

## Összetartozó sebesség és kormányzási szög jelek modell bázisú előállítás, önvezető elektromos járművek valós mozgásfolyamatainak tesztelésére, valamely város közlekedési hálózaton

Péter Tamás\*, Rózsás Zoltán \*\*, Lakatos István \*\*\*

\* BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék (e-mail: peter.tamas@mail.bme.hu).

\*\* Autóipari Próbapálya Zala Kft (e-mail: zoltan.rozsas@apz.hu)

\*\*\* Széchenyi István Egyetem, (e-mail: drlakatosi@gmail.com)

Abstract: A kutatás célja olyan laboratóriumi modell alapú diagnosztikai eljárás kidolgozása, amely az önvezető elektromos járművek valamely város, közlekedési hálózat, vagy pályán történő valós mozgásfolyamatok tesztelését hajtja végre. A teszt, a valós forgalmi körülményeknek megfelelő összetartozó, sebesség és kormányzási szög jelek generálása, és amelyeket fel is használ a tesztvizsgálatoknál.

### 1. BEVEZETÉS

Az eljárás figyelembe veszi a trajektória követés valós folyamatát is. A kijelölt trajektórián történő mozgást oly módon hajtja végre, hogy a robotpilóta, vagy vezető, behatárolt mértékű tetszőleges hibát is elkövethet a trajektória követésnél, a haladáskor. Az egyes jármű sebességének előállításánál egyaránt figyelembe kell venni az adott forgalmi viszonyokat, az-az a hálózati szakasz környezetében közlekedő járművek összetételét és mozgását, továbbá azt, a napszakra, szezonálisokra is jellemző összetett közlekedési környezetet, amelyet a nagyméretű hálózati folyamatok határoznak meg. Ennek a vizsgálatnak a tárgyát képező modellbázisú eljárás tehát, egy olyan elméleti megalapozás, amely egyaránt figyelembe veszi a trajektória menti mozgást és a mikroszkopikus járműkörnyezet és a makroszkopikus forgalmi környezet kapcsolatrendszerét is.

### 2. AZ IDM MODELL FORGALMI ALKALMAZÁSA

Az Adaptive Cruise Control (ACC) olyan gépjárműforgalmi rendszer, amely lehetővé teszi a jármű számára, hogy a sebességet a környezethez igazítsa. Az Intelligens Driver Model (IDM) egy adaptív tempomat (ACC) modell, amelyet széles körben használnak a közlekedési kutatásokban a longitudinális mozgások modellezéséhez. Treiber, Hennecke és a Helbing 2000-ben, a Drezdai Műszaki Egyetem közlekedési laboratóriuma dolgozta ki az Intelligens Vezető Modellt (IDM), amelyet a BMW autógyár használ.

Az IDM modellt folyamatos forgalomáramlás modellezésében alkalmazzák az autópálya és a városi forgalom szimulációjánál. Autókövető modellként az IDM az egyes járművek helyzetének és sebességének dinamikáját írja le. A Multi-modell nyílt forráskódú közúti közlekedési

szimulátor esetében Treiber és Helbing (2002) az IDM-et használja a hosszirányú jármű mozgásának szimulálására és ez a szimulátor sávváltási stratégiát is bemutat. Modell-alapuló egysávos közlekedési inhomogenitását tanulmányoz Treiber et al. (2004).

A járműközlekedés stabilitását és az IDM paraméter érzékenységét vizsgálja Treiber és mtsai. (2006). Kesting et al. (2008) és javaslatot tesz az IDM modell vezetői paramétereinek kiterjesztésére. Vizsgálják az IDM-el felszerelt járművek hatását a forgalmi áramlásra és az utazási időkre, mint szűk keresztmetszete. Jerath (2010) szintén az IDM modellt használja és az Adaptive Cruise Control forgalmi folyamatokra gyakorolt hatását tanulmányozza. Fenti munkák eredményei azt mutatják, hogy az ACC járművek arányának növelése a forgalom hatékonyságának növekedését idézi elő az utazási idők csökkentésével. Treiber és Kesting (2011) az IDM segítségével tanulmányozta az instabilitást a torlódott forgalomban.

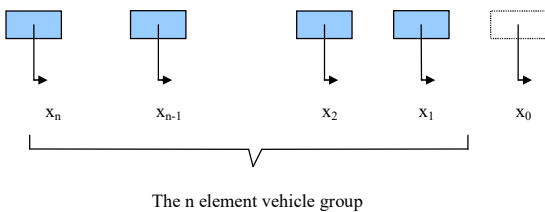
Az IDM modellnek számos előnye van a többi ACC modellel szemben a kalibrálás és az intuitív paraméterek szempontjából, továbbá a modellezés végrehajtása is egyszerű szimulációt igényel. Ennek ellenére, hátrányai is vannak a jármű és a vezető megfelelő tulajdonságainak biztonsága tekintetében. Az IDM ütközésmentes modell, ezért kritikus baleseti helyzetben a kívánt minimális távolság már nem elegendő a vezető biztonságának garantálására és vészfékezés esetén hajlamos a tényleges jármű lassulásának túllépésére.

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) munkáikban javaslatot dolgoztak ki az IDM modell pontosabb működésére és az IDM módosításaival foglalkoznak a gépjárművezető biztonsága és

a jármű valós képességének figyelembe vételével. A módosítás alapján, a vezetőnek már figyelembe kell vennie az őt kövöző járművek viselkedését is és ez által, egy új módosított IDM modellt fejlesztettek ki és tesztelt le mikroszkópikus szimulátorral a húr stabilizálás figyelembe vételével. Ez a módosított IDM modell már a valódi gépjármű-képességeket helyezte előtérbe.

