

# RENDEZETLEN ALKATRÉSZEK ÉRZÉKELÉSE AUTOMATIZÁLT RAKODÁSHOZ

Sebestyén László Ádám<sup>a</sup>, Magyar Gábor<sup>b</sup>, Andó Mátyás<sup>c\*</sup>, Magyar Gergely<sup>d</sup>

<sup>a</sup> BPW-Hungária Kft., Technológiai fejlesztő mérnök

<sup>b</sup> BPW-Hungária Kft., Gyártásautomatizálási csoportvezető

<sup>c</sup> ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

<sup>d</sup> ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérnöki BSc, 4. évf.

## ABSZTRAKT

Egy olyan automatizált rakodócella elemei kerülnek bemutatásra, amely elengedhetetlen az ömlesztett anyagok kipakolásához. Kiemelten foglalkoztunk a szkennelő állvány rezgésével, hogy a pontfelhő minősége megfelelő legyen. Végeselemes módszer segítségével sikerült az állványt megfelelő merevségűre átalakítani. A kezdeti kipakolási tesztek során a robot (KUKA KR120 R2700) többször is ütközött, ennek a hibának a kiküszöbölését szisztematikus tesztekkel igazoltuk. A rendszer optimalizálása érdekében a Wenglor MLSL 255 típusú lézerszkennő mozgásának a sebességét 20%-kal növeltük, ami miatt a pontfelhőben az adatpontok távolsága 2,1 mm-ről 2,4 mm-re nőtt. A rendszer használata igazolta, hogy a főbb módosításokkal a cella üzeme folytonossá és megbízhatóvá tehető továbbá a termelékenység is fokozható.

**Kulcsszavak:** *bin-picking, lézerszkennő, robot, automatizálás*

## 1. Bevezetés

A 21. században rengeteg új robot és szoftver támogatja a gyártást. Ezek a robotok segíthetnek, esetleg kiválthatják az embereket a nehéz, monoton és esetenként veszélyes munkakörökben. Így az emberek a felszabadult kapacitásukkal más problémákra fókuszálhatnak. Az automatizált rendszerező rendszerekkel (bin-picking) számos kutató foglalkozik a képfeldolgozás, a robotmozgás és az eszközzrendszer kihívásai miatt.

Egy tipikus, automatizált rendszerező rendszer magában foglalja a célobjektum észlelését, a pozíciójának meghatározását és a robotos manipulációt [1, 2]. A detektálási problémákat az anyag minősége, az alkalmazott képalkotó eszköz típus ismert hiányosságai és a nem megfelelő fényviszonyok is okozzák. A robotkaron elhelyezett érzékelők lehetnek lézerprojektoros [2], vagy kamerarendszeres megoldásúak [3]. A 2D látás egyetlen kamerát használ és az utóbbi években jelentős fejlettségi szintet ért el a gyártás és a termékellenőrzése során [4]. Általában véve a 2D-s adathalmazok kezelése egy kétdimenziós adatmátrixban elrendezve egyszerű, hiszen a helyzetre és az irányultságra vonatkozó információk a mátrixból való kinyeréséhez számos eszköz áll rendelkezésre [5]. A 3D-s rendszereknél (például legalább két kamera használata esetén) az adatok feldolgozása összetettebb. Az adatkészlet, az úgynevezett háromdimenziós pontfelhő, melynek elkészítéséhez szükség van az objektum szegmentálására a munkatérből, továbbá a pozíció becslésére és egy sablon illesztésére például egy 3D CAD modellhez viszonyítva [2, 6].

A lézerszkennerek működése trigonometrikus háromszögelésen alapulnak, ezért nem érzékenyek a rossz megvilágítási körülményekre [7]. A pontfelhők illesztésére és transzformálására alkalmas algo-



