



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za elektrotehniko*



LABORATORIJ ZA MODELIRANJE,  
SIMULACIJO IN VODENJE

LABORATORIJ ZA AVTONOMNE  
MOBILNE SISTEME

# Avtonomni mobilni sistemi

**Izr. prof. dr. Gregor Klančar**

gregor.klancar@fe.uni-lj.si

## Uvod v mobilne sisteme

2013/2014

# AMS: predavanja, vaje, ...



- Predavanja (45 ur) :
  - 3 ure/predavanje
  - učbenik: Avtonomni mobilni sistemi (pdf kmalu na voljo)
- Vaje (30 ur) :
  - 2 uri / termin (cca. 120minut/termin -> 11 terminov)
  - opravljene vaje so predpogoj
  - sestava: laboratorijske (9x), nekaj avditornih primerov, zagovori (2x)
  - simulacijski del (4x): simulacijsko okolje (Matlab), implementacija različnih algoritmov iz snovi predavanj
  - delo na napravah (5x): skupine po 2, samostojno delo na mobilnem sistemu (Rumba, Pioneer 3AT, kvadrokopter, Lego Mindstorm,...)
  - začetek konec oktobra
  - navodila za vaje na voljo sproti

# AMS: predavanja, vaje, ...



- Samostojno delo (75 ur):
  - ocena=pisni izpit (35%) + ustni izpit (35%) + vaje (30%)
- Komunikacija:
  - Laboratorij za avtonomne mobilne sisteme (& Laboratorij za modeliranje, simulacijo in vodenje)
  - domača stran: <http://msc.fe.uni-lj.si/StraniPredmetov.asp...>
  - govorilne ure: ponedeljek 9:00-10:00 oz. po dogovoru
  - e-mail: [gregor.klancar@fe.uni-lj.si](mailto:gregor.klancar@fe.uni-lj.si)



# Mobilni avtonomni sistem



- mobilni sistem, mobilnost
  - zmožni premikanja (lokomocije) v okolju, ni fiksno vpet v okolje
- avtonomni sistem, avtonomija
  - zmožen samostojnega delovanja v okolju
  - energijsko (napajanje), zmožnost sprejemanja odločitev in izvajanje akcij
- v praksi so to mobilni roboti oz. vozila: kopno, zrak, vesolje, voda,...

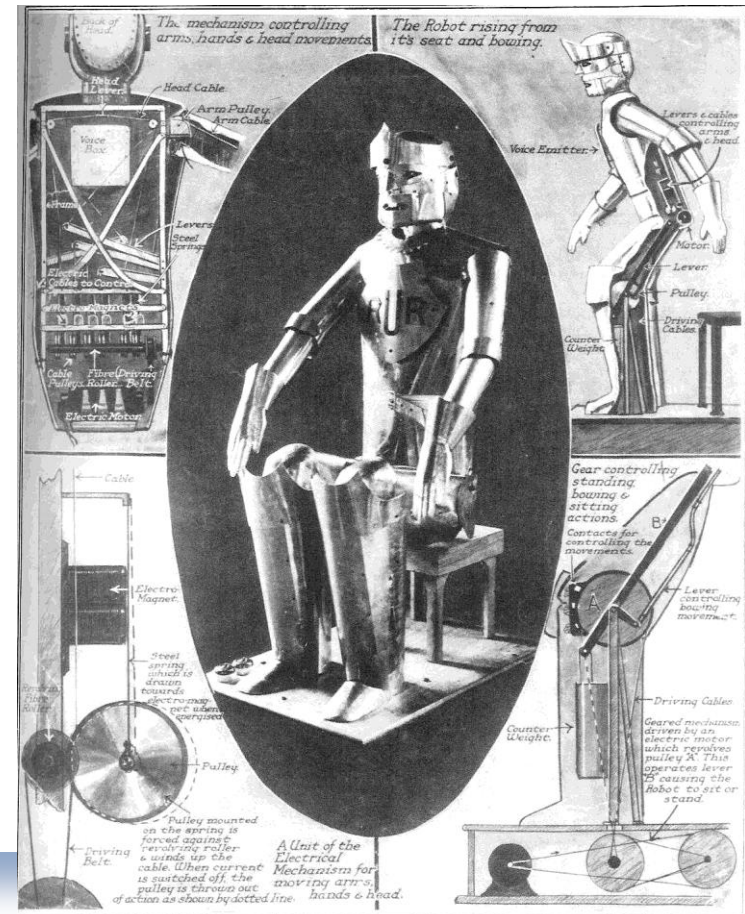


# Robot: pomen, izvor



- Pomen
  - **robot** (SSKJ): "... elektronska naprava, ki enakomerno opravlja vnaprej programirana, pogosto človekovemu zdravju škodljiva dela."
  - **robota** (SSKJ), star. pomen: izvajanje težkih del ("robota v rudniku jih je izčrpala").

- Strokovna uporaba:  
1920, Karel Čapek: drama R.U.R –  
Razumni Univerzalni Roboti



# ... v nadaljevanju



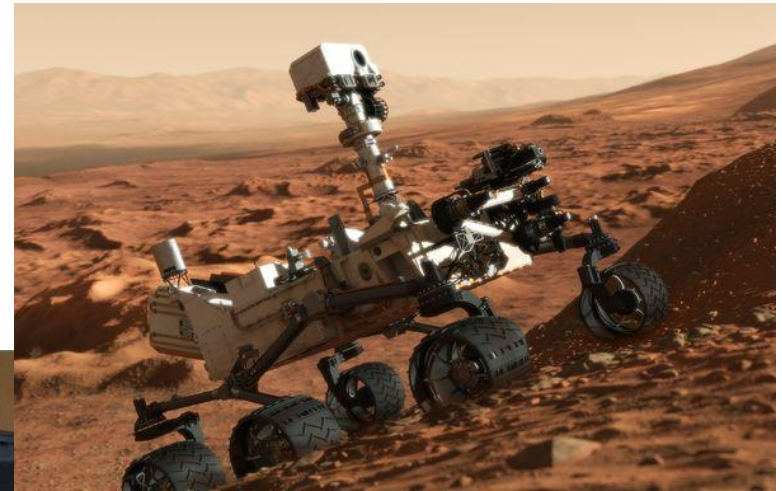
- motivacija za mobilnost & izzivi
- razne delitve (teren, lokomocija, namen, stopnja avtonomije)
- zgradba mobilnih sistemov
- motivacija za razvoj, uporaba, aplikacije
- zgodovinski pregled in prihodnost



# motivacija za mobilnost

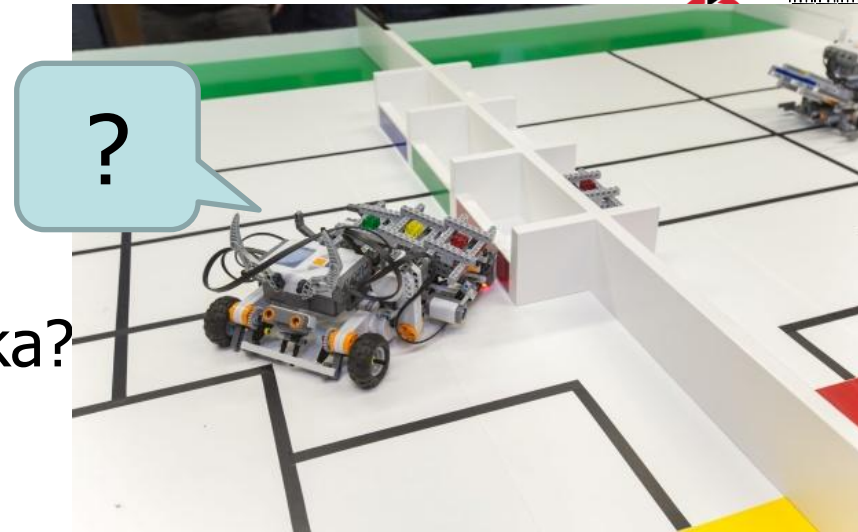


- *Fiksno vpeti* industrijski roboti so hitri, natančni, ponovljivi,... vendar imajo omejeno delovno območje
- Za zunanjo uporabo, morajo biti roboti zmožni *prostega gibanja* v velikih, nestrukturiranih, negotovih in dinamičnih okoljih



# izzivi mobilne robotike

- 1) Kje se nahajam?
- 2) Kako naj pridem do cilja?
- 3) Kako naj izvedem akcijo premika?



