



Innovative Teaching Approaches in development of
Software Designed Instrumentation and its application in
real-time systems

Theory of Robotics Systems

Locomotion

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union





Innovative Teaching Approaches in development of Software Designed Instrumentation and its application in real-time systems

Faculty of Technical
Sciences



Ss. Cyril and Methodius
University
Faculty of Electrical Engineering
and Information Technologies



Zagreb University of
Applied Sciences



School of Electrical
Engineering
University of Belgrade



Faculty of Physics
Warsaw University of Technology



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Teorija robotskih sistema (13E054TRS)

Deo 2:

Lokomocija – vrste kretanja mobilnih robota

Nastavnik: **doc. Kosta Jovanović**

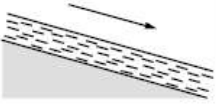


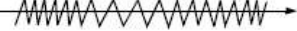





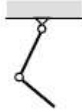

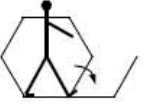
e-mail: **kostaj@etf.rs**

Sadržaj

- Vrste lokomocije (osnovne prednosti i nedostaci)
- Hodajući sistemi
- Mobilni sistemi na točkovima



Vrste lokomocije

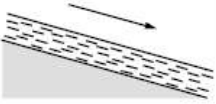
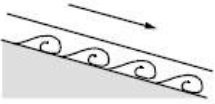

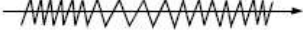



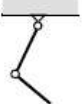

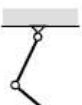

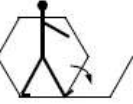
Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Jumping 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Walking 	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2) 

Zašto je tako teško napraviti tehnički pandam lokomociji?

- *power-to-weight* pogoni
- iskorišćenje energije u aktuatorima
- mehanička kompleksnost (minimizacija)
- senzorske informacije

Vrste lokomocije (biloška inspiracija)

Vrste lokomocije

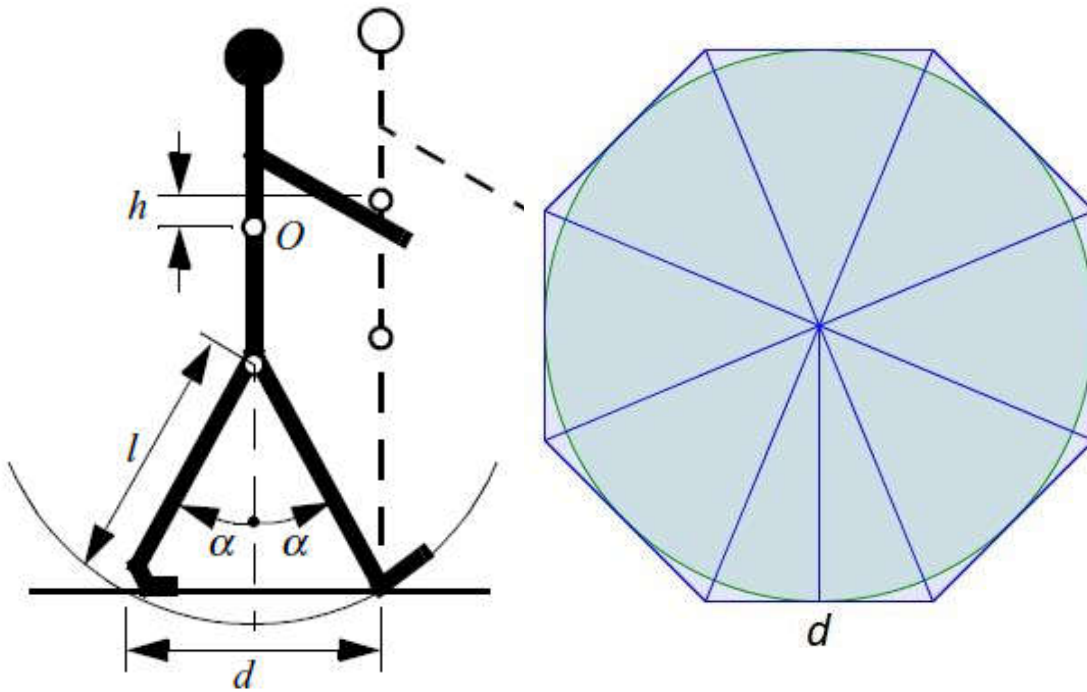
Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Jumping 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Walking 	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2) 

Vrste lokomocije (biloška inspiracija)



Tehnološko rešenje

Vrste lokomocije



biloška inspiracija ($d \rightarrow 0$) !?



