

Roboty mobilne

Czujniki

Wstęp

- Czujniki są wyposażone układ elektroniczny, który pełni funkcję przetwornika analogowo-cyfrowego, układu pośredniczącego z systemem sterowania robota i sterownika czujnika.
- Układy sterujące komunikują się z urządzeniami robota za pomocą standardowych portów komunikacyjnych: RS-232, RS-485, CAN, Ethernet, I²C, ...

Podział czujników

- Ze względu na rodzaj wielkości, która jest mierzona:
 - elektryczne,
 - nieelektryczne.
- Ze względu na złożoność wyniku pomiaru:
 - wieloparametrowe,
 - jednoparametrowe.
- Ze względu na umieszczenie czujników:
 - pokładowe,
 - pozapokładowe (najczęściej stacjonarne).
- Ze względu na umiejscowienie źródła mierzonego parametru:
 - wewnętrzne (z włączeniem rozpoznających stan robota względem otoczenia),
 - czujniki rozpoznające otoczenie,
 - inne.

Podział czujników

- Czujniki wewnętrzne:
 - czujniki względnych parametrów kinematycznych,
 - czujniki służące do samolokalizacji,
 - czujniki bezwzględnych parametrów kinematycznych
 - czujniki parametrów siłowych
 - inne (np. czujniki parametrów elektrycznych)
- Czujniki rozpoznające otoczenie:
 - czujniki dotykowe,
 - czujniki akustyczne,
 - czujniki optyczne zbliżeniowe
 - czujniki laserowe,
 - czujniki wizyjne,
 - czujniki służące do samolokalizacji.

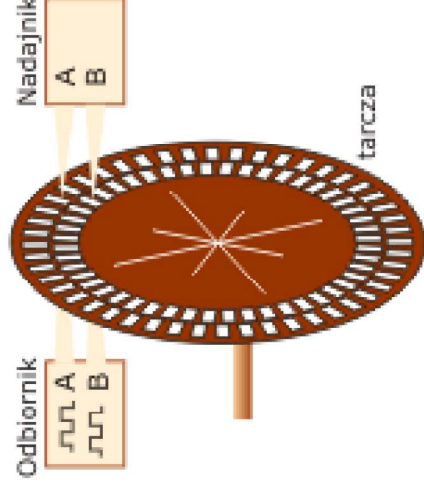
Czujniki wewnętrzne

- Czujniki względnych parametrów kinematycznych,
- Czujniki służące do samolokalizacji,
- Czujniki bezwzględnych parametrów kinematycznych,
- Czujniki parametrów siłowych,
- Inne (np. czujniki parametrów elektrycznych).

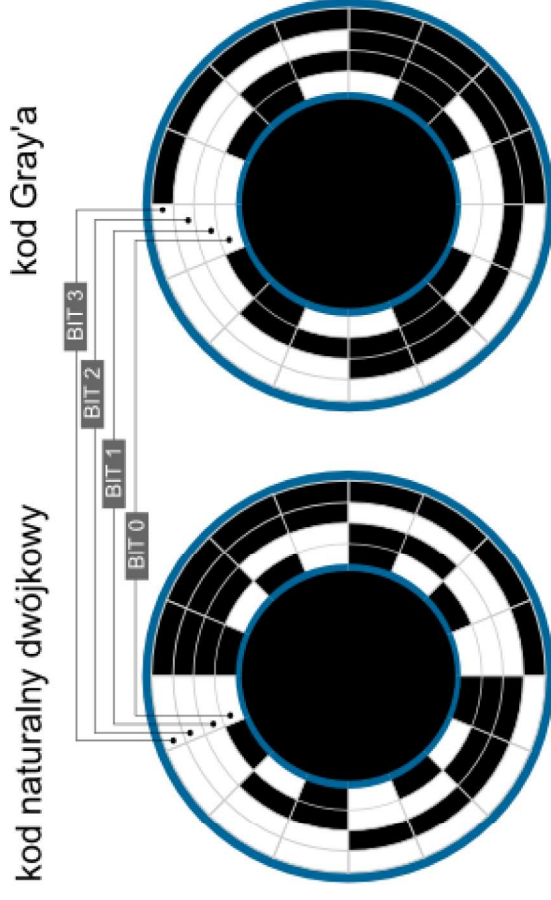
Czujniki względnych parametrów kinematycznych

- Pomiar **względnych** parametrów kinematycznych elementów ruchomych:
 - zmian położenia kąтового **silników** napędzających lub/i kół jezdnych,
 - zmian położzeń poszczególnych **elementów**, np. wysokości wysunięcia zawieszenia koła
 - zmian względnego położenia kąтового **zestawów kołowych**, wózków oraz innych elementów konstrukcji robota.
- Informacja o **położeniu** (czujniki absolutne) lub o **zmianach położenia** (czujniki przyrostowe).
- **Prędkość**: różniczkowanie położenia w czasie lub bezpośrednio: np. prądnica tachometryczna, czujniki indukcyjne lub czujniki pojemnościowe.
- **Przyspieszenie** kątowe: przez różniczkowanie prędkości kątowej lub bezpośrednio, z użyciem akcelerometrów (uwaga na drgania w czasie jazdy)

Przetworniki obrotowo-impulsowe



Enkodery
inkrementalne i
absolutne



Inne przetworniki używane jako czujniki położenia

- Przetworniki **magnetyczne** (magnetorezystancyjne)
- Przetworniki **hallotronowe**
- Rzadziej: indukcyjne, pojemnościowe i potencjometryczne
- Największa dokładność - czujniki parametrów kinematycznych ruchu obrotowego na wałach silników.
- Niekiedy bardziej celowe połączenie przetwornika pomiarowego z **kołem napędowym** (gdy nie ma możliwości zamontowania przetwornika na wale silnika, gdy luzy i niedokładności przekładni nie pozwalają na precyzyjny pomiar parametrów kinematycznych)
- Dane wykorzystywane w układach sprzężenia zwrotnego modułów **regulacji położenia** lub/i **prędkości** napędów i do samolokalizacji, zwanej odometrią

Czujniki samolokalizacyjne

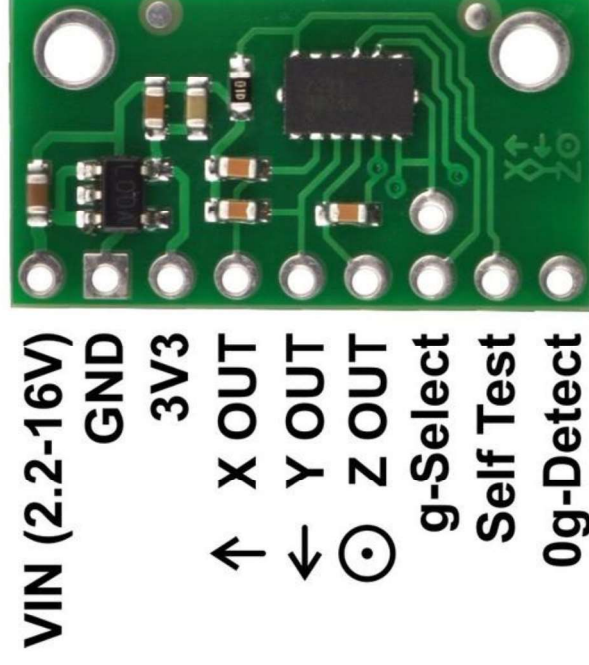
- **Samolokalizacja:** zliczeniowa i względna.
- **Samolokalizacja zliczeniowa:**
 - obliczane jest bieżące położenie robota na podstawie danych o poprzednim jego położeniu oraz o zmianie parametrów kinematycznych w czasie od wykonania pomiaru do wyznaczenia poprzedniego położenia;
 - założenie: poprzednie oszacowanie położenia robota było bezbłędne;
 - wada: kumulowanie się błędów
 - zaleta: możliwość wykorzystania danych z czujników bezpośrednio mierzących parametry kinematyczne robota
- **Samolokalizacja względna:** pomiar położenia robota względem wybranych elementów otoczenia (GPS, inne)

Czujniki bezwzględnych parametrów kinematycznych

- Do określenia parametrów bezwzględnego położenia robota oraz pierwszej i drugiej pochodnej położenia
- Czujniki te można traktować jako wewnętrzne wtedy, gdy ich działanie nie jest wspomagane zewnętrznymi urządzeniami, lecz wykorzystują pole grawitacyjne lub pole magnetyczne Ziemi.
- Mogą to być:
 - akcelerometry
 - inklinometry
 - kompasy
 - żyroskopy (giroskopy).

Akcelerometry

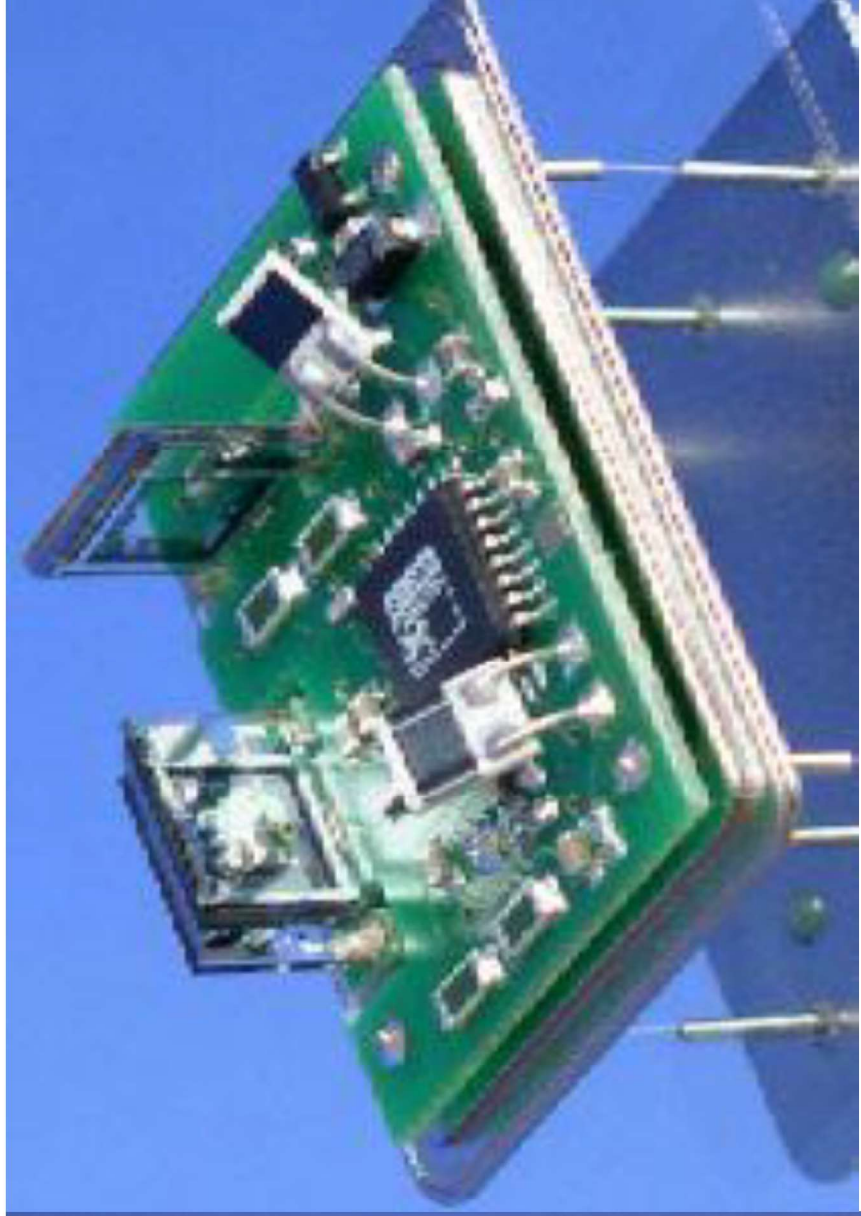
- Akcelerometry **wielosiowe**, do pomiaru wszystkich składowych przyspieszeń liniowych oraz kątowych
- Miniaturyzacja akcelerometrów oraz ich coraz niższy koszt - powszechne wykorzystywanie i w robotach.
- Budowa: miniaturowa masa, zamocowana na sprężystych belkach – elektroda w układzie kondensatora pomiarowego, pomiar wspomagany mikroprocesorem



Inklinometry

- Służą do pomiaru **odchylenia od pionu** (1D lub 2D)
- Umożliwiają pomiar **kąta** względem Ziemi niezależnie od umiejscowienia czujnika.
- Podstawowy element: wahadełko umieszczone w oleju w celu wytłumienia drgań.
- Inklinometry **analogowe**: hallotron lub magnetorezystor do pomiaru przemieszczenia wahadełka
- Inklinometry **optoelektroniczne**: wahadełko połączone z enkoderem optycznym.
- Inklinometry **pojemnościowe**: mikromechaniczny element krzemowy.
- Warunkiem dokładnego pomiaru pochylenia jest skuteczne **wytłumienie drgań** o relatywnie dużej częstotliwości, które są charakterystyczne dla ruchu robotów mobilnych.

