

*Roboty mobilne*

# Nawigacja z wykorzystaniem znaczników

# Metody nawigacji z wykorzystaniem specjalnych znaczników

wchodzących w skład systemu nawigacyjnego  
i dodanych celowo do otoczenia robota

# Nawigacja ze znacznikami

## *Cechy:*

- bardzo dokładne pozycjonowanie
- niski koszt obliczeniowy
- możliwość częstego odświeżania informacji
- konieczność b. dokładnego montażu
- wysokie koszty instalacji
- wysokie koszty konserwacji

## *Zastosowania:*

- lotnictwo
- żegluga

# Metody nawigacji ze znacznikami

## 1. Nawigacja trójkierunkowa (*trilateration*)

Pomiar **odległości** od 3 lub więcej obiektów:

- nadajniki stacjonarne + mobilny odbiornik
- mobilny nadajnik + stacjonarne odbiorniki

Przykład: GPS

## 2. Nawigacja triangulacyjna

Pomiar **kąta widzenia** 3 lub więcej obiektów:

- mobilny nadajnik i odbiornik kierunkowy + stacjonarne reflektory stacjonarne
- mobilny nadajnik dookólny + stacjonarne odbiorniki kierunkowe



# Triangulacja

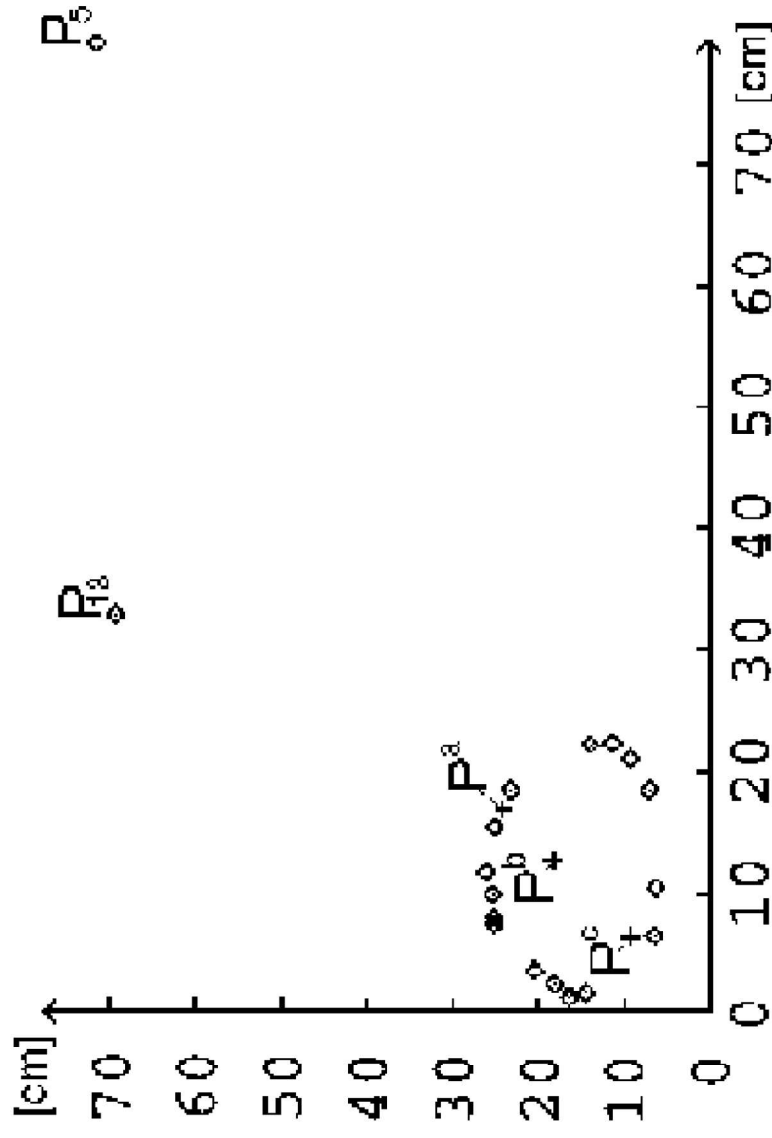
Cechy metody pomiarowej:

- dokładność zależna od błędów pomiaru kąta
- dokładność zależna od konfiguracji znaczników i odbiornika
- słaba dokładność przy małych kątach

# Typy triangulacji

- Triangulacja trójpunktowa:
  - najlepsze rezultaty wewnątrz trójkąta
  - metody obliczeniowe - zawodne (funkcje nieliniowe)
  - wymagany duży zasięg kątowy działania znaczników
  - wrażliwość na grube błędy pomiarowe
  - konieczność stałego widzenia wszystkich znaczników
- Triangulacja wielopunktowa:
  - znaleziono algorytm liniowy obliczania pozycji
  - możliwość wyeliminowania błędów grubych
  - dopuszczenie braku widoczności znaczników
  - im więcej znaczników, tym mniejszy błąd

# Triangulacja wielopunktowa



**Figure 6.3:** Simulation results showing the effect of outliers and the result of removing the outliers.

# Ultradźwiękowa nawigacja trójkierunkowa

Cechy:

- niezła dokładność
- niski koszt
- nieduże odległości
- obszar roboczy wolny od obiektów zakłócających bieg fal ultradźwiękowych

Mobilny nadajnik:

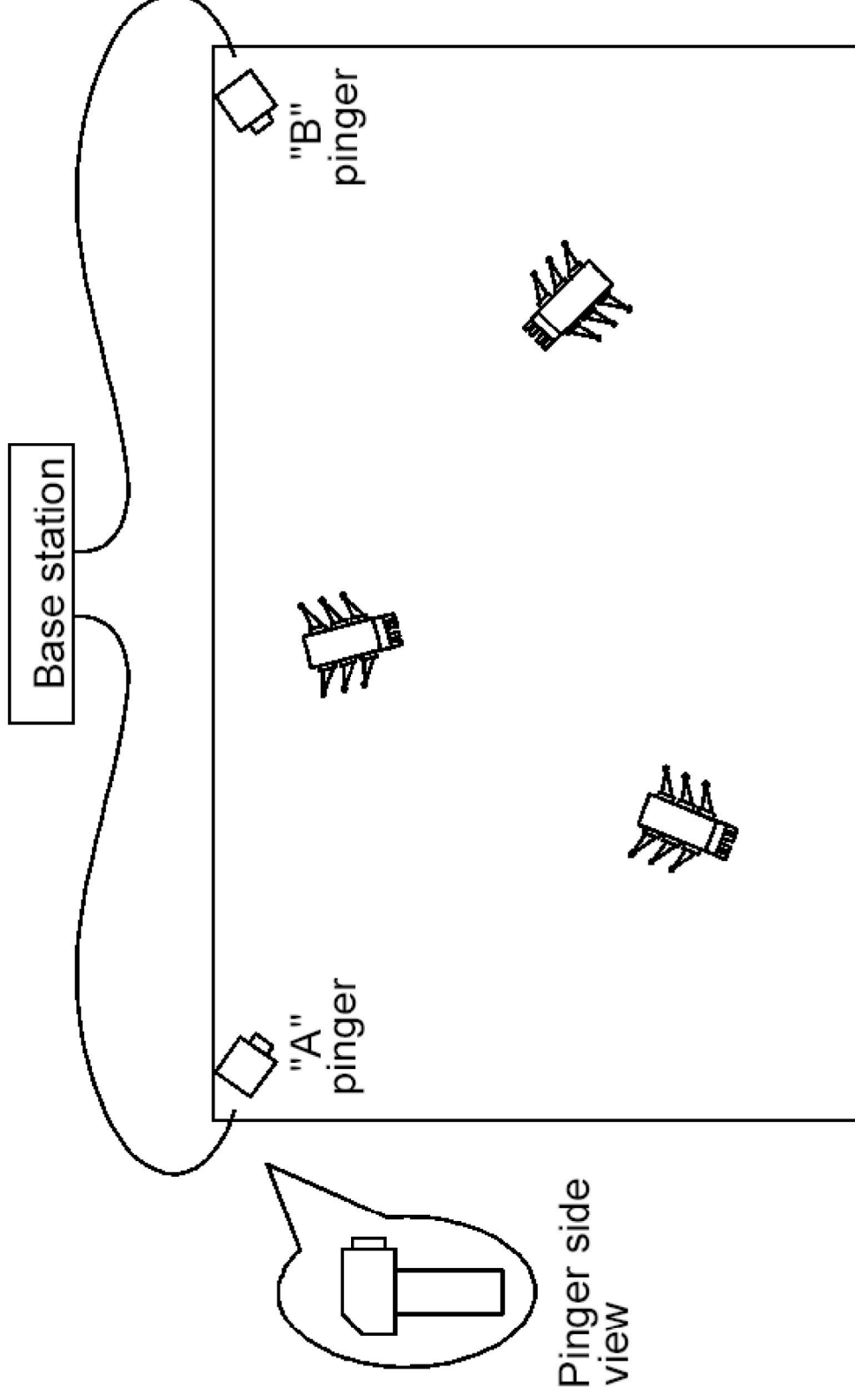
- dla pojedynczego robota lub mało licznego zespołu

