

PhD értekezés

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

Nyilatkozat önálló munkáról, hivatkozások átvételéről

Alulírott, Felső Gábor kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2007. július 11.

.....

TARTALOM

1. BEVEZETÉS.....	1
2. HAGYOMÁNYOS GYÁRTÓRENDSZEREK ÉS A ROBOTIKA ÁTTEKINTÉSE.....	4
2.1 GYÁRTÓRENDSZEREK	4
2.2 HIERARCHIKUS TERVEZÉSI ÉS IRÁNYÍTÁSI KONCEPCIÓ	5
2.3 A CIM KONCEPCIÓ ÉS KITERJESZTÉSE	5
2.4 ROBOTIKA.....	7
3. MIKROROBOTIKA.....	8
3.1 MIKRORENDSZER TECHNOLÓGIA (MST).....	8
3.2 MIKROROBOTIKA: ÁTTEKINTÉS.....	8
3.3 MIKROROBOTOK ALKALMAZÁSI TERÜLETEI	10
3.3.1 <i>Ipari gyártás- és mérés-technika.....</i>	<i>11</i>
3.3.2 <i>Ellenőrző és karbantartó robotok.....</i>	<i>11</i>
3.3.3 <i>Mikroméretű összeszerelés</i>	<i>11</i>
3.3.4 <i>Orvosi alkalmazások.....</i>	<i>12</i>
3.3.5 <i>Biotechnológiai, genetikai és gyógyszeripari alkalmazások</i>	<i>12</i>
3.4 MIKROMANIPULÁCIÓK.....	13
3.4.1 <i>Műveletvégzés és eszközeik.....</i>	<i>13</i>
3.4.2 <i>Mikromanipulációk automatizálása</i>	<i>13</i>
3.4.3 <i>A mikro- és makromanipulációk összehasonlítása</i>	<i>14</i>
3.5 SZÁLLÍTÁSI (TRANSPORT) FELADATOK	15
3.5.1 <i>Szállítási koncepciók.....</i>	<i>15</i>
3.5.2 <i>Mikrorobotikai meghajtási módok.....</i>	<i>16</i>
3.5.3 <i>Anyagtranszport járművek irányítása.....</i>	<i>18</i>
4. MIKROMANIPULÁCIÓS MUNKACELLA.....	19
4.1 HAGYOMÁNYOS MIKROMANIPULÁCIÓS MUNKAÁLLOMÁSOK.....	19
4.2 MIKROROBOTIKAI REFERENCIAMODELL	19
4.2.1 <i>A modellezés korlátai, irányítástechnikai megfontolások.....</i>	<i>20</i>
4.2.2 <i>Mobil környezet kihívásai</i>	<i>21</i>
4.3 A MUNKACELLA FUNKCIONÁLIS FELÉPÍTÉSE.....	22
4.4 A MUNKACELLA RENDSZERTECHNIKAI HIERARCHIÁJA	23
4.4.1 <i>Feladat dekompozíciós egység.....</i>	<i>23</i>
4.4.2 <i>Trajektóriatervező egység.....</i>	<i>24</i>
4.4.3 <i>Szabályozó egység.....</i>	<i>25</i>
4.4.4 <i>Mikromanipulációs egység</i>	<i>28</i>
4.4.5 <i>Transzport egység</i>	<i>28</i>
4.4.6 <i>Szenzor egység</i>	<i>28</i>
4.4.7 <i>Teljesítmény illesztő egység.....</i>	<i>29</i>
4.5 A MINIMAN RENDSZER	29
4.5.1 <i>A MINIMAN mechanikai felépítése</i>	<i>30</i>
4.5.2 <i>A MINIMAN vezérlő rendszere.....</i>	<i>32</i>
4.6 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	32
5. PIEZOELEKTROMOS MIKROROBOT DINAMIKAI MODELLJE.....	34

5.1	HENGERES PIEZOELEKTROMOS CSŐ HAJLÍTÁSA	34
5.1.1	<i>Megnyúlás és mechanikai feszültség</i>	34
5.1.2	<i>Mechanikai feszültség forgatónyomatéka</i>	37
5.1.3	<i>Rugalmas szál differenciálegyenlete és a hajlítás</i>	38
5.1.4	<i>A mechanikai és a villamos feszültség együttes hatása</i>	38
5.2	MIKROROBOT MOZGÁSÁNAK MODELLE	40
5.2.1	<i>Egylábú robotmodell</i>	41
5.2.2	<i>A mikrorobot mozgásegyenlet rendszere</i>	41
5.2.3	<i>A mikrorobot átviteli függvénye</i>	43
5.2.4	<i>Vezérlőfeszültség függvény választása</i>	44
5.2.5	<i>A stacionárius megoldás feltételei</i>	44
5.2.6	<i>A mozgásegyenlet stacionárius megoldása</i>	45
5.2.7	<i>A stacionárius megoldás jellemzése átlagértékekkel</i>	47
5.2.8	<i>A stacionárius mozgás feltételei - tervezési szempontok</i>	47
5.2.9	<i>A megoldás validálása különböző frekvenciákon</i>	48
5.2.10	<i>A robot irányítása</i>	49
5.3	MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS A MODELLE ÉRTÉKELÉSE	50
5.3.1	<i>Mérési összeállítás és módszer</i>	50
5.3.2	<i>Frekvenciafüggés vizsgálata</i>	50
5.3.3	<i>Járófelület hatásának vizsgálata</i>	52
5.3.4	<i>A dinamikai modell értékelése</i>	53
5.4	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	54
6.	MIKROROBOT POZÍCIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK	
	MEGHATÁROZÁSA	57
6.1	DISZKRÉT MOZGÁST LEÍRÓ OPERÁTOROK	57
6.2	MOBIL ROBOT POZÍCIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK DEFINÍCIÓJA	58
6.3	POZÍCIÓ ÉS ORIENTÁCIÓ VÁLTOZÁS LEÍRÁSA	59
6.4	ROBOT MOP MEGHATÁROZÁSA BECSLÉSI ELJÁRÁSSAL	60
6.5	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	63
7.	ÚJ ELJÁRÁSOK MIKROROBOTIKAI SZENZOROKRA	65
7.1	ROBOTIKAI SZENZOROK	65
7.2	KÉPALKOTÁS MIKROMANIPULÁCIÓS KÖRNYEZETBEN	66
7.2.1	<i>Fénymikroszkóp</i>	66
7.2.2	<i>Elektronmikroszkóp</i>	66
7.3	KÉPDETEKTÁLÁS ÉS KÉPFELDOLGOZÁS	67
7.4	JAVASLAT A MUNKACELLA SZENZORAIRA	68
7.5	TRANSPORT SZENZORRENDSZER	69
7.5.1	<i>Markerek</i>	69
7.5.2	<i>Optikai képfellevő rendszer</i>	70
7.5.3	<i>Képfeldolgozási eljárás</i>	70
7.5.4	<i>Robot MOP meghatározása</i>	74
7.5.5	<i>Implementáció és mérési eredmények</i>	74
7.6	MANIPULÁCIÓS SZENZORRENDSZER	75
7.6.1	<i>Képalkotás</i>	75
7.6.2	<i>A mélységi információ és a mélységi geometriai torzítás</i>	76
7.6.3	<i>Árnyékdetektáláson alapuló pozíció meghatározás</i>	77
7.6.4	<i>Defókuszáltság alapuló pozíció meghatározás</i>	79
7.6.5	<i>Kombinált eljárás a manipulátor pozíció meghatározására</i>	82
7.6.6	<i>Implementáció és mérési eredmények</i>	82

8. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA	85
9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA	86
IRODALOMJEGYZÉK	90
PUBLIKÁCIÓK.....	92
FÜGGELÉKEK	

1. 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 területén. A mikroelektronika megjelenése, majd ugrásszerű fejlődése (jelfeldolgozási sebesség, tárolókapacitás, kommunikáció) nagymértékben hozzájárult az automatizálható termelőeszközök továbbfejlődéséhez 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 nyolcvanas évek végén, kilencvenes évek elején 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 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 összefoglalóan manapság 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 projekten belül a magyar fél elsősorban a piezoelektromos robotrendszer irányítására és méréstechnikájára összpontosít, a robot pozíciójának mikrométeres tartományban való szabályozása érdekében.

A mikrorobotika területén folyó kutatások közül jelen értekezés a nagy pontosságú műveletvégzésre alkalmas mobil mikrorobot rendszerek megvalósíthatósági kérdéseivel foglalkozik.

Ennek érdekében a következő részfeladatok megoldását tűztem ki célul:

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

A választott kutatási célok meghatározását az teszi szükségessé, hogy jelenleg nem létezik a mikrorobotika általános rendszertехnikai megközelítése, amely a hagyományos robotikától eltérő mikrorendszertехnikai 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 és implementálását teszi összehasonlíthatóvá.

A munkacellában elhelyezkedő mobil mikrorobotok feladatuk ellátáshoz térben nagy 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 végezzek és modellt alkossak a mikromanipulációs munkacellában alkalmazható szenzortechnika érdekében. Ahol lehetett, a piezoelektromos rendszerre vonatkozó eredményeket általánosítottam.

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 réteg számára. Jelen értekezésben a mikrorobotikai munkacellák pozíció és orientáció meghatározására alkalmas vizuális alapú szenzorrendszerekre 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 orientációs szabályozására a pontos matematikai modellen alapuló hagyományos szabályozási eljárások helyett neurális hálózat és fuzzy-alapú szabályozást javaslok, konkrét megvalósítási lehetőséget azonban nem részletezek.

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.

Az értekezés 2. és 3. fejezetében a mikrorendszer technológia és a mikrorobotika egyenlőre 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 4., 5. és 6. fejezeteiben 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. Ebben a részben térek ki a robot vezérlőrendszerére is. A mikrorobot egyes részegységeit a már említett együttműködés keretében Karlsruhe-ban készítettük el, majd a berendezést az Irányítástechnika és Informatika Tanszéken fejeztük be és helyeztük üzembe. Itt kerül bemutatásra a szerző által kidolgozott dinamikai modell, melynek segítségével a robot szabályozásához elengedhetetlenül fontos működési tulajdonságok leírhatók.

Egy olyan bonyolultan modellezhető szabályozási rendszer, mint az ismertett mikrorobot, csak szenzorcsatolt eljárásokkal irányítható kielégítő pontossággal. A 7. fejezetet azon navigációs szenzorrendszer ismertetésének szenteltem, amely segítségével a robot mozgása irányítható. Ennek keretében egy kamerás hely- ill. helyzetfelismerő rendszerről van szó. Analizálom a mikrométeres akciótartományt vizsgáló mikroszkóp speciális érzékelési problematikáját és az adatfeldolgozó számítógépes környezetet is.

A 8. fejezetben kitérek a munka továbbfejlesztési lehetőségeire.

Az egyes fejezetek végén tézisekben foglalom össze az új tudományos eredményeket, amelyeket összefoglalóan megismétlek a 9. fejezetben. Az értekezés végén található irodalomjegyzékre történő hivatkozásokat a szövegben [nn] jelöli. A szerző által önállóan, vagy társszerzőkkel közösen készített publikációk listája ugyancsak az értekezés végén található, ezen publikációkra történő hivatkozásokat a szövegben [Pnn] jelöli.

A bírálatok és a védésről készült jegyzőkönyv a védést követően a Dékáni Hivatalban elérhetőek.

Ezúton kívánok köszönetet mondani konzulensemnek, *dr. Vajta László* docensnek, aki lehetőséget teremtett a hosszú éveken át folytatott munkára és támogatta kutatásaimat. Ugyancsak köszönettel tartozom *dr. Arató Péter* professzor úrnak mind témavezetői tevékenységéért, mind pedig azért, hogy lehetővé tette, hogy a tanszék tevékenységébe szervesszen bekapcsolódhasson a mikrorobotikai kutatási terület. Köszönet illeti mindazon diplomatervező és TDK hallgatókat, akik részt vettek a mikrorobotikai berendezések tervezésében, megvalósításában és mérések elvégzésében; többen közülük időközben az egyetem doktorandusz hallgatói, illetve a tanszék munkatársai lettek.

2. HAGYOMÁNYOS GYÁRTÓRENDSZEREK ÉS A ROBOTIKA ÁTTEKINTÉSE

2.1 Gyártórendszerek

A mai gyártórendszerek termékek széles palettáját állítják elő, amelyek egyik szélső esetben teljesen testre szabott egyedi termékek, másik végletben pedig tömegcikk. A gyártáshoz használt eszközöket a felhasználási célnak megfelelően kell kiválasztani és a gyártási követelményekhez igazítani. Még két, azonos terméket gyártó rendszer is gyakran különbözik. Mindazonáltal a legtöbb esetben standard megmunkáló gépeket és berendezéseket használnak, amelyeket a gyártórendszerhez konfigurálnak. Speciális termékek gyártása esetén azonban egyedi megmunkáló berendezésekre van szükség.

A mai gyártórendszerek általában négy gyártási elv valamelyikére épülnek, amelyek a rugalmasság növekedésével, vagyis a különböző gyártható típusok számának növekedésével sorrendben az alábbiak: futószalag rendszerű gyártás, rugalmas gyártórendszerek, gyártócella, NC gépek. A rugalmasság növekedésével a termelékenység, vagyis a gyártási mennyiség csökken.

Az utóbbi évtizedben megfigyelhető az a trend, hogy mind a lakossági, mind az ipari vásárlók egyre inkább speciális, saját igényüknek megfelelő termékeket vásárolnak, pontosabban elvárják, hogy az ismert termékek egy-egy variánsa számukra testre szabottan (pl. autógyártás) legyen elérhető. A *rugalmas gyártórendszerek* koncepcióját (flexible manufacturing system - FMS) tehát a verseny kényszerítette ki. Ezen okból kifolyólag a tipikusan nem tömeggyártászerű, de nem is teljesen egyedi termékek előállításának legcélszerűbb módja a rugalmas gyártórendszerek, illetve gyártócellák alkalmazása azáltal, hogy a vállalat a gyártósorát gyorsan képes megváltoztatni, átalakítani. A rugalmasság (flexibilitás) itt azt jelenti, hogy a berendezés átprogramozásával más termékek gyártása is lehetségessé válik ugyanazon a gyártórendszeren.

A rugalmas gyártórendszerekkel kapcsolatos jellemzők és követelmények az [1] és [40] irodalom alapján az alábbiakban foglalhatók össze:

- a rendszer technológiai berendezései alkalmasak különböző termékek gyártására, összeszerelésére;
- sokféle művelet elvégezhető a rendszer által és épp ezek speciális kombinációja révén képes egyedi igény szerinti gyártást (is) végezni;
- gyártás tipikusan előre definiált választható elemek szerint tekinthető rugalmasnak, vagyis általában nem végtelen, hanem véges számú, egymással is kombinálható opció közül választhat a felhasználó;
- gyors szerszám, illetve termék váltás képessége;
- termelékenység biztosítása magas fokú automatizáltság révén;
- magas rendelkezésre állás.

Meg kell említeni, hogy a gyártócellák és a rugalmas gyártórendszerek beruházási költségei magasak, ezért rendkívül fontos, hogy a berendezések magas rendelkezésre állási idővel és lehetőség szerint maximális kihasználtság üzemeljenek. A minőséggel szembeni magas elvárások azt eredményezik, hogy egy automatizált rendszerben a humán tényezőt, mint a folyamat legalacsonyabb megbízhatóságú elemét igyekeznek kivenni a rendszerből. A gyártórendszernek rugalmasnak kell lennie a rendelési tétellel

szemben, a különböző termékfajtákkal szemben, valamint rugalmaságot kell mutatnia a rendszer átkonfigurálása esetében is.

2.2 Hierarchikus tervezési és irányítási koncepció

Egy gyártórendszernek megfelelő tervezési és irányítási háttérrel kell rendelkeznie annak érdekében, hogy az őt üzemeltető vállalat sikeres legyen a versenypiacon. A teljesen centralizált tervezés és irányítás csak kis méretű termelő rendszereknél alkalmazható. Nagyobb szervezetek, rendszerek jól strukturált részekre oszlanak, amelyek egymástól bizonyos mértékig függetlenül, de egymással együttműködve végzik a gyártás mellett a tervezés és irányítás feladatait is. Az ilyen típusú rendszereket nevezik hierarchikus rendszereknek.

Egy vállalat tervezési és irányítási strukturáját tipikusan 4-6 szintre szokás osztani. A továbbiakban részletesen csak a legalsó szinten belüli problémákkal és megoldási lehetőségekkel foglalkozunk, de itt bemutatjuk az egyes szinteket és főbb feladataikat (4 szintű modell esetére).

- *Stratégiai tervezés (strategic planning)*. Ez a legmagasabb szint és a vállalat tevékenységének hosszú távú tervezésével foglalkozik a piacon maradás, bővülés érdekében. Tipikusan piackutatással, marketing elemzéssel, hosszú távú tervezéssel foglalkozik.
- *Üzemeltetés, működtetés tervezés (operations planning)*. Ennek keretében folyik a műszaki és szervezeti tervezési tevékenység, a vevői megrendelések kiszolgálása, mérnöki munkák, gyártási folyamatok tervezése, megrendelések kiszolgálásának ütemezése és irányítása.
- *Gyártásirányítás (manufacturing control)*. Feladatai: raktárkészlet gazdálkodás, anyagmozgatás, gyártás, összeszerelés és minőségellenőrzés.
- *Berendezések irányítása (machine control)*. Az egyes gépek és berendezések közvetlen irányításával törődik.

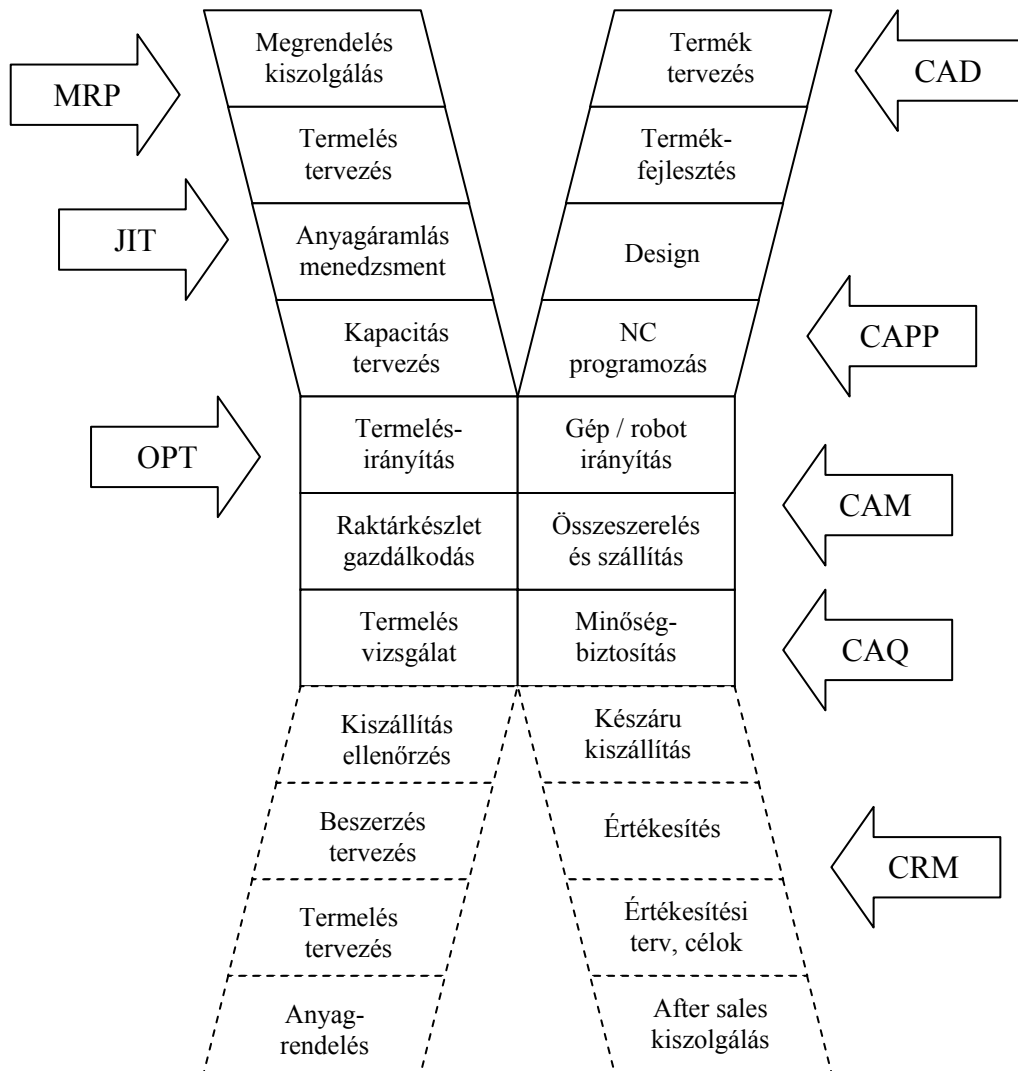
2.3 A CIM koncepció és kiterjesztése

A számítógépes rendszerek ipari méretű gyártórendszerekben való alkalmazásának hatékonyságát nagy mértékben növeli, amennyiben az egyes, számítógépekkel támogatott gyártási, illetve gyártástámogatási funkciókat egymással kommunikálni képes modulok végzik. A CIM (Computer-Integrated Manufacturing - számítógéppel megvalósított gyártás) egy gyűjtőfogalom, amely magába foglalja a CAD (Computer-Aided Design - számítógéppel segített tervezés), vagy CAE (Computer-Aided Engineering), a CAP (Computer-Aided Planning - számítógéppel segített technológiai tervezés), a CAM (Computer-Aided Manufacturing - számítógéppel segített gyártás, gyártásirányítás), a CAQ (Computer-Aided Quality Control - számítógéppel segített minőségbiztosítás) és a PP&C (Production Planning and Control - termeléstervezés és ellenőrzés) tevékenységeit [1], [40].

A CIM a termelési informatika központi fogalma, amely azonban élettörténete során több átalakuláson ment keresztül. A fogalom ebben a formában már a 70-es években megjelent és első igazi alkalmazási területe a rugalmas gyártórendszerek (FMS – Flexible Manufacturing System) létrehozása volt. A termelésautomatizálás első lépésként a termelésirányítási hierarchia legalsó szintjein jelent meg. A 80-as években a termelés műszaki tervezésének területe, a termékfejlesztés, a technológiai

folyamattervezés és a termelés tervezés jelentős informatikai támogatást kapott. Ezen számítógéppel támogatott funkciókat szokás CAxx alkalmazásokként is emlegetni. Ezt követően indult el a rugalmas gyártórendszerek és ezen támogató rendszerek integrációja [39].

Az „Y-modell” tulajdonképpen a CIM koncepcióra épülő termelésirányítási modell, amely a gyártási folyamatot helyezi előtérbe és célja a belső erőforrások optimalizálása. A Chen [38] által bemutatott „X-modell” ennek kiterjesztéseként értelmezendő és a beszállítástól az ügyfélszolgálatig terjedő láncolatot helyezi a modell fókuszába, ahogyan az a 2-1. ábrán látható. Az ábrán folytonos vonallal jelölt tevékenységek mindkét modellnek, míg a szaggatott vonallal jelöltek csak az X-modellnek elemei.



2-1. ábra: Y-modell és kiterjesztése, az X-modell

Az Y- és az X-modellben a gyártási és az ahhoz kapcsolódó tevékenységeket számítógépes támogatással végezzük. A CAxx fogalomkörén túlmenően a termelés tervezését pl. MRP (material requirement planning) rendszerek, az anyag beszállítást JIT (just-in-time) rendszerek, míg a termelésirányítást OPT (optimised production technology) [38] modulok végzik, vagy segítik. Az X-modell a külső kapcsolatok, a beszállítók és az ügyfelek céljait, igényeit is igyekszik a termelési folyamatba integrálni. Az X-modellre épülő termelési koncepció megköveteli, hogy megfelelő információcsere

legyen a láncolat tagjai között, elősegítve ezzel a megváltozott (ügyfél)igényekhez való gyors alkalmazkodást.

2.4 Robotika

A manipulátor az emberi kar és kéz egy mechanikai emulációja. A korai robotok az emberi kar modellezésének koncepciójából fejlődtek ki. A fejlődés a teleoperációból indult, ahol a manipulátor a humán operátor kezével van összeköttetésben, így lehetővé teszi, hogy az operátor olyan környezetben is elvégezhesse feladatait, amely valamilyen oknál fogva (fizikailag szűk hely, rádióaktív környezet, stb.) közvetlenül számára nem lehetséges. A modern robotok esetében a humán operátort egy programozható számítógép helyettesíti, amely kontrollálja a mechanikus manipulátor mozgását.

Az ipari robotok általános célú, programozható, többfunkciós manipulátorok, amelyek képesek anyagok, munkadarabok, alkatrészek, illetve szerszámok mozgatására. A mozgás paraméterei az elvégzendő feladatnak megfelelően programozhatók. Az ipari robot tehát egy rugalmasan automatizált rendszert képvisel (a dedikált automatikus rendszerekkel szemben), vagyis a CIM koncepcióba jól illeszkedik.

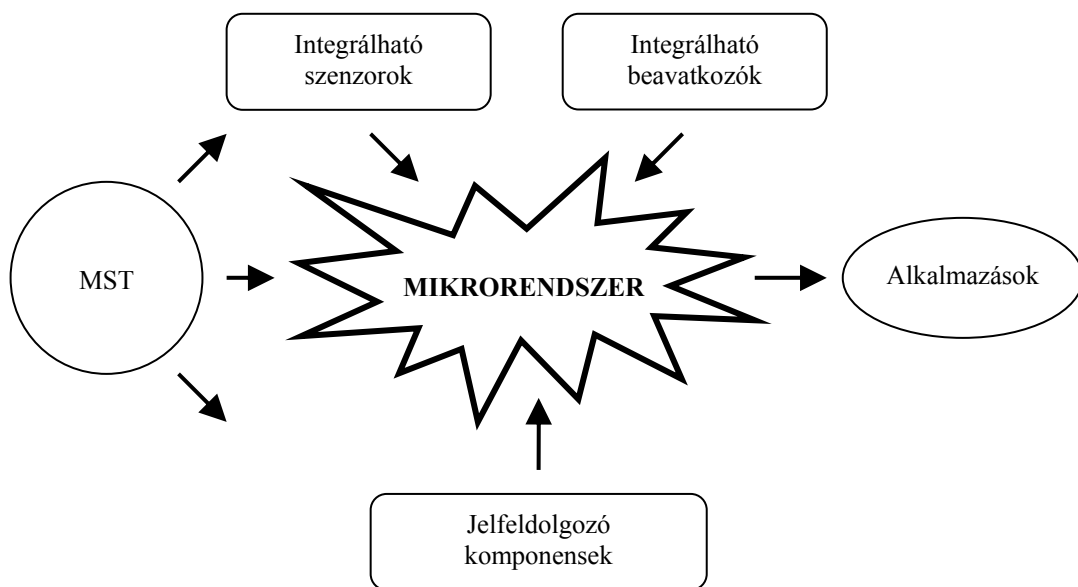
A robot egy nagyon összetett automata, amely számos mechanikai, elektromos, pneumatikus, hidraulikus és mikroelektronikai egységet tartalmazhat. Egy robot főbb funkcionális egységei az alábbiak:

- *meghajtó rendszer*, amely a mozgáshoz szükséges energia megfelelő helyre történő eljuttatását és megfelelő átalakítását végzi el (pl. elektromos energia mechanikai energiává történő átalakítása szervomotorral);
- *beavatkozó rendszer / végberendezés*, amely a munkadarabon a kívánt beavatkozást végzi el, vagy azt elmozdítja, stb.;
- *irányító rendszer*, amely a műveletvégzés megfelelő sorrendjét adja, a beavatkozókat a megfelelő pozícióba vezérli és megállapítja a tényleges és a kívánatos pozíciók eltérését;
- *szenzorrendszer*, amely lehetővé teszi, hogy a robot a környezetére és annak változásaira intelligensen tudjon reagálni azáltal, hogy a gyártás szempontjából legfontosabb fizikai változók értékeit méri.

3. MIKROROBOTIKA

3.1 Mikrorendszer technológia (MST)

Az elmúlt években a *mikrorendszer technológia* (microsystem technology - MST) az ipar egyik legnagyobb figyelemre számot tartó, ipari alkalmazási szempontból pedig világszerte az egyik legdinamikusabban fejlődő kutatás-fejlesztési területté vált. A mikrorendszer technológia már jelenleg is fontos alapját képezi különféle szenzorok, beavatkozók és szabályozó modulok felépítésének és működésének. Egyes területeken már mindennapi kapcsolatban is vagyunk reprezentáns képviselőivel (pl. orvosi katéterek, autók biztonsági légszákja kioldását indító gyorsulásmérő szenzorok, stb.).



3-1. ábra: Mikrorendszer és technológiai kapcsolatai

A mikrorendszer technológia fő célja miniatürizált intelligens és sokszor integrált szenzorok, aktuátorok (beavatkozók) és jelfeldolgozó egységek létrehozása és gyártása, amelyek érzékelésre, tervezésre, döntésre és beavatkozásra képesek (ld. 3-1. ábra). Általában azon rendszereket soroljuk a mikrorendszerek közé, amelyekben kis térrészben a lehető legtöbb funkció került megvalósításra és legalább egy mikro-mechanikailag megmunkált komponenssel rendelkeznek. Az MST mérettartományai így a nm-es-től a mm-es nagyságrendig terjednek. Az MST komponensek fontosabb alkalmazási területei az orvosi biológia, a járműtechnika, valamint a gyártás- és mérés technika. Az MST fontosságát számunkra az jelenti, hogy MST komponensek egyre gyakoribb építőkövei mikrorobotikai rendszereknek is.

3.2 Mikrorobotika: áttekintés

A hagyományos (makro-) robotokhoz hasonlóan a mikrorobotok is rendkívül összetett rendszerek. Különféle mikrobeavatkozók (mikroaktuátorok) és mikroérezelőkkel (mikroszenzorok) vannak ellátva, amelyek a környezetükkel való kapcsolatot biztosítják. A környezeti hatásokra az intelligens jelfeldolgozó egységek révén képesek reagálni. Vagyis a mikrorobotok - makroméretű társaikhoz hasonlóan - ugyancsak

mozognak, erőt fejtenek ki, célobjektumokon végeznek manipulációs műveleteket, stb. Néhány, a makrovilágban alkalmazott meghajtási elv alkalmazható a mikrovilágban is, de a "kicsinyítés" lehetséges határait figyelembe kell venni. Emellett kifejlesztettek néhány, kifejezetten mikrorobotok mozgatására alkalmas eljárást is.

Általában a mikrorobotoknak speciális követelményeknek kell megfelelniük, hogy nagyon kis méretű céltárgyak, munkadarabok kezelésére és mozgatására alkalmasak legyenek. Mindez nagy kihívásokat jelent a mikrorendszer technológia számára is: folyamatosan bővülő alkalmazási területek jelennek meg, ahol a hagyományos robottechnika már nem alkalmazható méreteiből és felépítéséből fakadó korlátainál fogva. Követelmények lehetnek továbbá a kis méret ellenére nagy távolságra elfogadható sebességgel történő mozgási képesség, különböző tárgyakon végzett manipulációs képesség, kellő robusztosság, veszélyes környezetben való működőképesség, alacsony karbantartási igény, valamint hosszú élettartam. Nemzetközi kutatások (NEXUS - Európa, NSF - USA, MITI - Japán) azt mutatják, hogy a közeli jövőben a mikrorobotok jelentős szerepet fognak játszani az iparban.

A nemzetközi mikrorobotikai kutatás-fejlesztési tevékenységek közül kiemelendő az USA-ban a Columbia University-n és az Ohio State University-n protein kristályok mikro megfogóval és robot látórendszer támogatásával történő automatikus összegyűjtésére folyó kutatás. A University of Washington egyik intézetében integrált mikrorendszert fejlesztenek élő sejtben több paraméter egyidejű mérésére molekuláris és sejtbiológia célokra. A University of Minnesota-n mikroméretű beavatkozó és szenzor fejlesztése folyik intracytoplazmikus sejt befecskendezéshez és DNS pronuklein befecskendezéshez. Európában a mikrorobotikai kutatások keretében Németországban *Prof. Fatikow* irányításával mikrométeres (és egyes kutatásokban nanométeres) tartományban folynak kutatások objektumkövetés, elektronmikroszkóp terében végzett mikromanipulációk és a mikromanipulációk irányításához szükséges 3D képfeldolgozás témakörében.

Magyarországon a BME-n az Irányítástechnika és Informatika Tanszéken túlmenően a Gyártástudomány és -technológia Tanszéken folynak mikrorobotikához kapcsolódó kutatások, fejlesztések. Az utóbbi tanszék egyik kutatási témája egy tervezési eljárás létrehozása mm alatti alkatrészek mozgatásához szükséges robotmegfogó létrehozásához. A tanszék is tagja a *4M NoE* (Multi-Material Micro Manufacture) elnevezésű, az EU által alapított közösségnek, amelynek célja mikro- és nanotechnológiák fejlesztése mikrokomponensek megmunkálásához, valamint részt vesz a *Production4μ* elnevezésű európai kutatási konzorciumban is mikroméretű termékek gyártásfejlesztése területén. Robotok szenzorcsatolt irányításában és gyártásautomatizálás területén a SZTAKI kutatóintézet, illetve a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Kara végez jelentős kutatásokat.

A mikrorobotok a makrovilág robotjaihoz hasonlóan programozhatóak, képesek előre nem látott eseményekre reagálni és távolról is vezérelhetőek. A leglényegesebb különbség a makro- és a mikrorobotok között a munkatér és a műveletek méretének nagyságrendjében van. Ez a mikrorobotikában a nanométeres nagyságrendtől a centiméteresig terjedhet¹ [33]. A rendszerek mérete alapján az alábbi osztályozás szokásos:

¹ Mindezek ellenére a mikrorobotok mérete jóval nagyobb tartományba is eshet és sokszor csak az akciótér nevezhető miniatűrnek.

- A nagyobb robotokat, amelyeknek jellemző dimenziója a cm^3 -es tartomány, **miniatűr robot**oknak nevezzük. Ezekre leginkább az emberi kézhez hasonló környezet és erő jellemző. Felépítésük szerint leginkább egy hagyományos, lekicsinyített robotrendszerhez hasonlítanak.
- A tulajdonképpeni **mikrorobotok** munkatere a mikrométeres nagyságrendbe esik. Az akciótartomány már emberi szemmel, vagy szokásos kamerával nem figyelhető meg kellő pontossággal, ezért a környezethez rendszerint hozzátartozik egy mikroszkóp is.
- A legkisebb robotokat **nanorobotok**nak nevezzük. Dimenziójuk a nanométeres tartomány, bár ez rendszerint néhány száz nm-t jelent. A szokásos mechanikai elvek itt már nemigen alkalmazhatók, sokkal inkább az atomi szinteken meglévő jelenségek felhasználásával működnek.

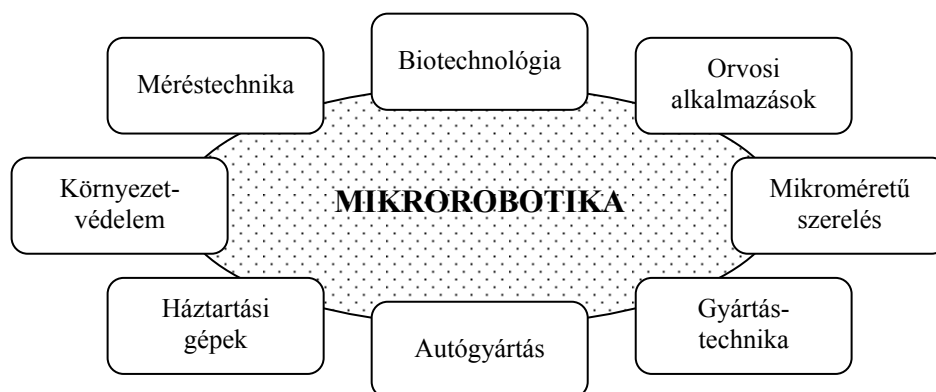
A mikrorobotok fontosabb feladatai a hagyományos általános célú robotrendszerekhez hasonlóan alapvetően két főbb csoportba sorolhatók:

- *mikromanipulációs műveletek*, amelyek esetében a robot adott helyen az objektumon, annak saját méreteivel megegyező, vagy annál kisebb nagyságrendbeli beavatkozást végez;
- *szállítási, vagy transzport műveletek*, amelyek esetében a robot az objektumot fizikai méreteinél lényegesen nagyobb távolságra szállítja.

A továbbiakban röviden áttekintjük a mikrorobotok főbb alkalmazási területeit, majd rátérünk a mikrorobotikai manipulációk és szállítási műveletek ismertetésére.

3.3 Mikrorobotok alkalmazási területei

Habár jelenleg még nem lehet pontosan megjósolni a mikrorobotok elterjedésének tendenciáját, a jelenlegi kutatások alapján a 3-2. ábrán feltüntetett alkalmazási területek valószínűsíthetők. Az alábbiakban ennek megfelelően felsorolunk néhány, jellegzetes mikrorobotikai alkalmazási példát. A mikrorobotok alkalmazási területeiről és néhány megvalósított mikrorobotikai rendszerről *Fatikow* [4] műve adja az egyik legszélesebb áttekintést.



3-2. ábra: Mikrorobotok alkalmazási területei

Dario [36] publikációjában elsősorban a gyógyászatot és a biológiát tekinti a mikrorendszerek legjelentősebb alkalmazási területeinek, ezen belül is a diagnosztikát, a

gyógyszerek megfelelő szervhez történő eljuttatását, a szövetmanipulációkat, valamint a minimál-invazív sebészeti beavatkozásokat jelöli meg első helyen.

A mikrorobotika orvosbiológia alkalmazási területének kiemelt fontosságát mindennél jobban aláhúzza az a tény, hogy megjelentek nemzetközi szabadalmak a mikrorobotika területén, többségében orvosi célokra történt megvalósításokat definiálva. A teljesség igénye nélkül néhány szabadalom címe (és a megjelenés éve):

- „Microrobot for Surgical Applications” (2006), US Patent 7042184
- „Method and System for Propelling and Controlling Displacement of a Microrobot in a Blood Vessel” (2004), CA Patent 2425795
- „Method for Making a Biochip” (2004), US Patent 6803228
- „Self-propelled Endoscopic Micro-Robot and System for Intestinal Endoscopy” (2004), US Patent 6702734
- „Robot System, Control Method, and Recording Medium” (2000), US Patent 6160371

Mindezek azt igazolják, hogy a [4]-ben megadott alkalmazási területeken belül az orvosbiológia kiemelt jelentőségűvé vált.

3.3.1 Ipari gyártás- és mérés technika

Az iparban, elsősorban a gyártás- és a mérés technikában nagy pontosságú, de kis mérettartományban működő ellenőrző rendszerek iránt igen nagy az igény. Egy ilyen fontos feladat például az integrált áramkörök gyártás közbeni, vagy utólagos tesztelése. Ennek során az integrált áramkörön kialakított tesztpontokhoz kell hőmérséklet-, vagy feszültségmérők kivezetéseit hozzáéríteni a megfelelő fizikai jellemző mérése érdekében.

