

Robot za pipetiranje

Roman Hribar, Robert Simčič, Matjaž Mihelj, Marko Munih
Laboratorij za robotiko, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1000 Ljubljana
roman.hribar@robo.fe.uni-lj.si

Pipetting robot

The paper outlines a small-footprint desktop robotic system with five degrees of freedom, which was developed for automatic pipetting, common in the field of pharmaceuticals, biology, chemistry, medicine, and elsewhere. The robot enables efficient, accurate and automatic fluid dispensing and transfer by using a manual pipette, mounted on the top of a robotic arm. First a brief description of liquid handling robots and the advantages of automatic pipetting are presented. Afterwards the key requirements of the robot assembly are given, with a description of the corresponding drive system, including stepper motors, pulleys, belts, and guides. The robot construction was designed in Autodesk Inventor. The system control comprises a power supply circuit and a microcontroller with an integrated algorithm for position control. Finally, problems that appeared in the course of work are given along with possibilities of future improvements.

Kratek pregled prispevka

Prispevek opisuje namizni robotski sistem za avtomatsko pipetiranje s petimi prostostnimi stopnjami, ki za zajem in prenos tekočine uporablja na vrh robotske roke pritrjeno ročno pipeto. Takšen sistem je možno uporabiti v različnih laboratorijih, kot so farmacevtski, biološki in kemijski ali pa tudi v medicinske namene. Na začetku je na kratko predstavljeno robotsko pipetiranje in prednosti avtomatskega pipetiranja. V nadaljevanju so obravnavane zahteve robota in ves pogonski sklop, v katerega spadajo koračni motorji, jermeni, jermenice in vodila. Natančno je opisan razvoj izdelanega robotskega mehanizma, ki je potekal v programskem okolju Autodesk Inventor. Sistem za krmiljenje uporablja mikrokrmilnik in napajalno vezje. Na krmilniku je nameščen celoten algoritem za pozicijsko vodenje robotskega sistema. Končno so podane težave predstavljene zasnove, možnosti izboljšav ter sklepne ugotovitve. Pipetirni robot se je izkazal za zanesljivo in natančno napravo, z velikim potencialom za uporabo v širokem spektru biomedicinskih aplikacij.

1 Uvod

Robotski sistemi so nepogrešljivi del sodobnega biološkega ali kemijskega laboratorija. Kmalu po iznajdbi prvih robotskih mehanizmov so se pojavili tudi prvi laboratorijski roboti. Z avtomatizacijo nekaterih laboratorijskih procesov se je povečala učinkovitost in uspešnost znanstvenih raziskav, kar je pripomoglo k hitrejšemu razvoju. Uporaba sodobnih tehnologij je v laboratorijih ključnega pomena, saj poleg hitrega napredka ohranja tudi konkurenčnost v primerjavi z drugimi laboratoriji. V veliki meri se robotske sisteme uporablja za pripravo in analizo tako bioloških kot tudi kemičnih vzorcev. Eden od pomembnejših robotskih mehanizmov, ki ga najdemo v laboratorijih je t.i. robot za pipetiranje. Gre za robotske mehanizme, s pomočjo katerih avtomatiziramo zajem in prenos tekočine med različnimi vzorčnimi posodami [1].

Prednosti avtomatizacije se kažejo v hitrejši obdelavi vzorcev ter povečanju ponovljivosti in zanesljivosti pipetiranja. To posledično pomeni zmanjšanje količine odpadnega materiala, ki je posledica človeških napak. Poveča se tudi učinkovitost in produktivnost, saj lahko robot deluje neprekinjeno. Pri delu z nevarnimi snovmi z avtomatizacijo vzpostavimo varnejše delovno okolje, saj uporabnik z njimi ni v neposrednem stiku.

2 Izbor sestavnih delov

Pred začetkom konstruiranja robota je bilo potrebno izbrati aplikaciji primerne aktuatorje, vodila, jermene in jermenice, ki morajo ustrezati določenim funkcionalnim pogojem. Glavne zahteve robotskega manipulatorja so predvsem visoka natančnost, hitrost in pospeški. Delovni prostor robota mora biti čim bolj kompakten, hkrati pa dovolj velik za pipetiranje šestih mikrotitrnih plošč. Robot mora biti dovolj natančen, da s konico zadane najmanjšo luknjico mikrotitrne plošče. Konica ima premer 0,9 mm, luknjica pa 3,3 mm.

$$n = \frac{d_{\text{luknjice}} - d_{\text{konice}}}{2} \quad (1)$$

Če podatka vstavimo v enačbo (1), dobimo zahtevano natančnost za osi X in Y , ki znaša 1,2 mm. Zahteve glede nosilnosti so nižje, saj je robotski mehanizem namenjen pipetiranju, kjer sama konstrukcija med delovanjem ni bistveno obremenjena [2].

