

Haptično vstavljanje igle z uporabo teleoperacije

Žiga Bizjak, Tim Kambič, Robi Ravnikar, Damjan Panič,
Janez Podobnik, Matjaž Mihelj, Marko Munih, Sebastjan Šlajpah

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

E-mail: zb3444@student.uni-lj.si, tk2777@student.uni-lj.si, robi.ravnikar@gmail.com, dp0678@student.uni-lj.si, janez.podobnik@fe.uni-lj.si, matjaz.mihelj@fe.uni-lj.si, marko.munih@fe.uni-lj.si, sebastjan.slajpah@fe.uni-lj.si

Teleoperated needle insertion

Haptic needle insertion is one of the key components in haptic teleoperation surgery. In this paper we present the use of one Omega.7 (master device) and three Phantom robots connected with a triangle platform (slave device) to insert a needle into lower arm. Pseudoadmittance control was implemented to control the pose of the slave device and also to provide feedback to master device. In addition, an augmented reality was used to further enhance the performance of the operator.

The application was divided into six phases: initialisation, moving slave device from the workspace, selecting working point, moving slave robot to that working point, hold robots, and teleoperation. The performance of the presented system was tested on a mockup (artificial arm with integrated tube representing vein) by successfully extracting fluid from artificial vein.

1 Uvod

Uporaba teleoperacijsko vodenih robotov v medicini je zelo pomembna, saj nam omogoča izvajanje preciznih gibov, ki presegajo zmoglosti kirurga. Z robotom pa lahko uporabnikove gibe ustrezno zmanjšamo, omejimo delovno območje, zmanjšamo nevarnost postoperativnih zapletov ter posledično vplivamo na samo trajanje hospitalizacije po operaciji. Vstavljanje igle je naloga, ki prikazuje uporabnost robotskega sistema v medicini. Na temo robotov v medicini je objavljenih kar nekaj del [1, 2, 3].

Teleoperacija predstavlja *delo na daljavo*, kjer tako *delo kot razdalja* nista natančno določena. Razdalja se lahko se nanaša na fizično razdaljo, kjer je operater ločen od robota z veliko razdaljo, lahko pa pomeni tudi razliko v merilu, kot na primer pri kirurških mikromanipulatorjih za operacije na mikroskopski ravni. Teleoperacijski sistem je sestavljen iz treh delov: upravljalne naprave, izvršne naprave ter regulatorja. Primer teleoperacijskega sistema v medicini je kirurški sistem DaVinci [4].

Uporaba teleoperacijskih sistemov je smotrna v primeru, kjer je manipulacija nevarna za človeška življenja ali pa fizične zahteve za manipulacijo presegajo človeške zmoglosti. Teleoperacija se uporablja v vesoljskih in vojaških aplikacijah, varnostnih sistemih, podvodnih vozilih in v medicini [5].

Robotski sistemi in slikovne tehnologije so revolucionirale medicinsko področje. Kljub napredku pa algoritmi umetne inteligence zaenkrat še niso sposobni človeške razsodnosti in intuicije, zato je pomembno sodelovanje kirurga z robotom. Tako izvedeni posegi so manj invazivni ter pozitivno vplivajo na postoperativne procese.

V tem delu bomo predstavili aplikacijo za teleoperacijsko robotsko vstavljanje igle v žilo. Operater preko haptične povratne zanke dobi informacijo o kontaktu igle in žile, kot pomoč operaterju pa je v aplikacijo vključena tudi obogatena resničnost.

2 Metodologija

Teleoperacijski sistem sestavljata upravljalna in izvršna naprava. Upravljalno napravo predstavlja haptični robot Omega.7 (Force Dimension, Švica). Robot ima 7 prostostnih stopenj (tri pozicije, tri orientacije ter še dodatno prijemalo na vrhu). Robot ima aktivno vodeno pozicijo in prijemalo, medtem ko je orientacija vrha robota zgolj pasivna. Robot lahko generira haptično povratno informacijo samo v obliki sil v smeri x , y in z .

