

Bírálat Szabó Géza

Smart Network Solutions for Industry 4.0: Leveraging 5G Network Exposure and adaptive Industrial Applications

(Intelligens hálózati megoldások az Ipar 4.0 számára: programozható 5G hálózatok és adaptív ipari alkalmazások)

című MTA doktori értekezéséhez

I. Általános értékelés

A disszertáció fő témája az 5G mobil hálózatok kiegészítése és integrálása ipari vezérlési és robotikai célú kommunikációs szabványoknak megfelelően. A fókuszban az áll, hogy milyen módon lehet az 5G hálózat képességeit kihasználni, illetve illeszteni az ipari folyamatszabályozási körökben szereplő applikációkhoz; hogyan lehet befolyásolni a hálózat működését ezen applikációk igényeinek megfelelően, illetve hogyan tudja maga a hálózat az applikációk minőségét monitorozni, viselkedését befolyásolni; mi a hatása a hálózati minőségi paramétereinek (csomagvesztés, késleltetés) az ipari folyamatok minőségére; hogyan definiálható egyáltalán az ipari folyamatok minősége.

A téma korszerű és releváns, hiszen az 5G hálózatok szabványosításának és bevezetésének egyik fő motivációja és újszerű használati módja az ipari folyamatok kommunikációjának ellátása. Természetesen erre a célra rendelkezésre áll számos korábbi szabványosított és gyártóspecifikus megoldás, ezek azonban túlnyomórészt vezetékes összeköttetésre épülnek. Az 5G ígérete és előnye, hogy az ipari kommunikációhoz szükséges szigorú követelményeket képes teljesíteni (magas megbízhatóság, alacsony késleltetés, determinisztikus működés) úgy, hogy a rádiós / mobil kommunikáció rugalmasságát és előnyeit (nincs szükség fix vezetékes infrastruktúrára) is hordozza.

Az 5G szabványcsaládot specifikáló 3GPP szervezet számos olyan, az 5G hálózatok alapvető működésének kiegészítéseként tekinthető további szabványt definiál, amelynek használata a fenti célokat lehetővé teszi. A Jelölt munkássága ezekre a szabványokra, illetve ezek kiegészítésére fókuszál olyan módon, hogy az ipari folyamatok kommunikációját is – más szervezetekben leírt – szabványos keretekre helyezi. A munka eredményei tulajdonképpen lehetővé teszik azt, hogy az 5G rendszerek fenti ígérete megvalósulhasson. A munka újdonságtartalma jelentős, ezt bizonyítja a számos nagy presztízsű folyóiratban és konferencián megjelent publikáció, illetve a releváns keresőkifejezésekre a Jelölt munkáit citáló keresési eredmények, valamint számos szabadalom.

A disszertáció és az elvégzett munka műszaki, távközlési, szoftver-technológiai eljárások és megoldások vizsgálatát tartalmazza. Mint ilyen, a Jelöltnek különös figyelmet kell fordítania arra, hogy a disszertációban elkülönítse és kiemelve a tudományosan releváns új eredményeket attól, hogy egy adott rendszerben bizonyos komponenseket megtervezett és megvalósított. Amikor egy műszaki rendszer megvalósításáról van szó, amennyiben az nem triviális és a tervezési szempontok, működési módok, elemzési szempontok, stb. formálisan (és ezáltal általánosíthatóan) le vannak írva, akkor az újszerű műszaki rendszer új tudományos eredménynek tekinthető. A dolgozat egyik hiányossága az, hogy az implementáció

és a tudományos újszerűség nem könnyen választható szét a leírás alapján. Ennek megfelelően a bírálatomban számos kérdést felteszek, amelyek ezt igyekeznek tisztába tenni.

A védésen kérem a Jelöltet, hogy ezeket válaszolja meg.

II. A tézisállítások összefoglalása, megjegyzések, kérdések a tézisekhez

Az **1. téziscsoportban** a szerző architektúrát és algoritmusokat mutat be egy adott robotikai feladat-típus automatikus végrehajtásához szükséges gyártócella-elrendezés (rádiós hozzáférési pontok helyzete) és szenzor viselkedés (kamera által kért hálózati minőség) együttes optimalizálására.

