

PhD értekezés tézisei

FELSŐ GÁBOR

**Mikromanipulációs robotrendszerek modellezése és vizuális
alapú pozíciómérési eljárásai**

Témavezető:

Dr. Vajta László

Prof. Dr. Arató Péter

**Budapesti Műszaki Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék**

Budapest

2007

BEVEZETÉS

A huszadik század második felében bekövetkezett műszaki-technikai fejlődés jelentős mértékben alakította át az ipari technológiák nagy részét, különösen igaz ez az automatizált gyártórendszerek területére. A mikroelektronika megjelenése, majd ugrásszerű fejlődése (jelfeldolgozási sebesség, tárolókapacitás, kommunikáció) nagymértékben hozzájárult az automatizálható termelőeszközök továbbfejlesztéséhez és a robotok, robotrendszerek elterjedéséhez. Ezt a folyamatot tovább gyorsította a robotizált gyártósorokkal elérhető termelési költségcsökkentés, nagyobb pontosság, az egyes munkafázisokra fordított idő csökkenése és ennél fogva a gyártórendszerek hatékonyabb működése.

A kilencvenes évektől kezdődően az orvosbiológiai technika, illetve a mikroelektronikai technológia fejlődésének eredményeként egyre fokozottabb igény merült fel olyan robotizált gyártó-, illetve beavatkozórendszerek iránt, amelyek képesek a milli- és a mikrométeres tartományban is pontos, reprodukálható műveletek elvégzésére. A robotika, a mikroelektronika és az orvosbiológiai technika határterületén körülbelül tíz éve kezdett kibontakozni az a tudományos kutatási és ipari alkalmazási terület, amelyet manapság összefoglalóan mikrorobotikának neveznek.

A Budapesti Műszaki Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszéke és a Karlsruhe-i Egyetem Folyamatszabályozási, Robotikai és Automatizálási Intézete (IPR) közötti évtizedek óta tartó kooperációs kapcsolat keretében kezdődött meg az a nagyszabású kutatási tevékenység, amelyben egy mikromanipulációs munkaállomás felépítése, modellezése, paramétereinek mérése, illetve a robotrendszer irányításához szükséges algoritmusok kidolgozása folyik. A kooperáció keretében piezoelektromos mikrorobot került megépítésre, amelynek részegységeit Karlsruhe-ban készítettük el, majd a berendezést az Irányítástechnika és Informatika Tanszéken fejeztük be és helyeztük üzembe. A projekten belül a magyar fél elsősorban a robotrendszer irányítására és mérés technikájára összpontosít, a robot pozíciójának mikrométeres tartományban való szabályozása érdekében.

Az értekezés első részében a mikrorendszer technológia és a mikrorobotika egyelőre kevésbé ismert interdiszciplináris témájának irodalmát és fogalomrendszerét tekintem át. A szakirodalom alapján az alapvető fogalmakat definiálom és rövid áttekintést nyújtok a mikrorobotikában alkalmazott speciális eljárásokról. Kitérek a vezető ipari országokban folyó kutatásokra, és ezen keresztül a tudományterület fontosságának bemutatására.

Az értekezés következő részében először a piezorobotok működési elvét és rendszertechnikáját ismertetem. Ezt követően részletesen tárgyalom a mikrorobotikai projekt keretében a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéken épített mikrorobot, mint univerzális prototípus felépítését és specifikációját. Részletesen kerül ismertetésre a mikrorobot – szerző által kidolgozott – dinamikai modellje, melynek segítségével a robot szabályozásához elengedhetetlenül fontos működési tulajdonságok leírhatók. Ebben a részben térek ki a robot vezérlőrendszerére is.

Egy olyan bonyolultan modellezhető szabályozási rendszer, mint az ismertetett mikrorobot, csak szenzorcsatolt eljárásokkal irányítható kielégítő pontossággal. A harmadik részt azon navigációs szenzorrendszer ismertetésének szenteltem, amely

segítségével a robot mozgása irányítható. Ennek keretében egy kamerás hely-, illetve helyzetfelismerő rendszerről van szó. Analizálom a mikrométeres akciótartományt vizsgáló mikroszkóp speciális érzékelési problematikáját és az adatfeldolgozó számítógépes környezetet is.

Az utolsó részben összefoglalom az eddig elért eredményeket és kitérek a munka továbbfejlesztési lehetőségeire.