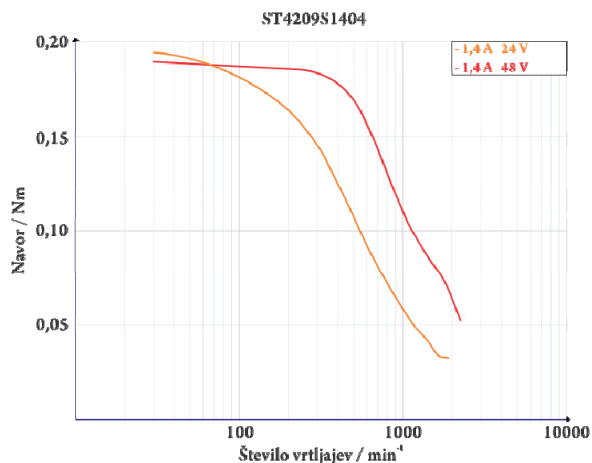
2.1 Koračni motorji

Zaradi visoke natančnosti in majhnih korakov, ki jih mora robot opravljati, smo se že na začetku osredotočili zgolj na koračne in linearne motorje, ki so za take mehanizme najbolj primerni. Glavno slabost linearnih motorjev v primerjavi s koračnimi motorji predstavlja manjša natančnost, medtem ko je njihova glavna prednost zmožnost doseganja višjih hitrosti in pospeškov.



Slika 1: Koračni motor ST4209S1404, ki poganja os Y .

Glavna prednost linearnih motorjev je lažje konstruiranje celotnega mehanizma, saj ni potrebno sestavljati vsake osi posebej. Celoten linearni motor lahko namreč že uporabimo kot os robota, posledično pa tudi ne potrebujemo dodatnih jermenic, jermenov in vodil. Najpomembnejši razlog, da smo izbrali koračne motorje, je nižja cena, saj so v primerjavi z linearnimi pogoni kar nekajkrat cenejši. Vse tri osi in rotacijsko mizo smo opremili s 4-faznim bipolarnim hibridnim koračnim motorjem podjetja Nanotec serije ST4209, ki omogočajo velik navor in prilagodljiv korak od polnega koraka $0,9^\circ$ do mikro-koraka $0,06^\circ$ [4].



Slika 2: Navorna karakteristika motorja ST4209S1404.

Iz navornih karakteristik in vztrajnostnih momentov motorjev ter mase gibljivih delov robota lahko za vsako od osi izračunamo maksimalne pospeške.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} + J\vec{\alpha} \quad (2)$$

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{a}{r} \quad (4)$$

Enačbo za maksimalen pospešek (5) dobimo, če enačbi (3) in (4) vstavimo v enačbo (2) in izrazimo pospešek a . Pri tem upoštevamo, da je \vec{M} vzporeden z $\vec{\alpha}$ in \vec{r} pravokoten na \vec{F} . Sedaj lahko zapišemo enačbo maksimalnega pospeška:

$$a = \frac{M}{mr + \frac{J}{r}}, \quad (5)$$

kjer je M maksimalen navor motorja, m je masa, ki jo mora posamezen motor premikati, r je polmer jermenice in J vztrajnostni moment rotorja.

2.2 Izbor ostalih pogonskih delov robota

Poleg izbora pogonov smo morali izbrati tudi vodila, jermenice in jermene.

2.2.1 Vodila

Uporabili smo linearna okrogla jeklena vodila in na vsako od osi namestili po dve

vzporedni vodili. Za os X smo vgradili vodili premera 8 mm, saj morata premagovati težo skoraj celotne konstrukcije robota, os X pa je hkrati tudi najdaljša izmed vseh osi. Za osi Y in Z smo izbrali vodila s premerom 5 mm, saj naj bi bili pripadajoči obremenitvi nekoliko manjši. Na osi X sta vodila dolžine 387 mm, na Y 269 mm in na Z 180 mm.

2.2.1 Ležaji

Za drsenje vodil smo uporabili linearne ležaje dimenzij 8x16x25 mm za 8 mm vodila in 5x12x22 mm za 5 mm vodila, za vrtenje jermenic pa kroglične ležaje dimenzij 4x13x5 mm. Na osi X smo kroglična ležaja vgradili v zaključni segment, na osi Y sta ležaja vgrajena v jermenico.