- 1) Lokalizacija** (senzorji, zemljevid, podana ocena začetne lokacije, ....)
- 2) Pot / trajektorija/ planiranje gibanja** (geometrijska pot / geometrijska pot v časovnem okviru / med ovirami)
- 3) Vodenje gibanja** (zaprtozančno vodenje)



# izzivi mobilne robotike...



|                                     | <b>fiksno vpeti manipulatorji</b>                | <b>mobilni roboti</b>                               |
|-------------------------------------|--|---|
| <b>lokalizacija</b>                 | enostavno<br>(fiksno baza, enkoderji v sklepih)  | teško   |
| <b>planiranje poti/trajektorije</b> | enostavno<br>(možne vse poti v delovnem območju) | teško<br>(hitrostne omejitve - vse poti niso možne) |
| <b>planiranje gibanja</b>           | teško<br>(veliko prostostnih stopenj - DOF)      | teško<br>(upoštevanje omejitev)                     |
| <b>vodenje gibanja</b>              | teško<br>(križne povezave tenzorja vztrajnosti)  | teško<br>(zaradi omejitev gladko vodenje ni možno)  |

# izzivi mobilne robotike...



- Omenjeni problemi (lokalizacija, planiranje, vodenje) so še zahtevnejši za **mobilne robote sestavljenih iz več teles**

**povezana vozila**



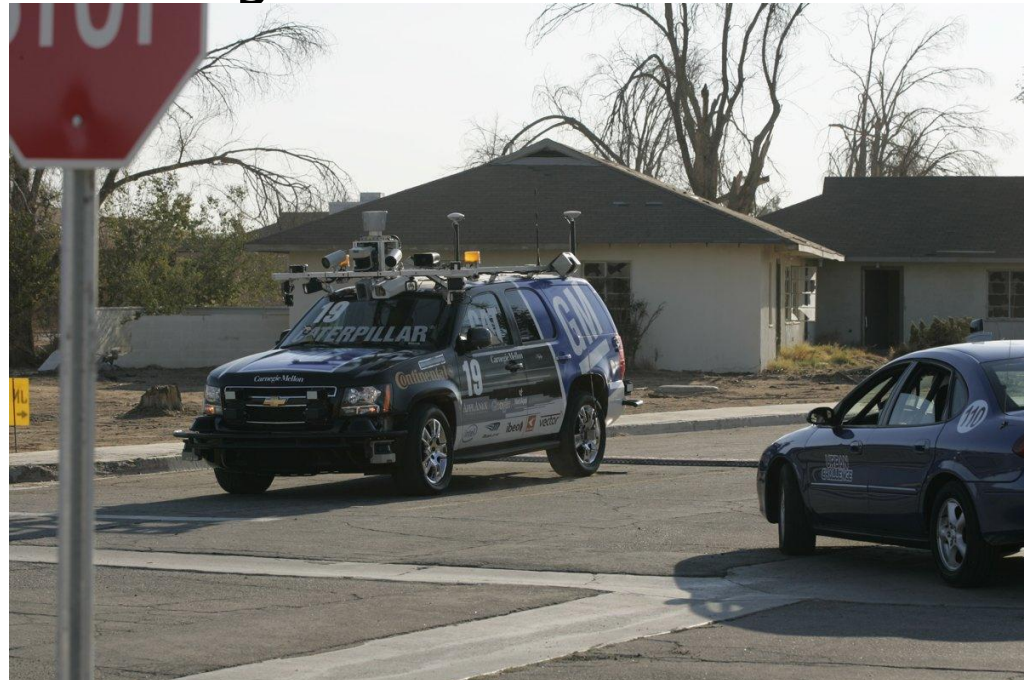
**mobilni manipulatorji**

**humanoidi**



**Avtonomni mobilni sistemi** morajo (med drugim, SLAM) morajo biti sposobni lokalizacije, planiranje gibanja in vodenja v nestrukturiranih, nepredvidljivih in dinamičnih okoljih.

Primer: Darpa Urban Challenge 2007



# Razvrstitev mobilnih sistemov - teren



- **Kopenski** mobilni sistemi (UGV - Unmanned Ground Vehicles). Večinoma kolesni pogon, goseničarji, nožni roboti...
- **Zračni** mobilni sistemi (UAV – Unmanned Aerial Vehicle)
- **Podvodni** mobilni sistemi (AUV- Autonomous Underwater Vehicles)
- **Vesolje**

# Razvrstitev MS- lokomocija



Načini premikanja – lokomocija:

- kolesni pogon (zelo pogosto v tehniki)
- goseničarji
- noge (dvonožni humanoidi, večnožni),
- krila,
- plovna konstrukcija,...

Naravni načini premikanja pogosto težavni za tehniko (tek, skakanja, plazenje). V tehniki je zelo pogost kolesni pogon, ki ga v naravi ni.

# Razvrstitev MS- namen uporabe



- *Servisni roboti* v strukturiranem okolju (okolja znane strukture: stene, predmeti pravilnih oblik):
  - transport (industrija, logistika)
  - čistilni roboti (sesalci in čistilci doma in v velikih stavbah)
  - strežni roboti (pomoč strankam, muzeji, trgovine)
  - varovanje (nadzor skladišč, zgradb)
  - zabava (robotski ljubljenci, robotski nogomet)
- *Terenski roboti* v nestrukturiranem okolju
  - raziskovalni roboti (vesolje, morje)
  - reševanje (vojaški, naravne nesreče)
  - pregled nevarnih okolij (minska polja, jedrski reaktorji,...)
  - kmetijstvo (obiralci, sajenje, košnja)
  - gradbeništvo
  - transport (natovarjanje, raztovarjanje,...)
  - vojska (izvidniška letala, avtonomni izstrelki)
  - ...



# Nekaj slik aplikacij MS



sesalec (iRobot Roomba)



čistilec bazenov (iRobot Verro 500 )



raznašalec zdravil, lažjih bremen (SpeciMinder)

Nekaj slik aplikacij MS



nadzorni robot (WoWee Rovio)



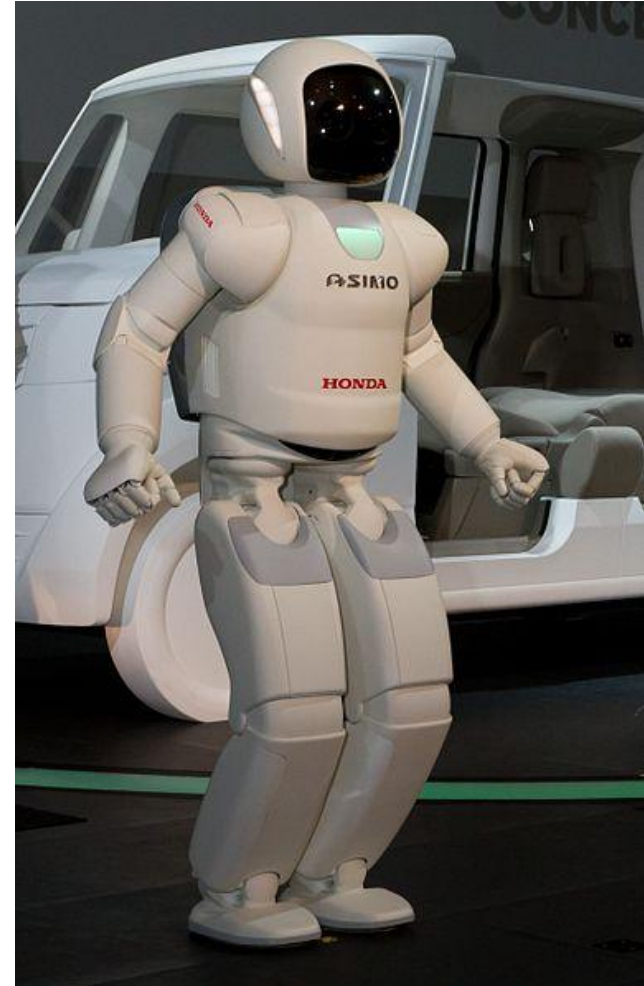
# Nekaj slik aplikacij MS



transportni robot (BigDog, Boston Dynamics)



humanoid (Asimo, Honda)



kvadrokopter (Parrot AR.Drone)