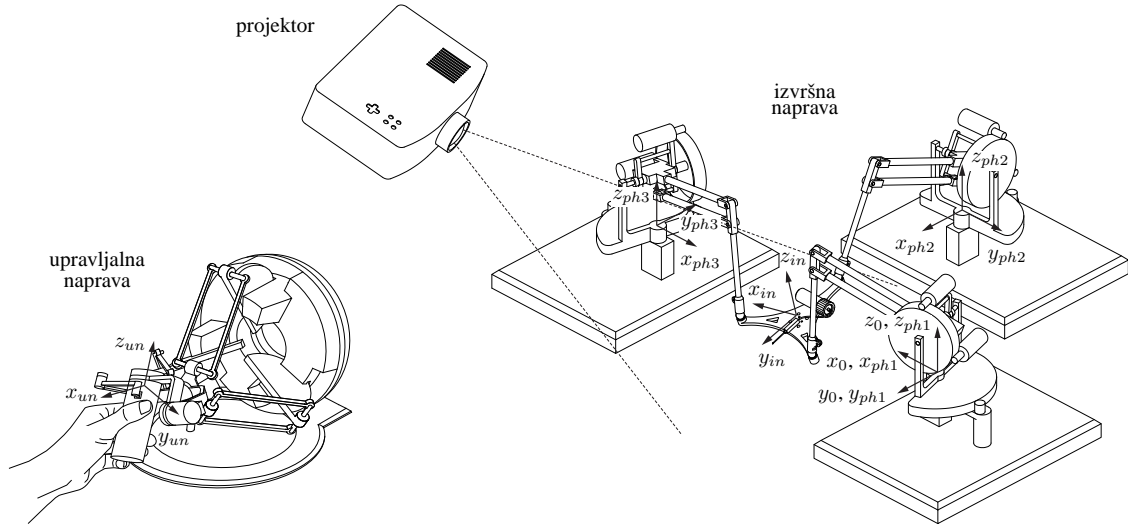
Izvršna naprava je sestavljena iz treh robotov Phantom, ki so preko trikotne plošče povezani v paralelni mehanizem (glej sliko 1). Vsak robot ima tri prostostne stopnje, medtem ko ima plošča šest prostostnih stopenj. Roboti so zaradi varnosti na ploščo pritrjeni preko magnetnih sferičnih sklepov. Dodaten nivo varnosti pa predstavlja varnostno stikalo, ki mora biti pritisnjeno celoten čas izvajanja gibanja.

V sistem je vključen še projektor NEC VT570 z ločljivostjo 1024×768 slikovnih pik. Služi kot prikazovalnik za obogateno resničnost. Izvršna naprava je opremljena s kirurško kanilo, za simulacijo pacientove roke pa je uporabljena plastična roka opremljena s cevko, ki predstavlja žilo.

Celotno vodenje je narejeno v programskem paketu Matlab/Simulink, vizualizacija pa je realizirana s programsko knjižnico OpenCV. Vzorčna frekvenca robotskega sistema znaša 5 kHz.

2.1 Direktna in inverzna kinematika izvršne naprave

Globalni koordinatni sistem $x_0-y_0-z_0$ izvršne naprave (plošče) sovпада s koordinatnim sistemom robota Phantom 1. Homogene transformacijske matrike \mathbf{H}_1 , \mathbf{H}_2 in \mathbf{H}_3 , ki



Slika 1: Shema sistema (upravljalna in izvršna naprava) z označenimi koordinatnimi sistemi

povezujejo globalni koordinatni sistem plošče z globalnimi koordinatnimi sistemi posameznih Phantom robotov (enačba (1)), smo določili na podlagi znane konfiguracije sistema.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_{ph}^T & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{H} \begin{bmatrix} {}^{ph}\mathbf{p}_{ph}^T & 1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

Phantom roboti, pritrjeni na ploščo, tvorijo enakostranični trikotnik. Določanje direktne kinematike plošče temelji tako na računanju geometrije trikotnika. Vrh izvršne naprave je definiran v središču plošče. Pozicija vrha \mathbf{p}_{in} je določena z enačbo (2).

$$\mathbf{p}_{in} = \frac{\mathbf{p}_{ph1} + \mathbf{p}_{ph2} + \mathbf{p}_{ph3}}{3} \quad (2)$$

Vektorji \mathbf{p}_{ph1} , \mathbf{p}_{ph2} in \mathbf{p}_{ph3} so pozicije vrhov posameznih robotov Phantom izražene v globalnem koordinatnem sistemu (slika 1). Orientacija vrha izvršne naprave \mathbf{R}_{in} je določena s sistemom enačb (3)–(6).

