

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

**SMART CITY APPLICATIONS FOR  
URBAN TRAFFIC ANALYSIS**

**BESENCZI RENÁTÓ**

**TÉMAVEZETŐ: DR. ISPÁNY MÁRTON**



**DEBRECENI EGYETEM  
INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA  
DEBRECEN, 2021.**



# 1 Bevezetés

Az okosváros alkalmazások kutatása és fejlesztése az elmúlt években egyre nagyobb figyelmet kap [13]. A crowd-sensing egy olyan adatgyűjtési technika, mellyel a városi környezet bizonyos tulajdonságait tudjuk mérni, vizsgálni, mint például a városi lakosság közlekedési szokásai [15]. Az elmúlt néhány évben számos úttörő autóiipari fejlesztéssel találkozhattunk. Egyrészt számos technológiai és autóiipari cég mutatott be önvezető autó prototípust, másrészt a tisztán elektromos hajtású autók egyre nagyobb számban vannak jelen az utakon. Egy érdekes információtechnológiai felvetés lehet, hogy egy központi okosváros alkalmazás tudja-e támogatni ezen járművek kényelmesebb használatát? Tud-e egy központi okosváros alkalmazás olyan szolgáltatásokat nyújtani, mellyel ezen járművek hatékonyabban üzemeltethetőek?

Ebben a dolgozatban a választ egy forgalomszimulációra alkalmas rendszerben adjuk meg, a Robocar World Championship (OOCWC) keretrendszerben. Az OOCWC elsődleges célja, hogy egy nyílt, open source kutatói platformot nyújtson városi forgalomirányítási algoritmusok tesz-

telésére, valamint az okosváros és az önvezető autók kutatási területei közötti lehetséges kapcsolatok vizsgálatára. Habár a rendszert egy olyan elképzelt jövőre fejlesztettük, amikor már csak önvezető járművek közlekednek az utakon, a jelenkor forgalmi helyzeteinek szimulálására, valamint scenárióelemzésére is alkalmas. A dolgozat első részében részletesen bemutatjuk a rendszert.

Az OOCWC részeként fejlesztett adatgyűjtő eszköz fontos eleme a rendszernek. Realisztikus forgalomszimulációhoz, scenárióelemzéshez, valamint hatékony útvonaltervezéshez valós adatok használata is szükséges. Emiatt készítettünk egy prototípust, mellyel adatokat tudunk gyűjteni városi környezetben. Az adatgyűjtő alrendszert a crowd-sensing paradigma mentén terveztük. Egy előzetes teszt során adatokat gyűjtöttünk Debrecenben, majd ezt az adatot aggregáció után felhasználtuk a Robocar City Emulator bemeneteként. Az adatgyűjtő neve Real-time Traffic Analyzer, az OOCWC rendszer továbbfejlesztett változata a Crowd-sourced Traffic Simulator. Az eszközről a dolgozat második részében írunk részletesen.

A dolgozat harmadik részében bemutatunk egy forgalomszimulációs modellt, mely gráfelméleten és véges Markov-láncokon alapul. Alapvető célja, hogy az autók eloszlása a térképen a szimuláció során stacionárius legyen. Ezen felül mutatunk egy módszert, mellyel a Markov for-

galomszimulációhoz szükséges Markov-kernelt tudjuk előállítani egy adott forgalmi gráfon. A szükséges adatokat a Taxi Trajectory Prediction nyílt térképi adatbázisból használjuk fel.

A disszertáció okosváros és városi közlekedés kutatási területeken hasznosítható fő eredményei (a publikációkkal együtt) az alábbiak:

#### I. Az OOCWC rendszer fejlesztésével kapcsolatban:

1. Részvétel az OOCWC forgalomszimulációs rendszer fejlesztésében [5], [6].
2. Egy crowd-sensing alapú adatgyűjtő rendszer fejlesztése [1], [3].
3. Az OOCWC rendszer továbbfejlesztése, hogy gyűjtött adatokat is tudjon kezelni [6], [1].

#### II. A szimulációs modell fejlesztésével kapcsolatban:

4. Egy véges Markov-láncokon alapuló közlekedésszimulációs modell továbbfejlesztése, valamint egy Markov-kernel készítésére alkalmas modell kidolgozása, nyílt adatbázisok használatával [4], [8], [7], [2].
5. A modell kiértékelése kicsi és közepes, valamint nagy méretben az OOCWC-ben [4], [8], [2], [1].

## 2 Adatgyűjtés az OOCWC rendszerben

**1. tézis.** *Kifejlesztettünk egy okosváros alkalmazás prototípust, mely forgalomszimulációra, valamint a robotautók és a okosváros kutatási területen felmerülő ötletek tesztelésére alkalmas.*

A Robocar World Championship (OOCWC) keretrendszer egy multiágens alapú szimulációs szoftver. Célja, hogy egy kutatási platformot biztosítson az önvezető autók és az okosvárosok lehetséges kapcsolatának vizsgálatára. Az OOCWC fő komponense a Robocar City Emulator (RCE), melynek fő feladatai: (1) a smart city server beolvassa a térképi adatbázist, majd a Boost Graph Library segítségével elkészíti a gráfot, (2) a traffic server forgalmat szimulál, (3) szimulációs ágensek csatlakozására ad lehetőséget.

Az OOCWC első gyors prototípusa a Justine. Három fő komponense az RCE, valamint két megjelenítő szoftver, az rewin és az rclg. A prototípus az OpenStreetMap (OSM) használja térképi adatbázisként, melyet az Osmium Library segítségével dolgozunk fel. A feldolgozás eredménye egy routing gráf és egy BGL gráf. A routing

gráfot a smart city server egy osztott memória szegmensbe tölti, melyen keresztül a többi komponens elérheti. A traffic server ezen a térképen szimulálja a forgalmat. Található egy minta kliens program is a prototípus mellett, mellyel a szerverhez történő kapcsolódás, valamint az osztott memória használata látható.

A szimuláció az OSM egy négyszög alakú részéből készített gráfon történik. A gráf minden élét 3 méteres részekre osztjuk. A Nagel-Schreckenberg (NaSch) [14] terminológia szerint minden ilyen él egy cellának felel meg, tehát minden cella 3 méter hosszú. A szimulációs lépésközt 200 milliszekundumra állítottuk. Egy él csak bizonyos számú járművet tartalmazhat (kiszámítható az él hosszának és a cella hosszának hányadosaként). Az egyszerűség kedvéért minden utat egy sávoként reprezentálunk irányonként. Az eredeti implementációban a járművek véletlenszerűen közlekednek. Az autóknak a térképen csak az eloszlása ismert. A kezdeti eloszlás érkezhethet valós, mért adatokból, vagy becsült adatokból. Eredményeinket a [5] és [6] publikációban összegeztük, a részletes leírás a dolgozat 2. fejezetében olvasható.