Jelen munkánkban támaszkodunk a francia kutatókkal végezett közös modellre a hátrányok leküzdésére. Ez alapján, az IDM modell már nagyobb teljesítményt nyújt a vezető biztonsága érdekében, a valós reakciókat követve az ütközés közeli kritikus helyzetekben. Az intelligens járművezető modell módosítását és korszerű működését mutatja be, a jármű valós képességével kapcsolatban. A modellezés és kutatási munka komplex területet ölel fel, és egyaránt tartalmazza a mikroszkópikus és makroszkópikus modellezés megközelítéseit is, Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017). A bonyolult makroszkópikus forgalmi környezetet a nagyméretű hálózati modell generálja, amelyen a meghatározott trajektóriák szakaszain a mikroszkópikus forgalmi modell szimuláció biztosítja az egyedi járműmozgást a forgalomban. Ennek a mikroszkópikus modellnek azonban ugyancsak megfelelően kell reprodukálnia a dinamikus közlekedési folyamatokat és szintén validálnak kell lennie. Ennek megfelelően, Munkánk ebben a szakaszában támaszkodunk a Treiber et al. 2000a. 2000b. Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017) Intelligens Driver Model kutatásokra és fejlesztésekre.

**A klasszikus IDM modell jellemzői:** Egyetlen differenciálegyenlet-rendszer, amely egy sávon haladó n db. járművek esetét vizsgálja. A mikroszkópikus modell, egy láncmodell szerű hosszirányú dinamikát ír le. Minden vezető csak előre figyel és igyekszik egy megfelelő követési távolságot betartani. Nincs előzés, a járművek megtartják sorrendjüket, meghatározó szerepe van az első járműnek, ill. a csoportban haladó lassú járműveknek is.



1. ábra: az n elemű járműcsoport és a mozgásukat determináló környezet

A klasszikus IDM modellt tagonként, külön-külön álló differenciálegyenletekkel írják fel. Vizsgálatainkban ezt összefoglaltuk az alábbi (1) differenciálegyenlet-rendszerbe, ahol az i-ik jármű pillanatnyi pozícióját írja

le az  $x_i(t)$  függvény. A modellben alkalmazott paraméterek és függvények az alábbiak:

$a_i$  az i-ik jármű legnagyobb gyorsulása  
 $v_i$  az i-ik jármű kívánt sebessége  
 $s_i$  az i-ik jármű és az őt megelőző közötti előírt távolságkülönbség ( $i=1,2, \dots, n$ )

$$\langle \underline{A} \rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \langle \underline{V} \rangle^{-1} \underline{f}_1(\dot{x}(t)) + \langle \underline{S} \rangle \underline{f}_2(x(t)) = \underline{1} \quad (1)$$

$$\langle \underline{A} \rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, \dots, \frac{1}{a_n} \right\rangle; \langle \underline{V} \rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{v_1^4}, \frac{1}{v_2^4}, \dots, \frac{1}{v_n^4} \right\rangle;$$

$$\langle \underline{S} \rangle = \langle s_1, s_2, \dots, s_n \rangle$$

$$s_i = s_{0i} = const., \text{ vagy: } s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i) \quad (i=1,2,\dots,n).$$

$$\underline{f}_1(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \underline{f}_2(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(x_0 - x_1)^2} \\ \frac{1}{(x_1 - x_2)^2} \\ \dots \\ \frac{1}{(x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix}, \underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}$$

A módosított IDM modellt, amelyet ebben a munkában alkalmazunk a (2) egyenlet szemléltet. Ennek részletes leírását a Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), (2013) munkák tartalmazzák. Ez a modell már azt is figyelembe veszi, hogy a járművezetők figyelemmel kísérik az őket követő járművek mozgását is, 2.ábra.

$$\langle \underline{A} \rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \underline{V} \underline{f}_1(\dot{x}(t)) + \underline{S} \underline{f}_2(x(t)) = \underline{1}(t) + \underline{h}(t) \quad (2)$$

$$\langle \underline{A} \rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, \dots, \frac{1}{a_n} \right\rangle;$$

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} \frac{1}{v_1^4} & \frac{h_1}{v_2^4} & & & \\ & \frac{1}{v_2^4} & \frac{h_2}{v_3^4} & & \\ & & \frac{1}{v_i^4} & \frac{h_i}{v_{i+1}^4} & \\ - & - & - & - & - \\ & & & & \frac{1}{v_n^4} \end{bmatrix};$$

$$\underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} s_1^2 & h_1 s_2^2 & & & & \\ & s_2^2 & h_2 s_3^2 & & & \\ & & s_i^2 & h_i s_{i+1}^2 & & \\ - & - & - & - & - & \\ & & & & & s_n^2 \end{bmatrix}$$

