

MEHANIKA LJUDSKOG TELA

Prof. dr Djordje Spasojević

Undergraduate kurs sa primenama u robotici

Trajanje: 10 sedmica

Fond: 3 časa nedeljno

Ukupno: 30 časova

Predznanje: fizika i matematika na nivou srednje škole

Jezik: srpski/engleski

Poseban fokus: biomehanika, modelovanje ljudskog tela i humanoidna robotika

Osnovna ideja kursa

Cilj kursa je da student nauči da ljudsko telo posmatra kao **mehanički sistem sastavljen od povezanih segmenata**, pri čemu su:

- **kosti** $\approx$ **kruta tela**,
- zglobovi $\approx$ mehaničke veze i ograničenja,
- mišići $\approx$ aktivni aktuatori,
- tetive $\approx$ elastični elementi,
- ligamenti $\approx$ pasivni elementi ograničenja,
- **stopalo** $\approx$ **kontaktni mehanizam**,
- podloga $\approx$ spoljašnje okruženje,
- **nervni sistem** $\approx$ **sistem upravljanja**.

Ovakav pristup omogućava prelaz: **fizika** $\rightarrow$ **biomehanika** $\rightarrow$ **model čoveka** $\rightarrow$ **robotika**.

Posebna pažnja posvećuje se tome da student razume **zašto je ljudski mišićno-koštani sistem veoma sofisticiran mehanički i upravljački sistem**.

Ishodi učenja

Po završetku kursa student bi trebalo da ume da:

1. koristi vektore, trigonometriju i osnovnu algebru za rešavanje biomehaničkih problema;
2. napravi slobodni dijagram sila (*free-body diagram*) ljudskog segmenta;
3. izračuna rezultantu sila i momenata;
4. odredi položaj centra mase jednostavnog sistema;
5. analizira translaciono i rotaciono kretanje segmenta tela;
6. primeni Newtonove zakone na ljudsko telo;
7. analizira ravnotežu čoveka u stojećem položaju;
8. izračuna sile i momente u zglobovima;
9. modeluje mišić kao aktuator;
10. razume ulogu mišića agonista i antagonista;

11. koristi princip poluge za analizu ekstremiteta;
 12. odredi rad, energiju i snagu pri ljudskom pokretu;
 13. modeluje telo kao sistem povezanih krutih tela;
 14. razume osnovne principe biomehanike hoda;
 15. poveže biomehanički model sa kinematikom robotskog manipulatora;
 16. razume analogije:
zglob čoveka ↔ robotski zglob; mišić ↔ aktuator; nervni sistem ↔ kontroler;
 17. napravi jednostavan matematički model ljudskog segmenta ili humanoidnog robota.
-

Struktura kursa

Kurs se sastoji iz sledećih logičkih celina:

- **Alat** (Matematika i fizika potrebne za biomehaniku).
- **Čovek kao mehanički sistem** (Centar mase, ravnoteža, sile i momenti).
- **Ekstremiteti** (Ruka, noga, rame, lakat, koleno, skočni zglob).
- **Trup i hod** (Kičma, stabilnost tela, hod i kontakt sa podlogom).
- **Čovek kao robot** (Modelovanje, kinematika, aktuatori, dinamika i humanoidna robotika).

Program po sedmicama

SEDMICA 1 — Repetitorijum matematike i fizike

Tema 1: Matematički alat (kratak repetitorijum):

- realni brojevi i jedinice, naučna notacija;
- osnovne jednačine (linearn i kvadratna);
- uglovi i trigonometrija (sin, cos, tan);
- osnovni grafici (linearna i kvadratna funkcija);
- sistem dve jednačine.

Tema 2: Vektori (kratak repetitorijum):

- skalar i vektor;
- komponente vektora;
- sabiranje vektora;
- rezultanta vektora;
- projekcija vektora.

Tema 3: Osnovna fizika (kratak repetitorijum):

- vektor položaja, putanja, brzina, ubrzanje, ugaona brzina, ugaono ubrzanje;
- masa, gustina, impuls, sila, Newton-ovi zakoni;
- rad, energija, snaga;
- translatorno i rotaciono kretanje;
- moment impulse, sile i inercije;
- trenje i elastičnost.

