MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

ROBOTOK HEPTIKUS TULAJDONSÁGÁNAK FEJLESZTÉSE GYÁRTÁSI ÉS SZERELÉSI FOLYAMATOK AUTOMATIZÁLÁSÁRA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Rónai László

okleveles mechatronikai mérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET
MECHATRONIKAI RENDSZEREK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

Doktori iskola vezető:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport vezető:

Dr. Szabó Tamás
egyetemi docens

Tudományos vezető:

Dr. Szabó Tamás
egyetemi docens

Miskolc, 2020

Bíráló bizottság

Elnök: **Prof. Dr. Páczelt István**
DSc, professor emeritus, Miskolci Egyetem

Titkár, tag: **Dr. Kovács György**
egyetemi docens, Miskolci Egyetem

Tagok: **Prof. Dr. Égert János**
CSc, professor emeritus, Széchenyi István Egyetem, Győr

Prof. Dr. Bertóti Edgár
DSc, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem

Dr. Pere Balázs
egyetemi docens, Széchenyi István Egyetem, Győr

Hivatalos bírálók

Dr. habil. Husi Géza
egyetemi docens, Debreceni Egyetem

Dr. Szirbik Sándor Mátyás
egyetemi docens, Miskolci Egyetem

Tartalomjegyzék

Bíráló bizottság.....I

Hivatalos bírálók I

1. Bevezetés 1

1.1. Előzmények 1

1.2. Célkitűzések 1

2. A feladat megoldásának módszere 4

3. Új tudományos eredmények 9

4. A hasznosítás és a továbbfejlesztés lehetőségei..... 11

A tézisfüzetben felhasznált irodalmak..... 13

Az értekezés témájához kapcsolódó saját publikációk..... 15

1. Bevezetés

A következő két alfejezet ismerteti a kutatómunka alapját képező robotizálás fontosságát, relevanciáját, továbbá a kutatás célkitűzéseit.

1.1. Előzmények

2013-ban Németországban meghirdetett negyedik Ipari Forradalom (Ipar 4.0 [1]–[3]) hatására ma már Magyarországon is jelentkezik az igény ipari folyamatok minél teljesebb körű automatizálására, robotizálására. Az elmúlt években Magyarországon is tapasztalható, hogy az eddig alkalmazott emberi erőforrást inkább gépek váltják fel. Napjainkban a 4. ipari forradalom zajlik, amelyet az információs- és kommunikációs technológiák (ICT) rohamos fejlődése idézett elő [1]. Az Ipar 4.0 egy ígéretes törekvés arra, hogy az üzleti- és az ipari folyamatokat integrálja, valamint a cégek értékláncában jelenlévő beszállítókat és az ügyfeleket összekösse [1]. Az emberi erő és intelligencia kiváltása megköveteli a gyártási folyamatok újragondolását, tervezését. A koncepció lehetővé teszi a rugalmas tömeggyártás feltételeinek megteremtését is. A modern kommunikációs eszközök pl. okostelefonok, tabletek lehetőséget biztosítanak a folyamatok nyomon követésére és beavatkozására. A különböző értékteremtő folyamatok távoli eléréssel monitorozhatóvá, illetve beavatkozhatóvá válnak.

Az orvostudományban már évtizedek óta folynak olyan kutatások, amelyek távoli eléréssel biztosítják pl. a páciensek operációját. Ehhez feltétlenül szükség van az érintéssel járó érzékelés meglétére, azaz a heptikus visszacsatolásra. A heptikus kifejezés a haptikos ókori görög szóból származik, amelynek jelentése „érintéssel járó érzés” [5].

Napjainkban egyre nagyobb kutatási potenciált fordítanak a hagyományos robotkarok kooperatív alkalmazására, illetve az emberi tevékenységek humanoid robotokkal való kiváltására. Ehhez nélkülözhetetlen a robotok heptikus [4]–[8] tulajdonságának fejlesztése.