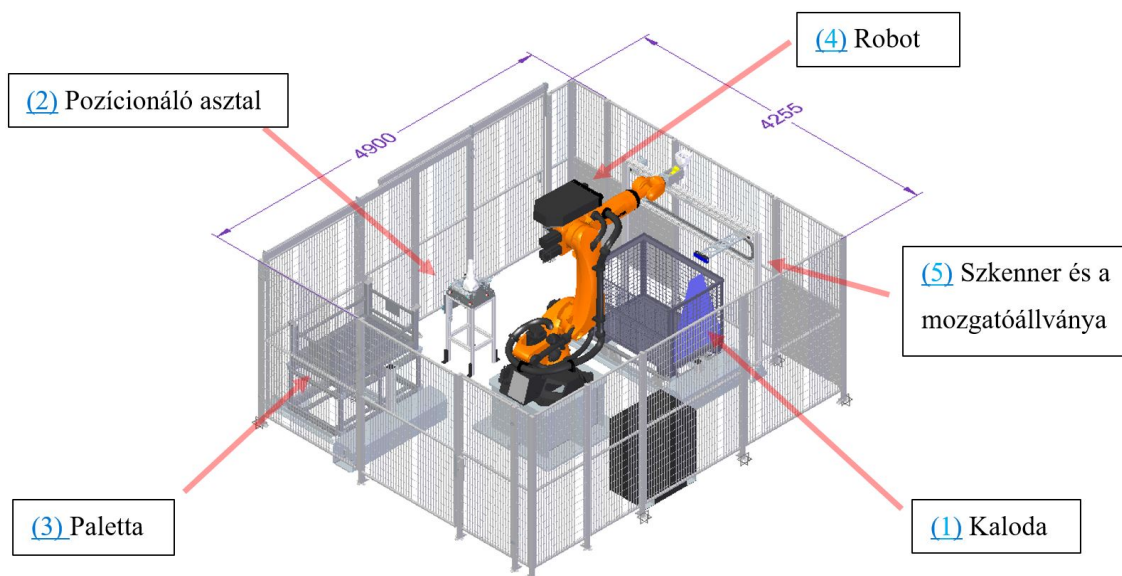
1. ábra: Rendezetlen egységakomány palettázása

ritmusok lehetőségeit számos kutató vizsgálta már. 1992-ben kifejlesztették az iteratív legközelebbi pont (ICP: Iterative Closest Point) algoritmust, mely a szabad formájú felület regisztrálásán alapul [8], majd ennek a korlátait vizsgálták a későbbiekben [6, 9]. Ennek hatására több kutatás kitér az ICP algoritmus által illesztett pontfelhők korlátosságára, és egyéb algoritmusokkal, például PCA: Principal Component Analysis (főkomponens analízis) algoritmussal egészítik ki az ICP-t [2, 10]. A kísérleti eredmények alapján a PCA-ICP algoritmust javasolható, mivel az algoritmus iterációs ideje rövidebb, mint a klasszikus ICP algoritmus számítási ideje [10].

A nagyobb súlyú alkatrészek esetén a munkavédelem is korlátozza a kipakolás lehetőségeit, hiszen egy dolgozó nem képes 8 órán keresztül nagyobb alkatrészeket rakodni úgy, hogy személyi sérülés és megbetegedés ne következzen be hosszabb távon sem. Ezért a cikkben ilyen alkatrészek felismerésével és kipakolásával fogunk foglalkozni, ahol a felmerülő problémák megoldását bemutatjuk (1. ábra).

## 2. Automatizált rakodócella

Az automatizált cellában (2. ábra) egy 6 tengelyes KUKA KR120 R2700 típusú robot dolgozik, mely 120 kg teherbírással és 2701 mm karkinyúlással rendelkezik. Az egységakományból (kalodából) (1) a robot az alkatrészeket a pozícionáló asztalra teszi (2), mely a tengelycsonkok megfelelő orientáci-



2. ábra: Automatizált rakodó cella elrendezése

ójába való elfordítását végzi el a hossz tengely mentén. Innen ugyanaz a robot teszi át a darabokat rendezetten a palettára (3). Ha a paletta megtelik, akkor az elhagyja a cellát egy dolgozó segítségével és átkerül a megmunkáló sorra, ahol egy másik robot felel a CNC megmunkálógépbe történő berakodásért.