A KUTATÁSI FELADAT CÉLKITŰZÉSEI

A mikrorobotika területén folyó kutatások közül az értekezés a nagypontosságú műveletvégzésre alkalmas mobil robotrendszerek megvalósíthatósági kérdéseivel foglalkozik.

Ennek érdekében a következő részfeladatok megoldását tűztem ki célul:

1. általános felépítésű, többcélú mikrorobotikai munkacella rendszertechnikai felépítése;
2. piezoelektromos elvű mikrorobot rendszertechnikai és szabályozástechnikai modellezése;
3. mikrorobotikai munkacella vizuális alapú globális és manipulátorának lokális pozíciómeghatározása.

Mikrorobotikai munkacella felépítése

A választott kutatási célok meghatározását az teszi szükségessé, hogy jelenleg nem áll rendelkezésre a mikrorobotika általános rendszertechnikai megközelítése, amely a hagyományos robotikától eltérő mikrorendszertechnikai jellemzőket is figyelembe venné. Ezért szükségessé vált, hogy a mikrorendszereken belül definiáljuk a széles tartományban hely- és helyzetváltoztatásra, valamint komplex munkavégzésre képes mobil rendszerek főbb feladatait.

A további mikrorobotikai kutatások feltétele, hogy definiáljunk és létrehozzunk egy olyan univerzális környezetet, amelyben a mobil mikrorobotikai alkalmazások többsége megvalósítható. Az ilyen elven felépülő mikrorobotikai munkacella alkalmas arra, hogy általános és specifikus mikrorendszerek rendszertechnikai tulajdonságai vizsgálhatók és validálhatók legyenek. A munkacella további előnye, hogy számos szenzor- és szabályozástechnikai megoldás kutatását, implementálását lehetővé és összehasonlíthatóvá teszi.

Piezoelektromos mikrorobotok rendszertechnikai vizsgálata

A munkacellában elhelyezkedő mobil mikrorobotok feladatuk ellátáshoz térben viszonylag széles tartományban működnek, mégis rendkívül nagy pontosság szükséges manipulációs feladataik ellátásához. A robotok szabályozhatóságának vizsgálata megköveteli mozgásuk analízisét. Tekintettel arra, hogy jelenleg nem létezik általánosan elfogadott mikrorobotikai prototípus, vagy modellrendszer, ezért a mechanikai jellemzők vizsgálatát egy piezoelektromos vezérlésű mikroroboton végeztem el. Célkitűzésem az volt, hogy a mikrorobotikai rendszerek egy tipikus

kutatási berendezésén mechanikai dinamikai vizsgálatokat végeztek és modellt alkossak a mikromanipulációs munkacellában alkalmazható szenzortechnika érdekében.

Mikromanipulációs munkacella szenzorrendszerei

Célkitűzésem alapján módszert adtam mikrorobotikai környezetben alkalmazható robotszenzortechnikai megoldásokra. A mikrorobotikai munkacellák szenzorainak legalapvetőbb feladata az, hogy a mikrorobot(ok) és beavatkozó szerveik fizikai jellemzőiről (pozíció, orientáció, erő, nyomaték, sebesség) információt szolgáltatson a jelfeldolgozó egység számára. Jelen értekezésben a mikrorobotikai munkacellák pozíció- és orientációmeghatározására alkalmas vizuális alapú szenzorrendszerre teszek javaslatot.

A mikrorendszertechnika egyik jelentős problémája, hogy technológiai okokból következően bármely egyedi, megvalósított rendszer számos paramétere jelentősen különbözik egy ideális paraméterű modelltől, a paraméterek meghatározása pedig nehézkes. Ehhez járulnak hozzá a makrokörnyezet bizonytalanságai, amelyek összessége végül egy sokparaméteres, környezeti hatások által jelentősen befolyásolt nemlineáris rendszert eredményez. Emiatt a robotrendszer pozíció és orientáció szabályozására a pontos matematikai modellen alapuló, hagyományos szabályozási eljárások helyett fuzzy- és neurális alapú szabályozást javaslok, konkrét megvalósítási lehetőséget azonban nem részletezek.

KUTATÁSI MÓDSZER, KÍSÉRLETEK, VIZSGÁLATOK

A kutatás során áttekintettem és tanulmányoztam a szakirodalom alapján a mikrorendszer technológia témakörében jelenleg folyó legfontosabb kutatásokat. Ennek keretében külön foglalkoztam a nemzetközi mikrorobotikai tudományos és ipari kutatás-fejlesztési irányokkal és alkalmazási példákkal.

