

Bilateralno teleoperiran kolesni mobilni robot

Rok Pučko

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Mentor: izr. prof. dr. Aleš Hace

rok.pucko@uni-mb.si, ales.hace@uni-mb.si

Bilaterally teleoperated wheeled mobile robot

Mobile telerobotics is the area of mobile robotics concerned with the control of robots from a distance. In telerobotics mobile robots are mostly semi-autonomous, full autonomy with today's state of technology has not yet been reached. It is well known that visual feedback to the operator of mobile telerobotic system provides sufficient information for management, when the robot is not located in the vicinity of objects from the environment. When the robot is in the vicinity of objects from the environment, management of robot based on visual feedback becomes difficult and non-intuitive. If haptic feedback is added to telerobotic system, management of the mobile robot becomes intuitive. The paper describes the construction and bilateral teleoperation of wheeled mobile robot using an active joystick. The joystick is used to remote control the speed of the mobile robot and as the haptic interface. When the mobile robot has contact with an object from his operating environment, the joystick reproduces the force of the contact. This does not imply physical contact of mobile robot with an environment. On the robot we measure the distance from the robot to object in surrounding area. This distance is then transformed into a virtual contact force. This virtual contact force is applied to the operator as a real force by the joystick. The work also describes a robust impedance control scheme, which is used to control the mobile robot. The described system has also been realized and tested. The mobile robot has been constructed for purpose of studying bilateral teleoperation algorithms for mobile robotic systems.

Mobilna telerobotika se ukvarja z upravljanjem mobilnih robotskih sistemov na daljavo. V telerobotiki so mobilni roboti večinoma polavtonomni, popolna avtonomnost z današnjim stanjem tehnologije še ni bila dosežena. Znano je da vizualne povratne informacije do operaterja mobilnega telerobotskega sistema nudijo dovolj informacij za upravljanje, kadar se robot ne nahaja v bližini objektov iz okolice. Kadar se robot nahaja v bližini objekta iz okolice je upravljanje z robotom težavno in neintuitivno. Če telerobotskemu sistemu dodamo haptično povratno informacijo s tem omogočimo intuitivno upravljanje mobilnega robotskega sistema. V prispevku je opisana izgradnja in bilateralno teleoperiranje kolesnega mobilnega robota z uporabo aktivne krmilne palice. Krmilna palica služi za daljinsko upravljanje mobilnega robota po hitrosti in kot haptični vmesnik. Krmilna palica reproducira kontaktno silo mobilnega robota z objektom iz okolice. Pri tem ne gre za fizični dotik mobilnega robota z okoljem. Na robotu merimo razdaljo od robota do objekta v okolici. Razdaljo nato transformiramo v virtualno silo dotika. To informacijo krmilna palica prenese v obliki sile na operaterja. V prispevku je podana shema robustnega impedančnega vodenja, ki je uporabljena za vodenje mobilnega robota. Opisan sistem smo tudi preizkusili. Mobilni robot je bil zgrajen z namenom študije algoritmov bilateralnega teleoperiranja mobilnih robotskih sistemov.

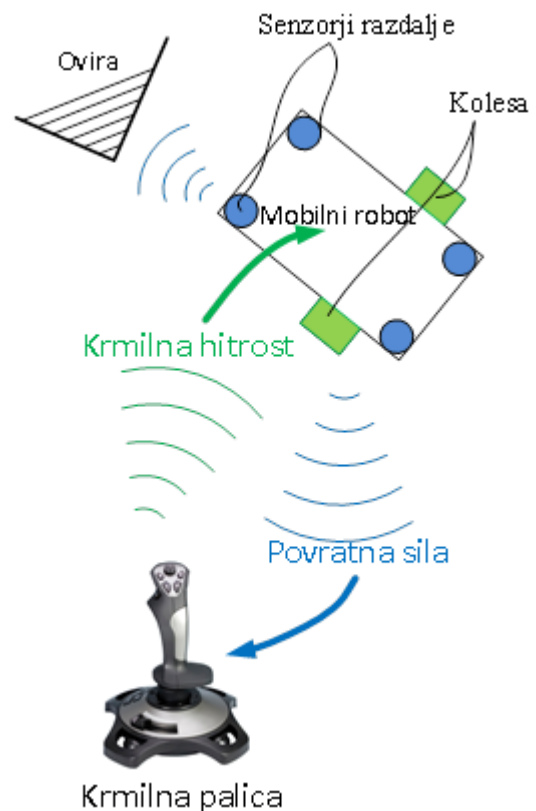
1 Uvod

Uporaba mobilnih robotov je aktualna, ko gre za robotske aplikacije z relativno velikim delovnim področjem, ki je na nek način nedostopni ali celo nevarno ljudem.