**2. tézis.** *Kifejlesztettünk egy adatgyűjtő eszközt, mely a városi forgalom mérésére alkalmas. Az eszköz járművekbe szerelhető és alkalmas a közlekedésben részt vevő járművek számolására, valamint az így gyűjtött adatok aggregált*

*formában történő továbbítására egy MQTT broker alkalmazás felé.*

A crowd-sensing egy adatgyűjtési módszer, melyet az OOCWC-ben az Automated Sensor Annotations modulnak feleltethetünk meg. Az általunk fejlesztett eszköz képes emberi beavatkozás nélkül adatgyűjtésre.

A fejlesztés első fázisában a rendszert egy ARM alapú hardverre implementáltuk. Mivel az ARM egy széles körben elterjedt processzor típus, könnyen elérhetőek rá fordítóprogramok, illetve használhatunk Beágyazott Linux Rendszereket. Választásunk a Zynq System-on-chip (SoC) alapú hardverekre esett. Az adatgyűjtő rendszert egy Digilent Zybo fejlesztői kártyára implementáltuk. A rendszer központi eleme egy Zynq Processing System, kiegészülve egy Processor System Resettel. Az egyes eszközök az Advanced Extensible Interface busz protokollon keresztül kapcsolódnak egymáshoz. Az egyes perifériák: Vincotech A1080-A GPS modul helymeghatározáshoz, SIM900 GSM modul internet eléréshez és OV7670 kamera modul. Ezen felül a SoC FPGA részét is hasznosítjuk, itt implementáltuk a memóriakezelést és az egyes perifériák kapcsolódását.

A képfeldolgozó algoritmus egy Haar-cascade alapú objektum osztályozás [16]. A videostream inicializálása után minden egyes képkockát eltárolunk egy Mat objek-

tumban, majd elvégezzük rajta az objektumkeresést. A kommunikációs protokoll MQTT, mely kifejezetten a *machine-to-machine* kommunikációra fejlesztettek. Alacsony átviteli overheaddel rendelkezik, valamint a publish-subscribe paradigma mentén működik. Eredményeinket a [3] publikációban összegeztük, a projekt részletes leírása megtalálható a disszertáció 3. fejezetében. A projekt nyílt forráskódú, letölthető a [1] tárolóból.

**3. tézis.** *Elvégeztük az OOCWC továbbfejlesztését, hogy gyűjtött adatok alapján is tudjuk inicializálni a szimulációt. Ezen felül teszteltük a forgalomszimulációs algoritmust és megmutattuk, hogy az algoritmus nem tartja a járművek eloszlását a szimuláció során.*

Az adatgyűjtő rendszer kimenete aggregált formában az RCE bemenetét jelenti. Ennek támogatására módosítottuk az OOCWC-t, a projekt neve Crowd-sourced Traffic Simulator. Kibővítettük az eredeti RCE szoftvert egy további osztállyal, mely a Traffic őosztály leszármazottja. Ebben az osztályban reprezentáljuk a mért adatokon alapuló forgalomszimulációt. Az osztály új tagjai a mért eloszlás, valamint egy függvény, ami ezen eloszlás alapján inicializálja a járműveket.

A bemenet egy egyszerű szöveges file, mely sorokat tartalmaz, minden egyes sor egy utca nevet és az ahhoz

tartozó sűrűség értéket tartalmazza. Ez alapján inicializáljuk a járműveket a térképre. Ezután megfigyelhetjük a szimuláció során az eloszlás esetleges változását. Megállapítottuk, hogy a rendszer eredeti implementációjában a járművek eloszlása a forgalmi gráfon nem lesz stacionárius, a szimuláció során az eloszlás megváltozik. Eredményeinket a [6] közleményben írtuk le, a részletes leírás megtalálható a dolgozat 3.2.-es fejezetében. A projekt nyílt forráskódú, letölthető a [1] tárolóból.

### 3 Szimulációs algoritmus

**4. tézis.** *Továbbfejlesztettünk egy gráfelméleten és a véges Markov-láncok elméletén alapuló modellt, mely a forgalmi gráfon tartja a járművek eloszlását. Újraparamétreztük a modellt, bevezetve a kétdimenziós stacionárius eloszlás koncepcióját. E paraméter becsléséhez a súlyozott legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztuk.*

A [9], [11] és [10] publikációkban egy városi forgalom szimulálására alkalmas sztochasztikus modell kerül bemutatásra. A modell véges Markov láncokon alapul, mely a város forgalmi gráfján értelmezett. Leírásra kerül egy átmenetvalószínűségi mátrix, mely a forgalom dinamikáját határozza meg, valamint az egyértelmű stacionárius eloszlás, amely a forgalom egyensúlyi állapotát jellemzi. Ebben az egyensúlyi állapotban az autók eloszlása a térképen változatlan marad egy bizonyos vizsgált időablakban. A Markov-lánc stacionárius eloszlása a járművek pillanatnyi valós eloszlását jelenti az úthálózaton.

A fenti modell alapján bevezetjük a „Markov random walk” és a „Markov traffic” fogalmakat. Az előbbi az egyedi járművek mozgását, míg az utóbbi a teljes forga-

lom dinamikáját írja le. A Markov traffic stacionárius eloszlása egy multinomiális eloszlás. Az ergodikus, véges Markov-láncok elmélete segítségével megmutatjuk, hogyan becsülhető egy úthálózat forgalma a stacionárius eloszlás segítségével. Bevezetünk egy új paramétert, nevezetesen a kétdimenziós stacionárius eloszlást, mely az átmenetváltószínűségi mátrix leírásához szükséges. Ezen paraméter becsléséhez a súlyozott legkisebb négyzetes (WLS) módszert alkalmazzuk.

Egy forgalmi rendszer elemzése a modellünkben a forgalmi gráf feltárását, valamint a kétdimenziós stacionárius eloszlás becslését jelenti mozgó szenzorokból érkező adatok alapján. Ilyen adathalmaz például a Taxi Trajectory Prediction dataset, mely nagy mennyiségben tartalmaz egymás utáni földrajzi koordinátákból álló útvonalakat. A becslés két részből áll, egyrészt egy naiv közelítésből, mely az empirikus gyakoriságát mutatja az egymás után következő átmeneteknek, valamint egy korrekciós tényezőtől, mely segítségével a kétdimenziós eloszlás marginális eloszlásai egyenlővé válnak. Ez utóbbi a úthálózati gráf Laplace mátrixától, valamint a forgalom irányultságától függ. Fontos megjegyezni, hogy ezek a statisztikai számítások egyszerű számolással előállíthatóak, tehát akár big data méretű adatokon is hatékonyan alkalmazhatóak.