2.2.1 Jermenica

Pri izbiri jermenice smo morali upoštevati, da jermenica ne bo prevelika, saj bi s tem dobili slabšo natančnost, ki jo izračunamo s pomočjo enačbe (6). Obenem pa nismo smeli uporabiti premajhne jermenice, ker bi s tem dobili manjše pospeške in hitrosti.

$$n = \frac{r\pi\alpha}{180^\circ} \quad (6)$$

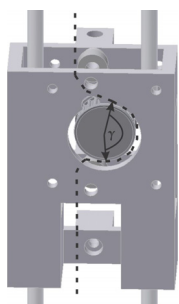
V enačbi (6) n predstavlja premik osi, če se koračni motor zavrti za kot α , medtem ko r označuje polmer jermenice. Morali smo upoštevati kompromis med čim večjo hitrostjo in čim boljše natančnostjo, zato smo se odločili za jermenice z dvaindvajsetimi zobmi in premerom 17 mm. Polmer jermenice (8,5 mm) lahko vstavimo v enačbo (5) in ob upoštevanju vseh ostalih parametrov dobimo maksimalne pospeške posameznih osi robota, ki znašajo:

$$a_x = 3,4 \frac{m}{s^2}; a_y = 4,0 \frac{m}{s^2}, a_z = 8,7 \frac{m}{s^2}.$$

Natančnost pri izbrani jermenici in četrtinskem koraku motorja znaša 0,03 mm, kar zadošča našim začetnim zahtevam.

3 Razvoj konstrukcije

Celoten robotski mehanizem je bil zasnovan v grafičnem okolju Autodesk Inventor. Začeli smo s konstruiranjem osi X , ki jo poganja najmočnejši koračni motor. Na gred koračnega motorja je pritrjena jermenica, motor pa na enega izmed končnih zaključkov. Na drugi strani je os prav tako zaključena s končnim členom, le da sta tukaj vgrajena dva kroglična ležaja, skozi katera poteka osovina, na katero je potem pritrjena jermenica.

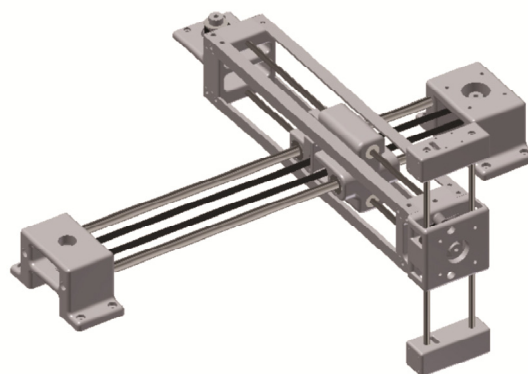


Slika 3: Potek jermena Z osi skozi pasivni zaključek osi Y .

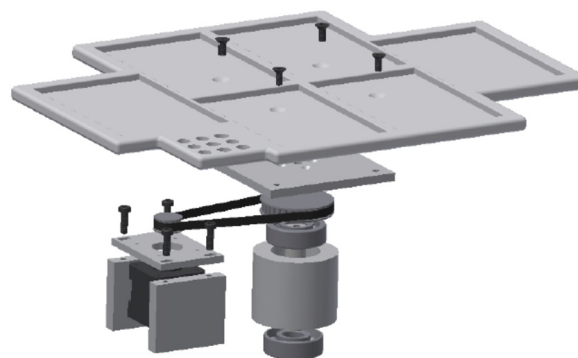
Jermenici sta povezani preko jermena, ki je pritrjen na voziček, tako da ploščica stisne jermen ob voziček. V voziček, ki povezuje osi X in Y , so vstavljeni štirje linearni ležaji za gibanje robota po X osi in štirje za gibanje po Y osi. Os Y je zaključena podobno kot os X , le da je zaradi pomanjkanja prostora na pasivnem segmentu kroglični ležaj vstavljen v jermenico in je osovina fiksirana. Poleg vodil, oba zaključka na Y osi povezujejo še štirje aluminijasti kotni profili, ki skrbijo za večjo togost konstrukcije. Za razliko od osi X in Y je pogon osi Z zasnovan tako, da je jermen vpet v oba zaključka osi Z , v pasivnem zaključku osi Y pa jermen objame jermenico, kot prikazuje slika 3. Motor Z osi je pritrjen na pasivni zaključek Y [2].

Doseg kartezičnega manipulatorja na sliki 4 je v smeri X 266 mm, v smeri Y 163 mm in v smeri Z 98 mm, kar pa ne zadošča našemu pogoju, da bi bil robot zmožen obdelovati šest mikrotitrskih plošč. Zaradi zahteve po kompaktnosti robota smo se odločili mehanizem dopolniti z dodatno rotacijsko mizo, ki zavzame relativno malo prostora. Jermenica z 12 zobmi, ki je pritrjena na gred motorja, je preko jermena

povezana z jermenico s 36 zobmi, ki je nameščena na rotacijsko mizo. S tem zagotovimo prestavno razmerje 1:3 in potrojimo resolucijo vrtenja rotacijske mize [3].