Ennek megfelelően az **1.1 tézisben** a felvesz/elhelyez típusú feladatokra alkalmas gyártócella digitális ikerpárjára tesz javaslatot. A disszertáció vonatkozó fejezeteiből (2.4 és 2.5) azonban hiányzik a rendszer digitális ikerpárjának precíz, formális leírása (olyan módon, hogy a tézis az adott specifikus cél-szoftverek használata nélkül is érvényes legyen, pl. egy digitális ikerpárral szemben támasztott követelmények formális leírása, stb.), illetve a digitális ikerpár lényegi komponenseinek (pl. rádiós terjedés szimulátor, szilárdtest szimulátor) ismertetése.

Kérdések:

1. Hogyan definiálja a magas/alacsony QoS-t? Átviteli sebességgel, vagy egyéb módon? Mely értékeket tekinti magasnak/alacsonynak a vizsgálatok során?
2. Hogyan definiálja a magas csillapítás küszöbértékét?
3. Mi alapján történí a szakaszcsillapítás – QoS szint összerendelése?
4. A 2.5 fejezetben említi egy „fizikai iker” eszközt, amely alapján a kamera tárgydetektáló képessége becsülhető, de semmi további információt nem közöl, mik az eszköz főbb jellemzői?
5. Ezek a számszerű értékek nyilvánvalóan függenek az adott felhasználási esettől és a fizikai elrendezéstől, mégis, mennyiben általánosítható ez a fajta digitális iker javaslat, milyen esetekre?
6. A Jelölt állítása szerint a digitális iker elegendően pontos modellje egy valóságos gyártócella elrendezésnek. Mi bizonyítja ezt, milyen esetekben érvényes ez a megállapítás, tekintve, hogy a rádiós jelnek csak a csillapítását veszi figyelembe, az átviteli minőséget ténylegesen befolyásoló további tényezőket (interferencia, rádiós kapacitás, alkalmazható modulációs és kódolási eljárások, stb.) nem?
7. A munka végzése során mit feltételezett, egyszerre hány darab magas QoS-t igénylő kamerát képes egy rádiós hozzáférési pont kiszolgálni?
8. A tézisdokumentumban közölt 2. ábrán olyan fejezetekre és további ábrákra hivatkozik, amelyek nem szerepelnek a tézisdokumentumban, sem a disszertációban. Ez egy, a Jelölt publikációjából egy az egyben átvett ábra, amely így korlátozottan értelmezhető. Érdekes lett volna a disszertáció releváns fejezeteire, ábráira hivatkozni.
9. A Jelölt 5G hálózatról ír, azonban 4G terminológiát és folyamatokat használ számos esetben (pl. QCI – az 5G-ben ez 5QI; vég-vég hordozók – az 5G-ben nincs ez a koncepció). Mint a disszertációból kiderül, ennek oka, hogy a vizsgálataiban az ún. nem önálló 5G architektúrát (NSA – Non-Standalone Architecture) feltételezi, amely esetén a maghálózat 4G és a rádióhálózat 5G.

Emiatt viszont zavaró, hogy máshol pedig a 4G-ben nem szereplő 5G maghálózati funkciókra (pl. NEF – Network Exposure Function) utal.

Az **1.2 tételben** javaslatot tesz egy elosztott megerősítéses tanulási eljárást lehetővé tevő architektúrára, amellyel az adott problémakör (felvesz-letesz típusú robotikai feladat) kezelhető. Az 1.1 és 1.2 tételállítások a disszertáció vonatkozó fejezetei (2.4, 2.5) alapján véleményem szerint nehezen elkülöníthetők.

Kérdések:

10. Az ügynökök megfigyelési terében központilag elérhető, vagy más ügynökök által mért/megfigyelt információ is szerepel, például a robotdaru pozíciója, a további rádiós hozzáférési pontok pozíciója, vagy minden hozzáférési pont–kamera pár közti csillapítás értéke. A szimulátorokon (digitális iker) alapuló tanítási fázis során ez az információ nyilván rendelkezésre áll, a következtetési (inference) fázisban egy valós rendszerben is megoldható, de mindenképpen egy közös információhalmazt jelent. Ennek fényében mi motiválja az elosztott, ügynök alapú architektúrát, ahol az ügynökök önállóan hoznak döntést, egy olyan architektúrával szemben, ahol a rádiós hozzáférési pontok elhelyezéséről, illetve a kamerák QoS kéréséről együttes, központosított döntés születne?

Az **1.3 tételben** a Szerző javaslatot tesz egy ún. tantervi tanulási (curriculum learning), vagy fokozatos tanulási eljárásra, amely alkalmas az 1. tétiscsoportban vizsgált optimalizálási feladat elvégzésére.

