ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK
ZAVOD ZA AUTOMATIKU I PROCESNO RAČUNARSTVO

ROBOTICS TOOLBOX

Upute za upotrebu

Robert Cupec

Osijek, 03.04.2012.

1. Objekti

Robot, predmeti kojima on rukuje te objekti u radnoj okolini robota prikazuju se pomoću podatkovnih struktura koje se u nastavku nazivaju *objekti*. Površina objekta sastoji se od ravnih poligonalnih ploha sa tri ili više vrhova. Svakom objektu pridružen je koordinatni sustav. Vrhovi objekta definirani su matricom `X` koja predstavlja pripadno polje podatkovne strukture kojom je objekt opisan. Svakom vrhu objekta odgovara jedan stupac matrice `X` tako da ta matrica ima onoliko stupaca koliko objekt ima vrhova. Svaki stupac matrice `X` ima 4 elementa, koji predstavljaju homogene koordinate određenog vrha objekta s obzirom na koordinatni sustav objekta. Objekti se mogu stvarati i prikazivati na zaslonu računala pomoću funkcija opisanih u nastavku.

cuboid

```
objekt = cuboid(a, b, c)
```

Funkcija **cuboid** stvara objekt oblika kvadra. Ishodište koordinatnog sustava kvadra je u njegovom centru mase. Duljine stranica kvadra su `a`, `b` i `c`, pri čemu je `a` duljina stranice paralelne s x-osi koordinatnog sustava kvadra, `b` duljina stranice paralelne s njegovom y-osi, a `c` duljina stranice paralelne s njegovom z-osi.

merge3dobjs

```
objekt3 = merge3dobjs(objekt1, objekt2)
```

Funkcija **merge3dobjs** stvara `objekt3` spajanjem objekata `objekt1` i `objekt2`.

plot3dobj

```
plot3dobj(objekt)
```

Funkcija **plot3dobj** prikazuje `objekt` na zaslonu računala.

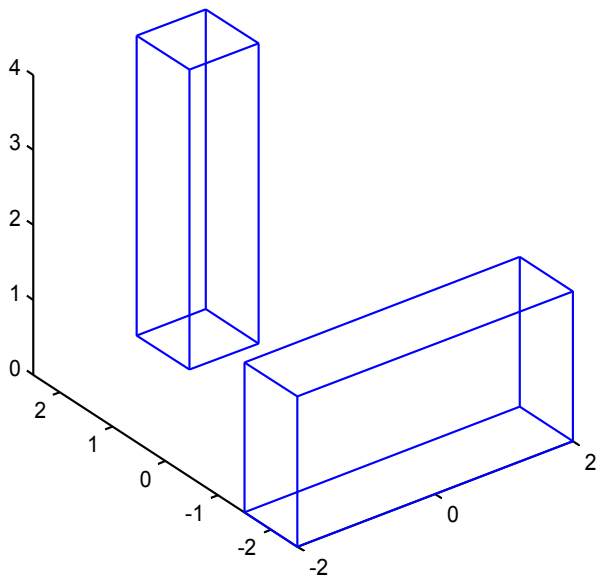
Koordinate vrhova nekog objekta se mogu transformirati iz jednog koordinatnog sustava u drugi množenjem s odgovarajućom matricom homogenih transformacija, što je ilustrirano sljedećim primjerom.

Primjer 1:

Sljedeći niz naredbi stvara scenu na kojoj se nalaze dva kvadra i prikazuje je na zaslonu računala.

```
% stvori objekt obj1

obj1=cuboid(1,1,4);
T10 = [1 0 0 0;
     0 1 0 2;
     0 0 1 2;
     0 0 0 1];
obj1.X = T10*obj1.X;

% stvori objekt obj2

obj2=cuboid(4,1,2);
T20 = [1 0 0 0;
     0 1 0 -2;
     0 0 1 1;
     0 0 0 1];
obj2.X = T20*obj2.X;

% stvori scenu spajanjem objekata obj1 i obj2

scena = merge3dobjs(obj1, obj2);

% prikazi scenu na zaslonu racunala

plot3dobj(scena);
```

Rezultat je prikazan na slici 1.



