

A dinamikus marási szerszámpályák hatékonyságának növelése az összekötő mozgások optimalizálásával

Increasing the efficiency of dynamic milling tool paths by optimizing the linking movements

Dr. JACSO Ádám¹, TANCSA Viktor², TÓTH-MOLNÁR Gellért³

^{1,2,3} BME, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék
cím: H-1111, Budapest, Műgyetem rakpart 3., tel.: +36 1 463 1875
e-mail: jacso.adam@gpk.bme.hu¹, tancsav@edu.bme.hu², tothmgellert@gmail.com³
honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

Over the past two decades, rough milling operations have been developing remarkably, thanks to the emergence of dynamic milling strategies. Through complex geometric calculations, modern CAM systems can create tool paths that ensure uniform tool load and continuous path curvature, which are essential in dynamic milling, but at the same time, they do not emphasise optimising the linking movements. The paper presents a method that can significantly reduce machining time by refining linking movements while preserving tool life.

Keywords: dynamic milling, linking movements, tool path optimisation, machining time

Kivonat

Az elmúlt két évtizedben a nagyoló forgácsolási műveletek látványos fejlődésen mentek keresztül a dinamikus marási stratégiák megjelenésének köszönhetően. A korszerű CAM rendszerek összetett geometriai számítások révén képesek olyan szerszámpályákat létrehozni, amelyek biztosítják a dinamikus marásnál létfontosságú egyenletes szerszámterhelést és folytonos pályagörbületet, ugyanakkor az összekötő mozgások optimalizálására nem fektetnek kellő hangsúlyt. A cikkben egy olyan algoritmus kerül bemutatásra, amely ezen mellékmozgások finomításával lehetővé teszi a megmunkálási idő jelentős csökkenését a szerszám éltartamának megőrzése mellett.

Kulcsszavak: dinamikus marás, összekötő mozgások, szerszámpálya optimalizálás, megmunkálási idő

1. BEVEZETÉS

A gyártásban alapvető cél a megmunkálás minőségének és hatékonyságának a növelése. A nagyoló forgácsolási műveleteknél különösen az utóbbi követelmény kielégítése bír kiemelkedő fontossággal. A nagyoló szerszámpályák tervezése már hosszú évtizedek óta a kutatások fókuszában áll, ennek ellenére jelenleg is a hagyományos 2.5D-s marási stratégiák, azaz az iránypárhuzamos- és a kontúrpárhuzamos stratégiák tekinthetők a legelterjedtebb megoldásoknak [1]. Azonban ezek a stratégiák számos hiányossággal rendelkeznek. Egyrészt ezeknél a megoldásoknál a pálya sarkos irányváltásokat tartalmaz, ami miatt a valós előtolási sebesség sokszor elmarad a programozott értéktől. Másrészt a szerszám terhelése is extrém mértékben ingadozhat a pálya mentén, ami miatt a forgácsolási paraméterek csökkentése válik szükségessé. Vagyis ezek a stratégiák sem az éltartam, sem a megmunkálási idő szempontjából nem nyújtanak optimális megoldást [2].

