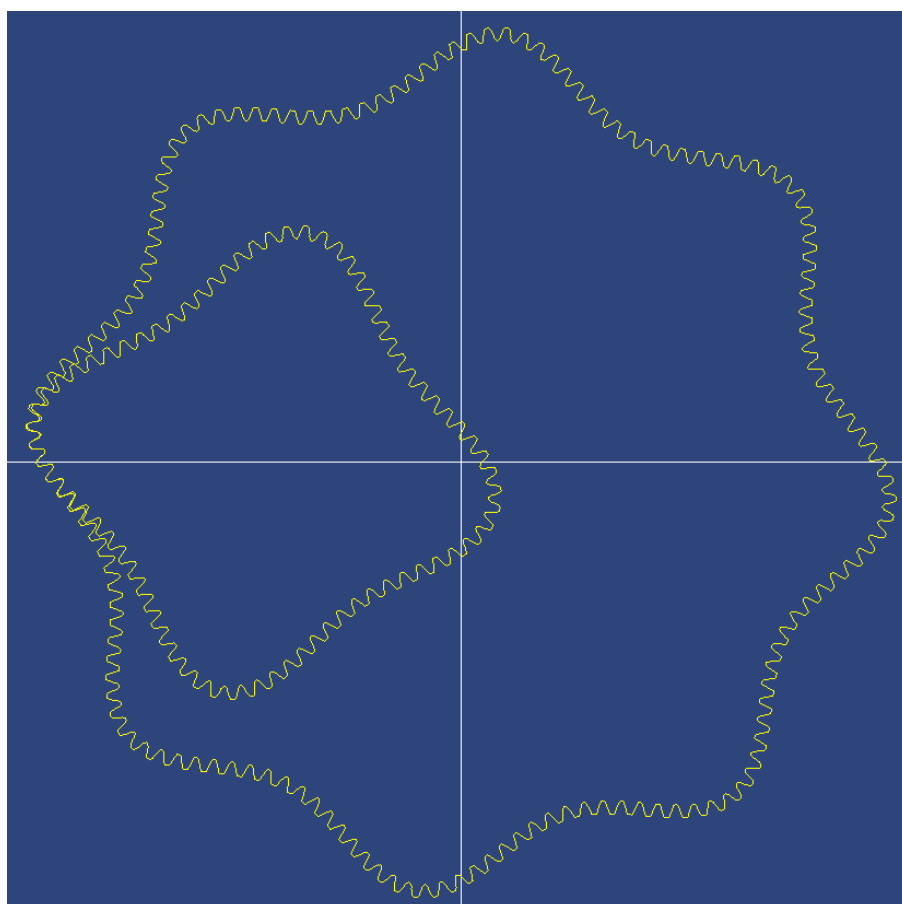




Általános geometriájú fogaskerekek generálása

TDK-dolgozat
2011.



Bendefy András (YTDMGX) BME GPK V. évf.

Bendefy Zoltán (BI106Z) BME VIK II. évf.

Konzulens: Bachrathy Dániel, Műszaki Mechanikai Tanszék

Tartalom

1	Bevezetés.....	3
2	Fogaskerekek.....	4
2.1	Fogaskerekek előállítás.....	4
2.2	Nem köralakú fogaskerekek	6
3	Klasszikus fogaskerék-generálás.....	7
4	Fogaskerekek származtatása	11
4.1	Egyenes legördítése.....	11
4.2	Numerikus megoldás.....	14
4.3	Köralak legördítése.....	16
5	Körtől különböző fogaskerekek	20
5.1	A főprofil-görbék meghatározása állandó tengelytávolság esetén.....	20
5.2	Fogaskerék-fogasléc kapcsolat	22
6	Fogprofilok megadása.....	23
6.1	Analitikus megadás	24
6.2	Diszkrét pontok megadása	26
6.3	Fogprofilok beprogramozása	26
6.3.1	Szabványos fogprofil.....	27
6.3.2	Szinuszos profil.....	29
6.3.3	Lánckerekek.....	30
6.3.4	A pontok manuális beadása	31
7	Számítások Matlab-ban.....	32
7.1	Boolean műveletek.....	32
8	Kontúrkereső algoritmus.....	33
8.1	Metszéspont létezésének feltétele, két szakasz esetén	34
8.2	A kontúr-poligon első pontjának keresése.....	35
8.3	További pontok keresése	36
9	Átültetés C#-be.....	41
9.1	A program ismertetése.....	41
9.1.1	Kör alakú fogaskerekek generálása.....	41
9.1.2	Körtől eltérő, állandó tengelytávolságú fogaskerékpár generálása.....	42
9.1.3	Általános geometriájú fogaskerék-fogasléc kapcsolat generálása	43

9.1.4	Megadott görbe befogazása	43
9.1.5	Egyéb funkciók	44
9.2	Függvény- és görbeszerkesztő program	44
10	Megvalósított példák.....	45
10.1	Háromágú fogaskerék	46
10.1.1	A főprofil görbe meghatározása.....	46
10.1.2	A főprofil-görbe befogazása	48
10.2	Mechanizmus egyenesbevezetése.....	49
10.2.1	Kinematika és felépítés.....	49
10.2.2	A főprofil görbe meghatározása.....	50
10.2.3	A főprofil görbe befogazása	51
10.3	Kardáncsukló lüktetésének megszüntetése	53
10.3.1	A főprofil görbe meghatározása.....	53
10.3.2	A főprofil görbe befogazása	54
10.4	Íróasztallámpa.....	56
11	Összegzés	60
12	Tervek a továbbfejlesztésről.....	60
12.1	Kontúrkereső algoritmus továbbfejlesztése	61
12.2	Poligon helyett spline kontúr.....	61
12.3	Integrálás CAD rendszerbe	61
12.4	A program funkcióinak kiterjesztése	62
13	Mellékletjegyzék	62
14	Irodalomjegyzék	63

1 Bevezetés

A fogaskerek gyártása leggyakrabban fogazógépek segítségével történik, melyek különböző kialakításúak lehetnek (lefejtő-maró, profilmaró stb.). E gépek a megfelelő paraméterek (modul, fogsorszám, átmérő stb.) megadása után képesek legyártani a fogaskereket, a pontos geometria ismerete nélkül. A közelmúltban, a gépészmérnöki gyakorlatban a fogaskerek egyértelmű geometriai leírására csak ritkán volt szükség, azonban a mai CNC technológiák bevezetésével ez megváltozott. Lehetőség nyílt például lézeres lemezmegmunkálási technológiával tetszőleges fogprofilú és alakú fogaskerek előállítására. Ezekhez viszont elengedhetetlen az egyértelmű geometriának a megadása.

Számos szoftver létezik, melyek képesek kétdimenziós fogaskerékalakokat produkálni, de ezek többsége nem a lefejtést modellezi, így csak speciális esetekben működik. Általában az evolvens egyenletét írják fel, majd azzal meghatároznak egy fogat, amit körkörös kiosztanak. Az alámetszett fogak generálására például ezek a programok nem alkalmasak.

A dolgozat célja, a probléma alapos körüljárása után, egy olyan program elkészítése, amely a kerek görbülését kinematikailag pontosan írja le, figyelembe véve a választott fogprofil alakját is. A geometriai és matematikai modellek megalkotásánál minden a lehető legáltalánosabban lett megfogalmazva, hogy később a hasonló jellegű problémák is kezelhetőek legyenek. Az általánosan elkészített modell lehetővé teszi, hogy nem csak kör alakú, hanem tetszőleges formájú görbét is be lehessen fogazni, ami változó áttételű fogaskereket eredményez.

A dolgozatban bemutatott programmal kör alakú és attól eltérő, tetszőleges fogprofilú fogaskerek pontos geometriáját készítheti el a felhasználó. Akik eddig ezeket a fogaskereket a bonyolultságuk miatt nem alkalmazták, azok számára ez a szoftver segítséget nyújthat. Néhány példa szemlélteti egy ilyen kerék megtervezésének a folyamatát. A program elkészítése talán lehetővé teszi, hogy ezek az ipari gyakorlatban ritkán előforduló gépelemek jobban elterjedhessenek.

2 Fogaskerek

Az ember által készített szerkezetekben régóta használnak fogaskereket. Fogaskerék áttétellel működő vízimalom legelső leírását M. Vitruvius Pollió római mérnök készítette el i.sz. kezdete körül, itt részletesen leírja annak szerkezeti felépítését és működését. [1] A fogaskereket különböző célokra alkalmazzák. A régi vízimalmoknál, szélmalmoknál fából készült fogaskerek segítségével továbbították a víz ill. a szél mozgási energiáját a malomkövekig. A mai modern gépek nagy részénél a nagy fordulatszámú erőgép (villanymotor, robbanómotor) és az alacsony fordulatszámú munkagép között többnyire lassító fogaskerék áttételt alkalmaznak, de gyorsító áttétel is előfordul. A finommechanikai és óraszerkezetekben a fogaskerek feladata inkább az alkatrészek pontos kinematikai mozgásának megvalósítása. A szerszámgépeknél alkalmazott fogaskerek egyszerre visznek át nagy teljesítményt és kinematikailag pontos mozgásokat.

2.1 Fogaskerek előállítása

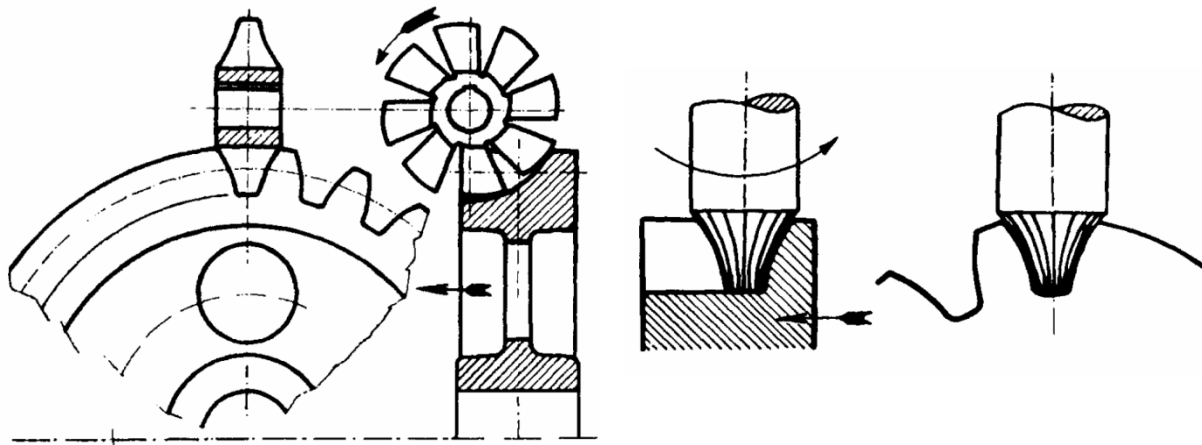
A dolgozatunkban felhasznált számítási modellek elkészítéséhez fontos volt a fogaskerek gyártási módszereibe közelebbi betekintést nyerni. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a fogaskerek gyártási technológiáit.

A fogazási eljárásokat alapvetően a következő három csoportba sorolhatjuk:

- Profilozó eljárások, melynél a szerszám hordozza a vele készítendő fogazat geometriai alakját.
- Lefejtő eljárások, melynél a fogprofil a szerszám és a munkadarab geometriailag helyes legördülése során jön létre
- Program-vezérelt eljárások, ahol a fogprofil kialakítása szerszám programozott mozgása során jön létre

Profilozó eljárások

A profilozó eljárás során a fogalak kialakítása tárcsamaróval vagy ujjmaróval történhet. Előnye, hogy nem igényel bonyolult szerszámgépet, hagyományos marógép és osztófej alkalmas az eljáráshoz. Nagy hátránya viszont, hogy minden modulhoz, ezen belül minden fogszámhoz külön szerszám szükséges

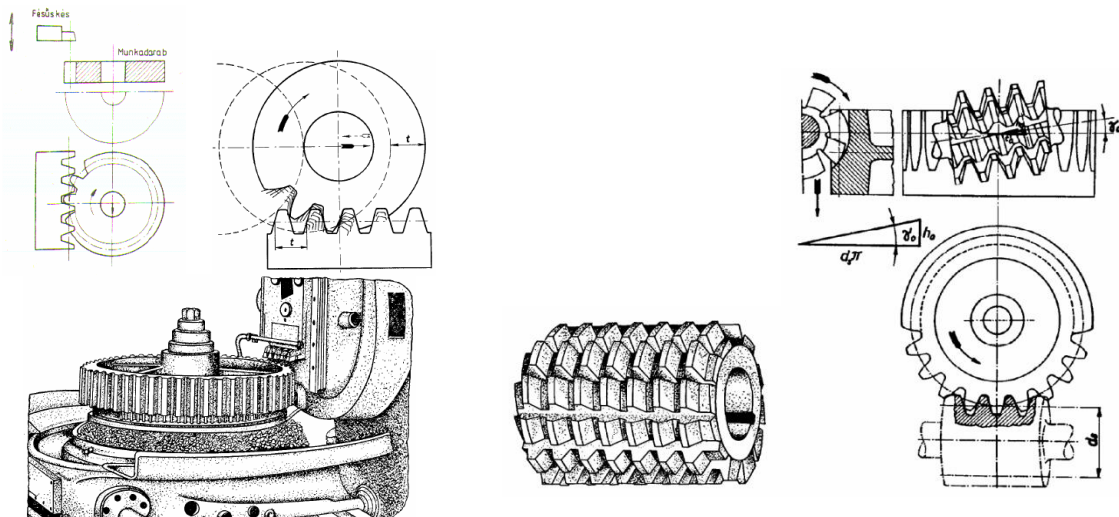


1. ábra A profilmarás bemutatása

Lefejtő eljárások

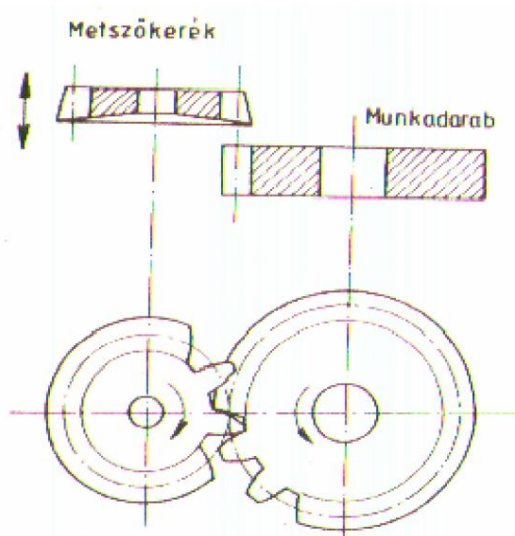
Maag-rendszerű, fésűskés-szerszámú lefejtő gyalulás, amikor is fogasléchez hasonló, egyenes profilú szerszám végzi a gyalulást (alternáló) főmozgást, a munkadarab pedig a szakaszos gördülő mellékmozgást. Elemi fogazat készítésekor az osztókör a szerszám középvonalával, a korrigált fogazat készítésekor pedig valamely ezzel párhuzamos $\pm x_m$ (profileltolás) távolságban levő vonalával van tiszta gördülésben.

Pfauter-rendszerű, csigamarós lefejtő marás, amikor is a főmozgást végző szerszám lényegében fogasléc (egyenes) profilú csavarfelület és a munkadarab mellékmozgása is folytonos forgó mozgás. A folytonos mozgások révén nagy termelékenység érhető el. A Pfauter-gép egy második mellékmozgást - a gyártandó kerék tengelye irányába eső eltolást is létrehoz.



2. ábra Maag (balra) és Pfauter (jobbra) rendszerű lefejtés

Fellows-rendszerű, metszőkerekes lefejtő vésés, amikor is az alternáló főmozgású, evolvens fogprofilú fogaskerék alakú szerszám mellékmozgásként szakaszosan összegördül a munkadarabbal. E rendszer a belsőfogazatok előállítására egyedül alkalmas lefejtő eljárás.



3. ábra A Fellows rendszerű lefejtés

Program-vezérelt fogazás

A vezérelt gépeken történő fogzáshoz általában szükségünk van a leendő fogazat pontos geometriájára. A fogazás történhet például CNC marógépen, huzal-szikraforgácsoló gépen vagy lézer lemez kivágó gépen.

2.2 Nem köralakú fogaskerek

Különleges esetekben körtől eltérő kerületű fogaskereket is alkalmaznak, amelyek változó áttételt eredményeznek. A változó áttételű fogaskerék és fogasléc rendszerek a hajtó és hajtott elem áttételi függvényének széles tartományban, szinte tetszőleges törvény szerinti megvalósítását biztosítják. Kinematikai vonatkozásban a nemköralakú fogaskerekből álló szerkezeteket a hajtó és hajtott tagok elfordulási szögei között fennálló nemlineáris összefüggés jellemzi. A változó áttételű fogaskerekre – tervezésük, gyártásuk mégoly érdekes volta mellett, vagy éppen miatt – a műszaki gyakorlat meglehetősen ritkán tart igényt, de azért lehet találkozni ilyen szerkezetekkel (fegyvertechnikában, bolygók mozgását szemléltető szerkezetekben, stb.). Az ilyen szerkezeteket fel lehet használni a változó sebességviszonyú mozgás átadásra. Azonban meg kell jegyezni, hogy ezen a különleges gépek nem kellő elterjedése miatt, a nem köralakú fogaskerekkel rendelkező szerkezeteket a gépek tervezésénél mindmáig gyakran más, bütykös, csuklós szerkezetekkel helyettesítik, annak ellenére, hogy ez a megoldás sok esetben nem kielégítő. [11][12]

A nemköralakú kerek rendeltetésének sajátásaiból kiindulva a szerkezetekben való alkalmazásuknál a következő jellegzetes esetek fordulnak elő:

- A gép működő és vezérlő részeinek mozgatása változó sebességgel.
- A párhuzamosan dolgozó szerkezetek ciklusidejének egyeztetése.
- A csuklós szerkezetek mozgásjellemzőinek megfelelő módon való változtatása, amit úgy érnek el, hogy a szerkezetek hajtó tagjairól a mozgást nemköralakú kerek adja át. [2]

3 Klasszikus fogaskerék-generálás

Az egyszerűbb geometriájú fogaskerek profilja körívekből és evolvens görbékből tevődik össze. A legtöbb fogaskerék geometriageneráló program csak ezen egyszerűbb felépítésű fogaskerek generálására alkalmas. A parametrikus CAD rendszerekbe beépített fogaskerék generáló modulok is hasonló elven működnek. Mivel az esetek többségében a fogaskerek előállítását fogazógépekkel történik, a modellek csak a megjelenítést segítik.

Jelenlegi gyakorlat szerint, ha egy konstrukció tervezése során fogaskerék megadására van szükség, a következő módon járhatunk el:

Mivel fogaskerek önmagukban nemigen fordulnak elő, az egymással kapcsolódó fogaskerek számítása többnyire egyszerre történik. A legfontosabb bemenő adatok a két egymással kapcsolódó fogaskerék fogszáma (z_1 ; z_2) és a modul (m). Ezen kívül meg kell adni a szabványos adatokat is: Alapprofilszög ($\alpha = 20^\circ$), Fejmagasságtényező ($ha^* = 1$), Lábhézag tényező: $c^* = 0,25$). Ha általános fogazást használunk (profileltolás alkalmazása), akkor lehetőségünk van az elemi tengelytávolságtól eltérő (többnyire annál nagyobb) értéket megadni. A profileltolást a következő előnyös tulajdonságok miatt célszerű alkalmazni:

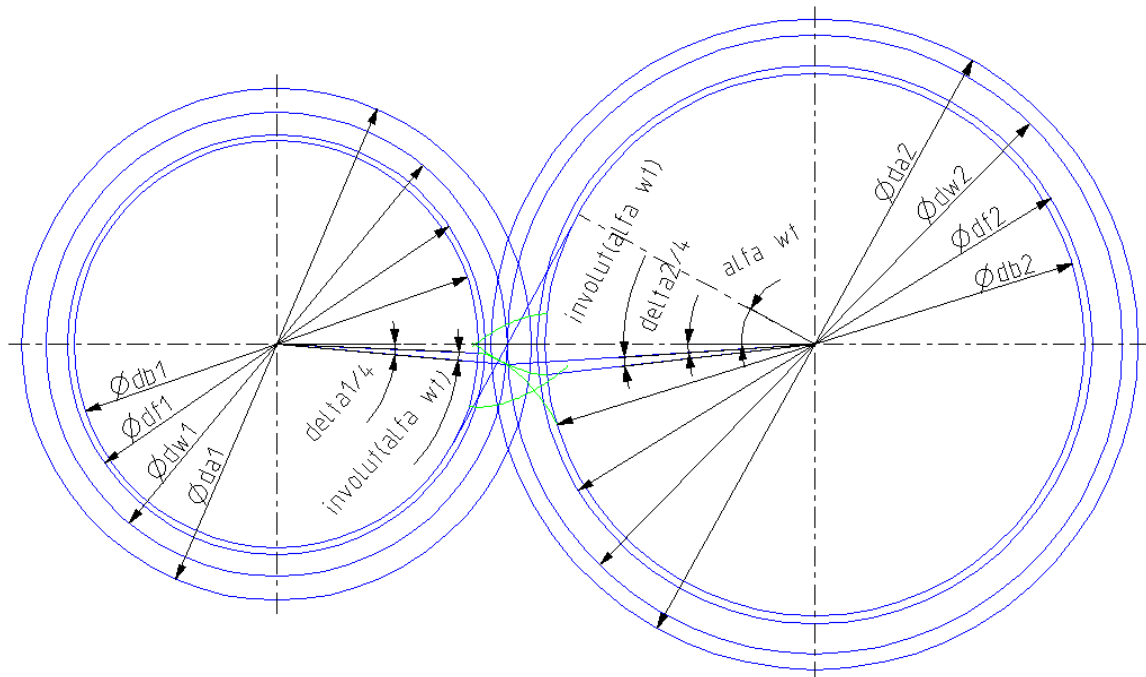
- Jobb csúszási és kopási viszonyok elérése
- Megadott tengelytávok betartása
- Alámetszés elkerülése
- Nagyobb teherbírás megvalósítása

Bemenő adatként kell még megadnunk a profileltolás elosztószámát (ψ_e : 0 és 0,5 között), ami meghatározza, hogy a tengelytáv növeléséből adódó össz profileltolás hogyan oszlik meg a két kerék között. [3]

A fogaskerékpár adatainak kiszámításához célszerű kihasználni a számítógép lehetőségeit, és pl. Excel táblázat (vagy más program) segítségével meghatározni a fogaskerek adatait. A számítások elvégzése után a következő kimenő adatok állnak rendelkezésünkre: [8] [3]

Osztókör átmérő	d_1, d_2
Gördülőköri átmérő	d_{w1}, d_{w2}
Fejkör átmérő	d_{a1}, d_{a2}
Lábkör átmérő	d_{f1}, d_{f2}
Alapkör átmérő	d_{b1}, d_{b2}
Profileltolás tényező	x_1, x_2
Az alapprofilszöghöz tartozó involut szög	$\text{involut}(\alpha_t)$
Kapcsolószög	α_{wt}
A kapcsolószöghöz tartozó involut szög	$\text{involut}(\alpha_{wt})$
Fog osztásszög	δ_1, δ_2

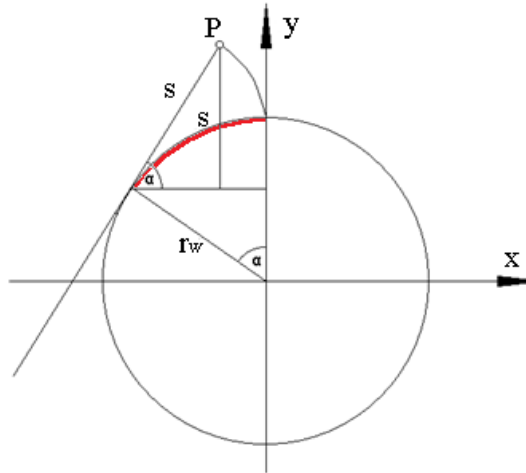
1. táblázat A geometriai adatok összegzése



4. ábra A fogaskerékpár megszerkesztése

Ezen adatok ismeretében már hozzáláthatunk a konkrét fogaskerek megszerkesztéséhez. A körök felrajzolása után az első fogak kontúrgörbéinek, vagyis az evolvensgörbék megszerkesztése következik. Ha azt szeretnénk, hogy az első fog, ill. fogárok a koordináta-rendszerhez képest szimmetrikus legyen, akkor az első fogprofil gördülőkörön lévő pontját a fog osztásszög $\frac{1}{4}$ részével el kell forgatnunk (ehhez szükséges a fog osztásszög és az involut szög ismerete).

A jelenleg elterjedten használt CAD rendszerek többségénél lehetőség van görbéknek függvénnyel való megadására. Ebben az esetben a (3.1) képlet segítségével megadhatjuk a kívánt evolvens egyenletét, paraméteres alakban.



5. ábra Az evolvens görbe számításához használt ábra

$$\mathbf{P}(\alpha) = \begin{bmatrix} -Rw \sin(\alpha) + s \cos(\alpha) \\ Rw \cos(\alpha) + s \sin(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rw(-\sin(\alpha) + \alpha \cos(\alpha)) \\ Rw(\cos(\alpha) + \alpha \sin(\alpha)) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$s = \frac{2 Rw \pi}{2\pi} \alpha = Rw \alpha \quad (3.2)$$

Ehhez definiálni kell egy koordináta rendszert, amelynek y tengelye a felrajzolandó evolvens kiindulópontja felé mutat ($\delta_1/4 - \text{involut}(\alpha_{w1})$), x tengelye pedig erre merőleges.

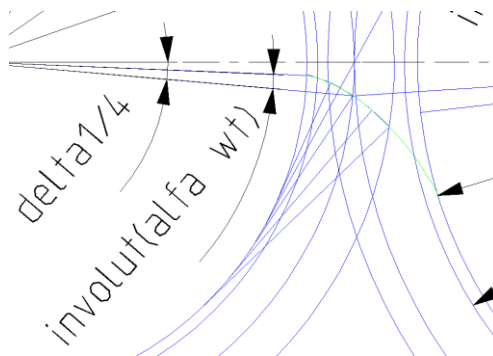
Az első evolvens megadása Pro/Engineer rendszerben az alábbi szöveg formátumban adható meg:

$$x = rb1 * (\sin(t*60) - (t*60 * (\pi/180)) * \cos(t*60))$$

$$y = rb1 * (\cos(t*60) + (t*60 * (\pi/180)) * \sin(t*60))$$

$$z = 0$$

Itt t paraméter értéke 0 és 1 között változik. A szinusz és koszinusz függvények argumentumában a szögértékeket fokban kell megadni, a második tag szorzóját radiánban. Ebben az esetben 60° -ot adtunk meg, hogy az evolvensgörbe biztosan a fejkörnél magasabban végződjön. Ha ezt a műveletet még háromszor elvégezzük a megfelelő adatokkal, megkapjuk a kiskerék és a nagykerék első fogainak jobb és baloldali profilgörbéit. Ezekből a profilgörbék közül nekünk a fejkör és lábkör közötti szakaszra van szükségünk.



