Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Gép- és Terméktervezés Tanszék

TÉRBELI FOGAZOTT HAJTÓPÁROK GYÁRTÁSGEOMETRIAI VISZONYAINAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE ÉS SZIMULÁCIÓJA

Ph.D. értekezés tézisei

Készítette:
Groma István
groma.istvan@gt3.bme.hu

Tudományos vezető:
Dr. Bercsey Tibor
bercsey.tibor@gt3.bme.hu
egyetemi tanár

Budapest
2010

1. Célkitűzések

Az ipari fejlődés megkívánja az egyre pontosabb, jobb hatásfokú és nagyobb teherbírású hajtóművek kifejlesztését, amelynek egyik elengedhetetlen feltétele a fogazott elemek geometriai viszonyainak a valóságot mind jobban megközelítő leírása és ismerete, a gyártásgeometriai követelményekhez való jobb illesztése. A korábbi gyártásgeometriai kutatások elsősorban ideális alakítási mechanizmusok vizsgálatával foglalkoztak, vagyis a gyártás, a mozgás, a leképezés, a visszaképezés, illetve a felhasználás során adódó eltéréseket, geometriai- és kinematikai hibákat, alakváltozásokat nem, vagy csak részben vették figyelembe.

Mivel a gyártási korlátok, nehézségek miatt az ideális geometria csak közelítőleg igaz egy megmunkált fogazatra, a kutatás fő célja egy olyan általános matematikai modell és módszer kidolgozása volt, amely felhasználja a gyártásgeometria és a fogazáselmélet ismert eredményeit, de képes kezelni a gyártási-, megmunkálási hibákat, valamint illeszkedik napjaink számítógépes tervező-, gyártó- és mérő rendszereinek alapmodelljéhez.

A kidolgozott modell és módszer segítségével előre jelezhető, illetve vizsgálható, hogy egy ismert gyártási tulajdonságokkal, geometriai- és kinematikai jellemzőkkel rendelkező alakítási mechanizmussal, gyártási eljárással milyen geometriai pontosságú hajtópár alakítható ki, illetve az előírt pontosság eléréséhez milyen gyártási paraméter tartományok betartása szükséges.

A kutatások a fogazáselmélet és gyártásgeometria, a valószínűségelmélet és valószínűségszámítás, valamint az információelmélet és informatika tudományterületek eredményeire és egyidejű kezelésére épültek.

2. A kutatások előzménye

A fogazáselmélet alapját képező kölcsönös burkolófelületek (konjugált felületek) alapgondolata először Oliviernél jelenik meg [Théodore Olivier, 1842], amit Gohman fejlesztett tovább és megalkotta a térbeli kinematikai geometriára épülő analitikai fogazáselméletet [H. I. Gohman, 1886]. Az általa kidolgozott módszer egyszerűsítette a konjugált felületek érintkezési vonalainak számítását, amelyek a differenciálgeometriában elfogadott módszereken alapultak. Gohman számítási módszerei így is elég bonyolultak és nehezen alkalmazhatóak voltak, ami Litvint és társait a kinematikai módszer kidolgozására sarkallták [Faydor L. Litvin és Alfonso Fuentes, 2004]. A kinematikai módszer alapgondolata, hogy az egymást burkoló felületek viszonylagos elmozdulásvektorának meghatározásánál felhasználásra kerülnek a kinematikában (merev testek térbeli mozgása) alkalmazott módszerek.

A Tajnafői által kidolgozott származtatáselmélet túllép a térbeli konjugált felületeken alapuló megközelítésen és az általánosabb mozgásleképezés alapgondolatából indul ki [Bercsey Tibor, 1977, Tajnafői József, 1991]. A szerszám működő felületét (akár felülettel, akár éllel rendelkezik) általánosan származtató felületnek, a szerszám által metszett térrész burkolófelületét pedig munkadarab felületnek nevezi. A származtató felületet egy tökéletesen merev, kopás-, hőtágulás- és súrlódásmentes elméleti szerszámfelületnek tekinti. A munkadarab felület a származtató felület valamint a szerszámgép és a munkadarab közötti relatív mozgások, a statikus és dinamikus mozgásinformációk rendszere alapján áll elő.

