szgezu_296_24

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

MTA doktori disszertáció tézisei

Szabó Géza

2024. december 6.

1. Bevezetés

Az ötödik generációs mobilhálózatokat (Fifth generation of mobile communications (5G)) arra tervezték, hogy a fogyasztói mobil szélessávon túlmutató új felhasználási eseteket támogassanak, mint például a kritikus gépi típusú kommunikáció (Machine Type Communication (MTC)) és a tömeges MTC. A kritikus MTC esetében rendkívül alacsony késleltetésre és magas megbízhatóságra van szükség, míg a tömeges MTC-nél a lefedettség kiterjesztése és a szenzor jellegű, nagy mennyiségű eszköz használata során a hosszú akkumulátor-élettartam az előny. Ugyanazon 5G hálózat képes a mobil szélessávú, kritikus és tömeges MTC használati esetek eltérő szolgáltatási minőségi követelményeinek támogatására.

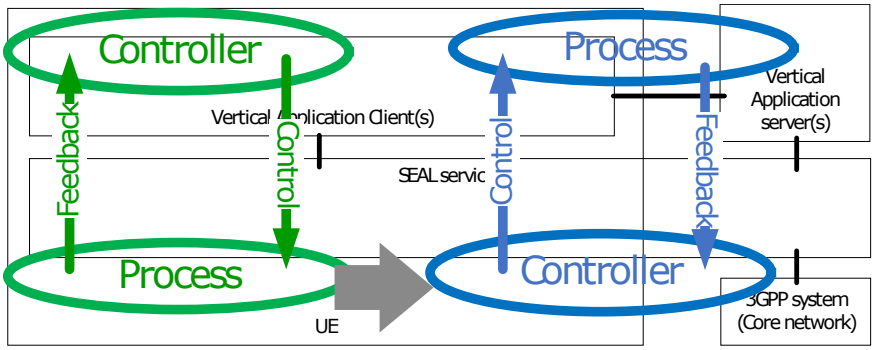
A Harmadik Generációs Együttműködési Projekt (Third Generation Partnership Project (3GPP)) [1] által definiált 5G maghálózati (5G Core (5GC)) szolgáltatásalapú architektúra (Service-Based Architecture (SBA)) meghatározza a funkcionális architektúrát és a szabványosított interfészeket, mivel az 5GC vezérlési sík hálózati funkciói (Network Functions (NFs)) szolgáltatásalapú interfészeket (Service-Based Interfaces (SBIs)) tesznek közzé. Az NF-ek regisztrálják szolgáltatásaikat a Hálózati Expozíciós Funkcióban (Network Exposure Function (NEF)) [2], így ezek a szolgáltatások más NF-ek által felfedezhetővé válnak. Ez rugalmas telepítést tesz lehetővé, ahol minden NF hozzáférést biztosít az arra jogosult más NF-ek számára, ami lehetőséget ad arra, hogy külső harmadik felek is használhassák az 5GC által nyújtott szolgáltatásokat és képességeket. A mobilhálózatok hagyományos konfigurálása az üzemeltetés-karbantartás (Operations and Maintenance (OM)) interfészeiken keresztül történik, amelyek parancssoros eszközök vagy NetConf alapúak [3]. Ezeket az interfészeket csak a hálózat üzemeltetői használhatják, ezért a gyárnak minden módosításhoz ügyfélszolgálati kérést (Customer Service Request (CSR)) kell benyújtania a kommunikációs szolgáltatónak (Communication Service Provider (CSP)). A CSR-ek kezelése jellemzően több manuális lépést igényel, így időigényes eljárás. Néhány egyszerűbb konfigurációs lépés automatizálható a gyár részéről a NEF alkalmazásprogramozási felületeken (Application Programming Interface (API)) keresztül. Ezeket a 3GPP a 23.501-es [4] Technikai Specifikáció (Technical Specifications (TS)), TS 23.502 [5] és TS 29.522 [2] specifikációkban határozta meg. Habár a NEF a 3GPP 15-ös kiadásának újdonsága volt, van egy problémája az Északi irányú API-k offline konfigurációja miatt: nem támogatta az API-k felfedezését, és működésük széttagolódáshoz vezetett. A NEF bevezetése után nem sokkal meghatározták a Közös API Keretrendszert (Common API Framework (CAPIF)), hogy létrehozzanak egy egységes és harmonizált platformot az összes 3GPP Északi irányú API számára. A CAPIF-fel kapcsolatos munkát a 3GPP Műszaki Specifikációs Csoport (Technical Specification Group (TSG)) Szolgáltatási Rendszer Aspektusok (System Aspects (SA)) 6-os számú munkacsoportjában (WG6) (SA6) végezték, amely a vertikális piacok számára nyújt alkalmazás-engedélyezési és kritikus kommunikációs alkalmazási megoldásokat. Az SA6 fő célja, hogy alkalmazási réteg architektúra specifikációkat biztosítson a 3GPP vertikális piacai számára, beleértve az architekturális követelményeket, a funkcionális architektúrát, az eljárásokat, az információáramlást, a nem-3GPP alkalmazási réteg megoldásokkal való együttműködést, és a megfelelő telepítési modelleket. Bár a NEF lehetőséget nyújt a hálózat alacsony szintű programozhatóságára, lehetőség nyílt annak felhasználó- vagy alkalmazásfejlesztő-barátabbá tételére is. Az 5G vertikális piacai számára meghatároztak egy közös képességkészletet, és bevezették a Szolgáltatást Támogató Architektúraréteg (Service Enabler Architecture Layer (SEAL)) 3GPP TS 23.434 [6] specifikációt, amely API-kat definiál kapcsolat kiépítéshez, kapcsolatkezeléshez, eszközkezeléshez, kapcsolatfigyeléshez, csoportkezeléshez, felhasználói profil lekérdezéséhez, identitás- és kulcskezeléshez, helyzetjelentéshez, eseményekhez és hálózati erőforrás-kezeléshez (Network Resource Management (NRM)). A SEAL interfész draszti-

kusan leegyszerűsítette az ipari 5G eszközök rendszerintegrációját [C1]. A programozható mobilhálózatok és kapcsolódó szabványok fejlesztése során az a motiváció, hogy a vertikális alkalmazások fejlesztői számára egy könnyen használható API-készletet biztosítsanak, amely lehetővé teszi a különböző ipari alkalmazásokhoz szükséges közös hálózati funkciók elérését mély hálózati ismeretek nélkül.

2. Kutatási célok és módszerek

Az expozíciót igénybe vevők az ipari IoT (Industrial Internet of Things (IIoT)) alkalmazások, amelyek szoftveres entitásként használják az 5G expozíciós interfészek szolgáltatásait, míg az expozíciót nyújtók azok az 5G funkciók, amelyek ezeket a szolgáltatásokat biztosítják a felhasználók számára. Jelenleg is folynak erőfeszítések annak érdekében, hogy a hálózati expozíciót egyszerűbbé tegyék az ipari vertikumok számára. Ezt a munkát ugyanez a motiváció vezérli, azzal a kutatási céllal, hogy az expozíciós kéréseket minél egyszerűbbé és automatikusabbá tegyem. Ezenkívül célom a lehető legszélesebb közösség elérése, ezért a Robot Operációs Rendszer 2-re (Robot Operating System (ROS)) összpontosítok – amelyet széles körben használnak kutatóintézetek, és amelyet az iparban is egyre inkább alkalmaznak –, valamint az ipari alkalmazásokban jól bevált Nyílt Platform Kommunikációs Egységesített Architektúrára (Open Platform Communications (OPC) Unified Architecture (UA)).