Tehnološko rešenje

Vrste lokomocije

Hodajući sistemi Vs. Mobilni sistemi na točkovima

Mehanizam: kompleksan, mnogo DoF, jednostavan sa svega nekoliko obrtnih osa/točkova

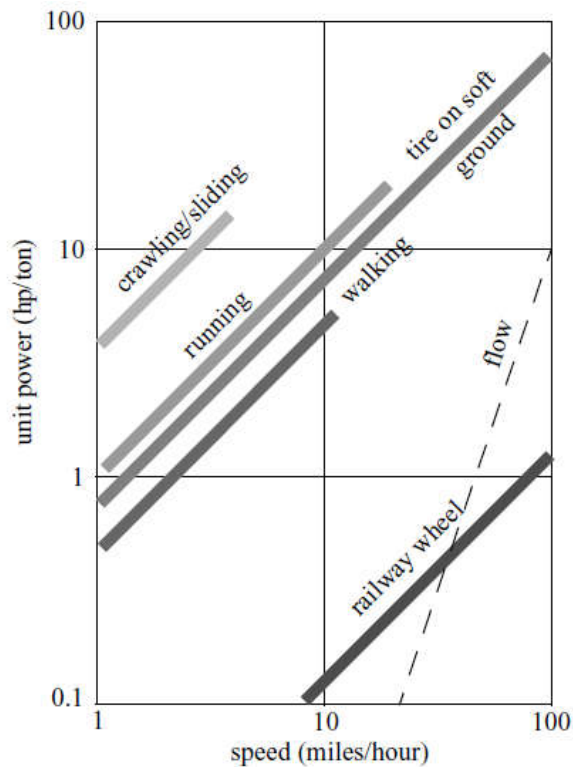
Fleksibilnost: razne vrste terena, stepenice, sa istim mehanizmom, samo po ravnom terenu ali se ostvaruje lokomocija visokih performansi (naročito na tvrdoj podlozi)

Vrste lokomocije

Hodajući sistemi Vs. Mobilni sistemi na točkovima

Mehanizam: kompleksan, mnogo DoF, jednostavan sa svega nekoliko obrtnih osa/točkova

Fleksibilnost: razne vrste terena, stepenice, sa istim mehanizmom, samo po ravnom terenu ali se ostvaruje lokomocija visokih performansi (naročito na tvrdoj podlozi)



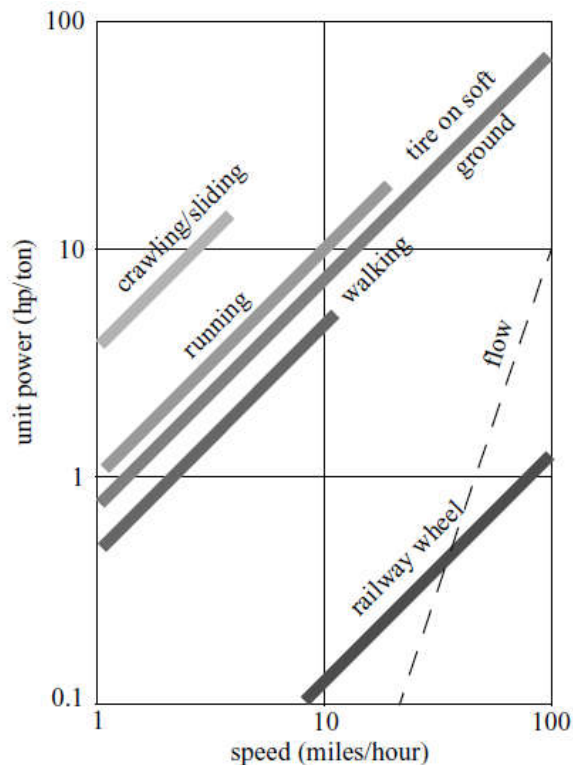
Efikasnost različitih vrsta kretanja u zavisnosti od brzine kretanja