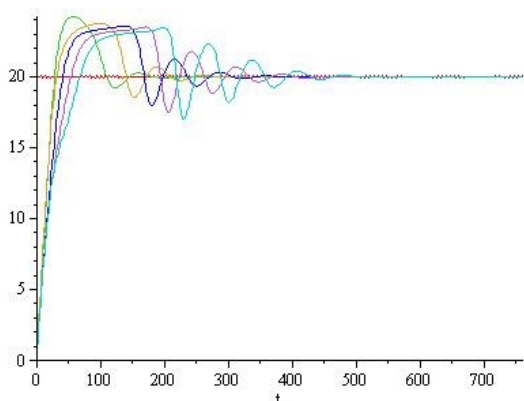
$$h(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ \dots \\ h_n(t) \end{bmatrix}; h_i(t) = h f_i(t) \cdot \frac{a_{i+1}}{a_i}; (i=1,2, \dots, n-1);$$

$$h_n(t) = 0.$$

$$s_i = s_{0i} = const., \text{ vagy: } s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i) (i=1,2,\dots,n).$$

$$\underline{f}_1(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \underline{f}_2(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\varepsilon_1^2 + (x_0 - x_1)^2} \\ \frac{1}{\varepsilon_2^2 + (x_1 - x_2)^2} \\ \dots \\ \frac{1}{\varepsilon_n^2 + (x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{1}(t) = \begin{bmatrix} 1(t) \\ 1(t) \\ \dots \\ 1(t) \end{bmatrix}$$



2. ábra: egy járműcsoport elindulást követő relatív távolságok beállása stabilizált sebességi állapotnál

### 3. AZ IDM MODELL ÉS A NAGYMÉRETŰ HÁLÓZAT KAPCSOLATA

Egy adott jármű sebességét és a követési távolságot a vezető határozza meg. A döntése azonban egyaránt függ a saját észleléseitől és a járműve által, a fizikai környezetről küldött jelzésektől, továbbá a hálózati forgalom helyi és általános hatásaitól.

Az útminőségi, meteorológiai, látási viszonyokból eredő fizikai hatások az adott járműsűrűségnél meghatározzák egy válaszható sebességtartományt. Adott szakaszon előre haladó, jármű-jármű hatásokból eredő dinamikus kapcsolatok forgalom leírására alkalmazható az előző pontban tárgyalt módosított IDM modell.

**Ugyanakkor, az IDM modellcsoport mozgásának dinamikája sem öntörvényű, ezt a nagyméretű hálózaton, hálózati szektorokon kialakuló vezérlő sebességek determinálják.** Lelassulnak, ha torlódás lép fel, megállnak, ha a forgalomirányító lámpa pirosra vált, de a reakciókésedelmi időket követően felgyorsulnak a megengedett legnagyobb sebességáthárig, ha az útszakasz szabad. **Ezt jelöli az 1. ábrán az  $x_0(t)$  vezérlő sebesség függvény, amelyet az egyes trajektóriáknál a nagyméretű makroszkopikus hálózati folyamatok határoznak meg.**

### 4. A HÁLÓZATI FORGALMI MODELL ALKALMAZÁSA

Ezekhez a kutatásainkhoz a szűkített hálózati forgalmi modellt alkalmazzuk, Péter T, and Bokor J (2011, 2010.1, 2010.2.), Péter T (2012), amely egy tartományban elhelyezkedő „n” szektorból álló  $x$  állapotvektorral jellemzett belső hálózati elemet tartalmaz. A modellhez „m” darab külső szektorok is tartozik, amelyek közvetlen kapcsolatokkal rendelkeznek valamely belső szektorral, ill., szektorokkal. Ez utóbbiak  $s$  állapotvektorát mérés alapján ismertnek tekintjük. Ennél a modellnél a kapcsolati hipermátrixot alkotó mátrixok közül, csak a  $K_{11}$  és  $K_{12}$  mátrixok játszanak szerepet, mert általuk képviselve van minden átadás, amely a belső szektorokra vonatkozik.

$$\dot{x} = \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x, s)x + K_{12}(x, s)s] \quad (3)$$

Ahol:  $x \in \mathfrak{R}^n$ ,  $\dot{x} \in \mathfrak{R}^n$ ,  $s \in \mathfrak{R}^m$ ,  $L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_n\}$ ,  $l_i$  a főátlóban a belső szakaszok hossza ( $\forall l_i > 0$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ),  $K_{11} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ ,  $K_{12} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ .

**A gyakorlatban fellépő késleltetések, amelyek nagy részben a reakció időből (észlelés, döntés, cselekvés: 0,6...0,7 s időtartam) és működtetésétől a hatás kialakulásáig eltelt időből (értéke: 0,15...0,3 s) származtatható időveszteségek figyelembe vétele, a valóságot pontosabban leíró matematikai modellt eredményeznek.**

**Ez esetben feltesszük, hogy az  $S(x)$  és  $E(x)$  belső automatizmusok  $x$  szerint, az  $u_{i,j}(t)$  forgalomirányítási lámpa függvények pedig  $t$  szerint folytonosan differenciálható**

függvények. Ez a modellezésnél különösebb megszorítás nélkül teljesíthető.

Hasonlóan, folytonosan differenciálhatóvá tehető az  $u_{ij}(t)$  lámpajel is az értelmezési tartományában, ha minden  $t_0$  szakadási pont  $\varepsilon_t$  sugarú környezetében a fenti módszert alkalmazzuk, ahol 1-ről 0-ra, illetve 0-ról 1-re történő értékváltozás lép fel. Ezáltal, folytonos dinamikus közlekedési modellt alkalmazunk és a gyakorlatban előforduló lassító, ill. reakciókésedelem-idő jelenséget is figyelembe vesszük a modellnél.  $S$  esetében, lassító jelenség lép fel, mivel óvatossá válnak a vezetők, amikor azt észlelik, hogy már nagyon tele van az a szakasz, amelyre éppen át akarnak hajtani.  $E$  függvényénél ugyan nincs késleltetés, de mivel egy szakasz kiürülése (amely egy időtartományon az utolsó jármű kilépése során valósul meg) időben folytonos járműsűrűség függvényt határoz meg ezen a szakaszon, ezért nincs ellentmondás az  $E$ -re is alkalmazott fenti modellparadigma esetében. Forgalmirányító lámpák esetében a reakció késedelem jelenség két módon lép fel. Egyrészt, a járművek nem indulnak el azonnal, amikor zöldre vált a lámpa, másrészt a valóságban a kereszteződésben előfordul, hogy a sárgára (ill., a pirosra) váltáskor szabálytalan „járműátfutás” történik. Ezeket a gyakorlatban valóban fellépő jelenségeket az átbocsátásnál a folytonosan differenciálható lámpajel alkalmazásával lehet figyelembe venni.

