

IPARI ROBOT ÉS MANIPULÁTOROK KUTATÁSA ÉS ALKALMAZÁS JÁRMŰ-ÉS AUTÓIPARI MÉRNÖKI TERÜLETEKEN, ÁTTEKINTÉS

RESEARCH AND APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS AND MANIPULATORS AT CAR- AND VEHICLE ENGINEERING, A REVIEW

Hazim Nasir Ghafil¹ Dr. Jármái Károly²

ABSTRACT

The application of industrial robots and manipulators at car- and vehicle industry is more and more popular. This meets the requirements due to cost reduction, precision work and rapid manufacturing. This paper shows the application of robots in welding, cutting, grinding, painting, etc. This operation requires skilled workforce and is time-consuming. Using robots, one can increase productivity and quality in this area. This work will explore the use of robot manipulators and their various applications in the automotive and vehicle industries, as well as the relationship between applications and optimized robot manipulators, and robotic statistics around the world.

Keywords: Robotics, Optimization, Robot Application, Industrial Robots

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a robotok nagy szerepet játszanak az emberi élet minden területén [1,2,3], mert az igény az alacsony költségű, magas színvonalú és gyorsan előállított termékek iránt egyre növekszik. Ez a munkavállalók számára is új helyzetet teremt, mivel ezek a robotok különösen előnyösek lehetnek, veszélyes munkakörnyezetekben, vagy nehéz környezeti feltételek mellett [4,5,6]. A járműipar és az egyéb gépjárműgyártás olyan területek, melyek a fent említett okok miatt egyre inkább robotizálnak. Axiomatikusan a robotok specifikációja függ az alkalmazástól, amely különböző feladat esetén különböző, mint például az összeszerelő robotok [7,8], amelyek nehéz alkatrészeket vagy PCB manipulátorokat mozgatnak, amelyeknek dinamikus terhelésük van. Természetesen mindkét példa pontos mozgást igényel. Az ipari robotok sok típusa létezik, és a cél és a kívánt feladatok szerint használják őket [9,10]. A leggyakrabban használt robotok a soros kialakítású robot manipulátorok, amelyeknél az egyes

merev test elemek, úgynevezett csuklókkal vannak összekötve [11], lásd az 1. ábrát.

A járműipar gyártási sorainál gazdaságilag nem kívánatos, hogy minden robot manipulátor ugyanolyan kialakítású legyen, mivel a robotok csuklói különböző terheléseknek vannak kitéve. Nyilvánvaló, hogy a robot manipulátor az összeszerelési sorban más kialakítású, mint a festési vagy hegesztési sorokon. Ezért szükséges a manipulátorok és a csuklók optimális kialakítása [12,13]. Egy másik tény is figyelembe kell venni az autógyártás robot manipulátorainak használatával kapcsolatban, nevezetesen azt, hogy a manipulátorok munkaterülete vagy konfigurációs területe statikus vagy dinamikus akadályokat tartalmazhat, ami a robotoknál útvonaltervezést tesz szükségessé. Ezek a pályák csak egy előre meghatározott útvonal-készletet tartalmazhatnak [14] a Descartes-i térben, statikus környezet esetén statikus útvonalakat, dinamikus környezet esetén, pedig folyamatosan változó útvonalakat jelentenek [15]. Mindkét esetben ezeknek az útvonalat adó pontoknak a kiválasztása a konfigurációs térből a robot csukló ismeretében az inverz kinematika módszer segítségével határozhatók meg [16].

2. ÚTVONAL ÉS TRAJEKTÓRIA TERVEZÉS

Az elmúlt évtizedek során robotokkal foglalkozó szakemberek figyelmét a robot manipulátorok kötötték le, mivel ezeknek széleskörű alkalmazási lehetőségei vannak számos iparágban.

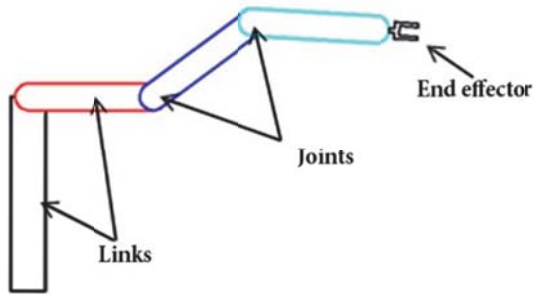
A robotmozgásban a legfontosabb feladat, hogy a robot elérési pontját a legrövidebb úton tervezze meg, ami kevesebb időt igényel, és kevesebb energiát használ a működése során. A tervezés fő előnye, hogy lehetővé teszi a robot számára, hogy komplex célokat érjen el [17]. Például egy robot számára, hogy egy konfigurációból egy másikba menjen át egy zsúfolt környezetben. Az útvonaltervezés csak egy geometriai művelet, amely leírja egy robot mozgásának útját, de nem írja le, hogy a mozgás miként történik. A csuklós

¹Idoktorandusz., Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet
² egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

