

Bírálat  
Dr. Szabó Géza  
“Intelligens hálózati megoldások az Ipar 4.0 számára:  
programozható 5G hálózatok és adaptív ipari alkalmazások”  
című MTA doktori disszertációjáról

## Előszó

A szerző a Távközlési Tudomány területén, az utóbbi időben beadott MTA doktori dolgozatokhoz képest eltérő stílusban ismertette az elért eredményeket. Emiatt az alábbi két szempontot kiemelt jelentőséggel veszem figyelembe az MTA doktori értekezés értékelése során:

- **SZ1 – A matematikai levezetések és a logikai érvelések megalapozottsága:**  
A disszertáció tartalmazzon matematikailag értelmezhető és logikailag megalapozott levezetéseket<sup>1</sup>, amelyek megfelelő módszertannal végzett alapos vizsgálatok alapján általános érvényű következtetések levonását és modellek, algoritmusok, protokollok származtatását teszik lehetővé.
- **SZ2 – Reprodukálhatóság:** A prezentáció biztosítsa az eredmények, levezetések és állítások indoklásának reprodukálhatóságát<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Az MTA VI. Műszaki Tudományok Osztályának a doktori eljárásra vonatkozó követelményei (<https://mta.hu/doktori-tanacs/a-vi-osztaly-doktori-kovetelmenyrendszer-105378>) között szerepel “Az értekezés ezeket az eredményeket egységes jelölésrendszerben és szemléletben foglalja össze, beleértve az eredmények előzményeit pontos irodalmi hivatkozásokkal, bemutatva az eredmények helyét a szakterületen, valamint azok áttekinthető bizonyítását, igazolását részletes levezetésekkel.”

<sup>2</sup>A CoARA (The Coalition for Advancing Research Assessment) “Agreement on Reforming Research Assessment” ([https://coara.eu/app/uploads/2022/09/2022\\_07\\_19\\_rra\\_agreement\\_final.pdf](https://coara.eu/app/uploads/2022/09/2022_07_19_rra_agreement_final.pdf)) “Quality implies that research is carried out through transparent research processes and methodologies and through research management allowing systematic re-use of previous results. Openness of research, and results that are verifiable and reproducible where applicable, strongly contribute to quality.”

# 1. Általános vélemény

Dr. Szabó Géza értekezésének témája az 5G hálózatok ipari alkalmazhatósága. A kutatási terület aktuális és jelentős az ipari alkalmazások szempontjából, annak ellenére, hogy már számos kutatás foglalkozott ezzel a témával. A kérdések nagy része azonban továbbra is megválaszolatlan.

A szerző az elért eredményeit egy 110 oldalas angol nyelvű disszertációban és egy 23 oldalas magyar nyelvű tézisfüzetben foglalta össze, amelyek alapján három folyóiratcikket és három konferenciaticket publikált. A disszertáció 7. fejezete angol nyelven tartalmazza a tézisek összefoglalását, míg a többi fejezet terjedelme 100 oldal. Ezáltal az értekezés formailag megfelel az MTA doktori szabályzatának.

## 2. Tézisek értékelése

A tézisfüzet 2. fejezete (“Kutatási célok és módszerek”) módszertani bekezdése (4. oldal) inkább mérnöki megközelítést tükröz, mintsem tudományosan megalapozott módszertani ismertetést. A távközlési tudomány területén a szimuláció olyan eszköz, amely lehetővé teszi egy alkalmazott megoldás működőképességének demonstrálását korlátozott esetekben, azonban nem tekinthető bizonyítási módszernek. Ezért a következő kijelentés “Ezenkívül merevtest-szimulációkat is alkalmaztam a módszereim validálására, közel a valós világbeli körülményekhez.” szakmailag nem helytálló. A validálás ebben az összefüggésben félrevezető, mivel a szimuláció nem alkalmas tudományos érvényesség igazolására, csupán a működőképesség demonstrálására korlátozott feltételekkel, valamint a szerző nem mutatta meg a merevtest-szimuláció szerepét és hatását a rendszer teljesítőképesség-értékelése során.

### 2.1. Az első téziscsoporttal kapcsolatos vélemény

Az értekezés második fejezete a Computer Communications folyóiratban megjelent cikken [1] alapul. A 2. fejezettel kapcsolatban a szerző három altézist fogalmazott meg, amelyeket az első téziscsoportban foglalt össze.