Nadajniki stacjonarne:

- dla bardziej licznych zespołów robotów

# System nawigacji ultradźwiękowej (przykład)

Obszar:  
9x9 metrów  
Dokładność:  
12,7mm (0,5")



# Optyczne systemy lokalizacji robotów

Typowe rozwiązania:

- mobilne odbiorniki kierunkowe i nadajniki stacjonarne
- mobilne kierunkowe układy nadawczo-odbiorcze i pasywne reflektory stacjonarne
- mobilne kierunkowe układy nadawczo-odbiorcze i aktywne stacjonarne układy retransmisyjne (transpondery)
- kierunkowe nadajniki mobilne i odbiorniki stacjonarne

# Optyczne systemy lokalizacji robotów

## Problemy:

- konieczność dokładnej widzialności między odbiornikiem i nadajnikiem
- konieczność ingerencji w otoczenie (montaż systemu)
- wrażliwość na odbicia (szczególnie przy układach ze stacjonarnymi reflektorami)
- koszty

# Ciekawe rozwiązania lokalizacji (choć leciwe)

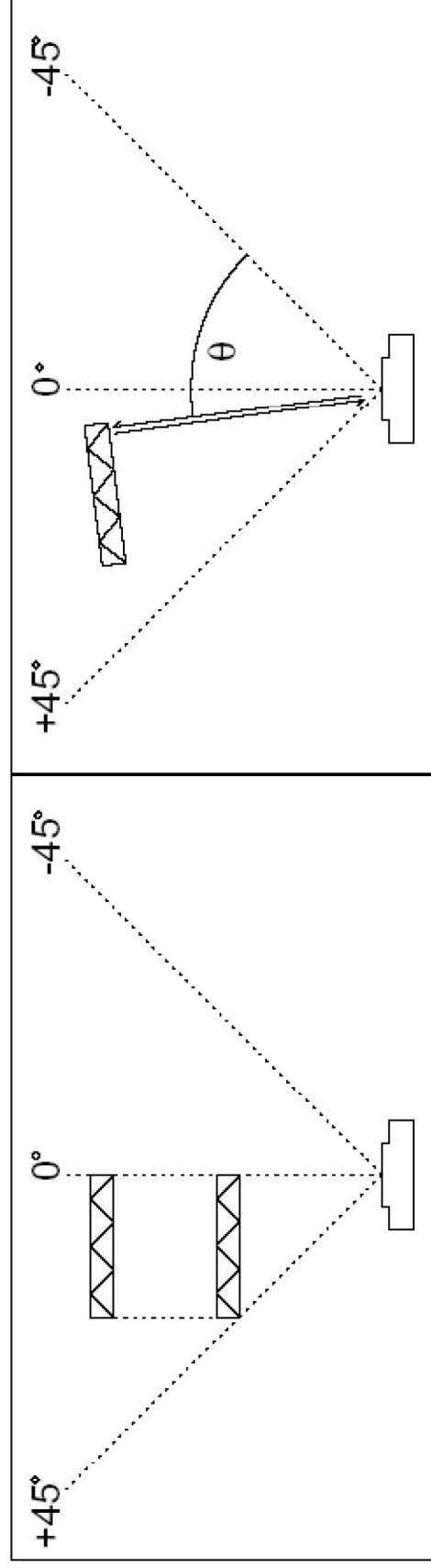
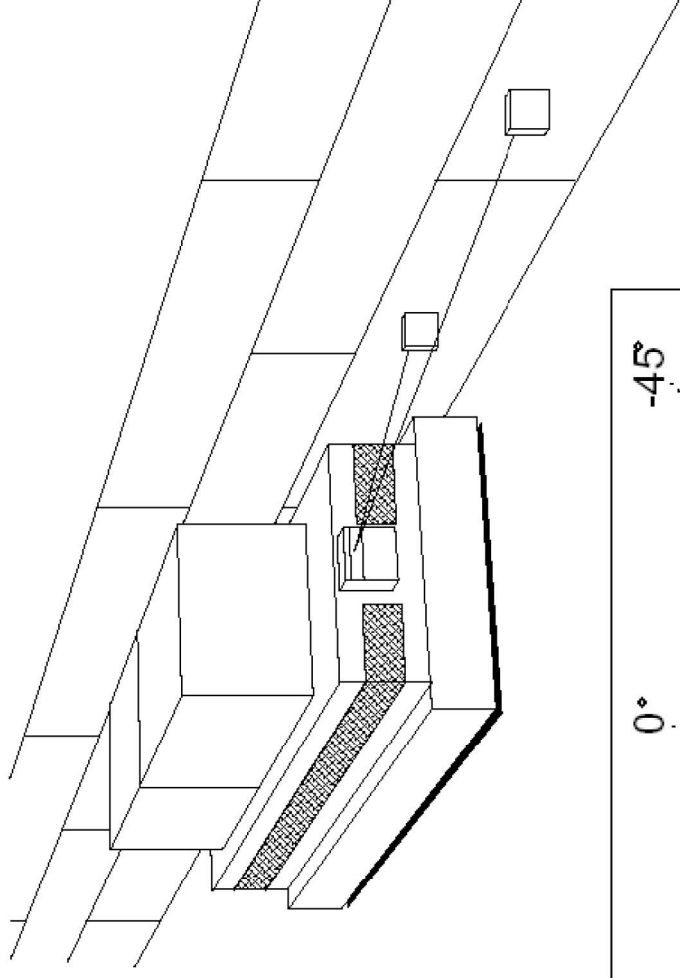
## System prowadzenia robota wzdłuż ścian

dokładność kątowa - ok. 0.05%

rozdzielczość kątowa - 0.006 stopni

zasięg - do 15m

koszt - ok. 4000\$



**Figure 6.11:** a. The perceived width of a retroreflective target of known size is used to calculate range; b. while the elapsed time between sweep initiation and leading edge detection yields target bearing. (Courtesy of NAMCO Controls).



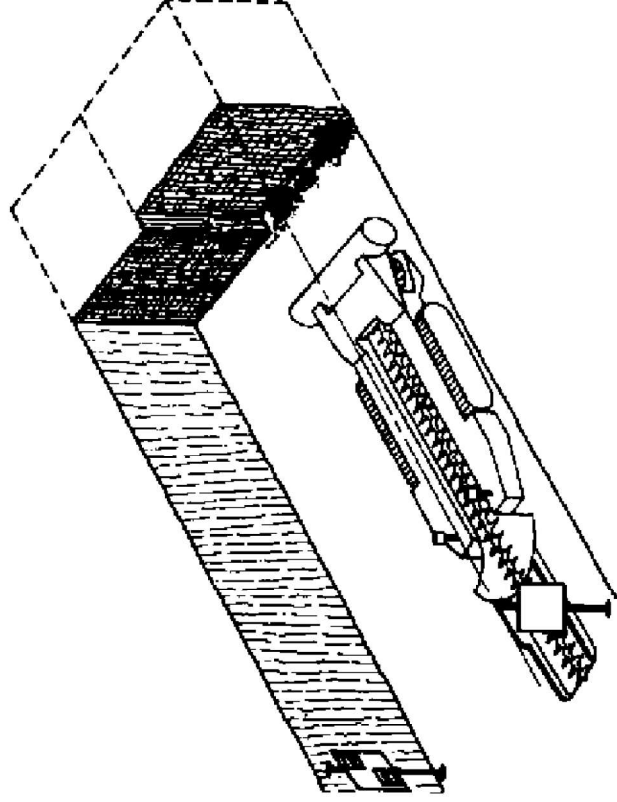
# Lokalizacja – przykład (2)

**System nawigacji autonomicznego kombajnu do pracy w kopalni węgla**

Problem - wibracje

Odbłyśniki cylindryczne

Dokładność rzędu 1cm na 1m  
wydrążonego chodnika



**Figure 6.13:** Front view of the Joy 16CM continuous mining machine at the U.S. Bureau of Mines' test facility. Cylindrical retroreflective targets are mounted on the tail (Courtesy of Anderson [1991].)