A Budapesti Műszaki Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszéke adott otthont annak a nagyszabású kutatómunkának, amelynek keretében megtervezésre és megépítésre került egy mikromanipulációs munkállomás. Ugyanitt folyt a szenzorrendszerek tervezése és kialakítása, valamint a képfeldolgozási algoritmusok implementálása és kísérletek elvégzése. A Karlsruhe-i Egyetem Folyamatszabályozási, Robotikai és Automatizálási Intézetében (IPR – Institut für Prozeßrechentechik, Automation und Robotik) végeztem a mikromanipulációs munkacellák tanulmányozását és az irányítási algoritmusok tesztelését.

A kísérletekben mindkét intézetben egy-egy piezoelektromos működésű mikrorobot szolgált vizsgálataink középpontjául, amely rendszert eredetileg a külföldi partner fejlesztette ki. A piezoelektromos meghajtás kiválasztására azért került sor, mert a megoldás lehetővé tette, hogy viszonylag kis ráfordítással nagy pontosságú és kis lépésközű mechanikai rendszert valósíthassunk meg. A piezoelektromos meghajtás továbbá lehetővé tette, hogy a rendszer nem kötöttpályás, hanem mobil kialakítású legyen.

A mikrorobot működési elve a következő: A robot három egyforma, henger alakú, piezoelektromos kerámia lábon áll, amely öt-öt elektródával van ellátva. Négy elektróda az egyes lábak hosszanti tengelyével párhuzamosan a henger alakú láb külső felületén, egy pedig a tengely mentén helyezkedik el. Az elektródákra feszültség kapcsolható (tipikusan 100 V - 300 V tartományban), amellyel a lábak megnyúlása, rövidülése, illetve görbítése végezhető el. A három láb elektródáinak megfelelő vezérlésével a robottest a munkasztalon (üveglap) néhány μm -el elmozdítható, folyamatos vezérlésükkel (tipikusan $U_{pp} = \pm 150 \text{ V}$ fűrészfeszültség rákapcsolásával) pedig max. 5 mm/s sebességgel léptethető. A mikrorobothoz egy kísérleti céllal kialakított manipulátor csatlakozik, amelynek a robottest felőli vége egy fémgömbben végződik. A fémgömböt három, a robottest mozgatásához használt lábbakkal megegyező piezoelektromos beavatkozó szerv mozgatja, amely a gömbhöz mereven rögzített manipulátor elfordulását eredményezi. A robot ennél fogva egy öt szabadságfokú mobil rendszert alkot, amelyből kettő translációs, három pedig rotációs.

A kísérleti céllal kialakított mikrorobot egyes szegmensei független vezérlése érdekében azt egy mikrokontroller alapú multiprocesszoros struktúrájú vezérlőelektronika látja el, amely soros, illetve párhuzamos buszon keresztül kapcsolódik az irányító számítógépekhez. A mikrokontrolleres architektúrában külön mikrokontrollerek végzik a lábak, illetve a manipulátor mozgatását, valamint a központi számítógéppel folytatott kommunikációt. A vezérlőelektronika mikrokontrollerjeinek buszához kapcsolódnak a D/A átalakítók után elhelyezkedő műveleti erősítők, melyek a piezoelektromos lábak elektródáira kapcsolják a vezérlőfeszültséget.

Fontos kiemelni, hogy a kutatómunka kezdeti szakaszában egy, a Karlsruhe-i Egyetem által tapasztalati úton megépített roboton végeztem vizsgálataimat. A mechanikai

modell megalkotásával lehetőség nyílt arra, hogy immár elméleti úton is elvégezhető legyen a tervezőmunka és a modell eredményeinek felhasználásával újabb fizikai prototípus megépítésére legyen mód, amelyhez továbbfejlesztett vezérlő elektronika készült.

A mikrorobotikai vizsgálatok szükségessé teszik a mikrorobot és a külvilág közötti kapcsolat megteremtését. Ezen a ponton válik nélkülözhetlenné egy olyan, általánosan definiálható "külvilág" létrehozása, amely a mikrorobotikai alkalmazások többségében előfordul és általánosan "előállítja" mindazokat az igényeket, amelyek ipari alkalmazás során is felmerülnek. A definiált munkacella a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén megvalósításra került és az összes, a továbbiakban részletezett vizsgálat és mérés a fenti elven kialakított mikromanipulációs munkacellában került elvégzésre.

