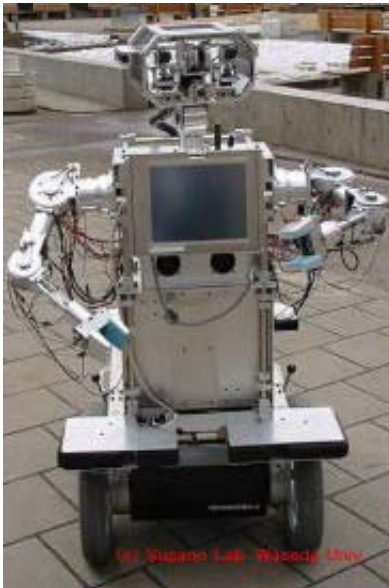


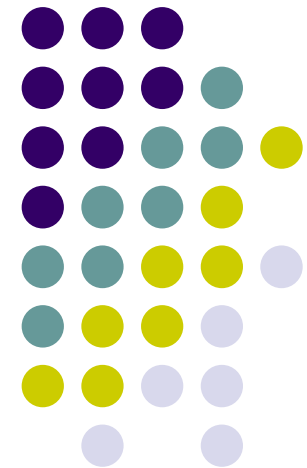
Lekcija 3: *Lokomocija nožnih robota*



Prof.dr.sc. Jasmin Velagić
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mobilna robotika

2012/2013



Lokomocija nožnih robota

- Mobilni roboti sa kotačima kreću se uglavnom po ravnoj podlozi, pri čemu se najčešće zanemaruje klizanje između robota i podloge.
- Postavlja se pitanje: **“Da li je moguće projektirati robote koji će se moći kretati kuda i čovjek, to jest kroz šume, neravne terene, ruševine, itd?”**.
- Kod mobilnih robota sa kotačima uspjehnost kretanja ovisi o pogonskom mehanizmu kotača.
- Za razliku od njih, kretanje nožnih robota ovisi o **broju nogu** i **načinu na koji se noge kreću** (mijenjanje poze).



Lokomocija nožnih robota

- Kretanje nožnih robota karakterizirano je **nizom dodirnih tačaka** između mobilnog robota i podloge.
- Ključne prednosti ove lokomocije uključuju **adaptibilnost, mogućnost manevriranja na neravnom terenu** (podlozi) i **sposobnost prolaska kroz otvore i ponore**.
- Također, ova vrsta lokomocije omogućuje rukovanje okolnim objektima sa velikom umješnošću.
- Izvrstan primjer za ovo je insekt balegar, odnosno buba, koji je sposoban kotrljati se poput lopte zbog vještih prednjih nogu.



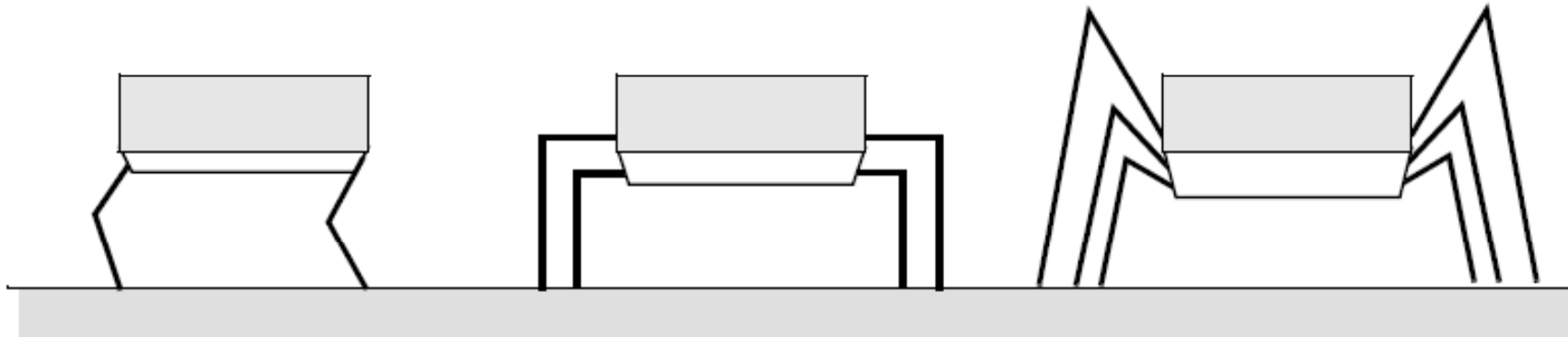
Lokomocija nožnih robota

- Loša svojstva nožnih robota:
 - **veliki broj stupnjeva slobode,**
 - **mehanička složenost,**
 - **složeno održavanje stabilnosti robota.**
- **Noga robota mora imati više stupnjeva slobode da bi mogla držati i nositi na sebi tijelo hodajućeg robota.**
- U nekim primjenama se koriste roboti koji mogu podizati i prenositi druge robote.
- Dodatno, dobra manevarska svojstva se mogu postići samo ako noge imaju dovoljan broj stupnjeva slobode kako bi se moglo djelovati silom u brojnim, različitim smjerovima.



Lokomocija nožnih robota

- Budući da je lokomocija nožnih robota biološki inspirirana, to je neophodno razmotriti ponašanje raznolikih živih bića.
- Postoje brojne, različite nožne konfiguracije koje su uspješno realizirane kod mnogih organizama (slika ispod).



Raspored nogu različitih živih bića

Lokomocija nožnih robota

- Krupne životinje, kao što su sisari i gmizavci, imaju **četiri noge**, dok insekti najčešće imaju **šest** ili **više nogu**.
- Neki sisari se mogu perfektно kretati i na samo dvije noge.
- Za razliku od drugih živih bića, čovjek se može kretati i skakutati **na samo jednoj nozi**.
- Ova posebna ljudska sposobnost manevriranja zahtijeva veoma složenu aktivnu kontrolu održavanja ravnoteže.
- Nasuprot njima, živa bića sa tri noge mogu postići **stabilno držanje** koje se može osigurati kada je njihov centar gravitacije unutar tronošca, kojeg formiraju noge sa podlogom.



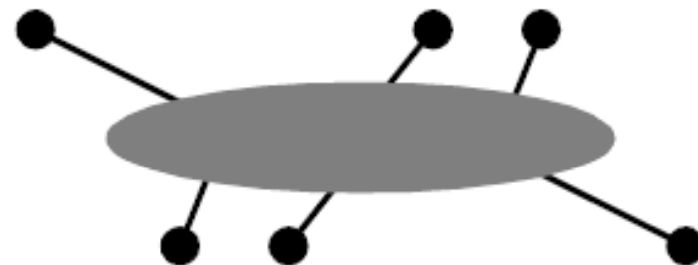
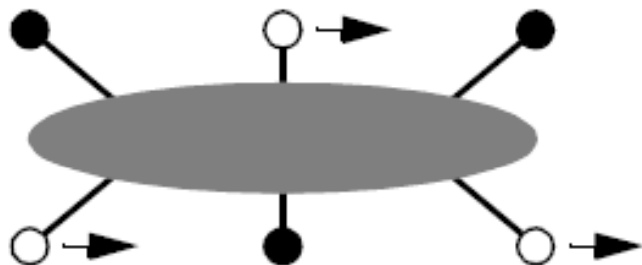
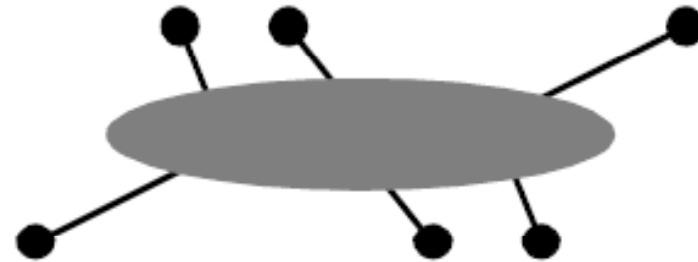
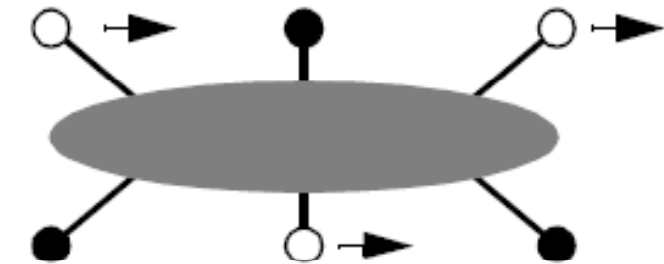
Lokomocija nožnih robota

- **Statička stabilnost** tronožne stolice je uspostavljena bez potrebe kretanja.
- Što se tiče robota, on mora biti sposoban **podizati svoje noge** da bi se mogao kretati.
- Da bi postigao statičko kretanje, robot mora posjedovati najmanje **šest nogu**.
- U takvoj konfiguraciji je moguće dizajnirati hod u kome su tronošci statički stabilni u dodiru sa podlogom cijelo vrijeme tokom kretanja.