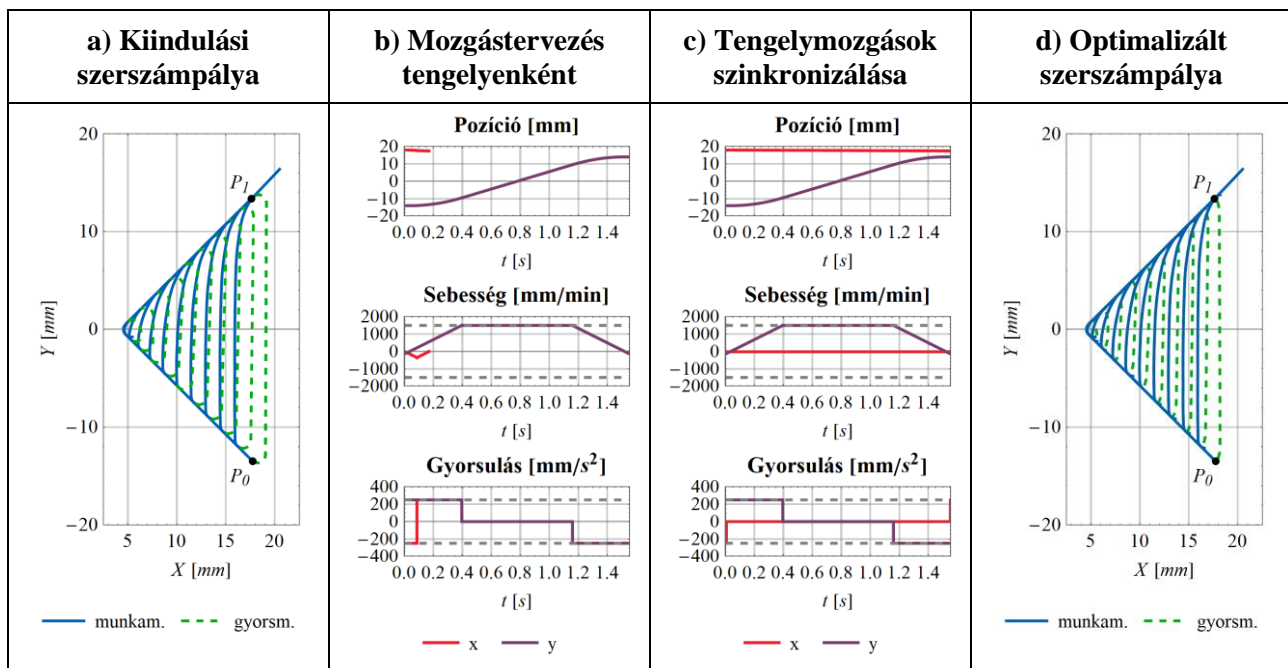
A hagyományos stratégiák hiányosságainak kiküszöbölése érdekében az elmúlt két évtizedben új trendek jelentek meg a nagyoló marási szerszámpályák tervezésénél. A korszerű CAM rendszerek lehetővé tették, hogy a technológia szempontok jobban érvényesüljenek, hiszen a számítási teljesítmény növekedésével bonyolultabb geometriai számítások is megoldhatóvá váltak a pályatervezés során. A szerszám terhelésének kontrollálásával lehetőség nyílt a dinamikus marási stratégiák alkalmazására, ahol kis (nagyságrendileg 10-25%-os) oldallépés mellett a hagyományos technológiáknál megszokott értékekhez képest lényegesen nagyobb (akár többszörös) fogásmélység, előtolás és forgácsolási sebesség engedhető meg [3, 4]. A szerszám éltartamának szempontjából egyaránt kedvező, hogy a nagy axiális fogásmélységnek köszönhetően a

szerszámkopás nagyobb felületen oszlik el, illetve az alacsony kontaktszög ($\theta \leq 60^\circ$) miatt kevesebb hőt vesz fel a szerszám [5]. A sebességparaméterek növeléséhez azonban elengedhetetlen a szerszám terhelésének szabályozása, hiszen enélkül az impulzusszerű erőnövekedések könnyen szerszámtöréshez vezethetnének. A megfelelő feltételek biztosítása érdekében sokszor hurkolt szerszám pályát kell alkalmazni, ahol forgácsolási és összekötő mozgásszakaszok váltogatják egymást. Különösen igaz ez a nehezen hozzáférhető területek, például zsebek, sarkok és hornyok megmunkálása esetén. A forgácsolási szakaszok alakjának optimalizálására számos olyan megoldást dolgoztak ki, amelyek az előzőekben említett feltételeknek eleget tesznek [6, 7], azonban az összekötő mozgások tervezésére eddig kevés figyelmet fordítottak. Rendszerint a korszerű CAM rendszerek is csak egy növelt előtolási sebességgel megtett egyenes szakaszt, illetve egy-egy érintőlegesen csatlakozó körív menti be- és kigördülési szakaszt alkalmaznak a forgácsolási szakaszok összekötéséhez [8]. Az alábbi cikkben egy olyan módszer kerül bemutatásra, amely erre a hiányosságra kínál hatékony megoldást.