A mikrorobot vezérlőelektronikájának adott utasítások segítségével kerültek megvalósításra az alapvető mozgások (előre, hátra, stb.), illetve így vezéreltük a manipulátort is. A felépített munkacellában a mikrorobot mozgásának tanulmányozása és a robot, valamint manipulátora pozícionálása megköveteli, hogy nagypontosságú pozíció és orientáció információkkal rendelkezünk a robot és manipulátora pillanatnyi helyzetéről. A mikrorobotikai alkalmazási környezetek sok esetben nem teszik lehetővé, hogy közvetlenül a robotra, illetve manipulátorára szenzorokat helyezünk el. Fel kell hívni azonban a figyelmet arra is, hogy a nagypontosságú mérés abszolút hibájának alacsony szinten tartása érdekében eleve célszerű a pozíciót mérő szenzorokat a munkacellához rögzített rendszerben, nem pedig a mobil egységen elhelyezni. A nagypontosságú manipulációk a legtöbb esetben eleve nem teszik lehetővé, hogy a megmunkáló eszközön kívül egyéb beavatkozás történjen a rendszerbe, így a mérési eljárásokat vizuális, érintésmentes módon kell megoldani. A definiált mikromanipulációs munkacella pozícióérzékelése így vizuális szenzorokra épül.

A mikromanipulációs munkacella egyik legfontosabb feladata a nagypontosságú műveletvégzés. A mikrométeres tartomány vizuális alapú megfigyelése ennél fogva megköveteli a mikroszkópos szenzorok alkalmazását. A mikromanipulációs tartományt a diffúz háttérvilágítás mellett egy párhuzamosan sugárzó fényforrással is megvilágítottuk, amely így a mikrorobot manipulátorát is megvilágítja és árnyékot vetít a tárgyfelületre. A mikroszkópra szerelt kamera pillanatfelvételeket készít a manipulátor pozíciójáról és a képet számítógépre továbbítjuk. A digitalizált képeken képfeldolgozási operátorok segítségével végzett műveletek révén meghatározható a manipulátor egyes, kitüntetett pontjainak pozíciója. Egy másik, a kép defókuszáltságán alapuló mérési módszert is vizsgáltunk, elsősorban a manipulátor orientációjának meghatározása céljából.

A mikrorobot test pozíciómérése érdekében a mikroroboton diódák segítségével aktív megvilágítást helyeztünk el. Alkalmos pozícióból végzett kamerás felvételek képfeldolgozás után alkalmasnak bizonyultak arra, hogy segítségükkel a mikrorobot test pozíciója és orientációja meghatározható legyen. Az eljárások implementálásra kerültek és kísérleti céllal kiválasztott objektumokon végrehajtva megfelelő mérési eredményeket szolgáltatottak.

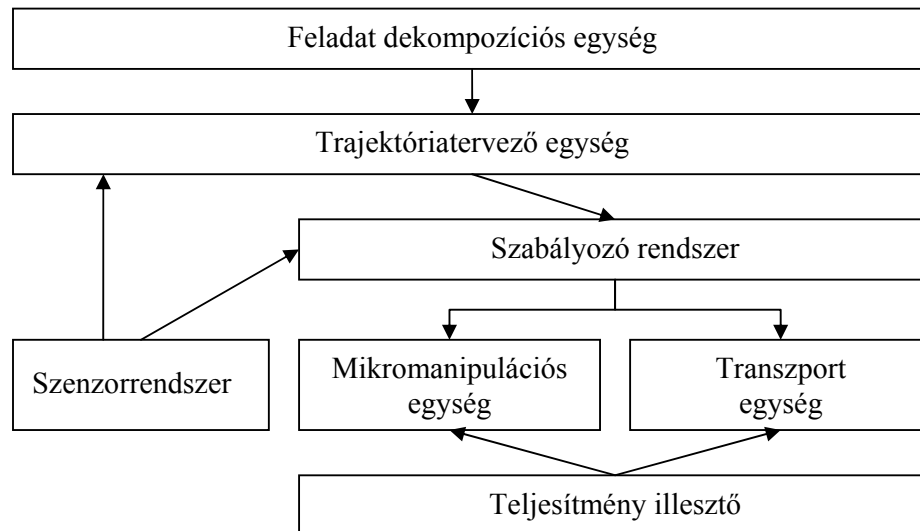
A legjelentősebb probléma a mikrorobot nem determinisztikus mozgása. Habár a robot közelítőleg az előre meghatározott (számított) trajektória mentén mozog, a manipulátor nem a kívánt pozícióba kerül, amennyiben nyílt hurkú szabályozást alkalmazunk. Ennek több oka van. Először, a szabályozó rendszer a globális szenzorrendszerből nyert nem kellően pontos bemeneti adatokra támaszkodik, mivel annak pontossága 0.1 - 1 mm

