

KOLLABORATÍV ROBOTKARRA ILLESZTHETŐ SOFT-MEGFOGÓ TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA

Mészáros Attila – Vajda Margaréta – Bálint Ádám – Sárosi József

Abstract: A kollaboratív robotok megjelenésével megnőtt az igény olyan speciális tulajdonságokkal rendelkező megfogókra, amelyek képesek a robot munkaterében tartózkodó operátorral együtt közösen elvégezni bizonyos feladatokat az ember épségének veszélyeztetése nélkül. Nem ritkán ezekhez a folyamatokhoz finom, az emberi végtagokhoz mozgásához hasonló műveletek elvégzése szükséges. Ezeknek a feladatoknak az ellátására lehetnek alkalmasak az úgynevezett soft- vagy puha megfogók. A soft kialakítású robot megfogókban nagy potenciál rejlik, hiszen olyan ipari problémákra képesek korszerű megoldásokat kínálni, amelyek eddig megoldatlannak, vagy csak körülményesen kivitelezhetőnek bizonyultak. A tanulmány egy olyan soft elemekből felépülő megfogót mutat be, amely kollaboratív robotra illesztve képes laboratóriumi munka elvégzésére, pontosabban különböző méretű Petri-csészék átmozgatására. A tervezési folyamat, illetve a geometriai paraméterek meghatározásának bemutatása után a kivitelezéshez használt módszerek és anyagok ismertetése következik. A tanulmány részletesen foglalkozik a megfogó részegységeivel külön elvégzett és az összeállított megfogón végrehajtott mérések folyamatával és összegzésével. Végezetül bemutatásra kerülnek az elvégzett mérések és funkcionális, illetve használhatósági tesztek eredményei.

Abstract: With the appearance of collaborative robots, the demand has increased for grippers with special properties that are able to perform certain tasks together with the operator in the robot's workspace without endangering human health. These processes require the performance of delicate operations similar to the movement of human limbs. For these tasks, the soft grippers can be suitable solutions. There is great potential in soft-designed robot grippers, as they are able to offer modern solutions to industrial problems that have so far proved unsolvable or only difficult to implement. The study presents a gripper built from soft elements, and after attached to a collaborative robot, it can perform laboratory work, more precisely moving Petri dishes of different sizes. After the presentation of the design process and the determination of the geometric parameters, the methods and materials used for the construction are described. The study deals in detail with the process and summation of the measurements performed separately with the gripper components and on the assembled gripper. Finally, the results of the performed measurements and functional and usability tests are presented.

Kulcsszavak: soft-megfogó, robot megfogó, kollaboratív robot

Keywords: soft gripper, robot gripper, collaborative robot

1. Bevezetés

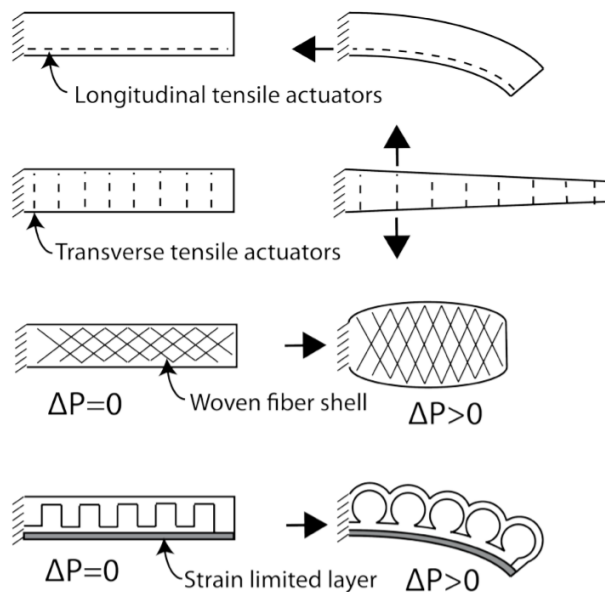
A megfogás és a manipuláció a robotkarok alapvető funkciói. A megfogás egy tárgy felvételének és megtartásának képessége a külső fizikai tényezők figyelembevételével, míg a manipuláció az a képesség, hogy egy tárgyra erőt fejtünk ki, és ezáltal annak elfordulását és elmozdulását idézzük elő a manipulátor referenciapontjához képest. Ezen túlmenően a vég-effektorok akár információkat is gyűjthetnek az objektumok fizikai tulajdonságairól. Ahhoz, hogy egy megfogó több feladatot is képes legyen ellátni speciális kialakításra, illetve anyagfelhasználásra van szükség.