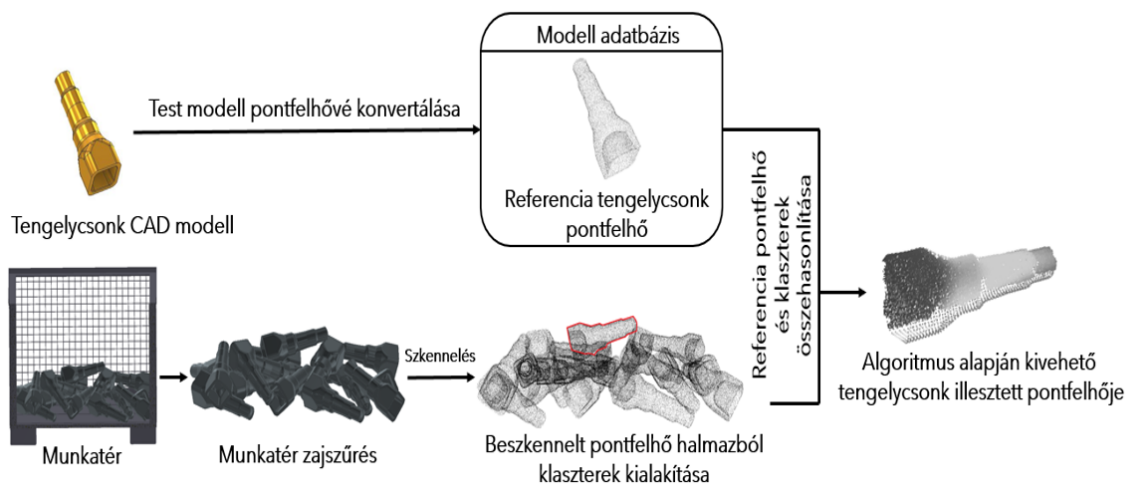
A képközpontúhoz egy Wenglor MSL 255 típusú profilszenzort (lézerszkener) használtunk, mely kék fényű, 3R-es biztonsági osztályú lézert fényt bocsát ki. A profilszenzor csak 2 dimenzióban képes pontokat felvenni, ezért szkennelés során mozgatni kell a szenzort.

A cella további fő alkotóeleme a szoftver. A szoftverbe importáljuk a pakolni kívánt tengelycsont CAD modelljének pontfelhőjét. A profilszenzor a pásztázás során elküldi a mért adatokat és a szoftver szeletenként összeilleszti 3 dimenziós felvétellé a mérést. Ezután zajszűrés következik, amivel a nemkívánt pontok kerülnek eltávolításra, így csökkentve a számítási időt. Klaszterezés (a pontok egy-egy csoportba foglalása úgy, hogy adott pont csak egy csoporthoz (alkatrészhez) tartozhat) után a szoftver összeilleszti a referencia modellt a klaszterekkel PCA-IPC algoritmus alapján (3. ábra).

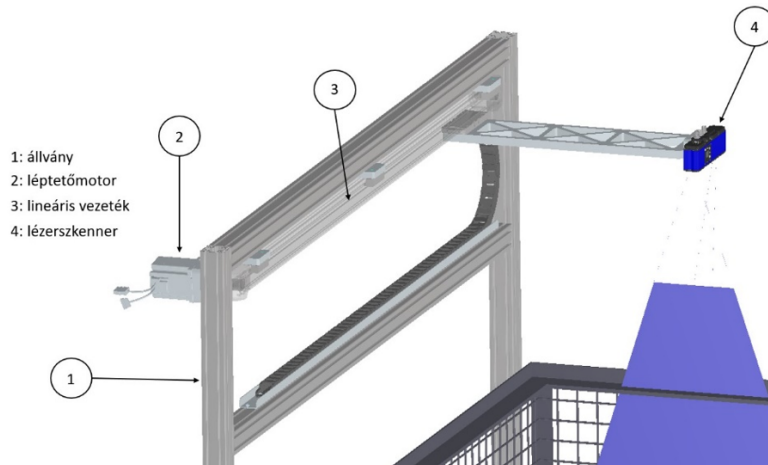
Az előzetes tesztek során a cella működésében két problémakört azonosítottunk: a szkennelés minőségét és az ütközések elkerülését. A továbbiakban ennek a két problémának, valamint a mozgások szinkronizálásának megoldását mutatjuk be.