$$\mathbf{x}_R = \frac{\mathbf{p}_{ph2} - \mathbf{p}_{ph1}}{|\mathbf{p}_{ph2} - \mathbf{p}_{ph1}|} \quad (3)$$

$$\mathbf{z}_R = \mathbf{x}_R \times \frac{\mathbf{p}_{ph1} - \mathbf{p}_{ph3}}{|\mathbf{p}_{ph1} - \mathbf{p}_{ph3}|} \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_R = \mathbf{z}_R \times \mathbf{x}_R \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{in} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_R & \mathbf{y}_R & \mathbf{z}_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

Inverzna kinematika izvršne naprave ni direktno vezana na sklepne spremenljivke robotov Phantom, ampak se prevede na določitev pozicije vrha posameznega robota Phantom. Glede na geometrijo (plošča je enakostranični trikotnik s stranico $a = 150$ mm) se jih določi kot

$$\mathbf{p}_{ph1} = \mathbf{p}_{in} + \frac{a\sqrt{3}}{2} \mathbf{R}_{in} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{p}_{ph2} = \mathbf{p}_{in} + \frac{a\sqrt{3}}{2} \mathbf{R}_{in} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_{ph3} = \mathbf{p}_{in} + \frac{a\sqrt{3}}{2} \mathbf{R}_{in} \begin{bmatrix} 0 & \frac{2}{3} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

Dobljene pozicije vrhov robotov Phantom smo z uporabo matrik \mathbf{H}_1 , \mathbf{H}_2 in \mathbf{H}_3 pretvorili iz globalnega koordinatnega sistema izvršne naprave v globalne koordinatne sisteme posameznih robotov Phantom (enačba (10)).

$$\begin{bmatrix} {}^{ph}\mathbf{p}_{ph}^T & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{ph}^T & 1 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

2.2 Regulacija lege izvršne naprave

Za znano lego izvršne naprave lahko določimo željene položaje robotov Phantom (${}^{ph1}\mathbf{p}_{r,ph1}$, ${}^{ph2}\mathbf{p}_{r,ph2}$, ${}^{ph3}\mathbf{p}_{r,ph3}$, enačbe (7)–(9)). Za regulacijo položaja vrha Phantom robotov smo implementirali proporcionalno-diferencialni (PD) regulator v zunanjih koordinatah na osnovi transponirane Jacobijeve matrike \mathbf{J}_{ph}^T . PD regulator lahko zapišemo z

$$\mathbf{F}_{ph} = \mathbf{K}_p ({}^{ph}\mathbf{p}_{r,ph} - {}^{ph}\mathbf{p}_{ph}) - \mathbf{K}_d {}^{ph}\dot{\mathbf{p}}_{ph} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ph} = \mathbf{J}_{ph}^T \mathbf{F}_{ph}, \quad (12)$$

kjer sta \mathbf{K}_p in \mathbf{K}_d proporcionalno in diferencialno ojačenje regulatorja (določena eksperimentalno), ${}^{ph}\dot{\mathbf{p}}_{ph}$ hitrost vrha robota Phantom, $\boldsymbol{\tau}_{ph}$ pa določeni navori za posamezne motorje.

2.3 Pseudoadmitančno vodenje

Teleoperacija na podlagi pseudoadmitance [6] temelji na uporabi virtualnega posrednika. Pri tem izvršna naprava sledi virtualnemu posredniku, sama izvršna naprava pa na upravljalno enoto vpliva preko haptične povratne povezave. Virtualni posrednik se giblje kot funkcija razlike med pozicijama upravljalne (\mathbf{p}_{un}) in izvršne (\mathbf{p}_{in}) naprave.

Za vodenje izvršne naprave določimo silo virtualnega posrednika \mathbf{F}_p z uporabo PD regulatorja

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{K}_{pp}(\mathbf{p}_{un} - \mathbf{p}_{in}) + \mathbf{K}_{dp}\dot{\mathbf{p}}_{un}. \quad (13)$$