#### 4.1 A modell validálása

*Budapesten*, a Petőfi híd pesti hídfőtől a körúton északi irányban a Nyugati térig terjedő szakaszon történt, a lámpás kereszteződéseknél az FKF ZRt. Forgalomtechnikai Igazgatóság által az BME rendelkezésre bocsátott aktuális lámpa-beállítási adatok mellett és a helyszínen elvégzett forgalomszámlálási adatok alapján. A vizsgált útvonal az egyes szimulációs időpontokban bejárásra került GPS készülékkel felszerelt gépjárművekkel is. A járműves mérés során rögzítésre kerültek a valós sebességprofilokat.

Ez a körúti modell, egy tipikus vonali modell, amelynél a jellegzetes sebességfolyamatot a forgalmirányító lámpaprogramok határozzák meg. A validálásoknál a PannonTraffic programot alkalmaztuk. A szimuláció a valós lámpaprogramokat vette figyelembe, ezért a mért sebességfolyamatok időbeni kialakulását jól követte a szimuláció. A validálásnál a sebességhatárok legjobb megközelítését a valóságnak legjobban megfelelő járműsűrűségek beállításával végezte el a program a körút egyes szektorainál. Az alkalmazott sebesség-sűrűség törvény minden esetben a Greenshields (lineáris) függvény volt. A szimuláció és a járműves mérés során kinyert sebességprofilok összehasonlítása természetesen megmutatta, hogy a sebesség-idő függvényeket egy sztochasztikus folyamat egy-egy realizációjának kell tekinteni és ezeket ennek megfelelően, valószínűségelméleti, ill. statisztikai analízis útján kell vizsgálni. A vizsgálat a fentiekben leírt módon tehát városban történt, nagy forgalom és több forgalmirányító lámpás kereszteződést érintő szakaszon

történő áthaladás mellett. A nagyszámú, sebességprofilokra és motorteljesítményekre vonatkozó nemparaméteres statisztikai próba homogenitás vizsgálatra irányult. Az volt a vizsgálat tárgya, hogy a kétféle független valószínűségi változókból álló minta-halmaz (a GPS készülékkel mért és a forgalmi modell által szimulált értékek) azonos eloszlású sokaságból származnak-e, tehát a gyakorlatban tekinthető-e a két minta azonos eloszlásúnak. A vizsgálatoknál 95%-os szintet választva megállapítást nyert, hogy mindkét esetben a két-két minta 95% -os szinten homogénnek tekinthető. A vizsgálataink eredményei tehát megnyugtatóan igazolták, hogy a modell lehetővé tesz olyan egyedi sebességfolyamatok és származtatott motorteljesítmény folyamatok kinyerését, amelyek a valóságnak megfelelnek Peter, Fülep and Bede (2011).

*Győr esetében*. A validált modell a városmagban, az egyik legnagyobb forgalmat lebonyolító Szent István utat (1. sz. főút) és környékét foglalta magában. A modell validálásánál támaszkodtunk a város által 2012. évben elvégzett keresztmetszeti forgalommérésekre. A hálózatot jellemző fő adatok: 228 db. útszakasz, 9 jelzőlámpával irányított csomópont és 38 egyéb csomópont. A hálózati tartományhoz 18 input szakasz és 15 output szakasz tartozott. A forgalmat irányító jelzőlámpák fázisterveit a Magyar Közút Zrt. Győri Igazgatósága és Győr város Önkormányzata bocsátotta a rendelkezésünkre. A modell esetében 63 keresztmetszeti mérési adat állt a rendelkezésünkre a validálásnál. A szimuláció 24h-s valós időtartamra vonatkozott, melynek számítógépes futtatási ideje 2 perc 14 másodperc volt. A program bármely időpontból újra indítható az adott időpontban érvényes állapotjellemzők, mint kezdeti értékek figyelembe vételével. A validálás során, negyed óránként felülvizsgálta az aktuális disztribúciókat és az átadásokat befolyásoló tényezőket a mért keresztmetszeti forgalmi adatok legjobb megközelítéséhez. Az ily módon történő előrehaladás során a korrelációanalízis óránként hajtotta végre a 63 mérési pont figyelembe vételével. A vizsgált 63 keresztmetszetenél a mért és modell alapján számított óránkénti keresztmetszeti forgalmi adatok között, a korrelációs együttható értéke nagyon jól közelítette az 1 értéket, pl. a reggeli 7h-8h közötti csúcsforgalomnál  $r_{xy}=0.993$  volt, amely a gyakorlatban már 100%-os korrelációnak tekinthető, Peter, T. Fazekas S. (2014).