### 2.1. Profilszkener mozgató állványának felülvizsgálata

A profilszenzort mozgató állvány alapját extrudált alumínium profilok adják és egy lineáris vezetőken keresztül biztosítja a szkener (4) mozgását vízszintes irányban egy léptetőmotor (4. ábra). Az előzetes vizsgálatok alapján megállapítható volt, hogy a működés során rezgések alakulnak ki, melyek hátrányosan befolyásolják a rendszer működését, vagyis a pontfelhő pontosságát. A rezgések kialakulásának fő oka az állvány instabilitása volt, ezért elemeztük a megfelelő kialakítást végelem módszerrel, Ansys Mechanical szoftverrel. A szimuláció során rúdmodellként vizsgáltam a rendszert, mert a merev végpontú rúdelemek nyomató és nyíró igénybevételek viselésére is alkalmasak, illetve a modellezett alumínium profilok keresztmetszete állandó és a hosszukhoz képest elhanyagolható nagyságú. Ezeket használhatjuk síkbeli vagy térbeli szerkezetek modellezéséhez és a számítási időt az elvárt pontosság szignifikáns romlása nélkül lehet csökkenteni egy háromdimenziós modell számítási idejéhez képest. A rúdelemekenél a tengelyirányú és a tengelyre merőleges igénybevételek egymástól függetlenül is vizsgálhatóak. A tartókonzolt egy felületelemmel közelítem, így később a tömegét könnyedén tudom optimalizálni a valós tömeghez viszonyítva. A vizsgálatomban a háromdimenziós felületmodellt azért használhatom, mert a modellezett szerkezet vastagsága sokkal kisebb, mint a



