

MISKOLCI EGYETEM DOKTORI (PHD) TÉZISFÜZETEI

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

**A marás számítógépes szimulációja és optimalási
kérdései**

Készítette:

NEHÉZ KÁROLY RÓBERT

okleveles gépészmérnök

AKI DOKTORI (PHD) FOKOZAT ELNYERÉSÉRE PÁLYÁZIK

MISKOLC, 2002

A bíráló Bizottság Tagjai

Elnök:

Dr. Tisza Miklós

a műszaki tudomány doktora

Titkár:

Dr. Varga Gyula

PhD

Tagok:

Dr. Horváth Mátyás

a műszaki tudomány doktora

Dr. Kovács György

az MTA doktora

Dr. Kundrák János

a műszaki tudomány doktora

Dr. Cser István

a műszaki tudomány kandidátusa

Hivatalos bírálók:

Dr. Mezgár István

a műszaki tudomány kandidátusa

Dr. Szalay Tibor

PhD

1. Előzmények

Az intelligens alkatrészgyártás egyik legfontosabb törekvése az, hogy a szerszámgépek működése közben minimálisra csökkentsék az operátori felügyelet szintjét. Ideális esetben az NC gépek automatikus üzemmódban működnek és ennek eléréséhez az NC program szimulációs és ellenőrző szoftverek felhasználása alapvető fontosságú. Egyszerű, hasáb alakú alkatrészek esetén elegendő a megmunkáló gépen egyszeri próbafuttatást alkalmazni, majd a megfelelő darabszámú alkatrészeket sorban legyártani. Szabadformájú (free-form) felületeket tartalmazó alkatrészekből általában csak néhány darab gyártása szükséges, ezért a próbafuttatás végrehajtási ideje túl nagy a teljes sorozat átfutási idejéhez képest. Az előgyártmányok ára gyakran olyan magas, hogy már komoly költségtöbbletet okozhat egy esetleges helyrehozhatatlan selejt alkatrész előállítás. A programbelövési idő csökkentésének legkézenfekvőbb módszere valamilyen NC program ellenőrző szimulációs módszer alkalmazása. A modern CAM alkalmazások fontos és elengedhetetlen komponense lett az NC program ellenőrző szimulátor.

Az NC program ellenőrző szimulátorokkal szemben támasztott fontos követelmény a szimulált modellek alapján az elfogadhatósági kritériumok vizsgálata. Ezt a folyamatot a szakirodalom verifikációnak nevezi. A jelenlegi fejlettségi szinten a szimulátorok az időegység alatt leválasztott anyagmennyiség (forgács) alapján képesek off-line szabályozásra, mivel a CLData kódot módosítva szabályozni tudják a technológiai paramétereket.

Az NC szimuláció témaköre egyszerre fejlődött a számítógépes grafikai lehetőségekkel és a rendelkezésre álló hardvereszközökkel. Az alkalmazott módszereket két fő csoportba sorolhatjuk. Az első az analitikus módszerek csoportja, amelyben az első eredményt 1978-ban *Gossard* és *Tsuchiya* érte el. Abban az időben már ismert szilárdtest modellezési lehetőségeket *Voelcker* (1981) használta fel NC geometriai szimulációra és ellenőrzésre. A másik szimulációs módszercsoport a diszkrét, közelítéses eljárások melyben jelentős eredményt ért el *Atherton* (1987), *Wang W.P.* (1986), *H. Oliver* (1992). Az említett szerzők már körvonalazták a lehetőségek határait. A 90-es években a fő kutatási irányok az ismert módszerek finomítására törekedtek. Az eljárások általános hátrányként meg kell említeni a nagy memóriaigényt és a kis számítási sebességet, esetenként a szimulált felület gyenge megjelenítési minőségét. *Kawasima* (1991), *Huang* (1997), *Albersmann* (1999), *König, Gröller* (1998) ezen hiányosságok kiküszöbölésére tett jelentős lépéseket.

