

Sistem za automatsku kompenzaciju sistemske greške senzora sile i momenta kod industrijskih robota

Nikola Vidaković, Nikola Knežević

Apstrakt—Ogroman je značaj merenja kontaktne sile u zadacima industrijske robotike. Ova merenja se mogu koristiti prilikom kontrole sile, zaštite od prekomernih sila, kao i u oblasti kolaboracije između čoveka i robota. Prilikom korišćenja senzora sile i momenta susrećemo se sa nekoliko problema koje ćemo u ovom radu pokušati da rešimo. Cilj nam je da razvijemo sistem za automatsku kompenzaciju sistemske greške senzora sile i momenta, koja će podrazumevati estimaciju pomeraja (engl. bias) senzora, gravitacionu kompenzaciju, kao i transformaciju sile u koordinatni sistem od interesa. Rezultat ove procedure je dobijanje preciznijih merenja kontaktnih sila koje su nam od značaja za dalju primenu.

Ključne reči—senzor sile i momenta; gravitaciona kompenzacija; estimacija mase i pomeraja; automatska kompenzacija sistemske greške

I. UVOD

Važnost preciznog merenja sila i momenata je esencijalna za mnoge primene u industrijskoj robotici kada robot dolazi u kontakt sa okolinom [1,2]. Merenja se mogu koristiti prilikom zaštite robota od prekomernih sila i kontrole primenjene sile [3,4]. U nekim slučajevima u industrijskoj robotici sama kontrola pozicije nije dovoljna, već je potrebno kontrolisati silu kojom se deluje [5,6]. Recimo, prilikom sklapanja određenih delova na traci za asembliranje je poznavanje sile neophodno [7,8,9]. Poznavanjem sile, greška u pozicioniranju gubi svoj značaj, jer se može lako detektovati kroz velike kontaktne sile, nakon čega možemo izvršiti korekciju pozicije [10]. Neki od novih izazova u polju robotike su kinematičko učenje [11] i kolaboracija između robota i čoveka [12,13], gde je poznavanje sile kojom čovek deluje na završni uređaj robota prilikom zajedničkog izvršavanja zadatka ključno.

U većini primena robot dolazi u kontakt sa okolinom preko svog završnog uređaja. Kontaktne sile koje deluju na završni uređaj mogu se meriti pomoću senzora koji se nalazi na zglobu pre završnog uređaja. Kasnije se može izvršiti transformacija ovih sila u odgovarajući koordinatni sistem, jer nam je često zgodnije da silu izražavamo u nekom fiksnom koordinatnom sistemu.

Usled različitih uticaja, kao što su promenljiva radna temperatura ili promene unutar elektronskih komponenti, može

se desiti da merenja senzora budu pomerena, tj. da ne pokazuju pravu vrednost sile, već vrednost koja ima određeni pomeraj. Takođe, uvek će postojati gravitaciona komponenta sile koja potiče od samog senzora i završnog uređaja koji je namontiran na njega, a koji imaju određenu masu. Da bismo dobili precizna merenja kontaktne sile, potrebno je izračunati konstantan pomeraj u merenjima senzora kao i promenljivu gravitacionu komponentu sile i kompenzovati ih prilikom očitavanja senzora.

Pošto se sa gorenavedenim problemima susrećemo prilikom svake primene senzora sile, značajno je osmisliti automatizovan sistem, koji će poništiti parazitne uticaje kada želimo da merimo kontaktnu silu. Taj sistem treba da objedinjuje sve neophodne procedure koje nam obezbeđuju precizna merenja. Takođe, procedura mora biti dovoljno modularna i univerzalna da se može koristiti kao sastavni deo različitih zadataka u robotici.

Ovaj rad daje odgovore na sledeća pitanja: Kako izvršiti estimaciju pomeraja senzora, kao i mase i centra mase senzora i završnog uređaja? Kako se vrši procena gravitacione komponente sile? Kako se vrši transformacija sile u različite koordinatne sisteme? Takođe, prikazani su rezultati eksperimentalnih merenja i diskusija o njihovoj preciznosti i mogućnostima primene razvijenih procedura.

Glavni cilj rada je razvoj automatizovane procedure za kompenzaciju sistemske greške senzora i dobijanje preciznih merenja kontaktne sile u globalnom koordinatnom sistemu.