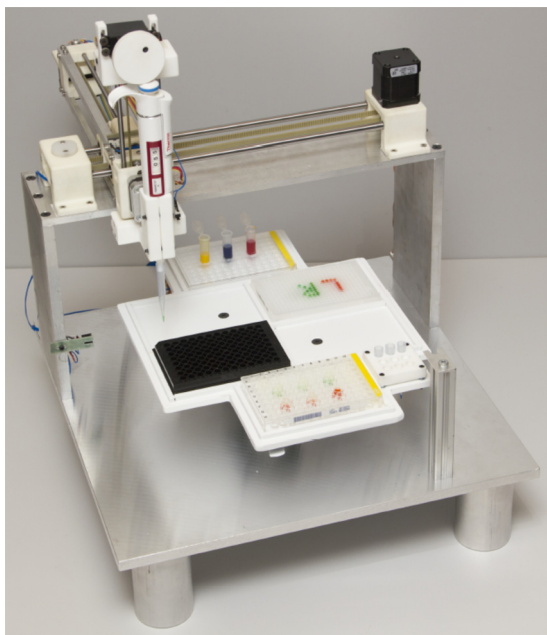
Slika 4: Kartezični manipulator.



Slika 5: Pogon rotacijske mize.

4 Končni robotski mehanizem

S pomočjo 3D tiskanja smo dali izdelati vse zaključke in sklepe robota, pri čemer je bila resolucija tiskanja nastavljena na 0,1 mm. Zaradi premajhne natančnosti tiskanja so vse izvrtine za vodila in linearne ležaje izvrtane s pomočjo precizijskega koordinatnega vrtalnega stroja. S tem smo se izognili morebitnim nesoosnostim vodil in nekotnostim med posameznimi osmi naprave, katere bi se pri sestavi in delovanju pokazale kot nepremostljiv problem. Dosežena je bila toleranca izvrtin od -0,01 mm do -0,02 mm od nazivnih mer in popolna gladkost obdelave [2].



Slika 6: Končni robotski mehanizem.

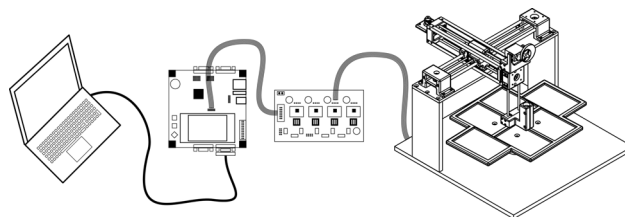
Ko smo imeli vse dele robota pravilno obdelane, smo lahko sestavili končni robotski mehanizem, ki je prikazan na sliki 6. Mehanizem je sestavljen iz manipulatorja, ki je pritrjen na aluminijast most, in rotacijske mize, s katero smo brez povečanja prostora povečali delovno področje. Ob vsakem zagonu je potrebno manipulator postaviti v začetno (referenčno) lego, zato smo na konec vsake osi kartezičnega manipulatorja namestili mehansko mikro stikalo. Na vrh manipulatorja smo pritrjili nastavek za pipeto, ki jo aktiviramo s pomočjo servo motorja.

5 Krmilnik

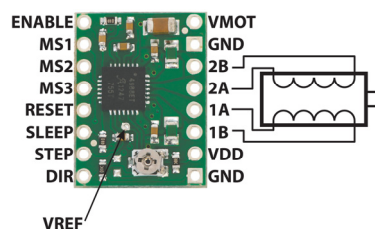
Celoten sistem, ki je predstavljen na sliki 7, lahko razdelimo na štiri dele: osebni računalnik, mikrokrmilnik, napajalno vezje in robotski mehanizem. Osebni računalnik in mikrokrmilnik komunicirata preko RS-232 komunikacije. Gre za asinhrono serijsko povezavo med dvema napravama. Program, ki teče na mikrokrmilniku, najprej poskrbi za obdelavo podatkov, ki mu jih pošlje osebni računalnik, zatem pa ta ukaz izvrši.

Na napajalnem vezju so nameščeni štirje moduli, ki so povezani z GPIO izhodnimi linijami mikrokrmilnika. Ta logične ukaze (0 V

ali 3,3 V) pošilja na krmilni modul, ki glede na vhodne podatke motor zavrti za določen kot.



