

Dvoosni krmilnik za hitro eksperimentiranje v robotskih aplikacijah

Milan ČURKOVIČ, Rok PUČKO, Mitja GOLOB, Aleš HACE

Izvleček: Predstavljeni dvoosni krmilnik omogoča poenostavljeno in hitro izvajanje laboratorijskih eksperimentov v robotskih in podobnih aplikacijah. Krmilnik je zasnovan na zmogljivem DSP-procesorju TMS320F28335, ki je sicer namenjen za vodenje servomotorjev. Pri snovanju in implementaciji algoritmov vodenja lahko uporabljamo računanje s plavajočo vejico, programiramo pa ga lahko kar v okolju Matlab/Simulink. Elektronsko vezje krmilnika je zasnovano tako, da omogoča robustno delovanje krmilnika tudi v industrijskih razmerah. Funkcionalna razširitev krmilnika je možna z notranjimi komunikacijskimi vmesniki. Krmilnik smo uporabili v okviru evropskega projekta FP7 HYPSTAIR za napredni HMI s haptičnim vmesnikom za manjše hibridno električno letalo.

Ključne besede: vodenje robota, haptični vmesniki, vodenje sile, hitra izvedba algoritmov vodenja

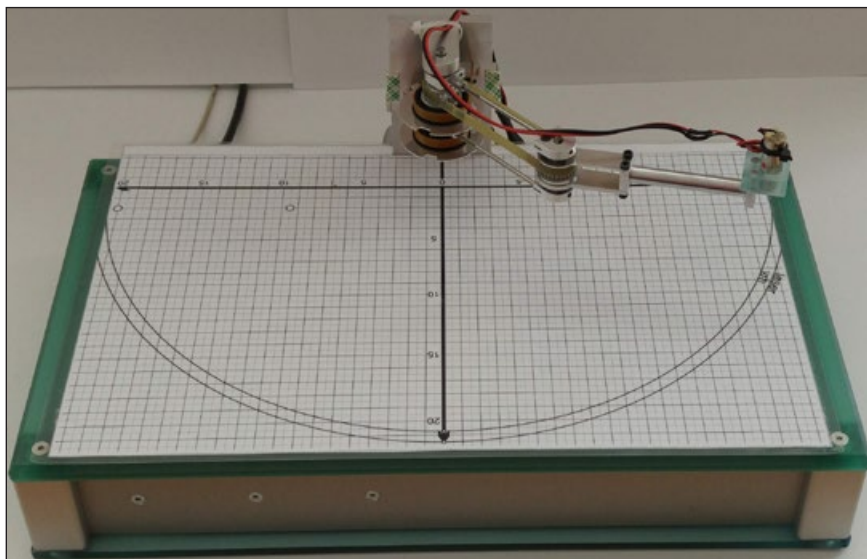
1 Uvod

Sistemi vodenja postajajo vse kompleksnejši, ker se zahteve glede vodenja vedno bolj zaostrejo. Po drugi strani tem zahtevam sledijo tudi mikrokrmilniki in digitalni signalni procesorji – DSP [1]. Postajajo vse zmogljivejši tako po moči procesorja in po kompleksnosti dodatnih enot. Izstopajo aritmetična enota za računanje s plavajočo vejico in periferni vmesniki, kot so pulznoširinski modulatorji, merilniki položaja in hitrosti s položajnim kodirnikom, različni komunikacijski kanali in drugo.

Z nižanjem cen mikrokrmilnikov se širi področje uporabe teh sistemov. Izrazita je tudi zahteva po skrajšanju časa razvoja izdelka in

s tem po hitrejšem prihodu na trg, kar pa se ne sklada s povečanjem kompleksnosti programske opreme. Povečano kompleksnost programske opreme obvladujemo z uporabo visoko nivojskega razvojnega okolja in s temu okolju prilagojenimi prevajalniki oziroma generatorji kode [2], [3]. Model simulacije uporabimo za avtomatsko generiranje kode za vgrajen procesor, ki deluje v re-

alnem času. Tak pristop odpravlja komunikacijo systemskega inženirja po systemskih specifikacijah s programskim inženirjem, ki potem po teh specifikacijah pripravi programsko opremo [4]. Seveda je posledica nenatančnosti v specifikacijah oziroma napačno razumevanje programskega inženirja nepravilno delovanje takega sistema. Pri na modelih osnovanem programiranju izvede kompleten



Slika 1. Laboratorijski mehanizem SCARA

Dr. Milan Čurkovič, univ. dipl. inž., Rok Pučko, dipl. inž., Mitja Golob, izr. prof. dr. Aleš Hace, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

postopek sistemski inženir, koda se generira avtomatsko, kot dokumentacija pa služi model sistema. Velika prednost takega pristopa je možnost uporabe že izdelanih, tudi že certificiranih modelov.