Az általános csavarfelületek gyártásgeometriai elemzésével Dudás Illés és Balajti Zsuzsanna foglalkoztak, az általuk kidolgozott módszer alkalmas a hengeres (ZA, ZI, ZN, ZK, ZTA,

ZTN stb. típusú) és kúpos (KA, KN, KI, KK, KT, KTA, KTN stb. típusú) csavarfelületek egységes tárgyalására [Balajti Zsuzsanna, 2007, Dudás Illés, 1988]. Az általános egyenlet a kinematikai módszer alaptörvényeire épít. A szerzők direkt feladatnak nevezik, amikor egy ismert csavarfelülethez tervezünk szerszámot, indirekt feladat alatt pedig azt az esetet értik, amikor egy ismert szerszám által kialakított fogfelület geometriáját határozzuk meg. A fogazási gyakorlatban mindkét esettel találkozunk.

A korábbi irodalomban nem található olyan megközelítés, amely átfogó módon kezeli a relatív mozgásinformációk pontatlanságából adó gyártásgeometriai eltéréseket. A kidolgozott módszer ennek a hiánynak a pótolását és a fogazáselmélet, a modell és a mozgásleképezésen alapuló gyártásgeometria továbbfejlesztését, fejlődéséhez való hozzájárulást tűzte ki célul.

3. Vizsgálati módszerek

A hajtópárok vizsgálatához, tervezéséhez korábban kidolgozott **kinematikai módszert** egy **valószínűségi mezővel** egészítettem ki, ahol a leképezési-, gyártási mechanizmus paramétereit valószínűségi változók reprezentálják. A modell felépítésénél az alapvető geometria ismereteken túl felhasználtam a **fogazáselmélet**, ezen belül a **származtatáselmélet** alapgondolatait és megközelítési módját. Az új eredményekhez vezető kutatómunka során az **információelmélet** területéről származó ismeretekre is építettem.

Egy ún. **indirekt feladat** esetén **differenciálgeometriai** eszközökkel felírható a szerszám működő felülete [Faydor L. Litvin, 1971, Dudás Illés, 1988]. A megmunkálás során történő relatív mozgások **folytonos transzformációkkal** modellezhetők, amelyek az esetek nagy részében a **homogén lineáris transzformációk** osztályába tartoznak, vagyis négydimenziós, négyzetes mátrixokkal reprezentálhatók. A mozgások és a felületek mérhető jellemzői az ún. **statikus- és dinamikus mozgásinformációk**, amelyek egyben gyártási paramétereknek is tekinthetők, mivel numerikus változásuk befolyásolja a származtatott gyártásgeometriát.

A kinematikai módszer alkalmazásával a megmunkált felület előáll a származtató felület – relatív mozgás során adódó – **burkoló felületeként** (ún. konjugált felületként). A megmunkált felület egy-, vagy kétparaméteres alakja implicit formában felírható, ahol a paraméterek általában a relatív mozgásinformációk, konkrét megmunkálás esetén pedig a gyártási paraméterek:

$$\vec{\mathbf{H}}(u_1, u_2; \underbrace{p_1, \ldots, p_l}_{\text{stat. mi.}}; \underbrace{p_{l+1}(u_1), \ldots, p_n(u_1)}_{\text{din. mi.}}).$$

Minden hibataggal rendelkező gyártási paraméter vagy mérethibával terhelt, vagy a megmunkálás ideje alatt zajos, vagy mindkettő fennáll. A gyártási paraméterekhez egy sztochasztikus, időben változó hibatagot szuperponáltam úgy, hogy a kitérés eloszlása normális eloszlású legyen a paraméter elvi értéke körül (ún. **Gauss zaj**). Továbbá feltételeztem, hogy az egymástól időben elkülönülő kitérési értékek egymástól függetlenek, vagyis a hibatag **fehér zajként** viselkedik. Harmadrészt a kinematika módszer alkalmazhatósága végett minden gyártási paramétert időben folytonosnak tekintettem, ami összhangban van fizikai tapasztalatainkkal. A felsorolt megfontolások alapján dolgoztam ki az ún. $\mathtt{RN}[.](t)$ formalizmust[1], amely hatására az összes gyártási paraméter egységes alakban írható fel:

[1] „Random Noise” angol kifejezés alapján.

$$\mathtt{RN}\left[s \pm a \circlearrowright f\right](t) := S_3\left(t; \hat{P}_0, \ldots, \hat{P}_{\lfloor fT \rfloor}\right),$$
$$\forall i : \hat{P}_i \cong \Phi\left(x; \mu := s, \sigma := \tfrac{a}{3}\right),\ t \in [0, T].$$

