

Fehér Balázs¹ – Bakó András²

INDULÁSI ELJÁRÁSOK MATEMATIKAI MODELLJÉNEK KIÉRTÉKELÉSI MÓDJAINAK ALAPJAI³

Kutatásaim során az ún. tanuló algoritmusokkal végzett eljárás – optimálással foglalkozom. Ez azt jelenti, hogy egy adott módon legenerálunk megfelelően nagy eljárás-sokaságot, majd bizonyos szempontok alapján változtatunk rajtuk úgy, hogy az alapvető tulajdonságaik (elsősorban akadálymentesség) ne sérüljenek. Ezen publikációmban (felhasználva korábbi eredményeimet) az adott eljárások kiértékelésének lehetséges módjait mutatom be. Emellett a jövőbeni fejlesztési lehetőségeket is összefoglalom.

BASICS OF MATHEMATICAL MODEL OF AIR TRAFFIC DEPARTURE PROCEDURES EVALUATION

My research objectives are the „self-developing” algorithms, and their usage for optimizing instrument procedures. Therefore we generate a sufficient number of procedures, and we change the parameters by different objectives (respecting the basic fundamentals e.g. obstacle clearance). In this paper, I will present (on the basis of my former researches) the possible evaluation methods of given procedures. Besides that, I will give a short brief about the further research opportunities in this application.

BEVEZETÉS

A légiforgalmi eljárások tervezése nagyon sokrétű feladat, és nehezen automatizálható. Problémát jelent, hogy a légi járművek nem csak síkban mozognak, így nem csak a vízszintes, de a megfelelő függőleges elkülönítést is biztosítani kell. Számításba kell venni a tereptárgyaktól való megfelelő távolság biztosítását is, mivel a balesetek elég nagy hányada esik az ún. CFIT kategóriába, ami a Controlled Flight Into Terrain, azaz irányított földnek ütközést jelent. Ekkor a repülőgép teljesen kormányozható és a balesetet a személyzet idézi elő, a légijármű nem szándékos földnek vezetésével. Ennek egy része a téves helyzetfelismerés (ld. térbeli dezorientáció), másik kisebb része pedig a nem megfelelő eljárásból adódhat. A jelenlegi légi forgalom folyamatoságát is nehéz biztosítani, a fő szabály, hogy a biztonságos elkülönítést (a légijárművek egymástól és a földtől való távolságát) minden esetben biztosítani kell, minden más szempont (kapacitásmenedzsment, környezetvédelem, zajvédelem) csak ez után következik.

Mindazonáltal a repülőterek versenyképességének egyik jelzője az is lehet a közeljövőben, hogy mennyire könnyű az adott reptérre érkezni, és arról indulni. Milyen gyakran lehet várakoztatásra (holding) számítani, mennyi résidőt (azaz slotot) lehet kiosztani. A várakoztatás extra üzemanyag-felhasználással jár (mind az indulás, mind az érkezés esetén), ezt a repülés előkészítése és tervezése folyamán számításba kell venni.

¹ Széchenyi István Egyetem – Győr, Közlekedési Tanszék, feherb@sze.hu

² Széchenyi István Egyetem – Győr, Közlekedési Tanszék, bakoa@sze.hu

³ Dr. Palik Máttyás alezredes, tanszékvezető egyetemi docens, Nemzeti Közszoigálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Tanszék, palik.matyas@uni-nke.hu

Publikációmban felhasználok a korábbi kutatásaim anyagait és alapjait [1], ezek alapján mutatom be az önfejlesztő algoritmusokkal végzett eljárás-fejlesztést, a generált eljárások kiértékelésének módjait.

A területi navigációs eljárások felépítésének ismertetése

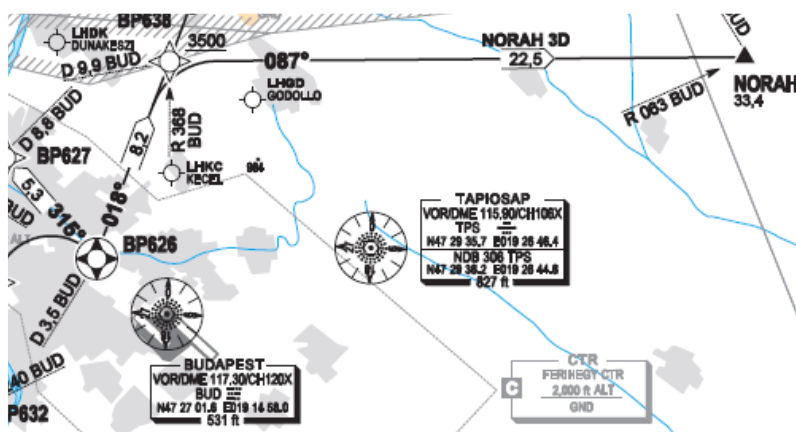
Hogy a téma további részleteit megismerjük, feltétlenül szükséges pár szót ejteni a repülési eljárásokról. Mivel a közforgalmi repülésnek olyankor is folynia kell, amikor a legtöbb magánpilóta szakszolgálati engedéllyel rendelkező ki sem nyitja a hangárajtót, sőt a fel- és leszállások egy része az egyszerű műszeres jogosításhoz képest is alacsonyabb időjárási minimumok mellett történik.

