

Statična identifikacija segmentov zgornje ekstremitete

Timotej Kodek, Marko Munih

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za robotiko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: tim@robo.fe.uni-lj.si

Povzetek. V delu obravnavamo metodo, s katero je mogoče z uporabo robotske metodologije identificirati statične parametre vseh treh segmentov zgornje ekstremitete, nadlakti, podlakti in dlani, uporabljene pogosto v biomehanskih raziskavah. Pri eksperimentalnem delu je za premikanje roke testirane osebe po predpisani trajektoriji uporabljen industrijski robot. Na podlagi meritve sile na vrhu robota in kotov v zapestju, komolcu in rami, je izveden postopek robotske identifikacije za izračun mas in težišč dlani in podlakti ter njun produkt za nadlaket. Kot matematični model roke je uporabljena zaprta kinematična veriga robot-roka, kjer se za roko upošteva trisegmentni planarni manipulator. V postopku se poleg mas, težišč in njihovih produktov identificirajo tudi vsi trije pasivni momenti v izmerjeni delovni točki za vse tri sklepe v sagitalni ravnini. V rezultatih je podana primerjava rezultatov z literaturo, kjer se statični parametri izračunajo na podlagi regresijskih krivulj, dobljenih na povprečni populaciji. Metoda je verifcirana na desetih meritvah ene osebe.

Ključne besede: mase segmentov, težišča segmentov, zgornja ekstremiteta, identifikacija, statični gib, slaba pogojenost sistema

A method for identifying static parameters in human upper extremity segments

Extended abstract. This paper presents a method for identifying static parameters of all three upper extremity segments which are often used in many biomechanical studies. An industrial robot is used for moving the human arm along a specified sagittal trajectory during which measurements of the shoulder, elbow, wrist angles and forces in the contact point are collected. An identification procedure was developed in analogy with those performed on industrial robots. It assumes the upper extremity model of a 3DOF planar structure in a closed kinematic chain. In contrast with robotic systems where the joint torques are well known, this is not the case in a realistic biomechanical system, where body segments are propelled by means of many muscles. In order to be able to acquire the joint torques in all three joints, forces from the end point were transformed to the joint level by means of the Jacobian matrix.

To be able to perform the identification, a suitable trajectory was obtained in all three joints with an appropriate low speed and with very small angle deviations around the operating point. The arm was assumed to be linear in this point since its passive properties showed no nonlinearities for such small angular ranges. By programming a suitable trajectory into the robot controller the ill-conditioning problem can be improved significantly. The algorithm identifies masses and mass center coordinates for the lower arm and palm segments, their products for the upper arm and the operating point passive moments (summed elasticities and Coulomb frictions) for all three joints in the sagittal plane. The results are finally compared to the literature estimations which are based on average population.

Key words: segment mass, segment center of gravity, upper extremity, identification, static movement, ill conditioning

1 Uvod

Pri številnih današnjih biomehanskih raziskavah, je treba poznati ali oceniti statične oziroma dinamične parametre posameznih telesnih segmentov, kot so na primer mase, težišča in vztrajnosti okrog posameznih osi. Potrebni so tako pri modeliranju, kot tudi pri ugotavljanju parametrov, kot so na primer momenti v sklepih. Da bi avtorji prišli do tovrstnih podatkov, se ponavadi sklicujejo na literaturo, ki podaja zelene parametre v obliki regresijskih krivulj z upoštevanjem lahko izmerljivih podatkov, kot je na primer telesna teža ali telesna višina. Med tovrstnimi študijami je danes zelo pogosto citirano delo [1], ki s svojimi izsledki temelji na predhodnih raziskavah na podlagi opazovanja absorpcije gama žarkov pri skupini stotih mladih moških [2]. Že pred tem pa je bilo opravljenih več tovrstnih študij, na katere se še danes sklicuje marsikateri avtor [3]. Ob tem se porodi vprašanje točnosti predpostavk v teh študijah, saj se biomehanske lastnosti ljudi med seboj lahko bistveno razlikujejo, poleg tega pa omenjene raziskave ne upoštevajo odvisnosti regresijskih krivulj od spola oseb. Prav tako se poraja vprašanje merodajnosti zaradi starosti oseb [4], saj je bila povprečna starost oseb, vključenih v raziskavo, okrog 24 let, veliko današnjih raziskav pa se osredotoča na osebe, ki so starejše in so preživele določene nevromišične motnje v preteklosti.