1.2. Célkitűzések

Az Ipari Forradalom 4.0 (Industrial 4.0) hatására manapság az ipari folyamatok automatizálása és robotizálása kiemelten fontossá vált. Megfigyelhető, hogy az eddig emberi munkaerővel végzett összeszerelés,

hegesztés, festés stb. mára már egyre több helyen robottal történik. Az eredmény az egyre szélesebb vevői igényeknek és nem utolsó sorban a robotok pontos pozícionálásának és rendelkezésre állásának is köszönhető.

Az emberi tevékenységek robotokkal való helyettesítése többirányú mérnöki kutatómunkát igényel. A gyártási, szerelési folyamatokban az operátorok által végzett és érzékelt műveleteket modellezni, illetve átültetni szükséges.

Az ipari robotoknak sok esetben olyan szerelési folyamatot kell megoldaniuk, amelyeknél szükséges lehet az erő-visszacsatolás megléte. Ezekben a helyzetekben a rendszernek döntést kell majd hoznia, hogy az adott szerelési művelet megfelelően került-e végrehajtásra.

A Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszéken több, a Robert Bosch Power Tool Kft.-nél felmerült robottal történő ipari szerelési folyamat megvalósíthatósági tanulmánya készült el. A feladatok megoldásakor több alkatrészt bepattanással lehetett szerelni, amelyek mechanikailag pillanatnyi stabilitásvesztéssel járnak.

A doktori képzési és kutatási szakaszában olyan szerelési folyamatokat vizsgáltam, amelyek robottal is elvégezhetők, és amelyeknél pillanatnyi stabilitásvesztés történik. A bepattanással szerelhető rugalmas szerkezetek a nagy elmozdulás- és kis deformáció elmélet segítségével jól modellezhetők. A szimulációs eredmények felhasználásával stabilitásvizsgálat is elvégezhető, amelynél figyelembe kell venni a nem konzervatív pl. disszipatív erők jelenlétét is. A kutatás során kialakítandó erőmérőrendszer használatával a teoretikusan meghatározott és a tényleges mérési eredmények összevethetővé válnak.

Ahhoz, hogy a műveleteket a robot az emberhez hasonlóan helyesen végrehajthassa, intelligens megfogók kifejlesztésére van szükség. Ez magában foglalja a beágyazott rendszerek (mikrovezérlők) alkalmazását is, amely az erő-visszacsatolást feldolgozza és kommunikál a robotvezérlő egységgel.

A kutatómunka során kitűzött célok az alábbiak:

- A heptikus témához kapcsolódó, rendelkezésre álló szakirodalmak feldolgozása.

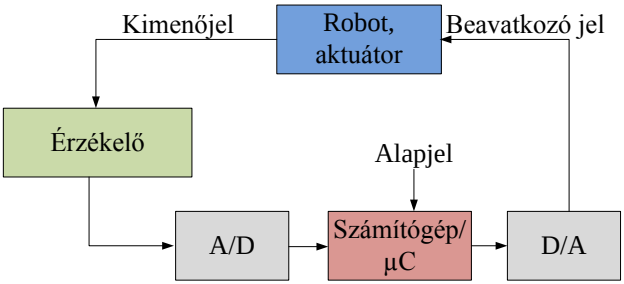
- A szerelés során fellépő pillanatnyi stabilitásvesztéssel járó mechanikai jelenségek feltárása, modellezéssel, valamint mérések elvégzése.
- Intelligens megfogó egység kifejlesztése, amellyel a stabilitásvesztéssel járó szerelési folyamatok követhetők és a kívánalmaknak megfelelően végrehajthatók.
- Kísérletek végzése gyakorlati szerelési folyamatokra.

A disszertációt az elvégzett kutatómunka időrendjét követve szerkesztettem meg.

2. A feladat megoldásának módszere

A doktori kutatómunka első lépésében számos szakirodalmat tekintettem át. A heptikus koncepciót három részterületre szokás felosztani: gépi-, számítógépes- és emberi heptikus visszacsatolások [4]. A disszertációmban a gépi heptikus visszacsatolással foglalkozom.