mindössze. A másik probléma a nem kellően ismert lokális súrlódás a robot lábak és a munkaasztal között. Végül a robotrendszer számtalan bizonytalanságot tartalmaz az alkatrészek összeszerelése és megmunkálása következtében. A legkisebb hiba a lábak pozíciójában és orientációjában a robot elméleti és tényleges viselkedése közötti jelentősebb különbséghez vezethet. Ezért a szenzorrendszernek egy zárt szabályozási körbe kell illeszkednie.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tézis

Kidolgoztam egy mikromanipulációs munkacella rendszertechnikai hierarchiáját. A mikromanipulációk és szállítási feladatok megoldására alkalmas, mikrorobotikai mechanizmusból, szenzorrendszerből és szabályozó rendszerből felépülő mikromanipulációs munkacella rendszertechnikáját az alábbi blokkvázlat írja le.



A feladat dekompozíciós egység a mikromanipulációs munkacellának adott átfogó feladatot bontja le elemi feladatok sorozatára és adja át a trajektóriatervező egységnek, amely által előírt útvonal alapjelként szolgál a szabályozó rendszernek. Az egységes szabályozó rendszer feladata, hogy a változó és csak részlegesen ismert környezetben a szállítási és a mikromanipulációs műveletek előírt trajektória mentén történő végrehajtása érdekében akár a transzport, akár a mikromanipulációs egységet működtesse. A rendszerek kis mérettartománya ugyanis szükségessé teszi, hogy a mikromanipulációs műveletekben mind a transzport, mind a mikromanipulációs egység részt vegyen, ezért a két egység a tervezés és a szabályozás szintjén nem, csak a beavatkozás szintjén választhatók külön. A transzport egység a mikrorobot test, a mikromanipulációs egység a mikromanipulátor mozgatását végzi. A teljesítmény illesztő a műveletvégzéshez szükséges jel- és teljesítményszintet biztosítja. A szenzorrendszer a mikrorobot és manipulátorának pozíció és orientáció adatait szolgáltatja a szabályozó rendszer részére. A munkatérben esetlegesen bekövetkező jelentős változások, illetve a csak korlátozott pontossággal ismert működésű műveletvégző egységek miatt az esetlegesen szabályozási tartományán kívülre kerülő mikrorobotikai rendszer irányíthatósága megköveteli, hogy a trajektóriatervező egység a szenzorrendszerrel kapott adatok alapján szükség szerint újratervezze a megkívánt útvonalat.

A tézisben megfogalmazott eredményekhez a [P1], [P4], [P5] és [P6] saját publikációk kapcsolódnak.

2. Tézis

Modellt dolgoztam ki egy piezoelektromos mikrorobot dinamikai viselkedésének leírására és a modell érvényességét mérésekkel igazoltam. A piezoelektromos meghajtású, diszkrét lépéseket végző mikrorobot mozgása közelítő lineáris rendszermodellel írható le.

- a) Elektrosztatikai és szilárdságtani modell alapján az l hosszúságú, cső alakú piezoelektromos beavatkozóra ható F mechanikai erő és elektródáira kapcsolt U villamos feszültség hatására a végpontjának ξ elhajlását a $\xi = k_F F + k_U U$ összefüggés írja le, ahol k_F és k_U állandók a piezoelektromos beavatkozó geometriájának és anyagállandóinak függvényei:

$$k_F = \frac{4}{3\pi} S_{11}^E \frac{l^3}{R_2^4 - R_1^4}$$

$$k_U = -\frac{8}{3\pi} d_{31} l^2 \frac{R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2}{R_2^4 - R_1^4} \cdot \sin \frac{\Phi}{2}$$

- b) A mikrorobot mozgása egy szakaszosan lineáris, másodrendű taggal jellemezhető. A mikrorobot mozgásegyenlete csillapítatlan esetben

$$\ddot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 [p(t) - k_U U(t)],$$

ahol $x(t)$ a mikrorobot pozíciója, $p(t)$ a piezoelektromos beavatkozó végpontjának pozíciója, $U(t)$ az elektródáira kapcsolt vezérlőfeszültség, m a mikrorobot tömege, k_U és k_F a fenti állandók, valamint $\omega_0^2 = \frac{1}{mk_F}$.