# Nekaj slik aplikacij MS



laboratorijski robot (Pioneer 3 AT)



kmetijstvo



reševalni robot (iRobot)



zabavni robot (Aibo)



# Zgradba MS = mehanika + elektronika



- mehanska konstrukcija, ogrodje robota, izvedba pogona
- aktuatorji (motorni pogon)
- senzorji (kontakta, hitrosti, zasuka, GPS, bližine,...)
- računalnik (PC, mikrokontrolnik)
- sistem napajanja (akumulatorju, sončne celice)
- elektronika (za pogon elektromotorjev, za komunikacijo,...)
- algoritmi za nižjenivojsko upravljanje (regulacija hitrosti, fuzija senzorjev, obdelava slikovne inf.,...)
- navigacija (ocenjevanje lege in planiranje premikov)
- komunikacija (s človekom, strojem)
- inteligenca (višji nivo vodenja, strategija, učenje,...)

# Motivacija za razvoj MS & MR



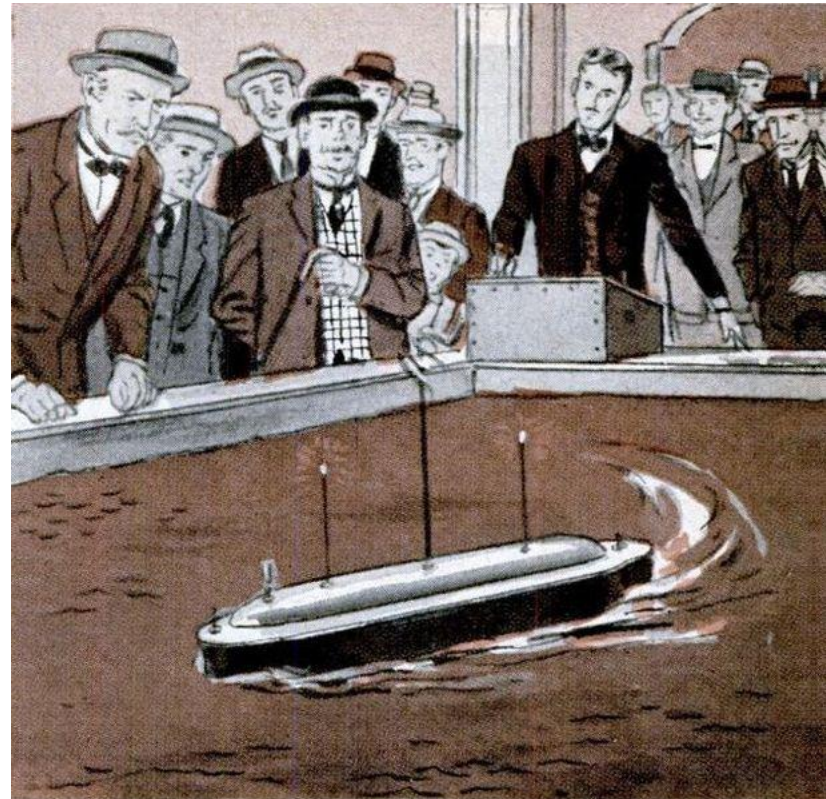
- Lenoba je gonilo napredka. Monotona in ponavljajoča dela želimo avtomatizirati.
- Dostop do nevarnih območij, do preveč oddaljenih (Mars) in nedostopnih območij (nanoroboti v medicini).
- Avtomatizacija, robotizacija ->
  - večja produktivnost
  - višja kvaliteta
  - manjši stroški dela



# Kratek zgodovinski pregled



- 1898 Nikola Tesla, demonstriral brezžično radijsko vodeno plovilo na sejmu elektronike Madison Square Garden v NY. Verjetno prvi mobilni robot.





# Kratek zgodovinski pregled



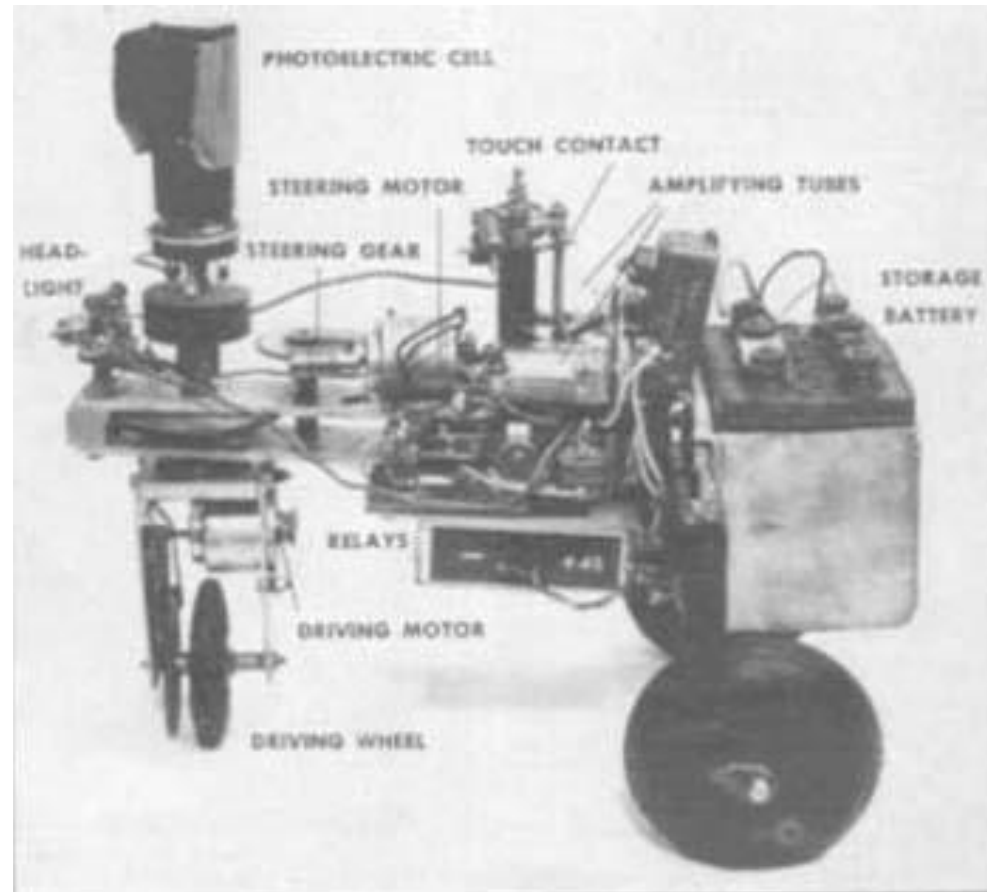
- okoli 1940, med drugo svetovno vojno, so Nemci razvijali avtopilotske rakete (projekt V1 in V2). (vodenje, giroskopi+pospeškometri)
- 
- Američan Norbert Wiener je razvijal sistem za avtomatsko usmerjanje in proženje protiletalskega topa, ki je vseboval radar, analogni računalnik in algoritem.



