



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS –TECHNOLÓGIA TANSZÉK

Tézisfüzet

**TÖBBTENGELYES MEGMUNKÁLÁS ANYAGELTÁVOLÍTÁS-SZIMULÁCIÓJA ÉS
FORGÁCSOLÁSI ERŐINEK BECSLÉSE ÁLTALÁNOS CÉLÚ GRAFIKUS VÉGREHAJTÓ
EGYSÉGEN**

Szerző:

TUKORA BALÁZS

Témavezető:

DR. SZALAY TIBOR

2012, Budapest

1 Bevezetés

Az automatizált megmunkálási folyamatok hatékony tervezése ma már elképzelhetetlen CAM rendszerek használata nélkül. Bár közvetlenül a szerszámgép vezérlőjét is programozhatjuk, mégis, ha bonyolult a munkadarabunk illetve számos műveletet kell rajta elvégeznünk, a pontos és gyors programozáshoz igénybe kell vennünk a CAM programok segítségét. Ez különösen igaz a több-tengelyes megmunkálásokra, ahol komplex, sokszor szoborszerű felületeket képzünk egyetlen befogással. Az optimális szerszámpálya előállítása a CAD alkatrésztervek alapján kifinomult számítógépi algoritmusokat igényel; másrészt a felhasználónak is meg kell engednünk azt, hogy ellenőrizze, vagy ha szükséges, módosítsa a számítógép által előállított műveleteket az interaktív folyamattervezés során. Az ellenőrzés legalapvetőbb módja a tervezett megmunkálási műveletek szemrevételezése a CAM program képernyőjén. A megmunkálási folyamatok vizualizációjának több szintje van, a szerszámpálya vonalszerű ábrázolásától kezdve a munkadarab alakváltozásának részletes megjelenítéséig az anyageltávolítási folyamat során. Míg az első segít kiküszöbölni az automatikus pályagenerálás durva hibáit, az utóbbi többek között a megmunkált alkatrész geometriai hibáira deríthet fényt. A disszertáció első része a megmunkálási folyamatoknak e magasabb szintű reprezentációjával foglalkozik.

Az anyageltávolítási folyamat szimulációja különleges kihívást jelent a CAM programok fejlesztőinek. Ahhoz, hogy megismerhessük a munkadarab végső alakját, a teljes anyageltávolítási folyamat szimulációját el kell végezni. Mivel a modellezett munkadarabnak kellően részletesnek kell lenni a vizuális ellenőrzéshez, a teljes geometriai információt leíró, hatalmas mennyiségű adatot kell rövid időn belül feldolgozni. Az idők során több, eltérő hatékonyságú szimulációs módszer is született erre a feladatra. Az egyik legrégebbi, és a mai napig leghatékonyabb megoldás sikere abban rejlik, hogy az anyageltávolítás-szimuláció során elvégzett számítási műveleteket nagyfokú párhuzamosítás mellett a grafikus végrehajtó egység (GPU) segítségével végzi el. Sajnos ez a módszer csak a 3-tengelyes megmunkálás egyszerű geometriai viszonyai esetén bizonyult életképesnek. A többtengelyes megmunkálás során kialakított munkadarabok összetett geometriája nem ábrázolható a hagyományos GPU-k által támogatott adatstruktúrákkal, a CPU-n történő szekvenciális programfuttatás teljesítménye pedig meg sem közelíti a GPU alapú megoldását.

Az általános célú grafikus végrehajtó egységek (GPGPU-k) megjelenése új eszköz adott a nem grafikus (tehát „általános” célú), nagymértékben párhuzamosított számítások végrehajtásához hagyományos személyi számítógépes környezetben. A doktori munka elsődleges célja egy olyan több-tengelyes anyageltávolítás-szimulációs módszer kidolgozása volt, amely ezen új generációs grafikus hardverek teljes mértékű támogatását élvezzi, ily módon érve el a hagyományos GPU-k által támogatott 3-tengelyes módszerek teljesítményét. Ez nem csupán valamely hagyományos algoritmus modern eszközön történő futtatását jelenti, hanem az adatábrázolás átalakítását, hogy teljesítsük a GPGPU-k egységesített hardver-architektúrája által támasztott követelményeket; a térfogat-kivonási műveletek

nagymértékben párhuzamosított végrehajtási módjának kidolgozását; valamint a megjelenítéshez elengedhetetlen adatrekonstrukció módjának definiálását. A munka eredménye egy nagyfelbontású, valós idejű szimuláció, ahol adatelemek milliói vesznek részt a számításokban a több-tengelyes anyageltávolítási folyamat gyors és részletes megjelenítése érdekében.