3. ábra: Pontfelhők illesztésének módszere

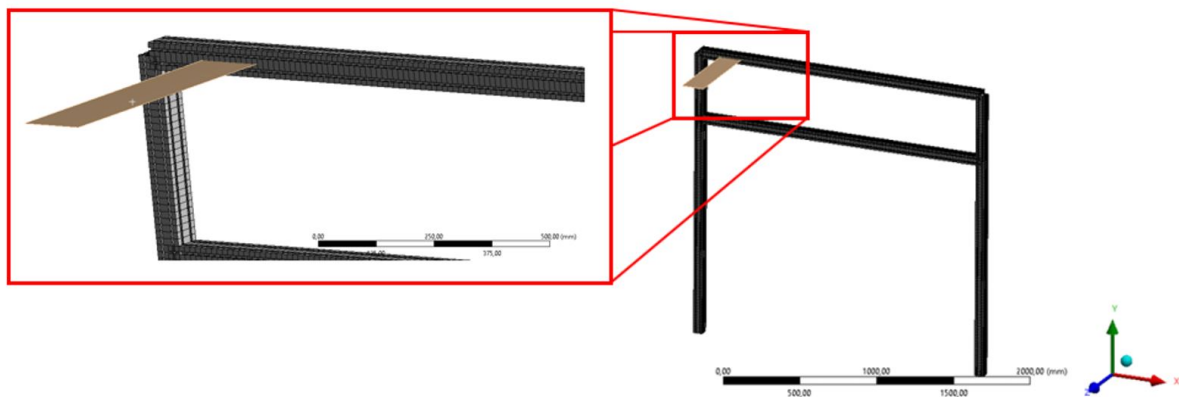


4. ábra: Szkenner tartó állvány elemei

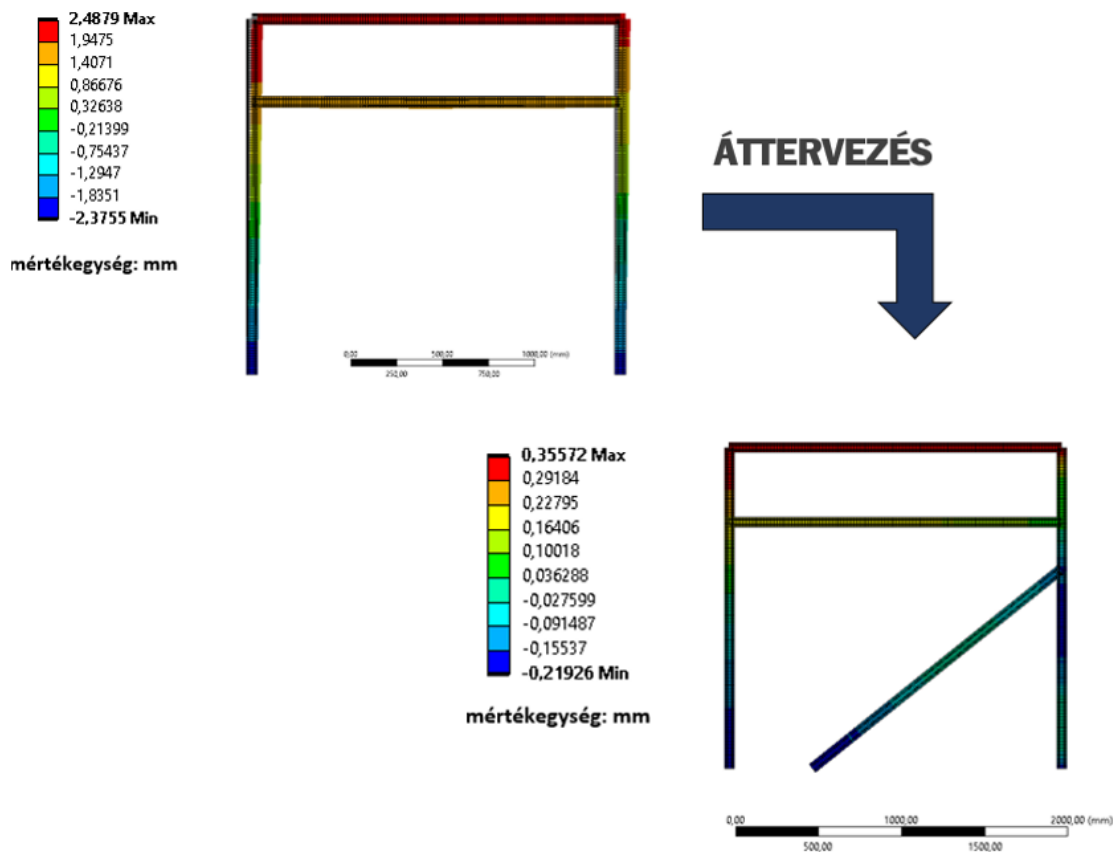
más irányú kiterjedése, illetve csak olyan igénybevétel keletkezik, ahol a vastagság irányában nincs olyan deformáció, amely befolyásolná a szerkezet viselkedését. A felületelem optimális vastagságának és sűrűségének beállításával megkaptam a valóságban is jelenlévő konzol tömegét, ami 2,47 kg a CAD szoftverből lekért adatok alapján a felhasznált  $2700 \text{ kg/m}^3$  sűrűséggel. A folytonos tömegeloszlású felületmodell azért használható a vizsgálatom során, mert a végén elhelyezkedő szkennér tömegével ellentétesen a konzol másik oldalán is elhelyezkedik a mozgató kocsi és a konzolt összefogó alkatrész, illetve a léptetőmotor. Így a tömegközéppontja a konzolnak és a kamerának megegyezik a konzol tömegközéppontjával. A felületelemet később merevként definiálom.

Mivel a szkennertartó állvány nem szenved maradandó alakváltozást, így az visszanyeri kezdeti formáját és pozícióját, ezért lineárisan rugalmas anyagmodellt alkalmaztunk. Ehhez két paraméter szükséges a rugalmassági-modulus, amelynek 70 GPa értéket, valamint a Poisson-tényező, amelynek 0,334-es értéket vettem fel. Kinematikai peremfeltételnek az állvány rögzítését a talajhoz képest befogás típusú kényszerként definiáltam. Ez a befogás kényszer megakadályozza a tér minden irányába az elmozdulást és a szögelfordulást. A vizsgálat során 1 m/s értékű kezdősebességet határoztunk meg a mozgó szkennernek, mely lassítás nélkül hirtelen (0,1 másodperc alatt) áll meg állandó lassulással.

Ez a jelenlegi rendszerben több, mint kétszeres biztonsági tényezőt jelent (jelenleg közel 0,4 m/s mozog), de később ezen tartalék fedezheti az igényt a gyorsabb szkennelési időre is. A hálózás során



5. ábra: Végeselemes háló



**6. ábra:** Szkenner tartó állvány áttervezése végelem módszer segítségével, az eredmény elmozdulás formájában látható

az átlagos elemméret 15 mm volt. A hálózás során lineáris közelítést alkalmaztam. Több tesztet is elvégeztem kisebb méretű átlagos elemmérettel, illetve másodfokú megközelítést alkalmazva, azonban pontosabb eredményt nagyságrendileg nem szolgáltatott számomra. Így a gyorsabb matematikai modell megoldása érdekében a későbbiekben nem használtam a számításigényes beállításokat. A háló 1 049 elemből és 525 csomópontból áll, hála az egyszerűsített állvány geometriának és a merev testként funkcionáló felületelemnek. Az elkészült háló az 5. ábrán látható.