A gépi heptikus visszacsatolásnál pl. egy ipari robot erő-visszacsatolást tartalmaz, amellyel az előzőleg emberekkel elvégeztetett szerelési folyamatok intelligensen kiválthatók. A 2.1. ábra egy olyan példát mutat be, amikor egy robot/aktuátor esetében erőmérés történik. A mért jelet visszacsatolva, átalakítva és kiértékelve a rendszer döntést tud hozni, hogy a beavatkozó elem pozíciója, fordulatszáma hogyan alakuljon.



2.1. ábra: A gépi heptikus visszacsatolás egy példája

A gépi heptikus visszacsatolás fontos szerepet kap különböző feladatok intelligens kezelésénél [6], [7].

A disszertációmban olyan szerelési folyamatok modellezésével és robottal történő végrehajtásával foglalkozom, amelyeknél a bepattanás jelensége lép fel. Az ilyen jelenséget magukban hordozó elemek egyik csoportját képezi a különböző kialakítású műanyag rögzítő fülek [9]–[11]. Ezeket az elemeket két összeszerelendő egység összekapcsolására szokták használni. A bepattanással járó munkadarabok szerelési folyamatait tárgyaló szakirodalmak száma is jól tükrözi a kutatási téma fontosságát.

A bepattanásra alkalmas rögzítő elemek síkbeli rúdszerkezetként való modellezése a végeselem-módszerrel jól kezelhető. Nemlineáris végeselemes mechanikai feladatokra kétféle leírásmód terjedt el, ezek az UL (Updated Lagrangian) [12] és a TL (Total Lagrangian) [12], [13].

Kis deformációk, valamint nagy elmozdulásoknál a forgások kezelése alapvető fontosságú. A co-rotációs módszer [14]–[16] alkalmazásával a deformációk és a merevtestszerű elmozdulások szétválaszthatók. Hasonló elvet foglal magába az UL leírási mód is. A [14]–[16] irodalmak kellő részletességgel tárgyalják a síkbeli hajlékony rúdszerkezetek végeselemes formuláit, amelyek alapján a bepattanás jelenségét szimuláló algoritmust fejlesztettem ki.

A műszaki életben gyakran fordulnak elő olyan szerkezetek, amelyek egymással érintkeznek. Két test közötti kapcsolat lehet egy-, illetve kétoldalú. Egyoldalú esetben az érintkezési feszültség csak a testbe mutathat, míg kétoldalú esetben az érintkezési feszültség irányára nincs megkötés [19]. Normál kontakt feladatnál az érintkezési erő iránya mindig merőleges az érintkező felületre.

A Signorini-féle kontakt feltétel [19], [20], értelmében az érintkezést egy nem reguláris függvénnyel lehet leírni, amely szorzat alakban írható fel

$$p_c d = 0, \tag{2.1}$$

ahol p_c a kontakt nyomás és d a hézag. Érintkezéskor $p_c \geq 0$ és a d hézag egyenlő nullával, minden más esetben a kontaktnyomás nulla, míg a hézag nagyobb, mint zérus.

A tanulmányozott szerelési folyamatoknál egy-egy pontban történő érintkezési feladatokat vizsgáltam. A kinematikai feltétel, azaz a $d = 0$ biztosításával a feladatok többsége kezelhető, azonban volt olyan szerelési folyamat, ahol a büntetőparaméteres technikát alkalmaztam.

Szerelési folyamatok járhatnak pillanatnyi stabilitásvesztéssel, az ilyen esetekben célszerű vizsgálatokat folytatni az adott egyensúlyi helyzet stabilitását illetően. A stabilitás koncepciója a mechanikában már a korai időkben is kutatott terület volt, hogy a rendszerek bizonyos egyensúlyi típusai jellemezhetővé váljanak [17], [18].

