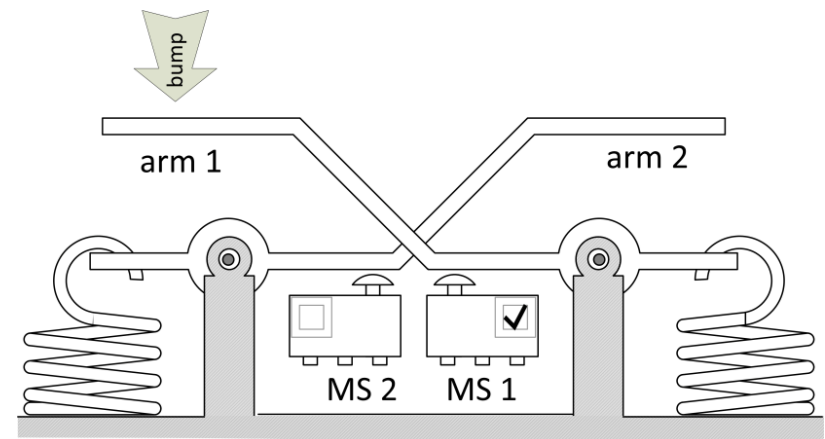
- **podstawowy** – pomiar i transformacja sygnałów fizycznych,
- **zintegrowany** – czujnik podstawowy wraz z przetwarzaniem sygnałów uwzględniającym:
wzmacnianie, filtrację, linearyzację, normalizację;
- **inteligentny** – czujnik zintegrowany wyposażony w komputerową analizę przetwarzanego sygnału oraz wstępną ocenę (ewaluację);



Czujniki dotykowe

Czujniki dotykowe – wykrywają fizyczny kontakt między pojazdem i przeszkodą; stosowane w prostych robotach mobilnych jako tania możliwość tworzenia opisu otoczeniu robota oraz zapewniające spełnienie wymagań bezpieczeństwa – fizyczny kontakt z przeszkodą skutkuje zatrzymaniem awaryjnym;

- **przełącznik** – po przekroczeniu siły większej od wymaganej następuje zamknięcie/otwarcie obwodu elektrycznego; stosowany nie tylko do wykrywania niechcianego kontaktu ze środowiskiem;
- **zderzak** – wykrywa sytuację awaryjną związaną z uderzeniem w przeszkodę; pochłania część energii uderzenia przy użyciu elastycznej osłony wyposażonej w sprężyny przymocowane do podwozia pojazdu; przełączniki wykrywają deformację osłony;



– Źródła: Lineykin, Simon. "Basic Perception." *Autonomous Mobile Robots and Multi-Robot Systems: Motion-Planning, Communication, and Swarming* (2019): 35-64.

<https://www.pololu.com/product/3677/pictures>



Czujniki dotykowe

Czujniki siły – wykrywają fizyczną deformację materiałów elastycznych; deformacja powoduje zmianę właściwości materiału (np. rezystancja, pojemność); głównymi parametrami czujnika siły są:

- minimalna wartość wykrywanej siły,
- maksymalna dopuszczalna siła;
- częstotliwość zmian wartości;

W pojazdach z napędem kołowym czujniki siły są często stosowane do zapobiegania przechylaniu się pojazdu oraz do wykrywania poślizgu;

Przemysłowe czujniki siły | Jakie technologie czujników są dostępne do pomiaru siły?:

<https://youtu.be/QbPEuTQvaiw>

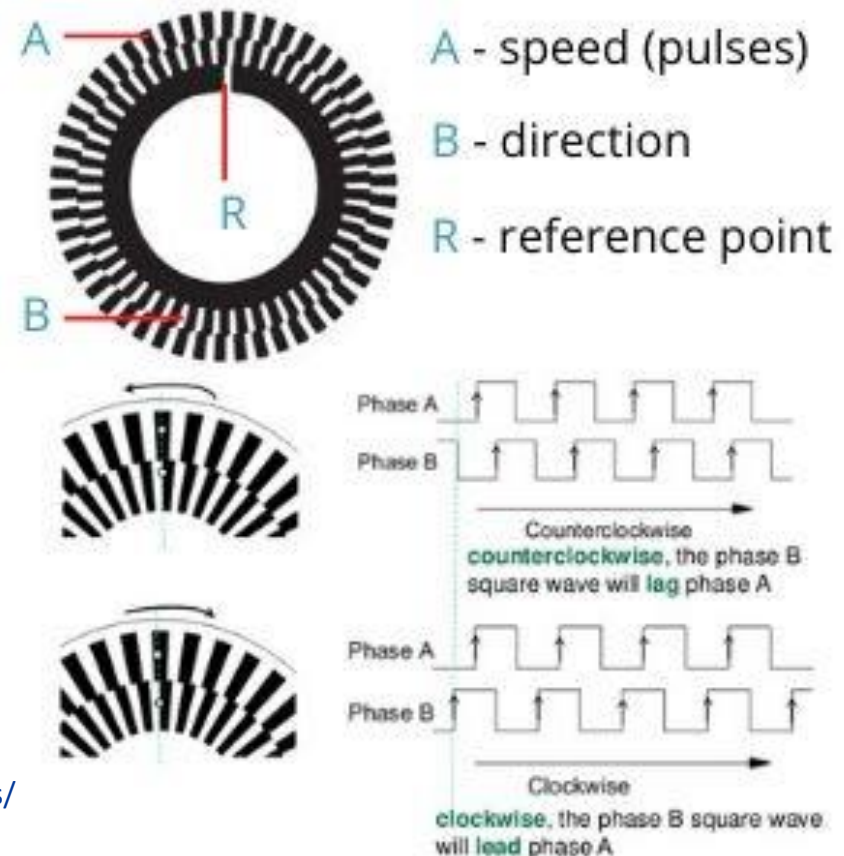
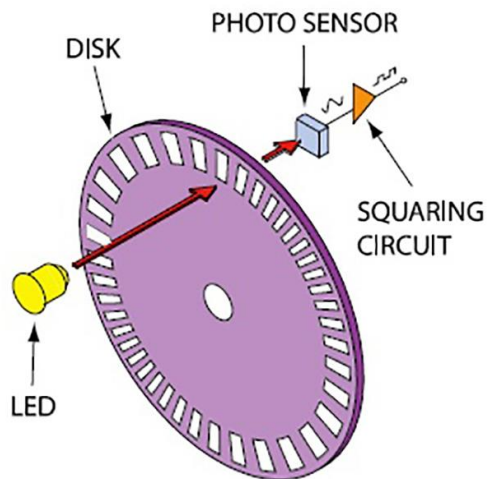
Czujniki odometryczne

Odometria – wyznaczenie trajektorii pojazdu na podstawie sumowania prędkości obrotowej kół. Brak czujnika położenia (orientacji) będzie skutkowało poprawną odometrią jedynie w dwóch wymiarach.

