

CAM rendszerek alkalmazásának lehetőségei és kihívásai robottal végzett forgácsolás esetén

Opportunities and Challenges of CAM Applications in Robotic Machining Operations

TANCSA Viktor¹, Dr. JACSÓ Ádám²

^{1,2} BME, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék
cím: H-1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3., tel.: +36 1 463 1875
e-mail: tancsav@edu.bme.hu¹, jacso.adam@gpk.bme.hu² honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

While machining is not among the primary application areas for industrial robots, the research and development achievements of recent years have positioned them as a viable alternative to large, stationary CNC machining centers with limited functionality. This paper reviews the current possibilities and technical challenges of employing robots for cutting operations, as well as the readiness of CAM systems to support these applications. Finally, the summary presents the future potential of robotic machining.

Keywords: Industrial robots, metal cutting, milling, CAM, OLP

Kivonat

Bár a forgácsolás nem tartozik az ipari robotok elsődleges alkalmazási területei közé, az elmúlt évek kutatási és fejlesztési eredményeinek köszönhetően napjainkban életképes alternatívát jelentenek a nagy méretű, helyhez kötött és korlátozott funkcionalitású CNC megmunkáló központokkal szemben. A cikk áttekinti a robotok forgácsoló megmunkálásra való alkalmazásának jelenlegi lehetőségeit, műszaki kihívásait és a CAM rendszerek felkészültségét ezen alkalmazások támogatására. Végezetül összefoglalásra kerülnek a robotos megmunkálás jövőbeli perspektívái is.

Kulcsszavak: ipari robotok, forgácsolás, marás, CAM, OLP

1. BEVEZETÉS

A gépiparban a forgácsolás alapvető szükséglet, amelyet hagyományosan merev és nagy tömegű CNC (Computer Numerical Control) szerszámgépekkel végeznek. Bár a CNC gépek pontossága kiváló, beruházási költségük magas, munkaterük korlátozott, és dedikált feladatokra tervezték őket. Az Ipar 4.0 térnyerésével a gyártásban a rugalmasság iránti igény ugrásszerűen megnőtt. Ennek eredményeként az utóbbi években trendként jelenik meg a szerszámgépek többfunkciós és alacsonyabb költségű gépekkel (robotokkal) való helyettesítése [1], [2]. A robotok lehetővé teszik, hogy a rendszerben különböző szerszámokkal és technológiákkal a gyártási folyamat több fázisában is alkalmazhatók legyenek, akár additív, szubtraktív vagy anyagmozgatási műveletek kombinálásával. A robotok előnyei közé tartozik a magas fokú rugalmasság, a kedvező beruházási költség, valamint a nagy méretű és komplexitású geometriák kezelésének lehetősége [2].

A történelmi fejlődés során a robotok az egyszerű, ismétlődő anyagmozgatási és hegesztési feladatoktól eljutottak arra a szintre, hogy a modern kompenzációs eljárásoknak köszönhetően ma már nagy pontosságot igénylő és sokoldalú forgácsolási feladatokat is képesek ellátni [3]. Jelenleg leginkább kis forgácsolóerőt igénylő műveleteknél (sorjázás, polírozás, műanyag- és famegmunkálás, kövek vágása) alkalmazzák őket, de alumínium és egyéb lágy fémek megmunkálása is egyre elterjedtebb [4]. Az extrém nagy pontosságot igénylő fémipari alkalmazásokban 3-5 tengelyes CNC gépeket használnak, melyek vezérlése CAM (Computer-Aided Manufacturing) rendszerek által generált G-kódon alapul. A robotok megkérdőjelezhetetlen előnyeinek kihasználása érdekében a korszerű CAM rendszerek már egyre fejlettebb robot-specifikus funkciókkal támogatják a robotos megmunkálást, ezek az ipari gyakorlatban azonban még nem terjedtek el [1], [4].