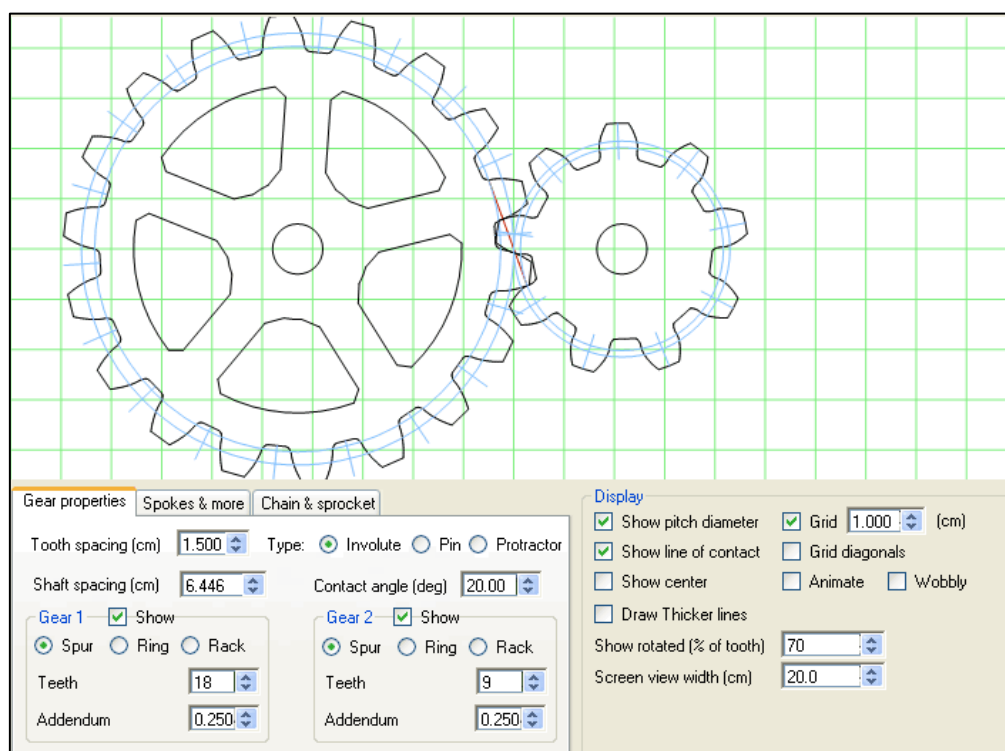
6. ábra Az evolvens profil megadása paraméteres egyenlettel és szerkesztett körívvel közelítve

Ha a CAD rendszerünkkel nem tudunk görbét egyenlet segítségével megadni, akkor közelítő szerkesztéssel is megadhatjuk a kívánt evolvens profilt (6. ábra). Az evolvens görbét olyan körívek sorozatával közelíthetjük, amelyeknek görbületi középpontjai az alapkörön vannak. Az ábrán látható, hogy már négy körívől álló sorozattal meglehetősen jó közelítést kapunk.

Bizonyos esetekben (kis fogszám, alacsony profileltolás érték, stb.) előfordulhat, hogy a lábkör sugár kisebb, mint az alapkör sugár. Ez azért probléma, mert az evolvens az alapkör alatt nincs értelmezve, így nem tudunk a lábkörig tartó profilgörbét szerkeszteni. Ebben az esetben megtehetjük, hogy a lábkör helyett a működő fogmagasság alsó határáig (lábkörsugár + lábhézag: $r_f + c^* \cdot m$) szerkesztjük meg az evolvenst.

A fenti szerkesztések után rendelkezésünkre állnak az első fogat határoló görbék: jobb- és baloldali profilgörbe, fejkör, lábkör. Ezeket felhasználva megrajzolhatjuk a fog kontúrját, és ezt a fogszámnak megfelelő mintázat (pattern) segítségével megkapjuk a teljes fogazatot. A kerék geometriájának többi részét hagyományos módszerrel hozzászerkeszthetjük, és így megkapjuk a kész fogaskereket.

A fogaskerék geometria generáló programok többsége a fent leírt műveleteket végzik el. Egy ilyen, kereskedelmi forgalomban kapható szoftver (Gear Generator, [4]) kezelőfelületét a 7. ábra mutatja.



7. ábra Egyszerű geometriájú fogaskerek generálására alkalmas, kereskedelmi forgalomban kapható szoftver [4]

4 Fogaskerek származtatása

Célunk egy olyan eljárás kidolgozása, amellyel a fogaskerek geometriáját a lefejtő eljárásoknak megfelelő módon generáljuk, tehát a gyártandó kerék pontos geometriáját kapjuk. Az eljárás több fő lépésre bontható, melyek közül az első a származtatás matematikai modelljének felírása.

A fogaskerek származtatása a tiszta kinematikai gördülésen alapszik [2.1. fejezet]. A hagyományos fogaskerék előállítási folyamatoknál egyenes gördül le körről vagy kör körről. Ebben a fejezetben általános geometrián legördülő egyenes és kör kinematikáját vizsgáljuk.

4.1 Egyenes legördítése

A fogprofil származtatásához felvesszünk két (x - y és ξ - η) koordinátarendszert. Az első, x - y koordinátarendszerben a befogazandó főprofil-görbét, a ξ - η -ban pedig a fogprofil görbét vesszük fel paraméteres egyenletek segítségével. A befogazandó görbét ezentúl főprofil-görbének hívjuk. Mivel egyenest gördítünk végig a főprofilon, ennél az eljárásnál alapvető kritérium, hogy főprofil-görbe konvex legyen, ellenkező esetben az egyenes metszené a főprofil görbét. A legördülő egyenes ξ - η a koordinátarendszernek a vízszintes, ξ tengelye. A ξ - η koordinátarendszer transzformációjával gördítjük a benne lévő fogprofil-görbét.

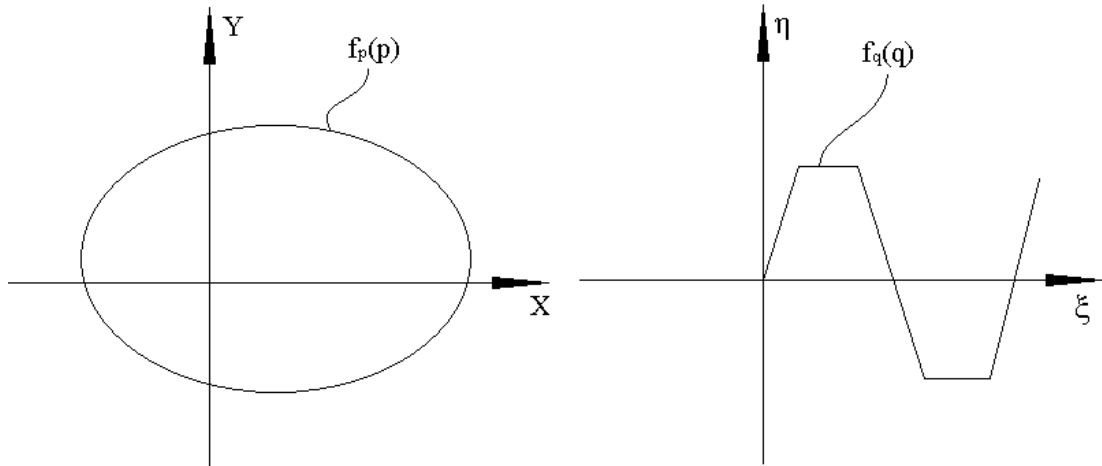
A főprofil (p) paraméteres egyenleteinek az X - Y - (Z) koordinátarendszerben vett homogén koordináták alakja:

$$X=X_p(p); \quad Y=Y_p(p) \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ (Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p(p) \\ Y_p(p) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{f}_p(p) \quad (4.1)$$

A fogprofil (q) paraméteres egyenleteinek a ξ - η - ζ koordinátarendszerben vett homogén koordináták alakja:

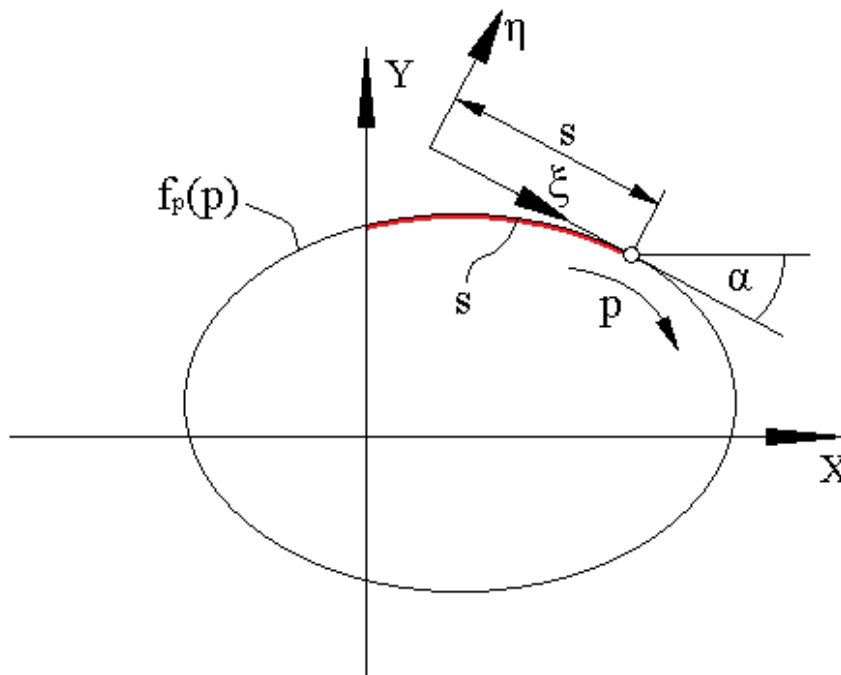
$$\xi=\xi_q(q); \quad \eta=\eta_q(q)+x_{pr} \quad \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ (\zeta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_q(q) \\ \eta_q(q) + x_{pr} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{f}_q(q) \quad (4.2)$$

ahol x_{pr} konstans a profileltolás [3. fejezet].



8. ábra A fő- és fogprofil görbe vázlata

A legördítés lépései:



9. ábra A ξ - η koordinátarendszer transzformációjának vázlata

A ξ - η koordinátarendszeren (p) paraméter függvényében, a 9. ábraán látható módon kell a transzformációt elvégezni. A transzformáció három főbb lépésre bontható:

1. Az $f_q(q)$ függvényt a ξ tengelyen negatív irányba el kell tolni $s(p)$ értékkel, ahol $s(p)$ az $f_p(p)$ görbe legördült hossza, a kezdő pozíciótól az aktuális pozícióig, (p) paraméter függvényében. Kiszámítása:

$$s(p) = \int \sqrt{\left(\frac{\partial X_p(p)}{\partial p}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_p(p)}{\partial p}\right)^2} dp = \int_0^p \sqrt{\left|\frac{\partial \mathbf{f}_p(l)}{\partial l}\right|} dl \quad (4.3)$$

Az áthelyezést az alábbi T_s homogén koordinátás transzformációs mátrix végzi.

$$T_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

2. A ξ - η koordinátarendszer forgatása $\alpha(p)$ szöggel.

A forgatást a T_α homogén koordinátás transzformációs mátrix végzi,

$$T_\alpha = T(\alpha(p)) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha(p)) & \sin(\alpha(p)) & 0 \\ -\sin(\alpha(p)) & \cos(\alpha(p)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

ahol $\alpha(p)$ és az $\mathbf{f}_p(p)$ görbe p - pontbeli érintőjének meredekségét jellemző szög:

$$\alpha(p) = \arctan \frac{\frac{\partial Y_p(p)}{\partial p}}{\frac{\partial X_p(p)}{\partial p}}. \quad (4.6)$$

A fenti egyenletben a kiterjesztett arctan függvényt használjuk, ami 0 - 2π -ig értelmezett, ellenkező esetben csak fél fordulatokra működne. A matematikai programok ezt $\text{atan2}(x,y)$ -al jelölik.

3. A ξ - η koordinátarendszer áthelyezése $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p(p) \\ Y_p(p) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{f}_p(p)$ pontba.

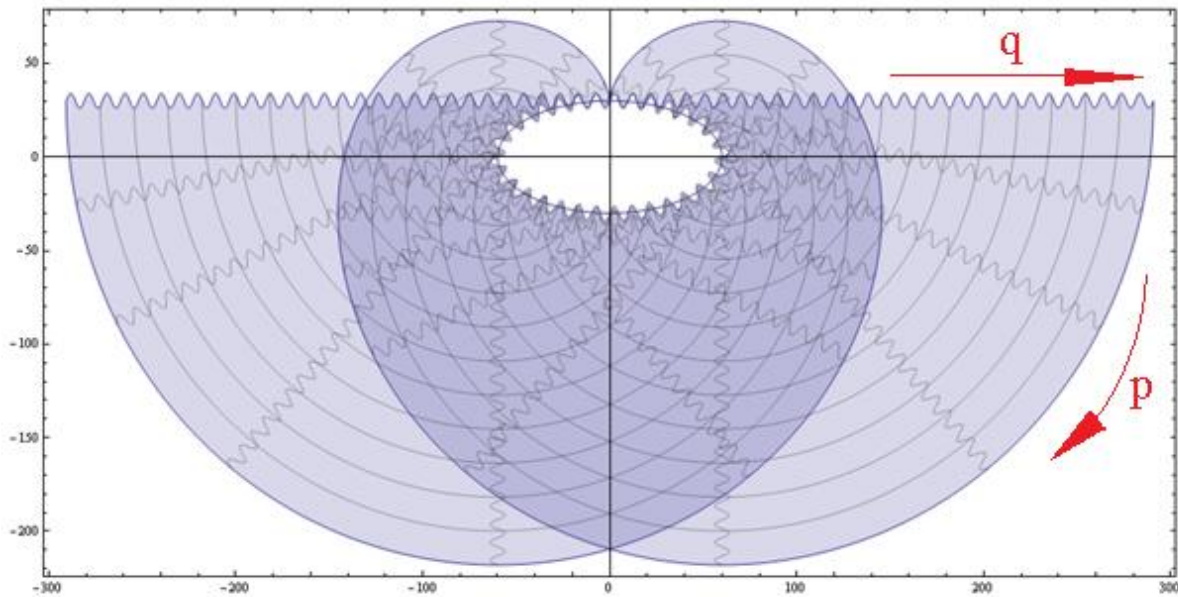
Az áthelyezést a T_{xy} homogén koordinátás transzformációs mátrix végzi.

$$T_{xy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_p(p) \\ 0 & 1 & Y_p(p) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A teljes transzformációt az alábbi egyenlet írja le:

$$E = T_{xy} \left(T_\alpha \left(T_s \mathbf{f}_q(q) \right) \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_p(p) \\ 0 & 1 & Y_p(p) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \cos(\alpha(p)) & \sin(\alpha(p)) & 0 \\ -\sin(\alpha(p)) & \cos(\alpha(p)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & -s(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_q(q) \\ \eta_q(q) + x_{pr} \\ 1 \end{bmatrix} \right) \right) \quad (4.8)$$

Eredményül egy kétváltozós (p és q) függvényt kapunk, mely az X-Y síkon egy felületet határoz meg. Az alakzat "belső" kontúrja a keresett, befogazott főprofil görbéje.



10. ábra Az analitikus eredmény szemléltetése, elliptikus kerék, és szinuszos fogprofil esetén

Kör alakú főprofil-görbe esetében

A hagyományos, hengeres fogaskerek esetében a főprofil egy r sugarú kör, melynek parametrikus egyenlete:

$$x = r \cos(2\pi p) \quad (4.9)$$

$$y = r \sin(2\pi p) \quad (4.10)$$

Érdeemes a fenti dimenziótlán alakot használni, ahol a p paraméter 0 és 1 között változik.

A főprofil-görbe (4.9),(4.10) egyenletének egyszerűsége miatt a transzformációhoz szükséges műveletek elvégzése viszonylag egyszerű. Elvégezve a differenciálást és integrálást az $s(p)$ görbehosszra és az $\alpha(p)$ érintő meredekségét jellemző szögre az alábbi összefüggéseket kapjuk:

$$s(p) = 2\pi r p \quad (4.11)$$

$$\alpha(p) = 2\pi p. \quad (4.12)$$

A fenti eljárás analitikus megoldása legtöbb esetben rendkívül bonyolult és a sok esetben meghaladja a megoldó-szoftverek képességét. Numerikus módszerrel, adott pontossággal és felbontással viszont viszonylag könnyen meg tudjuk oldani a problémát, melyet részletesen az alábbi [4.2. fejezet] tárgyal.

4.2 Numerikus megoldás

Az analitikus megoldásnál p és q futókoordináták (vagy paraméterek) folytonosan és egyenletesen változtak. A numerikus módszernél ezek egy-egy vektorral adhatóak meg, melyek a paraméterek diszkrét értékeit tartalmazzák. A paraméterek egyenletesen változnak a

kezdeti és végső értékeik között n lépésben. A p és q vektorok hossza, tehát a görbék felbontása n_p és n_q különbözhet egymástól.

Így az eljárás nagyon hasonló lesz a fent ismertetett analitikus módszerhez. A lényegesebb különbségeket az alábbiakban ismertetem.

Az $s(p)$ kiszámítása, tehát a főprofil-görbe hossza a p paraméter függvényében az (4.13) egyenlettel végezhető (Pitagorasz-tétel alkalmazásával):

$$s(p) = \text{cumsum} \sqrt{\left[\text{diff}(X_p(p)) \right]^2 + \left[\text{diff}(Y_p(p)) \right]^2}. \quad (4.13)$$

Itt a *diff* művelet a vektor két szomszédos elemének különbségét adja meg, tehát egy n elemű V vektorból egy $n-1$ elemű vektort kapunk az alábbiak szerint:

$$(\text{diff}[V])(i) = V(i+1) - V(i). \quad (4.14)$$

A *cumsum* művelet a vektor előbbi elemeinek az összegét képi, tehát egy n elemű V vektorból egy n elemű vektort kapunk:

$$(\text{cumsum}[V])(i) = V(1) + V(2) + \dots + V(i) = \sum_{k=1}^i V(k). \quad (4.15)$$

Fontos megjegyezni, hogy annak ellenére, hogy a paramétereket tartalmazó egyenletek is vektorok, a szorzás, osztás, hatványozás, stb. műveletek nem vektoriálisan értendők, hanem csak az azonos sorszámú elemek között (kivéve persze az analitikus módszerben is alkalmazott vektoriális műveleteket, melyeket a transzformációnál használtunk).

Az $\alpha(p)$ szöget, tehát főprofil p pontbeli érintőjének a szögét az alábbi egyenlettel határozhatjuk meg.

$$\alpha(p) = \arctan \frac{\text{gradient}[X_p(p)]}{\text{gradient}[Y_p(p)]} \quad (4.16)$$

A *gradient* művelet az adott vektor elemeinek a változását mutatja. Működése és célja hasonló a *diff* operátoréhoz, viszont itt az n elemű vektorból n elemű vektort és pontosabb közelítést kapunk. A *gradient* művelet definíciója vektorokra:

$$(\text{gradient}[V])(1) = V(2) - V(1) \quad (4.17)$$

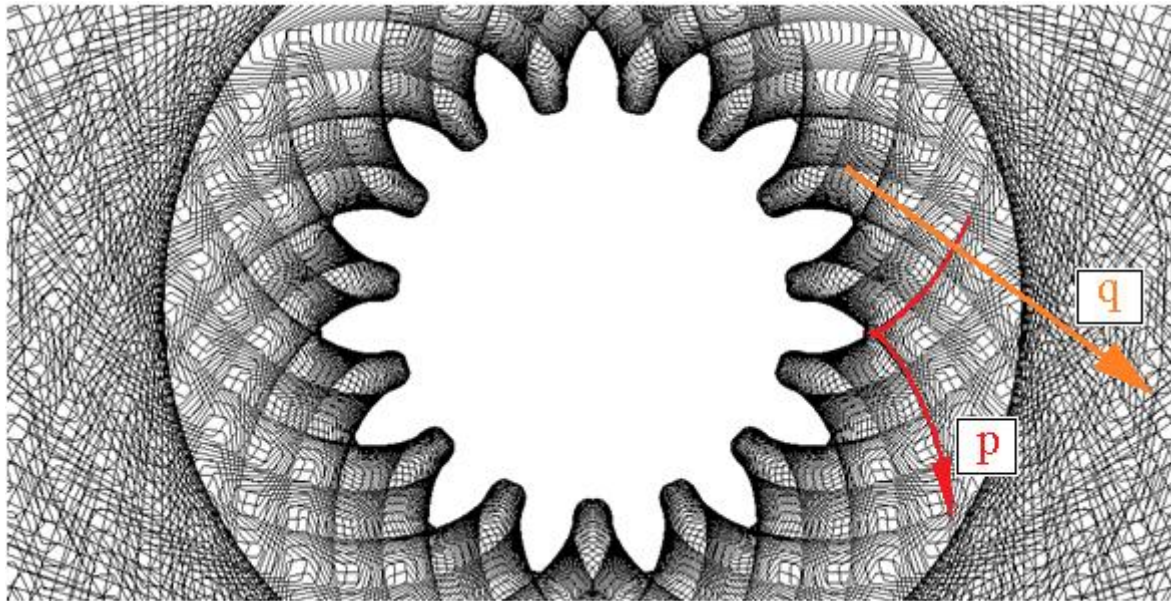
$$(\text{gradient}[V])(i) = \frac{V(i+1) - V(i-1)}{2} \quad 1 < i < n \quad (4.18)$$

$$(\text{gradient}[V])(n) = V(n) - V(n-1) \quad (4.19)$$

Ezen operátorok a Matlab programba be vannak építve. A *gradient* operátor pontosabb közelítést ad, mint a *diff* operátor, az ívhossz számításánál mégis a *diff*-et használtuk. Ennek

oka, hogy az s vektor első eleme *gradient*-et használva nem nulla lenne, mely helytelen eredményekhez vezethet. Az s -re felírt (4.13) egyenlet a poligon n pontja között lévő $n-1$ egyenes szakasz tényleges hosszát határozza meg. Az $n-1$ értéket kiegészítjük egy kezdeti nulla értékkel, így n elemű lesz a vektor.

A műveletek elvégzése után egy kétváltozós, diszkrét pontokból álló területet (rácsot) kapunk, melyet a 11. ábra szemléltet:



11. ábra A numerikus eredmények bemutatása, melynek belső kontúrja alkotja a fogaskereket.

4.3 Köralak legördítése

Abban az esetben, ha konkáv főprofil-görbét akarunk fogazattal ellátni, más módszert kell alkalmaznunk. Az egyeneshez kötött fogasléc helyett itt egy körhöz kötött fogaskereket, mint szerszám kereket gördítünk le a főprofil-görbén. Ennek az eljárásnak is vannak korlátai, ugyanis itt a főprofil-görbe legkisebb konkáv görbületi sugarát nem haladhatja meg a szerszámkerék gördülő körének sugara, ellenkező esetben a kör belemetszene a főprofil-görbébe.

A fogprofil származtatásához, hasonlóképpen, mint az egyenes legördítésénél [4.1. fejezet] felvesszünk két $(x-y)$ és $(\xi-\eta)$ koordinátarendszert. Az álló $x-y$ koordinátarendszerben a befogazandó főprofil-görbét, a mozgó $\xi-\eta$ -ban a fogprofil görbét vesszük fel paraméteres egyenletek segítségével. A $\xi-\eta$ -ban felvett görbe, a [4.2. fejezetben] leírtak alapján származtatott fogaskerek kontúrja lesz. A $\xi-\eta$ koordinátarendszer transzformációjával gördítjük a benne lévő származtatott fogprofil-görbét (szerszámfogaskereket). A legördülő kör középpontja a $\xi-\eta$ koordinátarendszernek az origója, a sugara pedig a fentiek figyelembevételével tetszőleges érték.

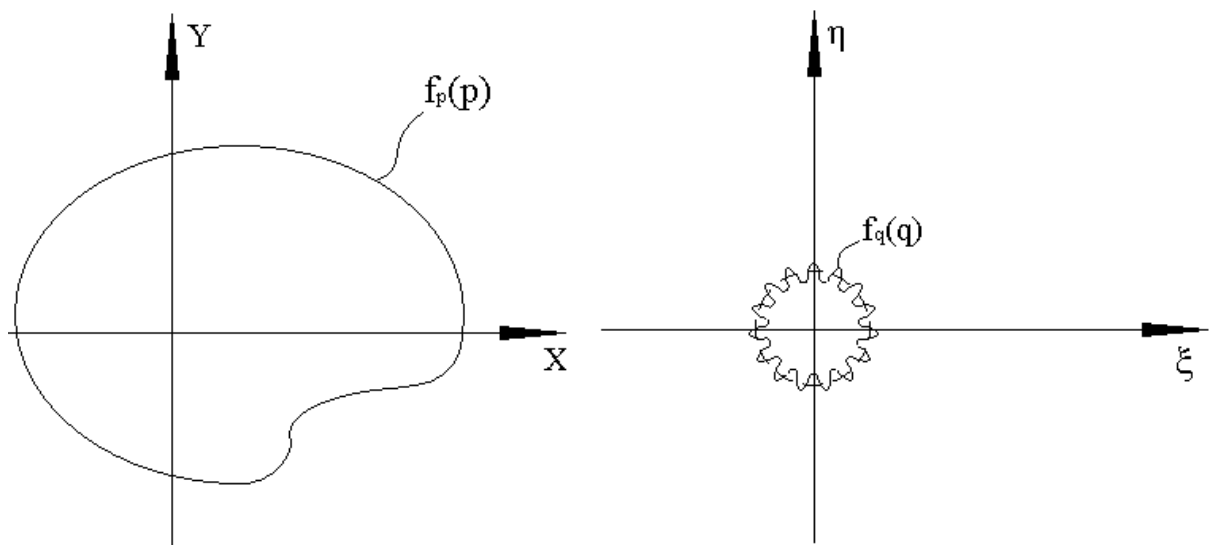
A főprofil (p) paraméteres egyenleteinek az $X-Y(Z)$ koordinátarendszerben vett homogén koordinátás alakja:

$$X=X_p(p); \quad Y=Y_p(p) \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ (Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p(p) \\ Y_p(p) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{f}_p(p) \quad (4.20)$$

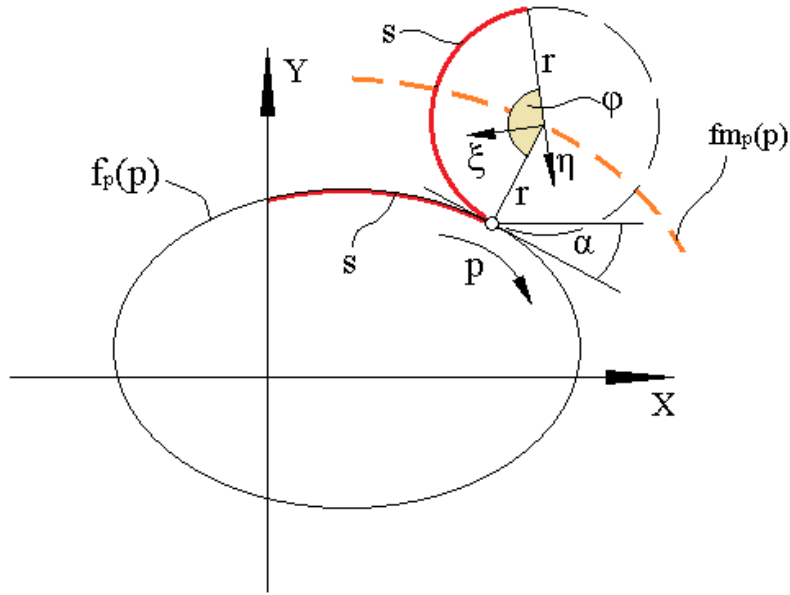
A fogprofil (q) paraméteres egyenleteinek a ξ - η - ζ koordináta-rendszerben vett homogén koordináták alakja:

$$\xi=\xi_q(q); \quad \eta=\eta_q(q) \quad \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ (\zeta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_q(q) \\ \eta_q(q) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{f}_q(q) \quad (4.21)$$

A fogprofil (a szerszámfogaskerék) koordináta-rendszerében megadott legördülő kör origó középpontú és r sugarú.