Kérdések:

11. A tanulási eljárásban az egyik fokozat (folytonos cselekvési tér) a sugárkövetéses terjedés-szimuláció paramétereinek beállítására törekszik. Ennek pontosan mi a célja, hiszen a valós rendszerben, ahol a következtetési fázis zajlik, ez nem értelmezhető. Ha viszont az inference is csak egy szimulált rendszerben történik, akkor nem lehet igazán jó következtetést levonni arra vonatkozóan, hogy a módszer mennyire lenne alkalmazható egy fizikai környezetben.

A **2. tétiscsoportban** a szerző olyan műszaki architektúrákat javasol és vizsgál, amelyek a 3GPP által az 5G rendszerekhez szabványosított funkciók (SEAL – Service Enablement Application Layer) segítségével lehetővé teszik, hogy vertikális alkalmazások az 5G hálózat képességeit kihasználják, a hálózat felé kéréseket küldjenek és a hálózathoz információt kapjanak.

A **2.1 tételben** a szerző bemutatja a ROS2-t használó applikáció és a 3GPP által definiált SEAL közötti csatlakozás megvalósítására javasol megoldását. A megoldás jelentősége, hogy képes a ROS2-ben alapértelmezett publikál-feliratkozik típusú kommunikációt az 5G mobil rendszerekben kezelt adatfolyamokra leképezni. A tételállítás szövege szerint két (szoftveresen megvalósított) csomópontot definiál (*"I propose a proxy node that collects the information and a node performing the mapping from ROS2 settings to 3GPP SEAL requests."*), a disszertáció vonatkozó fejezetében ez nehezen elkülöníthető, vagy azonosítható.

Kérdések:

12. A disszertációban bemutatott Unique Flow Topic Relay – UFTR funkció mellett melyik a másik, a tételállításban említett csomópont?

13. A 3.2.3.2 -ben azt írja, hogy ha egy mérési ablakban, az előző ablakhoz képest az átviteli sebesség különbsége kisebb, mint 10%, akkor ennek a témának egy garantált bitsebességű szolgáltatási osztályt feleltet meg. Mi történik, ha a későbbiekben az átviteli sebesség jelentősebben változik két egymás utáni átlagolási ablakban? Lehet-e dinamikusan változtatni a QoS osztályra való leképzést?

A **2.2 tételben** bevezeti az úgynevezett alagút módú működést, amellyel a 2.1 tételben bemutatott architektúrában, az ott definiált UTFR csomópontok között lehetővé teszi az üzenetek kiegészítését extra fejléc információval (időbélyeg, sorszám), amely a szolgáltatási minőség mérését lehetővé teszi.

Kérdések:

14. A 3.10 ábra szerinti UFTR architektúrában minden QoS szinthez (QCI értékhez) külön közlő (publisher) tartozik; ezek az adott QoS igényű üzeneteket a megfelelő témába publikálják. A bemenet azonban az alkalmazástól jövő üzenet; melyik funkcionális modul tudja ezt a leképzést (alkalmazástól jövő üzenet → QCI érték) megtenni? Honnan van az ehhez szükséges információ?

A **2.3 tételben** a Jelölt egy másik, a robotikában és ipari folyamatvezérlésben használt szabvány, az OPC UA és a 3GPP 5G rendszerek integrálását megvalósító elrendezésre tesz javaslatot. A megoldandó műszaki probléma itt is a két alapvető információközlési mód (közvetlen-feliratkozik, illetve az 5G-ben jellemző QoS adatfolyam) közti összerendelés, valamint a hálózati minőség monitorozásának megvalósítása; a Jelölt tételében bevezeti az ezt a funkcionalitást ellátó modulokat.

A **3. tétiscsoportban** vizsgált fő koncepció az alkalmazások adatainak és képességeinek kiejánlásáról (exposure) szól, amelyet így a hálózat, mint szolgáltatások fogyasztója használhat. Ez alapvetően egy, csak a közelmúltban felbukkant újszerű tématerület, amely lehetővé teszi, hogy a hálózat az applikációk állapotáról, teljesítőképességéről információt nyerjen és saját viselkedését ennek megfelelően befolyásolja.

