



**M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2**  
**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR**  
**GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS –TECHNOLÓGIA TANSZÉK**

# **Egyenletes szerszámterhelést biztosító szerszámpanyák tervezése zsebek megmunkálásához**

című PhD értekezés tézislevele

készítette:

JACSÓ ÁDÁM, okleveles gépészmérnök

témavezető:

Dr. SZALAY TIBOR, tanszékvezető, egyetemi docens

Budapest

2021



## Tartalom

1. A kutatási téma ismertetése, célkitűzések .....	1
2. Előzmények, kutatási módszerek .....	2
2.1. Szakirodalmi áttekintés .....	2
2.2. Szimulációs és forgácsolási kísérletek.....	5
3. A kutatómunka összefoglalása, tézisek .....	7
3.1. Állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák tervezése állandó görbületű kontúrszakaszok kontúrpárhuzamos megmunkálásához .....	8
3.2. Állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák tervezése általános kontúr megmunkálásához .....	9
3.3. Numerikus pályagenerálási algoritmus a kontaktszög állandó értéken tartásához .....	11
3.4. Állandó kontaktszöget biztosító trochoidális szerszám pálya mintázatok létrehozása .....	13
4. Az elért eredmények hasznosítása .....	14
5. Irodalomjegyzék .....	17
6. A dolgozat témájához kapcsolódó saját publikációk listája .....	20

Az értekezés bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetők.

## 1. A kutatási téma ismertetése, célkitűzések

Doktori kutatásaim során a zsebmarás technológiájának fejlesztésével és optimalizálásával foglalkoztam. A zárt bemélyítések, azaz a zsebek megmunkálásakor az jelenti a legnagyobb kihívást, hogy a ráhagyási alakzat nehezen hozzáférhető, ezért nem, vagy csak nehezen biztosíthatóak az optimálisnak tekintett forgácsolási körülmények. Mivel a zsebmegmunkálásnak e sajátossága elsősorban a nagyoláznál nyilvánul meg, ezért a munkám a nagyoló zsebmárási stratégiák továbbfejlesztésére, ezen belül az optimális szerszám mozgáspályák tervezésére irányult. A nagyolás vizsgálatára egyébként is érdemes nagy hangsúlyt fektetni, mivel átlagosan a megmunkálás idő körülbelül 50%-át teszi ki, de esetenként akár a simításhoz szükséges idő 5-10-szeresét is igényelheti [1].

A zsebek kialakítására különféle eljárások léteznek, azonban a munkáim során csak a legáltalánosabban alkalmazott 2.5D-s teraszoló stratégiákra fókuszáltam. A pályatervezési folyamat továbbfejlesztésekor közvetett célként a megmunkálási költségek csökkentését határoztam meg. A forgácsolási eljárásoknál különböző módszerek kínálóznak ennek megvalósítására, azonban a kutatásaim során csak a műveletelem-tervezés szintjéhez kapcsolódó továbbfejlesztési lehetőségekkel foglalkoztam, azaz adottnak tekintetem a gyártási eljárás jellegét, a megmunkálási környezetet, a szerszámgépet és a szerszámokat. Ezen feltételek mellett a gyártási költségek minimalizálása a megmunkálási idő csökkentésével és/vagy a szerszám éltartamának növelésével érhető el. Ennek megfelelően a közvetlen célt a megfelelő szerszám-pálya és a megfelelő forgácsolási paraméterek meghatározása jelentette.

A szakirodalom és az ipari gyakorlat alapján kijelenthető, hogy a zsebmarási szerszám-pályák tervezésekor az egyenletes szerszámterhelés és az egyenletes pályagörbület biztosítása jelenti a fő célokat (lásd 2.1. fejezet). Az egyenletes szerszámterhelés biztosítása egyrészt a megmunkálási idő szempontjából létfontosságú, mivel a forgácsolási paraméterek megválasztását korlátozhatnak a terhelés csúcsértékei. Másrészt az impulzusszerűen változó terhelés nagyobb igénybevételt jelentene a szerszámnak is, ami a szerszám éltartamának csökkenéséhez vezetne. Az egyenletes pályagörbület biztosítása a szánok gyorsulásképesége jelentette korlátok miatt szükséges, ugyanis az éles irányváltások környezetében a valós előtolási sebesség jelentősen elmaradhat a programozott értéktől, ami a megmunkálási idő növekedését vonja maga után. Az egyenletes szerszámterhelés és az egyenletes pályagörbület teljes körű biztosítása a hibrid szerszám-pályák alkalmazásával, azon belül a spirálszerű és a trochoidális pályatervezési stratégiák ötvözésével érhető el. A CAM rendszerek ugyan képesek az előzőekben felsorolt kritériumokat kielégítő szerszám-pályákat létrehozni a 2.5D-s zsebek nagyolásához, azonban ez még nem jelenti azt, hogy a megmunkálási idő szempontjából optimális megoldást biztosítanak. Ennek oka, hogy a pályatervezés szigorú szabályok szerint történik, amelyek ugyan a hagyományos kontúrparhuzamos stratégiához viszonyítva mind a megmunkálási időt, mind a szerszám éltartamát tekintve valóban jelentős előrelépést jelentenek, valódi

optimalizálás nem történik a pálya tervezése során. Ebből kifolyólag ez a problémakör napjainkban is aktív kutatási terület, mivel minden olyan fejlesztés, amely a megmunkálási időt akár csak néhány százalékkal is csökkenti, komoly költségmegtakarítást jelenthet a gyártásban.

A kutatásaim célja egy olyan egyenletes szerszámterhelést biztosító pályagenerálási stratégia kifejlesztése volt, amely tetszőleges kontúrral határolt 2.5D-s zsebek nagyolására alkalmazható, és adott terhelés mellett minimális megmunkálási időt biztosít. A spirálszerű és a trochoidális stratégiák továbbfejlesztését a kontaktszög és a pályagörbület alakulásának figyelembevételével kívántam megvalósítani. A pályagenerálási algoritmus kidolgozása során bemeneti változóként tekintettem a zsebet határoló kontúrra, a szerszám átmérőjére, a fordulatszámra, az axiális fogásvételre, a kontaktszög biztosítani kívánt értékére, illetve az adott kontaktszög esetén megengedhető előtolás értékére. Az optimális szerszám-pálya meghatározásánál az optimalizálási kritériumot a minimális pályabejárési idő elérése, az optimalizálási korlátokat pedig a szerszámterhelés és a pályagörbület kontrollálása jelentették. Azonban tágabb értelemben véve a kidolgozott algoritmus segítségével a szerszámátmérő, a fordulatszám és az axiális fogásvétel optimális megválasztására is lehetséges, ugyanis többszöri futtatásával egy másodlagos optimalizálási művelet végrehajtására nyílik lehetőség. A bemutatásra kerülő módszerek nem foglalokoznak a több szerszámmal, illetve az egy szerszámmal, de több bekezdéssel végzett nagyolás lehetőségével. Továbbá a geometriánál nem tértem ki a szigetek és a félig nyitott zsebek kezelésére sem. Azonban a felhasznált pályagenerálási elvek ezekben az esetekben is érvényesek maradnak, vagyis a kidolgozott algoritmus ezen geometriákra történő kiterjesztésének nincs gyakorlati akadálya.

Összefoglalva az előzőeket, az alábbi kutatási célokat és feladatokat fogalmaztam meg: (1) az állandó kontaktszöget biztosító szerszám-pályák tervezésének matematikai leírása, (2) a minimális görbületi sugár figyelembevételének megvalósítása a pályatervezés során, (3) az előző két ponthoz kidolgozott módszerek összekapcsolása a zsebmarási szerszám-pályák tervezéséhez, (4) a megmunkálási idő csökkentésére irányuló továbbfejlesztési lehetőségek keresése.

## 2. Előzmények, kutatási módszerek

Az alábbi fejezetben a témához kapcsolódó szakirodalmi ismeretek, valamint az elvégzett szimulációs és forgácsolási kísérleteknél alkalmazott módszerek kerülnek vázlatos bemutatásra.