- c) A piezoelektromos beavatkozó periodikus fűrészfeszültség-függvénnyel történő gerjesztése stacionárius állapotban a mikrorobot egyenes vonalú egyenletes és rezgő mozgásának szuperpozícióját eredményezi. A mikrorobot mozgása egy periódusának $x(t)$ pozíció és $v(t)$ sebesség időfüggvényei stacionárius állapotban

$$x_T(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} t - \frac{\mu g}{\omega_0^2 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \sin \omega_0 t \right] \cdot \varepsilon(t), \quad \text{ha } 0 \leq t < T/2;$$

$$x_T(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} t - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \left(\frac{\sin \omega_0 (t-T)}{\sin \frac{\omega_0 T}{2}} + 2 \right) \right] \cdot \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right), \quad \text{ha } T/2 < t \leq T;$$

$$v_T(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} - \frac{\mu g}{\omega_0 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \cos \omega_0 t \right] \cdot \varepsilon(t), \quad \text{ha } 0 \leq t < T/2;$$

$$v_T(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} - \frac{\mu g \cos \omega_0 (t-T)}{\omega_0 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \right] \cdot \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right), \quad \text{ha } T/2 < t \leq T,$$

ahol U_0 a fűrészfeszültség amplitúdója, T a periódusideje, μ a piezolábak és a munkaasztal közötti makroszkopikusan értelmezett súrlódási együttható, g a nehézségi gyorsulás.

d) Stacionárius állapotban a mikrorobot átlagsebessége $\bar{v} = \frac{2}{T} \left(U_0 k_U - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \right)$,

$$\text{lépéshossza } L = 2 \left(U_0 k_U - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \right).$$

e) A modell szinguláris helyeinek vizsgálata alapján a piezoelektromos mikrorobot működési tartományát az alábbi összefüggés jelöli ki:

$$\mu \leq \mu_{\max} = \frac{U_0 k_U}{mg k_F}.$$

A tézisben megfogalmazott eredményekhez a [P2] és [P7] saját publikációk kapcsolódnak.

3. Tézis

Matematikai modellt alkottam a mikrorobot pozíció és orientáció változásának leírására és paraméterbecslő eljárást dolgoztam ki mért marker pozíciókból a mikrorobot pozíciójának és orientációjának meghatározására. Egy három szabadságfokkal rendelkező, diszkrét elmozdulásokat végző mobil mikrorobot-rendszer pozícióját és orientációját az elemi lépéseit leíró operátorok láncolása állítja elő. A robot pozíciója és orientációja a roboton elhelyezett markerek kontaktusmentes méréséből ortogonális projekción alapuló, alább definiált paraméterbecslő eljárással határozható meg.

a) A diszkrét lépéseket végző mikrorobot i . lépés utáni pozícióját és orientációját leíró \mathbf{M}_i mátrix az elemi lépéseket leíró $STEP$ -operátorok ($\mathbf{O}_{j,j+1}$) láncolásával építhető fel:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{O}_{0,1} \cdot \mathbf{O}_{1,2} \cdot \dots \cdot \mathbf{O}_{i-1,i}$$

ahol az $\mathbf{O}_{j,j+1}$ $STEP$ operátor a mikrorobot j . lépésében a jK koordináta-rendszerben értelmezett eltolási és elforgatási transzformáció, \mathbf{M}_i pedig a mikrorobot középpontjának $x_{RKP,i}$ és $y_{RKP,i}$ pozíció és φ_i orientáció adataiból képzett mátrixa:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & x_{RKP,i} \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & y_{RKP,i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

b) Mobil mikroroboton elhelyezett n számú marker \mathbf{p} pozíciójának vizuális szenzorokkal végzett mérésével a robot $\hat{\mathbf{m}}$ pozíciójának és orientációjának ortogonális projekción alapuló legkisebb négyzetes becslését az alábbi összefüggés adja meg:

$$\hat{\mathbf{m}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{p}, \text{ ahol}$$

$$\hat{\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \hat{t}_x \\ \hat{t}_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ \vdots \\ x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -y_1 & 1 & 0 \\ y_1 & x_1 & 0 & 1 \\ x_2 & -y_2 & 1 & 0 \\ y_2 & x_2 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & -y_n & 1 & 0 \\ y_n & x_n & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

azaz az \mathbf{X} paramétermátrix a markerek ismert helyzetét tartalmazza a robot lokális koordináta rendszerében, \mathbf{p} vektor a markerek vizuális méréséből kapott pozícióikat foglalja magában a világkoordináta rendszerben, \mathbf{m} vektor pedig a robot középpontjának t_x és t_y pozícióját, valamint a robot φ orientációját ($r_1 = \cos \varphi$ és $r_2 = \sin \varphi$) tartalmazza.

