

Gépi tanulás alkalmazása a trochoidális marási szerszámpálya optimalizálásban

Application of machine learning in trochoidal milling tool path optimization

SZABÓ Eszter¹, Dr. JACSÓ Ádám²

^{1,2}BME, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék

cím: H-1111, Budapest, Műgyetem rakpart 3., tel.: +36 1 463 1875

e-mail: eszter.szabo.1@edu.bme.hu¹, jacso.adam@gpk.bme.hu², honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

Slot machining is considered a challenging manufacturing task. Due to the closed allowance material, it is difficult to ensure ideal machining conditions. The trochoidal milling strategy can provide a well-controlled radial depth of cut, making it a favourable solution for machining hard-to-access areas. Spline-based methods of tool path optimization were found to be superior among the possible strategies. However, these algorithms come with great computational costs; therefore, their industrial applications are not yet widespread. The aim of this study is to develop a machine learning based tool path optimization method, reducing the path generation time while sustaining the machining efficiency.

Keywords: trochoidal milling, Bézier curve, artificial neural network, tool path planning, optimization

Kivonat

A trochoidális marási stratégia alkalmazása hatékony megoldást nyújt a körülzárt alakzatok megmunkálására, mivel a hurkolt szerszámpályák elősegítik az ideális megmunkálási körülmények biztosítását, többek közt a szerszám radiális bemerülésének szabályozhatóságával. A pályaszakaszok meghatározására használt stratégiák közül a spline görbe alapú módszerek kiemelkednek a hatékonyságot tekintve, azonban az optimális szerszámpályák létrehozásának számításgénye jelentős, így ezek a módszerek az ipari alkalmazásokban egyelőre nem terjedtek el. A kutatás célja egy gépi tanulás alapú pályatervezési módszer fejlesztése, amely segítségével csökkenthető a pályagenerálási idő a megmunkálás hatékonyságának megőrzése mellett.

Kulcsszavak: trochoidális marás, Bézier görbe, mesterséges neurális hálózat, szerszámpályatervezés, optimalizálás

1. BEVEZETÉS

A forgácsoló műveleteknél gyakran előfordul, hogy zárt geometriájú alakzatokat, például zsebeket és hornyokat kell megmunkálni. A hagyományos horonymarás során azonban a ráhagyási alakzat nehéz hozzáférhetősége miatt nagy erők ébrednek, valamint magas forgácsolási hőmérséklet keletkezik [1], a szerszám gyors kopását, akár törését okozva [2]. Továbbá, a forgács eltávolítása is nehézséget okoz a horony megmunkálása során, ami a forgács újramarását okozhatja, rontva a megmunkált felület minőségét és tovább fokozva a szerszám kopását [3]. A trochoidális marási technika alternatívát nyújt az említett problémák elkerülésére horonymegmunkálás esetén is [4]. A trochoidális szerszámpályák egymást bizonyos mértékben átfedő görbeszakaszok láncolatából állnak [5]. A megmunkálás során a szerszám átmérője kisebb a kialakítandó horony szélességénél [6], így a trochoidális marási stratégiával csökkenthető a szerszám radiális bemerülése, azaz a kontaktszög [7]. Ez a tulajdonság a forgácsolás közben keletkező hő hatékonyabb elvezetését eredményezi [8]. Trochoidális marás során a keletkező felület minősége is jobb a hagyományos horonymarással előállított felületekéhez képest [9], valamint a kisebb forgácsvastagság kisebb forgácsolási erőket eredményez [10], lehetővé téve az előtolás és a fordulatszám növelését [11]. A számítógéppel segített gyártás (CAM - Computer Aided Manufacturing) rendszerek rugalmas megoldást nyújtanak a trochoidális szerszámpálya generálásra, azonban a kutatások azt mutatják, hogy léteznek hatékonyabb szerszámpálya

tervezési módszerek. Jacsó és társai Bézier görbe alapú módszert használtak szerszámpálya generálásához [12]. A módszer 40%-os javulást hozott a korábban alkalmazott ciklois alapú módszerhez képest, azonban a pályageneráláshoz használt kereső algoritmus nagy számításigénye hátráltatja a módszer gyakorlati alkalmazásokban való elterjedését. A gépi tanulás használható optimalizálási folyamatok gyorsítására a pontosság bizonyos mértékű csökkenése mellett. A gépi tanulás alapja az adathalmaz tulajdonságainak felismerése, mely információkat az esetek többségében neurális hálózatok kezelnek [13]. A kutatók a gyártástudományban számos feladatra használták a gépi tanulás nyújtotta lehetőségeket, azonban a szerszámpálya tervezési feladatokban való alkalmazás egyelőre nem elterjedt.