Lokomocija nožnih robota

- Statičko kretanje robota sa šest nogu



Lokomocija nožnih robota

- **Insekti i pauci imaju sposobnost kretanja čim se rode.**
- Kod njih se problem ravnoteže tokom kretanja rješava veoma jednostavno.
- Sisari sa četiri noge ne mogu postići statičko kretanje, ali su sposobni veoma lahko stajati na nogama.
- **Ljudska bića nisu u mogućnosti stajati u mjestu uz zadržavanje statičke stabilnosti.**
- Kod bebe su potrebni mjeseci da bi mogla ustati i hodati, a za trčanje i skakanje, posebno na jednoj nozi, neophodno je znatno više vremena.



3.2. Stabilnost nožnih robota

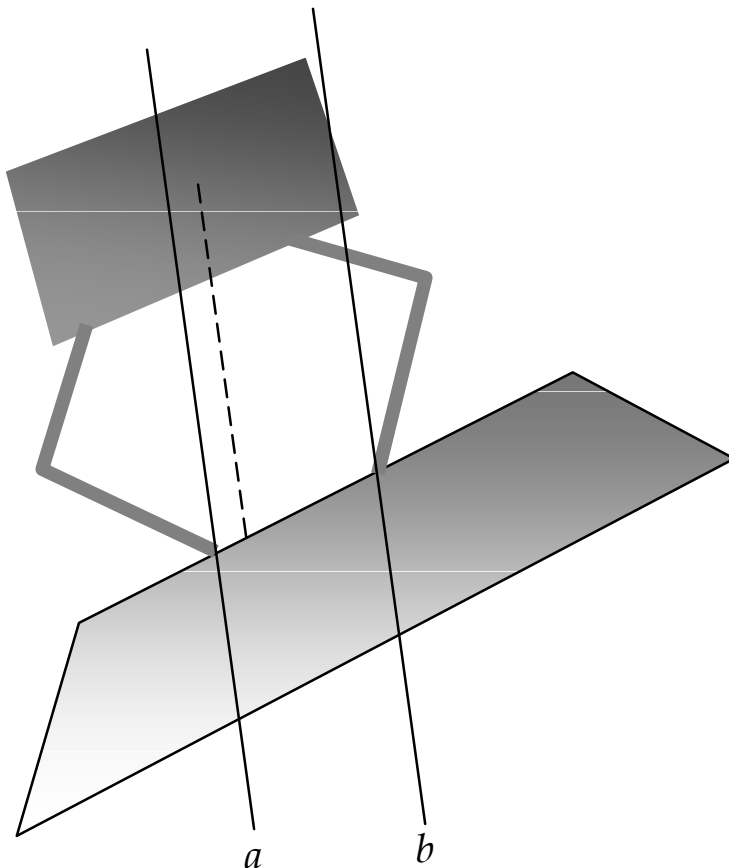
- Ako je nožni robot projektiran tako da se njegova ravnoteža održava u svakom trenutku, čak i kada su sve njegove noge ukočene, kaže se da robot pokazuje ***statičku stabilnost***.
- Formalnije iskazano, **statička stabilnost je održavanje težišta (centra gravitacije) robota uvijek unutar konveksnog područja iznad poligona kome su vrhovi tačke dodira nogu robota sa tlom.**



Stabilnost nožnih robota

Stabilnost dvonožnog robota

- Područje statičke stabilnosti je područje a - b .



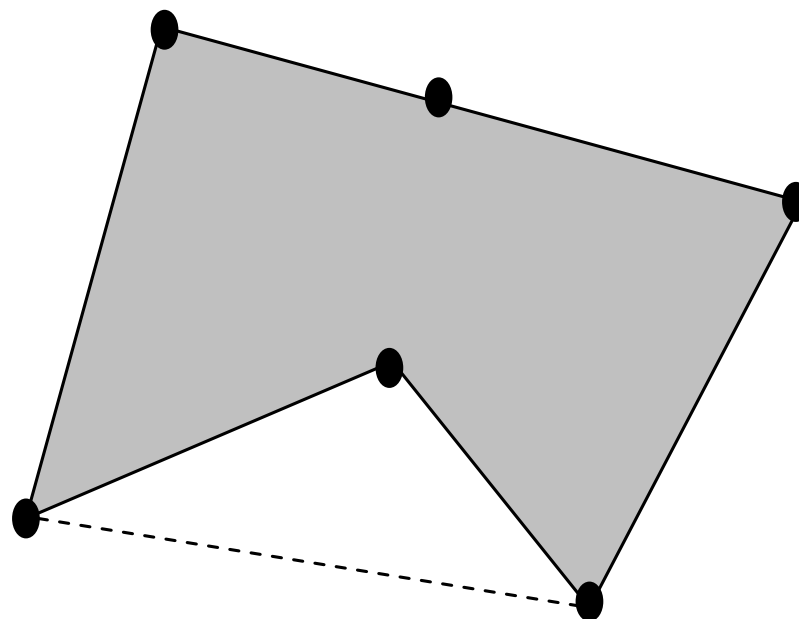
- Noge dodiruju tlo u tačkama a i b .
- Ako projekcija težišta robota (isprekidana linije) pada unutar segmenta a - b , robot ostaje statički stabilan.



Stabilnost nožnih robota

Stabilnost šestonožnog robota

- **Konveksno područje šestonožnog robota.**
- Ako se težište robota nalazi unutar konveksnog omotača, dobivenog konstrukcijom manjih konveksnih omotača koja sadrže sve vertikalne projekcije dodirnih tačaka sa podlogom, tada je robot **stabilan**.



Stabilnost nožnih robota

- **Glavna prednost statičke stabilnosti je da se nožni robot ne može srušiti usljed kašnjenja hoda nogu ili gubitka napajanja.**
- Statička stabilnost je mehanizam izbora za ogromnu većinu nožnih robota.
- Unutar statičke stabilnosti, ***rub stabilnosti*** je mjera trenutne stabilnosti robota i definirana je kao **minimalno rastojanje od vertikalne projekcije težišta robota do granice vertikalne projekcije konveksnog područja odgovarajućeg poligona.**



Stabilnost nožnih robota

- Ako težište robota može izaći izvan konveksnog područja poligona i kretanje robota se ostvaruje na upravljiv način, tada se za robota kaže da posjeduje ***dinamičku stabilnost***.
- Unutar dinamičke stabilnosti robot održava stabilnost upravljanjem kretanjem robota, modeliranjem i korištenjem inercije.
- Ovo ima za posljedicu potrebu za sofisticiranim dinamičkim modelom robotskog sistema i visoko razvijenim upravljanjem i procesom lokomocije.



Stabilnost nožnih robota

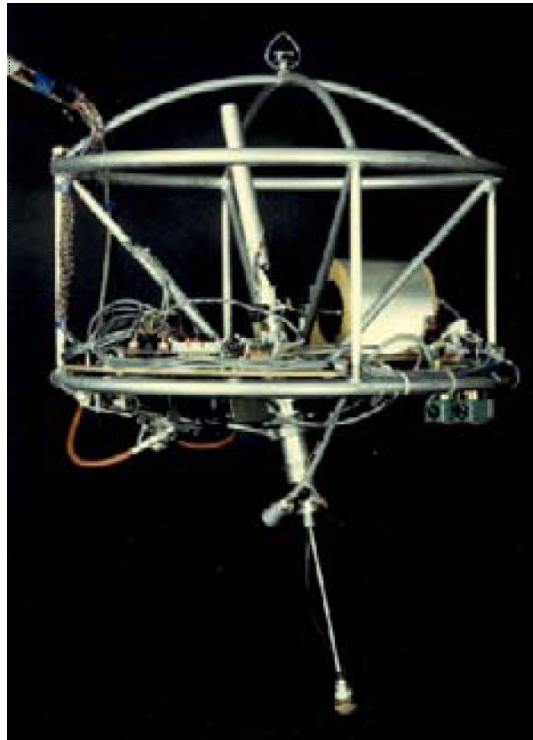
- Raibert je razvio brojne dinamički stabilne robote, uključujući jedno, dvo i četveronožne strojeve.
- Također je interesantan Honda robot (Asimo).



Iako je statička stabilnost lagana za održavanje, to je ograničena vrsta hoda robota i njegova gornja brzina.

Stabilnost nožnih robota

- Uz dinamičku stabilnost je usko povezan pojam **dinamički hod** kod koga se upravlja kretanjem robota dinamički da se održi ravnoteža.
- Vrlo ilustrativan primjer dinamičkog hoda je kretanje jednonožnog mobilnog robot.



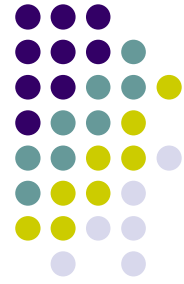
3.3. Broj nogu

- Nožni roboti su građeni sa 1, 2, 4, 8, pa čak i sa 12 nogu.
- Iako se najmanje jedna noga mora slobodno kretati da bi robot promijenio svoju pozu, za statičku stabilnost robota koja održava težište robota preko konveksnog područja poligona, potrebno je **minimalno četiri noge**, tri za formiranje poligona stabilnosti i jedna za kretanje.
- Ako robot pokazuje dinamičku stabilnost, **minimalan broj nogu je jedan**, kako tvrdi Raibert.
- Ovdje se pretpostavlja da se dodir noge sa tlom može modelirati kao kontaktna tačka.
- Također je moguće konstruirati robota sa širim ili dužim stopalima, što predstavlja robota sa većom stopalo-tlo kontaktnom površinom.