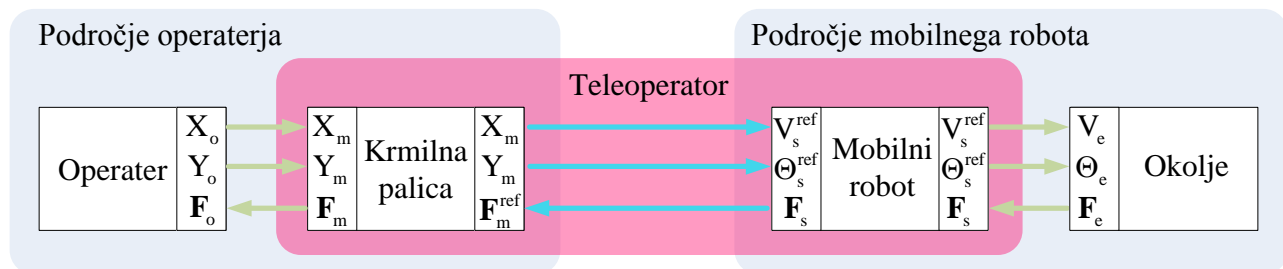
Področja kot so raziskovanje zemlje ali celo drugih planetov, delo v človeku nevarnih okoljih, pregled zahtevnih in človeku nedostopnih konstrukcij, itd. Našteti primeri ponujajo zelo raznoliko ponudbo nalog, ki bi jih mobilni roboti lahko opravljali. Z današnjo tehnologijo še ni možno realizirati avtonomne mobilne robote.

Mobilni roboti so zelo dober pristop zgoraj naštetim problemom, če jih lahko upravlja človek. Večinoma danes gre za unilateralno teleoperiranje, kjer imamo na voljo zgolj vizualno povratno informacijo.

Povratno informacijo o sili - »force feedback« ponuja človeku bistveno več in omogoča intuitivno vodenje, zato pa je potrebno vgraditi bilateralno vodenje, kjer v eni smeri operater diktira gibanje, v povratni smeri pa se operaterju posreduje informacijo o kontaktni sili robota s svojim okoljem.



Slika 1 Bilateralno teleoperiranje mobilnega robota



Slika 2 Bilateralno teleoperiranje

Na področju mobilne robotike in v strokovni literaturi je bilateralno teleoperiranje mobilnih robotov že bilo uporabljeno [1] [2] [3].

Zgraditi hočemo mobilnega robota, ki bo sposoben slediti krmilnim trajektorijam krmilne palice in bo sposoben zaznavati svoje okolje in se okolju prilagajati. Za to smo uporabili robustno impedančno podajno vodenje mobilnega robota. Od mobilnega robota želimo informacijo o razdalji do okoliških objektov in te transformacije želimo s pomočjo krmilne palice prenesti na operaterja v obliki sile. Zato

smo uporabili senzorje razdalje na robotu in aktivno krmilno palico.

Idejo realiziranega bilateralno teleoperiranega mobilnega robota prikazuje slika 1. Uporabniški vmesnik predstavlja aktivna krmilna palica. Skupaj z mobilnim robotom ju imenujemo teleoperator. Slika 2 prikazuje informacijski tok opisanega bilateralnega teleoperiranega sistema. Izbrali smo si tako imenovano FV (Force-Velocity) bilateralno shemo vodenja, pri kateri sta master in slave povezana s hitrostjo in silo. Mobilni

robot vodimo po hitrosti, ki mu jo vsiljuje krmilna palica. Povratno povezavo predstavlja informacija o sili – v našem primeru je to virtualna sila dotika mobilnega robota z okolico.

Za implementacijo izbrane sheme vodenja mobilnega robota potrebujemo meritev kotne hitrosti robota. Za meritev smo uporabili MEMS žiroskop ADIS16265. Več o načinih uporabljanja takšnih in podobnih senzorjev v mobilni robotiki najdemo v [4].

Krmilna palica in mobilni robot sta povezana brezžično. Predstavljena je uporabljena strojna oprema za brezžično komunikacijo.

2 Vodenje mobilnega robota

Nominalna dinamika z motilnim navorom mobilnega robota je predstavljena z (2.1).