Az összekötő mozgások optimalizálásakor az volt az elsődleges cél, hogy a pályabejáráshoz szükséges idő minimális legyen. Az optimalizálási korlátokat az jelentette, hogy a pályaszakaszok C^1 matematikai folytonossággal rendelkezzenek, ami folytonos sebességfüggvényeket biztosít, illetve a szerszám gép sebessége és a gyorsulás korlátai is figyelembevételre kerüljenek. A szerszám pályája forgácsolási szakaszaival a jelen tanulmány nem kíván foglalkozni. Az összekötő mozgások optimalizálásának lépései a következő fejezetben kerülnek bemutatásra.

2. AZ ÖSSZEKÖTŐ MOZGÁSOK OPTIMALIZÁLÁSÁNAK LÉPÉSEI

Az algoritmus kidolgozása során csak a 2.5D-s nagyoláshoz alkalmazott dinamikus marási szerszám pályákra fókuszáltunk. Ennél a stratégiánál a pálya trochoidális jellegű részeket is tartalmaz, ahol a forgácsolási pályaszakaszok rövid összekötő mozgásokkal vannak összekapcsolva. Általában ezeken a szakaszokon a szerszám nem kerül kiemelésre a biztonsági síkig, hanem vagy a megmunkálás síkjában marad, vagy csak néhány tizedmilliméternyi távolságra emelkedik el a már megmunkált felülettől. Ebből adódóan a mozgásokat elegendő a megmunkálás síkjában, azaz az X-Y fősíkban vizsgálni.



1. ábra Az összekötő mozgások optimalizálásának lépései

Az algoritmus kidolgozásánál azt feltételeztük, hogy számítások megkezdésekor rendelkezésre áll egy CAM rendszerrel generált referencia szerszám pályája (lásd 1/a ábra). Az összekötő mozgások optimalizálásának első lépéseként külön kell választani azokat a pályaszakaszokat, ahol nem történik anyagleválasztás (az ábrán zöld szaggatott vonallal jelölt szakaszok), majd meg kell határozni ezen szakaszok végpontjaiban a peremfeltételeket, azaz a végpontok koordinátáit (P_0, P_1) és a hozzájuk tartozó sebesség- (\vec{v}_0, \vec{v}_1) és gyorsulásvektorokat (\vec{a}_0, \vec{a}_1). Az összekötő mozgások optimalizálását ezután külön-külön lehet végrehajtani.

A megmunkálóközpontok rendszerint soros kinematikával rendelkező szerszámgépek, ezért az optimális mozgásokat a tengelyekkel párhuzamos komponensekre bontva külön-külön érdemes kiszámítani.

Tekintve, hogy adottak a végpontokhoz tartozó koordináták, illetve a sebesség- és gyorsulásvektorok, meghatározhatóak azok a trapézalakú sebességprofilok, amelyekkel a két pont közötti leggyorsabb út megvalósítható (lásd az Y-irányú mozgást az 1/b ábrán). A sebességprofil konstans szakasza a maximális sebességgel esik egybe, míg a lassuló és gyorsuló szakaszokhoz tartozó meredekség a gyorsuláskorlátok alapján határozható meg. Ha a kezdő- és végpont közötti távolság adott tengely menti vetülete túlságosan rövid, akkor elképzelhető, hogy a szán nem tudja elérni a maximálisan megengedett sebességet. Ekkor a trapéz alakú sebességprofil egy háromszög alakú sebességprofilá fajul (lásd az X-irányú mozgást az 1/b ábrán).