1. táblázat. $\mathtt{RN}\left[.\right](t)$ formalizmus értelmezése

a	A paraméter maximális kitérése.
f	A paraméter közelítési frekvenciája.
$\hat{P}_i$	A paraméter pillanatnyi értékéhez rendelt független valószínűségi változók idő szerint rendezve.
s	A paraméter valós bázisértéke.
$S_3(t; \ldots)$	Természetes köbös spline egy ponthalmaz felett a t paraméterrel kifejtve.
T	Teljes megmunkálási idő.
μ	Normális eloszlású valószínűségi változó várható értéke.
σ	Normális eloszlású valószínűségi változó szórása.
$\Phi(x; \mu, \sigma)$	A normális eloszlás eloszlásfüggvénye.

A megmunkálási idő a közelítési frekvencia alapján időszeletekre bontható, mely időszeletekhez rendre egy-egy független, **normális eloszlású valószínűségi változó** tartozik. A diszkrét mintán felvett pontszerű értékek időben izolálták, amelyek valamelyik **interpolációs módszer** segítségével folytonos függvénnyé alakíthatók.

A számtalan interpolációs módszer közül célszerű a **természetes köbös spline függvényinterpoláció** használata, mivel rendelkezik azzal a tulajdonsággal, hogy az érintett pontok környezetében marad a pontok között is[2] és a szimbolikus számítások során jól kezelhető [Szirmay-Kalos László, Antal György, és Csonka Ferenc, 2000, Horváth Imre és Juhász Imre, 1996].

A bevezetett valószínűségi mező hatására, a tényleges gyártásgeometriát az ún. **valószínűségi gyártásgeometria** helyettesíti, amelynek statisztikai tulajdonságai megegyeznek a gyártás során előállított, hajtópárokból álló mintáéval. Ebből adódóan, a módszer segítségével vizsgálhatóvá válnak a pontatlan gyártásgeometriával rendelkező valós fogazatok geometriai tulajdonságai a valódi gyártás megkezdése előtt. A valószínűségi gyártásgeometriához tartozó térbeli pontokat – határozatlan jellegük miatt – **sztochasztikus pontoknak** neveztem el.

$$\begin{array}{ccc}
 & \vec{\mathbf{H}}\left(u_1, u_2; p_1, \ldots, p_n\left(u_1\right)\right) & \\
\swarrow & & \searrow \\
\mathtt{RN}\left[s_1 \pm a_1 \circlearrowright f_1\right](t), & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & , \mathtt{RN}\left[s_n \pm a_n \circlearrowright f_n\right](t) \\
\swarrow & & \searrow \\
\hat{P}_{1,0}, \ldots, \hat{P}_{1,\lfloor f_1 T \rfloor}, & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & , \hat{P}_{n,0}, \ldots, \hat{P}_{n,\lfloor f_n T \rfloor}
\end{array}$$
$$\underbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad}_{N}$$

1. ábra. Hibataggal rendelkező gyártási paramétereknek a megmunkált felület implicit egyenletébe való behelyettesítése

[2] Runge-jelenség

A bevezetett hibatagok bemeneti értékei, nem mások, mint az 1. ábra legalsó rétegében szereplő valószínűségi változók konkrét eloszlásfüggvényei[3]. Amennyiben ismerjük ezeket az eloszlásokat a valószínűségi gyártásgeometria sztochasztikus értelemben határozottnak tekinthető.

A valószínűségi gyártásgeometria komplexitása miatt, nehezen alkalmazható közvetlenül. A valószínűségi gyártásgeometria tekinthető az elképzelhető geometriák folytonos halmazának egy adekvát eloszlással kiegészítve. Amennyiben a valószínűségi gyártásgeometriát egy **statisztikai mezőként** fogjuk fel, a struktúra statisztikai eszközökkel vizsgálhatóvá válik. Hogy a fogfelület tulajdonságai elemezhetőek legyenek, a valószínűségi gyártásgeometriát egy megfelelő méretű, véletlen mintával helyettesítjük. A minta elemei már egy-egy konkrét fogfelületet határoznak meg, amelyhez **számítógépes felületmodell** készíthető.