Broj nogu

- Iako je minimalan broj nogu zahtijevanih za statičku stabilnost, **četiri noge nisu idealan broj za sve primjene.**
- Ako statički stabilan robot ima samo četiri noge, tada njegovo kretanje može biti jednostavno.
- Moguće je kretanje jedne noge u vremenu, tako da robot mora pomaknuti svoju težinu kao dio hoda.
- Robot sa šest nogu može kretati više od jedne noge u svakom trenutku i ne mora imati plan za kretanje njegovog težišta kao odvojene komponente svoga hoda.



3.4. Izvedbe nogu

- Noga nožnih robota ima **dvije fiksirane tačke**, jedna na sastavu sa tijelom robota i druga na vrhu noge (stopalo).
- Kod nožnih robota obično je poželjno da se što je moguće više poveća područje unutar koga se stopalo može kretati.
- Za kretanje u trodimenzionalnom prostoru, neophodno je da minimalna konfiguracija nožnog robota sadrži zglobove koji joj omogućuju dovoljan broj stupnjeva slobode da bi stopalo obuhvatilo trodimenzionalnu dodirnu površinu s tlom.
- Fizički, većina robotskih zglobova posjeduje jedan stupanj slobode.

Izvedbe nogu

- Ovi jednostavni zglobovi se mogu kombinirati da se dobiju mnogo složeniji zglobovi, kao što su **loptasti zglobovi**.
- Iako se minimalno zahtijeva tri jednostavna zgloba za prekrivanje trodimenzionalnog prostora, stvarni radni prostor noge može se poboljšati korištenjem više od tri zgloba, i ako orijentacija dodira noge i podloge mora biti kontrolirana, tada se zahtijevaju dodatni zglobovi.
- Drugim riječima, zahtijeva se **minimalno tri stupnja slobode kretanja** jer je prostor kontakta noge i podloge trodimenzionalan.
- Da bi se dobio kvalitetniji hod izvodi se više od tri stupnja slobode.



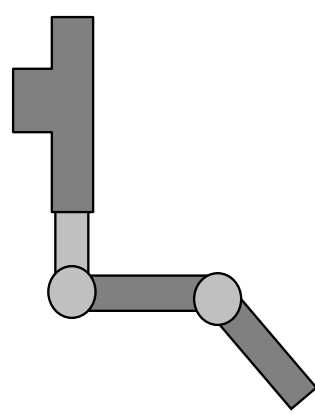
Izvedbe nogu

- Slično robotskim manipulatorima, robotska noga se može modelirati kao skupina krutih segmenata povezana zglobovima.
- Bazni segment je pričvršćen na tijelo robota i vrh noge može, ili ne mora, biti u dodiru s tlom.
- Jednostavni zglobovi robotske noge mogu biti translacijski i rotacijski.
- Rotacijski zglobovi uzrokuju rotaciju između dva kruta segmenta koje povezuje, dok translacijski proizvode translaciju.
- Složeniji zglobovi se mogu modelirati kombinacijom dvaju jednostavnih tipova zglobova.

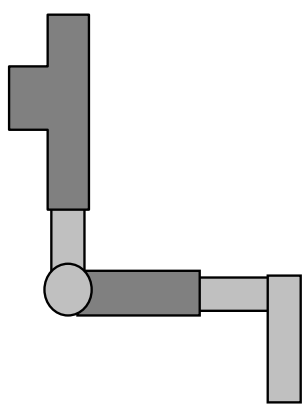


Izvedbe nogu

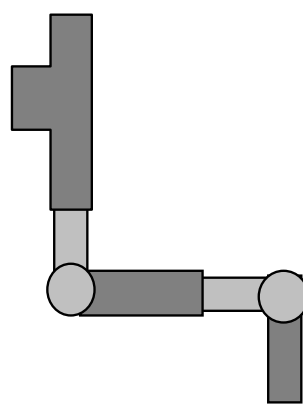
- Postoji osam osnovnih konfiguracija trodimenzionalnih robotskih nogu dobivenih kombiniranjem osnovnih tipova zglobova.



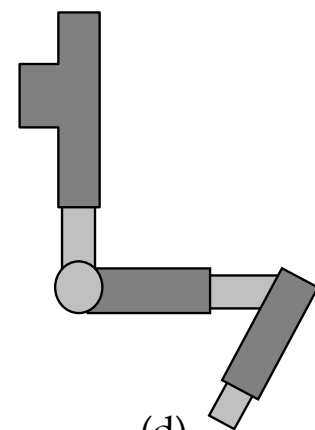
(a)



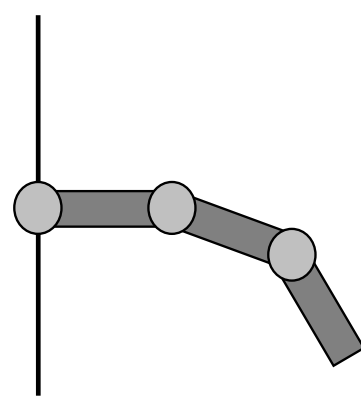
(b)



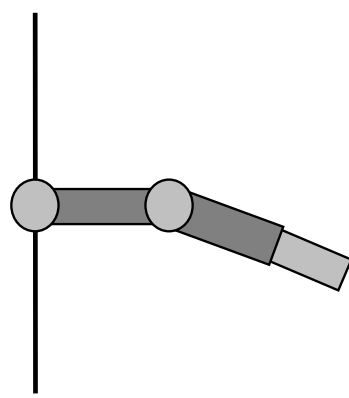
(c)



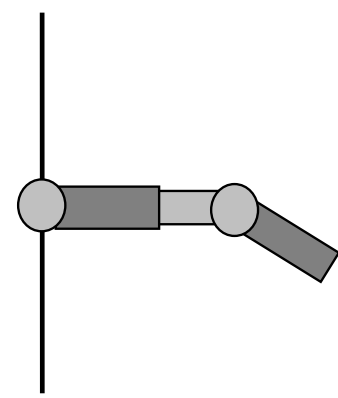
(d)



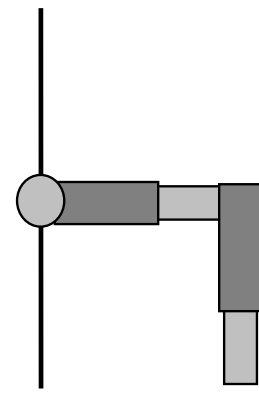
(e)



(f)



(g)



(h)

Izvedbe nogu

- Izvedbe jednostavnih nogu na temelju translacijskih i rotacijskih zglobova.
- Rotacijski zglobovi su označeni malim kružićima, dok su translacijski označeni svijetlim pravokutnicima.
- Kod struktura (a)-(d) translacijski zglobovi su u kontaktu s tijelom robota, za razliku od struktura (e)-(h) kod kojih su rotacijski zglobovi u kontaktu s tijelom robota



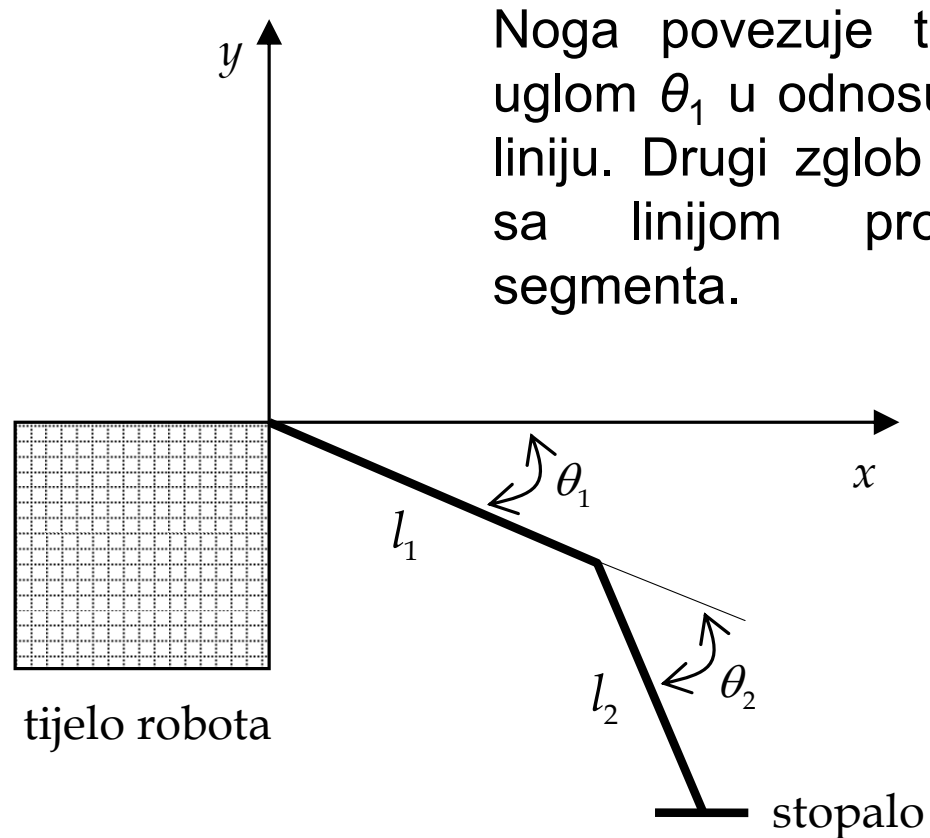
Izvedbe nogu

- Za dizajn pojedinačne noge, zadatak kretanja noge uključuje manipuliranje zglobovima tako da se omogućuje postizanje različitih pozicija u prostoru.
- Ovo predstavlja problem ***direktne kinematike*** robotske noge, formuliran kao: kako izračunati poziciju i orijentaciju vrha noge (stopala).
- Klasična formulacija ovog problema izražava se korištenjem homogenih koordinata za prikaz pozicije svakog segmenta noge i zatim računanje matrice homogene transformacije koja predstavlja transformaciju iz baznog koordinatnog sistema u koordinatni sistem pridružen vrhu noge, odnosno stopalu.