# Kratek zgodovinski pregled



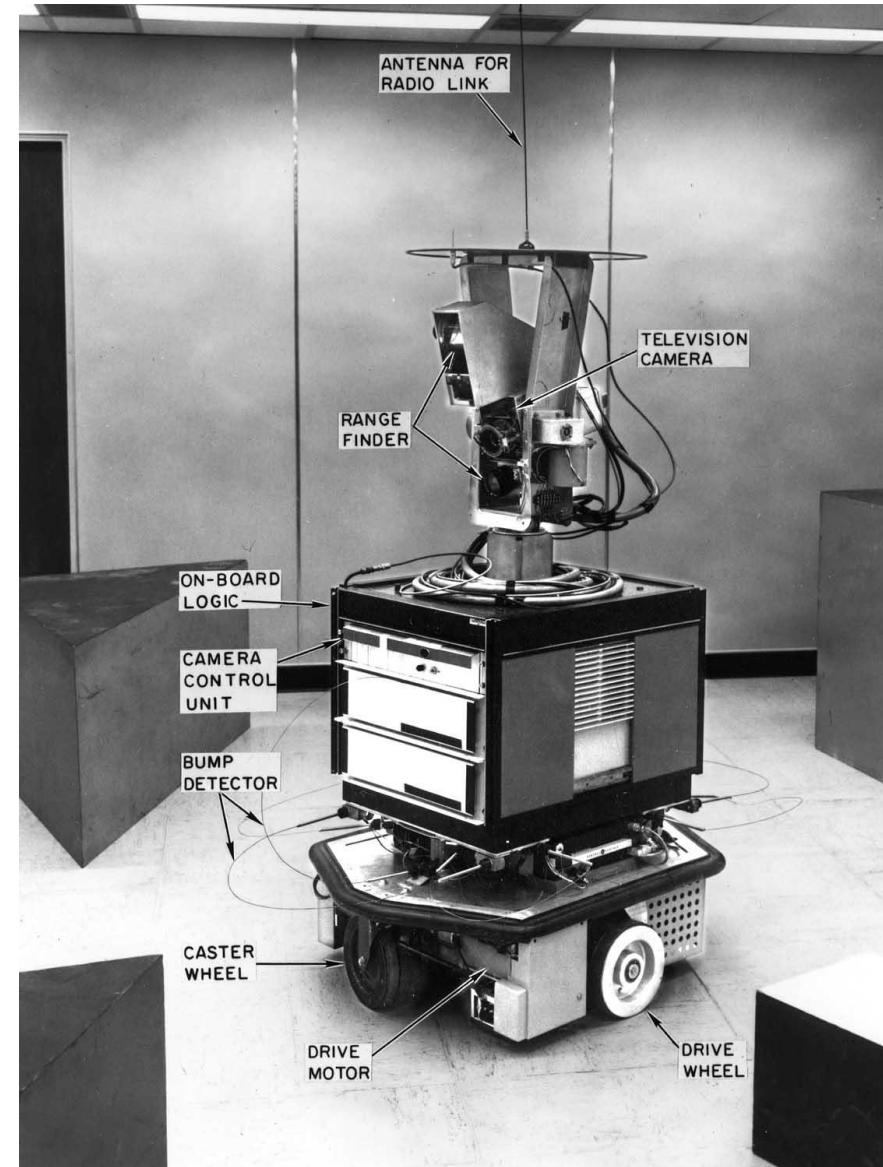
- 1953 je W. Grey Walter razvil elektronsko želvo avtonomnega robota, ki je zaznaval svetlobo (fotocelica) in oviro (kontakt) ter znal poiskati izvor svetlobe in se izogibati oviram.



# Kratek zgodovinski pregled



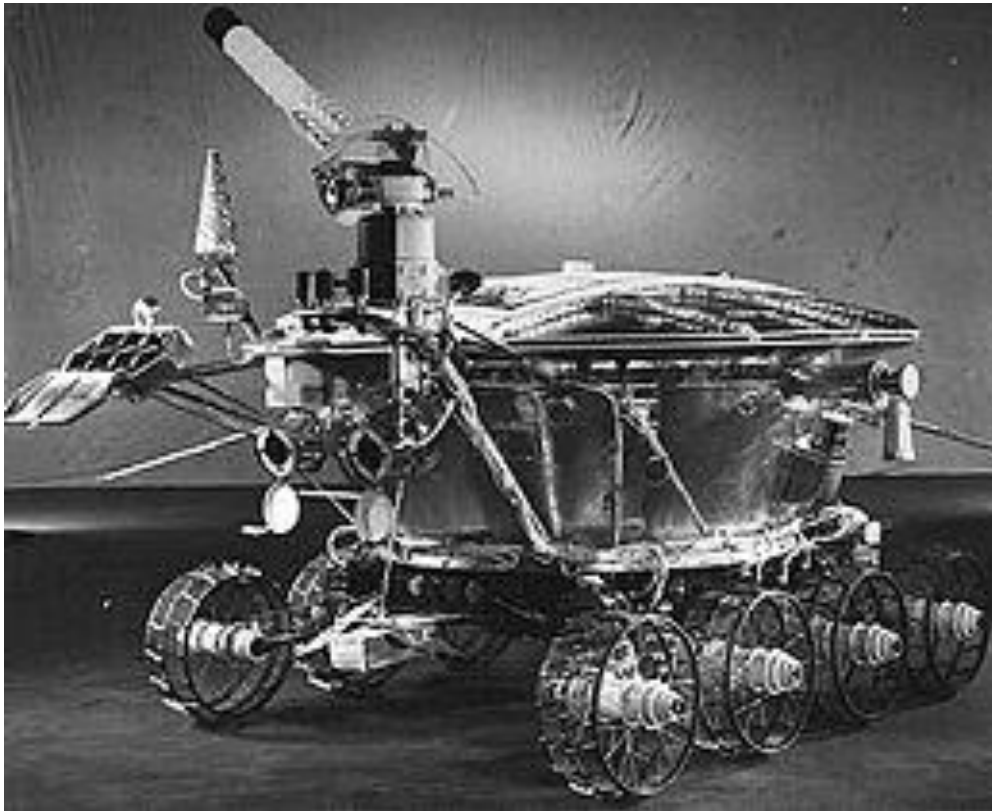
- 1966–1972 robota Shakey (Stanford raziskovalni center) Imel kamero, merilnik razdalje, senzor trka in brezžično povezavo. Bil je prvi mobilni robot, ki je znal planirati svoje akcije. Npr.: poiskati škatlo določene velikosti in barve ter jo premestiti na želeno mesto.



# Kratek zgodovinski pregled



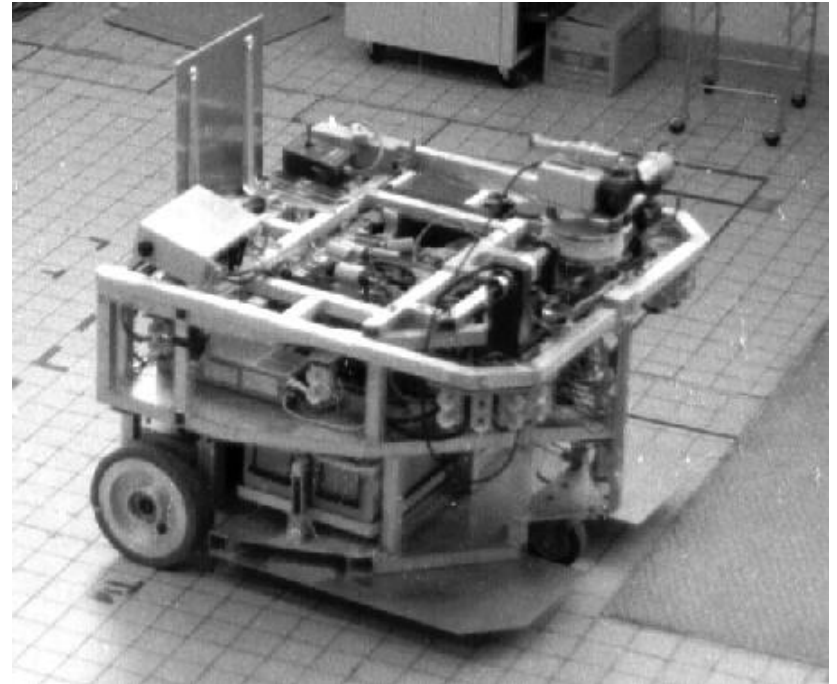
- 1970 je na luni pristalo prvo avtonomno vozilo (Lunokhod 1), ki je bilo daljinsko vodeno.