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & J_\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \ddot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ \tau \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F^{dist} \\ \tau^{dist} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Pri tem je M_v masa robota, J_Θ je vztrajnostni moment, \dot{v} je pospešek robota, $\ddot{\Theta}$ je kotni pospešek robota, F je krmilna sila, τ je krmilni navor, F^{dist} so vse nemodelirane – motilne sile in τ^{dist} vsi nemodelirani – motilni navori.

Sistemu pripišemo dinamiko diferencialne enačbe drugega reda, katere koeficienti predstavljajo predpisane vsiljene mehanske lastnosti – mehansko impedanco (2.2).

$$\mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{B}_d \dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{K}_d \mathbf{x}_e = -\mathbf{F}_e \quad (2.2)$$

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}^{ref} \quad (2.3)$$

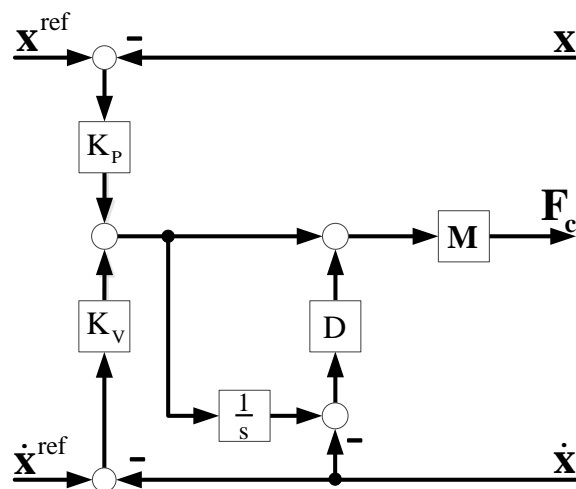
\mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d in \mathbf{K}_d so parametri mehanske impedance, \mathbf{x}_e je odstopanje med referenčno in dejansko vrednostjo trajektorije in \mathbf{F}_e je sila virtualnega stika robota z okolico. Več o \mathbf{F}_e je v [5].

Robustno impedančno vodenje je podano z (2.4).

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{M} \left(\ddot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{D} \left(\int \ddot{\mathbf{x}}_e dt - \dot{\mathbf{x}} \right) \right) \quad (2.4)$$

$$\mathbf{F}_e = [F_c \quad \tau_c]^T \quad (2.5)$$

Vektor \mathbf{F}_e je sestavljen iz potrebne krmilne sile in krmilnega navora, da zagotovimo sledenje mobilnega robota referenčni trajektoriji in \mathbf{M} je masna vztrajnostna matrika. Prispevek $\mathbf{D}(\int \ddot{\mathbf{x}}_e dt - \dot{\mathbf{x}})$ v enačbi se nanaša na estimacijo motenj. Odpravlja nemodelirane dinamike in motnje v sistemu, kot so trenje, modelne netočnosti ipd. Izraz v oklepaju je $\dot{\mathbf{x}}$. Izpeljava vodenja je podrobneje podana v [5].



Slika 3 Robustno impedančno vodenje

Na sliki 3 je shematsko prikazano robustno impedančno vodenje.

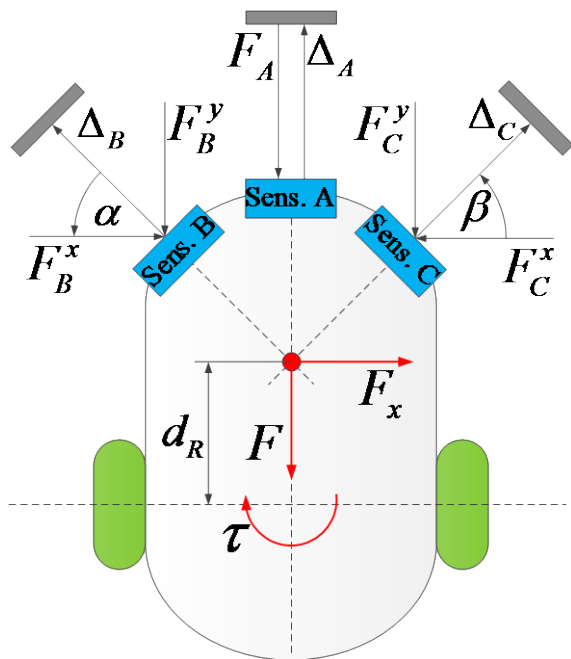
2.1 Virtualna reakcijska sila

Mobilni robot s svojo okolico nima fizičnega stika. Virtualna sila dotika z okolico je pridobljena iz senzorjev razdalje na mobilnem robotu. Bližje kot je robot nekemu objektu iz svoje okolice večja je virtualna sila dotika.