Zaradi omenjenih problemov to delo obravnava alternativno metodo za določanje vrednosti statičnih parametrov nadlakti, podlakti in dlani ter se pri tem opira na metodo klasične robotske identifikacije [5, 6]. Le-ta se običajno uporablja za ugotavljanje tovrstnih parametrov pri robotskih manipulatorjih in temelji na predpostavki, da znamo dinamično opisati mehanski sistem, ki ga obravnavamo.

2 Identifikacija parametrov segmentov pri robotih

V splošnem lahko dinamično obnašanje vsakega robotskega mehanizma v koordinatah sklepov opišemo z inverzno dinamično enačbo [5]:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_v\dot{q} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) = \tau - J^T(q)h \quad (1)$$

Koti so označeni s q , kotne hitrosti s \dot{q} in pospeški v sklepih s \ddot{q} . Na levi strani te enačbe so pasivni vplivi na navor v sklepih, ki jih povzročajo vztrajnosti segmentov $B(q)\ddot{q}$, Coriolisovi in centripetalni vplivi $C(q, \dot{q})\dot{q}$, gravitacijski prispevki $G(q)$, viskozno trenje $F_v\dot{q}$ in Coulombovo trenje $F_s \operatorname{sgn}(\dot{q})$. Desna stran enačbe so aktivni prispevki v obliki navora, ki ga povzročajo motorji τ in navori, s katerim okolica deluje na manipulator $-J^T(q)h$. Če upoštevamo, da imamo pri identifikaciji robotskih segmentov opravka z odprto kinematično verigo, kjer ni prispevka okolice, in poznamo dinamični model v analitični obliki, lahko dinamično relacijo manipulatorja v časovnem trenutku t_i zapišemo kot linearno relacijo:

$$\tau(t_i) = Y(t_i)\pi \quad (2)$$

Tukaj vektor $\tau(t_i)$ predstavlja navor v sklepih manipulatorja, matrika $Y(t_i)$ je matrika regresorjev, π pa vektor identifikacijskih parametrov, kot so na primer mase ali težišča. Ta vektor naj bo dolžine J in predstavlja J parametrov, ki jih želimo identificirati. Če sedaj upoštevamo, da ima manipulator P sklepov, lahko enačbo 2 v izbranem časovnem trenutku zapišemo kot:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1J} \\ 0 & y_{22} & \cdots & y_{2J} \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & y_{PJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \vdots \\ \pi_J \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matrika $Y(t_i)$ ima sedaj zgornjetrikotniško obliko dimenzije $P \times J$. Za N izmerjenih časovnih trenutkov lahko napišemo predločen sistem N enačb: (Matrike, ki vsebujejo N časovnih elementov, so v nadaljevanju označene z nadčrtaji $\bar{\cdot}$.)

$$\bar{\tau} = \begin{bmatrix} \tau(t_1) \\ \vdots \\ \tau(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(t_1) \\ \vdots \\ Y(t_N) \end{bmatrix} \pi = \bar{Y}\pi \quad (4)$$

V enačbi 4 je dimenzija matrike navorov $\bar{\tau}$ sedaj enaka $(PN \times 1)$, matrike regresorjev \bar{Y} $(PN \times J)$ in identifikacijskih parametrov π , $(J \times 1)$. Ker je pri identifikaciji cilj izračun vektorja π , do njega pridemo s pomočjo metode najmanjših kvadratov [5, 6]:

$$\pi = (\bar{Y}^T \bar{Y})^{-1} \bar{Y}^T \bar{\tau} \quad (5)$$

Pri tem postopku moramo izmeriti kinematične parametre (kote, hitrosti in pospeške sklepov ter dolžine segmentov) in navor v sklepih manipulatorja, ki so ponavadi kar linearna funkcija toka skozi motorje v N različnih časovnih trenutkih.

Ob slabi pogojenosti matrike $(\bar{Y}^T \bar{Y})$ je vrednost inverza zelo velika, identifikacija pa napačna. Cilj pri vsakem reševanju sistema z metodo najmanjših kvadratov je čim manjša razpršenost lastnih vrednosti in s tem čim manjša linearna odvisnost stolpcev matrike Y (in s tem \bar{Y}) [6, 7]. Če ima kvadratna matrika $(\bar{Y}^T \bar{Y})$ rang, ki je manjši od njene dimenzije J , to pomeni, da je matrika Y singularna, en stolpec matrike Y , ki povzroči singularnost, pa mora biti linearna kombinacija nekega drugega stolpca. Iz razcepa po singularnih vrednostih [6] v takem primeru sledi, da ta stolpec lahko črtamo in zmanjšamo dimenzijo matrike Y za ena, parametra iz vektorja π , ki stolpcu pripada pa ne moremo identificirati. Podobno ravnamo tudi tedaj, ko je kakšna lastna vrednost zelo majhna in s tem vnaša slabo pogojenost v matriko Y . Identificirani parametri, ki so *identifikabilni*, so po tovrstnem postopku še vedno pravilni, tisti, ki jih črtamo, pa postanejo *neidentifikabilni*.