12. ábra A fő- és a fogprofil (szerszámkerék) vázlata



13. ábra A ξ - η koordinátarendszer transzformációjának vázlata

A ξ - η koordinátarendszert (p) paraméter függvényében, a 13. ábraán látható módon kell transzformálni. A transzformáció két összetett lépésre bontható.

1. A ξ - η koordinátarendszer forgatása $\alpha(p) + \varphi(p)$ szöggel.

A forgatást $T_{\alpha\varphi}$ mátrix végzi.

$$T_{\alpha\varphi} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha(p) + \varphi(p)) & \sin(\alpha(p) + \varphi(p)) & 0 \\ -\sin(\alpha(p) + \varphi(p)) & \cos(\alpha(p) + \varphi(p)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

A (4.22) mátrixban szereplő $\alpha(p)$ az $f_p(p)$ görbe p - pontbeli érintőjének meredekségét jellemző szög,

$$\alpha(p) = \arctan \frac{\frac{\partial Y_p(p)}{\partial p}}{\frac{\partial X_p(p)}{\partial p}}. \quad (4.23)$$

A $\varphi(p) = s(p)/R$, a szerszámkerék legördüléséből eredő szögelfordulást jelöli. Az $s(p)$ a főprofil-görbe legördült hosszát jelöli a (p) paraméter függvényében.

$$s(p) = \int \sqrt{\left(\frac{\partial X_p(p)}{\partial p}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_p(p)}{\partial p}\right)^2} dp \quad (4.24)$$

2. A ξ - η koordinátarendszer áthelyezése $\begin{bmatrix} Xm \\ Ym \\ (Zm) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xm_p(p) \\ Ym_p(p) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{f}m_p(p)$ pontba.

Ezt a T_{mxy} mátrixszal valósítjuk meg:

$$T_{mxy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Xm_p(p) \\ 0 & 1 & Ym_p(p) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

A mátrixban szereplő $Xm_p(p)$ és $Ym_p(p)$ a legördülő kör (amely a szerszámkerék osztóköre) sugarával (r) és a profileltolással (x_p) [3. fejezet] módosított (eltolt) főprofil-görbe egyenletei.

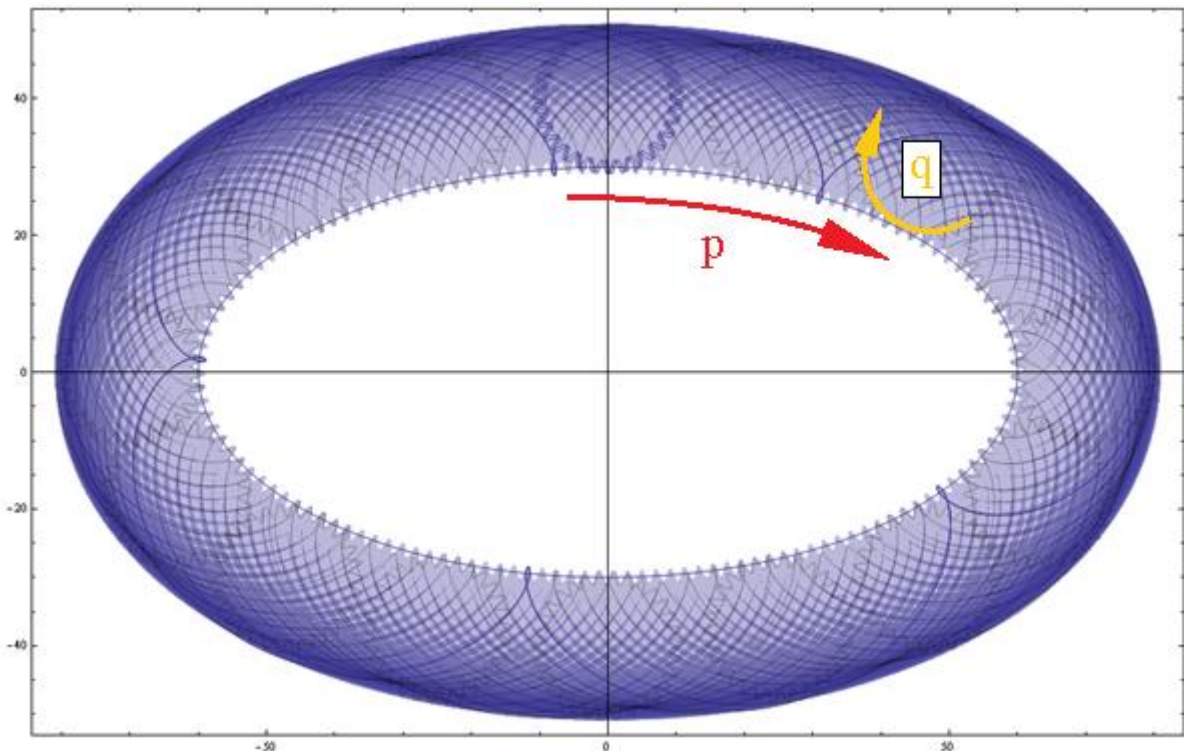
$$Xm_p(p) = X_p(p) + (r + x_p) \cdot \sin(\alpha(p)) \quad (4.26)$$

$$Ym_p(p) = Y_p(p) + (r + x_p) \cdot \cos(\alpha(p)) \quad (4.27)$$

A transzformáció az (4.28) egyenlet szerint alakul, ahol E az teljes transzformációt tartalmazó mátrix.

$$E = T_{mxy}(T_{\alpha\varphi}f_q(q)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & mX_p(p) \\ 0 & 1 & mY_p(p) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \cos(\alpha(p) + \varphi(p)) & \sin(\alpha(p) + \varphi(p)) & 0 \\ -\sin(\alpha(p) + \varphi(p)) & \cos(\alpha(p) + \varphi(p)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_q(q) \\ \eta_q(q) \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (4.28)$$

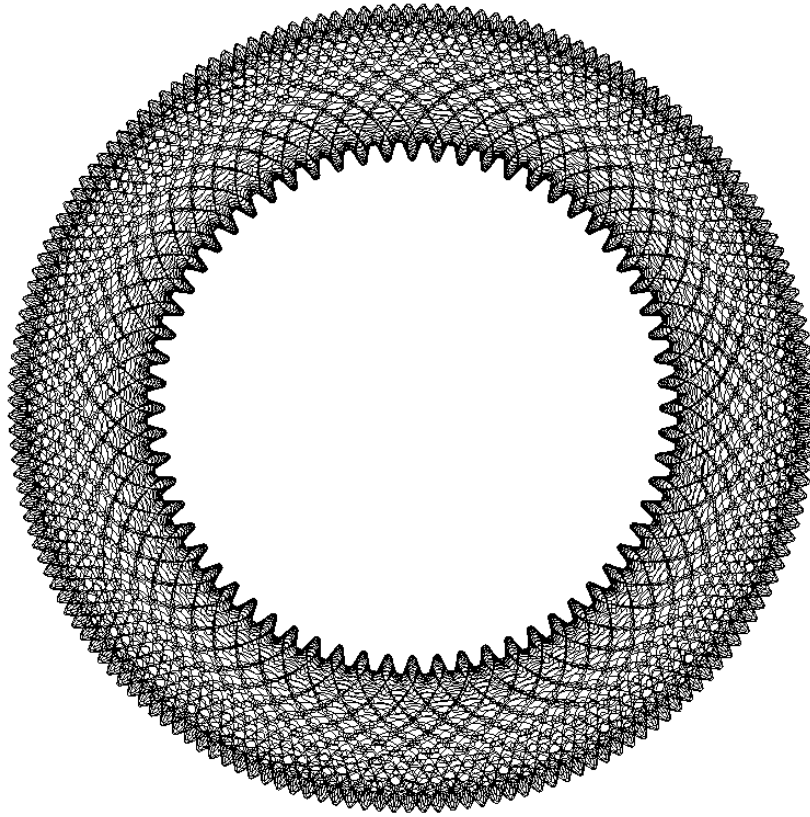
Ez egy két paraméter szerint változó függvény, mely egy felületet határoz meg az X-Y síkban. Az alakzat "belső" kontúrja a befogazott főprofil-görbe lesz.



14. ábra Az analitikus eredmény szemléltetése ellipszis alakú kerék esetén

A fenti eljárás analitikus megoldásának bonyolultsága miatt, az egyenes legördítésénél bemutatott módszert, a numerikus megoldást alkalmaztuk. Numerikus módszerrel, adott pontossággal (felbontással) könnyen meg tudjuk oldani a problémát [ld. 4.2 fejezet].

A műveletek elvégzése után egy kétváltozós, diszkrét pontokból álló területet (rácsot) kapunk, melynek kontúrja a fogaskerék.



15. ábra A numerikus eredmény szemléltetése

5 Körtől különböző fogaskerek

A korábban ismertetett módszerek alkalmazhatóak egy ismert főprofil göbe esetén. Az alábbiakban bemutatásra kerül egy módszer, amellyel megadott változó áttétel esetén meghatározható a fogaskerek főprofil-görbéje állandó tengelytávolságra.

A módszer módosításával változó áttételű fogaskerék–fogasléc geometriák is számolhatóak.

5.1 A főprofil-görbék meghatározása állandó tengelytávolság esetén

A fogaskerekknél az i áttételt a két (1-es és 2-es) kerék ω_1 és ω_2 szögsebessége arányával lehet definiálni:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\frac{\partial \varphi_1}{\partial t}}{\frac{\partial \varphi_2}{\partial t}} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \varphi_2} \quad (5.1)$$

amely segítségével a kapcsolódó fogaskerek szöghelyzet viszonyai is meghatározhatóak.

$$\partial \varphi_2 = \frac{1}{i} \partial \varphi_1 \quad (5.2)$$

$$\varphi_2 = \int \frac{1}{i} d\varphi_1 \quad (5.3)$$

Ha kör alakú fogaskerekekről van szó, tehát i konstans, akkor független φ_1 től tehát:

$$\varphi_2 = \frac{1}{i} \int d\varphi_1 = \frac{\varphi_1}{i} \quad \text{és} \quad i = \frac{\varphi_1}{\varphi_2}. \quad (5.4)$$

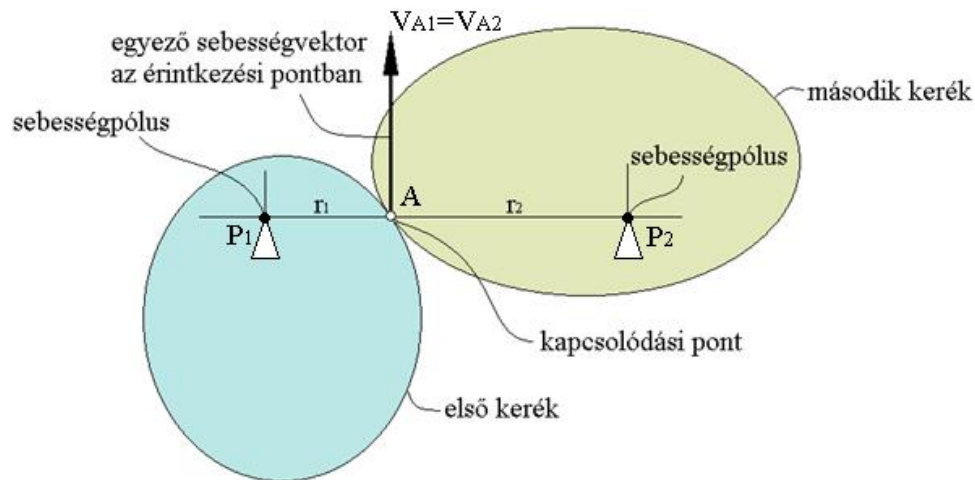
Ha i nem konstans, tehát az áttétel a kerek szögpozíciója szerint változik, akkor

$$\varphi_2 = \int \frac{1}{i(\varphi_1)} d\varphi_1 = \varphi_2(\varphi_1). \quad (5.5)$$

Ha az áttétel változik, a sugarak is változnak. Mivel az a tengelytáv állandó, írhatjuk, hogy

$$a = r_1(\varphi_1) + r_2(\varphi_2(\varphi_1)). \quad (5.6)$$

Összegördülés közben, a két kerék kapcsolódási pontjában azonosak lesznek a sebességek. A kerek póluspontjai (tengelyei) által meghatározott egyenesen rajta lesz a kerek kapcsolódási pontja



16. ábra A gördülés kinematikai viszonyainak szemléltetése

$$v_{a1} = v_{a2} \quad (5.7)$$

Az érintkezési ponthoz tartozó sebességeket a póluspontokból átszámolhatjuk.

$$r_1 \cdot \omega_1 = r_2 \cdot \omega_2 \quad (5.8)$$

Átrendezve és az i definícióját felhasználva felírhatjuk, hogy

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} = i. \quad (5.9)$$

Behelyettesítve az előző egyenletbe a tengelytávra vonatkozó (5.6) egyenletet megkapjuk az r_1 főprofil-görbét az áttétel függvényében.

$$i = \frac{r_2}{r_1} = \frac{a - r_1}{r_1} \quad r_1(\varphi_1) = \frac{a}{i(\varphi_1) + 1} \quad (5.10)$$

Tehát az $i(\varphi_1)$ és az „a” ismeretében az első kerék főprofil-görbéje könnyen meghatározható az x-y koordináta rendszerben.

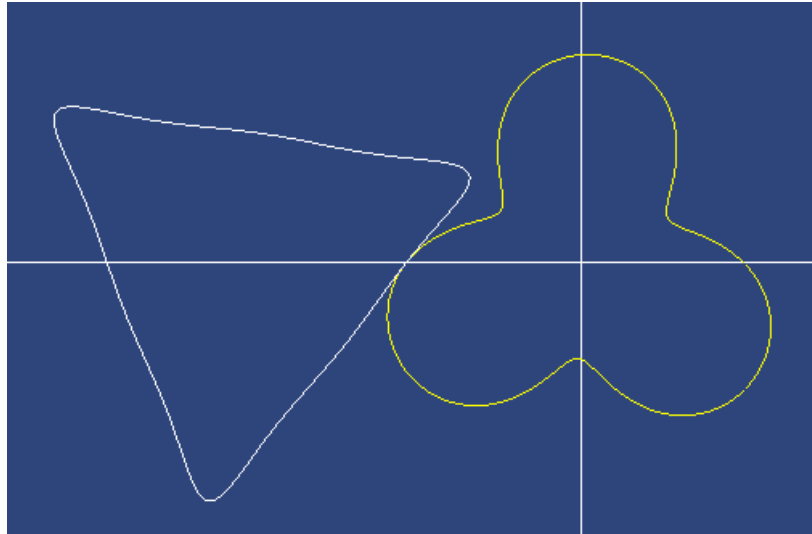
$$\mathbf{f}_1 = \begin{bmatrix} r_1(\varphi_1) \cos(\varphi_1) \\ r_1(\varphi_1) \sin(\varphi_1) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

A második kerék egyenletének a saját koordináta rendszerében való egyszerű felírásához szükségünk van a $\varphi_2(\varphi_1)$ függvényre (5.5).

$$r_2(\varphi_2(\varphi_1)) = r_1(\varphi_1) \cdot i(\varphi_1) \quad (5.12)$$

Ezzel a geometria adott az a ξ - η koordináta rendszerben:

$$\mathbf{f}_2 = \begin{bmatrix} r_2(\varphi_2) \cos(\varphi_2) \\ r_2(\varphi_2) \sin(\varphi_2) \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$



17. ábra Példa a nem köralakú gördülőgörbékre

5.2 Fogaskerék-fogasléc kapcsolat

Az általános fogaskerék-fogasléc párok geometriai számítása sokban hasonlít a fogaskerékpárok számításához. A fogasléc tekinthető egy végtelen hosszú sugárral rendelkező fogaskeréknek, melynek szögsebessége mindig zérus.

$$v = r \cdot \omega \quad (5.14)$$

$$r = \frac{v}{\omega} = \frac{v}{0} \rightarrow \infty \quad (5.15)$$

A (5.14-15) egyenletekben ω a szögsebesség, v kerületi sebesség és r a sugár.

Mivel az egyik szögsebesség mindig zérus, értelmetlen a hagyományos i áttétellel számolni, mivel az mindig végtelenre adódik. A számításokhoz definiáltunk egy $\hat{i}$ áttételtényezőt, mely a fogaskerék pillanatnyi szögsebessége és a fogasléc pillanatnyi haladási sebessége közt teremt kapcsolatot.

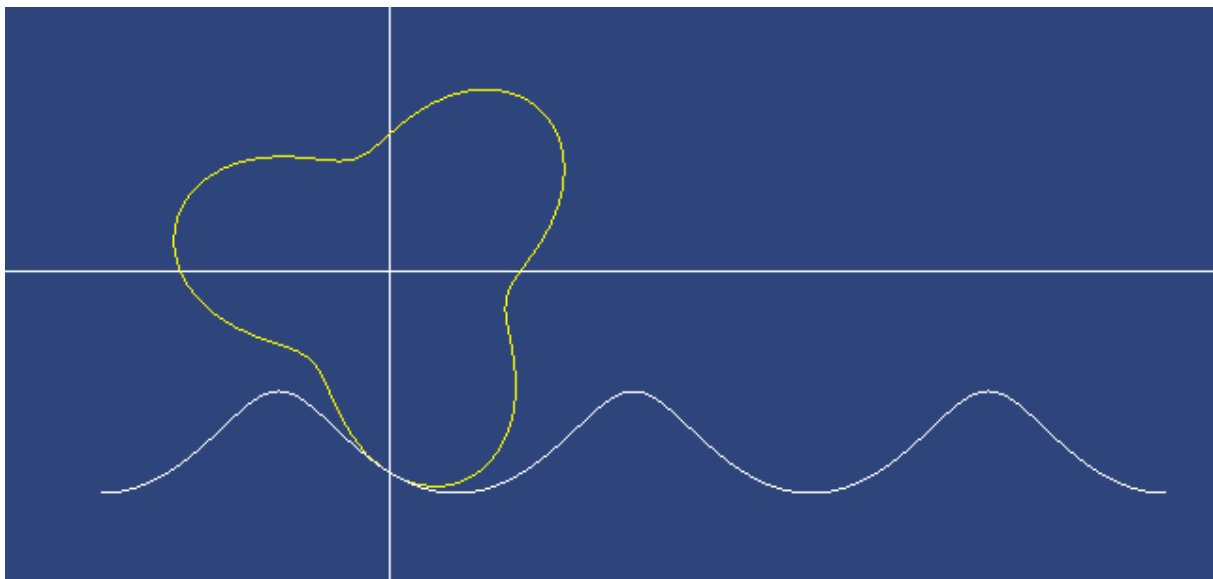
$$\hat{i} = \frac{v}{\omega} = \frac{r(\varphi) \cdot \omega}{\omega} = r(\varphi) \quad (5.16)$$

Tehát ha megadjuk a fogasléc pozícióját a fogaskerék szöghelyzetének függvényében, akkor abból számítható a geometria.

$$\hat{i} = \frac{\partial s}{\partial \varphi} = r(\varphi) \quad (5.17)$$

$$\mathbf{f}_1 = \begin{bmatrix} r(\varphi) \cos(\varphi) \\ r(\varphi) \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$\mathbf{f}_2 = \begin{bmatrix} s(\varphi) \\ -r(\varphi) \end{bmatrix} \quad (5.19)$$



18. ábra Példa az általános fogaskerék-fogasléc gördülőgörbéire

6 Fogprofilok megadása

A [4. fejezetben] bemutatott módszerrel szinte bármely, tetszőlegesen megadott görbe befogazható. Az [5. fejezetben] a befogazandó főprofil-görbék megadásával foglalkoztunk. Ebben a fejezetben a befogazáshoz használt fogprofilokat és megadási módszereiket vizsgáljuk.

Ugyan analitikusan szinte tetszőleges geometriájú, periodikusan ismétlődő görbe megadható, az egyenletek elbonyolódása és a használt numerikus módszer miatt viszont diszkrét pontokból (és köztük egyenes szakaszokból) álló profilgörbéket használunk.

6.1 Analitikus megadás

Az alábbiakban bemutatunk néhány módszert az analitikus profilmegadásra.

Színusz függvény

Az analitikus fogprofil megadására a legegyszerűbb példa a szinuszos fogprofil egyenlete. Analitikusan megadott szinuszos fogprofil legördülését megfigyelhetjük a 14. ábra, a [4.1. fejezetben]. A profil egyenlete paraméteres formában:

$$f_{sin} = \left[\begin{matrix} l & z & p \\ a \sin(2\pi z p) \end{matrix} \right], \quad (6.1)$$

ahol l a hullámhossz, z a fogsorszám, a az amplitúdó és p a 0-tól 1-ig változó paraméter.

Fourier-sorba fejtés

A periodikusan ismétlődő függvények Fourier-sorba fejthetők, végtelen sok, különböző szinuszos és koszinusz tag összegének felírásával. Nagy hátrány, hogy az egyenes szakaszok és az éles sarkok leírása nehézkes, a megfelelő pontossághoz nagyon sok Fourier komponens szükséges. A mi esetünkben a fogprofilok kellő pontosságú megadására ez az eljárás túlzottan bonyolult lenne.

Függvények összefűzése

Sokszor problémát jelent, hogy a felépítendő profil több különböző egyenletű görbe összefűzésével jellemezhető, mint például az alapvető fogaslécprofilnál. Ilyenkor lehetőség van az egyenletek összefűzésére a Heaviside-függvény (egységugrás-függvény) segítségével.

A függvényt létre lehet hozni a $\frac{1+(-1)^{\text{floor}(q \cdot C1+C2)}}{2}$ taggal, amely az egyes részfüggvényeket „ki vagy bekapcsolja”. Ha a $q \cdot C1+C2$ egészrésze páros, akkor a fenti tag értéke 1, ha páratlan, akkor az érték 0 lesz. Alábbiakban két példán bemutatjuk e módszer alkalmazását.

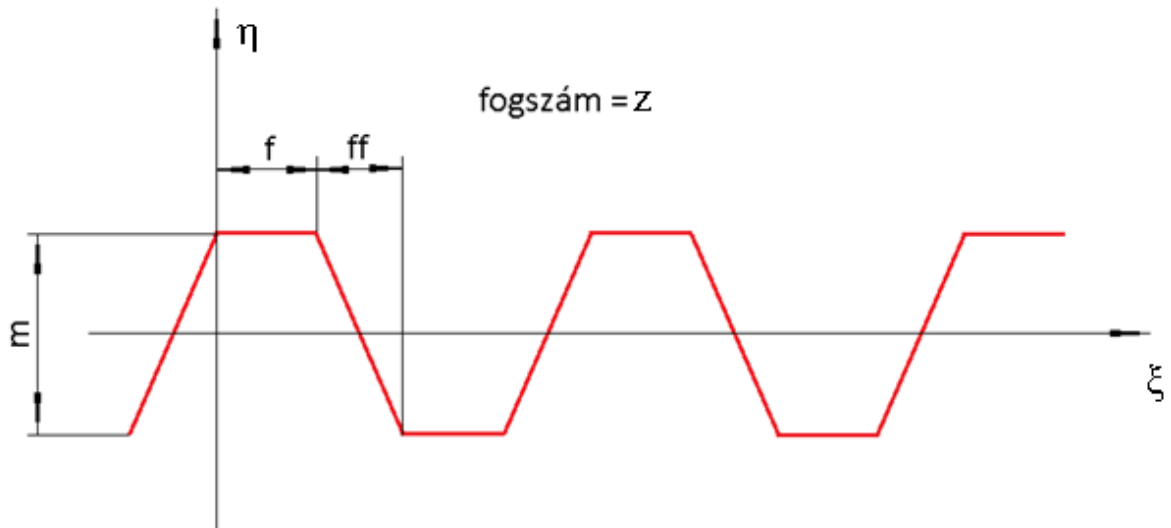
- Trapéz alakú fogasléc profil egyenlete:

A $\frac{1+(-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 4)}}{2} \cdot \frac{1+(-1)^{\text{floor}(\frac{q \cdot z \cdot 4}{2})}}{2}$ szorzó értéke akkor lesz egy, ha a $q \cdot z \cdot 4$ kifejezés páros és a fele is páros, ahol q a 0 és 1 között változó paraméter és z a fogsorszám. Ez minden negyedik egészrész értékre lesz igaz, tehát négy különböző függvény fűzhető össze. Ezzel a módszerrel 2^n különböző egyenlet egyesíthető. Az egyenletekben szereplő mennyiségeket a 19. ábra szemlélteti.

$$f(q) = \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 4)}}{2} \cdot \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(\frac{q \cdot z \cdot 4}{2})}}{2} \cdot f_1 +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 4 + 1)}}{2} \cdot \frac{1 + (-1)^{\text{floor}\left(\frac{q \cdot z \cdot 4}{2} + 1\right)}}{2} \cdot f_2 + \\
 & + \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 4 + 2)}}{2} \cdot \frac{1 + (-1)^{\text{floor}\left(\frac{q \cdot z \cdot 4}{2} + 2\right)}}{2} \cdot f_3 + \\
 & + \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 4 + 3)}}{2} \cdot \frac{1 + (-1)^{\text{floor}\left(\frac{q \cdot z \cdot 4}{2} + 3\right)}}{2} \cdot f_4
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Az aktivált függvények egyenes szakaszok, melyek az $\mathbf{AB}(q) = \begin{bmatrix} A_\xi \\ A_\eta \end{bmatrix} + q \left(\begin{bmatrix} B_\xi \\ B_\eta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_\xi \\ A_\eta \end{bmatrix} \right)$ formula segítségével adható meg.