A jelenlegi 3GPP SEAL tervezés lehetővé teszi, hogy a hálózat a vertikális alkalmazások számára mind megfigyelhetőséget, mind pedig vezérlési lehetőségeket biztosítson, de a jövőben az intelligens hálózati megoldások érdekében szükséges lenne az ellenkező irányú információ- és vezérlésáramlás is. Kutatási célom, hogy bővítsem a hálózat beavatkozási hatáskörét, és megfordítsam a korábbi telepítési modellt oly módon, hogy az 5G hálózat legyen az expozíciót igénybe vevő, míg az expozíciót nyújtók a vertikális alkalmazások azon funkciói, amelyek a szolgáltatásokat biztosítják a felhasználók számára (lásd 1. ábra). Egy másik értelmezésben az előző szakasz merev Vertikális Alkalmazási Réteg (Vertical Application Layer (VAL)) alkalmazásokról és adaptív hálózatokról szólt, míg ez a szakasz a VAL alkalmazások képességeit bővíti az adaptív viselkedés irányába, együttműködésben a hálózattal.



1. ábra. A vezérlési hurkok a „vertikális alkalmazás mint a hálózati expozíció fogyasztója” és a „hálózat mint az alkalmazás expozíció fogyasztója” megközelítésekben

A mobil szélessávra (Mobile Broadband (MBB)) tervezett alkalmazások jellemzően beépített alkalmazkodási mechanizmusokkal rendelkeznek, hogy kezeljék a különböző hálózati körülményeket. Ezenkívül a felhasználók tudatában vannak annak, hogy vezeték nélküli kapcsolatra csatlakoznak, és hajlandóak elviselni a hálózati körülmények alapján ingadozó szolgáltatásminőséget. Az MBB alkalmazások alkalmazkodási mechanizmusai általában a

forgalmi jellemzők saját belső mérésein alapulnak, például a Dinamikus Adaptív videó sugárzás (Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP (DASH)) [7] esetén, vagy a hálózati és szállítási réteg jellemzőin, mint például a kifejezett torlódás értesítése (Explicit Congestion Notification (ECN)) [8] esetén. Kutatási célom egy olyan módszer kidolgozása, amely lehetővé teszi a hálózati erőforrás-kezelés felhasználását a 3GPP tartományon kívül, egységes módon, különböző hálózati rétegek között. A VAL alkalmazás által kért hálózati erőforrás-kezelés eddig nyitott hurkos módszerrel működött. Nem volt szenzorunk, amely ellenőrizni tudta volna az NRM kérés hatásait a VAL alkalmazás teljesítményére. Kutatási célom ennek a vezérlési huroknak a bezárása az ipari folyamatokhoz kapcsolódó szenzorvagy megfigyelési módszerek és interfészek javaslatával.

A disszertációban alkalmazott kutatási módszerek a következőképpen összegezhetők:

- irodalmi áttekintés: alapos irodalmi áttekintést végeztem, hogy megértsem a 3GPP SEAL, ROS2 és hálózati műveletek terén meglévő állapotot.
- koncepcionális keretrendszer kidolgozása: Az irodalmi áttekintés alapján javaslok egy koncepcionális keretrendszert a ROS2 és az OPC UA használatára, hogy automatizáljam a SEAL alkalmazását különböző ipari vertikumokban.
- megvalósítás és tesztelés: megvalósítottam a javasolt megoldást ROS2 és OPC UA használatával, és különböző esetekben és telepítésekben értékeltem a teljesítményét. Ezenkívül merevtest-szimulációkat is alkalmaztam a módszereim validálására, közel a valós világbeli körülményekhez.
- esettanulmány elemzés: több esettanulmányt kiértékeltem a javasolt megoldás megvalósíthatóságának és hatékony működésének bemutatására.
- értékelés és validálás: a javasolt megoldást a teljesítménye, hatékonysága és skálázhatósága alapján értékeltem. Validáltam a megoldást azzal, hogy összehasonlítottam a meglévő megközelítésekkel, és bemutattam az automatizálás, rugalmasság és használhatóság terén nyújtott előnyeit.
- nyílt forráskódúvá tétel: a hozzájárulásokat nyílt forráskódúvá tettem, hogy a kutató közösség tesztelhesse, visszajelzéseket adhasson, és akár javíthassa is őket.

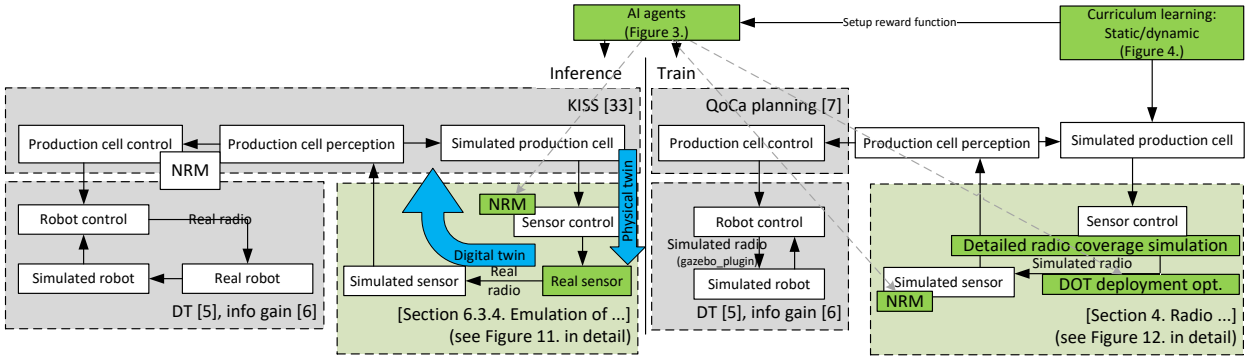
3. Eredmények

A gyártócella számos eseményt és anyagot tartalmaz, amelyek jelentősen befolyásolják a rádióhullámok terjedését. A gyártócella dinamikájának figyelembevétele érdekében optimalizálási algoritmusokat futtatnak a cella működése során, ami hosszú tanulási időt igényel. A jelenlegi műszaki megoldásokhoz képest számos fejlesztést vezetek be, beleértve a fizikai és rádióterjedési képességekkel rendelkező szimulációs környezetet, a gyors sugárkövetést a rádióterjedési modellezéshez, a tanterv alapú megerősítő tanulást és a rádióval összekapcsolt kamera fizikai ikertestvérét önbeállító jelenetbeállítási képességekkel. A javaslat a 5G rádióhasználat hatékonyságát ötvözi a pontos modellezéssel és a nagy felbontású szimulációkkal, miközben javítja a tanulási sebességet.

1. Téziscsoport. ***Az NRM expozíció hasznosítása szenzorok számára egy agilis gyártási cellában*** *[J3] Egy módszert javaslok, amely a vezetékes kommunikációt vezeték nélküli kommunikációval helyettesíti egy agilis gyártási cellában, minimális számú hozzáférési pont használatával. Ez a megoldás kihasználja az 5G legutóbbi szabványosított NRM-funkcióit, amelyek a kamerákhoz csatlakozó Felhasználói Eszközökön (User Equipment (UE))*