Z uporabo admitančnega modela zapisanega v Laplaceovem prostoru

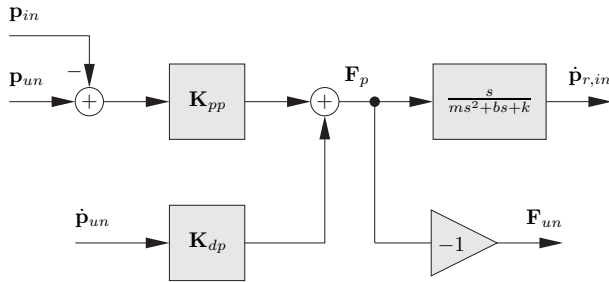
$$\frac{\dot{\mathbf{p}}}{\mathbf{F}} = \frac{s}{ms^2 + bs + k} \quad (14)$$

lahko določimo hitrost virtualnega posrednika $\dot{\mathbf{p}}_p$

$$\dot{\mathbf{p}}_p = \frac{s}{ms^2 + bs + k} \mathbf{F}_p. \quad (15)$$

Pri tem veličine m , b in k opisujejo dinamične parametre sistema (maso, dušenje in togost). Hitrost virtualnega posrednika $\dot{\mathbf{p}}_p$ predstavlja tudi referenčno hitrost izvršne naprave $\dot{\mathbf{p}}_{r,in} = \dot{\mathbf{p}}_p$, po integraciji pa tudi željeno lego $\mathbf{p}_{r,in} = \int \dot{\mathbf{p}}_{r,in} dt$.

Sila, ki deluje na virtualnega posrednika \mathbf{F}_p , nam predstavlja tudi nasprotno povratno silo, s katero izvršna naprava vpliva na upravljalno enoto $\mathbf{F}_{un} = -\mathbf{F}_p$. Celoten model vodenja je prikazan na sliki 2.



Slika 2: Model teleoperacijskega sistema na podlagi psevdoadmitance s haptično povratno zanko

2.4 Gibanje upravljalne naprave

Pri zagonu aplikacije kot tudi med samo aplikacijo je potrebno upravljalno napravo postaviti v želeno lego. Ker ima upravljalna naprava aktivne samo pozicije, rotacije pa so pasivne, lahko vodimo samo pozicijo vrha \mathbf{p}_{un} . Trajektorijo gibanja generiramo po metodi minimalnega časovnega odvoda pospeška [7]. Spremembo pospeška upravljalne naprave $\ddot{\mathbf{p}}_{un}$ lahko zapišemo z enačbo (16)

$$\ddot{\mathbf{p}}_{un} = -\frac{9}{D} \ddot{\mathbf{p}}_{un} - \frac{36}{D^2} \dot{\mathbf{p}}_{un} + \frac{60}{D^3} (\mathbf{p}_{f,un} - \mathbf{p}_{un}), \quad (16)$$

kjer je $\mathbf{p}_{f,un}$ končna pozicija upravljalne naprave, D pa razlika med določenim časom izvedbe naloge t_f in trenutnim že pretečenim časom t ($D = t_f - t$). Željeno lego upravljalne naprave določimo s trojno integracijo odvoda pospeška $\mathbf{p}_{r,un} = \iiint \ddot{\mathbf{p}}_{un} dt dt dt$.

Z implementacijo PD regulatorja izračunamo potrebno silo \mathbf{F}_{un} , da premaknemo upravljalno napravo v želeno lego

$$\mathbf{F}_{un} = \mathbf{K}_{pun} (\mathbf{p}_{r,un} - \mathbf{p}_{un}) - \mathbf{K}_{dun} \dot{\mathbf{p}}_{un}. \quad (17)$$

To silo pošljemo na krmilnik robota Omega, ki poskrbi za ustrezen premik robota.

3 Aplikacija

Aplikacija robotskega vstavljanja igle v žilo je razdeljena na šest stanj. Diagram prehajanja stanj je prikazan na sliki 3.

INICIALIZACIJA: Na začetku aplikacije se tako upravljalna kot izvršna naprava postavita v svoji začetni legi.

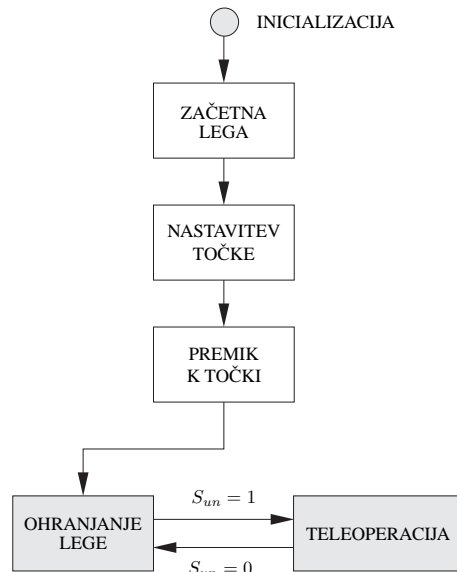
Ko manipulatorja dosežeta začetni legi, se sistem avtomatsko premakne v stanje *začetna lega*.