Inklinometr pojemnościowy



Kompasy z wyjściem elektronicznym

- Do określenia **orientacji** względem kierunku **północnego**, wyznaczanego przez pole magnetyczne Ziemi.
- Kompasy z **igłą magnetyczną**, której położenie jest odczytywane za pomocą układu optoelektronicznego.
- Kompasy z czujnikami **hallotronowymi**, które charakteryzują się wrażliwością na bardzo słabe pola magnetyczne.
- Sporym problemem jest **dokładność** kompasu, ponieważ ziemskie pole magnetyczne można łatwo zakłócić urządzeniami pokładowymi robota, np. silnikami czy przewodami prądowymi.
- Zakłócać pracę kompasu mogą również elementy konstrukcyjne robota, które zostały wykonane z materiałów ferromagnetycznych.
- Warunkiem prawidłowej pracy kompasu jest **zaekranowanie** pól magnetycznych, generowanych przez podzespoły robota i urządzeń pracujących w pobliżu robota.

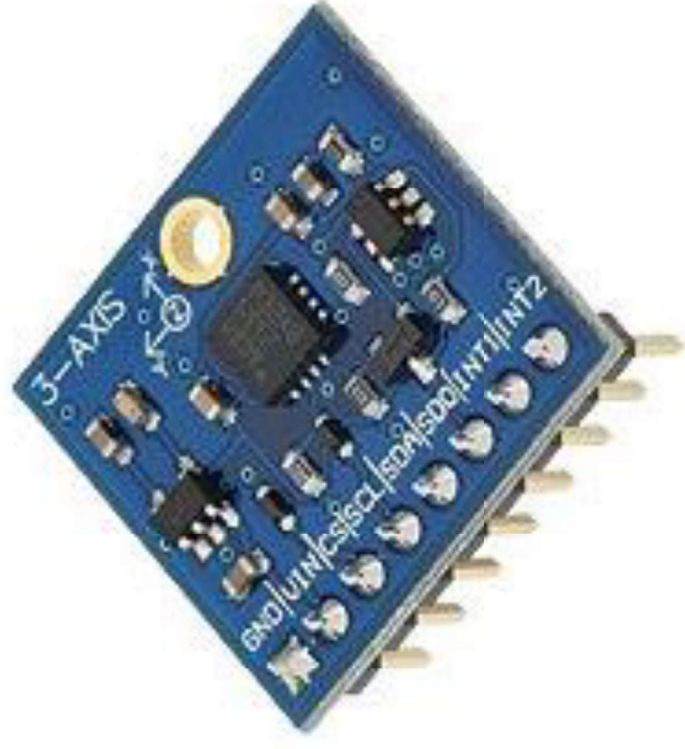
Kompasy cyfrowe



Giroskopy (żyroskopy)

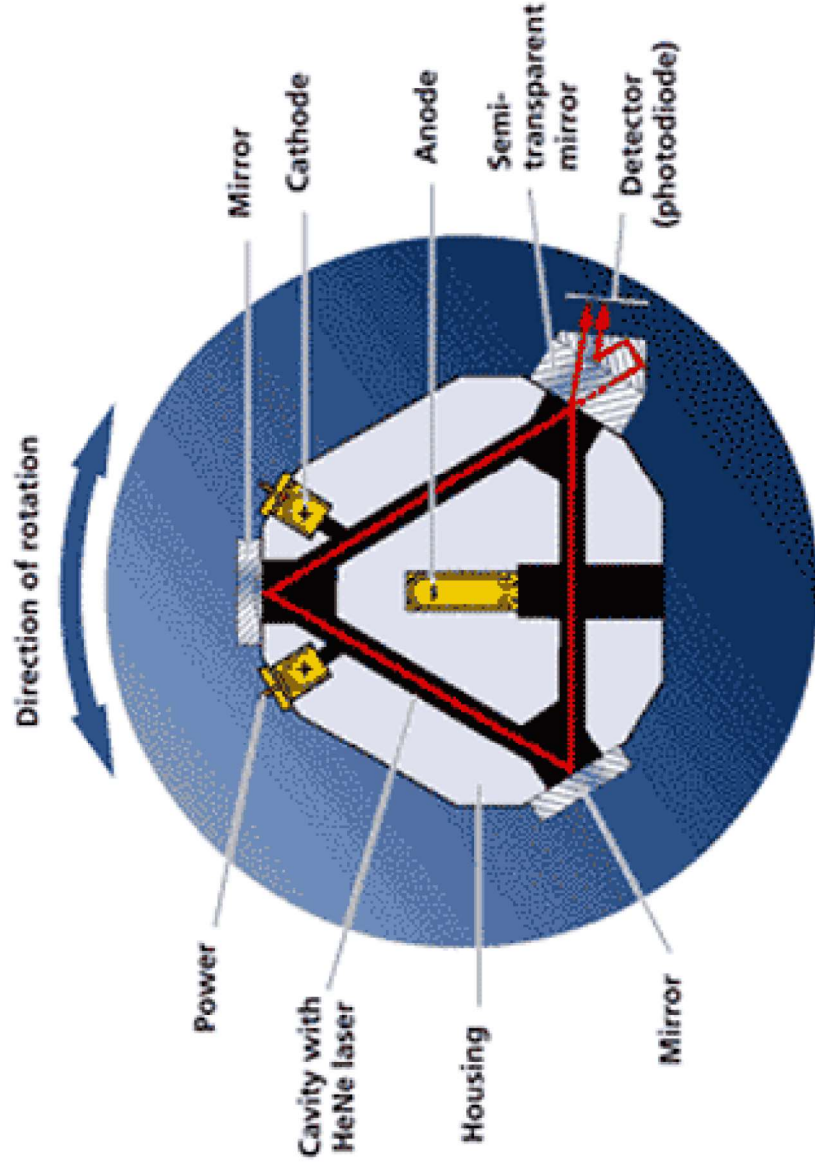
- Do wyznaczenia **zmian położenia katowego** względem położenia startowego.
- Urządzenia **mechaniczne**, z odpowiednio ułożyskowaną szybko wirującą masą, nie są stosowane w robotyce, ponieważ charakteryzują się dużą masą i rozmiarem, niewystarczającą dokładnością i dużym zużyciem energii.
- **Giroskopy piezoelektryczne** i **hallotronowe**: mierzy się parametry drgań małych elementów mechanicznych. Urządzenia tego typu są szeroko stosowane w modelarstwie lotniczym i wodnym, dlatego ich koszty są niewielkie. Spotyka się giroskopy jedno-, dwu- i trójosiowe.

Żyroskop modelarski 3-osiowy



Żyroskopy optyczne

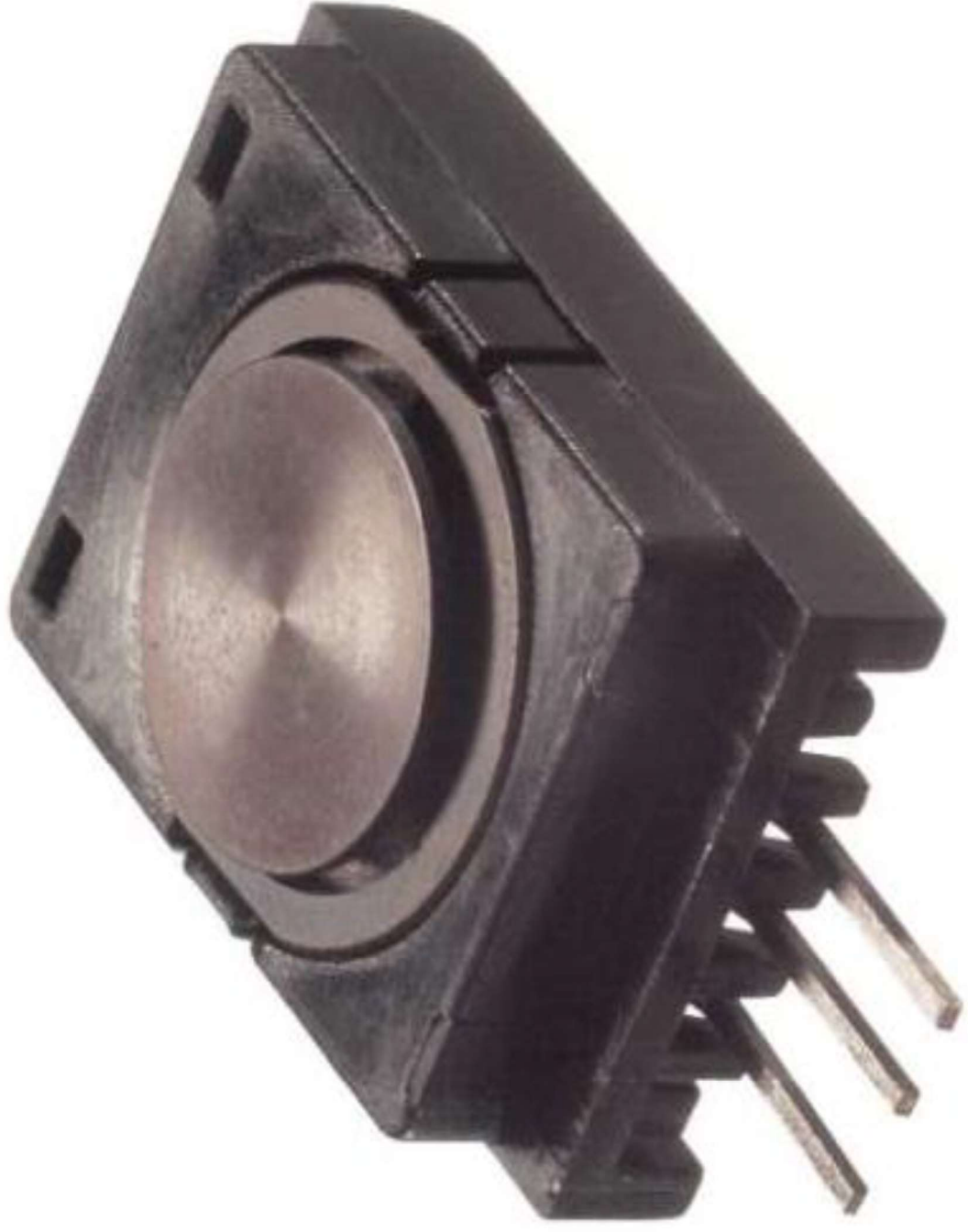
- Pomiar zmian długości fali świetlnej w pętli światłowodowej.
- Obrót układu w płaszczyźnie pętli powoduje zmianę długości fali.
- Pomiar różnicy długości fal odbywa się na zasadzie interferencji promienia bezpośredniego z promieniem, który przeszedł przez pętlę; układ elementów optoelektronicznych liczy prążki interferencyjne.
- Znacznie trwalsze i dokładniejsze od mechanicznych.