V nadaljevanju bomo predstavili zgradbo namenskega dvoosnega krmilnika [5]. Njegova tipična robotska aplikacija, tj. vodenje preprostega dvoosnega mehanizma SCARA, je prikazana na *sliki 1*. Sestavne enote našega dvoosnega krmilnika in način sestavljanja programskih aplikacij za krmilnik bomo prikazali na primeru haptične pogonske ročice [6], [7] in [8]. Ta primer je samo enoosni, vendar smo ga izbrali zaradi enostavnosti in s tem preglednosti. Sama aplikacija je podrobno opisana v [9]. Na koncu bo nakazana aplikacija na dvoosnem sistemu za upravljanje letala.

oscilator, vezje za zagon in vezje za nastavitev obnašanja DSP ob zagonu. Uporaba mikrokrmilnika z vgrajeno procesno enoto, pomnilnikom in perifernimi enotami bistveno zmanjša zahtevnost izdelave tiskanega vezja in s tem tudi vpliv zunanjih motenj.

Ključne lastnosti TMS320F28335 pri izbiri:

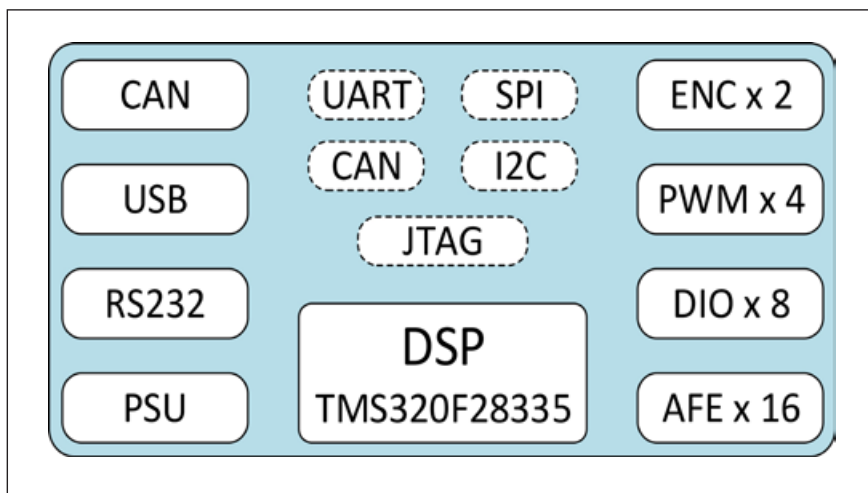
- delovna frekvenca 150 MHz,
- enota za izvajanje 32-bitnih operacij s plavajočo vejico (IEEE754 Single Precision FPU),
- pomnilnik 68 kB RAM, 512 kB FLASH,
- 18 izhodov PWM (od tega 6 HRPWM z resolucijo 150 ps),
- vmesnik za dva inkrementalna kodirnika položaja,
- komunikacijski vmesniki: 2 x CAN, 3 x SCI (UART), SPI, I2C,
- 12-bitni ADC, 16 kanalov, 80 ns, 2 x S/H,

■ 2.2 Napajanje in galvanske ločitve

Galvanska ločitev mikrokrmilnika preprečuje vpliv zunanjih motenj. Analogni vhodi sicer niso galvansko ločeni, uporabljamo pa nastavljivo diferenčno vhodno stopnjo. Napajalno napetost lahko spreminjamo v širokem območju. Poraba je odvisna od števila in vrste priklapljenih enot. Za zmanjšanje motenj v analognih signalih analogne vhodne stopnje napajamo izolirano. Galvansko ločene enote zahtevajo tudi zunanje napajanje, pri enostavnejših aplikacijah lahko uporabimo neizoliran notranji napajalnik.

■ 2.3 Analogni vhodi

ADC-modul mikrokrmilnika ima na vhodu dva osemkanalna multiplekserja s po enim zadrževalnikom sample/hold. Zasnova omogoča sočasni zajem vzorcev na obeh kanalih in nato zaporedno analogno digitalno pretvorbo. 12-bitni ADC potrebuje za pretvorbo 80 ns. Modul vsebuje tudi posebno vezje, ki strojno izbira analogne vhode, starta posamezne ali več zaporednih pretvorb in zapiše rezultate pretvorb v ustrezne registre. Na *sliki 3* je prikazana blokovna shema analogne vhodne stopnje. Vhodne signale najprej filtriramo z nizkopasovnim filtrom prvega reda. Sledi nastavljiv diferenčni ojačevalnik, pri katerem izberemo ojačenje, zamik (offset) in lomno frekvenco filtra z vrednostmi uporabljenih pasivnih elementov. Ojačenje lahko nastavljamo v širokem območju. Zadnje nizkopasovno sito je neposredno pri vhodnem priključku DSP.