#### 4.2. A sebességfolyamatok analízise

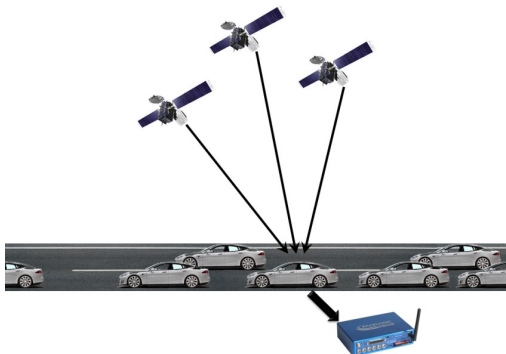
Modell-feltételezés, hogy  $\forall x_i, (x_i \in [0,1], i=1,2,\dots,n)$  állapotjellemzőhöz hozzárendelhető a  $v_i \geq 0$  sebesség érték is, egy  $x_i$  szerint folytonosan differenciálható  $f_i$  függvény alkalmazásával:

$$v_i = f_i(x_i(t)) \quad (4)$$

A makroszlópiikus hálózati modelltől az egyedi sebességfolyamatok kinyerésével és egy vezető-jármű modell felhasználásával, vizsgálni lehet az egyes járművek motor teljesítményigényét, energia felhasználását és a nem elektromos járművek károsanyag kibocsátását is. A

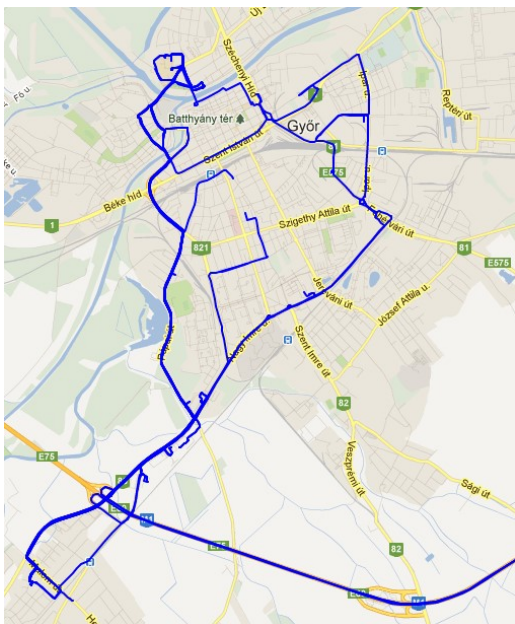
sebességfolyamatok alkalmasak modell-validálásra is. E-mellett ez a makroszkópikus modell alkalmas a kijelölt trajektótiák mentén az  $x_0(t)$  vezérlő jel kiintegrálására és a módosított IDM modell által generált sebességfolyamatok előállítására is.

#### 4.3. A mérésnél alkalmazott módszerek és eszközök Győrött

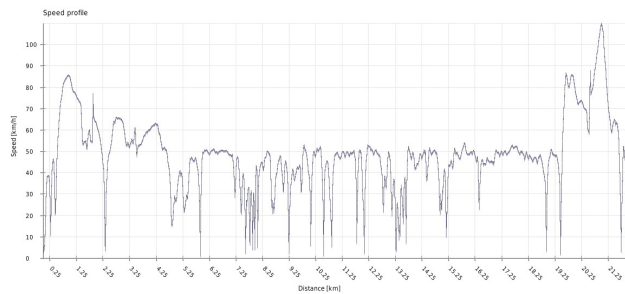


3 ábra GPS vevő készülékkel felszerelt jármű mérőrendszer

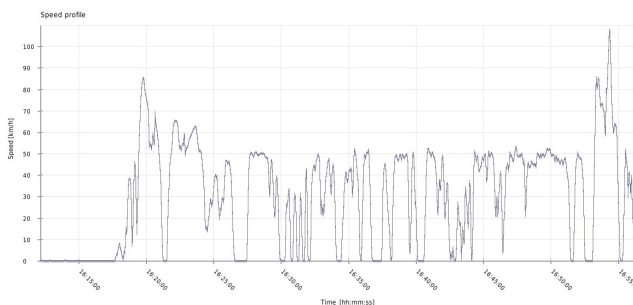
A GPS vevővel ellátott készülékek előnye az is, hogy a további feladatokkal összhangban, az adatbázis rendszerhez történő kapcsolódást és az adatok automatikus feldolgozását nagyban segíti 3 ábra. Ez által, nem csupán a sebesség értékek, hanem a GPS hely és időkoordináták is rögzítésre kerülnek a mérés során. A GPS-es mérések adatfájljai tárolásra kerültek a GPS koordináták alapján a megfelelő útszakaszokhoz hozzárendelve a területen végzett sebességmérés eredményeit, így a mérés során érintett valamennyi útszakaszra egyedi sebességfüggvényt kaptunk.



4. ábra GPS-es méréssel bejárt útvonalak Győr városában



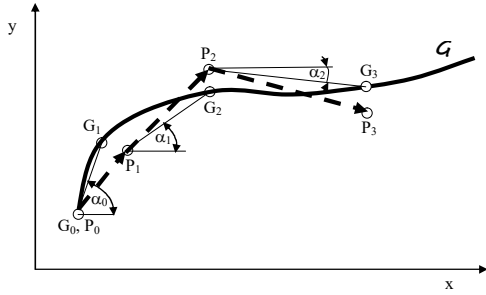
5. ábra a 004-es számú útvonalon mért sebesség értékek a távolság függvényében



6. ábra: a 004-es számú útvonalon mért sebesség értékek az idő függvényében

#### 5. A TRAJEKTÓRIA KÖVETÉSE

**A vezető, vagy robotpilóta által követett algoritmust egy rögzített Descartes koordináta rendszerben az alábbiak szerint modellezzük:** Egy  $G$  trajektóriát követ a járművezető/robotpilóta. A  $t_0$  indulási időpontban rajta van a  $G$  trajektórián, ezért ekkor a kiinduláskor:  $P_0 = G_0$ . A továbbiakban  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$  időpontokban születnek trajektória követési döntések. A  $t_i$  időpontokban a saját  $P_i$  pozíciójából az  $\alpha_i$  szög érték szerint megválasztott iránnyal és  $V_i$  sebességgel, kívánja elérni a trajektórián „kinézett” / ”kijelölt”  $G_{i+1}$  pontot. Azonban a  $t_{i+1}$  időpontban a  $P_{i+1}$  pontot érni el, mivel a választásainál  $\varepsilon_\alpha$  hibát követett el a szög megválasztásánál és  $\varepsilon_s$  hibát követett el a sebesség megválasztásánál. Ez így folytatódik tovább a geometriai stabilitást maga a  $G$  trajektória biztosítja.