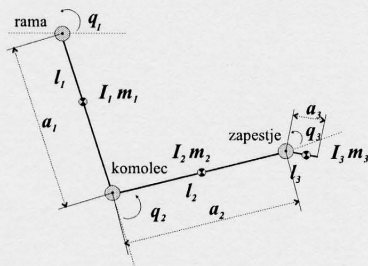
3 Identifikacija parametrov segmentov zgornje ekstremitete

Podobno kot pri robotski identifikaciji lahko parametre identificiramo tudi v biomehanskem sistemu. Bistvena razlika v primerjavi z robotskim mehanizmom je v načinu pogonov, saj pri biomehanskem sistemu ni motorjev, ampak sile in navori proizvajajo mišice, ki so v različnih točkah prek kit pritrjene na kosti. Za uporabo zgoraj razložene metodologije, je treba telesno okončino obravnavati na podoben način kot robota, ki ga poganjajo motorji. Ker ne poznamo navorov v sklepih, moramo razmere nekoliko spremeniti. Če bi imeli še naprej opravka z odprto kinematično verigo, ne bi bilo možnosti za ugotovitev prispevka sklepnih navorov med gibanjem. Zato je treba kinematično verigo zapreti in od zunaj vsiljevati določeno silo, ki jo ob predpostavki, da oseba ne izvaja nobene hotene aktivnosti, prek Jakobijeve matrike prenesemo na nivo sklepnih navorov. Ti navori so sedaj aktivni prispevki v sklepih.

3.1 Matematični opis dinamike zgornje ekstremitete

Pri modeliranju zgornje ekstremitete predpostavljamo, da so segmenti roke toga telesa (kar v resnici ne velja povsem

zaradi notranjih tkiv, ki med gibom spreminjajo svojo lego), da se rotacije sklepov dogajajo okoli fiksnih osi (kar je dokaj upravičeno pri zelo počasnem gibanju znotraj delovnih območij, kjer je potekal poskus) in da ni povsem nobene hotene aktivnosti τ , ki bi jo v gib vnašala mišična aktivnost. Model zgornje ekstremitete v sagitalni ravnini smo torej opisali kot preprost trisegmentni planarni manipulator, v skladu s prikazom na sliki 1. Pri



Slika 1. Geometrijske definicije pri predpostavljani strukturi zgornje ekstremitete s tremi prostostnimi stopnjami
Figure 1. Manjka podnapis v ANG!!! ???

tem so dolžine segmentov označene z a_i , težišča z l_i , koti s q_i , mase z m_i in vztrajnosti okoli težišč z I_i . Inverzni dinamični model roke je nekoliko drugačen kot pri mehanskem manipulatorju, saj je treba upoštevati, da imajo sklepi tudi določeno elastičnost, tako da je spremenjena enačba sedaj enaka [5]:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_v\dot{q} + F_e q + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) = \tau(u) - J^T(q)h \quad (6)$$

Člena, ki predstavljata elastičnosti in Coulombova trenja ($F_e q + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q})$) v primeru, da so mišice pasivne, pomenita pasivne momente v posameznih sklepih. Le ti so nelinearni [8] nastanejo pa kot posledica dejstva, da prek sklepov potekajo mišice, kite, vezi in koža. Poleg tega je sedaj aktivni navor τ funkcija aktivacije v mišicah, ki sodelujejo pri gibanju sklepa.

Ker imamo opravka s trisegmentnim modelom, zgornja enačba podaja relacijo za vse tri navori v sklepih rame, komolca in zapestja, kar pomeni za vse matrike dimenzije 3×3 , za vektorje pa 3×1 . Indeksi 1, 2 in 3 se nanašajo na ramo, komolec in zapestje.