II. METODOLOGIJA RADA

Potrebno je osvrnuti se na teorijsku osnovu merenja sile kod industrijskih robota i postupke estimacije pomeraja, računanja gravitacione kompenzacije i transformacije sila u različitim koordinatnim sistemima. Ako sa \mathbf{F}_s obeležimo vektor sa očitavanjima senzora, sa \mathbf{F}_c vektor sa kontaktnim silama, sa \mathbf{F}_b vektor sa pomerajima, sa \mathbf{F}_g vektor sa promenljivim gravitacionim komponentama sila i sa \mathbf{F}_n vektor sa očitavanjima usled šuma, onda možemo da pišemo:

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_n, \quad (1)$$

gde važi da je $\mathbf{F} = [F_x F_y F_z T_x T_y T_z]^T$, pri čemu prve tri komponente predstavljaju projekciju vektora sile, a druge tri projekciju vektora momenta. Naš cilj je da izračunamo konstantan vektor sa pomerajima \mathbf{F}_b i promenljivi vektor \mathbf{F}_g tako da možemo što bolje da estimiramo vrednosti kontaktnih sila \mathbf{F}_c .

A. Estimacija pomeraja

Pomeraj je uključen u sva očitavanja senzora, tako da prvo moramo izračunati \mathbf{F}_b i onda oduzimati te vrednosti od očitavanja senzora tokom rada u realnom vremenu. Estimaciju vršimo iz niza merenja senzora koja ćemo očitavati u tačno određenim orijentacijama završnog uređaja. Merenja se očitavaju dok je robot u stanju mirovanja i neopterećen. Estimaciju pomeraja \mathbf{F}_b vršimo na osnovu sledeće ideje: recimo da računamo vrednost F_{bx} . Dovedemo robot u položaj u kom bi trebalo da F_x komponenta sile bude nula i u ovom slučaju je očitavanje senzora F_{sx} u stvari vrednost pomeraja F_{bx} . Alternativno, možemo dovesti robot u položaje u kojima bi sile trebalo da imaju vrednosti $+F_x$ i $-F_x$ i u ovom slučaju očitavanja će biti $F_x + F_{bx}$ i $-F_x + F_{bx}$ respektivno; tada pomeraj možemo naći kao aritmetičku sredinu ova dva očitavanja. Na sličan način može se estimirati i pomeraj momenata: tražimo pozicije u kojima su stvarne sile $(+F_y, +F_z)$ i $(-F_y, -F_z)$, tada će očitavanja za moment oko x ose biti:

$$T_x = (r_y F_z - r_z F_y) + T_{bx}, \quad T_x = (-r_y F_z + r_z F_y) + T_{bx} \quad (2)$$

respektivno, gde je \mathbf{r} centar mase senzora. Vrednost T_{bx} možemo naći kao aritmetičku sredinu ova dva merenja. Kako bismo smanjili grešku estimacije usled šuma, možemo uzeti više od dva očitavanja sile za procenu pomeraja. Tačnije, postoje 24 odgovarajuće orijentacije senzora koje su pogodnije za merenja pomoću kojih ćemo vršiti estimaciju [10]. To su pozicije u kojima bi dve komponente uvek trebalo da imaju vrednost nula, a treća $\pm mg$, gde je m masa senzora i završnog uređaja, a g lokalno gravitaciono ubrzanje. Pri tome se sve 24 pozicije mogu dobiti transformacijom globalnog koordinatnog sistema. Tada vrednosti pomeraja sila F_x , F_y i F_z dobijamo kao aritmetičku sredinu svih 24 očitavanja odgovarajuće komponente. Vrednosti pomeraja momenta τ_x dobijamo kao aritmetičku sredinu očitavanja u onim pozicijama koje odgovaraju gore opisanim slučajevima. Slično tome, estimiranu vrednost pomeraja T_y i T_z dobijamo usrednjavanjem očitavanja u njima odgovarajućim pozicijama.

