



Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj
SZAKMAI BESZÁMOLÓ

**Mesterséges intelligencia alapú
alkalmazások fejlesztése nagysebességű
CNC marási szerszámpályák tervezéséhez**

JACSÓ ÁDÁM

tudományos segédmunkatárs
BME – GPK, Gyártástudomány és -technológia Tanszék

Noida, 2022

1. Bevezetés

A 2021. 09. 06. és 2022. 02. 09. közötti időszakot a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíjnak köszönhetően az indiai Amity University vendégkutatójaként tölthettem el. Az eredeti terveim szerint 2022. 01. 30-én utaztam volna haza, azonban a BME-n szokatlanul késői, február 14-i félévkezdés lehetővé tette, hogy a budapesti és az indiai tanszékek vezetőivel egyeztetve bő egy héttel meghosszabbíthassam a tanulmányutamat.

Az Amity University noidai központjában működő Amity School of Engineering and Technology kar Department of Mechanical Engineering tanszéke nagy szeretettel fogadott, amit mi sem bizonyít jobban, hogy már az első héten külön irodát kaptam, és a tanszéki honlapon is felkerültem a munkatársak közé. Ezen kívül jogosultságot kaptam a tanszék CNC megmunkáló központjának használatára is. Az együttműködő kollégák közül ki kell emelnem a tanszék vezetőjét, Dr. Basant Singh Sikarwart, aki a kutatási projekt helyi koordinátoraként segítette a munkámat. Ezen kívül hálával tartozom Dr. Rakesh Kumar Phandennak és Dr. Rajeev Kumar Singhnek, akik mind a szakmai munkában, mind a beilleszkedésben végig támogattak az Indiában eltöltött idő során.

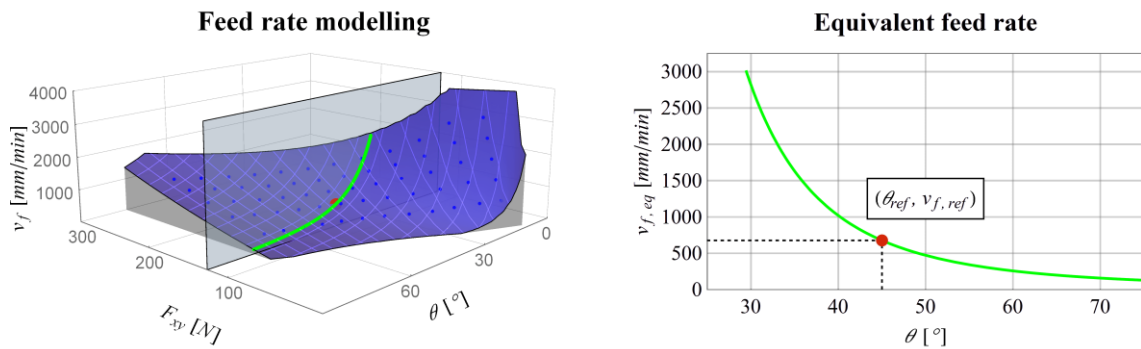
Sikarwar professzor kapcsolatainak köszönhetően, aki maga is Kanpurban szerezte a doktori fokozatát, volt szerencsém két hetet az Indian Institute of Technology (IIT) kanpuri kampuszán is eltölteni, ahol Manufacturing Science Laboratory fogadott vendégként. Szakmailag ez a kéthetes időszak is rendkívül hasznosnak bizonyult, hisz az itteni tanszék kompetenciái szinte teljes fedésben vannak a küldő intézményem, azaz a BME Gyártástudomány és -technológia tanszék kutatási és oktatási területeivel. Ezenkívül a publikációkhoz szükséges forgácsolási kísérleteket is itt végeztem el, kihasználva a mérésekhez rendelkezésre álló fejlett eszközparkot. A Kanpurban megismert kollégáknak köszönhetően egy harmadik egyetemet is megismerhettem, mivel az egyikük az IIT egyetemhálózat újdelhi kampuszára került át a doktori fokozat megszerzése után, és egy egynapos látogatás keretében bemutatta a fővárosi intézmény laborjait is.

Az Indiában töltött időszakra egyedül a vírushelyzet vetett árnyékot. A koronavírus miatti korlátozások miatt mind az őszi, mind a januárban kezdődő tavaszi félévben online oktatás zajlott, így a kampusz több mint 35000 hallgatójának csak a töredéke tartózkodott az egyetemen. Jelenléti gyakorlatot csak elvétve láthattam, az online oktatást tekintve pedig főként csak a tananyagot illetően történtek eszmecserek.