Eredményeinket a [4], [8], [7] és [2] közleményben,

valamint a dolgozat 4.3-as fejezetében fejtettük ki részletesen.

**5. tézis.** *Kiértékeljük a modellünk teljesítményét kicsi, közepes és nagyméretű szimulációkban, valamint továbbfejlesztettük az OOCWC-t, hogy támogasson Markov traffic szimulációkat. Megmutattuk, hogy közepes és nagy méretben a WLS módszer jobb eredményeket mutat, mint a klasszikus maximum likelihood (ML) közelítés.*

A modellünk teljesítményét közepes méretben egy OSM-ből exportált erősen összefüggő gráfon mutattuk be. Az ML és a WLS alapú becslés hatékonysága jelentős eltérést mutat a becsléshez felhasznált trajektóriák számának függvényében. Egyrészt, az ML becslés abszolút torzítása nagyobb trajektóriaszám esetén alacsonyabb, a WLS esetén konstans. Másrészt, a WLS alapú becslés alacsonyabb trajektóriaszám esetén jobb, viszont magasabb trajektóriaszám esetén rosszabb, mint az ML alapú becslés. Mivel valós forgalmi rendszerek esetén az alacsonyabb trajektóriaszám tipikusabb, így a WLS alapú megközelítés pontosabb becslést ad a stacionárius eloszlásra, mint a klasszikus ML alapú módszer.

Nagyméretű szimulációkhoz implementáltuk a modellt az OOCWC-ben. Első lépésként kibővítettük az OSMReader modult, hogy alkalmas legyen Markov-kernel file-ból

történő beolvasására. Ehhez fel kellett vennünk egy újabb parancssori argumentumot a Smart City Serverhez, valamint alapvető file olvasási műveletekkel kiegészíteni az OSMReadert. A megnyitott file-ból minden egyes valószínűségi vektort beolvasunk az osztott memóriába. Második lépésként kibővítettük az osztott memória szegmenst, hogy kezelni tudjuk a csomópontokhoz tartozó átmenet valószínűségi vektort. Az AdjacencyList egy olyan adathalmaz, mely tartalmazza (1) a csomópont OSM azonosítóját, (2) egy párt, mely magába foglal (2a) egy listát a szomszédos csomópontokról, valamint (2b) egy listát az egyes csomópontokba történő átmenet valószínűségéről. Ezeket a valószínűségeket a kernel file-ból olvassuk be ebbe a memóriaszegmensbe. Ha egy csomóponthoz nem található a kernel file-ban eloszlásvektor, akkor egyenletes eloszlás szerint inicializáljuk. Végül módosítottuk a szimulációs algoritmus alapvető működését. A szimulációs ágensek a következő csomópontot az aktuális csomópontoz tartozó átmenet valószínűségi vektor alapján választják. Ehhez a Boost Random függvénykönyvtár álvéletlen szám generátorát használjuk, mely a vektorban található multinomiális eloszlás szerint választja a következő csomópontot. A modell teljesítményét a Khi-négyzet próba segítségével elemeztük. Ezzel a próbával láthatóvá válik a különbség az aktuális eloszlás és az előzetesen kiszámolt stacionárius el-

oszlás között. Megmutattuk, hogy a szimuláció során a járművek eloszlása közelít a stacionárius eloszláshoz, illetve bizonyos idő eltelte után beáll az egyensúlyi állapot.

A szimulációs algoritmussal kapcsolatban eredményeinket a [4], [8] és [2] közleményben publikáltuk, a részletes leírás megtalálható a dolgozat 4.4–4.8 fejezeteiben. A teljes projekt letölthető a [1] tárolóból.

# Irodalomjegyzék

- [1] R. Besenczi. Crowd-sourced Traffic Simulator software repository, 2019. URL <https://github.com/rbesenczi/Crowd-sourced-Traffic-Simulator>.
- [2] R. Besenczi. Markov modell alapú közlekedés-szimulációs algoritmusok. In D. Tokody, E. Balla, and K. Németh, editors, *Okos Közlekedés Tudományos Konferencia 2019*, page 13. Doktoranduszok Országos Szövetsége, Műszaki Tudományok Osztálya, 2019. ISBN 978-963-318-570-4.
- [3] R. Besenczi, M. Szilágyi, N. Bátfai, A. Mamenyák, I. Oniga, and M. Ispány. Using crowdsensed information for traffic simulation in the Robocar World Championship framework. In *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 6th IEEE Conference on*, pages 333–337, 2015.
- [4] R. Besenczi, N. Bátfai, P. Jeszenszky, R. Major, F. Monori, and M. Ispány. Large-scale simulation of traffic flow using Markov model. *PLOS ONE*, 16(2):1–31, 02 2021. doi: 10.1371/journal.pone.0246062. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>.
- [5] N. Bátfai, R. Besenczi, A. Mamenyák, and M. Ispány. OOCWC: The Robocar World Championship initiative. In *Telecommunications (ConTEL), 2015 13th International Conference on*, pages 1–6, 2015.
- [6] N. Bátfai, R. Besenczi, A. Mamenyák, and M. Ispány. Traffic simulation based on the Robocar World Championship initiative. *Infocommunications Journal*, 7(3):50–59, 2015.
- [7] N. Bátfai, R. Besenczi, M. Ispány, P. Jeszenszky, R. S. Major, and F. Monori. Markov modeling and simulation of traffic flow. In *Data Science, Statistics & Visualisation, DSSV 2018*, page 61, 2018. URL <http://cstat.tuwien.ac.at/filz/BoA.pdf>.

- [8] N. Bátfai, R. Besenczi, P. Jeszenszky, M. Szabó, and M. Ispány. Markov modeling of traffic flow in smart cities. *Annales Mathematicae et Informaticae*, (53):21–44, 2021. URL <https://doi.org/10.33039/ami.2021.04.008>.
- [9] E. Crisostomi, S. Kirkland, and R. Shorten. A Google-like model of road network dynamics and its application to regulation and control. *International Journal of Control*, 84(3):633–651, 2011.
- [10] M. Faizrahneemooon. *Real-data modelling of transportation networks*. PhD thesis, Hamilton Institute, National University of Ireland Maynooth, 2016.
- [11] M. Faizrahneemooona, A. Schlote, L. Maggi, E. Crisostomi, and R. Shorten. A big-data model for multi-modal public transportation with application to macroscopic control and optimisation. *International Journal of Control*, 88(11):2354–2368, 2015.
- [12] N. L. Hjort and C. Varin. ML, PL, QL in Markov chain models. *Scandinavian Journal of Statistics*, 35(1):64–82, 2008.
- [13] E. Ismagilova, L. Hughes, Y. K. Dwivedi, and K. R. Raman. Smart cities: Advances in research—an information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 47:88–100, 2019.
- [14] K. Nagel and M. Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I France.*, 2(12), 1992.
- [15] R. Szabó, K. Farkas, M. Ispány, A. Benczúr, N. Bátfai, P. Jeszenszky, S. Laki, A. Vágner, L. Kollár, C. Sidló, R. Besenczi, M. Smajda, G. Kövér, T. Szincsák, T. Kádek, M. Kósa, A. Adamkó, I. Lendák, B. Wiandt, T. Tomás, A. Nagy, and G. Fehér. Framework for smart city applications based on participatory sensing. In *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2013 IEEE 4th International Conference on*, pages 295–300, 2013.
- [16] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–511–I–518 vol.1, 2001.