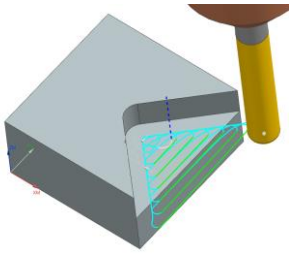
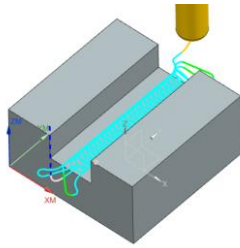
Mivel a tengelymozgásokat egymástól különválasztva kerültek meghatározásra az optimális sebességprofilok, a két tengely mentén különböző nagyságú idő szükséges a kezdő- és végpont közötti távolság megtételéhez. A pályatervezésnél természetesen ez nem engedhető meg, ezért a két mozgást szinkronizálni kell egymáshoz. Ez lényegében azt jelenti, hogy annak a tengely mozgását, amelyik kevesebb idő alatt is képes lenne célba érkezni, időben elnyújtva hozzá kell igazítani a másik tengely mozgásához (lásd 1/c ábra). Erre több módszer is kínálkozik. Mi ezek közül azt a megoldást választottuk, hogy a maximális sebességet csökkentve egy elnyújtott trapéz alakú profillal adtuk meg a lassítandó tengelyhez tartozó sebességprofil. Ezzel a módszerrel a gyorsulásra vonatkozó peremfeltételek és korlátok is könnyen figyelembe vehetőek.

A tengelymozgások szinkronizálását követően rendelkezésre áll az összekötő mozgásszakaszok idő szerinti paraméteres egyenlete. Amennyiben a szerszámgép vezérlése képes spline görbéket kezelni, érdemes élni ezzel a lehetőséggel, mivel így megőrizhető a kiszámolt pálya C^1 folytonossága. Ellenkező esetben a pálya vonallánccal való közelítése jelenthet megoldást. Ha megfelelő lépésközzel végezzük el a pálya felbontását, akkor a vezérlés képes lesz akadozás nélkül feldolgozni a lineáris mozgásszakaszokat megadó NC mondatokat, az interpolátor pedig el tudja simítani az elemi pályaszakaszok összeillesztéséből fakadó apró irányváltásokat.

Az előző lépéseket az összekötő szakaszokra külön-külön végrehajtva a szerszámpálya egészén elvégezhető az összekötő mozgások optimalizálása (lásd 1/d ábra). Szemmel látható, hogy az optimalizálás során jelentősen lerövidült az összekötő pályaszakaszok hossza. Azonban ennél is fontosabb, hogy olyan görbeívek kerültek meghatározásra, amelyek a szerszámgép képességeihez mérten a lehető legrövidebb idő alatt képesek összekapcsolni a szerszámpálya forgácsolási szakaszait. Az összekötő mozgások optimalizálásával elérhető ciklusidőcsökkenés mértékének szemléltetésére a következő fejezetben bemutatott esettanulmányok szolgálnak gyakorlati példákkal.

3. A KIDOLGOZOTT ALGORITMUS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

A kifejlesztett pályaoptimalizálási algoritmust két esettanulmányon keresztül értékeltük, ahol az NX CAM Adaptív marási stratégiáját választottuk referenciának. Az első mintageometria egy 20 mm oldalhosszúságú, 5 mm mély, derékszögű konvex sarok, a második egy 30 mm hosszú, 10 mm széles és szintén 5 mm mély horony volt (lásd 2. ábra). A megmunkáláshoz egy $\varnothing 6$ mm-es, 3 élű, keményfém szármaró szerszámot használtunk 150 m/min-es forgácsolási sebesség és 0.025 mm-es élenkénti előtolás mellett, ami 600 mm/min előtolási sebességet eredményezett. Az oldallépés nagyságának a szerszámtátmérő 25%-át, azaz 1.5 mm-et állítottunk be. Az összekötő mozgások maximális sebességénél 1500 mm/min-t engedélyeztünk, a szerszámgép szánjainak maximális gyorsulása 250 mm/s² volt.