A hagyományos robotmegfogók többnyire merev elemekből állnak. A működtetők különböző módokon helyezhetőek el a megfogó kialakítása szerint, mint például: a részegységeken belül, a megfogó ízületein belül, vagy a megfogó teljes

felépítményén keresztül inszerű szerkezetek segítségével (Melchiorri, Kaneko, 2008). A megfogó szerkezeti kialakítása a kétujjastól egészen a csuklós ujjakkal ellátott antropomorf „kezekig” terjed. Az antropomorf megfogók használatát gyakran az emberi kéz rugalmasságára és ügyességére való törekvés vagy az emberi környezettel való kompatibilitás motiválja. A közelmúltban számos antropomorf megfogót fejlesztettek ki (Controzzi et al., 2014), azonban ezeknél az eszközöknél továbbra is kihívásokat jelentenek, például az emberi kéz gyorsaságának, rugalmasságának és ügyességének eléréséhez szükséges mechanikai és vezérlési komplexitás, valamint a puha és deformálható tárgyak kezelésének nehézségei. A közelmúltban számos olyan kutatás született, amelyek mechanikailag egyszerűbb, antropomorf jellegű megfogókat mutattak be (Deimel–Brock, 2016; Shintake et al., 2018). Ezekben a kutatásokban közös, hogy részben, vagy teljesen rugalmas alkatrészeket használnak a megfogók kialakításánál, így biztosítva azt, hogy bonyolultabb feladatokat is képesek legyenek ellátni a vezérlés bonyolítása nélkül (Rus–Tolley 2015).

Az FEA-k (Fluidic Elastomer Actuator) más néven lágypneumatikus működtetők a legrégebbi, de még ma is a legelterjedtebb működtetési technológiák közé tartoznak a soft-robotikában. Számos előnyük miatt tartják a népszerűségüket, beleértve az egyszerű gyártást, a robusztusságot és az olcsó, könnyen hozzáférhető anyagokat (Gorissen et al., 2017; Polygerinos et al., 2017). Az FEA-k szerkezete általában geometriailag aszimmetrikus, így amikor bennük található kamrákat folyadék vagy gáz által gyakorolt nyomáson keresztül felfújásra kényszerítjük akkor a kamrák geometriájának megváltozása az egész szerkezet mozgására lesz kihatással (1. ábra).

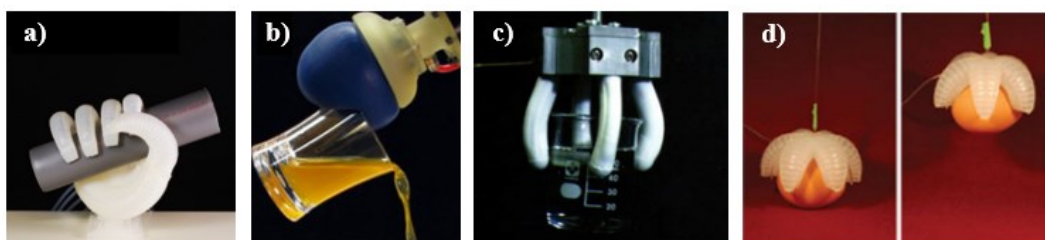
1. ábra: Soft-aktuátorok működésének általános megközelítései nyugalmi (bal), illetve működtetett (jobb) állapotban [5]



Forrás: Rus–Tolley (2015)

A soft-rendszerek természetes előnnyel rendelkeznek a merev elemekből álló megfogókkal szemben az ismeretlen tárgyak kezelésében (2. ábra). A soft-megfogóknak köszönhetően egyszerű vezérlési sémákkal lehet alkalmazkodni a különböző tárgyakhoz, vagy bonyolultabb műveleteket végrehajtani. Ezekben a rendszerekben használt megfogók kihasználhatják ezt az előnyt a hagyományos merev manipulátorokkal szemben, és ezek a szilikon elasztomerek lenyűgöző alkalmazkodóképességet mutatnak a beágyazott pneumatikus csatornáknak, illetve a hihetetlen rugalmasságuknak köszönhetően (Brown et al., 2010; Suzumori et al., 1992; Ilievski et al., 2011).

2. ábra: Különböző kialakítású soft-megfogók. a) emberi kéz kialakítású megfogó, b) ráfönódáson alapuló manipuláció, c) 4 ujjas megfogó, 6 ujjas megfogó



Források: a) Deimel, Brock 2016, b) Brown et al. 2010, c) Suzumori et al. 1992, d) Ilievski et al. 2011

2. Célkitűzés

A tanulmány célja egy olyan FEA rendszerű soft-megfogó tervezése és kivitelezése, amely egy kollaboratív robotra szerelve emberrel együttműködve képes dolgozni. A kollaboratív jellegű robotok egyik nagy kihívása, hogy a rájuk applikált megfogó szintén megfeleljen azoknak a követelményeknek, amelyek alkalmassá teszik a rendszert az emberi együttműködésre. A legfőbb problémát a megfogók szilárd alkatrészeinek élei, sarkai jelentik, ugyanis mozgás közben ezek jelentik a legnagyobb veszélyt. A soft-megfogók esetén a rugalmas aktuátoroknak köszönhetően ez a probléma nem jelentkezik, hiszen ezek az eszközök még működtetett állapotban sem képesek akkora erőbehatásra, hogy abból sérülés keletkezzen. A megvalósítani kívánt megfogót laboratóriumi eszközök, főként Petri-csészék mozgatására lett tervezve, de ezen kívül még számos más eszközt is képes kezelni, például: kémcsövek, lombikok.