Slika 4 prikazuje namestitev senzorjev na robotu. Iz treh senzorjev izračunamo silo F in navor τ , kot kaže (2.6) (slika 4).

$$\mathbf{F}_e = \begin{bmatrix} F \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_A + F_B^y + F_C^y \\ d_R (F_B^x - F_C^x) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sila F zavira gibanje mobilnega robota, navor τ skuša robota zasukati.



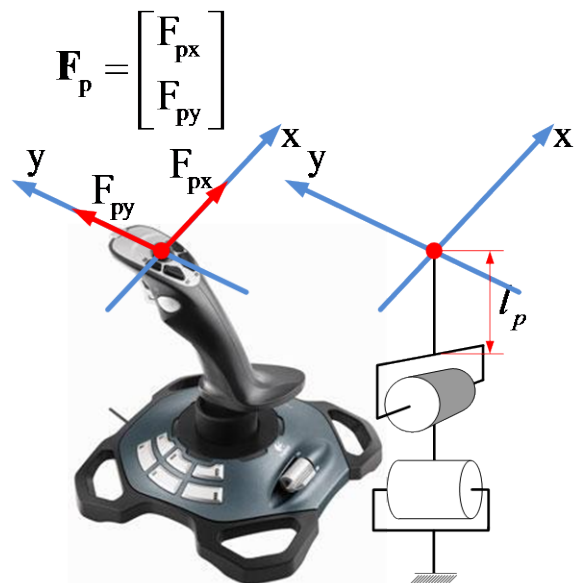
Slika 4 Modeliranje virtualne sile

Iz (2.2) vidimo da, dokler bo robot dovolj oddaljen od svoje okolice bo \mathbf{F}_e enak nič. To pomeni da bo \mathbf{x}_e enak nič, torej bo robot sledil referenčni trajektoriji (to zagotovi (2.4)). Ko se robot približa svoji okolici, je \mathbf{F}_e različen od nič in tako je tudi z levo stranjo (2.2). \mathbf{x}_e ni več enak nič, kar pomeni da robot ne sledi več referenčni trajektoriji. Med \mathbf{F}_e in \mathbf{x}^{ref} nastane kompromis, ki mu pravimo podajnost robota. Koliko se robot poda, določamo s \mathbf{K}_d . Več o podajnosti robota smo komentirali v zaključku.

3 Prenos sile na operaterja

Dvoosna aktivna krmilna palica vsebuje enosmerne motorje, ki so preko prenosa povezani s krmilno palico. Tako s tokom skozi elektromotor vplivamo na sili F_{px} in F_{py} (slika 5) na koncu krmilne palice, (2.7).

$$\mathbf{F}_p = \frac{\boldsymbol{\tau}_{mot}}{\mathbf{p} \cdot \mathbf{l}_p} \quad (2.7)$$



Slika 5 Dvoosna krmilna palica

V (2.7) je vektor \mathbf{F}_p sila na koncu krmilne palice, $\boldsymbol{\tau}_{mot}$ navor motorja, \mathbf{p} prestavno razmerje in \mathbf{l}_p dolžina ročice.

Enačba (2.8) opisuje obnašanje krmilne palice z neko vsiljeno mehansko impedanco.

$$\mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{B}_d \dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{F}_o - \mathbf{F}_e \quad (2.8)$$

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}^{ref} \quad (2.9)$$

Tukaj konstante \mathbf{M}_d in \mathbf{B}_d niso enake kot pri mobilnem robotu. Položajni pogrešek (2.9) je definiran kot razlika med trenutnim položajem in referenčnim položajem, ki predstavlja izhodiščni položaj krmilne palice. Enačbi (2.2) in (2.8) sta sklopljeni preko \mathbf{F}_e .