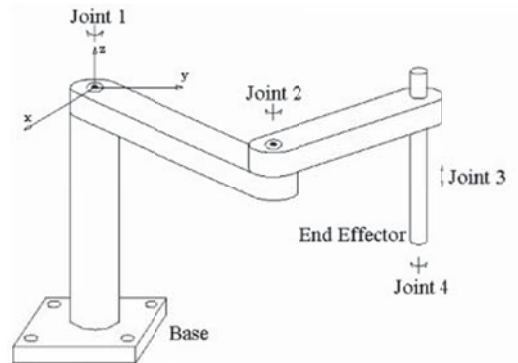
robot manipulátorok útvonalterve általában nagyobb kihívást jelent, mint a mobil robotok esetében, a nagy szabadságfok miatt. A robot manipulátor különböző iparági alkalmazásokban történő használatának fő

kialakítás kulcsa az, hogy minden alkalmazáshoz megfelelő pályautvonal tervet kell készíteni, ahol a pályán a sebességre, az erőre és a gyorsításra vonatkozó mozgás leírása megtalálható [18,19,20].

a)



b)



1. ábra. (a) 5R manipulátor, (b) RRdR manipulátor (SCARA robot)

Minden ipari robot manipulátor alkalmazásánál van egy út, amely pontokból álló pályát tartalmaz, minden pontot 3x1 pozícióvektor és 3x3 orientációs mátrix képvisel, a vektort és az orientációs mátrixot egyetlen A 4x4 homogén transzformációs mátrix [9].

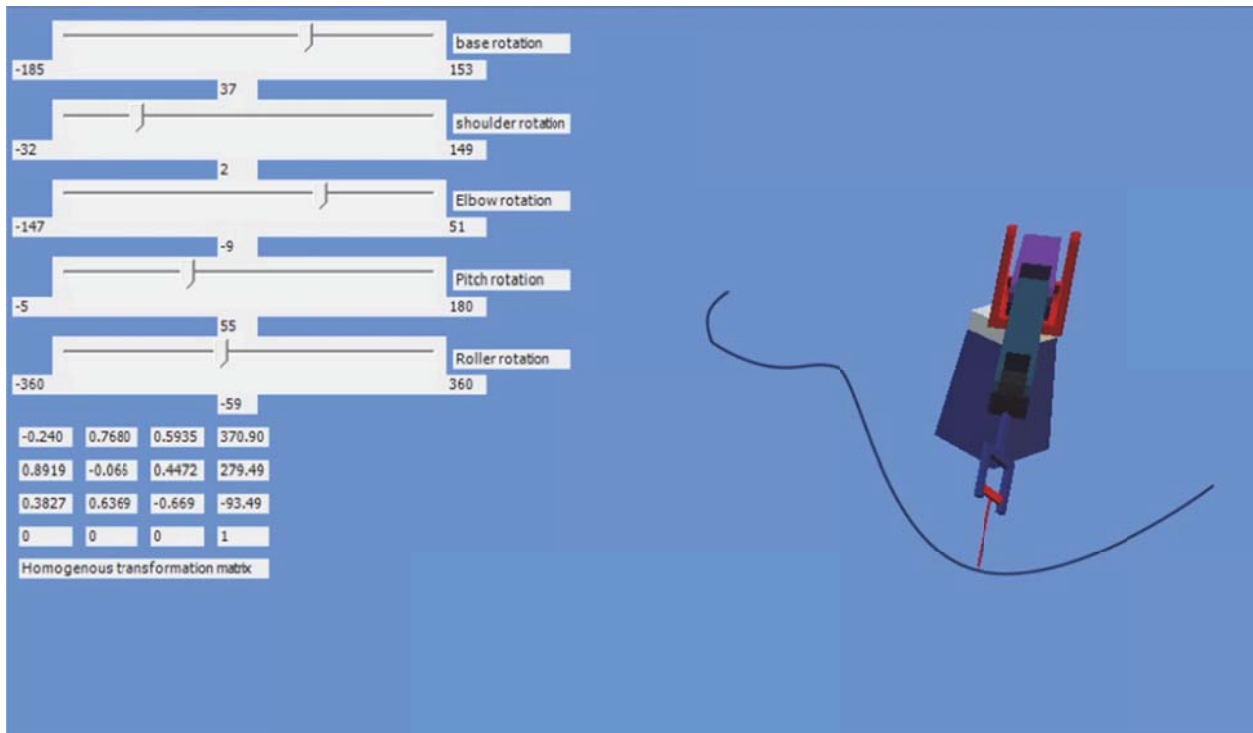
A 2. és 3. ábrák különböző pontokat mutatnak be egyetlen útvonalon. A pálya több, mint az egy-egy pontot összekötő vonal és további információkat igényel, illetve tartalmaz. Ahogy már említettük, meg kell adnunk a robot sebességét, gyorsulását és az erő nagyságát, amelyet leképezünk a robot mozgásteréből.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

a)

b)



2. ábra. (a) és (b) Különböző robot konfigurációk az útvonal különböző pontjaiban