2. Az elért kutatási eredmények

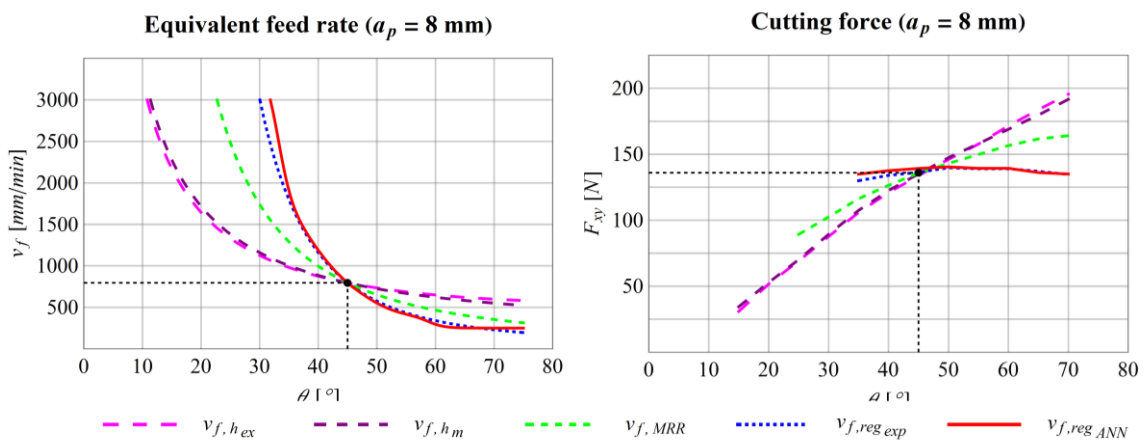
A munkatervben egy olyan új pályagenerálási módszer kifejlesztését tűztem ki célul, amely a szerszám előtolási sebességének szabályozására, illetve a pálya alakjának optimalizálására épül. Ennek megfelelően az alábbi három mérföldkövet lehetett kijelölni: az előtolási sebességet szabályozó metódus kidolgozása, a szerszám-pálya alakját optimalizáló algoritmus kidolgozása, illetve a két metódus összekapcsolása.

Az előtolási sebesség offline módon történő szabályozására egy mesterséges neurális hálózaton alapuló módszert dolgoztam ki. Minimális számú forgácsolási előkísérlet alapján a neurális hálózat megtanítható arra, hogy képes legyen megadni, hogy a szerszám pillanatnyi bemerülésének függvényében mekkora előtolási sebesség mellett marad a szerszámot terhelő erő a megadott határon belül.



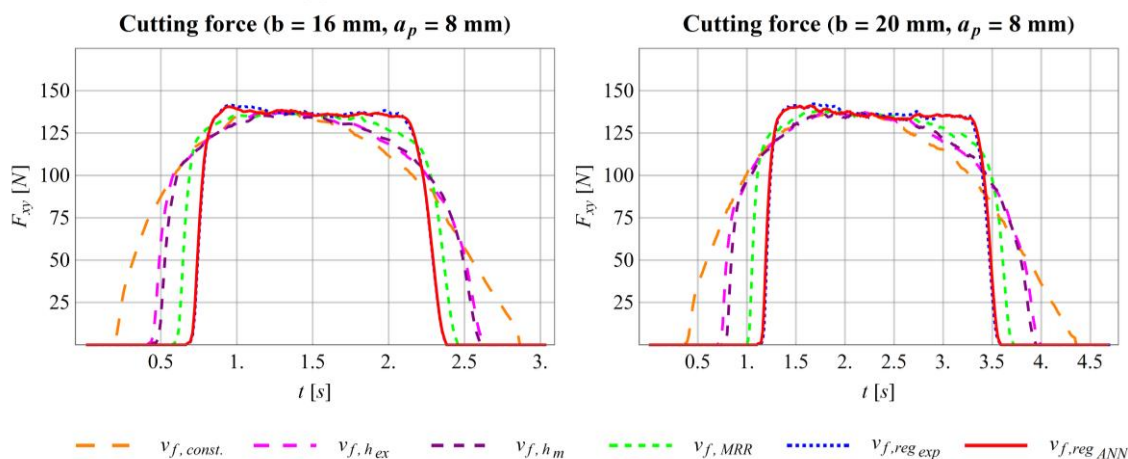
1. ábra A megfelelő előtolási sebesség meghatározása neurális hálózat segítségével változó kontaktszög esetén