Czujniki parametrów siłowych

- Pomiar **sił** lub **momentów sił** w układach napędowych - w celu uniknięcia przeciążenia robota, w celu pomiaru wartości siły, z jaką robot naciska na elementy otoczenia.
- Metoda: pomiar **odkształceń** badanego elementu robota i na tej podstawie obliczanie naprężeń, a następnie sił i momentów przenoszonych przez element.
- Pomiar odkształceń: **tensometry** oporowe lub półprzewodnikowe, wykorzystujące efekt piezorezystywny
- Pomiar odkształceń z użyciem metod **optycznych**, za pomocą fotodiod różnicowych i kwadrantowych.
- Pomiar za pomocą urządzeń, które wykorzystują efekt **piezoelektryczny** lub efekt **magnetosprężysty**.

Siłomierz piezorezystywny

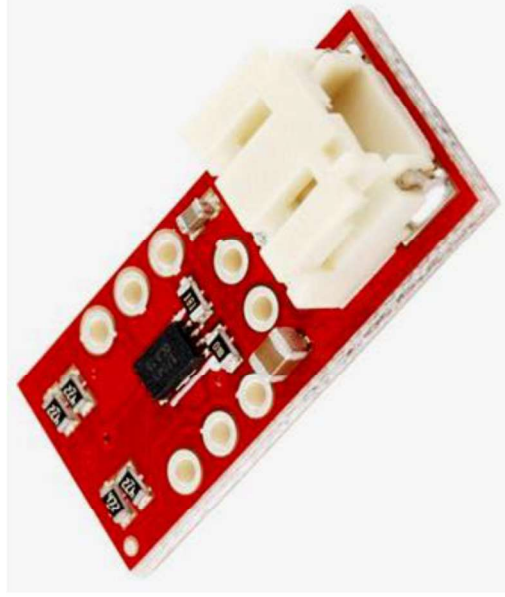


Czujniki momentu siły



Czujniki innych parametrów robota

- Pomiar **parametrów układu zasilania**: napięcie, natężenie i temperatura poszczególnych ogniw oraz całego zespołu baterii wraz z układem elektronicznym, który kontroluje pracę akumulatorów: oszacowanie stopnia naładowania, czasu pracy,
- Pomiar **temperatury**, napięcia i natężenia urządzeń wykonawczych robota, aby zapobiec uszkodzeniu silników i siłowników z powodu ich przeciążenia; wyniki pomiarów można przeliczyć na parametry dynamiczne, czyli na siłę lub moment siły.
- Ze względu na ograniczenia warunków pracy urządzeń elektronicznych, które stanowią konstrukcję robota, może być konieczne sprawdzanie parametrów środowiskowych wewnątrz robota, przede wszystkim temperatury oraz wilgotności.



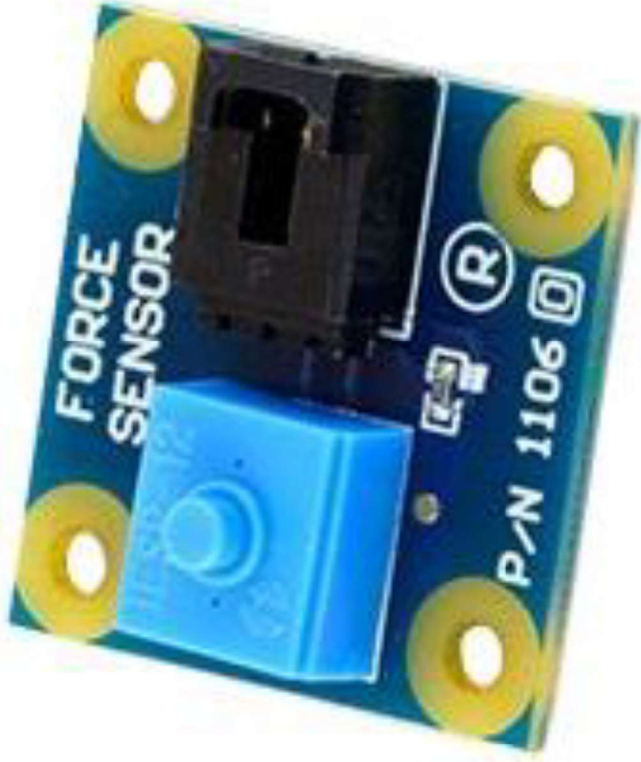
Czujniki rozpoznające otoczenie

- Dotykowe
- Akustyczne
- Optyczne zbliżeniowe
- Laserowe
- Wizyjne
- Samolokalizacyjne
- Inne

Czujniki dotykowe

- Informacja o **fizycznym kontakcie** robota z przeszkodą (informacja binarna lub wartość siły kontaktu)
- Wykonywane w formie **zderzaków** na układach sprężyn, z zamontowanymi mikrowyłacznikami.
- Stosuje się **optyczne** (odbiciowe) metody wykrywania ugięcia zderzaka.
- W celu wykrycia przeszkód w pewnej odległości od robota można zastosować elementy ze **sprężystego drutu**, przypominające wyglądem czułki owadów.
- Czujniki dotykowe charakteryzują się **bardzo prostą** zasadą działania, co skutkuje niskim kosztem tych czujników przy bardzo dużej niezawodności.
- Rzadko spotyka się konstrukcje robotów bez zderzaków
- Wadą czujników dotykowych jest konieczność wejścia elementu robota w **kontakt fizyczny** z przeszkodą, co może czynić tę informację bezużyteczną dla systemu sterowania robotem.

Czujnik siły kontaktu, zderzak

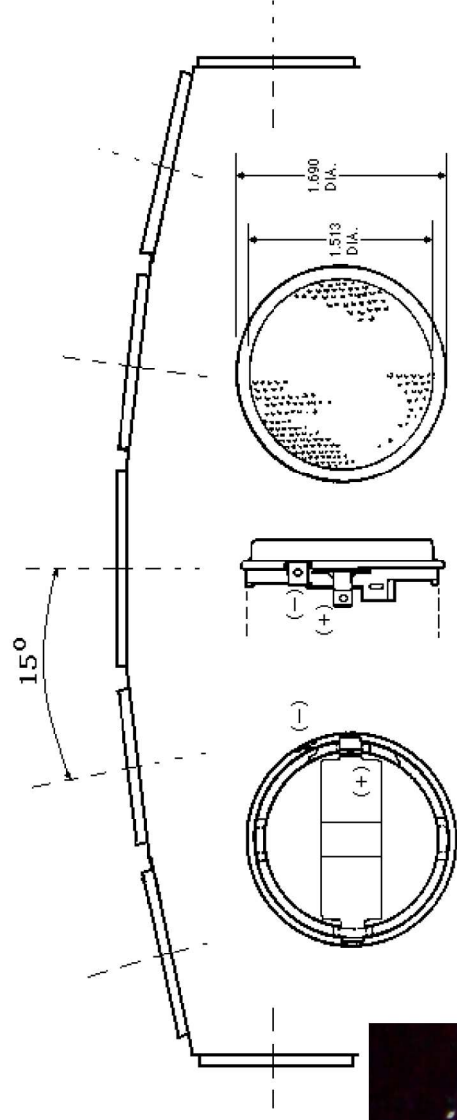


Czujniki akustyczne - sonary

- **Sonar:** zespół nadajnika i odbiornika ultradźwięków z możliwością pomiaru czasu od chwili wysłania fali ultradźwiękowej do chwili jej odebrania
- Odbiornik oczekuje na powrót **echa** fali odbitej od obiektu w okolicy robota i decyduje, czy amplituda sygnału powracającego jest wystarczająco duża, aby uznać echo za pochodzące od przeszkody robota

Sonary - podstawy działania

- Piezoelektryczny element drgający – nadawczo-odbiorczy lub osobno nadajnik i odbiornik
- Sterowanie – ok. 200V (separowane galwanicznie)
- Wzmacniacze sygnału odbieranego



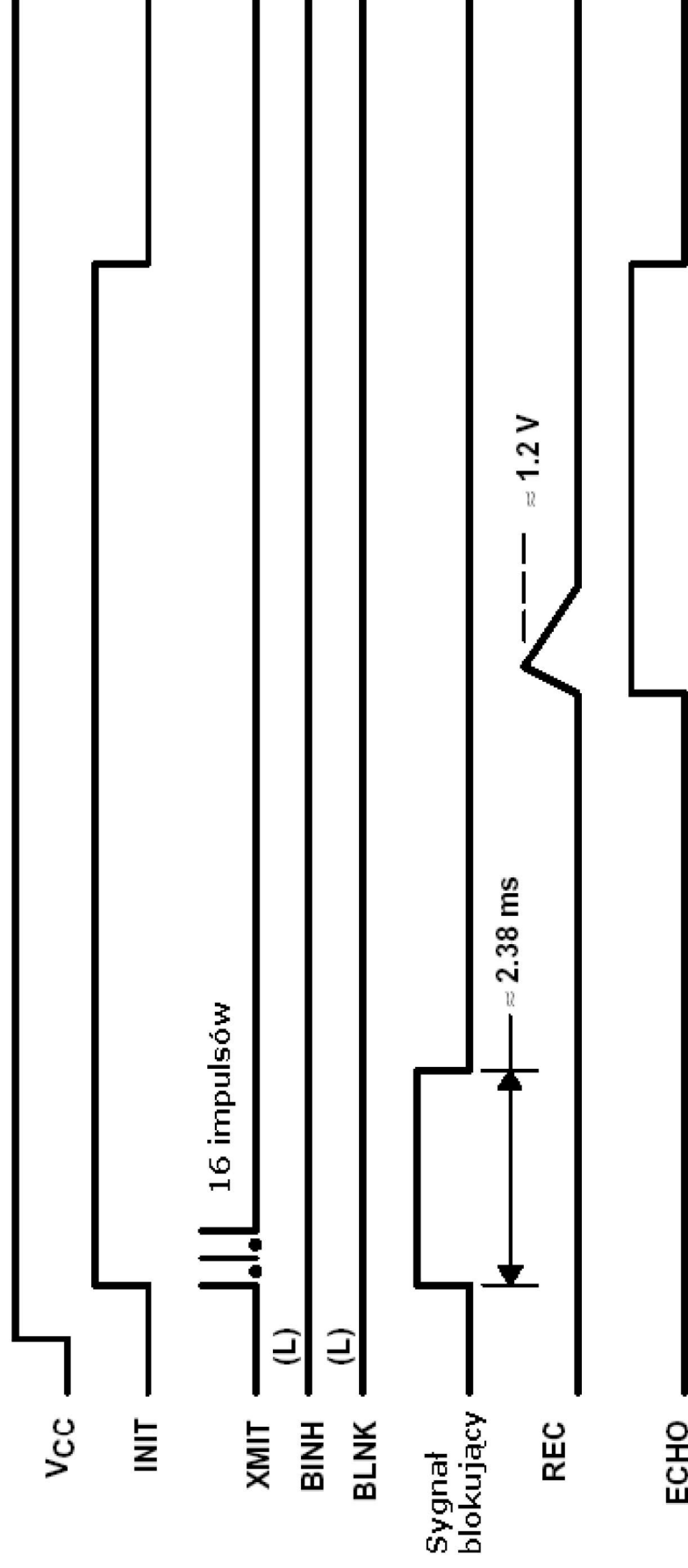
Konstrukcje sonarów

- Pojedynczy przetwornik, który po wysłaniu fali jest przełączany w tryb odbioru i rejestruje echo
- Zestaw składający się z odrębnego urządzenia nadawczego i odbiorczego.
- Oddzielenie elementu nadawczego od odbiorczego: zwiększanie zasięgu czujnika poprzez zastosowanie większej liczby elementów nadawczych, mocowanych we wspólnej obudowie: zwiększa amplitudę fali wysyłanej i możliwość odbioru sygnału echa z większej odległości