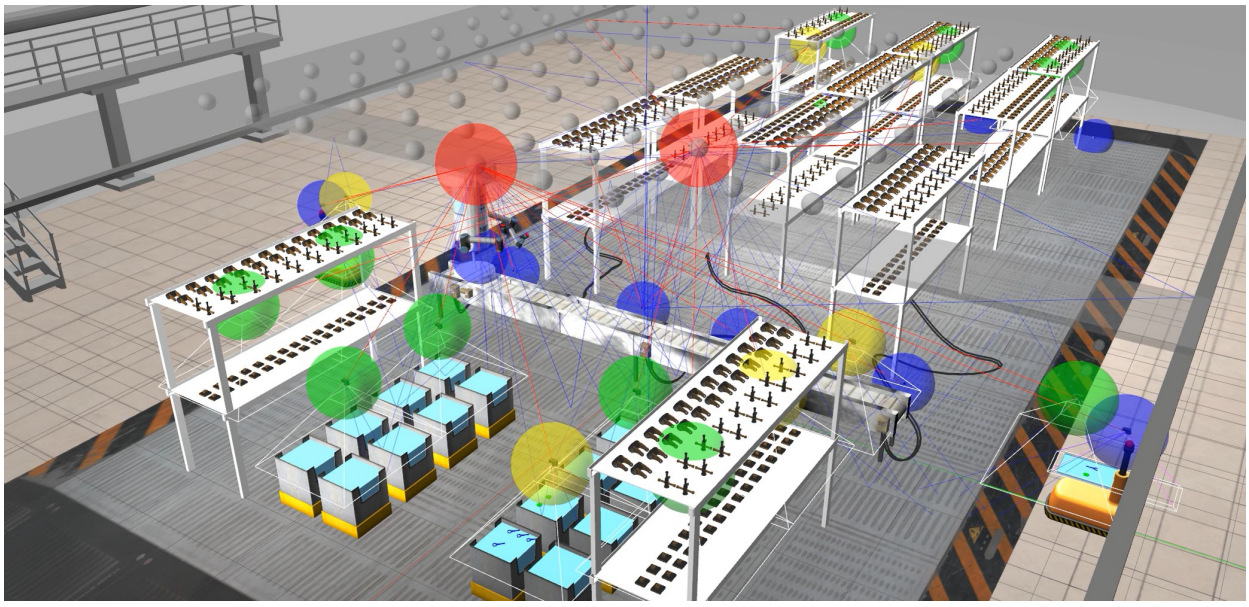
kerülnek meghívásra. A javaslat ötvözi az 5G rádióhasználat hatékonyságát a pontos modellezéssel és a nagyfelbontású szimulációkkal, miközben jelentősen javítja a tanulási sebességet.

1.1. Tézis. *[J3] Egy olyan új digitális ikerkörnyezetet (Digital Twin (DT)) javaslok, amely megerősítéses tanulási (Reinforcement Learning (RL)) algoritmus számára biztosít tanulási környezetet. A javasolt digitális iker a valóságot nagyon pontosan szimulálva, közel valós időben – vagy akár azt meghaladó gyorsasággal – működik, mind szilárdtest fizikai szimuláció, mind pedig hardveresen gyorsított sugárkövetés alkalmazásával a rádióhullám-terjedés szimulációjához.*



2. ábra. A jelenlegi munka és hozzájárulása az eddigi munkáinkhoz képest [szürke – jelenlegi állapot, zöld – hozzájárulások a [J3] folyóiratban].

Az 2. ábra a javasolt architektúrát szemlélteti digitális és fizikai iker kapcsolatokkal (kék nyilak). A vezérlési hurok a valós szenzortól a szimulált szenzorig, a gyártási cella érzékelésétől a szimulált gyártási celláig terjed, így alkotva meg a valós hardver-alapú érzékelés digitális ikrét. A visszacsatolási hurok a szimulált gyártási cellától indul, a szenzorvezérlésen keresztül halad a valós szenzorig, míg a másik visszacsatolási hurok a valós szenzortól indul, a szimulált szenzoron és gyártási cella érzékelésen keresztül a szimulált gyártási cellában ér véget.

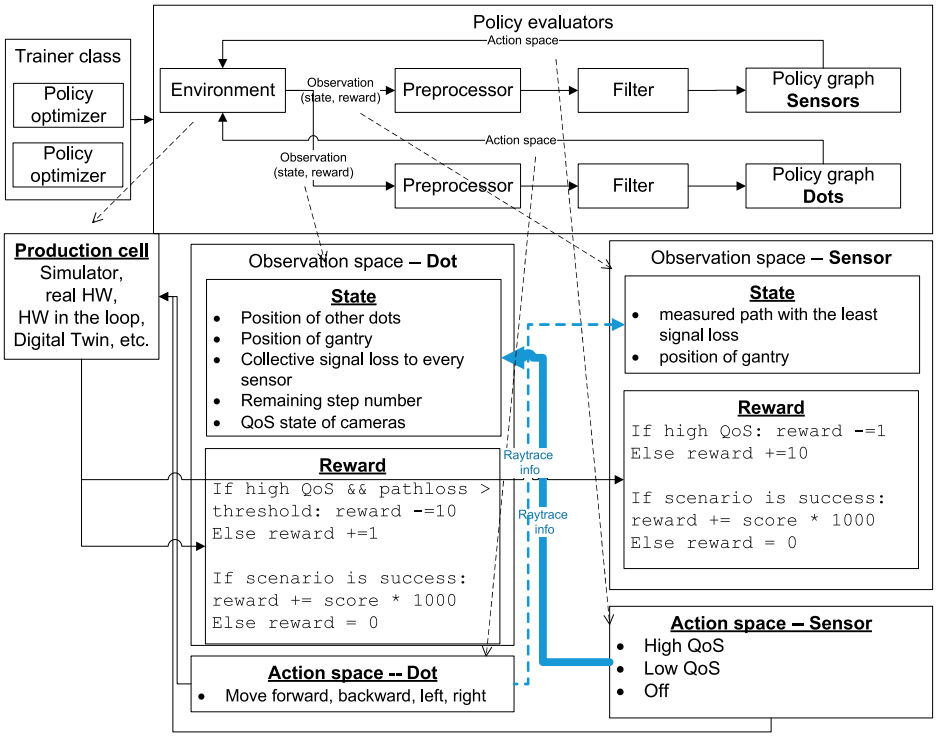


3. ábra. A javasolt rendszer

Értékelés. A javasolt rendszert megvalósítottam, és a rendszer működés közbeni bemutató videója megtekinthető a [9] hivatkozáson. A javasolt rendszer az 3. ábrán látható, amely nagy pontosságú szimulátorokat használ egy robotikai cellában való teljesítményének tesztelésére, és elemzi, hogyan befolyásolja a rádióhullámok terjedése a termelékenységi mutatókat dinamikus környezetben. Az Agilis Robotika az Ipari Automatizációért Verseny (Agile Robotics for Industrial Automation Competition (ARIAC)) 2020 [10] környezetet használva alapként, amelyet ROS-ban és Gazebóban valósítottak meg, a rendszer egy gyártósort szimulál, ahol robotkarok végzik egy rendelés összekészítését. Bár a szimulációk nem képesek teljes mértékben visszaadni a valós rendszerek működését, a beállítás közel valósághű pontosságra törekszik.

A Gazebo, amely a pontosságáról ismert, szimulálja a rendelés összekészítési folyamatot, míg egy grafikus feldolgozó egység-alapú (Graphics Processing Unit (GPU)) sugárkövető eszköz számítja ki a rádiós lefedettséget nagy pontossággal, figyelembe véve a felületi anyagokat és a dinamikus környezetet. A kamera digitális ikre értékeli a termelékenységi mutatókat, mérve a rádiósávszélesség korlátainak hatását a pozíciós hibán és annak rendszerre gyakorolt hatásán keresztül.

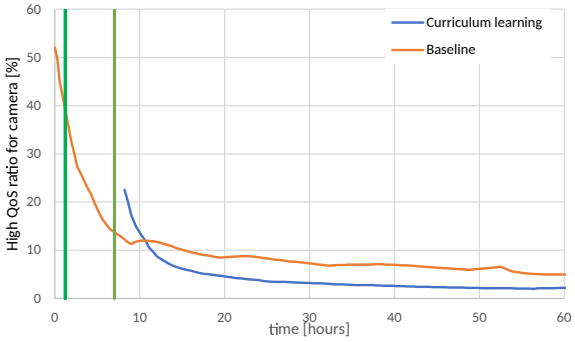
1.2. Tézis. *[J3] Új módszert javaslok, amely megerősítéses tanulási (RL) eljárás alkalmazásával optimalizálja a rádiós hozzáférési pontok elrendezését egy gyártó cellában illetve ezen gyártó cellában elhelyezett kamerák által biztosított videófolyamok minőségét, melyek szükségesek a gyártó cella működéséhez. A megközelítés mesterséges intelligencia (Artificial Intelligence (AI)) alapú ügynökök bevezetésére épül, amelyek egyrészt a hozzáférési pontokhoz rendelve optimalizálják azok elhelyezkedését, majd e hozzáférési pontok együttműködnek a másrészről a kamerarendszerekhez rendelt ügynökökkel annak érdekében, hogy a kamerák által biztosított videófolyamok minőségét az általuk kért hálózati erőforrások (NRM) dinamikus, igényalapú allokálásával optimalizálják, figyelembe véve a rádiófrekvenciás lefedettség sajátosságait és a gyártó cella működését.*



