

Trochoidális szerszám pályák tervezése Bézier-görbék alkalmazásával

Trochoidal tool path planning by using Bézier curves

Dr. JACSÓ Ádám¹, LADÓ Zoltán²

¹ BME, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék

² BME, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék

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

e-mail: jacso.adam@gpk.bme.hu¹, ladozoltan1@gmail.com², honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

Trochoidal milling can be used efficiently in high-speed machining of slot-like geometries. In recent decades, several studies have been conducted on the experimental and theoretical investigation of traditional tool path shapes, but due to the complexity of the problem, little attention has been paid to optimising the trajectory. This paper presents a new Bézier curve-based tool path modelling technique that creates the potential to maximize the productivity at a given tool load while meeting the requirements of high-speed machining.

Keywords: trochoidal milling, tool path optimisation, Bézier-curves, cutter engagement, cutting force

Kivonat

A trochoidális marási technológia rendkívül hatékonyan alkalmazható a horonyszerű alakajátosságok nagysebességű megmunkálására. Az elmúlt évtizedekben számos tanulmány született a hagyományos pályaalakok kísérleti és elméleti vizsgálatával kapcsolatban, azonban a probléma komplexitása miatt kevés figyelem fordult a pálya alakjának optimalizálására. A cikkben egy olyan Bézier-görbe alapú új szerszám pályamodellezési technika kerül bemutatásra, amely segítségével a nagysebességű megmunkálás követelményeinek kielégítése mellett lehetőség nyílik a termelékenység adott szerszámterhelés melletti maximalizálására is.

Kulcsszavak: trochoidális marás, szerszám pályamodellezés, Bézier-görbe, kontaktszög, forgácsolási erő

1. BEVEZETÉS

A trochoidális marási stratégia az egyik leghatékonyabb nagyolási technológia a nehezen forgácsolható anyagok nagysebességű megmunkálásának területén. A hurkolt szerszám pályák lehetővé teszik mind a magas előtolási sebesség alkalmazását, mind a szerszám radiális bemerülésének szabályozhatóságát [1]. A jól kontrollált anyagleválasztási viszonyoknak köszönhetően nagy axiális fogásvétel engedhető meg, ami növeli a szerszám kihasználtságát, köszönhetően annak, hogy a kopás nagyobb felületen oszlik el [2]. A trochoidális marásnál a radiális fogásvétel jellemzően alacsony marad, azonban nagy fordulatszám és előtolás engedhető meg, így az anyagleválasztási sebesség a pályahossz növekedésének ellenére is többszörösére emelkedhet a hagyományos pályatervezési stratégiákhoz viszonyítva. A trochoidális stratégia tehát mind a szerszám élettartamát, mind a megmunkálási időt tekintve kedvező megoldást kínál [3].

Az elmúlt két évtizedben számos kísérleti és elméleti kutatás foglalkozott a legelterjedtebben alkalmazott ciklois-jellegű és köríves pályatervezési stratégiák vizsgálatával [4-5]. A pálya alakjának optimalizálása azonban kevesebb figyelmet kapott, holott jelentős tartalékok állnak még rendelkezésre ezen a területen [6]. Az alábbi tanulmány egy olyan Bézier-görbe alapú pályamodellezési technikát mutat be, amellyel jelentősen csökkenthető a kontaktszög ingadozása, így a szerszám a pálya nagyobb részében dolgozhat ideális körülmények között. Az újonnan kifejlesztett pályatervezési algoritmussal akár több mint 25%-kal is növelhető az anyagleválasztási sebesség a szerszám maximális terhelésének emelkedése nélkül.