Tehát a közforgalmi repülések túlnyomó része – a megkövetelt térések, és az időjárástól való minél jobb függetlenedés miatt – műszerrepülési szabályok (IFR – Instrument Flight Rules) szerint történik, így az eljárásokat is műszerrepülésre építik fel. Az eljárások típusában megkülönböztetünk indulási és érkezési, várakozási eljárásokat. Jelen cikkben (terjedelmi korlátok miatt) az indulási eljárások ismertetését végezzük.

A területi navigáció pedig lehetővé teszi, hogy a repülőgéppel kielégítő pontossággal navigáljunk anélkül, hogy közvetlenül a földi telepítésű berendezés irányába, vagy irányából repülénk. Tehát egy olyan navigációs módszerről van szó, ami lehetővé teszi a repülési útvonal lényegében bárhol történő elhelyezését. Az ismertetett eljárás analízise is területi navigációs eljárás, hiszen nem adóra rárepülés vagy adótól elrepülés történik.

A NORAH 3D Indulási eljárás

Korábbi publikációimban [1],[2] is a NORAH 3D jelű indulási eljárást vizsgáltam, most ennek a vizsgált eljárás matematikai modelljének kiértékelésével foglalkozunk.



1. ábra A NORAH 3D indulási eljárás [6]

A SID⁴ 3,5 mérföldre kezdődik a BUD VOR⁵-tól, a BP626-os útvonalpontonál. Ez az eljárás kiindulópontja. 017°-ra fordulván, a track folytatódik a BP638 pontig. Ez a pont 9,9 NM-re van a BUD VOR-tól, a 356-os radiálon. BP638-nál a track 086°-ra fordul, amíg el nem éri a NORAH pontot, ami 33,4 mérföldre van a BUD VOR-tól, a 062-es radiálon.

⁴ SID: Standard Instrument Departure, azaz szabványos műszeres indulási eljárás.

⁵ VOR: VHF Omni-directional range, VHF körsugárzó adó.

Tehát egy hagyományos indulási eljárás a SID, azaz Standard Instrument Departure – azaz szabványos műszeres indulási eljárás, amit lényegében a felszállástól a TMA⁶-ból történő kilépőpont eléréséig tart.

Az indulási eljárásokkal szemben támasztott főbb jellemzők és követelmények [3] és [4] szerint:

- általánosságban, az indulási eljárás azért van, hogy megfelelő akadálymentességet adjon, közvetlenül a felszállás után, amíg a repülőgép el nem ér egy útvonali szegmenst. Az indulási eljárások tartalmazzák, de nem kizárólagosan a szabványos indulási útvonalakat, és a kapcsolódó eljárásokat (az Annex 11, 3-as függeléke alapján);
- az indulási eljárást légiforgalmi irányítás céljából, légtér menedzsment (forgalom szervezés) céljából, vagy egyéb okokból (például zajcsökkentés) követelik meg, és az indulási útvonalat nem kizárólag az akadálymentességi követelmények szabják meg;
- a doc. 8168 szerint az indulási eljárásokat az üzemeltetők, az ATC, és egyéb résztvevők folyamatos konzultációjával kell fejleszteni;
- gazdaságosság: minden kísérletnek, amit a gazdaságosság érdekében tesznek, hogy minimalizálva legyen az indulási eljárás végrehajtási ideje, és az igénybe vett légtér mérete, arra kell irányulnia, hogy a tervezett eljárások össze legyenek egyeztetve a biztonsági követelményekkel;
- az indulási eljárásokat vagy megadott útvonalakként, vagy irányítatlan indulási eljárás-ként (ld. doc. 8168, első rész, harmadik szakasz, negyedik fejezet – „Omnidirectional departures”) publikálják;
- a fordulókhöz hozzárendelt akadálymentességi területek tervezésekor a doc. 8168 2. szakaszának 3. fejezetét „Forduló-területek felépítése” célszerű alkalmazni. A rádiónavigációs adók karakterisztikája, és a fixek tűrései a doc 8168 2. szakaszának 2. fejezetében találhatóak.

Természetesen mindez, ami fel van sorolva, nem kötelezően betartandó előírás, hiszen az ICAO PANS⁷ betartása nem kötelező, de célszerű, hogy bármely repülőtérre elkészített eljárások a világ bármely részéből érkező/induló hajózószemélyzet számára ugyanazt jelentsék.