Prędkość kół jest zazwyczaj wyznaczana przy użyciu pomocy czujników obrotowo-impulsowych (enkoderów). Stosowane są enkodery optyczne i magnetyczne.

Incremental Encoder (Shaft Encoder)- how it works:

https://youtu.be/zzHcsJDV3_o





Kompas

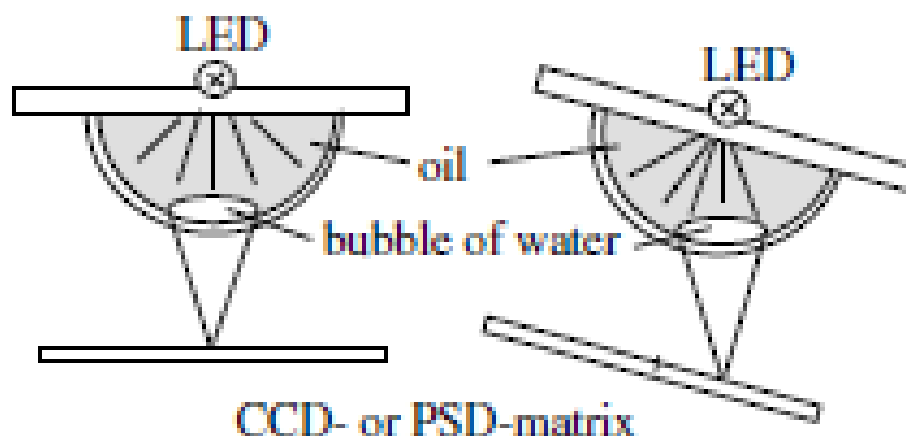
Kompas – może być używany do utrzymywania kierunku poprzez pomiar składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego, przy założeniu, że jest ona stała na krótkich dystansach. Oprócz klasycznego kompasu można również zastosować płytę ferrytową charakteryzującą się prostokątną pętlą histerezy; dowolne zewnętrzne pole magnetyczne będzie przesunęło namagnesowanie płyty tak, aby wchodziła ona nasycenie.

Stosowane są uzwojenia z rdzeniem ferrytowym przez które przepuszcza się zmienny prąd; wówczas dla szczytowej wartości napięcia występuje punkt nasycenia wywołany przez nagłą zmianę namagnesowania. Zastosowanie sygnału prądowego o charakterze trójkątnym (tzw. rampa) umożliwia wykonanie skanowania umożliwiającego wyznaczenie odchylenia od składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego.

Ze względu na możliwe zakłócenia metoda nie jest stosowana wewnątrz budynków.

Inklinometr optyczny

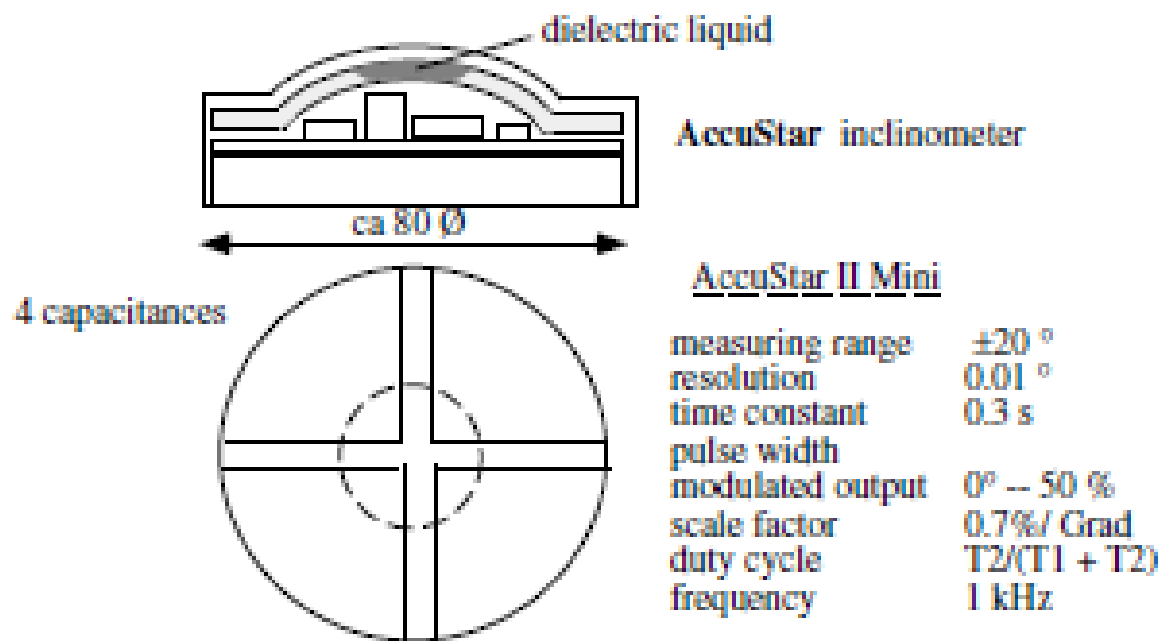
Inklinometry – pozwalają na określenie czy pojazd autonomiczny porusza się w górę, w dół lub czy niebezpiecznie się przechyla; pomiaru można dokonać za pomocą kropli cieczy przemieszczającej się pod wpływem grawitacji.



W przezroczystej półkulistej plastikowej misce wypełnionej olejem kropla wody tworzy soczewkę na dole, ponieważ woda jest bardziej gęsta niż olej. Światło diody jest rzutowane przez soczewkę na matrycę CCD. Każde odchylenie przesuwa kroplę, a więc i obraz diody LED na matrycy CCD, wskazując na wielkość nachylenia. Olej o odpowiedniej lepkości tłumi drgania spowodowane nierównym terenem;

Inklinometr pojemnościowy

Wykorzystuje zjawisko zmiany pojemności spowodowane przemieszczaniem się kropli cieczy dielektrycznej między okładzinami kondensatora. Zastosowanie układu kwadraturowego umożliwia pomiar kąta w dwóch płaszczyznach.





Czujniki bezwładnościowe

Do wyznaczenia położenia pojazdu można zastosować informacje o przyspieszeniu i szybkości obracania się.

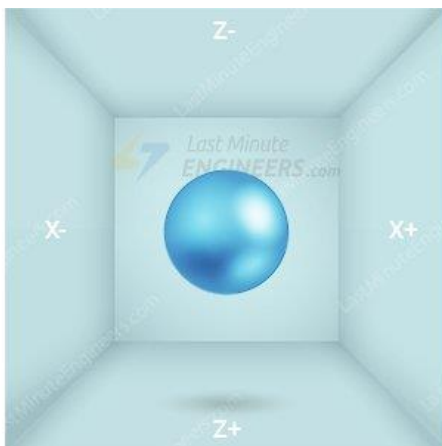
Konieczne jest zastosowanie całkowania.

Pomiary są niezależne od zewnętrznych zakłóceń jednak ich wiarygodność zależy od dokładności całkowania.