Vrste lokomocije

Hodajući sistemi Vs. Mobilni sistemi na točkovima

Mehanizam: kompleksan, mnogo DoF, jednostavan sa svega nekoliko obrtnih osa/točkova

Fleksibilnost: razne vrste terena, stepenice, sa istim mehanizmom, samo po ravnom terenu ali se ostvaruje lokomocija visokih performansi (naročito na tvrdoj podlozi)



Efikasnost različitih vrsta kretanja u zavisnosti od brzine kretanja:

Prevashodno zavisni od mase/distribucije mase robotskog sistema (uticaj terena po kome se vrši kretanje manje značajan)

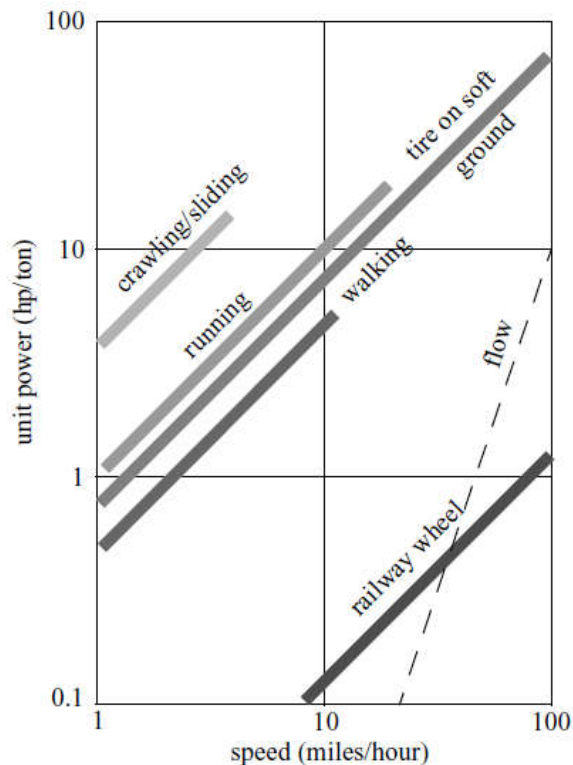
Prevashodno zavisni od tvrdoće i ravnoće terena (uticaj konstrukcije i težine robota manje značajan)

Vrste lokomocije

Hodajući sistemi Vs. Mobilni sistemi na točkovima

Mehanizam: kompleksan, mnogo DoF, jednostavan sa svega nekoliko obrtnih osa/točkova

Fleksibilnost: razne vrste terena, stepenice, sa istim mehanizmom, samo po ravnom terenu ali se ostvaruje lokomocija visokih performansi (naročito na tvrdoj podlozi)



Efikasnost različitih vrsta kretanja u zavisnosti od brzine kretanja:

Prevashodno zavisni od mase/distribucije mase robotskog sistema (uticaj terena po kome se vrši kretanje manje značajan)

Prevashodno zavisni od tvrdoće i ravnoće terena (uticaj konstrukcije i težine robota manje značajan)

Rešenje: Hodajući sistemi sa točkovima (wheel-legged robots) – Handle (<https://www.youtube.com/watch?v=-7xvqQeoA8c>)

Vrste lokomocije

Lokomocija se ostvaruje generisanjem sile od strane robota prema okruženju (podlozi po kojoj se kreću)! → Teme: aktuatori koji proizvode silu, fizička interakcija robota i okruženja, upravljanje interakcijom

Izazovi:

1) Stabilnost – održanje balansa (statička i dinamička)

- geometrija, tip i broj tački kontakta robota sa okruženjem
- centar gravitacije, centar pritiska, tačka nultog momenta
- nagib terena – uticaj gravitacije

2) Karakterizacija kontakta

- kontaktna površina i njen oblik
- trenje
- nagib terena – uticaj gravitacije

3) Karakterizacija okruženja

- struktura
- vrsta okruženja/sredine (vazduh, voda, teren tvrd/mek)