Slika 2. Blokovna shema krmilnika

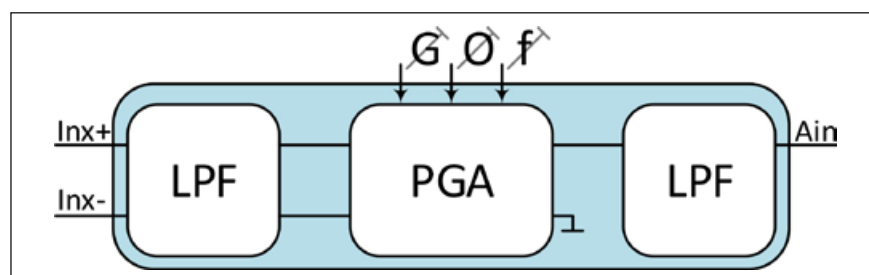
■ 2 Komponente sistema

Blokovno shemo krmilnika na *sliki 2* sestavljajo digitalni signalni procesor, komunikacijski in vhodno-izhodni vmesniki ter napajalna enota. Vhodno-izhodni vmesniki in napajalna enota so galvansko ločeni.

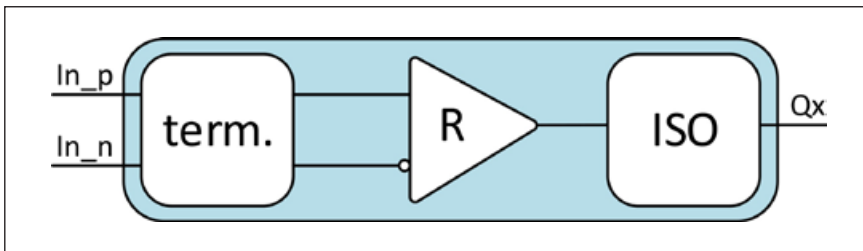
■ 2.1 Digitalni signalni procesor – DSP

Procesorski modul sestavljajo Digitalni signalni procesor TMS320F28335 družine Delfino,

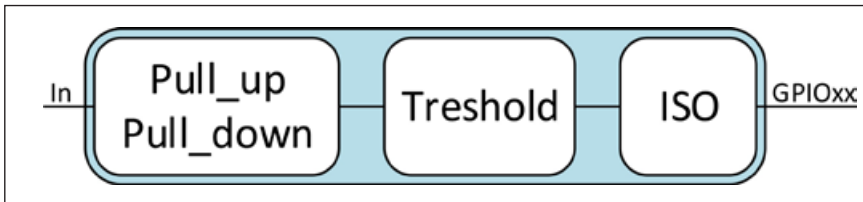
- sinhronizacija PWM in ADC in ključno
- podpora za generiranje izvršne kode iz modela Simulink s knjižnico perifernih enot DSP-ja [10].



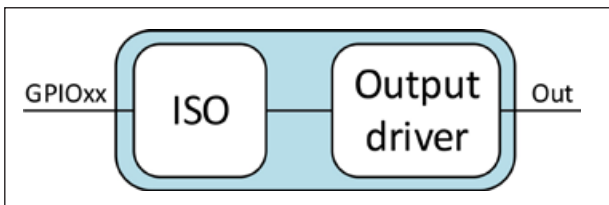
Slika 3. Analogna vhodna stopnja



Slika 4. Vhodna stopnja RS422 za inkrementalni kodirnik položaja



Slika 5. Digitalni vhodi



Slika 6. Digitalni izhodi

■ 2.4 Inkrementalni kodirniki položaja

Vhodni signali inkrementalnega kodirnika položaja na *sliki 4* se najprej zaključijo. S tem preprečimo odboj signalov na koncih linije in zmanjšajo motnje. Uporabljeno asimetrično vezje omogoča tudi neposreden priklop dajalnikov brez protifaznih signalov. Sledi RS422 sprejemnik in nato galvanska ločitev. Ker je sprejemno vezje galvansko ločeno, ga moramo napajati od zunaj. Pri tem nam je na voljo lokalna napetost, galvansko ločena od DSP, ni pa ločena od vhodnega napajanja.