Sl. 1. *Scena koja se sastoji od dva kvadra.*

2. Robot

Izgled, kinematički model i fizikalna svojstva robota definiraju se podatkovnom strukturom koja sadrži sljedeća polja:

- `n` - broj zglobova;
- `L` - polje od n elemenata. Svaki element opisuje jedan članak odnosno zglob robota;
- `g` - gravitacijski vektor prikazan s obzirom na bazni koordinatni sustav robota.

Svaki članak robota i njemu pridruženi zglob prikazani su podatkovnom strukturom koja sadrži sljedeća polja:

- `ksi` - parametar tipa zgloba;
- `DH` - vektor kinematičkih parametara $[\theta \ d \ a \ \alpha]^T$;
- `B` - matrica kojom je definiran izgled članka. Članak se može sastojati od jednog ili više kvadara. Svaki kvadar opisan je jednim retkom matrice `B`. Prva tri elementa retka predstavljaju koordinate centra mase kvadra u odnosu na koordinatni sustav članka. Posljednja tri elementa retka predstavljaju duljine stranica kvadra;
- `m` - masa članka;
- `dc` - koordinate centra mase članka s obzirom na koordinatni sustav članka;
- `Dc` - tenzor inercije članka s obzirom na njegov centar mase.

Na temelju navedene strukture može se pomoću funkcije **robotmesh** stvoriti objekt koji odgovara definiranom robotu. Takav se objekt zatim može prikazati na zaslonu računala funkcijom **plot3dobj** opisanom u prvom poglavlju.

robotmesh

```
robmesh = robotmesh(robot, q)
```

Funkcija **robotmesh** stvara objekt `robmesh` koji predstavlja robota definiranog podatkovnom strukturom `robot`. Varijable zglobova robota zadaju se vektorom `q`.

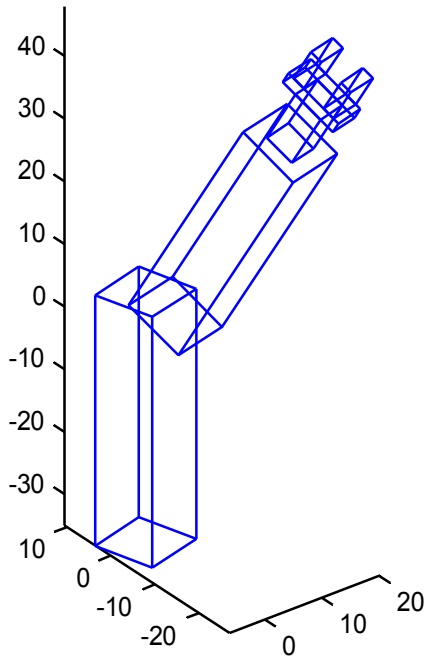
Primjer 2:

Sljedeći niz naredbi stvara dvoosni robotski manipulator i prikazuje ga na zaslonu računala.

```
% broj osi

robot.n = 2;

% varijable zglobova

q(1) = -75*pi/180;
q(2) = 30*pi/180;

% gravitacijski vektor

robot.g = [0 0 -9.81];
```

```
% prvi clanak

robot.L(1).ksi = 1;
robot.L(1).DH = [q(1) 0 0 -pi/2]';
robot.L(1).B = [0 15 0 10 40 10];

% drugi clanak

robot.L(2).ksi = 1;
robot.L(2).DH = [q(2) 10 0 pi/2]';
robot.L(2).B = [0 0 15 10 10 40;
    0 0 40 5 5 10;
    0 0 46 10 5 2;
    -3 0 50 2 5 6;
    3 0 50 2 5 6];

% prikaz robota na zaslonu racunala

robmesh = robotmesh(robot, q);

plot3dobj(robmesh)
```

Rezultat je prikazan na slici 2.