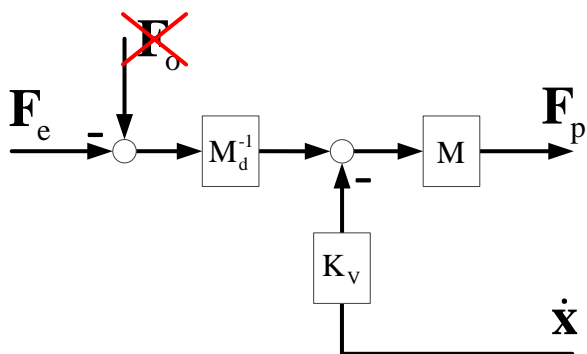
Dokler je \mathbf{F}_e enak nič, je tudi sila operaterja \mathbf{F}_o enaka nič in \mathbf{x}_e krmilne palice diktira linearno in kotno hitrost mobilnemu robotu.

Enačbi (2.10) in (2.11) kažeta, kako se virtualna sila mobilnega robota preslika preko krmilne palice na operaterja, slika 6.

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}_e \quad (2.10)$$

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{M} (-\mathbf{K}_v \dot{\mathbf{x}}_e - \mathbf{M}_d^{-1} (\mathbf{F}_o - \mathbf{F}_e)) \quad (2.11)$$

$$\mathbf{F}_p = [F_{px} \quad F_{py}]^T \quad (2.12)$$



Slika 6 Generiranje povratne sile

Ker na krmilni palici nismo merili sile, ki jo je povzročal operater, smo morali izpustiti meritev F_o . To delovanje krmilne palice ne spremeni.

3.1 Meritev položaja krmilne palice

Mehanizem krmilne palice je zgrajen tako, da omogoča določanje položaja krmilne palice s pomočjo vrtljivih potenciometrov. Krmilna palica ima dva vrtljiva potenciometra, s katerima lahko natančno določimo pozicijo krmilne palice.

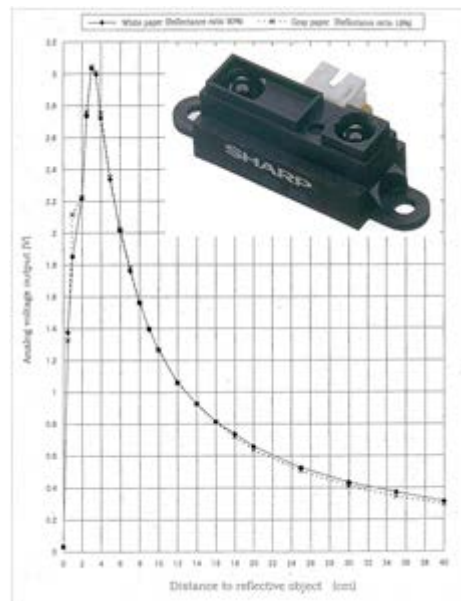
Pozicijo odčitamo s pomočjo AD pretvorne enote znotraj mikrokrmilnika MSP430F2274.

4 Izvedba

4.1 Senzor razdalje

Za merjenje razdalje mobilnega robota do objektov v okolici robota, smo uporabili optične senzorje v infrardečem sevalnem področju (v nadaljevanju IR senzor). Izbrali smo IR senzor proizvajalca SHARP z imenom GP2Y0A41SK0F, [6]. Vgrajeno ima elektronsko obdelavo signala s čimer v veliki meri odstrani vplive iz okolja in vpliv reflektivnosti odbojnega objekta.

Senzor pošlje IR svetlobni pulz vsako milisekundo in meri vpadni kot v katerem se svetlobni pulz vrne. Sprejemnik ima vgrajeno optično lečo, ki sprejeti IR impulz lomi tako, da pade na IR občutljiv detektor. Iz kota vpadnega IR impulza senzor izlušči informacijo o razdalji objekta, od katerega se je IR impulz odbil.



Slika 7 IR senzor in pripadajoča karakteristika

Informacijo o oddaljenosti odbojnega objekta dobimo v obliki analogne napetosti. Na sliki 7 vidimo odvisnost razdalje in izhodne napetosti. Odvisnost je nelinearna, v eni točki se tudi spremeni predznak gradienta.

Napetost smo pretvorili v digitalno obliko z AD pretvornikom v mikrokrmilniku LM3S1968.

4.2 MEMS žiroskop

Uporabljen žiroskop ADIS16265, [7], vsebuje vso potrebno signalno obdelavo integrirano v enem samem ohišju.

Senzor je v MEMS izvedbi. Kotno hitrost meri na podlagi zaznavanja Coriolisove sile oz. pospeška. Podrobno o delovanju MEMS žiroskopa v [8].

Preko SPI vodila mikrokrmilnik prečita trenutno vrednost kotne hitrosti.