Akcelerometry – mierzą przyspieszenie w jednym kierunku. W pojazdach autonomicznych mogą być stosowane czujniki montowane w poduszkach powietrznych.

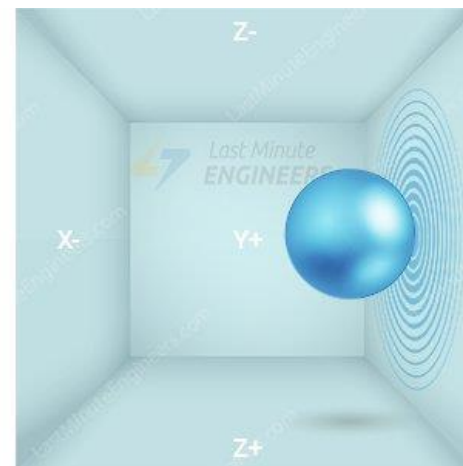
Czujniki bezwładnościowe

Weightless
State



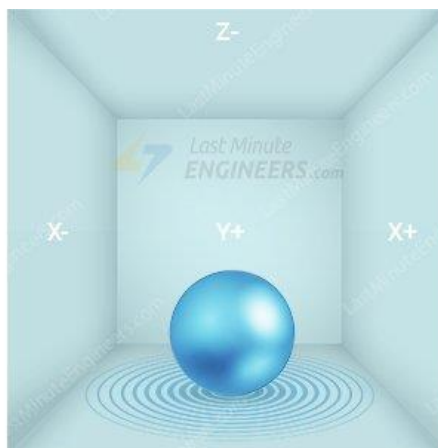
$X=0g$
 $Y=0g$
 $Z=0g$


Force 1g



$X=1g$
 $Y=0g$
 $Z=0g$

Gravitational
Force 1g

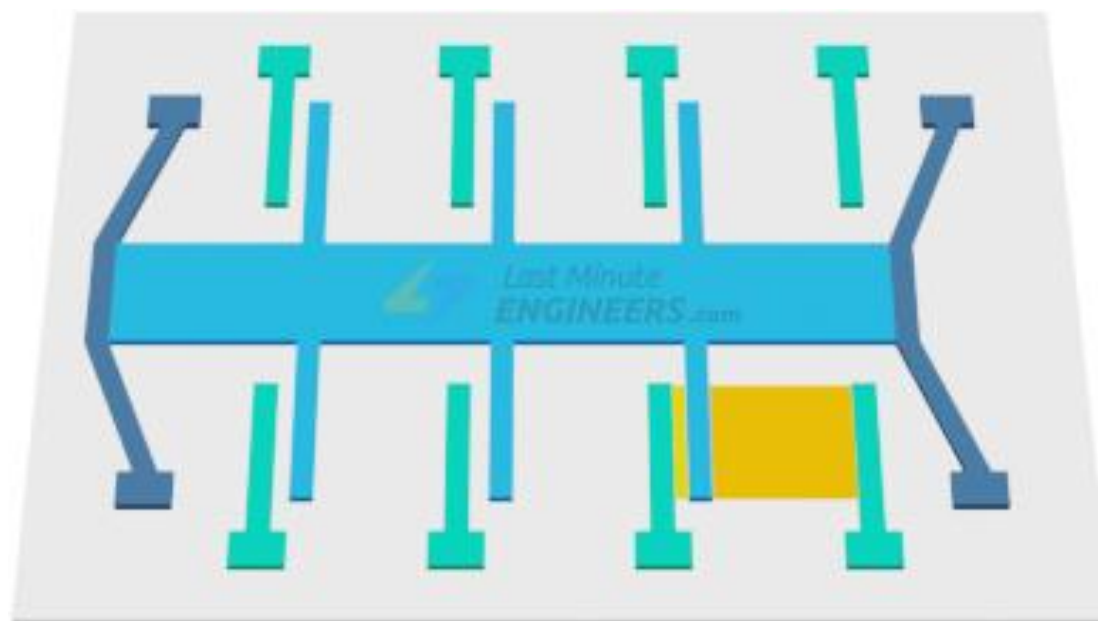


$X=0g$
 $Y=0g$
 $Z=1g$

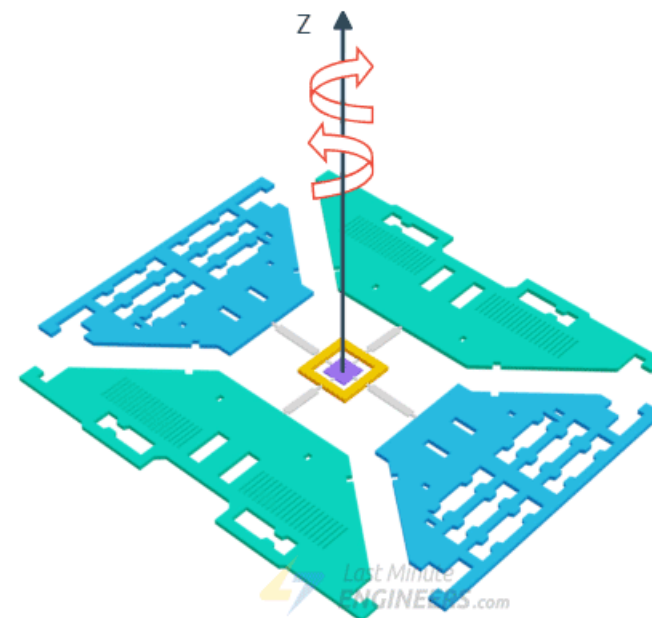
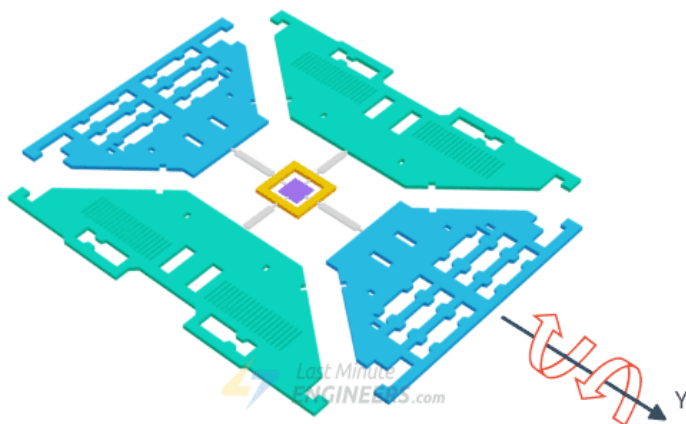
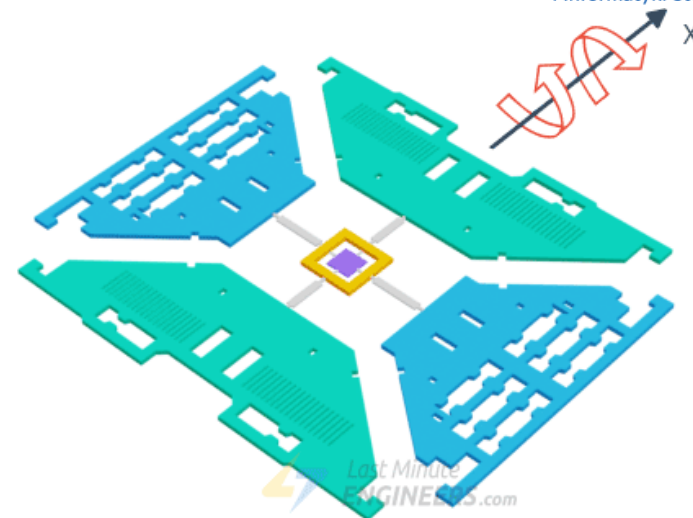
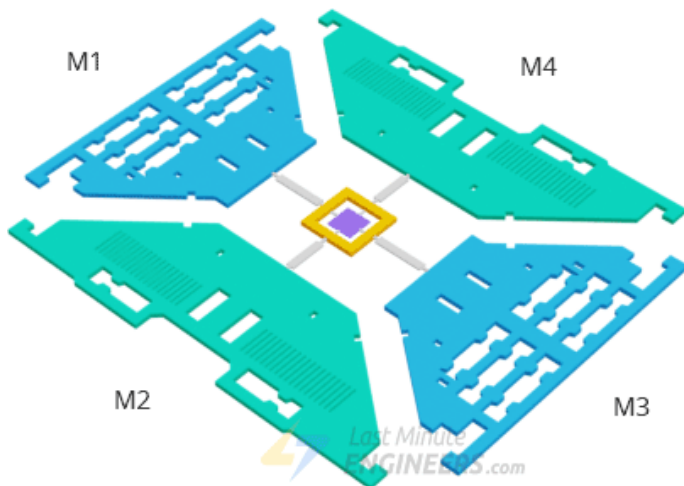
Akcelerometr MEMS