# Kratek zgodovinski pregled



- 1976 je NASA na Mars poslala dve avtonomni vesoljski sondi (Viking 1&2).
- 1977 so v Francoskem raziskovalnem centru LAAS naredili Hilare 1 mobilnega robota opremljenega z ultrazvočnim in laserskim merilnikom razdalje in kamero na robotski roki.

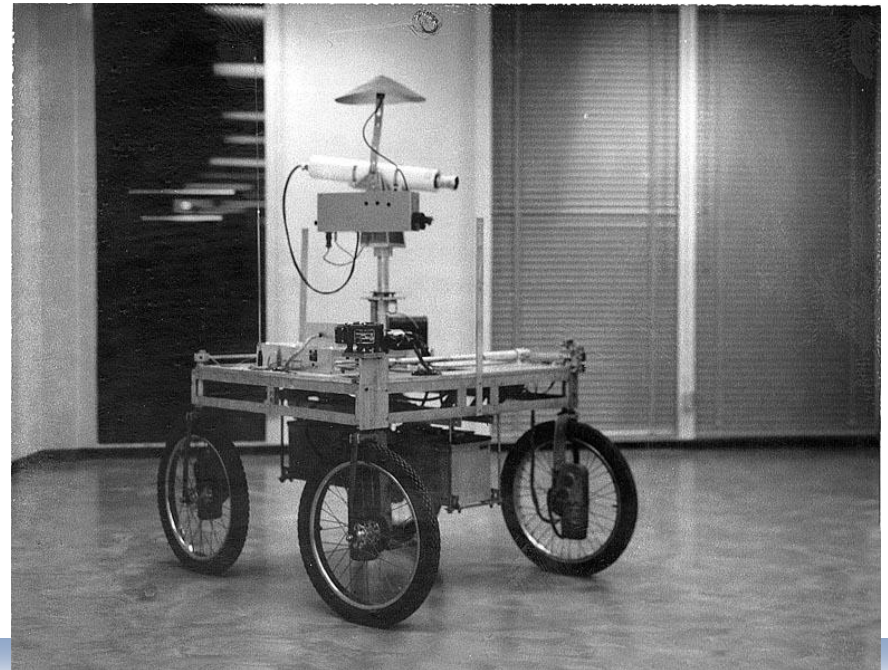




# Kratek zgodovinski pregled



- 1980 je bil razvit komercialni robot HERO, ki je bil predvsem namenjen zabavi in raziskovanju.
- Na Standfordu pa so naredili vozilo (Stanford Cart), opremljeno s kamero, s pomočjo katere je gradil zemljevid okolice.





# Kratek zgodovinski pregled



- razvoj je v sredini 1980 pa je naglo naraščal do danes, ko imamo več podjetij in raziskovalnih ustanov, ki tržijo in razvijajo mobilne robote.

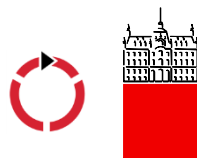
# Prihodnost ?



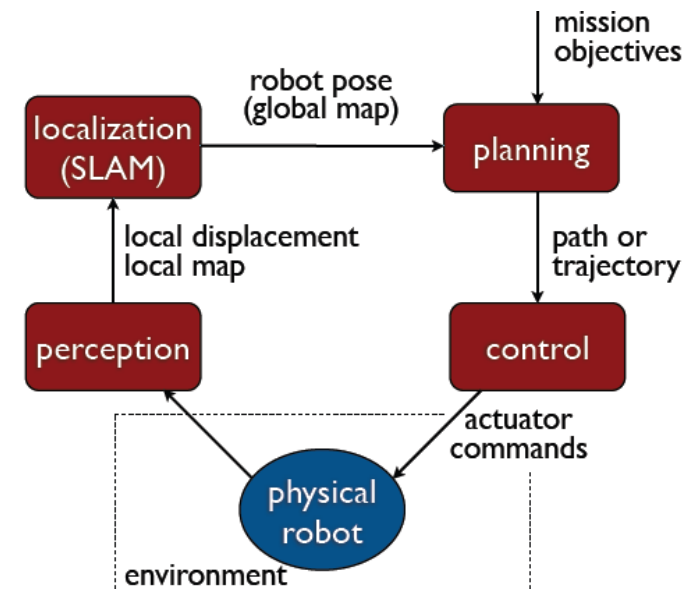
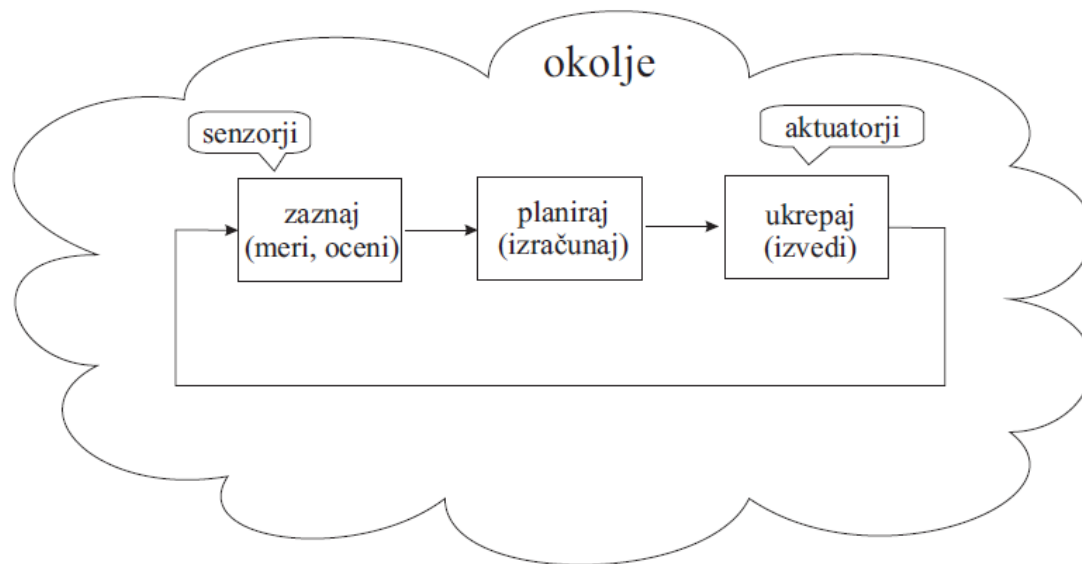
- v ZF filmih (Matrica, Transformerji,...)
- drzne napovedi iz preteklosti se niso uresničile (umetna inteligenca, okretnost)
- Po 2020 naj bi bili bodo roboti nepogrešljivi pri hišnih opravilih. Pomembno družinsko imetje, kot danes avtomobili.
- Po letu 2040, roboti sposobni abstrakcije, planiranja za opravljanje večine ročnih del podobno kot človek.