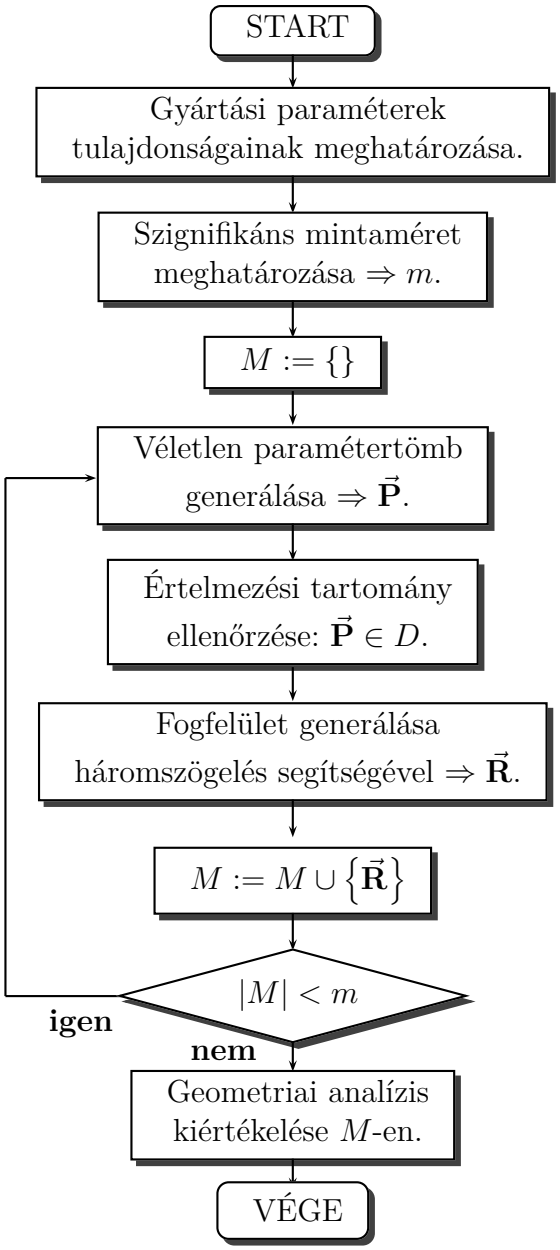
A szükséges mintanagyságot a normális eloszlásokra vonatkozó, ismert statisztikai összefüggések határozzák meg, amelyet az ASTM E122-es szabvány is rögzít:

$$\textit{Mintaméret} \geq \prod_i \frac{\Phi_{0,1}^{-1}\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)^2 \sigma_i^2}{ME^2}.$$

A képletben α görög betűvel jelzett **szignifikanciaszint** egy százalékos arány, amelynek értékét a statisztikai közelítés elvárt megbízhatóságához igazodva kell megválasztani. Az ME jelöli a **statisztikai hibahatárt**, ami tulajdonképpen az egyedek a populáció átlagától való eltérésének a tűrése, vagyis a konfidencia-intervallum méretét határozza meg.

A valószínűségi gyártásgeometriai modell alkalmazhatóságát és a benne rejlő potenciális előnyöket mért és számított eredmények párhuzamos értékelésével igazoltam [Waldemar Steinhilper és Bernd Sauer, 2006, Erney György, 1983, W. Höfler, 1967]. A verifikáció során egy **Niles ZSTZ 315 C1 típusú fogaskerék köszörűgépen** megmunkált, egyenes fogú, evolvens profilú hengeres fogaskerék sorozat (40 darab $z_1 = 9; m = 5\text{mm}; \alpha_0 = 20°; \beta = 0°; x_1 = +0,07; b = 44,8\text{mm}$ adatokkal rendelkező fogaskerék) mérési adatait hasonlítottam össze egy, a valószínűségi gyártásgeometriai modellen alapuló számítógépes szimuláció által jelzett eltérésekkel. A szimuláció során a megközelítőleg ismert gépbeállítási pontosságokból indultam ki és egy **Monte Carlo algoritmussal** szimulált geometriai mintát állítottam elő (2. ábra).

[3] A normális eloszlású valószínűségi változókat a várható érték és a szórás paraméterek egyértelműen meghatározzák.