3. Optimalás

Ebben a részben megpróbáljuk bemutatni, hogy mi a kapcsolat az optimalás és a robot alkalmazás között? Röviden az optimalizálás a helyi minimumok és/vagy maximumot keresését jelenti egy bizonyos tartományban egy adott célfüggvényénél [21]. Az előző részben megmutattuk, hogy egy konkrét robot manipulátor használata a különböző ipari alkalmazásokban egy jól definiált pályát jelent. Ez nem egyszerű művelet, ha figyelembe vesszük, hogy minden induló és célpontot összekötő útvonal során a robotnak több száz közbenső pontja is lehet, a variánsok száma végtelen számú lehet a kezdő és végpont között. A probléma még összetettebb lehet, ha a sebesség, a gyorsulás és az erő értékeire a pálya minden egyes pontjában szükség van. Mindazonáltal a számítástechnika és számos heurisztikus és biológiai inspirált algoritmus kifejlesztése megkönnyíti a fent említett végtelen számú útvonal optimalizálását egyetlen megoldásra, így egy adott ipari alkalmazásra az optimalási technikák javaslatot adnak, hogy mely megfelelő pályát kell követni.

Az optimalási módszerek felhasználásával egyes mérnöki elemek tervezése valósult meg, ahol először a probléma matematikai modellje került meghatározásra és a maximális terhelhetőség, vagy a minimális vastagság meghatározásával került sor az optimális megoldás kialakítására és még több más feltételt alkalmaztak, ami például a repülőgép súlyának vagy költségének [22] csökkentését eredményezte.

A kutatók évtizedek óta számos optimalási algoritmust alkalmaznak számos tudományterületen [23], ezeknek az algoritmusoknak a csoportja: A csillag, Hangyaboly, Méhraj, Genetikus, Mesterséges neurális hálózat, Részecske csoport, Harmónia keresés, és mások. Volt amikor két vagy több algoritmus hibridje került bevezetésre az optimalási folyamatban. Az útvonal optimális megoldásának megtalálásakor a szükséges idő és energia minimálisra csökkentése volt a cél, azaz az optimalás környezetbarát eljárásnak tekinthető, valamint növeli a robotok élettartamát, ami gazdaságossági szempont.

4. Robot manipulátorok a járművekben

A mechanikus műveletek nagy része a jármű végleges alakját, előállítását szolgálja. Műveletei az öntés, vágás, hegesztés, összeszerelés és festés, ezeknek a műveleteknek a sorrendje eltérhet, de ez nem okoz jelentős eltérést. Ebben a részben elmagyarázzuk ezeknek a műveleteknek néhány jellemzőjét.

4.1 Öntés

Az öntés a különböző anyagok felolvasásán keresztül jelenti a termékek előállítását, öntő formákba öntését. Ezen a területen a robotokat öntőformák kialakítására használják, ahol 3D-s nyomtatással vagy fűréssal, marással valósul meg a szerszám kialakítása. Ebben a folyamatban a robotok alkalmazása például az

anyagmozgatásban a kemencétől az öntőformába, sokkal biztonságosabb, mint a dolgozóké.

4.2 Kőszőrülés és polírozás

A robotok alkalmazásával az öntött termékeket gyártása pontosan elvégezhető, valamint a nem kívánt sorják eltávolítása és a végtermék polírozása. Nyilvánvaló, hogy ez a munka szakmailag hozzáértő dolgozókat igényel, és több időt vesz igénybe, mint a robotokkal elvégzett hasonló munka. A kőszőrülő robotok különböző területeken való felhasználása széleskörű, például vízalatti szerkezetek, mint a gátkapuk, ahol az anyag eltávolítás arányát is meghatározták [24], turbina gyártásánál és javításánál [25]. Az anyag eltávolítási arány [26] a legfontosabb szempont a kőszőrülésnél, és itt nemcsak gazdasági, hanem biztonságossági szempontokat is előnyben kell részesíteni, különösen olyan veszélyes helyeken, mint a nukleáris erőmű, ahol kőszőrülő robot manipulátort használtak a berendezés csővezeték rendszerének legyártásánál [27]. A kőszőrülő robotok általában kőszőrű korongokat használnak, de a robotos szalagkőszőrülés [28] szintén alkalmazott technológia, mely növeli a termelékenységet és a bonyolultabb felületek kőszőrülését teszi lehetővé. Néhány kutatás a kőszőrülés hőtermelésének és -eloszlásának vizsgálatát végezte [29], amelyek fontosak a kristályszerkezeti tulajdonságok előre jelzésénél bizonyos hőmérsékleti fokon a kőszőrült területen.

A polírozási folyamat a végső felületi finomságot és a fényes megjelenést biztosítja a felületeknél [30,31]. Polírozó robotokat széles körben használnak különböző iparágakban, mint például gránit csillogású fémlemezeknél stb. Egyes tanulmányok különböző módszereket alkalmaznak a polírozási folyamat követésére, mint a gépi látás [32] és szenzoros megfigyelés [33].