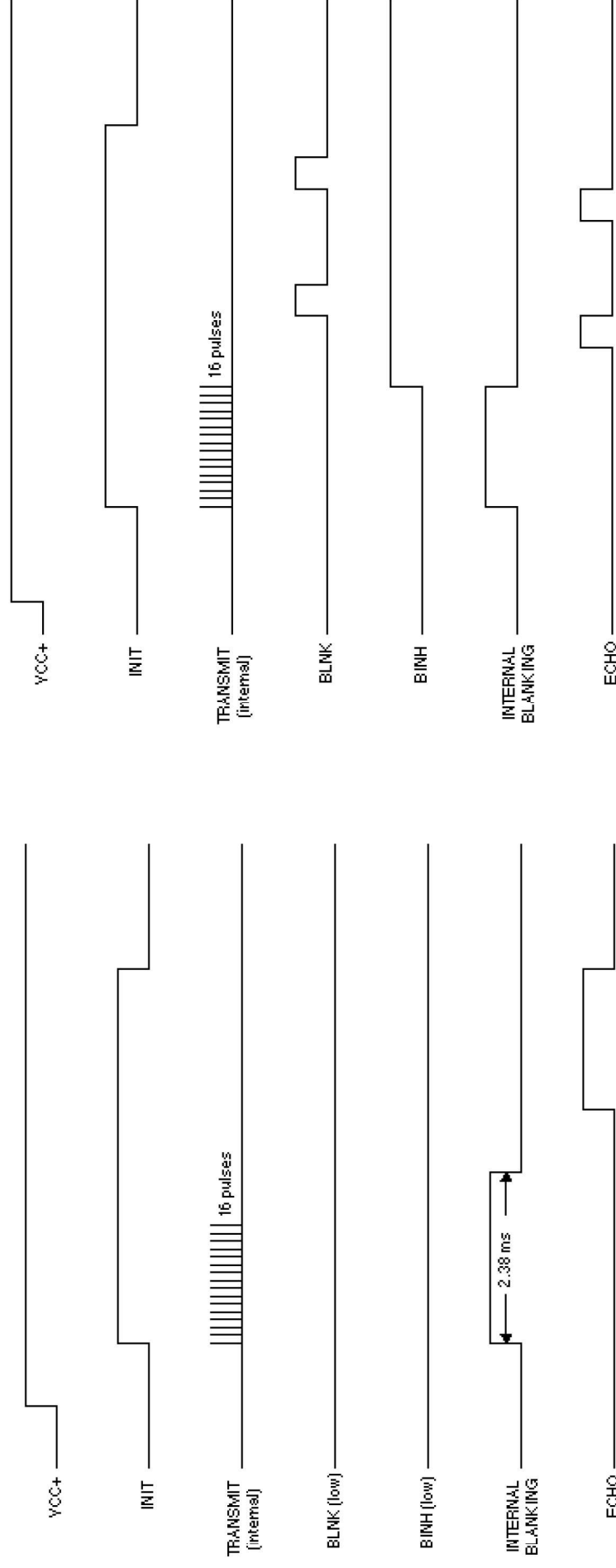
Cykl pracy sonaru - pojedynczy przetwornik

1. Nadanie serii impulsów (np. 16) – 50kHz
2. Odczekanie chwili, aż ustaną drgania płytki
3. Oczekiwanie na echo – wzmacnienie wzrasta z czasem

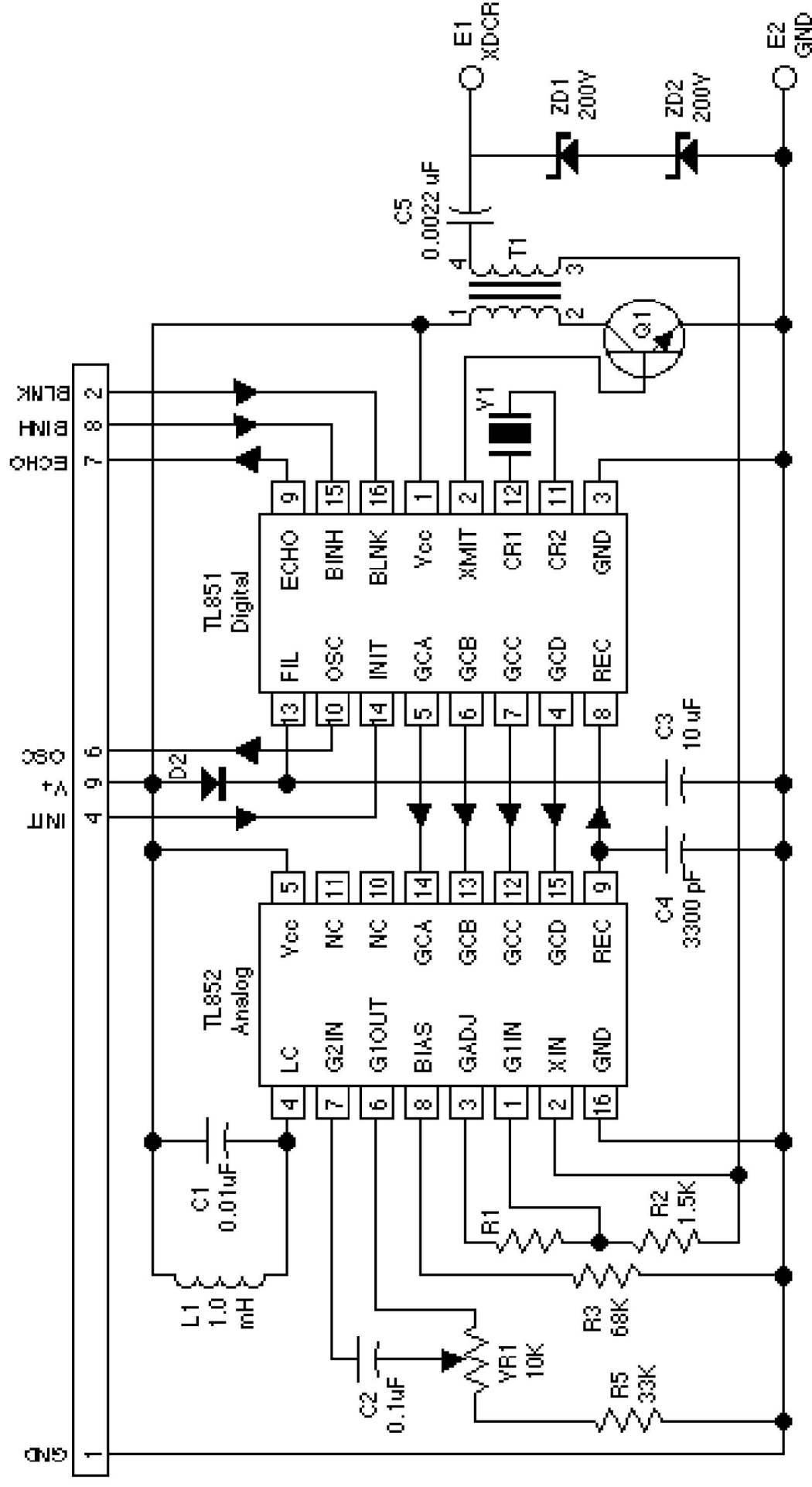


Tryby pracy sterownika sonaru

- Wykrywanie najbliższej przeszkody
- Wykrywanie źródeł echa (przeszkód) oddalonych od siebie o co najmniej 3 cm w zakresie czułości (40cm – 10m)



Układ elektroniczny sonaru



Cechy sonarów

- **Mały zasięg** - do 10m. Pomiar na większą odległość są obarczone zbyt dużym prawdopodobieństwem błędu.
- **Szeroki kąt widzenia** - czujnik wykrywa obiekty, które znajdują się w odległości kątowej do ok. 20 stopni od jego osi akustycznej, wartość ta może być różna w zależności od typu czujnika i waha się od ok. 10 stopni w odległości ok. 10m od czujnika do ok. 40 stopni w bezpośredniej bliskości czujnika.
- **Dokładność** wskazań czujnika – **słaba** i uzależniona od zmian szybkości rozchodzenia się dźwięku w powietrzu.
- Często **błędne wskazania**, spowodowane powstawaniem echa po odbiciu od większej liczby powierzchni, niż jedna.
- Wady i ograniczenia czujników powodują, że są one coraz rzadziej stosowane. Niskie koszty i małe zużycie energii powoduje, że w prostych konstrukcjach niewielkich robotów mobilnych nadal się je spotyka.