A szerző a gyártócellákban alkalmazott 5G vezeték nélküli IoT szenzorok (kamerák, lidar, hőmérséklet-érzékelők stb.) elhelyezésével foglalkozott. A feltételek között szerepel, hogy a szenzorok rendelkezzenek az ETSI által szabványosított NRM<sup>3</sup> (Network Resource Management) képességekkel. A disszertáció 13. oldalán a szerző ismertette az elérendő célokat, amelyek a következők: teljes rádiós lefedettség, energia- és spektrális hatékonyság,

---

<sup>3</sup>3GPP TS 23.434, Service Enabler Architecture Layer for Verticals (SEAL); Functional architecture and information flows, June 2021. [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23\\_series/23.434/23434-h20.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.434/23434-h20.zip)

produktivitási szint (Key Performance Indicators – KPI), valamint QoSensing mutatók, mint például a lefedettségi arány, kapcsolati arány, energiafogyasztás, végponttól végpontig tartó késleltetés és átvitel (throughput).

A szerző a kitűzött feladat megoldására két megerősítéses tanulási (RL heurisztikus módszer) ügynököt alkalmazott, valamint felhasználta az interneten elérhető Ray és RLlib programcsomagokat. A 2.1. ábrán a szerző vázlatosan illusztrálta a szenzorok és az azokban alkalmazott AI ügynökök elhelyezkedését, míg a 2.2. ábrán az RLlib könyvtárhoz illeszkedően bemutatta az RL feladat összeállítását. Ugyanakkor több fogalom értelmezése problémás, például a “High QoS”, “Low QoS” akciók, illetve a “scenario is success” kifejezés nem értelmezhető egyértelműen. Az alkalmazás szempontjából a kamerák “High QoS” vagy “Low QoS” kategóriákba sorolása túlzottan leegyszerűsítő megközelítés. Célszerűbb lenne arra fókuszálni, hogy a fogadó oldalon ténylegesen hasznosítható-e az adott kamera által közvetített felvétel. A gyakorlatban a végső felhasználási pontban megjelenő videofolyamok minősége több protokollrétegbeli folyamat eredménye, például a rádiós blokkok UE-k közötti allokációja, az IP transzport hálózat QoS képessége, a szerverekben futó funkciók és alkalmazások összeállítása a videó folyamok feldolgozására, stb. Ezért a rádiós elvesztés figyelembevétele önmagában nem elegendő, és túlzott egyszerűsítésnek tekinthető. Ennek következtében a 2.6.2.2. fejezetben alkalmazott mérőszámok nem tükrözik megfelelően a probléma lényegét, hogy a vevő oldalon érkezett videofolyamok valóban hasznosíthatók-e a gyártási folyamatokban.

A szerző formálisan, jelölésekkel nem specifikálta és nem indokolta az RL feladatot (lásd: Sutton és Barto, “Reinforcement Learning: An Introduction”, Bradford Books, 2018). Ennek következtében nem derül ki, mekkora az állapottér és a megfigyelőtér mérete. Az akciók jelentése szintén nincs kifejtve, így nem világos, hogy a szenzorok milyen módon jutnak információhoz a elvesztésről és a szcenárió sikerességéről. A szerző nem definiálta sem a “szcenárió” fogalmát, sem annak “sikerességét”. Továbbá a 2.2. ábrán szereplő számértékek (1, 100, 1000) mögött nincs magyarázat. Ezek a hiányosságok jelentősen csökkentik a modell tudományos megalapozottságát és az eredmények értelmezhetőségét. A formális RL specifikáció hiánya akadályozza a reprodukálhatóságot, valamint a megközelítés validálhatóságát is.

A fejezetben található egy szakmailag helytelen állítás<sup>4</sup>, ugyanis az RL formalizálása során a beágyazott Markov folyamatot a döntési pontokhoz rendeljük hozzá. Az állapot (megfigyelés) leírásához több vagy kevesebb véletlen változó hozzáadása nem befolyásolja a Markov-tulajdonságot. Így “more Markovian” kifejezés matematikai értelemben helytelen.

A 2.6. fejezetben a szerző elosztott szimulációs programokat alkalmazó digitális iker

---

<sup>4</sup>“Adding the capability to modify dot height aligns with classical RL, where the agent makes step-by-step decisions based on each observation. This simplifies the learning process and reduces decision complexity, making observations more Markovian.”