Az egyszerű vizualizáció mellett van egy másik, egyre fontosabb indoka is az anyageltávolítás-szimuláció CAM rendszerekbe való integrálásának. Az ismert CAM programok legújabb verziói olyan automatizált előtolás-optimaló eljárásokat kínálnak, amelyekkel jelentősen lecsökkenthetjük a megmunkálási időt. Ez azokban az esetekben lehetséges, amikor a technológiai kézikönyvekben található megmunkálási paraméterek kiválasztása kevésbé praktikus a nagymértékben változó forgácsolási viszonyok miatt. A többtengelyes megmunkálások pedig éppen ilyenek. Az előtolás-optimalás a várható forgácsolási erő becslésén alapul, és ehhez az anyageltávolítás-szimuláció szolgáltat megfelelő geometriai információkat a megmunkálási folyamatról.

Bár a CAM rendszerek készítői a megmunkálási idő jelentős csökkenését ígérik az előtolás-optimaló funkcióknak köszönhetően, használatuk veszélyeket is hordoz: a gyors, de durva erőbecslési módszerek nem garantálják a szerszámgyártók által ajánlott megmunkálási paraméterek betartását. Mindez fokozott szerszámkopáshoz és felületi minőségromláshoz vezethet. Éppen ezért meg kell vizsgálnunk, hogy létezik-e olyan, nagyobb pontosságot eredményező erőszámítási modell, amely bevethető ezeknél az optimalási feladatoknál.

A *mechanikus forgácsolási erő* modellel, bár sokkal pontosabb és részletesebb eredményeket szolgáltat, mint az előtolás-optimalásnál általánosan használt módszer, nem találkozhatunk a CAM programokban. Ennek a legfőbb oka az, hogy a modell egyenleteiben szereplő forgácsolási erő együtthatókat csak körülményes próbamegmunkálások elvégzésével tudjuk meghatározni, ráadásul korlátozott az érvényességük. A disszertáció második részében azzal foglalkozom, vajon lehetséges-e úgy átalakítani a mechanikus modell erőegyenleteit, hogy a gyakorlatban jobban használható számítási módhoz jussunk. Az egyenletek GPGPU környezetben történő hatékony megoldásának egy új módját mutatom be, továbbá az együtthatók meghatározásához egy olyan algoritmust javaslok, amely mentes az eddigi megoldásokra jellemző geometriai megkötésektől. Mindazonáltal, a bemutatott módszerek alkalmazhatósága több kérdést is felvet: elegendő információval rendelkezünk-e a forgácsolási folyamatról az offline fázisban, vagy magánál a szerszámgépénél kell elvégeznünk az erőbecslést? Mik ennek a feltételei? Ezekre a kérdésekre is kitérek a disszertációban.

2 Virtuális megmunkálás

2.1 Technológiai áttekintés

A CAM programok kétféle megmunkálás-szimulációt tartalmaznak, eltérő célokra. Az első a megmunkálási folyamatra koncentrálnak: megjeleníti a szerszámegység mozgását, kirajzolja a szerszám útját a szerszám-pálya-ellenőrzéshez, és ütközésvizsgálatot végez a munkatérben mozgó és álló egységek között. A virtuális tér objektumainak alakja statikus; a munkadarab alakváltozása és a forgácsolási folyamat nem követhető figyelemmel – ehelyett a szerszámegység kinematikai viselkedése a szimuláció tárgya, CAD modellezési technikákkal előállított merev testek egymást követő térbeli transzformációival, a munkadarab végső, megmunkált formájának ábrázolásával.

A virtuális megmunkálás másik fajtája az anyageltávolítási folyamat szimulációját végzi. Egyrészt az alakhelyesség ellenőrzése céljából bemutatja az előgyártmány alakváltozását, mialatt a szerszám végighalad a szerszám-pályán. Másrészt a forgácsolási folyamat során folyamatosan változó geometriai viszonyokról szolgáltat információt az erőbecsléshez és előtölés-optimaláshoz. A szimuláció alapja a munkadarab és a szerszám szilárdtest-modellezése a virtuális térben. A szerszám behatol a munkadarabba és anyagot távolít el belőle – tehát a szerszám térfogatát ki kell vonnunk a munkadarabéból. Az előgyártmány térfogatának és a szerszám sepről térfogatának a különbsége a teljes szerszám-pálya mentén adja a munkadarab formáját az anyageltávolítási folyamat végén.