A módszeres technológiai tervezés kialakulása a 20. század első évtizedében, a tömeggyártás elterjedése kapcsán zajlott le. A korszak kiemelkedő személyisége *F.W Taylor*, aki elsőként tett sikeres kísérletet a technológiai tervezés, a gyártási folyamatok szervezése és az üzemirányítás tudományos igényű összekapcsolására. Ezt a korszakot szokás a technológiai tervezés első forradalmának nevezni. A technológiai tervezés második

forradalma, a hatvanas évek első felében, a számítógépek műszaki alkalmazásának fokozatos terjedésével bontakozott ki. Az első, nemzetközileg is jelentős eredmények az APT rendszer létrehozásához kapcsolódnak (*D.T.Ross* 1955). A ma már klasszikus processzor-posztprocesszor elv az APT esetében jelent meg először.

Az NC programozást segítő, APT-szerű rendszerek közül a német EXAPT volt a legsikeresebb, amely a technológiai tervezés adott részfeladatainak automatizálásában nyújtott segítséget. A hetvenes évek közepére a nem APT alapú NC programozási rendszerek közül *Horváth Mátyás* irányítása alatt fejlesztett hazai FORTAP rendszer magas teljesítőképességével külföldön is nagy elismerésre tett szert. A forgástest jellegű alkatrészek teljes technológiai folyamatának automatizált tervezésére kifejlesztett TAUPROG-T rendszer a hazai technológiai tervezésemélet sajátos iskolájának kialakulásában is fontos szerepet játszott. Rendszertervét *Tóth Tibor*, *Vadász Dénes*, *Perger Géza*, *Detzky Iván* dolgozták ki. A rendszer hatékony algoritmusokkal támogatta a generatív sorrendszintézist, az automatikus felfogásmód-tervezést, a ráhagyások és műveletközi méretek meghatározását, az optimális ráhagyásleválasztási (fogásfelosztási) terv készítését, a gépi főidők számítását, a technológiai dokumentációk létrehozását.

A forgácsolástechnológiai folyamatok optimalálásának különböző kérdéseivel *Goranszkijt* követően *H.J. Jacobs*, *D. Kochan*, *W. König*, *W.R. Depiereux* és számos más külföldi kutató, hazánkban pedig *Horváth Mátyás*, *Somló János*, *Mészáros Imre* foglalkozott. A gyártórendszerek belső hierarchiájának kutatásában és a bonyolult rendszerek szintenkénti optimalálásában *Detzky Iván* ért el új eredményeket.

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén működő kutatócsoport sokéves munkája során arra a következtetésre jutott, hogy a technológiai tervezés, a termeléstervezés, műhelyszintű termelésirányítás integrálását, a célszerűen megválasztott intenzitás állapotváltozó jelentősen támogatja.

2. A dolgozat célkitűzése

Megvizsgálva a különböző ismert módszereket a megmunkálások számítógéppel segített geometriai szimulációja témakörben, arra a következtetésre jutottam, hogy hardveres gyorsítás alkalmazásával jobb minőségű és lényegesen gyorsabb szimulációs algoritmust lehet kifejleszteni. A hardveres gyorsítást, nem valamilyen célhardver, hanem szokványos, átlagosnak mondható grafikus kártya alkalmazásával céloztam meg. E cél megvalósításával a geometriai modellezés elvét racionálisan hozzá lehet igazítani a legújabb generációs grafikus hardverekhez.

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén már hosszú évek óta folyó, úgynevezett intenzitás alapú optimalási módszerek felkeltették az érdeklődésemet. A módszer

alapgondolata Detzky Ivántól származik, részletes kifejtésében és publikálásában *Tóth Tibor* és *Erdélyi Ferenc* játszott alapvető szerepet. Célul tűztem ki az eljárás továbbfejlesztését homlokmarásra. A szimulátorok képesek az egyes műveletelemek elvégzése során maradó szabálytalan ráhagyási alakzatok közelítéses számítására, ez lehetőséget teremt a forgácsleválasztási intenzitásszámításra, amely a szimulátorokat, posztprocesszorokat képessé teheti a megmunkálási paraméterek off-line szabályozására, a gyártási költségek és a termelékenység optimalizálására.

Kutatómunkám során a problémafeltevés, irodalomkutatás, megoldási módszerek keresése, implementálás, tesztelés, kiértékelés lépésekből álló ciklikus folyamatot követtem. Az irodalomkutatás során, alapvetően két tématerületet tekintettem át. Az egyik terület a forgácsolási folyamatok intenzitás alapú optimalizálásával foglalkozik. A másik pedig a számítógépes megmunkálás geometriai szimuláció és ellenőrzés tématerülete, ezen belül a hangsúlyt a marás specifikus problémákra helyeztem. Az elkészült kísérleti, prototípus szoftverek tesztelése, értékelése számos olyan új problémát vetettek fel, melyek megoldása újabb módszerek, technikák felhasználását, fejlesztését tették szükségessé. A kutatás során arra törekedtem, hogy minél több modern szoftvertechnológiai eszközt elsajátítsak és alkalmazzak.