(DT) keretrendszerben megvalósított tanítási kísérletekről számolt be. Ugyanakkor nem foglalta össze a kísérletek összeállítását és paraméterezését, ami megnehezíti az eredmények értelmezését és reprodukálhatóságát. Triviális, hogy a folytonos feladattartomány a diszkrét feladattartományt tartalmazza. Bár a tantervekben megkülönböztette a feladattartományokat, amit újdonságnak tállal. Pedig ez egyértelműen kiderülne, ha a szerző elején formálisan megfogalmazná az RL feladatot. Az RL egyik sajátossága<sup>5</sup>, hogy ha a tanítás során viszonylag pillanatnyilag jobb jutalmat eredményező állapottrajektóriákat használunk, ahogyan az értekezésben ismertetett diszkrét állapottartományból álló tanterv segítségével, akkor az epizódok átlagos jutalmának gyors konvergenciája nem meglepő, és nem feltétlenül garantálja, hogy a betanított RL ügynök megalapozott döntéseket fog hozni az egész állapottérre vonatkozóan. A megalapozott (minél jobb végső összjutalmat eredményező) döntésekhez elengedhetetlen, hogy a betanítás során az RL ügynök lehetőség szerint minél több trajektóriát bejárjon az állapottérben. A megfelelő állapottér-feltárás hiányában a tanulás torz lehet, és az ügynök döntései nem lesznek megbízhatóak új vagy ritkán előforduló szituációkban. Azaz a tanítás gyorsítása önmagában nem garantálja az RL ügynök által javasolt döntések jóságát, mivel "az RL konvergencia-sebessége akármilyen lassú lehet"<sup>6</sup>. A tanítás szimulációval (DT keret) történt, ugyanakkor hiányzik a szimulációs futtatások statisztikai elemzése, amely elengedhetetlen lenne az eredmények megbízhatóságának és érvényességének alátámasztásához. Az eredmények alapján nem sikerült meggyőzően demonstrálni, hogy a disszertáció 13. oldalán megfogalmazott célok – például teljes rádiós lefedettség, energia- és spektrális hatékonyság, valamint QoSensing mutatók – valóban teljesültek a javasolt megoldással.

Megállapítható, hogy

- az első téziscsoportban szereplő szerzői javaslat – a vezetékes kommunikáció vezetékek nélküli megoldással való kiváltása – nem tekinthető újdonságnak, mivel ez az 5G technológia fejlesztésének egyik alapvető célkitűzése. Az ipari IoT rendszerekben a vezetékek nélküli kommunikációra való áttérés már széles körben kutatott és alkalmazott megközelítés, így önmagában nem jelent tudományos újdonságot;
- a fejezetben több helyen találhatók ígéretes kifejezések – például NRM vagy merevtest-szimuláció –, azonban ezek szerepe nincs kifejtve a javasolt megoldásban, sem a rendszer teljesítőképességének értékelésében;
- a szerző a fejezetben felvázolt problémára heurisztikus módszert (megerősítéses tanulást) alkalmazott, azonban annak használata nem volt szisztematikus.

---

<sup>5</sup>analógia: az operációs kutatási feladatokban, amelyekben az állapottérben való keresés stratégiája fontos szerepet játszik.

<sup>6</sup>Györfi László szakmai megjegyzése

Az előszóban megfogalmazott szempontok figyelembevételével az MTA doktori disszertációban elvárható lenne a megerősítéssel tanulási feladatok formális specifikációja, amelyek részletes bemutatása nemcsak a tudományos megalapozottságot erősítené, hanem elősegítené az eredmények reprodukálhatóságát is;

- a levezetések, a részletes indoklások és a módszeres vizsgálatok hiányában az első téziscsoport nem tartalmaz tudományos eredményt. A futtatási eredmények bemutatása és azok elemzése nem kellően részletes. A fejezetben leírtak elegendőek a megoldás működőképességének demonstrálásához, azonban nem igazolják meggyőzően az eredmények jóságát. A jelölt elkerülte a feladatok megoldásához rendelkezésre álló tudományos módszerek – például sorbanállás-elmélet, valószínűségszámítás, matematikai statisztika – alkalmazását;
- a fejezet tartalmilag nem koherens: a szerző több célt tűzött ki – például teljes rádiós lefedettség, energia- és spektrális hatékonyság, produktivitási szint, valamint QoSensing mutatók (coverage rate, connectivity ratio, energy consumption, end-to-end delay és throughput) –, azonban a 2.6. fejezetben ismertetett eredmények nem igazolják, hogy ezek a célok teljesültek volna. A célkitűzések és az eredmények közötti kapcsolat nem világos, és hiányzik az a részletes elemzés, amely alátámasztaná, hogy a javasolt megoldás valóban hozzájárul a kitűzött teljesítménykritériumok eléréséhez. Ezt jelentős hiányosságnak tartom a tudományos igényesség szempontjából.