Nyilvántartási szám: DEENK/448/2021.PL  
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Besenczi Renátó

Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10054778

## A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

### Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

1. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Jeszenszky, P., Szabó, M., Ispány, M.: Markov modeling of traffic flow in Smart Cities.  
*Ann. Math. Inform.* 53, 21-44, 2021. ISSN: 1787-5021.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2021.04.008>
2. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Mamenyák, A., Ispány, M.: Traffic Simulation based on the Robocar World Championship Initiative.  
*Infocommun. J.* 7 (3), 50-58, 2015. ISSN: 2061-2079.

### Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

3. **Besenczi, R.**, Bátfai, N., Jeszenszky, P., Major, S. R., Monori, F., Ispány, M.: Large-scale simulation of traffic flow using Markov model.  
*PLoS One.* 16 (2), 1-31, 2021. ISSN: 1932-6203.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>  
IF: 3.24 (2020)

### Magyar nyelvű konferencia közlemények (1)

4. Monori, F., **Besenczi, R.**, Bátfai, N.: Forgalom szimulációs platform nyílt térképi adatbázisokon.  
In: Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VII. = theory meets practice in GIS / Balázs Boglárka, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 319-324, 2016. ISBN: 9789633185704

### Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

5. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Mamenyák, A., Ispány, M.: OOCWC: The robocar world championship initiative.  
In: Proceedings of the 13th International Conference on Telecommunications ConTEL 2015.  
Ed.: Thomas Planck, Graz University of Technology, IEEE, Graz, 1-6, 2015. ISBN: 9781479989720





6. **Besenczi, R.**, Szilágyi, M., Bátfai, N., Mamenyák, A., Oniga, I. L., Ispány, M.: Using crowdsensed information for traffic simulation in the Robocar World Championship framework.  
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 333-337, 2015. ISBN: 9781467381291
7. Szabó, R., Farkas, K., Ispány, M., Benczúr, A. A., Bátfai, N., Jeszenszky, P., Laki, S., Vágner, A., Kollár, L., Sidló, C., **Besenczi, R.**, Smajda, M., Kövér, G., Szincsa, T., Kádek, T., Kósa, M., Adamkó, A., Lendák, I., Wiandt, B., Tomás, T., Nagy, A. Z., Fehér, G.: Framework for smart city applications based on participatory sensing.  
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 295-300, 2013. ISBN: 9781479915439

#### Magyar nyelvű absztrakt kiadványok (1)

8. **Besenczi, R.**: Markov modell alapú közlekedés-szimulációs algoritmusok.  
In: Okos Közlekedési Tudományos Konferencia 2019 : absztraktkötet. Szerk.: Tokody Dániel, Balla Esztella, Németh Katalin, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Műszaki Tudományok Osztálya, Budapest, 15, 2019. ISBN: 9786155586385

#### Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (2)

9. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Ispány, M., Jeszenszky, P., Major, S. R., Monori, F.: Markov modeling and simulation of traffic flow.  
In: Book of Abstracts. Data Science, Statistics & Visualisation DSSV 2018 / P. Filzmoser; P.J.F. Groenen, Springer-Verlag, Vienna, 61, 2018.
10. **Besenczi, R.**, Katona, T., Szilágyi, M.: A fork implementation of the police edition of the OOCWC system.  
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 163-164, 2015. ISBN: 9781467381284

### További közlemények

#### Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

11. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Szabó, J., Jeszenszky, P., Buda, A., Jármi, L., Lovas, R. B., Pál, M. K., Bogacsóvics, G., Kovács, E.: DEAC-Hackers: játzó hackerek, hackelő játékosok.  
*Inform Társad.* 18 (1), 132-146, 2018. ISSN: 1587-8694.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.22503/infars.XVIII.2018.1.9>  
IF: 0.222





12. Bátfai, N., Bogacsovics, G., Paszerbovics, R., Antal, A., Czevár, I., Kelemen, V., **Besenczi, R.**: E-sportolók mérése.

*Inform. Társad.* 18 (1), 147-155, 2018. ISSN: 1587-8694.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22503/infars.XVIII.2018.1.10>

IF: 0.222

13. Bátfai, N., Bersenszki, M., Lukács, M., **Besenczi, R.**, Bogacsovics, G., Jeszenszky, P.: Az e-sport és a robotpszichológia közös jövője.

*Inform. Társad.* 16 (4), 26-39, 2017. ISSN: 1587-8694.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22503/infars.XVI.2016.4.2>

IF: 0.023

#### Idégen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

14. Bátfai, N., Mamenyák, A., Jeszenszky, P., Kövér, G., Smajda, M., **Besenczi, R.**, Halász, B., Terdik, G., Ispány, M.: Avatar-based sport science soccer simulations.

*Ann. Math. Inform.* 46, 13-36, 2016. ISSN: 1787-5021.

15. Bátfai, N., Jeszenszky, P., Mamenyák, A., Halász, B., **Besenczi, R.**, Komzsik, J., Kóti, B., Kövér, G., Smajda, M., Székelyhídi, C., Takács, T., Róka, G., Ispány, M.: Competitive programming: A case study for developing a simulation-based decision support system.

*Infocommun. J.* 8 (1), 24-38, 2016. ISSN: 2061-2079.

#### Idégen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

16. Bátfai, N., Papp, D., **Besenczi, R.**, Bogacsovics, G., Veres, D.: Benchmarking Cognitive Abilities of the Brain with the Event of Losing the Character in Computer Games.

*Stud. Univ. Babeş-Bolyai. Inform.* 64 (1), 15-25, 2019. ISSN: 1224-869X.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24193/subbi.2019.1.02>

17. Bátfai, N., **Besenczi, R.**: Robopsychology Manifesto: Samu in His Prenatal Development.

*Carpath. J. Electron. Comput. Eng.* 10 (1), 3-12, 2017. ISSN: 1844-9689.