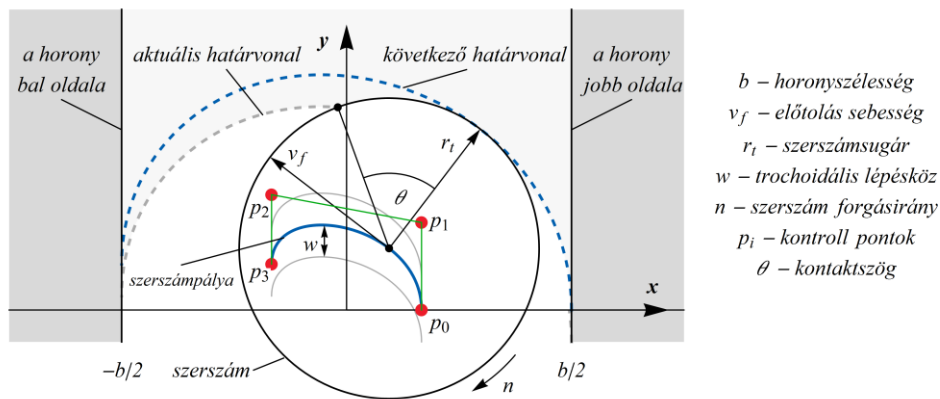
2. A SZERSZÁMPÁLYA MODELLEZÉSE

A trochoidális stratégia különféle zárt alakajátosságok, például hornyok és zsebek megmunkálása esetén alkalmazható. Bár a tanulmány az egyenes hornyok trochoidális megmunkálására fókuszál, a pályatervezés során alkalmazott elvek egyáltalán nem zárják ki a bonyolultabb geometriákhoz történő felhasználást sem.

Az állandó szélességű, egyenes hornyok gyakran előforduló alaksajátosságok a szekrényserű alkatrészekben. A pályatervezés során nagy könnyebbséget jelent, hogy ezeknél a geometriáknál elegendő egyetlen trochoidális periódus alakját meghatározni, amelyet a megfelelő lépésközzel ciklikusan ismétlődővé téve a teljes horony megmunkálása elvégezhető. A fejezet további részében a trochoidális pályamintázat meghatározásának lépései kerülnek ismertetésre.

Geometriai feltételek

Egy trochoidális periódus két szakaszra bontható: a forgácsoló és az összekötő mozgásra. A pálya modellezése során a két részt külön kezeltük, és elsősorban a forgácsoló szegmensre fókuszáltunk, hiszen az anyagleválasztási viszonyok figyelembevétele miatt ez jelenti a nagyobb kihívást. A pálya modellezése során szem előtt kell tartani, hogy a nagysebességű pályabejárás szempontjából létfontosságú C^2 folytonosság biztosított legyen. Ennek megfelelően legalább harmadfokú Bézier-görbévet kell alkalmazni. A vizsgálataink során egyelőre nem foglalkoztunk a harmadfokúnál magasabb rendű görbékkel, azonban bonyolultabb alaksajátosságok esetén már szükség lenne a modellezési technika flexibilitásának növelésére.



1. ábra A trochoidális szerszámpálya forgácsolási szakaszának modellezése

A harmadfokú Bézier-görbévé négy kontrollpont ($p_i = \{x_i, y_i\}$, $i = 0, \dots, 3$) segítségével adható meg. A kontrollpontok helyzetének kijelölését korlátozza az a peremfeltétel, hogy a forgácsolási pályarész kezdő- és végpontjában a szerszámnak érintőlegesen kell haladnia a horony oldalfalai mentén. Ennek a peremfeltételnek az értelmezéséhez tekintsük át az 1. ábrát, ahol b jelöli a horony szélességét, r_t a szerszám sugarát, valamint a horony középvonala egybeesik az Y koordinátatengellyel. Ekkor a következő egyenlőségeknek kell teljesülniük a geometriai peremfeltételek kielégítéséhez: $x_0 = x_1 = b/2 - r_t$, valamint $x_2 = x_3 = -b/2 + r_t$. Vagyis a négy kontrollpont horony tengelyére merőleges pozíciója kötött. Amennyiben a pályamintázat kezdőpontját hozzárendeljük a koordinátatengelyhez ($y_0 = 0$), a forgácsolási pályaszakasz alakját három szabad változóval lehet leírni: y_1 , y_2 és y_3 . A kontrollpontok mellett a pályaalak megadásához szükséges még a trochoidális lépésköz (w) meghatározása is. Mivel a w paraméter növelésével szigorúan monoton növekszik a radiális fogásvétel nagyságát leíró kontaktszög értéke is, ezért a maximális lépésköz kiszámításakor a megengedhető kontaktszög (θ_{max}) nagysága a mérvadó. Az 1. ábrán felvázolt alapesetbe meghatározott pályaalak megfelelő nagyságú eltolásával és elforgatásával tetszőleges helyzetű horony megmunkálása elvégezhető.