3.3.2 Ellenőrző és karbantartó robotok

Ezen robotok feladata lehet pl. ember által, vagy más módon elérhetetlen területek vizsgálata, javítása, vagy veszélyes területeken való munkavégzés. Ilyen feladatok lehetnek például csővezetékek, hőcserélők csőrendszerének, vagy turbinák belső falfelületének vizsgálata és javítása.

3.3.3 Mikroméretű összeszerelés

A mikroméretű összeszerelési (microassembly) feladatok a jövőben talán az egyik legfontosabb mikrorobotikai alkalmazási területet ölelik fel. A mikrorendszer technológia segítségével létrehozott miniatűr alkatrészek rendszerint egy komplex mikrorendszer részei. A mikrorendszerek tipikusan több, különböző technológiával előállított mikroméretű (esetleg néhány hagyományos) komponensből épülnek fel, szükség van tehát a rendszer nagy pontosságot igénylő összeszerelésére. A mikrorendszer technológia jelenlegi gyors fejlődését figyelve valószínűsíthető, hogy ezen összeszerelési műveletekben nélkülözhetetlenek lesznek a mikrorobotok képességei.

3.3.4 Orvosi alkalmazások

A "*minimal-invasive surgery*" (magyarul: minimál-invazív sebészeti beavatkozások) az orvosi gyakorlatban mind szélesebb körben alkalmazott műtéti eljárásokat jelentik. Ezen módszereknél vékony és hajlékony aktív endoszkópot vezetnek a beteg testébe kis bemetszésekkel megnyitott felületen, vagy a természetesen járatokon keresztül, sőt vezethetik véredényeken át is a kívánt célterületig. Itt aztán összetett *in-situ* (eredeti helyen elvégzett) vizsgálatok és beavatkozások (megfogás, érleszorítás, metszés, leszívás, stb.) végezhetőek el távirányítással. Ezen feladatok automatizált megoldása egy intelligens endoszkópot feltételez, amely számos szenzort és aktuátort, illetve fényforrást tartalmaz. Ezen mikrorobotikai eszközök forradalmasítanák a sebészetet, azonban megvalósításuk még nehézségekbe ütközik: méretük, vezérelhetőségük, szövetbarát megvalósíthatóságuk, energiaellátásuk, jelfeldolgozási és döntéshozó algoritmusaik fejletlensége miatt.

Ezen irányzat egy korai képviselője a RAMS [6] telerobotikai rendszer, amelyet elsősorban kutatási célra fejlesztettek ki, de várhatóan alkalmazható lesz az emberi szemén, vagy az agyban történő mikroméretű beavatkozásokra: 20 µm felbontással vezérelhető manuálisan. Egy másik példa a mikrosebészetben alkalmazott telerobotikai operációkra az ARTEMIS [7] telemanipulátor rendszer.

3.3.5 Biotechnológiai, genetikai és gyógyszeripari alkalmazások

Sejtek válogatása és egyesítése, szövetek szerkezetének vizsgálata, vagy idegen anyag bejuttatása egy sejtbe a mikrorobotok biológiai alkalmazásai közé tartoznak. Gyakori feladat bizonyos jellemzővel (alak, szín, stb.) rendelkező sejtek elkülönítése egy mintában és elszállításuk egy vizsgáló állomásra, vagy egy biológiai szenzorokkal ellátott mikroszonda bejuttatása egy szövet bizonyos részébe. Nagyon fontos terület a mesterséges megtermékenyítés is, illetve annak egy speciális új módszere az ICSI (IntraCytoplasmic Sperm Injection). Genetikai kutatásokban és környezetvédelmi technológiákban (ahol biológiai sejteket többek között veszélyes anyagok jelenlétének és/vagy koncentrációjának kimutatására használják) sejtek egyenkénti pontos mozgását és károsodásmentes manipulációját kell elvégezni.

A DNS-chipek a genetikai információt tároló DNS óriásmolekulák bizonyos szekvenciáinak azonosítására szolgálnak. A fotolitográfiával készülő chipek hordozóin mesterségesen alakítanak ki előre meghatározott bázisszekvenciákat mátrix elrendezésben. Az azonosításra váró DNS szakaszt az előkészítés során felszaporítják és egy fluoreszcens tulajdonságú vegyülettel "címkézik fel", majd felviszik a DNS-chip felületére, ahol a vizsgált DNS szakasz "rátalál" a megfelelő bázisokból álló komplementerére. A kiértékelés optikai úton történik, a mátrix adott pozícióiban fluoreszcencia figyelhető meg [8]. A mikrorobotika szerepe kis szériás DNS-chipek gyártásánál, a kémiai összetevők mikrométer méretű cellákba, mikropipettákkal történő adagolásánál jön szóba.

További biotechnológiai alkalmazások közé tartoznak a sejten belüli manipulációk (mikro-injektálás) és más mikrosebészeti beavatkozások [24], [25], [26].

3.4 Mikromanipulációk

A mikroméretű alkatrészek szerelése, az orvosbiológiai célú sejtmanipulációk, valamint a rendkívül nagy pontosságot igénylő műtéti beavatkozások (pl. szemműtétek) mind-mind a mikrorendszer technológia fontos területei közé tartoznak. Mikromanipulációs rendszerek számára különösen fontosak a megfelelő kötést, összekapcsolást biztosító technológiák, illetve az összeszerelési, vagy beavatkozó műveletek automatizálhatósága [31]. Mikrorendszerek és komponenseik nagy mennyiségben történő, tömeggyártásszerű és egyben gazdaságos előállításához rugalmas, automatizált, nagy-pontosságú és gyors - mikroméretű tartományban működő - összeszerelő rendszerekre van szükség.

3.4.1 Műveletvégzés és eszközeik

Habár általában a manipulációk az alkalmazástól és az automatizáltság fokától függően különböznek, *Hatamura* [2] műve alapján mégis összeállítható egy, jellemző lépésekből álló sorozat a beavatkozásokra: megfogás, szállítás, pozicionálás, elengedés, igazítás, rögzítés és a feldolgozási lépések, azaz vágás, forrasztás, ragasztás, szennyeződések eltávolítása, stb. Ezen műveletek elvégzéséhez megfelelő szerszámokra van szükség, amelyek - a makrovilág elnevezéseire hasonlóan - mikrokések vágáshoz, mikrotűk objektumok rögzítéséhez, adagoló mikrofűvőkák pl. ragasztóanyag, vagy biológiai minta célba juttatásához, mikrolézeres egységek forrasztáshoz, hegesztéshez, vagy vágáshoz, különböző mikromegfogók, kaparó és igazító, valamint egyéb megmunkáló eszközök. A mikromegfogóknak különösen fontos szerepük van, mert a robot manipulációs képességei nagyrészt attól függnek, milyen objektumokat és hogyan képes megragadni. A fogó alakjának a megfogandó objektum alakjához való igazítása a leggyakoribb megoldás (ahogyan a makrovilágban is), azonban ez esetben számolnunk kell a megfogó időnkénti, vagy rendszeres cseréjével, illetve a cseréhez szükséges eszközzel. A fémből készült és a tárgy alakját követő megfogók mellett használhatunk rugalmas műanyagból készült megfogókat is, amelyek kevésbé sérthetik meg az objektum felszínét. Még érzékenyebb környezetben, például orvosbiológia alkalmazásoknál sejt megfogására pipettát alkalmazhatunk. (Ilyen esetben a biológiai objektum méretének és a pipetta átmérőjének egymáshoz való viszonyától függően az objektum megfogásra, vagy teljesen felszívásra is kerülhet.)

3.4.2 Mikromanipulációk automatizálása

Különböző alkalmazási területeken megjelenő igények eltérő felépítésű mikro-manipulációs rendszereket tesznek szükségessé. A rendszerek egyik legfontosabb csoportosítása az automatizáltság foka alapján végezhető el.

- **Manuális mikromanipulációk.** Ez a jelenlegi leggyakoribb megoldás, a gyógyszerészetben és a biológiai kutatásokban egyaránt alkalmazott módszer. Még az iparban is nagyon gyakran a mikromanipulációs feladatokat speciálisan képzett humán technikusok végzik el. Pl. összeillesztenek parányi alkatrészeket, és miniatűr szerszámokkal rögzítik őket kívánt helyzetükben. Mindamelllett a miniatürizálás növekedésével a mérettűrés egyre kisebb lesz, amely pontosság biztosítására az emberi kéz egyre kevésbé alkalmas.
- **Teleoperáció.** Egy fejlettebb formát képviselnek a részlegesen automatizált, makroméretű, teleoperációk végzésére alkalmas mikromanipulációs rendszerek. Ezen rendszerek a humán operátor joystickkal, vagy egerrel végzett

kézmozgását alakítják át a mikromanipulátor finomabb két-, vagy háromdimenziós mozgásává. Ennek megfelelő elvégzése azonban megköveteli, hogy a beavatkozásnak az operátor által nyomon követhetőnek kell lennie, és a mikrovilág bizonyos, a műveletvégzés szempontjából lényeges fizikai jellemzőiről (pozíció, erő, zaj, stb.) információknak megfelelő módon kell eljutniuk az operátorhoz. Így ezen rendszerek is az emberi kéz ügyességét használják ki csak egy másik mérettartományban. A finom mozgás felbontása és sebessége azonban továbbra is korlát marad, mivel a beavatkozó mozgása az operátor kezének közvetlen imitációja.

- **Automatizált mikromanipuláció.** Az automatizált mikromanipulációs munkaállomások multifunkcionális robotizált rendszereket, mikroroboto(ka)t alkalmaznak feladataik elvégzésére, amelyek akár lehetnek mobilak is és különböző munkaterületen végezhetnek manipulációs feladatokat. Itt már nincs közvetlen kapcsolat az operátor keze és a robot között. Az összeszerelési, vagy egyéb beavatkozást igénylő műveletek nyílt-, vagy zárthurkú szabályozás alkalmazásával valósíthatók meg. A humán operátor utasításokat ad a rendszernek, amely végrehajtja az egyes műveleteket. Az utasítások absztrakciós szintje a szabályozó komplexitásától, teljesítőkéességétől függ.
- **Többágensű kooperatív manipulációs rendszerek.** Egy jövőbeni megoldás lehet a rugalmas robotrendszerek alkalmazása, amelyekben több miniatűr robotizált rendszer szoros együttműködésben (kooperáció) hajtja végre feladatait. Itt a robotok mérete a manipulálandó objektum méretével összemérhető.

3.4.3 A mikro- és makromanipulációk összehasonlítása

Habár a mikromanipulációs műveletek legtöbbször hagyományos "makroműveletek" elvégzését jelentik kis mérettartományban, a hagyományos eljárások nem mindig és nem azonos feltételek mellett alkalmazhatók változatlanul a mikrovilágban. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a legfontosabb eltéréseket.

- A mikroméretű objektumok (különösen a mikromechanikai elemek, amelyek vékony rétegekben kerülnek kialakításra) sokkal könnyebben sérülékenyek, meghajlanak, eltorzulnak szállítás, megmunkálás vagy pusztán a megfogás révén, mint makroméretű társaik. Ez elsősorban annak tulajdonítható, hogy a mikroméretű objektumok megfogásához, rögzítéséhez szükséges erő a méret csökkenésével kisebb mértékben csökken, mint az adott objektumot jellemző minimális, már maradandó alakváltozást okozó beavatkozás.
- A mikroobjektumok sokkal érzékenyebbek a porra, nedvességre, rázkódásra, vagy a hőmérséklet változásaira. Ennek érdekében használatosak tisztaterek, amelyekben állandó hőmérséklet, pormentesség és rázkódás mentesség biztosított.
- Az egyik legjelentősebb probléma a különböző erők egymáshoz képesti aránya közötti eltérés. A gravitáció a mikrovilágban csak kis szerepet játszik a komponensek kis tömege miatt. Az elektrosztatikus erők, vagy a Van-der-Waals erők jelentősége azonban fokozott. Magas páratartalmú környezetben, illetve amennyiben a manipulátor nedves, a felületi feszültség szerepe meghatározóvá válik². Ezek a makrovilágban szokatlan hatások többek között azt eredményezik,

² Léghangosított terek használatával ez a hatás csökkenthető, Arai [3] alapján 9 %-os páratartalom alatt elhanyagolhatóvá válik.

hogy egy tárgy megfogása és megmunkálása rendszerint könnyebb feladat, mint annak elengedése. Másrészt az adhéziós erők felhasználhatók új megfogási eljárásokra, amelyek alapjaiban különböznek a mechanikus (fogóval, vagy csipesszel történő megfogási, vagy tüvel történő rögzítési), illetve a pneumatikus (vákumkorong, pipetta) eljárásoktól. *Arai* [3] publikációjában néhány figyelemreméltó példát találhatunk ezen megoldásokra.

3.5 Szállítási (transzport) feladatok

A mikrotechnológiák esetében pl. a mechanikai, vagy az orvosbiológiai alkalmazások a legtöbb esetben megkövetelik, hogy a megmunkálandó objektumot, vagy egy sejtet saját, illetve a beavatkozási környezet méreteihez képest jóval nagyobb távolságra juttassunk el. A mikrorobotikai rendszereknek a mikromanipulációk melletti másik fontos feladatcsoportját nevezzük szállítási, vagy transzport feladatoknak [21].

3.5.1 Szállítási koncepciók

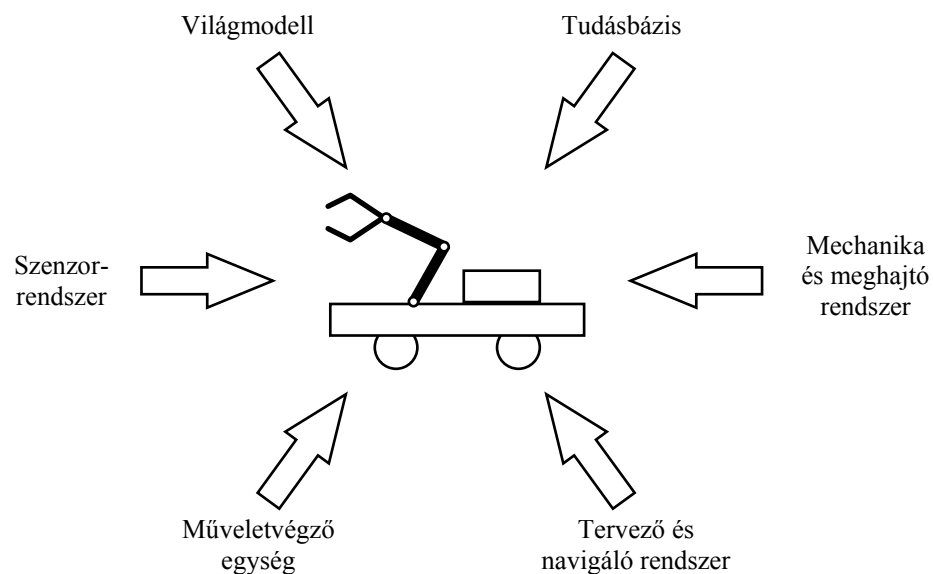
A makrovilág gyártórendszerei számára különböző anyagtranszport rendszerek állnak rendelkezésre, amelyek a szállítandó anyag mennyisége, a szállítás lehetséges módja és útvonala, valamint a szállítás elérhető sebessége szerint nyújtanak eltérő megoldásokat. Áttekintésükkel képet kapunk az egyes szállítási koncepciók mikrovilágban való alkalmazhatóságáról.

1. **Szállító sor (conveyor).** A szállító sorok számos változata létezik: szállítószalag, görgős szállító sor, fogas szállító sor, stb. A szállítandó objektumok vagy közvetlenül magán a szállító soron (pl. futószalagon), vagy egy arra helyezett tálcán található. A megmunkáló rendszer feladata, hogy az érkező objektumok közül a megfelelőt kiválassza, azt levegye a sorról, majd a megmunkálás végétével ismét visszategye a szállító sorra.
2. **Magasban futó szállító rendszer.** A magasban futó szállító rendszer sínekből, görgőkből és felfüggesztett szállítóegységekből álló szerkezet, amely a megmunkálandó tárgyakat szállító tálcákon, vagy közvetlenül felfüggesztve szállítja. Ez a megoldás a mikroobjektumok kis súlya miatt a mikrorendszer technológiában nem alkalmazott.
3. **Anyagtranszport járművek.**
 - a) *Vontatott jármű.* A járművet a padlóba épített vontató szerkezet (lánc) húzza. A jármű kötött útvonalon halad, bizonyos állomásokon lehetőség van a jármű lekapcsolására, illetve visszakapcsolására. Ez a szállítási módszer csak kis fokú rugalmasságot tesz lehetővé.
 - b) *Automatikusan vezetett jármű* (Automatic Guided Vehicle - AGV). Egy automatikusan vezetett jármű tipikusan a gyártóüzem, vagy a mikrorobotikai cella padlóján mozog kijelölt útvonalon. Az útvonalat rendszerint sín, a padlón futó passzív fluoreszkáló, vagy mágneses vonal formájában jelölik ki, illetve lehet egy aktív, padlóba épített útvonalkijelölő vezeték, amely egy rádiófrekvenciás jelet sugároz.
 - c) *Humán vezetésű jármű.* A gyártási műveletek sokszor igen nagy manőverező képességű anyagszállító rendszereket igényelnek, amelyeket humán vezetésű járművekkel látnak el. A makrovilágban erre példa az emelővillás targonca, míg a mikrovilágban a kézi távvezérléssel működtetett mobil mikrorobotok. Ezen járművek rugalmas gyártórendszerbe integrálhatók mobil terminálok

alkalmazásával, amelyek rádió-, vagy infravörös kapcsolattal csatlakoznak az irányító rendszerhez.

d) *Autonóm mobil jármű*. Egy autonóm rendszer általában képes feladatok megtervezésére és végrehajtására a kapott átfogó jellegű célkitűzésnek megfelelően, így alkalmazásukkal nagy flexibilitású gyártórendszerek építhetők fel. Egy autonóm mobil robot főbb rendszertechnikai komponenseit a 3-3. ábra tünteti fel, valamint a következő tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- önálló tervezés és műveletvégzési sorrend kialakítása a kapott célfeladatnak megfelelően, mint pl. egy objektum elszállítása a tárolóhelyről a megmunkáló egységhez;
- független végrehajtás, valamint a műveletek végrehajtásának felügyelete;
- a környezet megfigyelése, mérése és az eredmények interpretációja szenzorok segítségével: a járműnek működési környezete térképével rendelkeznie kell (vagy éppen fel kell azt derítenie) és fel kell ismernie az összes objektumot útja során;
- előre nem látott eseményekre való önálló reakcióképesség: pl. ha egy nem várt akadály kerül az útjába, a járműnek észre kell azt vennie és ki kell kerülnie;
- passzív és aktív tanulás: a járműnek képesnek kell lennie arra, hogy működése során nyert "tapasztalatokból" tanuljon, javítva ezzel működési képességeit.

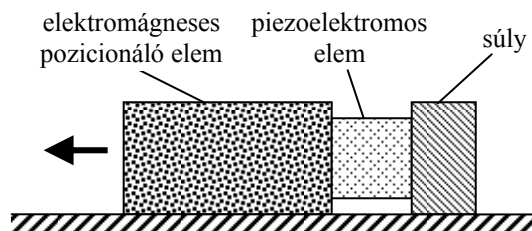


3-3. ábra: Autonóm jármű főbb komponensei

3.5.2 Mikrorobotikai meghajtási módok

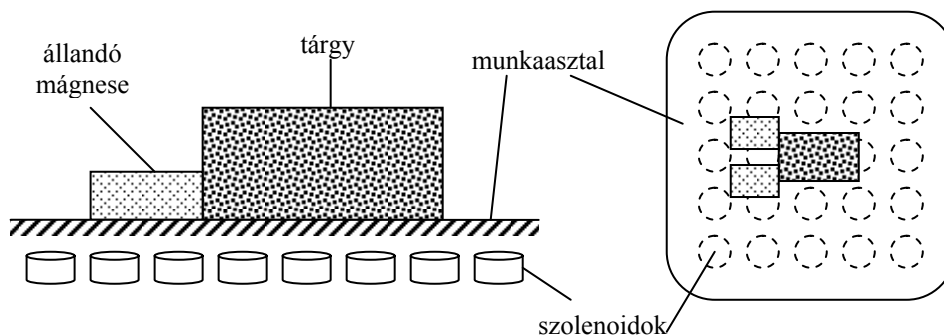
A mobil mikrorobotok meghajtására számos elképzelés született, illetve jelenleg is új és új meghajtási módokkal folynak kísérletek. Az alábbiakban bemutatunk néhány, mikrorobotok mozgatására alkalmas működési elvet, amelyek közül a legnépszerűbbek a piezoelektromos aktuátorok, illetve a mágneses meghajtás alkalmazása. A témáról bővebben ld. *Fatikow* [4] művét.

Az ún. "Tiny Silent Linear Cybernetic" mikroaktuátor a piezoelektromos aktuátorok nagyon rövid válaszidejét használja. Az aktuátor felépítésében egy piezokerámia elem egyik végére egy kicsiny elektromágneses pozicionáló elem, másik végére pedig egy súly van rögzítve a 3-4. ábrán látható módon. A működés első fázisában a piezo elemre feszültséget kapcsolunk, amelynek hatására az gyorsan megnyúlik, ellentétes irányban kimozdítva ezzel kezdeti pozíciójából mind a tehetetlen tömeget, mind pedig az elektromágneset. Ezt követően áramot vezetünk az elektromágnes tekercsébe, ezáltal rögzítjük azt a fémes talajhoz. Ezután a piezoelemet kontraktáljuk, minek hatására a súly elindul az elektromágneses elem irányába. Amikor a piezo elem teljesen összehúzódott, az elektromágnes gerjesztését megszüntetjük, ezáltal az egész aktuátor a tehetetlen tömeg hatására tovább mozog a nyíl irányában. Az egy lépéssel elérhető távolság a tömegek nagyságától és a súrlódási erőtől függ. A legkisebb megépített aktuátor prototípusa $5 \times 5 \times 12$ mm méretű és 37 kHz-es frekvenciával működtetve 35 mm/s haladási sebességet ért el. Az aktuátor számos lineáris léptetési, eltolási művelet végzésében kaphat szerepet.



3-4. ábra: Tiny Silent Linear Cybernetic mikroaktuátor

Az előbb ismertetett elvhez hasonló megoldást használ az ún. "Piezoelectric Micropositioning Device" (piezoelektromos mikropozicionáló eszköz). Itt az elektromágnes helyett csak egy pozicionáló elem helyezkedik el. Az első lépésben a piezoelem hirtelen megnyúlik, eltávolítva egymástól a súlyt és a pozicionáló elemet. Ezután a piezoelemet lassan kontraktáljuk, amely még nem okozza a pozicionáló elem elmozdulását. A következő fázisban ezt az összehúzódási folyamatot hirtelen megállítjuk, ennek hatására a még mozgásban lévő tehetetlen tömeg eltolja a pozicionáló elemet. Az ismertetett rendszer már kereskedelmi forgalomban is kapható, pozicionálási sebessége elérheti az 5 mm/s értéket, pontossága $0.1 \mu\text{m}$ és legfeljebb 13 N erőt képes kifejteni.



3-5. ábra: Elosztott mágneses aktuátor

Az ún. "Distributed Magnet Actuator" (elosztott mágneses aktuátor) néhány állandó mágneset használ az objektum mozgására. Az állandó mágneseket a munkaasztal alatt

mátrix elrendezésben lévő elektromágnesek segítségével pozicionálja a 3-5. ábrának megfelelően, így translációs mozgások mellett az objektum rotációja is megvalósítható. A megfelelő mozgás megvalósításához az egyes elektromágnesek bekapcsolása révén kialakuló mágneses tér szolgál. A megvalósított kísérleti példányban a 4.5×4.5 cm-es munkatér alatt 36 db 3.5 mm átmérőjű elektromágnes helyezkedik el. Az elektromágnesek kapcsolását számítógépes rendszer vezérli, a manipulációt kamerás rendszer felügyeli.

A mikrorobotikai rendszerekben fellépő súrlódás kiküszöbölése érdekében fejlesztették ki az ún. lebegő mobil egységet. A robot munkaterülete egy fémből készült légpárnás asztal, melyen egyenletes közönként apró levegő fúvókák találhatók a robottest lebegésben tartásához. Az asztal nem sík, hanem szabályos elrendezésben bemélyedésekkel és kiemelkedésekkel ellátott, tulajdonképpen mindkét dimenzióban fésűs szerkezetű. Az ugyancsak fém robottest (15 mm \times 15 mm) és az asztal egy elektrosztatikus rendszert alkot. Egy ilyen fésűs rendszerben, ha feszültséget kapcsolunk rá, a fellépő elektrosztatikus erőnek nemcsak a fegyverzetekre merőleges irányban, hanem azzal párhuzamosan is van komponense, amely a robottest elmozdulását eredményezi. A megfelelő feszültség előállítása vezeték nélküli megoldással, UV fényel (365 nm) való megvilágítás révén keletkezik. Ehhez a mikrorobot felső felületén egy piroelektromos elemet (5 \times 6 \times 0.2 mm³) helyeztek el, amelyben fény hatására elektromos feszültség keletkezik. A létrejövő elektrosztatikus erő vízszintes komponense révén kialakult mozgás a megvilágítás kikapcsolása után a csekély súrlódás miatt hosszabb ideig is fennmarad, a mikrorobot sebessége elérheti a 7 cm/s értéket. A robot mozgásának irányítása rendkívül nehéz, ugyanis a mozgás iránya a robottest kiindulási pozíciójától függ.

3.5.3 Anyagtranszport járművek irányítása

A mikrovilág számára felépítendő rugalmas gyártórendszerek és gyártócellák kiszolgálását a célszerűség, a pontosság és a megfelelő sebesség érdekében javasolt automatizált szállító járművekkel végezni. Az ipari gyártórendszerek mobil járművei mintájára a mikrotartományban üzemelő szállító rendszereket az irányításuk automatizáltsági foka szerint besorolhatjuk a makrovilágban felállított modellek valamelyikébe, azaz

- automatikusan vezetett jármű (AGV),
- automatikus forgalomirányítású humán irányítású jármű,
- autonóm mobil jármű.

A szállító járművek flexibilitása nagyban növelhető, amennyiben a jármű irányítását számítógép vezérlésű irányítórendszer végzi. Amennyiben csak kevés jármű közlekedik, központi irányítást használhatunk. Nagyfokú automatizáltságú anyagelosztáshoz és sok jármű alkalmazása esetén decentralizált irányítási rendszert célszerű használni. Ez esetben azonban a járművek mozgásának kooperációját és szinkronizációját gondosan meg kell tervezni a folyamatos működés és az ütközések elkerülése érdekében. A centralizált vs. decentralizált irányítás alkalmazhatóságáról bővebben ld. az A. Függelékben.

4. MIKROMANIPULÁCIÓS MUNKACELLA

4.1 Hagyományos mikromanipulációs munkaállomások

Az egymástól meglehetősen távol eső területekről hozható alkalmazási példák nagy száma világosan mutatja, hogy a különböző objektumok kezeléséhez és a rajtuk elvégzendő műveletekhez kellő flexibilitással rendelkező miniatűr beavatkozókra, azaz mikromanipulátorokra igen nagy szükség van, amelyek a sokféle és eltérő feladatokhoz egyszerű és gyors szerszámcserét tesznek lehetővé. A hagyományos mikromanipulációs munkaállomások legnagyobb problémáját éppen ez okozza, ugyanis ezeket általában egyetlen speciális feladatra optimalizálják. Továbbá a legtöbb mikromanipulációs munkaállomás munkatere korlátozott, ezért más tevékenységekhez nem, vagy csak körülményes átalakítási eljárások végrehajtása után is csak korlátozott mértékben alkalmazhatók. A jelenlegi technológiák többségében emberi beavatkozást igényelnek, tulajdonképpen egy mikroszkópból és manuális mikromanipulátor(ok)ból állnak.

Jellemző példaként a 4-1. a) ábrán látható az Eppendorf cég TransferMan NK 2 mikromanipulátora [9], amely manuálisan irányítható és kb. 40 nm-es lépésközzel mozgatható mikromanipulátorokat tartalmaz. A b) ábrán a Micromanipulator Co. MSS101 mikrosebészeti célokra kifejlesztett manipulátor állomása [10] látható, amely mikro-injektáló eszközökkel van felszerelve. Az állomás 1-10 μm méretű objektumokon történő beavatkozásokra alkalmas.



a) Eppendorf TransferMan NK 2 mikromanipulációs munkaállomása



b) Micromanipulator Co. MSS101 mikrosebészeti állomása

4-1. ábra: Ipari mikromanipulációs állomások

4.2 Mikrorobotikai referenciamodell

A mikrorobotikával kapcsolatban említett feladatok vizsgálatát célszerű egységesen kezelni. A mozgás, az érzékelés, a szabályozás, a korlátozottan ismert és változó környezet vizsgálata érdekében szükségessé vált, hogy definiáljak egy modellt és a vizsgálatokat a továbbiakban erre korlátoztam. *Ennek érdekében megalkottam egy mikromanipulációs munkacella általános modelljét és a mobil mikromanipulációkat a következőkben ezen modell keretei között vizsgáltam.* A modell előírásainak megfelelően kísérleti mikromanipulációs munkaállomást is felépítettem a modell érvényességének gyakorlati kísérletekkel való alátámasztása érdekében. Jelen fejezet a mikromanipulációs munkacella felépítését ismerteti. A munkacella alkotóelemei úgy

lettek definiálva, hogy az az alkalmazások többsége számára megfelelő környezetet szolgáltatson, műveletvégzési tartománya a szokásos mikromanipulációk nagyságrendjébe essen, viszont kellően nagy legyen annak érdekében, hogy a szállítási műveletek is elvégezhetőek legyenek. Az itt tárgyalandó mikromanipulációs munkacella tehát nem más, mint egy *referenciamodell* a mikrorobotikai műveletek, az érzékelés és az irányítás vizsgálata számára.

Célunk az, hogy a korábban bemutatott mikrorobotikai rendszerek által elvégzendő feladatokat a mikromanipulációs munkacella egységei elláthassák. A munkacellában elvégzendő feladatok tehát alapvetően nem mások, mint a mikromanipulációk és a szállítás.

4.2.1 A modellezés korlátai, irányítástechnikai megfontolások

A mikrorobotika korábban említett definíciója alapján célszerű megvizsgálni azon eljárásokat, amelyek segítséget nyújtanak ahhoz, hogy a mikrorobot képes legyen a definiált feladatok elvégzésére. Egy viszonylag egyszerű elven létrejövő meghajtás (pl. piezoelektromos mikrorobot) is összetett fizikai folyamatok kölcsönhatása révén épül fel. A robot mozgása egy egyszerű modell esetén is fizikai változók és anyagállandók bonyolult összefüggése segítségével is csak korlátozottan írható le. Mikrorendszerek esetében a mozgás pontos leírásának főbb korlátai általában a következők lehetnek:

- Csak közelítő pontosságú elméleti modell áll rendelkezésre; a rendelkezésre nem álló, de elméletileg kidolgozható "pontosabb" modell komplexitása lényegesen nagyobb (pl. nemlineáris).
- A modell paraméterei csak közelítő pontossággal ismertek. Sokszor azonban a paraméterek pontosabb ismerete már nem javítja a modell pontosságát.
- Bizonyos paraméterek kellően pontos ismerete mégha elméletileg lehetséges is lenne, mikrorendszerek esetében a gyakorlatban szinte biztosan csak közelítő értékük ismert.
- A modell paramétereinek térben, illetve időben történő megváltozása lényegesen bonyolultabbá teszi a mozgást, tulajdonképpen az "állandó együtthatós" modellt "változó együtthatós" rendszermodellel³ kellene felváltani. A modell paramétereinek térben és időben történő változása és környezetfüggősége bizonyos esetekben elvileg ugyan mérhető lehet, a paraméterek megismerésének (mérésének) ideje és költsége azonban rendszerint túl magas. Ezért gyakran a modell komplexitása növelésének elkerülése érdekében mégis állandó paraméterű modellt alkalmazunk.
- Bizonyos, a robotikában nagyon gyakori esetekben a modell paraméterei, esetenként a modell paramétereinek pontos belső kapcsolata is csak közelítően ismert. Esetenként nem is ismerjük előre a paramétereket befolyásoló tényezők pontos hatását, csak tendenciájukat.
- Előfordulhat, hogy elméletileg sem áll módunkban a modell kívánt pontosságú közelítése.

³ A következőkben részletesen is bemutatásra kerülő piezoelektromos mikrorobot esetén pl. a talaj és a lábak közötti súrlódási együttható változhat időben, illetve helyről helyre is a működési tartományban. Ennek oka lehet pl. a felületre lecsapódó pára, vagy a helyről helyre változó vastagságú porréteg jelenléte, amely befolyásolja a talaj (üvegfelület) és a lábak közötti csúszási, vagy tapadási súrlódást. A súrlódási együtthatók értékében fennálló lokális eltérés, pl. a három közül csak egy, vagy két láb csúszási tulajdonságainak megváltozása a mozgás jellegét is megváltoztathatja, pl. egyenes vonalú haladásból a robot elkanyarodhat.

Azon esetekben, amikor a paraméterek megismerése korlátokba ütközik - és rendszerint ez a helyzet -, a környezeti és "belső" fizikai változók megváltozása a rendszer hatásláncán kifejtve hatásukat a kívánt lefolyástól eltérő rendszerviselkedést eredményez. Az irányítástechnika mindezt zavarásnak tekinti és különféle eljárásokat "ajánl" a zavaró hatások kiküszöbölésére. Mivel a fent említett gondolatmenet a mikrorendszerek esetében fokozottan érvényes, a vezérlés típusú irányítás korlátai miatt *szabályozást* kell alkalmaznunk a rendszer kívánt módon való működésének elősegítése érdekében. A szabályozás mindamellett megköveteli, hogy kellően pontos információkkal rendelkezünk a fizikai rendszer állapotáról, pontosabban az azt jellemző fizikai változókról. Ezt a feladatot a mikrorobotikai munkacella *szenzorai* végzik el. A szabályozás számtalan fizikai jellemző megkívánt értéken való tartását, illetve megkívánt mértékű változását végezheti el. A következőkben a mechanikai műveletvégzés és szállítási feladatok miatt elsősorban a *pozíció- és orientáció-szabályozás* feladatát értjük ez alatt. Így a szenzorrendszerek is elősorban ezen változók mérésére hivatottak.

4.2.2 Mobil környezet kihívásai

A rögzített helyen működő automaták, robotok környezete bizonyos értelemben előre ismert. Működési tartományuk előre kijelölt helyein végeznek előre definiált feladatokat. A mobil robotok esetében azonban a problémák komplexitása nagyságrendekkel megnő. A részlegesen ismert környezet a makrovilágban is problémákat okoz. A mobil rendszernek legalább korlátozottan képesnek kell lennie arra, hogy előre nem látott eseményekre reagáljon és előre eltervezett feladatát a megváltozott körülmények között is megkísérelje végrehajtani. A komplexitás növekedését elsősorban az érzékelési problémák növekedése és a szituációk felismeréséhez szükséges döntések bonyolultsága okozza. Gondoljunk például az automata gépkocsi problémájára, amely emberi beavatkozás nélkül képes közlekedni. Amennyiben a komplexitást csökkentjük, pl. kötöttpályás, alacsonysebességű, rövidtávú magasvasúti szállítás, vagy automata raktározás, a lehetséges szituációk száma jelentősen csökken és a probléma a mai tudásunk szerint megoldható. (Jelenleg azonban még nem létezik általános célú automata gépkocsi.) Az a képesség, hogy az előre nem látott eseményekre reagálni tudjunk, szükségessé teszi, hogy a rendszert bizonyos mértékű intelligenciával ruházzuk fel. Így a robotrendszer egy feladatot kap, amelyet elemi lépések sorozatára kell lebontania és azt elvégeznie.

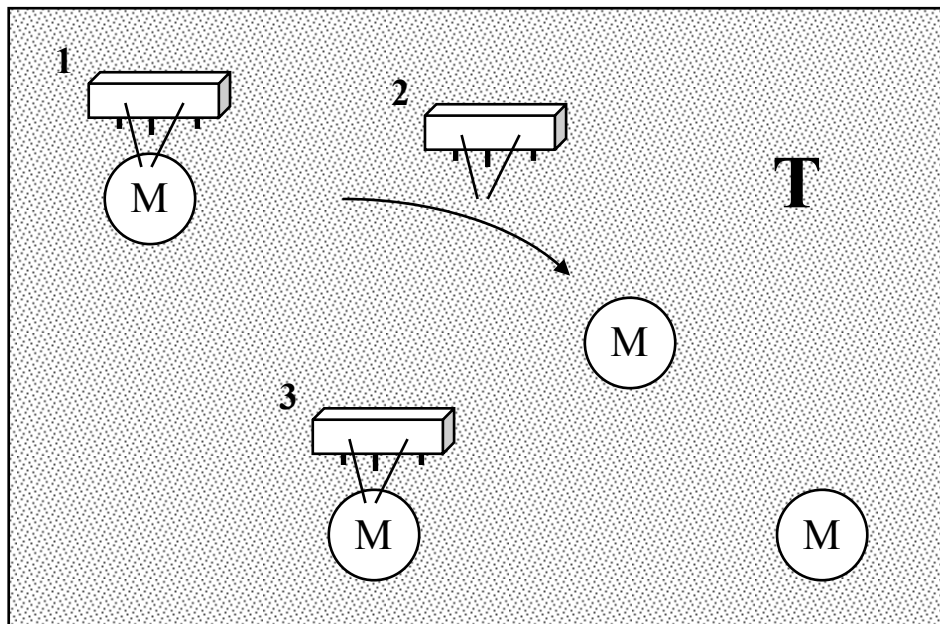
A mikrovilágban sem más a helyzet. A mobil mikrorobotikai rendszerek is ki vannak téve olyan környezeti hatásoknak, amelyek fellépése esetén a robot pusztán vezérléssel nem lenne képes feladatát teljesíteni. A mobil mikrorobotok irányításához is az egyik legfontosabb feladat a robotról és környezetéről történő információgyűjtés, vagyis az érzékelés. A mikrovilág azonban új követelményeket is állít, beavatkozóit és szenzorait, ha lehet és ha szükséges, ugyancsak kis mérettartományban kell megvalósítani. A miniatürizálás egyben azonban korlátokat is jelent és esetenként új módszereket kell alkalmazni. Lényeges tehát látni azt, hogy a munkacella szenzorainak szükségességét az általános irányítástechnikai megfontolásokon túl a részlegesen ismert mobil környezet önmagában is indokolja.

4.3 A munkacella funkcionális felépítése

Az általános célú mikrorobot – modellünknek megfelelően – a mikromanipulációs munkacella műveletvégző egységeként végzi feladatait. Ennek keretében viszonylag nagy távolságra szállít mikroobjektumokat és kis méretű tárgyakat, miközben a rendszer elvárható pontossága $10\ \mu\text{m}$ és $1\ \text{cm}$ közötti nagyságrendbe esik. Ezzel szemben a mikromanipulációk pontosságát a μm tartományban kell tartanunk. A két eltérő pontosságot igénylő feladat elvégzése rendszerint térben is elkülönül: a nagy pontosságot igénylő manipulációs műveletek rendszerint csak a munkacella megadott helyszínein, a manipulációs állomásoknál elvégezendők, míg a szállítási feladatokat éppen ezen állomások között kell végrehajtani. Ennélfogva a mikrorobot munkaterülete funkcionálisan két tartományra osztható, amelyek egymástól térben is elkülönülnek: *transzport* (szállítási, vagy globális) és a *manipulációs* (lokális) tartományok. A két tartomány összehasonlítása megtalálható a 4-2. ábrán.