4.3 Vágás

A gyártók régóta használják a vágógépeket az alkatrészek gyártására. 3 tengelyes, vagy még összetettebb CNC vagy robot manipulátor használata esetén különböző összetett formák alakíthatók ki. A robot manipulátorok alkalmazása vágásra széleskörű alkalmazást jelent a különböző autóiparhoz tartozó iparágak területein [34]. A robotok soros vágása a kis merevség esetén jól használható [35] az úrhajózási és a járműiparban, ahol a forgácsolási erők és a gravitáció helymeghatározási hibákat eredményezhetnek, de egyes megoldások ezt a problémát azáltal, hogy bevezetnek egy optimálást a szerszám pozicionálásánál [36, 37, 38]. Ezen új technikák csillapítással ellátott vezérlőrendszert használnak a vágógépen, amely pontosabbá tette a forgácsolási folyamatokat [39].

4.4 Szerelés

A különböző alkatrészek összeszerelése egy meglehetősen összetett feladatot jelent, mint például egy autómotor, vagy az egész autó összeszerelése, és ez általában monoton és időigényes folyamat, ami a robot manipulátorok alkalmazását megfelelő alternatívává teszi. A robotizált összeszerelési művelet klasszikus megközelítése a grafikus mozgástervezés, bár más stratégiákat is használtak, mint például a gépi látás alapú módszerek [40], továbbá az összeszerelő robotok felszerelhetők érzékelőkkel és jól programozhatók, hogy biztonságos legyen az adott munkaterületen együtt dolgozni emberekkel [41]. Az ember és a robot [42,43] közötti együttműködés szintén alkalmazott megoldás, mivel nagyon hasznos egyes műveletnél. Az összeszerelés a fent említett eljárások között különös gondosságot igényel, mivel ez a folyamat magában foglalja a jármű egyes részeinek összerakását, amelyek nagy tömegűek lehetnek, vagyis a robot manipulátorainak csuklóin és karjain nagyobb feszültségeket jelentenek, ezért ezek a terhelések, valamint a ciklikus terhelés és fáradás mind figyelembe kell venni a manipulátorok kialakításakor. Számos tanulmány megkülönböztette a pálya tervezést [44] és a sebesség és a minőség közötti kompromisszum kialakítását, abban az esetben, ha az összeszerelési eljárásához tartozik.

4.5 Festés

A festés robotpálya-optimalása az offline kísérleti algoritmus segítségével történt [45]-ben, feltételezve, hogy nincs szingularitás és redundancia.

Néha a festés nem pusztán egy olyan anyagdarabot takar, amelynek egy egységes bevonórétege van, hanem művészeti jellege lehet, mint a kínai festészetnek. Ezt a műveletet robotizálni lehet, mivel a festést különálló részekre bontva minden egyes részhez egy pályát generált [46], ez hasznos különösen az autóipar számára, ahol néha szükség van logó vagy művészeti ábra kinyomtatására.

4.6 Hegesztés

A hegesztés, vagy a hegesztett terület szilárdsága számos tényezőtől függ. Például az elektróda sebessége a kívánt nagyságú legyen és a kívánt útvonalon mozogjon. Az elektróda és a hegesztett felület közötti távolság, a hegesztési pálya alakja pl. cikkcakk, körkörös és így tovább, mind hatással vannak az eljárásra. Az előzőekben említett tényezőknél a legjobb választás a hegesztés az előre beprogramozott robot manipulátorokkal [47]. A hangya kolónia és a genetikai algoritmus hibrid algoritmusát [48] alkalmazták egy hegesztő robot útvonaltervezésében, ahol a hangyakolónia előnyös szerepet tölt be az algoritmus gyors

konvergenciájánál, valamint a lokális optimalás GA mutációját használta ki. Ugyanígy ezt a hibrid algoritmust alkalmazták a hegesztési robotok munkabeosztásánál [49].

A hegesztés paramétereit úgy optimalták, hogy egy olyan relációs modellt alakítottak ki, amely a legkevesebb kísérleti számot igényli hegesztési termelés kialakításához [50]. Ezt a mesterséges neurális hálózattal végzett ortogonális teszt kombinációjával valósították meg. Egy másik hegesztési paraméter optimalást hajtottak végre a válaszfelület módszer, a genetikai algoritmus és a neurális hálózat segítségével [51]. A hegesztőrobotokat különböző módokon igyekeztek könnyebben kezelhetővé és produktívabbakká tenni, mint például a beszádfelismerés [52] alkalmazásával, hogy a robot manipulátorokat könnyebben kezeljék a preoperábilis időszakban. Az egyik dinamikus szimulációs szoftvercsomag a RecurDyn, amely felhasználható a hegesztőrobotok szimulálására és több olyan információ visszajuttatására, mint például a motorok specifikációja vagy gravitációs kiegyenlítés témája [53].

Hibrid diszkrét PSO algoritmust vezettek be a hegesztőrobotok termelési hatékonyságának javítása érdekében ezen robotok útvonaltervezésének javítására [54].