A neurális hálózatok használatának előnye elsősorban abban nyilvánul meg, hogy általános alkalmazhatóságot tesz lehetővé, és a hagyományos módszerekhez képest lényegesen kevesebb előzetes információ és mérési eredmény szükséges a megbízható alkalmazásához, így könnyebben adaptálható a változó gyártási feladatokhoz. Az előtolási sebességet szabályozó modult a tangenciális és centripetális gyorsulások figyelembevételével is kiegészítettem, aminek köszönhetően a megmunkálási idő pontosan megbecsülhetővé válik, ami nélkülözhetetlen jelentőséggel bír mind a pályaalak, mind a forgácsolási paraméterek meghatározásának szempontjából. A kidolgozott módszer tesztelésére különböző forgácsolási kísérleteket végeztünk. Az egyenes menti marás közben végzett mérések azt mutatták, hogy a forgácsolási erő kontrollálását tekintve a neurális hálózat alapú módszer messzemenően képes felülmúlni a geometriai módszerekre épülő előtolás szabályozási módszereket, illetve a regressziós modellektől is pontosabb eredményt képes nyújtani.



2. ábra A különböző előtolás szabályozási módszerek összehasonlítása egyenes menti marás esetén

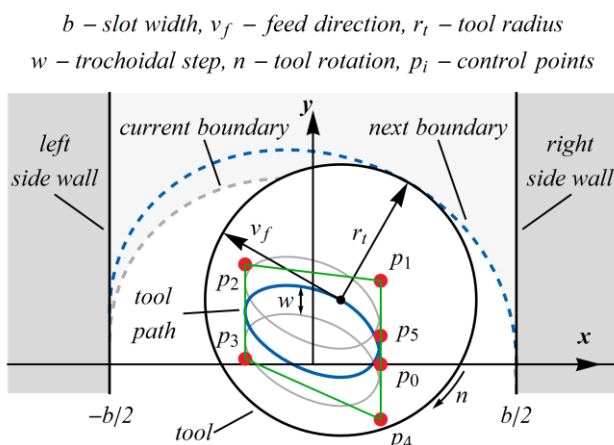
A trochoidális marás közben végzett vizsgálatok emellett azt is igazolták, hogy az előtolás megfelelő szabályozásával jelentős mértékben csökkenthető a megmunkálási idő. A hagyományos ciklois alapú stratégiát alkalmazva a kísérletek során a ciklusidőt tekintve 50%-os csökkenést is elérni lehetett az általánosan alkalmazott konstans előtolás kiváltásával.



3. ábra A különböző előtolás szabályozási módszerek összehasonlítása trochoidális marás esetén

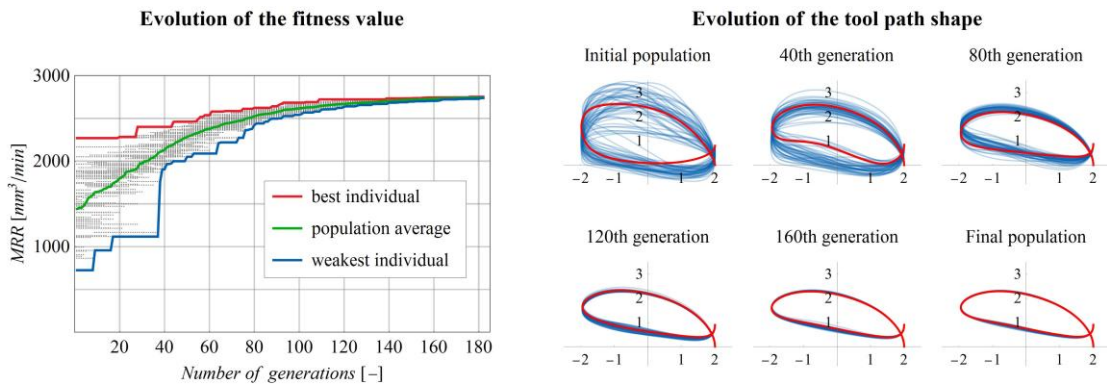
A kidolgozott módszert összefoglaló publikáció (ANN-based feed rate scheduling with cutting force and acceleration constraints in trochoidal milling) jelenleg a társszerzők jóváhagyására vár, és a következő hetekben egy Q1-es folyóiratba tervezzük benyújtani.