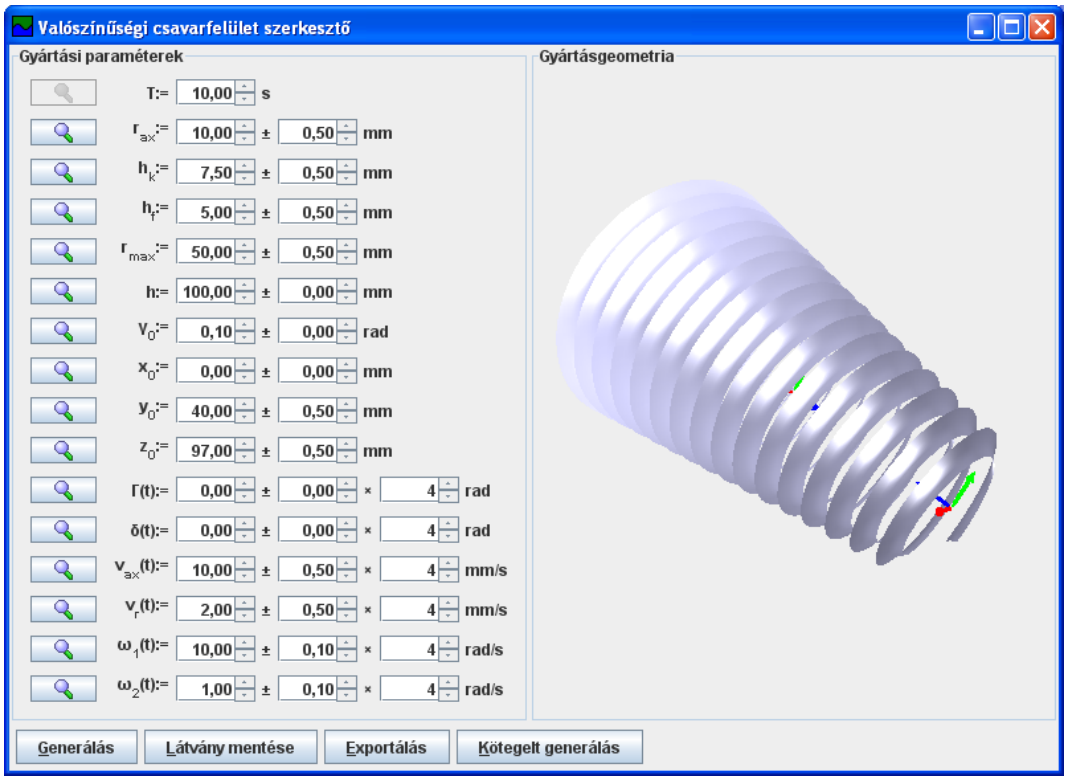
2. ábra. A valószínűségi gyártásgeometria elemzéséhez kidolgozott algoritmus folyamatábrája

A szimulált mintán, a fogaskerekek vizsgálata területén elterjedt mérési gyakorlattal analóg, geometriai számításokat végeztem. A számított és mért adatsor **átlagát** és **tapasztalati szórását** hasonlítottam össze, jól illeszkedőnek tekintettem a szimulációt, amennyiben a mért és a számított átlag és szórás 15% alatti relatív eltérést mutatott, rossznak, ha az 50%-ot meghaladta. Amennyiben a relatív hiba a 100%-ot is meghaladja, úgy értékeltem, hogy a szimuláció nem modellezi az adekvát számításokat. A mért és a szimulált eredmények jó egyezése igazolja a valószínűségi gyártásgeometria és a kidolgozott módszer alkalmazhatóságát (2. táblázat).

2. táblázat. A mért és a szimuláció során számított értékek összehasonlítása (átlag ± szórás)

Mért mennyiség	**Mérés**	**Szimuláció**	**Relatív eltérés**
A fogazat ütése (F_{rr})	$10,6 \pm 3,7 \mu$m	$10,5 \pm 1,2 \mu$m	$1 \pm$ **68%**
Fogirányhiba ($F_{\beta r}$)	$6,9 \pm 4,8 \mu$m	$6,6 \pm 4,3 \mu$m	$4 \pm$ 10%
Többfogméret ingadozása (F_{vWr})	$10,2 \pm 2,9 \mu$m	$13,3 \pm 3,0 \mu$m	$30 \pm$ 3%
Profilhiba (f_{fr})	$4,8 \pm 3,7 \mu$m	$4,5 \pm 1,2 \mu$m	$6 \pm$ **68%**
Alaposztáshiba (f_{pbr})	$7,1 \pm 2,8 \mu$m	$6,4 \pm 2,9 \mu$m	$10 \pm$ 4%