Metoda pomiarowa bazuje na wykrywaniu zmiany pojemności spowodowanej poruszaniem się masy na skutek pojawienia się przyspieszenia.

Podstawowa trudność polega na wyeliminowaniu składowej przyspieszenia ziemskiego, którego wartość wielokrotnie przewyższa mierzone przyspieszenie. W tym celu wykorzystywana jest informacja o orientacji pojazdu.



Akcelerometr MEMS





Akcelerometr MEMS

EN | Bosch Working principle of an acceleration sensor:

<https://youtu.be/4kfzqZpttTA>

Czujniki prędkości obrotowej

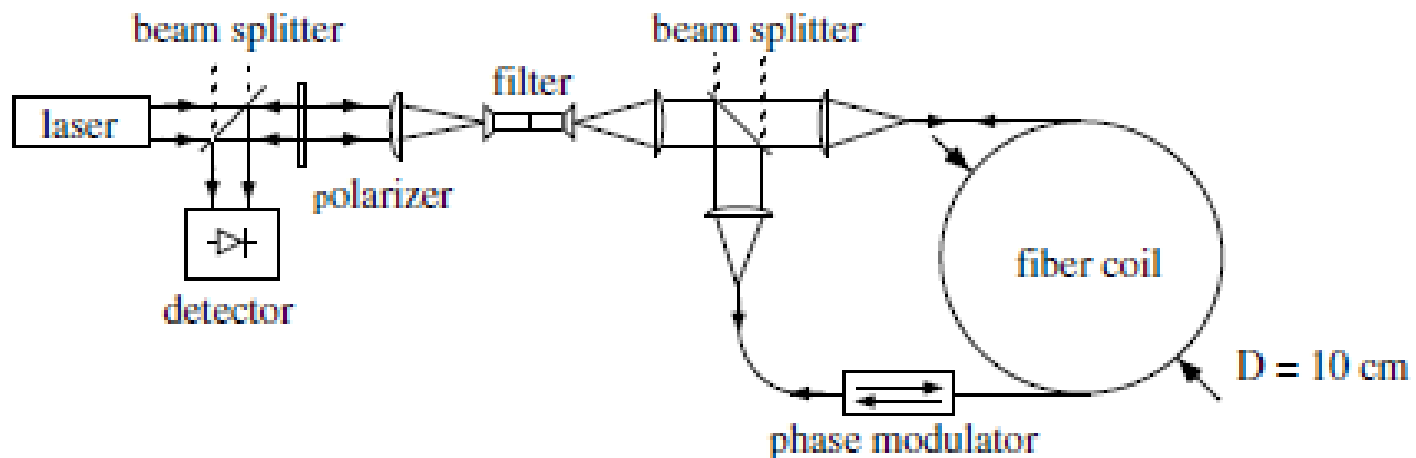
Jeżeli nie jest wymagana wysoka dokładność stosowane są **tanie czujniki bazujące na MEMS**.

Wyznaczenie pozycji i orientacji pojazdu bez zewnętrznych znaczników wymaga zastosowania precyzyjnych czujników prędkości;

Żyroskop laserowy – wykorzystuje tzw. efekt Sagnaca. Dwie wiązki światła biegną w przeciwnych kierunkach w światłowodzie; Jeżeli światłowód będzie się obracał, nastąpi przesunięcie fazy między wiązkami światła.

Laser Gyroscope:

<https://youtu.be/8lYkisyOZvs>



Czujniki prędkości obrotowej

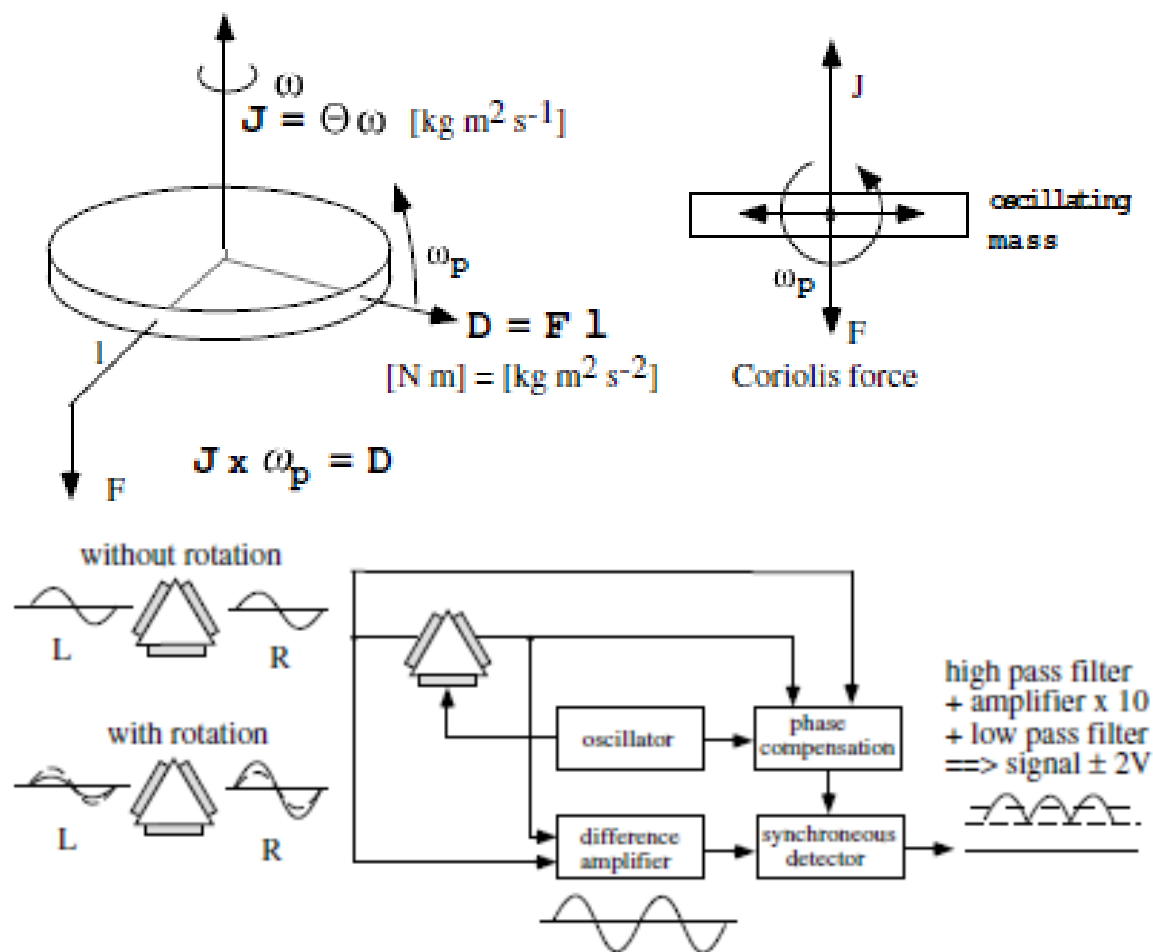
Żyroskop mechaniczny – działa w oparciu o zasadę zachowania momentu pędu.

Gyroscope:

https://youtu.be/cquvA_IpEsA

EN | Bosch Working principle
of a gyroscope for ESP®:

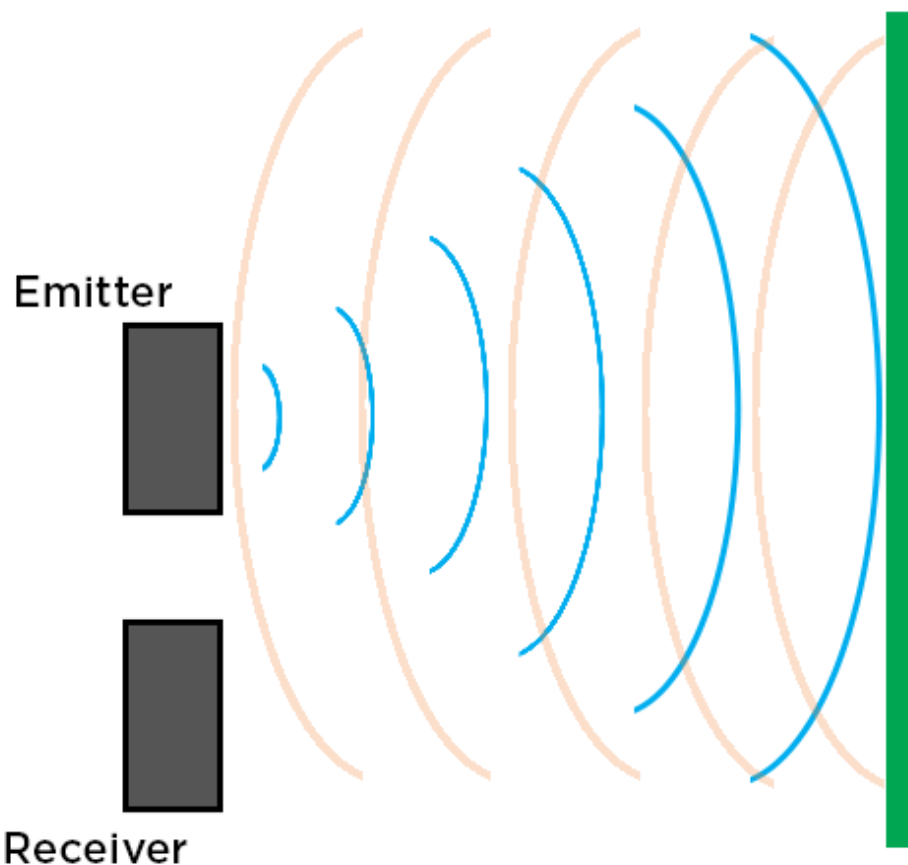
<https://youtu.be/XsjvaYAFN1M>



Czujniki odległości

Czujniki odległości (zbliżeniowe) – mają kluczowe znaczenie w zakresie mapowania i unikania kolizji przez pojazdy autonomiczne. Mogą być:

- aktywne: ultradźwiękowe, laserowe, podczerwień,
- pasywne: kamery.



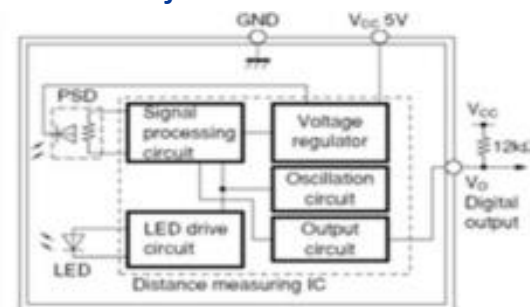
Czujniki działające w podczerwieni

Pomiar odległości za pomocą światła podczerwonego jest zwykle używany do wykrywania przeszkód znajdujących się w pobliżu (5-80 cm);

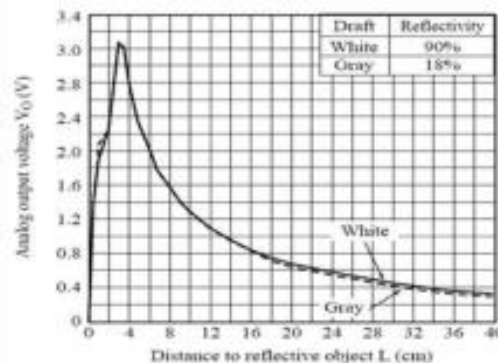
W pojazdach autonomicznych jest często stosowany jako czujnik bezpieczeństwa, np. do wykrywania stopni, a także w małych robotach, jako tani czujnika do badania środowiska.