Sl. 2. *Dvoosni robotski manipulator.*

3. Planiranje trajektorije

Podržane su dvije metode planiranja trajektorije interpolacijom na temelju zadanih točaka: linearna interpolacija s kvadratnim prijelazima i Ho-Cookova metoda. Prva metoda implementirana je funkcijom **linkvadint2**, a druga funkcijom **hocook**.

linkvadint2

```
[W, dW, ddW] = linkvadint2(Wd, tu, T, ksi)
```

Funkcija **linkvadint2** na temelju prolaznih točaka zadanih matricom `Wd` generira kontinuiranu trajektoriju linearnom interpolacijom s kvadratnim prijelazima. Svaki stupac matrice `Wd` predstavlja jednu prolaznu točku. Razmatraju se dvije osnovne vrste trajektorija: trajektorije u prostoru zglobova i trajektorije u prostoru konfiguracije alata. Ukoliko se radi o trajektoriji u prostoru zglobova, prvih *n* elemenata svakog stupca matrice `Wd` predstavljaju vrijednosti varijabli zglobova za danu točku trajektorije. Ukoliko se želi prikazati i otvaranje odnosno zatvaranje hvataljke, tada pretposljednji element stupca predstavlja otvorenost hvataljke. Ukoliko se radi o trajektoriji u prostoru konfiguracije alata, prvih $n = 6$ elemenata stupca matrice trajektorije predstavljaju komponente vektora konfiguracije alata $\mathbf{w} = [x \quad y \quad z \quad \varphi \quad \theta \quad \psi]^T$ za danu točku trajektorije. U oba slučaja, zadnji element stupca predstavlja vrijeme. Vremena ubrzanja zadaju se vektorom `tu` koji ima onoliko elemenata koliko ima prolaznih točaka odnosno stupaca matrice `Wd`. Vrijeme uzorkovanja trajektorije zadaje se argumentom `T`. Posljednji argument `ksi` predstavlja vektor koji ima onoliko elemenata koliko stupnjeva slobode gibanja ima robot. Svaki element vektora `ksi` odgovara jednom parametru trajektorije, tj. jednom retku matrice `Wd` (izuzev vremena, tj. posljednjeg retka). Ukoliko je neki element vektora `ksi` jednak 1, odgovarajući parametar trajektorije predstavlja kut u radijanima, a ukoliko je 0, odgovarajući parametar trajektorije predstavlja udaljenost odnosno koordinatu u metrima ili milimetrima. Trajektorija koju funkcija **linkvadint2** vraća kao rezultat prikazana je *matricom trajektorije* dimenzija $(n + 2) \times m$, gdje je *n* broj stupnjeva slobode gibanja, a *m* broj točaka trajektorije. Svaki stupac matrice trajektorije predstavlja jednu točku trajektorije. Elementi stupca sadrže podatke analogne onima sadržanim u matrici `Wd`. Osim matrice trajektorije `W`, funkcija **linkvadint2** vraća i matrice `dW` i `ddW` koje predstavljaju prvu odnosno drugu derivaciju trajektorije prikazane u istom formatu kao i matrica `W`.