19. ábra A trapéz profil vázlata és a mennyiségek magyarázata

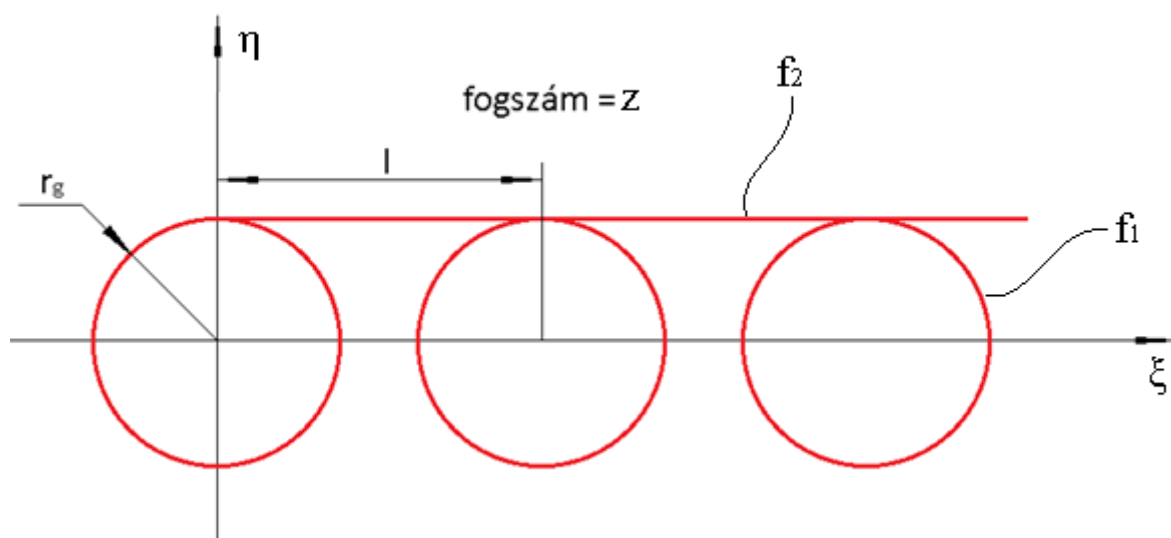
- Görgő profil egyenlete:

A lánckerek származtatásához használt görgőprofil a lánc geometriai jellemzőit hordozza, mint a görgők átmérője és távolsága. E profil két egyenlet összefűzésével analitikusan a következő módon írható le. Feladattól függően a görgők összekötésének módja változhat.

$$f(q) = \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 2)}}{2} \cdot f_1 + \frac{1 + (-1)^{\text{floor}(q \cdot z \cdot 2 + 1)}}{2} \cdot f_2 \tag{6.3}$$

$$f_1 = \begin{bmatrix} r_g \cdot \sin(-2 \cdot \pi \cdot q \cdot z \cdot 2) + l \cdot \text{floor}(q \cdot z) \\ r_g \cdot \cos(-2 \cdot \pi \cdot q \cdot z \cdot 2) \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

$$f_2 = \begin{bmatrix} l \cdot \text{floor}(q \cdot z) + \left(z \cdot q - \text{floor}(z \cdot q) - \frac{1}{2} \right) \cdot l \cdot 2 \\ r_g \end{bmatrix} \tag{6.5}$$



20. ábra A görgőprofil vázlata

6.2 Diszkrét pontok megadása

A diszkrét profil megadásánál más szemléletet kell alkalmazni. Itt ugyanis nem a görbét határozzuk meg, hanem a pontokat, melyeket egyenes szakaszok kötnek össze. Az eredmény koordinátáit vektorokban tároljuk, amely segítségével direkt módon előállíthatjuk a [6.1. fejezetben] leírt fogprofil egyenlet $f_q(q)$ diszkrétizált alakját, a $\mathbf{q}$ vektor segítségével. Ezen módszer segítségével az egyenes szakaszokból felépülő trapéz alakú fogprofil megadása lényegesen egyszerűbb, de az összetett függvényekkel megadott alakok is egyszerűen előállíthatók az egyes függvények diszkrétizált vektorainak egyszerű összefűzésével.

6.3 Fogprofilok beprogramozása

Programnyelvek használatával a fogprofilok megadása jelentősen leegyszerűsödik. Elég egyetlen ismétlődő fog alakját megadni, majd azt egymás után, fogszámszor kiosztani. Ha megadjuk egyetlen fog pontjainak koordinátáit $\mathbf{x}_f$ és $\mathbf{y}_f$ vektorok alakjában, p -t, a periódus hosszát, és n -t, a fogszámot, akkor a fogprofil definiáltuk. Az egyetlen periódus pontjainak koordinátáit az $\mathbf{x}$ és $\mathbf{y}$ vektorokba rendezve elvégezhető a kiosztás az x tengely mentén, az alábbi módon:

$$\mathbf{fp}_x = [\mathbf{x}_f + 0 \cdot P \quad \mathbf{x}_f + 1 \cdot P \quad \dots \quad \mathbf{x}_f + (n-1) \cdot P] \quad (6.6)$$

$$\mathbf{fp}_y = [\mathbf{y}_f \quad \mathbf{y}_f \quad \dots \quad \mathbf{y}_f]. \quad (6.7)$$

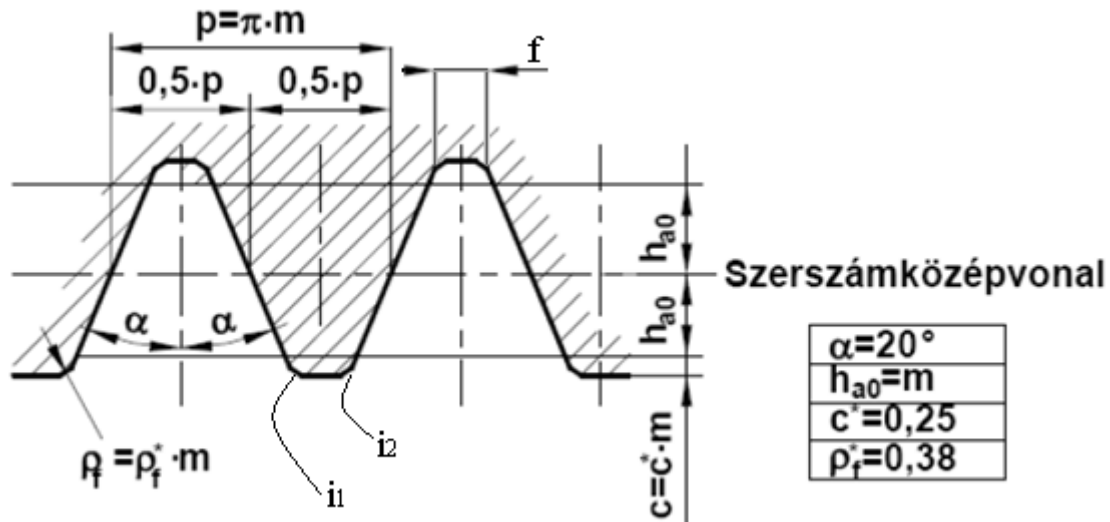
A fenti egyenletben az $\mathbf{fp}_x$ és $\mathbf{fp}_y$ a teljes, n periódus hosszú fogasléc pontjait tartalmazó vektorok.

Az ún. for-ciklus segítségével a kiosztás könnyedén elvégezhető. Az eljárás lehetővé teszi, hogy tetszőlegesen megadott, egyetlen fogból fogaslécet generáljon. Az általunk létrehozott

programban három különböző fogazatot definiáltunk előre, melynek paraméterei utólag is megváltoztathatóak.

6.3.1 Szabványos fogprofil

A szabványos fogprofil analitikus megadása rendkívül hosszú kifejezést eredményezne, mivel hat különböző egyenlettel megadható görbéből tevődik össze (4 egyenes és két körív).



21. ábra Evolvens profilú hengeres kerek „Maag-féle” szerszám alapprofilja [5][8]

Egyetlen periódus (lásd 21. ábra.) megadása viszonylag egyszerű, melyet egy algoritmus segítségével könnyedén kioszthatunk. A profil két alsó lekerekítését adott felbontással adhatjuk meg, így azok egyenes szakaszokból tevődnek össze. Az eredmény koordinátáit mátrixba rendezve írható le egy periódus:

$$M_p = \begin{bmatrix} 0 & f & i_{1x} & i_{2x} \\ h_{a0} + C & h_{a0} + C & i_{1y} & i_{2y} \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Az i_{1x} , i_{1y} , i_{2x} és i_{2y} vektorok n (felbontás) eleműek. Az elemeket a $\mathbf{q}$ vektor segítségével hozzuk létre, melyek szintén n eleműek és 0-tól 1-ig egyenletesen változnak.

$$\mathbf{q} = [q(1) \quad q(2) \quad \dots q(i) \quad \dots q(n)] \quad (6.9)$$

$$q(i) = \frac{i}{n} \quad (6.10)$$

$$i_{x1} = [i_{x1}(1) \quad i_{x1}(2) \quad \dots i_{x1}(i) \quad \dots i_{x1}(n)] \quad (6.11)$$

A köríveket a (6.12-15) egyenletekkel határozzuk meg.

$$i_{1x}(i) = \rho_f \cdot \cos \left(\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot q(i) - \pi + \alpha \right) + \frac{P}{2} + l \quad (6.12)$$

$$i_{1y}(i) = \rho_f \cdot \sin \left(\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot q(i) - \pi + \alpha \right) - ha_0 - C + \rho \quad (6.13)$$

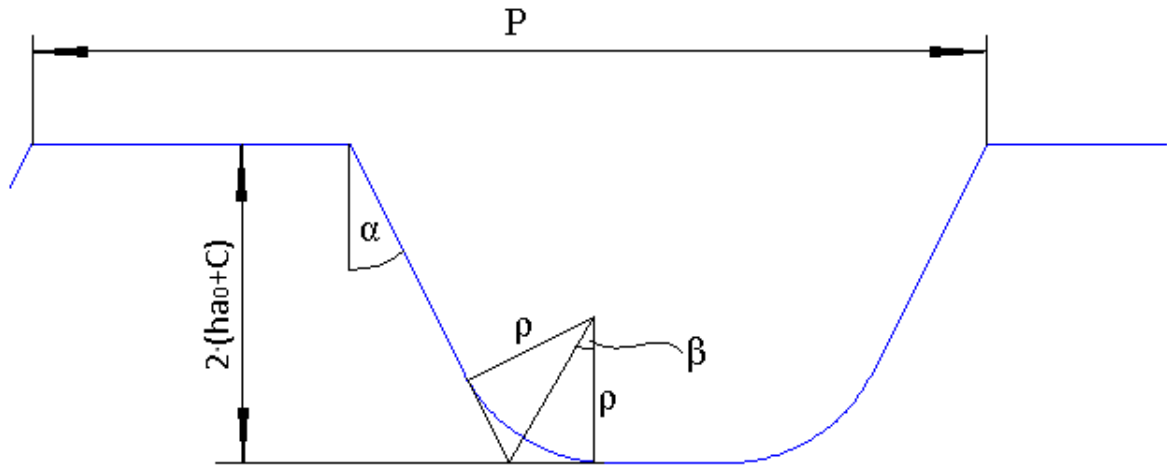
$$i_{2x}(i) = \rho_f \cdot \cos \left(\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot q(i) - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{P}{2} + f - l \quad (6.14)$$

$$i_{2y}(i) = \rho_f \cdot \sin \left(\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot q(i) - \frac{\pi}{2} \right) - ha_0 - C + \rho \quad (6.15)$$

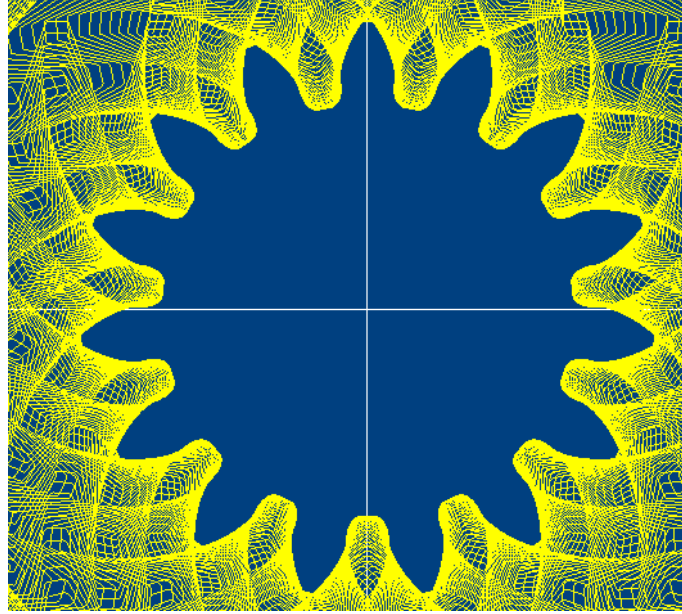
$$f = \frac{P}{2} - 2 \cdot (ha_0 + C) \cdot \tan(\alpha) \quad (6.16)$$

$$l = \rho \cdot \tan(\beta) \quad (6.17)$$

$$\beta = \frac{\frac{\pi}{2} - \alpha}{2} \quad (6.18)$$



22. ábra A fogprofil felírásához használt vázlat



23. ábra Szabványos profil legördülése körrel

6.3.2 Szinuszos profil

A szinuszos fogprofil meghatározása mind analitikus, mind diszkrét felírása egyszerű. Hasonlóan az előzőekhez itt is egy n elemű $\mathbf{q}$ vektor segítségével írhatjuk fel az egy periódus koordinátáit tartalmazó vektorokat ($\mathbf{x}_p$ és $\mathbf{y}_p$).

$$\mathbf{q} = [q(1) \quad q(2) \quad \dots q(i) \quad \dots q(n)] \quad (6.19)$$

$$q(i) = \frac{i}{n} \quad (6.20)$$

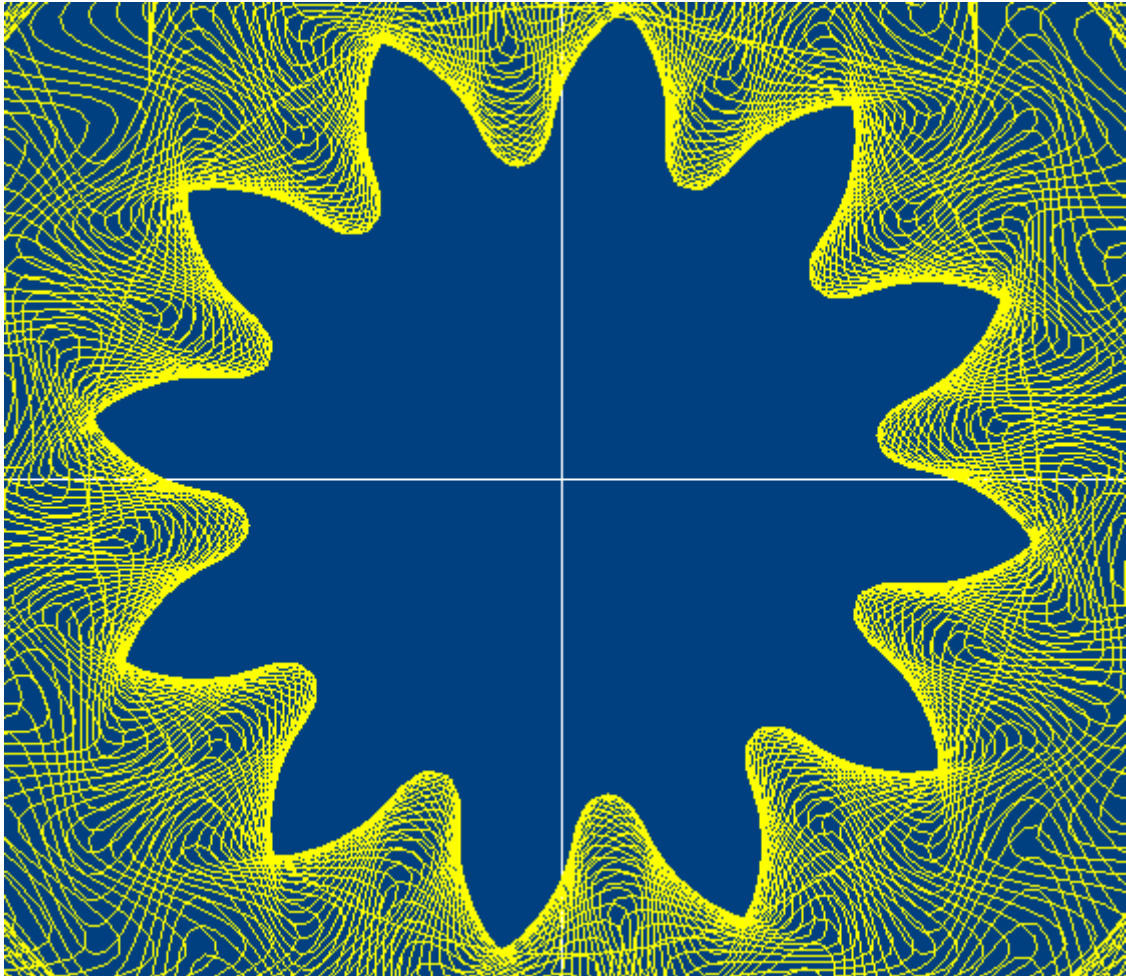
$$\mathbf{x}_p = [x_p(1) \quad x_p(2) \quad \dots x_p(i) \quad \dots x_p(n)] \quad (6.21)$$

$$\mathbf{y}_p = [y_p(1) \quad y_p(2) \quad \dots y_p(i) \quad \dots y_p(n)] \quad (6.22)$$

$$x_p(i) = l \cdot q(i) \quad (6.23)$$

$$y_p(i) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot q(i)) \quad (6.24)$$

A fenti (6.19-24) egyenletekben az l a hullámhossz és A az amplitúdó.



24. ábra Szinusz-profil legördítése körről

6.3.3 Lánckerekek

Az egy periódus pontjait tartalmazó vektorok elemeit az alábbi egyenletekkel adhatjuk meg.

$$x_l(i) = r \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot q(i)) \quad (6.25)$$

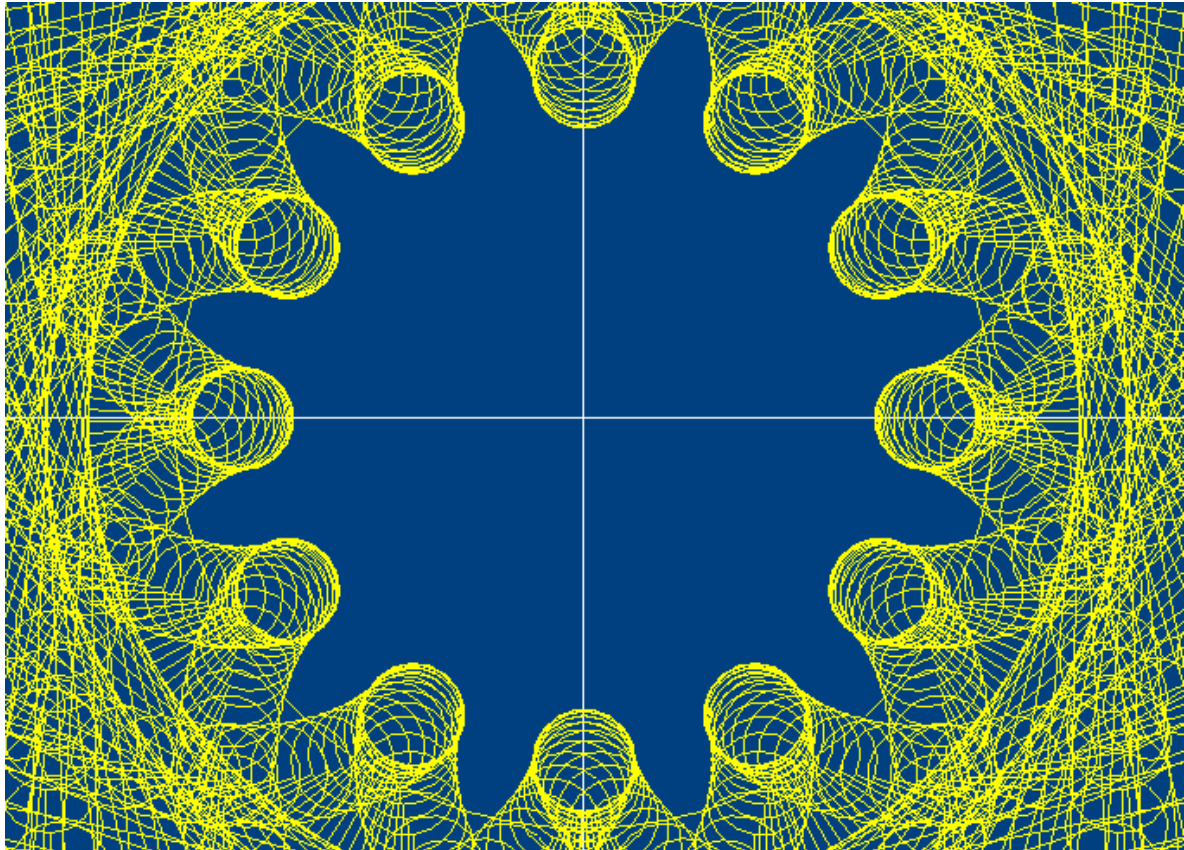
$$y_l(i) = r \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot q(i)) \quad (6.26)$$

$$\mathbf{x}_p = [\mathbf{x}_l \quad 0] \quad (6.27)$$

$$\mathbf{y}_p = [\mathbf{y}_l \quad k] \quad (6.28)$$

Az $\mathbf{x}_l$, $\mathbf{y}_l$ vektorok tartalmazzák a görgők pontjait és a k magassággal állíthatjuk be, hogy a görgők milyen magasságú vízszintes egyenessel legyenek összekötve.

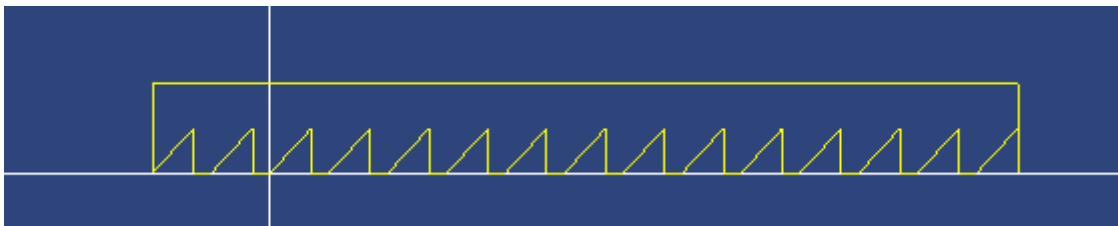
A $\mathbf{q}$ vektor képzése a fentiekhez hasonló módon történik ($\mathbf{q}$ egy n elemű vektor, melynek elemei 0 és 1 között egyenletesen változnak.)



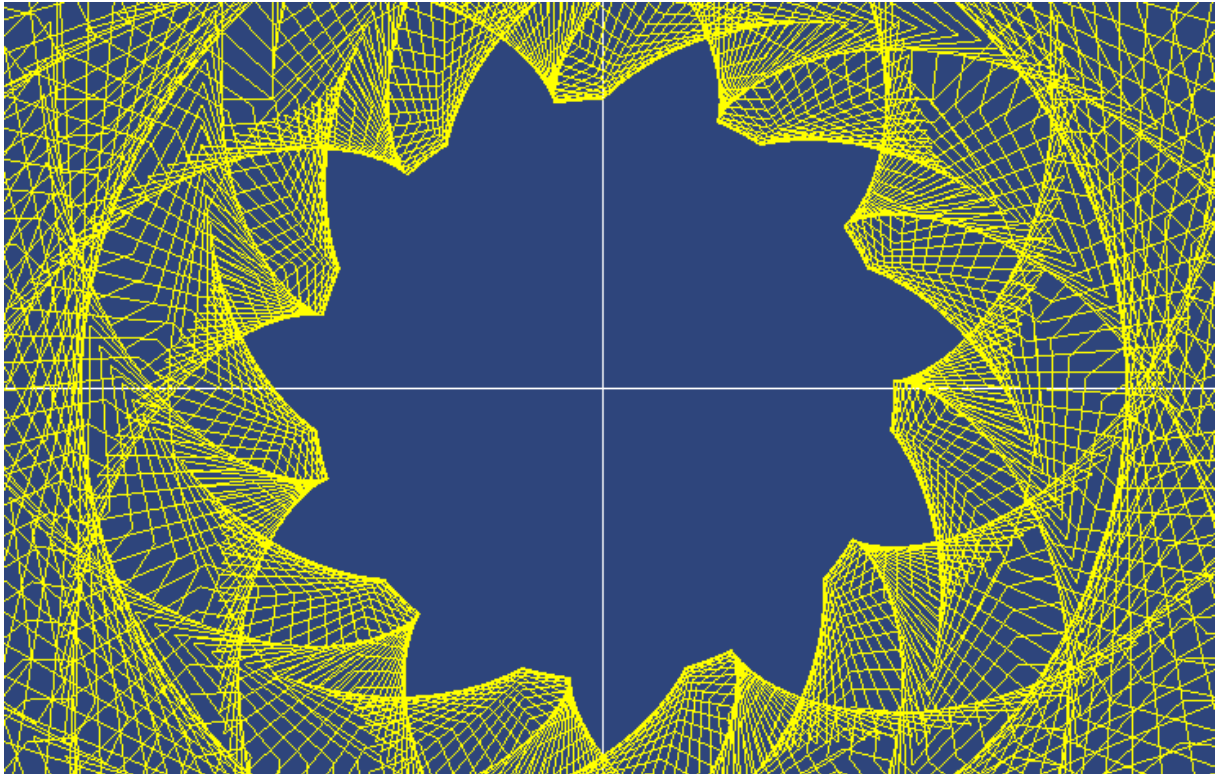
25. ábra Lánckerék-profil legörgetése körről

6.3.4 A pontok manuális beadása

Ez az eljárás egy beadott profilt oszt ki fogszámszor, periódusnyi távolságban. Az egyetlen ismétlődő elem pontjainak megadása tetszőleges módszerrel megtörténhet. Az módszert nem befolyásolja a periódus pontjainak a száma, sem a helyzete, ezért azok koordinátái akár manuálisan is megadhatóak, ami tetszőleges fogprofil generálását teszi lehetővé.



26. ábra Manuálisan megadott fűrész alakú fogprofil



27. ábra Manuálisan megadott fűrész fogprofil legördülése körről

7 Számítások Matlab-ban

A Matlab szoftver alkalmas numerikus problémák megoldására, így a fent leírt módon beprogramozhatóak a számítás lépései. A legördülés transzformációit, a numerikus megoldásnak megfelelően diszkrét lépésekben hajtjuk végre. A következő probléma a legördülés eredményeként szolgáló kontúrvonal meghatározása, melyre több módszert kipróbáltunk.

7.1 Boolean műveletek

A kontúrgörbe meghatározásának egyik módja a Boolean halmaz műveletek alkalmazása, amely során egy, a leendő fogaskeréknél nagyobb kiterjedésű körből indulunk ki. A ξ - η koordinátarendszer transzformációja a numerikus módszer alkalmazása miatt n -szer hajtódik végre a választott felbontás alapján. Az eljárás során a minden egyes transzformációs lépés után el kell végezni a megfelelő kivonási műveletet a kör és a ξ - η -ban található fogazó síkidom között. Az n számú kivonás után létrejön a kontúrpoligon, ahogy az 28. ábra mutatja.