■ 2.5 Digitalni vhodi

Posebnost logičnih vhodov je zelo široko območje vhodnih in napajalnih napetosti. Vezje deluje z logičnimi nivoji TTL kakor tudi s 24-voltnimi signali. Pri tem pa imamo možnost uporabe internega vezja pull-up ali pull-down. Pull-up vezje deluje samo pri 5-voltnih signalih, na višje napetosti pa zaradi diode ne vpliva. S tokovnim ponorom kot pull-down vezjem pokrijemo široko območje vhodnih napetosti,

pri tem pa se vhodni tok bistveno ne spreminja. Na *sliki 5* je blokovna shema izvedbe digitalnega vhoda, nivo preklopa nastavimo s stikali. Sledi galvanska ločitev.

■ 2.6 Digitalni izhodi

Tudi digitalni izhodi so galvansko ločeni. Podpirajo široko območje napajalnih napetosti od 5 V do 24 V. Dva izmed štirih izhodov sta hitra in omogočata prenos podatkov s hitrostjo do 10 Mbps. Oba logična nivoja izhodne stopnje sta aktivna. Druga dva izhoda sta počasnejša, vendar tokovno zmogljivejša. Hitrost prenosa je 100 bps, izhod pa je izveden kot

dvosmerno stikalo. Z mostičkoma lahko za vsak izhod izberemo pull-up ali pull-down način delovanja. Vsi izhodi so galvansko ločeni.

■ 2.7 Pulznoširinski modulator

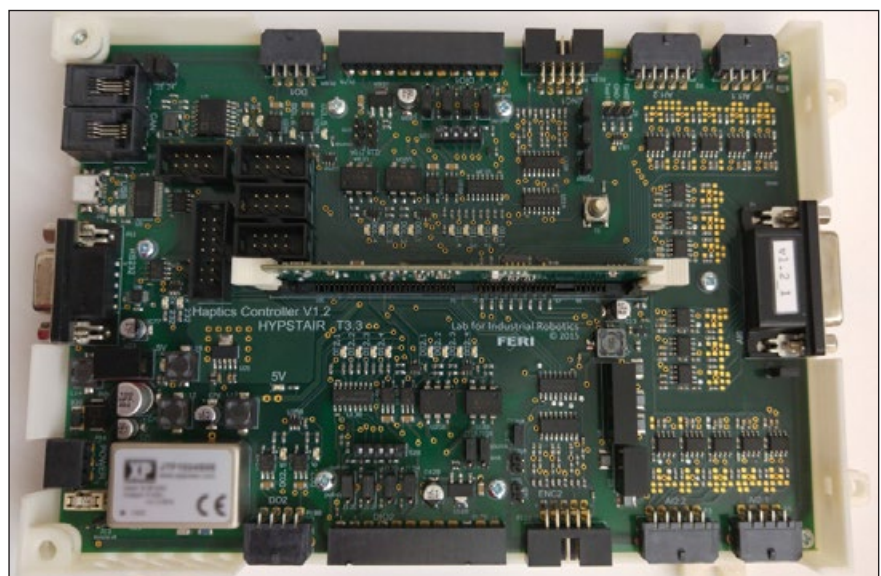
Mikrokrmilnik vsebuje posebno enoto PWM. Štirje izmed šestnajstih PWM-izhodov DSP so speljani na zunanje priključke. Vsi so galvansko ločeni, uporabljajo pa enako vezje in izhodni gonilnik kot hitri digitalni izhodi. Maksimalna frekvenca je 10 MHz in s tem zagotavlja nespremenjeno prevajalno razmerje (ang. Duty cycle) PWM-signalov. Območje izhodne napajalne napetosti je 5 V do 24 V.