A valószínűségi gyártásgeometria az egyszerű fogfelületeken túl alkalmazható és kiterjeszthető a bonyolultabb **csavarfelületek** esetére is. Ennek érdekében az általános, explicit csavarfelület egyenleteket a relatív mozgásinformációk helyettesítésével valószínűségi gyártásgeometriává alakítottam. A csavarfelület a szerszám konjugált felületeként adódik, explicit felírásához a **kapcsolódás alaptörvényéből** adódó vektoregyenlet megoldása szükséges. A valószínűségi gyártásgeometriára a vektoregyenlet közvetlenül nem oldható meg, de az azt helyettesítő minta elemeire már igen.



3. ábra. A gyártási paraméterek tulajdonságait vezérlő, valamint a valószínűségi csavarfelület előállítását bemutató képernyő

Az összetett számítások elvégzésére egy egyedi számítógépes alkalmazást fejlesztettem ki, amely körív profilú szerszámmal köszörült csigák, alakhibákkal rendelkező fogfelületeinek vizsgálatára alkalmas (3. ábra). A program a csavarfelületek számítógépes reprezentációján túl, a várható hibák előre jelzésére is alkalmazható, amelyre adott gyártási paraméterek mellett szimulációkat végeztem.

A valószínűségi gyártásgeometrián alapuló modell segítségével meghatározható a bemenetként kezelt szerszám és gyártási paraméterek mellett megmunkált fogazat várható alakhibáinak nagyságrendje, valamint egy adott fogazati minőség eléréséhez szükséges gyártási pontosság. A térbeli hajtópárok ilyen formában megvalósuló tárgyalásmódja szorosabb kapcsolatot eredményez a tervezési szakaszban dokumentált hajtópár és a választott megmunkálási technológia között. A valószínűségi gyártásgeometrián alapuló megközelítés elsőrendű haszna, hogy a gyártást megelőzően a hajtópár geometriai viszonyainak a jelenlegi módszereknél pontosabb analízise válik lehetővé.

4. Irodalmi hivatkozások listája

[Balajti Zsuzsanna, 2007] Balajti Zsuzsanna: Kinematikai hajtópárok gyártásgeometriájának fejlesztése. Ph.D. értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2007

[Bercsey Tibor, 1977] Bercsey Tibor: Toroidhajtások elmélete. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1977

[Dudás Illés, 1988] Dudás Illés: Csavarfelületek gyártásának elmélete. Akadémiai értekezés, Miskolc, 1988

[Erney György, 1983] Erney György: Fogaskerekek. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983

[Faydor L. Litvin, 1971] Faydor L. Litvin: A fogaskerékkapcsolás elmélete. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971

[Faydor L. Litvin és Alfonso Fuentes, 2004] Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes: Gear Geometry and Applied Theory. Cambridge University Press, Cambridge, 2004

[H. I. Gohman, 1886] H. I. Gohman: Theory of Gearing Generalized and Developed Analytically. Odessza, 1886

[Horváth Imre és Juhász Imre, 1996] Horváth Imre, Juhász Imre: Számítógéppel segített gépészeti tervezés. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1996

[Szirmay-Kalos László, Antal György, és Csonka Ferenc, 2000] Szirmay-Kalos László, Antal György, Csonka Ferenc: Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés. ComputerBooks, Budapest, 2000

[Tajnafői József, 1991] Tajnafői József: Mechanizmusok származtatáselméletének alapjai és hatása a kreatív gondolkodásra. Akadémiai értekezés, Miskolc, 1991

[Théodore Olivier, 1842] Théodore Olivier: Théorie géometrique des engrenages. Párizs, 1842

[W. Höfler, 1967] W. Höfler: A fogaskerékellenőrzés új módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967

[Waldemar Steinhilper és Bernd Sauer, 2006] Waldemar Steinhilper, Bernd Sauer: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. Springer, Berlin, 2006

5. Új tudományos eredmények

1. tézis: A szerszámgépek mozgásleképezési-, valamint a származtatott munkadarab geometriai alakeltérései az alakítási mechanizmus statikus- és dinamikus mozgásinformációinak valószínűségi változókkal való helyettesítésével általánosan, kvantitatív módon jellemezhetők, ami a korábban kidolgozott származtatáselméleti modell kiterjesztése és biztosítja a bemeneti hibatagok beépítését a formális gyártásgeometriába. A valószínűségi változók formális kifejtésénél mindig a vizsgált leképezési mechanizmusra jellemző sztochasztikus tulajdonságokhoz illeszkedő módon kell eljárni [2, 8, 5, 4, 13, 10, 1, 3, 7, 6, 9, 11, 12].