Slika 7: Celoten sistem.



Slika 8: Modul za krmiljenje bipolarnega koračnega motorja.

Krmilni modul s čipom A4988 na sliki 8 nam omogoča krmiljenje bipolarnih koračnih motorjev do 2 A izhodnega toka. Z njim lahko enostavno nastavljamo ločljivost koraka motorja, smer vrtenja, hitrost vrtenja in tok [5].

6 Pozicijsko vodenje robotskega mehanizma

Za avtomatsko pipetiranje je bil razvit algoritem za pozicijsko vodenje, pri katerem osebni računalnik mikrokrmilniku pošilja koordinate točk, kamor naj se premakne vrh robota. Mikrokrmilnik glede na trenutno lego robotskega mehanizma izračuna potrebne parametre za premik v zeleno točko.

Hitrost vrtenja koračnega motorja in posledično hitrost pomika robotskega mehanizma sta odvisni od frekvence signala, ki ga mikrokrmilnik pošilja na pin STEP modula. Vsakokrat, ko preide signal iz nizkega na visok nivo, motor naredi en korak. Ko želimo motor vrteti z določeno hitrostjo, je potrebno predhodno izračunati zakasnitev med koraki. To izračunamo z enačbo

$$p = \frac{F}{v}, \quad (7)$$

kjer F označuje frekvenco časovnika, ki je v našem primeru 100 kHz, v pa predstavlja hitrost, ki je tu izražena kot zeleno število korakov, ki jih motor naredi v eni sekundi. Če želimo, da motor enakomerno pospešeno koraka,

$$v_i = (v_{i-1}^2 + 2aS)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

moramo izračunati zakasnitev med koraki za vsak korak in sicer s pomočjo enačbe (8), v katero vstavimo izraz (7). V enačbi (9) a ponazarja pospešek, S pa prepotovano pot. Z uporabo Taylorjeve vrste lahko izraz aproksimiramo in tako dobimo:

$$p_i = p_{i-1} \left(1 - p_{i-1}^2 \cdot \frac{a}{F^2} \right). \quad (9)$$

Dobljeni izraz nam omogoča hitro računanje zakasnitev za naslednji korak.

Servo motor, ki služi za proženje pipete, premikamo tako, da nanj pošiljamo zaporedje pravokotnih pulzov s periodo 20 ms in amplitudo 3-5 V. Dolžina pulza določa kot zasuka motorja in mora znašati med 0,9 ms in 2,1 ms, kar predstavlja obe skrajni legi motorja.

7 Zaključek

Cilj je bil izdelati enostaven in poceni robotski mehanizem, ki bi ga lahko uporabljali za avtomatizacijo pipetiranja. Potrebno je bilo skonstruirati in sestaviti kartezični manipulator in zanj izdelati nosilno konstrukcijo. Manipulatorju smo dodali rotacijsko stopnjo,

tako da smo na osnovno ploščo namestili rotacijsko mizo. Za natančno odmerjanje tekočine smo uporabili ročno avtomatsko pipeto, katero smo namestili na vrh triosnega manipulatorja.

Med izdelavo so se pokazale tudi nekatere pomanjkljivosti. Ena izmed glavnih slabosti je prevelika podajnost vseh osi manipulatorja. Poleg tega težavo predstavlja tudi samodejno premikanje osi Z ob izklopu koračnega motorja, saj je pridržalni moment motorja premajhen. To bi lahko bilo mogoče preprečiti z zamenjavo jermena z navojnim vretenom.

8 Literatura

- [1] C.Scott, Robots in the Laboratory, 2013
- [2] R. Hribar, Razvoj in izdelava robota za pipetiranje s tremi translacijskimi stopnjami, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, Ljubljana 2013.
- [3] R.Simcic, Vodenje robota za pipetiranje, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, Ljubljana 2014.
- [4] Nanotec, ST4209- High Resolution Stepper Motor-Nema 17.
- [5] A4988 Stepper Motor Driver Carrier Data Sheet
- [6] M. Hren, Robot za pipetiranje, Osnutek funkcionalnih zahtev, Ljubljana 2012.
- [7] D. Štritof, Mikrokrmilniški učni sistem za upravljanje koračnih motorjev, 2001.
- [8] J. Lenarčič, T. Bajd Robotski mehanizmi, Založba fakultete za elektrotehniko, Ljubljana 2013.
- [9] S. Lavrič, Krmiljenje koračnih motorjev v teoriji in praksi, Svet elektronike št. 70, 2000.
- [10] Pololu Corporation, A4988 Stepper Motor Driver Carrier.
- [11] M. Barr, Introduction to Pulse Width Modulation (PWM).