Sarok maradéknagyolása		Trochoidális horonymarás	
			
NX Adaptív marás str.	Optimalizált	NX Adaptív marás str.	Optimalizált
36 s	30 s (-17%)	61 s	46 s (-25%)

2. ábra Esettanulmányok a pályaoptimalizálás hatékonyságának értékeléséhez

A 2. ábrán feltüntettük az eredeti szerszám pályákhoz tartozó, illetve az összekötő mozgások optimalizálása után mért ciklusidőket. Mindkét geometriánál a szerszám pályája hosszának körülbelül a felét az összekötő mozgások tették ki. A sarok maradéknagyolásánál a be- és kigördülési szakaszok hosszának relatív részaránya valamelyest alacsonyabb volt, azonban ebben az esetben is sikerült 17%-os csökkentést elérni a megmunkálási időben. A trochoidális horonymarásnál, ahol a be- és kigördülési szakaszok részaránya magasabb volt, még ennél is nagyobb javulást sikerült elérni, ugyanis épp a negyedével csökkent a ciklusidő. A hatékonyság ilyen mértékű javulásának jelentőségét tovább növeli az a tény, hogy ez nem a szerszám éltartamának rovására történik, hiszen az összekötő mozgások során a szerszám egyáltalán nem is érintkezik az anyaggal. Összefoglalásképpen tehát elmondható, hogy mindkét esettanulmány meggyőzően alátámasztotta a kidolgozott algoritmus létjogosultságát és az optimalizálás fontosságát.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott esettanulmányok igazolták, hogy a korszerű CAM rendszerek által generált dinamikus marási szerszám pályák esetén jelentős tartalékok álnak rendelkezésre a megmunkálás hatékonyságának növelésére. Bizonyos esetekben az összekötő mozgások optimalizálásával akár 25%-os ciklusidő csökkenést is elérni lehet. Ennek megvalósításához azonban elengedhetetlen a szerszám gép képességeinek szem előtt tartása a szerszám pályája tervezése során. Reményeink szerint az alábbi kutatás is hozzájárulhat ahhoz, hogy a CAM rendszerek nagyobb hangsúlyt fektessenek erre a területre.

Természetesen a cikkben bemutatott algoritmus képességeinek kibővítésére számos továbbfejlesztési lehetőség kínálkozik. Különösen nagy előtolási sebességek esetén a gyorsulásváltozás folytonosságát is biztosítani kell, ami C^2 matematikai folytonossággal rendelkező pályagörbék alkalmazását teszi szükségessé. Valamint a komplexebb geometriák esetén külön vizsgálatokat kell végezni arra vonatkozóan is, hogy a szerszám ne érjen a munkadarabhoz a visszaállások során, amit egy automatikus ütközésellenőrzéssel lehetne megvalósítani.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány, valamint a TKP-6-6/PALY-2021 számú projekt Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg. A konferencián való részvétel az Európai Bizottság H2020 - EPIC (No. 739592) projektjének támogatásával valósulhatott meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] X. Yang, X. Cai, W. Yang, and Y. You, 'Novel Tool Path Generation Method for Pocket Machining Using Sound Field Synthesis Theory', *Machines*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/machines11020131.
- [2] Y. Li, C.-H. Lee, and J. Gao, 'From computer-aided to intelligent machining: Recent advances in computer numerical control machining research', *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2015, doi: 10.1177/0954405414560622.
- [3] A. Jacso, G. Matyasi, and T. Szalay, 'The fast constant engagement offsetting method for generating milling tool paths', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, May 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03834-8.
- [4] A. Jacso and T. Szalay, 'Optimizing the numerical algorithm in Fast Constant Engagement Offsetting Method for generating 2.5D milling tool paths', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 108, no. 7, Art. no. 7, Jun. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05452-1.
- [5] D. Liu, Y. Zhang, M. Luo, and D. Zhang, 'Investigation of Tool Wear and Chip Morphology in Dry Trochoidal Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V', *Materials*, vol. 12, no. 12, Art. no. 12, Jun. 2019, doi: 10.3390/ma12121937.
- [6] A. Jacso, B. S. Sikarwar, R. K. Phanden, R. K. Singh, J. Ramkumar, and G. N. Sahu, 'Optimisation of tool path shape in trochoidal milling using B-spline curves', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 121, no. 5, pp. 3801–3816, Jul. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09527-z.
- [7] 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.*, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.056.
- [8] A. Gerencser and A. Jacso, 'CAM rendszerek korszerű nagyoló ciklusainak kísérleti és szimulációs vizsgálata', *XXVII Nk. Gép. Konf. OGÉT 2019*, no. pp. 145-148., Art. no. 145-148., 2019.