2. tézis: Amennyiben a származtató felületnek a munkadarab felületére való leképezése felírható az egymástól független, relatív mozgásinformációkon értelmezett folytonos vektorfüggvénnyel, akkor a függvény értelmezhető egy megfelelően megválasztott bemeneti valószínűségi vektorváltozó transzformációjaként. A valószínűségi vektorváltozó transzformációja a koordináták sokaságához egy-egy térbeli ponteloszlást, a sztochasztikus pontok sokaságát rendeli. A koordináták teljes, folytonos sokaságához rendelt sztochasztikus pontokból álló eloszlás sokaságok együttese a valószínűségi gyártásgeometria. A lokális és globális leképezési technikákat egyaránt figyelembe véve a származtató felület és a relatív mozgásinformációk valószínűségi vektorváltozóval való helyettesítésével adódik a megmunkált fogfelület valószínűségi gyártásgeometriája [2, 8, 5, 4, 13, 10, 1, 3, 7, 6, 9, 11, 12].

3. tézis: A valószínűségi gyártásgeometria kezelésére a hibatagok eloszlását figyelembe vevő véges véletlen mintát előállító számítógéppel segített módszert és eljárást dolgoztam ki. A kidolgozott valószínűségi gyártásgeometriai modell, illetve eljárás alkalmasságát egy 40 darabból álló, evolvens fogazatú, egyenesfogú hengeres fogaskerék minta ($z = 9; m = 5\text{mm}; \alpha_0 = 20°; x_1 = +0,07$) gyártásgeometriai alakeltéréseinek vizsgálatán keresztül igazoltam. A mért és a számítógéppel előállított véletlen mintán számított fogazási hibák (ütés, fogirányhiba, többfogméret hiba, profilhiba, alaposztáshiba) átlaga és tapasztalati szórása különböző mértékű, de általában jó egyezést mutatott, nagyságrendi eltérés (100%-nál nagyobb relatív eltérés) az értékek között sehol nem mutatkozott [12].

4. tézis: A térbeli fogazatok, így a csavarfelületek gyártásgeometriáját leíró, a kinematikai módszeren alapuló általános leképezési modellt alkalmasan kiegészítve az alakítási mechanizmus és a származtató felület hibatagjaival, a csavarfelület és a térbeli fogazatok valószínűségi gyártásgeometriája szimulálható a kidolgozott véges, véletlen mintát előállító számítógépes program segítségével. A véges mintán a csavarfelület hibái koordinátageometriai módszerekkel kiadódnak, amelyek lehetővé teszik ismert beállítási pontossággal rendelkező alakítási mechanizmus esetén a fogfelület geometriájára vonatkozó, megbízható statisztikai becslést [2, 8, 5, 4, 13, 10, 1, 3, 7, 6, 9, 11, 12].

6. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[1] Groma István – Bercsey Tibor: Csavarfelületek geometriai hibáinak modellezése. *GÉP*, LVII. évf. (2006), 57–60. o.

[2] Groma István – Bercsey Tibor: Csavarfelületek geometriai hibáinak modellezése. In *OGÉT 2007: XV. Nemzetközi Gépész Találkozó* (konferenciaanyag). Kolozsvár, 2007, 57–60. o.

[3] Groma István – Bercsey Tibor: Csavarfelületek gyártási hibáinak modellezése valószínűségi változók használatával. *GÉP*, LVIII. évf. (2007), 51–54. o.

[4] Groma István – Bercsey Tibor: Modeling shape errors of worm gears. In *2007 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (konferenciaanyag). Las Vegas, 2007.

[5] Groma István – Bercsey Tibor: Modelling shape inaccuracies of worm milling cutter. In *Proceeding of the 12th International Conference on Tools* (konferenciaanyag). Miskolc, 2007, 163–168. o.

[6] Groma István – Bercsey Tibor: Csavarfelületek gyártási hibáinak modellezése valószínűségi változók bevezetésével. *GÉP*, LIX. évf. (2008), 31–33. o.