### 2.1. Szakirodalmi áttekintés

A zsebmarási feladat leírására M. Held [2] a következő definíciót fogalmazta meg: adott a zseb geometriája, valamint adottak a technológia célok és korlátok; ezek alapján meghatározandók (1) a megfelelő szerszámméret, (2) a megfelelő technológiai paraméterek és (3) a megfelelő szerszám-pálya. A doktori kutatásaimban

a zsebmarási probléma ezen részfeladatai közül a megfelelő szerszám-pálya meghatározásának módszereire fókuszáltam. A szerszám-pálya tervezésekor a következő feltételeket kell figyelembe venni: (1) geometriai feltétel: a méret- és alakpontosságra, valamint a felületi érdességre vonatkozó igények teljesülése mellett a teljes ráhagyási alakzatot el kell távolítani, (2) anyagleválasztási feltétel: megfelelő forgácsolási paramétereket kell alkalmazni a hatékony anyagleválasztás biztosításához (megfelelő forgácsképződés és szerszám éltartam), (3) mechanikai feltétel: a forgácsolási erő és -energia nem lépheti túl a szerszám, a készülék és a szerszám-gép mechanikai képességeiből adódó korlátokat. [3]

Az olyan innovatív forgácsolási technológiák alkalmazása, mint a nagyelőtolású marás (HFM) [4], a nagy teljesítményű marás (HPM) [5], vagy a nagysebességű marás (HSM) [6], jelentősen képesek csökkenteni a megmunkálási időt, és ezáltal a gyártási költségeket. Mivel a zsebmarási feladatoknál a ráhagyási alakzat nehezen megközelíthető, ezért a fent említett eljárások közül egyértelműen kiemelhető nagysebességű marási technológia [7].

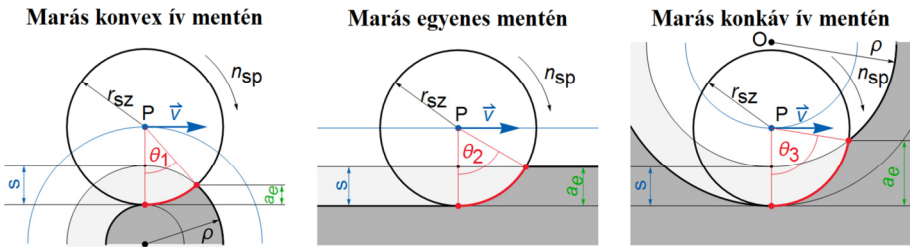
A HSM technológia alkalmazásához azonban megfelelő körülmények biztosítása szükséges. A szerszám-gépnek, a szerszámnak, a szerszámtartónak, a munkadarab anyagának, a szerszám-pálynak mind-mind megfelelőnek kell lennie olyan feltételek mellett is, ahol a fogácsolási sebesség a megszokott értékek akár 5-10-szeresét is elérheti [8]. A nagysebességű megmunkálásokra alkalmas szerszám-pályáknak két kritériumot kell kielégíteniük: (1) a pályának megfelelő folytonossággal kell rendelkeznie, valamint (2) a megmunkálás során egyenletes szerszámterhelést kell biztosítania [9] [10].

Amikor a szerszám egy sarokhoz ér, le kell lassítania, meg kell változtatnia a mozgásirányát, és a sarkot elhagyva újból fel kell gyorsítania [11]. Nem megfelelő szerszám-pálya esetén a HSM technológiánál megszokott sebességparaméterek mellett a valós megmunkálási idő a programozott előtolási sebességből számolt értéknek akár a 3-8-szorosát is elérheti [12]. A megmunkálási idő növekedésén túl a forgácsolási körülmények kedvezőtlen volta miatt is kerülendő, hogy éles sarkok mentén történjen anyagleválasztás [13] [14]. Emiatt a HSM technológia alkalmazása esetén elengedhetetlen a szerszám-pálya legalább  $G^1$  folytonossága,  $C^2$  folytonosság mellett azonban már a gyorsulásfüggvények is folytonosak lesznek [15]. Ennek megfelelően a nagysebességű megmunkálásoknál célszerű másodrendű matematikai folytonosságot biztosító harmadfokú polinomiális spline görbét alkalmazni, amellyel jelentősen csökkenthető a pályabejáráshoz szükséges idő [16]. A pálya folytonosságának biztosítására abban az esetben is érdemes ügyelni, ha ez a pályahossz növekedésével jár, ugyanis sok esetben még ezzel együtt is csökken a pályabejárási idő [17].

A forgácsolási erő szabályozásával a szerszám a megengedhető legnagyobb terhelés közelében dolgozhat a megmunkálás során, ezzel biztosítva a maximális termelékenységet [18]. A forgácsolási erő kismértékű ingadozásának további előnye, hogy kisebb a szerszámtörés és a rezgések kialakulásának veszélye, ezzel növelve a szerszám éltartamát [19]. A hatékony megmunkáláshoz tehát elengedhetetlen a

forgácsolási folyamat stabilitása [20] [21]. Azt is érdemes kiemelni, hogy a marási folyamat leírásával foglalkozó kutatások tapasztalatai csak akkor használhatóak fel, ha a szerszám radiális bemerülése ismert és közel állandó [22]. Azonban zsebmarás esetén, ahol ívek és sarkok menti kontúrmarás valósul meg, a szerszámterhelés állandó értéken tartása komoly kihívást jelent a szerszám-pálya tervezése során.

A szerszám és a munkadarab kapcsolódási viszonyainak jellemzésére a leghatékonyabb paraméter a kontaktszög ( $\theta$ ) [23] [24], ami a szerszám fogásában lévő ívhosszához tartozó középponti szöggént definiálható.



2.1. ábra A kontaktszög alakulása különböző görbületű pályaszakaszokon

Egyenes menti marás esetén az oldallépés ( $s$ ) megegyezik a radiális bemerüléssel ( $a_e = s$ ), vagyis az oldallépés közvetlenül meghatározza a kontaktszöget. Azonban az ívek és sarkok mentén történő marásnál a szerszám radiális bemerülése és az oldallépés nagysága eltérnek egymástól (lásd 2.1. ábra) [25]. A radiális bemerülés megváltozásával a leválasztott forgács keresztmetszete is módosul [26], ami közvetlen hatással van a forgácsolási erő nagyságára [27]. Ennek az lesz a következménye, hogy állandó nagyságú oldallépés esetén a konvex ívek mentén lecsökken ( $\theta_1 < \theta_2$ ), a konkáv ívek mentén megnövekszik a kontaktszög értéke ( $\theta_3 > \theta_2$ ), illetve ennek megfelelően változik a forgácsolási erő nagysága is. [28] Konkáv sarkok mentén akár többszörös növekedés is kialakulhat, holott a nehezen megmunkálható anyagok esetén már a kontaktszög csekély növekedése is veszélyes lehet. [29]

A szerszámterhelés ingadozásának kezelésére két megoldás létezik: az előtolás szabályozása, valamint a radiális bemerülés szabályozása [30]. Az előtolási sebesség szabályozása azonban a problémáknak csak egy részére jelent megoldást. Egyrészt a szerszám gépnek képesnek kell lennie a folytonos lassítások/gyorsítások megvalósítására [11], valamint az esetenként kialakuló nagy kontaktszög továbbra is rezgések és termikus sokk forrása lehet [31]. A forgácsolási hőmérséklet növekedése még akkor is megfigyelhető, ha a kontaktszög értéke csak mérsékelten növekszik meg, ami negatív hatással van a szerszám éltartamára [32]. Ezért a maximális hatékonyság csak a pálya alakjának módosításán keresztül érhető el [33] [34]. Ezzel együtt az előtolás szabályozása hatékony kiegészítője lehet a modern pályagenerálási stratégiáknak, ahol a szerszám radiális bemerülése már csak csekély mértékben ingadozik [9]. A radiális bemerülés szabályozásához a szerszám-pálya módosítása szükséges. Azonban ez a megközelítés azt is lehetővé teszi, hogy a

forgácsalak, és ezzel együtt a forgácsolási körülmények is állandóak legyenek a pálya mentén. Ez a kontaktszög állandó értéken tartásával biztosítható [35]. A módszer előnye, hogy konstans előtolási sebesség adható meg, valamint a pályagenerálás független marad a munkadarab anyagától és a szerszám geometriájától, így nem kell számolni a szerszámterhelést leíró modellek bizonytalanságával sem [36].

