

# Avtomatizacija montaže elektronskih vezij v ohišja

Peter Čepon, Roman Kamnik, Tadej Bajd

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

Laboratorij za robotiko in biomedicinsko tehniko

Tržaška 25, 1000 Ljubljana

cepo@email.si, roman.kamnik@robo.fe.uni-lj.si, tadej.bajd@robo.fe.uni-lj.si

*Automatic assembly of electronic circuits into housings*

## **Abstract**

*In the paper a feasibility study for the robotized assembly of the electronic circuit into housing is presented. The study investigated allowable position displacements and the interaction forces during screw insertion, screwing and screw tightening. In the study, the industrial Cartesian robot manipulator, automatic screwdriver, robot force wrist sensor, and the optical system for kinematics measurements were employed. Several measurement trials were accomplished examining assembly with different initial displacements. The results show that the automatic assembly is feasible. Moreover, on the basis of the acquired data the performance of the needed robotic and sensory systems are determined.*

## **1. Uvod**

Sodobna proizvodnja tiskanih vezij temelji na avtomatiziranih linijah za izdelavo elektronskih vezij. Na avtomatiziranih linijah se vrši avtomatska montaža elektronskih komponent, spajkanje ter nadzor kvalitete. Sledita fazi preizkušanja ter montaža vezij v ohišja. Navkljub skoraj popolnoma avtomatizirani proizvodnji, se montaža elektronskih vezij v ohišja še vedno opravlja ročno, kar predstavlja ozko grlo v proizvodnji elektronskih sistemov. Zato je cilj predstavljenega projekta odprava ozkega grla v proizvodnji elektronskih sistemov z uvedbo avtomatske montaže elektronskih vezij v ohišja. V okviru projekta je bila zato opravljena študija izvedljivosti avtomatizirane montaže elektronskega vezja merilnika gledanosti

televizijskih kanalov v ohišje. Študija je obsegala analizo gibanja manipulatorja, ki ima v zapestju pritrjen vijačnik, ter analizo sil in momentov interakcije pri vijačenju pri različnih pogojih vstavljanja in različnih hitrostih vijačenja. Sile in momenti pri vijačenju so bili izmerjeni s pomočjo šestdimenzionalnega merilnika sil in momentov JR3, ki je bil nameščen v zapestje kartezičnega robotskega manipulatorja. Trajektorije gibanja vijačnika in elektronskega vezja so bile izmerjene s pomočjo optičnega merilnega sistema OPTOTRAK, ki je namenjen brezkontaktnemu merjenju položajev merilnih markerjev pritrjenih na merilne objekte. Pridobljeni rezultati določajo obremenitve manipulatorja med gibanjem ter vijačenjem vijakov. Na podlagi izmerjene obremenitve je tako moč

izbrati robotski manipulator primeren za avtomatsko montažo elektronskih vezij. Merilni rezultati določajo tudi meje največjega položajnega odstopanja centra vijaka od centra luknje, pri katerem je še možno uspešno vijačenje vijaka. Pridobljene informacije določajo zahteve točnosti za senzorni sistem zaznavanja položaja lukenj. Izmerjeni signali sil in momentov interakcije pri neuspešnih poskusih vijačenja omogočajo identifikacijo ugotovitve napake. Informacija o obliki in frekvenčni vsebini signala sile določa vrsto nepravilne situacije vijačenja.

## 2. Opis sistema za avtomatsko vijačenje

Pri izvedbi študije je bil uporabljen kartezični robotski manipulator JR500 japonskega proizvajalca JANOME, katerega delovni prostor v horizontalnih x in y smereh znaša 300 mm in v vertikalni z smeri 100 mm. Hitrosti premikanja robotskega manipulatorja znašajo v x in y smeri od 100 do 500 mm/sec in v z smeri od 10 do 200 mm/sec. Operacija vijačenja je opravljena s pomočjo električnega vijačnika proizvajalca YEASU, nameščenega v zadnji segment robotskega kartezičnega manipulatorja. Vijačnik omogoča spreminjanje zateznega momenta in hitrosti vijačenja. Vpenjanje vijakov v vijačnik z odjemnega mesta podajalnika je izvedeno s pomočjo podtlaka. Med zapestje robotskega kartezičnega manipulatorja in vijačnikom je nameščen šestdimenzionalni merilnik sil in momentov JR3, ki na izhodu daje napetosti v področju  $\pm 10V$ . Izmerjene analogne vrednosti je potrebno pretvoriti v sile in momente s pomočjo pretvorbenih koeficientov. Z merilnikom sile JR3 so bile izmerjene sile in momenti interakcije vijačenja med vijakom in luknjo. Za merjenje gibanja in določanje položajnih napak