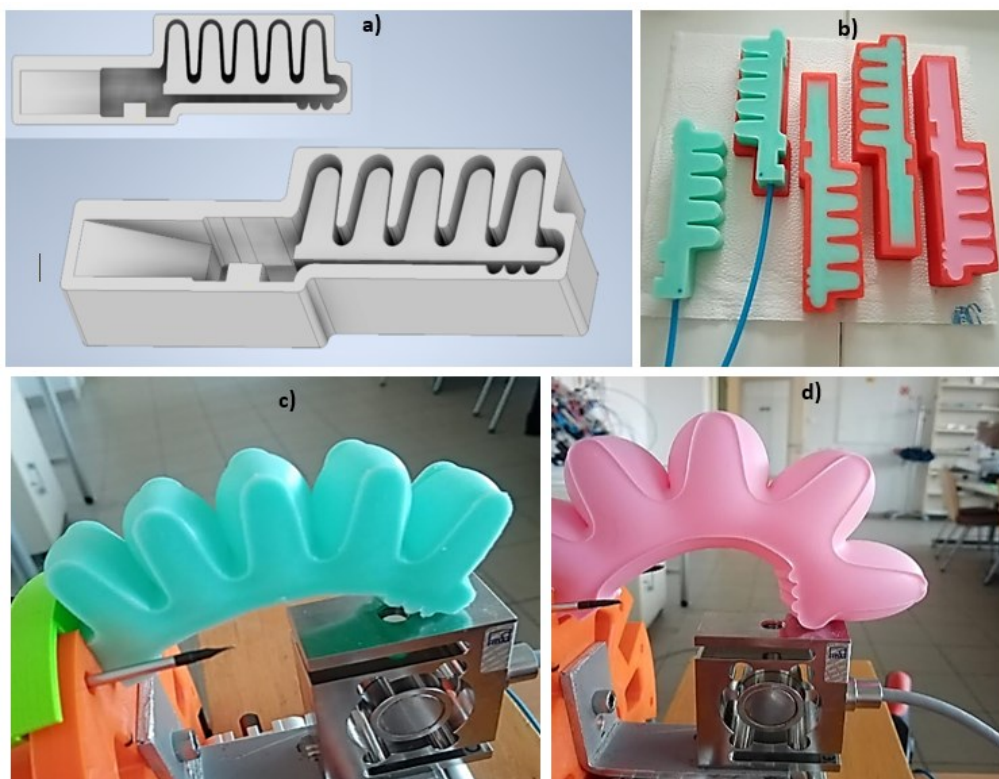
A megfogóval szemben támasztott főbb követelmények:

- legyen képes különböző méretű (120-80 mm átmérővel rendelkező, maximum 0,15 kg tömegű) Petri-csészék manipulációjára különböző sebességeken,
- a megfogó fejtsen ki akkora erőt, hogy stabilan tudja elvégezni a manipulációs feladatot különböző sebességeken,
- kialakítása megfeleljen a kollaboratív jellegű megfogók alapvető elvárásainak.

3. Anyagok és módszerek

A soft aktuátorok tervezésénél elsődleges szempont a megfelelő alak és kamraszám meghatározása volt. Ennek peremfeltételeit a kitűzött feladat biztosította. A felül köríves alak és a kissé dőlt oldalak a felfújódás során bírnak jelentőséggel, hiszen ezzel a kialakítással ellátott aktuátorok elhajlása nem olyan nagy mértékű adott nyomáson, mint a párhuzamos fallal ellátott megoldások. Az így létrejött elhajlás mértéke elegendő ahhoz, hogy az aktuátor fogó felülete 45° -os szöveget legyen képes bezárni a felfogatási pontjának hosszabb élével. Így a megfogó kialakításától függően létrejöhet a megfogási pont megfelelően nagy nyomás mellett. Fontos kiemelni a megfelelően nagy nyomás értéket, ugyanis ezek a típusú aktuátorok 0,03MPa és 0,2 MPa között képesek megfelelően működni. Vagyis a forma kialakításánál fontos szerep jutott annak a tényezőnek, hogy a tervezett 0,1 MPa nyomásnál az aktuátorok elérjék a megfelelő pozíciójukat (3. ábra).

3. ábra: Petri-csésze manipulációjához tervezett soft-megfogó részegységeinek előállítási fázisai. a) Megtervezett öntőforma, b) 3D nyomtatott öntőformák gyártási folyamat közben, c) Shore A40-es keménységű anyagból előállított aktuátor tesztje, d) Shore A30-as keménységű aktuátor működés közben



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

A kamrák száma szintén meghatározó szerepet tölt be az aktuátorok viselkedésében, ugyanis a rosszul megválasztott kamraszám nem megfelelő

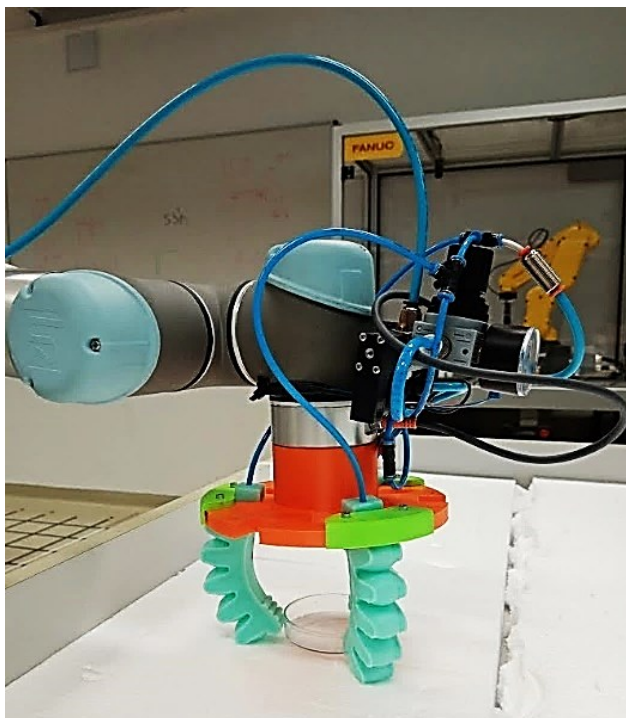
működés közbeni viselkedésekhez vezethet. Korábbi kísérleti tapasztalatok alapján elmondható, hogy egy kamrapáros 10-15 fokos szögbeli eltérést képes előidézni. Ezért az aktuátor kamraszámát ötben határoztuk meg.