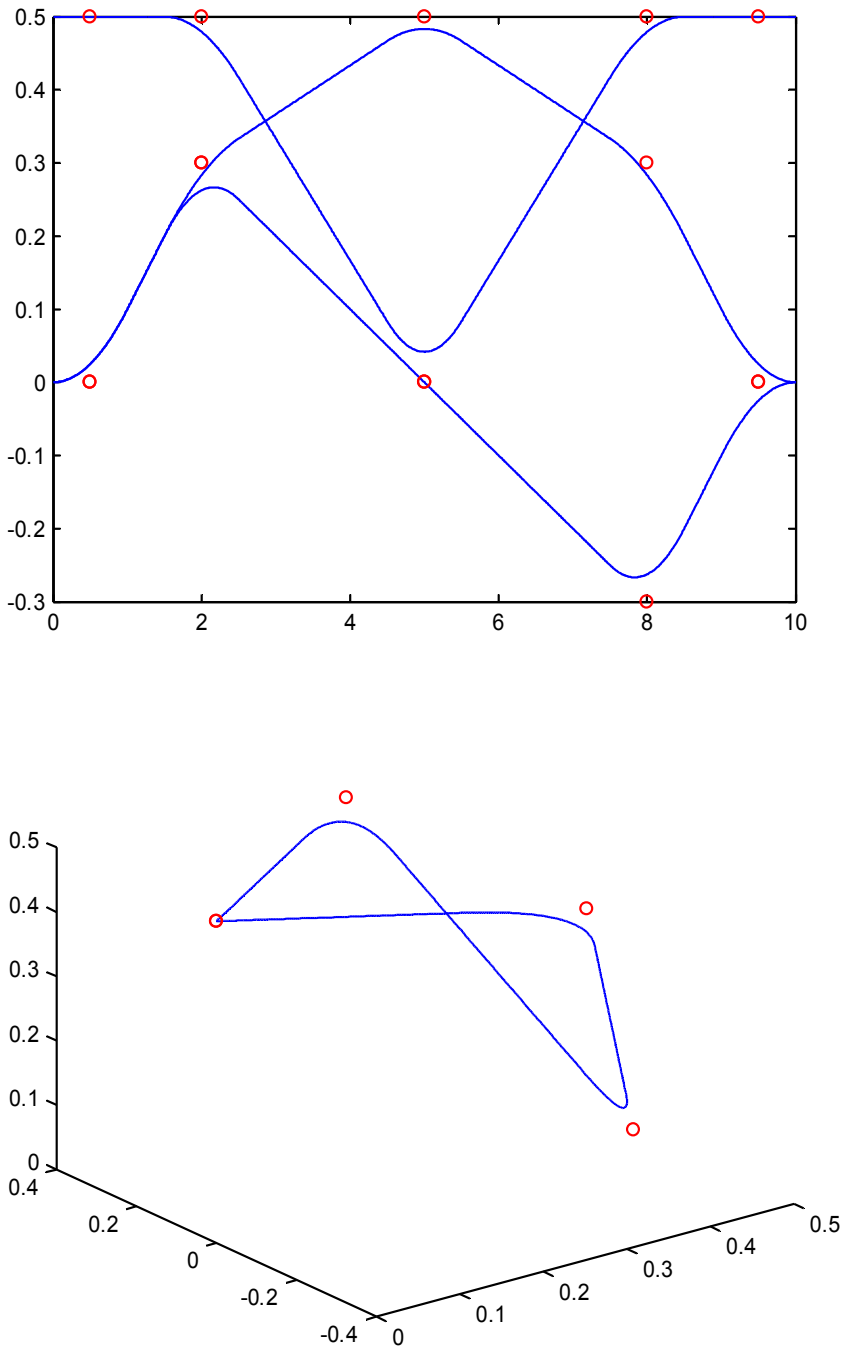
Primjer 3:

Sljedeći niz naredbi generira trajektoriju linearnom interpolacijom s kvadratnim prijelazima i prikazuje ju na zaslonu računala u obliku vremenskog dijagrama te u 3D prikazu.

```
% zadavanje prolaznih tocaka

Wd = [0.0 0.0 0.5 0.5;
    0.3 0.3 0.5 2.0;
    0.5 0.0 0.0 5.0;
    0.3 -0.3 0.5 8.0;
    0.0 0.0 0.5 9.5]';

% linearna interpolacija s kvadratnim prijelazima

[W, dW, ddW]=linkvadint2(Wd,[0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]',0.01,[0 0 0]');

% prikaz trajektorije na zaslonu racunala
```

```
figure(1)
plot(W(4,:),W(1:3,:),'b',Wd(4,:),Wd(1:3,:),'ro')

figure(2)
plot3(W(1,:),W(2,:),W(3,:),'b',Wd(1,:),Wd(2,:),Wd(3,:),'ro')
```

Rezultat je prikazan na slici 3.