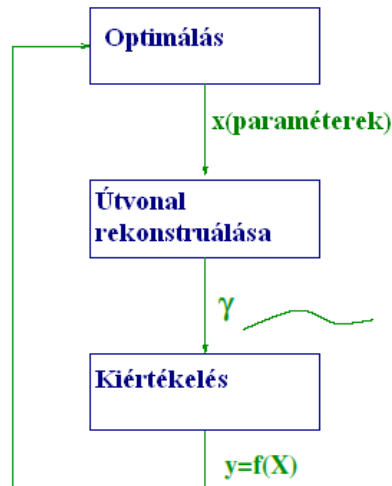
Ideális esetben egy SID geometriailag úgy néz ki, hogy a légijármű felszállás után egyenes szakaszon haladjon a kilépőpont irányába, illetve legfeljebb egy töréspont legyen az útvonalán, ahol fordulót kell végrehajtania. Az első waypointnak célszerűen 3–5 NM-ön belül kell lennie, a pályaküszöbötől mérve, illetve a kilépőpont felé vezető fordulót is tekinthetjük annak, ekkor a fordulót 3–5 NM-re kell a pályaküszöbötől elhelyezni.

Az indulási eljárások vizsgálata

Az indulási eljárásokat rekurzív elven vizsgáljuk, az alábbiak szerint:

⁶ TMA: Terminal Maneuvering Area, a repülőtér körüli

⁷ ICAO PANS: a nemzetközi polgári repülési szervezet (ICAO) 8168. számú kézikönyve, a léginavigációs szolgálatok eljárásait tartalmazza. (Procedures for Air Navigation Services) [4]

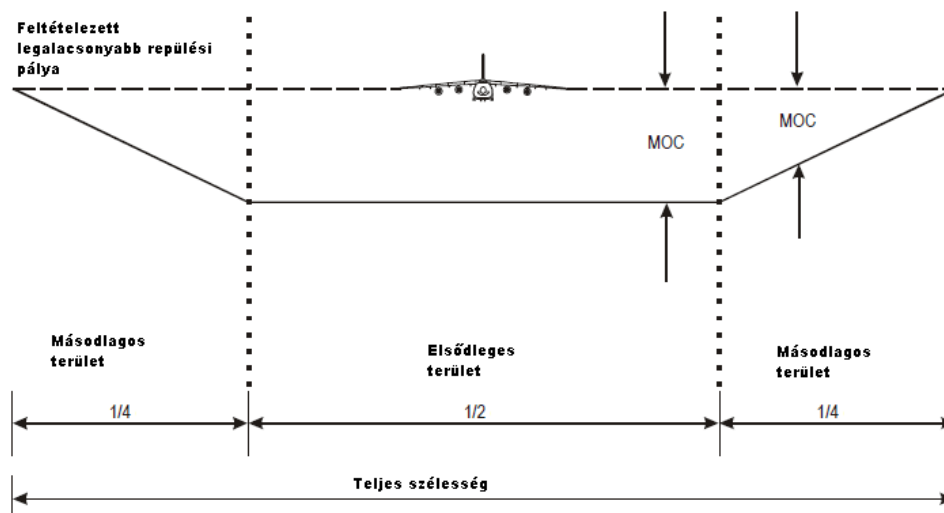


2. ábra Egy adott útvonal optimalizálásának lépései [12] nyomán

A lépéseknél fontos megjegyezni, hogy a tulajdonképpeni tervezés a legelső lépéssel kezdődik, miszerint adott szempontok alapján kiértékeljük az eljárást. A mindenkor legfontosabb szempont, hogy az akadálymentesség biztosítva legyen. Az önfejlesztő algoritmus változtat az adott paramétereken, hogy az útvonal pl. Az optimalizált eljárás kipróbálása után a visszajelzések, ill. adatrögzítő eszközök segítségével kinyert repülési pályaadatok alapján rekonstruáljuk a berepült útvonalat. Ez alapján meg tudjuk határozni a fejlesztendő paramétereket.

Korlátozó feltétel – az akadálymentesség

Az akadálymentesség biztosításához a doc 8168 alábbi ábráját célszerű elemezni:



3. ábra Akadálymentességi területek

Minden szegmensnek van egy megfelelően hozzárendelt területe, védett légtere, ahogy a fenti ábra is mutatja. Rendszerint az útvonal mindkét oldalán szimmetrikus a védett terület. Megkülönböztetünk elsődleges és másodlagos területeket, azonban sok esetben csak az elsődleges területek használata engedélyezett. Ahol vannak másodlagos védett területek, minden oldal külső része (névlegesen a teljes szélesség 25 százaléka) számít a másodlagos területekhez.

Egy adott „p” pont másodlagos védett légtereit két fix között lineáris interpolációval (egyenese arányosság) lehet meghatározni, az adott fixek szélességéből az alábbi formula alapján:

$$W_{sp} = W_{s1} + \frac{D_p}{L}(W_{s2} - W_{s1})$$

ahol:

- W_{sp} - a másodlagos terület szélessége „p” pontnál
- W_{s1} - a másodlagos terület szélessége az első fixnél
- W_{s2} - a másodlagos terület szélessége a második fixnél
- D_p - „p” pontnak az első fixtől mért távolsága a névleges pályán mérve
- L - a két fix távolsága a névleges tracken mérve.