■ 2.8 Komunikacijski vmesniki

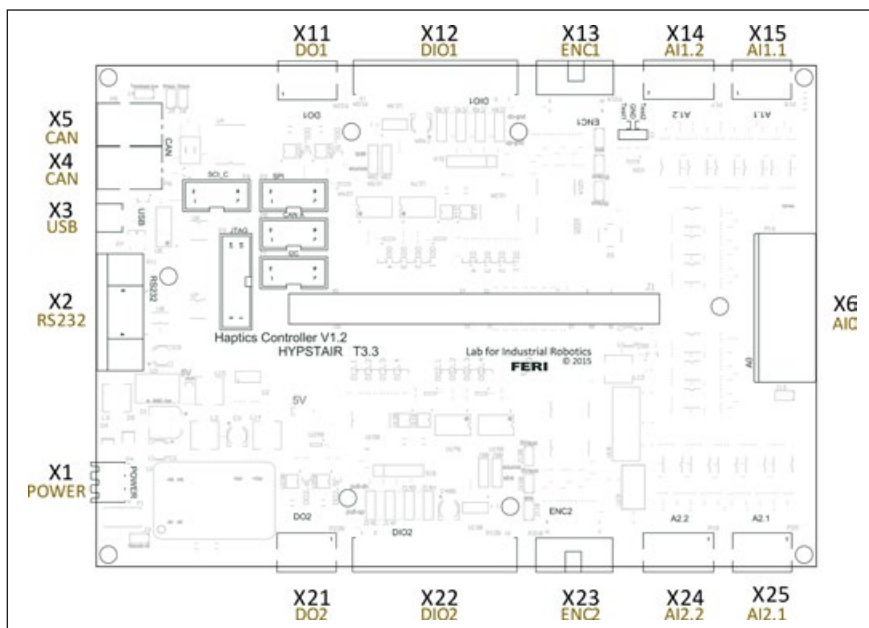
Povezava krmilnika z ostalimi napravami poteka s komunikacijskimi vmesniki. Tako sam DSP kot celoten krmilnik vsebujeta veliko komunikacijskih vmesnikov: SCI – RS232, SCI – USB in CAN. USB uporabljamo predvsem za povezavo z osebnim računalnikom za spremljanje in nadzor izvajanja aplikacije, RS232 in CAN pa za povezavo z ostalimi enotami. Vsi komunikacijski vmesniki so galvansko ločeni.

■ 2.9 Razširitveni priključki

Funkcije krmilnika lahko razširimo z dodatnim vezjem, priklopljenim na razširitvene priključke. Med dru-



Slika 7. Dvoosni krmilnik



Slika 8. Razporeditev priključkov dvoosnega krmilnika

gim lahko povečamo število merilnikov položaja. S posebno izvedbo merilnika, s katerim nadomestimo vključeno eQEP-enoto, zmanjšamo težave pri merjenju majhnih hitrosti v področju pod nekaj pulzov na merilni interval.

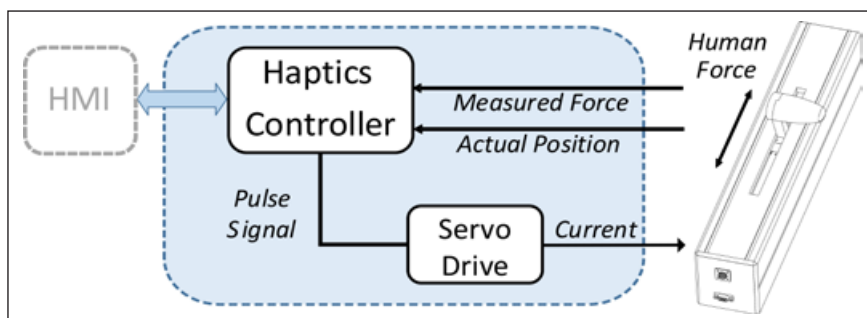
Na *sliki 7* je dvoosni krmilnik. Razvojno okolje za programsko opremo na osnovnem nivoju je Code Composer Studio (CCS), ki podpira programiranje v C-jeziku. CCS uporabljamo tudi pri delu v na modelih osnovanem visokonivojskem programiranju za prevajanje z generatorji kode ustvarjene kode C. Razporeditev priključkov krmilnika je podana na *sliki 8*.

■ 3 Hitra gradnja programske opreme

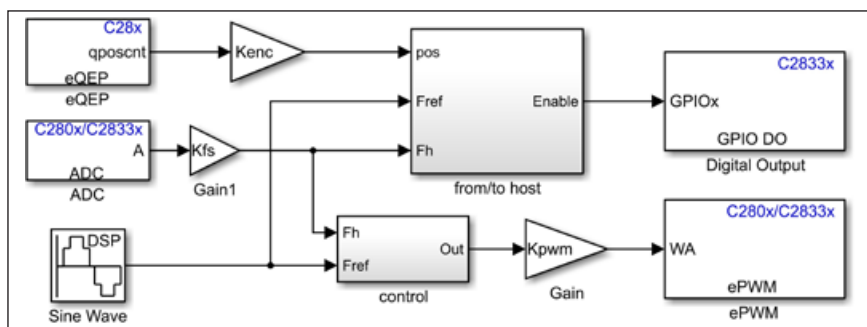
Hitra gradnja programske opreme (ang. Rapid Prototyping) za vodenje mehatronskih sistemov izhaja iz na modelih osnovanega pristopa k načrtovanju sistemov vodenja. Matlab/Simulink oziroma njuni odprtokodni izvedbi Octave/Scilab so vedno bolj razširjeni pri snovanju in testiranju delovanja različnih dinamičnih sistemov. Grafični uporabniški vmesnik je pregleden in enostaven za uporabo. Izdelan simulacijski model vodenja pretvori generator kode v izvršno kodo mikrokrmilnika oziroma DSP-ja in s tem opravi implementacijo.