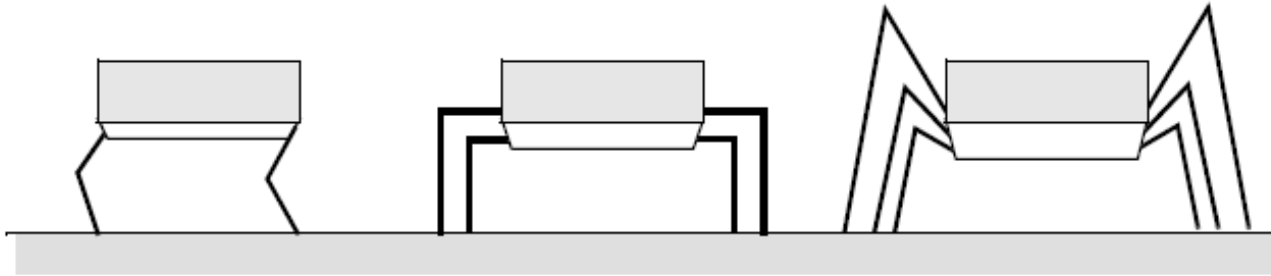
Hodajući sistemi



Nedostaci: kompleksna konstrukcija – pogonski sistem, mnogo DoF, težina robota opterećuje pogone

Prednosti: razne vrste neravnih terena, savladavanje prepreka (rupa, stepenica), fleksibilnost

Hodajući sistemi

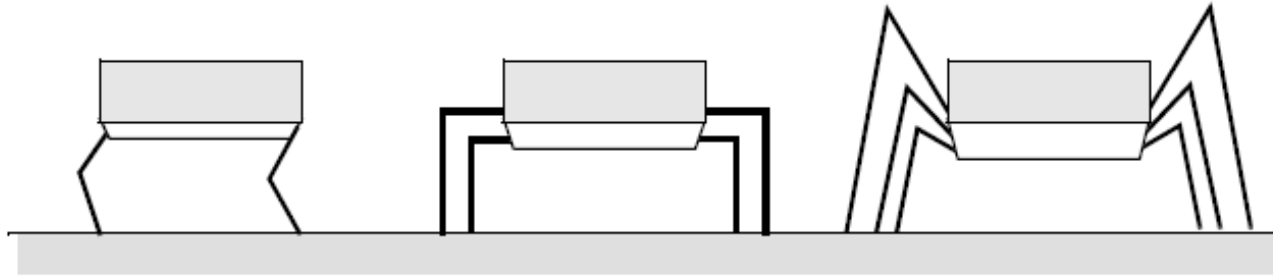


Više nogu – veća margina stabilnosti/balansa, ali veća kompleksnost
Manje nogu – veća manevrabilnost, ali kompleksnije „upravljanje“

Statički balans – potrebne su 3 tačke oslonca (ili kontaktna površina sa podlogom), da je centar gravitacije (projekcija centra mase u poligonu koje formiraju 3 tačke oslonca)

Pitanje: Koliko nogu za stabilan STATIČKI hod?

Hodajući sistemi



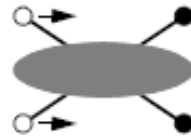
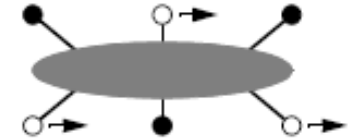
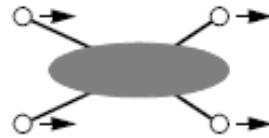
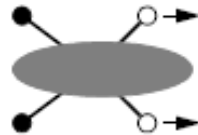
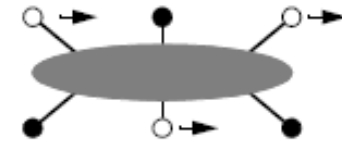
Više nogu – veća margina stabilnosti/balansa, ali veća kompleksnost
Manje nogu – veća manevrabilnost, ali kompleksnije „upravljanje“

Statički balans – potrebne su 3 tačke oslonca (ili kontaktna površina sa podlogom), da je centar gravitacije (projekcija centra mase u poligonu koje formiraju 3 tačke oslonca)

Pitanje: Koliko nogu za stabilan STATIČKI hod?

Odgovor: najmanje 6!