Az anyageltávolítás-szimulációs módszerek közül a *z-map módszer* – ahol úgynevezett mélységi képek reprezentálják a munkadarab geometriáját – bizonyult a legsikeresebb technikának, mivel a képtérben végzett műveletek elvégzését nagymértékben támogatják a hagyományos grafikus hardverek. A hardver-technológia fejlődését követő számtalan adaptációjának köszönhetően vált a 3-tengelyes virtuális megmunkálás vezető megoldásává. Mindazonáltal, a módszer csak azokban az esetekben alkalmazható, ahol a megmunkálás során a szerszám irányultsága állandó, ugyanis egyetlen mélységi képből nem ábrázolhatunk egymás által takart felületeket. Ez azt jelenti, hogy nem használható többtengelyes megmunkálások szimulációjára. Többféle megoldás született e probléma kiküszöbölésére. A *kiterjesztett z-map módszer* ún. *dexeleteket*, az *egyenközű tér-dekompozíció (uniform space decomposition)* azonos nagyságú kockákat, míg a *hierarchikus tér-dekompozíció (hierarchical space decomposition)* különböző méretű térrészeket használ a virtuális objektumok geometriájának leírásához. Néhányan a *konstruktív szilárdtest-geometriát (constructive solid geometry)* javasolták marási folyamatok szimulációjához. A *felület-modellezés (boundary representation, BRep)* a CAD rendszerekben domináló modellezési technika, amelynek egyszerűbb formáját, a *háromszög-alapú felület-modellezést* ismerhetjük fel virtuális megmunkálásoknál. Sajnos azonban elmondható, hogy ezeknek a megoldásoknak a teljesítménye még csak meg sem közelíti a képtér-alapú módszerét, mivel nem élvezik a grafikus hardverek támogatását. Összehasonlító vizsgálatokban kimutatták, hogy a GPU-val támogatott *z-map* módszer legalább egy nagyságrenddel gyorsabb, mint a CPU-n futtatott többtengelyes szimulációs technikák.

A modern CAM rendszerek magas szintű grafikus támogatást nyújtanak a folyamattervezéshez és a megmunkálási tervek előzetes ellenőrzéséhez. Lenyűgöző megjelenítéssel találkozhatunk esetükben, hála a nagy felbontású, síklapos felületmodell alapú kinematikai szimulációnak és a számtalan vizuális segédeszköznek. Mindez azonban ez nem mondható el a többtengelyes anyageltávolítás-szimulációs moduljaikra. A hagyományos technikák nem használhatók szabadformájú felületek 5-tengelyes megmunkálásánál. Az eredeti z-map módszer adaptálása szerény eredményeket hozott; a kiterjesztett z-map módszer és az objektumtérben végzett technikák elvesztették a grafikus hardverek támogatását; míg az egyéb járulékos megoldások, mint például a szerszám seprert térfogatának analitikus meghatározása, amely jól definiálható szerszám-mozgásoknál felgyorsíthatja a szimulációt, nem bizonyult életképesnek többtengelyes megmunkálások esetén a bonyolult szerszám pályák miatt.

2.2 A virtuális megmunkálással kapcsolatban kitűzött feladatok

A meglévő technológiák hiányosságait figyelembe véve a kutatómunka elsődleges célja egy olyan anyageltávolítási szimulációs módszer kidolgozása 5-tengelyes megmunkálásokra, amely kihasználja a legújabb generációs grafikus hardverek, az általános célú grafikus végrehajtó egységek nagymértékben párhuzamosított program-végrehajtási képességének előnyeit. Mindez a CPU minimális közreműködését jelenti az adatkonverzió, adat-reprezentáció, -feldolgozás és megjelenítés terén. A módszernek a következő tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- A z-map módszer hagyományos grafikus hardveren elért sebességével azonos nagyságrendű számítási sebesség;
- A térfogat-kivonási műveletek nagymértékben párhuzamosított végrehajtása GPU programok (shaderek) által, seprert térfogatok és bonyolult geometriájú szerszámok használatának támogatásával az analitikus számítások mellett;
- Teljes mértékben GPU alapú adatkonverzió testmodellből megjelenítésre alkalmas soklapos modellé, a CPU-GPU közötti szűk adatátviteli keresztmetszet negatív hatásainak kiküszöbölése érdekében;
- A folyamat megjelenítése a BRep alapú CAD modellek esetén megszokott minőségben.