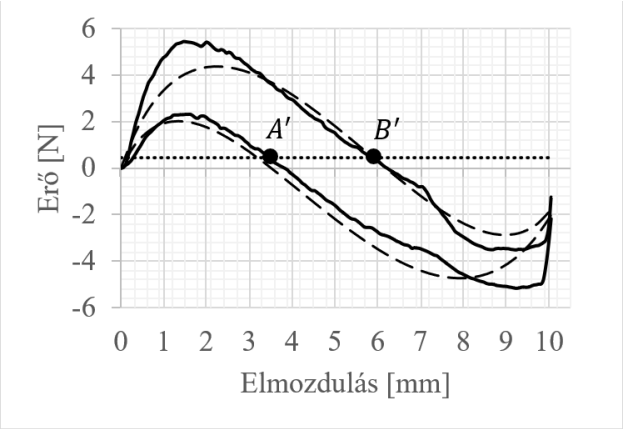
Egy mechanikai, csak konzervatív erőkkel jellemezhető szerkezet egyensúlyi helyzetének stabilitásvizsgálatára a Dirichlet-elv szolgál, amely a Π teljes potenciális energiát használja fel. Az elv kimondja,

hogy akkor tekinthető stabilnak az egyensúlyi helyzet, ha a Π potenciális energiának itt minimuma van.

Stabilitásvizsgálati feladatok gyakran csak konzervatív erőket tartalmaznak, azonban lehetnek olyanok is, amelyeknél ezen erők mellett nem konzervatív erők is jelen vannak. Az ilyen típusú stabilitási problémák L. Salvadori [17], [18] tétele segítségével vizsgálhatók.

A disszertációmban egy konkrét szerelési példán keresztül egy akkumulátor be-, illetve kiszerelésének modellezésével meghatároztam az erő-elmozdulás hiszterézis alakú görbét. Az akkumulátort egy műanyag, rugalmas cellatartóba kell behelyezni. A görbe méréssel történő felvételéhez egy kísérleti mérőrendszert fejlesztettem ki. A mérőrendszer tartalmaz egy erőmérő cellát, egy mikrovezérlőt és reléket a robottal történő kommunikáció érdekében. Ahhoz, hogy az erőértékeket közel valós időben, személyi számítógépen is meg tudjam jeleníteni kifejlesztettem egy mérésadatgyűjtő programot LabVIEW szoftverben.

A 2.2. ábra mutatja az akkumulátor kvázi-statikus szerelési folyamatának mérési-, illetve modellezési eredményeit. A vízszintes szaggatott vonal az akkumulátor súlyerejét reprezentálja. Az A' és a B' a stabilitás határát jelző pontok, ahol rendre az akkumulátor automatikusan ki-, vagy be fog pattanni. Azonban e két pont között az adhézió megjelenhet, ahogy ez a méréseknél is tapasztalható volt.

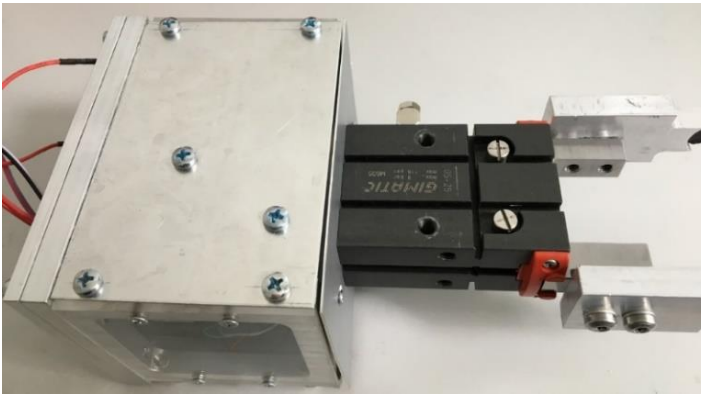


2.2. ábra: Beszerelés és kiszerelés erőszükséglete (—— mérés; ---- szimuláció)

A szerelési folyamatokat lehet kvázi-statikusan, illetve dinamikusan is elvégezni. A stabilitásvizsgálat rámutatott arra, hogy a stabilitás határát jelző pontnál kvázi-statikus esetben elengedve pl. az akkumulátort, az automatikusan be fog pattanni a cellatartóba. Dinamikusan elvégzett szerelésnél, azonban a stabilitás határpontja előtt elengedve az akkumulátort, be fog pattanni a végső helyére. Ennek oka, hogy a határpont előtti helyzetben az akkumulátor kinetikus energiája képes fedezni a súrlódási munka és az alakváltozásból származó energia növekményt. Így egy olyan közelítő módszert dolgoztam ki, amely meghatározza Coulomb súrlódás mellett az akkumulátorok dinamikus behelyezésekor a robotmegfogó nyitásának és egyben megállításának a helyzetét.