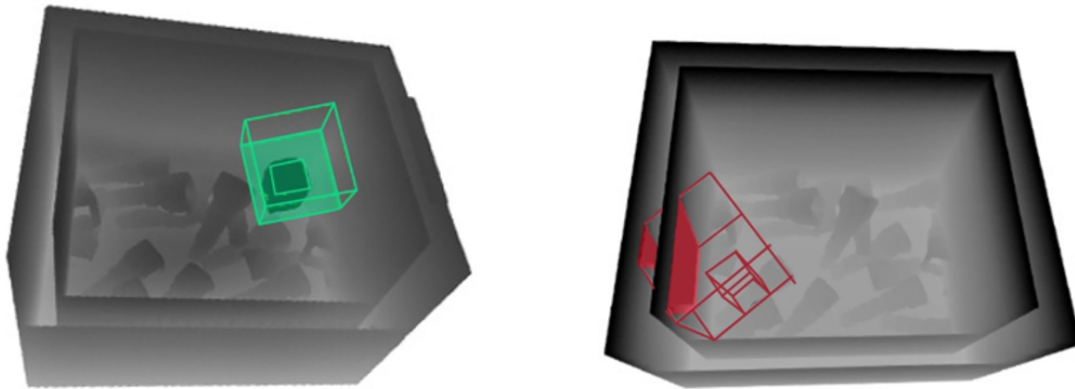
A vizsgálatok 2,48 mm-es maximális amplitúdójú rezgést mutattak, ami bár jelentéktelen lehet a szkenner tartó állvány méreteihez képest, de a képfelvétel minőségét jelentősen befolyásolhatja. Az állvány átalakítására a rezgések csökkenése érdekében szükség volt, hogy a már kiépített rendszert ne kelljen emiatt drasztikusan megbontani. A numerikus vizsgálatok azt mutatták, hogy egy hozzáadott megtámasztás kialakításával a maximális amplitúdó 0,35 mm-re csökkenthető (6. ábra). Ez a kilengés a szkennelés jóságát már nem befolyásolja jelentősen.

## 2.2. Ütközésfigyelés

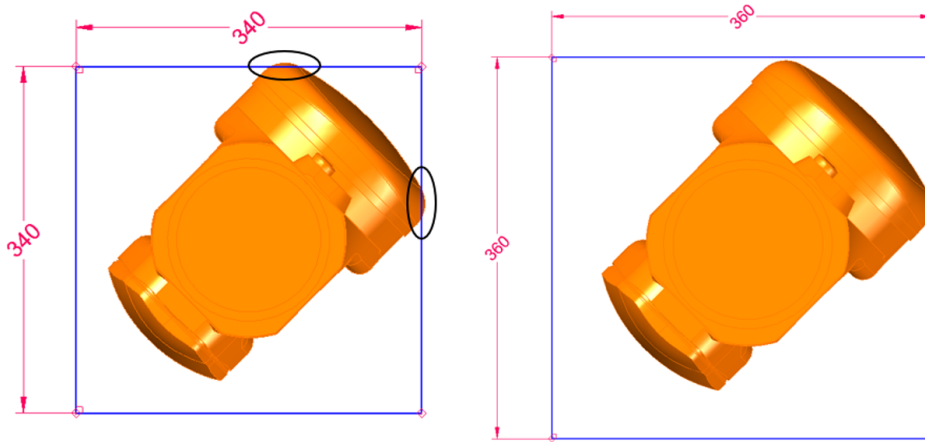
A tesztek során a robot megfogó szerkezete számos alkalommal nekiütközött a kalodának. Az ütközésfigyelést szoftveresen oldottuk meg, virtuális védőmezővel jellemeztük a robot csuklókat, a kalodát, illetve a megfogót is. A 7. ábra bal oldalán látható egy olyan állapot, amikor kivehető darabot talált a szoftver, a jobb oldalán pedig egy ütközés miatt nem kivehető darabot definiált.