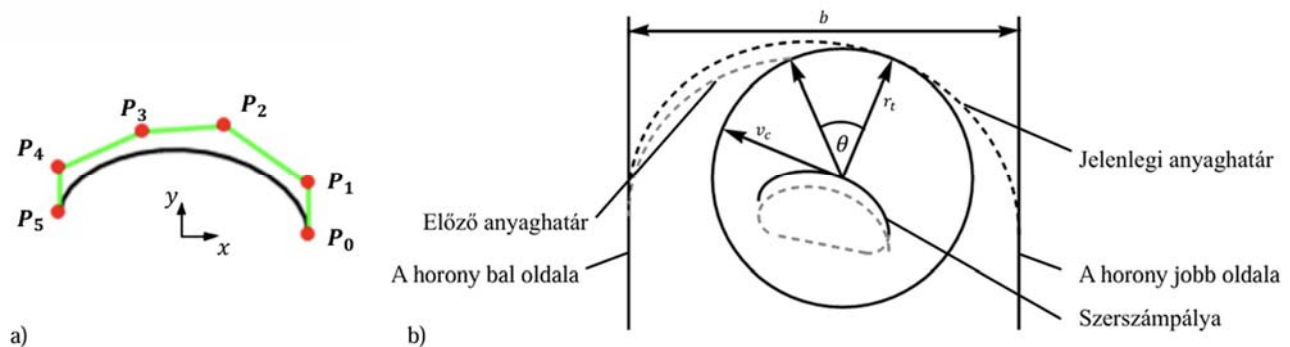
A kutatás célja egy gépi tanulás alapú pályatervezési módszer fejlesztése, amely segítségével csökkenthető a pályagenerálási idő a megmunkálás hatékonyságának megőrzése mellett.

2. SZERSZÁMPÁLYASZAKASZOK MODELLEZÉSE

A szerszámpályaszakaszok modellezése a Bézier görbe alapú módszerrel történik. A Bézier görbét definiáló egyenlet a következő:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i \quad (1)$$

ahol n a Bézier görbe fokát, i az adott kontrollpont indexét, és P_i az i -edik kontrollpont koordinátáit jelöli. A szerszámpályatervezés során a hat kontrollpontos modellezés elegendő komplexitást biztosít a görbeszakaszok optimalizálásához [12]. A kontrollpontok elhelyezése egyenként történik az 1. Ábra szerint:



1. Ábra. a) Bézier görbe kontrollpontjainak elhelyezkedése. b) A kontaktszög (θ) értelmezése.

A szerszámpályák kontrollpontjainak optimális pozícióját négy tényező határozza meg: a horonyszélesség, a szerszámtér, a kontaktszög és a minimális görbületi sugár. Ezek közül a kontaktszög, azaz a szerszám be- és kilépési pontjához tartozó középponti szög (1. b ábra) kulcsfontosságú paraméter a szerszámterhelés kontrollálásához. A görbeszakasz kontrollpontjainak x koordinátái a horonyszélesség (b), valamint a szerszámsugár (r) függvényeként fejezhetők ki.

3. SZERSZÁMPÁLYÁK OPTIMALIZÁLÁSA

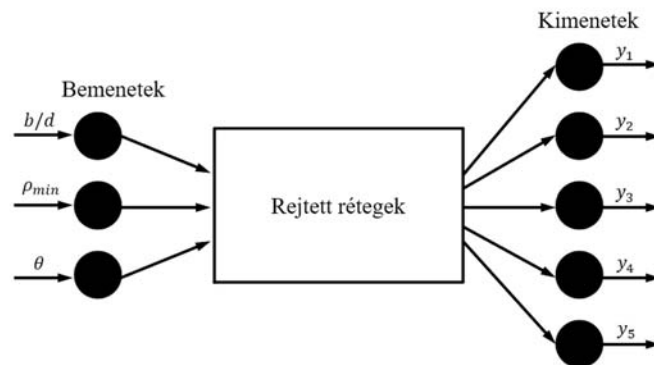
A célkitűzések között szerepel a megmunkálás hatékonyságának növelése, ennek megfelelően az optimalizálás célfüggvényeként az anyagleválasztási sebesség (MRR - Material Removal Rate) választható:

$$MRR = \frac{Q_p}{t_p} = \frac{b \cdot a_p \cdot w}{\frac{s}{v_f}} \left[\frac{mm^3}{min} \right] \quad (2)$$

ahol Q_p a periódusonként leválasztott anyagmennyiség, t_p a periódusidő, b a horony szélessége, a_p a fogásmélység, w a trochoidális lépés, s a periódus ívhossza, v_f az előtolási sebesség. Az optimalizálás során továbbá szükséges figyelembe venni a geometriai korlátokat. A maximális kontaktszögre vonatkozó feltétel a szerszámterhelés szabályozását, a minimális görbületi sugár pedig a tervezett előtolási sebesség megvalósíthatóságát biztosítja.

A Jacsó és társai [12] által kifejlesztett iteratív algoritmus segítségével 44 különböző bemeneti kombinációhoz generáltunk optimális szerszámpályát, ahol egységnyi szerszámsugár mellett a

horonyszélesség a 2,5 mm, 3 mm, 3,5 mm és 4 mm, a minimális görbületi sugár a 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm és 0,4 mm, míg a maximális kontaktszög a 15°, 30°, 45° és 60° értékeket vette fel. A görbét meghatározó paraméterek bemeneti, a görbe kontrollpontjainak y koordinátái pedig kimeneti mátrixokat alkottak (2. Ábra).



2. Ábra. Neurális hálózat be- és kimenetei.

Az így definiált adathalmazon történt a gépi tanulás megvalósítása. A bemeneti és kimeneti vektorpárok (a bemeneti és kimeneti mátrixok összetartozó sorai) tanító és validációs adathalmazokat alkottak. A tanító adathalmaz a vektorpárok felét tartalmazta, a validációs halmaz pedig a maradékot, ügyelve arra, hogy mindkét halmaz elemei szétszórtnak legyenek kiválasztva a paramétermezőből. Egy optimalizáló program készült a legalkalmasabb mesterséges neurális hálózat (ANN – Artificial Neural Network) architektúra megtalálására, mivel a megfelelő neuronszám megválasztására nem létezik általános algoritmus. A program különböző modelleket hozott létre az ANN teljesen kapcsolt rétegeinek számát (4 és 20 között) és a rétegenkénti neuronok számát (3 és 480 között) változtatva. Az aktivációs függvények a hiperbolikus tangens, illetve a ReLU függvények voltak. A túlillesztés elkerülése érdekében a tanítási folyamat megállt, amennyiben a veszteség függvény nem javult az előző körökben. A korlátozó feltételeket, valamint a szerszámpályával elérhető anyagleválasztási sebességet figyelembe véve került megválasztásra a megfelelő neurális hálózat (1. Táblázat).

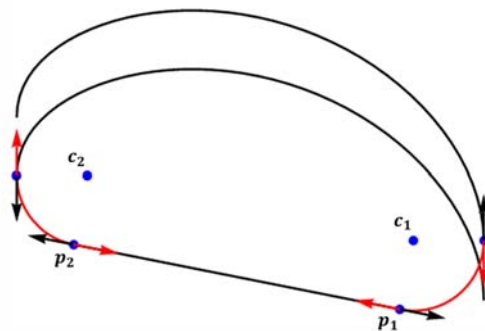
A legjobbnak talált neurális hálózat.

1. Táblázat.

Réteg (n)	Bemenet	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Kimenet
Neuronok száma	3	15	30	60	120	240	480	5
Aktivációs függvény	tanh	tanh	tanh	ReLU	tanh	ReLU	tanh	tanh

4. A PÁLYAGENERÁLÁSI ALGORITMUS VALIDÁLÁSA FORGÁCSOLÁSI KÍSÉRLETEKKEL

A kísérletek során használt szerszámpályák forgácsoló szakaszai a neurális hálózattal generált szegmensekből álltak. Az összekötő szakaszokat érintőlegesen csatlakozó körívek és egyenesek alkották (3. Ábra).



3. Ábra. A szerszámpálya szegmensek tangenciális csatlakozása.