A másodlagos légterek MOC ⁸(Minimum Obstacle Clearance) értékét a teljes MOC értékből egyenes arányossággal kapjuk meg, az alábbi formula szerint:

$$MOC_{sy} = MOC_p \cdot \left(1 - \frac{Y}{W_s}\right)$$

ahol:

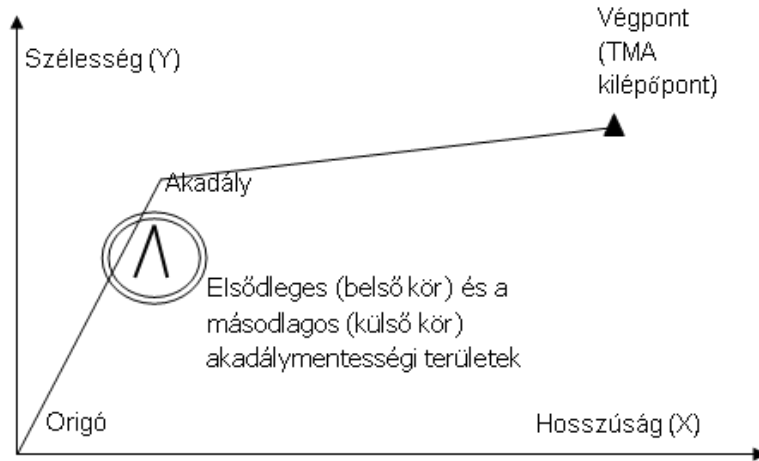
- MOC_p - az elsődleges terület MOC értéke
- MOC_{sy} - a másodlagos terület MOC értéke
- W_s - a másodlagos terület szélessége
- Y - távolság az akadálytól – az elsődleges terület szélére a névleges pályától bocsátott merőlegessel mérve

Megjegyzés: a doc. 8168-ban található összes számítás és táblázat NEL⁹ szerint értendő, 2000 feettel tengerszint felett, és +15°C-os hőmérséklet esetére.

Ha egy algoritmussal generálunk eljárásokat, célszerű az akadálymentességi vizsgálatot „megfordítani”, ahogy [1]-nél is ismertetésre került. Tehát az akadály körzetét kell vizsgálni, hogy a generált track „belelóg”-e az elsődleges, ill. másodlagos síkokba. Ha a generált track metszi mindkét kört, az eljárás nem biztonságos. Ha csak két metszéspontunk van (a külső körben) a track a másodlagos területen halad át. Ha ez a helyzet, az eljárás tovább vizsgálható, mivel a másodlagos terület limitjei lineárisan csökkennek.

⁸ MOC: Minimum Obstacle Clearance, azaz minimális akadályoktól való távolság.

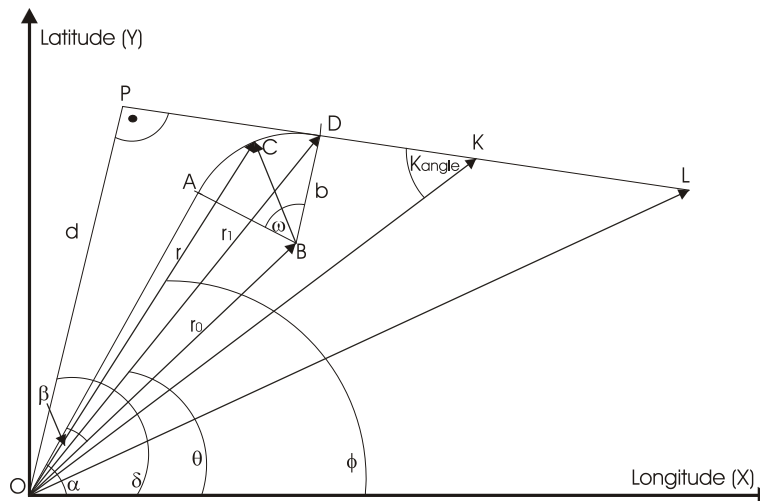
⁹ NEL: Nemzetközi Egyezményes Légkör, a szakirodalom ISA-ként (International Standard Atmosphere) is hivatkozik rá. Egységes ún. műlégkör, az alábbi feltételekkel: teljesen száraz, tengerszinten 1013,25 hPa légnyomás, 15 °C hőmérséklet és a gradiens 2 °C 1000 lábanként.



3. ábra A modell egyszerűsítése

Az egyszerűsített modell ismertetése

Hogy tisztában lehessünk a modell kiértékelésével, az alábbiakban az egyszerűsített eljárás-vizsgálati matematikai modellt ismertetjük.



4. ábra A modell egyszerűsítése, forrás: [1]

Egy polárkoordinátás rendszerben a kört (r, φ) ismeretében az alábbi formában írhatjuk fel:

$$r^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \alpha) + r_0^2 = a^2, \quad (1)$$

ahol r_0 a középpont első koordinátája $(\alpha - \beta)$ így $\alpha = \arctan \frac{b}{a}$ a kör sugara. Így az egyenlet B középponttal és b sugárral, ha $r > a$,

$$r^2 - 2r\sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\varphi - \left(\alpha - \arctan \frac{b}{a}\right)\right) + (a^2 + b^2) = b^2 \quad (2)$$

r_1 általában $r_0 + b$, mivel nem lehet nagyobb a sugárnál:

$$r_1 = r_0 + b (< r_0 + b) \quad (3)$$

Az egyenes szakasznál $\tan \alpha$, és A pont adott. Az OBC koszinusz tételt alkalmazva, hogy megkapjuk r_1 -et, ami a forduló végpontja:

$$b^2 = r_0^2 + r_1^2 - 2r_0r_1 \cos \delta \quad (4)$$

$$r_1^2 - 2r_0r_1 \cos \delta + r_0^2 - b^2 = 0 \quad (5)$$

Kör egyenlete, egy érintőre $\theta = \varphi$ az alábbi $(r_0; \varphi)$ érintési pontban:

$$r(\theta) = r_0 \sec(\theta - \varphi) \quad (6)$$

Az ív másik pontja $D(d, \delta)$ sugara pedig b .