4. ábra. A javasolt rendszer mesterséges intelligencia architektúrája

A RL esetében (lásd 4. ábra) a megfigyelési tér azokra az információkra utal, amelyeket az ügynök a környezetből kap, és amelyek segítik a döntéshozatalban. A rádiós vevő számára ez magában foglalja a többi vevő pozícióját, az aktuátor helyzetét, a jelveszteségeket, a tantervi tanulásból hátralévő lépéseket és a kamera érzékelési pontosságának adatait. A jelveszteséget sugárkövetéssel számítjuk a mobil cellában, míg a jutalmak ösztönzik a tanulást a cselekvések alapján, befolyásolva a tanulási sebességet és a konvergenciát. A kamera megfigyelési tere a minimális jelveszteségű útvonalra és az aktuátor helyzetére összpontosít. Ezek a megfigyelési terek univerzálisak, és függetlenek a gyártási cella elrendezésétől.

A cselekvési tér az ügynökök számára elérhető cselekvések halmazát definiálja. Mind a rádiós vevő, mind a kamera diszkrét cselekvési térrel rendelkezik. A rádiós vevő cselekvései közé tartozik a mozgás négy irányba (előre, hátra, balra, jobbra) és a magasság beállítása a tanulás megkönnyítése érdekében. A kamera a magas vagy alacsony szolgáltatás minőség (Quality of Service (QoS)) csatlakozás között választ, amely befolyásolja a továbbított kép felbontását ezáltal pedig a feladat végrehajtásának pontosságát. A cselekvési és megfigyelési terek összefüggnek, amikor az ügynökök kommunikálnak; a csatlakozás alapja a jelveszteségi-küszöb, amely biztosítja az adatátvitel megfelelő minőségét.

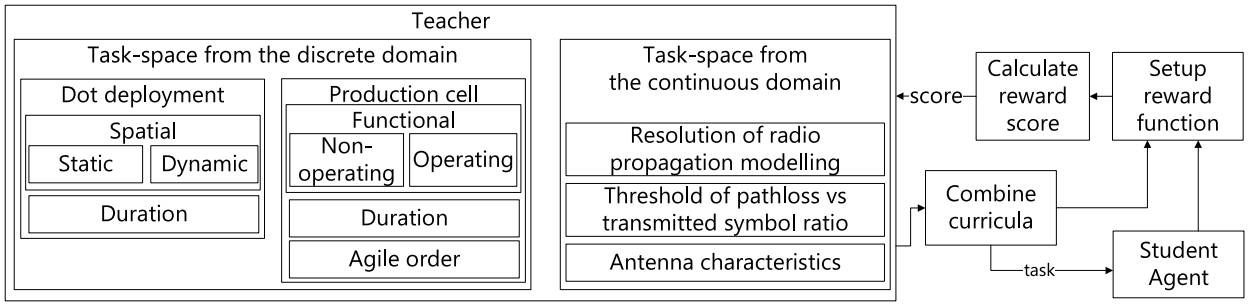


5. ábra. A kamera számára igényelt magas QoS csatorna arány

Értékelés. A 5. ábra a kamera magas QoS csatorna választási arányát mutatja. Érdemes megjegyezni, hogy az 1-2. tananyag (lásd az 1.3. Tézist) során nem működik a kamera szenzor, ezért arra a részre nincs adat. A tanulásalapú megoldás körülbelül 2,12%-os magas QoS választási arányra konvergál, míg az alapérték 4,97%, ami több mint duplája a kért magas QoS aránynak. A *magyarázat* a következő. Az elemzett időszakban a tantervi tanulás nélküli módszer nem tudta elérni ugyanazt a teljesítményt, mint a tantervi tanulás alapú megközelítés, de hosszabb tanulás esetén várhatóan megközelíti ugyanazt a QoS arányt.

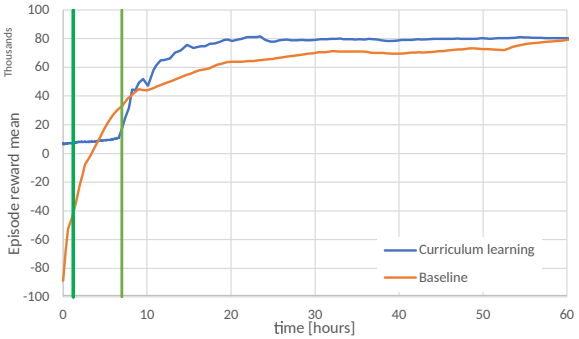
1.3. Tézis. *[J3] Új tantervi tanulás (Curriculum Learning (CL)) alapú módszert javaslok a termelési cella dinamikus természetének figyelembevételére. Az egyedi tantervek kialakítása a feladattartományok csoportosításán alapul. A diszkrét feladattartomány a statikus és az üzemelő termelési cellát foglalja magában, míg a folyamatos feladat tartomány a sugárkövetés felbontásához, jelerejéhez és antennajellemzői átkonfigurálásával kapcsolatos feladat típusokat jellemzi. A jutalomfüggvényeket a tantervekhez igazítva határozom meg, biztosítva ezzel a tanulási folyamat hatékonyságát és célorientáltságát.*

Két üzemmódot állítok be a rádió vevők és a gyártócella számára (lásd a 6. ábrát): statikus és dinamikus. A statikus esetben a vevők rögzítettek maradnak, nem mozdulnak és nem képesek jobb lefedettséget keresni. A statikus cella forgatókönyv azt jelenti, hogy a gyártócella nem üzemel. A dinamikus esetben a rádiós vevők szabadon mozoghatnak a lefedettség



6. ábra. Architektúra a feladat- és jutalmazási tanterv beállításához

optimalizálása érdekében, de az inferencia fázis alatt statikusak maradnak. A dinamikus gyártócella esetben a gyártócella üzemel, a robotok aktívan vezéreltek és mozgásban vannak.



7. ábra. Epizód jutalom átlag

Értékelés. A 7. ábra a tanulási idő függvényében mutatja az epizód jutalom átlagát. A mérési adatokat az RL TensorBoard-jából gyűjtöttük. A piros vonal az alapesetet mutatja, amikor nincs alkalmazva a tantervi tanulás. A kék vonal azt az esetet mutatja, amikor a tanterv tanulást alkalmazzuk a tanulási sebesség növelésére. A zöld függőleges vonalak jelzik egy új tanterv bevezetését.

- Tanterv 1: A 0-tól az első zöld függőleges vonalig, 0-1 óra: Dinamikus rádió vevő telepítés nem működő (statikus) gyártócellában.
- Tanterv 2: Az elsőtől a második zöld függőleges vonalig, 1-7 óra: A túltanulás enyhítése a dinamikus rádió vevő telepítési fázis adott hosszára.
- Tanterv 3: A második zöld függőleges vonal után, 7-60 óra: Statikus rádió vevő telepítés működő (dinamikus) gyártócellában.

Más tantervek, mint például az agilis igények és a feladattér randomizálása, a teljes tanulás során alkalmazásra kerülnek.