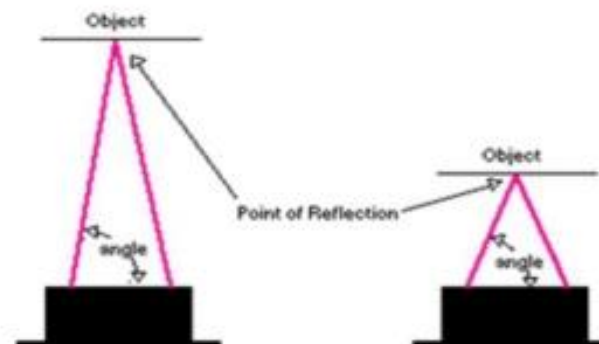
(a) Figure



(b) Schematic



(c) Characteristic



(d) Principles of measurement
using IR sensor



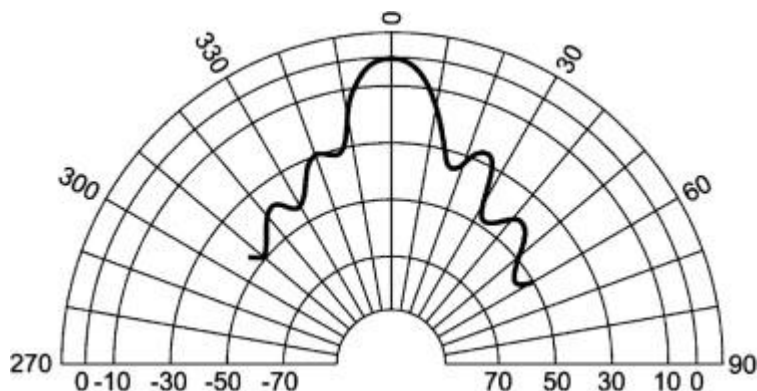
Czujniki ultradźwiękowe

Pomiar odległości przy użyciu czujników ultradźwiękowych polega na emitowaniu fali ultradźwiękowej i zmierzeniu czasu odebrania echa (fali odbitej od przeszkody). Fala ultradźwiękowa jest wytwarzana przy użyciu oscylującej membrany albo kryształu piezoelektrycznego.

Cienka membrana o średnicy 50 mm jest wprawiana w drgania o częstotliwości ok. 50 kHz. Emituje ona falę ultradźwiękową propagującą z prędkością 330 m/s. Odbita od przeszkody fala wraca do membrany, która pełni rolę odbiornika; czas przelotu fali służy do wyznaczenia odległości od przeszkody. Sygnały ultradźwiękowe są silnie tłumione w powietrzu. Dla 50 kHz maksymalna odległość wynosi 11 m.

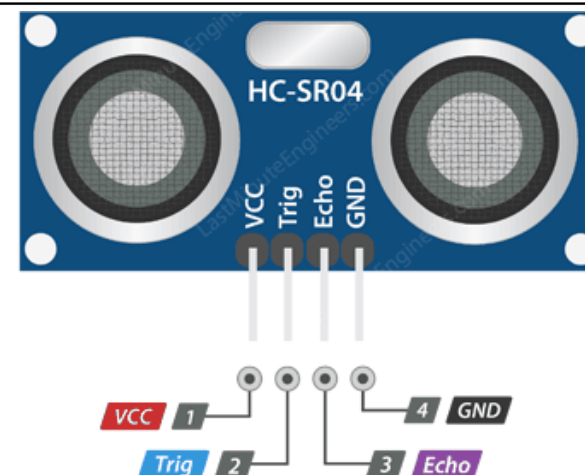
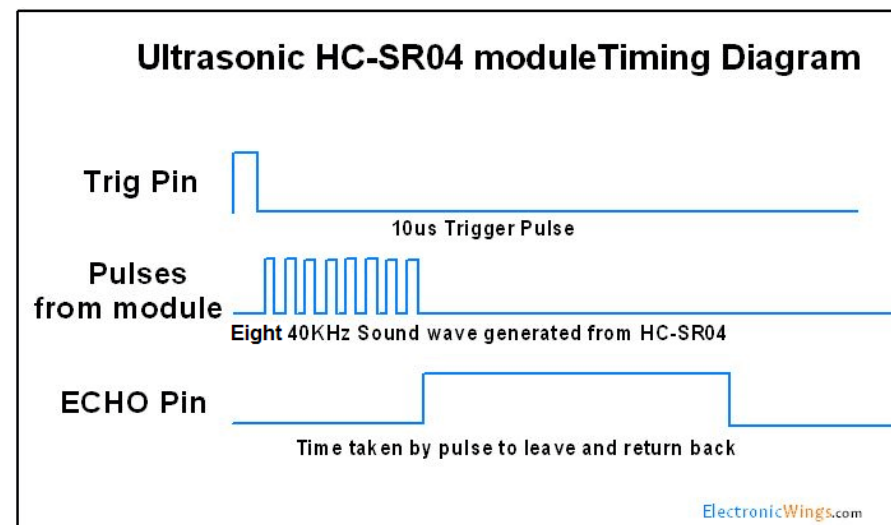
Prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej zależy od temperatury, ciśnienia i wilgotności, jednak dla niewielkich odległości może być traktowana jako stała.

Czujniki ultradźwiękowe



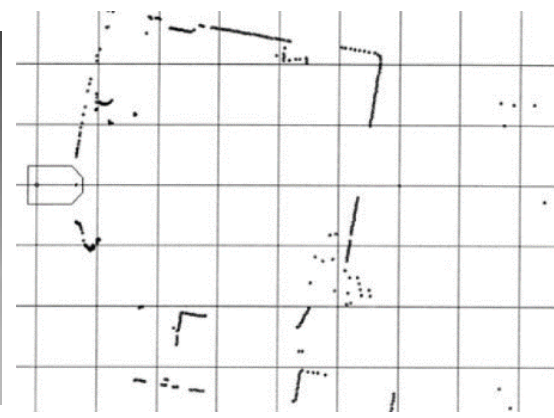
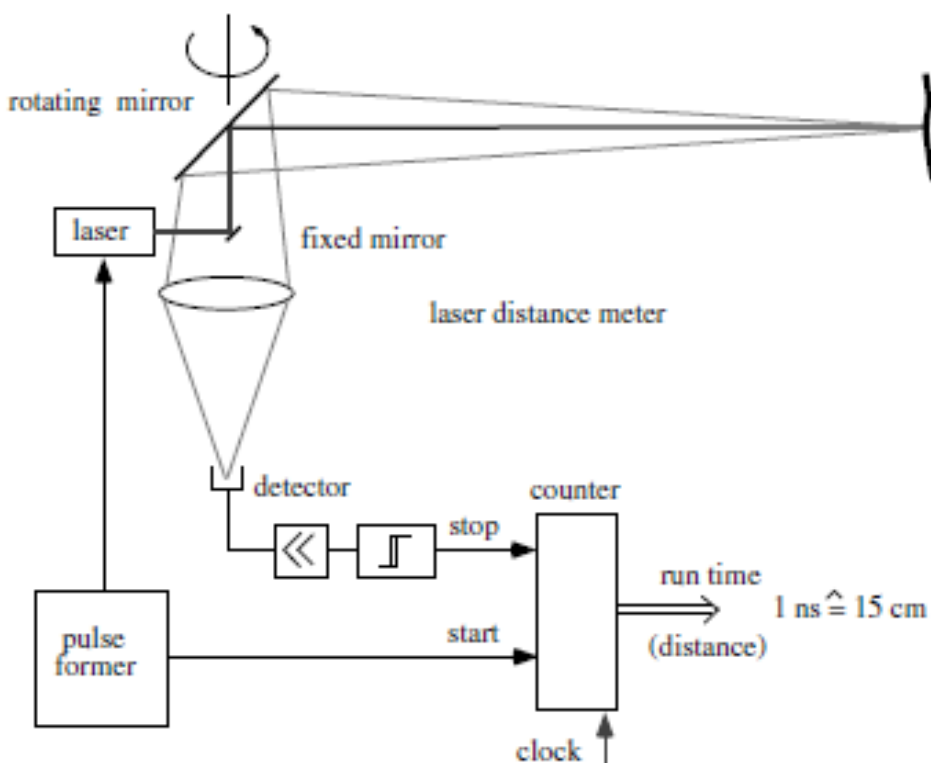
Ultrasonic sensors – the alternative for difficult surfaces:

<https://youtu.be/JNQA3VMFTU>



Czujniki laserowe

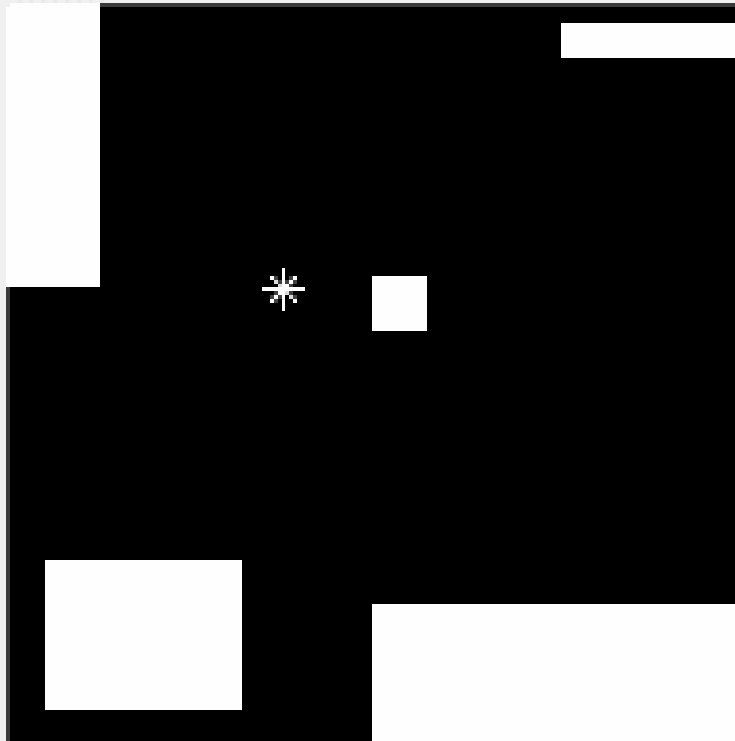
Radar laserowy – czujnik laserowy emitujący wąskie impulsy o czasie trwania 1 ns; moc lasera 10 W; liczba impulsów 4500 imp/s (bezpieczny dla oczu). długość fali emitowanej wiązki zbliżona do podczerwieni; podczas generowania impulsu uruchamiany jest licznik, który zatrzymuje się w momencie odebrania wiązki odbitej.



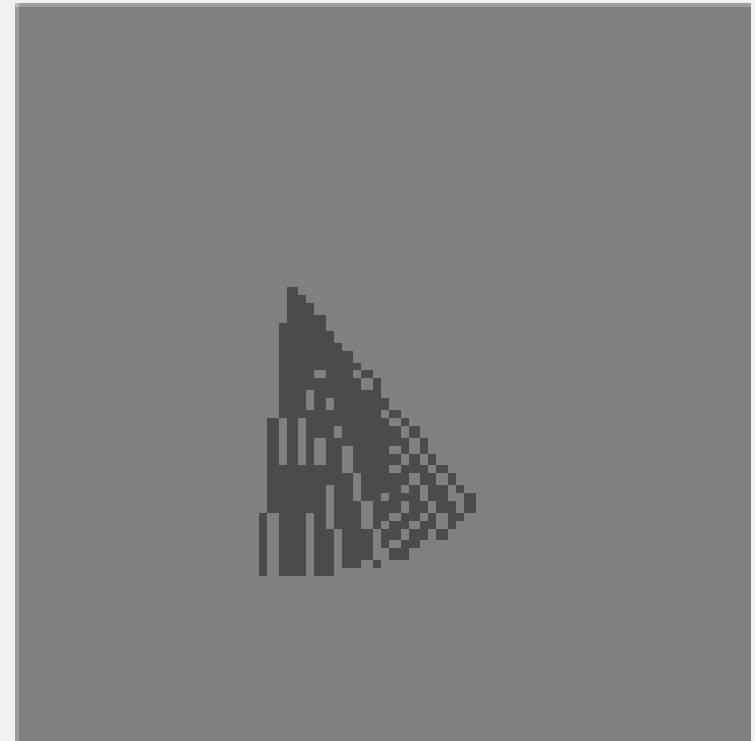
Cone angle	180°
Angle resolution	1°/0.5° / 0.25°
Response time	13 ms / 26 ms / 53 ms
Resolution	10 mm
Systematic error	±15 mm
Statical error at 1 σ	5 mm
Measurement range	8 m, 16 m, 32 m, 80 m
Transfer rate	9.6/19.2/38.4/ 500 kBaud
Working temperature	0...+50°C
Supply voltage	24 V ±15%
Weight	ca. 4.5 kg
Size (H × L × W)	210 mm × 156 mm × 155 mm

Czujniki laserowe

Environment map



Inverse Laser scan measurement



SLAM100 Handheld Lidar Scanning a Garage for point cloud:

<https://youtu.be/4-DiK4VZTnI>



Czujniki wizyjne

Czujniki półprzewodnikowe stosowane w systemach wizyjnych wykorzystują wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne polegające na uwalnianiu elektronów pod wpływem absorpcji fotonów.

Czujniki CMOS:

- małe rozmiary,
- większa dynamika niż CCD,
- brak efektu rozogniskowania,
- ciągłe przetwarzanie obrazu na napięcie,
- dostęp do pojedynczych pikseli,
- większa cena niż CCD.