Közelről megvizsgálva az eredményül kapott kontúrpoligont, láthatjuk, hogy a szakaszok hossza jelentősen eltérhet. Emellett észrevehetjük, hogy a fogak oldala „lépcsős” jellegű lesz. A felbontás növelésével e lépcsősség megmarad, viszont a mérete csökkenthető. Ekkor a pontok száma radikálisan megnövekedhet, és rendkívül kicsi szakaszok keletkezhetnek. Ezen felül a felbontás növelésével a számítási idő is drasztikusan megnő. Ahhoz, hogy az

eredményekből CNC programot lehessen generálni, mind a lépcsős jelleget, mind a túl rövid szakaszokat meg kell szüntetni, amit a pontok szűrésével tehetünk meg.

A lépcsős jelleg megszüntetésének egyik módja a paraméterezés felcserélése. Jelenleg a q -val paraméterezett fogprofil vonjuk ki lépésenként egy körlepből, a p -vel paraméterezett transzformációs görbe mentén [4.2. fejezet]. Ha a kivonás után újra elvégezzük a műveletet, úgy, hogy a p -vel paraméterezett görbével határolt felületeket vonjuk ki a fogprofil-görbéje (q) mentén, akkor a lépcsős jelleg megszüntethető.



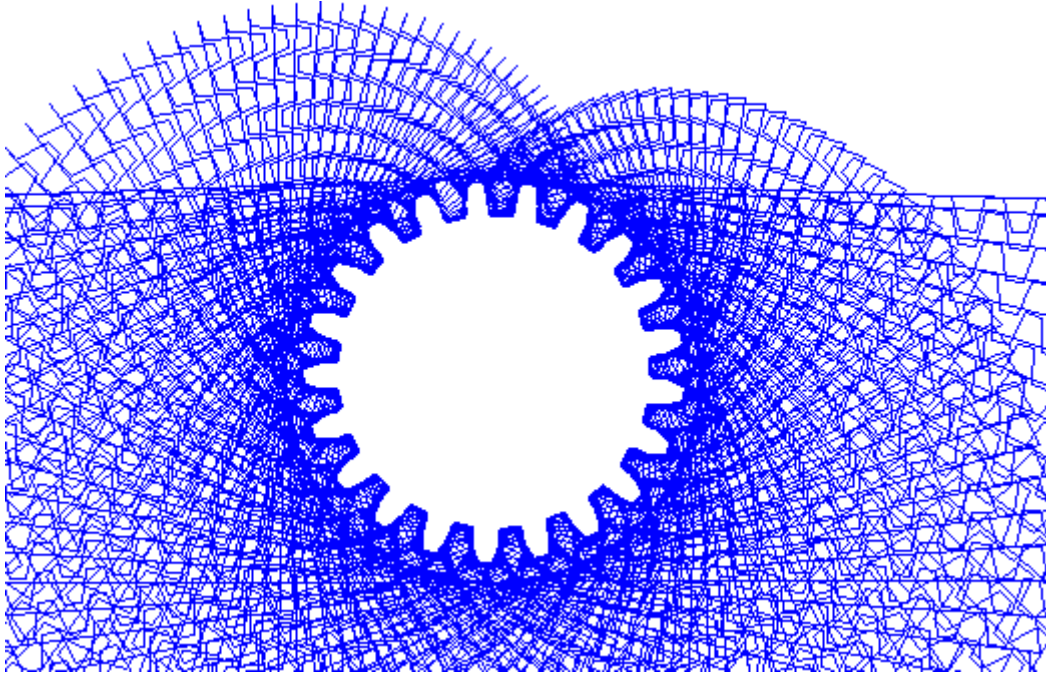
28. ábra A fogazat lépcsős jellege

8 Kontúrkereső algoritmus

A kontúrvonal meghatározására alkalmazott Boolean műveletes módszer igen időigényesnek bizonyult, emellett a végeredményeken sokszor szűrési munkákat kellett végrehajtani. A Matlab-ban megtalálható Boolean operátorok tetszőleges művelet (unió, metszet, stb.) esetén is lehet használni, amelyek kezelik a különleges eseteket is (több kiadódó kontúr, üres halmazok, stb.). Ez az általános megoldás számunkra felesleges lépéseket is tartalmaz, így egy saját célirányos kód kidolgozásával a számítás menetét felgyorsíthatjuk. Kidolgoztunk ezért egy célszoftvert, melyet kifejezetten ennek a problémának a megoldására szántunk. A program működési elve alapvetően a végleges kontúrpoligon következő pontjának a megtalálásán alapszik.

A fogaskerek generálásánál eredményül számos egyenes szakaszból álló vonal-láncot kapunk, melyeknek a belső kontúrját kell meghatározni (29. ábra). Az előző, halmazműveletes eljárással ellentétben itt nem a transzformált fogprofilok egymással alkotott metszéspontjait határozzuk meg, hanem egy ismert pontból elindulva, letapogatjuk a belső kontúr, úgy, hogy a következő pont mindig az előző ismert ponttól nagyjából azonos

távolságra legyen. Ezen letapogatás során egyenesek metszésének meghatározásával keressük meg az új pontot.



29. ábra Részlet az összefüggő vonalhalmazból

8.1 Metszéspont létezésének feltétele, két szakasz esetén

Az új pontok keresését ún. keresőszakaszok segítségével végezzük. Az eljáráshoz tudnunk kell, hogy két, végpontjaival megadott szakasz rendelkezik-e metszésponttal, és ha igen, akkor annak koordinátáit. Legyen az **AB** és **CD** szakasz koordinátája ismert. A p_1 és p_2 futókoordináta segítségével felírható a két egyenes paraméteres egyenlete az alábbi módon:

$$\mathbf{AB} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} + p_1 \left(\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \right) \quad (8.1)$$

$$\mathbf{CD} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} + p_2 \left(\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \right) \quad (8.2)$$

Az egyenes szakaszok pontjait 0 és 1 közé eső paraméterek behelyettesítésével kaphatjuk meg. A metszéspont számításához egyenlővé téve a két szakasz egyenletét, kifejezhetjük a két ismeretlent, p_1 és p_2 paramétert.

$$p_1 = \frac{A_y - C_y + \frac{D_y - C_y}{D_x - C_x} \cdot (C_x - A_x)}{B_y - A_y - \frac{D_y - C_y}{D_x - C_x} \cdot (B_x - A_x)} \quad (8.3)$$

$$p_2 = \frac{A_y - C_y + \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \cdot (C_x - A_x)}{D_y - C_y - \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \cdot (D_x - C_x)} \quad (8.4)$$

Ha kiszámoljuk ezeket az értékeket bármely **AB** és **CD** szakaszra, leellenőrizhetjük, hogy van-e valódi metszéspont, mivel az csak $0 \leq p_1 \leq 1$ és $0 \leq p_2 \leq 1$ esetén létezik.

Ha az **AB** vagy **CD** szakasz valamelyike függőleges, tehát $A_x=B_x$, vagy $C_x=D_x$, akkor a nullával való osztások miatt 0/0 (végtelen/végtelen) típusú egyenleteket kapunk. Hogy ezekkel a speciális esetekkel is tudjunk számolni, újabb egyenleteket kell felírni rájuk.

Ha **AB** függőleges, de **CD** nem, akkor a p_2 paraméter számítása az alábbiak szerint módosul.

$$\mathbf{AB} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} + p_1 \left(\begin{bmatrix} 0 \\ B_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ A_y \end{bmatrix} \right) \quad (8.5)$$

$$\mathbf{CD} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} + p_2 \left(\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \right) \quad (8.6)$$

$$p_2 = \frac{A_x - C_x}{D_x - C_x} \quad (8.7)$$

Ha **CD** függőleges, de **AB** nem, akkor pedig a p_1 paraméter számítása változik:

$$\mathbf{CD} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} + p_2 \left(\begin{bmatrix} 0 \\ D_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ C_y \end{bmatrix} \right) \quad (8.8)$$

$$\mathbf{AB} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} + p_1 \left(\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \right) \quad (8.9)$$

$$p_1 = \frac{C_x - D_x}{B_x - D_x} \quad (8.10)$$

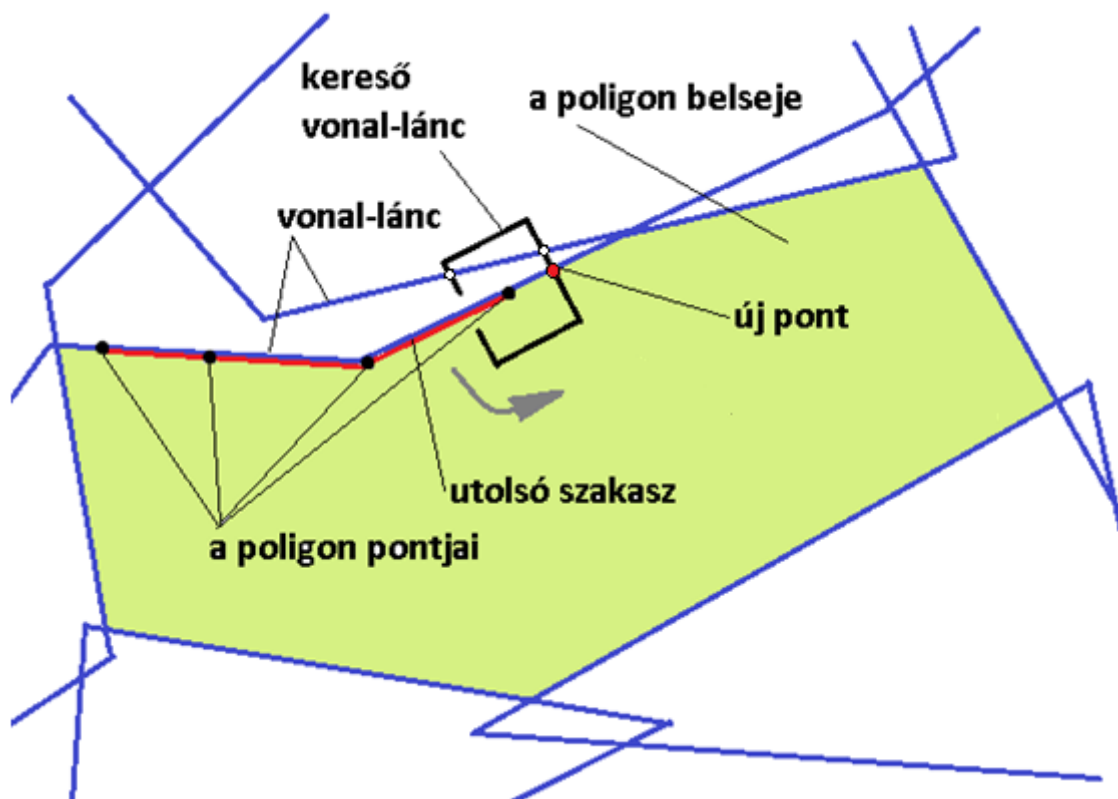
8.2 A kontúr-poligon első pontjának keresése

A fentebb leírt módon megvizsgálhatjuk, hogy két tetszőleges egyenes szakasznak létezik-e metszéspontja. A kontúrpoligon első pontjának meghatározásához a belsejéből egy keresőszakaszt kell indítani, ami biztosan kivezet belőle. Egy ilyen szakasz két végpontja lehet például a (0,0) és a (0, $y_{\max}$), ahol az $y_{\max}$ a vonallánc pontjainak legnagyobb értékű Y koordinátája.

A következő lépés az, hogy ezzel a szakasszal vizsgáljuk a vonallánc összes szakaszát metszésre. A próbaszakasz metszéspontjait a 0 és 1 közé eső p_1 paraméterek tárolják, melyek közül nekünk a legkisebb p_1 értékre van szükségünk. Ezt az értéket visszaírva a próbaszakasz egyenletébe visszakapjuk az első metszéspont koordinátáit.

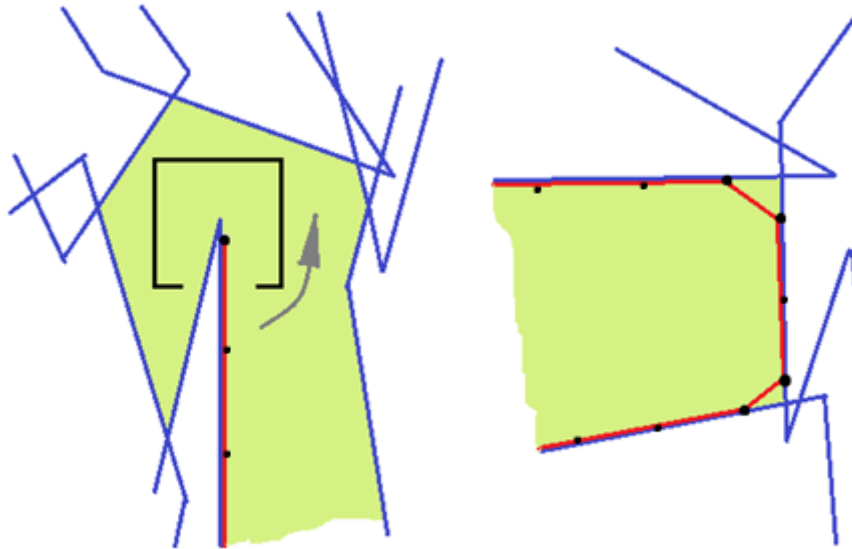
8.3 További pontok keresése

A poligon többi pontját egy kereső szakaszból álló, hurokszerű vonallánc segítségével határoztuk meg (lásd 30. ábra). Az eljárás lényege, hogy megszabunk egy körbejárási irányt. Ha az óra mutató járásával egyező irányban haladunk végig a kontúron, akkor az utolsó ismert szakasz bal oldala a poligonon kívülre, a jobb pedig azon belülre esik. A következő pont keresése során egyenes szakaszból álló vonal-láncot indítunk a poligon belsejéből a külsejébe az 30. ábra látható módon. A vonal-lánc több szakaszból tevődik össze, melyeken a körbejárási iránynak megfelelően, egyenként elvégezzük a metszéspontkeresést. A kereső vonal-lánc szakaszait úgy paraméterezzük, hogy a legkisebb paraméterrel rendelkező metszéspont lesz a keresett pont, az első metszett szakaszon.



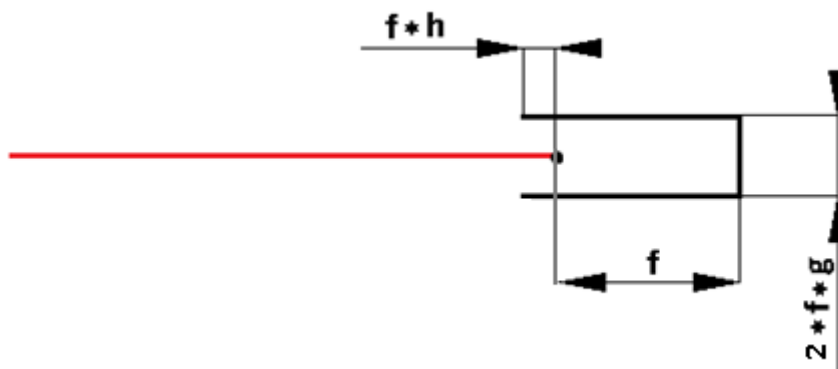
30. ábra A kontúrkeresés elvi vázlata

Ennek az eljárásnak a hátránya, hogy a kereső vonal-lánc bizonyos esetekben nem találja meg a megfelelő következő metszéspontot. Ez akkor fordulhat elő, ha a kontúrvonal éles, 180° -hoz közeli fordulatot vesz. További hátrányos tulajdonság, hogy az éles sarkok detektálására alkalmatlan, levágja azokat. Ezeknek a hibáknak tipikus eseteit láthatjuk a 31. ábraán. Fontos megjegyezni, hogy egy gyakorlatban is használható fogprofil esetén ezek a hibák általában nem fordulnak elő.



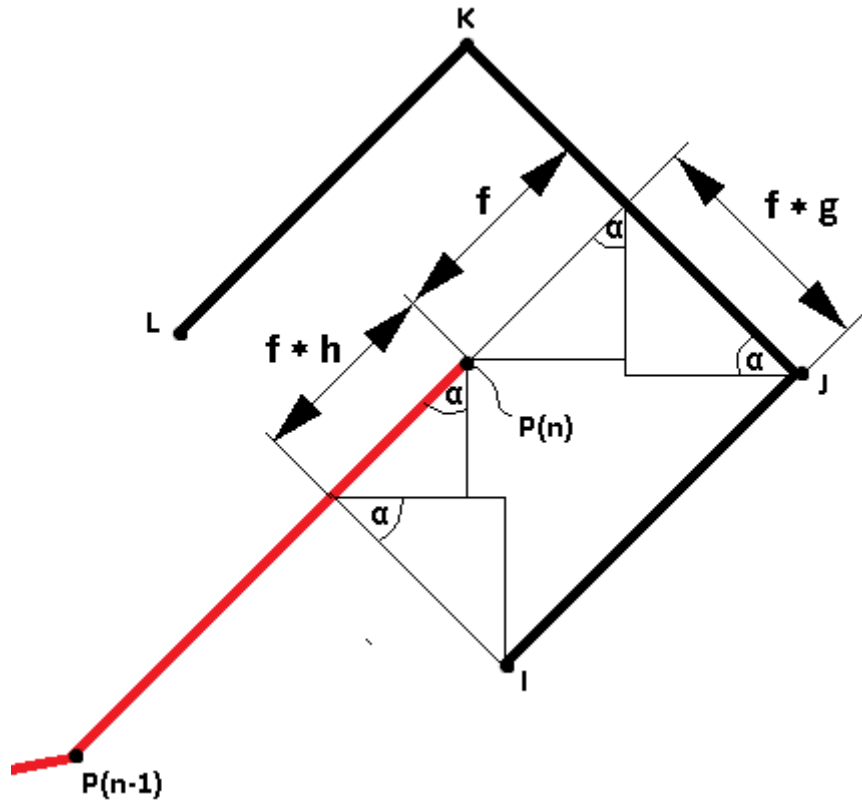
31. ábra A hátrányos tulajdonságok szemléltetése

A kereső vonal-lánc formája jelentős mértékben befolyásolhatja az eredmény minőségét és helyességét. A cél egy olyan forma definiálása volt, amely nagy biztonsággal megtalálja a következő pontot a kontúron és a sarkokat kevésbé vágja le. Előnyös minél kevesebb szakaszból építeni e vonal-láncot, mivel az csökkentheti a számítás időtartamát. Számos forma kipróbálása után egy három szakaszból álló, lapított téglalap alakú formára esett a választás (32. ábra). A lapított forma lehetővé teszi, hogy nagyobb szögváltozás esetén az új pontot közelebb vegye fel, így csökkentve a sarkok levágását valamint így az egyenes szakaszokra kevesebb pont esik.



32. ábra A kereső vonallánc vázlata

A 32. ábraán látható f érték a jellemző felbontás, amely a programban a felhasználó igényei szerint tetszőlegesen állítható. A g és h szorzókkal állítható be az ellapítás és a hátrább tolás mértéke. A tapasztalatok azt mutatták, hogy $g=0,2$ és $h=0,1$ körüli értékekkel kapunk megfelelő eredményeket. Az f felbontást az adott geometriának, a gyártási eljárásnak és az elvárt pontosságnak megfelelően kell megadni. A kereső vonal-lánc pontjainak a számításához a 33. ábraán látható vázlatot alkalmaztuk:



33. ábra Keresőnégyzőg pontjainak a számítása

Az α a poligon utolsó szakaszának az állás-szöge, mely az $\alpha = \text{atan}\left(\frac{P_y(n) - P_y(n-1)}{P_x(n) - P_x(n-1)}\right)$ összefüggéssel számolható, ahol a $P(n) = \begin{bmatrix} P_x(n) \\ P_y(n) \end{bmatrix}$ a poligon utolsó (n -edik) ismert pontjának koordinátái. A fenti vázlatot alkalmazva az I, J, K és L pontok koordinátái az alábbi összefüggés szerint alakulnak.

$$I = \begin{bmatrix} P_x(n) - g \cdot f \cdot \sin(\alpha) - h \cdot f \cdot \cos(\alpha) \\ P_y(n) - g \cdot f \cdot \cos(\alpha) + h \cdot f \cdot \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

$$J = \begin{bmatrix} P_x(n) - g \cdot f \cdot \sin(\alpha) + f \cdot \cos(\alpha) \\ P_y(n) - g \cdot f \cdot \cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

$$K = \begin{bmatrix} P_x(n) + g \cdot f \cdot \sin(\alpha) + f \cdot \cos(\alpha) \\ P_y(n) + g \cdot f \cdot \cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

$$L = \begin{bmatrix} P_x(n) + g \cdot f \cdot \sin(\alpha) - h \cdot f \cdot \cos(\alpha) \\ P_y(n) + g \cdot f \cdot \cos(\alpha) + h \cdot f \cdot \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (8.14)$$

A koordináták ismeretében a metszéspontok a fentebb [8.1. fejezet] ismertett módszerrel határozhatóak meg.

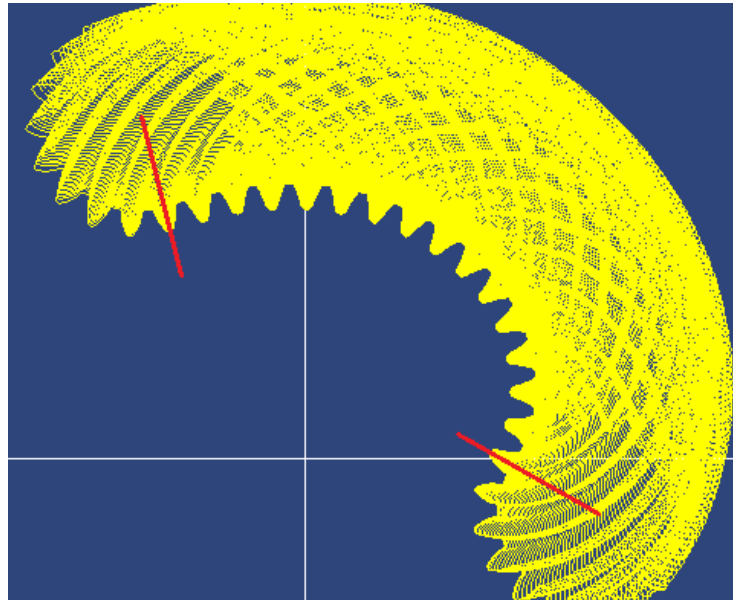
Hogy meggyorsítsuk a számítási folyamatot, az új metszéspontokat az előzőek közelében keressük. Ezt egy kör alakú tartománnyal végezzük, melynek sugarát úgy kell választani, hogy a lehető legkisebb legyen, de biztosan meghaladja, a centrum és a legközelebbi, pontok

távolságát. A vonalláncoknak csak azon szakaszain kell elvégezni a metszéspontkeresést (a kereső vonal-lánc szakaszaival), amelynek legalább az egyik végpontja ebbe a tartományba esik. Ezen szakaszok darabszáma általában jóval kisebb a vonallánc összes szakaszának darabszámánál. A vizsgálatához használt feltétel:

$$R > |\mathbf{V} - \mathbf{P}(n)|, \text{ vagy } R^2 > (V_X(i) - P_X(n))^2 + (V_Y(i) - P_Y(n))^2, \quad (8.15)$$

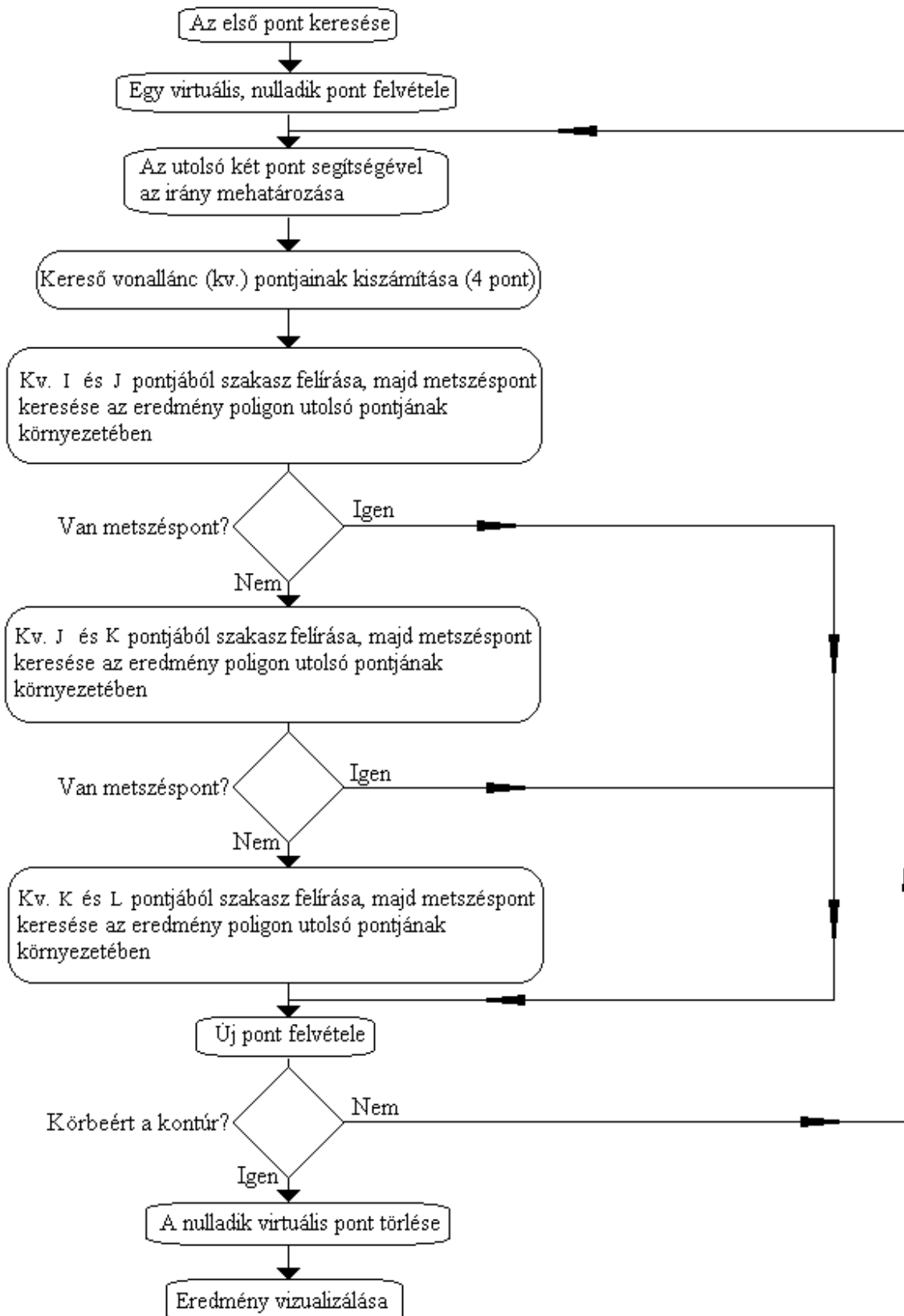
ahol R a kör-tartomány sugara, $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_X(i) \\ V_Y(i) \end{bmatrix}$ a vonallánc i -edik elemének a koordinátái és $\mathbf{P}(n) = \begin{bmatrix} P_X(n) \\ P_Y(n) \end{bmatrix}$ a poligon utolsó meglévő pontjának koordinátái. A számításnál csak azokat az i indexű elemeket kell vizsgálni, amelyekre a fenti feltétel teljesül.