Sonary – odbicie dźwięku

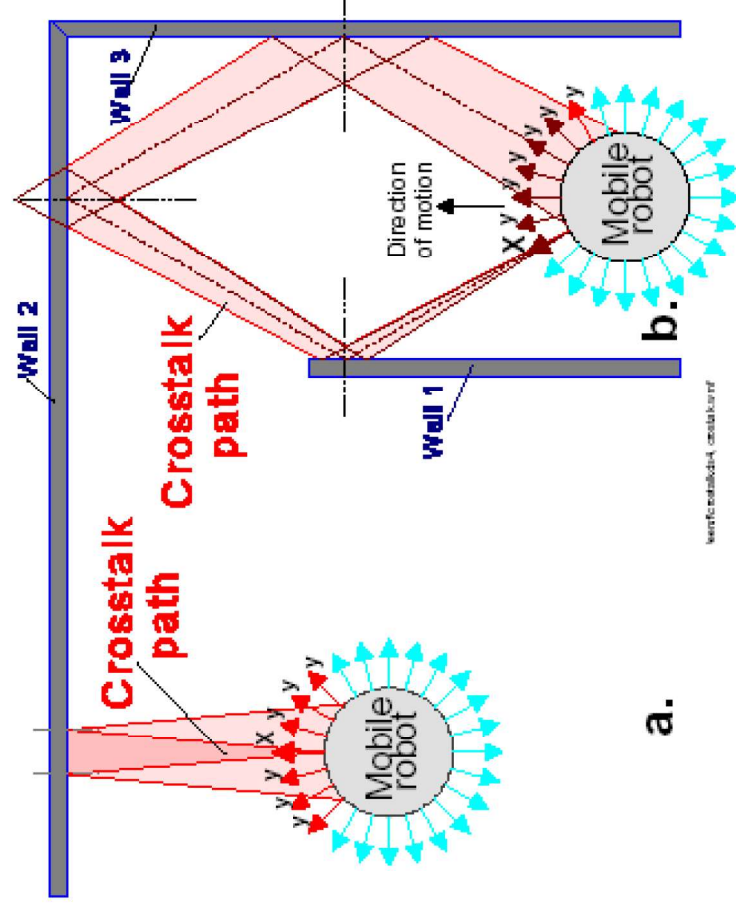
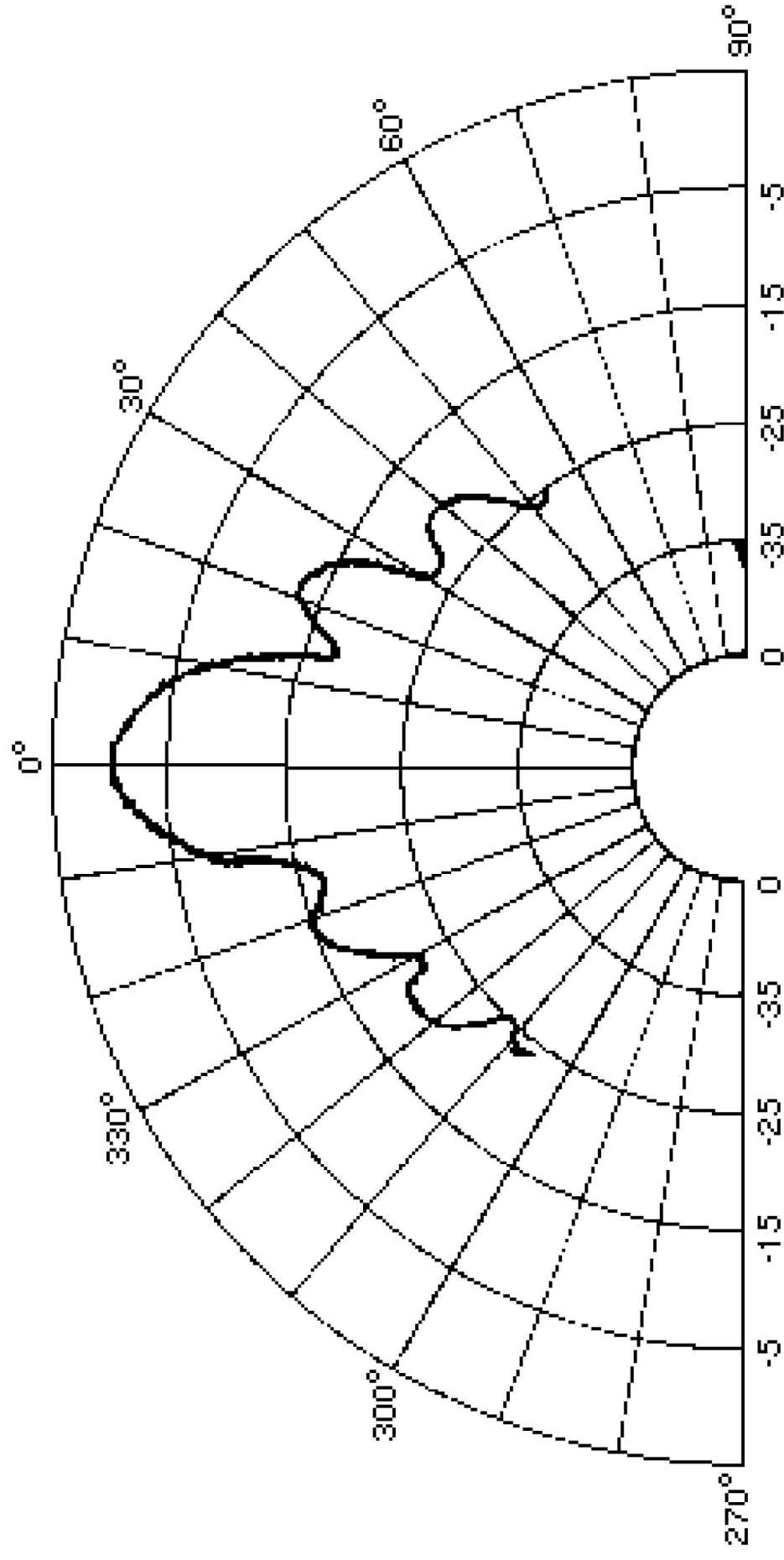
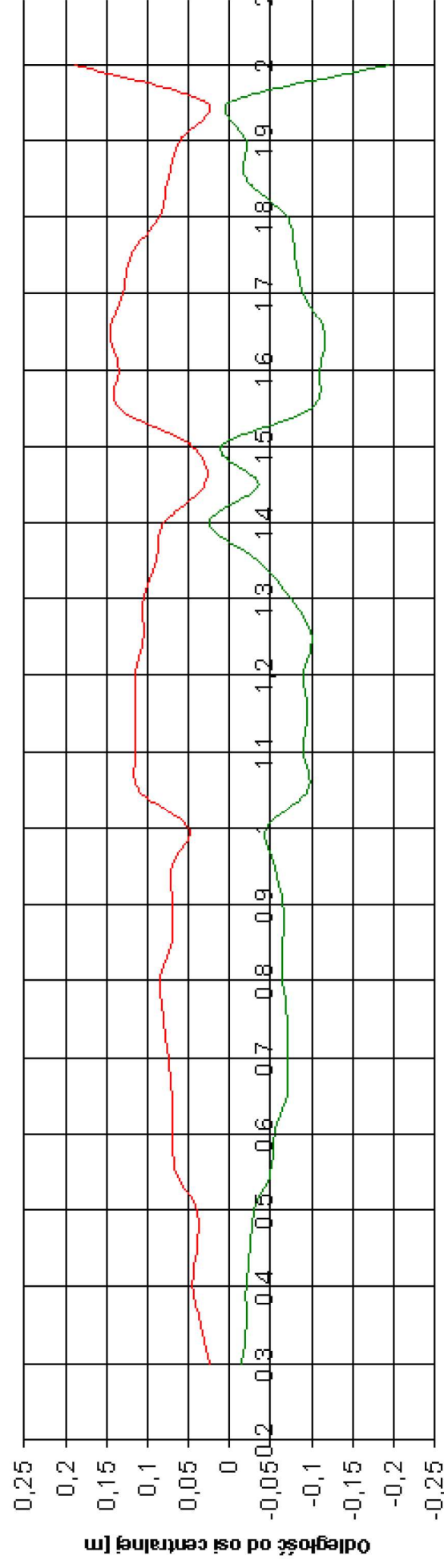
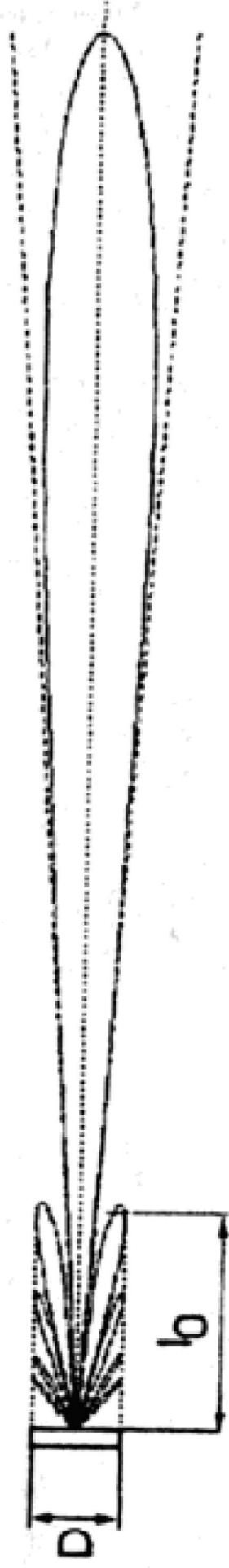


Figure 4.1: Crosstalk is a phenomenon in which one sonar picks up the echo from another. One can distinguish between a. direct crosstalk and b. indirect crosstalk.

Sonar - charakterystyka kątowna

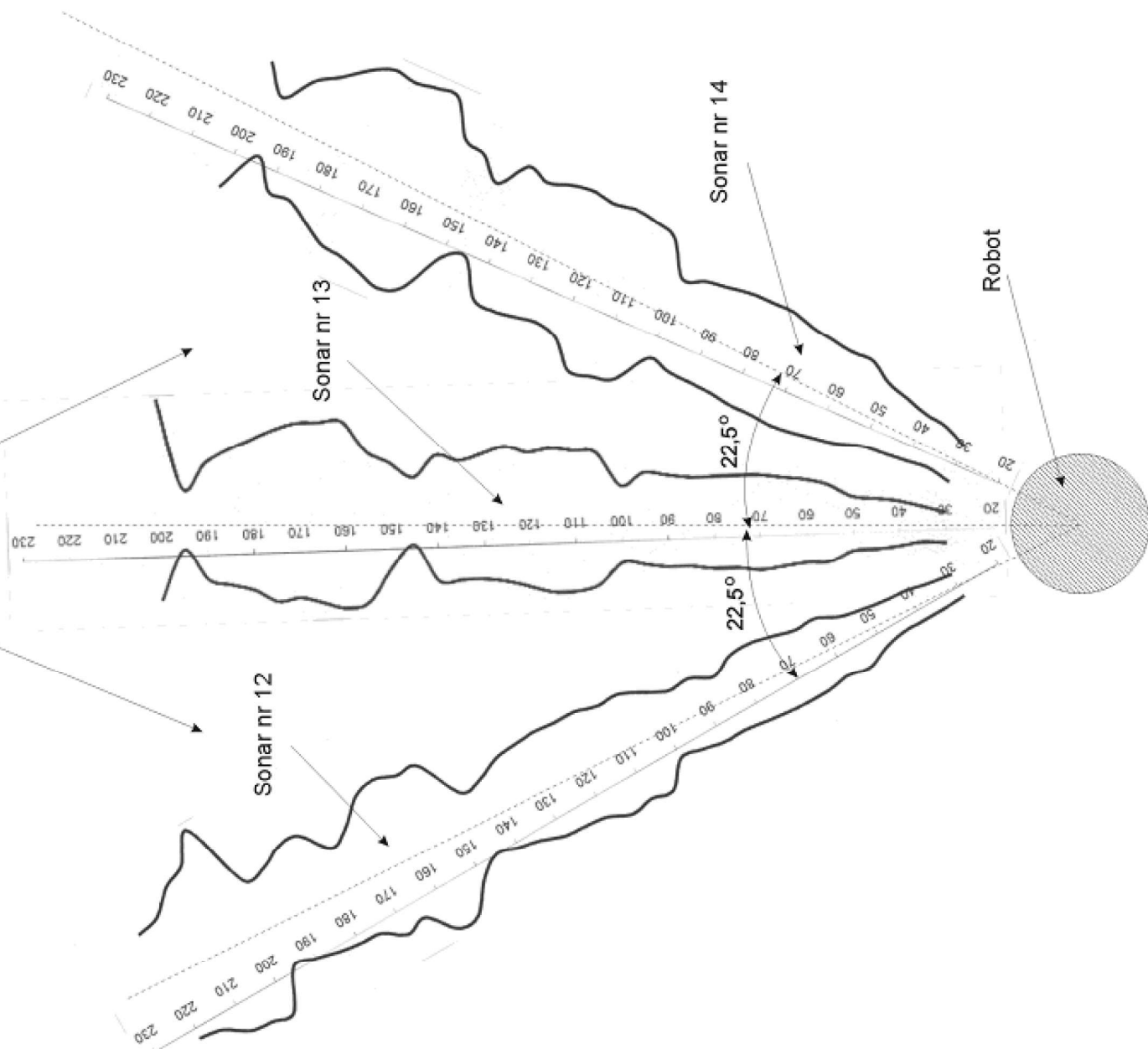


Sonar - zakres kątowy działania



Odległość przeszkody od robota [m]