Hodajući sistemi



4 noge: **hod** (nije statički stabilan!) / **galop**

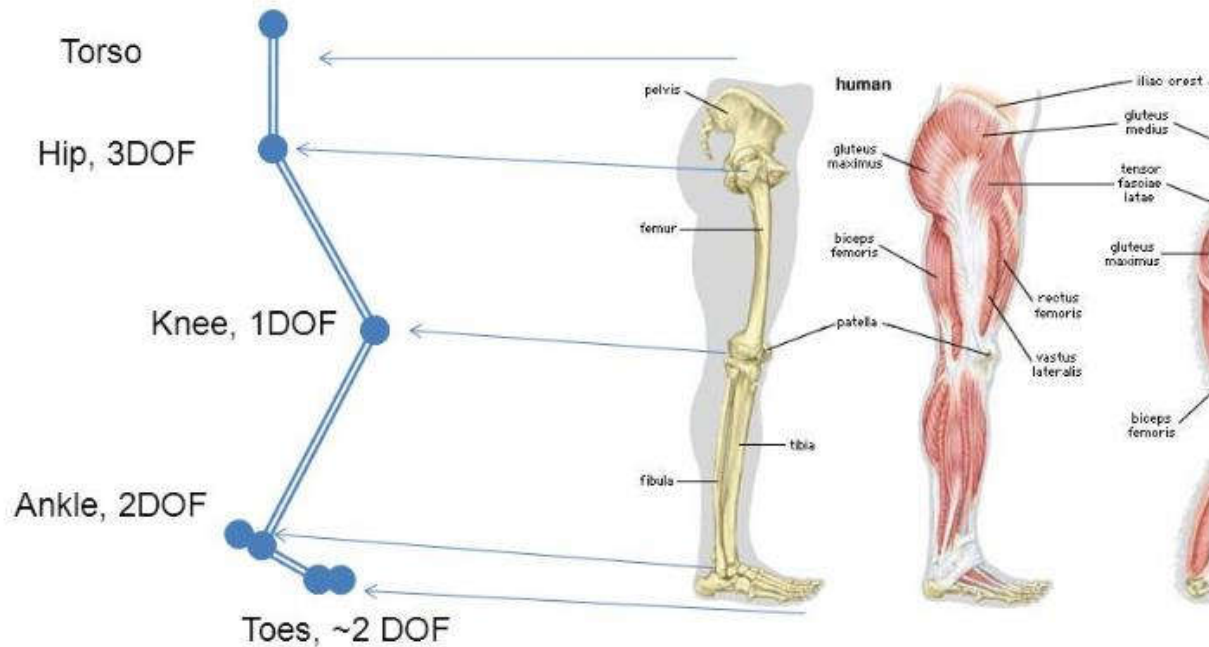
6 nogu: **hod** (statički stabilan)

Hodajući sistemi

Koliko stepeni slobode ima noga čoveka? Koliko minimalno stepeni slobode je potrebno za kretanje – pravolinijsko? a sa promenom pravca?