Az aktuátorok elkészítéséhez az öntés módszerét választottuk. Ezzel a módszerrel érhető el a legnagyobb légzárási képesség, szemben a 3D nyomtatott eljárással, illetve az előre megtervezett alakzat minden paraméterével együtt jó közelítéssel elkészíthető. Az öntéshez két különböző szilikon anyagot használtunk: MoldMax 30, illetve MoldMax 40-et. Ezek Shore A30, illetve Shore A40 rugalmasságú platina katalizátoros szilikon öntőgumik, amelyekkel az ehhez hasonló kis darabszámú öntési feladatok könnyen elvégezhetőek akár vákuumozás nélkül is.

Az öntéshez szükséges formákat Autocad Inventor tervezőprogram segítségével terveztük meg és 3D nyomtatási technológiával állítottuk elő. A nyomtatáshoz egy Craftbot+ nyomtatót használtunk Hertz PLA töltettel, 0,2 mm rétegvastagsággal.

A megfogó kialakításánál a 3 vagy annál több ujjal rendelkező koncepció jöhetett számításba, ugyanis ezek a típusok képesek a palástfelülettel rendelkező tárgyakat a megfelelő módon megfogni (4. ábra).

4. ábra: Összeállított 3 ujjas soft-megfogó felszerelve egy UR-5-ös kollaboratív robotegységre



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

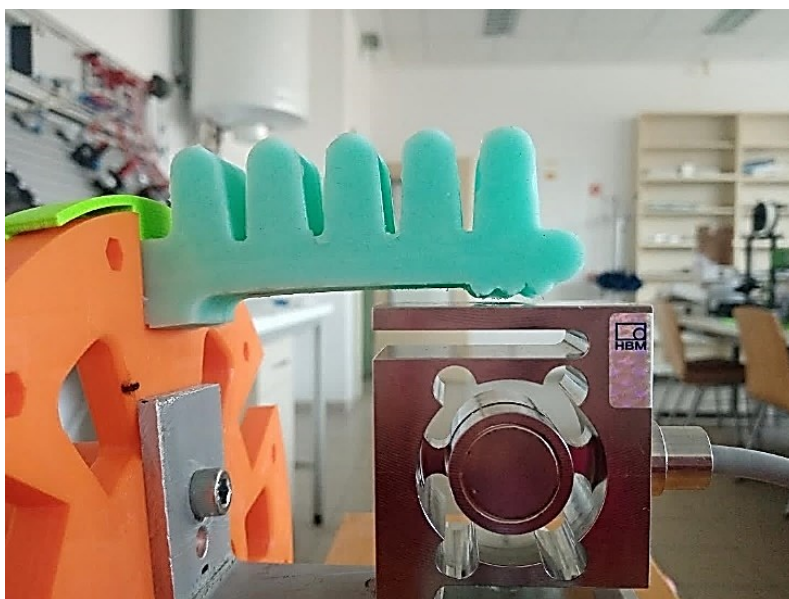
A kollaboratív tulajdonság miatt, a megfogó szilárd alapegysége nem rendelkezhetett éles sarkokkal, illetve bármely olyan kialakítással, amely mozgás közben az emberi épséget veszélyeztetné. Ennek érdekében egy alapjában kerek, sarkoktól mentes alapot választottunk az aktuátorok befogására. Az ujjak számát

3-ban határoztuk meg, ugyanis ezzel az ujjszámmal már úgy gondoltuk, hogy stabilan képesek leszünk a meghatározott átmérővel rendelkező Petri-csészéket megfogni. A megfogó alapját szintén egy Craftbot+ típusú 3D nyomtatóval állítottuk elő Hertz PLA anyagból 0,2 mm-es rétegvastagsággal.

5. Mérési eredmények és értékelésük

Annak érdekében, hogy megbizonyosodjunk arról, hogy a megfogó a tervezett módon képes lesz elvégezni a feladatot, különböző módokon és különböző eszközökkel vizsgáltuk azt. Első lépésként az aktuátorok dinamikus karakterisztikájának felvételét végeztük el. Az idő függvényében fellépő erőváltozást egy HBM S9 típusú húzó-nyomó cellával végeztük el, amely 0,5 kN maximális terhelhetőséggel, 0,02%-os pontossággal és 2 mV/V érzékenységgel rendelkezik. Az eszközt egy CLIPx jelerősítővel kötöttük össze. A mérések elvégzésénél már a legyártott megfogó alapba helyeztük az aktuátorokat a minél pontosabb eredmények érdekében (5. ábra).