Optimalizálás

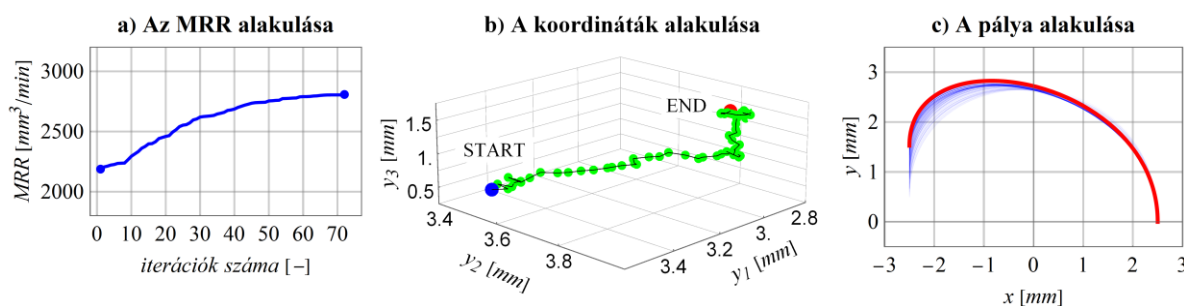
Ahhoz, hogy a Bézier-görbe alapú trochoidális pályamintázat nagyobb termelékenységet biztosítson, mint a hagyományos pályaalakok, a kontrollpontok szabad koordinátáinak (y_1 , y_2 és y_3) optimális megválasztása szükséges. Az optimalizálási célfüggvény az anyagleválasztási sebesség (Material Removal Rate - MRR) maximalizálásaként fogalmazható meg. Az algoritmus kidolgozása során az MRR átlagos értékét a forgácsolási szakaszra vonatkoztattuk, ami az egy periódusban leválasztott anyagmennyiség (Q_p [mm^3]) és a forgácsolási szakasz megtételéhez szükséges idő (t_p [min]) hányadosaként határozható meg:

$$MRR = \frac{Q_p}{t_p} = \frac{b \cdot a_p \cdot w}{l_p / v_f} \left[\frac{mm^3}{min} \right] \quad (1)$$

ahol b [mm] a horony szélessége, a_p [mm] az axiális fogásmélység, w [mm] a trochoidális lépésköz, l_p [mm] a forgácsolási periódus hossza és v_f [mm/min] az előtolási sebesség. Tekintve, hogy a pályamintázat alakja csak a trochoidális lépésköze és a pálya hosszára van hatással, ezért valójában a w/l_p hányados maximalizálása a feladat.

Az optimalizálási korlátot egyrészt a maximális szerszámterhelés kontrollálása jelenti. Ez a w trochoidális lépésköznek a megengedett maximális kontaktszög (θ_{max}) alapján történő meghatározásával vehető figyelembe. Másrészt a nagysebességű pályabejárás biztosítása érdekében arra is ügyelni kell, hogy a pálya ne tartalmazzon olyan kis görbületi sugarú részeket, ahol a szerszámnak a centripetális gyorsulás miatt le kellene lassítania. A szának gyorsulásképségének (a_{max} [mm/min^2]) függvényében megadható az a minimális görbületi sugár, amely mellett még megvalósítható a programozott előtolási sebesség: $\rho_{min} = v_f^2/a_{max}$ [mm].

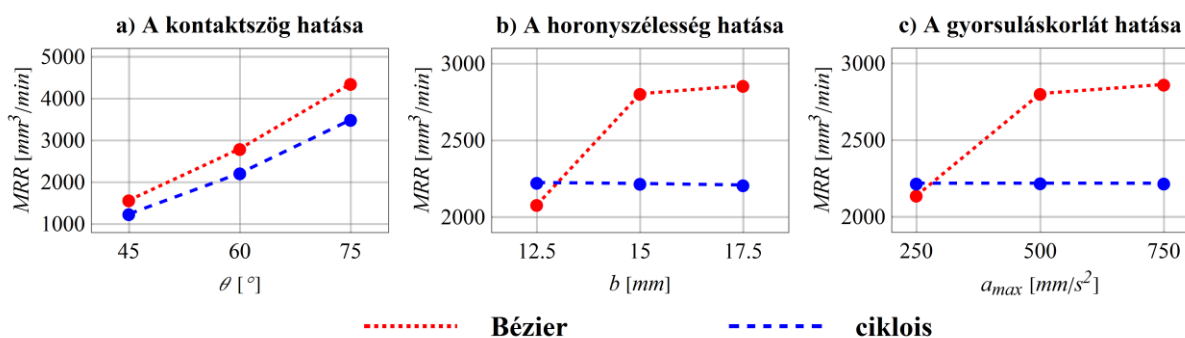
Az optimalizálási feladat matematikailag jól kondicionált, ugyanis a kontrollpontok helyzetének kis változására a célfüggvény értéke is kis mértékben változik. Azonban az optimalizálási korlátok nem vehetőek közvetlenül figyelembe, ezért a gradiens alapú optimalizálási módszerek helyett heurisztikus algoritmusok alkalmazása javasolt. A számos kínálgató lehetőség közül az egyszerűsége okán a sztochasztikus hegymászó algoritmusra esett a választásunk, azonban az optimalizálási eljárás finomítása még további kutatások tárgyát képezheti. A pályaalak fejlődését az optimalizálás során a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A pálya fejlődése a sztochasztikus hegymászó algoritmus lépései során