A kapott mérési- és szimulációs eredmények, illetve a szakirodalmak alapján célszerű volt egy intelligens, robotra illeszthető megfogó kifejlesztése. A megtervezett és legyártatott megfogót összeszerelt állapotában a 2.3. ábra szemlélteti. Az egységre egy pneumatikus megfogó szerelhető fel. A megfogóhoz a korábbi kísérleti mérőrendszer NYÁK-ját áttervezetem, amelyen relék helyett optocsatolók találhatók, a pergés jelenségének kiküszöbölése érdekében. Az erőmérő cella jeleinek digitalizálását egy 24 bites szigma-delta A/D átalakító végzi.

Szerkezetileg a megfogó tartalmaz egy túlterhelési védelmet az erőmérő cella biztonsága érdekében, továbbá két lemezt, amelyek egy párhuzamos mechanizmust alkotva megakadályozzák a nem kívánt erőkomponensek fellépését.



2.3. ábra: A kifejlesztett intelligens megfogó egység

A feladat megoldásának módszere

Az alkalmazott mikrovezérlő egy Arduino fejlesztői platformon található ATmega328 típusú egység. A mikrokontrollerre egy feladatfüggő feltételrendszeren alapuló algoritmust fejlesztettem ki, amellyel meghatározható a stabilitás határpontja, illetve dinamikus beszerelésnél a határpont előtt lévő – a megfogó kinyitásához tartozó – szerszámközéppont (TCP – Tool Center Point).

A stabilitási feltételrendszer négy, feladat függvényében kombinálható feltételei:

$$\left\{\frac{\left|\hat{F}_{nom}-\hat{F}\right|}{\hat{F}_{nom}}<\delta_1\right\},\left\{\frac{\left|F_{max}^{nom}-F_{max}\right|}{F_{max}^{nom}}<\delta_2\right\},\quad \{\tan\alpha_i<0\},\{F_i<\delta_3\}. \tag{2.2}$$

Az első feltétel a folyamat során mérhető átlagos szerelési erőt, illetve egy korábbi méréssel megkapott névleges értékének összehasonlítását tartalmazza. A második feltétel a szerelés közbeni maximum erőt meghatározva képes a folyamatra jellemző maximális szerelési erő függvényében döntésre. A harmadik feltétel értelmében az erő-elmozdulás diagram negatív meredekségű szakaszában kell majd elengedni a szerelendő munkadarabot. Az utolsó feltétel alkalmazásával biztosítható, hogy a megfogó az adott munkadarabot a stabilitási határpont előtt engedje el, ezzel teljesítve a dinamikus beszerelést.

A megépített intelligens robotmegfogóval további szerelési folyamatokat végeztem el, mint például egy műanyag csat bepattintását, illetve 5 darab akkumulátor cella műanyag cellatartóba történő szerelését. A kifejlesztett intelligens megfogó nemcsak robotra felszerelve használható, hanem önállóan, külön eszközként is.

A kifejlesztett egység a szerelési folyamatok intelligens elvégzésén felül ellenőrzési feladatokra is alkalmas, amellyel az adott részösszeállítás vagy összeállítás minősége biztosítható.

3. Új tudományos eredmények

Az alábbiakban kerülnek megfogalmazásra azok a tézis értékű új tudományos eredmények, amelyek kidolgozása a doktori kutatómunka része volt.