	Transzport tartomány	Manipulációs tartomány
<i>Funkció</i>	Mikroobjektumok szállítása	Speciális mikromanipulációk végrehajtása
<i>Hely</i>	Mikromanipulációs állomások között	Mikromanipulációs állomásokon
<i>Sebesség</i>	nagy (mm/s)	alacsony ($\mu\text{m/s}$)
<i>Pontosság</i>	$10\ \mu\text{m}$ - $10\ \text{mm}$	$10\ \text{nm}$ - $10\ \mu\text{m}$

4-2. ábra: Transzport és manipulációs tartományok



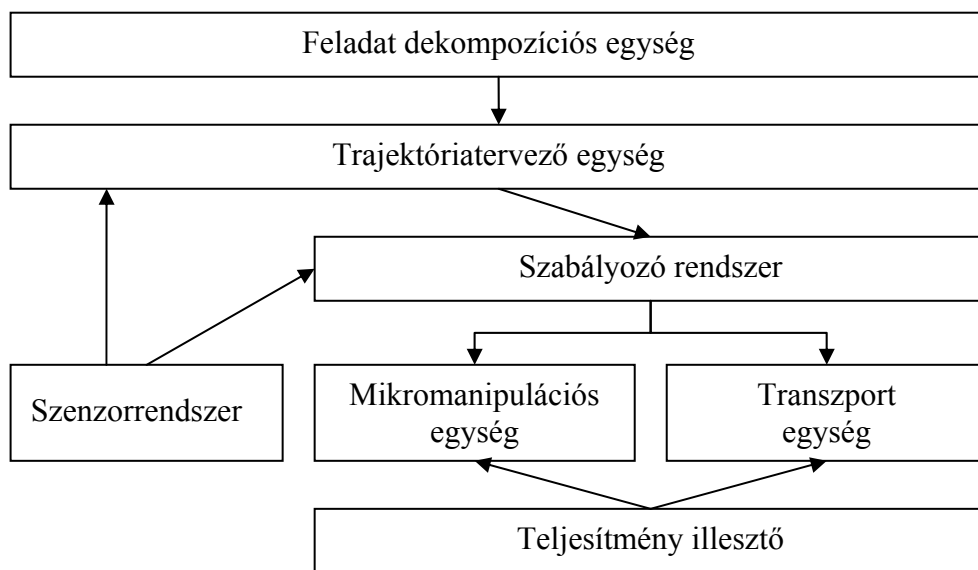
4-3. ábra: Manipulációs állomások a munkacellában

A mikromanipulációs munkacellában a manipulációs állomások egy lehetséges elhelyezkedését mutatja a 4-3. ábra. A munkacella területének jelentős része a szállítási tartományhoz (*T*) tartozik, ebbe "ékelődnek be" a mikromanipulációs állomások (*M*). A mikrorobot az 1-es és 3-as pozíciókban egy manipulációs állomáson tartózkodik

műveletvégzés céljából, míg a 2-es pozícióban lévő mikrorobot éppen úton van az egyik mikromanipulációs állomásról egy másikra.

4.4 A munkacella rendszerteknikai hierarchiája

Az eddigiekben vázolt követelmények alapján *definiáltam a mikromanipulációs munkacella rendszerteknikai felépítését*, amelyet a 4-4. ábra blokkvázlata foglal össze. A továbbiakban ismertetem az egyes blokkok feladatait és esetenként rendszerteknikai megvalósításukat. A mechanikai (mikromanipulációs és transzport) egységek, valamint a szenzorrendszer felépítését és működését az értekezés későbbi részében részletesen is ismertetem. A többi blokk részletes megvalósítása azonban nem része a kutatási célkitűzéseknek, így azokkal csak a rendszerteknikai felépítés koherenciájához szükséges mértékben foglalkoztam. Ezek az alábbiakban funkcionális leírások, a szabályozó rendszer esetében pedig koncepcionális javaslatok formájában találhatók.



4-4. ábra: Mikromanipulációs munkacella rendszerteknikai felépítése

4.4.1 Feladat dekompozíciós egység

A mikromanipulációs munkacella legnagyobb intelligenciával ellátott egysége, amely az átfogó jellegű feladatnak megfelelően elemi lépések sorozatát állítja elő (dekompozíció) a mikrorobot trajektóriatervező és lépésvezérlő rendszere számára. Feladat lehet például egy mikrorendszer összeszerelése, vagy egy objektum elszállítása egyik helyről egy másikra. Ezen feladatok rendszerint manipulációs és transzport műveletek egész sorát igénylik. Az utóbb említett feladat dekompozícióval pl. az alábbi lépésekből álló műveletsorozatra bontható:

- objektum (szerszám, vagy alkatrész) megfogása;
- elindulás;
- szállítás, útvonal (trajektória) követése;
- dokkolás a célállomáson;
- objektum lerakása és a manipulációs műveletek megkezdése.

Ilyen típusú feladatok megoldása tipikusan mesterséges intelligencia algoritmusok alkalmazásával történhet. Szokásos megközelítés, hogy a rendszert az objektumok helyétől, helyzetétől függő állapotokkal jellemezzük. Először meghatározzuk a rendszer kiindulási és célállapotát és számba vesszük a lehetséges elemi operátorokat (lépéseket, műveleteket), amelyek segítségével a rendszer állapota megváltoztathatók. Ezután az operátorok által meghatározott állapottérben egy (sokszor nagyon bonyolult) keresést hajtunk végre, hogy megtaláljuk a kezdeti állapotból a végállapotba vezető optimális (vagy egyáltalán lehetséges) lépéssorozatot. Az egység ezután a feladat elvégzéséhez szükséges egyes részműveleteket az alsóbb szintre továbbítja.

4.4.2 Trajektóriatervező egység

A hierarchia következő szintjén foglal helyet a trajektóriatervező egység. Ennek feladata az átfogó jellegű feladatból dekompozícióval kapott eljárás megtervezése és végrehajtása. Ilyen feladat lehet - a fenti példánál maradva - egyetlen, az összeszerelési műveletben részt vevő alkatrész mozgatása egy "tárolóhelyről" az alkatrész összeszerelési helyére és ott a megfelelő pozícióban való elhelyezése, lerakása. Ehhez a rendszernek legalább korlátozott információkkal kell rendelkeznie környezetéről, ezt szokás világmodellnek nevezni. A szenzorok által szolgáltatott információk és a világmodell segítségével a robot és manipulátorainak térbeli helyzete meghatározható⁴. Ezután következik a tervezés. A robot (és/vagy manipulátorának) jelenlegi helyzete és a cél ismeretében kell egy, vagy több lehetséges útvonalat⁵ találni, amelyen a robotot (és/vagy manipulátorát) célba juttatjuk. A lehetséges útvonalak közül az egyetlen, végül végrehajtásra kerülő útvonal kiválasztása többféle szempont figyelembe vételével történhet. Választhatjuk a legrövidebb, vagy a leggyorsabb útvonalat. Tipikusan ennél összetettebb igényeink vannak, ezért úgy szokás eljárni, hogy definiálunk egy költségfüggvényt, amely a számunkra érdekes fizikai változókból képzett skalár függvény és ennek minimumára optimalizáljuk az útvonalat. Azért célszerű így eljárni, mert ekkor ismert (állapottér, vagy gráf) kereső eljárások alkalmazhatók, amelyek minimális költségű útvonalat keresnek. Ez esetben az optimalizálási eljárás szükség szerint történő megváltoztatása nem jár a keresési algoritmus megváltoztatásával, csupán a költségfüggvényt kell módosítanunk. A kiválasztott megoldás szolgál a robotrendszer szabályozója alapjelül és továbbításra kerül a hierarchia alacsonyabb szintjére.

A fenti megoldás tulajdonképpen a makrorobotikában is alkalmazható. Fel kell azonban hívni a figyelmet a mikrorobotikai környezet sajátosságai miatt egy nagyon fontos rendszertechnikai következményre. Míg a makrorobotikai rendszerekben a szállítási és manipulációs feladatok végrehajtása elválasztható egymástól, ezért mind a trajektóriatervezés, mind a szabályozás szintjén akár önálló rendszerek is képesek ezen feladatokat ellátni, ezt a mikrorobotikában nem lehet minden esetben megtenni. Ennek fő oka a rendszerek kis méretében keresendő, mely azt eredményezi, hogy a szállítási és a manipulációs feladatokban rendszerint ugyanazon beavatkozók vesznek részt, ezért

⁴ A vázolt rendszertechnikai felépítés nem rögzíti, hogy a világmodell a szenzorrendszernek, vagy a trajektóriatervező rendszernek a része. Ennek az az oka, hogy mindkét megoldás megfelelő lehet, attól függően, hogy a környezetre vonatkozó információk mennyire részletes és mennyire statikus. Jól ismert környezet esetében, vagyis amikor a világmodell nem változik, a szenzorrendszerbe integrálható, így az a rendszer pozícióját közvetlenül képes szolgáltatni. Amennyiben a modellt éppen a szenzor által szolgáltatott információk alapján időnként módosítani szükséges, a modellt inkább a tervező egységhez helyezik közelebb.

⁵ Trajektóriának ezt, a kiválasztott célhoz vezető utat, vagy lehetséges utakat nevezzük.

nem lehet az irányításukat maradéktalanul elválasztani egymástól (pontosabban a rendszertechnika magasabb szintjén kell ezt a feladatot elvégezni). A később bemutatásra kerülő piezoelektromos mikrorobot is szolgáltat erre példát. A manipulátor vezérlése egy gömbfelületen mozgó piezoelektromos lábbal történik, a robot testét is ugyanilyen felépítésű lábak mozgatják a talajon. Egy láb lépésköze (egy adott beállításban) kb. $3\ \mu\text{m}$, ezzel a robot testének pozicionálási pontossága is kb. $3\ \mu\text{m}$. Amennyiben a manipulátor hossza $50\ \text{mm}$, míg a rögzítéséhez és mozgatásához szükséges gömb - amelyen a piezoláb lépked - sugara $5\ \text{mm}$, a manipulátor végének legkisebb elmozdulása a láb pozicionálásához képest tízszeresére növekszik, vagyis $30\ \mu\text{m}$ lesz. Tekintettel arra, hogy a manipulátor pontosságát kívánatos az elérhető legkisebb mérettartományban tartani, szükséges, hogy a manipulátor pozicionálásában a robot testét mozgató lábak is részt vegyenek; ekkor a robottest lépkedésével együtt mozog a manipulátor is. Ennek rendszertechnikai követelménye az, hogy a mechanikai transzport egység és a manipulációs egység irányítását együttesen kell megvalósítani és ugyanez igaz a trajektóriatervezésre is, ahogyan azt az ábrán is jelöltük.

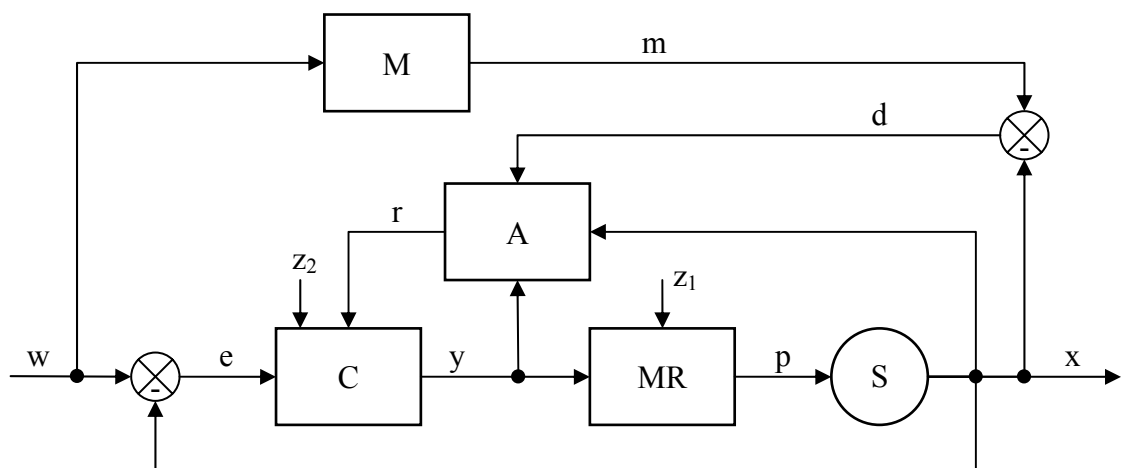
A trajektóriatervező általában nem működik folyamatosan, a forrástól a célig tartó útvonal megtervezése után átadja ezen információkat a szabályozó rendszernek, amely a robot és manipulátorának mozgását irányítja. A környezetben bekövetkező jelentős változások (pl. egy előre nem látott akadály felbukkanása), vagy mozgó cél követése azonban megkövetelheti, hogy a trajektóriatervező folyamatosan újraszámolja az útvonalat.

4.4.3 Szabályozó egység

A mikrorobot rendszerek egyik legnagyobb problémája a pontatlan mozgás kiküszöbölése. A nyílt hurkú irányítás a mikrorobotikai rendszerek esetében rendszerint kudarcot vall. Ezért a munkacella megfelelő pontosságú irányítását egy intelligens szabályozó rendszer alkalmazásával szükséges megoldani. Részvételemmel, valamint a Karlsruhe-i Egyetem Folyamatszabályozási, Robotikai és Automatizálási Intézetének munkatársaival közösen mikrorobotikai környezetre három szabályozási eljárás koncepcióját dolgoztuk ki, amelyet az alábbiakban ismertetek. Ezek a modellbázisú adaptív szabályozó, a neurális hálózat alapú szabályozó, valamint a fuzzy szabályozó. Ezt követően röviden ismertetem a mikrorobot, mint szabályozott szakasz modellezésének lehetséges eljárásait.

4.4.3.1 Modellbázisú adaptív szabályozás

Szokásos szabályozástechnikai megközelítés a modellbázisú (adaptív) szabályozó rendszer alkalmazása, amelynek felépítése a 4-5. ábrán látható. A szabályozási folyamatban alkalmazott rendszertechnikai modell megadja a rendszernek, mint folyamatnak a kimenetét a bemeneti jelek függvényében.



4-5. ábra: Modellbázisú adaptív szabályozás

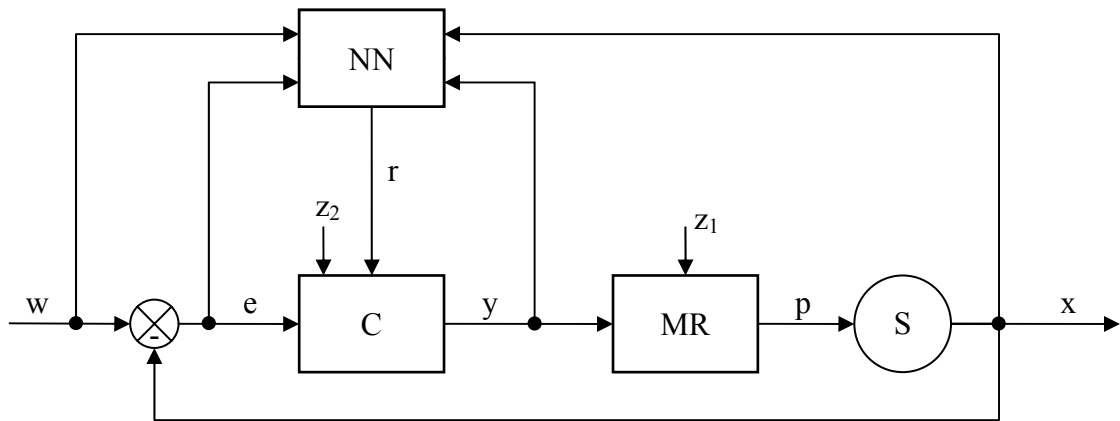
A szabályozó rendszer bemenetére érkezik a w jel, amely a mikrorobot kívánt pozíciója. A C szabályozó y kimenete az MR mikrorobot mozgató utasítása. A mikrorobot tényleges p pozícióját az S szenzorok által mért x jel szolgáltatja. A hagyományos zárt szabályozási kört a szabályozó, a mikrorobot és a szenzor alkotja. A szabályozási kör adaptív viselkedését a külső kör végzi. Ebben helyezkedik el a mikrorobot M matematikai modellje, amely a robot fizikai és kinematikai paramétereiből épül fel (robot tömege, formája, meghajtás fizikai elve, stb.). A modell általában rendkívül összetett. Az A adaptív egység úgy módosítja a szabályozó r paramétereit, hogy a valódi robot p pozíciója (pontosabban annak mért x értéke) és a modell által számított m érték közötti eltérés ($d = m - x$) kicsi legyen. (Amennyiben elhagyjuk az M és az A tagokat, a szabályozó elveszti adaptációs képességét és egy nem adaptív szabályozót kapunk.) A környezeti zavaró hatásokat z_1 és z_2 reprezentálja. z_1 a véletlen zavarás, amely előre nem számolt és a szabályozóra kifejtett hatása így nem is ismert, míg z_2 a rendszeres zavarás, amely számítható és így mindig ugyanazt a hatást fejt ki a szabályozóra. Az adaptív szabályozás célja, hogy a mikrorobot a kívánt pozícióba jusson (pontosabban a kívánt trajektóriát járja be a célig), miközben a d hiba közel zérus. Mindez egy nagyon pontos matematikai modellt igényel és a probléma megoldása nem triviális.

A modellbázisú adaptív szabályozás előnye, hogy elvileg tökéletes szabályozás érhető el alkalmazásával. Hátránya azonban, hogy kellően pontos és így szükségképpen bonyolult matematikai modellt kell hozzá alkotni, ezért a modell alapján végzett számítások a szabályozási folyamat során hatalmas számítási kapacitást igényelnek.

4.4.3.2 Neurális hálózat alapú szabályozó

Egy neurális hálózatot alkalmazó, mikrorobotikai alkalmazásra javasolt szabályozó rendszer felépítése látható a 4-6. ábrán. A szabályozási rendszer két kört tartalmaz. A belső visszacsatolós körben helyezkedik el az MR mikrorobot, az S szenzor és a C szabályozó. A külső körben találjuk az NN neurális hálózatot, amely egy on-line tanulási és adaptációs eljárás révén a szabályozó r paramétereinek módosításában (paraméter adaptáció) tölt be fontos szerepet. A neurális hálózat képes megtanulni a legtöbb szabályozási problémát, amelyet a z_2 rendszeres zavarások okoznak. A neurális hálózat bemenő paramétere a mikrorobot trajektóriájának számított w értéke, a robot

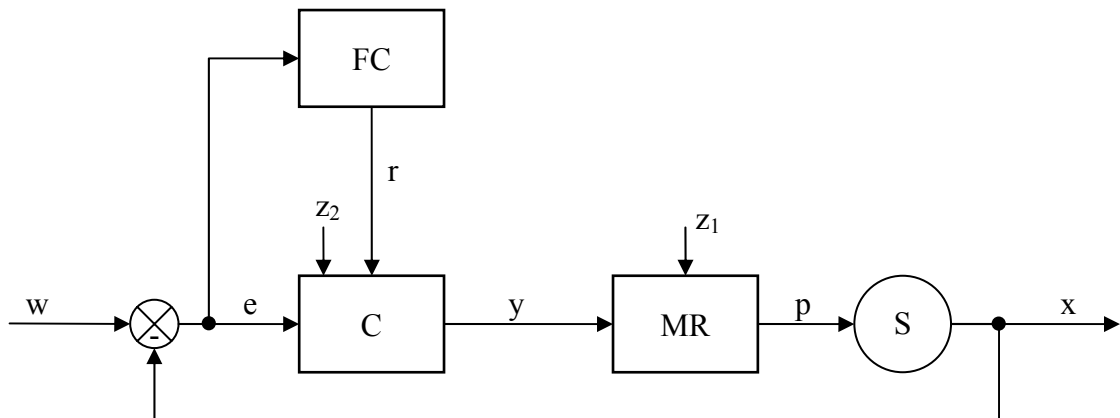
mért x pozíciója, a szabályozó y kimenete, valamint az e szabályozási hiba (a robot tényleges pozíciójának a kívánt értéktől való eltérése).



4-6. ábra: Szabályozó neurális hálózat alkalmazásával

4.4.3.3 Fuzzy szabályozó

A fuzzy szabályozó nem igényel adaptációs egységet. Egy javasolt megvalósítása a 4-7. ábrán látható. A fuzzy szabályozó (FC) itt közvetlenül befolyásolja a C szabályozót paraméterein keresztül. A fuzzy szabályozó bemenete az e szabályozási hiba, amely a robot mért x pozíciójának a kívánt w trajektóriától való eltérése. A szabályozás sikeres működésének feltétele a fuzzy szabályozó szabálybázisának felépítése a mikrorobot viselkedésére vonatkozó a priori tudás alapján.



4-7. ábra: Fuzzy szabályozó

4.4.3.4 Mikrorobot, mint szabályozott szakasz modellezése

A fent ismertetett három szabályozási megoldás közül úgy tűnik, hogy csupán a modellbázisú adaptív szabályozás igényli a mikrorobot rendszertechnikai modelljét. Ez nincs így. Nem szóltunk eddig ugyanis a C szabályozó megvalósításáról, amely lehet hagyományos P, D és I tagokból felépülő, vagy maga is fuzzy alapú I. vagy II. típusú (folytonos, vagy digitális) szabályozó. Ennek megtervezéséhez és megvalósításához pedig szükségünk van a mikrorobot, mint szabályozott szakasz dinamikájának

ismeretére, amelyhez két úton juthatunk. Egyik lehetőségünk, hogy elméleti megfontolások alapján a mikrorobot fizikai jellemzőiből felépülő dinamikai modellt⁶ készítünk, másrészt empirikus úton, a mikrorobot viselkedésének megfigyelése alapján valamilyen ismert rendszertechnikai modellel közelíthetjük a viselkedését. Mindkét esetben végeredményben egy közelítő modellt kapunk, amelyet a szabályozó megvalósításához tudunk felhasználni, legyen az egy adaptív modellbázisú, neurális hálózat alapú, vagy fuzzy szabályozó. A modell pontossága és a megalkotásához figyelembe vett paraméterek, vagyis a modell komplexitása azonban kétségkívül eltérő lehet különböző szabályozási környezetben. A modellbázisú adaptív szabályozás a mikrorobot feltételezett pozícióját a matematikai modell alapján a szabályozás teljes időtartamában folyamatosan újraszámolja és összehasonlítja a robot tényleges pozíciójával, így ennek a modellnek a komplexitás igénye nagyobb, mint más eljárások esetében. A mikrorobot viselkedésének valamilyen pontosságú modellezésétől azonban egyik szabályozási eljárás sikeres alkalmazásának reményében sem tekinthetünk el.

4.4.4 Mikromanipulációs egység

A mikromanipulációs egység végzi a mikroméretű összeszerelési, vágási, megfogási stb. feladatokat. Korábban ismertetésre kerültek a mikromanipulációs egységgel szemben támasztott követelmények, a mikromanipulációk automatizálási kérdései, valamint a tipikus mikromanipulációs műveletek.

4.4.5 Transzport egység

A transzport egység feladata alkatrészek, összeszerelt objektumok, biológiai sejtek, stb. szállítása a mikromanipulációs munkacella egyik részéről a másikra. Egy korábbi fejezetben már tárgyaltuk különböző szállítási koncepciók mikrorobotikai környezetben való alkalmazhatóságát, valamint bemutatásra került néhány mikrorobotikai transzport rendszer.

4.4.6 Szenzor egység

A szenzor egység fő feladata, hogy a mikromanipulációs rendszer (és környezete) állapotáról mérési eredményeket szolgáltatson. Tulajdonképpen interfészt biztosít a környezet és a szabályozó között. A mikromanipulációs munkacella fő feladatai a nagyon pontos munkavégzés és a szállítás. Ennélfogva a szabályozó rendszer számára a legfontosabb információk a mikrorobot és manipulátorának pozíciója és orientációja, ezért a mikromanipulációs munkacella szenzorainak elsősorban *pozíció- és orientációmérési* feladatokat kell elvégezniük.

Mikrorobotikai szenzorokkal szemben támasztott főbb követelmények az alábbiak:

- **Pontosság;** a műveletvégzés és a szállítási feladatok szabályozásához szükséges mértékű pontosságot jelenti. Ez a szükségleteknek megfelelően térben és időben változhat.
- **Gyorsaság;** a folyamat állapota és a szenzor által arról szolgáltatott információ rendelkezésre állása között a lehető legrövidebb időnek kell eltelnie. Ez egyrészt azért fontos, hogy az információ a rendszer aktuális állapotára vonatkozzon és ennek megfelelően legyünk képesek döntéseket hozni. Másrészt hosszú

⁶ Az értekezés 5. fejezete egy piezoelektromos mikrorobot mechanikai jellemzőiből felépülő dinamikai modellt tárgyal.

jelfeldolgozási idő a szabályozási körben holtidős tagként jelenik meg, amely a szabályozást lengővé, instabillá teheti.

- **Minimális beavatkozás;** cél az, hogy a szenzor a mérendő folyamatba a lehető legkisebb beavatkozást tegye. Ennek jelentősége mikrorendszerek esetében fokozott.
- **Információ feldolgozás;** a szenzornak a rendszer számára megfelelő alakú és feldolgozható minőségű információt kell szolgáltatnia. Pl. vizuális szenzoroknál nem elegendő pusztán a látvány előállítás, hanem el kell végezni a kép feldolgozását is a pozícióra vonatkozó adatok kinyerése érdekében.

A szenzorrendszer a mikrorobot pozíciójára és orientációjára vonatkozó információkat a szabályozó mellett a trajektóriatervező egység számára is rendelkezésre bocsátja. Ennek különösen globális pozicionálási problémák esetében van jelentősége. Ekkor a szenzorrendszer információi alapján kerül aktualizálásra a rendszer világmodellje és ennek segítségével végezhető el a mikrorobot globális pozíciójának meghatározása.

4.4.7 Teljesítmény illesztő egység

Általában a mikrorendszerek kis méretük, kis energiájú munkavégzési igényeik miatt alacsony teljesítmény igényűek. Mint említettük, a mikrorobotikai rendszerek gyakran egyszerre tartalmaznak makro- és mikrorendszer technológiai egységeket. Ezek jelszintje azonban egymástól nagyon eltérő lehet. Maguk a mikrorendszerek kis teljesítményszintjük mellett is igényelhetnek nagy feszültségszintet (pl. piezoelektromos beavatkozók), nagy elektromos térerősséget, nagy fényerőt (pl. lézeres optikai csapda), stb. A jelszintek széles tartományban való előfordulása miatt rendszerint szükség van egy teljesítmény illesztő egységre, amely a mikromanipulációs munkacella elektromechanikai, manipulációs, szabályozó és szenzorrendszere, valamint egyes részegységeik közötti jelszintek transzformációját végzi.

4.5 A MINIMAN rendszer

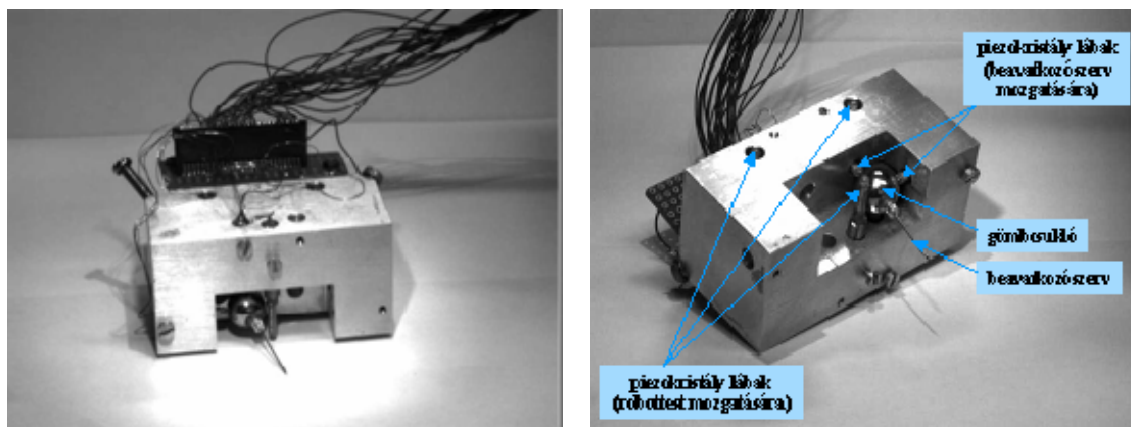
Annak érdekében, hogy a mikrorobotikai vizsgálatainkat a gyakorlatban is elvégezhessük, szükséges volt, hogy a laboratóriumban rendelkezésünkre álljon egy működő mikrorobotikai rendszer, amelyen kísérleteket végezve a mikromanipulációs munkacellára és a mikrorobotok rendszertechnikájára vonatkozó kijelentéseinket általánosíthatjuk. Ehhez az szükséges, hogy maga a kísérleti rendszer is kellően általános célú legyen. Kiindulásként a Karlsruhe-i Egyetem Folyamatszabályozási, Robotikai és Automatizálási Intézete (IPR) által kifejlesztett MINIMAN (MINIatürizált mikroMANipulátor) nevű rendszerét választottuk. A németországi egyetemen megalkotott koncepciót továbbfejlesztve és ezt a továbbfejlesztett modellt a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén megépítve rendelkezésünkre állt egy olyan mikrorobotikai rendszer, amely mechanikai működését tekintve és irányítástechnikai koncepciójában alkalmas általános célú mikrorobotikai vizsgálatokra.

A MINIMAN továbbfejlesztése nagyrészt azon koncepció alapján történt, amelyet az értekezés későbbi fejezeteiben fogok részletezni. Másrészt, tekintettel a mikrorobotika területén rendelkezésre álló viszonylag kevés tudományos háttérre és szabványos megoldásra, sok esetben tapasztalati úton jártunk el, amelyeket a Karlsruhe-i Egyetemen, illetve a BME-n gyűjtöttünk. Itt ezért kevés indoklással, inkább a megértéshez szükséges mértékben röviden, tényszerűen ismertetem a MINIMAN

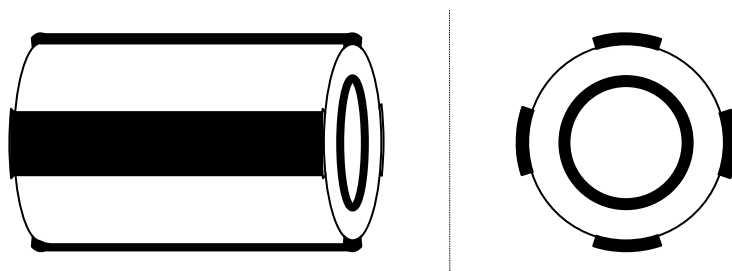
rendszer felépítését. Kitérek azon vonatkozásaira, amelyek az általam végzett kutató és kísérletező munka révén javaslatomra kerültek megvalósításra. Tekintettel azonban arra, hogy a MINIMAN egy hosszabb, sok résztvevős kutatási projekt keretében valósult meg, a rendszer megépítését a projekt csapat egésze eredményének tulajdonítom. A MINIMAN rendszerrel kapcsolatban részletes információk megtalálhatók *Vajda-Vogel* [11], *Helybély* [12] és *Kleinheincz* [13] műveiben. A mikrorobot későbbi változatai az irodalomban MINISTER (MINIaturized STEpping Robot) néven találhatók. A rendszer egyes elemeinek a saját kutatómunka keretében végzett részletes elemzése pedig az értekezés későbbi fejezeteiben kerül sorra.

4.5.1 A MINIMAN mechanikai felépítése

A BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén megépített MINIMAN mikrorobot teste egy 60×30×30 mm-es tömör alumínium tömbből lett kialakítva. A robot három piezoelektromos kerámiából készített lábón áll úgy, hogy egy elöl és kettő a robot hátsó részén helyezkedik el. Az eredeti németországi modellen ez éppen fordítva volt, a módosítás oka az, hogy ezzel - tapasztalatok szerint - pontosabb mozgás volt biztosítható, valamint az, hogy így az elülső láb két oldalán akár két manipulátor is elhelyezhető. A mikrorobot az egyik manipulátorával felszerelve a 4-8. ábrán látható.



4-8. ábra: A MINIMAN mikrorobot

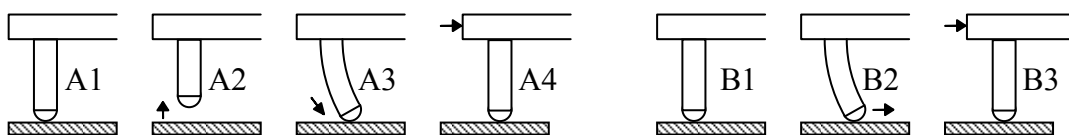


4-9. ábra: Piezo lábak és az elektródák

A piezo lábak egyforma, kb. 20 mm hosszú, 3 mm külső és 1.5 mm belső átmérőjű cső formájú piezoelektromos kerámiából lettek kialakítva. A piezo csövek külső felületén a 4-9. ábrán látható módon szimmetrikusan négy szegmensben egy-egy elektróda helyezkedik el. A csövecske belső felületén ugyancsak kialakításra került egy elektróda. Az egyes elektródákra kapcsolt feszültségek hatására az inverz piezoelektromos hatásnak megfelelően a piezo csövecske deformálódik: megfelelő vezérléssel elérhető a

csövecske megnyúlása, hosszanti összehúzódása, illetve elgörbítése. A csövecske (láb) mozgása ezen elemi deformációkból építhető fel. A lábak jobb tapadása érdekében a végükre egy-egy rubingolyó került felragasztásra.

A robottest mozgása a három piezo láb elektromos feszültség hatására bekövetkező deformálásával történik a 4-10. ábrának megfelelően. Egy-egy láb elektródáira olyan feszültségsorozatot kapcsolunk, amely a kiinduló helyzetből (A1) először a láb összehúzódását, ezáltal felemelését (A2), majd elgörbítését és kinyújtását, vagyis egy kicsit odébb lerakását (A3), ezt követően kiegyenesítését (A4) eredményezi. A deformációs sorozatot megfelelő sebességgel és a lábak összehangolt vezérlésével elvégezve a mikrorobot teste elmozdul, vagyis "a robot megtesz egy lépést". Ezen lépés során, amikor a piezolábak a talajon vannak, tapadva segítik a mikrorobot elmozdulását, azonban a felemelésük alatt a robot teste kissé megbillen, ezáltal "imbolygóvá" teszi a robot járását.



4-10. ábra: Piezolábak mozgása, a robot lépése

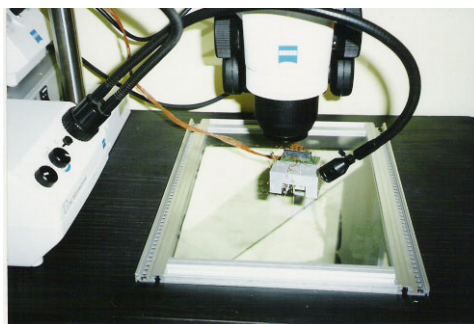
Egy másik megoldásban a lábakat nem emeljük fel, hanem a kiinduló helyzetből (B1) egy gyors feszültségváltással a talajon előre csúsztatjuk (B2), majd lassan kiegyenesítjük, miközben a robot teste előre mozdul (B3). A robot mozgásának részletes leírását a mozgást modellező fejezet tartalmazza. Itt annyit érdemes megjegyezni, hogy a mikrorobot egy lépéssel kb. 3-5 μm -t képes megtenni, a haladási sebesség pedig elérheti az 1-5 mm/s értéket.

Kézenfekvőnek tűnik, hogy a mikrorobot manipulátorát is hasonló elven működtessük, ahogyan a test mozgása történik. E célból három, egymásra merőleges tengely mentén helyeztünk el a mikrorobot mozgátást végző piezolábakkal azonos felépítésű, elektródákkal ellátott piezokerámia csövecskét. A három tengely metszéspontjában egy acélgolyó helyezkedik el, amelyet egy mágnes rögzít a mikrorobot hasához, de a három manipulátorláb támasztja meg. A manipulátorlábak már ismert vezérlésével azok az acélgolyó felületén "gyalognak", ezzel az acélgolyó elfordítható és így a hozzá rögzített beavatkozó - egy látszólagos gömbfelület mentén - három dimenzióban pozicionálható. A kísérleti megvalósításban a beavatkozót egy orvosi injekciós tű reprezentálja (ld. 4-8. ábra). Meg kell jegyezni, hogy a manipulátor pontatlansága nagy mértékű, ami többek között abból is adódik, hogy a golyó végén levő manipulátor kar viszonylag nagy nyomatékkel terheli a csuklót.

A mikrorobotot egy üveglapon helyeztük el a megfelelő súrlódási viszonyok érdekében, valamint a robot pozíciójának alulról történő optikai mérése céljából. A mikromanipulációk mikroszkópon keresztül figyelhetők meg, illetve a mikroszkópra szerelt CCD kamera képének kiértékelésével válnak mérhetővé. A 4-11. ábrán látható a kísérleteinkhez a BME-n megvalósított mikromanipulációs munkacella.



a)



b)

4-11. ábra: Kísérleti mikromanipulációs állomás a MINIMAN rendszerrel

4.5.2 A MINIMAN vezérlő rendszere

A rendszer vezérlését kezdetben egy Siemens C167-es mikrokontroller alapú, dual-portos RAM-mal ellátott vezérlő végezte, amely a Karlsruhe-i Egyetemen került kifejlesztésre. A nem kielégítő dokumentáltság, a sorozatos meghibásodások, az alkatrészek beszerzési problémái, valamint a vezérlő funkcionális hiányosságai egy új vezérlőelektronika fejlesztését igényelték.