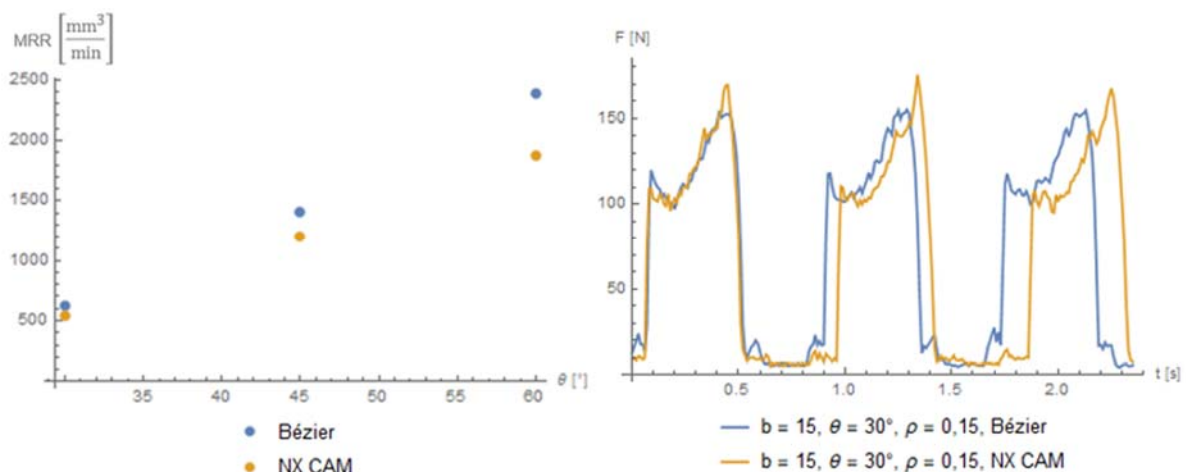
Az erőmérési kísérlet egy Kondia B-640 háromtengelyes megmunkálóközpont segítségével történt. A szerszám egy 10 mm-es, 3 élű Smicut M1010C25_LC szármáró volt. A munkadarab téglatest alakú volt, anyaga Al6082 alumínium ötvözet, méretei 100 x 175 x 120 [mm]. A kísérletek során alkalmazott forgácsolási paramétereket a 2. Táblázat tartalmazza.

Forgácsolási paraméterek

2. Táblázat.

Forgácsolási sebesség	v_c	200	[m/min]
Élenkénti előtolás	f_z	0,05	[mm]
Élek száma	z	3	[db]
Fordulatszám	rpm	6366	[1/min]
Előtolási sebesség	v_f	955	[mm/min]
Fogásmélység	a_p	2	[mm]

A korábbi kutatások [12] már igazolták, hogy a Bézier görbe alapú pályamodellezéssel akár 40%-kal is növelhető a termelékenységi a hagyományos ciklois jellegű stratégiához képest, ezért az összehasonlító vizsgálatoknál egy ettől sokkal korszerűbb megoldást, az NX CAM adaptív marási stratégiáját vettük referenciának azonos bemeneti paraméterek megadásával. Az adaptív marási stratégia szintén a kontaktszög szabályozásán alapul, azonban az általunk kifejlesztett módszerrel ellentétben nem alkalmaz pályaoptimalizálást az anyagleválasztási sebesség maximalizálása érdekében [14]. Az ANN segítségével létrehozott Bézier görbe alapú szerszámpályák MRR értékei minden esetben nagyobbak voltak, tehát ezen szerszámpályák hatékonyabbak az NX CAM által nyújtott megoldásnál. A kifejlesztett algoritmussal generált szerszámpályák előnye a kontaktszög növelésével egyre nagyobb mértékben mutatkozik meg (4. a) Ábra). A forgácsolási erők szempontjából a Bézier görbe alapú szerszámpályák minden vizsgált esetben (30, 45 és 60°-os kontaktszögek esetén) kisebbek voltak az NX CAM-mel generált pályáknál (4. b) Ábra).