$$(b = 15 \text{ mm}, a_p = 5, r_t = 5 \text{ mm}, \theta_{max} = 60^\circ, v_c = 200 \frac{m}{min}, v_f = 1275 \frac{mm}{min}, a_{max} = 500 \text{ mm/s}^2)$$

A 2. ábrához tartozó alapbeállításokat referenciaként felhasználva megvizsgáltuk azt is, hogy a kontaktszög, a horonyszélesség, illetve a gyorsuláskorlát változása milyen hatással van az elérhető anyagleválasztási sebességre. Az elemzés azt mutatta, hogy az új pályatervezési stratégiával akár 25-30%-os javulás is elérhető a hagyományos ciklois-jellegű pályákhoz képest, amennyiben az ρ_{min} minimális görbületi sugár nem közelíti meg túlságosan a horonyba írható maximális kör sugarát. A ciklois-jellegű pályatervezési stratégia csak akkor maradt versenyképes a Bézier-görbe alapú optimalizált szerszám pályával, ha a horony túlságosan keskeny volt a szerszámétmérőhöz viszonyítva, illetve ha az ρ_{min} paraméter túlságosan kicsi volt a szának alacsony gyorsulásképsége miatt.

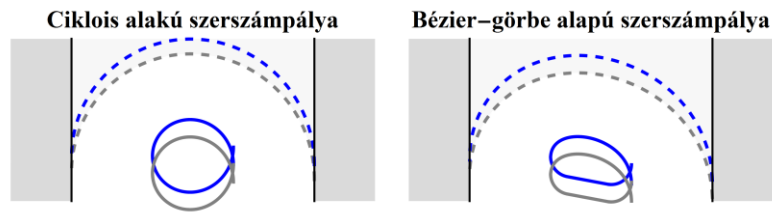


3. ábra A különböző bemeneti paraméterek hatása az elérhető anyagleválasztási sebességre

3. FORGÁCSOLÁSI KÍSÉRLETEK

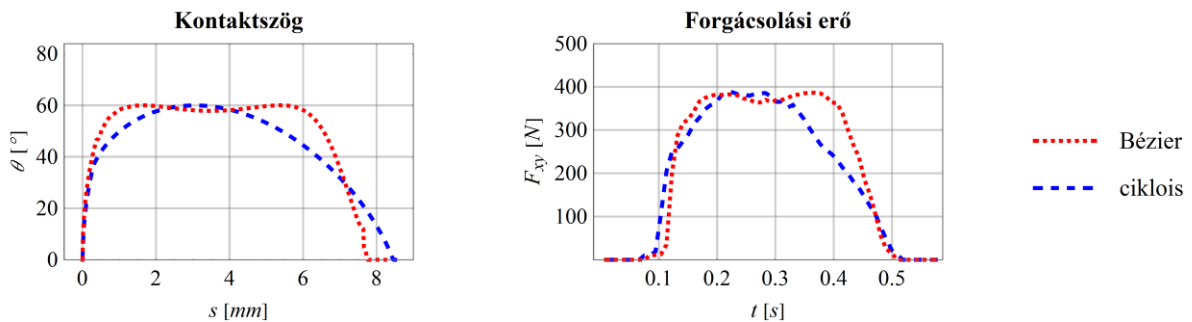
Annak ellenőrzésére, hogy a szerszámterhelés valóban kontrollált marad-e az új pályatervezési stratégia alkalmazásakor, forgácsolási kísérleteket hajtottunk végre. A méréseket egy KONDISIA 640B típusú 3-tengelyes megmunkáló központban végeztük el. A szerszámkopás hatásának minimalizálása érdekében a munkadarab anyagának egy könnyen forgácsolható alumínium ötvözetet (Al6061) választottunk. A forgácsoláshoz egy $\varnothing 10$ mm átmérőjű, két élű, bevonat nélküli keményfém szármáró szerszámot (Gühring DIN 6527L, $\lambda = 45^\circ$ -os spirálszög) használtunk elárasztásos hűtés mellett. A munkadarabra ható forgácsolási erőt egy Kistler 9257B típusú, háromkomponensű piezoelektromos erőmérő szenzor segítségével mértük. A kiértékelés során a forgácsolási erő megmunkálás síkjába eső vetületét (F_{xy}) elemeztük.