3. A feladat megoldásának módszere

A megmunkálás-szimulációs algoritmusok megismerése, és néhány fontosnak ítélt eljárás implementálása volt az első lépés. Gyakorlati tapasztalatok és a szakirodalom tanulmányozása után követelményrendszert állítottam fel, amely egyfelől a forgácsolási folyamatokra, másfelől magára a szimulációs algoritmusra vonatkozik.

A forgácsolási folyamatok esetén alkalmazott szimulációs és ellenőrző eljárások ideális esetben a következő kérdésekre keresik a válaszokat: (1) Az adott műveletelem alkalmazásakor a megmunkált felület megfelel-e az előírt tűrés követelményeinek? (2) Van-e valamilyen nemkívánatos mellékhatás, ütközés? Például: a munkadarabfelfogó készülék ütközik-e a szerszámmal, vagy a szerszámbe fogó készülék ütközik-e a kész felülettel? (3) Mekkora az adott műveletelem termelékenysége, költsége? (4) A forgácsoláskor fellépő erők nem okoznak-e szerszámtörést vagy túl nagy szerszámelhajlást, esetleg gyors szerszámkopást?

Ezekre a kérdésekre kielégítő választ akkor kaphatunk, ha megvizsgáljuk, és osztályozzuk a megmunkálás közben lehetséges hibákat. Különböző tevékenységekhez, és szintekhez különböző hibaforrások és hibatípusok tartoznak. A mai korszerű, kereskedelmi forgalomban kapható NC program szimulátor és ellenőrző szoftverek általában csak az NC program szintű hibák feltárását és automatikus vagy interaktív korrigálását teszik lehetővé. Ez abból adódik,

hogy a NC program nézőpontjából lehetetlen a felsőbb hierarchiai szintek vizsgálata, hogyha például nincs semmilyen információnk a tényleges megmunkáló gépről, gyártócelláról, arról a tágabb környezetről, ahol a megmunkálás valójában végbemegy. A NC kód generáló posztprocesszorok csak a legalapvetőbb geometriai, technológiai információkat tárolják az egyes gépekről, vezérlésekről. A szerszám pálya generátor szoftverek az egyes megmunkáló műveleteket általános gépekre hozzák létre (a már említett processzor-posztprocesszor elv). A hagyományos megmunkálások esetében ez a módszer jól bevált és a mai napig elfogadott.

Vannak azonban olyan modern megmunkálási eljárások, amelyek technológiai tervezésekor is szükséges a gépkonfiguráció geometriai kialakításának ismerete. A szerszám pálya generátor szoftverek ilyen esetben is dolgozhatnak hagyományos geometriai rendszerben (munkadarabhoz kötött rendszerben), de a posztprocesszálási fázishoz már nélkülözhetetlen a valóságos elrendezés ismerete. Az öttengelyes megmunkálási módszerek ebbe a kategóriába sorolhatóak. Általánosságban igaz az a kijelentés, hogy az öttengelyes megmunkálás-szimulátorok működéséhez elengedhetetlen a tényleges gépkonfiguráció geometriai elrendezésének ismerete. Ezzel a többletinformációval, a megmunkáló gép szintjén jelentkező hibák nagyrésze is korrigálható.

Az implementált szimulációs algoritmusok alapján következtetésre jutottam, hogy az NC megmunkálás-szimulációhoz a *munkadarab*, az *alkatrész*, és a *szerszám származtató felülete által seprert térfogat*, mint három geometriai entitás modellezésére van szükség. Öttengelyes megmunkálás esetén negyedikként a *szerszám gép* geometriai modellezése is szükséges. A munkadarab geometria dinamikusan változik (térfogata csökken), miközben a szerszám a megadott szerszám pálya mentén mozog, és anyagot távolít el belőle. Olyan algoritmus kifejlesztése a cél, amely gyorsan és pontosan tudja modellezni ezt az anyageltávolítási folyamatot. A modellek követelményrendszere annak a függvényében változik, hogy milyen típusú szimuláció és ellenőrzési feladatot kell végrehajtani. A különböző műveletelemek szimulációjának eltérő követelményei lehetnek.