## 2.2. A második téziscsoporttal kapcsolatos vélemény

A második téziscsoport ismertetése az értekezés harmadik fejezetében található, amely két folyóiratcikken alapul [2, 3]. A szerző célként tűzte ki a SEAL (Service Enable Architecture Layer) és a ROS2 integrálását. A bemutatott megoldás azonban egy bonyolult, de nem példa nélküli programozási feladatnak tekinthető, amelyet a jelölt a vonatkozó szabványok előírásainak figyelembevételével hajtott végre. A fejezetben szereplő, 32 sorból álló kódrészlet (Listing 3.1, 43. oldal) több “misztikus” konstans értéket tartalmaz, amelyeknek indoklása hiányzik.

Az előszóban megfogalmazott szempontok – például levezetések, alapos indoklások, vizsgálatok és elemzések – hiányában a második téziscsoport nem tartalmaz tudományos eredményt. Ugyanakkor kiemelendő az, hogy a jelölt demonstrálta a protokollok és szabványok ismeretét, amely hozzájárult a mérnöki feladat szakszerű megoldásához.

### 2.3. A harmadik téziscsoporttal kapcsolatos vélemény

A harmadik téziscsoport eredményei szinten a már említett két folyóiratcikkben találhatók meg [2, 3]. Az értekezés harmadik és negyedik fejezete a téziscsoporthoz kapcsolódóan tárgyalja az RL feladat megfogalmazását. Sajnos ebből a megfogalmazásból a formális leírás hiányzik: a jutalomfüggvény az akciók leírásából nem derül ki, milyen konkrét lépéseket javasol az ügynök, valamint a 3.1 képletben szereplő jutalomfüggvény mögötti szándék nincs indokolva, és a benne szereplő mennyiségek definíciója alapján nem lehet meghatározni az értéküket (pl. a csomagkésleltetés gyakorisága, illetve a *drop<sub>topic</sub>* értelmezése – miszerint minden  $n$ . csomag eldobásra kerül). A mérnöki gyakorlat szempontjából az RL ügynök akciója (a késleltetés csökkentése vagy növelése) nem értelmezhető, mivel a késleltetés számos rendszerparamétertől, hálózati döntésektől és a hálózatban megjelenő konkurens adatfolyamoktól is függ. A jelölt által javasolt megoldás értékelése felszínes, nem támasztja alá meggyőzően, hogy a megoldás valóban hatékonyan működik.

### 2.4. A negyedik téziscsoporttal kapcsolatos vélemény

A negyedik téziscsoport mögött egy folyóiratcikk [2] és két konferenciatickk [4, 5] áll. A szerző az ötödik fejezetben összefoglalja az eredményeket, és vizsgálja a hálózati erőforrás-menedzsment ipari folyamatokra gyakorolt hatását. Az ipari gyártásban használt robotok nagy értékű berendezések, így alapvető elvárás, hogy a számukra kijelölt és programozott feladatokat pontosan hajtsák végre, ezzel növelve a gyártás hatékonyságát. Amennyiben a robotok működtetése és vezérlése hálózaton keresztül történik, a hálózat tervezésének és működtetésének minimális követelménye a robotok pontos feladatvégrehajtásának támogatása. Ennek megfelelően a “felvesz és lerak” típusú ipari folyamatok esetén elengedhetetlenek olyan objektív mérőszámok, amelyek a robot által lerakott tárgyak elhelyezési pontosságát mérik. Ezzel szemben a szerző a humán szubjektív értékelési mutató – MOS (Mean Opinion Score) – bevezetését javasolja, amelyet eredetileg teljesen más célra (a beszédátvitel szubjektív minősítésére <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800.1-200303-S/en>) vezettek be. Az MOS alkalmazása az iparban levő robotikai folyamatok teljesítménymérésére alaposabb indoklást igényel: miért van szükségünk a humán szubjektív szempontokra a végrehajtás pontosságát igénylő feladatok (pl. a robotok távoli vezérlése) értékelésében?