Egy mozgó hegesztő robotot két optimalási modellel hoztak létre a mozgásprobléma megoldására, és megoldást adtak "komplex, mindenféle pozíciójú hegesztési műveletre" [55]. Bizonyos gyártási esetekben az ipari robotoknak többféle feladatot kell elvégezniük, például különböző varratok hegesztésével, és ezek a feladatok ismétlődően előfordulnak, van egy módszer [56], amely javítja a gyártási területek sorozatos feladatainak gyártási idejét a végrehajtás szabadsága mellett.

A legtöbb ipari robot manipulátornál létezik olyan rezgésprobléma, amely a robot motorokból származik, vagy a dinamikus mozgások miatt adódik. A minimális ívű és minimális távolságú pályák kombinációja hatékony kinematikai rendszert eredményez [57]. A

hegesztési folyamatban két együtt dolgozó manipulátor elméleti és kísérleti szempontból is emulálásra és vizsgálatra került [58]. Az emulálás a két robot esetében olyan pályatervezésnek számított, ahol a tervezés végrehajtásához a genetikai algoritmust alkalmazták.

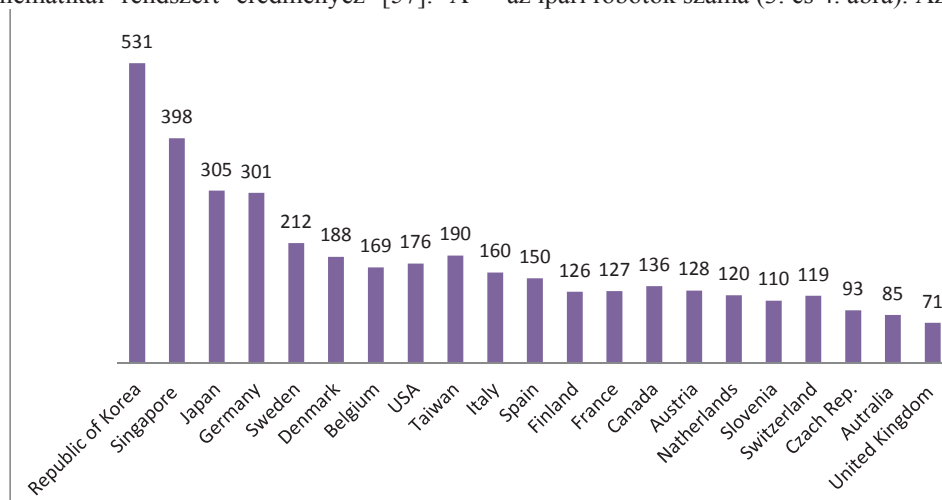
5. Optimalás és robot tervezés

Az előzőekben leírtak bizonyították, hogy a robot útvonalának és pályájának optimalása a közös a különböző alkalmazású ipari robotok esetén. Ebben a részben a gyakorlati alkalmazás és a robot közötti kapcsolat kerül bemutatásra.

Először is, minden robottervező a megfelelő robot kialakítására törekszik a megfelelő alkalmazáshoz, hogy kielégítsék a felhasználók azon igényét, ami a gazdaságosságra vonatkozik. Különösen igaz ez az autóiparban, mivel ez az iparág többszörös robotcélú, és sokszor egyetlen robotot alkalmaz minden területhez. Így ebből a pontból sok tervező már évek óta dolgozik azon, hogy olyan optimalási módszereket használjon, melyek a megfelelő robot megfelelő alkalmazásának megtervezéséhez felhasználhatók. A legutóbbi időkből a topológia optimalást használják robotok tervezésére [59,60,61], például olyan algoritmusokat, mint a nemlineáris Levenberg-Marquardt [62] módszer azért, hogy a csomópontok közötti optimális hosszúság elérése mellett csökkenjen a hiba a végfelhasználói pozícióban és orientációban. Ezek a példák és még sokan más azt mutatják be, hogyan lehet alkalmazni a robot optimalási technikákat.

6. Statisztikák

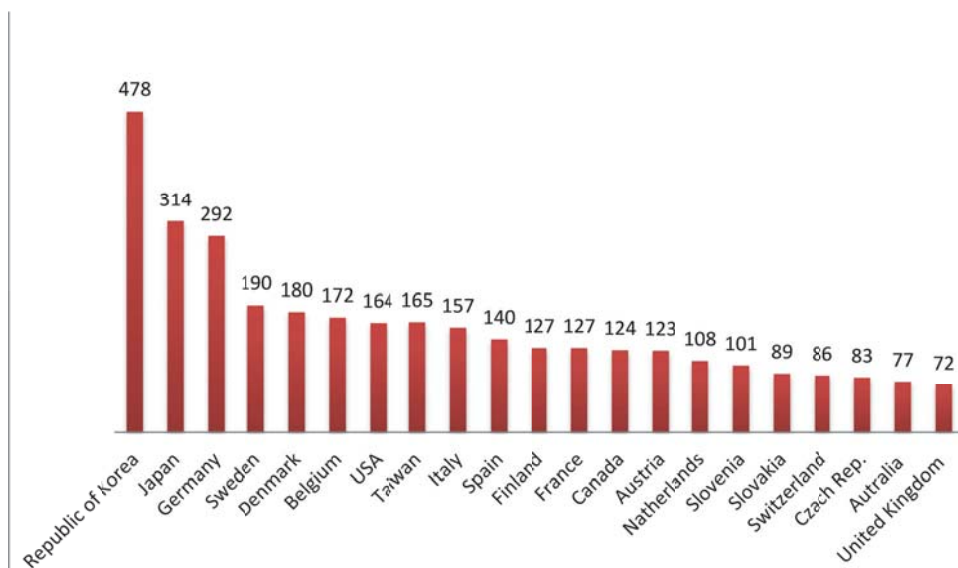
Az ipari robotok világszerte gyorsan terjednek a különböző országok gyártói közötti verseny következtében, és a megbízható statisztikák a robotok számának gyors növekedésére utalnak az elmúlt néhány évben. Az IFR [63] Nemzetközi Robot Szövetség által kiadott jelentés mutatta, hogy egy év alatt hogyan nőtt az ipari robotok száma (3. és 4. ábra). Az észak-