T1. Bepattanás elméleti vizsgálatára egy végeselemes algoritmust fejlesztettem ki, amely a hajlékony, rugalmas szerkezeti elemeket nagy elmozdulással, kis alakváltozással modellezi. A síkbeli rudakkal modellezett szerkezeti elemek közötti érintkezést a modell részben büntetőparaméteresen, illetve kinematikai feltétel ($d = 0$) biztosításával, Coulomb súrlódás alkalmazása mellett veszi figyelembe. Az algoritmus közvetlenül szolgáltatja az érintkezési erő konzervatív- és nem konzervatív összetevőinek megfelelő irányú összetevőit a további elemzésekhez. Egy be- és kiszerelési példán keresztül méréssel igazoltam a szimulációval kapott erő-elmozdulás hiszterézis alakú zárt görbét.

Vonatkozó publikációk: [S1], [S2], [S3], [S4], [S6], [S7].

T2. Szerelési példáknál analitikusan L. Salvadori tétele segítségével meghatároztam azt az instabil egyensúlyi helyzetet, amelynél a megfogót kinyitva a szerelési folyamat autonóm módon végbemegy. Az egyensúlyi helyzet instabilitását kissebességi perturbációval numerikusan a Newmark módszer felhasználásával is ellenőriztem. Kimutattam, hogy a munkadarab kvázi-statikus behelyezésekor az instabil pont előtt megnyitva a megfogót a darab egy közbenső helyzetében beragadhat. A két megállapítást a mérési tapasztalatok is alátámasztják.

Vonatkozó publikációk: [S7], [S10].

T3. Elméletileg megmutattam, hogy a rugalmas bepattanással járó szerelési folyamatok dinamikusan történő végrehajtásakor a robot megfogója hamarabb is nyitható, mint a stabilitásvesztéssel járó egyensúlyi helyzet. Egy közelítő algoritmust dolgoztam ki a

nyitási helyzet numerikus meghatározására, amely azon alapszik, hogy a kezdeti sebességgel rendelkező munkadarab kinetikus energiája képes fedezni a függőleges irányú támasztóerőkből származó súrlódási munka és az alakváltozási energia növekményt. Ennek jelentősége a szerelési ciklusidő rövidítésében jelentkezhet.

Vonatkozó publikáció: [S10].

T4. Egy erőmérő cellát tartalmazó, célirányos intelligens robotmegfogót fejlesztettem ki, amellyel a bepattanással járó, kvázi-statikus vagy dinamikus szerelési folyamatok végezhetők el, összhangban a T2, illetve a T3 tézisekkel. A csak szerelés irányú erők mérését két rugalmas lemezből álló párhuzamos mechanizmus biztosítja. A megfogó intelligenciáját adó központi egysége egy mikrokontroller, amely adott feladathoz- és a megfogó előírt sebességéhez alkalmasan választott feltételrendszer alapján képes a munkadarab elengedési pontját, azaz a megfogó nyitásának TCP helyzetét megadni a robot számára.

Vonatkozó publikációk: [S5], [S8], [S9], [S11], [S12].

4. A hasznosítás és a továbbfejlesztés lehetőségei

Az ipari robotok heptikus tulajdonságának fejlesztésével a gyártási- és szerelési folyamatok intelligens végrehajtását lehet elérni.

Az iparban gyakran alkalmazott bepattanásra alkalmas műanyag elemek szerelésének végeselemes modellezésére algoritmust dolgoztam ki, amellyel szimulációkat végeztem. Ezen alkatrészek a szerelés során nagy elmozdulást, nagy szögelfordulást és kis alakváltozást szenvednek el. A végeselem-módszerrel az ilyen természetű feladatok jól kezelhetők. A szerelendő alkatrészek között gyakran érintkezés lép fel, amelynek figyelembevételét a kinematikai feltétellel és a büntetőparaméteres technikával biztosítottam. Coulomb súrlódás feltételezésével meghatároztam a beszereléshez és a kiszereléshez szükséges erő-elmozdulás diagramokat. A kifejlesztett algoritmus jól alkalmazható a bepattanással járó ipari szerelési folyamatok modellezésére.