A téziscsoportban ismertetett eredmények felszínesek, a dolgozat nem támasztja alá alapos indoklással vagy levezetésekkel a javasolt megoldás érvényességét. A MOS képletekben szereplő számértékek magyarázat nélkül jelennek meg, ami tovább csökkenti az értekezés ezen részének tudományos megalapozottságát.

### 3. Összefoglaló értékelés

Az értekezés több ponton inkább egy kifejlesztett termék technikai dokumentációjára emlékeztet, különösen a távközlési tudományterületen megszokott cikkekhez és doktori munkákhoz viszonyítva. A dolgozatban említett demonstrációs videó egy ipari környezetben elterjedt marketing eszköz, ami az eredmények tudományos megalapozottságát nem bizonyítja. A dolgozat nem tartalmaz részletes levezetéseket, alapos vizsgálatokat, és mérhető valamint matematikai szempontból értelmezhető állításokat. A megoldási javaslatok mögött nem találhatók logikai érveléssel ellátott indoklások. Az implementációs eredmények mérnöki jellegűek, és a jelölt nem végzett összehasonlító elemzést más, hasonló megközelítésekkel. Hiányzik a módszertan szisztematikus alkalmazása és annak tudományos alapossága – például a merevtest-szimuláció szükségessége nincs megfelelően alátámasztva, a MOS alkalmazása pedig erőltetett. Az értekezésben kitűzött célok és a bemutatott eredmények között tartalmi inkoherenca tapasztalható.

Nem kétséges, hogy a szerző és kutatótársai jelentős mérnöki munkát végeztek: pl. szabadon hozzáférhető szoftvercsomagok (Gazebo, RLib, Ray) felhasználásával, saját modulok (pl. Gazebo plugin) fejlesztésével megvalósították a szerzők által "Digitális Iker"-ként definiált elosztott szimulációs/emulációs keretrendszert [6], amelyben a komponensek a valós környezetnek megfelelő módon kommunikálnak egymással, hasonlóan a fizikai eszközökhöz. Az értekezés a szerző alapos szabványismeretét és a technikai kompetenciáját demonstrálja. A megvalósított keretrendszer a tudományos vizsgálatok és azok alapján levonható tudományos következtetések előszobájának tekinthető. Azaz egy olyan eszközt létrehozta, amellyel végrehajthatóak különböző kísérletek és az eredmények alapján le lehet vonni megfelelően alátámasztott következtetéseket (lásd Pólya György "A gondolkodás iskolája" című könyve).

Összességében azonban úgy látom, hogy az értekezés jelen formájában nem tartalmaz megfelelően alátámasztott tudományos eredményeket, amelyek megfelelnek az MTA doktori disszertációval szemben támasztott elvárásoknak pl. előszóban ismertetett SZ1 és SZ2 követelmények alapján.

Budapest, 2025. október 29.

Do Van Tien

## Hivatkozások

- [1] G. Szabó and J. Pető, „Intelligent wireless resource management in industrial camera systems: Reinforcement learning-based AI-extension for efficient network utilization,” *Comput. Commun.*, vol. 216, pp. 68–85, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.12.026>
- [2] G. Szabó, „Towards the automatic network resource management of OPC UA in 5G private networks,” *Comput. Networks*, vol. 250, p. 110581, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110581>
- [3] —, „Enhancing vertical application and network co-design: A solution for multipath channel switching in ROS2 with 3GPP integration,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 34 269–34 285, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3543905>
- [4] G. Szabó, Z. Trombitás, J. Pető, T. Lohmar, I. Komlósi, T. Pepó, A. Vidács, and M. Andó, „Impact of network resource management on quality of industrial processes,” in *NOMS 2023-2023 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. IEEE, May 2023, p. 1–4. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/NOMS56928.2023.10154396>
- [5] G. Szabó, M. Balogh, and A. Vidács, „Impact of network resource management on the quality of pick and place processes,” in *2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. IEEE, Jun. 2024, p. 1–5. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.23919/SpliTech61897.2024.10612562>
- [6] G. Szabó, S. Rácz, N. Reider, H. A. Munz, and J. Pető, „Digital twin: Network provisioning of mission critical communication in cyber physical production systems,” in *2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, 2019, pp. 37–43.