7. ábra. robotpilóta által követett algoritmust

A stabilitás, amelyet a trajektória lekövetési módszer biztosít, ill. a határátmenetet alkalmazó differenciálegyenlet-rendszer. A mozgásfolyamat az alábbi hozzárendelésekkel írható fel, egyszerű ekvidisztáns időközök figyelembe vételével:

$$P_i = [x_i, y_i] \quad \rightarrow \quad G_{i+1} = [X(t_{i+1}), Y(t_{i+1})];$$

$$t_{i+1} = (i+1)\Delta t; \quad tg(\alpha_i) = m_i; \quad s_i = \overline{P_i G_{i+1}}; \quad (i= 0, 1, 2, \dots)$$

Figyelembe véve az irányvektort és a szakaszhosszakat és sebességet:

$$\underline{r}_i = [1, m_i], \quad \rightarrow \quad \underline{r}_i^0 = \left[ \frac{1}{\sqrt{1+m_i^2}}, \frac{m_i}{\sqrt{1+m_i^2}} \right]$$

$$\left( m_i = \frac{Y((i+1)\Delta t) - y_i}{X((i+1)\Delta t) - x_i} \right)$$

$$s_i = \sqrt{(X((i+1)\Delta t) - x_i)^2 + (Y((i+1)\Delta t) - y_i)^2}$$

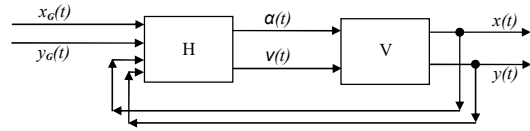
$$\left( v_i = \frac{s_i}{\Delta t} \right)$$

A fenti összefüggésekkel a trajektória követés diszkrét pontjai az alábbi rekurzív formulával, egyszerűen leírhatók:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{s_i}{\sqrt{1+m_i^2}}$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{s_i \cdot m_i}{\sqrt{1+m_i^2}}$$

A hibamentes trajektóriakövetés hatásmechanizmusát az alábbi ábra szemlélteti:



8. ábra

Abban az esetben pedig, ha hibával terhelt a trajektória követés, az alábbi algoritmus írja le és ábra szemlélteti a hatásmechanizmusát:

$$s_i \xrightarrow{real} s_i + Error_s = s_i \cdot \varepsilon_s$$

$$(v_i \xrightarrow{real} v_i + Error_v = v_i \cdot \varepsilon_s)$$

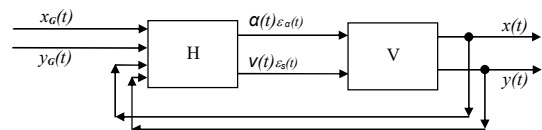
$$m_i \xrightarrow{real} m_i + Error_\alpha = m_i \cdot \varepsilon_\alpha$$

$$0.7 \leq \varepsilon_s \leq 1.3 \quad 0.7 \leq \varepsilon_\alpha \leq 1.3$$

$$\alpha \cong tg \alpha \quad \varepsilon_\alpha \cong m_\alpha$$

$$x_{i+1} := x_i + \frac{s_i \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1+m_i^2 \cdot \varepsilon_\alpha^2}}$$

$$y_{i+1} := y_i + \frac{m_i \cdot \varepsilon_\alpha \cdot s_i \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1+m_i^2 \cdot \varepsilon_\alpha^2}}$$

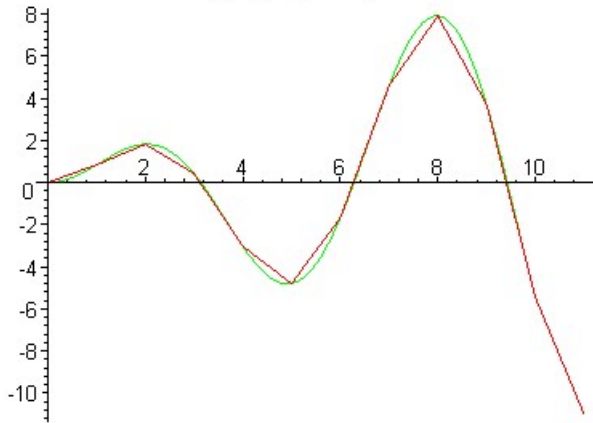


9. ábra

A trajektóriát követő módszer geometriai stabilitást már az előzetes szimulációs vizsgálatoknál is jól alátámasztják, ezt

szemléltetik 10.1 ábra abban az esetben, ha pontos a szög és távolság becslés, de a stabilitás akkor is biztosított, ha különböző mértékű, 5% - 30 % véletlent hibák terhelik az irány és távolság becslést, lásd 10.2 -10.4 ábrák.