A forgácsolási kísérleteket különböző kontaktszög és horonyszélesség értékek mellett is elvégeztük. Minden esetben bizonyítást nyert, hogy azonos maximális kontaktszög mellett a forgácsolási erő maximuma sem növekedett. A vizsgált beállítások közül a 2. ábrán bemutatott alapesethez tartozó szerszám pályák a 4. ábrán láthatóak. Az optimalizált szerszám pályája forgácsolási szakaszait érintőlegesen csatlakozó körívvel és egyenes összekötő szakaszokkal kapcsoltuk össze.



4. ábra A ciklois alakú és az optimalizált Bézier-görbe alapú szerszám pályák összehasonlítása

A 4. ábrán látható szerszám pályák mentén számolt kontaktszög alakulását, illetve a kísérlet során mért forgácsolási erőket az 5. ábra szemlélteti. A diagramok alapján jól látható, hogy a pályaalak optimalizálása nem befolyásolta a maximális erőértékeket, viszont a szerszám hosszabb ideig dolgozhatott a megengedett terhelés közelében, ami a megmunkálás termelékenységének növelése szempontjából kulcsfontosságúnak tekinthető.



5. ábra A kontaktszög és a forgácsolási erő alakulása a pálya mentén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalásképpen elmondható, hogy az új pályatervezési stratégia alkalmazásával a szerszám maximális terhelésének növekedése nélkül sikerült növelni a megmunkálás termelékenységét. A kifejlesztett pályatervezési eljárás egyelőre csak az egyenes hornyok trochoidális marásánál került részletesebb vizsgálat alá, azonban a kontrollpontok számának növelésével a bonyolultabb geometriák kezelésére is adottak a lehetőségek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az 2017-1.3.1-VKE-2017-00029 (Moduláris digitális gyártástechnológiai keretrendszer és szolgáltatások fejlesztése KKV-k számára) és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap ED_18-2-2018-0006 (Kutatások az ipari digitalizáció által nyújtott potenciál minőségi kiaknázására) projektek támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] M. Otkur és I. Lazoglu, „Trochoidal milling”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 47, sz. 9, o. 1324–1332, júl. 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.002.
- [2] D. Liu, Y. Zhang, M. Luo, és D. Zhang, „Investigation of Tool Wear and Chip Morphology in Dry Trochoidal Milling of Titanium Alloy Ti–6Al–4V”, *Materials*, köt. 12, sz. 12, o. 1937, jún. 2019, doi: 10.3390/ma12121937.
- [3] A. Pleta, F. A. Niaki, és L. Mears, „A comparative study on the cutting force coefficient identification between trochoidal and slot milling”, *Procedia Manuf.*, köt. 26, o. 570–579, jan. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.067.
- [4] Szalóki István, Csuka Sándor, Csesznok Sándor, és Sipos Sándor, „Can trochoidal milling be ideal?”, *XXI Conf. GTE*, 2012.
- [5] A. Pleta, F. A. Niaki, és L. Mears, „Investigation of Chip Thickness and Force Modelling of Trochoidal Milling”, *Procedia Manuf.*, köt. 10, o. 612–621, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.063.
- [6] A. Jacso, G. Matyasi, és T. Szalay, „Trochoidal tool path planning method for slot milling with constant cutter engagement”, *Lect. Notes Mech. Eng.*, o. 8, 2020.