2.3 Megvalósult eredmények

A céloknak megfelelően egy teljes körű többtengelyes anyageltávolítás-szimulációs eljárás került kifejlesztésre, amelyet – a kiinduló adatok létrehozásán kívül, amely a CPU és GPU közötti munkamegosztás eredménye – teljes egészében a grafikus hardver végez, beleértve az adat-reprezentációt és –feldolgozást, valamint a virtuális objektumok megjelenítését. Miután a megfelelő volumetrikus modellezési technika kiválasztásra került, az adatstruktúráját a GPU shaderek általi feldolgozáshoz igazítottam, hogy mellőzhető legyen a CPU közreműködése. Kétféle térfogat-

kivonási számítási módszert alkalmaztam: egy hagyományos analitikus algoritmust és egy képtér-alapút – mindkettőt a GPGPU alapú párhuzamos végrehajtás követelményeinek megfelelően. Az utóbbi kiszolgálására egy GPU alapú módszert javasoltam a seprert térfogat meghatározására. Végül egy gyors és megbízható megjelenítési technikát dolgoztam ki a speciális, nagy-sűrűségű dexel-adatstruktúrához alakítva.

Az elvégzett tesztek megmutatták, hogy a térfogat-kivonási számítások és az adatkonverziós lépések nagymértékben párhuzamosított végrehajtása, valamint a CPU-GPU közötti adatátvitel szűk keresztmetszetének kiiktatása számottevő sebességbeli és minőségi javulást eredményez. A multi-dixel alapú módszer teljes egészében grafikus hardverre történő adaptálásával először sikerült elérni, hogy egy több-tengelyes megmunkálás-szimulációs technika elérje a 3-tengelyes módszerek teljesítményét. A gyors adatkonverzió és a párhuzamosított térfogat-kivonási számítások lehető tették egy hatékony újraszámolási és nagyítási megoldás alkalmazását, növelve a szimuláció minőségét. Az úgynevezett réteges mélységi és normálvektoros képek (layered depth-normal images, LDNI) használata a szerszám térfogatának leírásához a térfogat-kivonási műveleteknél megengedi bonyolult geometriájú szerszámok és soklapos seprert térfogatok bevonását is a szimulációba.

Az eredmények azt mutatják, hogy a legújabb technológia használata új lehetőségeket teremt a megmunkálási szimulációk terén, különösen, ha a grafikus hardverek szegmensének elképesztő növekedési ütemére tekintünk. Amint a GPGPU-k a személyi számítógépes környezet mindennapos alkotórészeivé válnak, a szoftvertechnológiai módszereknek is változniuk kell. Többé nem hagyható figyelmen kívül a mérnöki szoftver-rendszerek fejlesztésénél az új hardver-architektúra párhuzamos számításoknál mutatott hatékonysága.

3 GPGPU alapú forgácsolási erő becslés

3.1 Technológiai áttekintés

Az anyageltávolítás-szimuláció nem csupán a tervezett megmunkálási folyamat vizuális ellenőrzésére alkalmas, hanem a forgácsolási erő becsléséhez, az előtolás-optimaláshoz is képes geometriai információkat szolgáltatni a megmunkálási folyamatról. A forgácsolási erő helyes megválasztása hatással van a biztonságra, a megmunkálási időre és a kialakított felületek minőségére. Az erőket a főorsó teljesítményéhez és a szerszám megengedhető terhelhetőségéhez kell igazítani, hogy elkerüljük a szerszámtörést és korlátozzuk a szerszámelhajlást, amely alakhibákhoz és felületi minőségromláshoz vezet. Az erők ismerete elengedhetetlen a szerszámkopás és a rezgések becsléséhez is.

Hagyományosan a forgácsolási paramétereket kézikönyvekből olvassuk ki, amelyek számtalan munkadarab – szerszám párosra javasolnak értékeket. Ez a megoldás jól működik mindaddig, amíg a megmunkálási geometria, így a paraméterek nem változnak jelentősen a folyamat közben. Mindez igaz $2\frac{1}{2}$ -tengelyes marásra, amikor a tengelyirányú és radiális fogásmélység szűk határok között

mozog, de a szoborszerű felületek kialakítása már ezen értékek állandó változását vonja maga után. A forgácsolási geometria előzetes ismerete nélkül a legrosszabb esetet kell figyelembe vennünk a folyamat-tervezésnél, a paraméterek konzervatív megválasztása pedig gyakran vezet a megmunkálási idő növekedéséhez, a forgácsolási erő fluktuációjához és a szerszám idő előtti kopásához az előforduló kis forgácsvastagság miatt.