A gyártás hatékonyságának szempontjából tehát kulcsfontosságú a megfelelő szerszám-pálya megválasztása. [37] A nagyolás során még a szabadformájú felületek megmunkálásakor is általában konstans Z szintű 2.5D-s stratégiát alkalmaznak [38], ahol a megmunkálás az X-Y fősíkkal párhuzamos síkokban történik, és a Z tengely mentén csak a fogásvételeknél van mozgás. Így a pályatervezési feladat egy síkbeli problémává egyszerűsödik. A zsebmegmunkálási művelet során egy megadott kontúron belüli anyagmennyiséget távolítunk el. Néhány nagyon ritkán alkalmazott módszer mellett két klasszikus 2.5D-s zsebmarási stratégia létezik: az iránypárhuzamos (más néven cikk-cakk, vagy zigzag) és a kontúrpárhuzamos [2]. Azonban ezek a megoldások sem a pálya görbületének folytonosságát, sem a szerszámterhelés egyenletességét nem képesek biztosítani. A hagyományos alapstratégiák mellett léteznek összetettebb megoldások is, amelyek a számítógépes támogatással történő tervezés vívmányaiként jelentek meg [39]. A modern pályagenerálási megoldásoknál az jelenti a legfontosabb előrelépést, hogy a kontaktszög alakulásának és a pálya görbületének figyelembevétele is megvalósítható a pályagenerálás során. A zsebek megmunkálásánál a gyakran alkalmazott megoldások közé tartozik a spirálszerű stratégia [40], amely kiválóan alkalmazható a nagysebességű megmunkálásoknál is, tekintve hogy a pálya nem tartalmaz sarkokat és éles irányváltásokat [41], illetve a trochoidális stratégia, amellyel a pálya folytonos görbülete és a szerszámterhelés kontrollálása is biztosítható [42]. Mivel a két pályatípus épp ellentétes feltételek mellett működik hatékonyan, ezért a két stratégia ötvözése általános gyakorlatnak számít. A két vagy több pályagenerálási stratégia kombinálásával létrehozott pályákat nevezzük hibrid szerszám-pályáknak.

A modern pályagenerálási stratégiák nélkül a nagysebességű megmunkálások hatékony kivitelezése elképzelhetetlen volna a zsebmarási feladatoknál. Azonban ezzel együtt a pályabejárési idő optimalizálásának tényleges megvalósítása még nem megoldott, ezért ez a terület további kutatások tárgyát képezi.

## 2.2. Szimulációs és forgácsolási kísérletek

A zsebmarási feladatoknál az jelenti a legnagyobb kihívást, hogy az esetek többségénél az anyagleválasztási viszonyok folyamatosan változnak a pálya mentén. A szakirodalom-kutatás tapasztalatai alapján arra a megállapításra jutottam, hogy a változó anyagleválasztási viszonyok jellemzésére az alábbi mutatók a legalkalmasabbak: (1) a kontaktszög, (2) az anyagleválasztási sebesség, (3) a maximális és az átlagos forgácsvastagság, illetve (4) a forgácsolási erő. Ezen paraméterek vizsgálatára szimulációs és kísérleti jellegű módszereket egyaránt alkalmaztam a megmunkálási stratégiák értékelésekor.

A kereskedelmi forgalomban számos szimulációs szoftver érhető el a CNC megmunkálások elemzésére. Napjainkban, ha nem is nagy számban, de már léteznek olyan magas szintű szoftvercsomagok, amelyek a marási műveletek technológiai elemzését is képesek elvégezni. Kézenfekvő lett volna a doktori kutatásaim során ezen szoftverek valamelyikét igénybe venni, azonban a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszékén ezek egyike sem volt elérhető. Tekintve, hogy a pályagenerálási algoritmusok kidolgozása során egyébként is szükségem volt a pálya menti forgácsolási viszonyok matematikai leírására, ezért eltekintettünk a magas beruházási költséggel járó szoftvervásárlástól. Ehelyett egy olyan saját fejlesztésű célprogramot készítettem Wolfram Mathematica környezetben.

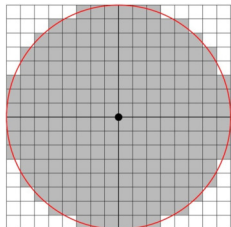
A szimulációs program megírása során az volt az elsődleges célkitűzés, hogy a szerszám pillanatnyi terhelése általános alakú szerszám pályák esetén is vizsgálható legyen. Mivel a maradékanyag eltávolításának analitikus leírása csak egyszerű esetekben lehetséges, összetett szerszám pályák esetén már nem, ezért egy diszkrét modellen alapuló algoritmust dolgoztam ki. A kifejlesztett algoritmus 2.5D-s marási műveletek esetén alkalmazható, és az anyagleválasztási sebesség, a kontaktszög, valamint a maximális és közepes forgácsvastagság pillanatnyi értékének alakulását képes meghatározni.

A szimuláció végrehajtásához első lépésként diszkrétizálni kell a munkadarabot és a szerszámot a megmunkálás síkjában, azaz a szerszám tengelyére merőleges X-Y síkban. Erre a célra kézenfekvő volna egy pixel-alapú felbontás alkalmazása, főleg abban az esetben, ha az ráhagyási alakzat leválasztásának időbeli folyamatát grafikusán is szeretnénk megjeleníteni. Ennek a módszernek az alkalmazása általános gyakorlatnak számít, azonban az algoritmus kidolgozása során az a felismerésem támadt, hogy egy dixel-alapú felbontás bevezetésével jelentősen csökkenthető a számítási igény, amennyiben csak a forgácsolási jellemzők elemzésére akarjuk használni az algoritmust. Ekkor ugyanis a munkadarab és a szerszám geometriai modelljei a 2D-s mátrixok helyett 1D-s vektorokkal is reprezentálhatóak. A modellek megalkotása után a szerszám pályára mentén adott nagyságú lépéseket téve végig lehet haladni a szerszámmal, miközben minden lépésben meghatározható a munkadarab és a szerszám X-Y síkbeli metszete. Ha ismerjük az axiális fogásvétel és az előtolási sebesség nagyságát, akkor a lépésként kiszámolt metszetek területéből meghatározható az anyagleválasztási sebesség, valamint a többi vizsgálni kívánt forgácsolási mutató értéke is.

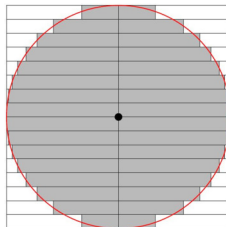
Mivel a szimuláció elsősorban az anyagleválasztási sebesség és a kontaktszög elemzésére irányul, ezért a számítások során egy egyszerű hengeres hasábként tekinthetünk a szerszámmra, mivel a vizsgált paraméterekre nincs hatással a szerszám pontos geometriája. Ennek a hengeres hasábnak az X-Y síkban vett metszete egy körlemezzel lesz egyenértékű. Amennyiben ezt a körlemez egy bináris elemekből álló mátrixszal modelleznénk, úgy a mátrix 1 értékű elemei mindig egymás mellett állnának. Ez adta az ötletet ahhoz, hogy a dixel-alapú eljárások mintájára egy-egy sornak a tartalmát csak az első és utolsó 1-es mátrixelem pozíciójának leírásával egy intervallum formájában adjam meg. Ez a megoldás két szempontból is előnyösebb,

mint a pixel-alapú megközelítés. Egyrészt a felbontás lépésközének csökkentésével nem négyzetesen, hanem egyenesen arányosan fog nőni az adatmennyiség és az elvégzendő logikai műveletek száma. Másrészt az intervallum határainak megadásánál nem szükséges követni a pixelméret szerinti kerekítést, hanem alkalmazhatunk lebegőpontos számokat is. Ezzel elérhetjük azt is, hogy a modellezett körlemez területe megegyezzen a valós kör keresztmetszetével.

### Pixel-alapú reprezentáció



### Dexel-alapú reprezentáció



## 2.2. ábra A szerszám pixel-, illetve dexel-alapú modellje

A doktori kutatásaim során a szimulációs és a forgácsolási kísérletek eredményei mindvégig összhangban voltak egymással, azonban fontosnak éreztem, hogy a szerszámterhelés alakulásáról közvetlen eredmények is rendelkezésre álljanak, így a kifejlesztett algoritmusok validálásához minden esetben végeztem ellenőrző méréseket is. A forgácsolási kísérleteket a Gyártástudomány és -technológia Tanszék KONDIS 640B típusú 3-tengelyes megmunkáló központján végeztem el, ahol a munkadarabra ható erőt egy Kistler 9257B típusú, háromkomponensű piezoelektromos erőmérő szenzorral mértem. A különböző stratégiák összevetésekor a megmunkálási idő és a forgácsolási erő maximumértékei jelentették az összehasonlítási alapot.

## 3. A kutatómunka összefoglalása, tézisek

A kutatás céljaként tetszőleges kontúrral határolt 2.5D-s zsebek nagyolására alkalmazható, egyenletes szerszámterhelést biztosító pályagenerálási stratégia kifejlesztését határoztam meg. Az algoritmus megalkotásához azonban több olyan részfeladat megoldásán keresztül vezetett az út, amelyek önmagukban is új, tudományos jelentőséggel bíró módszerek és összefüggések kidolgozását igényelték.