Az NC program ellenőrző eljárások közül a következő négyet célszerű alkalmazni a szimulátorokban: (1) a kész felület vizuális ellenőrzése a teljes NC program szimulált futtatása után (2) a szerszám egyes elmozdulásainak megfigyelése, grafikus animáció segítségével, (3) a megmunkált felület és a tervezett felület összehasonlítása (4) a megmunkálás közben fellépő erők és szerszám elhajlások összehasonlítása a megengedett értékekkel.

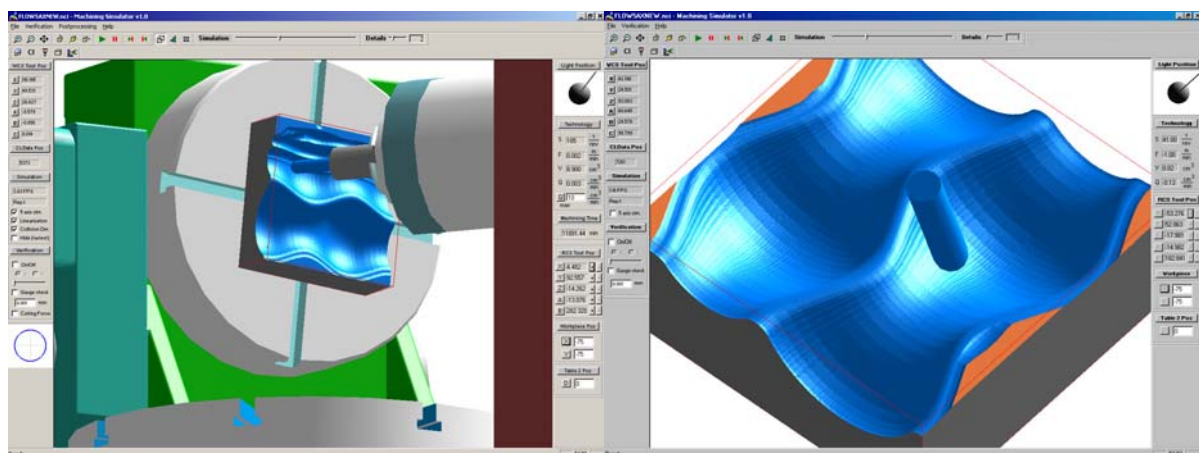
Mind a négy eljárásnál szükség van nézőpont független munkadarab vizsgálatra. Ez azt jelenti, hogy kiegészítő követelményként azt is el kell várni egy algoritmustól, hogy képes legyen dinamikusan változtatni a nézőpontot a szimuláció fent említett első és második eljárásában, elősegítve ezzel a valódi munkatér szimulációt. Tapasztalataim azt mutatják, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható szimulátorok ezt csak részben vagy egyáltalán nem tudják teljesíteni. Ez a kiegészítő követelmény azért fontos, mert ennek hiányában nem lehet megvalósítani a valós idejű 5 tengelyes anyagleválasztás szimulációt és grafikus

animációt, mégpedig azért nem, mert a forgó és billenő asztalokon elhelyezett munkadarab megmunkálás közben dinamikusan változtatja a pozícióját.

A z-buffer algoritmust a 70-es évek közepétől alkalmazzák a háromdimenziós grafikában, bár eleinte a nagy tárigénye miatt háttérbe szorult. A *z-buffer algoritmus* a takarási feladatot az egyes pixelekre oldja meg, oly módon, hogy minden pixelre megkeresi azt a poligont, amelynek a pixeleken keresztül látható pontjának a *z* koordinátája minimális. Ezt a keresést azzal támogatja, hogy minden pixelhez letárol egy aktuális mélység értéket. A poligonokat egyenként dolgozza fel és meghatározza a poligonok vetületén belül eső pixeleket.