Merilno območje, ki ga lahko izmerimo, se nahaja med $\pm(320^{\circ}/s)$. Senzor zakodira informacijo o kotni hitrosti s 14 biti. Povezava med digitalno zakodirano informacijo senzora in fizikalno enoto podaja (4.1).

$$\omega = 320 \cdot \left(\frac{x}{4368} \right) \begin{bmatrix} \circ \\ s \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

V (4.1) je ω fizikalna kotna hitrost, x je digitalno zakodirana informacija od senzorja.

4.3 Brežična povezava med krmilno palico in mobilnim robotom

Brežična povezava je bila realizirana z sprejemno oddajnim integriranim vezjem CC2500, [9], proizvajalca Chipcon. Deluje v 2400 – 2483,5 MHz območju. Vgrajen je v razvojni modul eZ430-RF2500 proizvajalca Texas Instruments, na katerem je prav tako uporabljen mikrokrmilnik MSP430F2274.

Radio omogoča podatkovne hitrosti do $500 \frac{\text{kbit}}{\text{s}}$, je paketno usmerjen in ima veliko strojne podpore za izvajanje operacije pošiljanja in sprejemanja podatkov preko elektromagnetnih valov. Tako smo postavljenim zahtevam primerno nastavili konfiguracijske registre radia, ki določajo vse lastnosti brezžične povezave ter nato preko SPI vodila pošiljali in sprejemali podatkovne pakete in kontrolne ukaze.

4.4 Mikrokrmilnik MSP430F2274 in krmilni program

MSP430F2274, [10], je 16 bitni mikrokrmilnik proizvajalca Texas Instruments. Mikrokrmilnik je klasične RISC arhitekture z Von Neumanovo razporeditvijo pomnilnika in optimiran za delovanje v režimih nizke porabe energije. MSP430F2274 smo dobili skupaj z eZ430RF2500 razvojno ploščo, ki vsebuje že omenjeni brezžični komunikacijski modul CC2500.

Mikrokrmilnik smo uporabili za krmiljenje aktivne krmilne palice in brezžično komunikacijo z mobilnim robotom. Prav tako smo krmilnik občasno uporabili za pošiljanje podatkov teleoperatorja na osebni računalnik, kjer so nas zanimali predvsem časovni poteki virtualnih sil in razdalj.

Krmilni algoritem bomo razložili s pomočjo slike 8. Ob vklopu sistema se vsi periferni moduli mikrokrmilnika inicializirajo. To so nastavitve digitalnega takta mikrokrmilnika, konfiguracija AD pretvornika, PŠM modula, UART in SPI enot ter konfiguracija brezžičnega komunikacijskega modula.

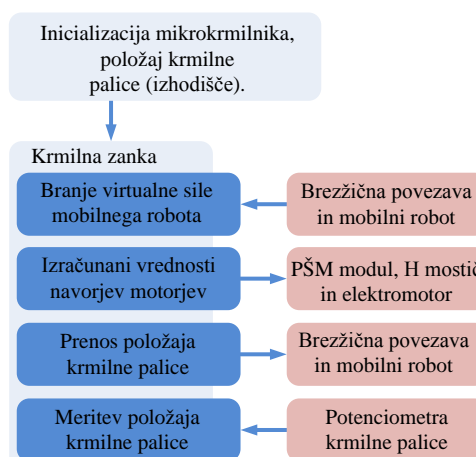
Ko je inicializacija sistema zaključena lahko s pritiskom tipke na krmilni palici poženemo krmilni algoritem (poženeta se hkrati algoritem na palici in robotu).

Prvi korak predstavlja branje oddaljenosti robota do objekta iz okolice. S tem dobimo informacijo o virtualni sili med robotom in objektom.

V drugem koraku na podlagi sprejete virtualne sile le to prenesemo na operaterja krmilne palice, po postopku opisanem v razdelku 3.

V koraku tri določimo položaj krmilne palice, kot smo to opisali v 3.1.

Četrti korak zaključuje zanko krmilnega programa s posredovanjem položaja krmilne palice preko brezžične povezave na mobilni robot.



Slika 8 Krmilni program v MSP430F2274

4.5 Mikrokrmilnik Stellaris LM3S1968 in krmilni program

LM3S1968, [11], je 32 bitni mikrokrmilnik proizvajalca Stellaris. Mikrokrmilnik je ARM (Advanced RISC Machine) M3 arhitekture, z Harwardsko razporeditvijo pomnilnika. Vsebuje strojni množilnik za 32 bitna cela števila. Množilnik lahko zmnoži dve števili v enem strojnem ciklu. Algoritem vodenja je implementiran z uporabo aritmetike s fiksno vejico [12], [13], kar se lepo sklada s strojnim množilnikom v mikrokrmilniku. S tem smo dosegli hitrejši izračun regulacijskega algoritma,

kot bi ga sicer z uporabo tehnike računanja s plavajočo vejico.