Az origóból merőlegest állítva $P(r_0, \theta)$ pontban. Összekötjük D és O pontokat majd megkapjuk a DOP derékszögű háromszöget, ahol $DO=d$ és DOP szög $= \delta - \theta$. Ezért

$$OP = r_0 = d \cdot \cos(\delta - \theta) \quad (7)$$

OPK derékszögű háromszög, ezért $\theta = \frac{\pi}{2} - K_{szög}$, ezért

$$K_{szög} = \pi - \alpha. \quad (8)$$

Ezért:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha) = \frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \quad (9)$$

Amiatt, hogy

$OP = r_0 = \cos(\delta - \theta)$, ezért:

$$r_0 = d \cos \left(\delta - \left(\frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \right) \right) \quad (10)$$

ω meghatározása: az ív középpontjában, három szög van, az első az OAB derékszögű háromszögben, az első szög ezért $= \arctan \frac{a}{b}$. A második az OBD derékszögű háromszögben. A koszinusz tételt alkalmazva

$$d^2 = b^2 + \left(\sqrt{a^2 + b^2} \right)^2 - 2b\sqrt{a^2 + b^2} \cos 2, \quad (11)$$

A (10)-es formulát behelyettesítve:

$r(\theta) = r_0 \sec(\theta - \varphi)$ Ahol r és θ a vonal bármely pontjának polárkoordinátái, $\varphi = \theta$ ezért

$$\frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \quad (12)$$

és

$$r_0 = d \cos \left(\delta - \left(\frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \right) \right). \quad (13)$$

(12) és (13), alkalmazásával számítsuk ki $r(\theta)$ -t:

$$r(\theta) = d \cos \left(\delta - \left(\frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \right) \right) \cdot \sec \left(\theta - \frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \right)$$

A teljes eljárás hosszának meghatározása

Polárkoordináta rendszerben az "S" ív hosszának meghatározása az alábbival lehetséges [8]:

$$S = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{d}{dt} r(t) \right)^2 + r(t)^2} dt \quad (14)$$

A track hossza az alábbi háromból tevődik össze:

Elsőnek kiszámítjuk az egyenest: $r = \arctan \alpha$ egyenes. Itt a legegyszerűbb módja eldönteni a hosszat, ez legyen a .

Második rész:

$$r(\theta) = d \cos \left(\delta - \left(\frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \right) \right) \sec \left(\theta - \frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - (\pi - \omega)) \right) \quad (15)$$

Az eredmény: $b \cdot \omega$ mert a sugár b , a középponti szög ω , a kerület $2b\pi$ osztva 2π -vel és beszorozva ω -val:

$$\frac{2b\pi}{2\pi} \omega = b\omega. \quad (16)$$

Harmadik rész:

$r(\theta) = d \sec(\theta - \varphi)$ megfelel a DL szakasznak, a második egyenesnek.

Az optimalizációs modellekben a vízszintes komponensek vizsgálatakor ezen három rész egyenletének vizsgálata történik.

A teljes eljárás hossza a három rész összege, tehát $a + b \cdot \omega + DL$. Ennek a hosszának a minimalizálása szükséges lehet egy eljárás optimalizálásához. De az eljárás nem lehet túl rövid, mert az egyrészt nem adhat megfelelő emelkedést, és növelheti a személyzet terhelését. Pl. egy átlagos "Category A" repülőgép, pl. egy Boeing 737, vagy Airbus 320 esetén az Operation Manual (vagy a QRH, ill. "check-list") több, mint 30 elemet tartalmaz, amit felszállás után végre kell hajtani (ld [9] és [10]). Ugyan ennek nagy része az emelkedés elején végrehajtásra kerül, de még az átváltási magasság eléréséig is marad kb. 10-12 tennivaló. (ld. [14]) Ezek végrehajtása is megszabja a személyzet munkaterhelését, indokolatlanul rövid eljárási szegmensek ebben problémát okozhatnak.

Természetesen az akadálymentesség vizsgálata is fontos, ahogy korábban említettük.