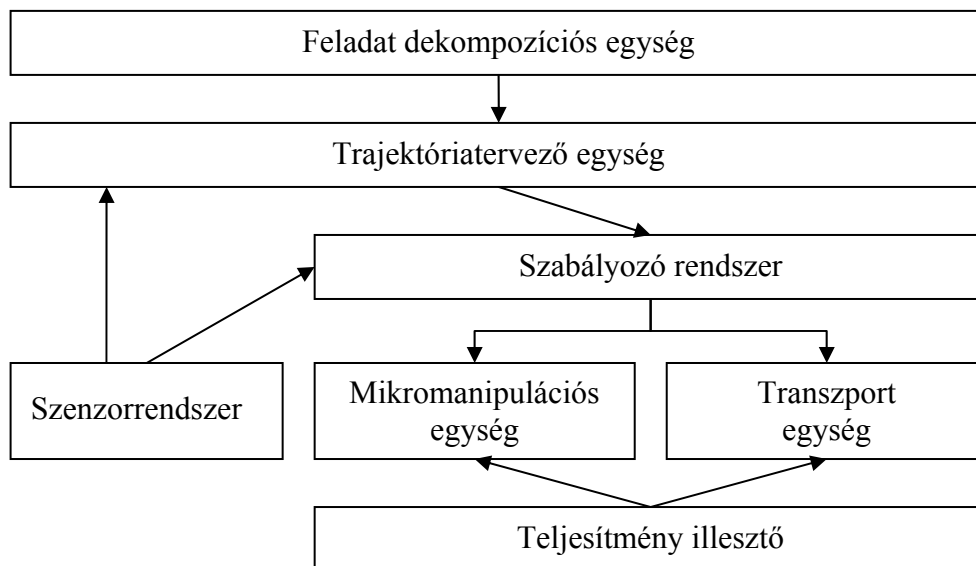
A mikrorobot vezérlését egy mikrokontroller alapú rendszer (MIPCO) végzi, amely a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén került kifejlesztésre. Jelenlegi megvalósításában piezo láb hármasonként egy-egy vezérlő kártya került kialakításra, amelyen elhelyezkedő mikrokontroller (ATMEL AT90S8515) felelős az egyes lábakhoz rendelt D/A átalakítók írásáért. A D/A kimenetéhez nagyfeszültségű műveleti erősítők (APEX PA42) csatlakoznak, a láb meghajtásához ± 150 V feszültség szükséges. Az erősítők kimenetei a piezolábak 4-4 elektródáira vannak vezetve, míg a piezoláb belső elektródája zérus potenciálú. A kártyák RS485 buszon keresztül csatlakoznak egymáshoz, illetve a vezérlő PC-hez. A lábhármasonként kialakított tagolás révén a mikrorobot testének mozgásvezérlése, illetve egy-egy manipulátor vezérlése egy-egy kártyához került hozzárendelésre. A moduláris, elosztott vezérlés lehetővé teszi, hogy a mikrorobot vezérlő rendszere a tényleges kiépítéstől függően legyen képes a megfelelő modulok meghajtására. A vezérlő rendszer részletes felépítése megtalálható *Vajda-Vogel* [11] dolgozatában.

4.6 Új tudományos eredmények

Az ebben a fejezetben részletesen tárgyalt új tudományos eredményeket az alábbi tézis foglalja össze.

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 szenzorrendszertől kapott adatok alapján szükség szerint újratervezze a megkívánt útvonalat.

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

5. PIEZOELEKTROMOS MIKROROBOT DINAMIKAI MODELLJE

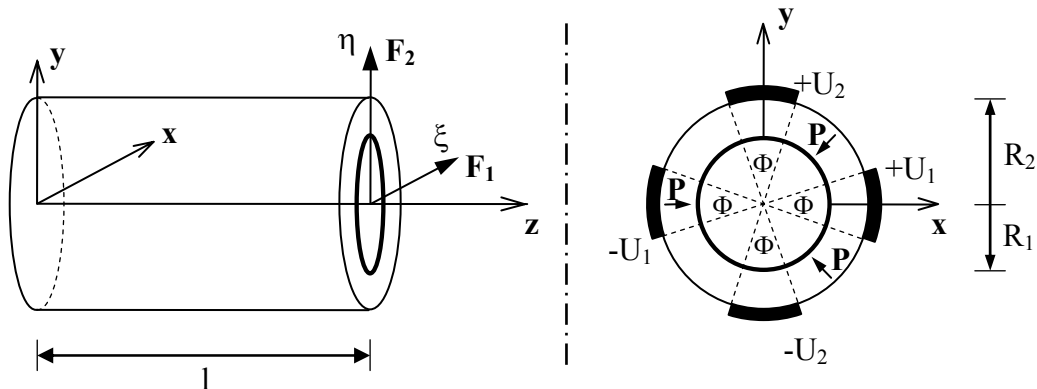
A mikromanipulációs munkacella szabályozási problémáinak vizsgálata során megállapítottuk, hogy a választott szabályozási eljárástól függetlenül szükségünk van a rendszer dinamikájának ismeretére. Ez a fejezet a korábban ismertetett MINIMAN piezoelektromos mikrorobot dinamikai modelljét tárgyalja.

A modellezést két lépésre bontjuk. A robot az inverz piezoelektromos hatás révén „lépkedő” mozgást végez. A mozgás modellezése során ezért első lépésként az a célunk, hogy meghatározzuk a piezoelektromos lábak villamos feszültség hatására létrejövő mechanikai deformációját. A modellezés második lépésében a lábak mechanikai deformációja alapján vizsgáljuk a robottest mozgását.

5.1 Hengeres piezoelektromos cső hajlítása

5.1.1 Megnyúlás és mechanikai feszültség

A piezoelektromos lábak mechanikai deformációjának vizsgálatát az inverz piezoelektromos hatás, valamint a mechanikai szilárdságtan és rugalmasság összefüggései alapján végezzük. A mikrorobot lába egy hengeres csövecské, amely belül üreges, a henger fala pedig piezoelektromos tulajdonsággal rendelkező ún. piezokerámiából készült. A csövecské külső felületén hosszanti irányban négy elektróda helyezkedik el, míg a belső falán szintén található egy elektróda. Az 5-1. ábra a geometriai változók, a koordinátarendszerek, valamint az elektródákra kapcsolt feszültségek értelmezését tünteti fel, míg az 5-2. ábra a csövecské egy elemi hosszúságú darabjának két dimenzióban bekövetkező alakváltozását ábrázolja.



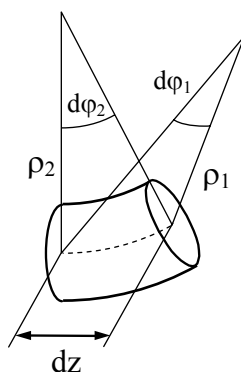
5-1. ábra: Hengeres piezoelektromos csövecské geometriája

A rúd megnyúlása a keresztmetszet mentén x -től és y -től függően is változik. A keresztmetszet egy tetszőleges $Q(x,y)$ pontjában a relatív megnyúlás az elemi rúdrészlet geometriája alapján

$$s_z(x, y) = \frac{(\rho_1 - x)d\varphi_1 - dz + (\rho_2 - y)d\varphi_2 - dz}{dz}, \quad (5-1)$$

azaz tagonként felírva

$$s_z(x, y) = \rho_1 \frac{d\varphi_1}{dz} - x \frac{d\varphi_1}{dz} + \rho_2 \frac{d\varphi_2}{dz} - y \frac{d\varphi_2}{dz} - 2. \quad (5-2)$$



5-2. ábra: Elemi rúdrészlet hajlítása

A mechanikai deformáció a csövecske végeire ható mechanikai erők, valamint az elektródákra kapcsolt villamos feszültség hatására következik be. Ennek tárgyalásához felírjuk az inverz piezoelektromos hatás lineáris mátrix egyenletét

$$\mathbf{s} = \mathbf{dE} + \mathbf{St} \quad (5-3)$$

Esetünkben a mátrixegyenlet alábbi skalár formáját használjuk:

$$s_z(x, y) = d_{31}(x, y) \cdot E(x, y) + S_{11}^E(x, y) \cdot \sigma_z(x, y), \quad (5-4)$$

$s_z(x, y)$	relatív megnyúlás;
$E(x, y)$	elektromos térerősség;
$d_{31}(x, y)$	piezoelektromos állandó (elektromos térerősségre merőleges irányú megnyúlás esetén, negatív mennyiség);
$\sigma_z(x, y)$	mechanikai feszültség;
$S_{11}^E(x, y)$	mechanikai engedékenységi együttható (a rugalmassági, vagy Young-modulus reciproka).

Az egyenletből kifejezve a z irányú mechanikai feszültséget

$$\sigma_z(x, y) = \frac{1}{S_{11}^E(x, y)} \cdot s_z(x, y) - \frac{d_{31}(x, y)}{S_{11}^E(x, y)} \cdot E(x, y) \quad (5-5)$$

A piezo csövecske terhelt és hajlított helyzetben nyugalmi állapot esetén mechanikailag egyensúlyban van, vagyis minden A keresztmetszetre

$$\int_A \sigma_z(x, y) dA = 0 \quad (5-6)$$

A fenti egyensúlyi integrálegyenletbe behelyettesítjük σ_z és s_z kifejezését.

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{d\varphi_1}{dz} \int_A \frac{1}{S_{11}^E(x,y)} dA - \frac{d\varphi_1}{dz} \int_A \frac{x}{S_{11}^E(x,y)} dA + \rho_2 \frac{d\varphi_2}{dz} \int_A \frac{1}{S_{11}^E(x,y)} dA - \\ - \frac{d\varphi_2}{dz} \int_A \frac{y}{S_{11}^E(x,y)} dA - 2 \int_A \frac{1}{S_{11}^E(x,y)} dA - \int_A \frac{d_{31}(x,y)}{S_{11}^E(x,y)} E(x,y) dA = 0 \end{aligned} \quad (5-7)$$

Az egyensúlyi egyenlet második és negyedik tagjában a hengerszimmetria miatt az integrálok értéke zérus⁷, így maguk a tagok is zérusok. Az egyenletet egyszerűsítve és rendezve kapjuk, hogy

$$\rho_1 \frac{d\varphi_1}{dz} + \rho_2 \frac{d\varphi_2}{dz} = 2 \left(1 + \frac{\alpha}{2} \right) \quad (5-8)$$

ahol

$$\alpha = \frac{\int_A \frac{d_{31}(x,y)}{S_{11}^E(x,y)} E(x,y) dA}{\int_A \frac{1}{S_{11}^E(x,y)} dA} \quad (5-9)$$

A rúdtengely görbületei külön-külön a fenti egyenletből nem határozhatók meg, de Bernoulli feltételezéséből⁸ kiindulva szimmetria okokból elfogadhatjuk, hogy

$$\rho_1 \frac{d\varphi_1}{dz} = \rho_2 \frac{d\varphi_2}{dz} = 1 + \frac{\alpha}{2} \quad (5-10)$$

Innen pedig meghatározható a relatív megnyúlás a görbületek függvényében, amint a fenti mennyiségeket az (5-2) egyenletbe írjuk. Egyszerűsítés és rendezés után kapjuk

$$s_z(x,y) = - \left(1 + \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \left(\frac{x}{\rho_1} + \frac{y}{\rho_2} \right) + \alpha \quad (5-11)$$

A gyakorlatban szokásos⁹ esetekben $\alpha \ll 1$, így $1 + \alpha/2 \approx 1$. Így nagyon jó közelítéssel

⁷ A második tagban az integrálást elvégezve kapjuk, hogy

$$\int_A \frac{x}{S_{11}^E(x,y)} dA = \iint_{r,\vartheta} \frac{r^2 \cos \vartheta}{S_{11}^E(r,\vartheta)} d\vartheta dr = \int_r \frac{r^2}{S_{11}^E(r)} \left(\int_{\vartheta=0}^{2\pi} \cos \vartheta d\vartheta \right) dr = 0$$

mert $\cos \vartheta$ teljes periódusra vonatkozó integrálja zérus. A negyedik - a számlálóban y -t tartalmazó - integrál hasonlóképpen zérus. Az integrál zérus értéke a geometria mellett az anyagállandók hengerszimmetriája mellett következik csak be, ekkor ugyanis $S(r, \vartheta) = S(r)$, így a belső integrálból kiemelhető.

⁸ Bezák G.: Mechanika - Szilárdságtan. Jegyzet. Bp., 1987. [14] 106-107.o. és 128-130. o.

⁹ Az α nagyságrendjének érzékeltetésére tekintsünk egy tömör, 1.5 mm sugarú PXE-52 anyagú piezoelektromos kerámia hengert. Legyen az egyik elektróda a henger palástján, míg a másik a tengely mentén. Kapcsoljunk az elektródák közé $U=150$ V feszültséget. α értékét ekkor egyszerűen számíthatjuk:

$$\alpha = \frac{\int_A \frac{d_{31}(x,y)}{S_{11}^E(x,y)} E(x,y) dA}{\int_A \frac{1}{S_{11}^E(x,y)} dA} = \frac{-270 \cdot 10^{-12} \text{ As/N} \cdot 150 \text{ V}}{16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N} \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \cdot \frac{(1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \pi}{1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = -2.7 \cdot 10^{-5}$$

Bár α értéke függ az elektródák közé kapcsolt U feszültségtől, piezoelektromos környezetben szokásos feszültségintek ($U < 1000$ V) mellett abszolút értéke $2 \cdot 10^{-4}$ -nél kisebb.

$$s_z(x, y) = -\left(\frac{x}{\rho_1} + \frac{y}{\rho_2}\right) + \alpha \quad (5-12)$$

A mechanikai feszültség pedig s_z (5-5) egyenletbe való helyettesítésével

$$\sigma_z(x, y) = \frac{1}{S_{11}^E(x, y)} \left(-\frac{x}{\rho_1} - \frac{y}{\rho_2} + \alpha - d_{31}(x, y) \cdot E(x, y) \right) \quad (5-13)$$

5.1.2 Mechanikai feszültség forgatónyomatéka

A mechanikai feszültség forgatónyomatéka a hajlítás tengelyére vonatkozóan

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \int_A \mathbf{r} \times \mathbf{k} \sigma_z(x, y) dA = \int_A (x\mathbf{i} + y\mathbf{j}) \times \sigma_z(x, y) \mathbf{k} dA = \\ &= \mathbf{i} \int_A y \sigma_z(x, y) dA - \mathbf{j} \int_A x \sigma_z(x, y) dA \end{aligned} \quad (5-14)$$

A mechanikai feszültséget behelyettesítve és a rendszer hengersizmetriájának felhasználásával az integrálást elvégezve kapjuk, hogy

$$\mathbf{M} = M_x \mathbf{i} + M_y \mathbf{j}, \quad (5-15)$$

$$M_x = -\left(\frac{I_E}{\rho_2} + \beta_2\right) \quad (5-16)$$

$$M_y = +\left(\frac{I_E}{\rho_1} + \beta_1\right)$$

ahol I_E a szilárdságtanból ismert *hajlítási merevség*, amely hengersizmetrikus rúd esetében

$$I_E = \int_A \frac{x^2}{S_{11}^E(x, y)} dA = \int_A \frac{y^2}{S_{11}^E(x, y)} dA = \pi \int_r \frac{r^3}{S_{11}^E(r)} dr \quad (5-17)$$

valamint

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -\int_A \frac{\alpha - d_{31}(x, y)E(x, y)}{S_{11}^E(x, y)} x dA \\ \beta_2 &= -\int_A \frac{\alpha - d_{31}(x, y)E(x, y)}{S_{11}^E(x, y)} y dA \end{aligned} \quad (5-18)$$

amely a piezoelektromos hatás következtében létrejövő forgatóhatás nyomatéka.

5.1.3 Rugalmas szál differenciálegyenlete és a hajlítás

A görbült rúdtengely görbületeit a rugalmas szál differenciálegyenletéből határozhatjuk meg. Kis görbületekre jó közelítéssel igaz, hogy

$$\begin{aligned}\xi''(z) &\approx \frac{1}{\rho_1} = \frac{M_y - \beta_1}{I_E} \\ \eta''(z) &\approx \frac{1}{\rho_2} = \frac{-M_x - \beta_2}{I_E}\end{aligned}\quad (5-19)$$

Egyensúlyban M_x és M_y a külső F_1 és F_2 erőknek a csövecske (piezoláb) rögzített végére vonatkozó nyomatékával egyenlő, vagyis

$$\begin{aligned}M_x &= -F_2(l - z) \\ M_y &= F_1(l - z)\end{aligned}\quad (5-20)$$

A nyomatékokat az (5-19) differenciálegyenletbe írva és kétszer integrálva megkapjuk a külső erővel és elektromos feszültséggel terhelt piezoelektromos rúd egyenletét:

$$\begin{aligned}\xi(z) &= \frac{F_1 l - \beta_1}{2I_E} z^2 - \frac{F_1}{6I_E} z^3 \\ \eta(z) &= \frac{F_2 l - \beta_2}{2I_E} z^2 - \frac{F_2}{6I_E} z^3\end{aligned}\quad (5-21)$$

amely $z = l$ helyettesítéssel megadja a csövecske végének elhajlását az eredetileg egyenes rúdtengelyhez képest:

$$\begin{aligned}\xi &= \xi(l) = \frac{l^3}{3I_E} F_1 - \frac{l^2}{2I_E} \beta_1 \\ \eta &= \eta(l) = \frac{l^3}{3I_E} F_2 - \frac{l^2}{2I_E} \beta_2\end{aligned}\quad (5-22)$$

Az I_E hajlítási merevség a hengerszimmetrikus rúd szilárdságtani állandói által meghatározott állandó. A β -k pedig a szilárdságtani állandók mellett a villamos feszültség és így az elektromos térerősség eloszlásának függvényei.

5.1.4 A mechanikai és a villamos feszültség együttes hatása

Célunk a piezocsövecske elektródaira kapcsolt villamos feszültség és a rúdtengely végének kitérése közötti kapcsolat meghatározása, vagyis a β -kra vonatkozó (5-18) integrálok meghatározása. Az alábbiakban egy adott térerősség eloszlás mellett határozzuk meg az integrálokat, valamint az ennek eredményeképpen létrejövő rúd alakot.

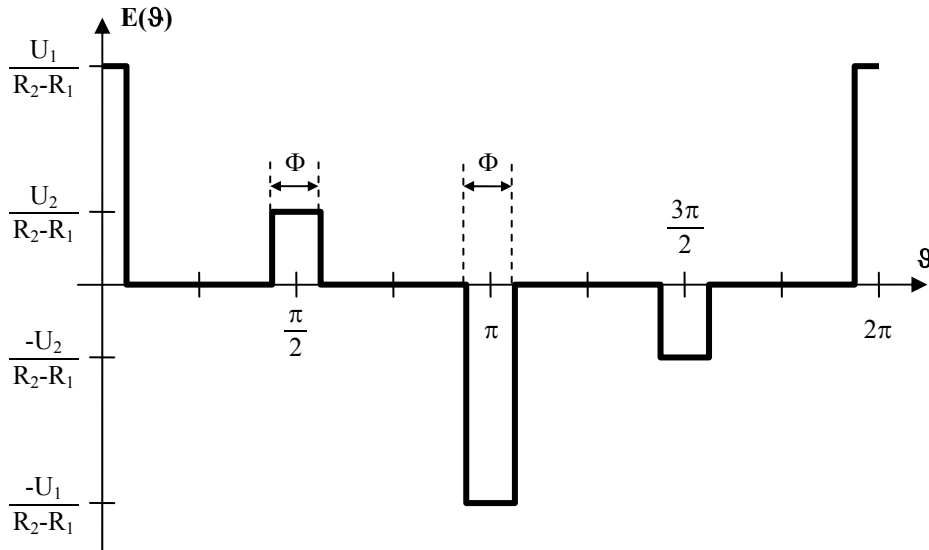
A csövecske hengerszimmetriája miatt a mechanikai és a villamos mennyiségek függvényeit polárkoordinátás alakban írjuk fel a keresztmetszet tetszőleges

$Q(x,y) = Q(r, \vartheta)$ pontjaira¹⁰, így az integrálást is könnyebb elvégezni. A szilárdságtani és piezoelektromos mennyiségek eloszlása a belül üreges, hosszanti irányban egyébként homogén csőben

$$d_{31}(x,y) = d_{31}(r, \vartheta) = d_{31}(r) = \begin{cases} 0 & r < R_1 \\ d_{31} & R_1 \leq r \leq R_2 \end{cases} \quad (5-23)$$

$$S_{11}^E(x,y) = S_{11}^E(r, \vartheta) = S_{11}^E(r) = \begin{cases} \infty & r < R_1 \\ S_{11}^E & R_1 \leq r \leq R_2 \end{cases} \quad (5-24)$$

Az elektromos térerősség is kétváltozós függvény. A belső hengerpaláston elhelyezett zérus potenciálú elektróda miatt $r < R_1$ esetén $E(r, \vartheta) = 0$. A hengerpalást külső felületén négy elektróda helyezkedik el, a tengelyhez képest 90° -ban a palást mentén elforgatva. A lábak vezérlésének egyszerűsítése érdekében az egymással szemközti elektródákra ellentétes polaritású, de azonos abszolút értékű feszültséget kapcsolunk. Így a piezo csövecské elektródáinak állapotát két változóval, az U_1 és U_2 elektróda feszültségekkel jellemezhetjük. Feltételezésünk szerint a piezoelektromos anyagban az E elektromos térerősség legyen a tengelytől való távolságtól független, a ϑ szög függvényében pedig az 5-3. ábra szerinti; vagyis az elektródákkal ellátott piezokerámia csövecskét többelektródás hengerkondenzátorként modellezzük és a szomszédos fegyverzetek közötti szórt teret a fegyverzetek közötti térhez képest elhanyagoljuk.



5-3. ábra: Térerősség eloszlás a piezocsövecskében

A piezocsövecské vége ξ és η elmozdulásának meghatározásához a fenti függvényeket az I_E hajlítási merevség, valamint α és β integrálkifejezésébe kell helyettesíteni, majd az integrálást elvégezni. Az integrálást polárkoordinátarendszerben elvégezve a következőket kapjuk.

$$I_E = \frac{\pi}{4} \frac{R_2^4 - R_1^4}{S_{11}^E} \quad (5-25)$$

¹⁰ A Descartes- és a polárkoordinátarendszer kapcsolatát $x = r \cos \vartheta$, $y = r \sin \vartheta$, $dA = r dr d\vartheta$ írja le.

$$\alpha = \frac{d_{31}}{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{2\pi} E(\vartheta) d\vartheta = 0 \quad (5-26)$$

$$\beta_1 = \frac{4}{3} \frac{d_{31}}{S_{11}^E} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \cdot \sin \frac{\Phi}{2} \cdot U_1 \quad (5-27)$$

$$\beta_2 = \frac{4}{3} \frac{d_{31}}{S_{11}^E} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \cdot \sin \frac{\Phi}{2} \cdot U_2 \quad (5-28)$$

Ennek alapján meghatározhatjuk a piezocsövecske végének külső mechanikai erő és villamos feszültség hatására létrejövő deformációját:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= k_F \cdot F_1 + k_U \cdot U_1 \\ \eta &= k_F \cdot F_2 + k_U \cdot U_2 \end{aligned} \right\} \quad (5-29)$$

ahol a fentiek értelmében az állandók, melyek mindegyike pozitív (mivel d_{31} negatív)

$$\begin{aligned} k_F &= \frac{4}{3\pi} S_{11}^E \frac{l^3}{R_2^4 - R_1^4} \\ k_U &= -\frac{8}{3\pi} d_{31} l^2 \frac{R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2}{R_2^4 - R_1^4} \cdot \sin \frac{\Phi}{2} \end{aligned} \quad (5-30)$$

A deformációra vonatkozó egyenletek felírhatók mátrix alakban is:

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & U_1 \\ F_2 & U_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_F \\ k_U \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{k}$$

A fenti összefüggések világosan mutatják a mechanikai és a piezoelektromos hatások szuperpozícióját. A mechanikai erő és a villamos feszültség lineáris szuperpozíciójaként áll elő a csövecske végének \mathbf{t} deformációja (elhajlása). A mátrixegyenletben az \mathbf{Y} mátrix tartalmazza a piezocsövecskére ható mechanikai erőket és az elektródákra kapcsolt villamos feszültségeket, míg az állandókat tartalmazó \mathbf{k} vektor a piezokerámia anyagállandóitól és geometriájától függ.

5.2 Mikrorobot mozgásának modellje

A MINIMAN rendszerű piezoelektromos mikrorobot mozgása bonyolult folyamat. Bármilyen meglepő, leginkább a szárazföldi gerinces állatok (két, vagy négy lábúak) mozgásához hasonlítható. A piezoelektromos lábakat a robot testének alsó részéhez rögzítjük és az előző fejezetben leírt törvényszerűségek figyelembevételével a rajtuk elhelyezkedő elektródákra kapcsolt feszültséggel mozgatjuk azokat. A robottest stabil egyensúlyi helyzete érdekében három lábat alkalmazunk. Amennyiben egy-egy láb elektródákra lassan növekvő feszültséget kapcsolunk, azok meghajlanak és ez a robot kismértékű elmozdulását eredményezi, amennyiben azonban a villamos feszültséget ismét lassan nullára csökkentjük, a lábak kiegyenesednek és a robot visszatér eredeti

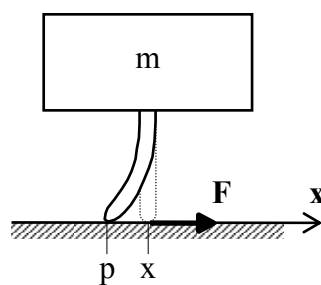
pozíciójába. Ahhoz, hogy a robot előrehaladjon, a lábak léptetését kell megoldani. Erre két módszer kínálkozik:

- a) „Sétálás”: A lábat az ember lépéséhez hasonlóan felemeljük, előrenyújtjuk, majd új pozíciójába lerakjuk. Ezután a lábat kiegyenesítjük, ami a robot előremozdulását fogja eredményezni. Ahhoz, hogy a láb felemelt pozíciójában a robottest ne billenjen el, a lépést kellő gyorsasággal kell végrehajtani.
- b) „Csoszogás”: A lábat a talajon tartva lassan meghajlítjuk, majd hirtelen rántással előrehúzzuk, miközben az a talajon megcsúszik. Ezután a lábat új pozíciójában lassan kiegyenesítjük, ami a robot előremozdulását fogja eredményezni.

A „sétálás” típusú mozgás a szárazföldi élőlények természetes mozgása. A mikrorobot esetében a „sétálás” azonban csak bonyolult vezérlés segítségével valósítható meg. Figyelembe kell emellett azt is venni, hogy a „sétálás” során a mikrorobot függőleges irányban is billeg, rezeg, ami a mikrorobotikában szükséges pontos pozicionálás során kedvezőtlen lehet. Ezért a mikrorobotot elsősorban „csoszogás” típusú mozgásra kényszerítjük, a továbbiakban ezen mozgás elemzésével foglalkozunk.

5.2.1 Egylábú robotmodell

A mikrorobot mozgását egy egylábú modell segítségével vizsgáljuk. A modellben a mikrorobot testét egy m tömegű merev test képviseli, amely egyetlen piezoelektromos mozgatószerven (láb) áll. A láb tengelye áthalad a test tömegközéppontján (a mozgás során a láb kis meghajlása miatt ez folyamatosan érvényesnek tekinthető), így maga a robottest nem gyakorol forgatónyomatékokat a lábra. A valóságban egy ilyen robot instabil egyensúlyi helyzetben lenne, de modellünkben kis oldalirányú erővel folyamatosan egyensúlyi helyzetben tartható, mindez azonban csak elhanyagolhatóan kis mértékben befolyásolja a modell érvényességét. A modell dinamikája az x és az y tengely mentén hasonló, így elegendő a vizsgálatot csak egy tengely mentén elvégezni; itt az x tengelyt választottuk. (Az y tengely mentén történő mozgás leírásához a ξ helyváltozót η -ra kell cserélni.) Az egylábú robot modellje az 5-4. ábrán látható.



5-4. ábra: Egylábú robotmodell

5.2.2 A mikrorobot mozgásegyenlet rendszere

Tekintettel arra, hogy a piezoláb tömege a robottest tömegéhez képest elhanyagolhatóan kicsi, az egylábú modellben a mikrorobot mozgásegyenlete $F = m \cdot a$ alakban írható, ahol tapadás esetében a tapadási, vagy csúszás esetében a csúszási súrlódási erő F , a mikrorobot tömege m , gyorsulása a . Az 5-4. ábrának megfelelően jelölje x a robot tömegközéppontjának vízszintes pozícióját, p a piezoláb talppontjának helyét, ξ pedig a

piezoláb végpontjának meghajlított állapotban a feszültségmentes állapothoz képesti elhajlását; ekkor $x = p - \xi$. Érvényesek továbbá az (5-29) piezoláb egyenletek¹¹, melyeknek itt az x tengely menti alakját használjuk. Az U vezérlőfeszültség függvényt úgy definiáljuk, hogy a piezolábnak az x tengely pozitív irányába eső elektródájára $u_+(t) = U(t)$ feszültséget kapcsolunk, míg a vele átellenes oldalon elhelyezkedő elektródára $u_-(t) = -U(t)$ feszültséget. A rendszer dinamikáját összességében tehát a *mikrorobot differenciál-egyenletrendszerével* írhatjuk le:

$$\begin{cases} F = m\ddot{x} \\ \xi = k_F F + k_U U \\ x = p - \xi \end{cases} \quad (5-32)$$

A fenti differenciál-egyenletrendszer a változók kiküszöbölésével egyszerűsíthető az alábbi alakra, amelyre a továbbiakban a *mikrorobot mozgásegyenletek*ént hivatkozunk:

$$\ddot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 [p(t) - k_U U(t)] \quad (5-33)$$

ahol

$$\omega_0^2 = \frac{1}{mk_F}. \quad (5-34)$$

A differenciál-egyenletrendszerben, illetve a mozgásegyenletben m , k_F és k_U ismert állandók (így ω_0 is az), $U = U(t)$ ismert időfüggvény. Az $x = x(t)$, $p = p(t)$, $\xi = \xi(t)$ és $F = F(t)$ pedig ismeretlen időfüggvények. Tekintettel arra, hogy a három egyenletből álló differenciál-egyenletrendszer négy ismeretlent tartalmaz (illetve a belőle származtatott differenciális mozgásegyenlet két ismeretlent tartalmaz), a differenciál-egyenletrendszernek (illetve a differenciálegyenletnek) további információk hiányában nincs egyértelmű megoldása. A differenciál-egyenletrendszer, illetve a mozgásegyenlet a robot mozgása során kulcsfontosságú szerepet játszó tapadás, illetve súrlódás, mint peremfeltételek ismeretében oldható meg.

A mikrorobot esetében a kis méretű alkatrészek és a robot kis lépésköze miatt a piezoláb és a munkaasztal adott felületdarabja közötti kölcsönhatásnak rendkívül fontos szerepe van az egyes lépések, ezáltal a mozgás makroszkopikus jellegének kialakításában. A tapadási és súrlódási kölcsönhatás nem lineáris, függ az érintkező felületek anyagminőségétől, az éppen érintkező felületdarabok érdességétől, mozgó láb esetében a csúszó felületek egymáshoz képesti sebességétől, valamint a környezeti hatásoktól (pl. páratartalom, por jelenléte, hőmérséklet, stb.). A lokális felületi érdesség a mikrorobot mozgása során helyről helyre, míg a páratartalom, hőmérséklet, stb. pedig időben is változhat. A mikromanipulációs munkacellában azonban az a célunk, hogy ezen változások lehetőség szerint kicsik legyenek, ezért a mozgás kézben tarthatósága

¹¹ A piezoláb egyenleteket a piezocsövecské egyensúlyi helyzetében határoztuk meg. Tekintettel azonban arra, hogy a lábak mozgásához használt vezérlőfeszültség frekvenciája (tipikusan 50 Hz - 5 kHz) a szokásosan alkalmazott piezokerámiák sajátfrekvenciájához (tipikusan 10 kHz - 1 Mhz, pl. PXE-52 anyagú, 20 mm hosszúságú henger esetében 70 kHz) képest nagyságrenddel kisebb, a rendszer dinamikai tulajdonságait a piezokerámia dinamikai tulajdonságai csak elhanyagolható mértékben befolyásolják. Így a piezokerámia egyensúlyi helyzetére meghatározott összefüggések alacsony frekvenciás környezetben változatlan formában érvényesek.

érdekében „sima” munkaasztalt (pl. tiszta, pormentes üveglap), állandó hőmérsékletet („hidegfényű” megvilágítás alkalmazásával) és állandó páratartalmat (légkondicionált helyiség) szükséges biztosítanunk. Tisztában kell legyünk azonban azzal, hogy mindezen eljárások sem képesek a fenti változó hatásokat tökéletesen kiküszöbölni, de ingadozásukat jelentősen tudják csökkenteni. Ezért a továbbiakban a tapadási és a súrlódási kölcsönhatást egyszerűsítve, a makroszkopikus tapadással és súrlódással írjuk le úgy, hogy annak lokális, illetve időben történő változását a rendszerre ható véletlen zajnak tekintjük. A modellben – a makroszkopikus leíráshoz hasonlóan – a csúszási súrlódási erőt a csúszási súrlódási együtthatóval, illetve a maximális tapadási súrlódási erőt a tapadási súrlódási együtthatóval arányosnak vesszük. A kölcsönhatásban véletlen zajnak tekintett hatást a súrlódási együttható átlagos értéke körüli kis változásnak tekintjük. Feltételezzük továbbá, hogy a csúszási súrlódási együttható átlagos értéke és a tapadási súrlódási együttható átlagos értéke megegyeznek, ezt az értéket a továbbiakban μ -vel jelöljük.

$$\mu(x, y, t) = \mu + \varepsilon(x, y, t) \quad (5-35)$$

A súrlódás kismértékű lokális és időbeni ingadozását tehát a súrlódási együtthatóban elkülönített $\varepsilon(x, y, t)$ zaj tartalmazza. Ezt a robotmozgás modellezésének további részében elhanyagoljuk és tényleges hatásának kiküszöbölését a szabályozó rendszerre bizzuk. A fenti egyszerűsítések jogosságát az elvégzett és későbbiekben bemutatásra kerülő mérési eredmények támasztják alá.

A makroszkopikus modell alapján, ha a láb mozgatása során éppen tapadás van, akkor a piezoláb talajjal érintkező pontja nem mozdul el, a tapadási erő pedig egy korlátos értékig növekedhet. Ha a láb csúszik, akkor a súrlódási erő ismert és állandó. A mikrorobot mozgását leíró differenciálegyenletek megoldásához szükséges peremfeltételek tehát:

$$\begin{aligned} |F| \leq \mu mg \quad \text{és} \quad \dot{p} = 0 & \quad \text{ha tapad} \\ |F| = \mu mg & \quad \text{ha csúszik} \end{aligned} \quad (5-36)$$

Az (5-32), illetve egyszerűsített formában az (5-33), valamint az (5-36) egyenleteket együttesen a *mikrorobot mozgásegyenlet-rendszerének* nevezzük.

5.2.3 A mikrorobot átviteli függvénye

Vizsgáljuk meg a mozgást a komplex frekvenciatartományban. Ehhez képezzük az (5-33) mozgásegyenlet Laplace-transzformáltját.

$$s^2 X(s) - sx(-0) - \dot{x}(-0) + \omega_0^2 X(s) = \omega_0^2 P(s) - \omega_0^2 k_U U(s) \quad (5-37)$$

Ebből kifejezhetjük $X(s)$ -t:

$$X(s) = -\frac{k_U \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} U(s) + \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} P(s) + \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} x(-0) + \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \dot{x}(-0) \quad (5-38)$$

Az átviteli függvény meghatározásához tekintsük azt az állapotot, amikor a robot lába tapad, vagyis $p = \text{állandó}$. Válasszuk meg a koordinátarendszert úgy, hogy kezdetben

$p = 0$ legyen. A vezérlőfeszültség függvényt pedig később úgy választjuk meg, hogy $t = 0$ környékén a tapadás valóban biztosítva legyen. Az átviteli függvény meghatározásához bekapcsolási jelenségre szorítkozunk, vagyis $t = -0$ -nál minden jel zérus. Ezen túlmenően $P(s)$ -t nullának tekintjük, amely bekapcsolási jelenség esetében a koordinátarendszer leírt választásával egyébként is teljesül. A villamos feszültség, mint gerjesztés és az elmozdulás, mint a gerjesztésre adott válasz alapján definiálható a mikrorobot átviteli függvénye a fentiek alapján:

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = -\frac{k_U \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \quad (5-39)$$

Az (5-39) átviteli függvény egy, csak tapadási tulajdonsággal rendelkező piezoelektromos mikrorobot csillapítás nélküli átviteli függvénye, vagyis a mikrorobot mozgását nem jellemzi teljesskörűen. A mikrorobot dinamikai tulajdonságairól azonban fontos információkat szolgáltat. A mikrorobot a modell szerint tehát egy csillapítatlan másodrendű lengő rendszerrel modellezhető, a rendszer aluláteresztő jellegű ω_0 törésponti körfrekvenciával. A fenti gondolatmenetben figyelmen kívül hagytuk a valóságos rendszer csillapítását. Tekintettel azonban arra, hogy a későbbiekben elsősorban a rendszer stacionárius állapotát vizsgáljuk, kis csillapítás esetében a csillapítatlan rendszer leírásával ez jól közelíthető.

5.2.4 Vezérlőfeszültség függvény választása

A „csoszogás” típusú mozgás létrehozásához olyan feszültségfüggvényt keresünk, amelyet a láb egyik elektródájára, ennek ellentettjét a vele szemben elhelyezkedő másik elektródára kapcsolva a kívánt mozgás jön létre. Ennek során először a lábat lassan hátrafelé meghajlítjuk, miközben a mikrorobot teste lassan előremozdul. Ezután az elektródák polaritását hirtelen felcseréljük, ez a lábat előrerántja, miközben annak talppontja a talajon megcsúszik. Majd a lábat lassan kiegyenesítjük, ami a robot testét tovább mozgatja előre. Ezen feltételeket egy periodikus fűrészfeszültség-függvény (T periódusidővel) megfelelően kielégíti, amely egy periódusának időfüggvénye és annak Laplace-transzformáltja az alábbi:

$$U_T(t) = -\frac{2U_0}{T} t \cdot \varepsilon(t) + 2U_0 \cdot \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right), \quad (5-40)$$

$$U_T(s) = -\frac{2U_0}{Ts^2} + \frac{2U_0}{s} e^{-s\frac{T}{2}}. \quad (5-41)$$

5.2.5 A stacionárius megoldás feltételei

Az (5-38) egyenlet megadja ismert vezérlőfeszültség és kiindulási értékek mellett az elmozdulás Laplace-transzformáltját. Inverz Laplace-transzformációval az időfüggvény meghatározható. A nehézséget az okozza, hogy ehhez ismernünk kell a piezoláb talppontjának mozgását.

A mikrorobot folyamatos haladása lépések sorozatát jelenti, ez pedig a lábak elektródáira kapcsolt periodikus feszültségfüggvénnyel valósítható meg. Írjuk fel általánosan a feszültségfüggvényt periódusonként:

$$U(t)\varepsilon(t) = U_T(t) + U_T(t-T) + U_T(t-2T) + \dots = \varepsilon_T(t)U_T(t). \quad (5-42)$$

Itt $U_T(t)$ jelöli azt a függvényt, amely az első periódusban $U(t)$ -vel megegyezik, azon kívül azonosan nulla, az $\varepsilon_T(t)$ pedig a fenti összefüggés által értelmezett operátor. A válasz (elmozdulás) időfüggvénye az alábbi alakú lesz:

$$x(t) = \varepsilon_T(t)x_T(t) + x_{tr}(t). \quad (5-43)$$

A bekapcsolás után hosszú idő múlva az $x_{tr}(t)$ tranzienstag eltűnik és a válasz is tisztán periodikus lesz. A stacionárius megoldás megtalálásához tehát jelöljük most ki az időskála $t=0$ pontját ebben az intervallumban. Belátható, hogy stacionárius esetben az (5-38) egyenletben az $U(s) = L\{U_T(t)\}$ helyettesítést elvégezve $x(t) = L^{-1}\{X(s)\}$ a $t \in [0, T]$ intervallumban helyesen adja vissza az $x_T(t)$ függvényt¹².