A tézisben megfogalmazott eredményekhez a [P3] és [P8] saját publikációk kapcsolódnak.

AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

Magyarországon elsőként a Budapesti Műszaki Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszékén indult kutatási projekt a mikrorobotika témakörében, amelynek beindításában jelen értekezés szerzője is szerepet vállalt. Az elmúlt tíz év során jelentős elméleti és kísérleti kutatómunka folyt a tanszéken ebben a témában. A kutatási projekt keretében létrejött a Mikrorobotikai Laboratórium, mely indulása óta számos TDK munkának, diplomatervezési gyakorlatnak és doktori kutatásnak adott helyet.

A mikrorobotika egy viszonylag új kutatási terület, amely a robotika, a jelfeldolgozás, a mikrorendszer technológia és a szenzortechnika legújabb eredményeit használja fel. Számos megvalósított alkalmazási példa található az irodalomban, amelyek különböző speciális célfeladatok elvégzéséhez vesznek igénybe mikrorobotikai rendszereket. A kísérleti megvalósítások jelentős része azonban kizárólag az adott feladat megoldására került kidolgozásra. Ezen célrendszerek továbbfejlesztett változatait a jövőben leginkább különféle mikrorendszerek tömeggyártásában fogják várhatóan alkalmazni. Mobil környezetben alkalmazható általános célú rendszerek és szenzortechnikai eljárások azonban kevésbé ismertek. Ez utóbbiak szerepe egyedi mikrorendszertechnikai gyártás, tesztelés, ellenőrzés esetén nő meg. Egy ilyen általános célú rendszer az általam is vizsgált piezoelektromos mikrorobot, melynek rendszertechnikai analízise hasonló működési elvű robotok tervezéséhez, gyártásához és üzemeltetéséhez szolgáltatott matematikai modellt.

A mikrorobotika helyet kapott a tanszék oktatási tevékenységében is. Számos előadás, köztük az „*Intelligens rendszerek*”, a „*Gépi látás*”, a „*3D látórendszerek*” és a „*Robotok és szenzorai*” c. tantárgyak foglalkoznak a mikrorobotika szenzortechnikai, szabályozástechnikai és jelfeldolgozási problémáival, valamint utalnak a mikrorobotikára, mint a robotika alkalmazási példáira. A tanszéken megvalósított mikrorobotikai eszközök az „*Intelligens robotok*” és az „*Autonóm rendszerek*” c. tárgyak standard mérései.

A mikrorobotika területén számos más kutatómunka is megindult: mobil robotrendszerek optimális trajektóriatervezési kérdései, kooperációs eljárások multiágensű rendszerekben, amelyek speciális, mikrorobotikai környezetben előforduló robotszabályozási feladatok megoldását tűzik ki célul.

A mikrorobotikai kutatások szenzortechnikai és szabályozástechnikai témakörben további tudományos együttműködési területet teremtettek a Karlsruhe-i Egyetem Folyamatszabályozási, Robotikai és Automatizálási Intézetével, valamint több más partner egyetem intézeteivel. Ennek keretében magyar hallgatók TDK munka részfeladatait, illetve diplomatervezési feladatokat végeztek el a külföldi partner intézetben, valamint oktatók kölcsönös cseréjére is sor került. Az együttműködés eredményei számos közös publikációban jelentek meg. A mikrorobotika területén is létrejött együttműködés a Budapesti Műszaki Főiskola, Mérés és Automatizálás Intézetével, elsősorban a mikrorobotok fuzzy alapú szabályozási kérdéseiben.

A Karlsruhe-i Egyetem említett tanszékével közösen a Volkswagen Alapítvány támogatását nyertük el a Mikrorobotika Labor felszerelésére. Az elmúlt években több hazai és uniós pályázat volt eredményes és a támogatásokból tovább bővült a labor eszközkészlete.

Az EU FP7 keretprogramban a mikro- és a nanotechnológia kiemelt célterület. Az Irányítástechnika és Informatika Tanszék partner egyetem bevonásával mikrorobotika területén (egészségipari alkalmazás) konzorciális pályázatot készül benyújtani, ezzel is folytatva a tanszéken megindult mikrorobotikai kutatásokat.