# Lokalizacja – przykład (3)

## Wykrywanie aktywnych oraz pasywnych znaczników

### Zasięg:

150m - znaczniki aktywne

30m - znaczniki pasywne (kody paskowe)

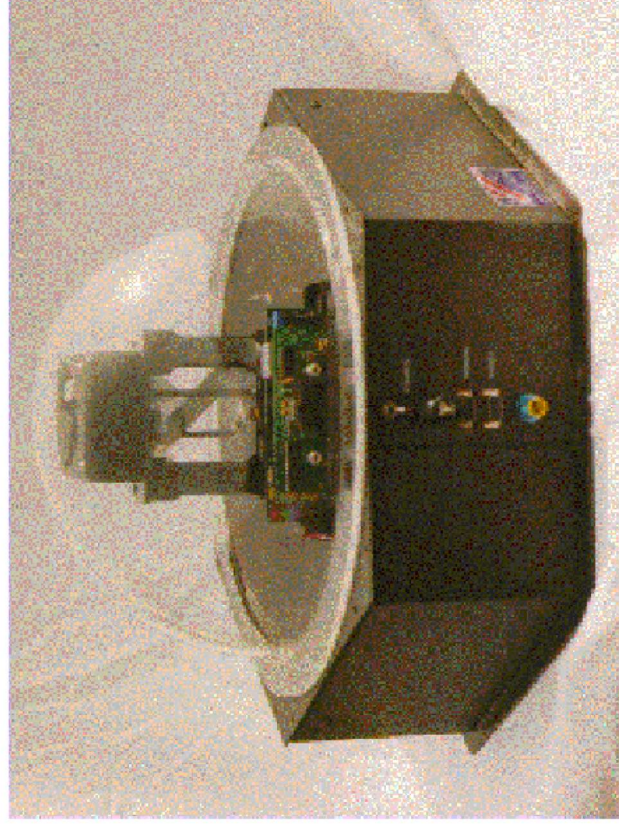
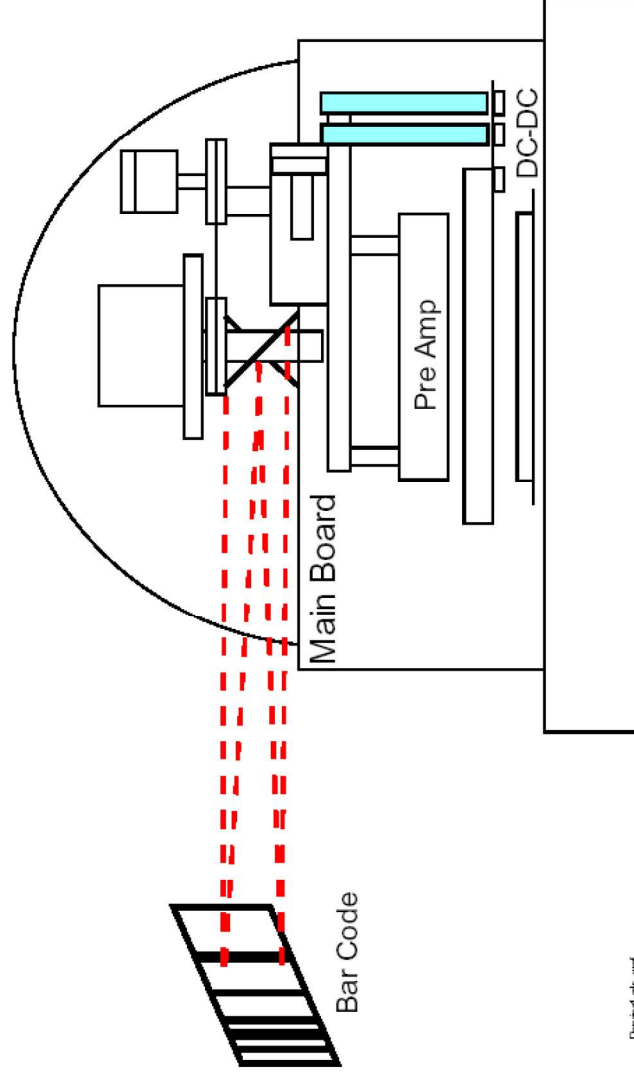
Powtarzanie pomiarów - co 100ms

### Dokładność:

- rzędu 0.1 stopnia

### Problemy:

- odbicia
- zakłócenia od światła słonecznego



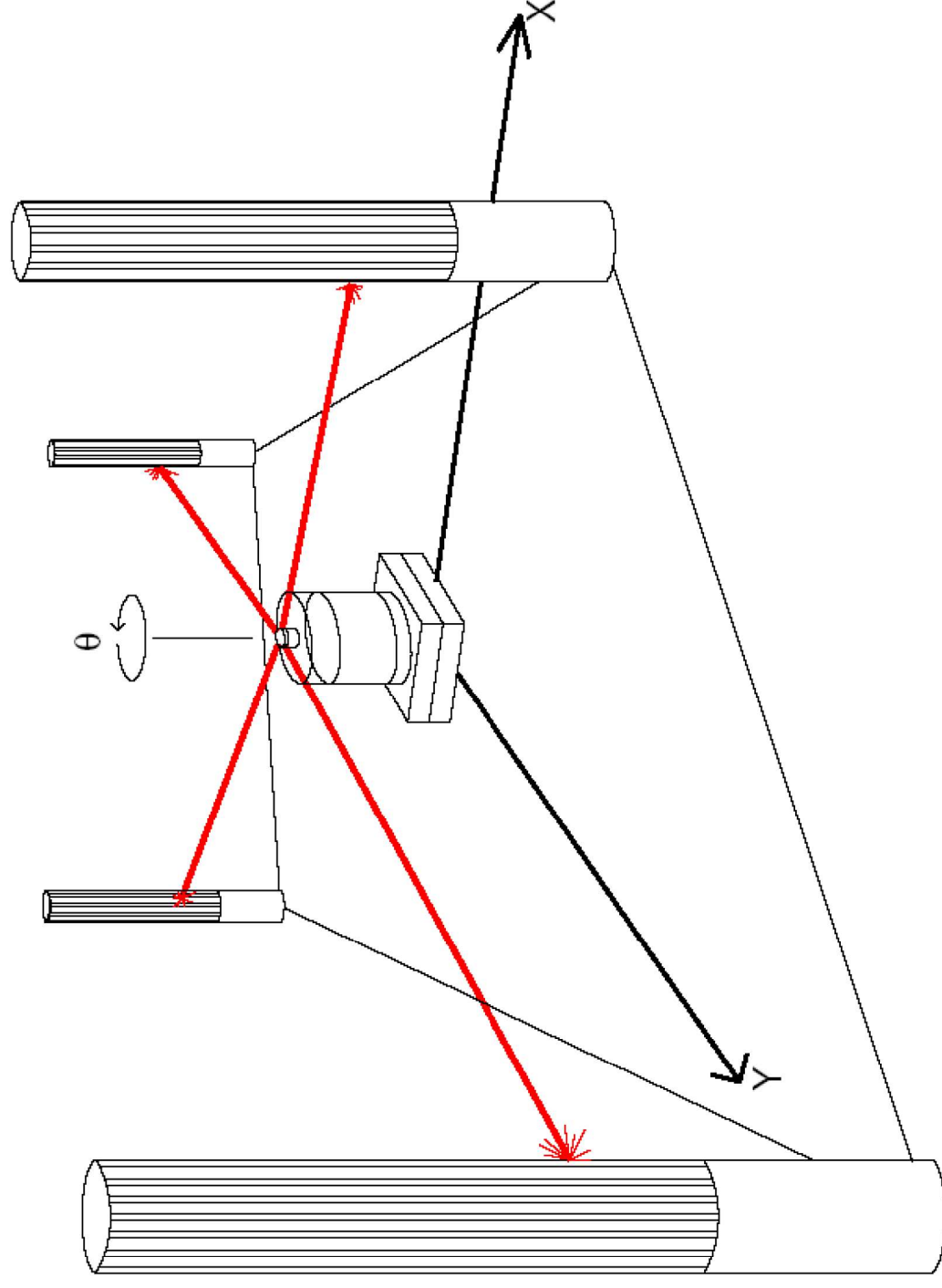
# Lokalizacja – przykład (4)

System do zastosowań zewnętrznych:

- zasięg do 25m
- min. 15s widzenia wszystkich znaczników

Dokładność:

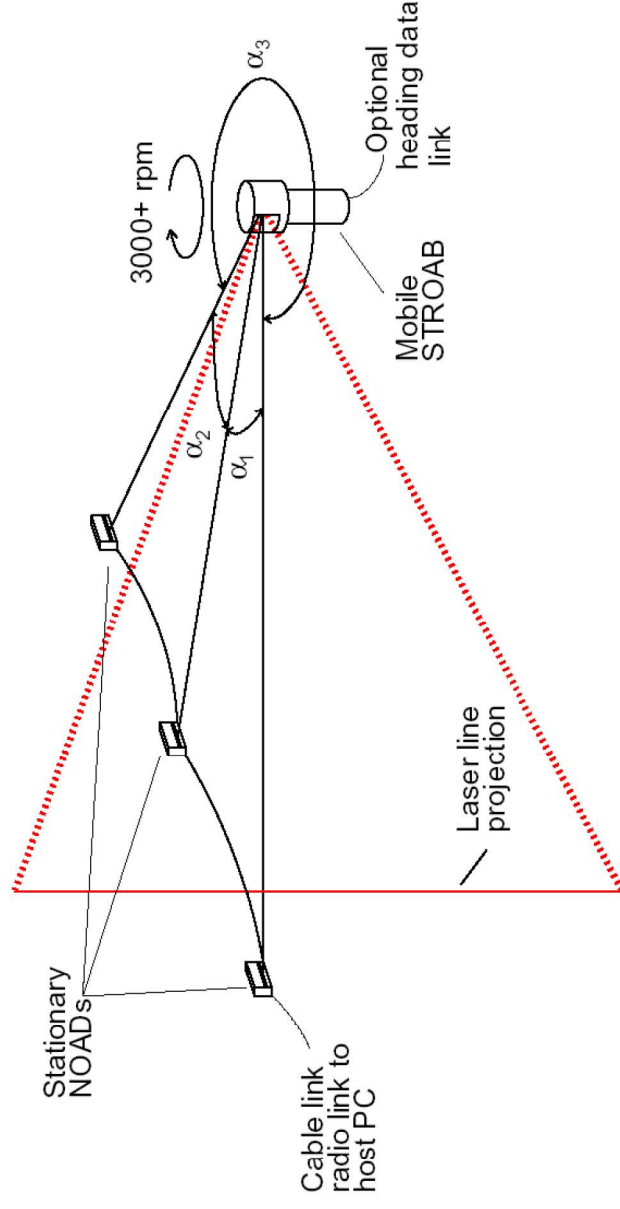
- kątowa ok. 1/8 stopnia
- liniowa ok. 100mm



**Figure 6.16:** The TRC Beacon Navigation System calculates position and heading based on ranges and bearings to two of four passive beacons defining a quadrilateral operating area. (Courtesy of TRC.)