A CAM programok fejlesztői felismerték ezt a problémát és olyan funkciókat integráltak az alkalmazásokba, amelyekkel a forgácsolási erők az optimális közelében tarthatók a megmunkálás folyamán. E célból offline előtolás-optimalizációt használnak, a geometriai jellegű szerszám-pálya-generálást követő lépésben. Ekkor a szerszám-pálya görbéje már nem változik, csupán egyetlen paramétert, az előtolás mértékét változtatják, hogy az erőket egyensúlyban tartsák. Az előtolás-optimalizációnál használt általános módszer *anyageltávolítási-ráta (material removal rate, MRR)* alapú: az előtolás nagysága fordítottan arányos az eltávolított anyag átlagolt mennyiségével. Számos CAM program tartalmaz előtolás-optimalizáló modult, hosszabb szerszám-élettartamokat és rövidebb megmunkálási időt ígérve. Azonban az MRR modellnek van egy problémája: nem képes a forgácsolási erő pillanatnyi értékét és irányultságát meghatározni, ami szükséges lenne a felületi minőség és a pontosság kézben tartásához. A megbízhatatlanság még nagyobb hiba: vizsgálatokban kimutatták, hogy ugyanazon anyageltávolítási ráta egészen különböző erőviszonyokat rejthet, így a CAM programok előtolás-optimalizáló moduljai rendszeresen a szerszám-gyártók ajánlásainál nagyobb értékeket engednek meg. Éppen ezért kiemelt kutatási téma olyan erőszámítási modellek bevonása az előtolás-optimalizálásba, amelyek figyelembe veszik a megmunkálási folyamat valós fizikai jelenségeit.

A *mechanikus forgácsolási erő modell* a forgácsolási erő számításának hagyományos egyenleteit – amelyek leírják a gyalulási és nyírási folyamatok hatásait az elemi vágóél mentén – kiterjeszti a marószerszám összetett geometriájára. A vágóélet lineáris él-szegmensek sorozataként tekintjük, majd ezeken az elemi éleken tangenciális, radiális és axiális erőkomponenseket számítunk a ferdeszögű, egyélű forgácsolás hagyományos egyenleteivel. A teljes él mentén fellépő pillanatnyi erőket az aktív él-szegmenseken – tehát azon szegmenseken, amelyek az adott pillanatban részt vesznek a forgácsolásban – ható erők összegzésével nyerjük. Az aktív szegmenseket a szerszám származtatott felülete és a munkadarab közötti érintkezési felület meghatározásával választjuk ki.

Az érintkezési felületet kezdetben analitikusan számolták, egyszerű és változatlan megmunkálási geometriát feltételezve a forgácsolási művelet során. Többtengelyes megmunkálásoknál, ahol a forgácsolási viszonyok folyamatosan változnak, ez a módszer nem hoz megfelelő eredményt. Éppen ezért, a szimulációs technikák fejlődésével az analitikus módszereket felváltották a diszkrét megoldások. Ekkor az érintkezési felület az él-szegmensekkel együtt levetítésre kerül a szerszám tengelyére merőleges síkra, és a vizsgálatot a képtérben végzik: az érintkezési felületen kívül eső szegmenseket nem veszik figyelembe a számításoknál. Sajnos ennek a megoldásnak az a velejárója, hogy a szerszám oldalsó felületei, amelyek normálja merőleges a szerszám tengelyére, nem jelennek meg a vetített felületen, a majdnem merőleges normálvektorú felületfoltok pedig torzulást szenvednek

a projekció során. Ez azt jelenti, hogy a módszer nem alkalmazható ujjmarókhhoz, illetve olyan műveleteknél, ahol a szerszám hengeres része is részt vesz a megmunkálásban. Az idők folyamán tettek ugyan javaslatokat az érintkezési felület összetettebb ábrázolására, de ezek a nagy számítási igényük miatt csak rövidebb szerszám-pálya-szakaszok esetén voltak használhatók. Elmondható, hogy mind a mai napig nem született általános érvényű megoldás erre a problémára.