A felülvizsgálat során megállapítottuk, hogy bizonyos helyzetben a robotcsukló köré meghatározott virtuális védőmező (340x340x340 mm-es kocka) terjedelme nem elegendő (8. ábra). CAD rendszer segítségével meghatároztuk, hogy mekkora kocka szükséges a megfelelő védelemhez, így 360x360x360 mm-re növeltük a virtuális védőmező méretét.



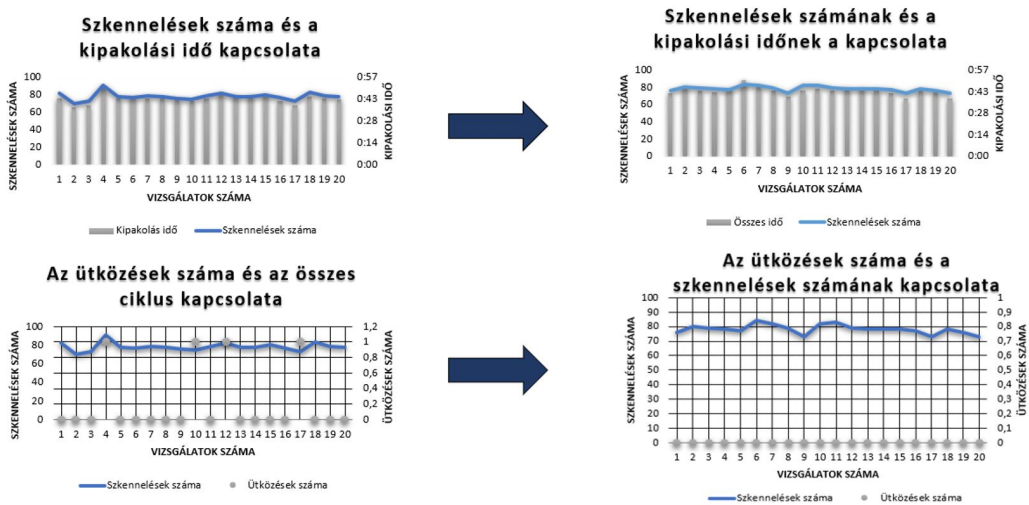


7. ábra: Ütközésfigyelés szoftveres környezetben



8. ábra: Ütközésetektálás felülvizsgálatának bemutatása

Ugyanakkor, ha a virtuális kocka méretét növeljük, akkor nagyobb az esély arra, hogy ütközést fog detektálni a szoftver olyan esetben is, amikor nincsen valós ütközés, ami kihat a kipakolási hatékonyságára is. Ezért 20 db kirakodási tesztet végeztünk el, minden tesztben 50 db tengelycsont kipakolással (összesen 1 000 kipakolás). A 9. ábra bemutatja a főbb működési jellemzőket változtatás előtt és után.



9. ábra: Az ütközések és a szkennelések száma 5% virtuális térfogat növekedés mellett

**1. táblázat:** Szkenelési paraméterek jelenlegi és a kiegyenlített ciklusidők esetében

	Szkenelési idő [s]	Szkenelési sebesség [m/s]	Szkenelt pontok száma [db]	Pontfelvételek távolsága [mm]
Kiindulás	10,2	0,3778	~950 000	2,1
20%-kal növelt	8,4	0,4587	~780 000	2,4

### 2.3. Szkenner és robot mozgásának szinkronizálása

A 100%-os sebességgel üzemelő robot esetén a szkenelési idő több, mint a robot kipakolásának ideje. Így előfordul, hogy a robot arra vár, hogy a szkenelés befejeződjön. A ciklusidők alapján meghatároztuk a szükséges új szkenelési sebességet, mely megközelítőleg 20%-os sebesség növekedést igényel. Ennek a sebességnövekedésnek a hatását az 1. táblázat foglalja össze a szkenelésre nézve.

A szkenelési sebesség növelésével a képfelvételezési számok csökkennek, ezáltal kevesebb pontot fogunk kapni a kaloda tartalmáról. A felvételek pontjai közötti Y irányú (4. ábra) távolság 2,1 mm-ről 2,4 mm-re növekedik. Ez azt jelenti, hogy a program kevesebb pontból tudja meghatározni a szükséges pontfelhőillesztéseket, ezáltal pontatlanság léphet fel.