2. MŰSZAKI NEHÉZSÉGEK ÉS KIHÍVÁSOK

A soros kinematikai lánc összetett inverz kinematikai feladatai és a szingularitási pozíciók elkerülése mellett a robotos forgácsolás ipari elterjedésének legfőbb gátját a mechanikai felépítésből adódó kis szerkezeti merevség jelenti. Mivel az ipari robotok jellemzően nyílt kinematikai láncú, forgócsuklós mechanizmusok, szerkezeti merevségük jelentősen elmarad a hagyományos szerszámgépeketől. Ennek következtében a marási műveletek során fellépő forgácsolóerők a robotkar számottevő rugalmas deformációját okozzák, ami a szerszám pályájának drasztikus eltéréséhez vezet [4]. Ezt tovább súlyosbítja a robotstruktúrák alacsony sajátfrekvenciája, amely hajlamossá teszi a rendszert a káros rezgésekre. A kutatások nagyon hamar rávilágítottak, hogy ezen rezgések fellépésekor a forgácsolóerő drasztikus emelkedése tapasztalható, ami közvetlenül rontja a gyártott alkatrészek minőségét [5]. Nem meglepő tehát, hogy az elérhető publikációk elsősorban a rendszerszintű merevség hiányát, a dinamikai instabilitást és a kinematikai korlátokat helyezik a kutatás fókuszába. Ezek a tényezők ugyanis közvetlenül határozzák meg a robotos forgácsolás alkalmazási lehetőségeit, a megmunkálható anyagok körét és a tartható tőrészeket.

A irodalmi áttekintés során jól azonosíthatóak voltak a különböző alapanyagok megmunkálásához kapcsolódó domináns kutatási irányok és technológiai kihívások. A robotoknál felmerülő konfigurációs kihívások legtöbbször a fémek megmunkálása kapcsán képeztek kiemelt kutatási fókuszot [6], [7]. A szerszámoptimalizálásának nehézségei titánötvözetek, alumínium, acél [8] és kő [9] esetében is előkerülnek. A megmunkálási pontosság és a folyamatstabilitás kérdésköre szinte minden anyagcsoportnál kardinális probléma, a műanyagok polírozásától [10] kezdve a fa marásán [11] át egészen a fémek és a kövek marásáig [12], [13] és köszörüléséig [14].

Munkadarabanyagok közül az alumíniumötvözetek megmunkálását vizsgálták a legkiterjedtebben: fűrési, marási, köszörülési és polírozási műveletek során egyaránt kritikus tényezőként jelenik meg a gépkonfiguráció, a pályatervezés, a pontosság és a stabilitás is [15-18]. A szakirodalom rávilágít arra, hogy a vizsgált műveletek közül a marás tartalmazza a legtöbb és legkomplexebb technológiai kihívást az anyagok széles skáláján.

Jelen kutatás fókuszában ezért a robottal végzett marás és annak nehézségei állnak. A terület egyik fő dilemmája a robot teherbírása, merevsége és pontossága közötti ellentmondásos kapcsolat: míg a nagyobb teherbírású robotok szerkezetileg merevbbek, abszolút pontosságuk jellemzően kisebb. Ezt tovább bonyolítja, hogy az ipari robotok merevsége nem egy állandó érték, hanem egy rendkívül összetett, dinamikus változó paraméter, ami nagymértékben függ a robotkar aktuális konfigurációjától, a gravitációs erő irányától, a szerszámközéppont (TCP - Tool Center Point) munkatérén belüli helyzetétől és orientációjától, valamint az egyes csuklók egyedi rugalmasságától [13]. Ezen változók együttes hatása miatt a forgácsolás során fellépő erők kiszámíthatatlan deformációkat okozhatnak [19]. Ezekre a nehézségekre a kutatók és az ipar olyan adaptív megoldásokkal válaszol, amelyek célja a hibák előzetes vagy forgácsolás közbeni prediktív kompenzálása [3], [20]. Kulcskérdés azonban, hogy ezek a komplex algoritmusok milyen mértékben képesek integrálódni a kereskedelmi CAM rendszerekbe, vagy megmaradnak-e a posztprocesszálas szintjén alkalmazott egyedi kiegészítéseként.

3. CAM RENDSZEREK KÉPESSÉGEI ÉS KORLÁTAI

A hatékony robotos megmunkálás elképzelhetetlen megfelelő szoftveres támogatás nélkül. A robotok online tanítása (teach pendant) komplex 3D-s pályák és szűk toleranciák esetén (pl. marás) nem járható út. A megoldást a CAM és offline programozó (OLP) rendszerek jelentik. Ezek integrációjának igénye már a 2000-es évek elején megjelent, ugyanis a legfőbb korlát a CAM-alapú pályatervezés és az OLP-szimuláció közötti kétirányú adatcsere hiánya volt [21]. Ez azt eredményezte, hogy az OLP környezetben végzett kinematikai módosítások – például a szingularitás-elkerülés, konfigurációváltás vagy a robot fizikai korlátjai – felülírhatják a CAM-oldali ütközésvizsgálatokat és megmunkálási paramétereket, amiről a tervezőrendszer nem kapott visszacsatolást [22]. Ez nemcsak a programozási időt és az iterációk számát növeli meg, hanem súlyos hibaforrást is jelent, hiszen a robotkar olyan pozíciókba kényszerülhet, amelyek ütközésveszélyesek, vagy a szerkezet szempontjából kedvezőtlenek. A szoftverek áttekintése során alapvetően három megközelítéssel találkozhatunk, melyek eltérő mértékben integrálják a gyártási és robotikai szempontokat: (1) CAD/CAM rendszerek robotikai modullal (2) OLP rendszerek CAM támogatással (3) integrált CAD/CAM/OLP rendszerek. A 1. táblázat a teljesség igénye nélkül összegyűjti és csoportosítja az iparban legszélesebb körben erre a célra használt szoftvereket és szoftvermodulokat.