ZAČETNA LEGA: V tem stanju se izvršna naprava odmakne na rob delovnega prostora. S tem omogočimo, da lahko bolnik varno namesti roko v za to predvideno delovno območje. Upravljalna naprava v tem primeru sledi gibanju izvršne naprave. Končno lego ter hitrost izvršne naprave se lahko prilagodi glede na potrebe aplikacije. Ko izvršna naprava doseže željeno lego, se aktivira stanje *nastavitev točke*.

NASTAVITEV TOČKE: To stanje vključuje obogateno resničnost. Z upravljalno napravo premikamo virtualno točko (rdečo piko), ki se jo s projektorjem projecira v delovni prostor. Z postavitvijo pike določimo grobo pozicijo delovne točke oziroma žile. Ker je premikanje točke zgolj ravninski problem, so premiki upravljalne naprave možni zgolj v ravnini (premiki v vertikalni smeri so onemogočeni). Naslednje stanje se aktivira, ko uporabnik zapre prijemalo na vrhu upravljalne naprave.

PREMIK K TOČKI: V tem stanju se vrh izvršne naprave (igla) premakne nad prej določeno delovno točko. Izvršna naprava se premika zgolj po horizontalni ravnini. Ker smo v prejšnjem stanju upravljalno napravo uporabili za nastavitev delovne točke, je potrebno po končanem gibanju izvršne naprave upravljalno napravo postaviti v začetno lego, legi obeh naprav pa ustrezno resetirati in poravnati. Ko vrh izvršne naprave doseže delovno točko, se aktivira stanje *ohranjanje lege*.

OHRANJANJE LEGE: To stanje je pogojeno z uporabo prijemala na vrhu upravljalne naprave. Le-to je uporabljeno kot stikalo: ko je prijemalo odprto, je signal $S_{un} = 0$, ko pa je prijemalo zaprto, je signal $S_{un} = 1$.



Slika 3: Diagram prehajanja stanj pri izvajanju naloge. Med stanjema *ohranjanje lege* in *teleoperacija* preklaplamo s prijemalom na vrhu upravljalne naprave (odprto prijemalo $S_{un} = 0$ oziroma zaprto prijemalo $S_{un} = 1$).

To stanje je aktivno ob odprtem prijemalu. V tem stanju tako upravljalna kot izvršna naprava držita trenutni legi. Uporabi se ga takrat, ko je premikanje izvršne naprave nezaželjeno, npr. ko je igla vstavljena v žilo.

TELEOPERACIJA: Ob preklopu prijemala izvršne naprave v $S_{un} = 1$ se aktivira teleoperacijsko vodenje. V tem primeru je lega vrha upravljalne naprave posredna referenca za gibanje izvršne naprave, kot je to opisano v poglavju 2.3. Vodimo lahko tako pozicijo kot orientacijo izvršne naprave, preko haptične povratne informacije pa uporabnik tudi čuti sile interakcije izvršne naprave. To stanje se uporablja za izvedbo ustrezne manipulacije igle (vstavljanje igle v žilo, odstranitev igle). Z uporabo prijemala se lahko preklaplja med tem stanjem in stanjem *ohranjanje lege*.

Za namen aplikacije smo pripravili tudi preprost uporabniški grafični umestnik, ki omogoča zagon in ustavitev aplikacije.

4 Razprava

Aplikacijo smo testirali s pomočjo umetne roke in tekočine, ki je predstavljala umetno kri. Prvi operater je skrbel za zagon aplikacije in za nadzor varnostnega stikala na robotih Phantom, drugi operater pa je preko robota Omega vodil izvajanje teleoperacije. Na sliki 4 je prikazana uspešna izvedba aplikacije vstavitve igle v roko in pretok tekočine v posodo, nameščeno na platformi.