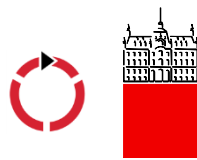
# Delovanje AMS, arhitektura



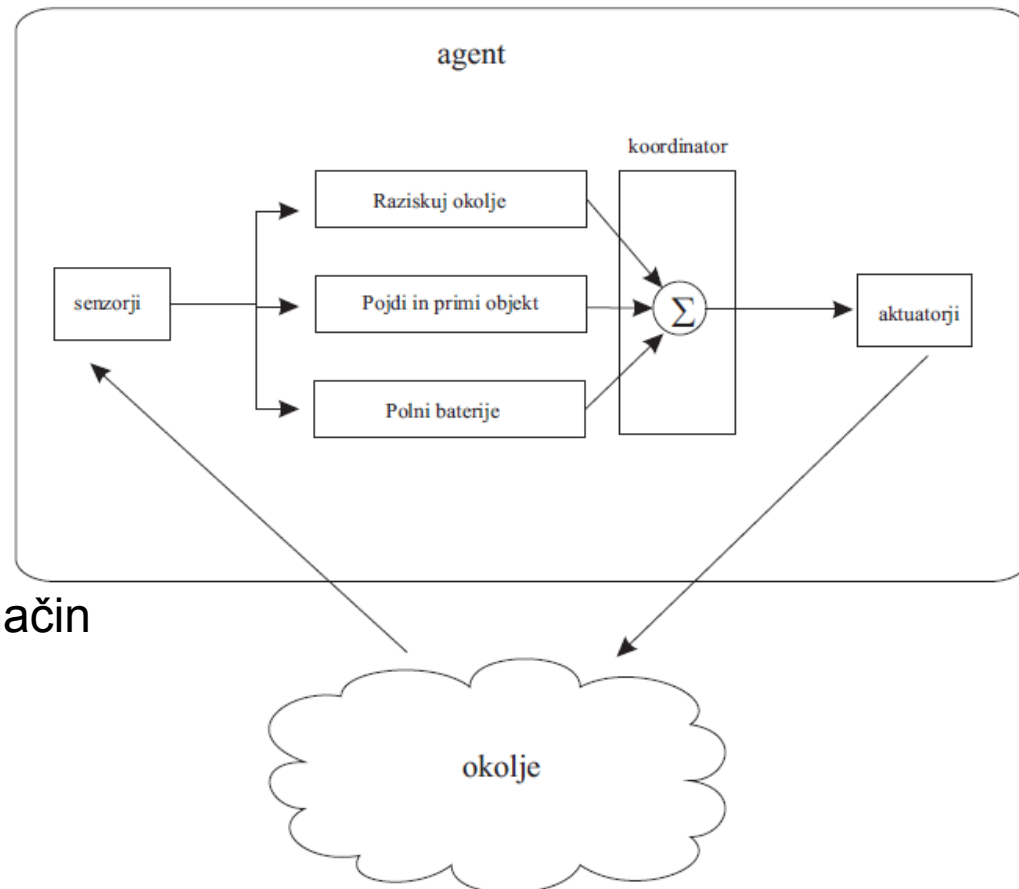
- Omogoča robotu opravljanje določene naloge
- SENSE-PLAN-ACT (kognitivni sistemi) (zaporedno oz. horizontalna struktura)
- Ko agent zazna okolico, nato s pomočjo internega modela sveta naredi plan oz. načrt za izvedbo akcije in akcijo izvede.
- Učinkoviti za znana okolja, rabijo natančen model okoja – nerobustnost.



# Delovanje AMS, arhitektura



- Paralelne (vzporedne ali vertikalne) strukture
- Princip zaznaj-deluj (SENSE-ACT), so brez simbolične predstavitve okolja in ne planirajo.
- Odzivni sistemi, njihova dejanja so reakcije na zaznave senzorjev.



Arhitekture:

- odzivne (“ne razmišljaj, reagiraj”),
- hibridne (“razmišljaj in deluj hkrati”)
- vedenjske arhitekture (“razmišljaj na način kot deluješ”).

# Vsebina predmeta AMS



- Agent in večagentni sistemi
- Modeliranje MS
- Planiranje
- Vodenje
- Senzorika v MS
- Nedeterminističnost, meritve, lokalizacija

Večinoma bomo obravnavali kolesne mobilne robote (WMR-wheeled mobile robot).



- **Avtonomni mobilni sistemi**, učbenik, Gregor Klančar (pdf)
- H. Choset, K. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. Kavraki, S. Thrun, **Principles of Robot motion, Theory, Algorithms and Implementation**, MIT Press, 2004.
- Thrun, S., Burgard, W., Fox, D.: **Probabilistic Robotics**, The Mit Press, 2006.
- itd.



# Nekaj primerov iz laboratorija...



## Naloge:

- zaznavanje okolice,
- iskanje zelenih ciljev,
- planiranje in optimiranje poti,
- avtonomno delovanje,
- navigacija.

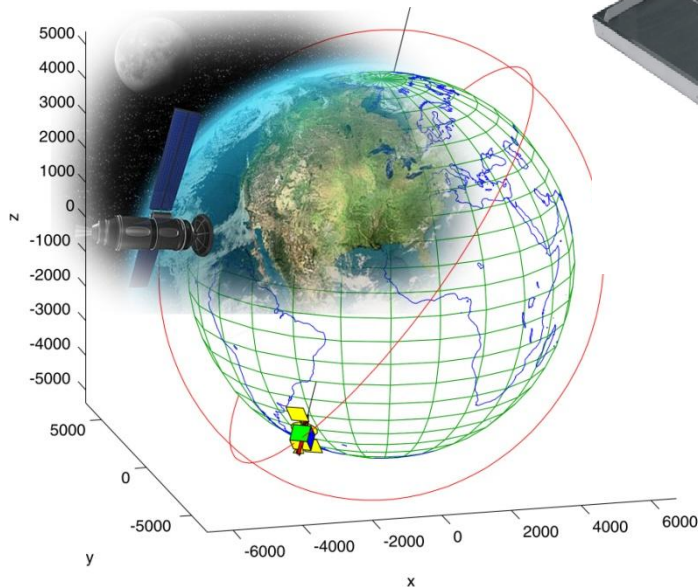
## Problematika pri načrtovanju:

- senzorika,
- modeliranje in simulacija
- algoritmi vodenja,
- razpoznavanje značilk v prostoru,
- lokalizacija,
- gradnja zemljevida.



## Področja:

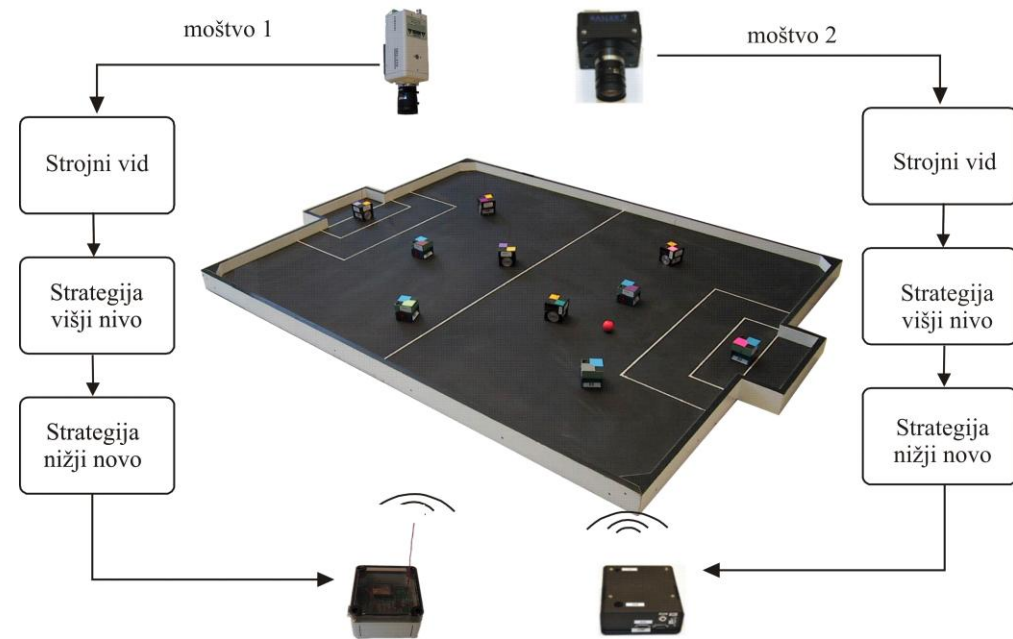
- robotski nogomet
- avtonomno vozilo
- brezpilotno letalo
- vesolje – satelitsko daljinsko zaznavanje