Első lépésként kidolgoztam egy szimulációs eljárást, amely hatékony eszközként szolgált a 2.5D-s zsebmarási szerszám pályák technológiai elemzésénél (lásd 2.2. fejezet). Ezt követően bővítettem azon szakirodalomból ismert összefüggések körét, amelyekkel megadható a kontaktszög és az oldallépés között fennálló kapcsolat. Ezen összefüggések segítségével mind az állandó görbületű (lásd 3.1. fejezet), mind az általános alakú kontúrgörbék esetén (lásd 3.2. fejezet) létrehozhatóak állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák. Utóbbi esetben a szerszám pályá tervezési feladata egy kezdeti érték problémaként írható le, amelynek megoldásához egy

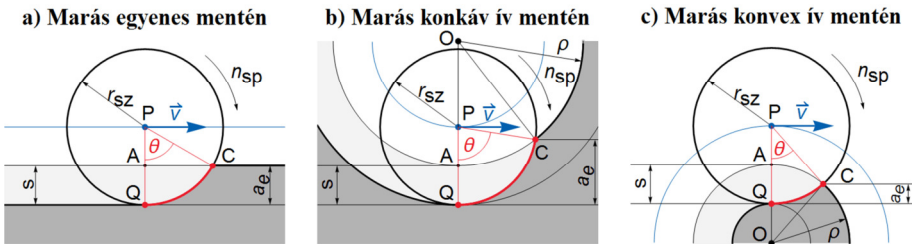
hatékonyan alkalmazható numerikus eljárást is kidolgoztam (lásd 3.3. fejezet). Ezt az algoritmust trochoidális szerszám pályák tervezéséhez is felhasználtam, és sikerült olyan új típusú pályamintázatokat kifejleszteni, amelyek hatékonysága felülmúlja az eddig ismert megoldásokét (lásd 3.4. fejezet).

A kidolgozott algoritmusok általános zsebekhez történő felhasználásához egy olyan eljárást fejlesztettem ki, amellyel a középtengely transzformáció végrehajtását követően megvalósítható a spirálszerű és a trochoidális stratégiák összekapcsolása. A saját fejlesztésű algoritmussal létrehozott szerszám pályát szimulációs és forgácsolási kísérleteknek vettem alá, amely során a CAM rendszerekben elérhető modern pályagenerálási stratégiákkal hasonlítottam össze (lásd 4. fejezet).

A fejezet további részében a fent említett eredmények kerülnek részletes ismertetésre.

### 3.1. Állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák tervezése állandó görbületű kontúrszakaszok kontúrparhuzamos megmunkálásához

Az állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák tervezésének áttekintéséhez először vizsgáljuk meg az állandó görbületű kontúrszakaszok esetét. Az egyenes, illetve körív menti megmunkálás során kialakuló geometriai viszonyokat a következő ábra szemlélteti. Jelölje  $s$  az oldallépést,  $r_{sz}$  a szerszám sugarát,  $\rho$  az aktuális kontúr görbületi sugarát és  $\theta$  a kontaktszöget!



3.1. ábra A kontaktszög alakulása állandó görbületű kontúrszakaszok esetén

A szakirodalomban megtalálhatóak azok az összefüggések, amelyek az ábrán látható esetekben megadják, hogy adott nagyságú oldallépés esetén mekkora kontaktszög alakul ki. Viszont arra vonatkozó levezetést nem találtam, amely megadná, hogy mekkora nagyságú oldallépés esetén alakul ki az alkalmazni kívánt kontaktszög, holott a pályatervezés során épp erre volna szükség, mivel a kontúrparhuzamos stratégiánál az oldallépés nagysága határozza meg a szerszám pályák alakját. Egyenes menti marásnál ez egy egyszerű összefüggéssel megadható ( $\theta(s) = \arccos(1 - s/r_{sz})$ ) azonban körív esetén nem határozható meg egyértelműen az inverz függvény a kontaktszöget leíró képletből. Ehelyett vissza kell nyúlni az OPC háromszögre felírt koszinusztételhez, amiből a kontaktszögre vonatkozó levezetés is kiindult [35]:

$$|\overline{OC}|^2 = |\overline{PO}|^2 + |\overline{PC}|^2 - 2 |\overline{PO}| |\overline{PC}| \cos(\sphericalangle OPC) \quad (1)$$

A **konkáv ívek** esetében a következő behelyettesítések végezhetőek el a fenti összefüggésben:  $|\overline{OC}| = \rho$ ,  $|\overline{PO}| = \rho + s - r_{sz}$ ,  $|\overline{PC}| = r_{sz}$ ,  $\sphericalangle OPC = \pi - \theta$ , míg a **konvex ívek** esetében az alábbi behelyettesítések szükségesek:  $|\overline{OC}| = \rho$ ,  $|\overline{PO}| = \rho - s + r_{sz}$ ,  $|\overline{PC}| = r_{sz}$ ,  $\sphericalangle OPC = \theta$ . Figyelembe véve az  $s \in [0, 2r_{sz}]$  peremfeltételt, a megfelelő összevonások és egyszerűsítések elvégzésével egy uniformizált összefüggés vezethető le az oldallépés és a kontaktszög között fennálló kapcsolat leírására.

**I. Tézis:**

Állandó görbületű síkbeli kontúrszakaszok esetén a kontúr görbületi sugarának függvényében az alábbi összefüggés adja meg azt az oldallépést, amellyel  $\theta$  nagyságú kontaktszög biztosítható:

$$s(\theta, \rho) = r_{sz}(1 - \cos\theta) + k\rho - k\sqrt{\rho^2 + r_{sz}^2(\cos^2\theta - 1)}$$

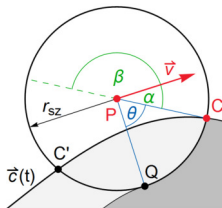
ahol  $s$  az oldallépés,  $r_{sz}$  a szerszám sugara,  $\rho$  az aktuális kontúr görbületi sugara, a  $k$  értéke konkáv ívek esetén  $-1$ , konvex ívek esetén  $1$ .

A téziszhez kapcsolódó saját publikációk: [JÁ1-JÁ8] [JÁ10] [JÁ12]

A fenti összefüggés azonban csak állandó görbületű kontúrszakaszok kontúrpárhuzamos megmunkálásakor alkalmazható. Tekintsük meg, hogy hogyan adható meg az állandó kontaktszöget biztosító szerszám pálya alakja általános alakú kontúr esetén!

**3.2. Állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák tervezése általános kontúr megmunkálásához**

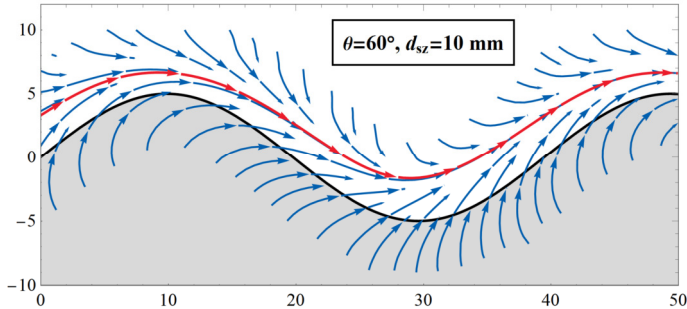
Az állandó kontaktszöget biztosító szerszám pályák létrehozásának feladata általános alakú kontúrok esetén a következőképpen definiálható. Adott a szerszám  $r_{sz}$  sugara, az alkalmazni kívánt  $\theta$  kontaktszög nagysága és egy  $\vec{c}(t)$  síkbeli görbe, amely a munkadarab aktuális kontúrját jelöli. Ezek alapján kell meghatározni azt a  $\vec{p}(t)$  síkbeli görbét, amely mentén végigvezetve a szerszám középpontját a kialakuló kontaktszög a megadott  $\theta$  értéket veszi fel. E síkbeli feladat megoldásához a szerszámot tekintjük úgy, mint egy  $r_{sz}$  sugarú körlemez.