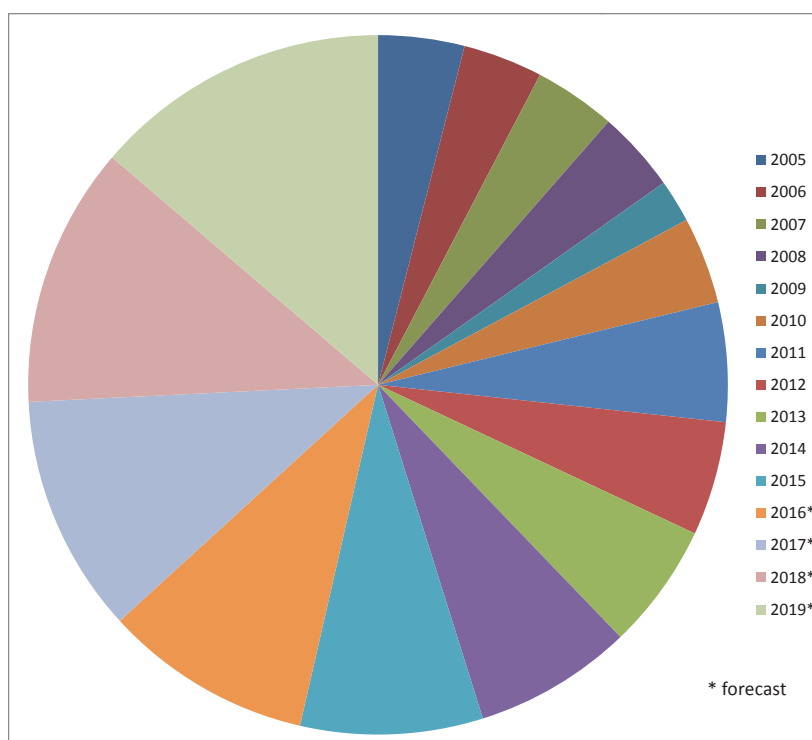
3. ábra. A többcélú ipari robotok száma (minden típus) per 10,000 alkalmazott a feldolgozó iparban 2015-ben

amerikai robotrendelések és leszállítások [64] mutatják a legfrissebb növekedéseket. Az iparág megrendelése a robotok esetében 61% -kal nőttek az összeszerelés területén és 24% -kal a ponthegesztésnél, valamint a fogyasztási cikkek és az élelmiszeripar 32% -kal

növelték a robotok megrendelését. Az 5. ábra mutatja, hogy az elmúlt években hogyan fejlődött a robotok száma világszerte [65]. Mindenesetre számos jelentést [66] tettek közzé, hogy megmutassák az ipari robotok világméretű növekedését



4. ábra. A többcélú ipari robotok száma (minden típus) per 10,000 alkalmazott a feldolgozóiparban 2014-ben



5. ábra Az ipari robotok éves igénye 2005-2019 között

7. Összefoglalás

Ebben a tanulmányban egy áttekintést készítettünk a robotok alkalmazásáról az autóiparban. A gyártók

törekednek a költségek csökkentésére, a pontos munkavégzésre és a gyors gyártásra, amire a verseny szorítja és ehhez az ipari robotok használatával jutnak el. A járműiparban a robotok egyik legfontosabb

alkalmazási területe a hegesztés. A robotok használata ennél a műveletnél időmegtakarítást és nagyobb pontosságot eredményez. A robotok alkalmazása növelheti a termelékenységet és a minőséget minden gyártási technológiánál, mint például a festés és az anyagmozgás, és ezáltal előnyös lehet a robotok használata. Ez a cikk nemcsak a robot manipulátorokat és a különböző alkalmazásokat vizsgálja az autópárhán és a járműiparban, hanem az alkalmazások és az optimált robot manipulátorok közötti kapcsolatot is.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