18. **Besenczi, R.**, Tóth, J., Hajdu, A.: A review on automatic analysis techniques for color fundus photographs.

*Comput. Struct. Biotechnol. J.* 14, 371-384, 2016. ISSN: 2001-0370.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csbj.2016.10.001>

#### Magyar nyelvű konferencia közlemények (1)

19. Bátfai, N., Szabó, J., **Besenczi, R.**, Jeszenszky, P., Szabella, O., Abai, A., Kocsis, D., Bozsányi, A., Szabó, Á., Ispány, M.: Az oktatás és az esport szinergiája.

In: Új kutatások a neveléstudományokban 2017 : pedagógusképzés és az inklúzió. Szerk.:

Kerülő Judit, Jenei Teréz, Kreatív Help Bt., Debrecen, 136-151, 2018. ISBN: 9786150036953





## Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

20. Hajdu, A., Harangi, B., **Besenczi, R.**, Lázár, I., Emri, G., Hajdu, L., Tijdeman, R.: Measuring regularity of network patterns by grid approximations using the LLL algorithm.  
In: Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2016), Cancun, Mexico, 2016, IEEE, [Piscataway], 1524-1529, 2017. ISBN: 9781509048472
21. **Besenczi, R.**, Szitha, K., Harangi, B., Csutak, A., Hajdu, A.: Automatic optic disc and optic cup detection in retinal images acquired by mobile phone.  
In: ISPA 2015 : 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. Eds.: S. Loncaric, D. Lerski, H. Eskola, R. Bregovic, University of Zagreb, Zagreb, 193-198, 2015, (ISSN 1845-5921) ISBN: 9781467380324
22. **Besenczi, R.**, Szitha, K., Hajdu, A.: A framework for distributed processing on an offline cell phone network.  
In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2014 : Proceedings, Vietri sul Mare, Italy. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 257-262, 2014. ISBN: 9781479972807

## Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

23. **Besenczi, R.**, Szitha, K., Hajdu, A.: Distributed eye lesion detection on an offline cell phone network.  
In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2014 : Proceedings, Vietri sul Mare, Italy. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 467, 2014. ISBN: 9781479972807

**A közlő folyóiratok összesített impact faktora: 3,707**

**A közlő folyóiratok összesített impact faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 3,24**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2021.10.05.





**Short thesis for the degree of  
doctor of philosophy (PhD)**

**SMART CITY APPLICATIONS FOR  
URBAN TRAFFIC ANALYSIS**

**RENÁTÓ BESENCZI**

**SUPERVISOR: DR. MÁRTON ISPÁNY**



**UNIVERSITY OF DEBRECEN  
DOCTORAL SCHOOL OF INFORMATICS  
DEBRECEN, 2021.**



# 1 Introduction

In recent years, the research and development of Smart City applications have become a vivid topic [13]. Crowd-sensing is a technique with which we are able to measure certain conditions of urban areas [15]. More precisely, we can observe the habits of the population (e.g., travelling) and analyze it. In the past few years, many developments have occurred in the car industry. First, prototypes of autonomous or driverless cars are introduced by several tech giants and car companies. Second, pure electric cars are on the market for a few years. The question arises as to what contribution can be made from the viewpoint of information technology: how can a (smart) city administration assist the widespread of these cars? What can a city-controlled IT solution offer to these cars to allow them to be operated more efficiently?

In this thesis, to answer the need for a traffic management system, we present an open-source software and hardware system, called the Robocar World Championship (OOCWC). The primary aim of the OOCWC is to offer a research platform for developing urban traffic control al-

gorithms along with traffic simulation algorithms that will provide the framework to investigate the relationship between smart cities and driverless cars. Although we developed the software for a future time when most of the cars are driverless, it is capable of analyzing certain scenarios in the present, as well. In the first part of this thesis, the OOCWC is described in detail.

The data collector device of the OOCWC is an important part of the system. For traffic simulations, scenario analysis and route planning, we need measured data, so we developed a rapid prototype following the crowd-sensing approach. We performed the initial test of the device in Debrecen and the collected data can be used to run simulations using the Robocar City Emulator. The name of this device is Real-time Traffic Analyzer and the fork implementation of the OOCWC that uses collected data is the Crowd-sourced Traffic Simulator. A detailed description is given in the second part of the thesis.

Finally, in the third part of the thesis, we introduce our traffic simulation model based on graph theory and a Markov model of probability theory. Its basic functionality is to hold the distribution of the cars on the map in a steady state during a given time period. In addition, we show a mathematical method with which we can create a Markov kernel that is necessary to simulate Markov traffic on a

given traffic graph. To create this file, we use the publicly available Taxi Trajectory Prediction dataset.

The main contribution of this thesis applicable in Smart City and urban traffic management field (including the corresponding publications as well) can be summarized as follows:

I. In connection with the development of the OOCWC:

1. Participation in the development of the OOCWC traffic simulation software [5], [6].
2. The development of a crowd-sensing tool for data collection [1], [3].
3. Further development of OOCWC system to use collected data [6], [1].

II. In connection with the elaboration and development of a simulation model:

4. Improvement of a traffic simulation algorithm based on a Markov model of probability theory and elaboration of a method for creating a Markov kernel from open databases [4], [8], [7], [2].
5. Evaluation and implementation of the model in small and medium sizes and with large-scale simulations in the OOCWC [4], [8], [1], [2].

## 2 Data collection in the OOCWC

**Thesis 1.** *We have developed a smart city application prototype that can be used for traffic simulation and for testing research ideas in connection with smart cities and autonomous cars.*

The OOCWC is a multi-agent based simulation software created to provide a common research platform for the investigation of the connection between autonomous cars and smart cities. The main component of the OOCWC is the Robocar City Emulator (RCE). This component has several tasks: (1) the smart city server opens the map database, converts it to a Boost Graph Library (BGL) graph, (2) the traffic server simulates traffic, (3) the component allows simulation agents (e.g., clients) to connect to the server and operate.

The first rapid prototype of the OOCWC is called Justice. Its 3 main components are the RCE, and the two monitors, the rcwin and the rclog. This prototype uses the OpenStreetMap (OSM) database and processes it with the Osmium Library. The results of this processing are a routing map graph and a BGL graph. The routing map

graph then loaded into a shared memory segment by the smart city server. The traffic server simulates traffic. A sample client program is provided to the original version that demonstrates how a client software can connect to the server and how the shared memory segment can be used.