# Rozwiązywanie zadania lokalizacji (5)



**Figure 6.21:** The Computerized Opto-electronic Navigation and Control (CONAC<sup>TM</sup>) system employs an onboard, rapidly rotating and vertically spread laser beam, which sequentially contacts the networked detectors. (Courtesy of MTI Research, Inc.)

Laser obrotowy montowany na urządzeniu mobilnym

Połączone w sieć odbiorniki stacjonarne

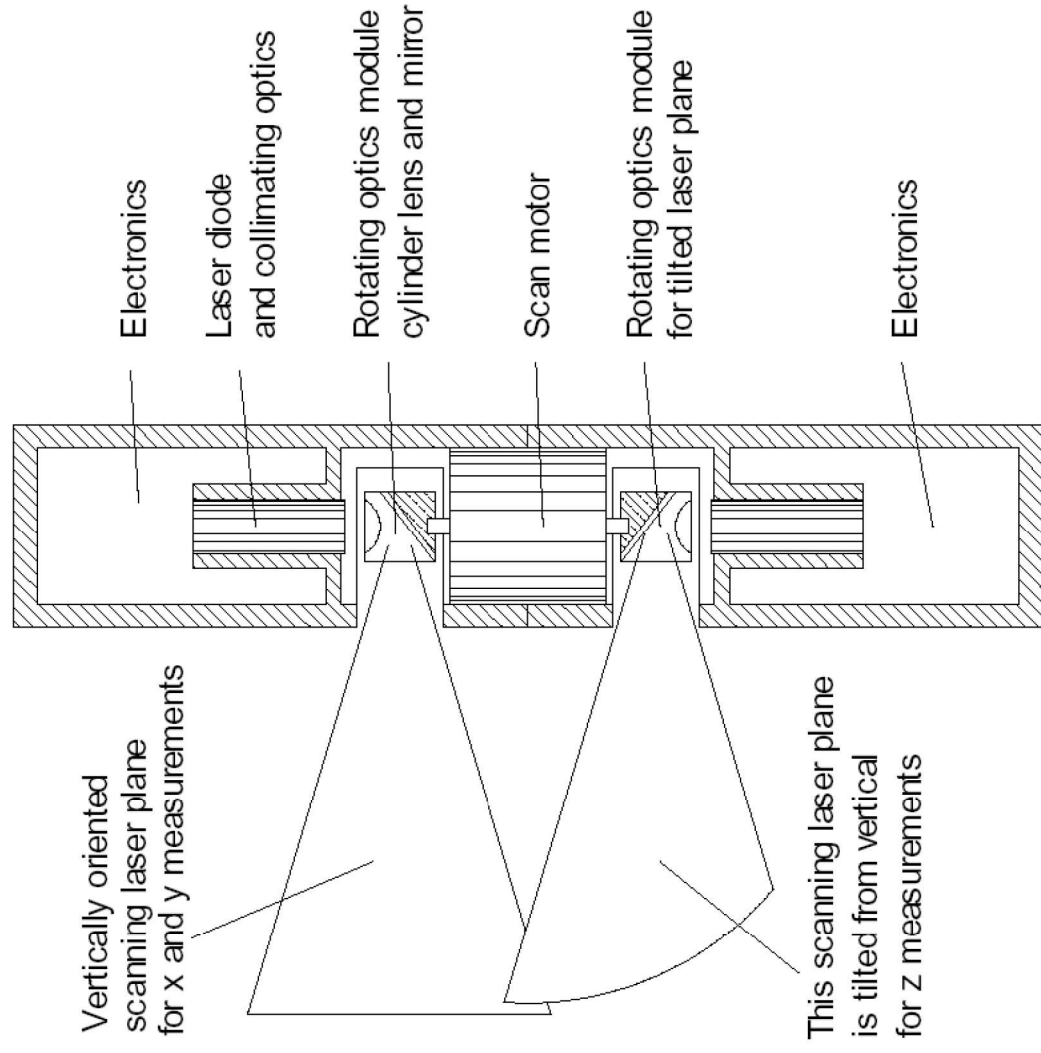
Dokładność liniowa: ok. 1cm

Dokładność kątowa: ok. 0.1 stopnia

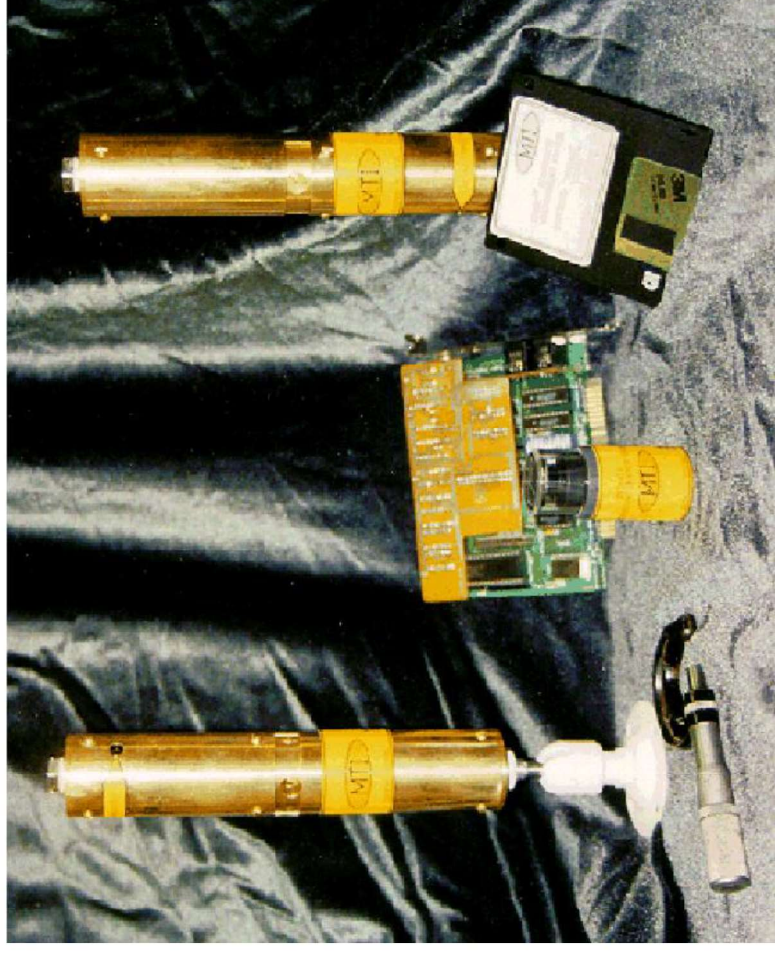
Częstość pomiarów: 25Hz

# Rozwiązanie zadania lokalizacji (6)

Dwa stacjonarne lasery nadawczo-odbiorcze  
Aktywny transponder mobilny  
Możliwość użycia do obserwacji wielu robotów  
Dokładność liniowa: ok. 1mm  
Dokładność kątowa: ok. 0.05 stopni  
Zasięg: do 250m  
Maksymalna prędkość: 100km/h



**Figure 6.24:** Simplified cross section view of the dual-laser position-location system now under development for tracking multiple mobile sensors in 3-D applications. (Courtesy of MTI Research, Inc.)





# Lokalizacja – system geodezyjny (7)



**Figure 6.26:** The Odyssey positioning system comprises two laser beam transmitters and a pole- or wand-mounted receiver. (Courtesy of Spatial Positioning Systems, Inc.)