med centrom vijaka in centrom luknje med vijačenjem je bil uporabljen optični sistem za brezkontaktno merjenje položajev markerjev OPTOTRAK. Merilni sistem OPTOTRAK je optična naprava, ki s pomočjo več linijskih kamer določa položaj markerjev v prostoru. Kamere zaznavajo v področju infrardeče svetlobe merilne markerje, ki so infrardeče svetilne diode. Sistem meri koordinate merilnega markerja z natančnostjo do 0.3 mm natančno. Položaj markerjev je merjen glede na kartezični koordinatni sistem, katerega položaj uporabnik definira s pomočjo posebne kalibracijske plošče z osmimi markerji in kalibracijsko proceduro. Pri vijačenju elektronskih vezij v ohišje so bili uporabljeni vijaki velikosti M3, dolžine 5 mm s korakom navoja 0.5 mm. Na sliki 1 je predstavljen sistem za avtomatsko vijačenje. Viden je kartezični manipulator, vijačnik, senzor sile v zapestju, ter elektronsko vezje pripravljeno za vijačenje v ohišje.



Slika 1: Sistem za avtomatsko vijačenje elektronskih vezij v ohišja

Na sliki 2 je prikazan položaj pritrditve senzorja v zapestje manipulatorja med zadnji segment in vijačnik, ter namestitvev markerjev za brezkontaktno merjenje na vrhu manipulatorja in elektronskega vezja.



Slika 2: Merilnik sil ter merilni markerji za zajemanje sil in gibanja med vijačenjem elektronskega vezja v ohišje

### 3. Protokol meritev in obdelava podatkov

S sistemom predstavljenim v razdelku 2, je bila opravljena serija testnih avtomatskih vijačenj elektronskega vezja merilnika TV gledanosti v ohišje. Opravljenih je bilo večje število poskusov vijačenja pri različnih pogojih. Protokol merilnega poskusa je vseboval prijem vijaka v vijačnik s pomočjo podtlaka, horizontalen prenos vijaka nad luknjo, vertikalno gibanje navzdol in hkratno vijačenje z določenim številom vrtljajev. Ob koncu vijačenja je sledila pritegnitev vijaka z določenim zateznim momentom. Med vijačenjem so bile izmerjene sile in momenti med vijačnikom in elektronskim vezjem ter njihovi trajektoriji gibanja.

Položaji merilnih markerjev nameščeni na vijačniku in elektronskem vezju, so bili zajeti

s pomočjo optičnega sistema OPTOTRAK, ki nam je hkrati služil tudi za zajem izhodnih napetosti merilnika sil in momentov. Čas zajemanja vsakega merilnega teka je trajal 12 sekund pri frekvenci vzorčenja 50 Hz.

Sile in momenti, ki so bili izmerjeni glede na koordinatni sistem merilnika sil in momentov v njegovem centru, so bili s pomočjo transformacijskih enačb (1), (2) in (3) preračunani na vrh vijačnika. Na ta način so bile določene sile in momenti, ki so delovali na vijak med samim vijačenjem. Pri preračunu sil in momentov je bila predpostavljena toga zveza med vrhom vijačnika in merilnikom sil. Vektorske transformacijske enačbe za preračun sil na vrh vijačnika imajo naslednjo obliko:

$$M_p = R \times F_m \quad (1)$$

$$M_v = M_m - R \times F_m = M_m - M_p \quad (2)$$

$$F_v = F_m \quad (3)$$

kjer so :