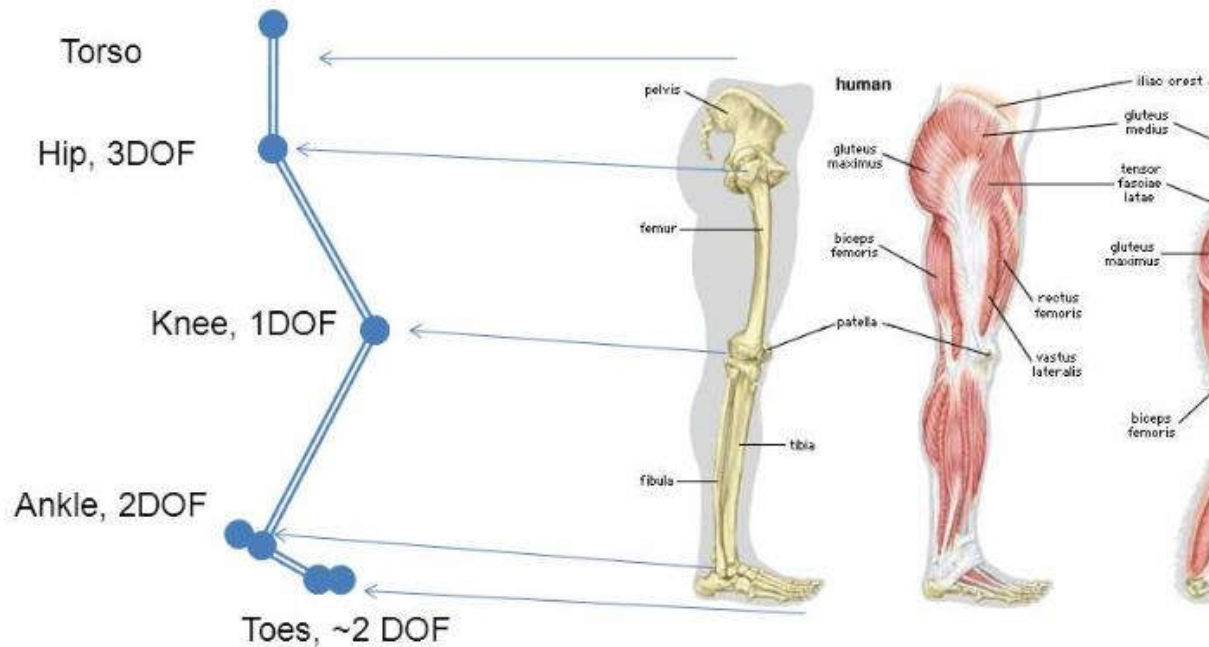
Hodajući sistemi

Koliko stepeni slobode ima noga čoveka? Koliko minimalno stepeni slobode je potrebno za kretanje – pravolinijsko? a sa promenom pravca?



Hodajući sistemi

Koliko stepeni slobode ima noga čoveka? Koliko minimalno stepeni slobode je potrebno za kretanje – pravolinijsko? a sa promenom pravca?

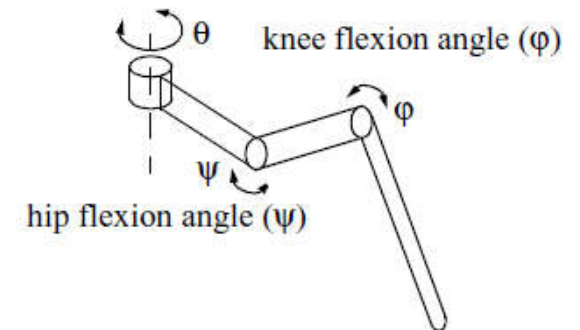


Čovek – 6+ DoF

Za pravolinijsko kretanje – noge sa min. 2 DoF

Za pravolinijsko sa promenom pravca – noge sa min. 3 DoF

hip abduction angle (θ)