Az elvégzett analitikus- és numerikus stabilitásvizsgálattal meg lehet határozni a stabilitás határát jelző pontot, amely akár a szerelési ciklusidő rövidülését is eredményezheti. Nagyobb sebességgel történő szerelésnél egy olyan numerikus módszert javasoltam, amely képes meghatározni egy akkumulátor műanyag cellatartóba történő dinamikus behelyezésekor a robotmegfogó nyitásának stabilitásvesztés előtti helyzetét. A szerelési folyamat végrehajtásakor a munkadarab mozgási energiája képes fedezni az alakváltozási energia és a súrlódásból származó munka növekményt. Ezen ismereteket az iparban szintén jól ki lehet használni a technológia optimálásakor.

A stabilitásvesztéssel járó szerelésekre kifejlesztettem egy intelligens megfogót. A tervezési folyamat során két tervváltozatot is elkészítettem, amelyek képesek biztosítani a csak szerelés irányú erő mérését.

Egy gyakorlati feladat megoldásához szükség van az intelligens megfogó betanítására, amelyhez egy próbamérés tartozik, hogy meghatározzuk a bepattanásra jellemző erő-elmozdulás diagramot, annak paramétereit (F_{max}^{nom}, $\hat{F}_{nom}$, stb.), illetve nevezetes pontjait. A mikrokontroller programjában az adott feladatra össze kell állítani a megfogó nyitására alkalmas vezérlő feltételrendszert. Több olyan robottal elvégezhető

folyamatot mutattam be a kutatómunka során, amelyeknél a kifejlesztett intelligens megfogót az iparban is alkalmazni lehet.

A jövőbeni tervek között szerepel más bepattanással járó szerelési folyamatok dinamikai modellezése és szimulációja. Bepattanáson kívül egyéb ipari heptikus feladatok vizsgálata és robottal történő végrehajtása. Továbbá, egy profilsínvezetést tartalmazó másik megfogó konstrukció megépítésével összehasonlító mérések elvégzésére is lehetőség fog nyílni.

A tézisfüzetben felhasznált irodalmak

[1] A. ROJKO: Industry 4.0 Concept: Background and Overview, *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, Vol. 11, No. 5, 2017, pp. 77–90.

[2] M. XU, J. M. DAVID, S. H. KIM: The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges, *International Journal of Financial Research*, Vol. 9, No. 2, 2018, pp. 90–95.

[3] B. P. SANTOS, F. CHARRUA-SANTOS T. M. LIMA: Industry 4.0: An Overview, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, UK, 2018, pp. 1–6.

[4] M. A. SRINIVASAN: What is Haptics, *Laboratory for Human and Machine Haptics*, The Touch Lab MIT, 2005, pp. 1–11.

[5] E. S. ABDULMOTALEB, O. MAURICIO, E. MOHAMAD, C. JONGEUN: Haptic Technologies, Bringing Touch to Multimedia, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011

[6] B. S. HOMBERG, R. K. KATZSCHMANN, M. R. DOGAR, D. RUS: Haptic Identification of Objects using a Modular Soft Robotic Gripper, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2015, pp. 1698–1705.

[7] V. J. GOHIL, DR. S. D. BHAGWAT, A. P. RAUT, P. R. NIRMAL: Robotics Arm Control Using Haptic Technology, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, Vol 2, 2013, pp. 98–102.

[8] C. HATZFELD, A. T. KERN: Engineering Haptic Devices, A Beginner's Guide, Second Edition, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2009

[9] R. M. KSHIRSAGARL, D. B. PAWAR: Design and Analysis of Snap Fit Joint in Plastic Part, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 2015, pp. 83–87.

[10] C. KLAHN, D. SINGER, M. MEBOLDT: Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints, *Procedia CIRP 50*, Vol 75, 2016, pp. 264–269.

[11] BAYER MATERIALSCIENCE LLC: Snap-Fit Joints for Plastics, A design Guide, *Bayer Polycarbonates Business Unit*, Pittsburg, Pennsylvania, 1998

[12] K.-J. BATHE, H. OZDEMIR: Elastic-plastic large deformation static and dynamic analysis, *Computers & Structures*, Vol. 6, Issue 2, 1976, pp. 81–92.