V LM3S1968 smo implementirali vodenje mobilnega robota, kot je to opisano v 2 z naslednjo izjemo. Na mobilnem robotu smo merili kotno hitrost z elektronskim MEMS žiroskopom. Meritev je natančna in hitra. Linearna hitrost robota je vodena po krmilnem principu. Tako se zakon vodenja iz (2.4) spremeni v (4.2).

$$\tau = J_{\Theta} \left(\ddot{\Theta}_c + D \left(\int \ddot{\Theta}_c dt - \dot{\Theta} \right) \right) \quad (4.2)$$

$$\ddot{\Theta}_c = -K_V \dot{\Theta}_e - K_P \Theta_e \quad (4.3)$$

$$\Theta_e = \Theta - \Theta^{ref} \quad (4.4)$$

τ je krmilni navor, J_{Θ} je vztrajnostni moment mobilnega robota, parameter D določa hitrost konvergence k predpisanemu obnašanju sistema, K_V in K_P sta povratno znančni ojačenji.

Pri mobilnem robotu smo k brezžični komunikaciji pristopili enako, kot pri krmilni palici. Uporabili smo eZ430RF2500 modul, ki preko UART vodila komunicira z LM3S1968 mikrokrmilnikom.

Krmilni algoritem bomo razložili s pomočjo slike 9.

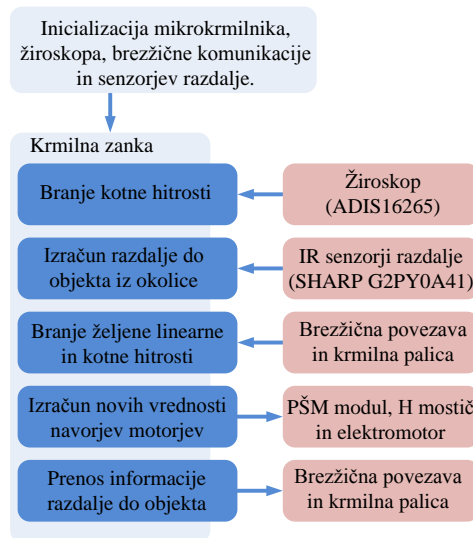
Ko je inicializacije konec, krmilni program čaka na pogoj za start, ki ga sprejeme od krmilne palice.

Ko zaznamo veljaven pogoj za start, začnemo izvajati krmilno zanko. V prvem koraku iz žiroskopa preberemo trenutno kotno hitrost, nato izračunamo razdaljo do morebitnega okoliškega objekta in od krmilne palice pridobimo željeno linearno in kotno hitrost.

V četrtem koraku iz vseh prej pridobljenih informacij izračunamo nove vrednosti krmilnih navorjev za motorje in le te v petem koraku preko PŠM enote apliciramo na motorje.

V zadnjem, šestem koraku, krmilni palici preko brezžične komunikacijske enote

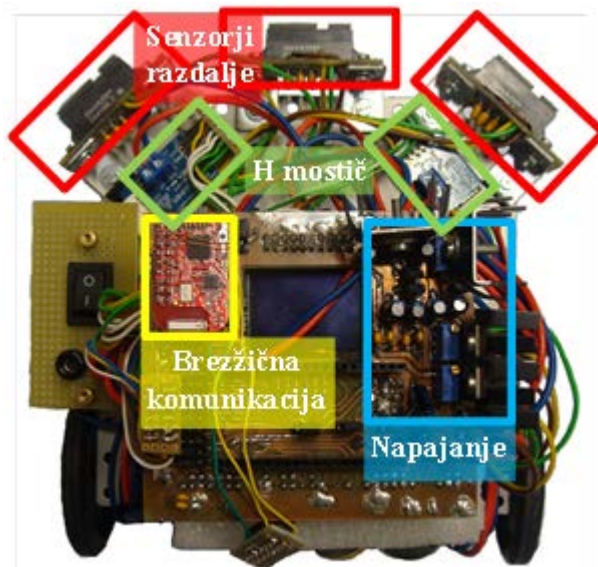
sporočimo trenutno odaljenost do okoliškega objekta.