**3.2. ábra A megfelelő előtolás irány meghatározása a kontaktszög megfelelő értékének biztosításához**

A fenti ábra alapján levezethető, hogy az előtolási sebesség megfelelő iránya a  $\vec{CP}$  vektor  $\beta = \pi/2 + \theta$  szöggel való elforgatásával adható meg. Mivel az előtolási vektort leíró függvény megegyezik a szerszám pálya görbéjének első deriváltjával ( $\vec{v}(t) = \vec{p}'(t)$ ), ezért a  $\vec{c}(t)$  kontúrgörbe és a kontaktszög alapján felírható egy olyan differenciálegyenlet, amely megadja a  $\vec{p}(t)$  pályagörbe alakját.

Az előző megfontolások alapján bármely olyan  $P$  pontban meghatározható a megfelelő előtolási irány, amely a munkadarab kontúrjához képest  $r_{sz}$  távolságon belül helyezkedik el. Az így létrehozott vektormezőre a 3.3. ábra mutat példát.



3.3. ábra A megfelelő előtolás irányokat szemléltető vektormező

Egy kezdőpont kijelölése után a feladat egy kezdeti érték problémaként is megfogalmazhatóvá válik:

## II. Tézis:

Változó görbületű síkbeli kontúrral határolt munkadarab esetén az alábbi kezdeti érték probléma megoldásával határozható meg az a szerszám pálya, amellyel állandó  $\theta$  nagyságú kontaktszög biztosítható:

$$\vec{p}(t) = \vec{c}(t) + R\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \cdot \vec{p}'(t) \cdot \frac{r_{sz}}{|\vec{p}'(t)|}$$

$$\vec{p}(0) = P_0$$

ahol  $\vec{p}(t)$  a szerszám pálya,  $\vec{c}(t)$  a kontúr leíró vektorfüggvény,  $r_{sz}$  a szerszám sugara,  $P_0$  a szerszám pálya kezdőpontja, ahonnan a szerszám éppen érinti a kontúr  $\vec{c}(0)$  kezdőpontját, valamint  $R\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)$  a forgatómátrix:

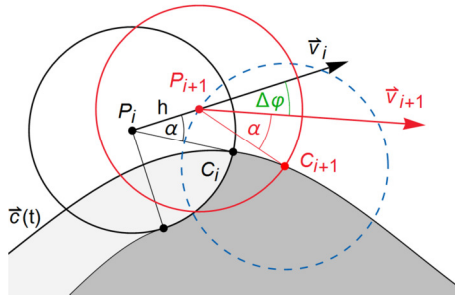
$$R\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \end{bmatrix}$$

A téziszhez kapcsolódó saját publikációk: [JÁ6] [JÁ9] [JÁ11] [JÁ12]

A tézisben megfogalmazott kezdeti érték probléma ugyan csak elemi kontúrok esetében oldható meg analitikusan, azonban numerikus eljárások alkalmazásával általános esetben is meghatározható az állandó kontaktszög biztosító szerszám pálya. Erre a célra egy saját algoritmust fejlesztettem ki.

### 3.3. Numerikus pályagenerálási algoritmus a kontaktszög állandó értéken tartásához

A probléma geometriai megoldásához a 3.2. ábra továbbgondolása szükséges. Tételezzük fel, hogy az ábra a  $t_i$  paraméterértékhez tartozó állapotot szemlélteti, és ez alapján kell a  $t_{i+1}$  paraméterértékhez tartozó állapotot meghatározni. Ekkor ismert a  $t_i$  paraméterhez tartozó  $P_i$  pont és az ehhez a ponthoz tartozó  $\vec{v}_i$  érintőirányú egységvektor. Ezeket a kiegészítéseket a 3.4. ábra szemlélteti.



3.4. ábra A szerszám pálya egy szakaszának megszerkesztése

A numerikus pályagenerálási algoritmus működését az alábbi tudományos megállapításban foglaltam össze:

#### III. Tézis:

Változó görbületű, általános alakú síkbeli kontúrral határolt munkadarab esetén az alábbi numerikus módszerrel határozható meg az a szerszám pálya, amely állandó  $\theta$  nagyságú kontaktszögöt biztosít.

Jelölje  $\vec{c}(t)$  a megmunkálni kívánt munkadarab aktuális határának paraméteres vektoregyenletét, ahol  $t \in [t_{min}, t_{max}]$ . Tegyük fel, hogy adott a szerszám sugara ( $r_{sz}$ ), a szerszám középpontjának egy kiindulási pozíciója ( $P_0$ ), ahonnan a szerszám körvonala érinti a kontúr kezdőpontját ( $C_0 = \vec{c}(t_{min})$ ), valamint a numerikus lépésköz nagysága ( $\Delta t$ ). Ezen adatok alapján a szerszám pálya további pontjai a következő műveletek végrehajtásával határozhatóak meg:

(folytatás a következő oldalon)

- 0. lépés:** Inicializálás:  $t_i = t_{min}$ ,  $i = 0$
- 1. lépés:** Forgassuk el a  $P_i C_i$  vektort a  $P_i$  pont körül  $\alpha = \pi/2 - \theta$  szöggel, megkapva ezzel a  $\vec{v}_i$  érintővektort!
- 2. lépés:** Helyettesítsük be a kontúr  $\vec{c}(t)$ -vel megadott egyenletébe a  $t_i + \Delta t$  paramétert, megkapva ezzel a  $C_{i+1}$  pontot!
- 3. lépés:** Határozzuk meg a  $C_{i+1}$  középpontú  $r_{sz}$  sugarú körnek és a  $P_i$  pontból  $\vec{v}_i$  vektor mentén indított félegyenesnek a metszéspontját (ha több is van, akkor a  $P_i$  ponthoz közelebbit), megkapva ezzel a  $P_{i+1}$  pontot!
- 4. lépés:** Növeljük a paramétert ( $t_i = t_i + \Delta t$ ) és a lépésszámlálót ( $i = i + 1$ )!
- 5. lépés:** Ha még nem értünk végig a kontúron ( $t_i \leq t_{max}$ ), akkor térjünk vissza az 1. lépésre!

Az algoritmus számítási hatékonysága tovább növelhető, ha

- az állandó lépésköz helyett adaptív lépésközt
- a pontok összekötésénél elsőfokú helyett harmadfokú spline-t
- a továbblépési irány figyelembevételénél az explicit Euler-módszer helyett a javított Euler-módszert

alkalmazunk.

A tézishez kapcsolódó saját publikációk: [JÁ9] [JÁ11-JÁ13]

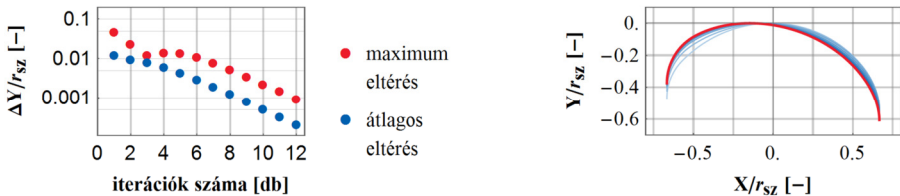
Az algoritmus általános kontúrgörbékhez is képes egyszerű geometriai műveletek útján olyan szerszám pályát létrehozni, amely állandó kontaktszögöt biztosít a megmunkálás során. Emellett nem csak az állandósult állapotra működik, mint a meglévő geometriai módszerek, hanem az átmeneti szakaszokra is képes kiszámítani a megfelelő szerszám pályát. Továbbá a módszer egyaránt rendelkezik a pixel-alapú módszerekre jellemző általános felhasználhatósággal és a geometriai módszerek egyszerűségével, gyors működésével (kiváltképp akkor, ha a továbbfejlesztési megoldások is megvalósításra kerülnek). Az elvégzett kísérletek azt is igazolták, hogy az állandó kontaktszögű szerszám pályáknál a szerszám terhelése végig egyenletes marad, ami lehetőséget biztosít a maximális termelékenység elérésére.

### 3.4. Állandó kontaktszöget biztosító trochoidális szerszám-pálya mintázatok létrehozása

Az előző tézisben ismertetett algoritmust alapvetően azzal a céllal fejlesztettem ki, hogy a munkadarab aktuális állapotának kontúrgörbéje alapján meg lehessen határozni a következő fogásvételhez tartozó, állandó kontaktszöget biztosító szerszám-pályát. Amíg a szerszám nem éri el a kész munkadarab kontúráját, addig csak a ráhagyási alakzat csökkentése a feladat. Azonban az algoritmus olyan feladatokra is alkalmazható, ahol több fogást kell venni. Ebben az esetben a munkadarab határát jelölő kontúrgörbét minden fogásvétel után újra kell számolni, a pálya meghatározásakor pedig figyelembe kell venni a végső geometria által jelentett korlátokat is. Ezen kiterjesztések alkalmazásával lehetőség nyílik olyan trochoidális szerszám-pályák tervezésére is, amelyeknél a kontaktszög a lehető leghosszabb ideig marad a névleges értéken, szemben a hagyományos trochoidális szerszám-pálya mintázatokkal, ahol a szerszám terhelése folyamatosan változik.