■ 3.1 Sistem haptične pogonske ročice

Haptična pogonska ročica je vmesnik med človekom in strojem. Z velikostjo in obliko povratne sile pri premikanju ročice uporabniku sporoča različne informacije o stanju pogonskega sistema [9]. Sistem haptične pogonske ročice na *sliki 9* sestavljajo: haptični krmilnik, servopogon, haptična pogonska ročica in uporabniški vmesnik HMI. Aktuator



Slika 9. Haptična pogonska ročica

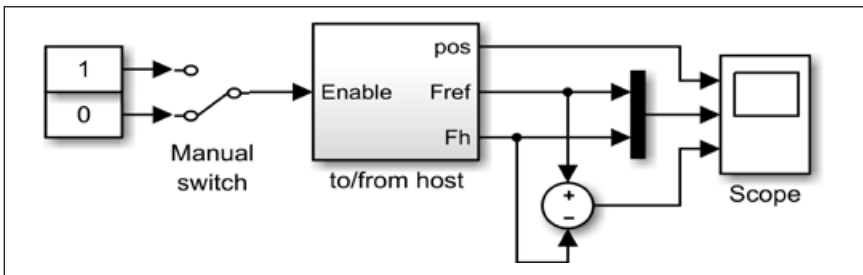


Slika 10. Testni model – Simulink

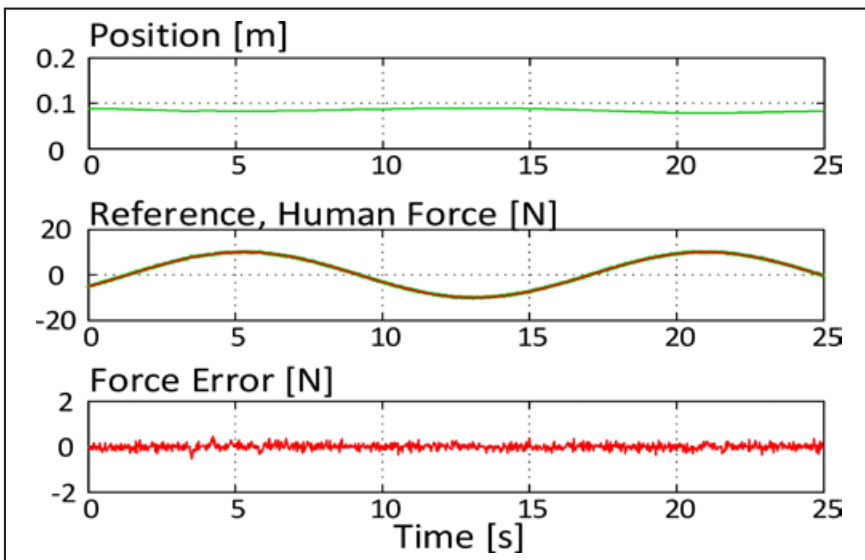
v pogonski ročici poganja zanj prirejen servopogon oziroma regulator toka. Na vhod za referenčni tok je priključen PWM-izhod krmilnika. Haptična pogonska ročica ima vgrajen senzor dejanske sile, s katero človek deluje na ročico in senzor položaja ročice.

Delovanje sistema smo preizkusili s sinusnim referenčnim signalom sile. Položaj ročice nastavljamo z roko, pri čemer se meri dejanska sila. Razliko med referenčno in dejansko silo vodimo na regulator sile, katerega izhod kot referenco toka posredujemo servopogonu. Na osebnem računalniku teče oddaljena aplikacija uporabniškega vmesnika, ki preko navideznega serijskega vmesnika na USB-vodilu sprejema podatke o položaju, referenčni in dejanski sili. Zaradi kratkega časa vzorčenja (100 μ s) in počasne komunikacije z uporabniškim vmesnikom na oddaljenem računalniku sprotni prenos vseh zajetih podatkov ni mogoč, zato jih shranjujemo v RAM-pomnilnik na DSP-ju in prenašamo na zahtevo.