Ahogy azt említettük, a stacionárius megoldás meghatározásához ismernünk kell a piezoláb talppontjának mozgását. Ehhez tekintsünk két lehetséges esetet:

- I) A piezoláb talppontja a feszültségfüggvény ugráshelyének kivételével végig tapad, nem csúszik meg.
- II) A piezoláb talppontja a T periódus különböző intervallumaiban - a feszültségfüggvény ugráshelye környékén túlmenően is - megcsúszik.

Itt nem részletezett módon belátható, hogy $f > 2f_0$ esetén¹³ a II) feltétel ellentmondáshoz vezet, ti. a megoldás szerint az erő az ugráshely kivételével a tapadás határain belül marad, vagyis megcsúszás nem következhet be. A továbbiakban a megoldást az $f > 2f_0$ tartományban az I) esetre keressük. A megoldás ismeretében teszünk kijelentéseket az $f < 2f_0$ frekvenciatartományra is.

5.2.6 A mozgásegyenlet stacionárius megoldása

A fenti megfontolások alapján a mozgásegyenlet megoldható. A megoldás menete $f > 2f_0$ frekvenciákra megtalálható a C. függelékben, itt a végeredményt közöljük.

Első félperiódus ($0 \leq t < T/2$)

$$x_T(t) = \left[\frac{2U_0k_U}{T}t - \frac{\mu g}{\omega_0^2 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \sin \omega_0 t \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (5-44)$$

$$v_T(t) = \left[\frac{2U_0k_U}{T} - \frac{\mu g}{\omega_0 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \cos \omega_0 t \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (5-45)$$

¹² $L\{\dots\}$ a Laplace-transzformációt, míg $L^{-1}\{\dots\}$ az inverz Laplace-transzformációt jelöli.

¹³ $f = 1/T$ a vezérlőfeszültség frekvenciája, míg $f_0 = \omega_0/2\pi$ a mikrorobot sajátfrekvenciája.

$$a_T(t) = \frac{\mu g}{\sin \frac{\omega_0 T}{2}} \sin \omega_0 t \cdot \varepsilon(t) \quad (5-46)$$

$$F_T(t) = \frac{\mu m g}{\sin \frac{\omega_0 T}{2}} \sin \omega_0 t \cdot \varepsilon(t) \quad (5-47)$$

$$\xi_T(t) = \left[\frac{\mu g}{\omega_0^2 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \sin \omega_0 t - \frac{2U_0 k_U}{T} t \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (5-48)$$

$$p_T(t) = 0 \quad (5-49)$$

Második félperiódus ($T/2 < t \leq T$)

$$x_T(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} t - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \left(\frac{\sin \omega_0 (t-T)}{\sin \frac{\omega_0 T}{2}} + 2 \right) \right] \cdot \varepsilon \left(t - \frac{T}{2} \right) \quad (5-50)$$

$$v_T(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} - \frac{\mu g \cos \omega_0 (t-T)}{\omega_0 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \right] \cdot \varepsilon \left(t - \frac{T}{2} \right) \quad (5-51)$$

$$a_T(t) = \mu g \frac{\sin \omega_0 (t-T)}{\sin \frac{\omega_0 T}{2}} \cdot \varepsilon \left(t - \frac{T}{2} \right) \quad (5-52)$$

$$F_T(t) = \mu m g \frac{\sin \omega_0 (t-T)}{\sin \frac{\omega_0 T}{2}} \cdot \varepsilon \left(t - \frac{T}{2} \right) \quad (5-53)$$

$$\xi_T(t) = \left[2U_0 k_U \left(1 - \frac{t}{T} \right) + \frac{\mu g \sin \omega_0 (t-T)}{\omega_0^2 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \right] \cdot \varepsilon \left(t - \frac{T}{2} \right) \quad (5-54)$$

$$p_T(t) = 2 \left[U_0 k_U - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \right] \cdot \varepsilon \left(t - \frac{T}{2} \right) \quad (5-55)$$

Az időfüggvények jellegének bemutatása érdekében a D. Függelékben megtalálható a B. Függelékben megadott paraméterekkel rendelkező mikrorobot elméleti modellje alapján számított időfüggvényeinek egy-egy periódusa.

Az első és a második félperiódusban $T/2$ környezetének kivételével a robot lába tapad, így a robot csúszásmentesen mozog. A feszültségfüggvény ugrásának környezetében a piezoláb megsúszik, ez a robot tulajdonképpeni lépése.

5.2.7 A stacionárius megoldás jellemzése átlagértékekkel

A bonyolult időfüggvények mellett a mozgás jól jellemezhető két fontos átlagértékkel: a lépéshosszal (L) és az átlagsebességgel (\bar{v}). A lépéshossz az egy periódus, vagyis a T periódusidő alatt megtett távolság. A lépéshossz független a vezérlő frekvenciától.

$$L = x(T) - x(0) = 2 \left(U_0 k_U - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \right) \quad (5-56)$$

A mikrorobot átlagsebessége a megtett út és az idő hányadosa, amely $t \gg T$ esetén az alábbi kifejezéshez konvergál

$$\bar{v} \approx \frac{x(T) - x(0)}{T} = Lf = 2f \left(U_0 k_U - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \right) = 2f (U_0 k_U - \mu m k_F g). \quad (5-57)$$

5.2.8 A stacionárius mozgás feltételei - tervezési szempontok

A vezérlőfeszültség függvényét úgy választottuk, hogy azzal a mikrorobotot az x tengely pozitív irányába mozgassuk előre. Így tehát átlagsebessége, vagyis az (5-57) kifejezés nem lehet negatív, mert akkor a mozgást leíró kezdeti kifejezésekkel kerülnénk ellentmondásba.

$$\bar{v} \geq 0 \quad (5-58)$$

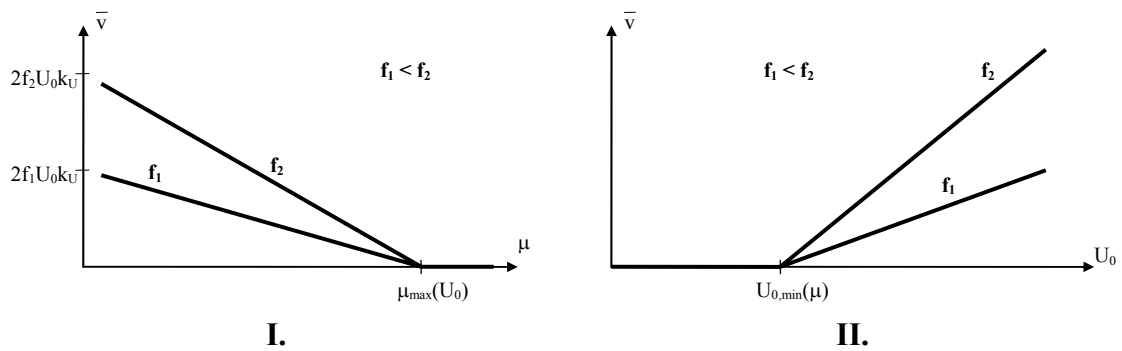
Az egyenlőtlenségből a súrlódási együtthatót kifejezve

$$\mu \leq \mu_{\max} = \frac{U_0 k_U \omega_0^2}{g} = \frac{U_0 k_U}{m g k_F} = - \frac{2U_0 d_{31} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \sin \frac{\Phi}{2}}{m g l \cdot S_{11}^E}, \quad (5-59)$$

vagy a feltételt a vezérlőfeszültségre kifejezve

$$U_0 \geq U_{0,\min} = \mu \frac{g}{k_U \omega_0^2} = \mu m g \frac{k_F}{k_U} = - \frac{\mu m g l \cdot S_{11}^E}{2 d_{31} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \sin \frac{\Phi}{2}}. \quad (5-60)$$

Az 5-5. ábrákon felrajzoltuk a mikrorobot sebességkarakterisztikáit, vagyis az átlagsebességét a súrlódási együttható (I.), valamint a vezérlőfeszültség amplitúdójának (II.) függvényében különböző frekvenciájú fűrészelés esetében. A fentiek alapján egy bizonyos súrlódás (μ_{\max}) felett a robot már nem mozgatható az adott vezérlőjellel, a robot egy helyben marad és rezgő-, nem pedig haladó mozgást végez. A robot átlagsebessége az (5-57) kifejezés alapján elvileg súrlódásmentes környezetben a legnagyobb; ekkor azonban a mozgás éppen a tapadási és a súrlódási erők hiánya miatt nem kontrollálható, ezért a súrlódásmentes esetben számítható maximális átlagsebességet inkább elméleti határértékként kezeljük. Ezzel egyenértékű, hogy egy minimális vezérlőjel ($U_{0,\min}$) szükséges ahhoz, hogy a robot elinduljon, e fölött az átlagsebessége lineárisan változik a fűrészelés amplitúdójával.



5-5. ábra: Mikrorobot I. és II. sebességkarakterisztikája

Bizonyítható, hogy a fenti egyenlőtlenségek, amelyek a modell makroszkopikusan megfigyelhető viselkedésének ellentmondásmentességéhez szükségesek, pontosan megegyeznek azzal a feltétellel, aminek teljesülése esetén a vezérlőfeszültség ugráshelyén a tapadási erő eléri maximumát és így a piezoláb megcsúszik, vagyis a mikrorobot valóban képes megtenni lépését. (Lásd C. függelék 2. pont.)

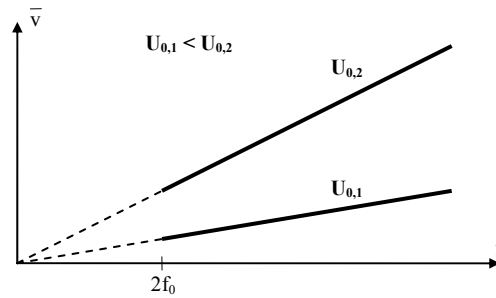
A μ_{max} -ra, illetve $U_{0,min}$ -re kapott egyenlőtlenségekbe k_U és k_F állandókat behelyettesítve a súrlódási együttható maximumára, illetve a vezérlőfeszültség minimumára egy-egy, egymással egyenértékű, összetett kifejezést kaptunk, amely piezoelektromos és mechanikai állandókat, valamint a piezoláb és elektródáinak geometriai jellemzőit tartalmazza. A μ_{max} (5-59) és $U_{0,min}$ (5-60) kifejezései tehát a piezoelektromos hajtású mikrorobot rendszerek tervezésének alapvető fontosságú összefüggéseinek tekinthetők.

5.2.9 A megoldás validálása különböző frekvenciákon

Az $f > 2f_0$ frekvenciájú vezérlőjel esetén a megoldás minden komponense ellentmondásmentesen írja le a mikrorobot mozgását. Amennyiben a vezérlőfrekvencia $f < 2f_0$, a robot mozgásának jellege megváltozik. Tételezzük fel, hogy az f frekvenciát $2f_0$ -nál nagyobb értékről csökkentjük f_0 alá, vagyis a T periódusidőt növeljük egy $T_0/2$ -nél kisebb értékről T_0 fölé. Formálisan a stacionárius megoldás (5-47) erőfüggvényében szereplő $\sin \omega_0 t$ tag így kezdetben egy negyedperiódusnál kisebb szakaszt fut be 0 és $T/2$ között. $T=T_0/2$ esetén a szinuszos tag éppen egy negyedperiódust fut be. Ha T -t növeljük (vagyis a frekvencia $2f_0$ alá csökken), a szinuszos tag egy negyedperiódusnál nagyobb szakaszon fut végig 0 és $T/2$ között, maximumát $t=T_0/4$ -kor veszi fel. Formálisan ekkor azt tapasztaljuk, hogy már $t < T/2$ esetén $\sin \omega_0 t / \sin \omega_0 T/2 > 1$, így $F(t) > \mu mg$, ami fizikailag lehetetlen, hiszen μmg a tapadási erő maximuma. Valójában az történik, hogy a láb megcsúszik és $F(t) = \mu mg$ (súrlódási erő) lesz. Ha T -t még tovább növeljük, a szinuszos tag formálisan félperiódusnál, majd akár több periódust is befutva éri el $T/2$ -t. Ezalatt a tapadási erő többször is eléri maximumát, vagyis a láb többször megcsúszik, majd ismét a tapadás határán belülré kerül.

Kétségtelen, hogy a fenti következtetés nem egzakt, hiszen megoldásunk egyik feltétele volt, hogy az első félperiódusban a piezoláb végig a tapadás határán belül marad. Ennek ellenére a gondolatmenet alapján megállapítható, hogy $f < 2f_0$ esetében a robot mozgása bonyolultabbá válik, egyetlen periódus is több csúszási és tapadási szakaszból fog állni. A mozgás pontos leírásához ezen szakaszokat egyenként szükséges figyelembe venni és a mozgásegyenletet szakaszonként megoldani az egyes vezérlőfrekvencia

tartományokra. Ennek a megoldásnak azonban inkább elméleti jelentősége van, mert a robot mozgását így sokkal bonyolultabb leírni és kézben tartani.



5-6. ábra: Mikrorobot III. sebességkarakterisztikája

Az 5-6. ábrán a mikrorobot III. sebességkarakterisztikáját látjuk, amely az előzőek alapján az átlagsebességet ábrázolja a frekvencia függvényében. Így a vezérlőfrekvenciára vonatkozó $f > 2f_0$ feltételt a piezoelektromos mikrorobot rendszerek tervezéséhez és üzemeltetéséhez szükséges további, alapvető összefüggéseihez soroljuk. A frekvencia növelése ténylegesen azonban csak egy határértékig képes a sebesség növelésére, a csillapítások ugyanis jelentőssé válnak. Gyakorlati tapasztalatok alapján ~ 3 kHz frekvencia felett a robot irányítása nehézkessé válik, mozgása bizonytalan lesz. 5 kHz környékén a robot már szinte nem mozog. Ezért a mikrorobotot 3 kHz alatti frekvenciákon alkalmaztuk.

5.2.10 A robot irányítása

Az előzőekben láttuk, hogy az ismertetett piezoelektromos mikrorobot elsősorban sebességvezérelhető. Amennyiben a mikrorobotot adott környezetben (vagyis adott μ súrlódás mellett) különböző sebességgel kívánjuk mozgatni, ehhez megfelelő, ha a vezérlőfeszültség amplitúdóját $U_{0,\min}$ -nél nagyobb tartományban változtatjuk: a robot sebessége U_0 lineáris függvénye. Másik lehetőség, hogy az $f > 2f_0$ tartományban a fűrészfeszültség frekvenciáját változtatjuk: a robot sebessége a frekvenciával egyenesen arányos.

Amennyiben a mikrorobotot lassan szeretnénk mozgatni, de ezt valamilyen oknál fogva nem tudjuk a feszültség változtatásával megtenni, és a rendelkezésre álló frekvenciatartomány már „nem megfelelő”, megoldás lehet, hogy a fűrészjel kitöltését változtatjuk. Ez esetben a „megfelelő” frekvenciájú ($f > 2f_0$) fűrészimpulzusokat csak $T_h > T_0/2$ időközönként alkalmazzuk. Ez esetben a robot L lépésköze változatlan, átlagsebessége azonban lecsökken

$$\bar{v}_h = \frac{L}{T_h} = \bar{v} \frac{T}{T_h}. \quad (5-61)$$

Amennyiben azt kívánjuk elérni, hogy a robot mindössze egyetlen lépést tegyen meg, célravezető egyetlen $f > 2f_0$ fűrészimpulzus alkalmazása. Ekkor a robot pozícióvezérelhető.

5.3 Mérési eredmények és a modell értékelése

Az elméleti modell hihetőségének és alkalmazhatóságának vizsgálatára diplomamunka keretében került sor. *Helybély* [12] diplomatervének egyik részében a fent ismertetett matematikai modell kísérleti úton történő vizsgálatát végezte el.

A mérési feladat célkitűzését és a mérési összeállításra vonatkozó javaslatot jelen értekezés szerzője állította össze, a mérést ténylegesen azonban a diplomatervező önállóan végezte el. Ezért a mérési eredmények az ő munkájának tekintendők, itt csak a mérési módszer, valamint a végeredmények kerülnek ismertetésre annak érdekében, hogy a dinamikai modell értékelése elvégezhető legyen. A mérések részletes leírása megtalálható a hivatkozott irodalomban.

5.3.1 Mérési összeállítás és módszer

A mérések során három különböző fizikai mennyiség került meghatározásra: tapadási súrlódási együttható, csúszási súrlódási együttható és a mikrorobot átlagsebessége. A mérések az Irányítástechnika és Informatika Tanszék Mobil- és Mikrorobotikai Laboratóriumában felállított mikromanipulációs munkacellán lettek elvégezve. A mérés során a mikrorobot vezérlőfeszültségének frekvenciáját lehetett állítani, a többi paraméter méréssel és/vagy számítással került meghatározásra.

A súrlódási együttható változtatását a robot alá helyezett anyagminták cserélgetésével érhetjük el. A mérés során többféle anyag lett használva: üveg, normál papír, fényes felületű papír és három fajta különbözőképpen felületkezelt alumíniumlemez. A tapadási súrlódási együttható méréséhez a robot egy ismert hosszúságú lejtőre lett helyezve, amelynek hajlásszögét folyamatosan növeltük. Abból a helyzetből, ahol a robot megcsúszott, a tapadási súrlódási együttható számítható. A csúszási súrlódási együttható méréséhez a robotot a felületen állandó sebességgel húzva, a húzóerő nagyságából a csúszási súrlódási együttható meghatározható. Minden felületen a mérések tízszer lettek elvégezve, a legkisebb és a legnagyobb értékek elhagyását követően a tapadási, illetve a csúszási súrlódási együttható értéke átlagolással került meghatározásra.

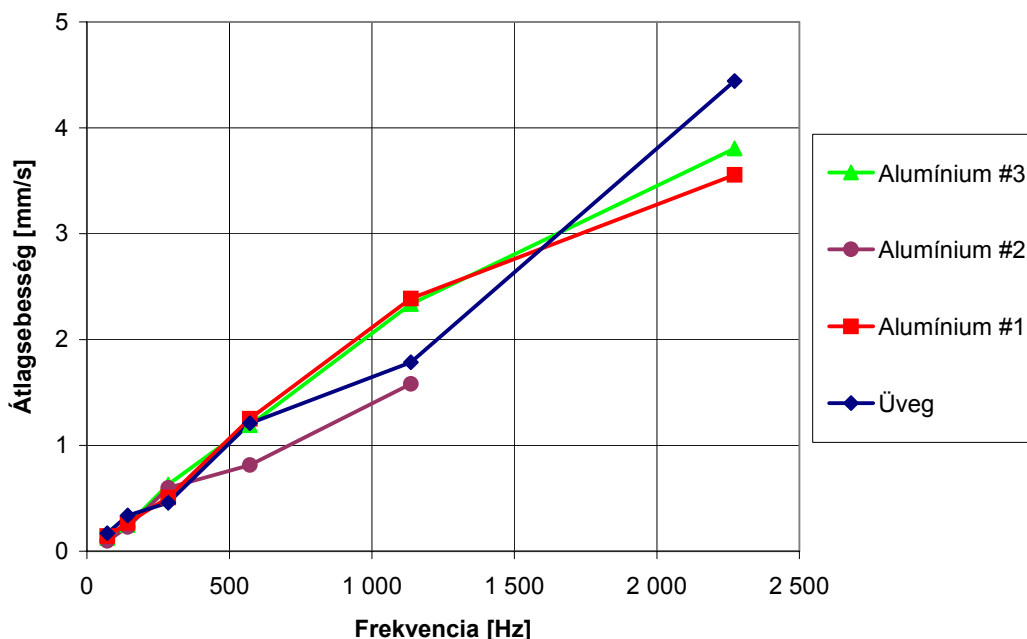
Az átlagsebesség méréséhez a mikrorobotot ismert hosszúságú pályán végigvezetve, az idő mérésével került meghatározásra a robot átlagsebessége. A pálya hossza minden esetben úgy lett megválasztva, hogy a robot futási idejéhez képest a kézi időmérés (tizedmásodperces pontossággal) hibája elhanyagolható legyen. Minden mérés legalább nyolcszor lett elvégezve, az átlagsebesség minden időadathoz meghatározásra került és az átlagolás ezután, a legkisebb és a legnagyobb érték elhagyása után lett elvégezve.

5.3.2 Frekvenciafüggés vizsgálata

Az átlagsebesség frekvenciafüggésének vizsgálata során célunk a gyakorlatban elemezni a III. sebességkarakterisztika linearitását, valamint megvizsgáljuk a mikrorobot tényleges viselkedését a $2f_0$ határfrekvencia környezetében. A vezérlő fűrészjel frekvenciájának függvényében a mért átlagsebességek az 5-7. ábrán láthatók.

A mérést a mikromanipulációs munkacella eszközkészletével végeztük, amely 5 kHz-ig vezérelhető. E felett a mikrorobot már nem képes elindulni, 3-5 kHz tartományban

pedig mozgása bizonytalan. Ezért vizsgálatainkat a 2500 Hz alatti tartományra szűkítettük.



5-7. ábra: Átlagsebesség frekvencia függésének mérési eredménye

Járófelület anyaga	Korrelációs együttható	Determinációs együttható
Üveg	0.9963	0.9926
Alumínium #1	0.9905	0.9811
Alumínium #2	0.9946	0.9893
Alumínium #3	0.9954	0.9908

5-8. ábra: A mért sebességkarakterisztika linearitásának mértéke

A grafikonon „jól látszik” a karakterisztika linearitása. A lineáris illeszkedés számszerű jóságát a mérési pontokra illesztett regressziós egyenestől való eltérés mértékével jellemezhetjük; ez a korrelációs együttható, illetve ennek négyzete a determinációs együttható¹⁴. A fenti mérés esetében a determinációs együttható értéke 98-99%, azaz nagyon magas a lineáris illeszkedés mértéke, ami megfelelően igazolja az elméleti modellből levezetett lineáris kapcsolat helyességét.

Az elméleti modellből a tényleges robot geometriai és piezoelektromos jellemzői alapján meghatároztuk az f_0 sajátfrekvenciáját. A B. Függelékben szereplő értékek felhasználásával

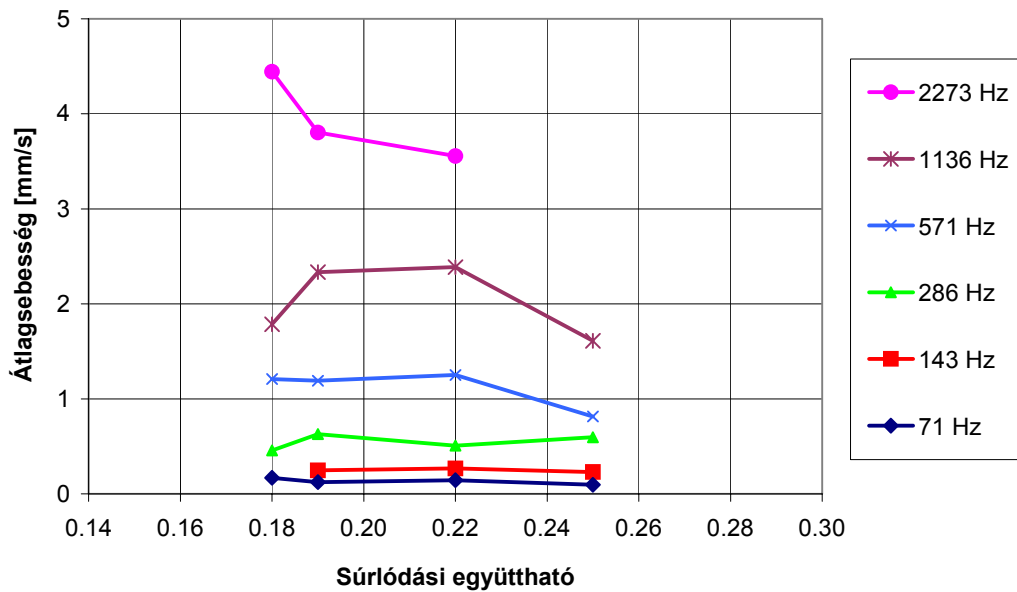
¹⁴ A lineáris regressziószámításnál a korrelációs együtthatót és a determinációs együtthatót az ismert módon határoztuk meg, az együtthatók definíciói megtalálhatók többek között *Rembold-Levi* [17] könyvében 411-415. o. A determinációs együttható értéke 0 és 1 között lehet, 1 esetében a mérési pontokra tökéletesen illeszkedik a közelítő egyenes, míg 0 érték esetében az illesztett regressziós egyenes nem alkalmas a két változó közötti lineáris kapcsolat leírására.

$$f_0 \text{ (számított)} = 262 \text{ Hz.}$$

Vagyis a $2f_0$ határfrekvencia 524 Hz, amelynél kisebb frekvenciákra a modell nem ad leírást, de a mozgás jellegének megváltozását jelezte. A mérés során azt tapasztaltuk, hogy ez a változás nem számottevő, a mikrorobot ezen frekvenciatartományban is követte a sebességkarakterisztika lineáris jellegét, vagyis a robot alacsony frekvencia-tartományban is vezérelhető maradt.

5.3.3 Járófelület hatásának vizsgálata

Az átlagsebesség súrlódási együtthatótól való függésének vizsgálata során célunk az I. sebességkarakterisztika mérése, amely eredmény az 5-9. ábrán látható.



5-9. ábra: Átlagsebesség súrlódási együttható függésének mérési eredménye

A modell alapján azt vártuk, hogy növekvő súrlódási együttható mellett az átlagsebesség csökken, valamint a különböző frekvenciákhoz tartozó görbék egy pontban, μ_{\max} -nál érik el a $v = 0$ sebességértéket. A mérési pontokból a legkisebb négyzetek módszerével végzett lineáris regressziószámítás segítségével minden frekvencián meghatároztuk a regressziós egyenes metszéspontját a súrlódási együttható tengelyével, vagyis a mérési eredményekből meghatároztuk az (5-59) egyenlettel definiált határértéket a súrlódási együtthatóra.

Frekvencia	71 Hz	143 Hz	286 Hz	571 Hz	1136 Hz	2273 Hz
μ_{\max} (kalkulált)	0.39	1.04	-0.42	0.43	0.72	0.40

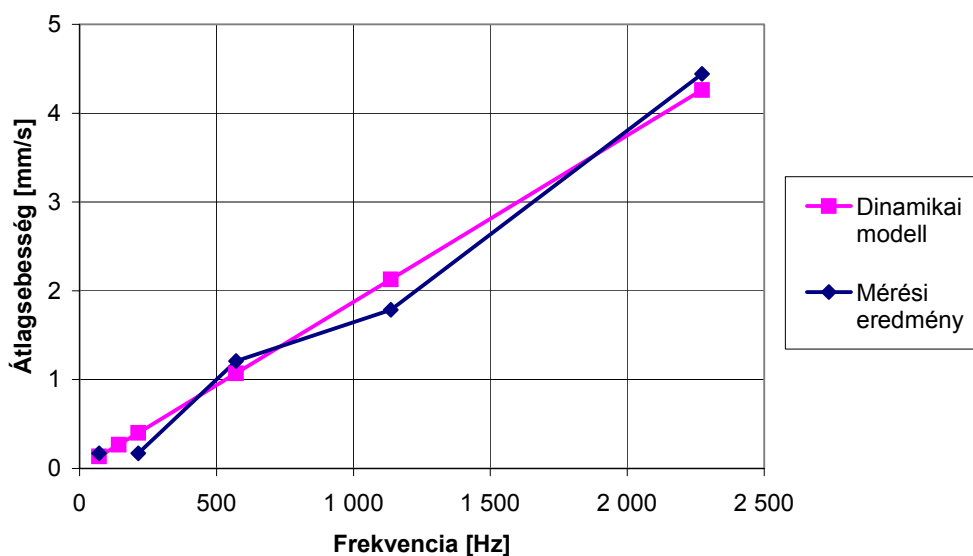
5-10. ábra: Súrlódási együttható határértékei mérés alapján

Hat különböző frekvencián elvégzett mérésből egy negatív értéket ad, ami nyilvánvalóan hibás, valamint két további érték jelentősen eltér a többitől. Három további frekvencián (vastagon kiemelve) mért sebességértékekre illesztett regressziós egyenesek azonban közelítőleg egy pontban, $\mu_{\max} = 0.39 \dots 0.43$ értéknél metszik a súrlódási együttható tengelyét, amelyet elfogadhatunk a súrlódási együtthatóra

vonatkozó határértéknek (az alkalmazott vezérlőfeszültség mellett). A mérési eredmények hibáját, illetve szóródását okozhatják a felület lokális egyenetlenségei, illetve a felületen lokálisan található szennyeződések, amelyek helyről helyre eltérően befolyásolják a robot mozgását. A mérési eredmények tovább erősítik a dinamikai modell hitelességét, azonban ismét felhívják a figyelmet a lokálisan változó környezetben tevékenykedő robot bizonytalan mozgása miatt a szabályozás szükségességére.

5.3.4 A dinamikai modell értékelése

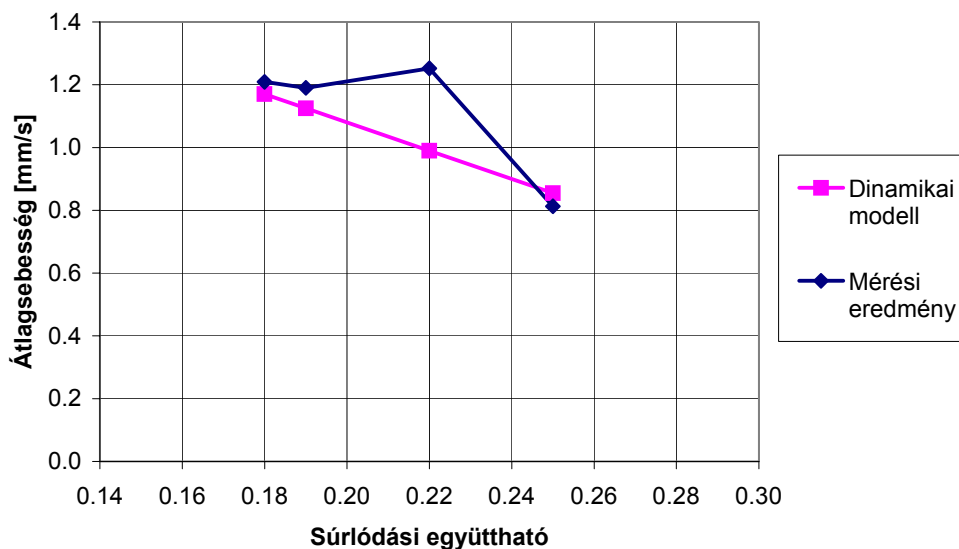
A dinamikai modell helyességének megítélése érdekében összehasonlítottuk a modelltől számított értékeket a mérési eredményekkel. Az 5-11. ábrán üvegfelületen végzett sebességmérések eredményei és az üvegfelület súrlódási együtthatójával ($\mu = 0.18$) a modelltől számított sebesség értékek kerültek ábrázolásra.



5-11. ábra: Mért és számított sebességek üvegfelületen

Az 5-12. ábra adott vezérlőfrekvencián (571 Hz) ábrázolja különböző felületeken végzett sebességmérések eredményeit, illetve a modelltől számított sebesség értékeket.

A sebességmérés hibája a manuális távolság- és időmérés hibája alapján 1.5%, azaz 0.01–0.06 mm/s. A mérési eredmények egyes esetekben a mérési hibatarományon belül, sok mérési pontban pedig azon kívül esnek. Mindazonáltal a modell és a mérések eredményeinek összehasonlítása jól mutatja, hogy a modell jellegre helyesen és nagyságrendileg is megfelelően írja le a mikrorobot mozgását. Ezért a mikrorobot mozgásának leírására kidolgozott dinamikai modellt és az abban megállapított összefüggéseket a mikrorobot mozgásának leírására alkalmas eszköznek tekinthetjük.



5-12. ábra: Mért és számított sebességek különböző felületeken

A modell és a mérési eredmények eltérését elsősorban a felület lokális egyenetlenségei, a felületen lokálisan található szennyeződések, valamint a mikrorobot modellben használt, de a valóságban nem teljeskörűen ismert paramétereit közötti eltérések okozzák. Mindezek alapján kijelenthető, hogy a modell alkalmas arra, hogy a robot irányítása érdekében a mozgást befolyásoló paraméterek hatásának jellegét és nagyságrendjét megismerjük, ennek alapján a megfelelő vezérlő jellemzőket kiválaszthassuk, valamint a robot, mint szabályozott szakasz dinamikai viselkedését leírhatjuk.

5.4 Új tudományos eredmények

Az ebben a fejezetben részletesen tárgyalt új tudományos eredményeket az alábbi tézis foglalja össze.

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,

$$k_U \text{ és } k_F \text{ a fenti állandók, valamint } \omega_0^2 = \frac{1}{mk_F}.$$

- 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

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

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

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

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

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.

6. MIKROROBOT POZÍCIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Az előző fejezetben bemutatásra került egy, a piezoelektromos mikrorobotok dinamikai tulajdonságait figyelembe vevő matematikai modell. Ennek alapján meghatároztuk a mikrorobot mozgásának lefolyását. A következőkben egy általános felépítésű mikrorobot pozíciójának és orientációjának mérés technikai szempontból előnyös definícióját mutatom be és megoldást dolgozok ki a mikroroboton elhelyezett markerek mérésének segítségével a mikrorobot pozíciójának és orientációjának meghatározására.

6.1 Diszkrét mozgást leíró operátorok

Egy mobil robot mozgása felbontható elemi elmozdulásokra. Amennyiben a robot mozgása diszkrét elmozdulásokból áll, célszerű ezeket egy-egy lépésnek tekinteni, míg folytonos mozgást végző robot esetében a folytonos mozgást közelítjük diszkrét elemi lépésekkel. A robot eredő mozgása ezen elemi lépések összessége.

Tekintsük a robot egy tetszőleges \mathbf{P} pontját, amely a robot testéhez, mint merev testhez rögzített. A robot testének tetszőleges elmozdulása esetén a kiválasztott pont új \mathbf{P}' pozíciója az elmozdulást leíró \mathbf{O} operátorral a következőképpen fejezhető ki:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{O}(\mathbf{P}) \quad (6-1)$$

A robot mozgása egymás utáni elemi lépésekből állítható össze, amely leírható az elemi lépéseket jellemző $\mathbf{O}_{i-1,i}$ operátorok egymás utáni végrehajtásával:

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{O}_{n-1,n}(\mathbf{O}_{n-2,n-1}(\dots(\mathbf{O}_{0,1}(\mathbf{P}_0))\dots)), \quad (6-2)$$

ahol az $\mathbf{O}_{i-1,i}$ operátor a \mathbf{P}_{i-1} pontot a \mathbf{P}_i pontba transzformálja.

Amennyiben a robot csak síkbeli mozgást végez, az \mathbf{O} operátor különböző síkbeli transzformáció lehet: eltolás, elforgatás, stb., illetve ezek kombinációja. Amennyiben a robot testét merev testnek tekintjük, akkor az \mathbf{O} operátorra igaznak kell lennie, hogy egy merev test pontjaira alkalmazva leírják ugyanazon merev test ugyanazon pontjainak helyzetét a merev test egy másik síkbeli pozíciójában. Ennek a követelménynek eleget tesz, ha az \mathbf{O} operátort egy elforgatási és egy eltolási transzformáció egymásutánjaként határozzuk meg:

$$\mathbf{P}' = \text{Translate}(\text{Rotate}(\mathbf{P})) \quad (6-3)$$

Tekintsünk egy K koordinátarendszert és definiáljuk az elforgatási transzformációt célszerűen úgy, hogy az a K koordinátarendszer origója körül ϑ szögben forog, majd az eltolási transzformáció egy \mathbf{t} vektorral való eltolást végez. A fenti operátor tehát egy elforgatási és egy eltolási transzformációval a \mathbf{p} helyvektort a \mathbf{p}' vektorba viszi át:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{A}_\vartheta \cdot \mathbf{p} + \mathbf{t}, \quad (6-4)$$

ahol az \mathbf{A}_ϑ mátrix az origó körüli ϑ szögű elforgatás mátrixa. Annak érdekében, hogy az elforgatást és az eltolást egyetlen mátrixszal tudjuk leírni, bevezetjük a homogén koordinátákat¹⁵, amelyekkel a fenti transzformáció a következőképpen írható fel:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{O} \cdot \mathbf{p}, \quad (6-5)$$

ahol \mathbf{O} jelöli az \mathbf{O} operátor mátrixát. Az egyenletet részletesen felírva

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & t_x \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6-6)$$

illetve a mátrixműveleteket elvégezve

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos \vartheta - y \cdot \sin \vartheta + t_x \\ y' &= x \cdot \sin \vartheta + y \cdot \cos \vartheta + t_y \end{aligned} \quad (6-7)$$

6.2 Mobil robot pozíciójának és orientációjának definíciója

A robot pozíciójának és orientációjának definiálásához ki kell jelölnünk egy világkoordináta-rendszert, valamint egy kitéüntetett középpontot és irányt a robot testén, amelyek referenciaként használhatók. Jelöljük a későbbiekben definiálandó Robot Középpontot RKP-val. Helyezzük a robot testéhez rögzített lokális koordináta-rendszer origóját RKP-ba, ennek x tengelye legyen párhuzamos a robot hosszanti tengelyével, az y tengely pedig erre merőleges. A robot pozíciójának ezentúl az RKP koordinátáit nevezzük, orientációját pedig a világkoordináta-rendszer x tengelye és a robothoz rögzített lokális koordináta-rendszer x tengelye által bezárt φ szöggel definiáljuk.

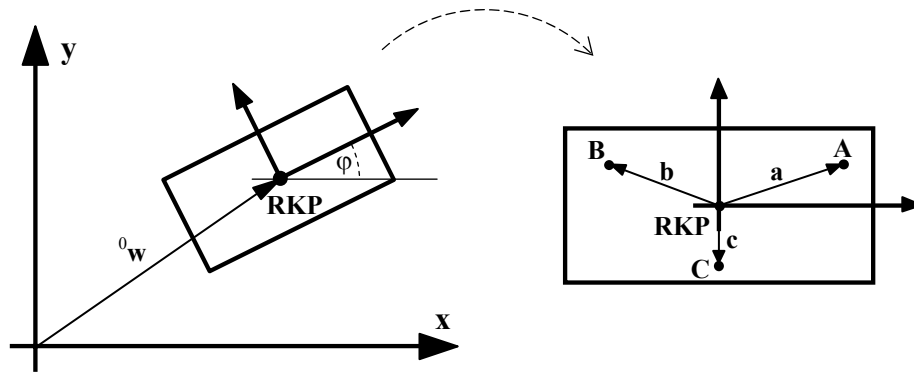
Az RKP helye a robot testén tulajdonképpen tetszőlegesen kijelölhető. Választható a robot fizikai tömegközéppontjának síkbeli vetülete, vagy geometriai középpontja, illetőleg bármely más pont is. Célszerű azonban RKP-t úgy választani, hogy az RKP koordinátáinak mérése során (a robot pozíciójának a szenzorrendszer általi mérésekor) az a lehető legkönnyebben meghatározható legyen. Kívánatos ugyanakkor, hogy az RKP többé-kevésbé a robot geometriai középpontja közelében legyen. (Nem biztos azonban, hogy a geometriai középpont - pl. marker elhelyezésével - fizikailag is megjelölhető, így nem biztosítható, hogy annak pozíciója közvetlenül mérhető.) Ezért a következő eljárás célravezető. Megjelölünk a robot testén három, vagy több pontot, jelölje ezeket \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , stb., amelyekhez RKP-ból rendre az \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , stb. vektorok, a világkoordináta-rendszer origójából pedig az ${}^0\mathbf{a}$, ${}^0\mathbf{b}$, ${}^0\mathbf{c}$, stb. vektorok vezetnek, az RKP helyvektora a világkoordináta-rendszerben pedig ${}^0\mathbf{w}$.