Izvedbe nogu

- Na sljedećoj slici prikazana je dvodimenzionalna noga sastavljena od dva rotacijska zgloba odvojena krutim segmentima dužina l_1 i l_2 .



Izvedbe nogu

- Postavljanjem ishodišta koordinatnog sistema u tačku dodira zgloba sa tijelom robota, pozicija stopala, kao funkcija od θ_1 i θ_2 (zglobovski uglovi), dana je sa:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = l_1 \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{bmatrix} + l_2 \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (*)$$

- Jednadžba (*) predstavlja jednadžbu direktne kinematike.
- Inverzna kinematika** noge uključuje određivanje uglova θ_1 i θ_2 , koji se zahtijevaju za mjesto stopala u tački (x, y) .

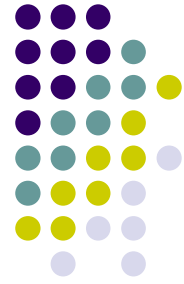
Izvedbe nogu

- Jednostavnim računanjem se dobiva:

$$\cos(\theta_2) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

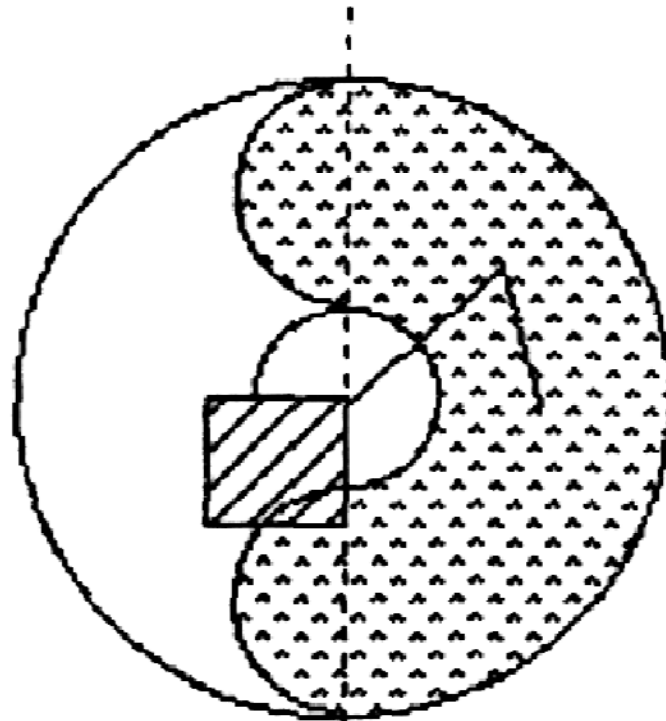
$$\cos(\theta_1) = \frac{(l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2))x + l_2 \sin(\theta_2)y}{x^2 + y^2}$$

- Rješenje inverzne kinematike, u općem slučaju, **nije jednoznačno**, može postojati više rješenja istog problema.
- Također, nisu sva rješenja (x, y) dohvatljiva za nogu.
- Za ove tačke se kaže da su van radnog prostora noge.



Izvedbe nogu

- Pretpostavljajući da je prvi zglob ograničen u području $|\theta_1| \leq \pi/2$ tada je $l_2 = l_1/2$.
- Rezultantni radni prostor noge je skiciran na slici.



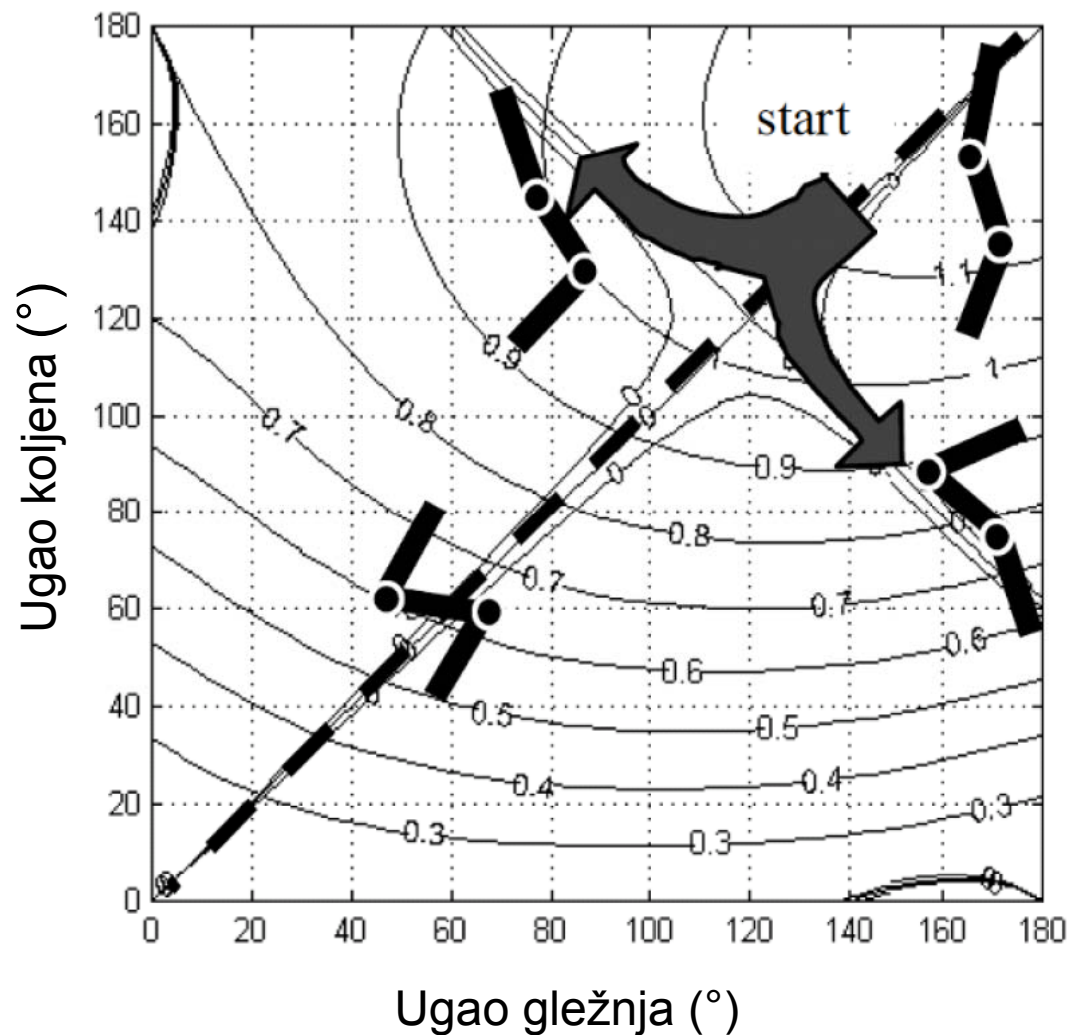
Radni prostor dvodimenzionalne noge

Izvedbe nogu

- Zbog postojanja više stupnjeva slobode dvozglavnog sistema kvazielastične operacije noge se, u principu, mogu realizirati kompenzirajućim neelastičnim operacijama dvaju zglobova.
- Svojstvo elastičnosti postiže se sinhroniziranim opterećenjem zglobova koljena i gležnja (članak).
- Za postizanje optimalne duljine skoka pri određenoj brzini trčanja minimalna krutost noge mora biti postignuta.
- Tokom skoka uglovi koljena i gležnja mijenjaju se sinhronizirano.
- U trčanju ugao koljena općenito doseže maksimalno savijanje (ili ispruženje) ranije nego ugao gležnja. Kod maratona kretanje rezultira sinhroniziranim promjenama oba ugla.

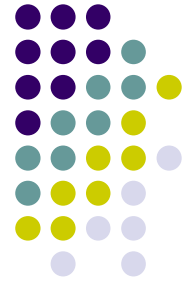
Izvedbe nogu

- Općenito, savijanje u jednom zglobu praćeno je izduženjem u drugom zglobu (slika ispod).



Izvedbe nogu

- Drugim riječima, **zglobovi se suprotstavljaju jedan drugom tokom kretanja.**
- U slučaju prevelikog ispruženja zglobovski **momenti mijenjaju predznak.**
- Tako visoko nestabilno stanje može nametnuti ozbiljne zahtjeve na upravljački sistem.
- Poznato je da bilo koji mehanički sistem ima gubitke usljed trenja. Jedan od načina smanjenja utjecaja trenja je poboljšanje zglobova.
- Trčanje čovjeka se generira cikličkim operacijama nogu.
- Horizontalna brzina stopala neminovno oscilira od nulte vrijednosti tokom kontakta sa podlogom do dvostruke brzine trčanja tokom faze leta.