PUBLIKÁCIÓK

Tézispontokban hivatkozott tudományos közlemények

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratszövegek

- [P1] Santa, K., Fatikow, S., Felső, G.: „Control of Microassembly-Robots by Using Fuzzy-Logic and Neural Networks”, *Computers in Industry (The Netherlands)* 39, pp. 219-227. 1999. Lektorált, Referált.

Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratszövegek

- [P2] Felső, G.: „Theory of the Motion Principle of a Piezoelectric Driven Microrobot”, *Periodica Polytechnica*. 2001. Budapest. Lektorált.
- [P3] Felső, G., Vajta, L.: „A New Approach to the Calibration Problems of Three-Dimensional Laser Scanners”, *Periodica Polytechnica*. 2001. Budapest. Lektorált.

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadások

- [P4] Felső, G.: „Manufacturing System in the Micro Domain: Microrobotics”, *IFAC-Workshop on Manufacturing Systems: Modelling, Management and Control, MIM'97*, pp. 355-359. February 3-5, 1997. Vienna, Austria
- [P5] Santa, K., Fatikow, S., Felső, G.: „Control of Microassembly-Robots by Fuzzy-Logic and Neural Networks”, *Preprints of the Annual Conference on Life Cycle Approaches to Production Systems, Management, Control, Supervision, ASI'97*. July 14-18, 1997. Budapest, Hungary
- [P6] Felső, G.: „Sensor Structure and Control Approach for Microrobots”, *IEEE International Conference on Computational Cybernetics, ICC3 2003*. August 29-31, 2003. Siófok, Hungary

Könyvtárakban el nem helyezett kutatási jelentések

- [P7] Vajta, L., Helybéli, Z., Felső, G.: „Das mathematische Modell des Mikroroboters”, *FKFP 0417/1997-1, Aufsatz*. p. 45. 1998. Budapest

Csak szóban elhangzott előadások

- [P8] Vajta, L., Felső, G.: „Automatizálás mikrorobotika alkalmazásával”, *Nemzetközi Számítástechnikai Tudományos Konferencia, microCAD '97*. 1997. február 26-27. Miskolc

További tudományos közlemények

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadások

- [P9] Arató, P., Vajta, L., Felső, G.: „Visual Sensoric for Microrobot Systems”, *Proceedings of the IIS World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI'97, Vol. 3, pp. 1-5.* July 7-11, 1997. Caracas, Venezuela. Lektorált.
- [P10] Arató, P., Vajta, L., Felső, G.: „Micromanipulation Sensor Structure: A New Approach”, *IFAC/IFIP Conference on Management and Control of Production and Logistics, MCPL'97, Vol. 2, pp. 641-645.* August 31-September 3, 1997. Campinas, Brazil. Lektorált.
- [P11] Felső, G., Helybély, Á., Vajta, L.: „Development of a Microrobot System for Microbiological Applications”, *Proceedings of the Symposium on Intelligent Systems in Control and Measurement, TEMPUS INTCOM 2000, pp. 29-33.* September 9-14, 2000. Veszprém, Hungary

Helyi részvételű rendezvény kiadványában megjelent idegen nyelvű előadás

- [P12] Felső, G.: „Visual Sensoric in Micromanipulation”, *Proceedings of the Conference on the Latest Results in Information Technology.* May 28-29, 1997. Budapest, Hungary

Magyar nyelvű konferencia-előadás

- [P13] Felső, G.: „Szenzorrendszerek és szabályozási problémák a mikrorobotikában”, *Nemzetközi Automatizálási és Robottechnikai Szimpózium és Szakkiállítás, HUNGAMAT '97, pp. 106-113.* 1997. november 25-27. Budapest

Könyvtárakban el nem helyezett kutatási jelentések

- [P14] Vajta, L., Felső, G.: „Entwicklung einer Mikromanipulations-Arbeitszelle”, *Abschlußbericht für die Volkswagen Stiftung. p. 35.* Mai 1998. Budapest – Karlsruhe

Csak kivonatban megjelent konferencia-előadás

- [P15] Felső, G.: „Új eljárás felületi minőségellenőrzésre lézerrel”, *Mérnöki kutatások legújabb eredményei c. nemzetközi tudományos konferencia.* 1996. szeptember 10-12. Budapest

Csak szóban elhangzott előadások

- [P16] Felső, G.: „Mikrorobotika”, *MTA Távközlési rendszerek, Automatizálási és Számítástechnikai Bizottság együttes ülése,* 1996. június 22. Budapest