Az RKP-t definiáljuk a fizikai tömegközéppont analógiájára (most három pont esetén):

$$\mathbf{w} = \frac{\alpha \mathbf{a} + \beta \mathbf{b} + \chi \mathbf{c}}{\alpha + \beta + \chi} = \alpha \mathbf{a} + \beta \mathbf{b} + \chi \mathbf{c}, \quad (6-8)$$

¹⁵ Egy $(x,y)^T$ vektor homogén koordinátás alakjának az 1 értékű harmadik koordinátával kiegészített $(x,y,1)^T$ vektort nevezzük.

ahol α , β és χ nem valóságos, hanem fiktív, szabadon választható "tömegeket" képviselnek, ezért a számítások egyszerűsítése érdekében legyen $\alpha + \beta + \chi = 1$. A bemutatott RKP definíció az alábbi ábrán látható.



6-1. ábra: Robot KözéP Pont (RKP) definiálása

A robot mozgása során RKP koordinátái is változnak. Tekintettel arra, hogy RKP is a robot egy pontja, mozgása leírható az \mathbf{O} transzformációval:

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{w}' &= \mathbf{O} \cdot {}^0\mathbf{w} = \mathbf{O} \cdot (\alpha {}^0\mathbf{a} + \beta {}^0\mathbf{b} + \chi {}^0\mathbf{c}) = \\ &= \alpha \mathbf{O} {}^0\mathbf{a} + \beta \mathbf{O} {}^0\mathbf{b} + \chi \mathbf{O} {}^0\mathbf{c} = \alpha {}^0\mathbf{a}' + \beta {}^0\mathbf{b}' + \chi {}^0\mathbf{c}' \end{aligned} \quad (6-9)$$

6.3 Pozíció és orientáció változás leírása

Tekintsük a robot egymás utáni elemi lépéseit, és az egyes pozíciókban elhelyezkedő koordinátarendszereket. Jelölje őket: 1K , 2K , ..., ${}^{i-1}K$, iK (az i . lépés után). A 0K koordinátarendszer a világkoordináta-rendszert jelöli és RKP kezdetben a 0K origójában helyezkedik el. A robot egy kiválasztott \mathbf{P} pontját az egyes pozíciókban jelölje \mathbf{P}_i , továbbá az a ${}^i\mathbf{p}_i$ vektor, amelyik az i . lépés után az i . pozícióban elhelyezkedő robot \mathbf{P} pontjába a iK koordinátarendszer origójából mutat (ld. 6-2. ábra).

Az ${}^{i-1}K$ koordinátarendszerben értelmezett $\mathbf{O}_{i-1,i}$ transzformáció a robot testét, így annak \mathbf{P} pontját is egy lépéssel elmozdítja. Az egyetlen lépést leíró $\mathbf{O}_{i,k}$ műveletet STEP operátornak nevezzük. A STEP operátor definíciójának megfelelően:

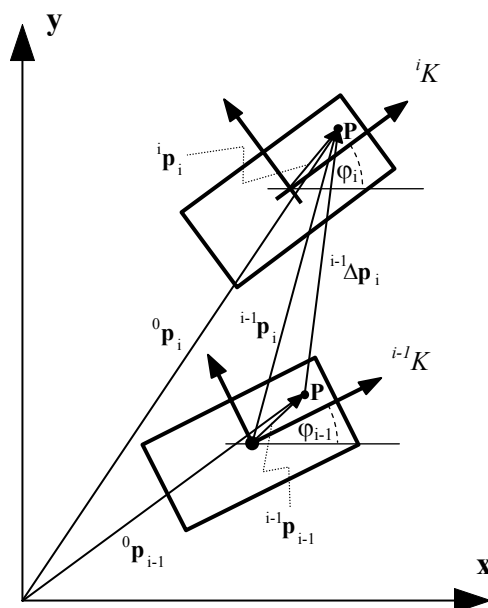
$${}^{i-1}\mathbf{p}_i = \mathbf{O}_{i-1,i} \cdot {}^{i-1}\mathbf{p}_{i-1} \quad (6-10)$$

Mivel a robot merev test, ezért ${}^0\mathbf{p}_0 = {}^1\mathbf{p}_1 = {}^2\mathbf{p}_2 = \dots = {}^{i-1}\mathbf{p}_{i-1} = {}^i\mathbf{p}_i$. Ebből következően az előző egyenlet a következő alakban is felírható:

$${}^{i-1}\mathbf{p}_i = \mathbf{O}_{i-1,i} \cdot {}^i\mathbf{p}_i \quad (6-11)$$

Így a \mathbf{P}_i pont koordinátái a világkoordináta-rendszerben:

$${}^0\mathbf{p}_i = \mathbf{O}_{0,1} \cdot \mathbf{O}_{1,2} \cdot \dots \cdot \mathbf{O}_{i-1,i} \cdot {}^i\mathbf{p}_i \quad (6-12)$$



6-2. ábra: Robot elemi lépése

A ${}^0\mathbf{p}_i$ vektorok csak az egyes pontok pozícióját tartalmazzák, a robot orientációjára vonatkozóan semmilyen információt nem adnak. Ezért a továbbiakban a robot i . lépése utáni pozícióját és orientációját az \mathbf{O} transzformáció mátrixának megfelelően a következőképpen definiáljuk és **MOP**-nak (Matrix of the Orientation and Position) nevezzük:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{O}_{0,1} \cdot \mathbf{O}_{1,2} \cdot \dots \cdot \mathbf{O}_{i-1,i} \quad (6-13)$$

A robot pozícióját és orientációját MOP-al írjuk le, amelynek elemei közvetlenül megadják az RKP pozícióját és a robot orientációját a világszínvonalon a robot i . lépése utáni helyzetében:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & x_{RKP,i} \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & y_{RKP,i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-14)$$

6.4 Robot MOP meghatározása becslési eljárással

A robot MOP - definíciója alapján - teljeskörűen leírja a robot pozícióját és orientációját. A mikromanipulációs munkacellában a robot előírt pályán történő irányítása, illetve az adott célpontba történő vezetése érdekében a szabályozó rendszer feladata a megkívánt trajektória követése. Ennek érdekében a szenzorrendszer mérési adataiból közvetlenül, vagy közvetett módon kell meghatároznunk a robot MOP-ot. A következő fejezetben ismertetésre kerülő indokok miatt a mikrorobot pozíció mérésére kontaktusmentes mérési eljárást indokolt használnunk. Kézenfekvő, hogy a robot egyes pontjaira markereket helyezünk el és a markerek pozícióját optikai úton mérjük.

Ismeretes, hogy egy homogén, lineáris transzformáció teljesértékűen jellemezhető a transzformáció terét kifesztő, nem koplánáris vektorok és transzformáltjaik

megadásával. Tulajdonképpen a MOP is ezt tartalmazza, mivel elemei az ortogonális bázisvektorok transzformáltjai.

Síkbeli transzformációk kielégítően leírhatók két, nem egy egyenesbe eső vektor és transzformáltjaik megadásával. A pontosság és más tényezők növelése érdekében általánosan $n > 2$ vektor vizsgálatát végezzük el. A vizsgált vektorok a robot testének kiválasztott és a robot testéhez rögzített pontjaiba (a markerek középpontjaiba) mutatnak, így a vektorok tulajdonképpen a robot egyes pontjait írják le. Tekintsünk tehát n vektort, ennek három pontra vonatkozó esetét az RKP definíciójában \mathbf{a} , \mathbf{b} és \mathbf{c} jelöli, általánosan jelölje most őket \mathbf{p}_j , ahol $j \in [1, n]$: \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 , \mathbf{p}_3, \dots , \mathbf{p}_n . A jelölések egyszerűsítése érdekében az i . pozícióban lévő robot egyes pontjaiba mutató vektorokat és koordinátáikat a világkoordináta-rendszerben vesszős indexek, a lokális koordináta-rendszerben pedig vessző nélküliek jelölik (az alsó indexek most nem a lépésre, hanem a vektor sorszámára utalnak).

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 = {}^i \mathbf{p}_{1,i} &= \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} & \mathbf{p}_2 = {}^i \mathbf{p}_{2,i} &= \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} & \dots & \mathbf{p}_n = {}^i \mathbf{p}_{n,i} &= \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}'_1 = {}^0 \mathbf{p}_{1,i} &= \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ 1 \end{bmatrix} & \mathbf{p}'_2 = {}^0 \mathbf{p}_{2,i} &= \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ 1 \end{bmatrix} & \dots & \mathbf{p}'_n = {}^0 \mathbf{p}_{n,i} &= \begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6-15)$$

A MOP transzformációs mátrixban pedig használjuk az alábbi rövidítést: $r_1 = \cos \varphi$ és $r_2 = \sin \varphi$. Ekkor a MOP alakja a következő:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_2 & t_x \\ r_2 & r_1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-16)$$

A világkoordináta-rendszerbeli pozíciók pedig a MOP-pal a következőképpen írhatóak:

$$\mathbf{p}'_1 = \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}'_2 = \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_2 \quad \dots \quad \mathbf{p}'_n = \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_n \quad (6-17)$$

A fenti mátrixegyenlet-rendszerben a \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 , ..., \mathbf{p}_n vektorok ismertek, hiszen ezek a roboton rögzített pontokba az RKP-ből mutató vektorok. A szenzorrendszer feladata a \mathbf{p}'_1 , \mathbf{p}'_2 , ..., \mathbf{p}'_n vektorok, vagyis a világkoordináta-rendszerben a roboton kijelölt pontok pozíciójának a mérése, ami már reális célkitűzés a szenzorrendszer számára. A mérési adatokból kell meghatározni azt az \mathbf{R} transzformációs MOP-ot, amellyel a fenti egyenletrendszer teljesül.

Az egyenletrendszer $n > 2$ esetén túlhatározott. A túlhatározottság oka az, hogy merev testről lévén szó, az egyes pontok között mérhető távolság a mozgás során nem változik. Mérés esetén azonban a mérési eredmények hibával terheltek, tehát várhatóan semmilyen \mathbf{R} mátrix nem elégíti ki teljesen pontosan az egyenletrendszert. A feladat az, hogy olyan \mathbf{R} megoldást találjunk az egyenletrendszerre, amely valamilyen kritérium szerint a legjobban közelíti a tényleges MOP-ot. Ezt becslési eljárások alkalmazásával érhetjük el. Ehhez felírjuk a mátrixegyenlet-rendszert egyetlen mátrixegyenlettel úgy,

hogy az $\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{e}$ általános lineáris rendszermodellnek megfelelően az ismeretlen mennyiségek külön vektorban szerepeljenek (\mathbf{e} a hibavektor):

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ \vdots \\ x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & -y_1 & 1 & 0 \\ y_1 & x_1 & 0 & 1 \\ x_2 & -y_2 & 1 & 0 \\ y_2 & x_2 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & -y_n & 1 & 0 \\ y_n & x_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix} + \mathbf{e} \quad (6-18)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{e}$$

A becslési eljárás célja olyan $\hat{\mathbf{b}}$ paramétervektor becslése, amely a becslési kritériumot teljesíti. Amennyiben a becslés a mérési adatok ismeretében elvégezhető, a paramétervektor elemei egyértelműen meghatározzák a robot MOP-ját, így a robot pozíciója és orientációja meghatározásra került.

A Gauss-Markov-becslő (GM) használatával a legkisebb kovarianciájú becslési hibával rendelkező paramétervektort állíthatunk elő. A becslő használatának feltétele, hogy a paramétervektor korrelációs mátrixát és a hibavektor kovarianciamátrixát ismerjük. A becslési eljárás *Kronmüller* [19] alapján

$$\hat{\mathbf{b}}_{GM} = (\mathbf{X}^T \mathbf{V}_e^{-1} \mathbf{X} + \mathbf{K}_b^{-1})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{V}_e^{-1} \mathbf{y}. \quad (6-19)$$

A fenti egyenletben $\mathbf{V}_e = \mathbf{E}\{\mathbf{e} \mathbf{e}^T\}$ a hiba kovarianciamátrixa, $\mathbf{K}_b = \mathbf{E}\{\mathbf{b} \mathbf{b}^T\}$ a paramétervektor korrelációs mátrixa, ahol $\mathbf{E}\{\}$ a várható értéket jelöli. Amennyiben a paramétervektorról, vagyis az ismeretlen mennyiségekről további információk állnak rendelkezésre, vagy pl. egy további szenzorrendszer kiegészítő információkat szolgáltat, illetve a köztük levő összefüggések előre ismertek, a Gauss-Markov-becslő használata indokolt.

Amennyiben a paramétervektorról, valamint a hiba kovarianciamátrixáról nem áll rendelkezésre kellő információ, $\mathbf{K}_b^{-1} = \mathbf{0}$ és $\mathbf{V}_e = \sigma_e^2 \mathbf{I}$ helyettesítéssel a legkisebb négyzetes (Least-Squares) becslőhöz [19] jutunk:

$$\hat{\mathbf{b}}_{LS} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (6-20)$$

A részletszámítások mellőzésével a robot pozíció és orientáció paramétereit tartalmazó paramétervektor legkisebb négyzetes becslése:

$$\hat{\mathbf{b}}_{LS} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \hat{t}_x \\ \hat{t}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{nS_2 - (S_X^2 + S_Y^2)} \cdot \begin{bmatrix} nS_H - S_X S'_X - S_Y S'_Y \\ nS_V + S'_X S_Y - S_X S'_Y \\ S_2 S'_X - S_X S_H + S_Y S_V \\ S_2 S'_Y - S_X S_V - S_Y S_H \end{bmatrix}, \quad (6-21)$$

ahol

$$\begin{aligned}
 S_X &= \sum_{j=1}^n x_j & S_Y &= \sum_{j=1}^n y_j \\
 S'_X &= \sum_{j=1}^n x'_j & S'_Y &= \sum_{j=1}^n y'_j \\
 S_H &= \sum_{j=1}^n x_j x'_j + y_j y'_j & S_V &= \sum_{j=1}^n x_j y'_j - x'_j y_j \\
 S_2 &= \sum_{j=1}^n x_j^2 + y_j^2
 \end{aligned} \tag{6-22}$$

A legkisebb négyzetes becslési eljárás numerikus kiszámítása során az $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ mátrix invertálását el kell végezni. Érdemes felhívni a figyelmet arra, hogy az invertálandó mátrix 4×4 eleméből áll a mérési pontok számától függetlenül, vagyis a számítás komplexitását a mérési pontosság növelése érdekében a mérési pontok (markerek) számának növelése nem befolyásolja. A becslési eljárással tehát a \mathbf{b} paramétervektorra kapunk egy becslést, amelynek elemei a robot MOP mátrixának elemeit tartalmazzák. A \mathbf{b} paramétervektor t_x és t_y elemei közvetlenül a robot pozíció koordinátái, míg a robot orientációját a \mathbf{b} paramétervektor r_1 és r_2 elemeiből $\varphi = \arctan r_2 / r_1$ adja.

6.5 Új tudományos eredmények

Az ebben a fejezetben részletesen tárgyalt új tudományos eredményeket az alábbi tézis foglalja össze.

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 koordinátarendszerben 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 magába 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.

7. ÚJ ELJÁRÁSOK MIKROROBOTIKAI SZENZOROKRA

7.1 Robotikai szenzorok

A szenzorok fő feladatai, hogy a rendszer és környezete állapotáról mérési eredményeket szolgáltatassanak. Úgy is tekinthetjük, hogy interfészt biztosítanak a környezet és a szabályozó között. A szenzorokat tipikusan a mérendő jel alapján szokás csoportosítani. Mikrorendszertechnikai környezetben alkalmazható szenzorok egy egyszerű csoportosítása látható alább.

Jelforma	Mérendő mennyiség
Termikus	Hőmérséklet, hőmennyiség, hőáram, entrópia, hőkapacitás, stb.
Sugárzás	Sugárzás erőssége, hullámhossza, stb.
Mechanikai	Elmozdulás, sebesség, gyorsulás, erő, nyomás, tömegáram, akusztikus hullámhossz és amplitúdó, stb.
Mágneses	Mégneses térerősség, fluxus, mágneses momentum, mágneses permeabilitás, stb.
Kémiai	Páratartalom, pH szint, ionizáltság, gáz, illetve egyéb anyagok koncentrációja, stb.
Biológiai	Fehérje, hormon, antigének jelenléte, formája, mennyisége, stb.

7-1. ábra: Szenzorok osztályozása

A mikromanipulációs munkacella fő feladatai a nagyon pontos munkavégzés és a kellően nagy távolságra történő szállítás. Ennélfogva a szabályozó rendszer számára a legfontosabb információk a mikrorobot és manipulátorának *pozíciója* és *orientációja*. A mikrorobot a modellnek megfelelően csak síkban tud mozogni, azonban a manipulátor esetében a pozíciót három dimenzióban kell meghatároznunk.

A mikromanipulációs munkacella általános célú feladatok végrehajtására szolgál, ezért a pozíció- és orientációmérést is sokrétű feladatok ellátása során kell biztosítani. A mikroméretű tárgyak és élő organizmusok sérülékenysége szükségessé teszi, hogy a mérés minimális beavatkozással történjen. Ennek érdekében a kontaktusmentes eljárásokat részesítjük előnyben. Ennek keretében elsősorban az elektromágneses hullámokkal történő mérési eljárások jöhetnek számításba. Az említett objektumok érzékenysége miatt ezen belül is a látható fénnel, illetve az ahhoz közeli hullámhosszakkal (infravörös, UV) történő vizsgálat javasolt. Mindezen megfontolások alapján pozíció- és orientációmérési célokra mikrorobotikai környezetben elsősorban vizuális alapú szenzorokat javasolunk, ezért a kutatást a továbbiakban vizuális alapú mérési módszerekre és eljárásokra korlátozzuk [22], [23], [27].

Az ebben a fejezetben bemutatásra kerülő megoldások elsősorban a mérési eljárást hivatottak meghatározni és irányt szabni az optikai szenzorok terén folytatandó további

kutatásoknak. Az itt ismertetésre kerülő tudományos eredményeket implementált berendezéseken végzett mérési eredmények támasztják alá. A mérési módszereknek a szerző által is kezdeményezett továbbfejlesztései időközben diplomatervezési munkákban, illetve PhD eljárás keretében kerültek megvalósításra, ezért az itt bemutatott eredmények végül tézisként nem kerültek megfogalmazásra.

7.2 Képképzés mikromanipulációs környezetben

Az egyik legnehezebb feladat a mikrovilágban végbemenő folyamatokról történő információszerezés és az információ továbbítása a makrovilág felé. A mikrorobot navigációját és irányítását egy intelligens érzékelő rendszernek kell támogatnia. A mikromanipulációs munkacella látórendszerének főbb feladatai az alábbiak:

- a mikrorobot és manipulátora egzakt, vagy nem egzakt pozíciójának és orientációjának meghatározása;
- a tervezett trajektóriától való eltérés meghatározása;
- a mikromanipulációs állomáson történő dokkolási folyamat támogatása.

A transzport tartományban történő navigációhoz a korábban leírtaknak megfelelően 0.01-1 mm közötti pontosság szükséges. Ezt a vizuális felbontást egy szokásos kamera felhasználásával elérhetjük. A kihívást a munkacella egész területén történő folyamatos megfigyelés és mérés jelenti. A szenzor kialakítására és a mérési módszerre a későbbiekben tesztek javaslatot.

A manipulációs tartományban 0.1-10 μm felbontás szükséges. Ezen mérés érintésmentes megvalósítása mikroszkóp alkalmazását igényli.

7.2.1 Fénymikroszkóp

A legkézenfekvőbb megoldás a mikrovilágban végbemenő folyamatok megfigyelésére a fénymikroszkóp, amely a látható fénytartományban dolgozik (380 nm - 760 nm). A fény hullámtermészete miatt a mikroszkóp felbontóképessége is korlátozott: $1/d = n \sin u / \lambda$, ahol λ az alkalmazott hullámhossz, n a törésmutató, u pedig az objektív nyílásszöge. Mivel technikai okokból $n \sin u$ (az ún. numerikus apertúra) még immerziós folyadékkal is csak mintegy 1.35-ig növelhető ($u \approx 65^\circ$, $n = 1.5$), a d felbontási határ csak alig valamivel kisebb, mint a használt fény hullámhossza. Fehér fényel használt fénymikroszkópok esetén, immerziós folyadék nélkül nagyságrendi közelítésnek a felbontási határt 0.5 μm (500 nm) értéknek vehetjük.

Ennél kisebb méretű objektumok, manipulációs lépések „vizuális” megfigyelését tehát a nagyítás növelésével már nem, csak a vizsgáló hullámhossz csökkentésével érhetjük el. A felbontási határt ultraibolya fényel levegőben kb. 200 nm-ig lehet csökkenteni (az ennél rövidebb hullámhosszú fényt a levegő erősen abszorbeálja), vákumban ennél kisebb hullámhosszú fény is használható néhányszor tíz nanométer határig.

7.2.2 Elektronmikroszkóp

Amennyiben ennél nagyobb felbontásra van szükségünk, a mikrotartomány vizualizációját elektronmikroszkóp segítségével végezhetjük el. A mágneses, vagy elektrosztatikus elektronmikroszkóp elvi felépítése teljesen hasonló a projekciós fénymikroszkóphoz, csak a közönséges lencsék helyett mágneses, illetve elektromos

terek fókuszálják a tárgy egyes pontjaira érkező és ott különböző mértékben elnyelődő és szóródó elektronnyalábot, létrehozva ezzel a tárgy elektronoptikai képét. Az elektronmikroszkóp nagy előnye a fénymikroszkóppal szemben a sokkal jobb feloldóképesség, amely a 0.5 nm-es határt is elérheti, a hasznos nagyítás pedig elérheti a 300 000-szerest, a fénymikroszkópoknál alkalmazott maximális nagyítás több százszorosát.

Mikrorobotikai alkalmazásokban a manipulációs állomást egy vákumkamrába kell helyezni. Az elektronmikroszkóp a lényege a *Hatamura* [5] által bemutatott integrált mikroméretű gyártórendszernek, amely három vákumkamrából álló egységben végzi mikroméretű objektumok előállítását és összeszerelési műveleteit.

Az elektronmikroszkóp alkalmazása azonban számos korlátozást is magával hoz. A manipulátornak vákumban kell működnie és ellenállónak kell lennie az elektronsugárzással szemben. Mikroelektronikai komponensek emiatt nem, élő organizmusok pedig csak korlátozottan helyezhetők el a mikroszkóp kamrában. További korlátozást jelent az elektronmikroszkóp kamra kis mérete, bár az utóbbi időben ~50 cm méretű kamrákat is készítenek. Nem elhanyagolható szempont az elektronmikroszkóp technológia lényegesen magasabb költsége a fénymikroszkóphoz képest.

7.3 Képetektálás és képfeldolgozás

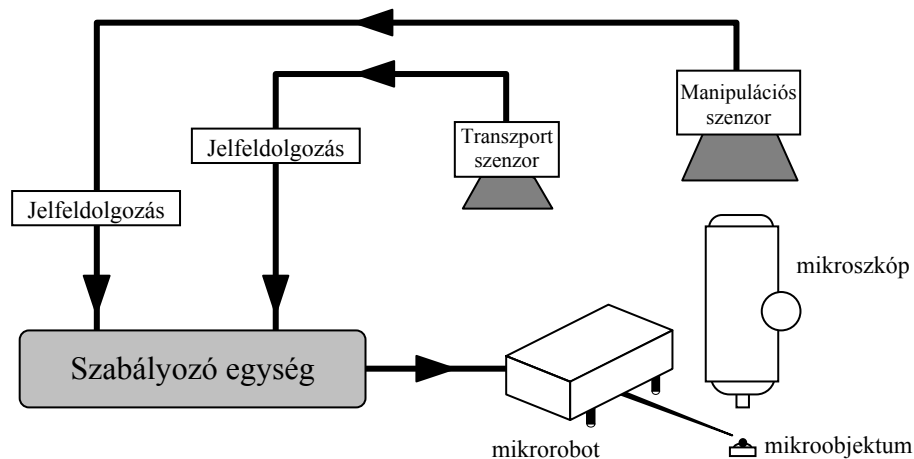
A vizuális szenzorok esetében egy optikai rendszer a mikromanipulációs munkacella egy adott helyén egy adott nézőpontból látható látványt képezi le. A leképzett látványból az elektronikus kép (jelfolyam) előállítása kamerával történik. Analóg kamera (ilyenek a széles körben elterjedt CCD eszközök) használata esetén még szükség van egy A/D átalakítóra, amelyet képdigitalizálónak neveznek, míg a digitális kamerák közvetlenül a digitális képet szolgáltatják. A robot, vagy manipulátora pozíciójának meghatározása ezután a digitális kép feldolgozásával történhet, ahol különböző képfeldolgozási eljárások révén juthatunk a kívánt információkhoz.

Lényeges azt látnunk, hogy a végső mérési eredmény kinyerésére irányuló folyamat során alapvetően két eltérő információredukciós lépcső található: egyrészt az elektrooptikai rendszer, amely a látványból valamilyen felbontású digitális képet állít elő, majd a képfeldolgozó eljárás, amely a kép manipulálásával szolgáltatja a mérési eredményt. Mindig tudatában kell lennünk annak, hogy az elektrooptikai rendszer korlátait (pl. felbontóképesség) semmilyen képfeldolgozó eljárással nem tudjuk megjavítani, azaz a látványból az elektrooptikai leképzés során elvesztett információk utólag nem hozhatók vissza a képbe.

A képfeldolgozási műveletek nagy számítási kapacitást igényelnek, egyrészt, mert a pontosság érdekében a digitális kép a kamera felbontásától függően 200 000 – 3 000 000 pixelt tartalmaz, másrészt, mert a képfeldolgozási algoritmusok nagy komplexitásúak. A mai számítógépek feldolgozási sebessége azonban már megközelíti azt a határt, amely lehetővé teszi, hogy vizuális szenzorok képfeldolgozási algoritmusaiakkal együtt egy szenzorcsatolt szabályozási körbe helyezhetők legyenek. Az utóbbi időben elterjedtek a DSP processzorral ellátott digitális kamerák is, amelyekben a képfeldolgozási műveleteket a kamerával egybeépített jelfeldolgozó processzor végzi el, amelyen a képfeldolgozási algoritmust futtatva a kamera kimenetén – a képpel mellett – közvetlenül a mérési információt kapjuk.

7.4 Javaslat a munkacella szenzoraira

A mikromanipulációs munkacella funkcionális felépítésének elemzése során láttuk, hogy a manipulációs és szállítási feladatok két, egymástól elkülöníthető funkcionális és térbeli tartományra oszthatók a cellát. A mikromanipulációk igen nagy pontosságú, mikrométeres nagyságrendbe eső műveleteket jelentenek, amelyeket a mikrorobot beavatkozó szerve, a mikromanipulátor hajt végre. A műveletek pontossága érdekében rendszerint célszerű a végrehajtási sebesség rovására még kompromisszumot is kötni. A mikrorobot szállítási feladatai mikroobjektumoknak és alkatrészeknek a mikromanipulációs munkacella egy állomásáról egy másikra való szállítása. A szállítási műveletek – összehasonlítva a manipulációs eljárásokkal – viszonylag kis pontosság mellett nagy sebességet igényelnek. Az egyes tartományok pontosság, sebesség és az információszerzés tárgya szerinti különbözősége folytán célszerű eltérő technológiával megvalósított szenzorokat alkalmazni a munkacella egyes tartományaiban; ezek a *mikromanipulációs szenzor* és a *transzport szenzor*. A munkacella szenzorainak sematikus rajza a 7-2. ábrán látható.



7-2. ábra: Mikromanipulációs munkacella szenzorai

A mikromanipulációs tartományban vizuális szenzorként egy kamerával felszerelt mikroszkóp alkalmazását javasoljuk. A mikroszkóp által előállított képet egy CCD kamerával detektáljuk és a jelfeldolgozó egység képfeldolgozási eljárások alkalmazásával határozza meg a mikromanipulátor pozícióját és orientációját, amely szabályozási és trajektóriatervezési célokra használható fel. A mikroszkópos környezet előnye, hogy alkalmazásával a humán operátor számára is lehetőség nyílik, hogy megfigyelje és felügyelet alatt tartsa a mikrorobotnak a mikroszkóp látóterében végzett nagy pontosságú műveleteit.

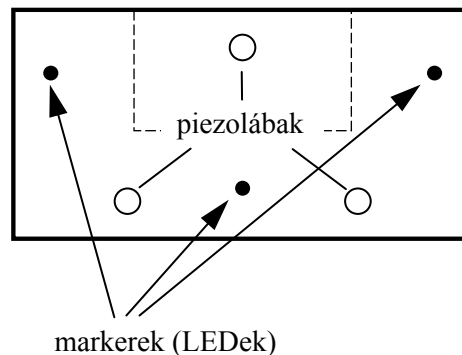
A szállítási tartományról a transzport szenzor gyűjt információkat a robottest globális pozícióját és orientációját illetően. Megvalósítását tekintve a robottesten elhelyezett markerek képét egy CCD kamera detektálja és a transzport szenzorhoz kapcsolódó jelfeldolgozó egység képfeldolgozási eljárásokkal számítja ebből a mikrorobot pozícióját és orientációját.

7.5 Transzport szenzorrendszer

A transzport szenzorrendszer feladata a mikrorobot test pozíciójának és orientációjának meghatározása a munkaasztal síkjában, vagyis két dimenzióban. A mikrorobot a transzport tartományban viszonylag nagy sebességgel képes mozogni, ez elérheti az 1-5 mm/s értéket. A mikrorobot a mikromanipulációs munkacella teljes területén szabadon mozoghat, vagyis a transzport szenzorrendszer számára a teljes terület vizsgálata kívánatos. A BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén megépített mikrorobot teste egy 60×30×30 mm-es tömbből lett kialakítva, míg a mikromanipulációs munkacella mérete 320×240 mm. Tekintettel a robottest kis méretére, a transzport szenzort a munkacellához (és nem pedig a robothoz) rögzítetten volt célszerű kialakítani. A robottest pozíciójának mérését annak néhány kitüntetett pontjának mérésére vezetjük vissza, azokat pedig ún. markerekkel jelöljük meg.

7.5.1 Markerek

Megfelelőnek tűnik, amennyiben a markerek a robot legfelső sík felületén helyezkednek el [29]. Az irányítási feladat célja, hogy a robot a mikromanipulációs munkaállomások egyikére eljusson. Fentebb részletezett okokból a mikromanipulációs állomásokon célszerűen egy-egy mikroszkóp is elhelyezkedik, valamint további eszközök találhatóak a manipulációs műveletek elvégzése érdekében. Ezért nem lehet kizárni, hogy a mikrorobot egyes pozícióiban annak felső felületén elhelyezett markerek egyike, másika a kamera látóterében takarásban van, ami megnehezíti a robot pozíció meghatározását. Ezért egy másik megoldás került kidolgozásra, amely a markereket a robot alsó felületén helyezi el. A markerek elhelyezésére szolgáló megoldás részletesen szerepel *Vajda* [16] dolgozatában.



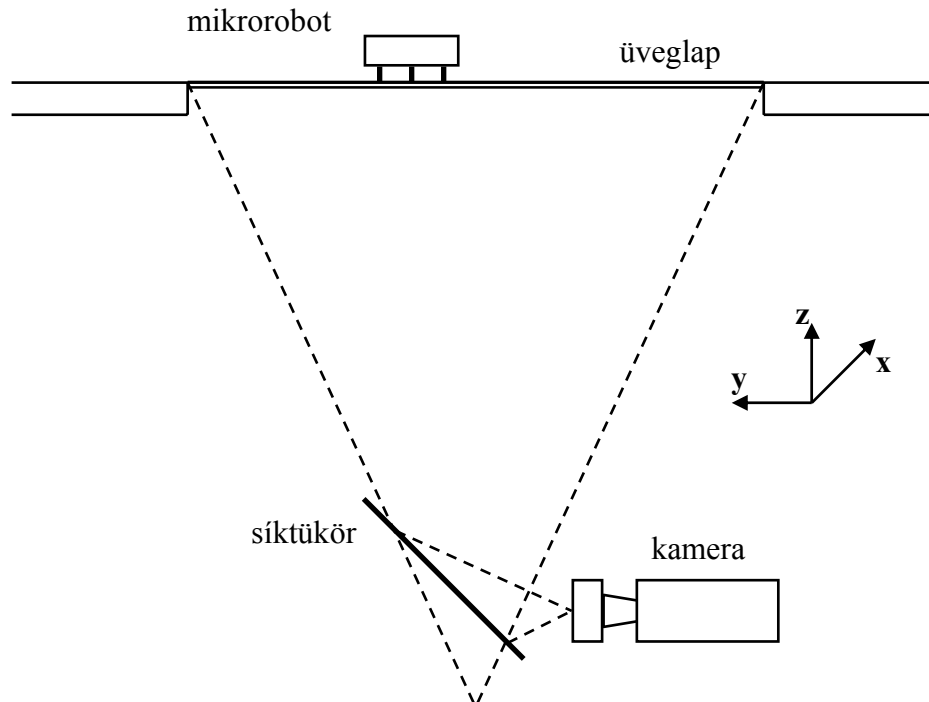
7-3. ábra: Robottest alsó részén elhelyezett markerek

A mikrorobot az egyenletes és kellő tapadás biztosítása érdekében egy üveglapon mozog, ami lehetővé teszi, hogy a mikrorobot mozgásának megfigyelését alulról végezzük. Így a markereket nem a robot felső, hanem az alsó felületén (a robot hasán) helyezük el és a kamera az itt elhelyezett markerek pozícióját méri. Az orientáció meghatározásának céljából a markerek egy meghatározott geometriai elrendezésben helyezkednek el a robot felületén. Ezt kielégítően valósítja meg három, nem egyenlő oldalú háromszög csúcspontjaiba helyezett marker struktúra. (Szükséges megemlíteni, hogy a mérési pontosság növelhető azáltal, hogy háromnál több markert helyezünk el a robot alsó részén.) A képfeldolgozási eljárás további egyszerűsítése érdekében aktív markereket (világító diódák / LED) használunk. Ezek segítségével a markerek a képfeldolgozás során jól elkülöníthetők a háttértől. Amennyiben a LED-ek fénye önmagában nem elegendő a háttértől való megkülönböztetés érdekében, különbségi

képfeldolgozási eljárás használható, amelynek során a LED-ek ki- és bekapcsolhatók és a két állapotban készített képfelvételek különbsége már jól kiemeli a markereket.

7.5.2 Optikai képfellevő rendszer

A képdetektálást és rögzítést egy kamera és elé helyezett objektív alkotja. Kameraként egy kereskedelmi forgalomban beszerezhető megfelelő felbontású fekete-fehér CCD eszköz szolgál. A kamerával és a hozzá csatlakozó optikával szemben támasztott legfontosabb elvárás, hogy minimális torzítású képet alkosson. A fent vázolt marker megvalósítás mellett alkalmazott optikai leképezés vázolata a 7-4. ábrán látható.



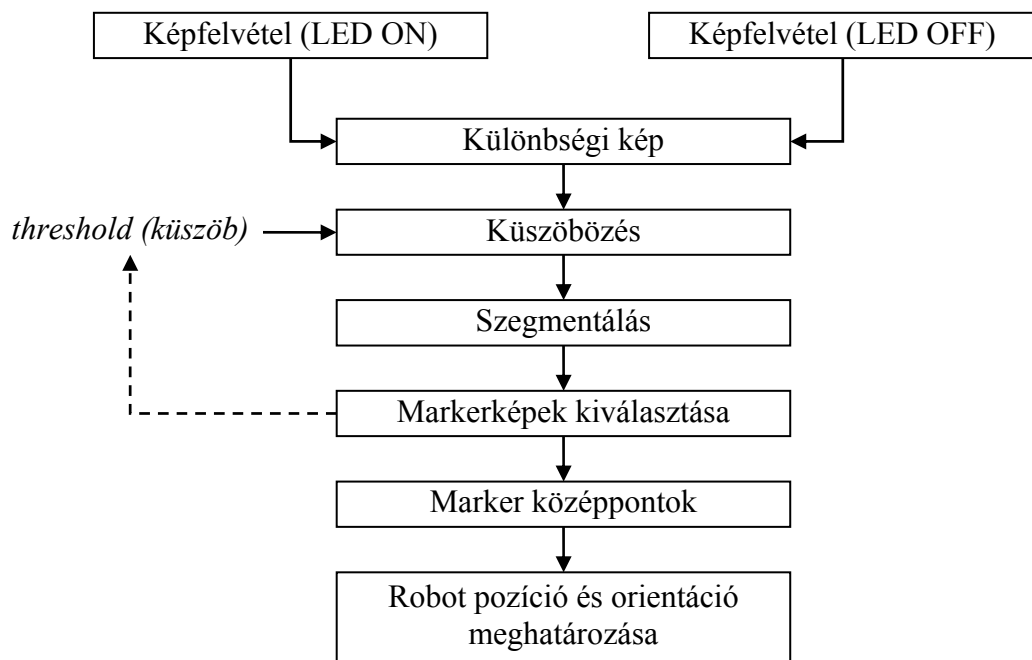
7-4. ábra: Kamera elhelyezése és optikai leképezése

Az alacsony torzítás érdekében kis látószögű objektívet célszerű alkalmaznunk. A viszonylag nagy tárgyfelület (a munkacella teljes területe) kis látószögű objektívvel történő leképezéséhez nagy tárgytávolság szükséges. Tekintettel arra, hogy ez a távolság függőleges irányban lefelé nem növelhető korlátlanul, így egy 45°-ban elhelyezett síktükörrel vezetjük a fényt a vízszintesen elhelyezkedő kamerához.

7.5.3 Képfeldolgozási eljárás

A kamera által előállított kép képdigitalizáló eszközön keresztül jut a feldolgozó számítógépbe. Az itt megvalósított algoritmus feladata, hogy a bemenetére érkezett digitális képből valós pozíció és orientáció adatokat szolgáltatson. A rendszer egy továbbfejlesztett változatában DSP kamerát alkalmazunk, itt a kamerában integráltan megvalósított DSP processzor közvetlenül végzi a képfeldolgozást. A DSP kamera kimenetén a kompozit video jel mellett soros porton kapjuk a pozíció és orientáció adatokat. A DSP kamera könnyen programozható és támogatja képfeldolgozási algoritmusok megvalósítását. Az algoritmus maga azonban független attól, hogy egy külső számítógépen, vagy a DSP kamerán futó program formájában kerül

megvalósításra. A javasolt képfeldolgozási algoritmus a 7-5. ábrán látható és egyes lépéseit alább részletezzük.