Pola martwe będące
poza zasięgiem sonarów



Sonary przeznaczone do robotów

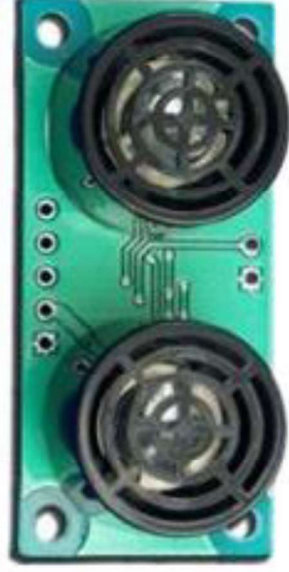
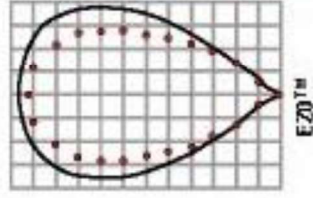


- Zasięg: 15cm - 6m
- Porty: I2C, szeregowy
- Rozdzielczość: 3 - 4cm
- Zasilanie: 5VDC (max 5.5VDC)
- Rozmiary: 24mm x 20mm x 17mm
- 25\$/szt.



- Zasięg: 3cm - 6m
- Port I2C
- Rozdzielczość: 3 - 4cm
- Rozmiary: 43mm x 20mm x 17mm
- 59\$/szt.

Sonary do robotów

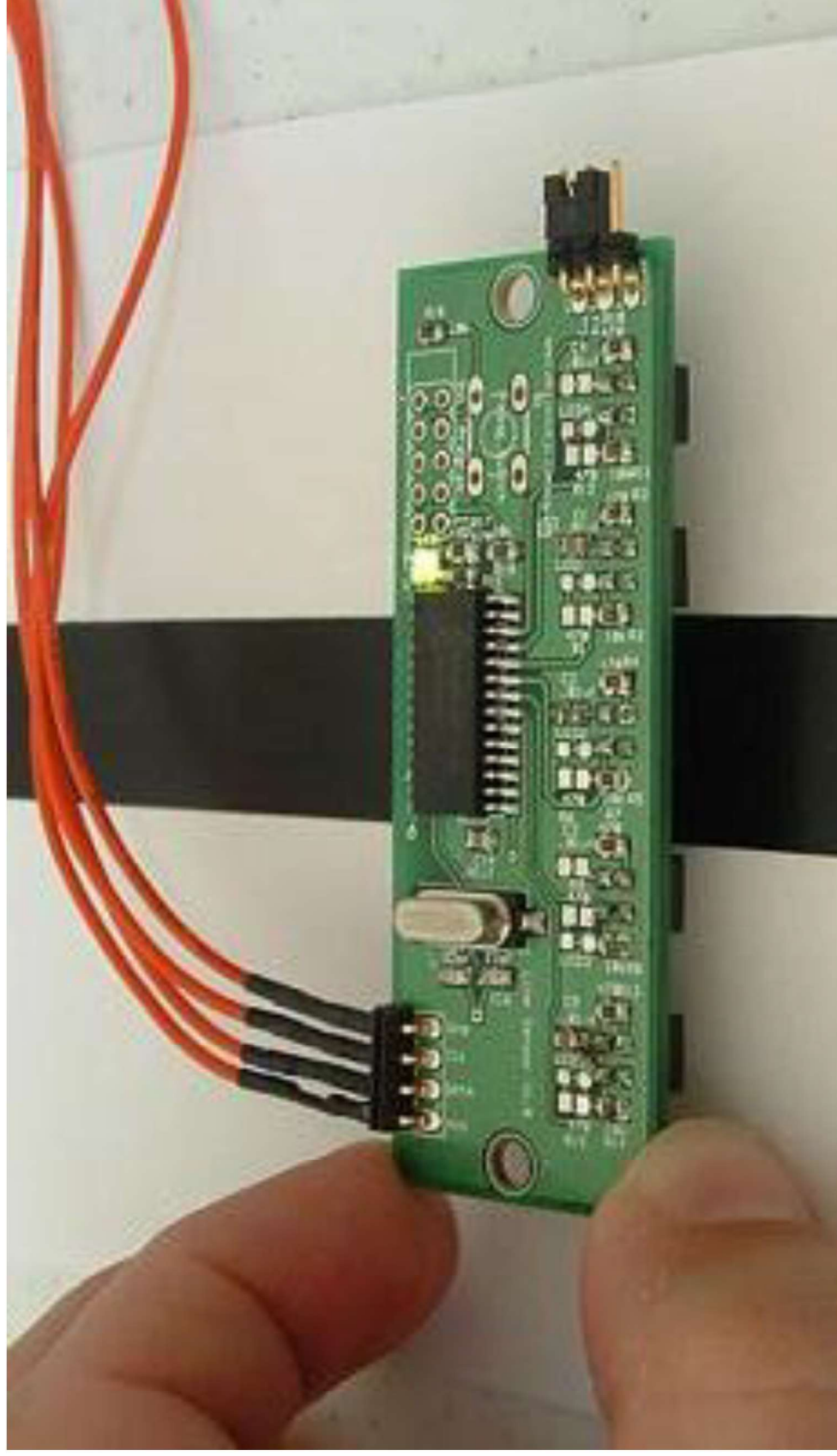


Czujniki optyczne zbliżeniowe (IR)

- Służą do wskazania przybliżonej odległości od czujnika do obiektu.
- Para: dioda świecąca i fotodioda, LED oświetla obiekt, a fotodioda rejestruje falę odbitą. Układ elektroniczny ocenia amplitudę fali świetlnej, rejestrowanej przez fotodiodę i szacuje odległość od odbijającego tę falę obiektu
- Mała dokładność
- Słaba odporność na zakłócenia – można poprawić stosując np. modulację

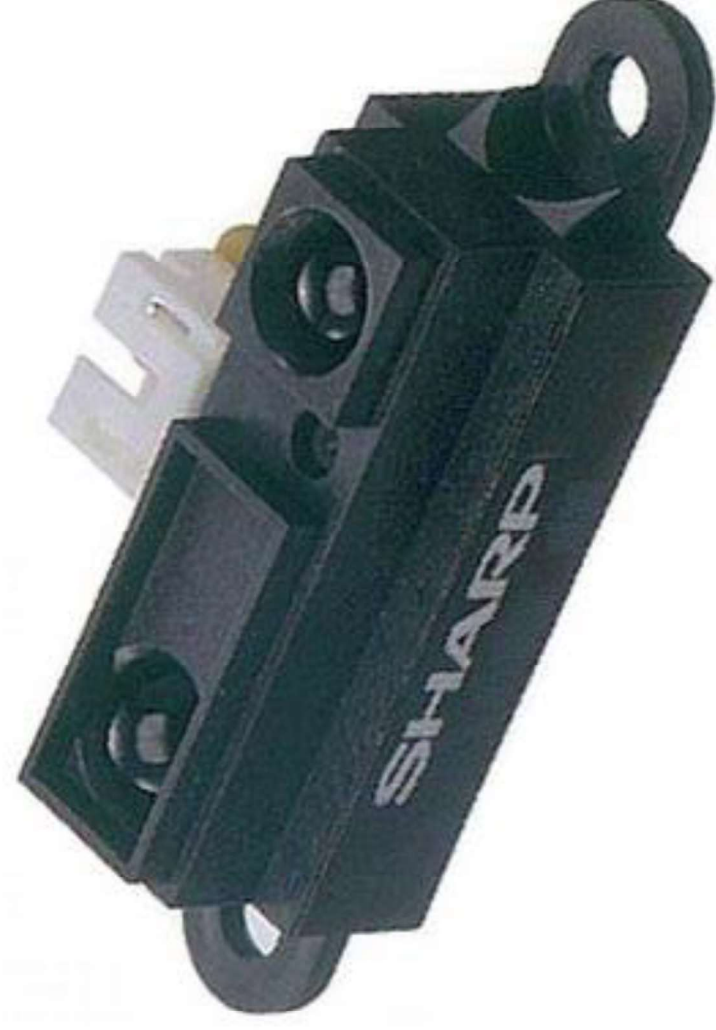


IR do sprawdzania podłoża



IR z triangulacją

- Lepsze rezultaty w szacowaniu odległości
- Układ elektroniczny, który oblicza odległość od obiektu, mierzy na kąt, pod jakim detektor obserwuje plamkę światła podczerwonego, emitowanego przez LED
- Dokładność czujników spada wraz ze wzrostem odległości od czujnika



Czujniki laserowe

- Znacznie dokładniejsze, niż akustyczne i optyczne zbliżeniowe.
- Emisja wiązki laserowej w podczzerwieni i rejestracja odbicia tej wiązki od obiektów wokół robota.
- Wiązka laserowa jest zbieżna, jej obraz na obiektach wokół robota to plamka o niewielkiej średnicy (kilka mm).
- Duża dokładność wyznaczenia kierunku, w którym odbywa się pomiar, a stożek czułości ma bardzo mały kąt wierzchołkowy.
- Dalmierze laserowe: duży zasięg i brak ruchomych elementów.