A mechanikus erőmodell esetében a forgácsolási erő együtthatók meghatározása jelenti a kritikus pontot. A megmunkálási viszonyoktól független együtthatók kiszámítására a legtöbb szerző pontosan meghatározott technológiai paraméterekkel végzett mérések sorozatát javasolja, amely alapján numerikus vagy analitikus számításokkal nyerhetők az együtthatók. Két különböző kalibrációs elvvel találkozhatunk a szakirodalomban. Az „egységes” megközelítés kísérleti úton meghatározott, ortogonális forgácsolás útján kinyert adatokból dolgozik, és adaptálja azokat a szerszám geometriájának megfelelő viszonyokra. A „direkt” megközelítés szerint, amennyiben egy bizonyos szerszámra érvényes együtthatókat keresünk, magát a szerszámot kell a tesztek során felhasználni. A mért forgácsolási erők az elvégzett műveletekre jellemző forgácsolási paraméterekkel együtt lesznek az együttható-számítás kiinduló értékei.

Valamennyi publikált módszerre jellemző, hogy nagyszámú kalibrációs teszt szükséges az együtthatók meghatározásához. Többen próbálkoztak azzal, hogy minimális kísérletezés útján állítsák elő az együtthatókat – több-kevesebb sikerrel. Kiderült, hogy egyetlen horony vagy fél-horony marása során is elegendő információt nyerhetünk az együtthatók meghatározásához, de a gyakorlatban használható módszer még nem született. Ráadásul, az együtthatókat kísérő fő problémákat még nem sikerült megoldani. Először is az együtthatók a munkadarab anyagától, a szerszám anyagától és bevonatától, továbbá a vágóélek geometriájától is függenek. Emiatt valamennyi munkadarab-anyag – szerszám párosra el kellene végezni a kalibrációs vizsgálatokat. Másodsor, mivel az együtthatók értékét a szerszám kopása is megváltoztatja, a marási folyamat során előbb-utóbb elveszítik érvényességüket. Ezek a problémák teszik a mechanikus erőszámítási modell alkalmazását rendkívül nehézé a gyakorlatban, annak ellenére, hogy pontosabb és részletesebb eredményeket szolgáltat, mint az MRR módszer.

3.2 Forgácsolási erők becslése általános célú grafikus hardver-környezetben

A kutatómunka második része a mechanikus forgácsolási erő modell alkalmazhatóságával és megvalósíthatóságával kapcsolatos kérdésekre fókuszál. Úgy vélem, hogy két fő célt kell teljesíteni, ha a gyakorlatban is eredményesen használható modellt akarunk létrehozni. Először is az erőszámítás módját úgy kell átformálni, hogy az megfeleljen a valós idejű több-tengelyes szimuláció követelményeinek. Ez a szimuláció során kinyert geometriai információk közvetlen elérését és párhuzamosított feldolgozását jelenti, hogy elkerüljük a jelenlegi módszerek szükségtelen projekciós lépéseit és a jórészt szekvenciális programvégrehajtást. Másodsor pedig, az együtthatók

meghatározásának módját gyorsítani és egyszerűsíteni kell. Azt feltételeztem, hogy a jelenlegi számítási módszereket jellemző geometriai megszorítások csökkentése, valamint az együtttható-meghatározás valós idejű végrehajtása elvezethet az érvényességi probléma megoldásához.

3.3 Eredmények

A munka eredményeként egy olyan forgácsolási erő becslési eljárás született, amely gyors, és általános megoldást kínál az érintkezési felület problémájára, a párhuzamos program-végrehajtás és az anyageltávolítás-szimuláció során kinyert geometriai adatok közvetlen felhasználása révén. A módszert gömbvégű maróval végzett többtengelyes megmunkálásra programoztam le és ellenőriztem, de az általános profilú szerszámokra történő adaptálásának módját is feltűntettem az aktuális fejezetekben.

Szintén bemutatásra kerül, hogy a mechanikus erőszámítási modell – a forgácsolási geometriát leíró adatok közvetlen feldolgozása és a párhuzamos számítások által nyújtott előnyökön kívül – az együttthatók meghatározásának egy olyan, kézzelfogható módját biztosítja, amely csökkenti a geometriai megkötéseket az együtttható-meghatározás során, ezáltal téve lehetővé a mechanikai modell szélesebb körű felhasználását. Az, hogy képesek vagyunk valós időben meghatározni az együttthatókat, valamint hogy a bemutatott módszer – az ismert technikákkal szemben – nem igényel speciális forgácsolási feltételeket a megmunkálás során, elméletileg lehetővé teszi az eljárás tetszőleges marási folyamatoknál történő alkalmazását (beleértve a többtengelyes marást is), és azt, hogy a frissen meghatározott együttthatókat azonnal, ugyanazon megmunkálási műveletnél felhasználjuk az erők becslésére. Ezzel a megoldással legyőzhetjük a két legnagyobb akadályt, amely a mechanikai modell gyakorlatban történő alkalmazása előtt állt. Először is, a nélkül képesek vagyunk a forgácsolási erő pillanatnyi nagyságának és irányultságának becslésére, hogy szükségünk lenne előzetesen megalkotott együtttható-adatbázisokra, amelyeknek valamennyi munkadarab-anyag – szerszám párosra tartalmazniuk kellene értékeket. Másodsor, ha a megmunkálás során rendszeresen frissítjük az együttthatókat, megelőzhetjük a szerszám kopása okozta fokozatos elavulásukat.