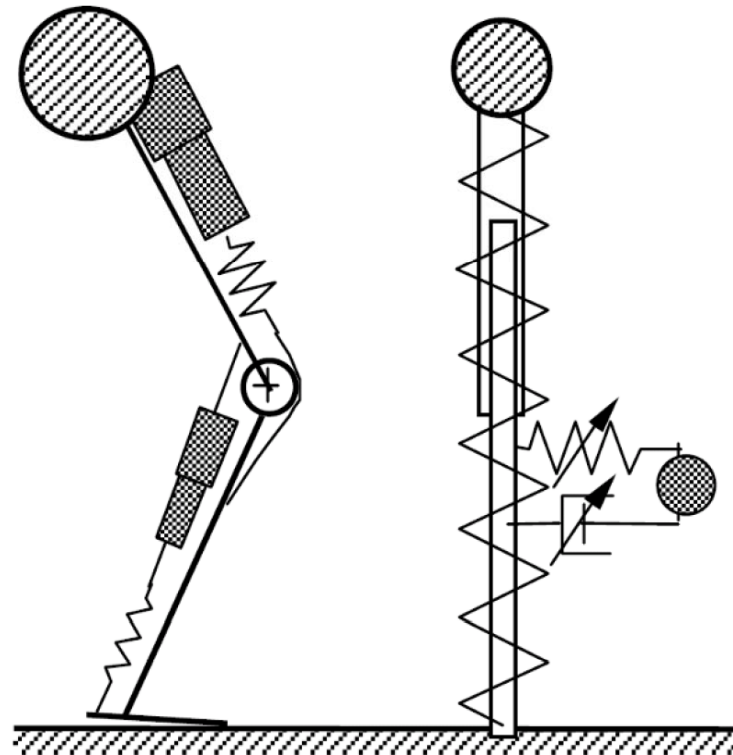
Izvedbe nogu

- U vertikalnom smjeru dolazi do nagle propagacije stopala prilikom slijetanja.
- Prilagođavanje brzine stopala, prilikom slijetanja, u trenutku kontakta sa podlogom predstavlja **veliki izazov za sisteme upravljanja.**
- Posebno se u aksijalnom smjeru zahtijeva da aktivna noga smanji svoju brzinu za pola dotadašnje vrijednosti.
- Isto tako, potrebno ubrzanje aktivne noge i smanjenje pohrane energije će povećati troškove lokomocije.



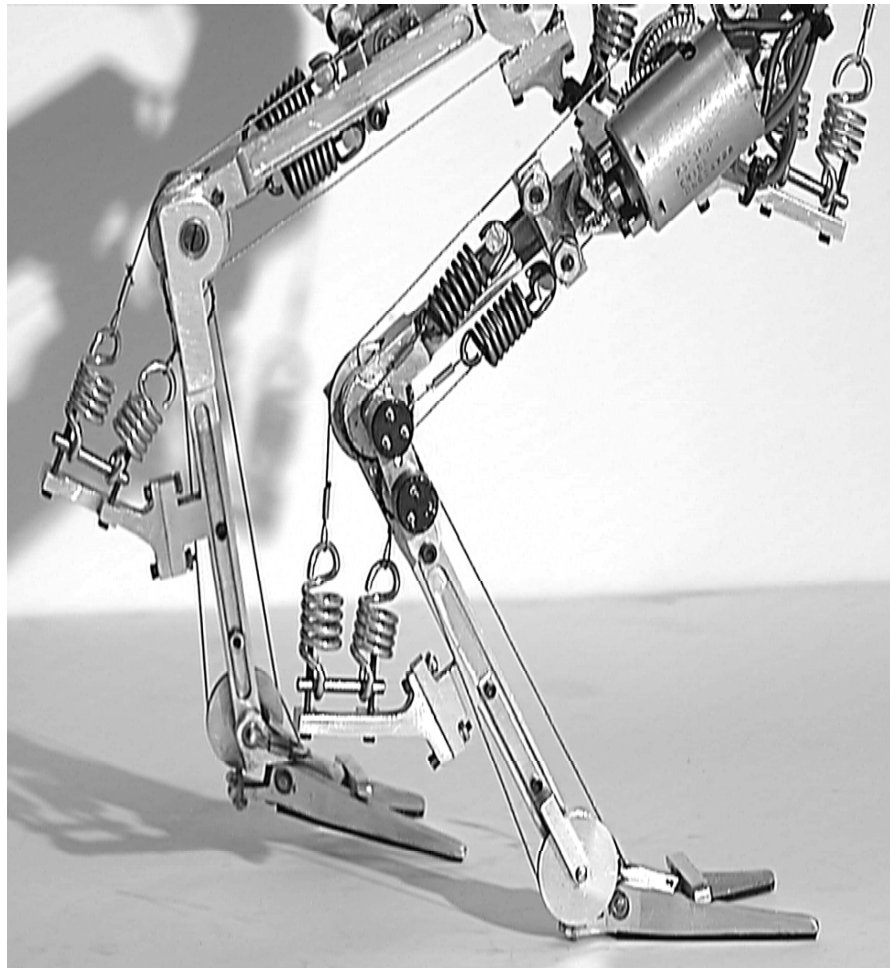
Izvedbe nogu

- Umjesto toga, trkač doživljava udar usljed naglog smanjenja brzine distalne mase.
- Kvalitet jastučića pete (ovisno o kvalitetu džona patike) i viskozno-elastična suspenzija mišića noge smanjuju amplitudu i vrijeme porasta reakcije sile tokom spuštanja noge.



Izvedbe nogu

- Fizička realizacija viskozno-elastične suspenzije klimavih segmenata.



Izvedbe nogu

- Ovo značajno prigušuje utjecaj neizbježnih gubitaka.
- Da bi se održala brzina trčanja, uz istovremeno eliminiranje gubitaka uslijed trenja, trkač mora uložiti dodatni napor kombinirajući kretanje različitih zglobova.
- Kako se glavni gubici javljaju u aksijalnom smjeru noge to je moguće kompenzirati gubitke aktivnim izduženjem noge.
- Trkač dodiruje podlogu sa savijenim segmentima u koljenu, time se smanjuje pritisak na sve najbliže zglobovske površine.
- Ovo izduženje opruga noge i koljena se može ostvariti pogonjenjem serijski povezanih opruga.





3.5. Upravlјivost noge

- Za zadanu poziciju stopala postavlja se pitanje: **Može li se nogom kvalitetno upravljati u okolini zadane pozicije?**
- Odgovor na ovo pitanje daje matrica Jacobiana, koja povezuje brzine stopala (vrha noge) sa ugaonim brzinama zglobova $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}$$

Upravlјivost noge

- Matricom Jacobiana predstavlja se problem diferencijalne kinematike:

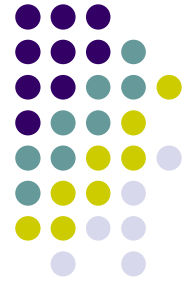
$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\theta) \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix}$$

- Ako je zadana željena trajektorija noge u radnom prostoru, može se izračunati inverzna matrica Jacobiana $\dot{\theta} = \mathbf{J}(\theta)^{-1} \dot{x}$, koja određuje odgovarajuće brzine zglobovskog prostora.



Upravljivost noge

- Kada noga izgubi jedan ili više stupnjeva slobode u radnom prostoru, kao što su granice radnog prostora noge, pojavljuju se tzv. **singulariteti**.
- Postojanje singulariteta u nekim konfiguracijama noge znači da je nemoguće pomicati nogu u odgovarajućem smjeru od singularne tačke.
- Singulariteti se javljaju na granici radnog prostora, ali se mogu pojaviti i unutar radnog prostora.
- **Matematički se singulariteti dobivaju izračunavanjem determinante matrice Jacobiana i njenim izjednačavanjem s nulom.**
- Kada je determinanta Jacobiana jednaka nuli, matrica Jacobiana gubi puni rang i singulariteti postoje.



Upravljalnost noge

- Za jednostavnu dvodimenzionalnu nogu determinanta Jacobiana iznosi:

$$\det(\mathbf{J}(\theta)) = l_1 l_2 |\sin \theta_2| = 0$$
$$\Rightarrow \theta_2 = 0 \text{ ili } \pm \pi$$

- Fizički ovi singulariteti odgovaraju ispruženom ili zgrčenom položaju noge.

3.6. Direktna i inverzna kinematika 3D prostora

- Do sada je razmatran problem direktne i inverzne kinematike u 2D prostoru, budući da je stanje noge definirano njenom pozicijom (x, y) i orijentacijom θ .
- U 3D prostoru zahtijeva se **šest skalarnih parametara** za prikaz stanja noge, tri za poziciju i tri za orijentaciju.
- Translacija i orijentacija u 3D prostoru postaju prilično glomazne ako se uzima razdvajanje pozicije i orijentacije.
- Mnogo efikasnije rješenje predstavlja upotreba **homogenih koordinata** za prikaz tačaka i homogene transformacije za prikaz transformacije između dva koordinatna sistema, odnosno za prikaz pozicije i orijentacije, općenito.