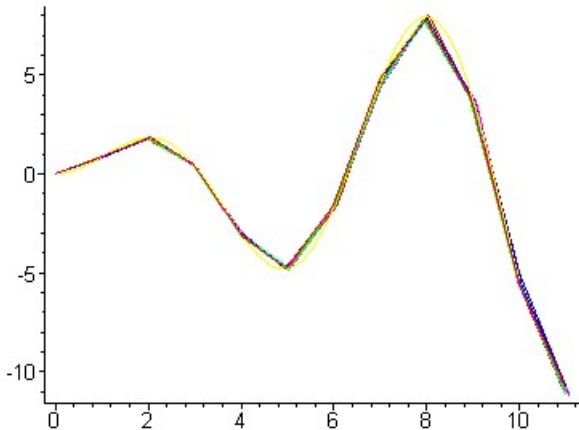
**Y et G Error 0**



10.1 ábra

12 sec időben egy útkanyart a hibátlan algoritmus diszkrét időpontokba pontosan lekövet

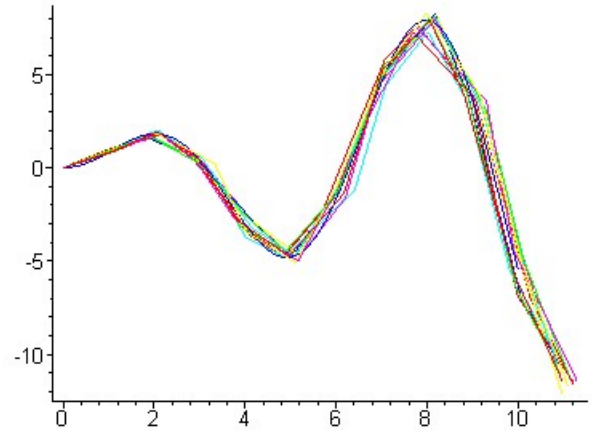
**Trajektoris\_MaxErr5**



10.2 ábra

12 sec időben egy útkanyart a 5%-os hibával az algoritmus diszkrét időpontokban jól lekövet

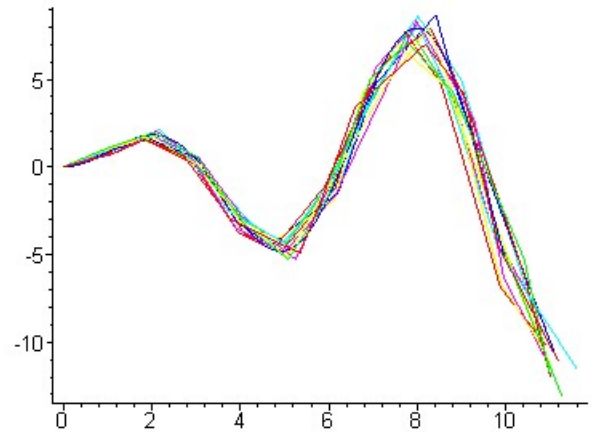
**Trajektoris\_MaxErr20**



10.3 ábra

12 sec időben egy útkanyart az extrém 20-30%-os hiba mellett az algoritmus stabilan működik

**Trajektoris\_MaxErr30**



10.4 ábra

Tovább vizsgálva a diszkrét pontokban történő trajektória követést, áttérünk a folytonos idejű követésre. Ekkor egy nem feltétlen a trajektória ponthoz tartozó kezdeti értékből kiindulva, folytonos  $\epsilon_a = \epsilon_a(t)$  és  $\epsilon_s = \epsilon_s(t)$  hibafüggvényeket veszünk figyelembe a trajektória követést leíró differenciálegyenlet-rendszer felírásánál.

$$x_{i+1} := x_i + \frac{s_i \epsilon_s}{\sqrt{1 + m_i^2 \epsilon_\alpha^2}}$$

$$y_{i+1} := y_i + \frac{m_i \epsilon_\alpha s_i \epsilon_s}{\sqrt{1 + m_i^2 \epsilon_\alpha^2}}$$

$$\Delta t \rightarrow 0$$

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i; \Delta y = y_{i+1} - y_i;$$

$$s_i = \Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}; m_i = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$\Delta x = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}};$$

$$\Delta y = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \varepsilon_\alpha \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}}$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2\right) \cdot \varepsilon_s}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}};$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}\right) \sqrt{\left(\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2\right) \cdot \varepsilon_\alpha \varepsilon_s}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}}$$

If  $\lim \Delta t \rightarrow 0 \rightarrow \exists \dot{x}(t), \dot{y}(t)$

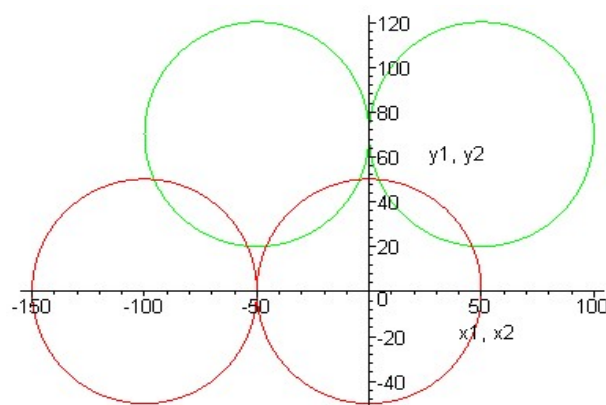
$$\dot{x}(t) = \frac{\dot{x}_G \sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2} \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2 \varepsilon_\alpha^2}};$$

$$\dot{y}(t) = \frac{\dot{y}_G \sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2} \cdot \varepsilon_\alpha \varepsilon_s}{\sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2 \varepsilon_\alpha^2}}$$

$$\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)} = \frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G} \varepsilon_\alpha; \quad \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2} \varepsilon_s$$

$$\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)} = \frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G} \varepsilon_\alpha; \quad \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2} \varepsilon_s$$