CAM robotos kiegészítővel	OLP CAM támogatással	CAM/OLP integrált megoldás
Siemens NX CAM	Robotmaster (Mastercam)	SprutCAM X Robot
TopSolid'CAM	RoboDK CAM	ENCY Robot
Autodesk PowerMILL Robot	ABB RobotStudio Machining	

A CAM rendszerek kiegészítése sokszor kimerül a szerszámalyák direkt robotos posztprocesszáálásában. A szerszám gép helyett választhatunk robotot, és a megmunkálás során alap konfigurációbeállításokat végezhetünk. Lehetőség van kiegészítő tengelyek (sínek, forgóasztalok stb.) kezelésére és OLP parancsok beépítésére a mozgási ciklusokba. A robotok merevségi, pálya- és konfiguráció-optimalizálási, valamint stabilitási problémáira azonban nem adnak választ [23]. Az OLP alapú és integrált rendszerek már kiterjedt robotos funkcionalitást és optimalizálási lehetőséget biztosítanak. Lehetővé teszik a forgácsolási paraméterek, a szerszámtengely-orientáció és az interpolációs stratégiák rugalmas kezelését, miközben a robot csuklóira optimalizálják a TCP mozgását. A beépített útvonal-analitika hatékonyan kezeli a szingularitásokat, a csuklóátfordulásokat és az ütközéseket, a virtuális kontroller-alapú szimuláció pedig garantálja a program pontos kivitelezhetőségét, mielőtt azt exportálnák a fizikai robotra [22]. Az integrált CAM/OLP rendszerek ma már a digitális iker (Digital Twin) technológián és gép-tudatos ("Machine-Aware") pályatervezés segítségével nyújtanak átfogó mozgásmenedzsmentet a robotcellák számára [24]. Ezek a szoftverek, már a kezdeti programozási fázisban figyelembe veszik a robot mozgási képességeit és korlátait, így már a pálya generálása közben elkerülnek a robot szinguláris pontjait és a tengelyek végállásait. Mindenre kiterjedő optimalizációra még ezekben sincs lehetőség, azonban interaktív tengelytérképek segítségével teljes körű hozzáférést biztosítanak a robotok pályamenti konfigurációs beállításaihoz [25], [26]. A programozónak nincs más dolga, mint "drag-and-drop" módon egy biztonságos zónába húzni a pálya vonalát, amit a szoftver azonnal lefordít az új csuklókonfigurációra (lásd 1. ábra)



1. ábra. Interaktív tengelytérkép (Robot Axis Map) (SprutCAM X Robot 17)

Egyes szoftverek már teszt jelleggel tartalmaznak diszkretizációs keresőalgoritmusokat, mellyel automatikusan azonosítják a pálya menti legmerevebb robotpózokat, miközben összehangolják a redundáns és a külső tengelyek mozgását [27]. Ez az integrált megközelítés garantálja, hogy a komplex trajektóriák – a szingularitások és ütközések elkerülése mellett – a lehető legnagyobb szerkezeti stabilitással és pontossággal

valósuljanak meg a fizikai roboton. Emellett a modern eszközök támogatják a közvetlen API (Application Programming Interface) alapú kapcsolatot külső eszközökkel és saját fejlesztésű modulokkal [28], [29].

4. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS JÖVŐBELI IRÁNYOK

A jelenleg kereskedelmi forgalomban lévő, modern CAM és offline programozó (OLP) rendszerek a robotos forgácsolás kinematikai és geometriai akadályait már kiválóan kezelik, a dinamikai és fizikai jelenségek – mint az ébredő erők, rezgések és alakváltozások – natív optimalizálására azonban még nem képesek. Bár az ipari igények és a mögöttes kutatások rendkívül gyors ütemben bővülnek, a szoftverfejlesztők a rendszerek hibamentességének és robusztusságának megőrzése érdekében csak némi késéssel tudják integrálni a legújabb technológiai innovációkat. A jelenlegi szoftverek natív hattengelyes vezérlést, teljes körű konfigurációbeállítást, és kezdetleges optimalizálási algoritmusokat kínálnak, mind a konfiguráció, mind a szerszámorientáció tekintetében. Emellett a modernebb rendszerek egyre nyitottabbá válnak a külső, nyílt forráskódú fejlesztések és egyedi algoritmusok befogadására is. A jövőbeli fejlődés egyik fő iránya a megfelelő konfigurációs szekvencia kiválasztását támogató, a strukturális merevséget javító és a forgácsolási rezgéseket is figyelembe vevő komplex algoritmusok közvetlen beépítése lesz. Valamint a pozicionálási hibák valós idejű kompenzálása is támogatható, akár többtestdinamikai szimuláció (MBS), végeelemes analízis (FEA) vagy digitális iker (Digital Twin) technológiákat használó modulok segítségével. Ezen fejlett modulok integrációjának végső célja a közvetlen, dinamikailag is kedvező konfiguráció és szerszámorientáció meghatározása, amely a hagyományos szerszámgépek szintjére emelheti a robotos megmunkálóközpontok megbízhatóságát.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal 2025-1.2.7-HU-CN-PARTNER-2025-00015 azonosítójú, „Energiahatékony technológiák fejlesztése robotos megmunkálási folyamatokhoz” című projektjének és az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíj (BO/00841/24/6) támogatásával valósulhatott meg. A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közös támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. Çakır, B. Hekimoğlu, és C. Deniz, „Path Planning for Industrial Robot Milling Applications”, *Procedia Computer Science*, köt. 158, o. 27–36, jan. 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.024.
- [2] W. Ji és L. Wang, „Industrial robotic machining: a review”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 103, sz. 1, o. 1239–1255, júl. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03403-z.
- [3] V. D. Sagias, M. Koutroumpousis, C. Stergiou, A. Tsolakis, G. Kioroglou, és P. Zacharia, „FEA-Guided Toolpath Compensation for Robotic Machining: An Integrated CAD/CAM/CAE Framework for Enhanced Accuracy”, *Automation*, köt. 6, sz. 4, nov. 2025, doi: 10.3390/automation6040073.
- [4] P. Stavropoulos, C. Gerontas, H. Bikas, és T. Souflas, „Multi-Body dynamic simulation of a machining robot driven by CAM”, *Procedia CIRP*, köt. 107, o. 764–769, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.059.
- [5] J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stavropoulos, és G. Chryssolouris, „MACHINING WITH ROBOTS: A CRITICAL REVIEW”, 2011. Elérés: 2026. március 1. [Online]. Elérhető: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17857617>
- [6] P. Xu, Y. Gao, X. Yao, Y. H. Ng, K. Liu, és G. Bi, „Influence of process parameters and robot postures on surface quality in robotic machining”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 124, sz. 7, o. 2545–2561, febr. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10640-2.
- [7] M. Saravana Mohan, P. S. Samuel Ratna Kumar, és P. M. Mashinini, „Sustainable Development of Redundant Articulated Robot Components Using Simscape Multibody”, in *Sustainable Machining and Green Manufacturing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2024, o. 193–219. doi: 10.1002/9781394197866.ch10.
- [8] I. Iglesias, A. Sanchez, és F. J. G. Silva, „Robotic path compensation training method for optimizing face milling operations based on non-contact CMM techniques”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, köt. 85, o. 102623, febr. 2024, doi: 10.1016/j.rcim.2023.102623.
- [9] Z. Zhang, F. Yin, H. Huang, G. Huang, és C. Cui, „An industrial robot-based sawing method for natural stone sculpture”, *J Comput Des Eng*, köt. 11, sz. 6, o. 75–85, dec. 2024, doi: 10.1093/jcde/qwae094.
- [10] J. Li és misai., „The Real-Time Local Surface Model Construction Method of Unknown-Model Workpieces for Robotic Polishing”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, köt. 30, sz. 2, o. 1286–1297, ápr. 2025, doi: 10.1109/TMECH.2024.3409938.