Az algoritmus alkalmazása során azt tapasztaltam, hogy néhány periódus után a pálya alakja stabilizálódott, és a szomszédos periódusok közötti eltérés szinte elhanyagolható értékre csökkent. Természetesen az alkalmazást nagyban segíti, ha elegendő egyetlen periódust meghatározni, amit ciklikusan lehet ismétlni a horony teljes hosszának elkészítésekor.

Az algoritmus tehát a kontúr periódusonkénti újrászámításával képes meghatározni a szerszám-pálya forgácsoló szakaszait. A pályagörbe állandósult alakja egy iteráció útján határozható meg. A tesztek azt mutatták, hogy ez az iteráció gyors, és rendszerint monoton konvergenciát biztosít. Miután az iteráció eléri a pályamintázat végső alakját, nincs más teendő, mint az összekötő mozgásokkal kiegészíteni, és a megfelelő trochoidális lépésközzel ciklikusan ismétlődővé tenni. Az iterációt az alábbi ábra szemlélteti.



3.5. ábra A pálya alakjának változása az iteráció során

A kidolgozott módszer hatékonyságának igazolására forgácsolási kísérleteket végeztem. Az eredmények azt mutatták, hogy azonos technológiai paraméterek beállítása mellett mind a köríves, mind a ciklois jellegű szerszám-pályához képest jelentős előrelépést jelent a kifejlesztett pályamintázat alkalmazása. A kontaktszög szabályozásának köszönhetően a szerszám a lehető leghosszabb ideig dolgozhat a megengedett szerszámterhelés mellett. Ezen túlmenően az új típusú pályalakkal a pálya hossza rövidebbre, a trochoidális lépés nagyobbra adódott a hagyományos stratégiákhoz képest, aminek köszönhetően az anyagleválasztási sebesség értéke akár 40%-kal is növekedhet.

Az előzőek alapján az alábbi tudományos megállapítást fogalmaztam meg:

#### IV. Tézis:

Az egyenes vonalú, állandó szélességű hornyok trochoidális megmunkálásához létrehozható olyan ismétlődően alkalmazható pályamintázat, amely a be- és kigördülési szakaszok között állandó kontaktszöveget biztosít a pálya mentén. A stacionárius megmunkálási körülmények biztosításán túl a létrehozott pályamintázat nagy előnye, hogy a köríves és a ciklois jellegű hagyományos trochoidális stratégiákhoz viszonyítva jelentősen rövidebb szerszám pályával teljesíthető a kontaktszög maximális értékére vonatkozó korlátozás.

A tézishez kapcsolódó saját publikációk: [JÁ9] [JÁ11-JÁ13]

#### 4. Az elért eredmények hasznosítása

Az előző tézisekben ismertetésre kerültek azok az algoritmusok, amelyeket az állandó kontaktszöveget biztosító szerszám pályák tervezéséhez dolgoztam ki, azonban a szemléltetésre szolgáló példák főként egyszerűbb geometriákhoz kapcsolódtak. Természetesen a módszerek kidolgozásakor lényeges szempont volt, hogy az algoritmusok általános zsebgeometria esetén is alkalmazhatóak legyenek. Az alábbi fejezetben egy olyan állandó kontaktszöveget biztosító hibrid szerszám pálya kerül bemutatásra, amelyet a saját algoritmusok összekapcsolásával hoztam létre.

Egy csillag alakú mintageometriához készült szerszám pályát szimulációs és forgácsolási kísérletek segítségével is megvizsgáltam. Az eredmények értékeléséhez négy különböző CAM rendszerben elérhető modern pályagenerálási stratégiát választottam összehasonlítási alapként. Ezek a következők voltak: az EdgeCAM 2017R2 Waveform stratégiája, az NX 12.0 Adaptive Milling stratégiája, a SolidCAM 2020 iMachining stratégiája, valamint a VoluMill stratégia teszteléséhez a ZW3D 2021-es verzióját használtam.

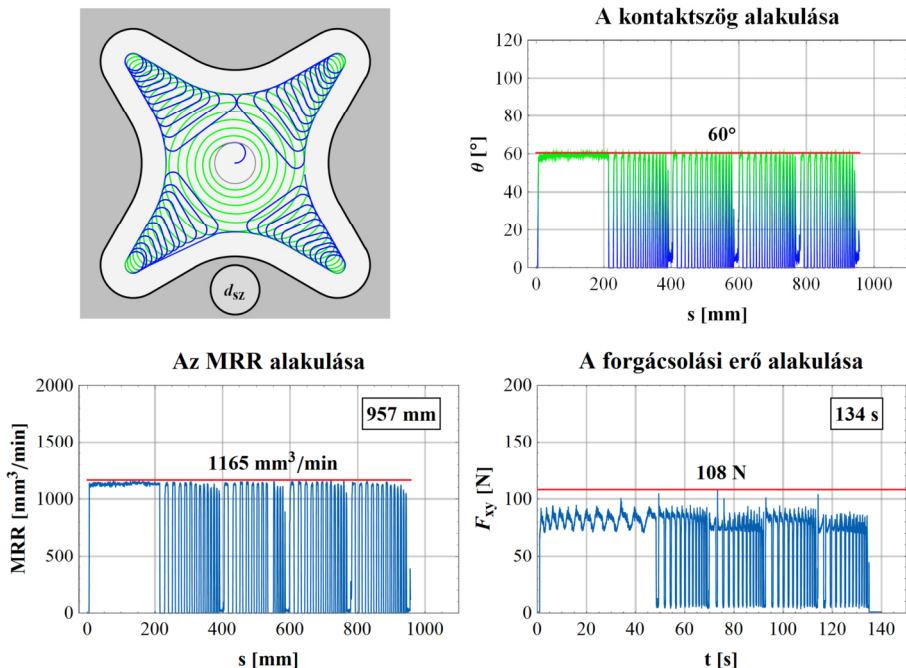
A kísérletek során egy  $\emptyset 6\text{ mm}$ -es egylű keményfém szármaró szerszámot használtam. A forgácsolási paramétereket a szerszámkatalógus alapján határoztam meg (lásd 4.1. táblázat). A kezdőfurat átmérője  $11\text{ mm}$  volt, így az eltávolítandó anyag térfogata  $V = 2098\text{ mm}^3$ -re adódott. Tekintve, hogy a táblázatban megadott forgácsolási paraméterekből számított anyagleválasztási sebesség értéke  $MRR_{nom} = 1147,5\text{ mm}^3/\text{min}$ , az elméletileg elérhető minimális megmunkálási idő  $t = 110\text{ s}$ . A névleges forgácsolási paraméterek mellett egyenes menti kontúrmarást is végeztem, ahol a forgácsolási erő maximumát  $99\text{ N}$ -nak mértem. Az összekötő mozgások egyenes szakaszain egységesen  $v_f = 1500\text{ mm}/\text{min}$  nagyságú növelt előtolási sebességet alkalmaztam, míg az előtolás szabályozásnál  $v_{fmax} = 1000\text{ mm}/\text{min}$  értéket állítottam be felső korlátnak. A be- és kigördülések sugarai a saját stratégiánál, illetve azon rendszereknél, ahol volt lehetőség ennek

megadására, egységesen  $\rho = 1 \text{ mm}$  nagyságú, így a szerszámgép gyorsulásképesége még nem jelentett korlátozó tényezőt.

#### 4.1. táblázat A kísérletek során használt forgácsolási paraméterek

Forgácsolási sebesség	$v_c = 120 \text{ m/min}$
Előtolási sebesség	$f_z = 0,04 \text{ mm}$ ( $v_f = 255 \text{ mm/min}$ )
Axiális fogásvétel	$a_p = 3 \text{ mm}$
Kontaktszög	$\theta = 60^\circ$

A következő ábrán látható diagramok igazolják, hogy a kifejlesztett algoritmusnál mind a kontaktszög, mind az anyagleválasztási sebesség szabályozása megfelelően működik (az  $MRR$ -nél látható 1,5%-os hiba elhanyagolhatónak tekinthető). Komolyabb eltérés egyedül a forgácsolási erőben mutatkozott, ahol az egyenes menti maráshoz képest 9%-kal nagyobbra adódott a maximális érték. Ez valószínűleg arra vezethető vissza, hogy az előtolás szabályozását az anyagleválasztási sebesség állandó értéken tartására alapoztam. A megmunkálási idő 134 s volt, ami az elméleti minimum értékét csak 22%-kal haladja meg.