A pályaalak optimalizálásának megvalósításához a nagysebességű megmunkálások egyik sarkalatos pontjához, nevezetesen a trochoidális jellegű megmunkálásokhoz hoztam létre egy innovatív pályagenerálási módszert. Első lépésben a megfelelő pályamodellizési és optimalizálási keretrendszer kidolgozása volt a célom. Az előtolási sebesség szabályozását csak később integráltam a pályatervezési folyamatba, ezért kiindulásként az egységnyi pályahossz alatt leválasztott anyagmennyiség maximalizálását választottam optimalizálási célfüggvénynek. A pálya modellezésénél többféle spline-alapú görbecsaládot is teszteltem, végül a B-spline alkalmazására esett a választásom a CNC technológiában való elterjedtsége és a rugalmas felhasználhatósága miatt.



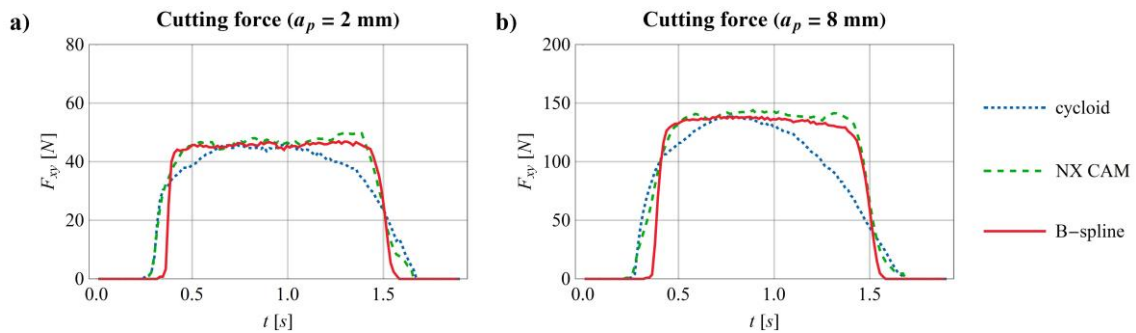
4. ábra A trochoidális pályalak egy periódusának modellezése B-spline görbével

A pályaalak optimalizálásához egy olyan algoritmust dolgoztam ki, amely a pályát leíró spline görbe kontrollpontjainak megfelelő megválasztásával képes biztosítani a minimális megmunkálási időt. A spline optimális alakjának meghatározásához a kollégákkal történt konzultációknak is köszönhetően egy differenciál evolúciós optimalizálási eljárást fejlesztettem ki, ahol a megoldásjelöltek kiértékelésekor a pályabejáráshoz szükséges idő minimalizálása jelenti a célfüggvényt, az optimalizálási korlátokat pedig a megmunkálási környezet sajátosságai, azaz a technológiai korlátok és a szánok gyorsulásképeségei adják.



5. ábra A trochoidális pályaalak optimalizálása egy differenciál evolúciós eljárás segítségével

A kifejlesztett pályaoptimalizálási stratégiát kísérleti és szimulációs vizsgálatoknak vetettük alá. Az összehasonlító elemzésben a hagyományos ciklois alakú szerszám-pálya mellett az NX CAM rendszer modern nagyolási ciklusát, az Adaptive Milling stratégiát is górcső alá vettük. A kísérletek eredményei azt mutatták, hogy a hagyományos ciklois alakú szerszám-pályához képest akár 50% feletti, az Adaptive Milling ciklushoz képest 5-15% körüli csökkenést tett lehetővé az optimalizált pályaalak. Emellett a forgácsolási erő kontrollálását is pontosabban valósította meg, mint a másik két megoldás.



6. ábra A forgácsolási erő alakulása különböző trochoidális pályaalakok esetén

A kidolgozott módszert összefoglaló publikációt (Optimisation of tool path shape in trochoidal milling using B-spline curves) egy Q1-es folyóiratba nyújtottuk meg, ahol a bírálók „Major Revision”-t kértek, de a javítások elvégzése esetén támogatnák a cikk megjelenését.