Sl. 3. *Trajektorija prikazana vremenskim dijagramom i 3D prikazom.*

hocook

```
[Qc, dQc, ddQc] = hocook(Q, dqgr, ddqgr, Ts)
```

Funkcija **hocook** na temelju prolaznih točaka zadanih matricom `Q` generira kontinuiranu trajektoriju Ho-Cookovom metodom. Trajektorija dobivena ovom metodom ima neprekinutu prvu i drugu derivaciju, a brzine i ubrzanja su unutar granica zadanih vektorima `dqgr` i `ddqgr`. Vektori `dqgr` i `ddqgr` imaju onoliko elemenata koliko robot ima stupnjeva slobode gibanja. Svaki element vektora `dqgr` predstavlja najveću dozvoljenu brzinu promjene odgovarajuće varijable zgloba. Analogno tome, svaki element vektora `ddqgr` predstavlja najveće dozvoljeno ubrzanje odgovarajućeg zgloba. Parametar `Ts` predstavlja vrijeme uzorkovanja trajektorije. Kao rezultat funkcija **hocook** vraća matricu trajektorije istog formata kao i funkcija **linkvadint2**.

4. Dinamički model robotskog manipulatora

Dinamički model robotskog manipulatora može se prikazati matričnom diferencijalnom jednadžbom

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{h}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau},$$

gdje je

- $\mathbf{q}$ - vektor varijabli zglobova,
- $\boldsymbol{\tau}$ - vektor pogonskih sila/momenata,
- $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ - tenzor inercije manipulatora,
- $\mathbf{N}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ - vektor centrifugalnih i Coriolisovih sila,
- $\mathbf{h}(\mathbf{q})$ - vektor gravitacijskog djelovanja.

Matrica **D** te vektori **N** i **h** mogu se za zadane vrijednosti $\mathbf{q}$ i $\dot{\mathbf{q}}$ izračunati pomoću funkcije **dynmodel**.

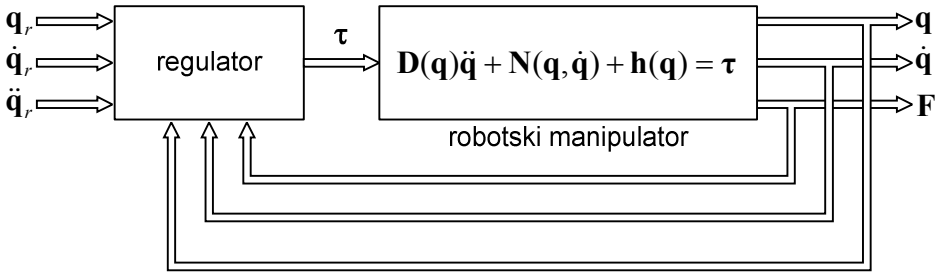
dynmodel

```
robotNew = dynmodel(robot, q, dq, Ftool)
```

Funkcija **dynmodel** na temelju parametara robota zadanih podatkovnom strukturom `robot` opisanom u poglavlju 2 te vektora varijabli zglobova `q` vektora derivacija varijabli zglobova `dq` i vektora vanjskih sila koje djeluju na alat robota `Ftool` izračunava tenzor inercije manipulatora **D**, vektor centrifugalnih i Coriolisovih sila **N** te vektor gravitacijskog djelovanja **h** i sprema ih u polja `D`, `N` i `h` podatkovne strukture `robotNew`. Ukoliko nema kontakta između robota i njegove okoline, `Ftool` je nul-vektor od *n* elemenata, gdje je *n* broj osi robota.

5. Simulacija robota upravljanog digitalnim regulatorom

Na slici 4 shematski je prikazan sustav upravljanja robotskim manipulatorom. Zadatak regulatora je da varijable zglobova **q** što manje odstupaju od referentne trajektorije $\mathbf{q}_r$. Na temelju vrijednosti **q**, $\dot{\mathbf{q}}$, $\mathbf{q}_r$, $\dot{\mathbf{q}}_r$ i $\ddot{\mathbf{q}}_r$, regulator izračunava odgovarajuće vrijednosti momenata $\boldsymbol{\tau}$ koji predstavljaju upravljačke signale. Povratna veza po poopćenoj sili **F** omogućuje upravljanje silom dodira.



Sl. 4. *Blokovska shema sustava upravljanja robotskim manipulatorom*.