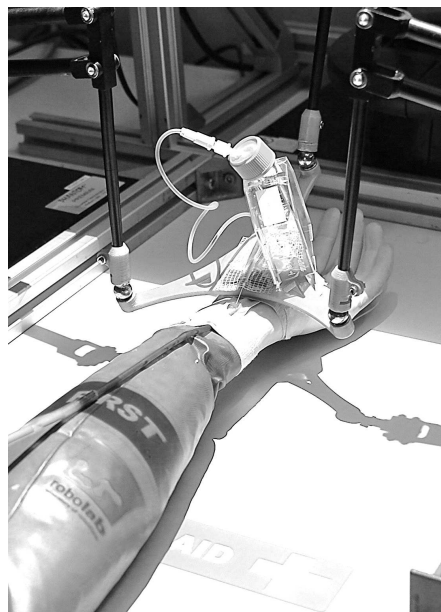
Prednost arhitekture teleoperacije je, da lahko operater spremeni merilo premikov, kar pomaga pri natančnosti vstavljanja igle. V aplikaciji lahko nastavljamo merilo premikov tako za rotacijske kot za translacijske premike.

V testnih pogojih je celoten proces vstavljanja igle trajal okoli 30 sekund. Samo izvajanje bi sicer lahko pohitrili, ampak smo zaradi varnostnih razlogov pustili daljše čase izvajanja določenih stanj.

Medicinski roboti verjetno ne bodo nikoli prevzeli nalog zdravstvenega osebja, vendar pa so jim lahko v veliko pomoč. S pravo uporabo aplikacije lahko rešimo veliko problemov v moderni medicini. Robotsko vstavljanje igle bi lahko uporabili v kontaminiranih področjih, v področjih kjer medicinsko osebje fizično ne more dostopati do bolnika ali pa bi lahko aplikacijo razširili na uporabo pri operacijah. Primer uporabe bi lahko bil vstavljanje infuzije kesonskim delavcem, ki delajo globoko pod morjem na velikih pritiskih, kjer zdravstveno osebje nima dostopa. Primer uporabe je tudi bolnik v karanteni, kjer ne želimo dodatno izpostavljati zdravstvenih delavcev. V tem primeru bi lahko vbrizgali zdravila ali vzeli kri z robotom.

Zaradi uporabe umetne roke in žile, bi za realno uporabo morali nekatere parametre (predvsem za togost sistema) na novo oceniti in preizkusti. Stanja smo določili z ozirom na varnost bolnika, kar posledično pomeni, da je večina gibov izvedenih z majhno hitrostjo. Grafični vsmesnik za operaterja je zelo enostaven in omogoča le vklop in izkop sistema, kar pomeni, da uporabnik ne potrebuje dodatnega izobraževanja za uporabo aplikacije.

Za to aplikacijo je bila uporabljena generična oblika



Slika 4: Slika uspešnega testa na umetni roki. Na sliki vidimo realizacijo postavitve igle ter ciljne posode za tekočino. Na roki je vidna tudi umetna žila, s pomočjo katere smo tekočino pripeljali do mesta vboda.

platforme. Za realno aplikacijo bi bilo potrebno realizirati namenskega robota za izvajanje medicinskih operacij. Prav tako bi bilo potrebno prilagoditi tudi ostale sklope sistema. Čeprav je ta aplikacija zgolj testiranje principa delovanja, predstavlja osnovo za prihodnje aplikacije namenjene v medicinske namene in aplikacije, kjer je teleoperacije potrebna za uspešno izvedbo.

Literatura

- [1] F. T. Cullen, *Technology and Terrorism*. Routledge, 2017.
- [2] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035–2057, 2006.
- [3] N. Abolhassani, R. Patel, and M. Moallem, "Needle insertion into soft tissue: A survey," *Medical Engineering and Physics*, vol. 29, no. 4, pp. 413–431, 2007.
- [4] G. H. Ballantyne and F. Moll, "The da Vinci telerobotic surgical system: the virtual operative field and telepresence surgery," *Surgical Clinics of North America*, vol. 83, no. 6, pp. 1293–1304, 2003.
- [5] S. Lichiardopol, "A survey on teleoperation," *Technische Universitat Eindhoven, DCT report*, 2007.
- [6] J. J. Abbott and A. M. Okamura, "Pseudo-admittance bilateral telemanipulation with guidance virtual fixtures," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 26, no. 8, pp. 865–884, 2007.
- [7] A. Piazzoli and A. Visioli, "Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 1, pp. 140–149, 2000.