Ha egy tetszőleges kezdeti érték esetén és zérus hiba mellett ( $\varepsilon_s := 1$   $\varepsilon_\alpha := 1$ ) alkalmazzuk a levezetett eredményt, akkor a trajektória görbén egy távolságtartó, szögtartó és irányít tartó leképezést kapunk, az-az egy egybevágósági transzformációt hajt végre a trajektória leképezés, így pl. a 11. ábrán, egy egymáshoz kapcsolódó két 100-100 m átmérőjű körpálya leképezése látható egy tetszőleges kezdeti érték esetén:



11. ábra

## ÖSSZEFOGLALÁS

A folytonos trajektória követés esetére levezetett differenciálegyenlet-rendszere alapján megállapítható, hogy a trajektória követésre alkalmazott fizikai megfontolások jól hasznosíthatók a laboratóriumi tesztek alkalmával, valamilyen, előre meghatározott mértékű hibaelkövetést is magában hordozó vezetési technika, vagy stratégiához tartozó szimulációs kormányzási szögek időbeni előállításához. Itt biztosítani kell a kiválasztott trajektória pontokon egy alkalmas GPS alapú pontsorozatot a geometria felvételéhez. Ezen fut a követendő pont, amelynek sebessége egyaránt figyelembe veszi a bonyolult, valós forgalom okozta makroszkopikus környezetet és a járművek együttes dinamikájának megfelelően, a mikroszkopikus környezetet is a szimuláció során.

Ez a folyamat szolgáltatja az adott viszonyok közepette, a kormányzási szöveget, amely a szimulációs szögből a jármű és kormánygeometria alapján számítható. A trajektórián történő mozgás sebességét a szimulátor közvetlenül szolgáltatja a hektikus forgalmi viszonyoknak megfelelő módon. Mérésekre és validálásokra természetesen szükség lesz a városi forgalomban és a zalaegerszegi tesztpályán egyaránt.



## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## IRODALOM

- Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012).** Modified intelligent driver model, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 40(2): 53–60. <https://doi.org/10.3311/pp.tr.2012-2.02>
- Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013).** Modified intelligent driver model for driver safety and traffic stability improvement, *IFAC Proceedings Volumes* 46(21): 744–749. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00132>
- Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017),** Generalized Velocity–Density Model based on microscopic traffic simulation, *Transport*, DOI: 10.3846/16484142.2017.1292950 To link to this article: <http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2017.1292950> ISSN: 1648-4142 (Print) 1648-3480 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/tran20>
- Jerath, K., (2010).** Impact of adaptive cruise control on the formation of self-organized traffic jams on highway. Master's thesis, The Pennsylvania State University The Graduate School. Department of Mechanical and Nuclear Engineering.
- Kesting, A., Treiber, M., Helbing, D., (2008).** Agents for traffic simulation. *Physics and Society* 11, 325–356.
- Péter T, and Bokor J (2010.1)** Research for the modelling and control of traffic, In: Scientific Society for Mechanical Engineering ,33rd Fisita-World Automotive Congress: Proceedings, Budapest, Magyarország, 2010.05.30-2010.06.04. Budapest: GTE, 2010. pp. 66-73. (ISBN:978-963-9058-28-6)
- Péter T, and Bokor J (2010.2)** Modeling road traffic networks for control. Annual international conference on network technologies & communications: NTC 2010. Thaiföld, 2010.11.30-2010.11.30. pp. 18-22. Paper 21. (ISBN:978-981-08-7654-8)
- Peter, Fülep and Bede (2011)** The application of a new principled optimal control for the dynamic change of the road network graph structure and the analysis of risk factors, 13th EAEC European Automotive Congress 13th-16th June 2011. Valencia – SPAIN Society of Automotive Engineers (STA), 2011. pp. 26-36. (ISBN:978-84-615-1794-7)
- Péter and Bokor J (2011)** New road traffic networks models for control, *GSTF International Journal on Computing*, vol. 1, Number 2. pp. 227–232. DOI: 10.5176\_2010-2283\_1.2.65 February 2011
- Péter, T (2012)** Modeling nonlinear road traffic networks for junction control, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (AMCS)*, 2012, Vol. 22, No. 3. pp. 723-732. DOI: 10.2478/v1006-012-0054-1
- Péter T, Fazekas S (2014)** Determination of vehicle density of inputs and outputs and model validation for the analysis of network traffic processes **PERIODICA POLYTECHNICA: TRANSPORTATION ENGINEERING 42:(1) pp. 53-61.** (2014) (Budapest University of Technology and Economics)
- Treiber, M., Helbing, D., (2002).** Realistische mikrosimulation von straenverkehr mit einem einfachen modell. In: Symposium "Simulationstechnik ASIM.
- Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000a).** Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E* 62(2): 1805–1824. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805>
- Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000b).** Microscopic simulation of congested traffic, in D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf (Eds.). *Traffic and Granular Flow'99: Social, Traffic, and Granular Dynamics*, 365–376. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-59751-0\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59751-0_36)
- Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., (2004).** Microscopic simulation of congested traffic. *Physical Review E* 62, 1805–1824
- Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., (2006).** Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A* 360, 71–88.
- Treiber, M., Kesting, A., (2011).** Evidence of convective instability in congested traffic flow: A systematic empirical and theoretical investigation. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 17, 698–716.