7-5. ábra: Képfeldolgozó algoritmus mikrorobot pozíció és orientáció meghatározására

7.5.3.1 Képfelvétel és a különbségi kép előállítása

A tárgyasztal erős megvilágítást kap felülről a mikroszkópos környezetben történő manipulációs műveletek megfigyeléséhez és a manipulációs optikai szenzorokhoz szükséges megfelelő háttérvilágításhoz. A transzport szenzor esetében (tekintettel arra, hogy a kamera a tárgyasztal alatt helyezkedik el) mindezen fényforrások szórt fénye a robot markereinek fényerejéhez képest jelentős zavarást, zajt eredményezhet. Abban az esetben, amikor a markerek fényereje összemérhetővé válik az egyéb fényforrások megfigyelés irányában tapasztalt fényerejével, szükséges valamilyen módon a zavarás kiküszöbölése. Ennek érdekében különbségi képfeldolgozási eljárást célszerű alkalmazni. A módszer alapján először készítünk egy képfelvételt bekapcsolt (világító) markerek mellett, majd nagyon rövid időn belül a markerek megvilágítását kikapcsoljuk és így készítünk egy második képfelvételt. Amennyiben a képek felvétele között eltelt rövid idő alatt a mikrorobot csak észrevehetetlenül kicsinyt mozdult el, a két kép tulajdonképpen ugyanazt az állapotot tartalmazza be-, illetve kikapcsolt markerek mellett. A két kép különbségének (a kép minden egyes pixele által tartalmazott intenzitás értékek matematikai különbsége) képzésével előállíthatjuk az ún. különbségi képet; ez lesz a művelet kimenete. A különbségi képen nagyrészt csak ott lesznek zérustól eltérő értékek, ahol a két kép különbözik, vagyis a markerek pozíciójában.

7.5.3.2 Küszöbözés (thresholding)

A küszöbözés célja egy bináris kép előállítása, vagyis egy olyan képé, amelynek pixeljei csak két különböző értéket tartalmaznak. A bináris képen minden egyes képpont (pixel) a küszöbözés után vagy fekete (0) lesz, vagy fehér (1). A küszöbözés során minden egyes képpont intenzitásának függvényében egy új értékkel helyettesítjük azt;

amennyiben a képpont értéke (intenzitása) kisebb egy előre megadott küszöbnél (threshold), akkor helyére 0-t ír, egyébként 1-et. A küszöbözés jósága a küszöb megválasztásától nagymértékben függ, ezt leginkább a kép tartalma alapján lehet kiválasztani. Az algoritmus itt lényegében mindig ugyanolyan képeket dolgoz fel, amelyen nagyságrendileg ugyanakkora intenzitású objektumok találhatóak, ezért a küszöb értékét kísérletileg be lehet állítani, és utána hosszú időn keresztül nem szükséges rajta változtatni. A szegmentálás után a markerek kiválasztása során tapasztalhatjuk, hogy nem megfelelő küszöb értéket választottunk, ekkor egy módosított küszöbvel újra el kell végezni a küszöbözést és a szegmentálást (adaptív küszöbözés) [28].

7.5.3.3 Szegmentálás

A küszöbözés eredményeképpen egy bináris képet kapunk, melyen a markerek képét, illetve a zajt 1-esekből álló képpontok, míg a háttérrel 0-k alkotják. A szegmentálás célja, hogy az önálló pixelek halmazán összefüggő régiókat értelmezzen. Vagyis az összefüggő és 1-eseket tartalmazó pixeleket egy-egy régióhoz rendelje, ezek lesznek a markerek (illetve a zaj) képei. A szegmentálás során a *hat-szomszédságon* alapuló ún. *soros címkéző algoritmust* használjuk [18]. A szegmentációs algoritmus végén kapott kép minden egyes képpontja vagy a háttérhez tartozik, vagy egy címkével azonosított régió egy pontja.

7.5.3.4 Markerképek kiválasztása

Ideális esetben a szegmentálás eredményeképpen a képen három (illetve a markerek számával megegyező számú) régiót találunk: a három marker képét. Tekintettel arra azonban, hogy az eredeti képet zaj is terheli, elképzelhető, hogy a küszöbözéshez használt és nem megfelelően megválasztott küszöbérték miatt egyéb fényforrások fénye is - mint zaj - jelen lesz még a bináris képen is és a szegmentálás során önálló régióként kerül azonosításra, vagyis a markerek számánál több régiót találunk. Ez tipikusan kis intenzitású zavaró fényforrás és túl alacsonyra beállított küszöb esetén fordul elő. Túl magasra állított küszöb esetén pedig előfordulhat, hogy valódi markerek képét is elveszítjük a küszöbözés során, vagyis markerek számánál kevesebb régiót találunk. Mindkét esetben célszerű a képfeldolgozás műveletét egy új küszöb megválasztásával a küszöbözéstől újrakezdeni (adaptív eljárás).

Nagy intenzitású zavaró fényforrás képe ugyancsak félrevezethet bennünket. Ez esetben az egyes régiók mérete alapján hozhatunk döntéseket. Pl. három marker esetén három közel egyforma és egy negyedik, a háromnál kisebb régió megtalálása esetén ez utóbbi, kisebb méretű régiót tekinthetjük zajnak és elhagyhatjuk, míg a többi hármat tekinthetjük a három marker képének. A különbségi képek használatával és egy megfelelő küszöb (akár adaptív) beállításával a szegmentálás eredményeképpen rendszerint egyértelmű a markereket azonosító régiók kiválasztása.

A bemutatott, három markert alkalmazó elrendezés esetén a három marker azonosítása akként történhet, hogy a „középső” marker egyenlő távolságban helyezkedik el a másik kettőtől. Vagyis a markerek egymástól való távolságának kiszámítása és a távolság értékek sorba rendezése után a legkisebb, vagy legnagyobb kettő távolságértékhez tartozó markerek közül az a „középső”, amely a két távolsághoz tartozó markerekben közös. A többi marker ezután az óramutató járása szerint azonosítható.

7.5.3.5 Marker középpontok meghatározása

A kiválasztott régiókat tekintjük az egyes markerek képének. Az n . marker (régió) középpontját - mint egy bináris képen általában - az alábbi módon határozhatjuk meg:

$$\bar{x}_n = \frac{\sum_i \sum_j i \cdot b_n(i, j)}{\sum_i \sum_j b_n(i, j)}, \quad \bar{y}_n = \frac{\sum_i \sum_j j \cdot b_n(i, j)}{\sum_i \sum_j b_n(i, j)}, \quad (7-1)$$

ahol $b_n(i, j) = 1$ az n . markerkép pontjaira, egyébként 0. (i és j a kép sorai és oszlopai szerinti futóindex, az origó a kép közepébe helyezve.)

A pontosságot növelhetjük azáltal, hogy a középpont számítást nem a bináris képen, hanem még a küszöbözés előtti szürkeárnyalatos különbségi képen végezzük el.

$$\bar{x}_n = \frac{\sum_i \sum_j i \cdot d_n(i, j)}{\sum_i \sum_j d_n(i, j)}, \quad \bar{y}_n = \frac{\sum_i \sum_j j \cdot d_n(i, j)}{\sum_i \sum_j d_n(i, j)}, \quad (7-2)$$

ahol $d_n(i, j)$ a különbségi kép (i, j) pixelének értéke az n . markerkép pontjaiban, máshol viszont 0. (i és j a kép sorai és oszlopai szerinti futóindex, az origó a kép közepébe helyezve.) A középpontok koordinátáit pixelkoordinátákban kapjuk meg (amelyek azonban nem feltétlenül egész számok).

Ezt követően a kameramodellnek megfelelően át kell számítanunk a pixelkoordinátákban rendelkezésre álló marker középpontokat a világkoordináta rendszerben mért valós távolság értékekre, majd a marker középpontok alapján meghatározandó a robot pozíciója és orientációja.

A kameramodell egy egyszerű középpontos leképzésen alapul (pin-hole modell). A 7-4. ábrán jelölt koordináta rendszerben

$$\frac{b(x'_n + x_0)}{H} = \frac{\sigma_x \bar{x}_n}{k}, \quad \frac{b(y'_n + y_0)}{H} = \frac{\sigma_y \bar{y}_n}{k}, \quad (7-3)$$

ahol σ_x és σ_y a CCD kamera pixelmérete, H a lencse és a markerek síkjának távolsága (tárgytávolság), k a lencse és a detektor távolsága (képtávolság), x_0 és y_0 a kamera tengelyének a tárgyasztalhoz rögzített koordináta rendszer origójától mért távolsága, b pedig a tárgyasztal üvegének véges vastagsága következtében fellépő sugármenet eltolódás miatt bevezetett skálázási tényező. (A sugármenet eltolódás linearitásáról ld. *Vajda* [16] művét.) Ennek alapján

$$x'_n = \frac{\sigma_x \bar{x}_n H}{bk} - x_0, \quad y'_n = \frac{\sigma_y \bar{y}_n H}{bk} - y_0, \quad (7-4)$$

ahol x'_n és y'_n az n . marker középpontja a tárgyasztal koordináta rendszerében (világkoordináta rendszer).

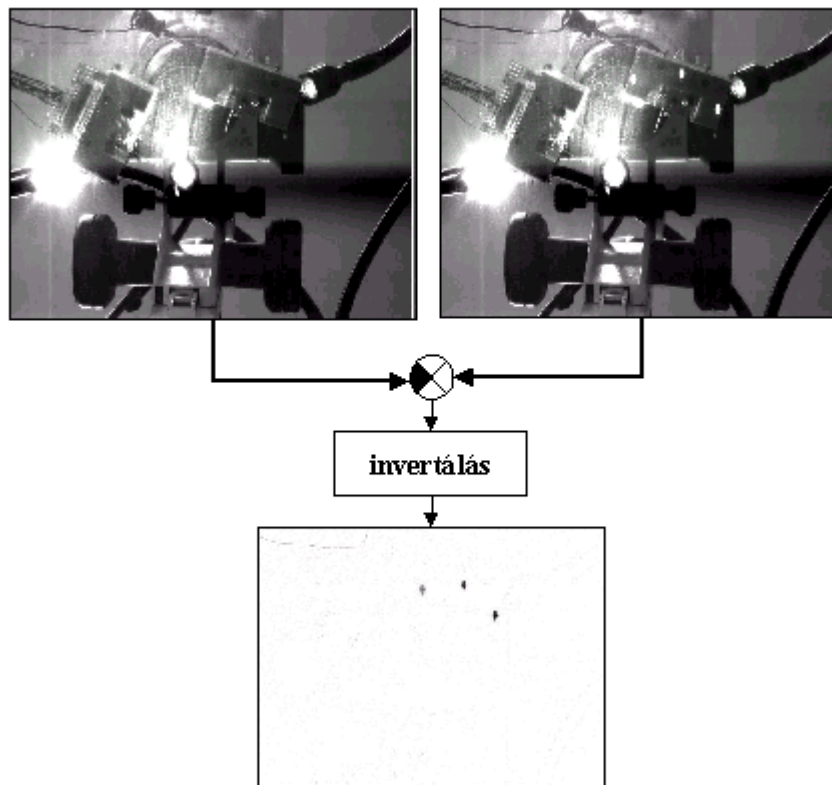
7.5.4 Robot MOP meghatározása

A mérési eljárás ezen pontján ismertek a mikroroboton elhelyezett markerek világkoordináta rendszerben mért pozíció adatai. A robot MOP meghatározásához a 6.4 fejezetben bemutatott becslési eljárást alkalmazzuk, ami a mért marker koordinátákból paraméterbecslő eljárás alkalmazásával előállítja a mikrorobot pozícióját és orientációját a világkoordináta rendszerben. Ezen mérési eredmények közvetlenül felhasználhatók a szabályozó rendszer számára a mikrorobot test pozíció és orientáció irányításához.

7.5.5 Implementáció és mérési eredmények

A transzport szenzorrendszerre az előzőekben javasolt és részletesen bemutatott eljárás egy-egy implementációját a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén *Vajda Ferenc* diplomamunka [16], valamint *Lassó András* és *Urbancsek Tamás* TDK dolgozat [20] keretében végezték el.

A mérés során jelentős mértékű zajjal kellett szembenézni. Ennek az az oka, hogy a kamera képen az aktív markerek fénye mellett jelen van a munkacellában elhelyezett eszközök, valamint a munkacella felülről történő megvilágítására alkalmazott fényforrások képe is, amely az aktív markerek fényénél akár nagyobb intenzitású is lehet, ld. a 7-6. ábrán. A realizáció során polárszűrő alkalmazásával sikerült a megvilágítás fényerejét csökkenteni a jel (aktív markerek fénye) kiemelése érdekében. A nem elhanyagolható mértékű zaj kiszűrésére a leghatékonyabb eljárásnak a fent bemutatott különbségi képfeldolgozás alkalmazása bizonyult, amely az állandó háttér és a megvilágítás szinte tökéletes kiszűrését biztosította.



7-6. ábra: Világító és kikapcsolt markerekkel készített képek és a különbségképzés után előálló invertált kép

További problémát jelentett, hogy a kis méretű aktív markerek nagyobb, elmosódott foltokként jelentek meg a képen. Ennek oka, hogy a markerek képének helyén annyi fény éri a kamera CCD érzékelőjét, hogy az már erősen telítésbe került. Ennek elkerülése érdekében szűkíthetjük a kamera objektíven lévő fényrekeszt, illetve csökkenthetjük a kamera integrálási idejét. A két eljárás mindegyike sokkal kontrasztosabb képet eredményezett, a markerek jóval kisebb méretűek lettek és határozottabb körvonalakkal rendelkeztek.

Vajda [16] implementációjában a pozíció meghatározását a bemutatott képfeldolgozási eljárás egy változatával elvégezve 0.1 mm pontosságot tudott elérni. Később *Vajda-Vogel* [11] dolgozatában ismerteti a bemutatott képfeldolgozási eljárás DSP kamera alkalmazásával történt realizációját, ahol az eljárást közvetlenül a kamera digitális jelfeldolgozó processzorán futtatta, így a pozíció és orientáció adatokat a kamera soros kimenetén kapta meg.

Az implementált eljárások igazolják a bemutatott transzport szenzorrendszer alkalmazhatóságát a mikrorobotikai munkacellában mozgó mikrorobot(ok) pozíció és orientáció meghatározására.

7.6 Manipulációs szenzorrendszer

7.6.1 Képkalkotás

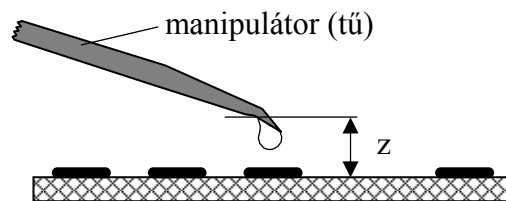
A mikromanipulációs tartományban szükséges mikrométeres nagyságrendű pozicionálási pontosság vizuális szenzorral történő megvalósításához mikroszkópot alkalmazunk, amelyhez egy CCD kamerát csatlakoztatunk. Mikroszkóp alkalmazása azért is célszerű, mert a mikromanipulációkat kis mérettartományon belül kell elvégezni, ez rendszerint egy mikroszkóp látóterének megfelelő tartomány. Másrészt a mikroszkóp a humán operátor számára is lehetővé teszi egyben a mikromanipulációk megfigyelését. A CCD eszközre leképzett képen képfeldolgozási eljárások alkalmazásával kell meghatározni a mikromanipulátor pozícióját [30], [32].

A mikroszkóp objektíveknek jelentős saját torzításuk is van, ami a képtér különböző pontjaiban eltérő. Az optika tengelytől távolodva a torzítás növekszik. Ezért a képfeldolgozási eljárások révén a képen kiválasztott pixeleknek valójában nem a geometriai optika alapján kiszámolható tárgypontra felelnek meg, azaz a leképzés nemlineáris. Amennyiben a képfeldolgozási eljárás célja a manipulátor abszolút pozíciójának mérése, geometriai torzításkompensációt kell alkalmazni. A mikromanipulációs munkacellában azonban tipikusan az a célunk, hogy a manipulátort egy kiválasztott célpontba juttassuk úgy, hogy mind a manipulátor, mind a céltárgy pozícióját ugyanazon a mikroszkóp képen mérjük. A manipulátor mozgását a szabályozó rendszer végzi, amelynek bemenő jele nem az abszolút pozíciók értékei, hanem a manipulátor és a célpont pozíciójának eltérése. Amennyiben az optikai tengelytől távolodva a torzítás miatti mérési hiba monoton (ez általában teljesül), az optikai szenzor által mért manipulátor és célpont pozíciók különbsége alkalmas ellenőrző jel a szabályozó számára. A monotonitás miatt a szabályozás stabil marad és minél közelebb jut a manipulátor a céltárgyhoz, a két pozíció mérésében a torzítás miatt elkövetett hiba közel azonos lesz, azaz a két pozícióérték különbségének hibája zérushoz tart. Ezért a mikroszkóp képből számolt pozíció értékek szabályozási célokra torzításkompensáció nélkül is felhasználhatók.

A mikromanipulációs munkacellában a Zeiss cég Stemi 2000-C sztereomikroszkópját alkalmaztuk, amelynek előnye, hogy zoom optikája révén mindhárom dimenzióban kellően nagy munkateret biztosít a manipulációk számára. A sztereo képalkotás a humán megfigyelő számára adott, a berendezés az egyik okulár helyére kamera illesztési lehetőséget biztosít.

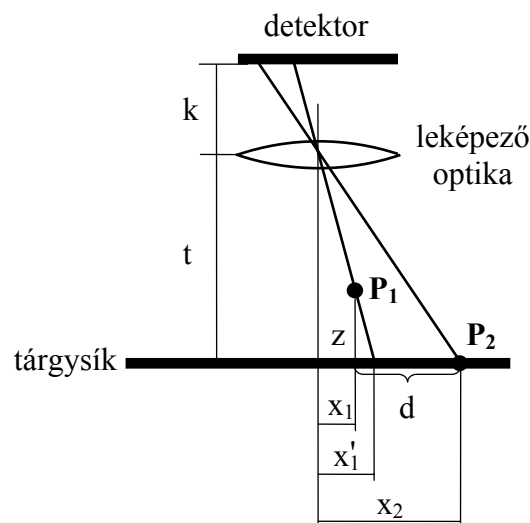
7.6.2 A mélységi információ és a mélységi geometriai torzítás

A mikromanipulátor három dimenzióban mozoghat, így egy-egy kitüntetett pontjának (tipikusan a manipulátor végpontjának) a pozícióját térben kell meghatároznunk. A transzport szenzorrendszertől eltérően tehát a 2D képből itt nemcsak a síkbeli x - y koordinátákat, hanem a 3D tartományban mozgó beavatkozó szerv végpontjának z koordinátáját is meg kell határoznunk. Egy jellemző alkalmazásban (pipettás adagolás) az alábbi ábrán illusztráltuk a mikromanipulátor mélységi pozíciója meghatározásának szükségességét.



7-7. ábra: Mikromanipulátor mélységi pozicionálása

Tekintettel arra, hogy a manipulátor végpontja rendszerint nem a tárgysíkban helyezkedik el, hanem tőle z távolságban van, a látvány két dimenzióra (az optikai eszköz detektor felületére) történő leképezése során mélységi geometriai torzítás lép fel a 7-8. ábra szerint. A manipulátor P_1 végpontja ugyanis a detektoron ugyanabba a képpontba képződik le, mint az optikai tengelytől x_1' távolságban a tárgysíkban lévő tárgypon. (Egy P_2 – tárgysíkban lévő – pont esetében nem lép fel a mélységi geometriai torzítás.)



7-8. ábra: Mélységi geometriai torzítás tárgysíkon kívüli objektum leképezésekor

Az optikai rendszer geometriája alapján

$$\frac{x_1'}{t} = \frac{x_1' - x_1}{z}, \quad (7-5)$$

ahonnan a \mathbf{P}_1 tárgy pont tényleges x_1 koordinátája

$$x_1 = x_1' \cdot \left(1 - \frac{z}{t}\right). \quad (7-6)$$

Az y koordinátára hasonló összefüggés írható fel, vagyis

$$y_1 = y_1' \cdot \left(1 - \frac{z}{t}\right). \quad (7-7)$$

Fontos tehát tudnunk, hogy a tárgysík felett található manipulátor x - y pozíciójának meghatározásához is mindenképp mérnünk kell a manipulátor tárgysíktól való z távolságát, hogy a leképzés során fellépő mélységi geometriai torzítást ki tudjuk küszöbölni. A manipulációs szenzorrendszer feladata tehát, hogy megfelelő eljárásokkal és képfeldolgozási algoritmusokkal a mikromanipulátor végpontjának mindhárom térbeli koordinátáját meghatározza.

Az x_1' és y_1' látszólagos koordináták az optikai rendszer jellemzői és a detektor pixelmérete alapján a képen mért pixel koordinátákból egyszerűen meghatározhatók.

$$\begin{aligned} x_1' &= n_{x1} \frac{t}{k} \delta_x \\ y_1' &= n_{y1} \frac{t}{k} \delta_y \end{aligned} \quad (7-8)$$

ahol t a tárgytávolság, k a képtávolság, t/k a mikroszkóp-kamera összetett optikai rendszer lineáris nagyítása, δ_x és δ_y a CCD detektor pixelmérete, valamint n_{x1} és n_{y1} az adott képpont pixeleiben mért x - y koordinátái.

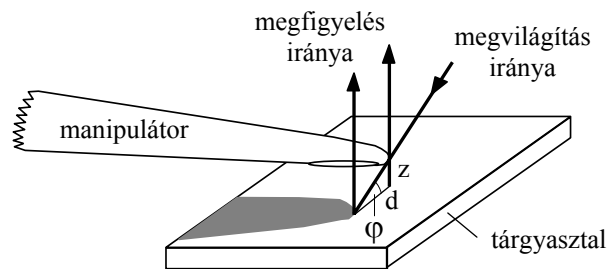
7.6.3 Árnyékdetektáláson alapuló pozíció meghatározás

7.6.3.1 Pozíció meghatározás elve

Az árnyékdetektálás módszere a mikromanipulációk megvilágításához használt erős fényen alapul. A mikroszkóp rendkívül kis látóterébe (tipikusan $0.1-10 \text{ cm}^2$) ugyanis elegendő fényenergia kell jusson, hogy akár a humán megfigyelő, akár a kamera a mikroszkópban megfelelő megvilágítású képet kapjon. Ennek elérése érdekében a mikroszkópos alkalmazásokban koncentrált, kis divergenciájú és nagy energiájú fényforrásokat használnak a tárgyasztal megvilágítására. A mikromanipulációk rendszerint állandó, pontosabban a beavatkozás idejére nem változó háttér (tárgyasztal) felett zajlanak. Az árnyékdetektálás alap gondolata az, hogy a manipulátor képének, valamint a megvilágítás következtében a manipulátor tárgyasztalon keletkező

árnyékának segítségével határozzuk meg a manipulátor síkbeli pozíciója mellett a manipulátor végpontjának a tárgyasztaltól való távolságát is.

A párhuzamos megvilágítás iránya vagy eleve ismert, vagy kalibrációs objektum alkalmazásával egyszerűen meghatározható [13]. A megfigyelés iránya rendszerint eltér a megvilágítás irányától, ez esetünkben kívánatos is a mérés pontosságának növelése érdekében. Célszerűen a továbbiakban a tárgyasztalra merőleges megfigyelési irányt tételezünk fel, amely tipikus mikroszkóp alkalmazásakor. A megvilágított manipulátor erős fényben kontúros árnyékot vet a tárgyasztalra, így a képen a manipulátor és árnyéka egyszerre látható. A manipulátor végpontjának három dimenziós pozíciója a manipulátor és árnyéka végpontjainak relatív pozíciója alapján határozható meg. Az árnyékdetektáláson alapuló pozíció meghatározás elve a 7-9. ábrán látható.



7-9. ábra: Mikromanipulátor pozíciójának meghatározása árnyékdetektálással

Az egyszerűsítés érdekében a megvilágítás iránya legyen párhuzamos az x - z síkkal. Az ismert φ irányszögű megvilágítás esetében

$$\tan \varphi = \frac{z}{d}. \quad (7-9)$$

Tekintsük ismét a 7-8. ábrát, ahol P_2 most jelölje azt a pontot a tárgysíkon, ahova a P_1 manipulátor végpont árnyéka vetül.

$$\frac{x'_1}{t} = \frac{d - (x_2 - x'_1)}{z} \quad (7-10)$$

A fenti két egyenletből a mélységi koordináta

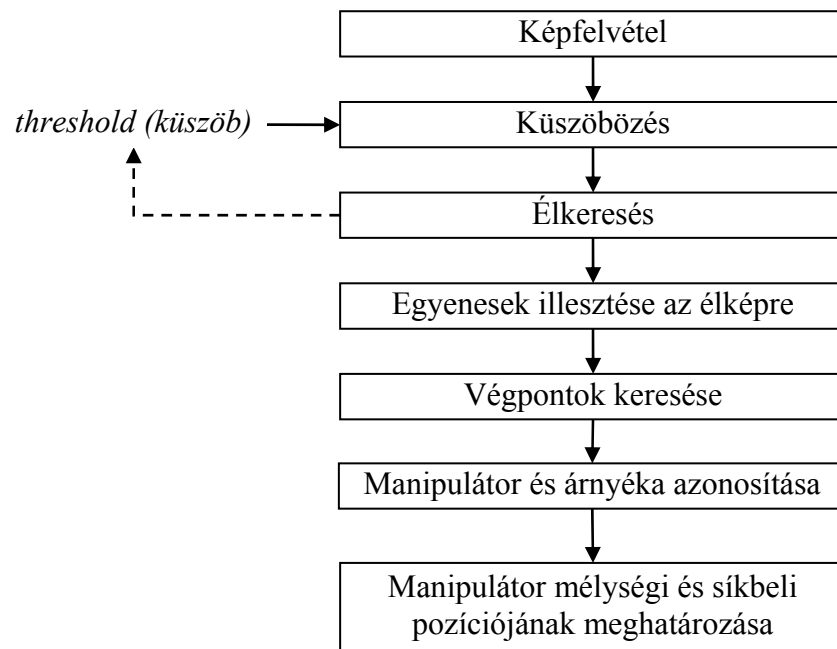
$$z = \frac{x_2 - x'_1}{\frac{1}{\tan \varphi} - \frac{x'_1}{t}} \quad (7-11)$$

A z koordináta ismeretében a mélységi geometriai torzítás kompenzáció is elvégezhető, így megkapjuk a manipulátor végpontjának térbeli pozícióját.

7.6.3.2 Árnyékdetektálás képfeldolgozási algoritmus

Az árnyékdetektálásos eljárás során a mikroszkóp képből először egy bináris képet készítünk adaptív küszöbözéssel, majd élkereső algoritmus segítségével meghatározzuk a manipulátor és árnyéka körvonalait. Az élképen egyeneseket illesztünk az élekre,

majd az egyenes szakaszokat sorba véve ott találjuk a manipulátor végpontját, ahol az egyenes szakaszok iránytangense a legnagyobbat változik egyik szegmensről a másikra lépve. A manipulátor és árnyékának azonosítását az eredeti szürkeárnyalatos képen az intenzitás eloszlásból tudjuk meghatározni, ugyanis az árnyék képének szürkességi szintjei kevésbé szóródnak, mint a manipulátoré.



7-10. ábra: Árnyékdetektálás képfeldolgozó algoritmus

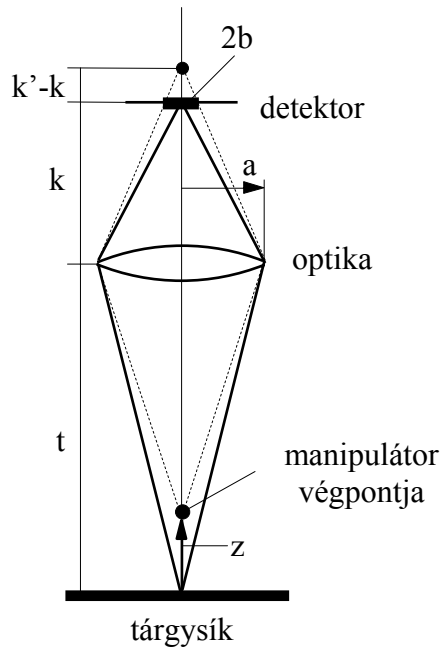
A gyakorlatban a mikroszkóp képen a manipulátor árnyékának és a tárgyasztal textúrájának az elkülönítése az élkeresés során nem egyszerű feladat. Továbbá minél távolabb van a manipulátor a tárgyasztal síkjától, az árnyék és különösen annak széle annál elmosódottabb. Ennek egyrészt a véges méretű megvilágító fényforrás, másrészt a manipulátor élén végbemenő fényelhajlás az oka. Ezért az árnyékdetektáláson alapuló pozíció meghatározási eljárás csak a tárgyasztaltól kis távolságra lévő manipulátor pozíciók esetében alkalmazható.

7.6.4 Defókuszáltság alapuló pozíció meghatározás

7.6.4.1 Pozíció meghatározás elve

A defókuszáltság alapú pozíció meghatározás egy változatát *Penteland* [34] ismerteti. Itt egy egyszerűsített, a leképezés geometriájára épülő pozíciómeghatározási eljárást mutat be. Ezen munka folytatásának, továbbfejlesztésének tekinthető a tanszék több munkatársa által kidolgozott eljárás [35], amelyik diszkrét Fourier transzformációt alkalmaz a mélységi információ meghatározására.

Az ismertető eljárás a mikromanipulátor képét mikroszkóppal állítja elő. Az optikai leképző rendszer tárgytávolsága a tárgyasztal távolságára van állítva, így a tárgyasztal síkjában lévő objektumok élesek, fókuszáltak. A manipulátor, amikor a tárgyasztal felett helyezkedik el, nincs a tárgysíkban, így képe elmosódott lesz. Az eljárás során éppen ezt a jelenséget használjuk ki, ugyanis a kis mélységélességű mikroszkóp optikai rendszerének leképezése során az elmosódottság mértéke annál nagyobb, minél távolabb van a manipulátor a tárgyasztal síkjától.



7-11. ábra: Defókuszáltság mértékének meghatározása

Az elmosódottság mértékét a manipulátor és a háttér képpontjai közötti intenzitás átmenet jellemzi; minél távolabb van ugyanis a manipulátor a tárgyasztaltól, annál szélesebb lesz ez az átmenet. Az intenzitás átmenet szélességének méréséből meghatározható a manipulátor távolsága a tárgyasztaltól. Sugároptikai közelítésben az objektum egy pontja – defókuszáltság következtében elmosódott – képének méretét a leképzési törvény alapján határozhatjuk meg. A levezetés egyszerűsítése érdekében tételezzük fel, hogy a manipulátor végpontja az optikai tengelyre esik a 7-11. ábrának megfelelően, de a végeredmény érvényes marad [13] az optikai tengelyen kívüli tárgypontokra is.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k} \quad (7-12)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t-z} + \frac{1}{k'} \quad (7-13)$$

$$\frac{a}{k'} = \frac{b}{k' - k} \quad (7-14)$$

A fenti egyenletrendszerből a defókuszált folt b sugarát a tárgyasztaltól való távolság függvényében kifejezve

$$b = \frac{af}{t-f} \cdot \frac{|z|}{t-z}, \quad (7-15)$$

illetve a mélységi z koordináta, amely csak pozitív lehet, hiszen a manipulátor csak a tárgysík felett és soha nem alatta mozog

$$z = \frac{bt}{\frac{af}{t-f} + b}, \quad (7-16)$$

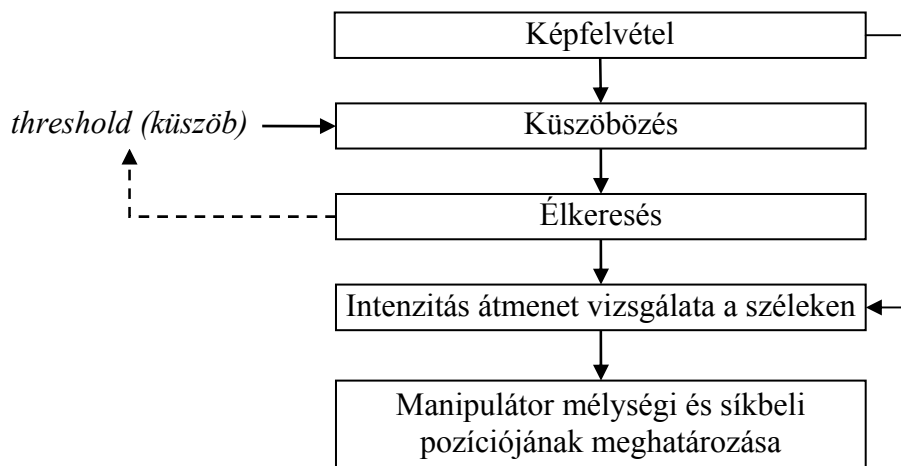
ahol t a tárgysík és az optikai sík távolsága (tárgytávolság), f az optikai rendszer fókusz-távolsága, $2a$ az apertúra átmérője, $2b$ pedig a defókuszált folt mérete.

A fenti sugároptikai közelítés nem veszi figyelembe a fény hullámtermészetét. Valóságban ugyanis a képalkotásban résztvevő fényhullámok az optikai rendszer apertúráján elhajlanak és a diffrakció következtében még a tárgysíkban lévő tárgypontok képe sem pont, hanem véges méretű, elmosódott korong (Airy-korong) lesz. A $2a$ átmérőjű apertúrán a diffrakció következtében az elhajlási korong átmérője $1.22 \lambda k / a$. Kis mélységi távolság esetében a képen a diffrakciós korong mérete lesz meghatározó, míg a mélységi távolság növelésével a képen az elmosódott folt méretét főként a sugároptika fogja meghatározni, vagyis z növelésével az elmosódott folt mérete a (7-15) kifejezéshez konvergál.

A mikromanipulátor végpontjának x - y koordinátái a képen mért 2D adatokból a mélységi információ ismeretében a mélységi geometriai torzítás kompenzációval számíthatók.

7.6.4.2 Defókuszáltság alapú képfeldolgozás algoritmus

A defókuszáltság alapú eljárás során a mikroszkóp képből egyrészt egy bináris képet készítünk, majd élkereső algoritmus segítségével közelítőleg meghatározzuk a manipulátor éleit. Majd ezen a területen az élekre merőlegesen a szürkeárnyaltos képen vizsgáljuk az intenzitás átmenetet és mérjük annak szélességét. Az intenzitás átmenet szélességével definiáljuk a defókuszált folt méretét a manipulátor végén.



7-12. ábra: Defókuszáltság alapú képfeldolgozás algoritmus

A defókuszáltság alapú eljárás nehézsége az, hogy nem ismert háttér előtt az intenzitás átmenet kezdetének és végének meghatározása nem nyilvánvaló, hiszen a háttéren lévő objektumok éles képe, valamint a manipulátor elmosódott képe átfedhetik egymást. Az eljárás javítható azáltal, hogy a kiterjedt tárgy képen több intenzitás átmenetet vizsgálunk, illetve jól definiált háttér előtt hajtjuk végre az algoritmust. Bár a mikroszkóp mélységelessége kicsi, egy bizonyos mélységi távolság alatt nagyon

nehézzé válik az intenzitás átmenet szélességének meghatározása, hiszen a tárgysíkhoz közeli manipulátor képe is élessé válik. Ezért az eljárás nagyon kis mélységi távolságok esetében nem alkalmazható.

7.6.5 Kombinált eljárás a manipulátor pozíció meghatározására

A defókuszáltság, illetve az árnyékdetektáláson alapuló eljárások elvi megfontolásaink szerint különböző mikroméretű mérettartományokban alkalmazhatók. Tapasztalataink szerint a defókuszáltság alapú eljárással a mikromanipulátor pozícióját $\sim 15 \mu\text{m}$ -nél nagyobb mélységi tartományban tudjuk meghatározni, míg az árnyékdetektálás módszere $\sim 20 \mu\text{m}$ alatti tartományban eredményes. Kézenfekvő, hogy a két eljárás kombinálásával széles mérettartományban leszünk képesek a manipulátor pozíciójának meghatározására. A kombinált módszer előnye, hogy ugyanazon szenzor elrendezést használja, azonban a mikroszkóp képeken eltérő képfeldolgozási eljárásokat kell végrehajtani az alábbiak szerint.

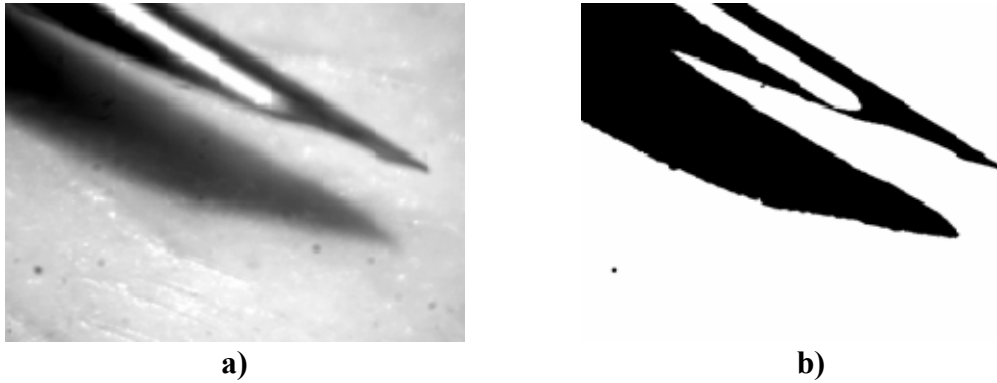
A manipulátor végpontja mélységi pozíciójának durva meghatározását először a defókuszáltság alapú eljárással végezzük. Amennyiben a manipulátor végpontja és a tárgyasztal közötti távolságra $20 \mu\text{m}$ -nél kisebb érték adódik, a képet az árnyékdetektálásos eljárással is feldolgozzuk és pontosítjuk a mélységi koordinátát. A manipulátor végpontjának a kép alapján számítható síkbeli koordinátáit a mélységi információ felhasználásával korrigáljuk a mélységi geometria torzítás kiküszöbölésére.

7.6.6 Implementáció és mérési eredmények

A mikroszkóp képen az ismertetett árnyékdetektáláson alapuló pozíció meghatározási eljárást a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén először *Kleinheincz Gábor* implementálta diplomamunkája [13] keretében. A mikromanipulációs munkacellában egy Zeiss Stemi 2000-C sztereomikroszkóp egyik okulárja helyére szerelt CCD kamera készítette a képfelvételeket. A bemutatott képfeldolgozási algoritmus egy implementációja Silicon Graphics Indigo² számítógép ILabDev fejlesztői környezetében készült el.