- $R = (r_x, r_y, r_z)$ ...vektor, ki kaže iz koordinatnega sistema merilnika sil v njegovem centru do vrha vijačnika
- $F_m = (f_x, f_y, f_z)$ ...izmerjeni vektor sil v koordinatnem sistemu merilnika sil
- $F_v = (f_x, f_y, f_z)$ ...vektor sile interakcije na vrhu vijačnika
- $M_m = (m_x, m_y, m_z)$ ...izmerjeni vektor momentov v koordinatnem sistemu merilnika
- $M_v = (m_x, m_y, m_z)$ ...vektor momentov na vrhu vijačnika

Da je bilo doseženo ujemanje orientacije izmerjenih sil in momentov so bile sile in

momenti s pomočjo enačb (4) in (5) transformirani v koordinatni sistem merilnega sistema OPTOTRAK. Preslikava orientacije vektorjev je bila opravljena s pomočjo homogene rotacijske matrike  ${}^mR_o$ , ki preslika orientacijo koordinatnega sistema merilnika sil v orientacijo koordinatnega sistema merilnega sistema OPTOTRAK. Preslikava je opisana z enačbama:

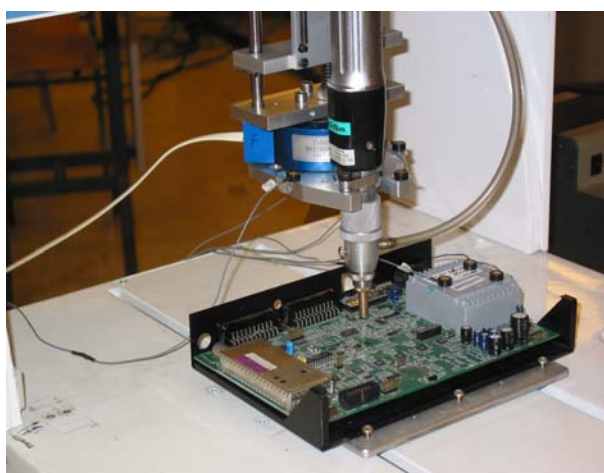
$$F_o = {}^mR_o * F_m \quad (4)$$

$$M_o = {}^mR_o * M_m \quad (5)$$

kjer so:

- $F_o = (f_x, f_y, f_z)$ ...vektor sil izražen v koordinatnem sistemu optičnega merilnega sistema
- $M_o = (m_x, m_y, m_z)$ ...vektor momentov izražen v koordinatnem sistemu optičnega merilnega sistema

Položaj vrha vijaka med gibanjem je bil določen posredno preko meritve položaja treh merilnih markerjev pritrjenih na vpenjalno ploščo vijahnika. Če je znan relativni premik med vrhom in markerji, ki pa je bil določen pred samo meritvijo, je moč iz znanega položaja markerjev izračunati tudi položaj vrha vijaka.



Slika 3: Prikaz položaja merilnih markerjev nameščenih na vijahniku in elektronskem vezju

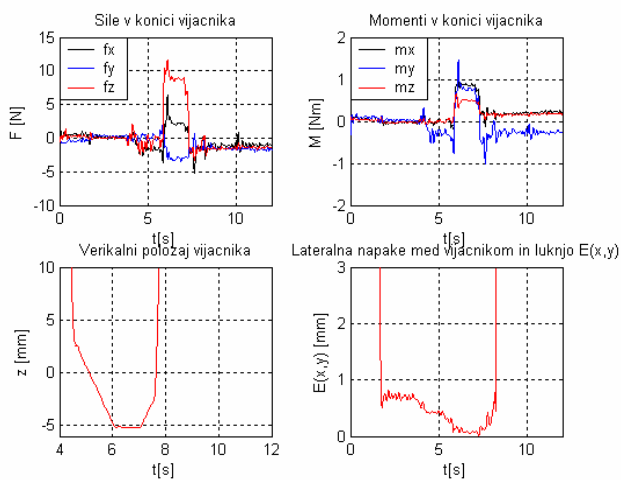
Podobno so drugi trije markerji, nameščeni na elektronskem vezju kot to prikazuje slika 3, služili za določitev centra luknje. Iz teh podatkov je bila določena lateralna napaka med centrom luknje in centrom vijaka  $E(x,y)$  kot:

$$E(x, y) = \sqrt{(x_{vijaka} - x_{luknje})^2 + (y_{vijaka} - y_{luknje})^2} \quad (6)$$