[13] P. NANAKORN, L. N. VU: A 2D field-consistent beam element for large displacement analysis using the total Lagrangian formulation, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 42, Issue14–15, 2006, pp. 1240–1247.

[14] L. L. Yaw: 2D Corotational Beam Formulation, *Walla Walla University*, USA, 2009

[15] M. A. CRISFIELD: Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, *John Wiley and Sons*, 1991

[16] R. M. DE SOUZA: Force-based Finite Element for Large Displacement Inelastic Analysis of Frames, *dissertation*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2000

[17] ROUCHE N., HABETS P., LALOY M.: Stability Theory by Liapunovs Direct method, *Springer-Verlag*, New York, 1977

[18] ROUCHE N., HABETS P., LALOY M.: A Ljapunov-féle direkt módszer (fordította: Szervánszky György), *Műszaki könyvkiadó*, Budapest, 1984

[19] PÁCZELT I.: Végeselem-módszer a mérnöki gyakorlatban I. kötet, *Miskolci Egyetemi Kiadó*, 1999

[20] A. SIGNORINI: Sopra akune questioni di elastostatica. *Ph.D. thesis*, Atti della Societa Italiana per il Progresso delle Scienze, 1933

Az értekezés témájához kapcsolódó saját publikációk

[S1] RÓNAI L., SZABÓ T.: Geometrically Nonlinear Modeling of a Snap Fitting Process, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, Debrecen, 2016, pp. 430–435., ISBN 978-963-473-944-9

[S2] RÓNAI L., SZABÓ T.: Molex 39-01-2040 típusú csatlakozó bepattanásának modellezése, *XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, OGÉT*, Kolozsvár, Románia, 2017, pp. 352–355., ISSN 2068-1267

[S3] RÓNAI L.: Elektromos kapcsoló mechanizmus átpattanási jelenségének modellezése, *Doktoranduszok Fóruma 2016*, Miskolci Egyetem, 2017, pp. 79–84.

[S4] RÓNAI L.: Számítógépes mérés erőmérő-cellával, *Doktoranduszok Fóruma 2017*, Miskolci Egyetem, 2018, pp. 91–96.

[S5] RÓNAI L., SZABÓ T.: Designing of Robotic Double-function Fingertips, *Design of Machines and Structures*, Vol. 7., No. 2, 2018, pp. 13–19., HU ISSN 2064-7522

[S6] RÓNAI L.: Erőmérő-cella terhelési eseteinek vizsgálata, *Doktoranduszok Fóruma 2018*, Miskolci Egyetem, 2019, pp. 79–84.

[S7] RÓNAI L., SZABÓ T.: Snap-fit Assembly Process with Industrial Robot Including Force Feedback, *Robotica*, Cambridge University Press, 2020, pp. 317–336. doi:10.1017/S0263574719000614, (**Q2, IF.:1.184**)

[S8] RÓNAI L.: Design Aspects of a Robotic End-effector, *Design of Machines and Structures*, Vol. 8., No. 2, 2019, pp. 52–58., HU ISSN 2064-7522

[S9] RÓNAI L., SZABÓ T.: Modeling and Robotic Handling of a Snap-Fitting Box Buckle, *Pollack Periodica*, Akadémiai kiadó, 2020, pp. 1–12. (cikk elfogadva, megjelenés alatt), **Q3**

[S10] RÓNAI L., SZABÓ T.: Stability Analysis of an Assembly Process Using Simulation, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 13, No. 1, 2020, pp. 14–24., doi: 10.14513/actatechjaur.v13.n1.531.

[S11] RÓNAI L.: Intelligens robotmegfogó elektronikai rendszerének tervezése, *Doktoranduszok Fóruma 2019*, Miskolci Egyetem, 2020 (megjelenés alatt)

[S12] RÓNAI L., SZABÓ T.: Intelligens robotmegfogó fejlesztése, *Multidiszciplináris tudományok*, Miskolci Egyetem, 2020, pp.1–6. (megjelenés alatt)