Przynajmniej dwa nadajniki stacjonarne

Mobilny odbiornik

Dokładność liniowa: ok. 1mm  
(dla dużych odległości ok.  
20mm)

Praca w trzech wymiarach

Zasięg: do 150m

Częstość pomiarów: 5Hz

# GPS

## Global Positioning System (Departament Obrony USA)

- 31 satelitów (28 stale czynnych)
- 12 naziemnych stacji kontrolnych i monitorujących (w pobliżu równika)
- odbiorniki sygnału (do 1800 km/h i do wysokości 18 km)

## Zasada działania:

- pomiar czasu dotarcia sygnału do odbiorcy
- nakładanie na sygnał szumu pseudolosowego:
  - wzmocnienie sygnału
  - możliwość kontrolowania dostępu
  - przekaz dodatkowych szyfrowanych komunikatów

## Zawartość sygnału GPS:

- informacja o układzie satelitów na niebie
- informacja o ich teoretycznej drodze
- informacja o aktualnych odchyleniach od zaplanowanej drogi

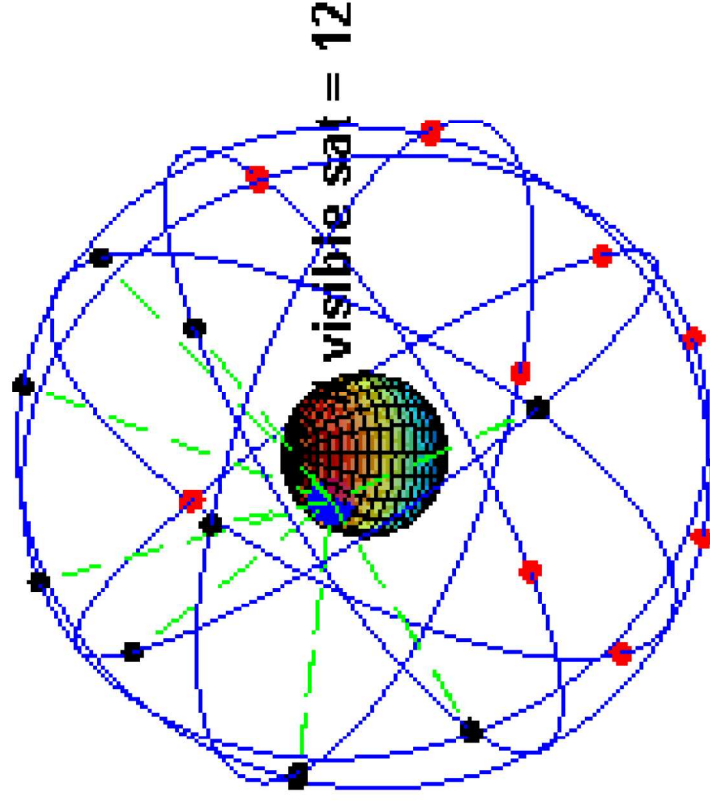
# GPS - założenia

- wyznaczanie położenia w czasie rzeczywistym
- odporność na zakłócenia
- niezależność od warunków
- 5 pocisków wystrzelonych z różnych źródeł ma trafić z dokładnością 5m
- ograniczenie kosztów odbiornika
- synchronizacja czasu za poziomie 1 $\mu$ s
- nielimitowana liczba użytkowników
- niewykrywalność odbiornika
- natychmiastowa informacja o wybuchu jądrowym



# GPS - satellite

- Widoczność z każdego miejsca na Ziemi - min. 4 satellite
- Orbita - poniżej geostacjonarnej (20183km)
- Możliwości satelitów:
  - praca bez kontaktu ze stacjami bazowymi
  - automatyczna nawigacja
  - zegary atomowe
  - łączność między satelitami
  - pomiar odległości między sat.



# GPS - zasada pomiaru odległości

- Określenie pozycji - sygnał przynajmniej z 4 satelitów, wyznaczamy (x, y, z, t)
- Sygnał nadawany na 2 częstotliwościach: 1,575 i 1,228 GHz
- Porównanie faz sygnałów pozwala wyznaczyć czas propagacji
- Modulowanie sygnałów różnymi kodami, zależnie od satelity
- Wpływ jonosfery - korygowany (systemy wojskowe, DGPS)
- Zaawansowane techniki oddzielania sygnału od szumu - mała antena odbiorcza
- Kluczowy b. dokładny pomiar i synchronizacja czasu między sat.
- Sieć korekcji czasu - względem naziemnych stacji bazowych

# GPS - dokładność

Dokładność „cywilna”:

- początkowo kilkanaście m,
- potem celowe zakłócenie - ok. 100 m (wyłączono w 2000r.)
- obecnie kilkanaście cm (jest nadawany dodatkowy sygnał)
- w ruchu rośnie dokładność - łatwiej odfiltrować szum radiowy
- DGPS - pomiar różnicowy, z użyciem dwóch odbiorników:
  - odbiornik stały ze znaną pozycją
  - odbiornik ruchomy
  - dokładność - pojedyncze cm
- z wykorzystaniem korekcji (sygnał nadawany ze stacji naziemnych
  - w Polsce jest ich ok. 100) - do 3 cm poziomo i 5 cm pionowo
- w przetwarzaniu po pomiarze (post processing) - nawet do 1mm

# Inne systemy nawigacji satelitarnej

- GLONASS - system rosyjski (24 satelity i 4 stacje naziemne, brak zakłóceń sygnału)
- Galileo - system europejski (w trakcie tworzenia - docelowo 30 satelitów, dokładność 10 cm, bezpłatnie do 4m)
- Compass - system chiński (transmisja dwustronna, dokładność rzędu 10 m)

## Podsumowanie (znaczniki)

- Konieczność użycia stacjonarnych elementów w otoczeniu - konieczna bardzo dokładna informacja o położeniu elementów nawigacyjnych (znaczników)
- Niektóre znaczniki wymagają dodatkowego zasilania
- Konieczność zapewnienia odpowiedniej widzialności (przynajmniej 2 lub trzy znaczniki)
- Duży wybór dróg (lecz dokładnych) zestawów komercyjnych
- Przydatne przy wymaganej dużej dokładności i wiarygodności pomiarów

# Metody nawigacji z wykorzystaniem elementów otoczenia robota

*landmark* - znacznik „naturalny”, element otoczenia  
wykorzystany do nawigacji, punkt orientacyjny

# Obiekty nadające się na punkty orientacyjne

- charakterystyczne cechy tych obiektów pozwalają na ich wykrycie i zidentyfikowanie poprzez układy sensoryczne robota mobilnego
- cechy: kształt, barwa, sposób odbicia fali
- warunek: wyraźne odróżnianie się od otoczenia

# Warunki poprawnej lokalizacji

- Znane położenie znaczników związanych z otoczeniem (nieruchomych)
- Łatwość odnalezienia i identyfikacji znaczników
- Brak innych obiektów podobnych do znaczników
- Dostępność informacji o znacznikach dla robota

## **Zadanie dla robota:**

- rozpoznać znacznik
- obliczyć położenie i orientację robota

Zwykle w przybliżeniu znane są współrzędne robota (np. jako wynik z odometrii)



# Etapy lokalizacji

1. Zebranie informacji z układów sensorycznych
2. Na podstawie przybliżonej informacji o współrzędnych robota wybranie obszaru poszukiwań, w którym oczekiwany jest znacznik
3. Odnalezienie znacznika
4. Ustalenie zależności między znanymi wcześniej danymi o otoczeniu a danymi zebranymi o znaczniku
5. Określenie położenia i orientacji robota względem znacznika oraz oszacowanie błędu

# Typy obiektów orientacyjnych

## 1. Naturalne:

znajdują się w środowisku i robot będzie wykorzystywał je do nawigacji

Można je znaleźć w środowiskach o określonej strukturze: korytarze, hale fabryczne, szpitale

## 2. Sztuczne:

określone obiekty, które należy wprowadzić do środowiska, aby była możliwa nawigacja

Sztuczne w nawiązaniu do poprzednich - jeżeli inne metody, niż triangulacyjne i trójkierunkowe lub/i użycie do wykrywania uniwersalnych układów czujników zamontowanych na robocie