9. IRODALOM

- Morteza Daneshmand et al.: Medical robots with potential applications in participatory and opportunistic remote sensing: A review, *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 160-180 (2017).
- Hesheng Wang et al.: Trajectory planning of tokamak flexible in-vessel inspection robot”, *Fusion Engineering and Design*, 98–99, 1678–1682 (2015).
- Newton Spolaor: Robotics applications grounded in learning theories on tertiary education: A systematic review, *Computers & Education*, 112, 97-107 (2017).
- Varun Gopinath: Risk Assessment Process for Collaborative Assembly – A Job Safety Analysis Approach, 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, 199 – 203 (2016).
- Varun Gopinath: Safe Assembly Cell Layout through risk assessment – An Application with Hand Guided Industrial Robot, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 430 – 435 (2017).
- George Michalos: ROBO-PARTNER: Seamless Human-Robot Cooperation for Intelligent, Flexible and Safe Operations in the Assembly Factories of the Future, Conference on Assembly Systems and Technologies and systems, 71 – 76 (2014).
- Aljaž Kramberger: Generalization of orientation trajectories and force-torque profiles for robotic assembly, *Robotics and Autonomous Systems* 98, 333–346 (2017).
- Sotiris Makris et al.: Dual arm robot in cooperation with humans for flexible assembly, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, 13–16 (2017).
- Mark W. Spong: Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, Wiley & Sons Inc., First Ed. (2005).
- John J. Craig: *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, Pearson Prentice Hall, Third Edition, (2005).
- Hazim Nasir Ghafil et al.: A Virtual Reality Environment for 5-DOF Robot Manipulator based on XNA Framework, *International Journal of Computer Applications*, 113 (3) (2015).
- Tuomo Kivelä et al.: A generic method to optimize a redundant serial robotic manipulator's structure, *Automation in Construction*, 81, 172–179 (2017).
- Alaa Hassan and Mohammad Abomoharam: Modeling and design optimization of a robot gripper mechanism, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 46, 94–103 (2017).
- Robins Mathew et al.: Trajectory Tracking and Control of Differential Drive Robot for Predefined Regular Geometrical Path, *Procedia Technology*, 25, 1273-1280 (2016).
- Adem Tuncer and Mehmet Yildirim: Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm, *Computers and Electrical Engineering*, 38, 1564–1572 (2012).
- Iliukhin V.N. et al.: The Modeling of Inverse Kinematics for 5 DOF Manipulator, *Procedia Engineering*, 176, 498-505 (2017).
- Lars Blackmore and Brian Williams: Optimal Manipulator Path Planning with Obstacles using Disjunctive Programming, *American Control Conference*, 14-16 (2006).
- Serdar Kucuk: Optimal trajectory generation algorithm for serial and parallel manipulators, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 219-232 (2017).
- Aljaž Kramberger et al.: Generalization of orientation trajectories and force-torque profiles for robotic assembly, *Robotics and Autonomous Systems*, 98, 333-346 (2017).
- Elias K. Xidias: Time-optimal trajectory planning for hyper-redundant manipulators in 3D workspaces, available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516302563>
- Hazim Nasir Ghafil: Inverse Acceleration Solution for Robot Manipulators using Harmony Search Algorithm, *International Journal of Computer Applications*, 144 (6) 1-7 (2016).
- József Farkas and Károly Jármái: *Optimum design of steel structures*, book, Springer Verlag (2013).
- Van-Oanh Sai et al.: Comparative Study on Recent Development of Heuristic Optimization Methods, *Third International Conference on Computing Measurement Control and Sensor Network (CMCSN)*, 68 – 71 (2016).
- Dominique Thuot et al.: Remote robotic underwater grinding system and modelling for rectification of hydroelectric structures, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 86–95 (2013).
- Stéphane Agnard et al.: Material removal and wheel wear models for robotic grinding wheel profiling, *Procedia Manufacturing*, 2, 35 – 40 (2015).
- Farzad Rafieian et al.: Angular analysis of the cyclic impacting oscillations in a robotic grinding process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 44, 160–176 (2014).
- Pie Yu: Research and application of piping inside grinding robots in nuclear power plant, *Energy Procedia*, 127, 54–59 (2017).
- Dong Zhang et al.: Dexterous space optimization for robotic belt grinding, *Procedia Engineering*, 15, 2762 – 2766 (2011).
- Amir Masoud Tahviliana et al., “Experimental and finite element analysis of temperature and energy partition to the workpiece while grinding with a flexible robot, *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 2292– 2303(2013).
- Dieste J.A. et al.: Automatic grinding and polishing using Spherical Robot, *Procedia Engineering*, 63, 938 – 946 (2013).
- Fengjie Tian et al.: Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 14, 55–64 (2016).
- Zhao-jun Yang et al.: A Novel Vision Localization Method of Automated Micro-Polishing Robot, *Journal of Bionic Engineering*, 6, 46–54 (2009).
- Segreto T. et al.: Cognitive decision making in multiple sensor monitoring of robot assisted polishing, *Procedia CIRP*, 33, 333 – 338 (2015).