SEDMICA 2 — Kinematika ljudskog tela

Linearna kinematika

Rotaciona kinematika

Čovek kao sistem segmenata (aproksimiranih kao kruta tela):

- trup,
- nadlaktica,
- podlaktica,
- šaka,
- butina,
- potkolenica,
- stopalo.

Robotika - analogija sa robotskim manipulatorom: link1-joint1-link2-joint2-....

SEDMICA 3 — Sile, momenti i ravnoteža

Vrste sila

- gravitacija;
- normalna sila;
- sila trenja;
- kontaktne sile;
- mišićne sile.

Moment sile

Statička ravnoteža

Primeri: (npr, za čoveka koji stoji na jednoj nozi odrediti: reakciju podloge, približnu silu u kuku, momente sile oko zgloba).

Robotika: primena na robotske noge, manipulatore, stabilnost humanoidnog robota.

SEDMICA 4 — Centar mase i stabilnost čoveka

Centar mase

- za diskretni system
- za homogeno telo
- za čoveka aproksimiranog kao sistem homogenih tela:

Stabilnost

- baza oslonca;
- vertikalna projekcija centra mase;
- moment prevrtanja;
- stabilnost pri stajanju;
- stabilnost pri pomeranju ruku.

Razlika između stabilnosti čoveka i stabilnosti humanoidnog robota.

Projektni zadatak - modelovati čoveka kao sistem segmenata i izračunati položaj centra mase.

SEDMICA 5 — Ruka, rame i lakat

Ruka kao robotski manipulator: nadlaktica→lakat→podlaktica→ zglob→ šaka

Lakat kao poluga; analize sile bicepsa, težine podlaktice, težine tereta, momenta sila oko lakta.

Mehanička prednost

Robotika (forward kinematics, joint angle, end-effector, workspace).

SEDMICA 6 — Noga, koleno i skočni zglob

Noga kao mehanički sistem

- kuk;
- butina;
- koleno;
- potkolenica;
- skočni zglob;
- stopalo.

Koleno - analiza

- sile mišića;
- težine tela;
- reakcije podloge;
- momenata sila u kolenu.

Čučanj – analiza promena sile mišića sa uglom kolena.

Skočni zglob i stopalo kao:

- poluga;
- kontaktni mehanizam;
- opružni element.

Robotika – poređenje ljudska i robotske noga sa 3 stepena slobode.

SEDMICA 7 — Mišići kao biološki aktuatori

Mišić kao aktuator sa ograničenjima: osnovni model i agonist–antagonist uloga

Tetiva (modelovana kao opruga)

Energija elastičnosti

Robotika – tetiva kao:

- compliant actuator;
 - series elastic actuator;
 - energy storage;
 - shock absorption.
-

SEDMICA 8 — Kičma i trup

Modeli kičme:

- kao krutog cilindra
- kao višecilindara povezanih fleksibilnim linkovima

Tipovi opterećenja u kičmi:

- kompresija;
- savijanje;
- torzija;
- smicanje.

Momenti sila u lumbalnom delu pri podizanju tereta

Robotika - kičma čoveka kao inspiracija za:

- humanoidne robote u skladu sa standardima;
- fleksibilne robote;
- multi-link manipulatore;
- balansiranje humanoidnog robota.

Projektni zadatak

1. teret uz telo;
 2. teret na udaljenosti 50 cm od tela.
-

SEDMICA 9 — Hod kao problem dinamike

Hod – analiza etapa hoda

Centar mase - analiza pomeranja centra mase tokom hoda

Sila reakcije podloge

Obrtni momenti koji postoje tokom hoda

Hod kao periodično kretanje – analiza koraka, kadence, perioda i brzine hoda.

Robotika – uloga dinamičke stabilnosti

SEDMICA 10 — Ljudsko telo kao multibody robot

Kinematički model

Dinamički model

Literatura

- Slajdovi sa predavanja
- Rob Pryce — [Introduction to Biomechanics — kompletan otvoreni udžbenik](#)
- Karine Hamm — [Biomechanics of Human Movement — otvoreni udžbenik i Print PDF](#)

Završni projektni zadatak ili ispit (kako škola odluči)