- [11] M. Pantscharowitsch, F. Linzer, H.-B. Neuner, és B. Kromoser, „On the Utilisation of the Workspace of an Industrial Robot for Milling Structural Timber Components - Experimental Trials with Different Arm Positions and Evaluation of Machining Quality”, o. 608, jan. 2023, doi: 10.52202/069179-0082.
- [12] J. Huang, H. Huang, S. Huang, és F. Yin, „Modeling of Chatter Stability for the Robot Milling of Natural Marble”, *Machines*, köt. 12, sz. 12, dec. 2024, doi: 10.3390/machines12120942.
- [13] X. Zhang, L. Zheng, W. Fan, L. Mao, Z. Li, és Y. Cao, „Multi-domain data-driven chatter detection in robotic milling under varied robot poses based on directional attention mechanism”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, köt. 227, o. 112406, márc. 2025, doi: 10.1016/j.ymsp.2025.112406.
- [14] Z. Tao, S. Li, L. Zhang, J. Qi, és D. Zhang, „Surface roughness prediction in robotic belt grinding based on the undeformed chip thickness model and GRNN method”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 120, sz. 9, o. 6287–6299, jún. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09162-8.
- [15] F. Ducobu, T. Beuscart, V. Dambly, E. Rivière-Lorphèvre, G. Ortiz-de-Zarate, és P.-J. Arrazola, „An experimental methodology to improve the robotic drilling of aluminium alloys”, *CIRP Annals*, köt. 74, sz. 1, o. 103–107, jan. 2025, doi: 10.1016/j.cirp.2025.03.028.
- [16] R. Zhang, Z. Wang, D. S. Alves, S. Hayward, N. Y. Bailey, és P. S. Keogh, „Tool orientation and path optimisation for error compensation in direct robotic plunge milling”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, köt. 0, sz. 0, o. 1–19, jún. 2025, doi: 10.1080/0951192X.2025.2511107.
- [17] J. Ge és mtsai., „Quantitative grinding depth model for robotic weld seam grinding systems”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 89, o. 397–409, márc. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.067.
- [18] J. Song és mtsai., „Research on polishing 3C aluminum alloy surfaces with a novel solid flexible tool”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 154, o. 536–545, nov. 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2025.10.010.
- [19] L. T. Tunc és S. Kurnaz, „Is process damping effective in the stability of robotic milling?”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 133, o. 879–890, jan. 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.11.084.
- [20] H. Zhang, W. Xu, Q. Peng, D. Wang, C. Jiang, és W. Li, „Phase Space Reconstruction-Based Online Roughness Monitoring in Robotic Milling of Aircraft Skin Edge”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, o. 1–12, 2025, doi: 10.1109/TMECH.2025.3603285.
- [21] J. Braumann és S. Brell-Cokcan, „Parametric Robot Control: Integrated CAD/CAM for Architectural Design”, előadás ACADIA 2011: Integration Through Computation, Banff (Alberta), Canada, 2011, o. 242–251. doi: 10.52842/conf.acadia.2011.242.
- [22] „CAD/CAM based robot programming for milling | Robotmaster”. Elérés: 2026. március 3. [Online]. Elérhető: <https://www.robotmaster.com/resources/armatec-survivability/>
- [23] Kollár József, „CAM Tippek #8: Robot programozás CAM rendszerrel problémái - 1. rész - CNC”. Elérés: 2026. március 3. [Online]. Elérhető: <https://www.cnc.hu/2014/04/robot-programozasa-cam-rendszerrel-problemai/>
- [24] „SprutCAM X Robot: innovative all-in-one CAD/CAM/OLP for robots”. Elérés: 2026. március 3. [Online]. Elérhető: <https://sprutcam.com/sprutcam-x-robot/>
- [25] „Industrial Robot programming workflow | SprutCAM X”. Elérés: 2026. március 4. [Online]. Elérhető: <https://sprutcam.com/sprutcam-x-robot/workflow/>
- [26] „Precision Mold & Pattern Milling with ENCYRobot – ENCY CAD/CAM software”. Elérés: 2026. március 4. [Online]. Elérhető: <https://encycam.com/powered-by-ency/precision-mold-pattern-milling-with-encyrobot/>
- [27] M. Makulavičius, S. Petkevičius, J. Rožėnė, A. Dziedzickis, és V. Bučinskas, „Industrial Robots in Mechanical Machining: Perspectives and Limitations”, *Robotics*, köt. 12, sz. 6, nov. 2023, doi: 10.3390/robotics12060160.
- [28] „ENCY Robot: Offline robot programming solution – ENCY CAD/CAM software”. Elérés: 2026. március 4. [Online]. Elérhető: <https://encycam.com/ency-robot/>
- [29] „CAM Software for Robots - RoboDK”. Elérés: 2026. március 4. [Online]. Elérhető: <https://robodk.com/CAM#stock-optimization>