The simulation takes place on a graph created from a rectangular part of OSM. We slice all edges for parts 3 meters long. Based on Nagel-Schreckenberg (NaSch) [14] terminology, all edges are divided cells. Therefore, the cell length is equal to 3 meters. We set the length of the simulation step for 200 milliseconds. Edges can contain a given number of cars only (calculated as the edge length divided by the length of the cell, or part, i.e. 3 meters), since one cell can contain only one car. For simplicity, we use only one lane per direction for a road segment. The first step of the simulation can be initialized based on measured data or some prescribed distribution (e.g., uniform). In the original implementation, the traffic server moves the cars quite randomly, i.e., if a car arrives at a graph vertex, it selects the next edge according to uniform distribution. We presented our findings in paper [5] and [6], the detailed description can be read in chapter 2 of the thesis.

**Thesis 2.** *We have developed a data collector device that can measure urban traffic. The device can be assembled into vehicles, can count individual traffic units and can*

*send aggregated data to an MQTT broker application.*

One type of data collection method is crowd-sensing; devices following this method can collect data without human interaction. In the OOCWC, this is the Automated Sensor Annotations component.

In the first phase of development, we implemented the data collection system in an ARM-based hardware. Since ARM is a ubiquitous CPU type, compilers are available, and we can use an Embedded Linux System. We developed our first prototype on a Zynq System-on-chip (SoC), more precisely on a Digilent Zybo development board. The central component of the system is the Zynq Processing System, along with the Processor System Reset. The devices are connected through the standard Advanced Extensible Interface bus protocol. We use a Vincotech A1080-A GPS module for positioning, a SIM900 GSM module for internet connection and an OV7670 camera module. In addition, we use the FPGA part of the SoC for memory operations and device connectivity.

The image processing method is a Haar-cascade classifier [16]. After initializing the videostream, we store every frame in a Mat object, and search for car objects. The algorithm tries to recognize a vehicle on every frame of the stream. For a communication protocol, we use MQTT, which is a protocol developed for *machine-to-machine* com-

munication. It has a low communication overhead and implements the publish-subscribe communication paradigm. We summarized our work in paper [3], the project is described in detail in chapter 3 of the PhD thesis. The project is open source and can be downloaded from [1].

**Thesis 3.** *We have performed further developments on the OOCWC to allow us to initialize simulations based on measured data. In addition, we have tested the simulation algorithm of the OOCWC with data of a test measurement and we have shown that the original simulation algorithm does not provide a stationary distribution for the cars during a simulation.*

The aggregated traffic data can be used to initialize simulations in the RCE. To obtain this functionality, we created a fork of the original OOCWC and modified it. The name of this project is Crowd-sourced Traffic Simulator. We extended the original OOCWC implementation with one new class which inherits from the Traffic class. This class represents the traffic which can be initialized based on measured data. The new members of this class are the measured distribution of cars and a function that initializes the vehicles.

The input data of the RCE is represented as a plain text file that contains lines, with each line containing a street

name and the car density value of the corresponding street. We initialize vehicles for the first step of the simulation as we measured. After that, we can observe and measure the operation of the simulation algorithm. We can state that in the original implementation of the RCE, the distribution of cars on the graph does not reach and hold a steady state and it changes during the simulation. We described our work in paper [6], the detailed description can be found in the section 3.2 in the PhD thesis. The project can be downloaded from [1].

### 3 Simulation algorithms

**Thesis 4.** *We have improved a mathematical model for traffic simulation that can provide a stationary distribution for cars on the map graph. A model is based on a Markov model of probability theory and graph theory. We have reparametrized the model by introducing the concept of two-dimensional stationary distribution and to estimate this parameter matrix, the weighted least squares (WLS) estimation is applied.*

In papers [9], [11] and [10], authors introduced a stochastic model that can control the traffic in an urban road network. The model is based on discrete time Markov chain on the road graph which plays the role of the state space. A transition probability matrix is introduced that describes the dynamic of the traffic while its unique stationary distribution corresponds to the traffic equilibrium (or steady) state. In this equilibrium state, the distribution of the cars on the graph remains invariant locally in time. So, this stationary distribution of the Markov chain can be interpreted as the momentary true distribution of the vehicles on the road network.

Based on the aforementioned mathematical model, we introduce the concepts of “Markov random walk”, which describes the motion of an individual vehicle, and “Markov traffic”, which describes the entire traffic on the road network, respectively. The stationary distribution of the Markov traffic is determined as a multinomial distribution. We present how the ergodic theory of finite Markov chains implies that a dense traffic event can be approximated well by the stationary distribution of a Markov chain on the road network. We reparametrize the model by introducing the concept of two-dimensional stationary distribution which possesses equidistributed marginals that are the unique stationary distribution of the transition probability matrix, respectively. To estimate this parameter matrix the weighted least squares (WLS) estimation as a kind of composite (quasi-) likelihood methods is applied, see [12].

The statistical analysis of a traffic system in our case means the exploration of the traffic graph and the estimation of the two-dimensional stationary distribution using mobile sensor data. In this case, we have trajectory data which consists of the sequences of consecutive geographical points, like in the Taxi Trajectory Prediction dataset. Our proposed estimator consists of two parts. First, the naïve estimator for the distribution of the consecutive pairs in trajectories based on the empirical frequencies, and sec-

ond, a correction term ensuring that the estimator has equi-distributed marginals. This second part depends on the Laplacian matrix of the road graph and the traffic direction vector. It is important to note that all statistics (two-dimensional consecutive frequencies, starting and ending frequencies) can be computed by counting, which is a very effective way and can be applied for big data, as well.

We described our work in papers [4], [8], [7] and [2], the detailed description can be found in section 4.3 in the PhD thesis.

**Thesis 5.** *We have evaluated the model in small, medium and large sizes and we have implemented the model in the OOCWC system to support Markov traffic simulations. We have shown that in medium and large networks, the WLS-based model outperforms the ML-based approach.*

For the evaluation of our model on a medium-sized network, we exported a strongly connected subgraph from the OSM map of Porto. The performance of the maximum likelihood and the WLS estimator show significant differences as we change the number of trajectories used for the estimation method. On the one hand, the absolute bias of the ML estimator is decreasing with higher number of trajectories, but it is constant for the WLS one. On the other hand, the WLS estimator is better with lower number of

trajectories, but worse with higher number of trajectories than the ML estimator. In real traffic settings, lower number of trajectories are more typical, so this simulation corroborates the superiority of WLS method based on two-dimensional stationary distribution against the traditional maximum likelihood.