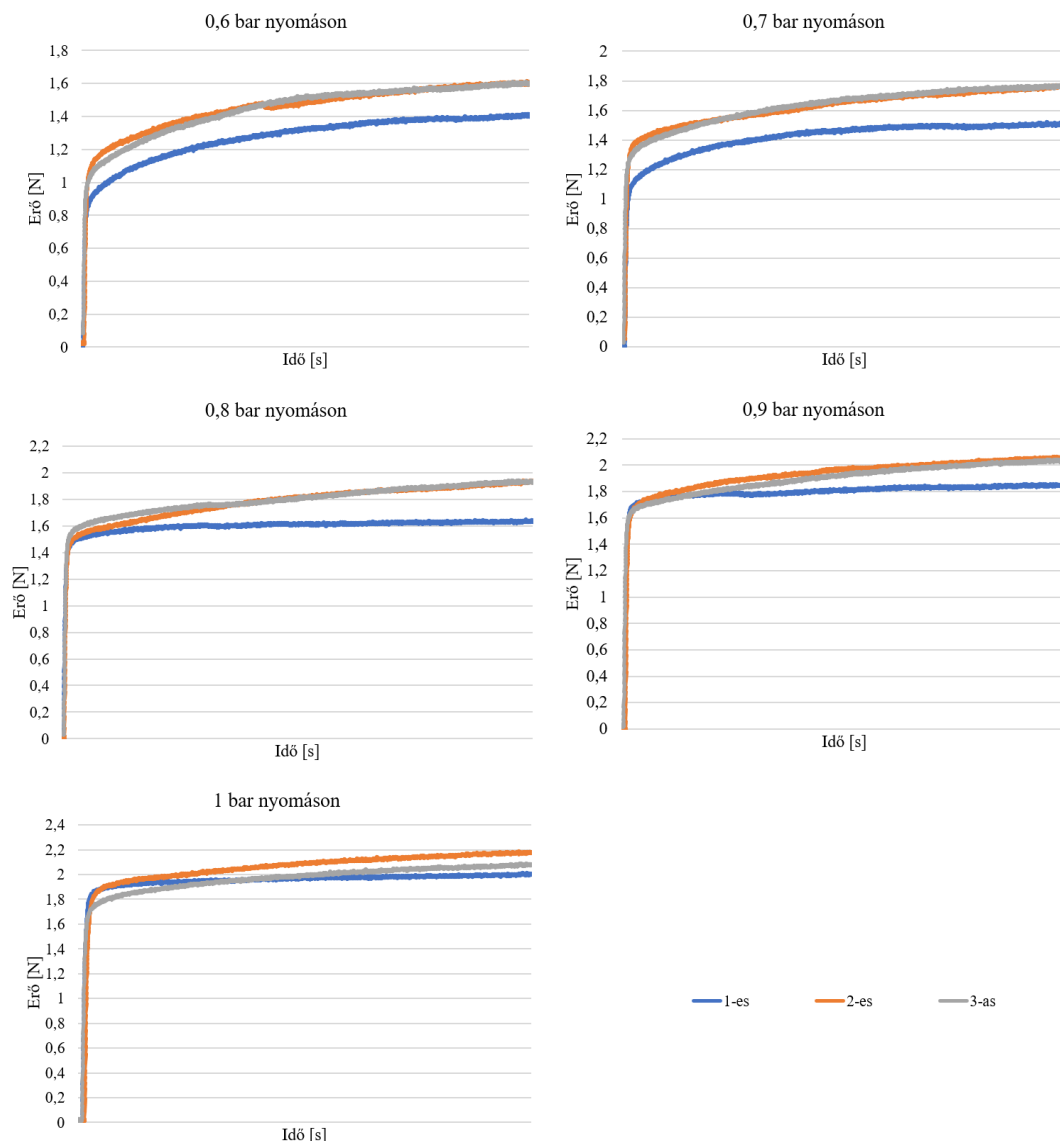
5. ábra: Mérésre előkészített soft-aktuátor



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

A kapott eredményekből látszik, hogy az aktuátorok a működtető nyomás hatására nem érik el végleges alakjukat és ezzel együtt a végleges erő kifejtésüket sem. Ez az elasztikus tulajdonságuknak köszönhető. Az ábrákból az is kivehető, hogy minél nagyobb a működtető nyomás, az aktuátor erő kifejtése annál rövidebb idő alatt éri el a maximumát. A tervezett 0,1 MPa-os vagyis 1 bar-os nyomáson a rákapcsolás pillanatától kezdve már az erő kifejtés állandónak tekinthető (6. ábra).