A változtatások óta nagyságrendileg 6 000 darab alkatrész pakolt ki a rendszer (6-szor annyit, mint ütközésetektálásra vonatkozó vizsgálatok voltak). A szkenelés és a robotmozgás szinkronizálása esetén is az állvány megtámasztása megfelelő, rezgésekből eredő káros hatást nem tapasztaltunk. Kijelenthető, hogy az állvány merevítése, az ütközésfigyelés és a szinkronizálás megfelelő a cella hosszú távú működtetéséhez.

## 3. Összefoglalás

Az automatizált rendszerezési feladat egy összetett műszaki kérdés, az optimális megoldáshoz számtalan peremfeltételt kell figyelembe venni. Ezt a rendszert több fajta tengelycsonk kipakolásához fejlesztettük, melynek központi eleme a 6 tengelyes KUKA KR120 R2700 típusú robot és Wenglor MLSL 255 típusú profilszenzor volt. A rendszer beüzemelése és tesztelése során számtalan problémát tapasztaltunk. Az egyszerűbb hibák kiküszöbölése után két problémakörre fókuszáltunk. Az egyik a szkenelési időt befolyásoló tényezők, a másik pedig az ütközések. Az ütközéseket kapcsán megállapítottuk, hogy egy adott szöghelyzetben a robotcsukló kifordul a korábban beállított virtuális védőmezőből. Ezért a védőmező méretét megváltoztattuk. A változtatás hatását tesztelve megállapítottuk, hogy ütközések továbbiakban nem következnek be és a kipakolási idő sem növekedett.

A szkenelési idő szinkronizálása a robot mozgásával kulcskérdés a rendszer hatékonyságára nézve, ezért a szkenelési sebességet 0,4587 m/s-ra növeltük melynél az adatpontok távolsága 2,4 mm lett. Megállapítottuk, hogy a rezgések miatt korábban megerősített állvány, továbbra is megfelelő és a ritkább szkenelési pontok sem okoznak problémát a számítógépes feldolgozásban. A cikkben ismertetett fontosabb változtatásokon túl a cellát finomhangoltuk. Ettől kezdve, a kipakolt 6 000 darab alkatrész esetén semmilyen problémát nem tapasztaltunk, így igazoltnak látjuk a felvetett problémák megoldását.

## 4. Irodalomjegyzék

- [1] P. Bellandi, F. Docchio, G. Sansoni, *Roboscan: a combined 2D and 3D vision system for improved speed and flexibility in pick-and-place operation*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 69, 2013, pp. 1873-1886, [CrossRef](#)
- [2] D. Buchholz, M. Futterlieb, S. Winkelbach, F.M. Wahl, *Efficient bin-picking and grasp planning based on depth data*, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation,

- Karlsruhe, Germany, 2013, pp. 3245-3250, [CrossRef](#)
- [3] W.C. Chang, C.H. Wu, *Eye-in-hand vision-based robotic bin-picking with active laser projection*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 85, 2015, pp. 2873–2885, [CrossRef](#)
- [4] D. Kragic, M. Björkman, H.I. Christensen, J.O. Eklundh, *Vision for robotic object manipulation in domestic settings*, Robotics and Autonomous Systems 52(1), 2005, pp. 85–100, [CrossRef](#)
- [5] J.R. Parker, *Algorithms for image processing and computer vision*, John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [6] G. Biegelbauer, M. Vincze, W. Wohlkinger, *Model-based 3D object detection*, Machine Vision and Applications 21(4), 2008, pp. 497–516, [CrossRef](#)
- [7] K. Li, J. Wang, D. Qi, *The development and application of an original 3D laser scanning: a precise and nondestructive structural measurements system*, Frattura ed Integrità Strutturale 14(51), 2019, pp. 386-397, [CrossRef](#)
- [8] P.J. Besl, N.D. McKay, *A method for registration of 3-D shapes*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(2), 1992, pp. 239-256, [CrossRef](#)
- [9] W.C. Chang, C.H. Wu, *Candidate-based matching of 3-D point clouds with axially switching pose estimation*, The Visual Computer 36, 2020, pp. 593–607, [CrossRef](#)
- [10] S.J. He, S.T. Zhao, F. Bai, J. Wei, *A Method for Spatial Data Registration Based on PCA-ICP Algorithm*, Advanced Materials Research 718-720, 2013, pp. 1033–1036, [CrossRef](#)