4. Ábra. A Bézier görbe alapú, valamint az NX CAM segítségével tervezett szerszámpályák összehasonlítása 15 mm-es horonyszélesség és 0,15 mm-es minimális görbületi sugár esetén; a) a fajlagosan leválasztott anyagmennyiség szerint, a kontaktszög változásának függvényében; b) a forgácsolási erőprofilok szerint, 30°-os kontaktszög esetén.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A szimulációs és mérési eredmények alátámasztották, hogy a gépi tanulás alapú módszer segítségével töredékére csökkenthető a pályagenerálási idő a korábbi módszerekhez képest. A bemutatott mesterséges neurális hálózat alapú optimalizálási algoritmust nem terheli jelentős hiba a korábban alkalmazott kereső algoritmus alapú módszerhez képest sem a termelékenységet, sem a szerszám terhelését tekintve. Az algoritmus egyenes hornyok trochoidális megmunkálásához kiválóan alkalmazható, a további fejlesztések során az általános geometriákra való kiterjesztés jelentheti a következő fontos állomást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Európai Unió RRF-2.3.1-21-2022-00004 azonosítójú, Mesterséges Intelligencia Nemzeti Laboratórium projektjének, valamint a BME EKÖP-24-4-II azonosítójú ösztöndíj programjának támogatásával valósulhatott meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] István Szalóki, Sándor Csuka, and Sándor Sipos, 'New Test Results in Cycloid-Forming Trochoidal Milling', *Acta Polytechnica Hung.*, vol. 11, no. 2, 2014.
- [2] Ashutosh Khatri, Muhammd P. Jahan, and Jianfeng Ma, 'Assessment of tool wear and microstructural alteration of the cutting tools in conventional and sustainable slot milling of Ti-6Al-4V alloy', vol. 105, pp. 2799–2814, 2019.
- [3] A. K. O. Gnytko, 'Theoretical research of the chip removal process in milling of the closed profile slots', *Arch. Mater. Sci. Eng.*, vol. 113, no. 2, pp. 69–76, Feb. 2022, doi: 10.5604/01.3001.0015.7019.
- [4] G. Gómez *et al.*, 'Comparison between milling roughing operations in full slotting manufacturing: trochoidal, plunge and conventional milling', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1193, no. 1, p. 012003, Oct. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1193/1/012003.
- [5] P. Avrampos and G.-C. Vosniakos, 'Coverage in planar surface polishing by trochoidal tool paths', *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, vol. 12, no. 2, pp. 663–675, May 2018, doi: 10.1007/s12008-017-0420-1.
- [6] M. Wagih, I. Maher, H. El-Hofy, J. Yan, and M. A. Hassan, 'Analysis and development of elliptical tool path in trochoidal milling', *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 47, pp. 168–183, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.10.002.
- [7] Prasad PATIL, Ashwin POLISHETTY, Moshe GOLDBERG, Guy LITTLEFAIR, and Junior NOMANI, 'SLOT MACHINING OF Ti6AL4V WITH TROCHOIDAL MILLING TECHNIQUE', *J. Mach. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 42–54, 2014.
- [8] Q. Deng, Z. C. Chen, Z. Chang, R. Shen, and Y. Zhou, 'A model for investigating the temperature of trochoidal machining', *J. Ind. Prod. Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 194–203, May 2020, doi: 10.1080/21681015.2020.1769749.
- [9] N. E. Karkalos, P. Karmiris-Obratański, S. Kurpiel, K. Zagórski, and A. P. Markopoulos, 'Investigation on the Surface Quality Obtained during Trochoidal Milling of 6082 Aluminum Alloy', *Machines*, vol. 9, no. 4, p. 75, Mar. 2021, doi: 10.3390/machines9040075.
- [10] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, and M. A. Sheikh, 'Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining', *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 7–8, pp. 782–800, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024.
- [11] K. A. Osman, V. Yılmaz, H. Ö. Ünver, U. Şeker, and S. E. Kılıç, 'Slot milling of titanium alloy with hexagonal boron nitride and minimum quantity lubrication and multi-objective process optimization for energy efficiency', *J. Clean. Prod.*, vol. 258, p. 120739, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120739.
- [12] A. Jacso, Z. Lado, R. K. Phanden, B. S. Sikarwar, and R. K. Singh, 'Bézier curve-based trochoidal tool path optimization using stochastic hill climbing algorithm', *Mater. Today Proc.*, vol. 78, pp. 633–639, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.056.
- [13] O.S. Eluyode and Dipo Theophilus Akomolafe, 'Comparative study of biological and artificial neural networks', *Eur. J. Appl. Eng. Sci. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 36–46, 2013.
- [14] ModuleWorks GmbH, 'Adaptive Roughing'. [Online]. <https://www.moduleworks.com/software-components/toolpath/adaptive-roughing/>. 2025.04.04.