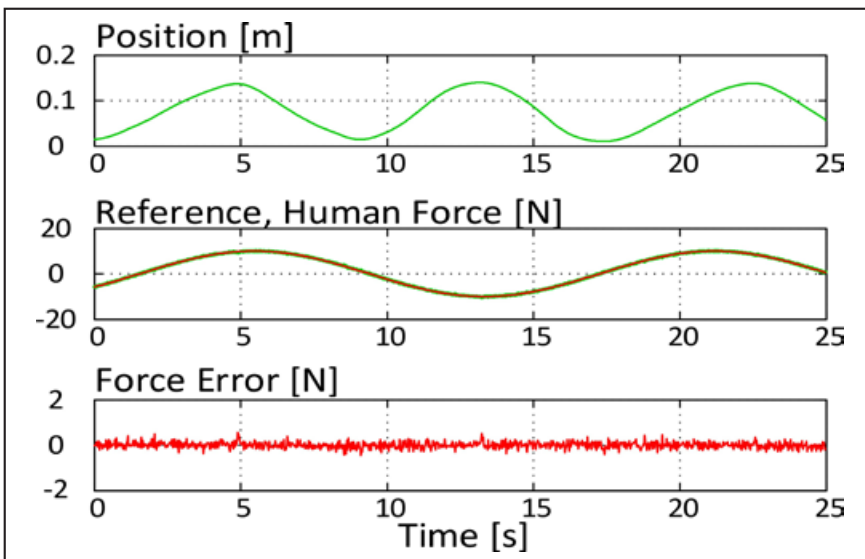
Na *sliki 10* je Matlab/Simulink model vodenja haptične pogonske ročice implementiran na haptičnem krmilniku. Povezava z oddaljeno aplikacijo je izvedena v podsistemu from/to host. Sprejema se signal



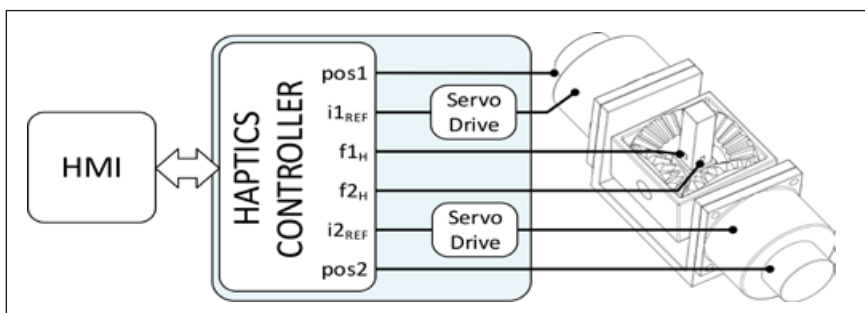
Slika 11. Aplikacija na oddaljenem računalniku



Slika 12. Regulacija sile pri mirujoči ročici



Slika 13. Regulacija sile pri gibajoči se ročici



Enable, ki omogoči močnostni ojačevalnik aktuatorja in s tem vodenje. Ko se Enable umakne, je izhodni ojačevalnik spet onemogočen, zajeti podatki pa se prenesejo na oddaljeni računalnik.

Uporabniški vmesnik na oddaljenem računalniku je predstavljen na sliki 11. Z ročnim stikalom omogočamo oziroma onemogočamo močnostni ojačevalnik aktuatorja. Po izklopu stikala se blok podatkov prenese in zapiše v delovni prostor Matlaba.

V nadaljevanju eksperimentalni rezultati prikazujejo odziv sistema na sinusno obliko referenčne sile ob interakciji s človekom. Na sliki 12 skuša človek držati ročico pri miru, na sliki 13 pa jo premika. V obeh primerih, ne glede na položaj ročice, regulator sile zagotavlja ustrezno sledenje dejanske sile referenčni.

Izvedeni aplikaciji služita le za potrjevanje delovanja strojne opreme. Opis uporabe eksperimentalnega sistema haptične pogonske ročice letala s hibridnim električnim pogonom je predstavljen v literaturi [9]. Opisani sistem je enoosni. Krmilnik pa omogoča tudi vodenje dvoosnih sistemov, ki pa so mehansko kompleksnejši. Na sliki 14 je primer dvoosnega sistema za vodenje letala (ang. Fly by Wire), primernega za vodenje s predstavljenim krmilnikom [11].

Dva motorja z dajalnikoma položaja sta povezana s prečnima zobnikoma, vzdolžna zobnika se prosto vrtita na svoji osi, povezani z ročico. Na ročici so prilepljeni merilni lističi za merjenje vzdolžne in prečne sile. Vrtenje obeh motorjev v isto smer pomeni premik ročice prečno, nasprotno vrtenje motorjev pa vzdolžno.

4 Zaključek

Dvoosni krmilnik poenostavlja razvoj in izvedbo krmiljenja različnih mehatronskih sistemov. Zmogljiv procesor, ki podpira računanje s plavajočo vejico, poenostavlja snovanje in izvedbo sistema vodenja in tako povečuje preglednost sistema.

Sistem dopušča tudi ročno optimizacijo posameznih delov algoritma in s tem še dodatne pospešitve pri izvajanju. Isti model lahko poganjamo na ciljnem krmilniku in v simulatorju.