A szimuláció szempontjából fontos felismerés, hogy ha z-buffert a megszokottól eltérően alkalmazzuk, akkor ez lehetőséget teremt a marás geometriai szimulációjához. Az átalakított z-buffer működés, amit a disszertáció részletesen bemutat, az OpenGL API segítségével könnyen implementálható, a felhasználó által nem látható „hátsó” mélységbufferben (*depth buffer*). Az *Silicon Graphics* által specifikált és elsőként az *NVIDIA* által megvalósított egyik új lehetőség az úgynevezett p-buffer kiterjesztés, ami lehetővé teszi a felbontás független mélység bufferek alkalmazását. Az új szimulációs módszer a hagyományos, p-buffert nem tartalmazó videó hardvereken is alkalmazható. A nagy számítási sebesség miatt a valószerű animált öttengelyes megmunkálás-szimuláció is létrehozható a módszer segítségével. A 1. ábrán látható a módszert alkalmazó saját fejlesztésű prototípus szimulátor két képernyőmentése.

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén már hosszú évek óta végzett intenzitás alapú optimálási módszerek kutatómunkájába 2000 szeptemberétől bekapcsolódtam. A disszertáció keretében a módszer alkalmazhatósági lehetőségeit megvizsgáltam marás esetére is. A forgácsolási folyamat műveletelemeinek tervezésekor az optimális technológiai paramétereinek meghatározása a gazdaságosság és termelékenység szempontjából kulcsfontosságú feladata.



1. ábra: a p-buffer eljárást használó prototípus szoftveralkalmazás két képernyője.

A technológiai paraméterek optimálására alkalmazható matematikai modellnek három összetevője van: (1) Az adott feladat mértékadó technológiai korlátainak meghatározása; (2) Az optimumkritériumként használt célfüggvény meghatározása; (3) A szerszáméltartam összefüggés, amely a célfüggvény feltételi egyenlete.

A modell független változói, amelyek egyben az optimálandó forgácsolási paraméterek, homlokmarás esetén a fogásmélység (d), a fogásszélesség, és az előtolás (f) vagy fogankénti előtolás (f_z).

Továbblépésként és összegzésként analitikus módszerrel megvizsgáltam, milyen hatással van a forgácsoló szerszám éltartamának a technológiai gyakorlatban adódó szórása az úgynevezett relatív költségekvivalens idő függvény változásra. Arra a következtetésre jutottam, hogy a végeredményként kapott összefüggések gyakorlati ökölszabályként is jól alkalmazhatóak a gyakorlatban. A levezetéseket és részletes következtetéseket a disszertáció tartalmazza.

4. Új tudományos eredmények

Az értekezésemben kidolgozott új tudományos eredményeket az alábbiakban foglalom össze:

Megvizsgálva a különböző ismert módszereket a marás számítógéppel segített geometriai szimulációja témakörben, arra a következtetésre jutottam, hogy hardveres gyorsítás alkalmazásával jobb minőségű és lényegesen gyorsabb szimulációs algoritmust lehet kifejleszteni.

Első tézis:

Kidolgoztam egy új heurisztikus marás-szimulációs módszert, ami abban tér el a jelenleg ismert módszerektől, hogy a három- és öttengelyes anyagleválasztás szimulációt, teljes egészében a számítógép videokártyája végzi. Ezzel a módszerrel a szimuláció sebessége és minősége is nagymértékben felgyorsul az eddig ismert eljárásokkal összehasonlítva. A sebességnövekedéssel lehetőség nyílik a munkatér valós idejű animációjára is, amely az öttengelyes megmunkálások szimulációja esetében nélkülözhetetlen.

* * *

Második tézis:

Az első tézisben bemutatott módszer alkalmazásával és a helyességének bemutatásához kidolgoztam egy prototípus marás szimulátor alkalmazást. A szoftver főbb szolgáltatásai:

- Szimulálja egy két körasztalos felépítésű szerszámgép munkaterét.
- Valós időben számítja és kijelzi a megmunkálógép egyes alkatrészeinek egymással való esetleges ütközését az ún. "AABB-tree" módszerrel. Továbbá nullpontfelvételnél is ezt az ütközésvizsgálati eljárást alkalmazza.
- Az anyagleválasztási intenzitás mérése az egyes szerszámelmozdulások között mérhető. Az előre megadott maximális intenzitás átlépése esetén a szimulátor az előtolás értéket automatikusan csökkenti.
- Öttengelyes megmunkálás esetén szerszámhelyzet transzformációt végez a munkadarab koordináta-rendszeréből a szerszámgép munkaterének koordináta-rendszerébe.
- Geometriai korrekciót (linearizációt) végez. A körasztal és a munkadarab geometriai helyzetéből adódó hibát, a rendszer automatikusan számítja és korrigálja.
- Feldolgozza a tervezett felület geometriáját, és összehasonlítja a 'megmunkált' felülettel.