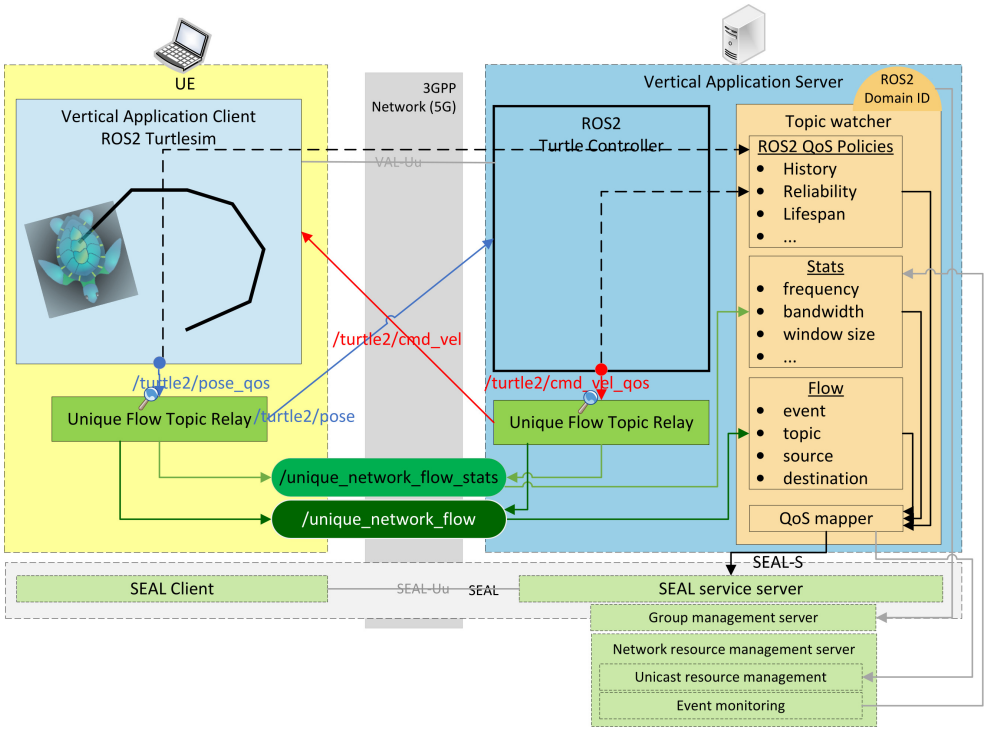
A tantervi tanulás egy korábbi szakaszból előre betanított stratégiával kezdődik, ellentétben az alapesetettel, amely a nulláról indul. A “Tanterv 3” két óra után felülmúlja az alapesetet, és 20 óra alatt eléri az optimális teljesítményt, míg az alapeset 60 órát vesz igénybe. Ez jól szemlélteti a tantervi tanulás által elérhető gyorsabb tanulást.

2. Téziscsoport. ***A vertikális alkalmazás a hálózati expozíció felhasználója*** *[J1, J2]. Egy olyan architektúrát és módszert javaslok, amely képes a vertikális alkalmazásokból származó információk kinyerésére, és automatikusan képes kéréseket indítani a 3GPP expozíciós rétege felé.*

A közzététel-feliratkozás (pubsub) protokollok egyetlen Internetprotokoll (Internet Protocol (IP)) kapcsolaton keresztül működnek a közzétevő és a feliratkozó között. Ezen az egyetlen IP-kapcsolaton belül több témakörre lehet feliratkozni, és több üzenetet lehet közzétenni és fogadni. Az üzenetek IP-csomagokba ágyazva kerülnek továbbításra a létrehozott kapcsolaton keresztül. Ez az üzemmód megakadályozza, hogy a kommunikációs csomópontok a hálózati QoS-t egyértelműen megkülönböztessék a közzétevők és az feliratkozók között az IP-forgalmi szinten. Így a kommunikációs csomópontokban csak ugyanaz a hálózati QoS rendelhető hozzá a közzétevőkhöz és a feliratkozókhoz. A javasolt megoldások ezt a problémát oldják meg.

2.1. Tézis. *[J2] Egy olyan új architektúrát és egyedi csomópontokat javaslok a ROS2 számára, amely képes begyűjteni a VAL alkalmazás viselkedésére és követelményeire vonatkozó információkat és ezen információk alapján automatikusan 3GPP expozíciós kéréseket állít elő. Javaslok egy proxy csomópont alkalmazását az információk gyűjtésére, valamint egy csomópontot, amely a ROS2 beállításokat 3GPP SEAL kérésekké képezi le.*

A javasolt architektúrával (8. ábra) olyan megoldást nyújtottam, amely automatikusan leképezi a ROS2 alkalmazási réteg információelemeit 3GPP SEAL kérésekre. A ROS2 alkalmazásfejlesztő feladata mindössze annyi, hogy megjelölje azokat a ROS2 témákat, amelyek speciális 3GPP QoS kezelést igényelnek. Bizonyítom, hogy az általam javasolt megoldás megvalósítható és erőforrás-takarékos. Három SEAL funkciót fedek le: csoportkezelést, hálózati erőforrás-kezelést és kapcsolatfelügyeletet.



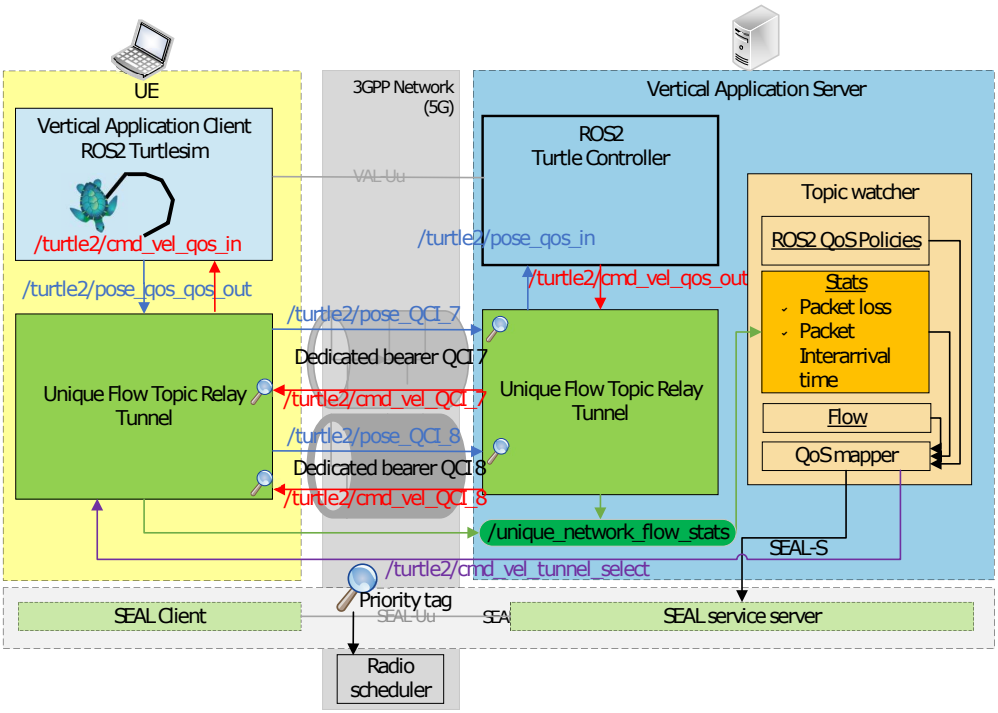
8. ábra. ROS2 Turtlesim Egyedi Adatfolyam Témakör Továbbító Csomópont (UFTR) telepítése

Értékelés. A javasolt rendszert implementáltam, és a kód elérhető egy ROS2 csomagként a [11] hivatkozáson. A javasolt rendszer működését bemutató videó megtekinthető a [12] hivatkozáson. Az általam javasolt módszer QoS leképező csomópontja egy absztrakt osztályon

keresztül hajtja végre a leképezési eredményeket, amely lehetővé teszi különböző API-k csatlakoztatását, mivel ugyanarra a kérésre különféle API-hívásokat lehet implementálni. Így a SEAL API-hívások könnyen lecserélhetők pl. NEF API-hívásokra (TS 23.501 [4], 23.502 [5] és 29.522 [2]). A fenti funkciók SEAL API-kezelője kb. 200 kódsorból áll. A javasolt módszer néhány plusz karakter hozzáadásával a meglévő kódban a témaneveknél, vagy pár sornyi kóddal a témanevek leképezéséhez az indító fájlban vagy parancssorban biztosítja a leírt funkciókat.