Ker je bil cilj identifikacijskega postopka ugotovitev statičnih parametrov, je lahko meritev potekala kvazistatično, medtem ko so bile mišice med samim gibom pasivne. Napravili smo torej naslednje predpostavke:

$$B(q)\ddot{q} \approx 0, \quad C(q, \dot{q})\dot{q} \approx 0, \quad F_v\dot{q} \approx 0, \quad \tau(u) \approx 0 \quad (7)$$

Po teh predpostavkah lahko sedaj enačbo 6 zapišemo precej bolj preprosto:

$$G(q) + F_e q + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) = -J^T(q)h \quad (8)$$

Zgornja enačba tako sestoji iz gravitacijskega prispevka $G(q)$, elastičnosti sklepov $F_e q$, od predznaka hitrosti

odvisnega Coulombovega trenja $F_s \operatorname{sgn}(\dot{q})$ na levi strani in transformacije sile okolice na nivo posameznih sklepov $J^T(q)h$ na desni. Gravitacijski vpliv lahko izračunamo na podlagi analize trisegmentnega planarnega manipulatorja [5]:

$$G(q) = [g_1 \ g_2 \ g_3]^T \quad (9)$$

$$g_1 = g((l_1 m_1 + a_1(m_2 + m_3))c_1 + (l_2 m_2 + a_2 m_3)c_{12} + l_3 m_3 c_{123})$$

$$g_2 = g((l_2 m_2 + a_2 m_3)c_{12} + l_3 m_3 c_{123})$$

$$g_3 = g l_3 m_3 c_{123}$$

Gravitacijska konstanta je tukaj označena kot G . Uporabili smo notacijo $c_1 = \cos(q_1)$, $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$ in $c_{123} = \cos(q_1 + q_2 + q_3)$, kar velja tudi vnaprej. Če predpostavimo, da na statična trenja ne vplivajo sosednji sklepi, lahko matriki elastičnosti in Coulombovih trenj zapišemo kot diagonalni matriki reda 3×3 z elementi F_{ei} in F_{si} . Izpeljali smo tudi Jacobijevo matriko $J(q)$ za trisegmentni planarni manipulator, ki podaja transformacijo med silami na vrhu in navori v sklepih, vendar je na tem mestu ne podajamo.

3.2 Identifikacijski postopek za parametre zgornje ekstremitete

Poenostavljeno enačbo roke 8 v skladu z identifikacijskim postopkom, opisanim v poglavju 2, lahko v izbranem časovnem trenutku t_i opišemo kot linearno kombinacijo matrike regresorjev in vektorja identifikacijskih parametrov π , ki je na splošno sestavljen iz treh podvektorjev π_1 , π_2 in π_3 , pripadajočih vsakemu segmentu:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{13} \\ 0 & Y_{22} & \cdots & Y_{23} \\ 0 & \cdots & 0 & Y_{33} \end{bmatrix}_{3 \times J} \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{bmatrix}_{J \times 1} \quad (10)$$

Pri tem velja, da je:

$$\dim(Y_{ij}) = 1 \times \dim(\pi_j) \quad (11)$$

in da je dolžina celotnega identifikacijskega vektorja enaka $J = \dim(\pi_1) + \dim(\pi_2) + \dim(\pi_3)$. Pri identifikacijskem postopku zopet upoštevamo, da relacija 10 velja v N časovnih trenutkih, kot je bilo prikazano v enačbi 4. Celotni problem je torej:

$$\bar{\tau}_{3N \times 1} = \bar{Y}_{3N \times J} \pi_{J \times 1}, \quad (12)$$

kjer zopet rešujemo problem najmanjših kvadratov iz enačbe 5.

Prvo vprašanje, ki se ga je treba lotiti pri praktični izvedbi identifikacijskega postopka, je izbira identifikacijskega vektorja. Za vsakega od segmentov želimo ugotoviti parametre mase m_i , koordinate težišča l_i ,

elastičnosti f_{ei} in Coulombovega trenja f_{si} . Skupaj torej to pomeni 12 identifikacijskih parametrov. Vidimo pa, da je mogoče število identifikacijskih spremenljivk zmanjšati za tri, če elastičnosti in Coulombova trenja nadomestimo z enim samim členom, ki pomeni pasivni moment v sklepu i , torej $\tau_{pi} = F_e q_i + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}_i)$.

Poleg tega lahko identifikacijski postopek bistveno poenostavimo, če problem obravnavamo po delih in za vsakega od navorov v sklepih napišemo svojo enačbo za vsak trenutek t_i . Problem torej obravnavamo v treh korakih, od zapestja (sklep 3) prek komolca (sklep 2) do rame (sklep 1).