34. Yi Liu et al.: Porcine automation: Robotic abdomen cutting trajectory planning using machine vision techniques based on global optimization algorithm, *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 193–200 (2017).
35. Alexandr Klimchik et al.: Identification of the manipulator stiffness model parameters in industrial environment, *Mechanism and Machine Theory*, 90, 1–22 (2015).
36. Berend Denkena and Thomas Lepper: Enabling an Industrial Robot for Metal Cutting Operations, *Procedia CIRP*, 35, 79 – 84 (2015).
37. Ulrich Schneider et al.: Compensation of Errors in Robot Machining with a Parallel 3D-Piezo Compensation Mechanism, *Procedia CIRP*, 7, 305 – 310 (2013).
38. Klimchik A. et al.: Experimental study of robotic-based machining, *IFAC-Papers on Line* 49 (12), 174–179(2016).
39. Taylor, C M: Process Damping and Cutting Tool Geometry in Machining, available online: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:43095855.
40. Weiwei Wan: Teaching robots to do object assembly using multi-modal 3D vision, *Neurocomputing*, 259, 85–93 (2017).
41. Sotiris Makris et al.: Dual arm robot in cooperation with humans for flexible assembly, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, 2017, pp. 13–16.
42. Xi Vincent Wang et al.: Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, volume 66, (2017), pp. 5–8.
43. Stefania Pellegrinelli et al.: Motion planning and scheduling for human and industrial-robot collaboration, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, (2017), pp. 1–4.
44. Anna Valente et al.: Smooth trajectory generation for industrial robots performing high precision assembly processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, (2017), pp. 17–20.
45. Heikki Hyotyniemi: Locally Controlled Optimization of Spray Painting Robot Trajectories, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control Year: 1990*, Volume: 1, pp. 283 – 287.
46. Fenghui Yao and Guifeng Shao: Painting Brush Control Techniques in Chinese Painting Robot, 2005 IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication, pp. 462-467.
47. Frederico A. Ramalho Filho et al.: Development of Parallel Manipulators for Welding Robots, *Robotics (ISR)*, 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK) pp. 1 - 6.
48. Haiming Shen: A Study of Welding Robot Path Planning Application Based on Genetic Ant Colony Hybrid Algorithm, 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), pp. 1743-1746.
49. Zhengda Meng and Qinqi Chen: Hybrid Genetic-Ant Colony Algorithm Based Job Scheduling Method Research of Arc Welding Robot, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 718-722.
50. Hu Hai-yan et al.: The research on parameters optimization of power battery pack welding based on neural network, 2016 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS) pp. 457 – 460.
51. Praga-Alejo R.J.: Optimization welding process parameters trough response surface, neural network and genetic algorithm, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2008*, pp. 393-399.
52. Ande Stanly et al.: Parametric studies on motion intensity factors in a Robotic Welding using Speech Recognition, 2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing, pp. 415-420.
53. Yan-Shen Wang: Dynamic simulation and gravity balancing optimization of spot welding robot based on RecurDyn, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 7 - 10, Beijing, China*, pp. 1905-1910.
54. Xuewu Wang et al.: Welding Robot Path Optimization Based on Hybrid Discrete PSO, 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design, pp. 187-190.
55. Tao Zhang: Optimal Motion Planning of All Position Autonomous Mobile Welding Robot System for Fillet Seams, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, VOL. 10, NO. 4, OCTOBER 2013, pp. 1147 - 1151
56. Sergey Alartsev and Frank Ortmeier: Improving the Sequence of Robotic Tasks with Freedom of Execution, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014) September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA, pp. 4503-4510.
57. Hang Dong: An Effective Technique to Find a Robot Joint Trajectory of Minimum Global Jerk and Distance, *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation Lijiang, China, August 2015*, pp. 1327-1330.
58. Gan Yahui et al.: Emulating manual welding process by two cooperative robots, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference July 28-30, 2014, Nanjing, China*, pp. 8414-8420.
59. Sébastien Briot and Alexandre Goldsztej: Topology optimization of industrial robots: Application to a five-bar mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 120, February 2018, pp. 30-56.
60. Sofiane Belhabib and Sofiane Guessasma: Compression performance of hollow structures: From topology optimisation to design 3D printing, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 133, Nov. 2017, pp. 728-739.
61. HaoWang et al.: An approach of topology optimization of multi-rigid-body mechanism, *Computer-Aided Design*, Volume 84, March 2017, pp. 39-55.
62. Tuomo Kivelä et al.: A generic method to optimize a redundant serial robotic manipulator's structure, *Automation in Construction*, Volume 81, September 2017, pp. 172-179
63. World robotics report available online: https://ifr.org/downloads/press/02_2016/2016FEB_PI_IFR_Roboterdichte_nach_Regionen_QS1.pdf
64. Robotics Industries Association, available online: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/2016-Breaks-Records-for-North-American-Robot-Orders-and-Shipment/content_id/6378
65. Latest forecast from the International Federation of Robotics (IFR), available online: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-report-2016>
66. Executive Summary World Robotics 2016 Industrial Robots, available online: https://ifr.org/img/uploads/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_20161.pdf