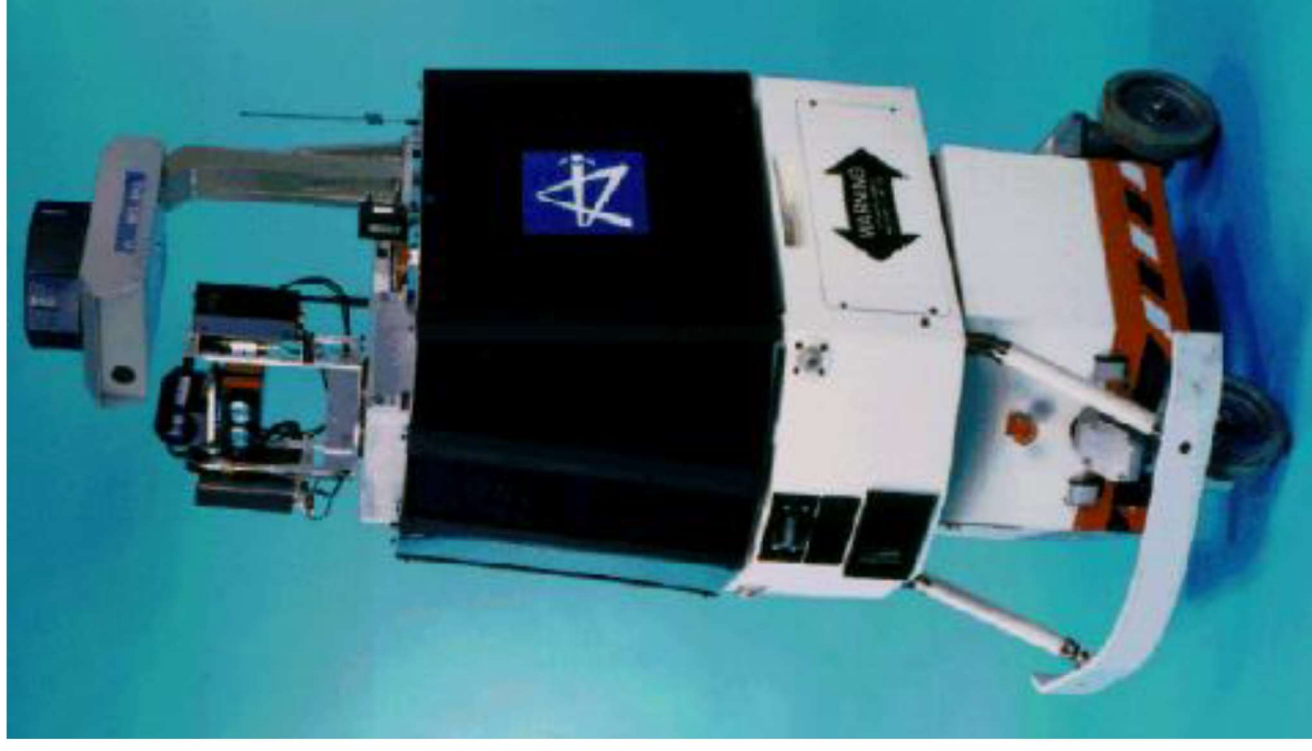
# Naturalne obiekty orientacyjne

- Podstawowa trudność: znaleźć charakterystyczne obiekty
- Podstawowy ukł. sensoryczny: system wizyjny
- Typowe obiekty orientacyjne dla wizji:
  - krawędzie pionowe (drzwi, narożniki)
  - punkty oświetleniowe (na suficie)
- Inne układy sensoryczne: czujniki odległości
- Obiekty orientacyjne dla czujników odległości:
  - krawędzie
  - narożniki
  - płaskie ściany

Właściwe określenie obiektów zwiększa dokładność

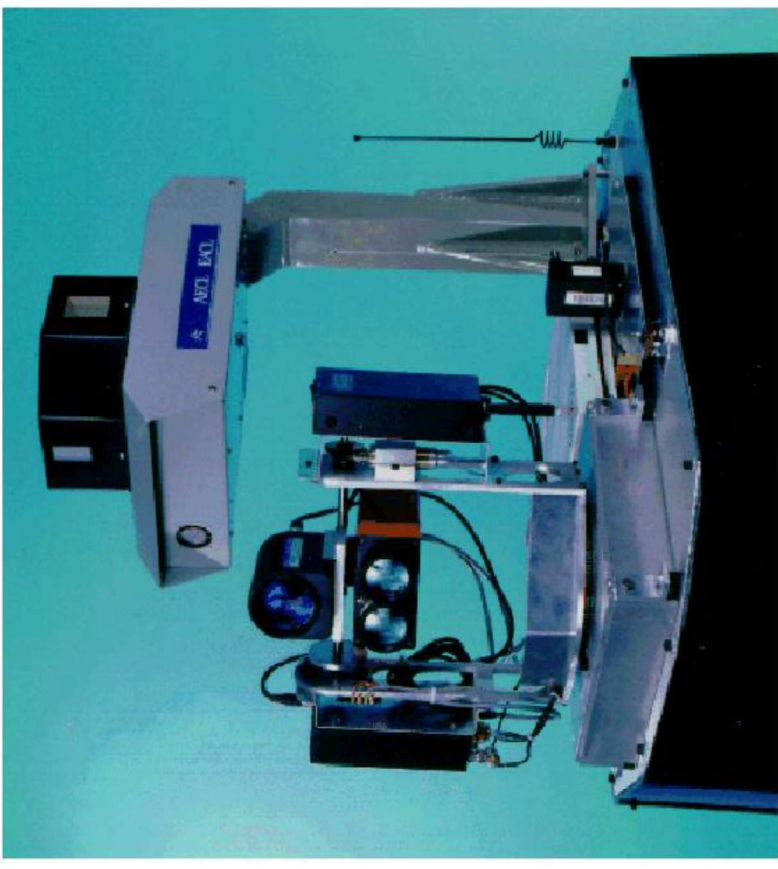
# Elementy układu nawigacji

1. Sensor do wykrywania obiektów (zwykle wizja)
2. Metoda porównywania obiektów z mapą znanych punktów charakterystycznych
3. Metoda obliczania współrzędnych robota oraz szacowania błędu



# Przykładowy system

- Wykrywanie:
  - znaków alfanumerycznych
  - drzwi
  - ciągłych elementów
- Możliwość uczenia
- Działanie:
  1. przybliżona pozycja (odometria)
  2. określenie widzialności
  3. poszukiwanie obiektu (wizja)
  4. określenie położenia względem obiektu
  5. korekcja odometrii
- Dokładność: kilka cm (drzwi)



**Figure 7.3:** AECL's natural landmark navigation system uses a CCD camera in combination with a time-of-flight laser rangefinder to identify landmarks and to measure the distance between landmark and robot. (Courtesy of Atomic Energy of Canada Ltd.)

# Sztuczne obiekty orientacyjne

- Znacznie łatwiejsze do wykrycia, niż naturalne
- Znane z góry parametry obiektów (rozmiar i kształt)
- Geometria prosta do przekształcenia przez perspektywę
- Niemal wyłącznie używa się systemów wizyjnych
- Różne kształty obiektów orientacyjnych:
  - romby
  - połowicznie zaczerpnięte okręgi
  - różne wzory na ścianach
  - kształt litery **H**
- Dokładność maleje ze wzrostem odległości
- Zależność dokładności od kąta widzenia znacznika



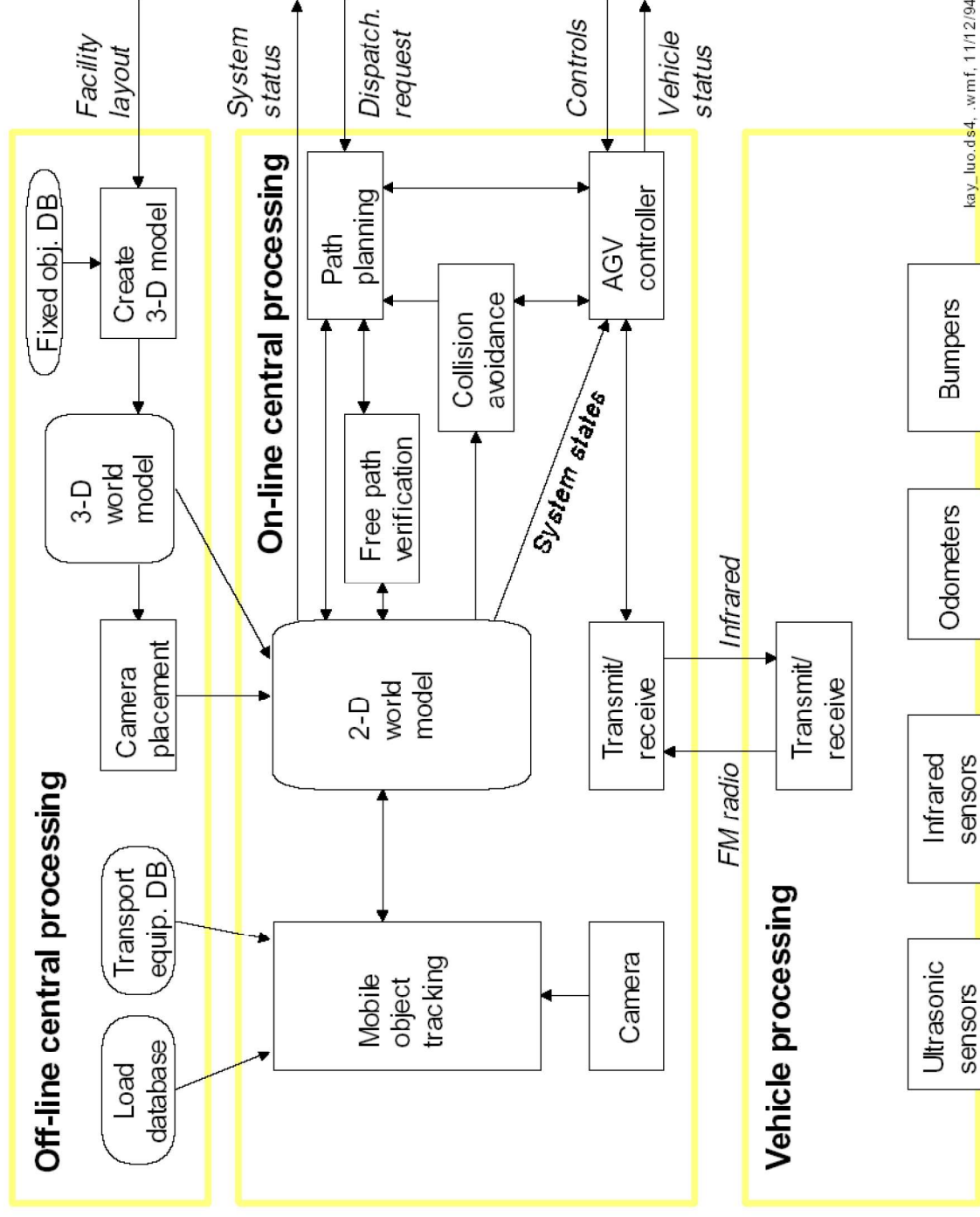
# Globalna wizja - ruchome obiekty

## orientacyjne

- Nieruchome kamery obserwujące roboty
- Roboty z charakterystycznymi znacznikami na pokładzie
- Dobre dla małych obszarów roboczych