6. ábra: A megfogóban alkalmazni kívánt 3 db soft-aktuátor dinamikus karakterisztikája

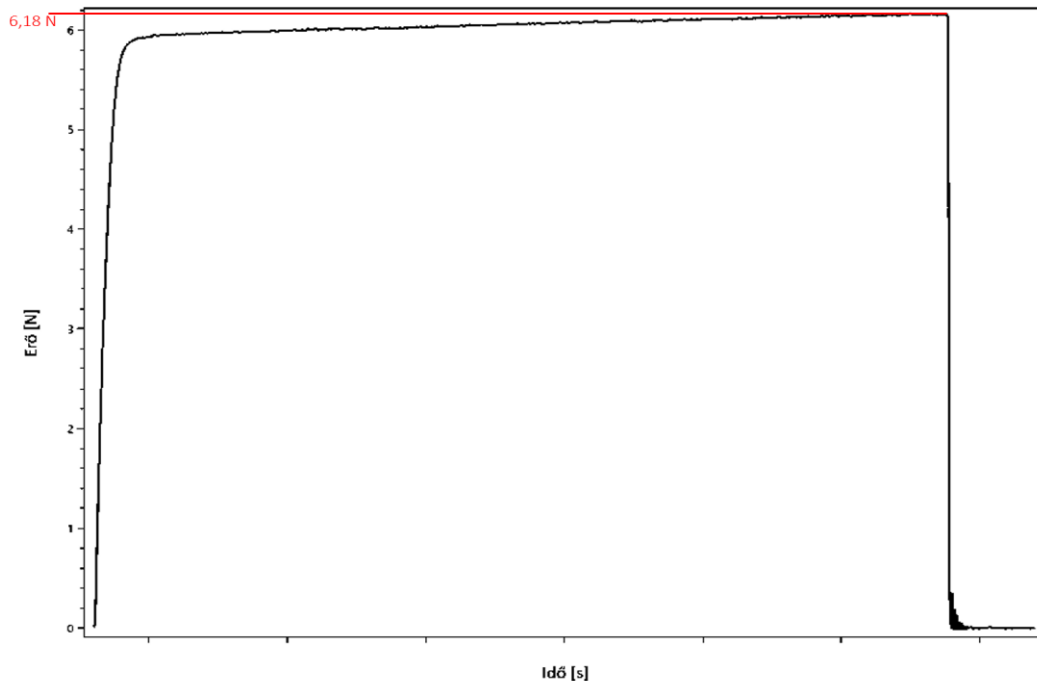


Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

A fentebb látható ábra alapján megállapítható, hogy annak ellenére, hogy a 3 aktuátor teljesen megegyező körülmények között készült el ugyanabból az anyagból, mégis működésbeli különbséget lehet tapasztalni megegyező bemeneti nyomásnál. A 3-as számú aktuátor kisebb nyomásokon rendre alulteljesített a többi társával szemben, míg az 1-es és 2-es számú közel azonos erőmaximumot és felfutást produkált. Azonban a bemeneti nyomás emelésnek hatására a különbségek csökkenni kezdtek, majd a tervezett 0,1 MPa-os nyomásnál minimumra csökkentek. Itt az aktuátorok már 2 N feletti erőt voltak képesek kifejteni. Ez az elkészült megfogó esetében az oldalirányú szorítóerő lesz.

Annak érdekében, hogy kijelenthessük, hogy az aktuátorok biztonságosan használhatók 0,1 MPa-os nyomáson, meg kellett vizsgálnunk, hogy egy aktuátor mekkora nyomást képes elviselni. Folytatva az előző lépéseket, a bemeneti nyomást 0,01 MPa-os értékkel folyamatosan növeltük egészen addig, amíg az aktuátor tökre nem ment. Ez az esemény a 0,2 MPa-os bemeneti nyomásnál történt meg (7. ábra).

7. ábra: Soft-aktuátor viselkedése 0,2 MPa-os bemeneti nyomás esetén



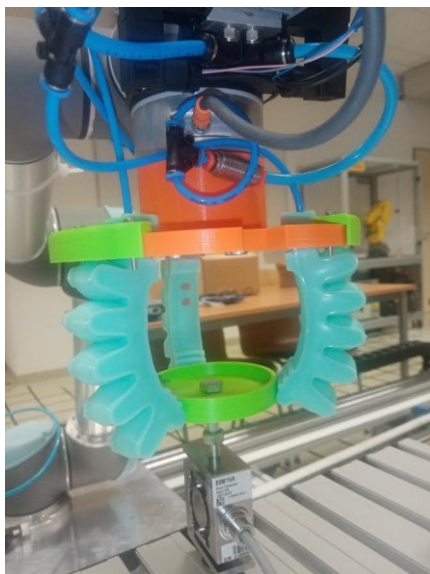
Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

Az ábrán jól kivehető az a pillanat, amikor az aktuátor tönkremegy, és az erő 0 N-ra esik vissza. Mivel ez az esemény az általunk választott bementi nyomás kétszeresénél történt meg, ezért kijelenthető, hogy a 0,1 MPa-os működtető nyomás biztonságosnak mondható a megfogó működése szempontjából.

A kapott eredmények alapján előrevetíthető volt, hogy az a megfogó, amely három soft-megfogót is tartalmaz képes lesz egy átlagos méretű és tömegű Petri-csésze mozgatására kollaboratív robot segítségével. Mivel ezek az eredmények, csak a csészék palástjára kifejtett erőt vázolják fel, ezért további mérésekre volt szükségünk ahhoz, hogy bizonyosságot nyerjen az eszköz használhatósága. A további méréseket már az összeállított megfogóval végeztük el.