For evaluation in a large scale, we implemented the model in the OOCWC. First, we extended the operation of the OSMReader to open Markov kernel files. We added new command line arguments for the Smart City Server and added some basic file reading functionality to the OSMReader. We open the Markov kernel file and read every vector into the corresponding shared memory segment. Second, we extended the shared memory segment to handle probability vectors for every node of the traffic graph. The AdjacencyList is a map datatype that consists of (1) the OSM ID of the node (2) a pair that consists of (2a) the list of the IDs of the adjacent nodes and (2b) the transition probabilities. We read the transition probabilities from the kernel file to this segment. If there is no transition probability vector for a node, we initialize this vector according to uniform distribution. Finally, we had to modify the basic operation of the simulation algorithm. A car selects the next node based on the probability vector of the current node. For this, we use a multinomial pseudo-random

number generation engine from the Boost Random library. The performance of our model can be described by a Chi-square test result, which shows the difference between the actual distribution of the cars and the previously calculated stationary distribution. We have shown that during the simulation, the distribution of the cars converge to the stationary distribution and after some time this distribution becomes steady.

We described all of our findings regarding the simulation algorithm in papers [4], [8] and [2], the detailed description can be found in section 4.4–4.8 of the PhD thesis. The project can be downloaded from [1].

# Bibliography

- [1] R. Besenczi. Crowd-sourced Traffic Simulator software repository, 2019. URL <https://github.com/rbesenczi/Crowd-sourced-Traffic-Simulator>.
- [2] R. Besenczi. Markov modell alapú közlekedés-szimulációs algoritmusok. In D. Tokody, E. Balla, and K. Németh, editors, *Okos Közlekedés Tudományos Konferencia 2019*, page 13. Doktoranduszok Országos Szövetsége, Műszaki Tudományok Osztálya, 2019. ISBN 978-963-318-570-4.
- [3] R. Besenczi, M. Szilágyi, N. Bátfai, A. Mamenyák, I. Oniga, and M. Ispány. Using crowdsensed information for traffic simulation in the Robocar World Championship framework. In *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 6th IEEE Conference on*, pages 333–337, 2015.
- [4] R. Besenczi, N. Bátfai, P. Jeszenszky, R. Major, F. Monori, and M. Ispány. Large-scale simulation of traffic flow using Markov model. *PLOS ONE*, 16(2):1–31, 02 2021. doi: 10.1371/journal.pone.0246062. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>.
- [5] N. Bátfai, R. Besenczi, A. Mamenyák, and M. Ispány. OOCWC: The Robocar World Championship initiative. In *Telecommunications (ConTEL), 2015 13th International Conference on*, pages 1–6, 2015.
- [6] N. Bátfai, R. Besenczi, A. Mamenyák, and M. Ispány. Traffic simulation based on the Robocar World Championship initiative. *Infocommunications Journal*, 7(3):50–59, 2015.
- [7] N. Bátfai, R. Besenczi, M. Ispány, P. Jeszenszky, R. S. Major, and F. Monori. Markov modeling and simulation of traffic flow. In *Data Science, Statistics & Visualisation, DSSV 2018*, page 61, 2018. URL <http://cstat.tuwien.ac.at/filz/BoA.pdf>.

- [8] N. Bátfai, R. Besenczi, P. Jeszenszky, M. Szabó, and M. Ispány. Markov modeling of traffic flow in smart cities. *Annales Mathematicae et Informaticae*, (53):21–44, 2021. URL <https://doi.org/10.33039/ami.2021.04.008>.
- [9] E. Crisostomi, S. Kirkland, and R. Shorten. A Google-like model of road network dynamics and its application to regulation and control. *International Journal of Control*, 84(3):633–651, 2011.
- [10] M. Faizrahneemooon. *Real-data modelling of transportation networks*. PhD thesis, Hamilton Institute, National University of Ireland Maynooth, 2016.
- [11] M. Faizrahneemooona, A. Schlote, L. Maggi, E. Crisostomi, and R. Shorten. A big-data model for multi-modal public transportation with application to macroscopic control and optimisation. *International Journal of Control*, 88(11):2354–2368, 2015.
- [12] N. L. Hjort and C. Varin. ML, PL, QL in Markov chain models. *Scandinavian Journal of Statistics*, 35(1):64–82, 2008.
- [13] E. Ismagilova, L. Hughes, Y. K. Dwivedi, and K. R. Raman. Smart cities: Advances in research—an information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 47:88–100, 2019.
- [14] K. Nagel and M. Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I France.*, 2(12), 1992.
- [15] R. Szabó, K. Farkas, M. Ispány, A. Benczúr, N. Bátfai, P. Jeszenszky, S. Laki, A. Vágner, L. Kollár, C. Sidló, R. Besenczi, M. Smajda, G. Kövér, T. Szincsaák, T. Kádek, M. Kósa, A. Adamkó, I. Lendák, B. Wiandt, T. Tomás, A. Nagy, and G. Fehér. Framework for smart city applications based on participatory sensing. In *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2013 IEEE 4th International Conference on*, pages 295–300, 2013.
- [16] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–511–I–518 vol.1, 2001.



Registry number: DEENK/448/2021.PL  
Subject: PhD Publication List

Candidate: Renátó Besenczi  
Doctoral School: Doctoral School of Informatics  
MTMT ID: 10054778

### List of publications related to the dissertation

#### Foreign language scientific articles in Hungarian journals (2)

1. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Jeszzenszky, P., Szabó, M., Ispány, M.: Markov modeling of traffic flow in Smart Cities.  
*Ann. Math. Inform.* 53, 21-44, 2021. ISSN: 1787-5021.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2021.04.008>
2. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Mamenyák, A., Ispány, M.: Traffic Simulation based on the Robocar World Championship Initiative.  
*Infocommun. J.* 7 (3), 50-58, 2015. ISSN: 2061-2079.

#### Foreign language scientific articles in international journals (1)

3. **Besenczi, R.**, Bátfai, N., Jeszzenszky, P., Major, S. R., Monori, F., Ispány, M.: Large-scale simulation of traffic flow using Markov model.  
*PLoS One.* 16 (2), 1-31, 2021. ISSN: 1932-6203.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>  
IF: 3.24 (2020)

#### Hungarian conference proceedings (1)

4. Monori, F., **Besenczi, R.**, Bátfai, N.: Forgalom szimulációs platform nyílt térképi adatbázisokon.  
In: Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VII. = theory meets practice in GIS / Balázs Boglárka, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 319-324, 2016. ISBN: 9789633185704

#### Foreign language conference proceedings (3)

5. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Mamenyák, A., Ispány, M.: OOCWC: The robocar world championship initiative.  
In: Proceedings of the 13th International Conference on Telecommunications ConTEL 2015.  
Ed.: Thomas Planck, Graz University of Technology, IEEE, Graz, 1-6, 2015. ISBN: 9781479989720