1. V prvem koraku identificiramo le parametra τ_{p3} in $m_3 l_3$, tako da izhajamo iz enačbe tretjega sklepa, ki neposredno sledi iz poenostavljene dinamične enačbe 8 (Z nadčrtaji je zopet označeno N časovnih trenutkov.):

$$\begin{aligned} T_3 &= [1 \quad gc_{123}] [\tau_{p3} \quad m_3 l_3]^T \\ \bar{T}_3 &= \bar{Y}_3 \pi_3 \implies \pi_3 = (\bar{Y}_3^T \bar{Y}_3)^{-1} \bar{Y}_3^T \bar{T}_3 \end{aligned} \quad (13)$$

2. V drugem koraku identificiramo parametre τ_{p2} , $m_2 l_2$ in m_3 , tako da izhajamo iz enačbe drugega sklepa in upoštevamo $m_3 l_3$. Po vpeljavi nove spremenljivke $T_2 = \tau_2 - gc_{123} m_3 l_3$ lahko napišemo:

$$\begin{aligned} T_2 &= [1 \quad gc_{12} \quad ga_2 c_{12}] [\tau_{p2} \quad m_2 l_2 \quad m_3]^T \\ \bar{T}_2 &= \bar{Y}_2 \pi_2 \end{aligned} \quad (14)$$

Ker sta v matriki \bar{Y}_2 drugi in tretji stolpec linearno odvisna, problem še naprej poenostavimo, tako da hkrati obravnavamo le enega od linearno odvisnih elementov matrike. Zanimarimo najprej tistega, ki mu pripada lastna vrednost 0, nato pa še tistega z zelo majhno lastno vrednostjo [6]. Ker je druga lastna vrednost zelo majhna v primerjavi z največjo, je aproksimacija upravičena. V prvem koraku tako identificiramo τ_{p2} in $m_2 l_2$,

$$\begin{aligned} T_2 &= [1 \quad gc_{12}] [\tau_{p2} \quad m_2 l_2]^T \\ \bar{T}_2 &= \bar{Y}_{21} \pi_{21} \implies \pi_{21} = (\bar{Y}_{21}^T \bar{Y}_{21})^{-1} \bar{Y}_{21}^T \bar{T}_2 \end{aligned} \quad (15)$$

Nato pa zopet τ_{p2} in še m_3 :

$$\begin{aligned} T_2 &= [1 \quad ga_2 c_{12}] [\tau_{p2} \quad m_3]^T \\ \bar{T}_2 &= \bar{Y}_{22} \pi_{22} \implies \pi_{22} = (\bar{Y}_{22}^T \bar{Y}_{22})^{-1} \bar{Y}_{22}^T \bar{T}_2 \end{aligned} \quad (16)$$

3. V tretjem koraku nam preostane le še identifikacija parametrov τ_{p1} , $m_1 l_1$ in m_2 . Zopet izhajamo iz enačbe pripadajočega sklepa in že identificiranih parametrov. Če sedaj upoštevamo, da je $T_1 = \tau_1 - g(a_1 c_1 + a_2 c_{12}) m_3 - gc_{123} m_3 l_3 - gc_{12}$, potem velja:

$$\begin{aligned} T_1 &= [1 \quad gc_1 \quad ga_1 c_1] [\tau_{p1} \quad m_1 l_1 \quad m_2]^T \\ \bar{T}_1 &= \bar{Y}_1 \pi_1 \end{aligned} \quad (17)$$

Ker sta v matriki \bar{Y}_1 drugi in tretji stolpec zopet linearno odvisna, problem poenostavimo, tako da naenkrat obravnavamo le enega od linearno odvisnih elementov matrike na enak način kot prej. V prvem koraku tako identificiramo τ_{p1} in $m_1 l_1$,

$$\begin{aligned} T_1 &= [1 \quad gc_1] [\tau_{p1} \quad m_1 l_1]^T \\ \bar{T}_1 &= \bar{Y}_{11} \pi_{11} \implies \pi_{11} = (\bar{Y}_{11}^T \bar{Y}_{11})^{-1} \bar{Y}_{11}^T \bar{T}_1 \end{aligned} \quad (18)$$

v drugem koraku pa zopet τ_{p1} in še m_2 :

$$\begin{aligned} T_1 &= [1 \quad a_1 gc_1] [\tau_{p1} \quad m_2]^T \\ \bar{T}_1 &= \bar{Y}_{12} \pi_{12} \implies \pi_{12} = (\bar{Y}_{12}^T \bar{Y}_{12})^{-1} \bar{Y}_{12}^T \bar{T}_1 \end{aligned} \quad (19)$$