Czujnik laserowy - zasada działania

- Pomiar odległości na podstawie pomiaru przesunięcia fazowego

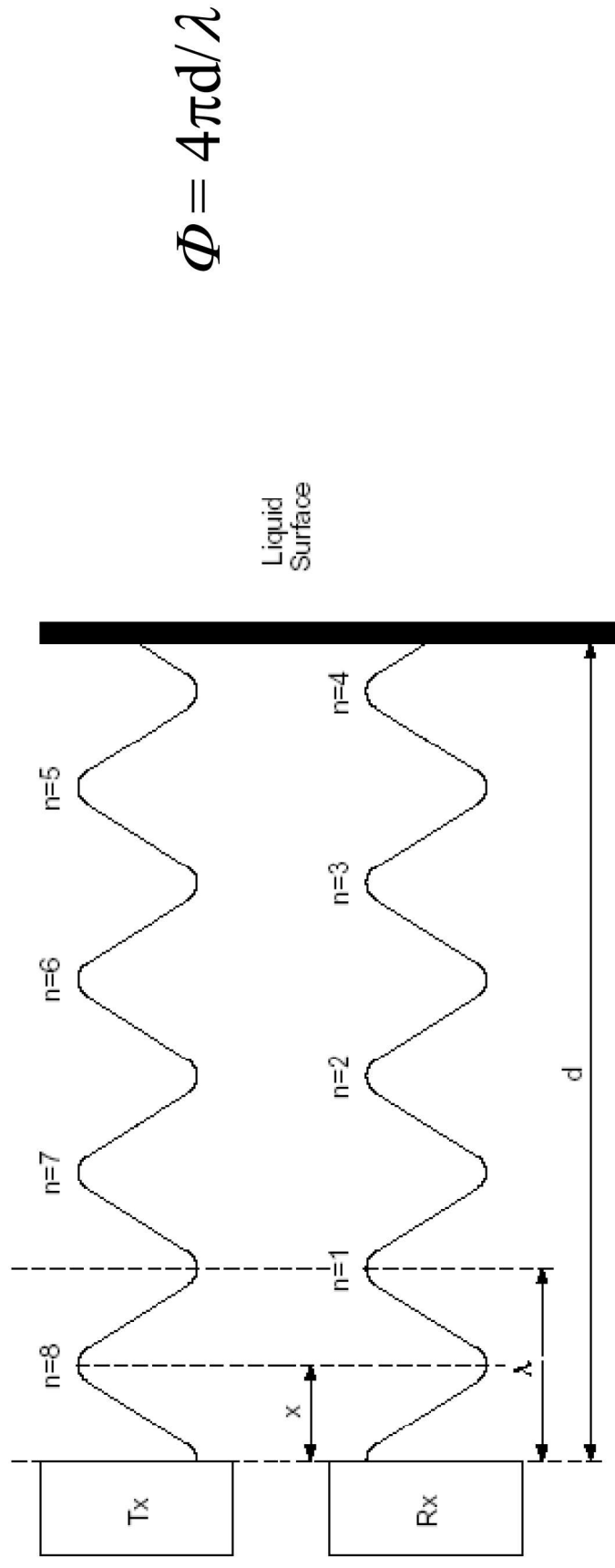


Figure 4.21: Relationship between outgoing and reflected waveforms, where x is the distance corresponding to the differential phase. (Adapted from [Woodbury et al., 1993].)

Skaner laserowy - modulacja częstotliwości

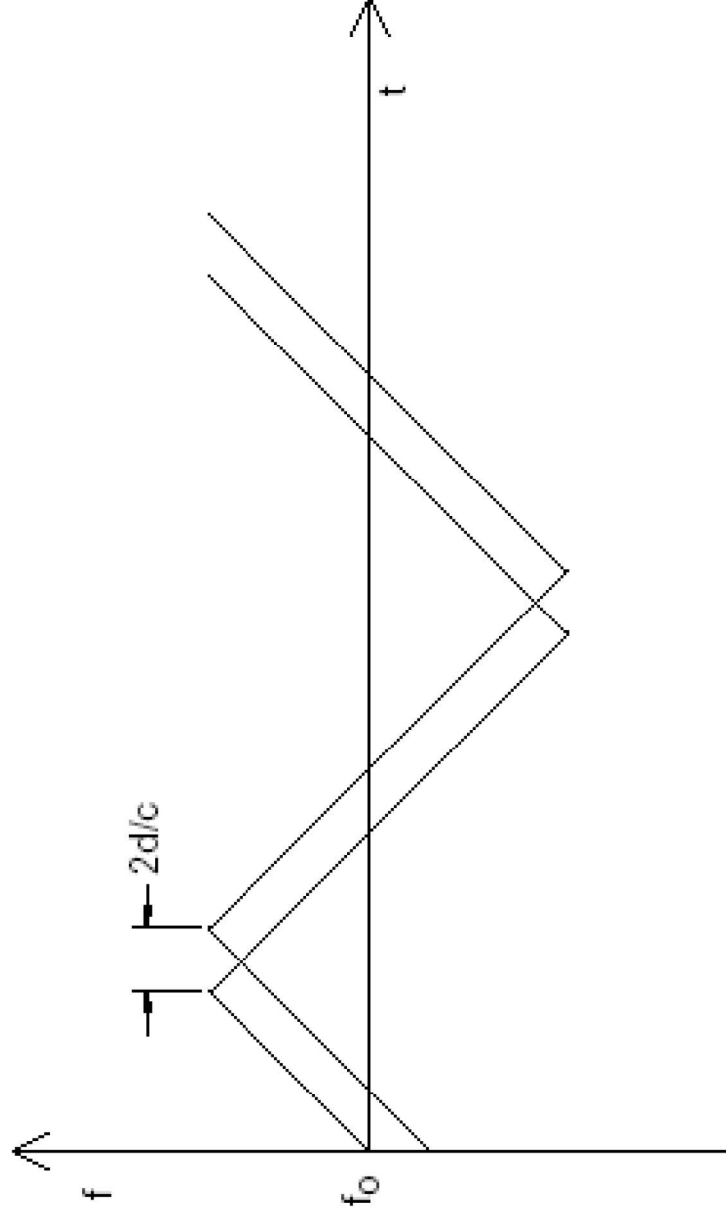


Figure 4.34: The received frequency curve is shifted along the time axis relative to the reference frequency [Everett, 1995].

Skanery laserowe

- Ruchome zwierciadło kieruje wiązkę laserową w różnych kierunkach.
- Skaner laserowy 2D - pomiar w płaszczyźnie zamocowania skanera.
- Skaner 3D - skierowanie wiązki lasera od płaszczyzny zamocowania skanera do 90 stopni w górę.
- Pomiar są wykonywane w odstępach kątowych co 1 stopień lub gęściej, zależnie od typu skanera.



Zasada działania skanera 3D

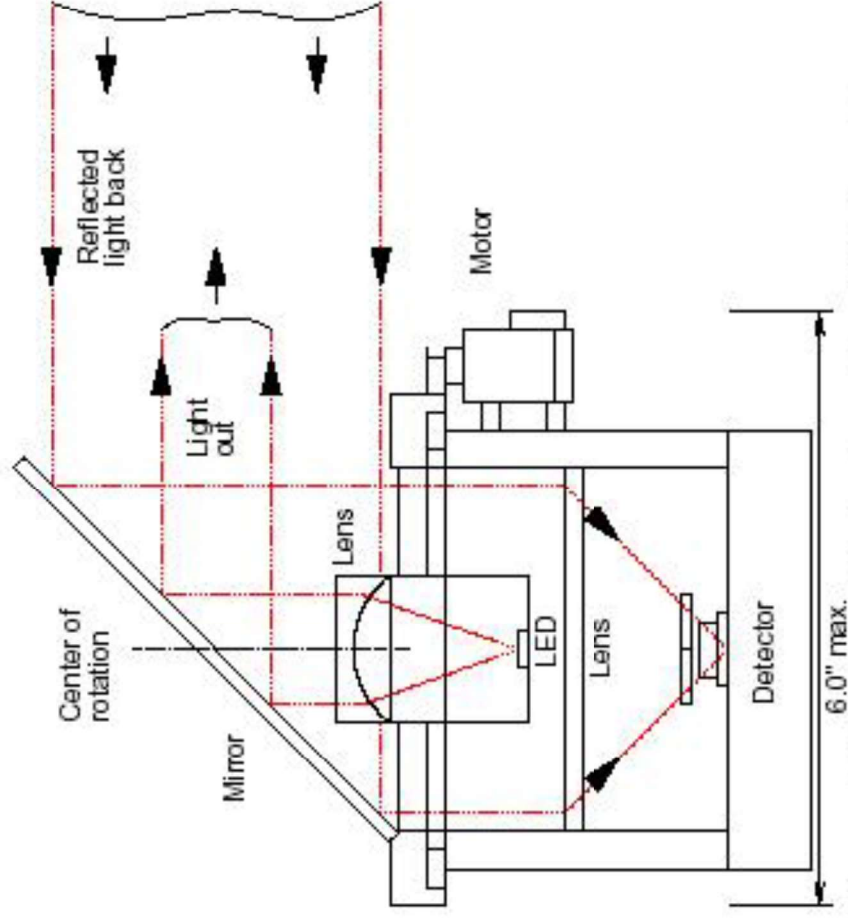


Figure 4.24: Schematic drawing of the ORS-1 ranging system. (Courtesy of ESP Technologies, Inc.)

coverage. It is driven at 1 to 2 rps by a motor fitted with an integral incremental encoder and an optical indexing sensor that signals the completion of each revolution. The system is mounted on a base plate.

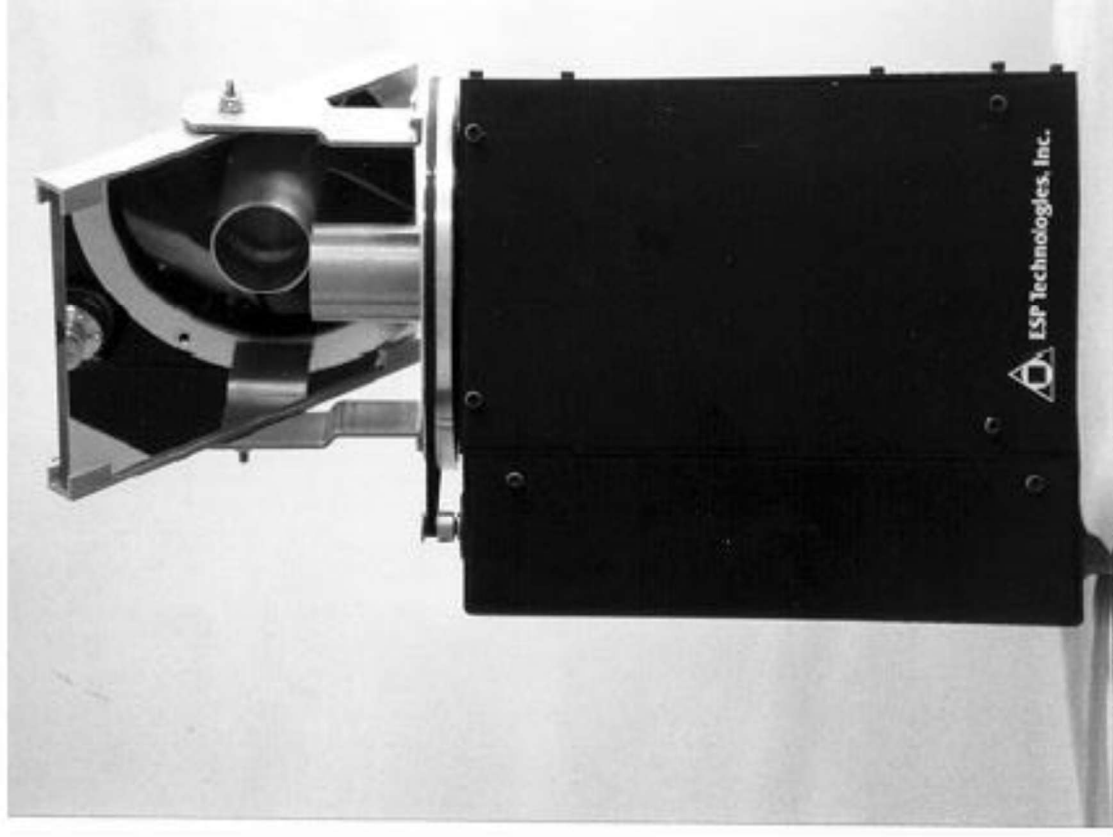


Figure 4.25: The ORS-1 ranging system. (Courtesy of ESP Technologies, Inc.)