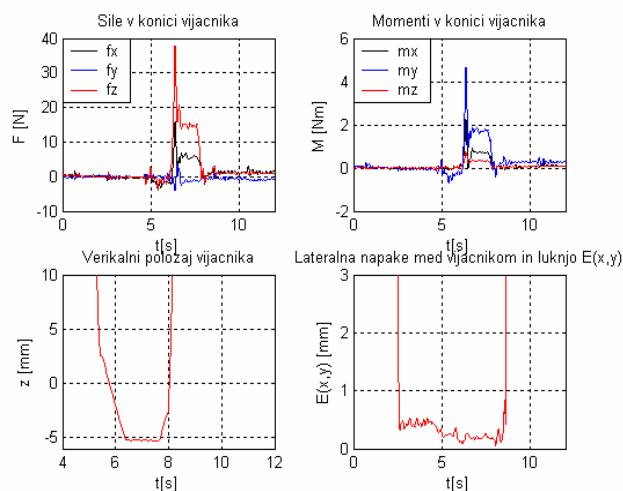
#### 4. Rezultati

Rezultati pridobljeni s pomočjo meritev predstavljajo sile in momente interakcije med vijakom in luknjo za vijachenje pri različnih pogojih. V grafih so posebej predstavljene sile, momenti, vertikalni položaj vrha vijaka glede na luknjo ter lateralna napaka med centrom luknje in centrom vijaka glede na enačbo (6).

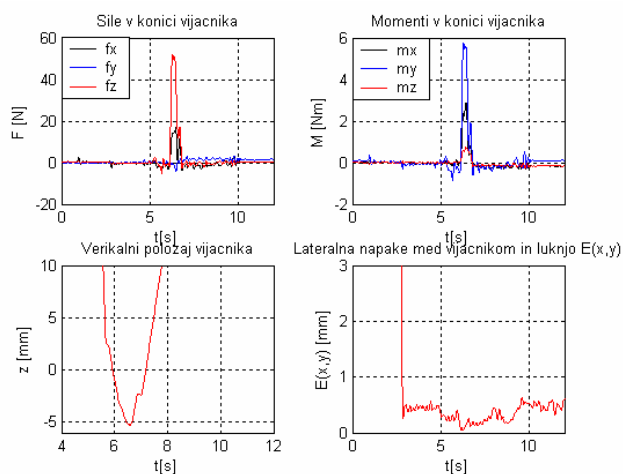
Rezultati na slikah 4, 5 in 6 predstavljajo primere, ko je bila lateralna napaka minimalna  $E_{min}(x,y)$  medtem, ko so bile spreminjane hitrosti vijachenj. Z primerjavo slik 4, 5 in 6 je mogoče razbrati, da se z višanjem hitrosti vrtljajev vijahnika sile interakcije povečujejo predvsem v vertikalni smeri z. Vsak vijak ima namreč s korakom navoja določeno hitrost vijachenja. Z odstopanjem od idealne hitrosti se povečuje tudi sila interakcije. Grafi predstavljeni na slikah 4 in 7 predstavljajo primera pri enaki hitrosti vrtljajev vijahnika ter minimalnem odstopanju  $E_{min}(x,y)$  (slika 4) in maksimalnem odstopanju  $E_{max}(x,y)$  (slika 7). Maksimalno odstopanje je bilo določeno s postopnim večanjem od minimalne lateralne napake po korakih 0.5 mm vse do neuspešnega poskusa. Iz rezultatov je razvidno da se vertikalna sila interakcije poveča in doseže vrednost 50 N za primer vijachenja pri odkliku vijaka od luknje 2 mm (glej sliko 7), medtem ko moment v y smeri dosega vrednost do 5 Nm, kar nakazuje na podajno zvižanje orodja v y smeri.