Na koncu lahko povzamemo, da je za nadlaket identifikabilen le produkt mase in težišča $m_1 l_1$, ne pa vsak posebej, medtem ko so drugi statični parametri preostalih dveh segmentov vsi identifikabilni. Treba je poudariti tudi, da je bilo potrebno pogojenosti matrik regresorjev \bar{Y} v zgornjih enačbah še naprej izboljšati, saj je tisti stolpec, ki pripada pasivnemu momentu, v vseh časovnih trenutkih enak 1. Zato smo v drugi stolpec matrik \bar{Y}_3 , \bar{Y}_{21} , \bar{Y}_{22} , \bar{Y}_{11} in \bar{Y}_{12} vnesli perturbacijo, ki odpravi konstantnost tega stolpca. Ta motnja je bila vnešena v obliki signala rampe z minimumoma v časovni točki t_1 in t_N , in maksimumom pri času $t_{N/2}$. Naklon rampe za vsako matriko posebej je bil določen tako, da smo minimizirali pogojenosti regresorskih matrik. Na koncu smo s takim postopkom dosegli pogojenosti, ki so se približale vrednosti 1, kar je bil tudi naš cilj. Seveda pa se po vnašanju opisane motnje v drugi stolpec ne moremo več zanesti na rezultat identifikacije, ki pripada drugemu stolpcu, torej na vse pasivne momente τ_{pi} . Tak postopek nam torej omogoča le identifikacijo statičnih parametrov $m_1 l_1$, m_2 , l_2 , m_3 in l_3 , medtem ko pasivne momente dobimo po postopku identifikacije prek izpeljave ustreznega člena τ_{pi} iz enačb 13, 14, 17 ter upoštevanja identificiranih parametrov in povprečja vseh N točk:

$$\tau_{p1} = \sum_{i=1}^N (-gc_{1i} m_1 l_1 - ga_1 c_{1i} m_2 + T_{1i}) / N \quad (20)$$

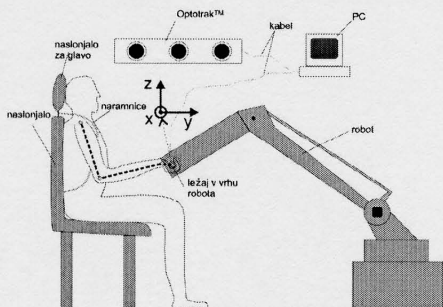
$$\tau_{p2} = \sum_{i=1}^N (-gc_{12i} m_2 l_2 - ga_2 c_{12i} m_3 + T_{2i}) / N \quad (21)$$

$$\tau_{p3} = \sum_{i=1}^N (-gc_{123i} m_3 l_3 + \tau_{3i}) / N \quad (22)$$

4 Eksperimentalni del

Cilj poskusa je bil vsiljevanje želene trajektorije v sklepe roke, na podlagi katere je mogoče kasneje izvesti identifikacijo. Pri poskusu smo uporabili industrijskega

antropomorfnega robota s šestimi prostostnimi stopnjami - *Yaskawa*® *MOTOMAN sk6*. Med meritvijo je bilo gibanje robota kar se da poravnano s sagitalno ravnino osebe (slika 2). Za merjenje sile je bil uporabljen 4-



Slika 2. Opis eksperimenta od zgoraj (levo) in od strani (desno) Figure 2. ?????

dimenzionalni senzor sile (JR^3 ®), pritrjen na vrh robota. Na vrhu senzora je bil pritrjen ročaj, obdan z gumo, in sicer tako, da je bila prek ležaja prosta rotacija okoli osi x. Merjena oseba je sedela na sedežu in z desno roko povsem sproščeno držala ročaj, trup pa je bil fiksiran s pomočjo naramnic, pritrjenih na stol. Za sledenje gibanja med meritvijo je bil uporabljen sistem za sledenje gibanja z aktivnimi IR markerji, *Optotrak*®. Markerji smo pritržili na kožo tik nad rotacijskimi točkami rame, komolca in zapestja, na vrh robota in obeh sklepov robota, ki sta se med meritvijo gibala. Vsi izračuni so bili izvedeni po zajemu podatkov s pomočjo uporabe programskega paketa *Matlab*®. Podatki iz *Optotraka* in senzora sile so bili pred obdelavo filtrirani z nizkopropustnim Butterworthovim sitom šestega reda s pasovno širino 5 Hz.

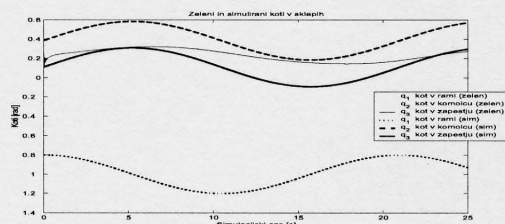
4.1 Določitev najboljše trajektorije v sklepih roke

Da bi lahko izvedli postopek identifikacije, je bilo treba v sklepe roke vnesti trajektorijo, ki mora zadoščati kriterijem:

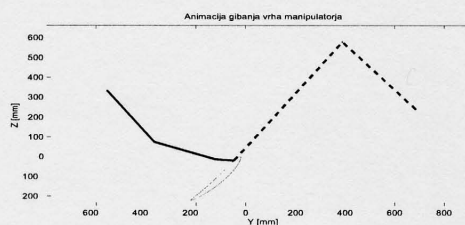
- Koti v sklepih ne smejo izkazovati prevelikih deviacij od izbrane delovne točke. V tej delovni točki namreč lahko predpostavimo linearni model s konstantnimi pasivnimi momenti.
- Da bi že v osnovi dobili čim večjo linearno neodvisnost obeh stolpcev vseh matrik Y , moramo po drugi strani v trajektorije kotov vnesti čim več variacij.
- Zaradi boljše variabilnosti vrha roke, je za trajektorije kotov veliko bolje, če so med seboj nekoliko fazno zamaknjene. Pri tem predpostavimo, da kot želeno trajektorijo vzamemo neki periodični signal.
- Poleg tega moramo izpolniti tudi zahtevo po kvazi statičnosti giba, ki določa, da mora biti trajektorija

izvedena z ne preveliko hitrostjo. Velikost te hitrosti smo empirično določili na 0.3 rad/s .

V Simulinku je bila najprej izvedena simulacija, ki upošteva povsem enake kinematične in dinamične razmere, kot nastopajo v dejanskem eksperimentu. V simulacijo so bili za referenco vnešeni koti s slike 3, trajektorija, katero pri takšnem gibu opiše vrh, pa je vidna s slike 4.



Slika 3. Primerjava med časovnimi poteki zelenih kotov v sklepih roke (debeli črta) in rezultati simulacije (tanki črta) Figure 3. ?????



Slika 4. Želena trajektorija, ki jo mora opisati vrh robota. Na desni strani je ponazorjen robot (črtkana črta), na levi pa roka (polna črta) Figure 4. ?????

Bistvene razlike med zelenimi koti in rezultati simulacije nastanejo v kotu zapestja q_3 , kar je predvsem posledica kinematičnih omejitev in dušenj, vnešenih v sklepe roke.

Prek tega smo prišli do zelene trajektorije, ki jo mora opraviti robot, da se bodo sklepi roke vsaj približno gibali v skladu z želeno trajektorijo, prikazano na sliki 3. Zaradi narave krmilnika robota smo morali izhajati iz programiranja točk, skozi katere naj se zapelje vrh robota s slike 4.

Po tem postopku smo dosegli ujemanje, katerega razlika od reference je bila v najslabšem primeru nekaj milimetrov, kar je povsem zadovoljivo.

5 Rezultati

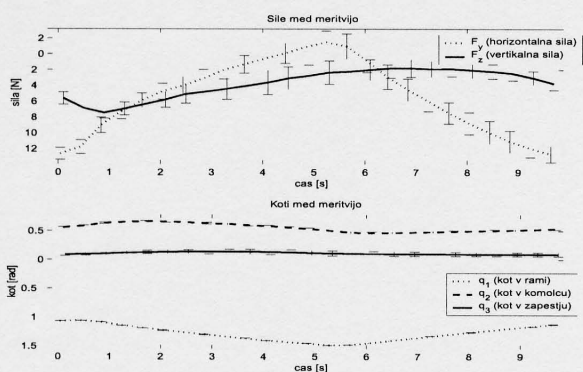
Celotna poskusna analiza je bila opravljena na eni sami osebi s telesno težo 77 kg, višino 182 cm in brez kakršnihkoli nevromišičnih boleznih.

Med vsako izmed desetih zaporednih meritev so bile pridobljene trajektorije kotov v vseh treh sklepih in prav tako izmerjene sile iz kontakta med roko in robotom.

	$m_1 l_1 [kgm]$	$m_2 [kg]$	$l_2 [m]$	$m_3 [kg]$	$l_3 [m]$	$\tau_{p1} [Nm]$	$\tau_{p2} [Nm]$	$\tau_{p3} [Nm]$
x_{ref}	0.400	1.126	0.189	0.753	0.078	/	/	/
\bar{x}	0.342	1.114	0.225	0.887	0.070	-2.581	-1.879	-0.028
σ_x	0.060	0.182	0.042	0.0518	0.002	0.230	0.096	0.003
$\bar{x} - x_{ref}$	-0.058	-0.012	0.036	0.134	-0.008	/	/	/

Tabela 1. Reference, pridobljene iz literature (x_{ref}), ter pridobljene identificirane vrednosti statičnih parametrov predstavljenih kot povprečja desetih meritev (\bar{x}), standardnih deviacij meritev (σ_x) in razlike povprečij glede na referenčne vrednosti $\bar{x} - x_{ref}$
Table 1. ?????