4.1. ábra A csillag alakú zseb megmunkálása a kifejlesztett szerszám pályával

A stratégiák értékeléséhez a forgácsolási erő maximumértékét és a megmunkálási időt választottam összehasonlítási alapnak. A forgácsolási erő kontrollálását tekintve a Waveform (96 *N*) és az Adaptive Milling stratégia (99 *N*) emelkedett ki, ahol a kontaktszög és az előtolási sebesség is állandó marad a pálya mentén, így az ébredő erő közel megegyezett a névleges paraméterekkel végzett egyenes menti marásnál tapasztalt értékkel. A saját pályatervezési algoritmusommal létrehozott pálya alakja közel megegyezett ezekkel a szerszám pályákkal, azonban a be- és kigördülési szakaszokon az előtolási sebesség szabályozását is megvalósítottam, aminek köszönhetően a megmunkálási idő lényegesen rövidebb lett. Mivel a sebesség szabályozása nem forgácsolási erőmodellen alapult, ezért a forgácsolási erőben növekedés következett be (108 *N*). Azonban az előtolási sebesség szabályozását szintén alkalmazó iMachining stratégia (119 *N*) és a VoluMill stratégia (119 *N*) esetében még nagyobbak bizonyult az eltérés mértéke. A megmunkálási időt tekintve messze a saját fejlesztésű pályagenerálási algoritmus bizonyult a legjobbnak az összevetésben (134 s). A második legrövidebb megmunkálási időt a VoluMill (171 s) érte el, azonban nem szabad elfelejteni, hogy ennél a stratégiánál volt a legmagasabb a szerszám terhelése. A kontaktszög állandó értéken tartásán alapuló pályatervezési algoritmusok, azaz a Waveform (203 s) és az Adaptive Milling (196 s) a megmunkálási időt tekintve is kedvezőnek bizonyultak a CAM stratégiák körében, míg az iMachinig stratégia (225 s) nem csak a forgácsolási erő alakulását, hanem a megmunkálási időt tekintve is elmaradt a konkurens stratégiákhoz képest.

Természetesen ez az egy példa nem jelenti azt, hogy a megmunkálási időt tekintve minden esetben ekkora mértékű csökkenés volna elérhető. Amennyiben a névleges előtolási sebesség és az összekötő szakaszokon alkalmazott növelt előtolási sebesség között kicsi az eltérés, illetve ha a szerszám pálya kevés összekötő mozgást tartalmaz, akkor az előtolás szabályozásának jelentősége értelemszerűen csökken. Azonban az elvégzett összehasonlító elemzés igazolta, hogy az előtolási sebesség optimalizálása a trochoidális szakaszok be- és kilépési szakaszain jelentősen javíthatja a megmunkálás hatékonyságát, így a saját fejlesztésű stratégia a CAM rendszerekben elérhető megoldásokat is képes lehet túlszárnyalni.

A további terveim között szerepel, hogy a létrehozott algoritmusok az ipari alkalmazásokban is szerepet kapjanak. Ennek első lépéseként már megtörtént a kapcsolatfelvétel egy hazai CNC vezérléseket fejlesztő céggel. Emellett mind a spirálszerű, mind a trochoidális jellegű stratégiák esetében látok még lehetőséget a metódusok továbbfejlesztésére. Az irányt elsősorban a forgácsolási erőmodellek integrálása, valamint a szerszám gép gyorsulási képességeinek figyelembevétele jelenti, ugyanis ezek várhatóan a jövő pályagenerálási algoritmusainak alapjait fogják képezni.

## 5. Irodalomjegyzék

- [1] A. Hatna, R. Grieve, és P. Broomhead, „Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues”, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, köt. 11, sz. 4, o. 309–330, 1998, doi: 10.1016/S0951-5240(98)00030-5.
- [2] Martin Held, *On the Computational Geometry of Pocket Machinig*. Springer Verlag, 1991.
- [3] M. Bouard, V. Pateloup, és P. Armand, „Pocketing toolpath computation using an optimization method”, *Computer-Aided Design*, köt. 43, sz. 9, o. 1099–1109, szept. 2011, doi: 10.1016/j.cad.2011.05.008.
- [4] J. Duplák, M. Hatala, D. Dupláková, és J. Steranka, „Evaluation of Time Efficiency of High Feed Milling”, *TEM Journal; Vol 7*, köt. No 1, o. 2018. ISSN 22178309, 2018, doi: 10.18421/tem71-02.
- [5] G. Byrne, E. Ahearne, M. Cotterell, B. Mullany, G. E. O’Donnell, és F. Sammler, „High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing – A Roadmap”, *Procedia CIRP*, köt. 46, o. 1–6, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.038.
- [6] M. M. Barash, „Handbook of high-speed machining technology”, *Journal of Manufacturing Systems*, köt. 5, sz. 1, o. 69–71, jan. 1986, doi: 10.1016/0278-6125(86)90069-5.
- [7] C. E. H. Ventura és A. Hassui, „Evaluation of static cutting forces and tool wear in HSM process applied to pocket milling”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 65, sz. 9–12, o. 1681–1689, jún. 2012, doi: 10.1007/s00170-012-4290-1.
- [8] Z. Wang és M. Rahman, „High-Speed Machining”, in *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, 2014, o. 221–253.
- [9] M. Held és C. Spielberger, „Improved Spiral High-Speed Machining of Multiply-Connected Pockets”, *Computer-Aided Design and Applications*, köt. 11, sz. 3, o. 346–357, máj. 2014, doi: 10.1080/16864360.2014.863508.
- [10] A. Lasemi, D. Xue, és P. Gu, „Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review”, *Computer-Aided Design*, köt. 42, sz. 7, o. 641–654, júl. 2010, doi: 10.1016/j.cad.2010.04.002.
- [11] V. Pateloup, E. Duc, és P. Ray, „Corner optimization for pocket machining”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 44, sz. 12–13, o. 1343–1353, okt. 2004, doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.04.011.
- [12] H. Siller, C. A. Rodriguez, és H. Ahuett, „Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing”, *Journal of Materials Processing Technology*, köt. 174, sz. 1–3, o. 355–362, máj. 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.02.008.
- [13] „Marás sarkokon belül”, *Sandvik tudástár*. <http://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/milling/pages/milling-inside-corners.aspx> (elérés júl. 24, 2019).
- [14] W. Shixiong, L. Zhiyang, W. Chengyong, L. Suyang, és M. Wei, „Tool wear of corner continuous milling in deep machining of hardened steel pocket”, *Int J Adv Manuf Technol*, o. 1–19, ápr. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1994-x.
- [15] A. Shahzadeh, A. Khosravi, T. Robinette, és S. Nahavandi, „Smooth path planning using biclothoid fillets for high speed CNC machines”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 132, o. 36–49, szept. 2018, doi: 10.1016/j.ijmactools.2018.04.003.
- [16] E. B. Msaddek, Z. Bouaziz, M. Baili, és G. Dessein, „Influence of interpolation type in high-speed machining (HSM)”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 72, sz. 1–4, o. 289–302, febr. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5652-7.
- [17] M. B. Bieterman és D. R. Sandstrom, „A Curvilinear Tool-Path Method for Pocket Machining”, *J. Manuf. Sci. Eng.*, köt. 125, sz. 4, o. 709–715, 0 2003, doi: 10.1115/1.1596579.