* * *

A forgácsolási folyamat műveletelemeinek tervezésekor az optimális technológiai paramétereinek meghatározása a gazdaságosság és termelékenység szempontjából kulcsfontosságú feladata. A technológiai paraméterek optimalizálására alkalmazható matematikai modellnek három összetevője van:

- (1) Az adott feladat mértékadó technológiai korlátainak meghatározása;
- (2) Az optimum-kritériumként használt célfüggvény meghatározása;
- (3) A szerszáméltartam összefüggés, amely a célfüggvény feltételi egyenlete;

A modell független változói, amelyek egyben az optimizálandó forgácsolási paraméterek, homlokmarás esetén a fogásmélység (d), a fogásszélesség (w), és az előtoló sebesség (f) vagy fogankénti előtolás (f_z).

Harmadik tézis:

Kidolgoztam a homlokmarás anyagleválasztási intenzitáson alapuló technológiai modelljét. Meghatároztam a főbb technológiai korlátokat, korlátfüggvényeket és a költségekvivalens idő függvényt. Megfogalmaztam a CAPP rendszer számára fontos direkt és indirekt feladatot.

* * *

A technológiai gyakorlatban az előírt optimális éltartam és intenzitás a munkadarab geometriájából vagy inhomogenitásából adódóan nem minden esetben érhető el. Szükséges a CAPP rendszerben is alkalmazható modell kialakítása, amely megfelelő módon kezelni tudja ezt a sztochasztikus jelenséget. A kialakított analitikus modell, az optimálási módszer alkalmazhatósági határait vizsgálja.

Negyedik tézis:

Analitikus módszerrel megvizsgáltam, milyen hatással van a forgácsoló szerszám éltartamának a technológiai gyakorlatban adódó szórása a relatív költségekvivalens idő függvény változásra. Két esetet különböztettem meg:

- valamely technológiai korlát az optimálási tartományt degenerálja (*degenerált keresési tartomány*), ezért az optimális intenzitás úgynevezett kvázi-optimális lesz.
- nincs mértékadó technológiai korlát (*szabályos keresési tartomány*) ezért az optimális anyagleválasztási intenzitás alkalmazható a műveletelemben

Ha a műveletelemhez tartozó *optimális intenzitás* szabályos keresési tartományban adódott, akkor a relatív éltartam változás, sokkal kedvezőbb befolyással van a relatív költségekvivalens idő változásra, mint ha az *optimális intenzitás* degenerált keresési tartományban adódott volna.

Az analitikus hibavizsgálat fő célja az, hogy segítségével megadhatjuk a megengedett relatív költségeltérés előírásakor a megengedett éltartamszórás tartományát is. Amennyiben ez a szórási tartomány *nagyobb*, mint amely a vizsgált gyártási feladatra a technológiai gyakorlatban valójában előfordul, akkor a *statikus optimálás* helyes eredményt ad. Ellenkező esetben viszont, *dinamikus* optimáló módszereket kell alkalmazni.

5. Az eredmények hasznosítása, lehetőségek a továbbfejlesztéshez

Az összefoglalt tudományos eredmények a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén folytatott kutatásokhoz csatlakoznak. Az elért eredmények a következő projektekből kerültek közvetlenül felhasználásra:

- *Gyártási folyamatok objektum orientált modellezése*,
Felsőoktatási Kutatási Fejlesztési Pályázat,
azonosító: 0275,
projektvezető: Dr. Erdélyi Ferenc
- *Digitális Vállalat*
Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program (NKFP)
azonosító: 2/040/2001
projektvezető: Dr. Tóth Tibor

Az értekezés elért eredményei a műszaki gyakorlatban is jól hasznosíthatók. Az egyetemi oktatás keretein belül a "Számítógépes Gyártásirányítás" című tárgy keretében demonstrációs céllal alkalmazható.