[7] Groma István – Bercsey Tibor: Evolvens fogazat megmunkálási hibáinak geometriai modellezése. *GÉP*, LVIII. évf. (2008), 40–43. o.

[8] Groma István – Bercsey Tibor: Modeling errors in worm gear manufacture with random variables. In *Proceedings of 6th Conference on Mechanical Engineering* (konferenciaanyag). Budapest, 2008.

[9] Groma István – Bercsey Tibor: Hengeres és kúpos csigák gyártási alakhibáinak modellezése. *Gépgyártás*, XLIX. évf. (2009) 4–5. sz., 17–22. o.

[10] Groma István – Bercsey Tibor: Modeling errors in worm gear manufacture with random variables. In *Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions* (konferenciaanyag). Sendai, 2009, 143–147. o.

[11] Groma István – Bercsey Tibor: Modelling Shape Inaccuracies of Worm Gears. *Journal of Machine Manufacturing*, XLIX. évf. (2009) 6. sz., 9–13. o.

[12] Groma István – Bercsey Tibor: Modelling Tooth-Shape Errors Using Random Variables. *Periodica Polytechnica – Mechanical Engineering*, 53. évf. (2009) 2. sz.

[13] Groma István – Bercsey Tibor – Horák Péter: Modeling errors in worm gear manufacturing with random variables. In *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium* (konferenciaanyag). Drezda, 2007, 171–182. o.

7. További tudományos közlemények

[14] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István: Erőforráshelyes konstrukciós folyamattervezés és optimálás. *GÉP*, 11–12. évf. (2005) 2. sz., 141–144. o.

[15] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István: Produktstrukturbasierte Produktentwicklungs- Prozessmodellierung und Optimierung mit genetischen Algorithmen. In *7. Magdeburger Maschinenbau-Tage* (konferenciaanyag). Magdeburg, 2005, 44–49. o.

[16] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István: Ressourcengerechte Produktentwicklungs-Prozessmodellierung und Optimierung mit Genetischen Algorithmen. In *Design for X: Beiträge zum 16. Symposium* (konferenciaanyag). Nürnberg, 2005, 59–66. o.

[17] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István: Tervezési folyamatok hozzárendelése heurisztikus módszerrel. *GÉP*, 8–9. évf. (2006) 2. sz., 153–155. o.

[18] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István: LP Modell und heuristische Methoden für Ressourcen gerechte Produktentwicklungs-Prozessplanung. In *8. Magdeburger Maschinenbau-Tage & 7. MAHREG Innovationsforum* (konferenciaanyag). Magdeburg, 2007, 181–186. o.

[19] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István – Gránicz Ádám: Ga-based flexible and effective task scheduling and resource allocation. In *10th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* (konferenciaanyag). Orlando, 2006, 119–124. o.

[20] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István – Gránicz Ádám: Ga-based flexible and effective task scheduling and resource allocation. In *Design for X: Beiträge zum 17. Symposium* (konferenciaanyag). Nürnberg, 2006, 95–104. o.

[21] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István – Gránicz Ádám: Ga-based flexible and effective task scheduling and resource allocation. In *8th International Dependency Structure Matrix (DSM) Conference* (konferenciaanyag). Seattle, 2006. október.

[22] Bercsey Tibor – Rick Tamás – Groma István – Gránicz Ádám: Task scheduling and resource allocation with multi-varibale heuristics. In *16th International Conference on Engineering Desing: Design Society* (konferenciaanyag). Párizs, 2007, 615–616. o.

[23] Groma István: The advantage of sparse symmetric matrix product calculation on distributed systems. In *Magdeburger Maschinenbau-Tage* (konferenciaanyag). Magdeburg, 2005, 290–296. o.

[24] Groma István – Bercsey Tibor: Product development process scheduling with multi-variable heuristic method. In *Proceedings of the 7th IPD Workshop* (konferenciaanyag). Magdeburg, 2008.

[25] Groma István – Bercsey Tibor – Rick Tamás: Product development process optimisation with heuristics methods, international design conference. In *Proceedings of the DESIGN 2008: 10th International Design Conference* (konferenciaanyag). Dubrovnik, 2008, 229–236. o.

[26] Rick Tamás – Groma István: Design structure based tasks scheduling using genetic algorithms. In *Scientific Bulletin Serie C, Volume XIX: International Multidisciplinary Conference 2005* (konferenciaanyag). Nagybánya, 2005, 231–238. o.