# Mobilni roboti, robotski nogomet

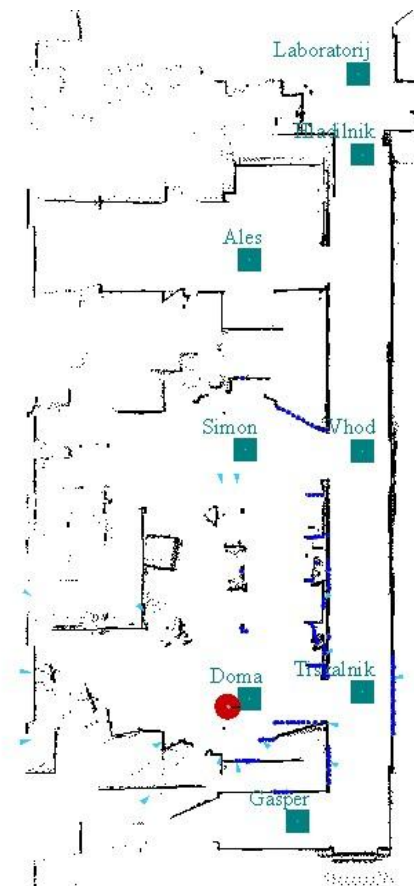
- Avtonomna igra, roboti sami opazujejo igro, sprejemajo odločitve in izvajajo akcije.
- Vodenje skupine (večagentni sistem), načrtovanje strategije, sodelovanje med agenti
- Vodenje posameznega robota, planiranje poti, izogibanje ovir, modeliranje situacij, predikcija



11:11



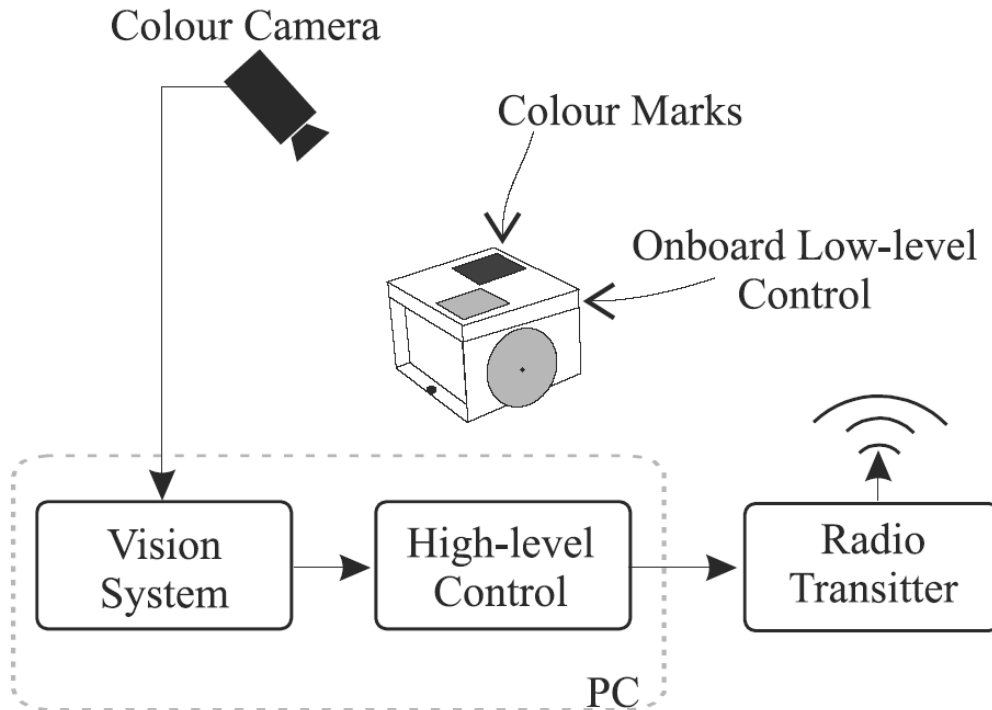
# Raziskovalni robot



# Vodenje WMR po trajektoriji



- Ključnih naloga v mobilni robotiki (industrija, roboti za strežbo, hišni roboti, težko dostopna ali nevarna območja, zabava,...)
- Robot z diferencialnim pogonom; senzorji za vodenje: enkoderji, laserski pregledovalnik, kamera



## dvo nivojska arhitektura:

- izvedba strojne opreme
- poenostavitev
- modularni pristop



# Praktični primeri

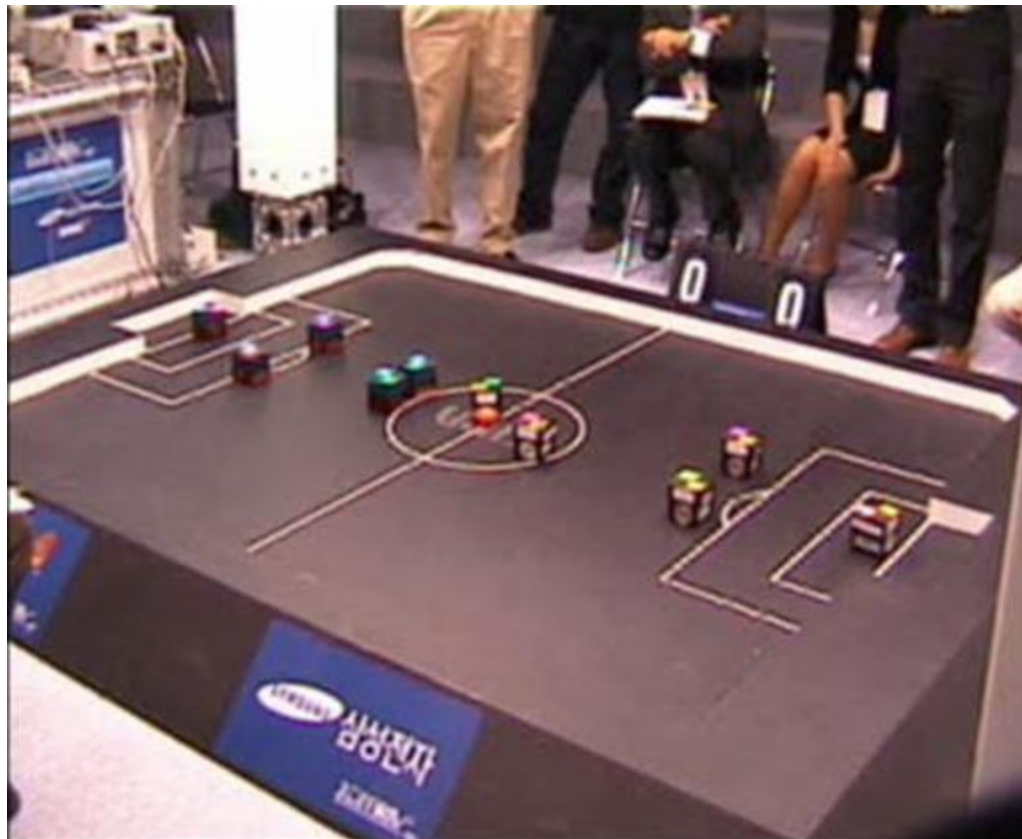
- Robotski nogomet
- Robotski balet
- Manipulacija predmetov brez prijema
- Izogibanje trkov
- Vožnja v formaciji
  
- Daljinsko zaznavanje Zemlje s sateliti





# Robotski nogomet

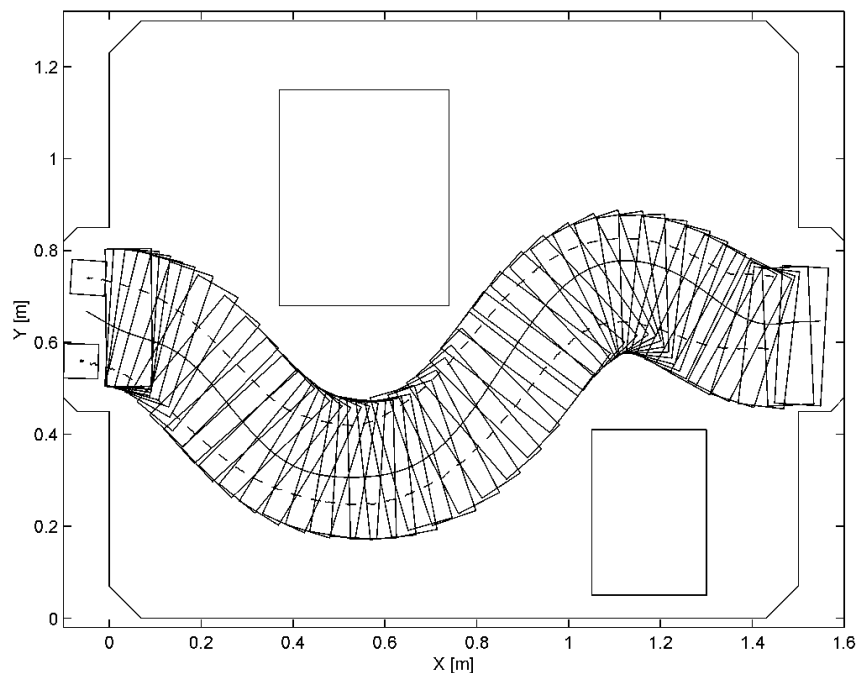
- Roboti kooperativno igrajo glede na sprogramirano strategijo
- Nekatera obnašanja vsebujejo sledenje trajektorijam (vratar, obramba,... )