2.2. Tézis. *[J2] Új architektúrát javaslok, ami a 2.1 tézis alagútüzemmódú (tunnel) kiterjesztése, ezzel elérve 1) hogy a rendszer hálózatfelügyeleti funkciókat biztosítson akkor is, ha a 3GPP SEAL hálózatfelügyeleti funkciókat nem nyújtja a 3GPP expozíciós interfész, és 2) hogy továbbfejlesztett dinamikus QoS-kezelést biztosítson a ROS2 alkalmazások számára, ha a dinamikus QoS-váltást nem támogatja a 3GPP maghálózat vagy rádió.*

Kapcsolatot hozok létre a ROS2 alkalmazási példányok UFTR csomópontjai között, majd az UFTR-ek az átvitt témákat egy másik UFTR példánynak publikálják, amely feliratkozik rájuk, így egy alagutat képezve a két UFTR között (lásd a 9 ábrát). A közzétevő egyedi üzenettípussal indul, amely tartalmaz egy időbélyeget, egy üzenetszámlálót és egy bináris mezőt. Az időbélyeg az óraértékkel töltődik fel, az üzenetszámláló egy folyamatosan növekvő egész szám, és a bináris adat az általános feliratkozó témán fogadott teljes üzenetet tartalmazza. Megjegyzendő, hogy ebben az esetben nem történik adat rész feldolgozása a hálózati csomagnak, így az üzenet típustól független, csupán egy beágyazás történik.



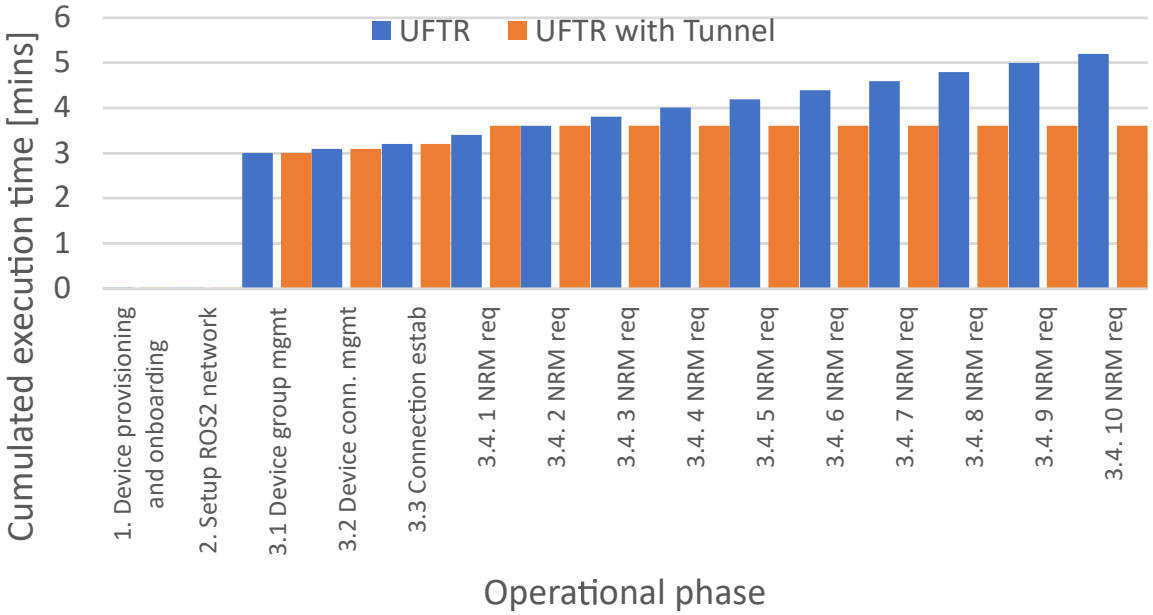
9. ábra. ROS2 architektúra alagúttal

Az alkalmazás egy `_qos_out` címkével ellátott témát publikál, amelyre az UFTR egy általános feliratkozó felületen keresztül iratkozik fel. Több közzétevő indul el, mint alagút kezdőpont — a demultiplexálás üzemmódban —, amelyek az üzeneteket új fejlécekbe ágyazzák és QoS kezeléssel továbbítják. A témák prioritási szinttel vagy szolgáltatásminőség osztály azonosító (QoS Class Identifiers (QCI)) értékkel, például "_QCI_8" vannak címkézve. Az UFTR a bejövő üzeneteket egyedi forgalmi azonosítókkal és QCI címkézéssel ellátott

kimenő témákhoz irányítja, így biztosítva a QoS-t ismert 5-tuple-ekhez rendelt NRM kérésekkel (lásd a 9 ábrát). A második üzemmódban (multiplexálás) az UFTR minden "_QCI" címkével ellátott témára feliratkozik, feldolgozza a fejléceket, és egy általános közzétevő továbbítja a bináris adatfolyamot. A `_qos_in` címkével ellátott témák jelzik, hogy az adatok kicsomagolásra kerültek és készen állnak a továbbításra.

Értékelés. A javasolt rendszert implementáltam, és a kód elérhető egy ROS2 csomagként a [11] hivatkozáson. A méréseket egy nem önálló (Non-Stand Alone (NSA)) privát 5G hálózatban végeztem, ahol a tesztelt UE-n kívül nem volt háttérforgalom vagy terhelés a rendszeren. Az NRM frissítése unicast erőforrás-törléssel történik, amelyet unicast erőforrás-létrehozási eljárás követ. Egy alapértelmezett hordozó kapcsolat (bearer) jön létre egy specifikus QCI-al (például: QCI 83), amely összekapcsolja a terminált és a bázisállomást. Amikor új NRM kérés érkezik különböző QoS követelményekkel, a hálózat dedikált hordozó kapcsolatot állít fel az UE számára. Mivel a Rel-17 SEAL nem támogatja az unicast erőforrás-frissítéseket, csak létrehozási és törlési eljárások állnak rendelkezésre. Ennek kezelésére az UFTR alagútüzemmód a ROS2 alkalmazás életciklusa alatt minden hordozó kapcsolatot beállít, így emulálva a QoS frissítéseket az alagutak közötti váltogatással.

A 10. ábra a végrehajtási időt hasonlítja össze az alap UFTR üzemmód és az alagútüzemmóddal működő UFTR között. Míg mindkét üzemmód azonos időt vesz igénybe a kezdeti NRM frissítésekhez, az alagútüzemmódban működő UFTR elkerüli a további hordozó kapcsolat újrakonfigurálását a QoS frissítések ROS2 rétegen belüli kezelésével. Ez a NRM váltási időt másodperc alatti szintekre csökkenti, szemben a hordozó kapcsolat beállításához szükséges több másodperccel.