A bakteriális evolúciós algoritmusos kiértékelés módjai

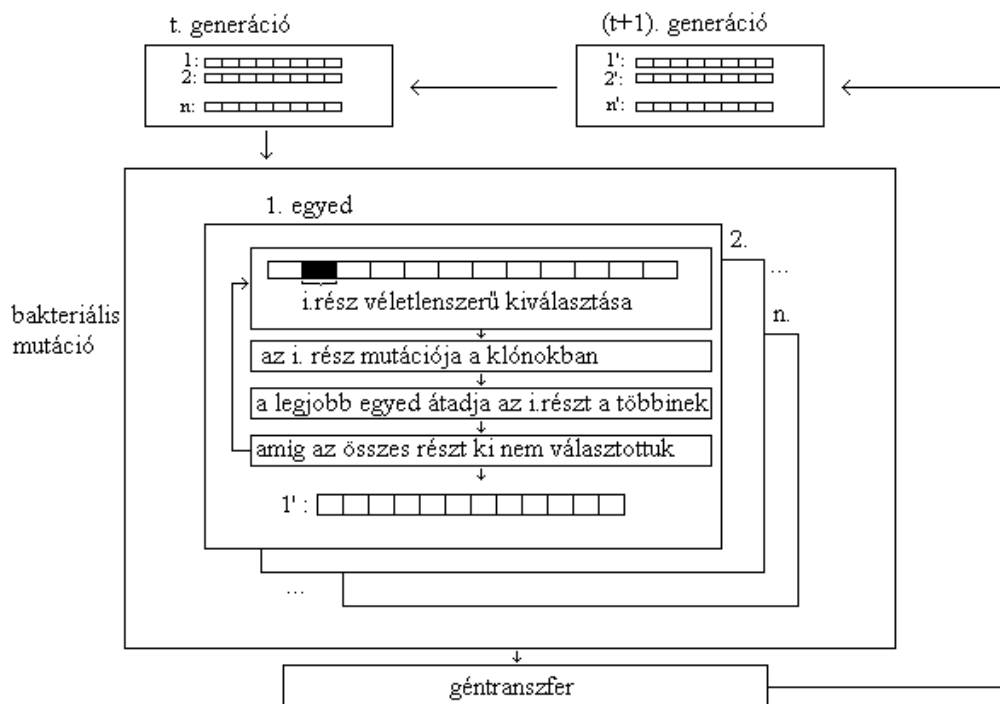
Első lépés: Létrehozunk véletlenszerűen egy $N_{induló}$ egyedből álló populációt.

Ez esetünkben azt jelenti, hogy a jelenlegi módszerekkel, akár manuálisan, akár a GeoTitan szoftver segítségével megtervezünk egy eljárást, ami az összes korlátozó feltételnek (amit a doc. 8168 második kötete tartalmaz) megfelel, és valamilyen előre rögzített stratégiát (pl. RNAV eljárás készítése, zajvédelmi korlátok, kapacitással kapcsolatos követelmények, szarak hossza – ld. az előző részben a kompromisszum a zajvédelem, és az üzemanyag-felhasználás között stb.) követ, és ezt sokszorozsírjuk, “klónozzuk” meghatározott számban.

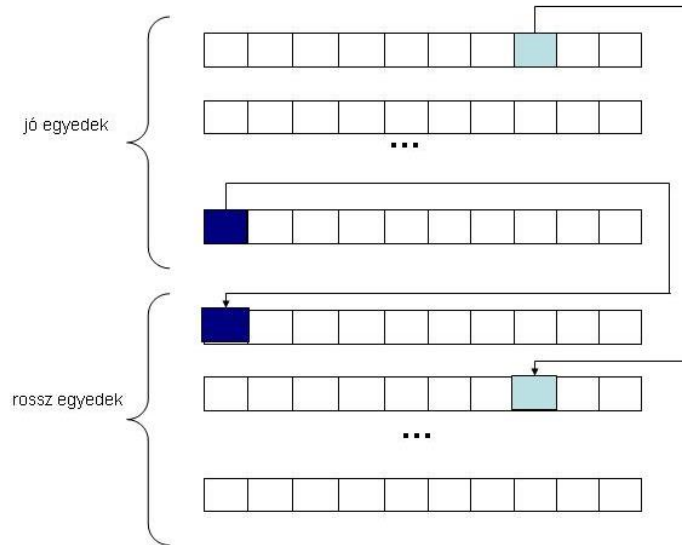
Másodszor, minden egyedre alkalmazzuk az ún. bakteriális mutációt, mely a következőképpen működik:

Az egyedet lemásoljuk $N_{klónok}$ példányban (ezek a klónok). A kromoszóma egy véletlenszerűen kiválasztott i . részét megváltoztatjuk a klónokban (mutáció), az eredeti baktériumban viszont nem. Utána kiválasztjuk a legjobb egyedet, és a kromoszómájának az i . részét átadjuk a többi egyednek. Ez azt jelenti, hogy a többi egyed kromoszómájának i . részét helyettesítjük a legjobb egyed kromoszómájának i . részével. Ezt a folyamatot, mely a mutáció-kiértékelés-kiválasztás-behelyettesítés lépéssorozatot jelenti, ismételjük addig, amíg a kromoszómának mindegyik részét (pontosan) egyszer ki nem választottuk. Amikor az egész kromoszómával végeztünk, kiválasztjuk a legjobb egyedet (pontosabban 3 legjobb egyedet), a többi $N_{klónok}$ egyedet pedig megszüntetjük.