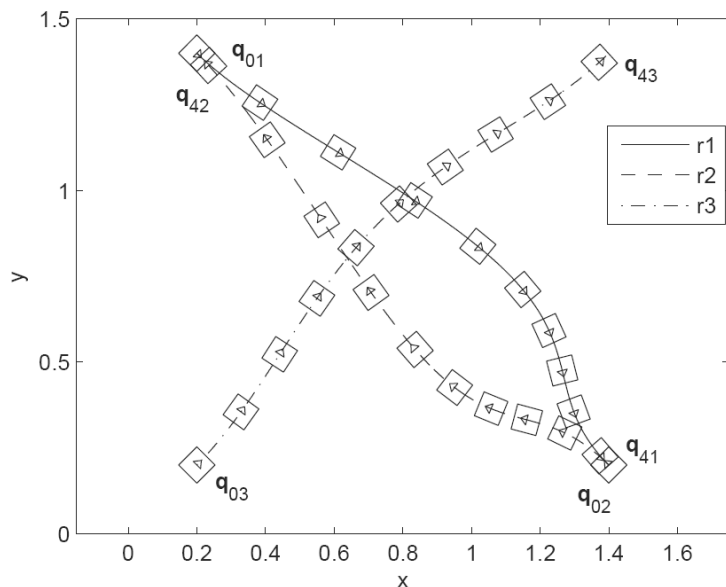
- **Roboti koordinirano plešejo**
- **Sledenje trajektorij z definiranim hitrostnim profilom**



# Manipulacija predmetov brez prijema



# Kooperativno izogibanje trkov

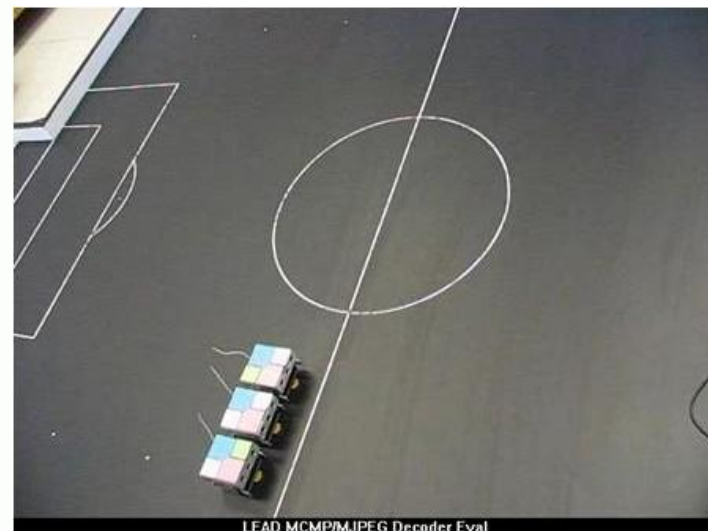
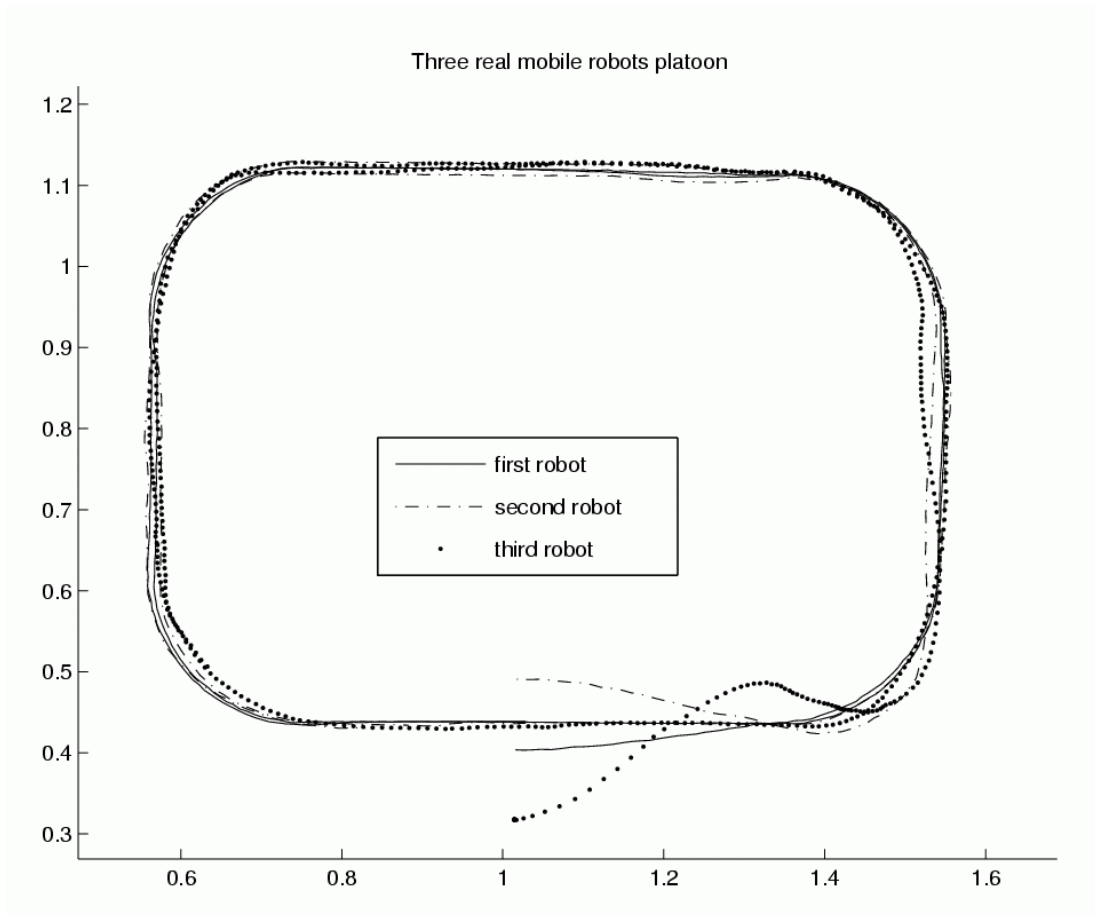


Optimizacija z omejitvami:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \sum_{i=1}^n s_i \\ & \text{subject to} \\ & d_s - r_{ij}(t) \leq 0, \quad \forall i, j, \quad i \neq j, \quad 0 \leq t \leq \max_i (T_{max_i}) \\ & v_i(t) - v_{max_i} \leq 0, \quad \forall i, \quad 0 \leq t \leq \max_i (T_{max_i}) \\ & a_i(t) - a_{max_i} \leq 0, \quad \forall i, \quad 0 \leq t \leq \max_i (T_{max_i}) \end{aligned}$$

# Vožnja v formaciji

Vodenje formacije (leader – followers)





# Daljinsko zaznavanje Zemlje s sateliti



Daljinsko zaznavanje (nizke orbite):

- slikovni senzor - kamera,
- senzori za določitev orientacije,
- lokalizacija,
- akuatorji za korekcijo orientacije,
- centralni računalnik, komunikacija...