B. Estimacija mase i centra mase

Da bismo izračunali gravitacionu komponentu sile, potrebno nam je da znamo masu i centar mase senzora i završnog uređaja. Ukoliko su ove vrednosti poznate mogu se koristiti, a u nastavku će biti dat postupak za njihovu estimaciju. Neka je gravitacioni vektor u globalnim koordinatama dat kao $\mathbf{g}_i = [0 \ 0 \ -g]^T$. Ako je sa \mathbf{R}_i obeležena matrica rotacije između globalnog koordinatnog sistema i i -te pozicije senzora, odnosno završnog uređaja robota, tada će gravitacioni vektor izražen u koordinatnom sistemu senzora biti: $\mathbf{g}_{si} = \mathbf{R}_i^T \mathbf{g}_i$. Očitavanje senzora u i -toj poziciji nakon što je oduzet pomeraj iznosi $\mathbf{F}_i =$

$m \cdot \mathbf{g}_{si}$. Ako smestimo sva merenja sile od ranije (24 merenja po 3 sile) u vektor $\mathbf{F}_{72 \times 1}$ i sve vektore \mathbf{g}_{si} u vektor $\mathbf{G}_{72 \times 1}$, možemo estimirati masu \bar{m} računajući:

$$\bar{m} = \min_m (\mathbf{F} - m\mathbf{G})^T (\mathbf{F} - m\mathbf{G}). \quad (3)$$

Koristeći metod najmanjih kvadrata [1], dobijamo:

$$\bar{m} = \frac{\mathbf{G}^T \mathbf{F}}{\mathbf{G}^T \mathbf{G}}. \quad (4)$$

Informacija o centru mase može se pronaći u merenjima momenta. Ako je rastojanje od centra senzorskog koordinatnog sistema do centra mase \mathbf{r} , tada i -ti momenat usled uticaja gravitacije, iznosi $\boldsymbol{\tau}_i = m \mathbf{r} \times \mathbf{g}_{si}$. Vektorski proizvod iz ove relacije može se zameniti sledećim izrazom: $\mathbf{T}_i = m \mathbf{A}_i \mathbf{r}$, gde je

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & g_{iz} & -g_{iy} \\ -g_{iz} & 0 & g_{ix} \\ g_{iy} & -g_{ix} & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Sada smestimo sve momente u jedan vektor $\mathbf{T}_{72 \times 1}$ i sve matrice \mathbf{A}_i u veliku matricu $\mathbf{A}_{72 \times 3}$ i računamo vektor $\bar{\mathbf{r}}$ kao:

$$\bar{\mathbf{r}} = \min_m (\mathbf{T} - \bar{m} \mathbf{A} \mathbf{r})^T (\mathbf{T} - \bar{m} \mathbf{A} \mathbf{r}), \quad (6)$$

gde je \bar{m} estimirana masa. Rešenje dobijamo korišćenjem pseudo-inverznog metoda:

$$\bar{\mathbf{r}} = \frac{1}{\bar{m}} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{T}. \quad (7)$$

C. Gravitaciona kompenzacija

Kada znamo masu i centar mase, možemo izračunati gravitacionu komponentu sile:

$$\bar{\mathbf{F}}_g = \begin{bmatrix} \bar{m} \mathbf{R}^T \mathbf{g}_i \\ \bar{m} \bar{\mathbf{r}} \times (\mathbf{R}^T \mathbf{g}_i) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Vidimo da je ovo promenljiva komponenta, jer zavisi od trenutne orijentacije senzora, odnosno od matrice rotacije \mathbf{R} , koja se može izraziti i preko Euler-ovih uglova. Odlučili smo se za ovakvu reprezentaciju matrice, jer Euler-ove uglove možemo dobiti od kontrolera robota putem direktne kinematike. Veza između elemenata matrice \mathbf{R} i Euler-ovih uglova glasi:

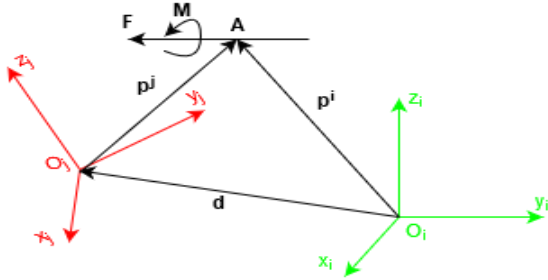
$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\varphi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\varphi) & \sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\varphi) - \cos(\psi) \sin(\varphi) & \cos(\psi) \sin(\theta) \cos(\varphi) + \sin(\psi) \sin(\varphi) \\ \cos(\theta) \sin(\varphi) & \sin(\psi) \sin(\theta) \sin(\varphi) + \cos(\psi) \cos(\varphi) & \cos(\psi) \sin(\theta) \sin(\varphi) - \sin(\psi) \cos(\varphi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Konačno, kada zamenimo \mathbf{R} u gornji izraz dobijamo:

$$\bar{\mathbf{F}}_g = mg \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \sin(\Psi) \\ -\cos(\theta) \cos(\Psi) \\ r_z \cos(\theta) \sin(\Psi) - r_y \cos(\theta) \cos(\Psi) \\ r_x \cos(\theta) \cos(\Psi) + r_z \sin(\theta) \\ -r_y \sin(\theta) - r_x \cos(\theta) \sin(\Psi) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