A neurális hálózat alapú eltolás szabályozási módszer és a differenciál evolúciós alapú pályaoptimalizálása algoritmus összekapcsolását is sikerült megvalósítani. Ehhez csupán arra volt szükség, hogy a különböző pályaalakok értékelése az anyagleválasztási sebesség alapján történjen, és ne a pályahossz és az eltávolított anyagmennyiség térfogata alapján. Ezzel a megoldással a szerszám-gép szánjainak gyorsulásképeségei és a megmunkálás stabilitásának megőrzése egyidejűleg is figyelembevételre kerülhet, amely a korábbi módszerekhez képest óriási előrelépést jelent. A kifejlesztett módszerrel létrehozott pályaalakokkal is elvégeztük a forgácsolási kísérleteket, és az eredmények igazolták, hogy a megmunkálási időt tekintve jelentős csökkenés érhető el. Az eredmények pontos kiértékelése, és az algoritmus szimulációs környezetben történő részletes elemzése még folyamatban van. Amennyiben a benyújtott publikációk elfogadásra kerülnek, azokra hivatkozva a teljes módszer is bemutatásra kerülhet a kiszemelt folyóirat terjedelmi korlátainak megsértése nélkül. A tervek szerint az elért eredményeket szintén egy impakt faktoros folyóiratban szeretnénk majd publikálni az alábbi címmel: Time-optimal trochoidal tool path planning with cutter engagement and acceleration limitations using B-spline curves.

A kutatómunka mellett volt lehetőségem egy előadást tartani a kutatási tématerületemről a fogadó tanszék munkatársai előtt az alábbi címmel: Developing new tool path generation algorithms for high-speed CNC milling involving artificial intelligence methods. Emellett különböző webinariumokon tarthattam rövid prezentációkat, és egy konferencia cikk elkészítésében is együttműködtem a tanszéki kollégákkal.

3. Összefoglalás

Az elmúlt 5 hónapban elvégzett kutatómunka során sikerült jelentős eredményeket elérnem a trochoidális szerszám pályák tervezésének területén. A későbbiekben a kidolgozott módszerek a nagysebességű megmunkálások egyéb területeire, például a sarkok maradéknagyolásához, illetve a zsebek marásához is felhasználhatók lesznek. Az egyedüli szűk keresztmetszetet a számításokhoz szükséges idő jelenti, amin az ipari alkalmazhatósághoz még javítani kell. A munka során számos ötlet született ennek megvalósítására, mint például a neurális hálózatok alkalmazásának bevonása az előtolás szabályozása mellett a pályaalak optimalizálásának területére is. Ezzel az Ipar 4.0-s technológiák irányvonalát követve új távlatok nyílhatnak meg a marási szerszám pályák tervezésének területén.

A kutatási együttműködés mind az én, mind az indiai partner intézmény szempontjából gyümölcsözőnek bizonyult. Az indiai partner máris jelezte, hogy szívesen támogatná az egyetemi kollégáim részvételét az általuk megrendezésre kerülő Future Learning Aspects of Mechanical Engineering (FLAME 2022) elnevezésű konferencián. Emellett az Amity University két fiatal kollégája is megpályázott egy indiai állami finanszírozású mobilitási ösztöndíjat, amellyel 2-6 hónapot tölthetnének a BME egy-egy kutatócsoportjánál. Valamint a kutatási témámmal az Amity University és az IIT közötti kapcsolatokat is sikerült felélnékítenem.

Az ösztöndíj a nemzetközi kapcsolatok építése mellett a személyes és szakmai fejlődésre is megteremtette számomra a lehetőséget. A jövőben igyekezni fogok, hogy a megszerzett tudást és tapasztalatot az oktatási tevékenységem és az ipari jellegű kutatási projektek során is hasznosítani tudjam, meghálálva ezzel az ösztöndíj elnyerésekor kapott bizalmat.

4. Elkészült publikációk

- JA1 Adam Jacso, Basant Singh Sikarwar, Rakesh Kumar Phanden, Rajeev Kumar Singh, Janakarajan Ramkumar, Govind N. Sahu: Optimisation of tool path shape in trochoidal milling using B-spline curves, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, JAMT-D-22-00057 (major revision)
- JA2 Adam Jacso, Szalay Tibor, Basant Singh Sikarwar, Rakesh Kumar Phanden, Rajeev Kumar Singh, Janakarajan Ramkumar: ANN-based feed rate scheduling with cutting force and acceleration constraints in trochoidal milling (benyújtás előtt)
- JA3 Rakesh Kumar Phanden, S.V. Aditya, Aaryan Sheokand, Kapil Kumar Goyal, Pardeep Gahlot, Adam Jacso: A state-of-the-art review on implementation of digital twin in additive manufacturing to monitor and control parts quality, Materials Today: Proceedings (megjelent)
- JA4 Adam Jacso, Szalay Tibor, Basant Singh Sikarwar, Rakesh Kumar Phanden, Rajeev Kumar Singh, Janakarajan Ramkumar: Time-optimal trochoidal tool path planning with cutter engagement and acceleration limitations using B-spline curves (folyamatban)