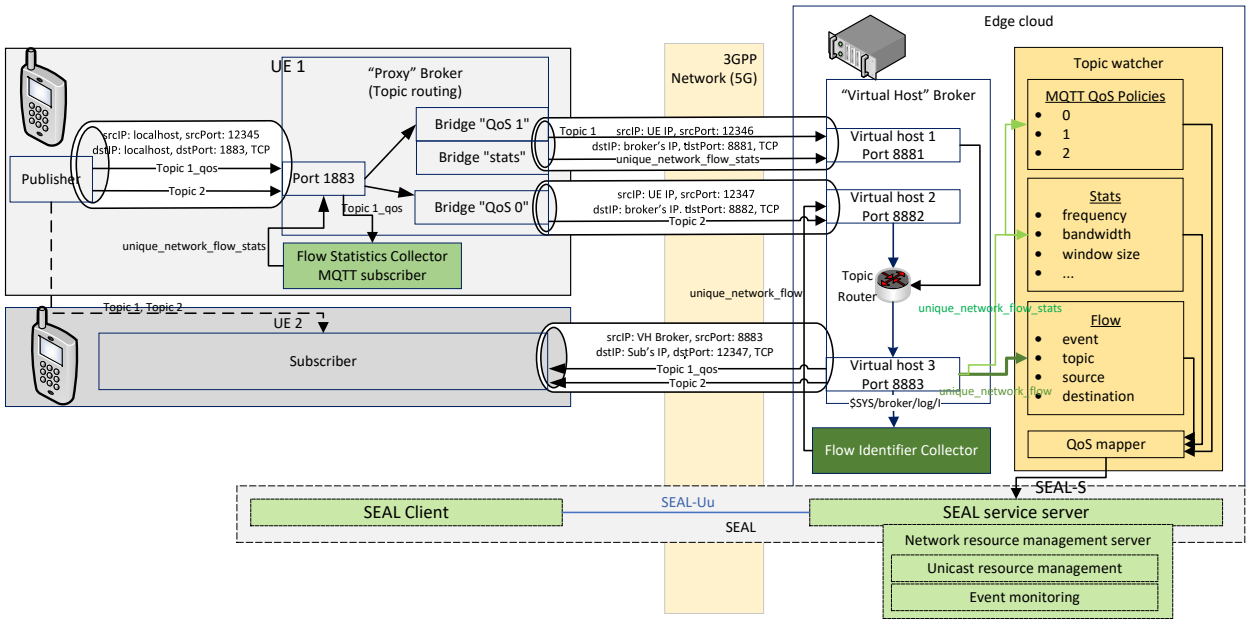


10. ábra. A működési fázisok kumulált végrehajtási ideje

2.3. Tézis. *[J1] Új architektúrát és egyedi csomópontokat javaslok az OPC UA számára, amely a VAL alkalmazás viselkedésére és követelményeire vonatkozó információk gyűjtésére szolgál és ezen információk alapján automatikusan 3GPP expozíciós kéréseket állít elő. A*

javasolt új architektúra egy proxy brókert és egy virtuális host brókert tartalmaz, amelyek biztosítják a szükséges információkat, valamint egy csomópontot, amely az OPC UA beállításokat 3GPP SEAL kérésekké képezi le. A megoldás a 3GPP SEAL hálózati erőforrás-kezelési és hálózatfelügyeleti funkcióival képes együttműködni.

A kívánt eredmény eléréséhez a "téma irányítás" nevű funkciót használtam. A peremfelhőbeli brókert "Virtuális Host" képességekkel bővítettem. Ez a funkció lehetővé teszi a bróker példány számára, hogy több porton figyeljen. Minden feliratkozó képes csatlakozni bármelyik portra, és megkapni a témához tartozó adatokat, bármelyik porton is publikálták ezt. Az ötlet az, hogy annyi virtuális hostot hozzak létre, ahány QCI-t szeretnék kezelni a rendszerben. Minden QCI osztályhoz külön virtuális host van definiálva. Ahogy az a 11. ábrán látható, a proxy bróker és a virtuális host brókerek közötti hidak egyedi IP folyamokat határoznak meg azokhoz a témákhoz, amelyek különleges QoS kezelést igényelnek a vezeték nélküli csatornán. Ezek az IP folyamok nem multiplexelt témákat tartalmaznak, és a folyam 5-tuple azonosítója egyedi lesz minden Üzenetközvetítő Telemetriai Protokoll (Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)) téma esetén.



11. ábra. A javasolt architektúra az OPC UA QoS automatikus SEAL-ra történő leképezésére

Értékelés. A javasolt módszereket bemutató videók sorozata elérhető a [13] hivatkozáson. A kapcsolódó kód nyílt forráskódú, és elérhető a [14] hivatkozáson. Az értékelés hasonló a 2.1. számú tézishez.

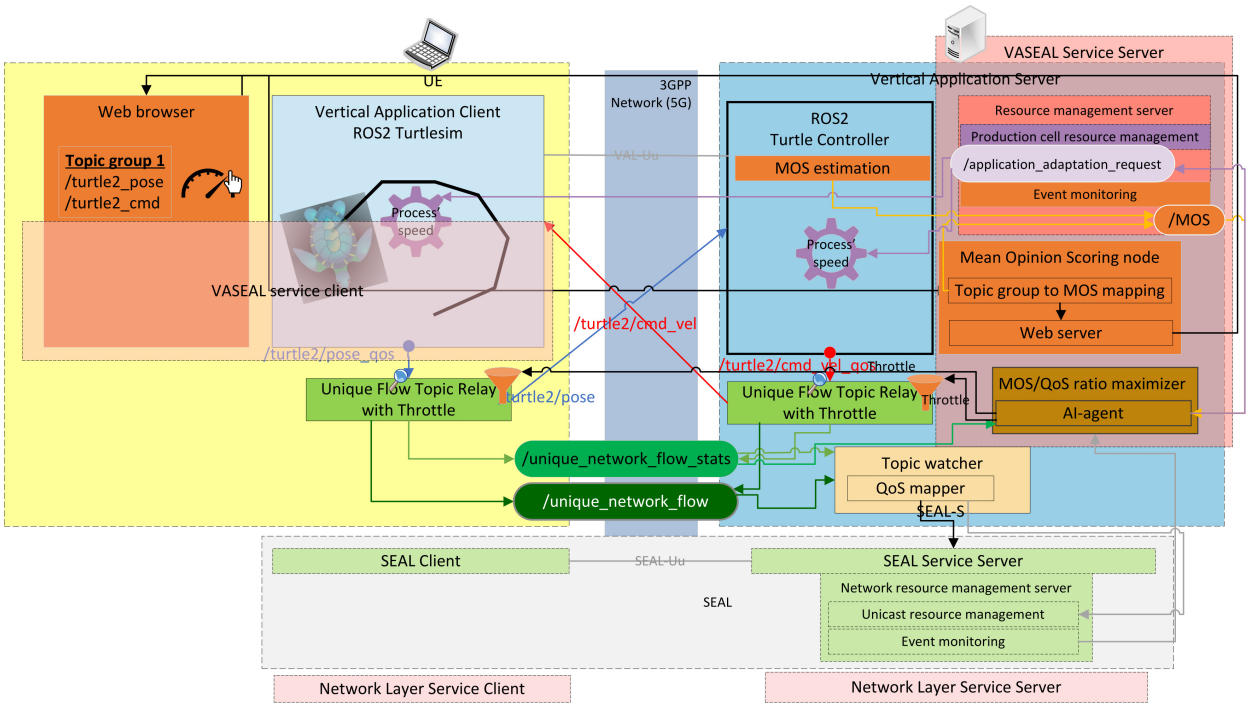
3. Téziscsoport. ***A hálózat mint az alkalmazás-expozíció felhasználója*** *[J1, J2] Javaslok egy új architektúrát, amely a hálózatot az alkalmazás-expozíció felhasználójának szerepébe helyezi (lásd 1. ábra).*

3.1. Tézis. *[J2] Új architektúra réteget javaslok a VAL réteg mellé, amit Vertikális Alkalmazás Szolgáltatásokat Támogató Architektúrarétegnek (Vertical Application Service Enabler Architecture Layer (VASEAL)) nevezek. Az új architektúra biztosítja, hogy a VAL alkalmazás megfigyelhető és irányítható legyen a hálózat felől. A megfigyelhetőséget biztosítandó egy új csomópontot javaslok, amely a VAL folyamat végrehajtásáról ad információkat, mind átlagos véleménypontszám (Mean Opinion Score (MOS)), mind becsült MOS (Estimated*

Mean Opinion Score (EMOS)) módon. Ahhoz hogy a VAL folyamat végrehajtási sebessége és felbontása szabályozható legyen, javaslok egy gyártócella erőforrás-kezelő interfészt.

Bevezettem a VASEAL-t, amely a vertikális alkalmazási réteget exponálja a hálózat felé. Az 12. ábra mutatja a koncepciót. Hasonlóan a SEAL-hez, a VASEAL is négy fő komponenssel rendelkezik: a VASEAL Szolgáltatási Szerverrel és Klienssel, valamint ezek hálózati oldali párjaival, a Hálózati Réteg Szolgáltatási Szerverrel és Klienssel.