D. Transformacija sile iz senzorskog u globalni koordinatni sistem

Često nam je od interesa da znamo kolika je vrednost kontaktne sile u nekom drugom koordinatnom sistemu, najčešće je to koordinatni sistem koji je pomeren na mesto vrha završnog uređaja (TCP – tool center point), a zadržava orijentaciju globalnog koordinatnog sistema. Time dobijamo merenje kontaktne sile na vrhu završnog uređaja izražene u fiksnim globalnim koordinatama.



Sl. 1. Transformacija sile i momenata između dva koordinatna sistema.

Transformacija se vrši na sledeći način: $\mathbf{F}^i = \mathbf{T}_i^j \mathbf{F}^j$ (slika 1) gde je \mathbf{T}_i^j matrica 6x6 i možemo je napisati u sledećoj formi:

$$\mathbf{T}_i^j = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i^j & \mathbf{0} \\ \mathbf{W}_i^j \mathbf{R}_i^j & \mathbf{R}_i^j \end{bmatrix}, \quad (10)$$

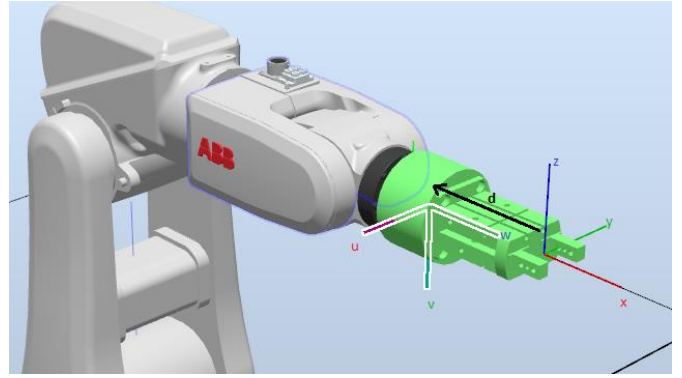
gde je

$$\mathbf{W}_i^j = \begin{bmatrix} 0 & -d_z & d_y \\ d_z & 0 & -d_x \\ -d_y & d_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

pri čemu je \mathbf{d} vektor pozicije O_j u odnosu na O_i , a \mathbf{R}_i^j matrica rotacije jednog koordinatnog sistema u odnosu na drugi [14]. Matricu \mathbf{R}_i^j možemo izračunati na način opisan u prethodnom poglavlju preko Euler-ovih uglova, a vektor \mathbf{d} je označava rastojanje između dva koordinatna sistema izražen u koordinatama globalnog koordinatnog sistema. Taj podatak takođe možemo dobiti od kontrolera robota, kao razliku pozicije dva koordinatna sistema u globalnim koordinatama. Konkretno, prilikom testiranja tačnosti sistema vršili smo merenja u jednoj konkretnoj poziciji (slika 2).

U našem slučaju vrednosti Euler-ovih uglova i vektora \mathbf{d} iznose:

$$\varphi = -90^\circ, \theta = 0^\circ, \Psi = -90^\circ, \\ d_x = -0.12 \text{ m}, d_y = 0 \text{ m}, d_z = 0 \text{ m}.$$



Sl. 2. Pozicija u kojoj smo vršili testiranje. Prikaz transformacije.

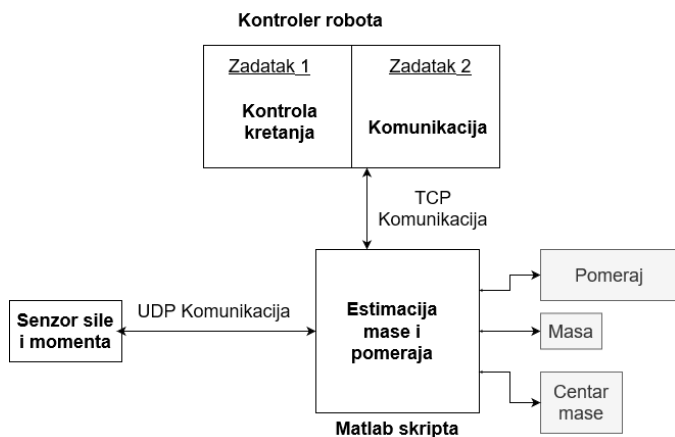
Odatve dobijamo rotacionu matricu:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Na osnovu ovih vrednosti vršili smo transformaciju sile u vrh završnog uređaja sa globalnom orijentacijom. Ukoliko se robot kreće, podatke o orijentaciji senzora treba slati iznova kad god vršimo merenje sile, pošto će se ove vrednosti menjati, a menjaće se i komponente vektora \mathbf{d} u globalnom koordinatnom sistemu.