A **3.1 tételben** ennek megfelelően a Szerző egy új szolgáltatási réteget vezet be, a 3GPP által definiált SEAL architektúra szerinti funkcionalitásokon túl. A bemutatott koncepcióban az ipari alkalmazás viselkedését mérő „szenzor” funkció a választott applikáció MOS (Mean Opinion Score) értékét teszi elérhetővé, a hálózat számára releváns beavatkozási lehetőségként pedig az ipari kontroller üzenetküldési gyakorisága befolyásolható. A vonatkozó leírásban (3.3 fejezet), az elméleti koncepció nagyban keveredik a demonstrációs célra választott konkrét gyakorlati példa-implementáció leírásával. Tudományos értékeléshez funkcionális elemek, ezek feladatainak leírása és a közöttük szükséges interfészek és ezeken folyó információcsere ismertetése lenne szükséges, függetlenül attól, hogy a megvalósításban ez egy új pub-sub téma, vagy éppen egy webes grafikus interfész. Érthető, hogy a szerző a Turtlesim szoftvert használja, mint példa, de a megfogalmazás olyan, hogy az olvasó számára nehéz az eredményeket általános érvényükben értelmezni (pl. ipari folyamatvezérlés kontra Turtlesim szimulátor); a leírás alapján úgy is tűnhet, hogy az eredmények csak a Turtlesim szoftverre érvényesek.

A **3.2 tételben** a szerző javaslatot tesz egy megerősítéssel tanulás alapú eljárásra, amely a vezérelt alkalmazáshoz (a példában: Turtlesim) definiált minőségi értékeket (MOS) megpróbálja a hálózat által nyújtott QoS mellett maximálni olyan módon, hogy a kontroller beavatkozási sebességét módosíthatja, illetve mesterségesen csomageldobást és késleltetés-változtatást idézhet elő. A dolgozatból hiányzik az algoritmus formális ismertetése, a Jelölt csak az alkalmazott függvénykönyvtárakról és ezek paramétereiről közöl limitált információt.

Kérdések:

15. A disszertáció 3.5 fejezetében azt írja, hogy a megerősítéses tanulás jutalomfüggvényébe olyan paramétereket érdemes tenni, amelyek a cselekvési tér részei, minden más a megfigyelési térbe tartozik. Ezzel a megállapítással nem értek egyet, véleményem szerint általában éppenséggel a megfigyelt értékek (a cselekvés eredménye) az, amelyek használatával érdemes a jutalomfüggvényt definiálni.
16. A 3.1 összefüggéshez definiálja (a szövegben, de nem formálisan) a MOS értékét (az elvárt pozíció és a tényleges pozíció közti átlagos négyzetes hiba). Ennek mekkora a nagyságrendje? A 3.1 jutalomfüggvényhez a MOS súlya 200; mekkorák a jellemző értékek a másik két paraméter (késleltetés, csomageldobás) esetében?
17. A 3.5 fejezetben ismerteti a tanulási eljárásra vonatkozó eredményeket. A következtetési (inference) fázisban volt-e 5G hálózat a Turtlesim alkalmazás és a kontroller között? Ha igen, ennek minőségét tudta befolyásolni (késleltetés, jitter, csomagvesztés), hogyan?

A **3.3 tétel**ben javasolt szoftver architektúra a 3GPP SEAL keretrendszert egészíti ki azzal a céllal, hogy lehetővé tegye a megváltozott hálózati viszonyokhoz (pl. romló QoS) való adaptációt olyan alkalmazások számára is, amelyek natív módon nem rendelkeznek ezzel a képességgel. A disszertáció vonatkozó fejezete részletezi az ennek megvalósításához szükséges funkcionális elemeket, azonban az adaptáció lehetséges konkrét módjait nem említi.

Kérdések:

18. Ha egy applikáció natív módon nem támogatja a változó hálózati viszonyokhoz való adaptációt, akkor a 4.3 fejezetben ismertetett elemek segítségével milyen konkrét adaptációs mechanizmusok valósíthatók meg mégis?

A **4. téziscsoportban** vizsgált terület az ipari folyamatok minőségi jellemzői és a hálózat viselkedésének ezekre való hatása. A tézisekben a Jelölt a távközlésben ismeretes QoE (Quality of Experience) és MOS (Mean Opinion Score) koncepciókat ülteti át az ipari alkalmazások környezetébe és azt vizsgálja, hogy a hálózati késleltetés mekkora hatással van különböző ipari folyamatok MOS jellegű metrikáira. Ennek a témának különféle ipari folyamatokra vonatkozóan elég széles irodalma van, különösen a hagyományos, vezetékes ipari hálózatok esetén, de 5G, vagy IEEE TSN környezetre is. Hiányoltam ezen szakirodalom ismertetését.