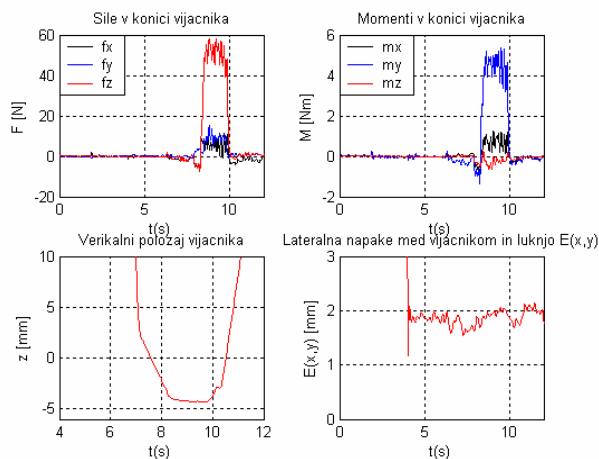
Slika 4: Vijačenje pri minimalnem odstopanju in hitrosti vijačenja 600 vrt/min



Slika 5: Vijačenje pri minimalnem odstopanju in hitrosti vijačenja 1000 vrt/min



Slika 6: Vijačenje pri minimalnem odstopanju in hitrosti vijačenja 1600 vrt/min



Slika 7: Vijačenje pri maksimalnem odstopanju in hitrosti vijačenja 600 vrt/min

## 5. Zaključek

V članku je predstavljena eksperimentalna študija avtomatskega vijačenja elektronskih vezij v ohišja s pomočjo robotskega sistema. V študiji so preučene sile in momenti interakcije med vijakom in luknjo (pri različnih pogojih vstavljanja vijakov).

Rezultati kažejo na možnost avtomatizacije vijačenja elektronskih vezij v ohišja, s podobnim pristopom kot je bil uporabljen pri eksperimentih. Na podlagi pridobljenih merilnih rezultatov so določene maksimalne obremenitve manipulatorja (podatek omogoča pravilno izbiro manipulatorja), optimalna hitrost vijačenja in

vertikalnega pomika navzdol, ki povzroča najmanjše obremenitve, največje dovoljeno lateralno odstopanje med centrom luknje in centrom vijaka, da je še doseženo uspešno vijačenje (podatek določa zahtevano natančnost senzornega sistema, s katerim bodo določane koordinate luknje) ter potek in frekvenčna vsebina signalov obremenitev pri neuspešnih poskusih vijačenja, ki lahko služijo za detekcijo in identifikacijo situacij med vijačenjem.

Rezultati študije bodo uporabljeni pri nadaljnjem razvoju robotizirane celice za avtomatsko vijačenje elektronskih vezij merilnika TV gledanosti v ohišja. Inteligentno vijačenje v robotizirani celici bo zasnovano poleg zajemanja sil interakcije, kot je to bilo predstavljeno v pričujočem delu, še na sistemu umetnega vida, ki bo služil za detekcijo položaja lukenj in analizo situacije pred vijačenjem.

## Literatura

- [1] R. Kamnik, G. Rodič, M. Mihelj, T. Bajd, Automation of car battery lid assembly operation, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, pp. 435-446, 2001.
- [2] D.E. Whitney, Part mating in assembly, *Handbook of industrial robotics*, New York: Wiley, pp. 1084-1116, 1985.
- [3] H. Zohoor, M. Shahinpoor, Dynamic analysis of peg-in-hole insertion for manufacturing automation, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 99-108, 1991.
- [4] S. Lee, H.H. Asada, A perturbation/correlation method for force guided robot assembly, *IEEE Transactions on Robot and Automation*, Vol. 15, No. 4, pp. 764-773, 1999.
- [5] R Maleki, *Flexible manufacturing system, the technology and management*, Englewood Cliffs, NJ: Prantice-Hall, 1991.
- [6] Pettinaro GC, Behavior-based peg-in-hole, *Robotica*, Vol. 17, No. 2, pp. 189-201, 1999.