Direktna i inverzna kinematika 3D prostora

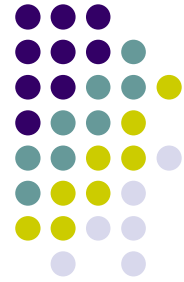


- Ovo omogućuje da se obje transformacije mogu izraziti uniformno kao produkt matrica, kao i višestruke transformacije izračunate matričnim produktom.
- Tačka $P=(x_1,x_2,x_3)$ u homogenim koordinatama može se predstaviti tačkom $P_h = [x_1,x_2,x_3,1]^T$.
- Transformacija tačke P u tačku $P'=(y_1,y_2,y_3)$ može se ostvariti kombinacijom matrica rotacije i translacije:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = (p_x, p_y, p_z)$$

Direktna i inverzna kinematika 3D prostora



- U zapisu homogenih koordinata:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Korištenjem matrice homogene transformacije T dobiva se:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{TP}$$

gdje je:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Direktna i inverzna kinematika 3D prostora

- Pretpostavimo da je jedan koordinatni sistem pričvršćen na stopalo noge i drugi na tijelo mobilnog robota.
- Tada postoji homogena transformacija T koja preslikava tačke koordinatnog sistema stopala u tačke koordinatnog sistema tijela robota.
- T će biti funkcija zglobovskih uglova i segmenata koji sačinjavaju nogu.
- Određivanje matrice T je proces uspostavljanja direktne kinematike noge.



Direktna i inverzna kinematika 3D prostora

- Ako koordinatni sistem pričvršćen na stopalo ima ishodište u vrhu noge tada se problem inverzne kinematike svodi na rješavanje sljedeće matrične jednačbe:

$$\mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

za neku kombinaciju zglobovskih uglova, gdje je (x, y, z) željena pozicija noge izražena u koordinatama tijela robota.



3.7. Hod nogu i upravljanje hodom

- Većina robotske literature, gdje se obrađuje hod robota, ima svoje ishodište u literaturi iz bioloških nauka.
- Koračanje hodajućih robota može se rastaviti u sinhronizirane korake svake noge.
- Pri tome se uočavaju dvije faze: **prijelazna faza**, u kojoj noga nije u dodiru s tlom, i **faza potpore**, u kojoj postoji dodir.
- Vrijeme potrebno za kompletiranje koraka poznato je pod imenom **vrijeme ciklusa**.



Hod nogu i upravljanje hodom

- Postoje dvije vrste hoda:
 - **Periodički**
 - **Neperiodički.**
- **Neperiodički hod** je svojstven biološkim sistemima koji hodaju neravnim tlom, dok je **periodički hod** svojstven sistemima koji idu ravnim tlom.
- Muybridge (1957) razlikuje osam različitih periodičkih hodova četveronožaca po ravnom tlu.



Hod nogu i upravljanje hodom

Periodički hod četveronožaca:

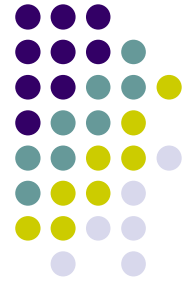
- **Sporo koračanje** (uključujući gmizanje kao specijalan slučaj). Jedna noga se kreće u jednom trenutku. Gmizanje je jedini statički stabilan hod.
- **Umjeren hod** (konjski hod). Hod brži od koračanja. Postoji naizmjeničnost između jedne i druge noge u hodu.
- **Kas.** Držanje je osigurano dijagonalnim rasporedom para nogu.
- **Brzi hod.** Držanje je osigurano lateralnim rasporedom parova nogu.
- **Lagano galopiranje.**



Hod nogu i upravljanje hodom

Periodički hod četveronožaca:

- **Galop.** Postoje dvije vrste galopa: linijski i rotacijski galop. Kod linijskog galopa noge se pomiču linijski duž tijela. U rotacijskom galopu noge se pomjeraju ciklički oko tijela.
- **Rikošeto.** Kretanje koje se sastoji od sekvence podskakivanja, skakutanja, skoka u zrak ili preskakanja. Ovo kretanje je svojstveno australskim torbarima, naprimjer, kengurima.

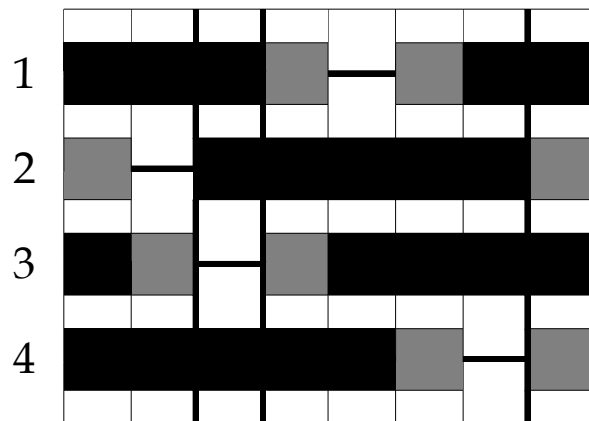


Hod nogu i upravljanje hodom

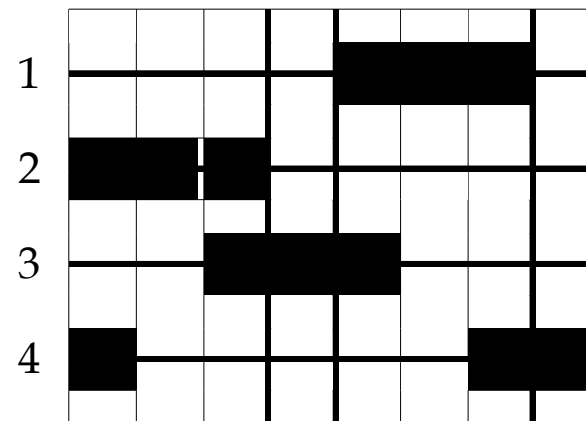
Periodički hod četveronožaca:



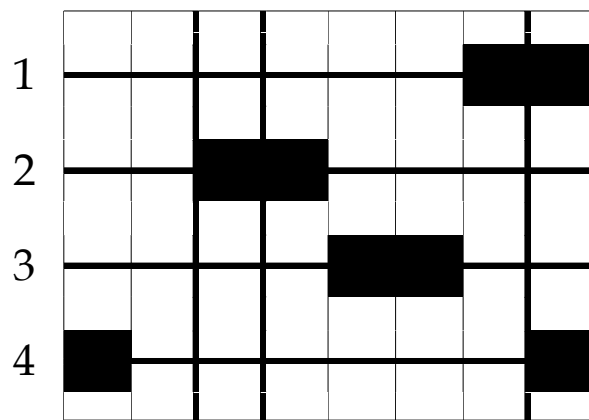
49/66



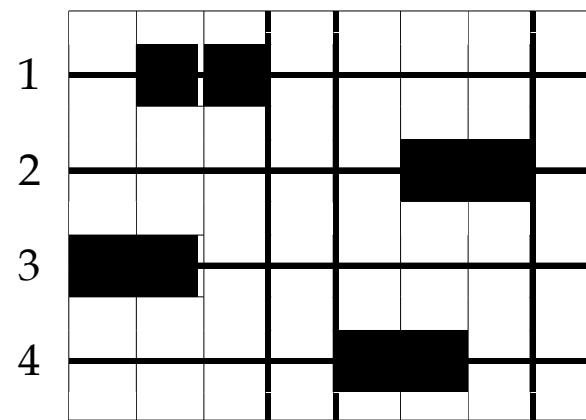
Koračanje i puzanje



Umjeren hod



Kas



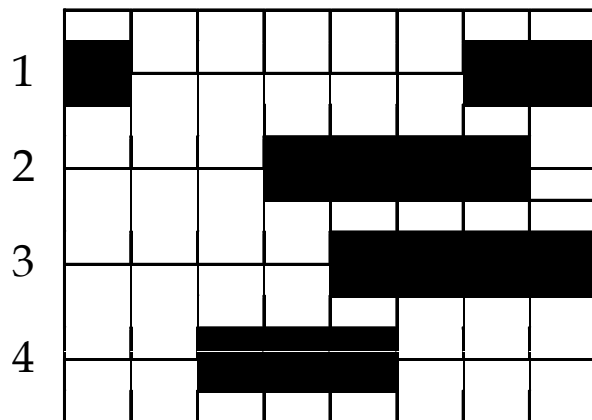
Brzi hod

Hod nogu i upravljanje hodom

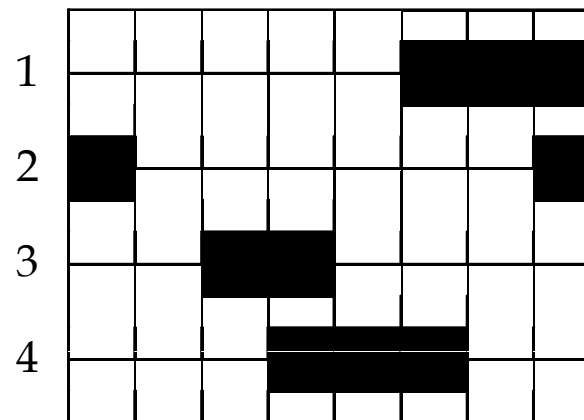
Periodički hod četveronožaca:



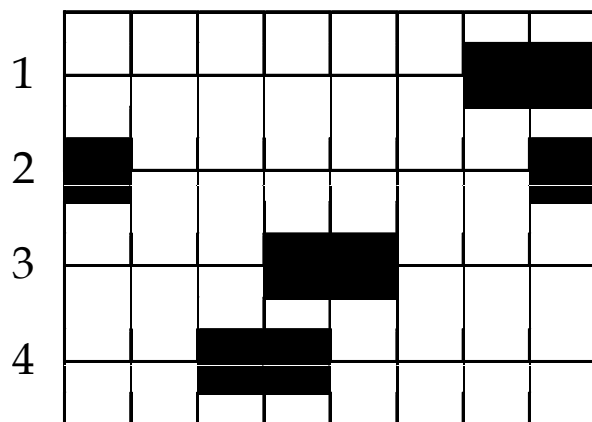
50/66



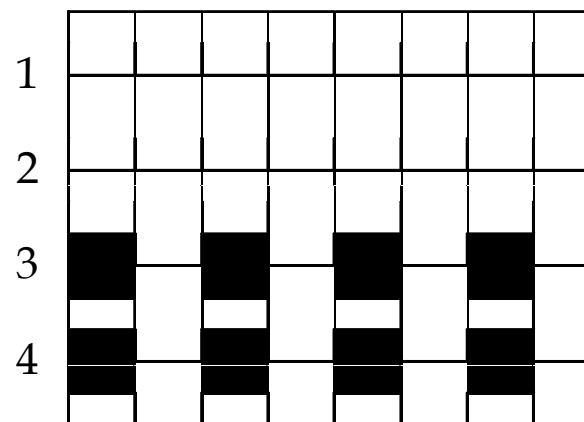
Lagano galopiranje



Linijski galop



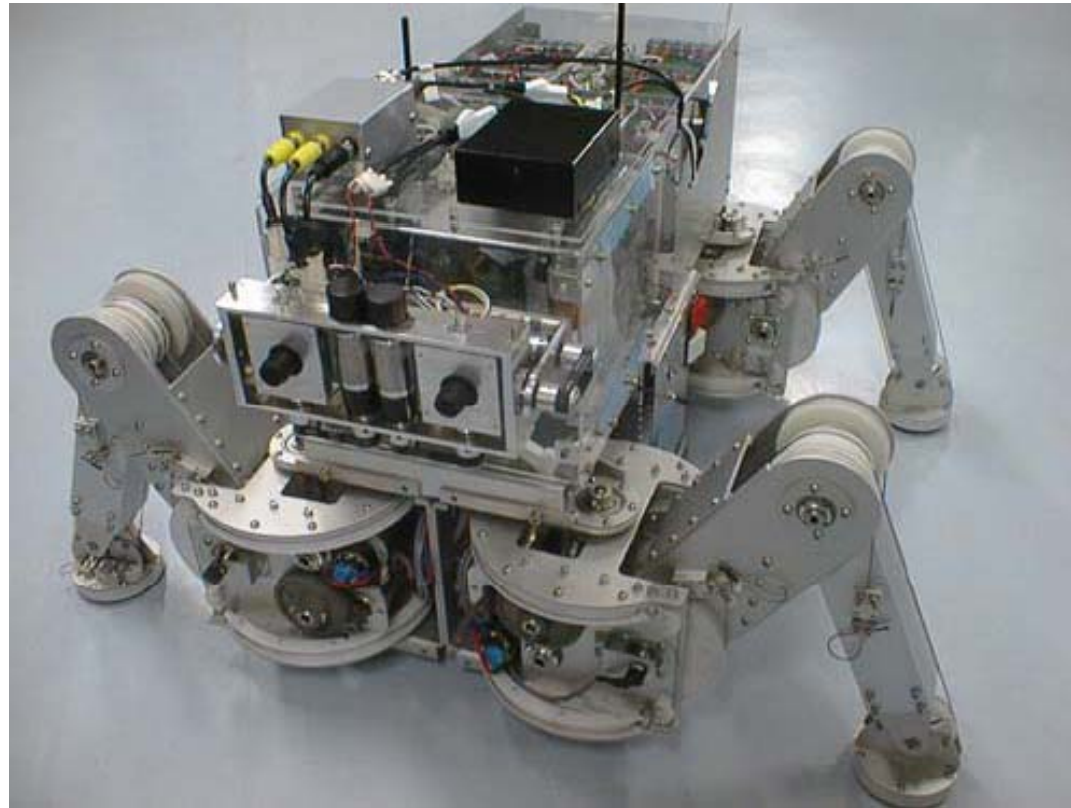
Rotacijski galop



Odskakanje

Hod nogu i upravljanje hodom

- Primjer realizacije četveronožnog mobilnog robota.



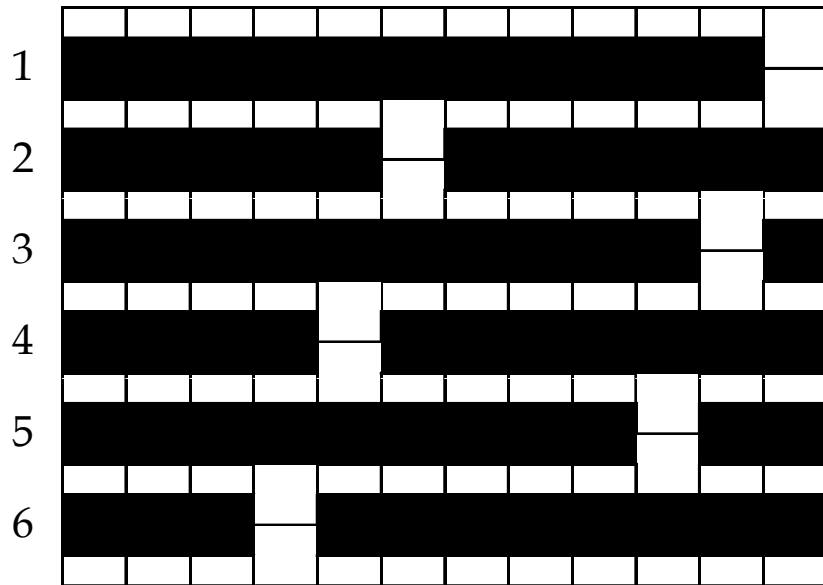
Hod nogu i upravljanje hodom

- Postoje dvije strategije za predviđanje rasporeda nogu tokom kretanja.
- Jedna strategija minimizira broj kretnji tijela, a druga preferira pomicanje centra mase kako bi se maksimiziralo područje stabilnosti robota.
- Kod robota sa šest nogu postoje dvije vrste hoda: **valni** i **jednako-fazni** hod.
- **Valni hod** karakterizira jednolika aktivnost svih nogu tokom hoda.
- **Jednako-fazni hod** se odlikuje optimalnom granicom statičke stabilnosti.

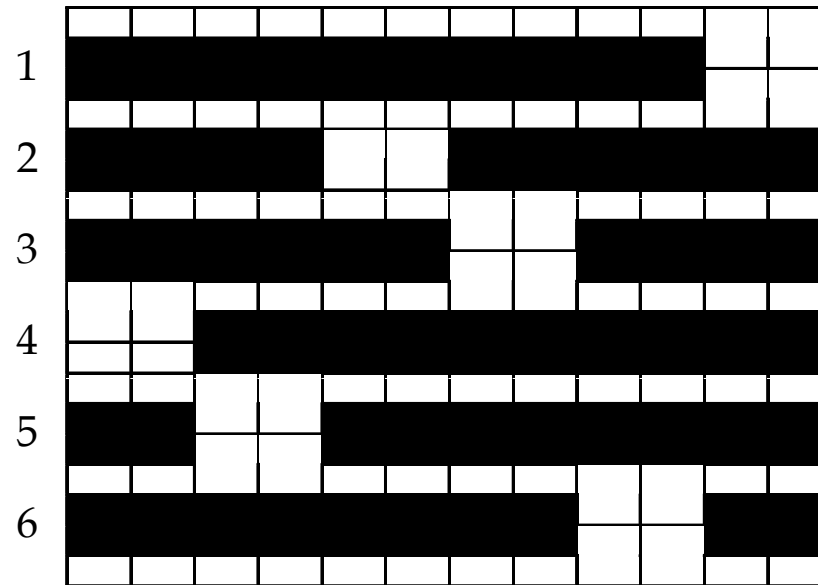


Hod nogu i upravljanje hodom

- Valni i jednako-fazni hod bioloških šesteronožaca.



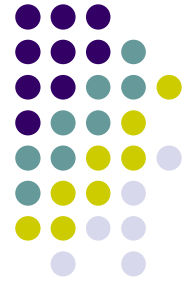
Valni hod



Jednako-fazni hod

Hod nogu i upravljanje hodom

- Što se tiče živih organizama, prvi koji su se kretali na šest nogu su rakovi.
- Po tome se odmah može zaključiti da je **hod na šest nogu najjednostavniji**.
- Šest nogu je bitno zato da tijelo koje hoda može uvijek stabilno stajati na tri noge (kao tronožac), dok se druge tri noge pripremaju za novu poziciju, na koju će se tijelo pomaknuti.
- Tako je najjednostavnije napraviti robota koji će hodati.
- Njemu za svaku nogu treba minimalno dva servomotora, koji će pomicati nogu gore-dolje i naprijed-nazad.