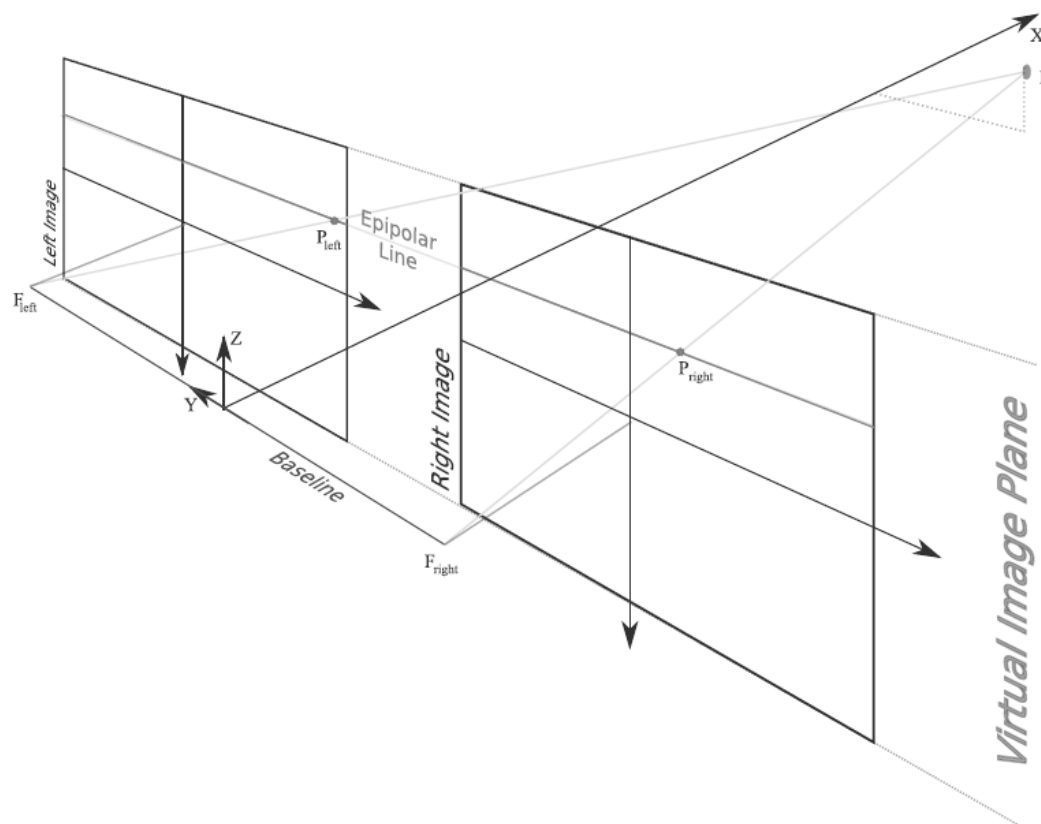
Czujniki CCD:

- większa czułość,
- mniejsza wrażliwość na szumy,
- uzyskanie obrazu kolorowego wymaga zastosowania filtrów RGB,
- efekt rozogniskowania przy intensywnym naświetleniu.

Systemy stereowizyjne

Uzyskanie informacji o odległości obiektu od kamery wymaga przeprowadzenia rekonstrukcji głębi na podstawie co najmniej dwóch obrazów z kamery 2D prezentujących scenę 3D z różnych punktów obserwacyjnych.

Informację o głębokości można uzyskać poprzez dopasowanie punktu na obu obrazach patrząc na przesunięcie między dopasowaną parą.



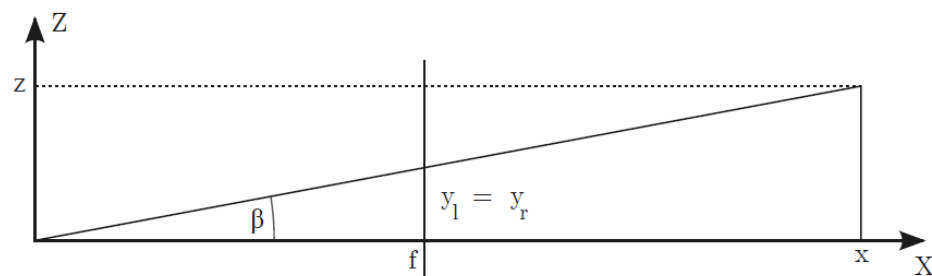
Systemy stereowizyjne

Wyznaczenie współrzędnych obiektu na podstawie dwóch obrazów

$$\tan(\alpha_l) = \frac{x_l}{f} = \frac{\frac{b}{2} - y}{x} \longrightarrow y = \frac{-x_l \cdot x}{f} + \frac{b}{2}$$

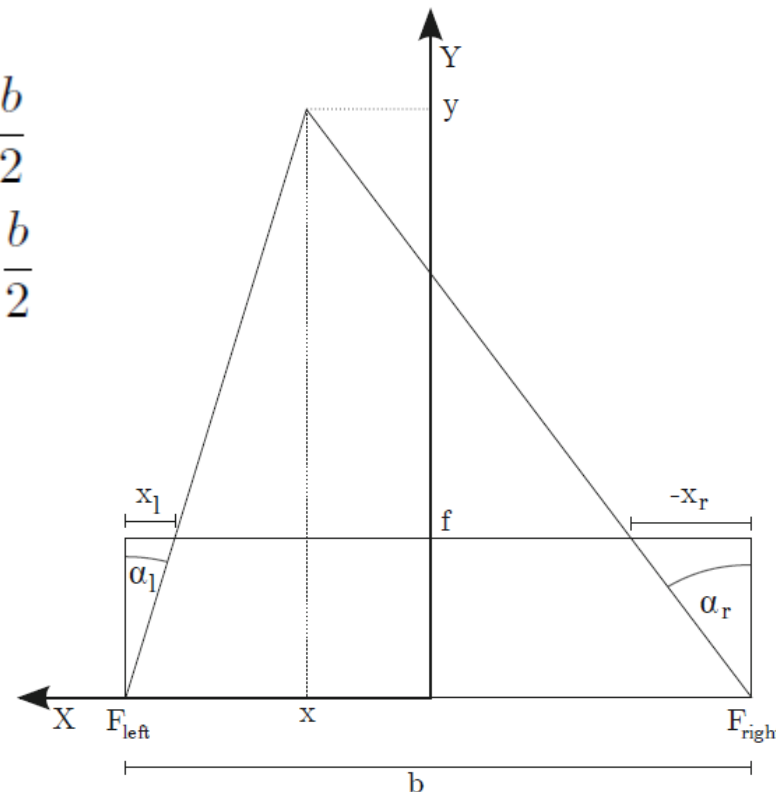
$$\tan(\alpha_r) = \frac{-x_r}{f} = \frac{\frac{b}{2} + y}{x} \longrightarrow y = \frac{-x_r \cdot x}{f} - \frac{b}{2}$$

$$x = \frac{b \cdot f}{x_l - x_r}$$



$$\tan(\beta) = \frac{y_l}{f} = \frac{z}{x}$$

$$z = \frac{x \cdot y_l}{f}$$



$$y = \frac{-\frac{b}{2} \cdot (x_l + x_r)}{x_l - x_r}$$

$$z = \frac{y_l \cdot b}{x_l - x_r}$$

Systemy stereowizyjne

Clumsy Cyclops- How does Stereo Vision work?:

<https://youtu.be/yfjMJfXMBcY>