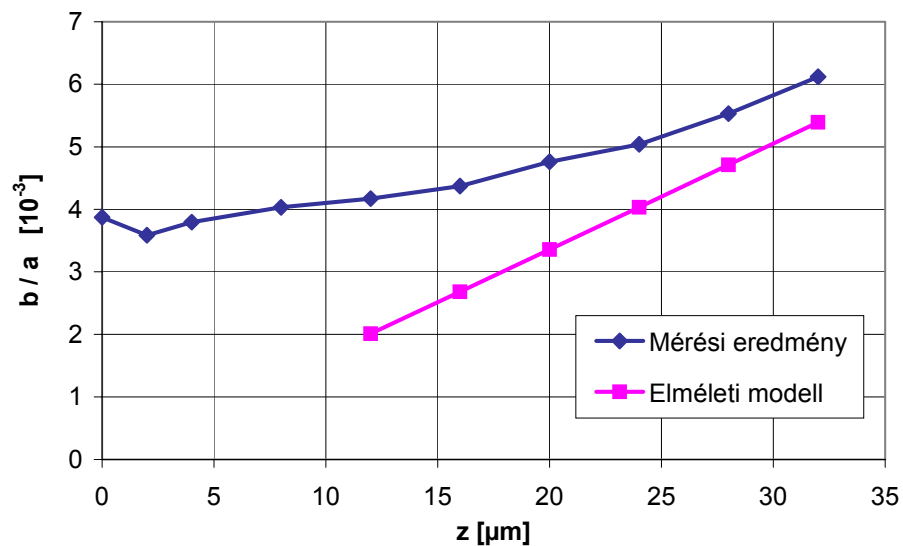
A 7-13. ábrán látható a mikroszkóppal készített kép, illetve a küszöbözés után előállított bináris megfelelője. Különböző tárgyfelületeken és eltérő megvilágítási viszonyok mellett végzett kísérletek azt mutatták, hogy az eljárás sikerességének alapvető feltétele a manipulátor erős, kollimált megvilágítása. A megvilágítás erőssége ugyanis kismértékben befolyásolta a manipulátor végponti pozíciójának pontos meghatározhatóságát, míg az árnyék detektálhatósága stabilnak bizonyult. A kollimált megvilágítás az árnyék élesebb szélét eredményezi, valamint lehetővé teszi, hogy a manipulációs tartomány egy meghatározott részén a megvilágítás beesési szögére állandó értéket alkalmazzuk számításainkban. A kollimált nyalábot a mikroszkóp egység KL-1500 LCD típusú hidegfényű forrása biztosítja üvegszálalás fényvezetővel és kollimátorral. Bár a specifikáció nem adja meg a nyaláb divergenciáját, de megemlíti, hogy a nyaláb jó közelítéssel párhuzamosnak tekinthető.

A mérések során is nyilvánvalóvá vált a küszöbözéshez használandó megfelelő küszöbszint megválasztásának fontossága, amely adaptív küszöbözési eljárással biztosítható. Az adaptáció célszerűen az élkeresési eljárás lefutásának sikeressége alapján végezhető el. Az implementált algoritmus a megvilágítás erősségétől függően 3-10 μm pontossággal képes a mikromanipulátor pozíciójának meghatározására.



7-13. ábra: Árnyékdetektáláson alapuló képfeldolgozási eljárás lépései
a) eredeti mikroszkóp felvétel, b) bináris kép élkeresés előtt

A defókuszáltság alapú pozíció meghatározási eljárást a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszékén először *Gürtler Csaba* és *Csákány Péter* vizsgálták. A mérés menete az volt, hogy ismert tárgyat (kisméretű hengert) kezdetben a tárgysíkba helyeztek, majd onnan mikrométercsavarral különböző pozíciókba tolták el és kamera felvételeket készítettek. A kamera képeken az ismertett képfeldolgozási algoritmus felhasználásával meghatározták a defókuszált folt kiterjedését és ezt összehasonlították a leképzés geometriájából meghatározott (7-15) szerinti elméleti értékekkel úgy, hogy a diffrakció miatt a sugároptikai modell eredményeit csak 10 μm felett használták. A defókuszált folt modellből számolt és a mérések során meghatározott relatív méretének (folt átmérő / apertúra átmérő) összehasonlítása látható a 7-14. ábrán.



7-14. ábra: Defókuszált folt relatív mérete a modell és a mérések alapján

A mérések visszaigazolják azon feltételezésünket, hogy a módszer csak nagyobb távolságokban (itt 15-20 μm felett) alkalmazható, ebben a tartományban a mérési eredmények jól közelítik a defókuszált folt modell alapján számolt méretét.

A kísérleti tapasztalatok igazolják a manipulációs szenzor és az ismertett két képfeldolgozási eljárás kombinált alkalmazhatóságát a mikromanipulátor térbeli pozíció meghatározására.

8. 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 és azóta ebben folyamatosan részt vesz. 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.

Az értekezésben ismertetett defókuszáltság alapú mérési eljárás megalapozta *Urbanček Tamás* benyújtás alatt álló doktori értekezésében szereplő mikromanipulációs, defókuszáltság alapú, Fourier transzformációra épülő pozíciómérési eljárását, új tudományos eredményét.

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.

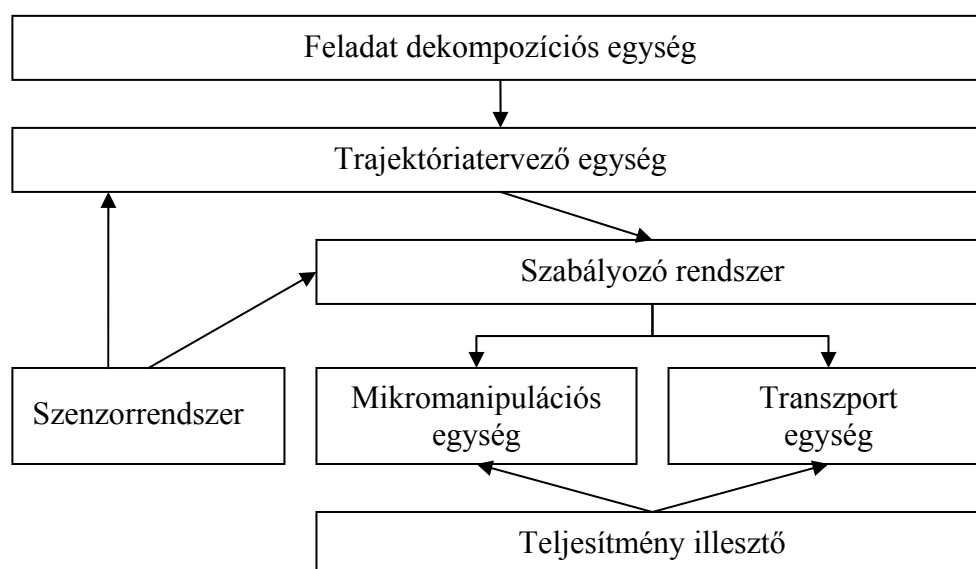
Az EU FP7 keretprogramban a mikro- és a nanotechnológia kiemelt célterület. Az Irányítástechnika és Informatika Tanszék partner egyetem bevonásával mikrorobotika területén (egészségipari alkalmazás) konzorciális pályázatot készül benyújtani, ezzel is folytatva a tanszéken megindult mikrorobotikai kutatásokat.

9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Az értekezésben részletesen tárgyalt új tudományos eredményeket az alábbiakban foglalom össze.

1. Tézis

Kidolgoztam egy mikromanipulációs munkacella rendszerteknikai hierarchiáját. A mikromanipulációk és szállítási feladatok megoldására alkalmas, mikrorobotikai mechanizmusból, szenzorrendszerből és szabályozó rendszerből felépülő mikromanipulációs munkacella rendszerteknikáját 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 szenzorrendszertől 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 elektródaira 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 elektródaira 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

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

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

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

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

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 $\bar{v} = \frac{2}{T} \left(U_0 k_U - \frac{\mu g}{\omega_0^2} \right)$,

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 láncolata 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 magába 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.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Rembold, U., Nnaji, B. O., Storr, A.: "Computer Integrated Manufacturing and Engineering", *Addison-Wesley*, 1993.
- [2] Hatamura, Y.: "Realization of Integrated Manufacturing System for Functional Micromachines", *Proc. of the First Int. Micromachine Symposium*, Tokyo, 1995, pp. 55-63.
- [3] Arai, T. et. al.: "Micro Manipulation Based on Micro Physics", *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Pittsburgh, Pennsylvania, 1995, pp. 236-241.
- [4] Fatikow, S., Rembold, U.: "Microsystem Technology and Microrobotics", *Springer Verlag*, 1997.
- [5] Hatamura, Y., Nakao, M., Sato, T.: "Construction of Nano Manufacturing World", *Microsystem Technologies*, 1995 (3), Vol. 1, pp. 155-162.
- [6] Das, H., Ohm, T., Boswell, C., Rodriguez, G., Steele, R., Istrate, D.: "Dexterity-enhanced Telerobotic Microsurgery", 1998.
- [7] ARTEMIS – Homepage, <http://www.iai.fzk.de/~artemis>, Forschungszentrum Karlsruhe, 1999.
- [8] Affymetrix: "Gene Chip Probe Array Technology", http://www.affymetrix.com/technology/tech_probe.html, Santa Clara, USA, 2000.
- [9] The Eppendorf TransferMan NK 2 micromanipulator, <http://www.eppendorf.com>, Eppendorf AG, Germany, 2007.
- [10] MSS Series Micro-surgery / Bio-MEMS Stations, <http://www.micromanipulator.com>, The Micromanipulator Co., USA, 2007.
- [11] Vajda, F., Vogel, M.: „Miniatürizált robotrendszer fejlesztése mikrobiológiai laboratóriumok automatizálására”, *diplomaterv*, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Orvosbiológiai Mérnöki Szak, Budapest, 2001.
- [12] Helybély, Á.: „Mikrorobot rendszer fejlesztése”, *diplomaterv*, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Informatikai Szak, Budapest, 2001.
- [13] Kleinheincz, G.: „3 dimenziós mérőrendszer fejlesztése mikromanipulátorhoz”, *diplomaterv*, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapest, 1998.
- [14] Bezák, G.: „Mechanika – Szilárdságtan”, egyetemi jegyzet, Budapest, 1987.
- [15] Lantos, B.: "Robotok irányítása", *Akadémiai Kiadó*, 1991.
- [16] Vajda, F.: „Pozicionáló szenzorrendszer mikrorobotos munkaállomáshoz”, *diplomaterv*, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapest, 1998.
- [17] Rembold, U., Levi, P.: „Realzeitsysteme zur Prozessautomatisierung”, *Carl Hanser Verlag*, 1994.
- [18] Jain, A. K.: „Fundamentals of Digital Image Processing”, *Prentice Hall*, 1998.
- [19] Kronmüller, H.: „Digitale Signalverarbeitung”, *Springer-Verlag*, 1991.
- [20] Lassó, A., Urbancsek, T.: „Mikromanipulátorok teleoperációs alkalmazása biotechnológiai kutatásokban”, *TDK dolgozat*, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapest, 1999.
- [21] Navarro-Serment, L.E., Grabowski, R., Paredis, C.J.J., Khosla, P.K.: „Millibots”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2002 (4), Vol. 9, pp. 31- 40.
- [22] Ruocco, R., White, T., Jarrett, D.: „Systematic Errors in Active 3D Vision Sensors”, *IEE Proc. Vision, Image and Signal Processing*, 2003 (6), Vol. 150, pp. 341- 345.

- [23] Bettini, A., Marayong, P., Lang, S., Okamura, A.M., Hager, G.D.: „Vision-Assisted Control for Manipulation Using Virtual Fixtures”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2004 (6), Vol. 20, pp. 953- 966.
- [24] Casanova, R., et. al.: „Towards Co-Operative Autonomous 1 cm³ Robots for Micro and Nanomanipulation Applications: MICRON”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2005, pp. 789-794.
- [25] Yung, T., et. al.: „Error Compensation and Feedforward Controller Design for a 6-degree-of-freedom Micro-Positioning Platform”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2005, pp. 942-947.
- [26] Tagliareni, F., et. al.: „Manipulating Biological Cells With a Micro-Robot Cluster”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2005, pp. 1414-1419.
- [27] Ogawa, N., Oku, H., Hashimoto, K., Ishikawa, M.: „Microrobotic Visual Control of Motile Cells Using High-Speed Tracking System”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005 (4), Vol. 21, pp. 704-712.
- [28] Makarov, A., Moniri, M.: „Binary Shape Coding Using Finite Automata”, *IEE Proc. Vision, Image and Signal Processing*, 2006 (5), Vol. 153, pp. 695-702.
- [29] Lerner, R., Rivlin, E., Shimshoni, I.: „Landmark Selection for Task-Oriented Navigation”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2007 (3), Vol. 23, pp. 494-505.
- [30] Wang, H., Liu, Y.-H., Zhou, D.: „Dynamic Visual Tracking for Manipulators Using an Uncalibrated Fixed Camera”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2007 (3), Vol. 23, pp. 610-617.
- [31] Man, G-K, Jong-Hyun, L.: „A Discrete Positioning Microactuator: Linearity Modeling and VOA Application”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007 (1), Vol. 16, pp. 16-23.
- [32] Neul, R., et. al.: „Micromachined Angular Rate Sensors for Automotive Applications”, *IEEE Sensors Journal*, 2007 (2), Vol. 7, pp. 302-309.
- [33] Sitti, M.: „Microscale and Nanoscale Robotics Systems”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007 (1), Vol. 14, pp. 53-60.
- [34] Pentelaud, A. P.: „A New Sense for Depth of Field”, *IEEE Transactions on PAMI*, 1987 (4), Vol. 9, pp. 525-531.
- [35] Urbancsek, T., Garay, Cs., Vajta, L.: „3D Spatial Coordinate Estimation of a Micro Manipulator From a Monocular Camera Image Using DFD Algorithm”, *IEEE International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping, IMG04*, pp. 337-342, July 1-2, 2004, Genova, Italy.
- [36] Dario, P. et al: „Micro-systems in Biomedical Applications”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2000 (10), pp. 235-244.
- [37] Nierlich, M., Steinmetz, O.: „A Monolithic Control Circuit for a 1 cm³ Microrobot for Biological Experiments”, *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference*, IEEE A-SSCC, 2005.
- [38] Chen, Z., Ma, S., Shang, J. S.: „Integrated Supply Chain Management for Efficiency Improvement”, *Int. Journal of Productivity and Quality Management*, 2006, Vol. 1, pp. 183-206.
- [39] Erdélyi, F., Tóth, T.: „A termelési informatika fogalomköre és oktatása”, *Informatika a Felsőoktatásban – Networkshop ’96*, 1996. augusztus 27-30., Debrecen.
- [40] Hervay, P., Nagy P., S.: „Gyártórendszerek a gépiparban”, *Műszaki Könyvkiadó*, 2003, Budapest.

PUBLIKÁCIÓK

Tézispontokban hivatkozott tudományos közlemények

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk

- [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 folyóiratcikkek

- [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, ICC 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*

FÜGGELÉKEK

- A. Függelék: Centralizált vs. decentralizált irányítás**
- B. Függelék: A MINIMAN mikrorobot és a munkacella eszközeinek paraméterei**
- C. Függelék: Mikrorobot mozgásegyenletének megoldása**
- D. Függelék: Dinamikai modell alapján az időfüggvények grafikonjai**
- E. Függelék: Mérési adatok**

A. Függelék: Centralizált vs. decentralizált irányítás

A szállító járművek flexibilitása nagyban növelhető, amennyiben a jármű irányítását számítógép vezérlésű irányítórendszer végzi. Amennyiben csak kevés jármű közlekedik, központi irányítást használhatunk. Nagyfokú automatizáltságú anyagelosztáshoz és sok jármű alkalmazása esetén decentralizált irányítási rendszert célszerű használni. Ez esetben azonban a járművek mozgásának kooperációját és szinkronizációját alaposan meg kell tervezni a folyamatos működés és az ütközések elkerülése érdekében.

A centralizált vs. decentralizált irányítás problémájának megvilágítására tekintsük a következő példát. Tegyük fel, hogy a gyártórendszerben, de akár egy teljesen általános zárt rendszerben N jármű közlekedik. Kooperatív viselkedésnek tekinthetjük azt, hogy bizonyos számú járművek nem egymástól függetlenül, hanem összehangolt tevékenységet végeznek. A mi esetünkben legyen a feladat az, hogy a járművek párosával összehangolt mozgást végezzenek, pl. egy tetszőleges kiindulási helyzetből mindegyik jármű menjen az előre kiválasztott másik jármű felé. Ez azt jelenti, hogy $N/2$ pár mozog összehangoltan. A mozgás során azonban figyelni kell arra, hogy a járművek ütközését elkerüljük. Egyszerűsítő feltevésünk lehet, hogy egyszerre legfeljebb két tetszőleges jármű ütközhet, bonyolultabb eset most ne forduljon elő. Tehát N jármű minden lehetséges másik, vagyis $N-1$ járművel ütközhet, ez $N(N-1)$ ütközési lehetőséget jelent. Amennyiben centralizált irányítást alkalmazunk, akkor a központi vezérlő számítógépnek (vagy a probléma komplexitásának elemzése szempontjából akár egy központi humán irányítónak) a kooperatív mozgás megvalósítása érdekében az N jármű, vagyis $N/2$ pár irányítása miatt $2N/2$ elemzést és döntést, az ütközések elkerülése miatt $N(N-1)$ elemzést és döntést kell elvégezni. Vagyis a centralizált irányítás komplexitása¹⁶ $O(N^2)$. Decentralizált irányítás esetében minden jármű azonos irányítási algoritmust használ, de önállóan végez elemzéseket és hoz döntéseket. Vagyis a kooperatív működés érdekében mindössze a saját és a "társ" járműre vonatkozó információk birtokában kell döntést hoznia, vagyis ez független a közlekedésben résztvevő többi jármű számától. Az ütközések elkerülése érdekében a többi $N-1$ jármű helyzetét kell figyelnie, sőt lokális szenzorrendszer esetében elegendő csak a "környéken" lévő járművekkel foglalkozni. Legrosszabb esetben is tehát a decentralizált irányítási probléma komplexitása $O(N)$.

A komplexitás jól jellemzi a feldolgozás idejét is. Legyen a diszkrét irányítási rendszer időalapja T , amely időközönként beolvassuk a szenzorok jeleit, elemezzük a szituációt és döntést hozunk. T -t úgy kell megválasztani, hogy ezen idő alatt a járművek előre nem tervezett szituációba ne kerülhessenek, vagyis amennyiben t időpillanatban a szituáció elemzése alapján meghozott döntéseink szerint elkerüljük az ütközést, akkor $t+T$ időpillanatban fájdalmas lenne megállapítani, hogy "tömegbaleset" történt. Tehát a járművek sebessége és a lehetséges szituációk egy felső korlátot adnak T -re. Az irányító számítógépekben futó algoritmusoknak a szituáció egy elemére (pl. egy járműre) vonatkozó számítási idejét nevezzük ciklusidőnek. A centralizált irányító számítógép algoritmusának ciklusideje legyen T_c , a decentralizált gépeké T_d . (Várhatóan $T_c < T_d$, hiszen ha az összes intelligenciát egy gépbe akarjuk belerakni, akkor elvárjuk, hogy az legyen nagyon gyors, bár ez nem feltételünk.) A centralizált irányító rendszernek, mint

¹⁶ A komplexitás mértékét a műveletvégzésnek az elemszámmal való arányosság jellemző nagyságrendje alapján definiáljuk. Pl. az elemszámmal való lineáris arányosságot $O(N)$ -nel (ejtsd: ordó n) jelöljük.

láttuk, N^2T_c időre van szüksége, hogy kiértékelje a szituációt és meghozza döntéseit. Amennyiben $N^2T_c > T$, akkor a centralizált irányító rendszer már nem képes a probléma megoldására azon idő alatt, míg biztosak lehetünk benne, hogy nem történik baleset. Ez esetben tehát elkerülhetlenné válik a decentralizált architektúra alkalmazása. Bár egy korszerűbb, gyorsabb számítógép alkalmazásával T_c csökkenthető, de N növekedésével egy adott rendszerben mindig található egy olyan határ, amely fölött a centralizált irányítási rendszer csődöt mond. Az irányítási feladat komplexitásának növekedése, illetve T_c növekedése ugyancsak eredményezheti, hogy decentralizált irányítást kell alkalmazni.

Miért nem alkalmazunk tehát minden esetben decentralizált irányítást? A decentralizált rendszerek esetén minden egyes mobil egységnek komplex érzékelő-, jelfeldolgozó és irányítási rendszerrel kell rendelkeznie, ami nyilván egy bonyolultabb és költségesebb rendszert kíván meg, mint a centralizált architektúra. A centralizált és decentralizált modellek közötti választást tehát gazdaságossági szempontok is befolyásolják. A fentiekben csak egy nagyon leegyszerűsített példát adtunk arra, hogy érzékeltesük a centralizált és decentralizált rendszerek közötti rendszertechnikai különbséget.

B. Függelék: A MINIMAN mikrorobot és a munkacella eszközeinek paraméterei

A megépített MINIMAN mikrorobot lényeges paraméterei

$$f_0 = 262 \text{ Hz}$$

$$U_0 = 150 \text{ V}$$

$$k_U = 1.1 \cdot 10^{-8} \text{ m/V}$$

$$k_F = 4.6 \cdot 10^{-6} \text{ m/N}$$

$$m = 80 \text{ g}$$

$$L \text{ (lépéshossz)} = 1.13 \text{ } \mu\text{m}$$

Zeiss Stemi 2000-C sztereomikroszkóp

Jellemzők	Alap eszköz	Cserélhető optikával
Teljes nagyítás tartománya	6,5x ... 50x	1,95x ... 225,0x
Működési távolság	90 mm	kiegészítő lencsétől függ
Látótér	23 mm	16/10 (mm)
Maximális tárgytér átmérője	35 mm	118 mm

Zoom lencserendszer		Okulár					
faktor	szabad működési távolság (mm)	WPL 10x/23 br. foc		WPL 16x/16 Br. foc		W 25x/10 foc.	
		Teljes nagyítás	Tárgytér (mm)	Teljes nagyítás	Tárgytér (mm)	Teljes nagyítás	Tárgytér (mm)
0,3x	285	1,95x...13,5x	118...17	3,1x...21,6x	82,1...11,9	4,9x...33,8x	51,3...7,4
0,4x	210	2,6x...18x	88,5...12,8	4,2x...28,8x	61,5...8,9	6,5x...45x	38,5...5,6
0,63x	130	4,1x...28,4	56,2...8,1	6,6x...45,4x	39,1...5,6	10,2x...70,9x	24,4...3,5
w/o	92	6,5x...45x	35,4...5,1	10,4x...72x	24,6...3,6	16,3x...112,5x	15,4...2,2
2,0x	31	13x...90x	17,7...2,6	20,8x...144x	12,3...1,8	32,5x...225x	7,7...1,1

Munkatér megvilágítása KL-1500 LCD hidegfényű forrással, üvegszálalás fényvezetővel és kollimátorral történik.

Sony DXC-151AP színes CCD kamera

- Pixelszám: 756×581
- Pixel távolság: $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$
- video rendszer: CCIR PAL
- S/N arány: min. 46 dB
- fenti mikroszkóphoz csatlakoztatva a kamerakép felbontása (két szomszédos pixelnek megfelelő két tárgypontról távolsága): $2.2 \mu\text{m} \dots 16.9 \mu\text{m}$ (zoom beállítástól függően)

C. Függelék: Mikrorobot mozgásegyenletének megoldása

1. Az első félperiódus megoldása

A megoldás érdekében a mozgásegyenlet Laplace-transzformáltjából indulunk ki.

$$X(s) = -\frac{k_U \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} U(s) + \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} P(s) + \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} x(-0) + \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \dot{x}(-0) \quad (\text{C-1})$$

Feltételünknek megfelelően $t \in [0, T/2)$ intervallumban a mikrorobot nem csúszik meg, így a koordináta-rendszer alkalmas választásával $p(t) = 0$, így $P(s) = 0$. A kiindulási értékeket pedig jelöljük $x_0 = x(-0)$, $v_0 = \dot{x}(-0)$. Ezt behelyettesítve $X(s)$ fenti kifejezésébe és az inverz transzformációt elvégezve megkapjuk $x(t)$ $[0, T/2)$ intervallumban érvényes kifejezését. A $v(t)$, $F(t)$ és $\xi(t)$ kifejezések deriválással, illetve a mikrorobot differenciálegyenlet-rendszer segítségével határozhatók meg.

$$U(t) = -\frac{2U_0}{T} t \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{C-2})$$

$$x(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} t + x_0 \cos \omega_0 t + \left(v_0 - \frac{2U_0 k_U}{T} \right) \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{C-3})$$

$$v(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} - x_0 \omega_0 \sin \omega_0 t + \left(v_0 - \frac{2U_0 k_U}{T} \right) \cos \omega_0 t \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{C-4})$$

$$F(t) = -m \omega_0 \left[x_0 \omega_0 \cos \omega_0 t + \left(v_0 - \frac{2U_0 k_U}{T} \right) \sin \omega_0 t \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{C-5})$$

$$\xi(t) = -x(t) = -\left[\frac{2U_0 k_U}{T} t + x_0 \cos \omega_0 t + \left(v_0 - \frac{2U_0 k_U}{T} \right) \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} \right] \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{C-6})$$

$$p(t) = 0 \quad (\text{C-7})$$

2. Megoldás a feszültségfüggvény ugráshelye környezetében

A $t = T/2$ időpillanatban a feszültségfüggvénynek ugrása van. Bár a valóságban a feszültség nyilván véges idő alatt vált polaritást, ez a τ felfutási idő - vagyis amíg a feszültség $-U_0$ -ról $+U_0$ -ra növekszik - lényegesen kisebb, mint a T periódusidő. Függetlenül attól, hogy a τ időtartam alatt a láb megcsúszik, vagy végig tapad, a csúszási, vagy tapadási erő legfeljebb a maximális μmg értéket érheti el, amely ugyan gyorsítja, vagy fékezi a robotot, azonban a nagyon rövid τ idő alatt ennek sebességváltoztató hatása elhanyagolható. Ugyanezen okból modellünkben a robot helyváltoztatását a τ idő alatt ugyancsak zérusnak tekintjük.

Részletesebben vizsgálva a τ felfutási idő alatti folyamatot, a villamos feszültség növekedésének hatására a $T/2$ -nél még pozitív tapadási erő először zérusra csökken, majd ellentétes (negatív) irányban abszolút értéke növekszik. Ha a τ időn belül a tapadási erő nem éri el (negatív) maximumát, a láb végig tapad és így a robot nem fog lépést tenni. Vizsgáljuk most azt az esetet, amikor a tapadás még τ -n belül eléri maximumát, a láb megcsúszik és ezután súrlódni fog, így az erő nagysága a súrlódási erővel lesz egyenlő. A $T/2 + \tau$ időpillanatban (2-es indexszel jelölve):

$$\xi_2 = \xi\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = k_F F\left(\frac{T}{2} + \tau\right) + k_U U\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = -k_F \mu mg + U_0 k_U \quad (\text{C-8})$$

$$p_2 = p\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = \xi\left(\frac{T}{2} + \tau\right) + x\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = -k_F \mu mg + U_0 k_U + x\left(\frac{T}{2} - \delta\right) \quad (\text{C-9})$$

Annak a feltételét, hogy mi szükséges ahhoz, hogy a tapadás még a τ felfutási időn belül elérje maximumát, vagyis a láb megcsússzon, az értekezés 5. fejezetében tárgyaljuk. (δ egy nagyon kis időtartamot jelöl $T/2$ elérése előtt.)

3. A második félperiódus megoldása

A $t \in (T/2, T]$ intervallum számítását $T/2$ -nél bekövetkező bekapcsolási jelenségként vizsgáljuk. Ebben az intervallumban a láb ismét tapad, így talppontja már nem mozdul el. A belépő függvényeket és a kiindulási értékeket jelöljük az alábbiak szerint:

$$U(t) = 2U_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \quad (\text{C-10})$$

$$p(t) = p_2 \cdot \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$x_2 = x\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = x\left(\frac{T}{2} - \delta\right) \quad (\text{C-11})$$

$$v_2 = \dot{x}\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = \dot{x}\left(\frac{T}{2} - \delta\right)$$

Helyettesítsük a (C-1) kifejezésben $U(s)$ és $P(s)$ helyébe a fenti $U(t)$ és $p(t)$ Laplace-transzformáltjait, x_2 -t az $x(-0)$ kiindulási érték helyébe, valamint v_2 -t az $\dot{x}(-0)$ kiindulási érték helyébe. Az inverz transzformációt elvégezve megkapjuk az $x(t)$ időfüggvényt a $(T/2, T]$ intervallumban. A $v(t)$, $F(t)$ és $\xi(t)$ kifejezéseit a már ismert eljárással kapjuk meg.

$$x(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} \left(t - \frac{T}{2}\right) + (p_2 - U_0 k_U) + \frac{\mu g}{\omega_0^2} \cos \omega_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) + \frac{1}{\omega_0} \left(v_2 - \frac{2U_0 k_U}{T}\right) \sin \omega_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \quad (\text{C-12})$$

$$v(t) = \left[\frac{2U_0 k_U}{T} - \frac{\mu g}{\omega_0} \sin \omega_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) + \left(v_2 - \frac{2U_0 k_U}{T}\right) \cos \omega_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \quad (\text{C-13})$$

$$F(t) = -m \omega_0 \left[\frac{\mu g}{\omega_0} \cos \omega_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) + \left(v_2 - \frac{2U_0 k_U}{T}\right) \sin \omega_0 \left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \quad (\text{C-14})$$

$$\xi(t) = k_F F(t) + k_U U(t) \quad (\text{C-15})$$

$$p(t) = \xi(t) + x(t) = p_2 \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \quad (\text{C-16})$$

4. A kiindulási értékek meghatározása

A fentiekben kapott megoldás a robotmodell stacionárius mozgását írja le. Az időfüggvények tartalmazzák a kiindulási értékeket is, mint egyenlőre határozatlan állandókat. A kiindulási értékek a mozgás periodicitása alapján határozhatók meg.

$$v(T) = v(0) = v_0 \quad (\text{C-17})$$

$$F(T) = F(0) = -mx_0\omega_0^2 \quad (\text{C-18})$$

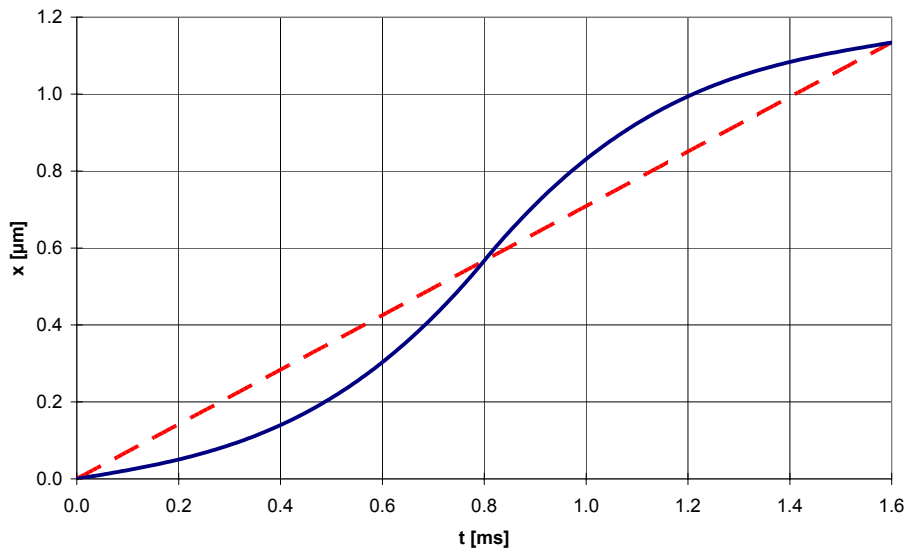
A fenti egyenletrendszerből - a részletszámítások mellőzésével - a kiindulási értékekre az alábbi megoldást kapjuk:

$$x_0 = 0 \quad (\text{C-19})$$

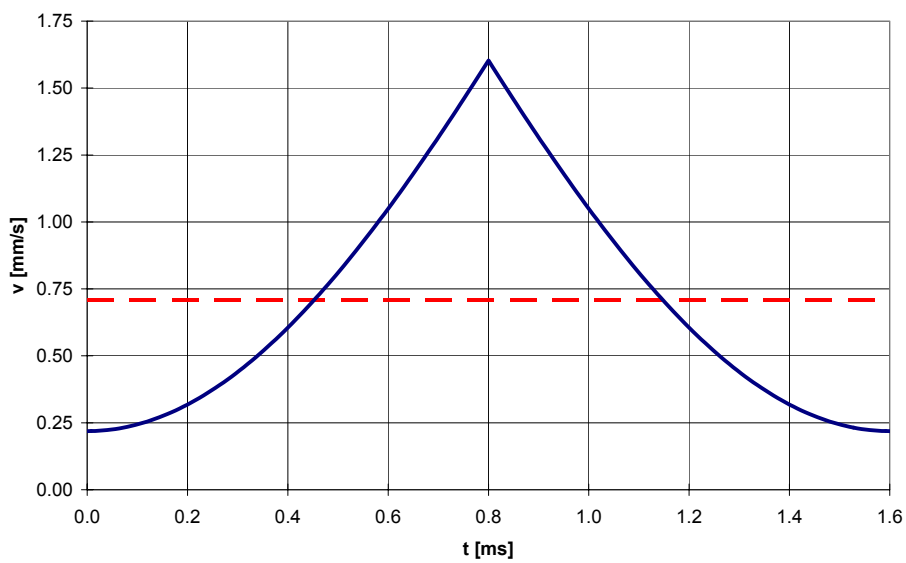
$$v_0 = \frac{2U_0k_U}{T} - \frac{\mu g}{\omega_0 \sin \frac{\omega_0 T}{2}} \quad (\text{C-20})$$

A kiindulási értékeket az időfüggvényekbe helyettesítve megkapjuk a teljes megoldást a rendszer stacionárius állapotában.

D. Függelék: Dinamikai modell alapján az időfüggvények grafikonjai

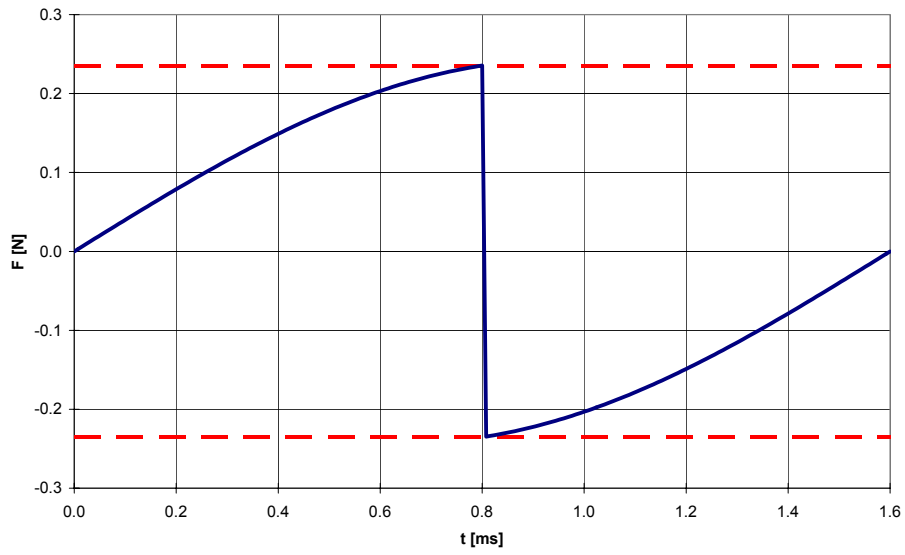


Pozíció időfüggvény

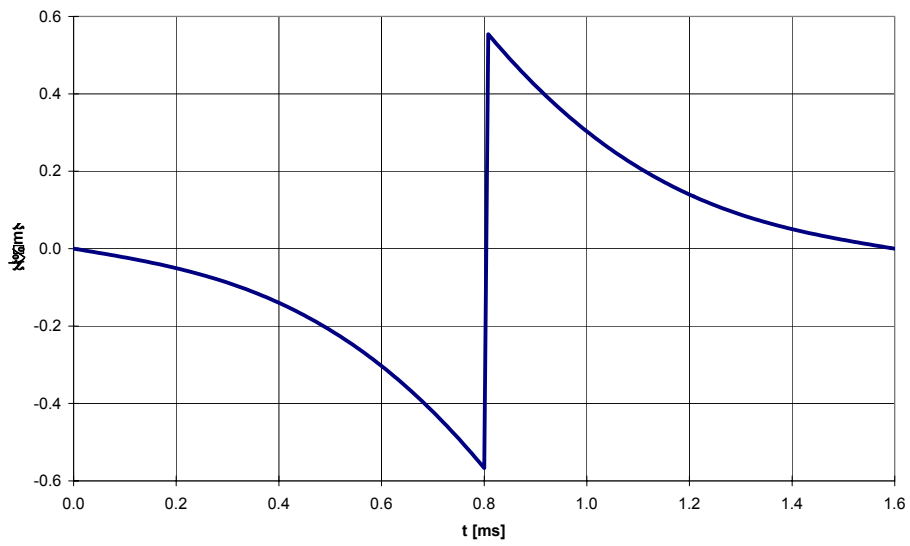


Sebesség időfüggvény

A pozíció és sebesség időfüggvényeken a szaggatott vonal az átlagsebességet, illetve az ezzel való haladás esetében a pozíció időfüggvényét ábrázolja.



Erő időfüggvény



Piezolás elhajlás időfüggvény

E. Függelék: Mérési adatok

Mikrorobot mozgásának mérési eredményei

Mérési eredmények: frekvencia - átlagsebesség karakterisztika

Átlagsebesség [mm/s]						
Frekvencia [Hz]	71	143	286	571	1 136	2 273
Üveg	0.170	0.339	0.459	1.209	1.785	4.443
Alumínium #1	0.144	0.268	0.508	1.252	2.387	3.555
Alumínium #2	0.097	0.229	0.598	0.813	1.581	
Alumínium #3	0.125	0.247	0.630	1.190	2.335	3.805

Átlagsebesség mérési adatai a frekvencia függvényében

Mérési eredmények: súrlódási együttható - átlagsebesség karakterisztika

Átlagsebesség [mm/s]	Frekvencia						
	Súrlódási együttható	71 Hz	143 Hz	286 Hz	571 Hz	1136 Hz	2273 Hz
Üveg	0.18	0.170		0.459	1.209	1.785	4.443
Alumínium #3	0.19	0.125	0.247	0.630	1.190	2.335	3.805
Alumínium #1	0.22	0.144	0.268	0.508	1.252	2.387	3.555
Alumínium #2	0.25	0.097	0.229	0.598	0.813	1.610	
μ_{\max} (kalkulált)		0.39	1.04	-0.42	0.43	0.72	0.40

Átlagsebesség mérési adatai különböző súrlódási együtthatónál

Mérési eredmények és számított értékek összehasonlítása

Átlagsebesség [mm/s]						
Frekvencia [Hz]	71	143	214	571	1 136	2 273
Mérési eredmény	0.170		0.170	1.209	1.785	4.443
Dinamikai modell	0.134	0.268	0.402	1.071	2.131	4.261

Üvegfelületen $\mu=0.18$

Modell és a mérési eredmények összehasonlítása üvegfelület esetén

Átlagsebesség [mm/s]			
	Súrlódási együttható	Mérési eredmény	Dinamikai modell
Üveg	0.18	1.209	1.170
Alumínium #3	0.19	1.190	1.125
Alumínium #1	0.22	1.252	0.990
Alumínium #2	0.25	0.813	0.855

Frekvencia $f=571$ Hz

Modell és a mérési eredmények összehasonlítása különböző felületeken

Defókuszáltság alapú távolság meghatározás mérési eredményei

z [μm]	b/a [x 0.001] elméleti	b/a [x 0.001] mért
36	6.07	
32	5.39	6.12
28	4.71	5.53
24	4.03	5.04
20	3.36	4.76
16	2.68	4.37
12	2.01	4.17
8		4.03
4		3.79
2		3.59
0		3.87