6. **Besenczi, R.**, Szilágyi, M., Bátfai, N., Mamenyák, A., Oniga, I. L., Ispány, M.: Using crowdsensed information for traffic simulation in the Robocar World Championship framework.  
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 333-337, 2015. ISBN: 9781467381291
7. Szabó, R., Farkas, K., Ispány, M., Benczúr, A. A., Bátfai, N., Jeszenszky, P., Laki, S., Vágner, A., Kollár, L., Sidló, C., **Besenczi, R.**, Smajda, M., Kövér, G., Szincsök, T., Kádek, T., Kósa, M., Adamkó, A., Lendák, I., Wiandt, B., Tomás, T., Nagy, A. Z., Fehér, G.: Framework for smart city applications based on participatory sensing.  
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 295-300, 2013. ISBN: 9781479915439

#### Hungarian abstracts (1)

8. **Besenczi, R.**: Markov modell alapú közlekedés-szimulációs algoritmusok.  
In: Okos Közlekedési Tudományos Konferencia 2019 : absztraktkötet. Szerk.: Tokody Dániel, Balla Esztella, Németh Katalin, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Műszaki Tudományok Osztálya, Budapest, 15, 2019. ISBN: 9786155586385

#### Foreign language abstracts (2)

9. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Ispány, M., Jeszenszky, P., Major, S. R., Monori, F.: Markov modeling and simulation of traffic flow.  
In: Book of Abstracts. Data Science, Statistics & Visualisation DSSV 2018 / P. Filzmoser; P.J.F. Groenen, Springer-Verlag, Vienna, 61, 2018.
10. **Besenczi, R.**, Katona, T., Szilágyi, M.: A fork implementation of the police edition of the OOCWC system.  
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 163-164, 2015. ISBN: 9781467381284

### List of other publications

#### Hungarian scientific articles in Hungarian journals (3)

11. Bátfai, N., **Besenczi, R.**, Szabó, J., Jeszenszky, P., Buda, A., Jármí, L., Lovas, R. B., Pál, M. K., Bogacsóvics, G., Kovács, E.: DEAC-Hackers: játzó hackerek, hackelő játékosok.  
*Inform Társad.* 18 (1), 132-146, 2018. ISSN: 1587-8694.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.22503/inf tars.XVIII.2018.1.9>  
IF: 0.222





12. Bátfai, N., Bogacsovics, G., Paszerbovics, R., Antal, A., Czevár, I., Kelemen, V., **Besenczi, R.**: E-sportolók mérése.  
*Inform. Társad. 18* (1), 147-155, 2018. ISSN: 1587-8694.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.22503/infstars.XVIII.2018.1.10>  
IF: 0.222
13. Bátfai, N., Bersenszki, M., Lukács, M., **Besenczi, R.**, Bogacsovics, G., Jeszenszky, P.: Az e-sport és a robotpszichológia közös jövője.  
*Inform. Társad. 16* (4), 26-39, 2017. ISSN: 1587-8694.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.22503/infstars.XVI.2016.4.2>  
IF: 0.023

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (2)

14. Bátfai, N., Mamenyák, A., Jeszenszky, P., Kövér, G., Smajda, M., **Besenczi, R.**, Halász, B., Terdik, G., Ispány, M.: Avatar-based sport science soccer simulations.  
*Ann. Math. Inform. 46*, 13-36, 2016. ISSN: 1787-5021.
15. Bátfai, N., Jeszenszky, P., Mamenyák, A., Halász, B., **Besenczi, R.**, Komzsik, J., Kóti, B., Kövér, G., Smajda, M., Székelyhídi, C., Takács, T., Róka, G., Ispány, M.: Competitive programming: A case study for developing a simulation-based decision support system.  
*Infocommun. J. 8* (1), 24-38, 2016. ISSN: 2061-2079.

Foreign language scientific articles in international journals (3)

16. Bátfai, N., Papp, D., **Besenczi, R.**, Bogacsovics, G., Veres, D.: Benchmarking Cognitive Abilities of the Brain with the Event of Losing the Character in Computer Games.  
*Stud. Univ. Babeş-Bolyai. Inform. 64* (1), 15-25, 2019. ISSN: 1224-869X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.24193/subbi.2019.1.02>
17. Bátfai, N., **Besenczi, R.**: Robopsychology Manifesto: Samu in His Prenatal Development.  
*Carpath. J. Electron. Comput. Eng. 10* (1), 3-12, 2017. ISSN: 1844-9689.
18. **Besenczi, R.**, Tóth, J., Hajdu, A.: A review on automatic analysis techniques for color fundus photographs.  
*Comput. Struct. Biotechnol. J. 14*, 371-384, 2016. ISSN: 2001-0370.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csbj.2016.10.001>

Hungarian conference proceedings (1)

19. Bátfai, N., Szabó, J., **Besenczi, R.**, Jeszenszky, P., Szabella, O., Abai, A., Kocsis, D., Bozsányi, A., Szabó, Á., Ispány, M.: Az oktatás és az esport szinergiája.  
In: Új kutatások a neveléstudományokban 2017 : pedagógusképzés és az inklúzió. Szerk.: Kerülő Judit, Jenei Teréz, Kreatív Help Bt., Debrecen, 136-151, 2018. ISBN: 9786150036953





Foreign language conference proceedings (3)

20. Hajdu, A., Harangi, B., **Besenczi, R.**, Lázár, I., Emri, G., Hajdu, L., Tijdeman, R.: Measuring regularity of network patterns by grid approximations using the LLL algorithm.  
In: Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2016), Cancun, Mexico, 2016, IEEE, [Piscataway], 1524-1529, 2017. ISBN: 9781509048472
21. **Besenczi, R.**, Szitha, K., Harangi, B., Csutak, A., Hajdu, A.: Automatic optic disc and optic cup detection in retinal images acquired by mobile phone.  
In: ISPA 2015 : 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. Eds.: S. Loncaric, D. Lerski, H. Eskola, R. Bregovic, University of Zagreb, Zagreb, 193-198, 2015, (ISSN 1845-5921) ISBN: 9781467380324
22. **Besenczi, R.**, Szitha, K., Hajdu, A.: A framework for distributed processing on an offline cell phone network.  
In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2014 : Proceedings, Vietri sul Mare, Italy. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 257-262, 2014. ISBN: 9781479972807

Foreign language abstracts (1)

23. **Besenczi, R.**, Szitha, K., Hajdu, A.: Distributed eye lesion detection on an offline cell phone network.  
In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2014 : Proceedings, Vietri sul Mare, Italy. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 467, 2014. ISBN: 9781479972807

**Total IF of journals (all publications): 3,707**

**Total IF of journals (publications related to the dissertation): 3,24**

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

05 October, 2021