Przykład:

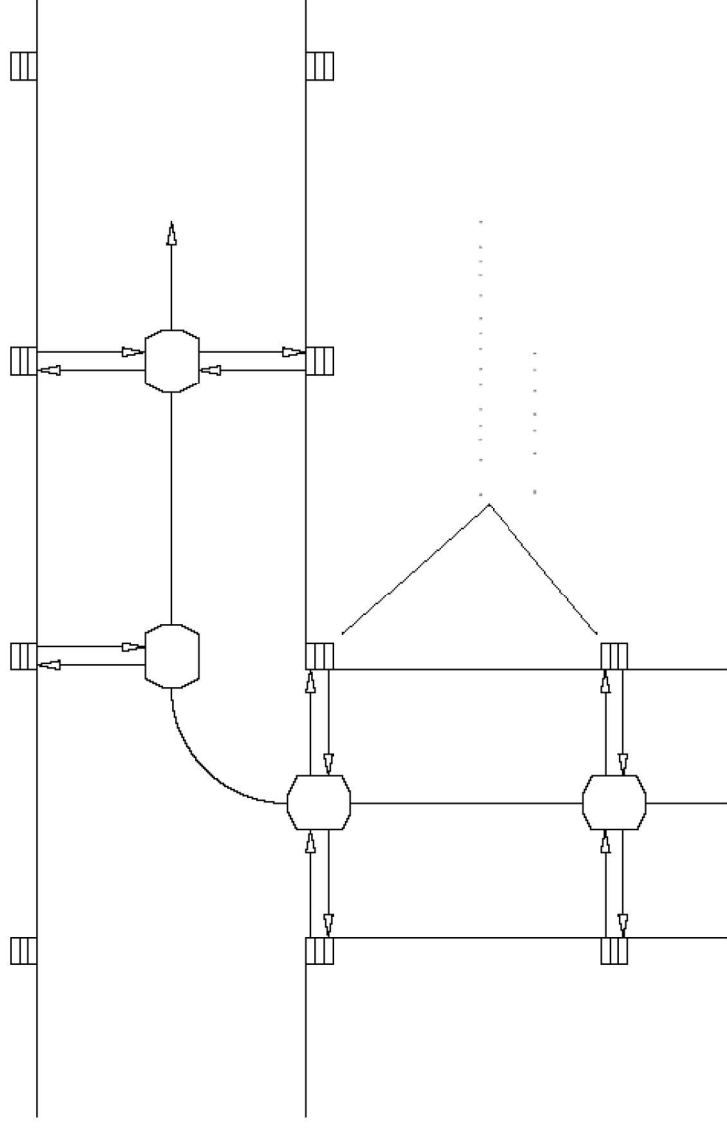
system robotów grających w piłkę



**Figure 7.4:** Block diagram of the processing functions for vehicle control using global vision. (Adapted from [Kay and Luo, 1993].)

# Sztuczne znaczniki - przykład (1)

- Znaczniki z taśmy odbijającej ultradźwięki
- Ocena odległości od znaczników za pomocą sonarów
- Dobre do ruchu po korytarzach

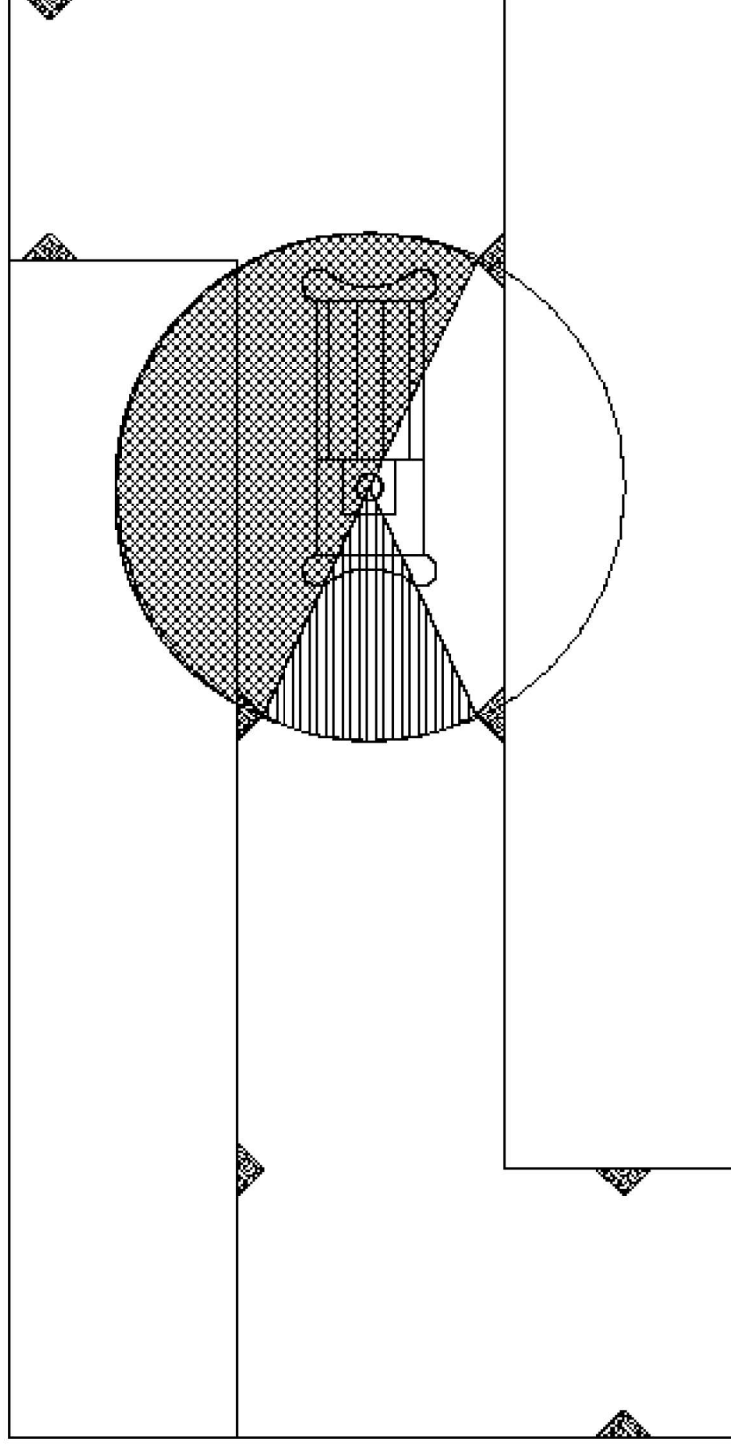


**Figure 7.5:** Polarized retroreflective proximity sensors are used to locate vertical strips of retroreflective tape attached to shelving support posts in the Camp Elliott warehouse installation of the MDARS security robot [Everett et al, 1994].



## Sztuczne znaczniki - przykład (2)

- Czujnik laserowy
- Odbłyśniki na ścianach



**Figure 7.6:** Retroreflective bar-code targets spaced 10 to 15 meters (33 to 49 ft) apart are used by the Caterpillar SGV to triangulate position. (Adapted from [Caterpillar, 1991a].)

# Sztuczne znaczniki - przykład (3)

- Duże maszyny robocze
- Informacja wstępna: odometria + giro (dokładność ok. 2%)
- Znaczniki na planowanej ścieżce ruchu
- Okresowa korekcja błędów