Izmerjene trajektorije povprečnih kotov in sil s standardnimi deviacijami so prikazane na sliki 5. Koti sicer niso



Slika 5. Povprečni izmerjeni koti (spodaj) in sile (zgoraj) iz desetih meritev in njihove standardne deviacije
Figure 5. ?????

povsem enaki želenim na sliki 3, vendar ustrezajo zahtevam trajektorije za identifikacijo. Opaziti je tudi precej večje standardne deviacije pri silah glede na tiste pri kotih.

Prav tako smo za vsako izmed desetih meritev izvedli identifikacijo po zgornjem postopku v okolju Matlab in nato dobljene rezultate primerjali s tistimi iz literature [1].

V literaturi je za zgornjo ekstremiteto zelo težko zaslediti parametre, kot so pasivni momenti v sklepih, vendar študija, ki smo jo napravili prej [8], služi za okvirno orientacijo. Tako pridobljeni rezultati identifikacije kot tudi podatki iz literature so razvidni iz tabele 4.1.

Iz tabele 4.1 vidimo, da so standardne deviacije največje za parameter m_2 , najmanjše pa za l_3 , medtem ko so napake med povprečjem in referenčnimi vrednostmi največje pri m_3 , najmanjše pa zopet pri l_3 . Razlog za najmanjše napake in deviacije pri l_3 je v akumulaciji napake pri tem postopku. V zadnjem koraku, ko se računajo parametri nadlakti, se namreč upoštevajo vse poprej identificirane vrednosti in seveda tudi njihove napake.

6 Sklep

Predstavljena metoda podaja relativno preprosto in popolnoma neinvazivno metodologijo za identifikacijo statičnih

parametrov zgornje ekstremitete. Pridobljeni rezultati pričajo, da smo sestavili postopek, ki vrne smiselne rezultate, primerljive s tistimi iz literature. Problem na tej stopnji pa je ovrednotenje pridobljenih identificiranih vrednosti, saj podatkov iz literature seveda ne moremo vzeti za zanesljivo referenco. Tudi v njih je namreč napaka, ki je povsem nepoznane narave in se po nekaterih ocenah giblje tudi tja do 30%.

Poleg predstavljene metode za določanje statičnih parametrov zgornje ekstremitete bi opisano metodo v prihodnosti lahko uporabili tudi kot osnovo za določanje transverzalnih vztrajnostnih momentov in viskoznih trenj pri vseh treh omenjenih segmentih. V enačbi 6 bi v tem primeru upoštevali še člene, povezane s hitrostmi in pospeški, in pri tem sistem vzbujali s trajektorijami določenih hitrosti in pospeškov.

7 Literatura

- [1] P. de Leva 1995. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters, *Journal of Biomechanics* 29, 1223-1230.
- [2] V. Zatsiorsky, V. Seluyanov 1983. The mass and inertia characteristics of the main segments of the human body, *International Biomechanics* vol. 4B, Human Kinetic, Illinois, 1152-1159.
- [3] W. T. Dempster, R. T. Gaughran 1969. Properties of body segments based on size and weight, Wright Patterson Air Force Base: Wright Air Development Center.
- [4] R. K. Jensen 1989. Changes in segment inertia proportions between 4 and 20 years, *Journal of Biomechanics* 6/7, 529-536.
- [5] L. Siciliano, B. Sciavicco 1996. Modeling and control of robot manipulators, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [6] C. H. An, C. G. Atkeson, J. M. Hollerbach 1988. Model-based control of a robot manipulator, MIT Press.
- [7] G. H. Golub, C. F. Van Loan 1996. Matrix computations, Johns Hopkins Series in the Mathematical Sciences.
- [8] T. Kodek, M. Munih, 2002. Quantification of shoulder and elbow passive moments in the sagittal plane as a function of adjacent angle fixations, To be published in the *Journal of Technology and Health Care*.

Timotej Kodek je leta 2000 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od istega leta je zaposlen kot mladi raziskovalec v laboratoriju za Robotiko in biomedicinsko

tehniko. Njegova glavna področja zanimanja obsegajo biomehaniko, robotiko in mikroprocesorske sisteme.

Marko Munih je diplomiral, magistriral in doktoriral v letih 1986, 1989 in 1993 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je na isti fakulteti kot izredni profesor ter predstojnik Laboratorija za robotiko in biomedicinsko tehniko. Njegovo raziskovalno področje se osredotoča na funkcionalno električno stimulacijo spodnjih ekstremitet, biomehaniko, ter obravnavanje novih rehabilitacijskih pristopov s pomočjo uporabe robotske tehnologije.