A modell validálása érdekében két, különböző karakterisztikájú tesztsorozat került elvégzésre. Az elsőhöz egy olyan tipikus marási műveletet választottam, amelyet az irodalomban általánosan használnak a mechanikai modell pontosságának ellenőrzéséhez. A második teszthez a szoborszerű felületek marásának viszonyait hoztam létre, ahol a forgácsolási geometria folytonosan változik a művelet során. A becsült és mért erők pillanatnyi értékei mindkét esetben erős egyezés mutattak, mind a hullámalak hasonlóságát, mind a csúcserő értékek nagyságát tekintve. A vizsgálatok azt is bizonyították – az eredeti mechanikus forgácsolási erő modell állításainak megfelelően –, hogy a különböző forgácsolási geometriák esetében meghatározott és alkalmazott együttthatók a megmunkálási viszonyok széles körére érvényesek.

4 Tézisek

A fent leírtak alapján az elvégzett kutatómunka tudományos eredményeit az alábbi tézisekben foglaltam össze:

1. tézis

Kimutattam a hagyományos CPU alapú többtengelyes anyageltávolítás-szimulációs módszerek hiányosságait. Azt találtam, hogy a 3-tengelyes szimulációval szemben fennálló teljesítménycsökkenésnek két fő oka van:

- Jól párhuzamosítható számításokat, amelyek során számos független adatelemen végezzük el ugyanazon műveleteket, a CPU-n hajtunk végre anélkül, hogy kihasználnák a grafikus hardver nagymértékben párhuzamosított programvégrehajtás során nyújtott előnyeit;
- A hoszt memóriából a grafikus eszköz memóriájába nagy mennyiségű adatot viszünk át a megjelenítéshez, így a CPU-GPU közötti szűk adatátviteli keresztmetszet meggátolja a hatékony vizualizációt és jelentősen lelassítja a szimulációt.

Ezek alapján javaslatot tettem az egyes feladatok újraelosztására a CPU és GPU között a hatékonyabb végrehajtás érdekében. Azon szimulációs lépéseket, amelyek SIMD jellegű végrehajtást igényelnek – így a separt térfogat generálást, a térfogat-kivonást és a multi-dexel reprezentációból soklapos felületmodellé történő konvertálást – a GPU-hoz rendeltem, hogy nagymértékben párhuzamosított módon történjen a végrehajtásuk. Ez a megoldás a grafikus eszköz memóriáján kívüli csekély adatáramlást is garantálja, így küszöbölve ki az adatátvitel szűk keresztmetszetének negatív hatását. Ily módon többtengelyes anyageltávolítás-szimuláció esetén is sikerült elérni az eddig csak a 3-tengelyes szimulációs módszerekre jellemző grafikus hardver-támogatottságot. [A1][A2][A3][A6]

2. tézis

Ortogonalis, független dexel-halmazok vertex-pufferekben való tárolásával és GPU shaderekkel való feldolgozásával a GPU-n történő párhuzamos végrehajtás követelményeihez alakítottam át a multi-dexel alapú objektum-reprezentációt. Azzal, hogy mélységi és normálvektoros képeket (LDNI) használtam az átmeneti objektum-reprezentációnál, bevontam a grafikus hardvert a kiinduló dexel-adatstruktúra létrehozásába, ily módon lehetővé téve a munkadarab egy részének gyors újjáépítését a megnövelt felbontás melletti felnagyításához. Definiáltam az ortogonalis, független dexelek alkotta objektum-leíró adathalmaz megjeleníthető, soklapos felületté való átalakításának módját. A módszer nem igényli a korábban publikált megoldásokra jellemző járulékos adat-újrarendezési lépést, így biztosítva a szimulációs lépések folyamatos GPU alapú végrehajtását, a CPU beavatkozása és felesleges CPU-GPU adatáramlás nélkül. [A3][A6]