A **4.1 tétel**ben felvesz-elhelyez típusú robotikai feladatokat vizsgál, ahol metrikaként egyrészt az optimális szállítási távolságot (Earth Movers' Distance, EMD), a NIST ARIAC (Agile Robotics for Industrial Automation Competition) versenyén kiértékelt pontszámot, valamint a teljes robotikai feladat végrehajtási idejét alkalmazza. A tétel kidolgozása során különböző hálózati késleltetésekkel szimulálta a robotikai feladatsort, ezekhez a fenti három metrikát kiértékelte vizuálisan és az ARIAC és teljesítési idők alapján az EMD értékeket öt intervallumra osztva definiálja az öt fokozatú MOS skálát. A definíció formálisan nincs bevezetve, a tétisállításban leírt módszer sincs formálisan leírva, csak mint egy példa viszonylag limitált számban futtatott szimulációkkal illusztrálva.

Kérdések:

19. Az 5.3 és 5.4 ábrák néhol ellentmondanak az intuíciónak, ugyanis az emelkedő késleltetés nem minden esetben jár a fenti metrikák romlásával. Például az ARIAC pontszám 1 és 2 ms késleltetésnél jobb, mint késleltetés nélkül, vagy a teljesítési idő 3 és 4 ms késleltetésnél is jobb, mint alacsonyabb késleltetéseken. Ezeknek mi a magyarázata?
20. Hogyan definiálná formálisan a 4.1 tézisállítást? Mennyire lehet ezt általánosítani, úgy megfogalmazni, hogy tetszőleges pick&place feladat jellemzésére megfelelő legyen?
21. Az (5.1) összefüggésben közölt MOS – késleltetés leképzés ellentmond annak, amit az 5.5 ábrán közöl. Mi ennek az oka? Ezek különböző scenáriókra értelmezendők?

A **4.2 tézisben** a Jelölt az előzőhöz hasonló módon, ezúttal robottal végzett csiszolási folyamatok MOS jellegű metrikáit és a hálózati késleltetés erre való hatását vizsgálja. A szerző itt a csiszolófej elhelyezkedésének hőtésképei közti EMD távolság értékeit osztja öt részre és rendeli hozzá a MOS értékeket. A vonatkozó fejezetben említést tesz továbbá egy többosztályos kép-klasszifikációs algoritmusról is, mint a MOS lehetséges becslési módjáról, de a részletek hiányoznak a dokumentumból.

A **4.3 tézisben** a szerző egy újabb ipari folyamat típushoz, a 3d nyomtatáshoz végzi el a 4. téziscsoport vizsgálatait, azaz MOS jellemző meghatározását és egy adott szimulációs példában a hálózati minőség erre való hatásának elemzését. A megközelítés ebben az esetben különbözik a 4.1 és 4.2 tézisektől, ugyanis itt a 3. téziscsoportban ismertetett architektúrában valósítja meg a robotikai feladatot, valamint az OPC UA közzeztetés-feliratkozik kommunikációjában a különböző témákon mesterségesen beillesztett késleltetés és csomagvesztés hatását vizsgálja.

Kérdések:

22. A 3d nyomtatási példában a “távolság” átlagát és szórását tekinti a mérvadó, MOS-ra leképezhető metrikának. Pontosan minek a távolságáról van szó? Kérem, vezesse be formálisan.
23. Az 5.2 ábrán bejelöli a fenti távolságok szerinti MOS értékeket. Ezt mi alapján teszi? Van formális definíciója az átlagos távolság – MOS összerendelésnek?
24. Az 5.11 ábra eredményeinél a SEAL NRM, a CAPIF NRM és a megnövelt felületi feszültségű folyadék esetek késleltetése is 60 ms? Ha igen, a CAPIF és SEAL által okozott extra késleltetés is figyelembe lett véve valahogy? Összehasonlíthatók ezek a többi vizsgálattal?

III. Összegzés

A Jelölt összességében új, önálló tudományos eredményeket ért el; ezek részletesebb értékeléséhez kérem, hogy a bírálóban feltett kérdéseket válaszolja meg. A Jelölt eredményeit megfelelő számban, rangos folyóiratokban és konferenciákon publikálta. A disszertáció nyilvános vitára való bocsátását javaslom.

Budapest, 2026. június 26.

.....

Fazekas Péter PhD

Nokia Bell Labs