Eksperimentalni rezultati pri sinusni obliki referenčne sile so pokazali dobro sledenje dejanske sile referenčni in s tem potrdili pričakovanja. Načrtujemo dodatno vezje na razširitvenem SPI-vodilu z dvema dodatnima vmesnikoma za inkrementalni kodirnik položaja. Tako bi lahko opisani dvoosni krmilnik uporabili tudi za štiriosne aplikacije. Z vezjem bi tudi izboljšali meritev hitrosti s pulznim kodirnikom položaja.

Lahko rečemo, da je Rapid prototyping tisto orodje, s katerim pretvorimo visokonivojski opis ali model, uporabljen pri simulaciji, v nizkonivojsko kodo, primerno za prevajalnike uporabljenega mikrokrmilnika.

Viri

- [1] Texas Instruments Incorporated: »TMS320F28335 Delfino Microcontroller | TI.com« [elektronski]. Available: <http://www.ti.com/product/TMS320F28335>
- [2] N. Semenič, A. Sarjaš, R. Svečko in A. Chowdhury: »Design and Implementation of Rapid Control Prototyping System with Matlab/Simulink,« Informacije MIDEM, 2011.
- [3] B. d. Santos, R. E. Araujo, D. Varajao in C. Pinto: »Rapid Prototyping Framework for Real-Time Control of Power Electronic Converters Using Simulink,« v IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013.
- [4] M. Ahmadian, Z. J. Nazari, N. Nakhaee in Z. Kostic: »Model based design and SDR,« v The 2nd IEE/EURASIP Conference on DSP-enabled Radio, London, UK, 2005.
- [5] M. Golob, R. Pučko, M. Čurkovič in A. Hace: »Hypstair Haptics Control Board Design 2.0, V1.3,« Laboratorij za industrijsko robotiko, FERI, Maribor, 23. 3. 2015.
- [6] »Uradna spletna stran projekta HYPSTAIR«: [elektronski]. Available: <http://www.hypstair.eu/>. [Poskus dostopa 2. 3. 2017].
- [7] A. Hace: »Haptics in cockpit environment (HYPSTAIR project – haptic interfaces),« v Symposium E2-Fliegen, Stuttgart, Germany, 18. February 2016.
- [8] A. Hace: »Experimental prototype system for haptic power lever: HYPSTAIR T3.3 Report No. 2: project task summary version 1.0,« UM-FERI, Maribor, 2016.
- [9] M. Golob, R. Pučko, M. Čurkovič in A. Hace: »Eksperimentalni sistem za haptično pogonsko ročico letala s hibridno električnim pogonom,« v AIG'17, Maribor, 2017.
- [10] The MathWorks, Inc.: »TIC2000 Support from Embedded Coder - Hardware Support - MATLAB/Simulink,« [elektronski]. Available: <https://www.mathworks.com/hardware-support/ti-c2000.html>. [Poskus dostopa 2. 3. 2017].
- [11] R. L. Hermans: »Design of an actuated side stick controller for the SiMoNa research simulator,« Doctors thesis, Delft University of Technology, Delft, 1999.
- [12] M. Čurkovič, R. Pučko, M. Golob, in A. Hace: »Dvoosni krmilnik za hitro eksperimentiranje v robotskih aplikacijah,« v AIG'17, Maribor, 2017.

Two-axis controller for a rapid experimentation in robotic applications

Abstract: The presented two-axis controller allows simplified and rapid implementation of laboratory experiments in robotics and similar applications. The controller is based on a powerful DSP processor TMS320F28335, which can implement control of servomotors. Design and implementation of control algorithms include usage of floating point calculations. The system is programmable in Matlab/Simulink environment. The electronic controller circuitry design enables a robust operation of the controller even in industrial conditions. Functional extensions of the controller are possible with the internal communication interface. The controller was applied within the European FP7 HYPSTAIR project for an advanced HMI with a haptic interface of a light hybrid electric aircraft.

Keywords: Robot control, Haptic interfaces, Force control, Rapid control prototyping

Zahvala

Projekt HYPSTAIR je bil financiran iz 7. okvirnega programa EU za raziskave, tehnološki razvoj in predstavitve s sporazumom št. 605305. Partnerji v projektu so bili Pipistrel, d. o. o., Ajdovščina (Slovenija), Siemens AG (Nemčija), MBVision (Italija), Univerza v Pisi (Italija) in Univerza v Mariboru (Slovenija). Članek je bil predhodno objavljen na deseti konferenci Avtomatizacija v industriji in gospodarstvu AIG'17 6. in 7. aprila 2017 v Mariboru [12].