3. tézis

Kidolgoztam a térfogat-kivonási műveletek grafikus hardveren futó, párhuzamos végrehajtással megvalósított módszerét. A hagyományos analitikus számítások mellett létrehoztam egy képtér alapú eljárást, ahol a szerszám-térfogatot LDNI képek reprezentálják a multi-dexel struktúrával ábrázolt munkadarabból történő térfogat-kivonásnál, ily módon téve lehetővé komplex geometriájú munkadarabok és seprert térfogatok bevonását a szimulációba. A képtér alapú térfogat-kivonási eljárás kiszolgálására kidolgoztam egy speciális seprert-térfogat generáló algoritmust, amely a szerszám-helyzetet definiáló pontok közötti linearizált mozgást végző szerszám seprert térfogatának LDNI képekben történő meghatározását végzi. A módszer segítségével a megjelenítendő megmunkált felület minősége eredményesen javítható a hagyományos, analitikus seprert-térfogat generáló algoritmusok használata nélkül. [A3][A4][A5][A6]

4. tézis

Oly módon alakítottam át a mechanikus erőszámítási módszer egyenleteit, hogy a geometriai információk, amelyeket a GPGPU alapú anyageltávolítás-szimuláció szolgáltat a pillanatnyi forgácsolási erők becsléséhez, közvetlenül a multi-dexel struktúrából származnak és a szerszám teljes származtatott felületére érvényesek, anélkül, hogy az adatstruktúra átszervezésére szükség lenne. Mindez a mechanikai modell erőegyenleteinek általános megoldását biztosítja tetszőleges szerszámalakra, 3- vagy többtengelyes megmunkálás során, beleértve a szoborszerű felületek megmunkálását is. [A5][A7][A10]

5. tézis

A GPGPU alapú anyageltávolítás-szimulációra és forgácsolási erő becslésre alapozva létrehoztam egy eljárást az erőegyenletekben szereplő együtthatók meghatározására, amely mentes a korábban publikált megoldásokra jellemző geometriai megkötésektől, és egyetlen marási művelet alatt, valós időben elvégezhető, a futó megmunkálással párhuzamosan. Mindezek alapján bemutattam egy előrettekintő algoritmust, amellyel a forgácsolási erő pillanatnyi értékének becslését lehet elvégezni marási műveletek során, beleértve a szoborszerű felületek többtengelyes megmunkálását, az együtthatók vagy anyagtulajdonságok előzetes ismerete nélkül, a szerszámra ható ortogonális erőkomponensek mérése és a megmunkálási folyamat egyidejű szimulációja segítségével. [A7][A8][A9]

5 A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [A1] Tukora B., Szalay T.: High performance computing on graphics processing units. *Pollack Periodica* 3(2), pp. 27-34., 2008.
- [A2] Tukora B., Szalay T.: Manufacturing Simulation in the Light of the Recent GPU Architecture. *Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering, Paper C20.*, 2008.
- [A3] Tukora B., Szalay T.: Fully GPU-based volume representation and material removal simulation of free-form objects. *Innovative Developments in Design and Manufacturing: Advanced research in virtual and rapid prototyping*, pp. 609-614., 2009.
- [A4] Tukora B., Szalay T.: LDNI alapú söpört térfogat generálása anyageltávolítás jellegű gépészeti szimulációhoz. *V. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia*, pp. 193-197., 2010.
- [A5] Tukora B., Szalay T.: GPGPU-based Material Removal Simulation and Cutting Force Estimation. *Proceedings of the Seventh International Conference on Engineering Computational Technology, Paper 17.*, 2010.
- [A6] Tukora B., Szalay T.: Az új generációs grafikus hardverek bevonása a megmunkálási-szimulációs eljárásokba. *Gép LXI* (4), pp. 35-40., 2010.
- [A7] Tukora B., Szalay T.: Real-time Cutting Force Prediction and Cutting Force Coefficient Determination during Machining Processes. *Advanced Materials Research: Modelling of Machining Operations*, pp. 85-92., 2011.
- [A8] Tukora B., Szalay T.: Cutting force prediction with adaptive method in the course of milling processes. *Proceedings of Factory Automation 2011*, pp. 89-92., 2011.
- [A9] Tukora B., Szalay T.: Real-time determination of cutting force coefficients without cutting geometry restriction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51, pp. 871-879., 2011.
- [A10] Tukora B., Szalay T.: Multi-dexel based material removal simulation and cutting force prediction with the use of general-purpose graphics processing units, *Advances in Engineering Software* 43, pp. 65-70., 2012.