Az új pont keresésének ciklusát addig kell ismételgetni, amíg be nem zárul a poligon, tehát amíg az új pont nem kerül a kezdeti pont adott sugarú körébe. E kör alakú tartomány sugara az f felbontás-tényezőnél valamivel nagyobb értékű. A tartományba kerülés véget vet a ciklusnak, majd lezárul a poligon, az első pont újbóli felvételével. Nem zárt főprofil-görbe esetén kicsit máképp kell eljárunk, ugyanis akkor nem a teljes kontúr meghatározása a cél. A legegyszerűbben úgy oldható meg a probléma, hogy megadjuk a kontúrpoligon kezdeti és végpontját, majd a kontúrkeresést ezek között végezzük. Ezek a pontok könnyen megadhatóak a főprofil-görbe kezdeti és végpontbeli normálisaival, ahogy a 34. ábra szemlélteti.



34. ábra Főprofil-görbe kezdő- és végpontbeli normálisai

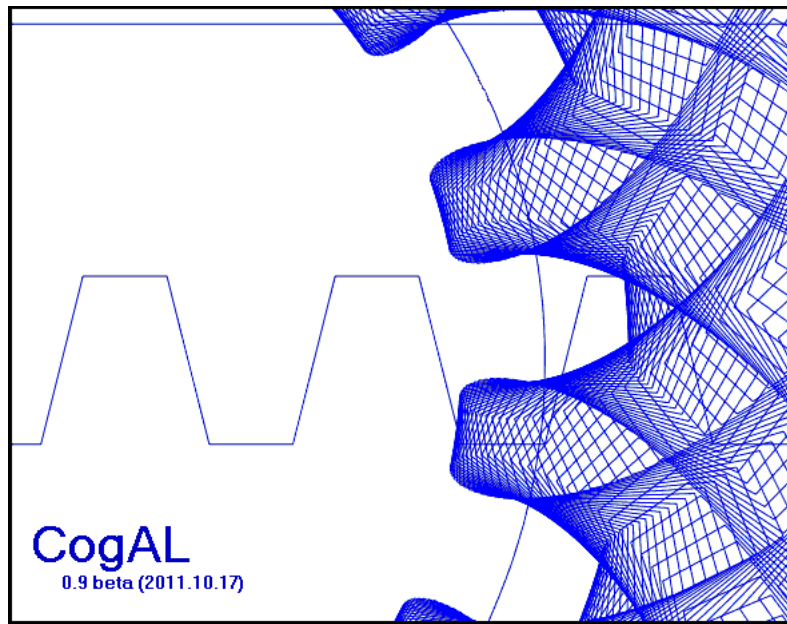
Olyan kontúr esetén, ahol igen hegyes, tűszerű alakzatok jelennek meg, a keresőalgorithmus a hiányosságaiból kifolyólag megakadhat. A program a fogaskerék-kontúrok meghatározására készült, ahol az eddig vizsgált esetekben mindig alkalmasnak bizonyult. A keresőalgorithmus folyamatát a 35. ábra mutatja be.



35. ábra Folyamatábra

9 Átültetés C#-be

A [4-8. fejezetekben] részletezett számítások Matlab-ban megírt programjait [ld. Melléklet] a kényelmesebb kezelhetőség és a szélesebb körű terjeszthetőség érdekében C# programnyelvre fordítottuk át. Célunk egy olyan alkalmazás létrehozása volt, mellyel gyorsan, kényelmesen, felhasználói ismeretekkel lehessen köralakú, vagy attól eltérő geometriájú fogaskerék és fogasléc geometriát létrehozni.



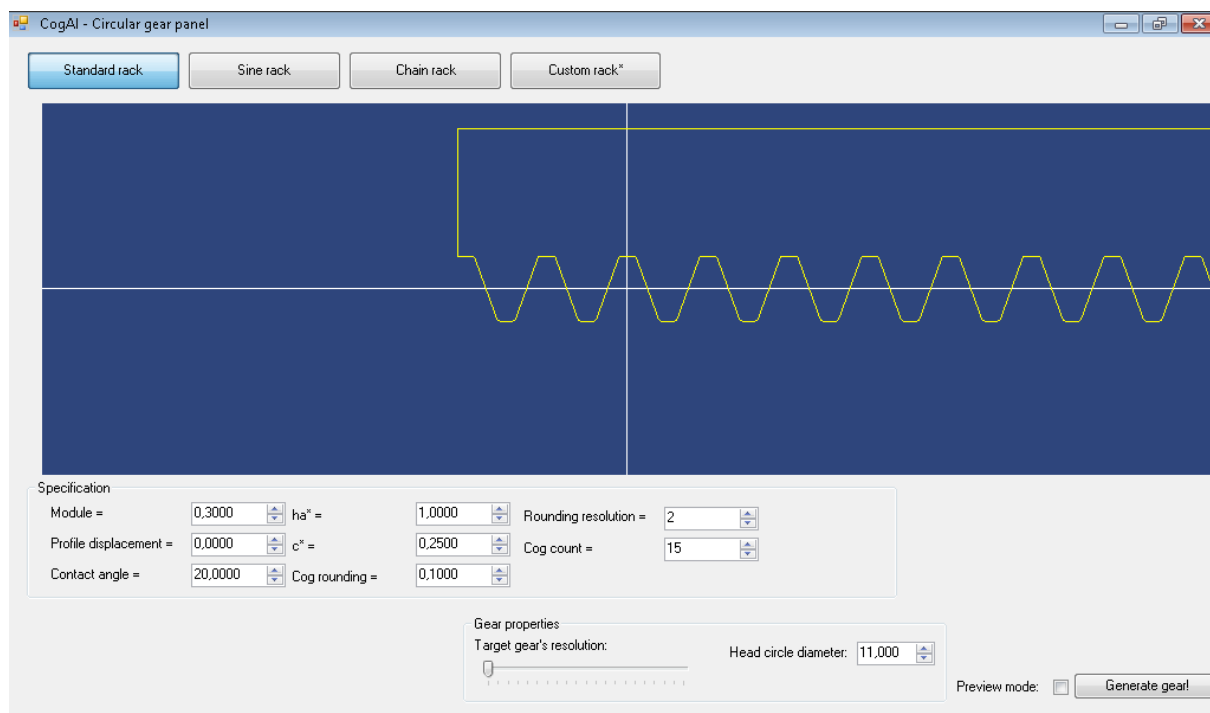
36. ábra A CogAL program bejelentkező ábrája

9.1 A program ismertetése

A program a CogAL nevet kapta, mely a „cogwheelgenerator algorithm” szavak összevonásából keletkezett. Alapvetően grafikus tervezői felületet szántunk a szoftvernek. Fontosnak tartottuk a részeredmények azonnali kirajzolását, a lehetségesen fellépő hibák felismerése érdekében. Az eredmények megjelenítését próbáltuk a lehető legkényelmesebb módon megvalósítani, melyhez hozzátartozik a „pan” funkció (az ábra egérrel tologatható) és az egér görgőjével vezérelhető zoom. A különböző változó mennyiségek megadását függvényekkel tehetjük meg, melyhez egy igen összetett egyenletfelismerő algoritmus megalkotása kellett. A megírásához a lengyel-formulát használtuk. [6] A program részletes bemutatását a CD mellékleten is megtalálható [ld. Melléklet] használati útmutató tartalmazza.

9.1.1 Kör alakú fogaskerekek generálása

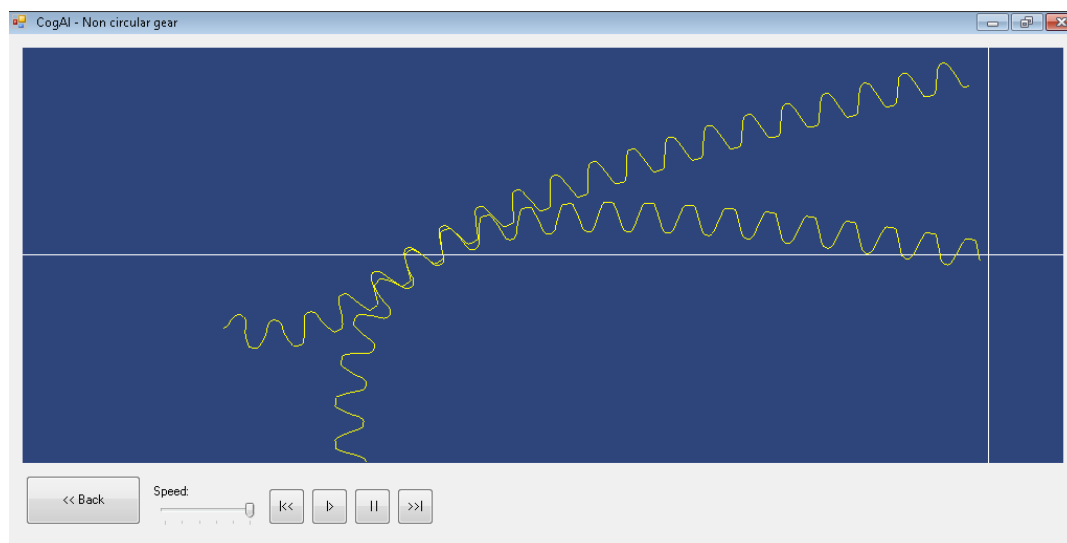
A kör alakú, szabványos profilú fogaskerekek esetében a tervezőfelületen a fogazógépbe beadandó adatokat kell bevinni. Ezen modul felfogható úgy is, mint egy virtuális fogazógép. A trapézon alapuló fogprofil mellett, a beépített funkciókkal lehetséges még szinuszos profil, görgős lánc profil (lánckerekekhez) és egyénileg meghatározott profil megadása is.



37. ábra A CogAL program hengeres fogaskerék generáló modulja

9.1.2 Körtől eltérő, állandó tengelytávolságú fogaskerékpár generálása

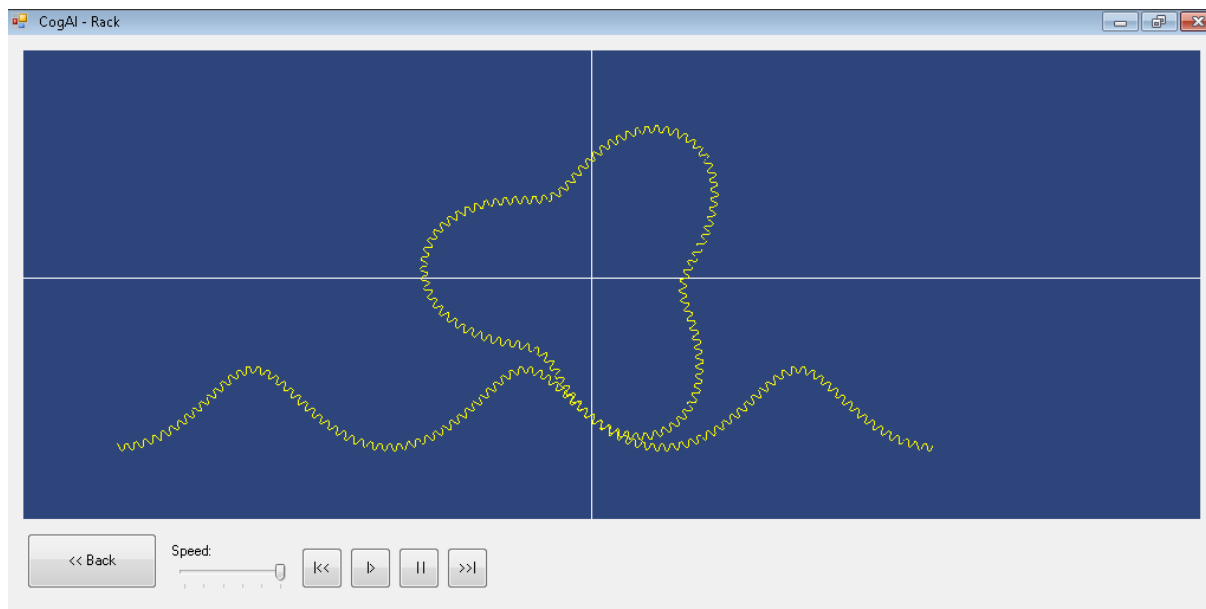
Ezen általános geometriájú fogaskerekek számításánál több lépést kell megtenni, az alábbi sorrendben: Az első lépés a gördülő görbék meghatározása, melyhez a tengelytávolság szükséges, valamint a kerekek szöghelyzetei (például a második kerék szöghelyzete az első szöghelyzetének függvényében). A második teendő a fogprofil meghatározása. Választhatunk itt is szabványos profilt, szinuszos profilt, vagy egyénileg meghatározott profilt. A megadás után a program generál egy szerszámkeréket, melyet végiggördít a befogazandó görbéken. Az ezt követő utolsó művelet a kontúrkereső algoritmus elindítása. A geometria legenerálása után a program lehetőséget nyújt a kész kerekek összegördítésére, amelyel ellenőrizhetjük az eredményt.



38. ábra A CogAL program megjelenítő modulja

9.1.3 Általános geometriájú fogaskerék-fogasléc kapcsolat generálása

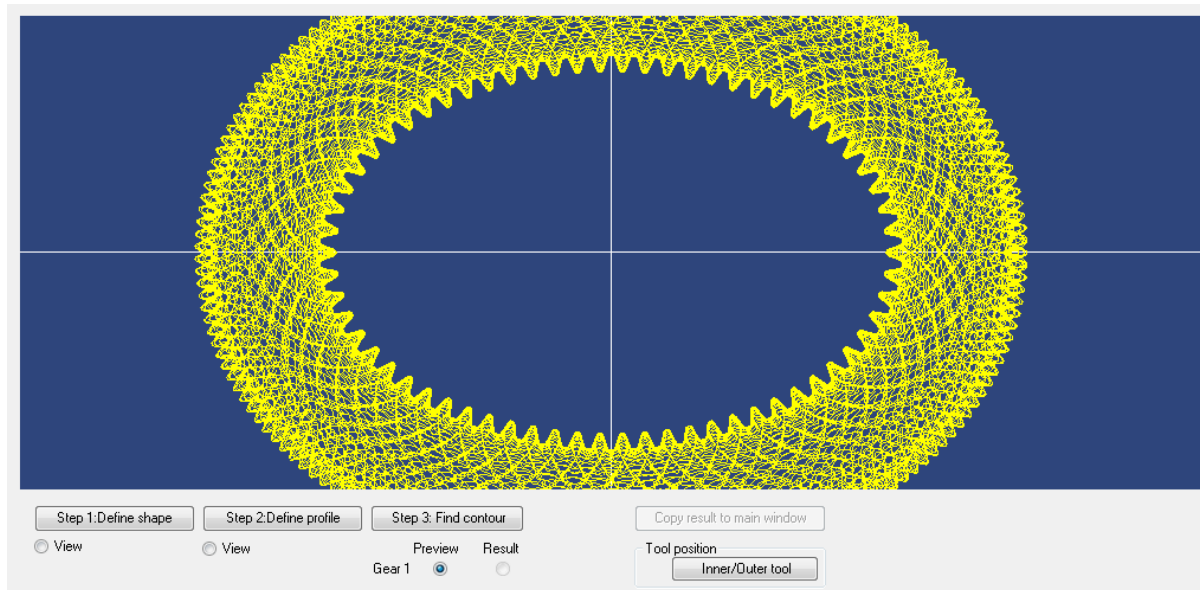
E modul működése és folyamata sokban hasonlít az előbb ismertetett nem kör alakú kerek generálásához. Lényeges különbség a felhasználói felületen a gördülő görbék megadásánál található, ahol a fogasléc helyzetét kell megadni a fogaskerék szöghelyzetének függvényében. Itt az áttételfüggvény hossz mértékegységgel rendelkezik [5.2. fejezet] és a tengelytávot nem kell megadni (mivel az minden esetben végtelen lesz).



39. ábra A CogAL program megjelenítő modulja

9.1.4 Megadott görbe befogazása

Ezzel a funkcióval tetszőlegesen megadott görbe fogazható be szabványos, szinuszos, görgős (lánc), vagy egyénileg megadott fogprofilal. A görbét vagy két parametrikus egyenlettel adhatjuk meg, vagy a koordinátáit egy CSV file segítségével.



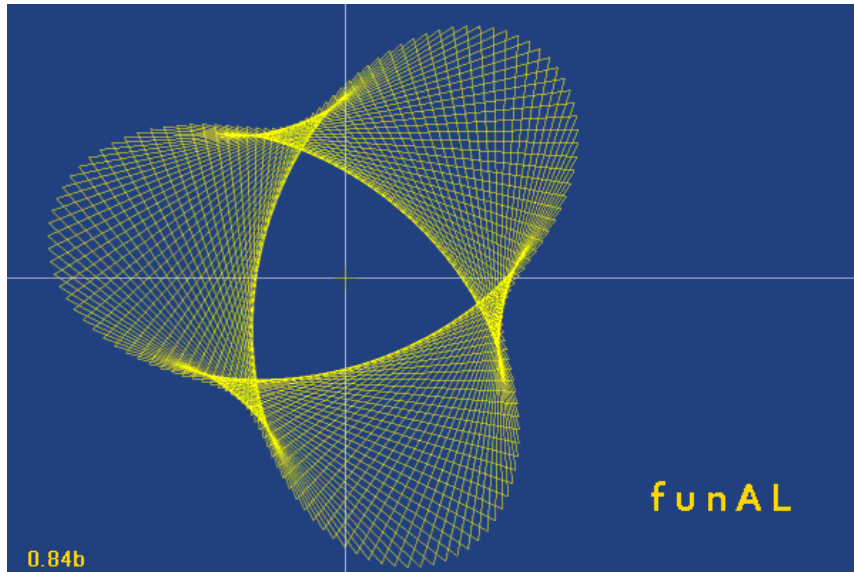
40. ábra Egyenlettel megadott görbe befogazása a CogAL-ban

9.1.5 Egyéb funkciók

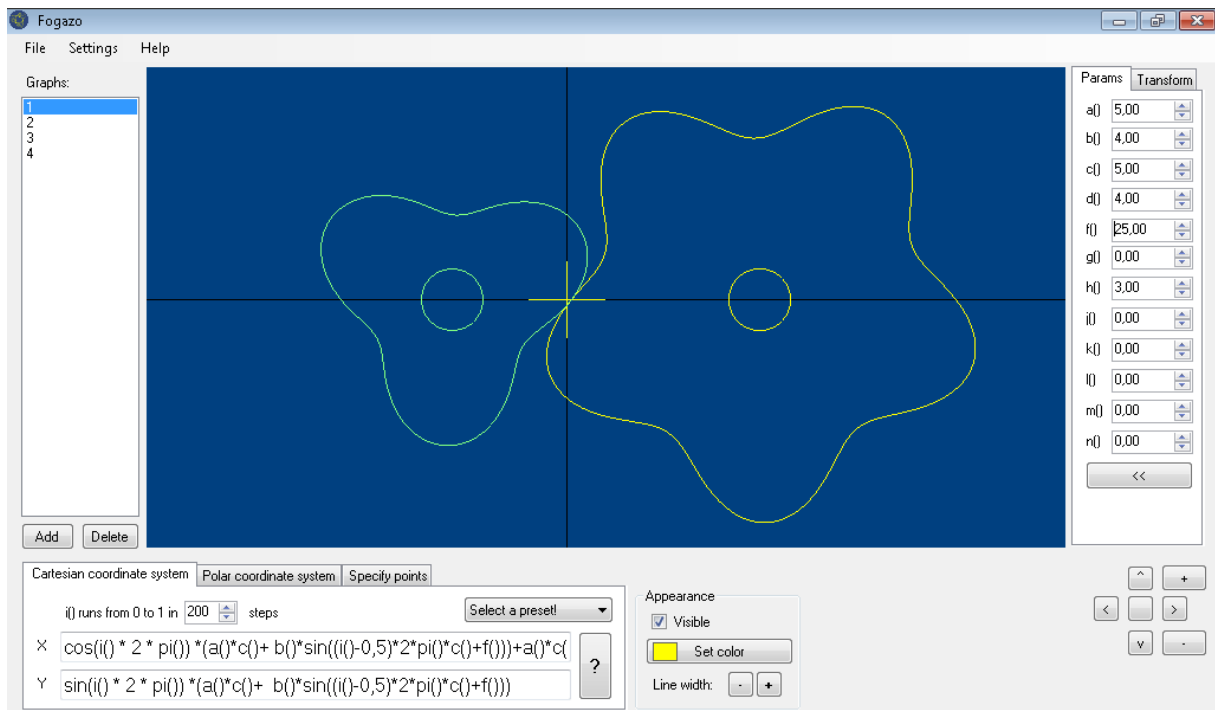
- A program rengeteg előre megadott paraméterrel dolgozik, melyek segítségével a legtöbb fogaskerék-geometria számolható. Ha viszont jóval nagyobb vagy kisebb mérettartományban, vagy más pontossági követelmények mellett szeretnénk dolgozni, előfordulhat, hogy ezek a paraméterek nem vezetnek helyes eredményre. Az „advanced settings” funkcióval a ritkán állítandó paraméterek megváltoztatására van lehetőség.
- A grafikai megjelenést, valamint a zoomolás és „pan” érzékenységet a „settings” menüben állíthatjuk be.
- Az végeredményként kapott fogaskerék görbéket a további felhasználás, gyártás érdekében exportálhatjuk képként, dxf fájlban vagy a pontok koordinátáit csv-ben.
- Biztosítjuk a programban a munka aktuális helyzetének mentését és előhívását, melyhez külön formátumot dolgoztunk ki.

9.2 Függvény- és görbeszerkesztő program

A változó függvények kényelmesebb tervezése és vizualizálása érdekében készítettünk egy hasonló grafikus környezettel rendelkező segédprogramot. A programban paraméterekkel lehet egyszerre több görbét megadni, melyeket csv-ben is kimenthetünk. A görbékkel transzformációkat is könnyedén végre lehet hajtani, melyek nagyban leegyszerűsítik a használatát. A rendszer részletes bemutatása szintén megtalálható a útmutatóban [ld. Melléklet]. A program a funAL nevet kapta, mely a „functiongenerator algorithm” szavak összevonásából keletkezett.



41. ábra A funAL program bejelentkező képe



42. ábra A függvényszerkesztő program kezelőfelülete

10 Megvalósított példák

A felhasznált összefüggések és a létrehozott program legjobb ellenőrzési módja, ha azokat valós tesztpéldákon keresztül ellenőrizzük. Az alábbi alfejezetekben, egy-egy mintafeladattal mutatjuk be a kerekek tervezését. Némely feladat esetében a kapott kerekeket le is gyártottuk.

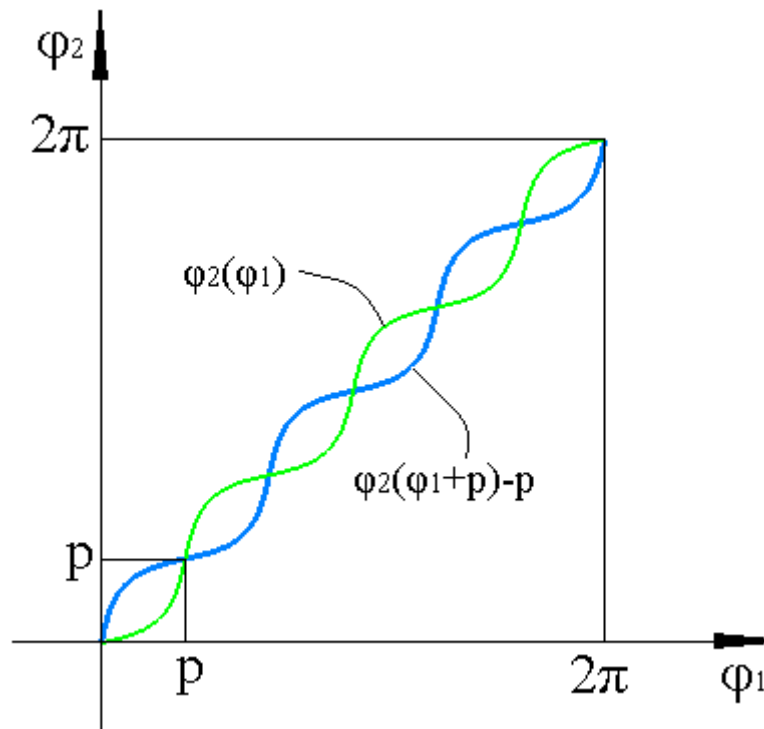
10.1 Háromágú fogaskerék

Az első kidolgozott és megvalósított példánk egy periodikusan változó áttételű, háromágú fogaskerékpár. A számításoknál úgy jártunk el, hogy a két kerék teljesen azonos legyen.

10.1.1 A főprofil görbe meghatározása

Mivel e példa még a CogAL program készítése előtt készült, a számításokat a [4. fejezetben] leírtak alapján végeztük. A geometria egyértelmű megadásához szükséges a tengelytávolság és az áttételfüggvény. A tengelytávolság ebben a példában $a=100[\text{mm}]$. Az áttételfüggvény a (5.1) képletnek megfelelően a kerek szögpozíció-változásainak a hányadosa, tehát $i = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \varphi_2}$.

Ha azt akarjuk, hogy a két kerék főprofil görbéje azonos legyen, akkor a szögpozíció-függvényeket úgy kell megadni, hogy teljesüljön a $\varphi_1(\varphi_2) = \varphi_2(\varphi_1 + p) - p$, ahol a p az áttétel ingadozás periódusa, ami a háromágú fogaskerék esetén $p = \frac{\pi}{3}$.



43. ábra A szögpozíciók összefüggésének ábrázolása

Ilyen jellegű áttételfüggvény felírható például egy szinusz függvény 45° -os elforgatásával. Mivel itt is a diszkrét megadást alkalmazunk, felírunk egy $\mathbf{q}$ paraméter vektort, mely n darab eleme 0 és 1 között egyenletesen változik (6.9).

A $\mathbf{q}$ paramétervektor segítségével felírható egy A amplitúdójú, N ingadozású, $2\pi\sqrt{2}$ hosszú szinusz hullám, melynek x és y koordinátáit az $\mathbf{S}$ mátrix tartalmazza.

$$\mathbf{S}(j) = \begin{bmatrix} q(j)2\pi\sqrt{2} \\ A \cdot \sin(q(j)N2\pi + \pi) \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

Ebben a kidolgozott példában $N=3$ és $A=0,05$.