Hodajući sistemi

Čovek – 6+ DoF

Za pravolinijsko kretanje – noge sa min. 2 DoF

Za pravoljnijsko sa promenom pravca – noge sa min. 3 DoF

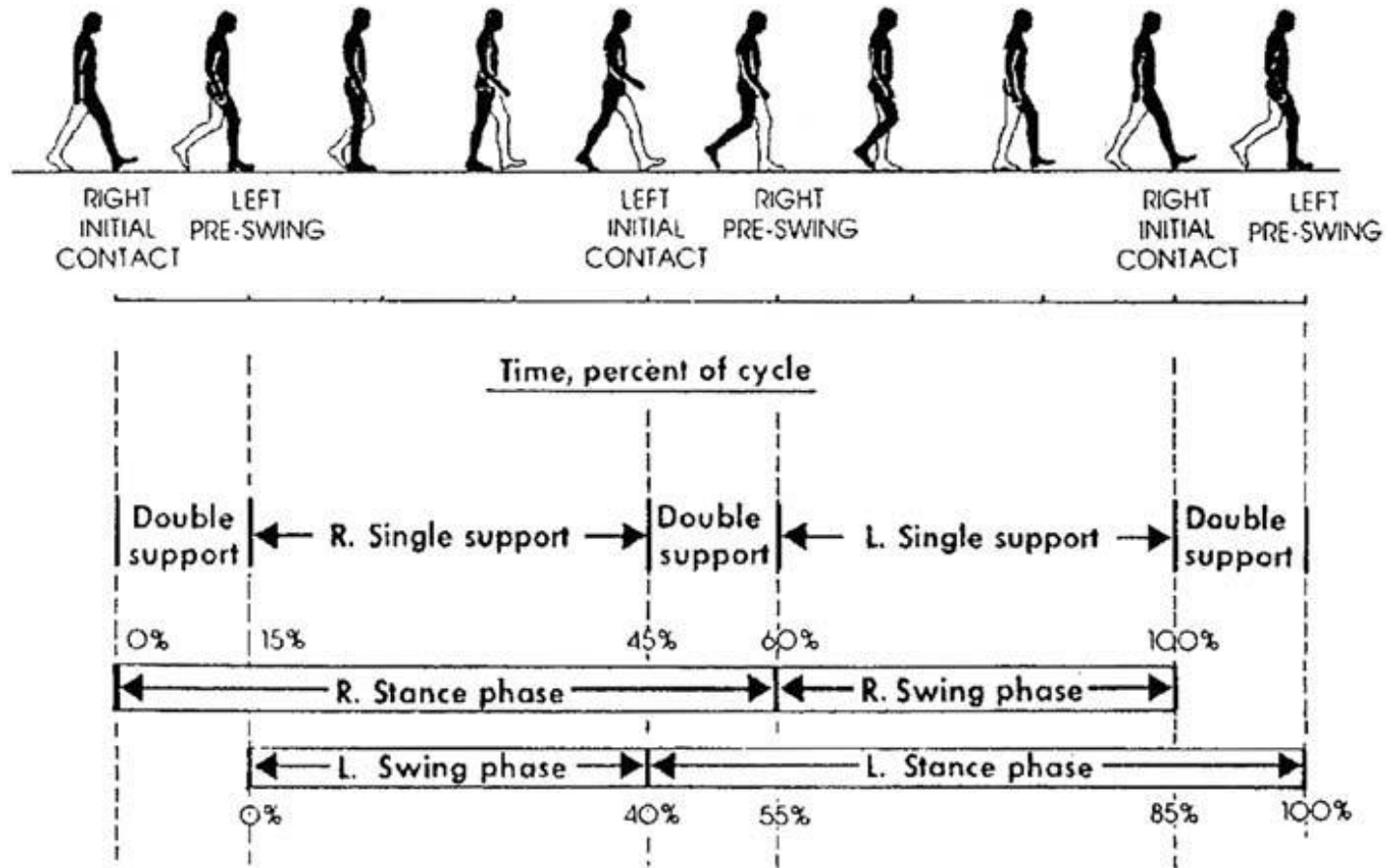
Koja je cena / prednosti dodavanja novih stepeni slobode?

Prednosti – povećanje manevrabilnosti, savladavanje težih terena, načina kretanja (brzine, mogućnost optimizacije), itd.

Cena – kompleksnost mehaničkog sistema, upravljanja (koordinacije DoF), dodatnog opterećenja/mase