Skanery - przykłady

only a single spot of light, but ran into problems due to target absorption and specular reflection.) As an added benefit, the use of two separate beams makes it possible to calculate the speed of moving vehicles to an accuracy of 1.6 km/h (1 mph). In addition, a two-dimensional image (i.e., length and

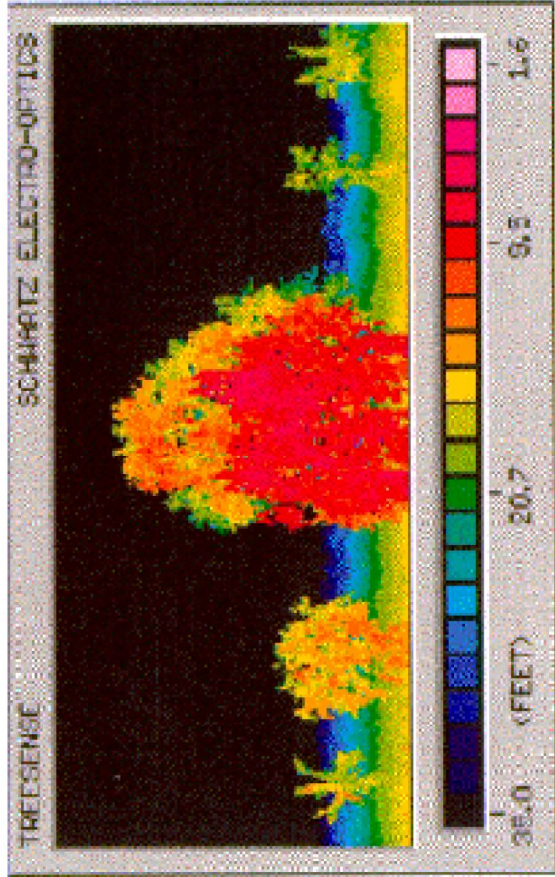


Figure 4.11: Color-coded range image created by the SEO TreeSense system. (Courtesy of Schwartz Electro-Optics, Inc.)

Table 4.6: Selected specifications for the TreeSense system. (Courtesy of Schwartz Electro-Optics, Inc.)

Parameter	Value	Units
Maximum range	9 m 30 ft	
Accuracy (in % of measured range)	1 %	
Wavelength	902 nm	
Pulse repetition frequency	15 KHz	
Scan rate	29.3 rps	
Length	229 mm 9 in	
Width	229 mm 9 in	
Height	115 mm 4.5 in	
Weight	5 lbs	
Power	12 V 12 W	

Cechy skanerów laserowych

- Skaner laserowy przekazuje do systemu sterowania robota serie danych o pomiarach odległości od obiektów wokół robota
- Serie są zbierane w stałych odstępach czasu
- W celu dokładnego określenia przestrzennego położenia każdego z punktów pomiarowych niezbędna jest dokładna znajomość położenia i orientacji robota z samolokalizacji.
- Skanery laserowe są coraz częściej stosowane w robotach, ponieważ pomiar za ich pomocą jest dokładniejszy, niż innymi metodami, a ponadto są coraz tańsze.

Skanery laserowe dla robotyki

- Niektóre firmy (np. Hokuyo) rozpoczęły produkcję skanerów laserowych specjalnie do zastosowań robotycznych; urządzenia te charakteryzują się małymi rozmiarami i masą, niewielkim poborem energii elektrycznej oraz wytrzymałością na wstrząsy, szczególnie w porównaniu z ofertą urządzeń, które nie były dedykowane dla robotyki



Specifications	
Voltage	5.0 V \pm 5 %
Current	0.5 A (Rush current 0.8 A)
Detection Range	0.02 m to approximately 4 m
Laser wavelength	785 nm, Class 1
Scan angle	240°
Scan time	100 ms/scan (10.0 Hz)
Resolution	1 mm
Accuracy	Distance 20 ~ 1000 mm: \pm 10 mm
	Distance 1000 ~ 4000 mm: \pm 1 % of measurement
Angular Resolution	0.36°
Interface	USB 2.0, RS232
Weight	141 gm (5.0 oz)

Skannery laserowe Hokuyo typ URG



Skaner 2D firmy SICK

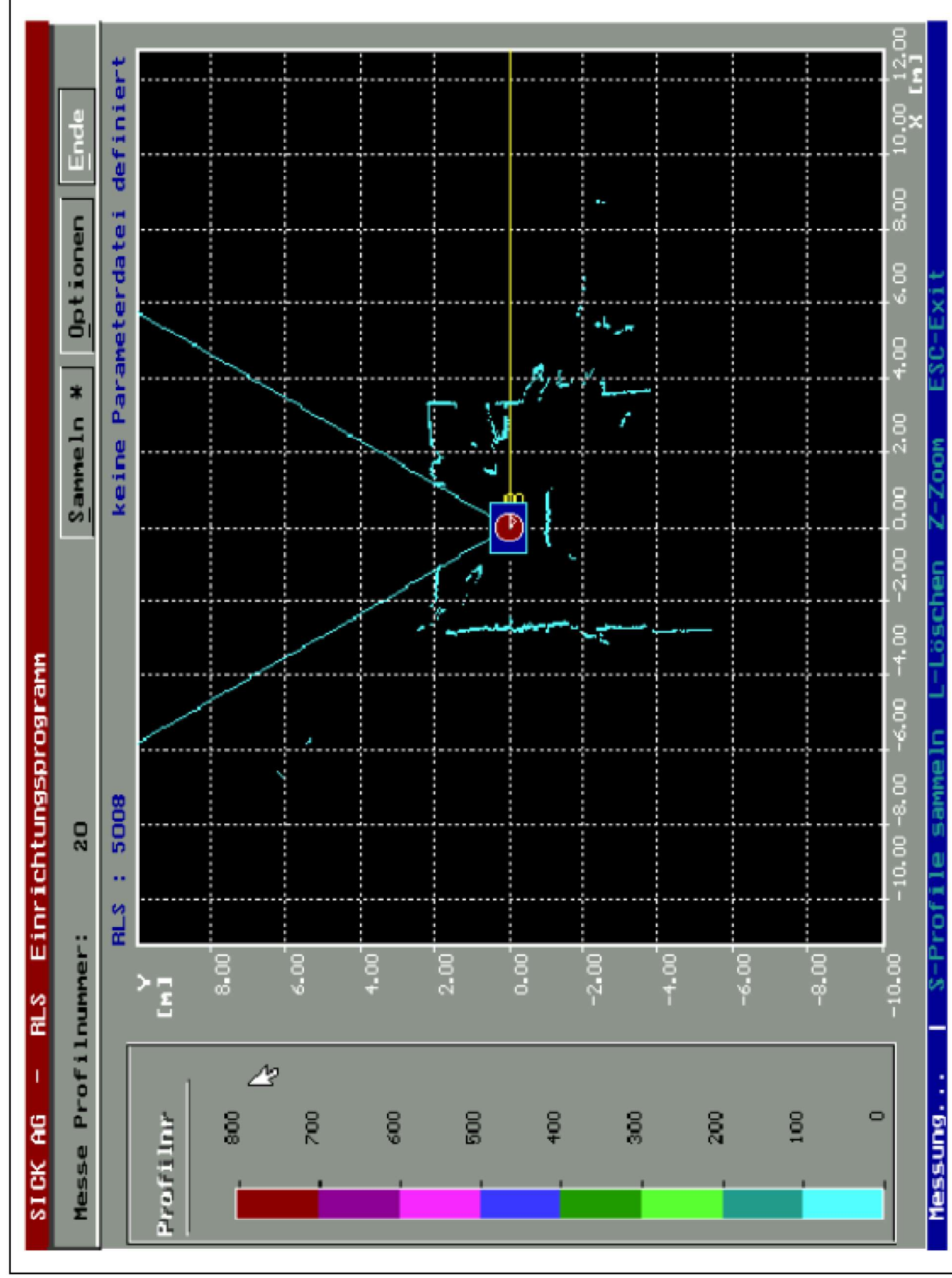
- Kąt skanowania 270°
- Interfejs EFI do bezpiecznej komunikacji
- Interfejs RS-422 do transmisji w czasie rzeczywistym



- Podczerwień: 905nm
- Wirujący reflektor
- Co 1°
- 75 skanów na sekundę
- Zasięg do 40m (80m)
- Oprogramowanie do nadzoru
- Nie wymaga się zabezpieczeń oczu

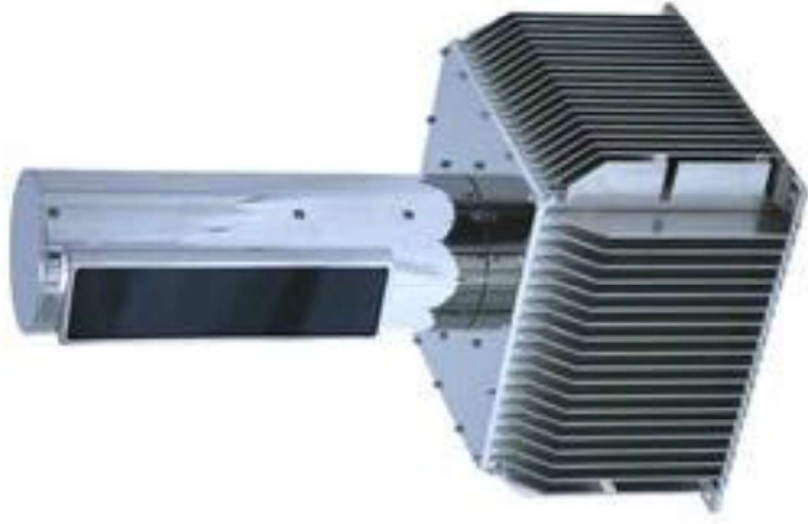


Obraz ze skanera



Rys. 6-11: Pomiar krawędzi

Skanner 3D SRI500



- Scan angles azimuth: $\pm 300^\circ$
- Scan angles elevation: $\pm 65^\circ$
- Scan speed V: 500 lines/s max, H: 1000o/s max
- Range: 5 feet to 500 feet
- Laser wavelength: 905 nm
- Average laser power: 1 mW
- Laser interlock: vertical scan mirror encoder
- Scan motors: long life brushless DC
- Azimuth accuracy, platform relative: 1.5 arc-min
- Weight: 35 lb (16kg)
- Power: 50-500 W, scan pattern dependent, 12-28 VDC
- Physical data interface: 100 Base-T Ethernet
- Application data rate: 25.6 Mbit/s at max scan rate

Czujniki wizyjne

- Wykonywane jako pokładowe oraz pozapokładowe.
- Systemy pokładowe mogą się składać z pojedynczej kamery lub zestawu do stereowizji.
- Systemy pozapokładowe to jedna lub kilka kamer, umieszczonych w ten sposób, aby obserwować obszar, po którym porusza się robot (lub zespół robotów) oraz sprzęt komputerowy, który dokonuje przetworzenia obrazu z kamer i przekazuje do robota tylko niezbędne dane, zazwyczaj o położeniu tegoż robota i innych istotnych obiektów.



Czujniki służące do samolokalizacji

- Czujniki GPS (będą omówione później)
- Samolokalizacja zliczeniowa jest możliwa nie tylko na podstawie odometrii, ale również dzięki pomiarowi przemieszczenia robota względem podłoża metodami ultradźwiękowymi, optycznymi lub za pomocą mikrofal.
- Czujniki obserwujące ruch podłoża i obliczające na tej podstawie prędkość robota, działają z wykorzystaniem efektu Dopplera, który występuje w fali odbitej od podłoża



Inne czujniki

- Czujniki param. chemicznych
- Czujniki param. fizycznych
- Czujniki obserwacyjne