Az $\mathbf{S}$ mátrix 45° -os elforgatását egy forgatómátrixszal végezhetjük el.

$$\begin{bmatrix} \varphi_1(j) \\ \varphi_2(j) \end{bmatrix} = \mathbf{S}(j) \cdot \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) & \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \\ -\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \quad (10.2)$$

Az áttételfüggvényhez a szögpozíciók változására van szükség, melyet az egyik numerikus deriválás módszerrel, a gradient (4.17-19) operátorral végezhetünk el.

$$i = \frac{\text{gradient}[\varphi_1]}{\text{gradient}[\varphi_2]} \quad (10.3)$$

Az áttételfüggvény ismeretében meghatározhatóak a szögpozíciókhoz tartozó sugarak a (10.4-5) képletekkel. A sugarak egy-egy n elemű vektorban vannak, melyek elemei:

$$r_1(j) = \frac{a}{i(j) + 1} \quad (10.4)$$

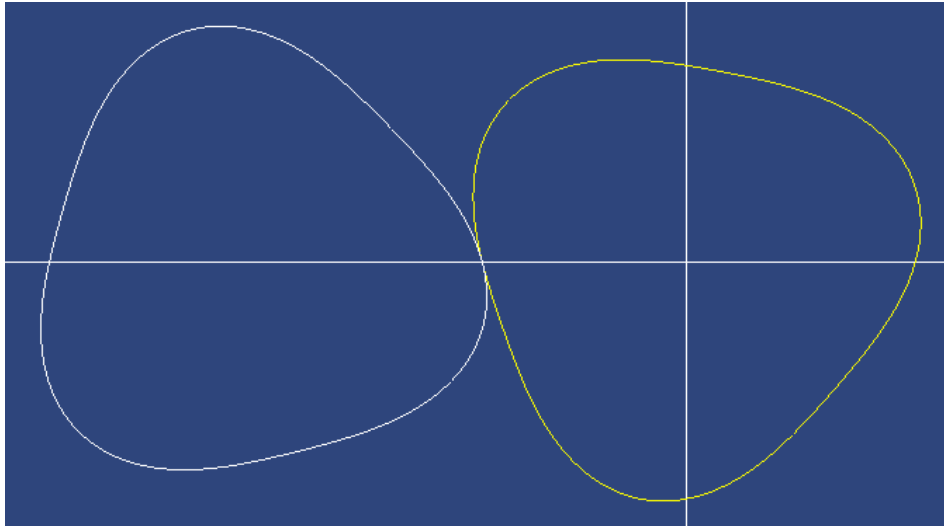
$$r_2(j) = a - r_1(j). \quad (10.5)$$

Az adott szögpozíciókhoz tartozó sugarak ismeretében felírható a főprofil-görbe pontjait tartalmazó mátrix (10.6-7).

$$\mathbf{f}_1 = \begin{bmatrix} r_1(j) \cos(\varphi_1(j)) \\ r_1(j) \sin(\varphi_1(j)) \end{bmatrix} \quad (10.6)$$

$$\mathbf{f}_2 = \begin{bmatrix} r_2(j) \cos(\varphi_2(j)) \\ r_2(j) \sin(\varphi_2(j)) \end{bmatrix} \quad (10.7)$$

A második kerék főprofil-görbéje ugyan az lesz, mint az elsőé, csak $\pi/3$ radiánnal el lesz forgatva.



44. ábra A háromágú fogaskerekek főprofil-görbéi

10.1.2 A főprofil-görbe befogazása

A [7.1 fejezetben] szemléltetett módon a befogazást ebben az esetben még a Boolean halmazműveletek segítségével végeztük. A virtuális befogazó-szerszám egy kör alakú, 17 fogszámú kerék volt, melynek trapéz profilú fogai voltak. A fogprofil moduljának megadásánál figyelembe kellett venni a háromágú kerekeken kívánt fogszámot. Mivel a periódushossz $P = m \cdot \pi$, a fogszám $Z=27$ és a főprofil görbe hossza s , az $s = P \cdot Z$ összefüggés miatt a modul $m = s/Z \cdot \pi$ értékre adódik. Ahhoz, hogy a két kerék a befogazás után is azonos maradjon, a Z fogszámot olyan értékre kellett választani, ami 3-al osztható, de hárommal osztva nem lesz páros. Ez azért fontos, mert így a három csúcsban fog található, a három árokban meg fogárok, melyek tudnak kapcsolódni. A megfelelő pontosság érdekében az n felbontást igen nagy, 2000 körüli értékre állítottuk be. A kapott eredményekből szűrés után G kódot [7] generáltunk, melyet betáplálva az egyik tanszéki háromtengelyes marógépbe le tudtuk gyártani az első pár tesztkereket. A G kód megalkotásánál figyelembe vettük az ujjmaró sugarát, tehát a szerszámpályát azzal eltolva (a kontúrra merőlegesen) hoztuk létre. A könnyebb gyártás érdekében a fogaskerekek anyagának fát választottunk.



45. ábra A legyártott háromágú fogaskerekek

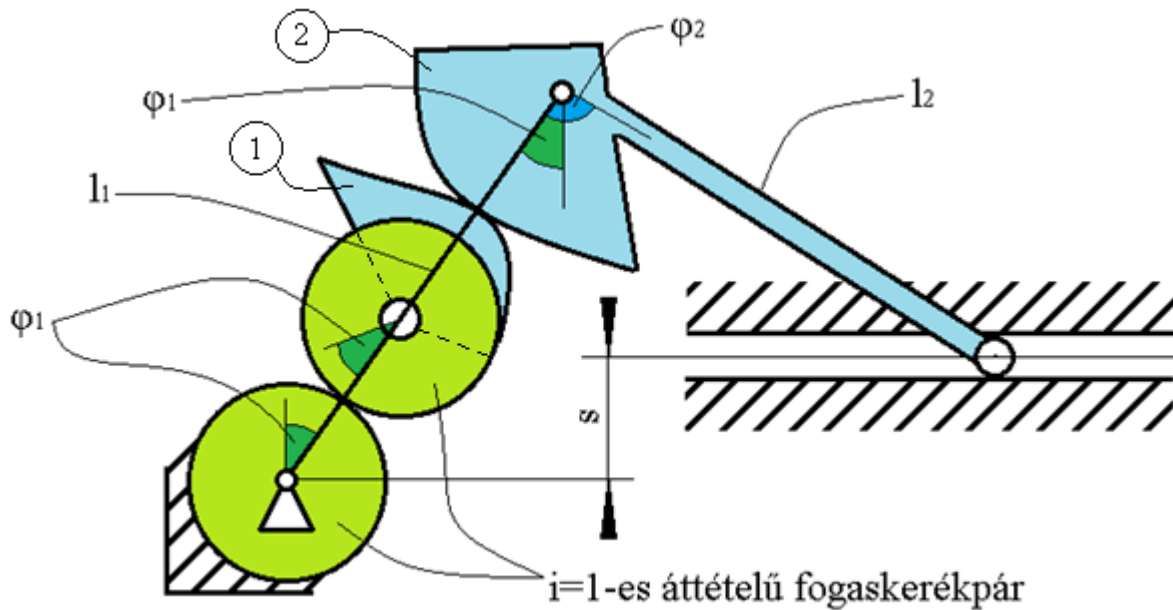
10.2 Mechanizmus egyenesbevezetése

A következő kidolgozott példának egyik célja az eljárás helyességének bizonyítása volt. Ennek az egyik módja egy kinematikailag túlhatározott mechanizmus építése. A mechanizmus tartalmazna körtől eltérő főprofilú fogaskerekeket, melyeknek előre meghatározott módon kell a mechanizmus egyes karjai között a szögváltozást megadni. Mivel a rendszer túlhatározott, könnyen lehet ellenőrizni, hogy helyesen működik-e (ellenkező esetben nem lehetne mozgatni). A másik, hasonló elképzelés, melyet végül megvalósítottunk, egy olyan nyílt láncú mechanizmus építése volt, melynek végpontja egy adott egyenes pályán halad, amely könnyen ellenőrizhető.

A kidolgozott példa másik fő célja az elkészült kontúrkereső algoritmus éles tesztelése volt.

10.2.1 Kinematika és felépítés

A megépített nyílt láncú mechanizmus két csuklós karból, egy $i=1$ -es áttételű fogaskerékpárból és egy változó áttételű, fogaskerékpárból áll (46. ábra). Az áttételfüggvényt úgy kell meghatározni, hogy a második kar végpontja egyenes pályán haladjon, ha a karokat mozgatjuk. Az 1-es áttételű fogaskerékpár első kereke a 46. ábraán látható módon rögzített, így a rendszer egy szabadságfokkal rendelkezik.



46. ábra A mechanizmus kinematikai vázlata

A mi esetünkben $l_1=l_2=150[\text{mm}]$, $s=50[\text{mm}]$.

Ahhoz, hogy meghatározzuk a fogaskerékpárt, fel kell írni az áttételfüggvényt, melyhez a kerek szögpozícióira van szükség. A 46. ábra-t tekintve felírható φ_2 a φ_1 függvényében.

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \arccos\left(\frac{l_1 \cos(\varphi_1) - s}{l_2}\right) \quad (10.8)$$

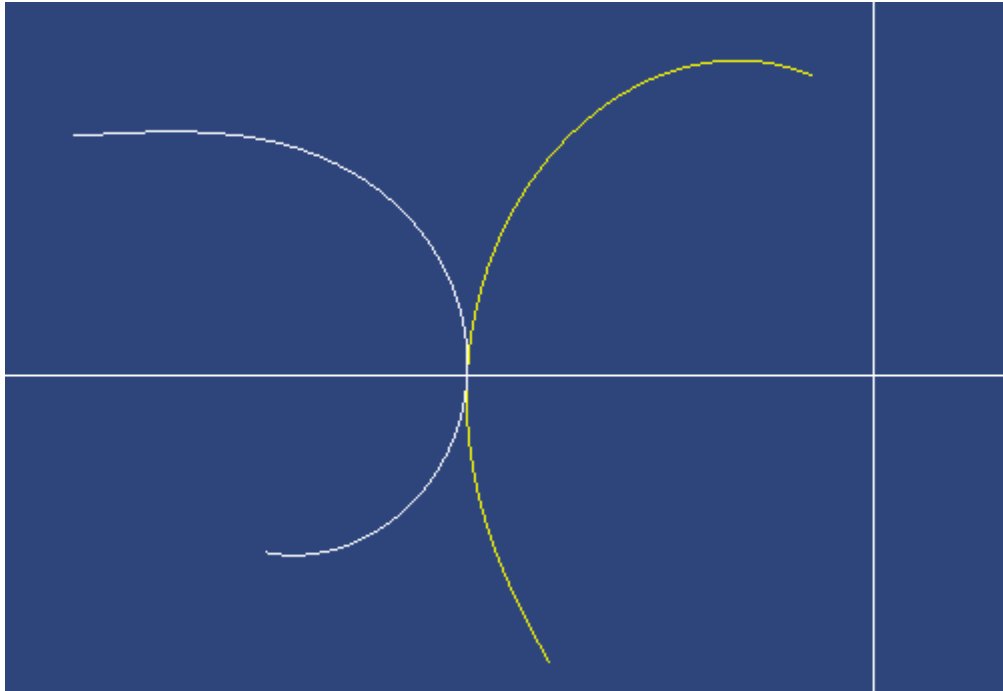
10.2.2 A főprofil görbe meghatározása

Az előző példához hasonlóan itt is a diszkrét megadást alkalmazzuk. Felírunk egy $\mathbf{q}$ paraméter vektort, mely n eleme 0 és 1 között változik egyenletesen (6.9).

A $\mathbf{q}$ vektor segítségével felírható a 0 és $2/3\pi$ között egyenletesen változó, n elemű φ_1 vektor és abból a φ_2 vektor. Az első kar szögtartományának felső határát azért vettük $2/3 \pi$ radiánra, mert az adott paraméterek mellett magasabb értékeknél nem működne a konstrukció megfelelően (mivel φ_1 közelít ahhoz az értékhez, ahol a (10.8) egyenletnek már nincs megoldása). Tehát a szögpozíciókat leíró vektorok az alábbiak szerint számíthatók:

$$\varphi_1(j) = \frac{2\pi}{3} q(j) \quad (10.9)$$

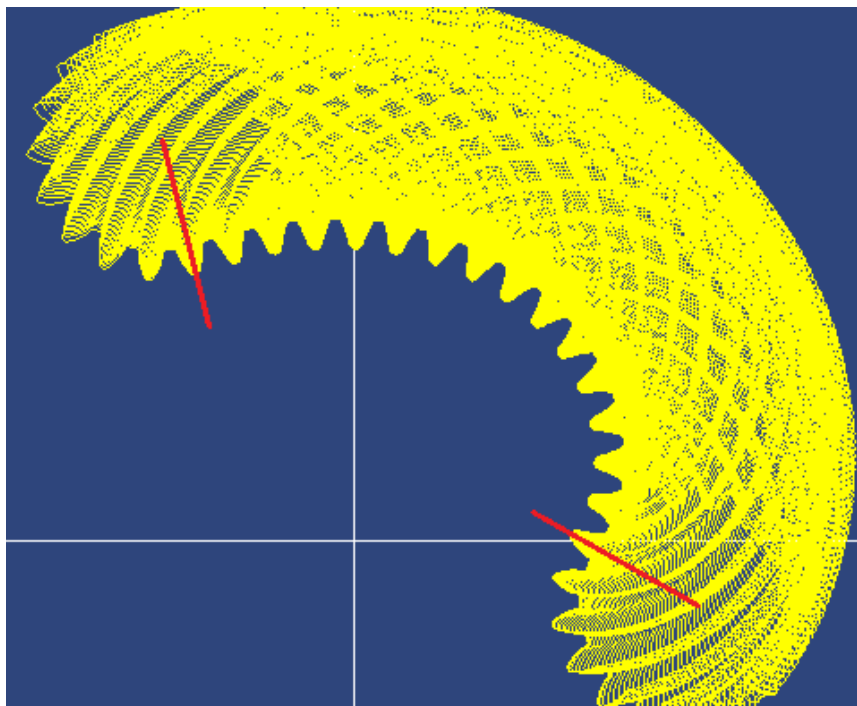
$$\varphi_2(j) = \varphi_1(j) + \arccos\left(\frac{l_1 \cos(\varphi_1(j)) - s}{l_2}\right) \quad (10.10)$$



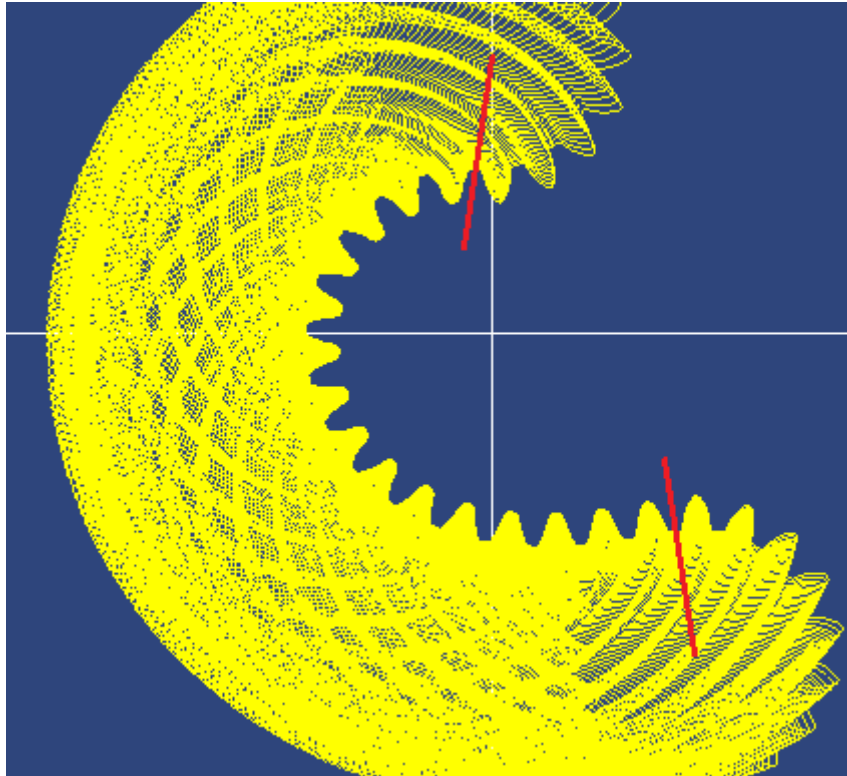
47. ábra Főprofilgörbék

10.2.3 A főprofil görbe befogazása

A befogazást a [4.2. fejezetben] szemléltetett módon végeztük, az általunk kidolgozott kontúrkereső algoritmus segítségével. A virtuális befogazó-szerszám, az előző példához hasonlóan, egy kör alakú, 17 fogszámú kerék volt, melynek trapéz profilú fogai voltak. A megfelelő pontosság érdekében az n felbontást igen nagy, 1000 körüli értékre állítottuk be.



48. ábra Az első kerék a kontúrkeresés előtt



49. ábra A második kerék a kontúrkeresés előtt

Mivel nyílt görbék befogazásáról van szó, meg kell adni a kontúr kezdeti és végpontját. A 48. ábraán és a 49. ábraán látható piros szakaszok jelzik ezeket a helyeket. A szakaszok a főprofil görbék kezdeti illetve végpontbeli érintőire merőlegesek.

A kontúrkereső eljárásnak köszönhetően nincs szükség az eredmények szűrésére, így közvetlenül G kódot [7] generálhattunk, melyet betápláltuk a tanszéki háromtengelyes marógépbe. A fogaskerekek anyaga ennél a példánál laminált fa (padlólap).

A mechanizmust a kerekek legyártása után összeszereltük és teszteltük (ld. 50. ábra, illetve a mellékletben található videó). A kisebb nagyobb gyártási pontatlanságok és kotyogások ellenére jól látszik, hogy az adott pont egyenes pályán halad, tehát a számítások helyesnek bizonyultak.



50. ábra Nyílt láncú mechanizmus egyenesbe vezetésének megvalósított példája

Az elkövetkező két példával az alkalmazási területek sokrétűségét szeretnénk szemléltetni. Az eddig legyártott fa fogaskerekek után lézeres CNC lemez-megmunkálási technológiával gyártatjuk le a kerekeket.

10.3 Kardáncsukló lüktetésének megszüntetése

Ez a példa már a CogAL program segítségével készült. A cél egy olyan fogaskerékpár megalkotása volt, amely egy bizonyos szögben álló kardáncsukló után kapcsolva megszünteti annak a szögsebesség lüktetését.

10.3.1 A főprofil görbe meghatározása

Hasonlóan az eddigi példákhoz, itt is a tengelytávolságra, illetve az áttétel függvényére van szükségünk. A tengelytávolságot $a=50[\text{mm}]$ -re választottuk.

A kijövő tengely (ω_2) szögsebessége a (10.11) képlet szerint változik, ha a behajtó szögsebesség (ω_1) állandó és a kardáncsukló állásszöge α , (ami a mi esetünkben 45°) [8]

$$\omega_2 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \frac{\cos(\alpha)}{1 - \sin^2(\alpha) \sin^2(\omega_1 t)} \omega_1 \quad (10.11)$$

A második kerék szögpozícióját integrálással kaphatjuk meg.

$$\varphi_2(\varphi_1) = \int_0^{\varphi_1} \frac{\cos(\alpha)}{1 - \sin^2(\alpha) \sin^2(\omega_1 t)} \omega_1 dt \quad (10.12)$$

Az előző példához hasonlóan itt is a diszkrét megadást alkalmazzuk. Felírunk egy $\mathbf{q}$ paraméter vektort, mely n eleme 0 és 1 között változik egyenletesen (6.9).

Legyen $\omega_1=1[\text{rad/sec}]$. Numerikus integrálással egyszerűen meghatározhatóak a szöghelyzetek az alábbi egyenletekkel.

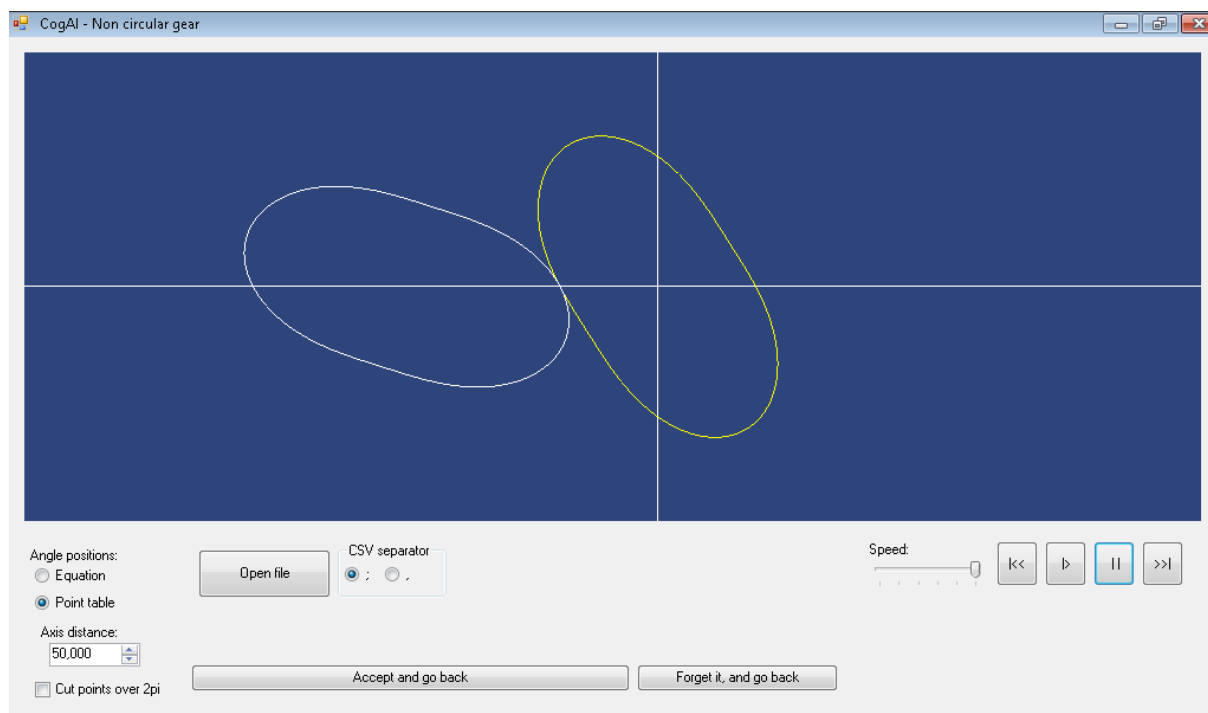
$$\varphi_1(i) = 2\pi q(j) \quad (10.13)$$

$$\omega_2(j) = \frac{\cos(\alpha)}{1 - \sin^2(\alpha) \sin^2(\varphi_1(j))} \quad (10.14)$$

$$\varphi_2(j) = \text{cumsum}[\omega_2(j) \text{gradient}[\varphi_1]] \quad (10.15)$$

A numerikus integrálás pontossága nagy mértékben függ az n felbontástól, viszont annak növelésével, a főprofil pontjainak száma is növekszik, így a számítás hosszadalmassá válhat. Egy egyszerű módszer segítségével ugyanannyi elemből álló szöghelyzet vektorokat kapunk, sokkal pontosabban. A felbontás n helyett $100n+1$ lesz, mellyel elvégezzük az integrálást (10.15). A kapott vektorból kivesszük minden századik elemeket és egy új vektorba rendezzük őket. A plusz egy elemre azért van szükség, hogy az első és utolsó elemeket mindenképpen áthozzuk az új, pontosabb vektorba.

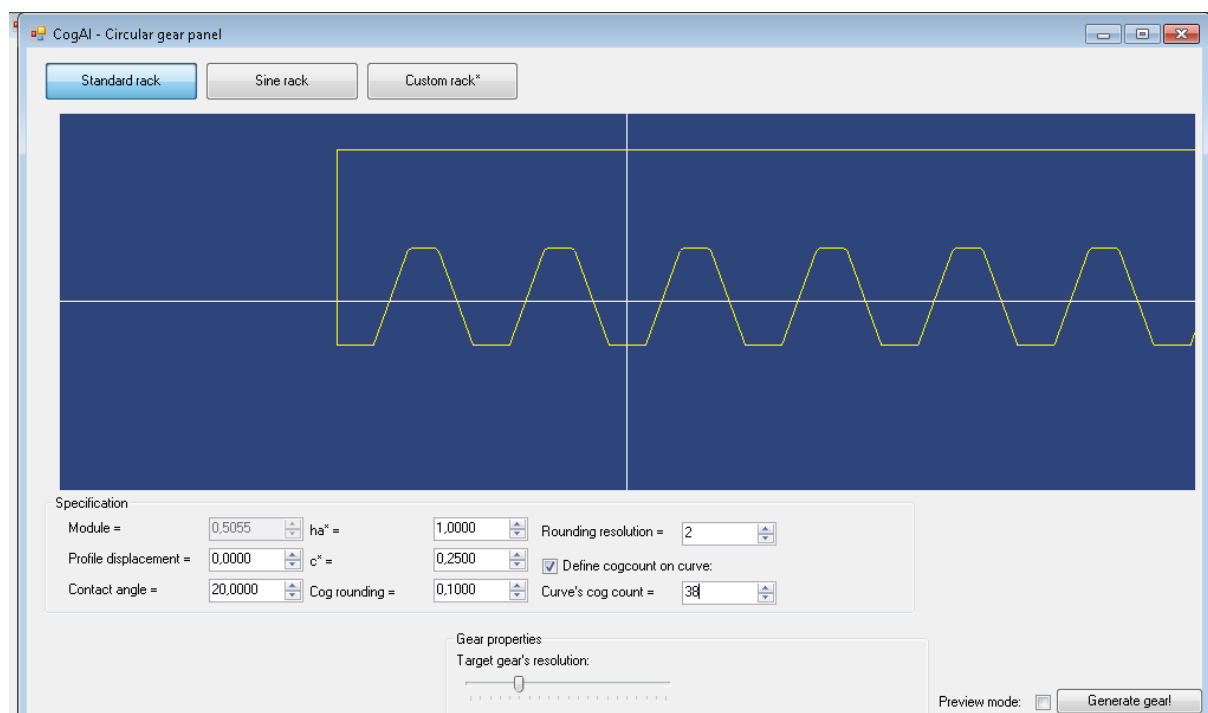
Az egyenleteket Matlab-ban elvégeztük, majd CSV formátumban kimentettük φ_1 és φ_2 vektorok elemeit. A CogAL programba a fájl betöltése és a tengelytáv megadása után máris láthatóak a főprofil görbék.