A következő lépésben következik a géntranszfer művelet, ahogy az alábbi ábra mutatja.



5. ábra A vázlatos működés (Dr. Botzheim nyomán)



6. ábra A géntranszfer művelet (Dr. Botzheim nyomán)

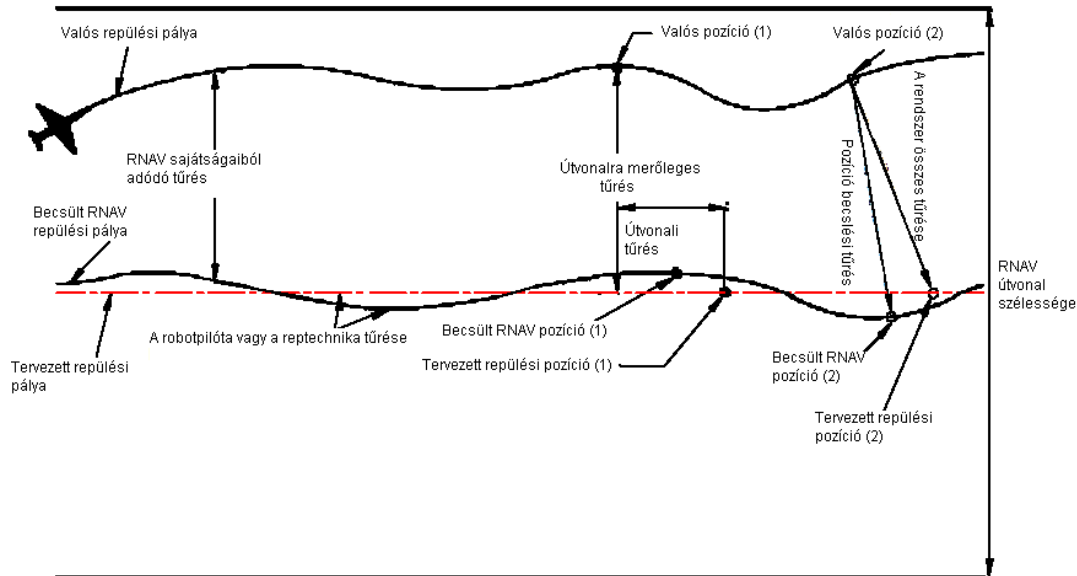
Ezután a populációt rendezzük az egyedek jósági értéke szerint, majd felosztjuk két fél populációra. Az egyik alpopulációba a jobb egyedek kerülnek, a másikba pedig a rosszabbak.

Ehhez minden baktérium változatot ki kell értékelnünk. Az értékelés alapja az a kritérium rendszer, amit az első fázisban meghatároztunk. A kiértékelés nem abszolút számokkal történik, hanem az alapján, hogy a megváltoztatott baktérium az eredeti, manuálisan szerkesztett változathoz képest mennyire tér el, pozitív vagy negatív irányban.

A kiértékelés folyamatát az alábbiakban foglalhatjuk össze:

A szabványok [3] és [4] tartalmazzák az eljárásokra vonatkozó megfelelő tűréseket. Például a Basic RNAV, azaz B-RNAV esetén a pontosság ± 5 NM. Ez az RNP-5-ös navigációs pontosságnak felel meg. Ez azt jelenti, hogy az útvonal 95%-ában a repülőgépnek a kijelölt útvonal ± 5 NM-es sávjában kell tartózkodnia.

A kiértékelés folyamán vizsgálni kell, hogy a vizsgált útvonal útvonali tűrésén belül a repülőgépek érinthetnek-e pl. zajérzékeny területet, vagy bármi más olyan részt, ahol (ha teljesül a megkívánt RNP pontosság) az új eljárás esetleg problémákat okozhat. (Természetesen, amennyiben akadálymentesség szempontjából rendben van – ez a legjobban korlátozó feltétel, ha valaminél az akadálymentesség sérül, pl. az elsődleges területen – ld. 3. ábra, akkor azt az eljárást tovább nem vizsgáljuk, az előbbi példában a „rossz egyedek” közé helyezzük.)



7. ábra RNAV útvonal tűrései [3]

A tervezett útvonaltól való „kilengések” vizsgálatának problémáját úgy kezelhetjük, hogy a továbbiakban különféle módszerekkel (pl. Branch and Bound algoritmussal [13]) a pozíciók halmazát vizsgáljuk, és azokat az eljárásokat részesítsük előnyben a „géntranszfer” művelethez, ahol a valós pozíciók nagy része elkerüli a problémás területeket.

A lényegi kiértékelés az eljárások egészére ár/érték arány alapján történik: azaz mérjük, hogy az egyes változatok a pontozási rendszerben mennyivel jobbak, de azt is, hogy ez az esetleges jobb eredmény mennyivel több ráfordítással, azaz más szárhosszak, gazdaságosabb emelkedési feltételek a SID-eknél, stb. teljesíthető, és ezeket az előre megadott költségmutatókkal össze-szorozva megkapjuk a javulás becsült költségvonzatát.

Mit kell az algoritmusnak figyelembe venni?