A továbbfejlesztés egyik lehetséges iránya a szimulátor továbbfejlesztése különböző öttengelyes gépkonfigurációk támogatására. Adatbázis-kapcsolatot lehet kidolgozni relációs szerszám adatbázisokhoz is. Ezen kívül gyakorlati mérésekkel lehet igazolni a disszertáció ötödik fejezetében bemutatott elvi mechanikai modellt. A disszertáció második mellékletében bemutatott minta adatbázist ki lehet dolgozni relációs adatbázis formájában is.

6. Az értekezés témájában megjelent tudományos közlemények

- [1] **Károly Nehéz:** *Postprocessor development*, International Workshop on Mechatronics Courses Proceedings 11-14 June p. 208, 1997.
- [2] **Nehéz Károly:** Bonyolult felületek előállítására 5 tengelyes posztprocesszor alkalmazásával, XIII. Szerszámgépek konferencia Miskolci Egyetem B,D,E,F szekciók kiadványa pp. 29-33, 1998. október 26-27.
- [3] **Nehéz Károly:** *5-tengelyes posztprocesszor fejlesztése*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 1998. november 6. Gépészmérnöki Kar szekciókiadványa pp. 48-54.
- [4] **Károly Nehéz:** *Five-axis postprocessor development*, microCad '99 International Computer Science Conference February 24-25, 1999

- Section I: Information Science and Technology, pp. 179-184.
- [5] **Károly Nehéz:** *Advanced simulation of five-axis machining*, 2nd International Conference of Phd Students, University of Miskolc, Hungary, 8-14 August 1999 pp. 390-395.
- [6] **Nehéz Károly:** *3-5 tengelyes megmunkálások számítógépes szimulációja*, A magyar tudomány napja, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 1999. november 4-5. pp. 40-45.
- [7] **Károly Nehéz:** *Computer Aided 3-5 Axis Milling Simulation*, microCad '2000 International Computer Science Conference 23-24 February 2000, Section I: Information Science and Technology pp.133-138.
- [8] **Nehéz Károly**, Dr. Csáki Tibor: *3 és 5 tengelyes NC megmunkálás számítógépes szimulációja*, OGÉT 2000, VIII. Országos Gépész Találkozó, 2000. április 7-9. Marosvásárhely, pp. 51-54.
- [9] **Károly Nehéz**, Takács György: *Cad environment for Machine Tools Design*, microCad '2000 International Computer Science Conference 23-24 February 2000, Section I: Information Science and Technology pp.139-144.
- [10] **Károly Nehéz**, György Velezdi, Tibor Csáki: *Efficient Simulation of 3-5 Axis Milling*, microCad '2001 Section J: 'Gábor Dénes' Applied Information Technology pp.183-188.
- [11] **Károly Nehéz**, György Velezdi, Tibor Csáki: *Cutting Force Modelling in 3-Axis Milling Simulators*, microCad '2002 International Computer Scientific Conference 7-8 March 2002. Section: H1 -Applied Information Engineering 2002. pp. 157-162.
- [12] **Károly Nehéz**, Tibor Tóth: *Optimization of Face-Milling Conditions on the Base of Material Removal Rate*, The Tenth International Conference on Machine Design and Production 4-6 September 2002, Cappadocia, Turkey, pp. 139-152.
- [13] **Károly Nehéz**, Tibor Csáki: *Cutting Force Modeling Possibilities in OpenGL Based Milling Simulators*, The Tenth International Conference on Machine Design and Production 4-6 September 2002, Cappadocia, Turkey, pp. 127-138.
- [14] **Károly Nehéz**, György Velezdi, Tibor Csáki: *Cutting Force Modelling with 3-Axis Milling Simulators*, GÉP, Gépipari tudományos egyesület műszaki folyóirata LIII. évfolyam 2002/2-3 pp. 36-39.
- [15] **Károly Nehéz**, Tibor Tóth: *Optimization of Face-Milling Conditions on the Base of Material Removal Rate*, Publications of the University of Miskolc, Series C, Mechanical Engineering, journal of Production Systems and Information Engineering, Volume 54. megjelenik decemberben.
- [16] **Károly Nehéz**, Tibor Csáki: *Cutting Force Modeling Possibilities in OpenGL Based Milling Simulators*, Publications of the University of Miskolc, Series C, Mechanical Engineering, journal of Production Systems and Information Engineering, Volume 54. megjelenik decemberben.