Slika 9 Krmilni program v LM3S1968

5 Rezultati

Slika 10 prikazuje mobilnega robota od zgoraj. Vidijo se optični senzorji, modul za brezžično komunikacijo, tiskanina, ki je nameščena nad LM3S1968 razvojno ploščo in vsebuje elektroniko za napajanje vseh komponent ter H mostiča za krmiljenje motorjev.



Slika 10 Mobilni robot, od zgoraj

6 Zaključek

V prispevku smo predstavili izgradnjo bilateralno teleoperiranega mobilnega robota. Predstavljena je bila shema robustnega impedančnega vodenja mobilnega robota s krmilno palico. Opisani so bili vsi bistveni uporabljene sklopi, ki se nahajajo v mobilnem robotu ali krmilni palici.

Zastavili smo si cilj realizirati bilateralno teleoperiran mobilni robot, kar smo tudi izpolnili. Vodenje smo želeli izvesti za hitrost in kotno hitrost. Uspeli smo realizirati samo vodenje kotne hitrosti. Vodenje hitrosti nismo uspeli realizirati zaradi tehničnih omejitev. Hitrost mobilnega robota smo krmilili.

Vožnja mobilnega robota ob oviri povzroči, da se robot poda in ne sledi več zadani trajektoriji (hitrosti). Hkrati virtualno silo med robotom in okolico – virtualna blazina – čutimo na krmilni palici. V poglavju 2.1 smo omenili da podajnost robota določamo s parametrom K_d (enačba (2.2)). K_d je koeficient namišljene vzmeti med robotom in okolico. Z njim nastavljamo gradient sile. Ker je to popolnoma virtualno imamo pri tem veliko svobode. K_d smo določili popolnoma eksperimentalno. Prenos virtualne sile na operaterja lahko tudi poljubno skaliramo, kar smo prav tako storili eksperimentalno.

Predstavljen mobilni robot nudi še veliko nadaljnega dela in izboljšav. Za namene študije telerobotskih sistemov bi bilo potrebno izboljšati meritev vseh bistvenih veličin in podrobneje raziskati vpliv parametrov na sistem – predvsem bi bilo zanimivo videti kako vplivajo parametri vsiljene impedance na mobilnega robota, s kakšnimi parametri bi dosegli optimalno vodljivost sistema.

Krmilno palico bi za resnejše nadaljnje delo bilo potrebno zamenjati z mehansko bolj izpopolnjeno. Zdajšnja ima veliko zračnosti v prenosu, ki negativno vpliva na delovanje celotnega sistema. Z boljšo krmilno palico bi lahko dosegli bolj verno reproduciranje virtualne sile na operaterja.

7 Reference

- [1] E. Slawinski, V. Mut, and J.F. Postigo, "Teleoperation of Mobile Robots," *Latin American Applied Research*, 2006.
- [2] Ildar Farkhatdinov, Jee-Hwan Ryu, and Jinung An, "A Preliminary Experimental Study on Haptic Teleoperation of Mobile Robot with Variable Force Feedback Gain," *IEEE Haptics Symposium*, p. 6, 2010.
- [3] Hong Zhe Jin, Jang Myung Lee, Bin Yao Seung Keun Cho, "Teleoperation of a Mobile Robot Using a Force-Reflection Joystick With Sensing Mechanism of Rotating Magnetic Field," *Transactions on Mechatronics Vol. 15*, Feb. 2010.
- [4] Thoma Braunl, *Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*: Springer, 2006.
- [5] Aleš Hace, Mobilni robot, Junij 2011.
- [6] SHARP, GP2Y0A41SKOF, Podatkovni list.
- [7] Analo Devices. Programmable Digital Gyroscope Sensor ADIS16265. Podatkovni list.
- [8] Mohamed Gad-el-Hak, *The MEMS Handbook*, Mohamed Gad-el-Hak, Ed. Notre Dame, Indiana, 2001.
- [9] Texas Instruments, CC2500, Podatkovni list.
- [10] Texas Instruments, MSP430x2xx Family, Uporabniška navodila za MSP430.
- [11] Texas Instrumets. Stellaris® LM3S1968 Microcontroller. Podatkovni list.
- [12] Advanced RISC Machines Ltd, Fixed Point Arithmetic on the ARM, Uporaba celoštevilске aritmetike, Uporabniška navodila.
- [13] Texas Instruments, Stellaris® IQmath Library, Uporabniška navodila.