1. Az adott útvonali szegmens hossza;
2. az adott útvonali szegmens szélességi kiterjedése, akadálymenteségi területei;
3. az adott útvonali szegmens emelkedési/süllyedési gradiense;
4. az akadályfelületek esésviszonyai, melyeket az alábbi, meghatározott adatok felhasználásával lehet kalkulálni:
 - földi navigációs berendezések pontossága, vagy területi navigációs pontosság;
 - fedélzeti navigációs berendezés pontossága;
 - repüléstechnikai/időzítési pontosság;
 - műszer szerinti sebesség – valós sebesség;
 - várhatóan alkalmazott bedöntés;
 - az adott repülési szegmens magassága;
5. várható környezeti adatok (hőmérséklet, szél).

Az első három értéket változtatni is tudjuk az eljárások javítása érdekében, ezeken felül még az alábbi paraméterekkel kell az algoritmusnak foglalkoznia:

- forduló geometria, ne legyenek pl. 200 csomónál, 90 fokos irányváltoztatást megkövetelő fordulók. A fordulók geometriáját (empirikus úton fejlesztve) a doc 8168 is tartalmazza;

- szélspirál: Amikor vége egy szegmensnek, és forduló következik, oda szélspirált szerkesztünk, a forduló tőrésének meghatározásához.

A fordulók (amennyiben szükséges) geometriai paramétereit:

- magasság;
- műszer szerinti repülési sebesség (IAS);
- várható szél;
- bedöntés;
- repüléstechnikai tőrések.

ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI MUNKÁK

Összefoglalásképpen megemlíthetjük, hogy az indulási eljárások fejlesztése során (egyelőre) az alábbi paramétereket lehet automatizáltan, önfejlesztő algoritmusok segítségével vizsgálni, és optimalni:

- akadálymentesség (mint legfontosabb, korlátozó tényező).
- optimális emelkedés.
- a jelenlegi légtérszerkezetből adódó korlátok figyelembe vétele.
- zajvédelmi szempontok, a különösen zajérzékeny területektől minél távolabb megszerkeszteni az útvonalat.

Az adott eljárás kiértékelése folyamán pedig az alábbi lépéseket tehetjük (egyúttal meghatározva a további kutatások irányát):

- egy adott eljárás vízszintes síkjának kielemezése – az útvonal vonalvezetésének minél optimálisabb meghatározásához a pályaadatok elemzése hagyományos numerikus módszerekkel (pl. B-spline, Bézier görbék, ld. [12]) vagy egyéb úton modellezni a repülőgépek valós pályáját;
- a kapott valós pályaadatok alapján meghatározni a generált eljárások ellenőrző-függvényének paramétereit.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Fehér, Bakó: Légiforgalmi indulási eljárások optimalálása, Repüléstudományi konferencia, 2013. április 11. Konferencia kiadvány. Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Katonai Repülő Tanszék. ISSN 1789-770X
- [2] Fehér, Bakó and Földesi (2012): Cost and fuel-efficient departure and arrival air traffic procedure design method, 8th Annual International Bata Conference for Ph.D. Students and Young Researchers, Tomáš Bata University, Zlín, Czech Republic 19th April 2012
- [3] EUROCONTROL – Guidance Material for the Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV) 3rd edition, 2003. március
- [4] ICAO Doc. 8168 Volume II 5th Edition, ICAO, 2005. június
- [5] Dr. Botzheim János – Intelligens számítástechnikai modellek identifikációja evolúciós és gradiens alapú tanuló algoritmusokkal. – Ph.D. értekezés BME-VIK Távközlési és Médiainformatikai Tanszék Budapest, 2007
- [6] HungaroControl – Hungarian Air Navigation Services: AIP Hungary SID Map LHBP 31 AIRAC AMDT 003/2009 Chapter: AD-2, Page: LHBP- ARR 31R-1.
- [7] Kirchner, F.: Optimal unconstrained solution to conflict resolution in 3-d airspace. Manuscript (2001).
- [8] George B. Thomas, Jr: Thomas' Calculus, 10th edition, Addison Wesley, 2003. Section 8.5, p 432
- [9] Boeing Commercial Airplanes: 737-6Q8/-7Q8/-8Q8 Flight Crew Operations Manual, NP. 21.36-39, pp. 140-143. Revision Number: 14, Revision Date: September 25, 2009.
- [10] Airbus Industrie: A320 family Flight Crew Operating Manual, 3.05-3.06, pp. 162-164. Airbus, 2009.
- [11] Parsopoulos, K.; Vrahatis, M. : Particle swarm optimization method in multiobjective problems. Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing (2002) (SAC). pp. 603–607.
- [12] D. Delahaye et al. : Mathematical Models for Aircraft Trajectory Design : A Survey. EIWAC 2013, 3rd ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo (2013)
- [13] Jens Clausen: Branch and Bound Algorithms - Principles and Examples. Department of Computer Science, University of Copenhagen, Universitetsparken 1, DK-2100 Copenhagen, Denmark
- [14] Malév Zrt: Operation Manual, Part B Rev. 13. pp.68-69. 2009. szeptember 25.