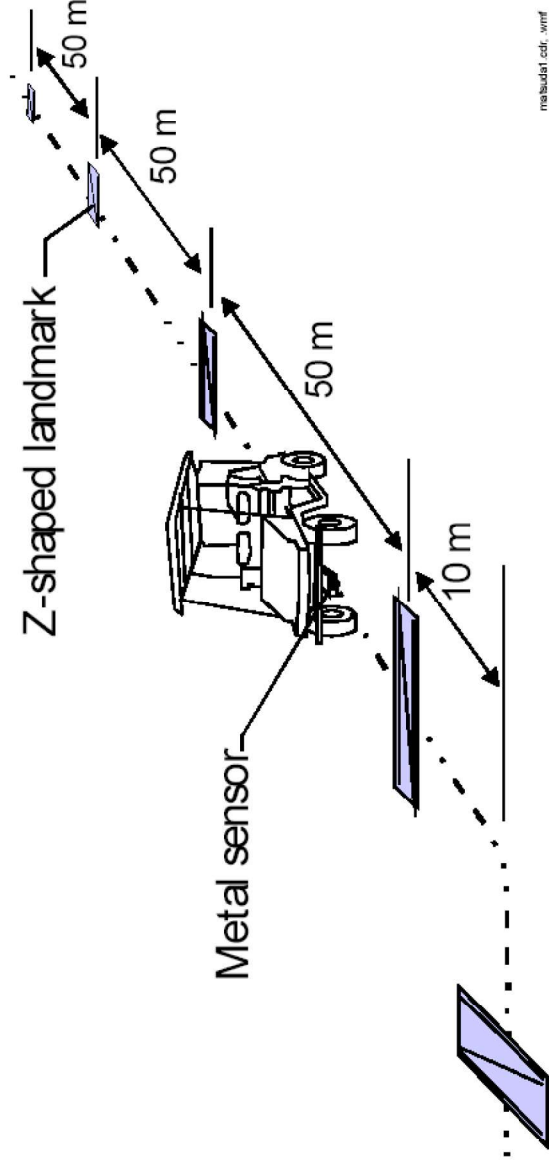
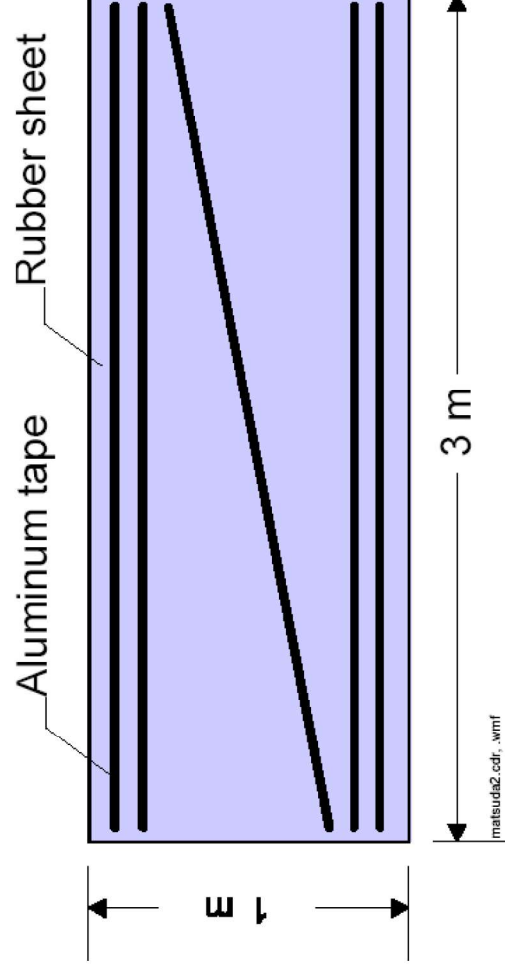


Figure 7.7: Komatsu's Z-shaped landmarks are located at 50-meter (164 ft) intervals along the planned path of the autonomous vehicle. (Courtesy of [Matsuda and Yoshikawa, 1989].)



# Nawigacja liniowa

## Znaczniki o charakterze ciągłym:

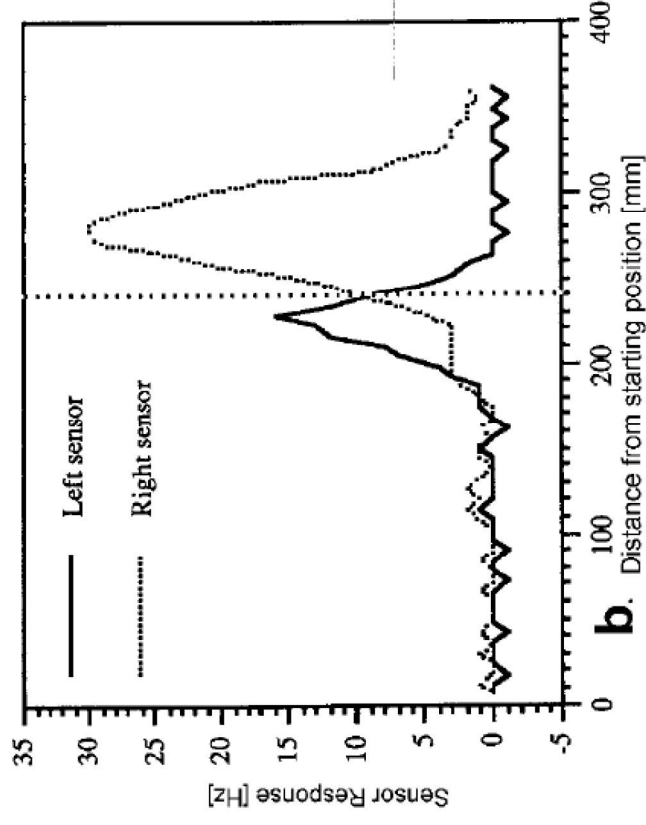
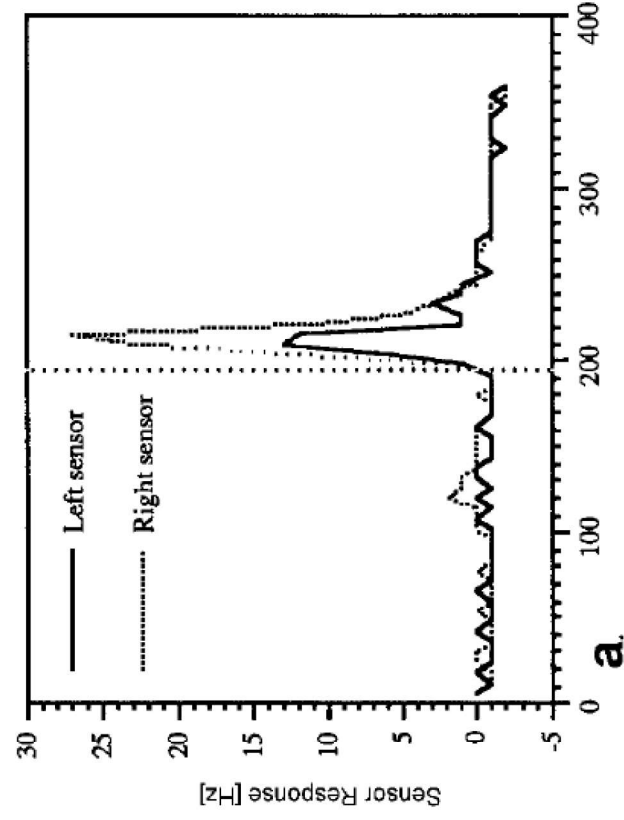
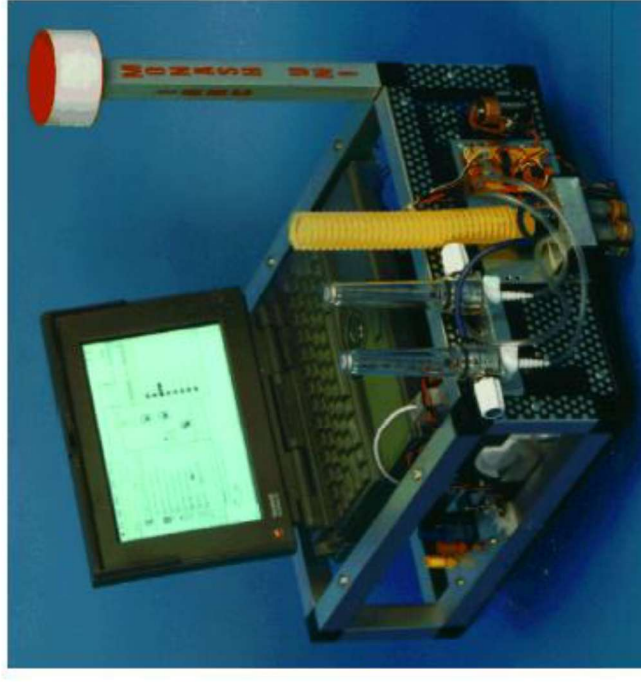
- kabel emitujący pole elektromagnetyczne o odpowiednich parametrach
- taśma z materiału odbłaskowego
- proszek ferromagnetyczny napylony na podłogę
- ścieżka narysowana na podłogę

## Zastosowania:

- Ruch w halach fabrycznych i magazynach (także przekazywanie dodatkowej informacji do pojazdu)
- Prowadzenie ruchu autobusów miejskich po wyznaczonym pasie ruchu

# Nawigacja liniowa

- Znaczniki o charakterze ciągłym:
  - ścieżki w zakładach pracy
  - ścieżki termiczne (ciepło od oświetlenia)
  - ścieżki chemiczne (zapach)



# Cechy nawigacji na podstawie obiektów orientacyjnych

- nie potrzeba modyfikacji otoczenia
- znaczniki są tanie
- duża zależność dokładności od odległości oraz kąta widzenia znacznika
- wymagane dokładne dane początkowe oraz położenie startowe robota

# Porównanie nawigacji wg obiektów orientacyjnych z nawigacją na znaczniki specjalne

- większa złożoność obliczeniowa metod
- konieczność przetwarzania dużej ilości danych
- dokładność i wiarygodność dużo mniejsza
- duży wpływ warunków otoczenia (światło, ...)
- znacznie niższe koszty ogólne