Annak érdekében, hogy megtudjuk mekkora erőhatásokkal szemben képes megtartani a felvett tárgyat a megfogó újabb mérőrendszer állítottunk össze. Alapja egy 3D nyomtatott Petri-csésze modell, amely közepén furattal rendelkezik. Ennek köszönhetően rögzíthetővé válik az előzetesen már használt HBM S9 húzó-nyomó mérőcellához. Így mérhetővé válik az az erő, amely hatására a csésze kicsúszik a megfogó szorításából (8. ábra).

8. ábra: Az elkészült megfogóval és mérőcellával összeállított mérőrendszer a megfogó szorító erejének mérésére

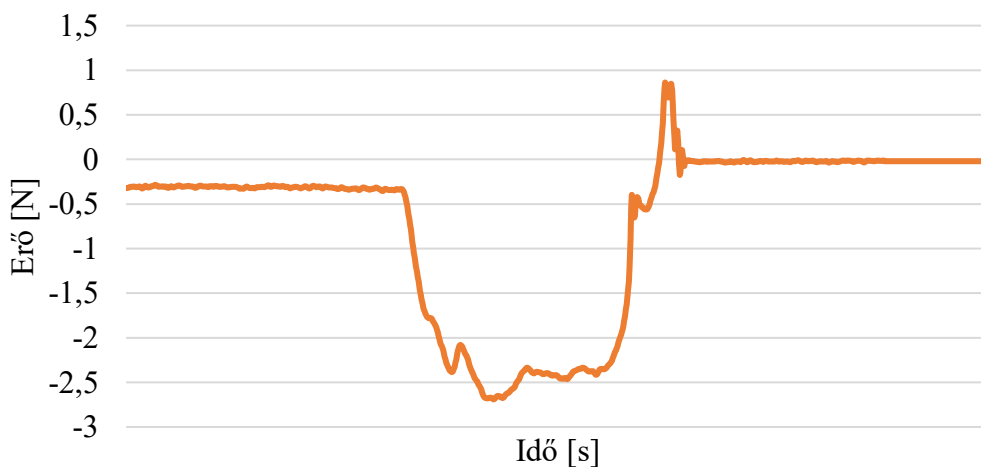


Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

A mérés elvégzéséhez az UR-5-ös robotkarra megírt program szolgáltatja azt az egyenletes z tengelyirányú mozgást, minek segítségével a tárgy emelését voltunk képesek szimulálni (9. ábra).

9. ábra: Dinamikus erőváltozások mérése az emelési fázis során

Összeállított megfogóval végzett húzóerő mérése



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

A mérést egy adott nyomáson négyszer is elvégeztük annak érdekében, hogy az eredmények átlagolásával minél pontosabb képet kapunk arról, hogy az adott

nyomáson mekkora erő szükséges a tárgy eltávolításához a megfogó ujjai közül. A mérés meneténél az aktuátoroknál már alkalmazott módszert használtuk, vagyis egy adott mérési sorozat lefuttatás után 0,01 MPa-os bemeneti nyomásnövelést hajtottunk végre egészen a kívánt 0,1 MPa-os értékig. A mérést mind a két átmérőjű csésze modellen végrehajtottuk, az eredményeket az 1. és 2. táblázat mutatja.

1. táblázat: 80 mm-es átmérőjű Petri-csésze húzásra kapott értékei

Mérés száma	0,05 MPa	0,06 MPa	0,07 MPa	0,08 MPa	0,09 MPa	0,1 MPa
1.	1,19 N	1,50 N	1,92 N	2,39 N	2,85 N	3,31 N
2.	1,15 N	1,46 N	1,94 N	2,55 N	2,42 N	2,05 N
3.	1,16 N	1,58 N	1,89 N	2,57 N	3,08 N	3,54 N
4.	1,54 N	1,57 N	1,99 N	2,54 N	2,67 N	3,69 N
ÁTLAG	1,26 N	1,53 N	1,94 N	2,51 N	2,76 N	3,15 N

Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

2. táblázat: 120 mm-es átmérőjű Petri-csésze húzásra kapott értékei

Mérés száma	0,05 MPa	0,06 MPa	0,07 MPa	0,08 MPa	0,09 MPa	0,1 MPa
1.	1,20 N	1,63 N	2,26 N	2,74 N	2,78 N	4,54 N
2.	1,42 N	1,72 N	2,06 N	2,70 N	3,32 N	4,70 N
3.	1,59 N	1,52 N	2,30 N	2,73 N	3,21 N	3,88 N
4.	1,46 N	1,67 N	2,20 N	2,87 N	3,30 N	3,93 N
ÁTLAG	1,42 N	1,64 N	2,21 N	2,76 N	3,15 N	4,26 N

Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerzők szerkesztése.

Az eredményekből látható, hogy a megfogó a folyamatosan növelt bemeneti nyomás hatására egyre nagyobb erővel volt képes szorítani a próba csészéket. A tervezett nyomáson, azaz 0,1 MPa-on a 80 mm átmérőnél 3 N feletti, míg a 120 mm átmérőnél 4 N feletti erő volt szükséges ahhoz, hogy elengedje a megfogott darabot. Figyelembe véve a nagyobb átmérővel rendelkező méretű Petri-csésze tömegét, ami megközelítőleg 0,15 kg, akkor láthatjuk, hogy a megfogó által kifejtett erő nagysága elegendő ahhoz, hogy ezt a tömeget biztonsággal tudja kezelni.