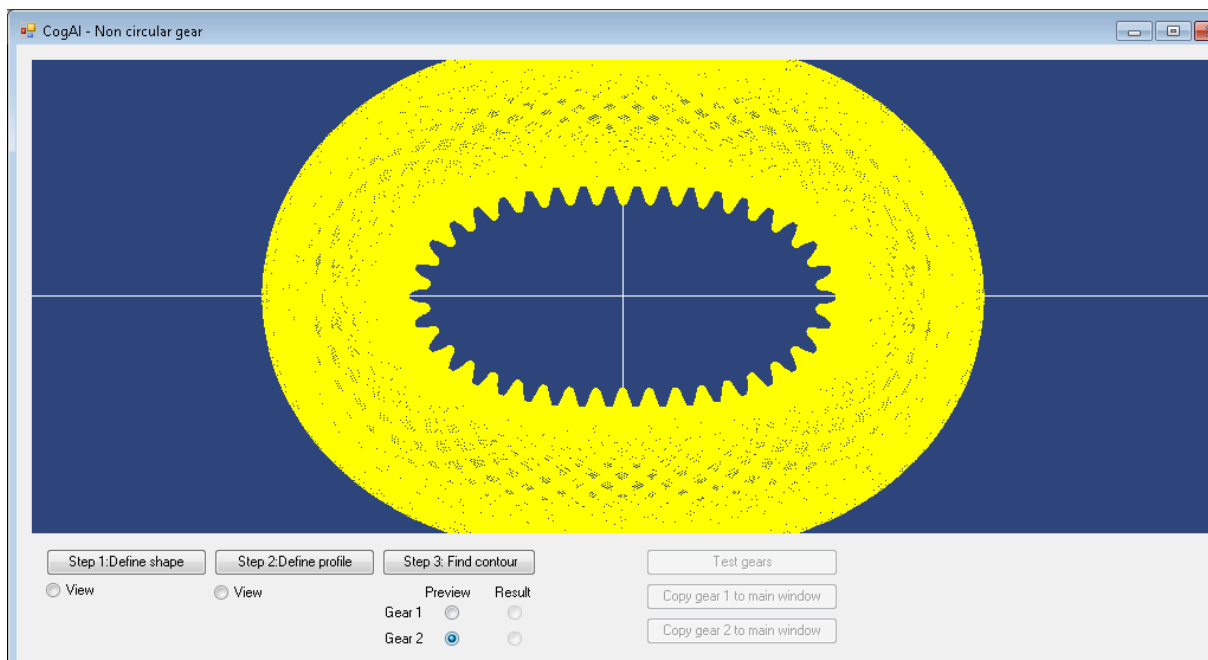
51. ábra A CogAL program főprofil görbe számító modulja

10.3.2 A főprofil görbe befogazása

A mesterkerék generálásánál bekapcsoltuk az egész fogszám opciót, amely olyan modult ad meg, amivel pont a megadott fogszám lesz kiosztva a főprofil görbén ($m = s/Z \cdot \pi$). Mivel a kardáncsukló szimmetrikus felépítésű a két kerék azonos főprofilú lesz. Célszerű volt olyan fogszámot választani, amivel a kerek a befogazás után is azonosak maradnak. A Z fogszám értékét úgy kell felvenni, hogy páros legyen, de kettővel osztva páratlan, így a nagy átmérőnél fog, a kicsinél fogárok lesz. Esetünkben a fogszám $Z=38$.



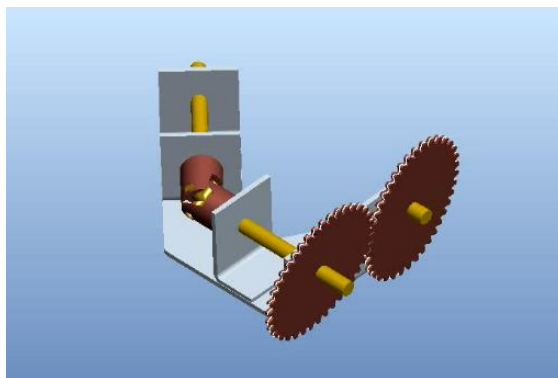
52. ábra A CogAL program fogprofil megadó modulja



53. ábra A befogazott kerék előnézete a CogAL programban

A mesterkerék legördítése után megkereshető a kontúr, melyet dxf formátumban exportáltunk.

A Pro/e WF5 CAD program segítségével készült egy modell, melyet legyártottunk [10]. A modellt és a teljes rajzdokumentációt a [Melléklet] tartalmazza.



54. ábra A cad modell



55. ábra A legyártott modell

10.4 Íróasztallámpa

Sokszor problémát jelent a karos szerkezeteknél, mint például az íróasztal lámpáknál, a karok pozícióban tartása. Háromféle megoldás terjedt el az ilyen problémák megoldására, melyeket a 2. táblázat szemléltet.

		
Ellensúlyos kialakítás	Súrlódási erővel rögzítés	Rugós feszítés

2. táblázat A főbb lámpakartípusok bemutatása

Az íróasztal lámpák esetében mind a három pozícióban tartási módszer előfordul. E módszereknek megvan az előnye és hátránya, de jellemző, hogy tökéletesen egyik sem felel meg a követelményeknek. Az általunk kidolgozott negyedik példa egy íróasztal lámpa rudazatának pozícióban tartása, változó áttételű fogaskerekek segítségével.

A problémát a rugófeszítéses kialakításoknál általában az jelenti, hogy míg a rugó karakterisztikája lineáris, a szükséges terhelő erő vagy nyomaték attól eltérő. Különböző, jól kiszámolt mechanizmusok segítségével meghatározható a rudazaton két olyan pont, melyek között a szükséges feszítőerő a távolság növekedésével jó közelítéssel lineárisan nő (ilyenkor a két pont közé kerül a rugó). A lineáris karakterisztikától való eltérést a súrlódási erő (fékek, szorítók) tölti ki.

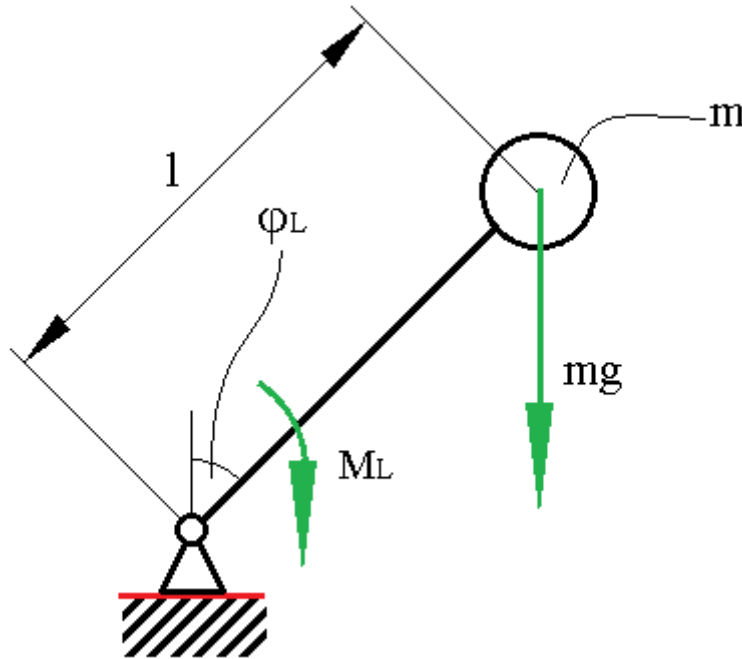
Változó áttételű fogaskerekeket és lineáris karakterisztikájú torziósrugót kombinálva szinte bármilyen karakterisztika előállítható (akár konstans nyomaték is).

A csigárugó lineáris karakterisztikájú, tehát a nyomatéka a rugó szöghelyzetétől φ_R lineárisan függ (10.16). A S_t a torziós rugómerevséget jelöli.

$$M_R = S_t \cdot \varphi_R \quad (10.16)$$

Ezzel ellentétben a kar végén ébredő nyomaték szinuszosan változik a lámpa φ_L szögpozíciója függvényében (10.17). A képletben szereplő mennyiségeket az 56. ábra szemlélteti.

$$M_L = mgl \cdot \sin(\varphi_L) \quad (10.17)$$



56. ábra A rúd tövében ébredő redukált nyomaték magyarázó ábrája

Az áttételfüggvényre igaz lesz, hogy az nem csak a szögpozíció-változások hányadosával egyezik meg, hanem a pillanatnyi nyomatékok hányadosával is (10.18-19).

$$i = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \varphi_2} = \frac{M_2}{M_1} \quad (10.18)$$

$$\frac{\partial \varphi_R}{\partial \varphi_L} = \frac{M_L}{M_R} \quad (10.19)$$

Ha a fenti (10.19) egyenletet megszorozzuk $\partial \varphi_L$ -el és M_R -el, majd integrálunk, az energia megmaradás törvényének megfelelő egyenletet kapunk, miszerint a munkák (nyomatékok integráltja a szögtartományokon) megegyeznek (10.20).

$$\int M_R d\varphi_R = \int M_L d\varphi_L \quad (10.20)$$

behelyettesítve a (10.16-17) egyenleteket a (10.20) egyenletbe, majd elvégezve az integrálást, az alábbi összefüggést kapjuk.

$$\int_0^{\varphi_R^*} S_t \cdot \varphi_R d\varphi_R = \int_0^{\varphi_L^*} mgl \cdot \sin(\varphi_L) d\varphi_L \quad (10.21)$$

$$\left[\frac{S_t \varphi_R^2}{2} \right]_0^{\varphi_R^*} = mgl [-\cos(\varphi_L)]_0^{\varphi_L^*} \quad (10.22)$$

$$\frac{S_t \varphi_R^{*2}}{2} + c_1 = mgl [-\cos(\varphi_L^*) + 1] + c_2 \quad (10.23)$$

$$\varphi_L^* = \arccos \left(1 - \frac{S_t \varphi_R^{*2} + C}{2mgl} \right) \quad (10.24)$$

A φ_L^* és a φ_R^* vektorok megadását ennél a példánál Excel táblázatban végeztük. A cellákba a $\mathbf{q}$ paraméter vektor n elemét írtuk be, melyek 0 és 1 között változik egyenletesen (6.9), majd segítségükkel felírtuk a φ_R^* és a φ_L^* vektor elemeit. A behelyettesített fiktív adatokat a

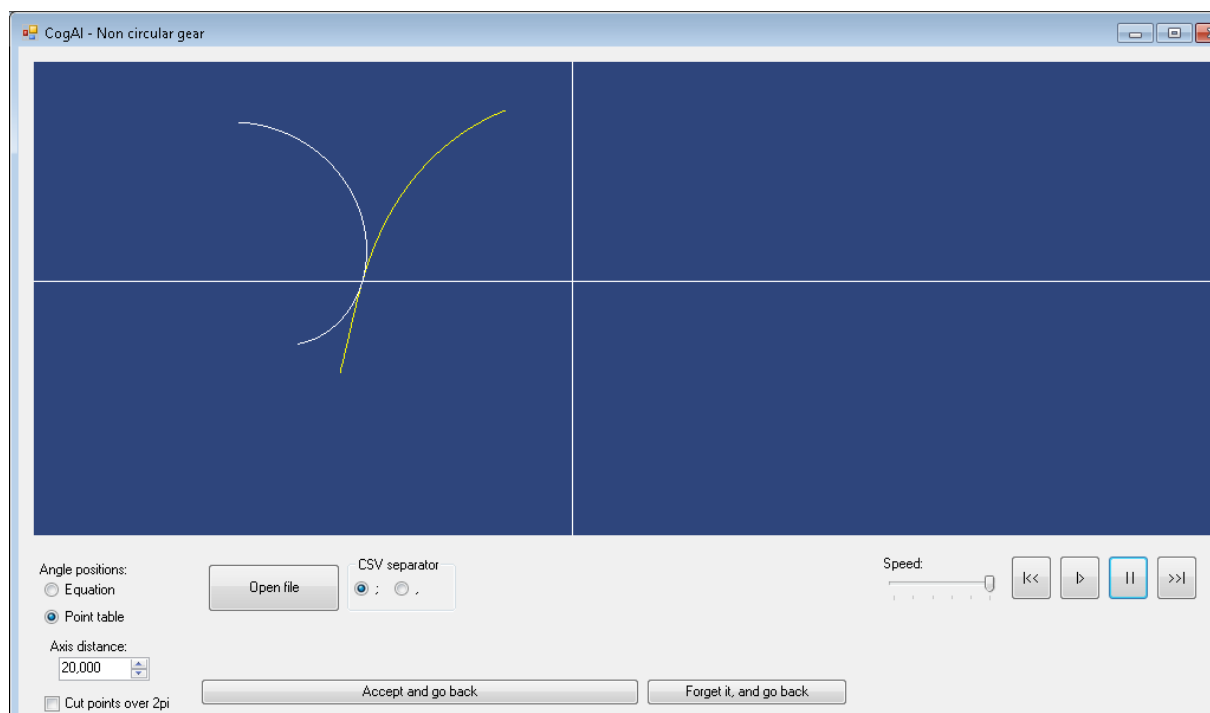
3. táblázat tartalmazza.

$$\varphi_L^*(j) = \arccos \left(1 - \frac{S_t (\varphi_R^*(j))^2}{2mgl} \right) \quad (10.25)$$

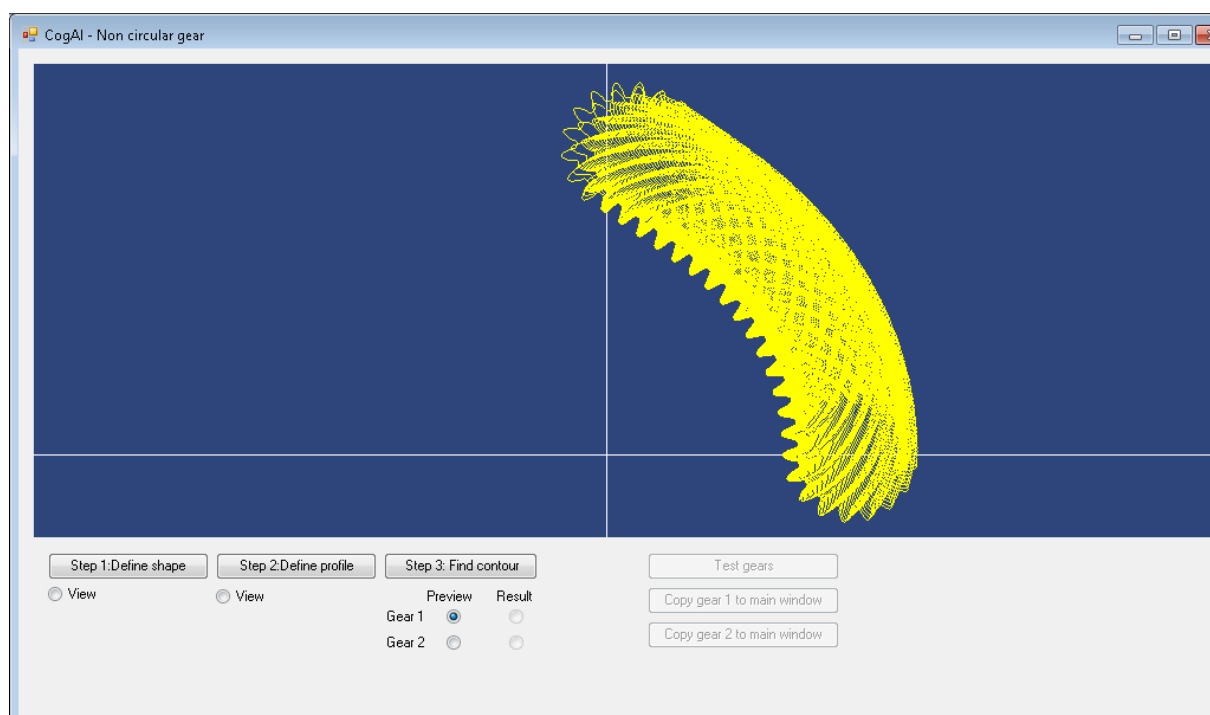
m	0,02	[kg]
l	0,2	[m]
S_t	0,1	[Nm/rad]

3. táblázat A tervezett lámpa adatai

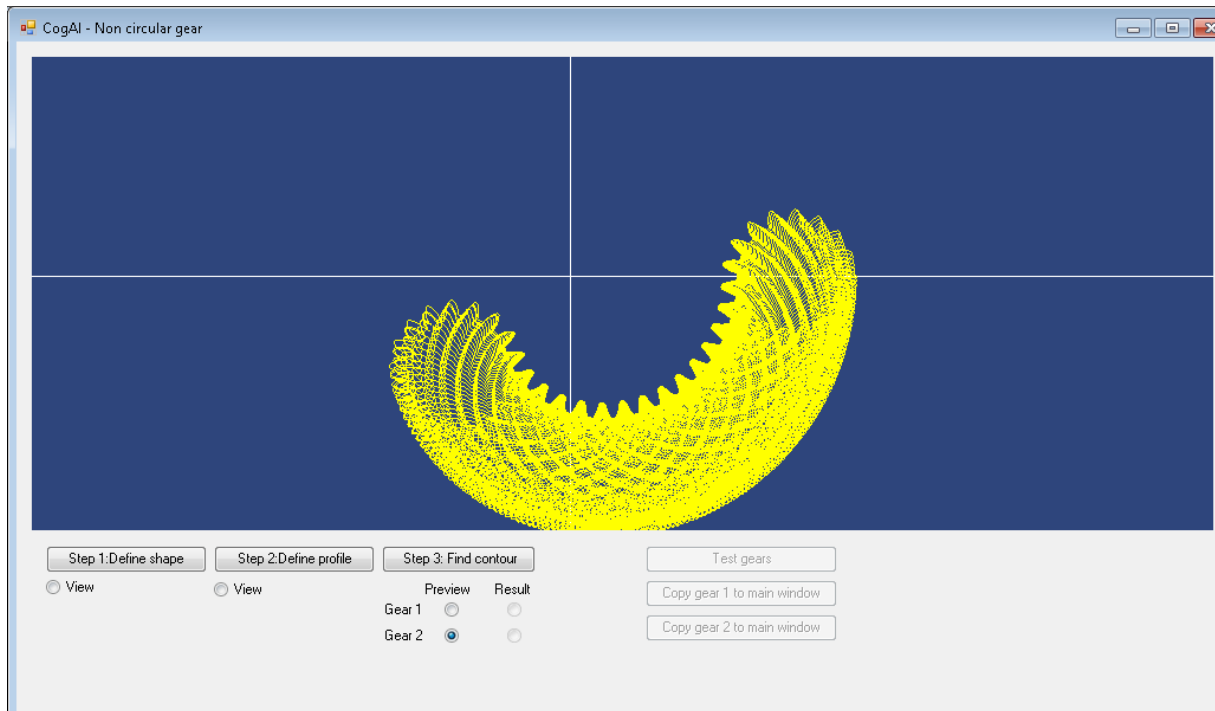
Az Excel file-ből CSV formátumot készítettünk, melyet be lehet importálni a CogAL program főprofil készítő moduljába. A fogprofil kiválasztása után megtörtént a befogazás.



57. ábra A CogAL program főprofilkészítő modulja



58. ábra Az első kerék előnézete



59. ábra A második kerék előnézete

A lámpa felépítésének részletes kidolgozására még nem került sor, de a közeljövőben tervezzük e példa megvalósítását is.

A példák jól szemléltetik a felépített matematikai modellek és módszerek helyességét és a készített program könnyen kezelhetőségét.

11 Összegzés

A dolgozatunk elkészítése során végigjártunk egy komplett programtervezési folyamatot, a matematikai modellek felállításától a program teszteléséig. Számos új mérnöki tapasztalattal és ismerettel lettünk gazdagabbak, beleértve ebbe az újonnan megismert módszereket és programokat.

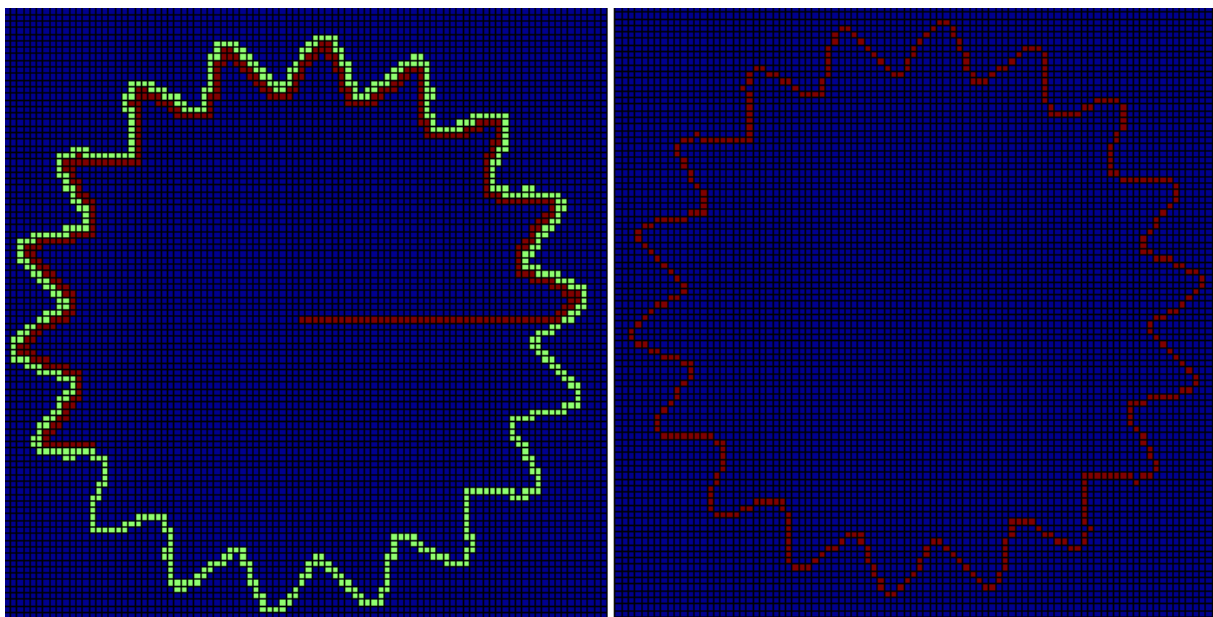
Úgy érezzük, hogy a tevékenységünk hasznos volt és a munkánk során megalkotott program sokaknak nyújthat majd segítséget a különböző mérnöki problémák megoldásánál.

12 Tervek a továbbfejlesztésről

Az eddig elért eredmények csak egy részét képezik a tervezett munkának. Az általunk kitűztünk további célokat és eddig elért részeredményeket, a további alfejezetekbe gyűjtöttük össze

12.1 Kontúrkereső algoritmus továbbfejlesztése

A jelenlegi program egyik gyenge pontja a viszonylag nagy számítási idő a kontúrkeresésnél [8. fejezet], annak ellenére, hogy az már a Boolean műveletekhez képest sokat gyorsult. Ez a kontúrkereső algoritmus működéséből adódik, mivel a ciklusokban sok számítást kell elvégezni. Elkezdtünk kidolgozni egy olyan kontúrkereső módszert, mely sokban hasonlít az előzőhöz, de ellentétben azzal a ciklusokban az aritmetikai műveletek helyett a logikai műveletek dominálnak, melyeket a processzor sokkal gyorsabban képes elvégezni. Az általunk tipikusan használt logikai művelet a relációk teljesülésének vizsgálata (pl.: $a < b$). A kontúrkereső az elérendő felbontásnál kisebb méretű pixelekre bontja a geometriát, majd a művelet befejeztével visszaalakítja pontkoordinátákká. A kontúr keresés működését a 60. ábra illusztrálja, igen alacsony felbontás mellett.



60. ábra Az új kontúrkereső program koncepciójának bemutatása (zöld pontok a határvonalak, piros pontok a megtalált kontúr pontok)

12.2 Poligon helyett spline kontúr

A tapasztalatok alapján az exportált eredmények az AutoCAD programban gyorsan és könnyen kezelhetők. A 3D-s, parametrikus CAD rendszerekbe behívva viszont sokszor problémát jelent a kijelölésnél a sok apró egyenes szakasz, mivel lelassíthatja a rendszert. Elképzelésünk alapján, ha a pontokat nem egyenes szakaszokkal kötjük össze, hanem spline görbét fektetünk rájuk, az eredmény könnyebben kezelhetővé, szemléltethetővé válhat.

12.3 Integrálás CAD rendszerbe

A program tesztelése és a hibák kijavítása után két szálra bontanánk a fejlesztést. Az újabb szál egy CAD rendszerekből vezérelhető szakmodul. A programnak nem lenne külön felhasználói felülete, ugyanis a CAD rendszertől kapná az adatokat és oda is küldené vissza az

eredményt. A felhasználó a saját CAD rendszerében, ha adatokat változtat, frissítés után megkapná egyből az új geometriát.

12.4 A program funkcióinak kiterjesztése

A program továbbfejlesztésénél szeretnénk lehetőséget nyújtani a fogaskerékpárok geometriai és szilárdsági számításainak elvégzésére is. Ehhez képleteket és diagramokat kell a programnak tartalmazni, amelyek segítségével a felhasználó a fogaskerekek komplett tervezését el tudja végezni. Emellett tervezünk kidolgozni egy általános geometriájú, dinamikusan változó tengelytávolságú fogaskerékpárok tervezésére alkalmas modult is.

13 Mellékletjegyzék

Mellékelt CD

- CogAL alkalmazás
 - o CogAL
 - o funAL
 - o Útmutatók
- Melléklet
 - o A dolgozat PDF formátumban
 - o Matlab programok
 - Összetett fogazás (régi módszerek, Boolean művelettel)
 - Boolean művelet DLL fájl
 - Kardáncsukló kompenzálás (új módszerek bemutatása)
 - Kardáncsukló kompenzálás kiszámolt adatai
 - o Kardáncsuklós modell rajzok PDF formátumban
 - o Mellékelt videók
 - Kardáncsukló kompenzálása, CAD modell
 - Kardáncsukló kompenzálása, legyártott modell
 - Nyílt láncú mechanizmus
 - Háromágú fogaskerékpár

Melléklet

- Kardáncsuklós modell rajzok PDF formátumban
- Használati útmutató

14 Irodalomjegyzék

1. **Malmok műszaki fejlődése a kezdetektől.** *Malmok.* [Online] <http://www.malmok.hu/malmok/malmok-fejlodestortenete/kezdetek>].
2. **F.L.Litvin.** *A fogaskerékkapcsolódás elmélete.* Budapest : Műszaki Könyvkiadó, 1972.
3. **Erney, György.** *Fogaskerekek.* Budapest : Műszaki Könyvkiadó, 1983.
4. **Generator, Gear.** Gear Generator. [Online] <http://woodgears.ca/gear/index.html>.
5. **Simon, Vilmos.** *Gépelemek 2.* Simon, Vilmos : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2008..
6. **Bach, Iván.** *Formális nyelvek.* Budapest : Typotex, 2002.
7. **G-code.** G-code. *Wikipedia.* [Online] <http://en.wikipedia.org/wiki/G-code>.
8. **Jegyzetek, BME Mechanika tanszék,** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.. [Online] www.mm.bme.hu.
9. **Németh, Gábor.** Fogaskerékhajtásról röviden.
10. **Fisher, U et al.** *Fémtechnológiai táblázatok.* Haan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel, 1999.
11. **Egerszegi, János és Laczik, Bálint.** Nem köralakú fogaskerekek a fegyvertechnikában. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Hadmérnöki Kar. [Online] [Hivatkozva:] <http://193.224.76.4/download/bjkmk/bsz/bszemle/kulon0123.html>.
12. **Laczik, Bálint.** Cometarium-mechanizmus, Fizikai szemle 2008/2