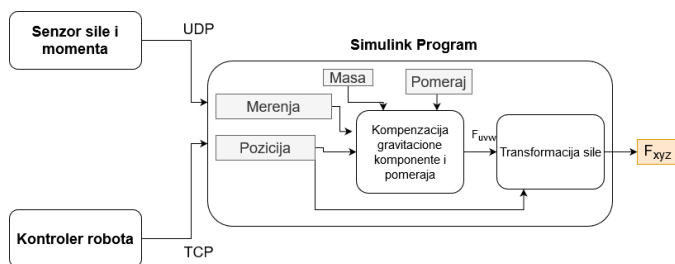
III. IMPLEMENTACIJA

Ideja je da se pomoću Matlab(MathWorks,Inc.) programa na PC računaru, vrši komunikacija sa sensorom i kontrolerom robota, kao i obrada dobijenih podataka. Napisan je program u ABB RobotStudio okruženju, gde smo zadali kretanje robota, a komunikacija sa Matlab programom preko TCP protokola vrši se u paralelnom zadatku. Kada robot stigne u određenu poziciju, šalje se poruka matlab programu, koji tada vrši očitavanje merenja sa senzora. Komunikacija između Matlab programa i senzora realizovana je preko UDP protokola. Osim toga, u Matlabu su implementirani i algoritmi za estimaciju od ranije. Blok dijagram programa za estimaciju mase i pomeraja je prikazan na slici 3. Dakle, pokretanjem programa na kontroleru robota, a zatim i Matlab programa, izvršava se automatizovana procedura za računanje pomeraja, mase i centra mase i oni se čuvaju za dalju upotrebu. Takođe, realizovan je i Simulink blok koji ima zadatak da primi merenje sa senzora, kao i vrednost vektora \mathbf{d} i Euler-ovih uglova sa kontrolera robota i da izvrši sva potrebna izračunavanja i transformacije, kako bismo dobili željene kontaktne sile. Dakle, napisan je novi program za robot, gde su zadate odgovarajuće pozicije i putanje u kojima želimo da merimo kontaktnu silu, a u paralelnom task-u napisan je kod gde je izvršena TCP komunikacija sa Matlab programom, tako što se periodično šalje poruka koja sadrži trenutne vrednosti vektora \mathbf{d} i Euler-ovih uglova.



Sl. 3. Blok dijagram programa za estimaciju pomeraja i mase

Simulink blok komunicira sa senzorom i robotom i periodično dobija podatke o merenjima i poziciji, i izvršava sve potrebne transformacije i izračunavanja (računanje gravitacione komponente sile, i transformacija u globalni koordinatni sistem). Blok dijagram programa koji vrši komunikaciju sa robotom i senzorom i obradu merenja prikazan je na slici 4. Sva merenja se čuvaju na računaru i mogu se koristiti u daljoj analizi.



Sl. 4. Blok dijagram programa koji vrši komunikaciju sa robotom i senzorom i obradu merenja

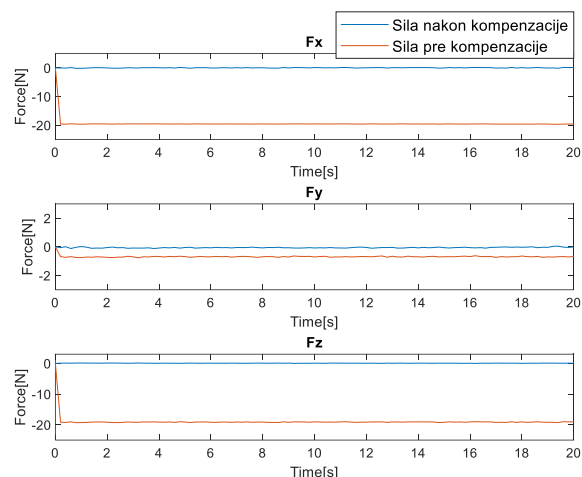
IV. REZULTATI

Eksperiment je sproveden u laboratoriji za robotiku Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Prilikom realizacije eksperimenata korišćen je ABB IRB 120 industrijski robot sa IRC5 kontrolerom i Ethernet Axia F/T Sensor [15]. Na robot je montiran senzor, a nakon njega i završni uređaj. Nakon pokretanja procedure za estimaciju pomeraja, mase i centra mase dobili smo sledeće rezultate:

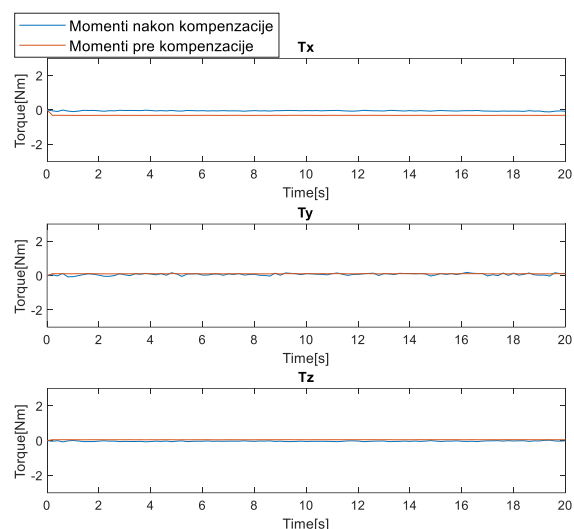
$$\mathbf{F}_b = [-19.77 \quad -6.88 \quad -19.36 \quad -0.07 \quad 0.09 \quad 0.07]^T, \quad m = 0.6271 \text{ kg},$$

$$\mathbf{r} = [0.0128 \quad -0.0001 \quad 0.0275]^T \text{ m}.$$

Zatim smo pokrenuli program koji vrši gravitacionu kompenzaciju i sve odgovarajuće transformacije, pri čemu nismo delovali nikakvom kontaktnom silom na završni uređaj robota. Na slikama 5 i 6 vidimo grafike kontaktnih sila nakon kompenzacije pomeraja i gravitacione komponente. Možemo zaključiti da smo dobili vrednosti bliske nuli.



Sl. 5. Sile „neopterećenog” robota u globalnom koordinatnom sistemu pre i posle kompenzacije

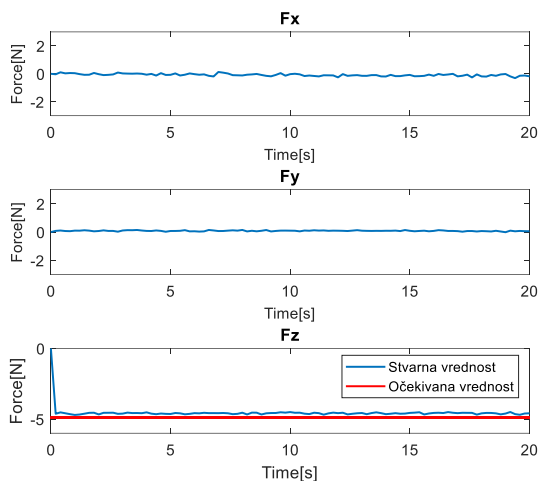


Sl. 6. Momenti „neopterećenog” robota u globalnom koordinatnom sistemu pre i posle kompenzacije

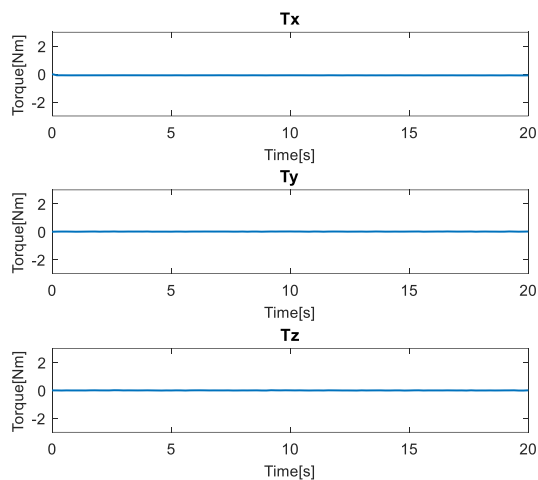
Kako bismo proverili preciznost senzora i uspešnost čitave procedure koristićemo teg od 500 grama koji ćemo staviti na završni uređaj (slike 7 i 8). Očekujemo da on doprinese očitavanju senzora kao $F_z = -m \cdot g$ u globalnom koordinatnom sistemu, gde je m masa tega, a g gravitaciono ubrzanje i iznosi 9.81 m/s^2 . Što se tiče momenta, pošto smo izvršili transformaciju sile u tačku u kojoj vršimo opterećenje, očekujemo nulte vrednosti svih momenata. Srednja vrednost sile F_z u ovom slučaju iznosi -4.5922 N , a očekivali smo silu -4.905 N . Greška iznosi 0.3128 N , odnosno 6.38% .

V. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Na osnovu dobijenih rezultata možemo zaključiti da naša automatizovana procedura daje smislene rezultate. Na slikama 5 i 6 možemo videti da su vrednosti svih momenata i sila veoma bliske nuli, što znači da smo uspeali da eliminišemo uticaj pomeraja senzora, kao i gravitacione komponente koja potiče od mase završnog uređaja i senzora.



Sl. 7. Sile sa tegom od 500 g na završnom uređaju robota



Sl. 8. Momenti sa tegom od 500 g na završnom uređaju robota

U nastavku eksperimenta, testirali smo tačnost naših merenja pomoću tega od 500g. Primećujemo da postoji greška 6.38%, koja potiče od nesavršenosti u estimaciji pomeraja i mase, ali i od greške u radu samog senzora. Uticaj šuma je primetan, pogotovu kod manjih sila. Iz specifikacija senzora i podataka o kalibraciji možemo zaključiti da ovaj model senzora i nije predviđen da radi sa malim silama, te se stoga i ne očekuje velika tačnost. Konkretno, za izabranu kalibraciju na y osi senzora koju smo koristili u eksperimentu, možemo meriti opseg od čak 200 N, pri čemu merna nesigurnost iznosi 2%, što je 4N. Dakle, treba proceniti koliki nam opseg merenja, kao i koja preciznost za konkretnu upotrebu treba, pa na osnovu toga izabrati senzor.

Treba napomenuti da bi estimaciju pomeraja trebalo raditi pre svakog korišćenja senzora, jer je primećeno da taj pomeraj nije uvek isti i da zavisi od različitih uticaja poput radne temperature, pritiska kojim smo pritegli završni završni uređaj na senzor i slično.

Procedure iznete u ovom radu predstavljaju osnov za dalju primenu senzora sile u industrijskoj robotici. Tek nakon što smo dobili tačnu vrednost kontaktne sile, možemo pristupiti njenoj kontroli ili zatvaranju povratne sprege. Jedna od mogućih primena je i detektovanje kontakta sa okruženjem

prilikom kretanja robota u prostoru, što se lako može demonstrirati. Veoma važna oblast gde se primenjuje senzor sile jeste i kolaboracija čoveka i robota, gde možemo meriti kojom silom čovek deluje na robota i u zavisnosti od nje sprovesti određene akcije. Zatim, možemo sprovesti kinematsko učenje gde čovek deluje određenom silom u pravcu u kom želi da pomeri robota i time ga „učiči“ određenoj trajektoriji. Kao što vidimo, veoma je široka oblast primene merenja sile u robotici, pa samim tim i ovde razvijenih procedura. Puno je prostora i za dalje usavršavanje samih procedura u cilju minimizacije greške i dobijanju preciznijih merenja, kao i nadogradnji za neke kompleksnije primene.

Dakle, cilj ovog rada je razvoj automatizovane procedure za kompenzaciju sistemske greške senzora sile kod industrijskih robota. Ova procedura se koristi prilikom bilo kakvog zadatka gde se očekuje merenje kontaktnih sila. Osnovni koraci za primenu ove procedure u opštem slučaju su sledeći:

- Povezati svu potrebnu opremu na lokalnu mrežu (senzor, kontroler robota, PC računar) i pravilno montirati senzor i završni uređaj.
- Napisati program za očitavanje merenja sa senzora i komunikaciju sa robotom.
- Napisati program koji će dovesti robot u tačno određene pozicije, pri tome vodeći računa o komunikaciji sa programom za merenje.
- Nakon izvršenih merenja, potrebno je izvršiti estimaciju odgovarajućih parametara. U našem eksperimentu procedure su realizovane u Matlab-u i ABBRobotStudio okruženju, ali se mogu implementirati i na drugom softveru.
- Čuvamo izračunate parametre za dalji rad.
- U zavisnosti od primene, pišemo program za robot, imajući u vidu da je potrebno slanje pozicije robota u svakom trenutku u kom očekujemo merenje.
- Implementiramo program za očitavanje merenja, kompenzaciju pomeraja i gravitacione komponente, pomoću dobijenih parametara, a na gorenavedeni način. Ovaj deo se takođe može realizovati u Matlab-u ili nekom drugom programskom jeziku.
- Prethodno navedeni koraci čine našu automatizovanu proceduru za kompenzaciju sistemske greške, a rezultuju dobijanjem kontaktnih sila, koje koristimo u nastavku.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 35003 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kao i od strane Fonda za nauku u okviru projekta PROMIS evidentiranog pod brojem 6062528.

LITERATURA

- [1] M. K. Vukobratović, V. Potkonjak, „Dynamics of contact tasks in robotics. Part I: general model of robot interacting with environment“, Mechanism and Machine Theory, Volume 34, Issue 6., pp 923-942, 1999
- [2] J. Jung, J. Lee, K. Huh. “Robust Contact Force Estimation for Robot Manipulators in Three-Dimensional Space.” Proceedings of the

- Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 220, no. 9, pp 1317–27, Sep. 2006.
- [3] L. Villani, J. De Schutter "Force Control". In: Siciliano B., Khatib O. (eds) Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008
- [4] G. Zeng, H. Ahmad "An Overview of Robot Force Control." *Robotica*, vol. 15, no. 5 pp.473-82, Sep. 1997
- [5] R Hu, C. Long, L. Zhang „Satellite Assembly Technology by Robot Under Visual Guidance and Force Feedback Control”. Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 856. Springer, 2018
- [6] W.D. Fisher, M. M. Shahid. "Hybrid Position/Force Control: A Correct Formulation." *The International Journal of Robotics Research* vol. 11, no. 4 pp. 299–311, Aug. 1992.
- [7] M. W. Abdullah, H. Roth, M. Weyrich, J. Wahrburg, „An Approach for Peg-in-Hole Assembling using Intuitive Search Algorithm based on Human Behavior and Carried by Sensors Guided Industrial Robot“, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, Issue 3, pp. 1476-1481, 2015.
- [8] Z. Jiabo, D. Na, D. Mingli, "Robotic Assembly Work Using Force Control," *IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China, pp. 1150-1153, 2018.
- [9] J. Bös, A. Wahrburg, K. D. Listmann, "Iteratively Learned and Temporally Scaled Force Control with application to robotic assembly in unstructured environments," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, pp. 3000-3007, 2017.
- [10] S. Vougioukas, "Bias Estimation and Gravity Compensation for Force-Torque Sensors" *3rd WSEAS Symposium on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering*, Athens, Greece, pp 82-85.
- [11] D. Massa, M. Callegari, C. Cristalli, "Manual guidance for industrial robot programming", *Industrial Robot*, Vol. 42 No. 5, pp. 457-465, 2015.
- [12] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca, A. Bicchi, „An atlas of physical human–robot interaction“, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 43, Issue 3, pp 253-270, 2008.
- [13] M. Geravand, F. Flacco, A. De Luca, "Human-robot physical interaction and collaboration using an industrial robot with a closed control architecture," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, pp. 4000-4007, May 2013.
- [14] B. Borovac, G. Đorđević, M. Rašić, M. Raković, "Industrijska robotika". Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [15] *Ethernet Axia F/T Sensor Manual*, ATI Industrial Automation, Inc., Apex, North Carolina USA, 2019.
- [16] J. Craig, „Introduction to Robotics: Mechanics and Control“, Addison-Wesley, 1989

ABSTRACT

The measurement of contact force is very important in industrial robotics. These measurements can be used to control the applied force, protect the manipulator from excessive forces, as well as in the field of collaboration between humans and robots. When using force-torque sensors, we encounter several problems that we will try to solve in this paper. Our goal is to develop the automatic calibration system for force-torque sensors, which will include bias estimation, gravity compensation, and force transformation into a coordinate frame of interest. The result of this procedure is obtaining more precise measurements of contact forces, which are important for our further application.

Automatic calibration system for force-torque sensors in industrial robotics

Nikola Vidaković, Nikola Knežević