A mérési eredmények alapján ugyan kijelenthető a csészék biztonságos manipulációja, azonban az eszköz kollaboratívsága, vagyis emberrel való együttműködési lehetőségei ebben a formában korlátozottak. Az esetleges emberrel való érintkezés tényét csak az UR-5-ös robotkar képes érzékelni és ha kell beavatkozni. A megfogó úgy lett tervezve és kivitelezve, hogy az esetleges

kontaktok során a kialakításból ne keletkezessen sérülés, azonban az ütközéseket detektálni nem tudja. Szenzorok segítségével ennek a lehetőségét is meg lehetne állítani a még biztonságosabb szintű üzem érdekében. Ilyen célú fejlesztésekre az úgynevezett IMU szenzorok (Inertial Measurement Unit) alkalmasak lehetnek. Ugyanis az IMU érzékelő egy olyan elektronikus eszköz, amelyet a test pontos erejének, a szögsebességnek, valamint a test irányának kiszámítására és jelentésére használnak, amelyet 3 szenzor, például giroszkóp, magnetométer és gyorsulásmérő keverékével lehet elérni. Ilyen eszközök alkalmazása a megfogó alapján, vagy esetleg külön-külön a megfogó szegmensein nagy mértékben hozzájárulna ahhoz, hogy az esetleges operátorral való érintkezést minél hamarabb észlelje a rendszer és időben be tudjon avatkozni.

6. Összegzés

A kollaboratív robottechnológia egyre nagyobb mértékű térhódítása miatt szükségessé váltak az olyan eszközök, amelyek biztosítani tudják ezeknek a robotoknak a biztonságos működését. Az egyik ilyen sarkalatos pont a robotokra helyezett megfogók kérdésköre. A hagyományos kialakítású megfogók sok esetben alkalmatlanok arra, hogy a velük szerelt egység kollaboratív munkát tudjunk végezni az éles sarkok és a kiálló részegységek miatt. Erre a problémára lehet megoldás a soft-aktuátorokkal szerelt megfogók.

A tanulmányban bemutatott megfogó Petri-csészék megfogására lett megtervezve és kivitelezve. A mérések bebizonyították, hogy a megfogót alkotó aktuátorok a tervezett nyomás hatására képesek megközelítőleg ugyanakkora erőkifejtésre külön-külön is, így biztosítva a megfogó pontos működését. A három aktuátorral felszerelt megfogó képes biztonsággal megfogni és kollaboratív sebességek mellett elmozgatni különböző méretű Petri-csészéket. A soft-aktuátorok ilyen feladatokban történő alkalmazása nagyban elősegítheti az ember-robot együttműködések javítását, ugyanis ezekkel az eszközökkel szerelt megfogók képesek a rájuk bízott feladat pontos elvégzésére amellet, hogy működésük közben az emberi egészségre semmilyen veszélyt nem jelentkeznek a kialakításukkal.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetemet kifejezni a Nemzeti Tehetségprogramnak, hogy a Nemzet Fiatal Tehetségeiért Ösztöndíj NTP-NFTÖ-22-B0196 pályázattal támogatták a munkám.

Irodalomjegyzék

- Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J. (2010): Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (44): 18809–18814. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003250107>
- Controzzi, M., Cipriani, C., Carrozza, M.C. (2014): Design of Artificial Hands: A Review. In: Balasubramanian, R., Santos, V. (szerk.): *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol 95. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03017-3_11

- Deimel, R, Brock, O. (2016): A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *The International Journal of Robotics Research*, 35 (1-3): 161–185. <https://doi.org/10.1177/0278364915592961>
- Gorissen, B., Reynaerts, D., Konishi, S., Yoshida, K., Kim, J.-W., De Volder, M. (2017): Elastic Inflatable Actuators for Soft Robotic Applications. *Advanced Materials*, 29 (43): 1604977. <https://doi.org/10.1002/adma.201604977>
- Ilievski, F., Mazzeo, A. D., Shepherd, R. F., Chen, X., Whitesides, G. M. (2011): Soft robotics for chemists. *Angewandte Chemie*, 50 (8): 1890–1895. <https://doi.org/10.1002/anie.201006464>
- Melchiorri, C., Kaneko, M. (2008). Robot Hands. In: Siciliano, B., Khatib, O. (szerk.): *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg. 345–360. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_16
- Polygerinos, P., Correll, N., Morin, S. A., Mosadegh, B., Onal, C. D., Petersen, K., Cianchetti, M., Tolley, M. T., Shepherd, R. F. (2017): Soft Robotics: Review of Fluid-Driven Intrinsically Soft Devices; Manufacturing, Sensing, Control, and Applications in Human-Robot Interaction. *Adv. Eng. Mater.*, 19 (12): 1700016. <https://doi.org/10.1002/adem.201700016>
- Rus, D., Tolley, M. T. (2015): Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521: 467–475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D., Shea, H. (2018): Soft Robotic Grippers. *Advanced Materials*, 30 (29): 1707035. <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- Suzumori, K., Iikura, S., Tanaka, H. (1992): Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms. *Control Systems. IEEE*, 12: 21–27. <https://doi.org/10.1109/37.120448>