- [18] S. Pavanaskar, S. Pande, Y. Kwon, Z. Hu, A. Sheffer, és S. McMains, „Energy-efficient vector field based toolpaths for CNC pocketmachining”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 20, Part 1, o. 314–320, okt. 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.06.009.
- [19] C. Wang, X. Zhang, H. Cao, X. Chen, és J. Xiang, „Milling stability prediction and adaptive chatter suppression considering helix angle and bending”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, köt. 95, sz. 9–12, o. 3665–3677, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1389-4.
- [20] F. Guerrero-Villar, R. Dorado-Vicente, P. Romero-Carrillo, R. López-García, és J. Mercado-Colmenero, „Computation of Instantaneous Cutter Engagement in 2.5D Pocket Machining”, *Procedia Engineering*, köt. 132, o. 464–471, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.520.
- [21] D. Pérez-Canales, J. Álvarez-Ramírez, J. C. Jáuregui-Correa, L. Vela-Martínez, és G. Herrera-Ruiz, „Identification of dynamic instabilities in machining process using the approximate entropy method”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 51, sz. 6, o. 556–564, jún. 2011, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.02.004.
- [22] H. Wang, P. Jang, és J. A. Stori, „A Metric-Based Approach to Two-Dimensional (2D) Tool-Path Optimization for High-Speed Machining”, *J. Manuf. Sci. Eng.*, köt. 127, sz. 1, o. 33–48, márc. 2005, doi: 10.1115/1.1830492.
- [23] E. Y. T. Adesta, R. Hamidon, M. Riza, R. F. F. A. Alrashidi, és A. F. F. S. Alazemi, „Investigation of tool engagement and cutting performance in machining a pocket”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, köt. 290, o. 012066, 0 2018, doi: 10.1088/1757-899X/290/1/012066.
- [24] X. Xi, Y. Cai, Y. Gao, és C. Gao, „An analytical method to calculate cutter-workpiece engagement based on arc-surface intersection method”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 107, sz. 1, o. 935–944, márc. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05100-8.
- [25] J. Tlustý, S. Smith, és C. Zamudio, „New NC Routines for Quality in Milling”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, köt. 39, sz. 1, o. 517–521, 0 1990, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61110-X.
- [26] X. Zhang, J. Zhang, és W. Zhao, „A new method for cutting force prediction in peripheral milling of complex curved surface”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 86, sz. 1–4, o. 117–128, szept. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8123-x.
- [27] I. Biró és T. Szalay, „Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 88, sz. 9–12, o. 2735–2743, febr. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8957-x.
- [28] K. W. Chan és H. S. Choy, „Machining Tactics for Interior Corners of Pockets”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 20, sz. 10, o. 741–748, 2002, doi: 10.1007/s001700200232.
- [29] A. Agic, M. Eynian, S. Häggglund, J.-E. Ståhl, és T. Beno, „Influence of radial depth of cut on entry conditions and dynamics in face milling application”, *Journal of Superhard Materials*, köt. 39, sz. 4, o. 259–270, 2017, doi: 10.3103/S1063457617040062.
- [30] J. Kloypayan és Y.-S. Lee, „Material engagement analysis of different endmills for adaptive feedrate control in milling processes”, *Computers in Industry*, köt. 47, sz. 1, o. 55–76, jan. 2002, doi: 10.1016/S0166-3615(01)00136-1.
- [31] J. Xu, Y. Sun, és X. Zhang, „A mapping-based spiral cutting strategy for pocket machining”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 67, sz. 9–12, o. 2489–2500, dec. 2012, doi: 10.1007/s00170-012-4666-2.
- [32] Iwao Yamaji, Yoshiaki Kakino, Soichi Ibaraki, Hidetoshi Otsuka, Hidenori Saraie, és Heizaburo Nakagawa, „Influence of Die Geometry on Tool Life in Endmilling of Hardened Steel”, *Progress of Machining Technology*, 2002.
- [33] H.-C. Kim, „Tool path generation and modification for constant cutting forces in direction parallel milling”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 52, sz. 9–12, o. 937–947, jún. 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2790-4.

- [34] K. A. Desai és P. V. M. Rao, „Machining of curved geometries with constant engagement tool paths”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, köt. 230, sz. 1, o. 53–65, 2016, doi: 10.1177/0954405415616787.
- [35] T. R. Kramer, „Pocket milling with tool engagement detection”, *Journal of Manufacturing Systems*, köt. 11, sz. 2, o. 114–123, 1992, doi: 10.1016/0278-6125(92)90042-E.
- [36] J. A. Stori és P. K. Wright, „Constant engagement tool path generation for convex geometries”, *Journal of Manufacturing Systems*, köt. 19, sz. 3, o. 172–184, 2000, doi: 10.1016/S0278-6125(00)80010-2.
- [37] G. Póka, G. Mátyási, és I. Németh, „Burr Minimisation in Face Milling with Optimised Tool Path”, *Procedia CIRP*, köt. 57, o. 653–657, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.113.
- [38] L. Chen, Y. Li, és K. Tang, „Variable-depth multi-pass tool path generation on mesh surfaces”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 95, sz. 5–8, o. 2169–2183, márc. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1367-x.
- [39] I. Kuric és S. Legutko, „Chosen aspects of modern CAPP systems”, *Computational Methods in Science and Technology*, köt. 7, o. 65–74, 2001.
- [40] M. Held és C. Spielberger, „A smooth spiral tool path for high speed machining of 2D pockets”, *Computer-Aided Design*, köt. 41, sz. 7, o. 539–550, júl. 2009, doi: 10.1016/j.cad.2009.04.002.
- [41] B. Zhou, J. Zhao, L. Li, és R. Xia, „A smooth double spiral tool path generation and linking method for high-speed machining of multiply-connected pockets”, *Precision Engineering*, köt. 46, o. 48–64, okt. 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.03.014.
- [42] C. Zhuang, Z. Xiong, és H. Ding, „High speed machining tool path generation for pockets using level sets”, *International Journal of Production Research*, köt. 48, sz. 19, o. 5749–5766, okt. 2010, doi: 10.1080/00207540903232771.

## 6. A dolgozat témájához kapcsolódó saját publikációk listája

- [JÁ1] Jacsó Ádám és Mátyási Gyula, „Szerszám-pálya-generálás zsebek megmunkálásához”, XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT, o. 4, 2014.
- [JÁ2] Jacsó Ádám, Mátyási Gyula és Szalay Tibor, „Contour-parallel toolpath generation for pocket machining using Voronoi diagram”, 6th International Technical Conference and Technological Forum 2015, o. 5, 2015.
- [JÁ3] Jacsó Ádám, Mátyási Gyula és Szalay Tibor, „Advanced spiral tool path for circular pocket machining”, International Conference on Innovative Technologies (IN-TECH 2015), sz. pp. 202-205., o. 4, 2015.
- [JÁ4] Jacsó Ádám, Mátyási Gyula, és Szalay Tibor, „NC program geometriai feldolgozása technológiai elemzést végző szimulációhoz”, XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT, sz. pp. 226-230, o. 5, 2016.
- [JÁ5] Jacsó Ádám és Szalay Tibor, „Analysing and optimizing 2.5D circular pocket machining strategies”, Lecture Notes in Mechanical Engineering, sz. 201519, o. 355–364, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-68619-6\_34.
- [JÁ6] Jacsó Ádám, Szalay Tibor, Juan Carlos Jauregui, és Juvenal Rodríguez Resendiz, „A discrete simulation-based algorithm for the technological investigation of 2.5D milling operations”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, köt. 233, sz. 1, o.: 78-90., 2019, doi:10.1177/0954406218757267
- [JÁ7] Juan Carlos Jauregui, Juvenal Rodríguez Resendiz, Suresh Thenozhi, Szalay Tibor, Jacsó Ádám és Takács Márton, „Frequency and Time-Frequency Analysis of Cutting Force and Vibration Signals for Tool Condition Monitoring”, IEEE Access, köt. 6, o. 6400–6410, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2797003.
- [JÁ8] Gerencsér Ádám és Jacsó Ádám, „CAM rendszerek korszerű nagyoló ciklusainak kísérleti és szimulációs vizsgálata”, XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, sz. pp. 145-148., o. 4, 2019.
- [JÁ9] Jacsó Ádám, Mátyási Gyula és Szalay Tibor, „The fast constant engagement offsetting method for generating milling tool paths”, Int J Adv Manuf Technol, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03834-8.
- [JÁ10] Balázs Barnabás Zoltán, Jacsó Ádám és Takács Márton, „Micromachining of hardened hot-work tool steel: effects of milling strategies”, Int J Adv Manuf Technol, köt. 108, sz. 9, o. 2839–2854, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05561-x.
- [JÁ11] Jacsó Ádám és Szalay Tibor, „Optimizing the numerical algorithm in Fast Constant Engagement Offsetting Method for generating 2.5D milling tool paths”, Int J Adv Manuf Technol, köt. 108, sz. 7, o. 2285–2300, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05452-1.
- [JÁ12] Jacsó Ádám, Mátyási Gyula és Szalay Tibor, „A kontaktszög meghatározásának geometriai módszerei marásnál”, Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT, o. 149–152, 2020.
- [JÁ13] Jacsó Ádám, Mátyási Gyula és Szalay Tibor, „Trochoidal tool path planning method for slot milling with constant cutter engagement”, Lecture Notes in Mechanical Engineering, o. 8, 2020.