Hodajući sistemi

Obrazac dvonožnog hoda



Hodajući sistemi

Obrazac dvonožnog hoda

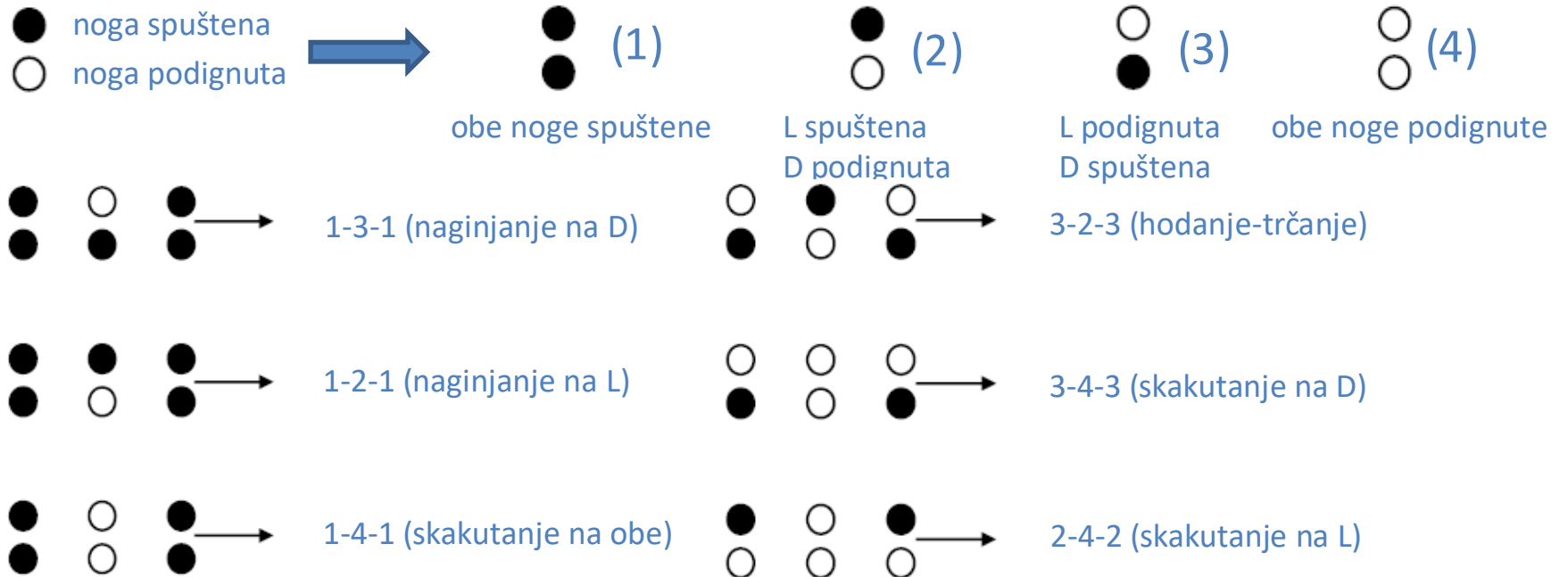
- Broj različitih sekvenci kretanja hodajućih sistema (N) zavisi od broja nogu (k):
$$N=(2k-1)!$$
- Za dvonožni mehanizam $k=2$: $N=3!=6$
- Za četvoronožni mehanizam $k=4$: $N=7!=5.040$
- Za šestonožni mehanizam $k=6$: $N=11!=39.916.800$

Hodajući sistemi

Obrazac dvonožnog hoda

- Broj različitih sekvenci kretanja hodajućih sistema (N) zavisi od broja nogu (k):
$$N=(2k-1)!$$
- Za dvonožni mehanizam k=2: $N=3!=6$
- Za četvoronožni mehanizam k=4: $N=7!=5.040$
- Za šestonožni mehanizam k=6: $N=11!=39.916.800$

- Sekvenca je prelazak u jedno stanje i povratak u inicijalno
- Kombinacije za dvonožnog robota (4 konačna stanja):



Hodajući sistemi

Sekvenca planiranja kretanja hodajućeg mehanizma:

- ❑ Modeliranje dinamike hoda
 - Omogućavanje testiranja simulacijom (din: SLIP model, sta: – inverzno klatno)
 - Planiranje kretanja za kukove i stopala
- ❑ Generisanje trajektorije
 - Proračun kretanja (pogonjenih) zglobova
- ❑ Inverzna kinematika
 - Način kompenzacije odstupanja položaja kukova i stopala
- ❑ Upravljanje odstupanjem u praćenju trajektorije
 - Prilagođenje trajektorija kukova i stopala
- ❑ Regulatori kritičnih stanja
 - Hardverska implementacija na osnovu proračunatih ograničenja
- ❑ Implementacija mehanike i elektronike (razvoj mehatroničkog sklopa)
 - Čitanje senzora, obrada podataka, zatvaranje lokalnih povratnih petlji
- ❑ Integracija (realizacija upravljačkih algoritama)

Hodajući sistemi



ASIMO Hopping and Jumping, 2014

(<https://www.youtube.com/watch?v=2cz5dVv1BXI>)



ASIMO Walking and Running, 2014

(https://www.youtube.com/watch?v=_kzgj4Rnpqc)



ASIMO climbing stairs, 2014

(<https://www.youtube.com/watch?v=8psxACU1oSc>)

Hodajući sistemi



Massachusetts Institute of Technology

MIT cheetah, 2015

(https://www.youtube.com/watch?v=_luhn7TLfWU)

Autonomous Running Jumps Over Obstacles in the MIT Cheetah 2

Hae-Won Park, Patrick Wensing, and Sangbae Kim



MITMECHE
BIOMIMETIC ROBOTICS LAB



Boston Dynamics – BigDog, 2010
(<https://www.youtube.com/watch?v=cNZPRsrwumQ>)

Boston Dynamics