Sumulacija ovakvog sustava upravljanja može se izvesti pomoću programskog paketa SIMULINK i simulacijskog modela **robman_sim.mdl**. Ovaj simulacijski model poziva funkciju **roboctrlalg** kojom je implementiran digitalni regulator. Prije pokretanja simulacije treba definirati podatkovnu strukturu `robot` kojom je opisan robotski manipulator na način objašnjen u poglavlju 2 te podatkovnu strukturu `ctrlparam` kojom se konfigurira regulator. Struktura `ctrlparam` ima sljedeća polja

`nStates`	- broj memorijskih varijabli koje prenose informaciju između dva koraka izvođenja algoritma;
`x0`	- početne vrijednosti memorijskih varijabli;
`T`	- period uzorkovanja;
`umax`	- najveća vrijednost upravljačkog signala;
`umin`	- najmanja vrijednost upravljačkog signala;
`bCartesian`	- ima vrijednost 1 ukoliko se radi o upravljanju u prostoru konfiguracije alata, odnosno 0 ukoliko se radi o upravljanju u prostoru zglobova.

Pored ovih polja korisnik može u strukturu `ctrlparam` dodati i vlastita polja pomoću kojih može zadati različite parametre regulatora.

roboctrlalg

```
[uc, xNew] = roboctrlalg(robot, ctrlparam, t, q, dq, F,
             qr, dqr, ddqr, x)
```

Funkcija **roboctrlalg** poziva se iz simulacijskog modela **robman_sim.mdl** i predstavlja upravljački algoritam za robotski manipulator. Dodavanjem vlastitog koda u funkciju **roboctrlalg** korisnik može implementirati različite digitalne regulatore za upravljanje robotskim manipulatorom. Parametri robota kojim regulator upravlja prosljeđuju se argumentom `robot`. Konfiguriranje regulatora izvodi se postavljanjem polja podatkovne strukture `ctrlparam` na željene vrijednosti prije pokretanja simulacije. Argument `t` predstavlja vrijeme od početka izvođenja simulacije. Varijable zglobova manipulatora sadržane su u vektoru `q`, a njihove derivacije u vektoru `dq`. Argument `F` predstavlja silu kojom okolina djeluje na alat manipulatora. Trenutna referentna

vrijednost varijabli zglobova prosljeđuje se regulatoru argumentom `qr`, dok se argumentima `dqr` i `ddqr`. Memorijske varijable prosljeđuju se argumentom `x`. Funkcija vraća upravljački signal `uc` koji predstavlja vektor od n elemenata, gdje je n broj osi robota, te nove vrijednosti memorijskih varijabli `xNew` koje se mogu mijenjati unutar funkcije.

6. Animacija

Kretanje robota može se prikazati animacijom pomoću funkcije **dyn3dscene**.

dyn3dscene

```
dyn3dscene(robot, Q, env, plotbox, alpha, beta, T, Tpause)
```

Funkcija **dyn3dscene** omogućuje prikaz animacije kretanja robota na temelju trajektorije dobivene npr. simulacijom opisanom u poglavlju 5. Robot je definiran argumentom `robot` koji predstavlja podatkovnu strukturu opisanu u poglavlju 2. Trajektorija koja definira kretanje robota zadaje se argumentom `Q` koji predstavlja matricu trajektorije opisanu u poglavlju 3. Okolina robota definirana je argumentom `env` koji predstavlja objekt opisan u poglavlju 1. Okolina može biti samo jedan predmet ili se može sastojati od više objekata grupiranih u jedan objekt kako je opisano u poglavlju 1. Robot i njegova okolina prikazani su u baznom koordinatnom sustavu robota. Skala prikaza definirana je argumentom `plotbox` koji predstavlja vektor od 6 elemenata. Prva dva elementa predstavljaju minimalnu i maksimalnu x-koordinatu prikaza, druga dva minimalnu i maksimalnu y-koordinatu, a treća dva minimalnu i maksimalnu z-koordinatu. Kut promatranja scene definiran je argumentima `alpha` i `beta`, gdje `alpha` predstavlja azimut, a `beta` elevaciju virtualne kamere. Argument `T` predstavlja vrijeme uzorkovanja trajektorije. Brzina izvođenja animacije može se podesiti odgovarajućim izborom argumenta `Tpause`. Naime, vrijeme između prikaza dvije uzastopne slike animacije na zaslonu računala jednako je vremenu potrebnom za prikaz slike uvećanom za `Tpause`.