Hod nogu i upravljanje hodom

- Takav robot će se moći uspješnije kretati po neravnim terenima, ali će biti i sporiji od ostalih vrsta robota, jer mu brzina ovisi o brzini pokretanja nogu, a pošto sa servomotorima nije moguće te noge pomicati brzo on će biti spor.
- Kada se pogledaju kukci, vidi se da se oni kreću izuzetno brzo (za svoju veličinu), to je zato što se njihove noge sastoje od nekoliko članaka i više mišića.
- Moguće je načiniti imitaciju takve noge, pa za pogon robota upotrijebiti umjetne mišiće ili više brzih servomotora.



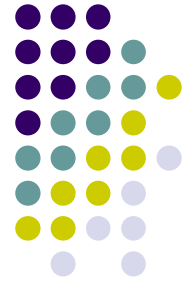
Hod nogu i upravljanje hodom

- Umjetni mišići su građeni od materijala koji se pod utjecajem električne energije stežu, odnosno rastežu.
- To su takozvani "pametni polimeri", na primjer, polipiroli, ali oni su još uvijek u razvoju i još nisu ni blizu organskim mišićima.
- Šesteronožni roboti, između ostalog, imaju veliku primjenu u deminiranju minskih polja i pronalaženju mina.

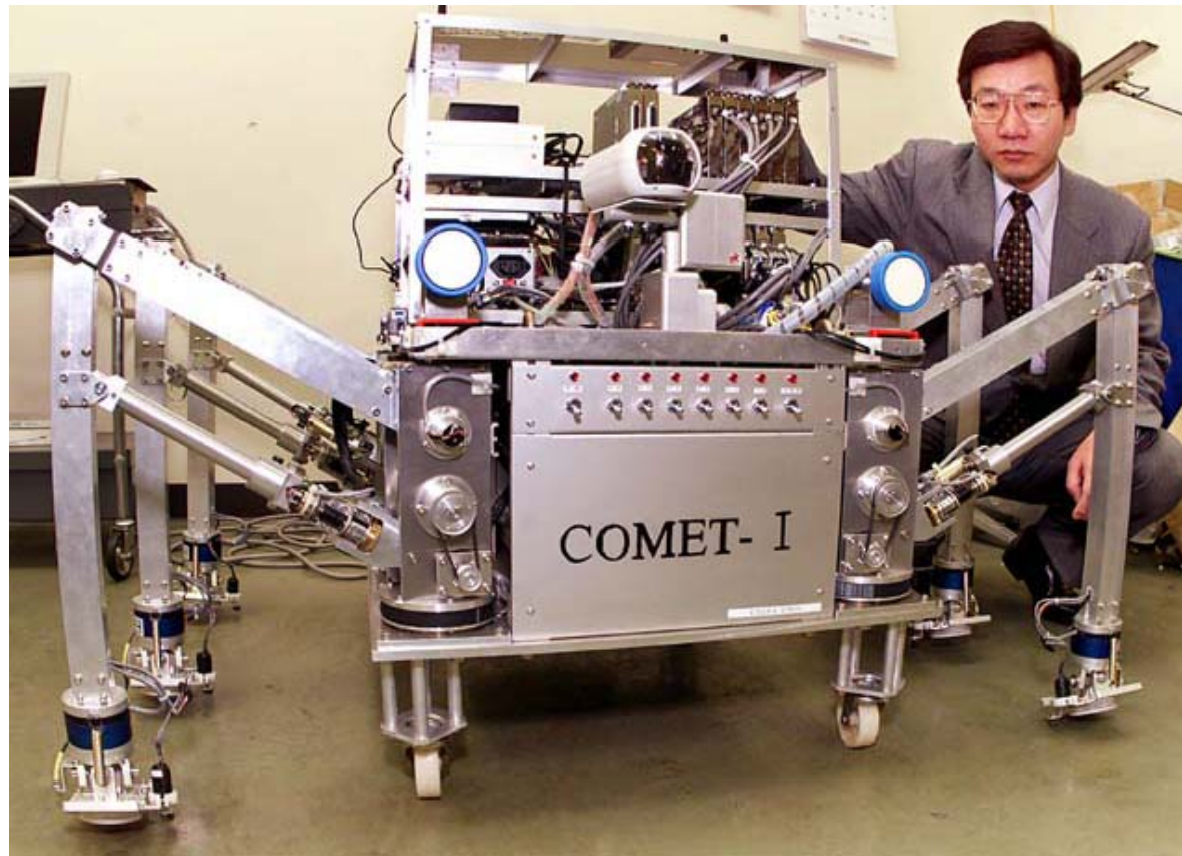


Hod nogu i upravljanje hodom

- Jedan od prvih šestonožnih robota deminera je COMET 1.



57/66



3.8. Ostali tipovi mobilnih robota

- Osim mobilnih robota na kotačima i nožnih robota postoje i druge vrste robota s obzirom na način obavljanja kretanja i sredine unutar koje se kreću, kao što su **podvodni roboti**, **leteći (zračni) roboti** i **svemirska vozila**.
- Kod podvodnih robota (plovila) najviše su u upotrebi dvije pogonske strukture: **robot u obliku torpeda** i **robot sa perajama**.
- Torpedo podvodni roboti koriste pojedinačne propelere za kretanje naprijed, odnosno nazad, dok se upravljačke površine koriste za upravljanje smjerom kretanja.



Ostali tipovi mobilnih robota

- Upravljačke površine mogu osigurati pravac kretanja samo u horizontalnoj ravnini, odnosno samo u vertikalnoj ravnini.
- Dubina se može kontrolirati plutanjem robota. Kod druge vrste robota kolekcija peraja je raspoređena duž tijela robota.
- Upravljanje skupom peraja može se mijenjati pozicija i orijentacija robota neovisno.
- Rezultat su bolja manevarska svojstva u odnosu na torpeda podvodne robote.
- Također je važno naglasiti da je podvodnog robota moguće izgraditi bez aktivnog propulzionog upravljanja, korištenjem aktivnog upravljanja plutanjem.



Ostali tipovi mobilnih robota

- Kod podvodnih robota su posebno izraženi problemi **opažanja okoline** i **upravljanje**.
- Korištenje vizualnih senzora na velikoj dubini je dosta problematično, zbog toga što voda sadrži materijale koji mogu opažanje na temelju svjetlosti učiniti nemogućim, čak i na malim udaljenostima od podvodnog robota.
- Iako voda omogućava lutanje (plutanje) robota i njegovo kretanje, nemoguće je tačno odometrijski estimirati poziciju i orijentaciju podvodnog robota na temelju brzine propelera i pozicije upravljačkih površina.



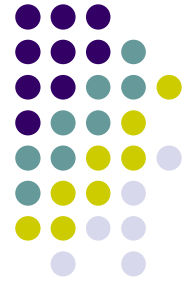
Ostali tipovi mobilnih robota

- Primjer podvodnog robota



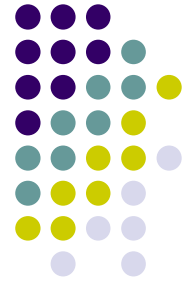
Ostali tipovi mobilnih robota

- Zračni roboti obuhvaćaju sve vrste letjelica, počevši od letjelica sa autopilotom do autonomne bespilotne letjelice (robota).
- Veliki broj letjelica sa nepomičnim krilima se može upravljati daljinski sa zemlje.
- Daljinske komande se osiguravaju iz zemljanih stanica i koriste se sofisticirane metode lokalizacije zračnih robota na temelju mjerenja GPS-a.
- Druga vrsta letećih robota su autonomne letjelice koje na sebi imaju upravljačko-navigacijski sistem koji omogućuje njihovo kretanje bez pomoći čovjeka.



Ostali tipovi mobilnih robota

- Kod letećih robota je posebno izražen problem **duljine leta** zbog ograničenog vremenskog trajanja baterija, odnosno veličine benzinskog rezervoara.
- Tipični primjeri letećih robota su helikopteri i bespilotne letjelice.
- Upravljanje helikopterom predstavlja veliki izazov, budući da je helikopter složen i nelinearan sistem sa značajno izraženim međusprežnim efektima između pojedinih osi kretanja, odnosno rotacije.



Ostali tipovi mobilnih robota

- Primjeri bespilotnih letjelica i helikoptera



Bespilotna letjelica

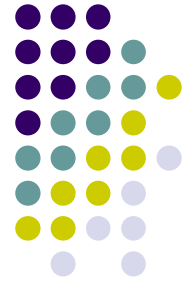


Autonomni helikopter



Ostali tipovi mobilnih robota

- Svemirski mobilni roboti se koriste kao pomoć pri konstrukciji, održavanju i popravci svemirskih stanica i satelita.
- U novije vrijeme se posebna pažnja posvećuje razvoju mobilnih robota za istraživanje nepoznatih ili nedovoljno istraženih svemirskih prostranstava, kao što je između ostalog i planeta Mars.
- Za istraživanje Marsa je razvijeno nekoliko generacija mobilnih robota čiji oblik i performanse su se prilagođavale novim saznanjima vezanim za tu planetu.



Ostali tipovi mobilnih robota

- Primjer robota za svemirska istraživanja