A VASEAL Szolgáltatási Szerver a Vertikális Alkalmazási Szerver mellett fut, amely a gyártócellához vagy más VAL alkalmazáshoz szükséges Erőforráskezelési Szervert és Eseményfigyelést tartalmazza. A VASEAL Szolgáltatási Kliens a Vertikális Alkalmazási Kliens mellett fut, amely az eseményfigyelés adatgyűjtéséhez tartozó grafikus felhasználói felületet futtatja. A Hálózati Réteg Szolgáltatási Kliens a SEAL Kliens mellett fut. A Hálózati Réteg Szolgáltatási Szerver pedig a SEAL Szolgáltatási Szerver mellett fut.



12. ábra. A ROS2 Turtlesim architektúrája UFTR-rel, csomag áthaladás sebességét befolyásoló funkcióval és MOS telepítéssel

Értékelés. A javasolt rendszert megvalósítottam, és a kód elérhető ROS2 csomagként a [11] hivatkozáson. A javasolt rendszer működését bemutató videó megtekinthető a [12] hivatkozáson.

Amikor a hálózati erőforrások kimerülnek, a SEAL szerver 'QoS csökkentési értesítést' küld a 'témamegfigyelőnek', amely értesíti a 'MOS/QoS arány maximalizáló' csomópontot. Ez a csomópont egy témát nyit meg, amelyre a 'Turtle 1 Vezérlő' feliratkozhat, és reagál a '/MOS' témára, ahol a vezérlő automatikusan közzéteszi a becsült MOS értékeket. Emberi szakértők is beállítanak MOS pontszámokat, és az arány maximalizáló kiszámítja a szükséges lépéseket az elfogadható MOS fenntartása érdekében, miközben csökkenti a QoS-t, és kéréseket küld a SEAL szervernek.

Két lehetséges kimenetel van: ha a SEAL szerver teljesíti a QoS kérést, egy 'Alkalmazási QoS változási értesítést' küld, jelezve egy új működési pontot. Ha nem, egy újabb 'QoS csökkentési értesítést' küld, ami arra ösztönzi a maximalizálót, hogy további alkalmazkodást

kérjen a Turtle 1 Vezérlőtől. A MOS/QoS arány maximalizáló, amelyet az 12. ábra mutat be, a VAL szerveren található, de hálózati funkcióként is megvalósítható, hozzáféréssel a SEAL és VASEAL erőforrásaihoz a monitorozás és vezérlés céljából.

3.2. Tézis. *[J2] Új módszert javaslok arra az esetre, amikor a 3GPP SEAL 'Alkalmazási QoS változási értesítést' küld, a megerősítéses tanulás (RL) alkalmazása révén, hogy a felhasználói élmény minősége (Quality of Experience (QoE)) adott szinten maradjon, miközben alkalmazkodik a rendelkezésre álló hálózati jellemzőkhöz. A javaslat része egy egyedi proxy csomópont, amely a csomagokat valós időben szűri, a hálózati jellemzőket emulálva, hogy az RL algoritmus gyorsan tanuljon anélkül, hogy módosítanánk a hálózatot vagy az alkalmazást.*

A javasolt rendszer architektúráját az 13. ábra mutatja be. A javasolt megoldás egy megerősítéses tanulás alapú megközelítés. Minden, az UFTR által kezelt témához tartozik egy AI-ügynök, RLlib terminológiával élve egy rollout worker. A külső *környezet* a ROS2 környezet. A *megfigyelési tér* a különböző ROS2 témákra való feliratkozással kerül összegyűjtésre: a forgalomstatisztikák sávszélesség- és jitterértékei, MOS, késleltetés, eldobott csomagok száma és a vezérlési sebesség. Az ügynökök *akciótere* a késleltetés, eldobott csomagok száma és vezérlési sebesség növeléséből vagy csökkentéséből áll egy lépésnyit, az adott értékkészleten belül. Az ügynök által meghatározott akciókat a fent említett ROS2 témákon keresztül publikáljuk.

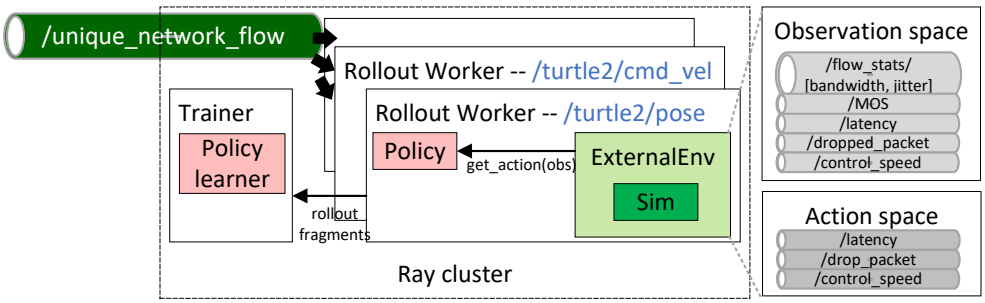
Az egyes témákhoz tartozó jutalomfüggvény a következő:

$$reward_{topic} = w_1 * mos + latency_{topic} - drop_{topic} \tag{1}$$

, ahol

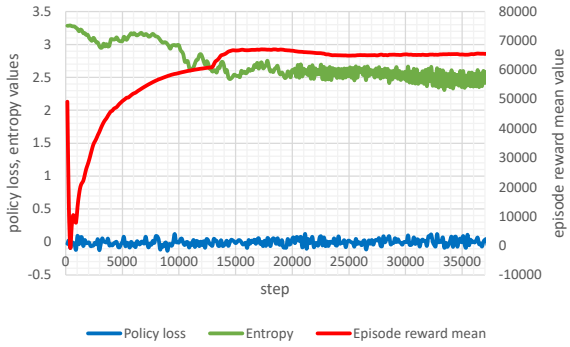
- w_1 értéke a méréseimben 200,
- mos értéke a vezérelt érték kívánt pozíciója és aktuális pozíciója közötti négyzetes hiba, amely a folyamat sebességével van skálázva,
- $latency_{topic}$ a 'UFTR with Throttle' által a csomag késleltetésének gyakoriságát jelenti. Ennek hatása a téma frissítési sebességétől függ,
- $drop_{topic}$ azt jelenti, hogy a 'UFTR with Throttle' minden n-edik csomagot eldobja az adott témából. Minél nagyobb az érték, annál kevesebb csomag esik ki.

Fontos megjegyezni, hogy a jutalomfüggvény nem tartalmazza a VAL folyamat sebességét, mivel az a speciális vezérlő által biztosított MOS értékében szerepel.



13. ábra. A MOS/QoS arány maximalizáló architektúrája

Értékelés. A 14. ábra a proximális politikaoptimalizálás (Proximal Policy Optimization (PPO)) tanulási folyamat eredményét mutatja be. Az epizód jutalom átlaga az összes ügynök átlagos jutalmát reprezentálja. Kezdetben, amikor az ügynökök felfedezik a környezetet, a jutalom csökken, de hamarosan javulni kezd. 15 ezer lépésnél elérjük a maximális jutalmat, és 20 ezer lépésnél az entrópia azt jelzi, hogy nincs további tanulás az akciótéren. A veszteségfüggvény, amely az ágens viselkedésének változásait tükrözi, ingadozik, de általában 1 alatt marad. Az entrópia, amely a döntési véletlenszerűséget méri, sikeres tanulás során csökken. Az ábra sikeres tanulást jelez, és bár minden téma más rollout munkással rendelkezik, az összes ügynök ugyanazt a politikát osztja meg. Ennek eredményeként a [J2] bemutatja, hogy a vezérelt folyamat az eredeti sebességének felére csökkent, és úgy döntött, hogy csak minimális csomagvesztést és minimális késleltetést vállal, ezzel magas MOS értéket elérve.



14. ábra. A tanítási folyamat

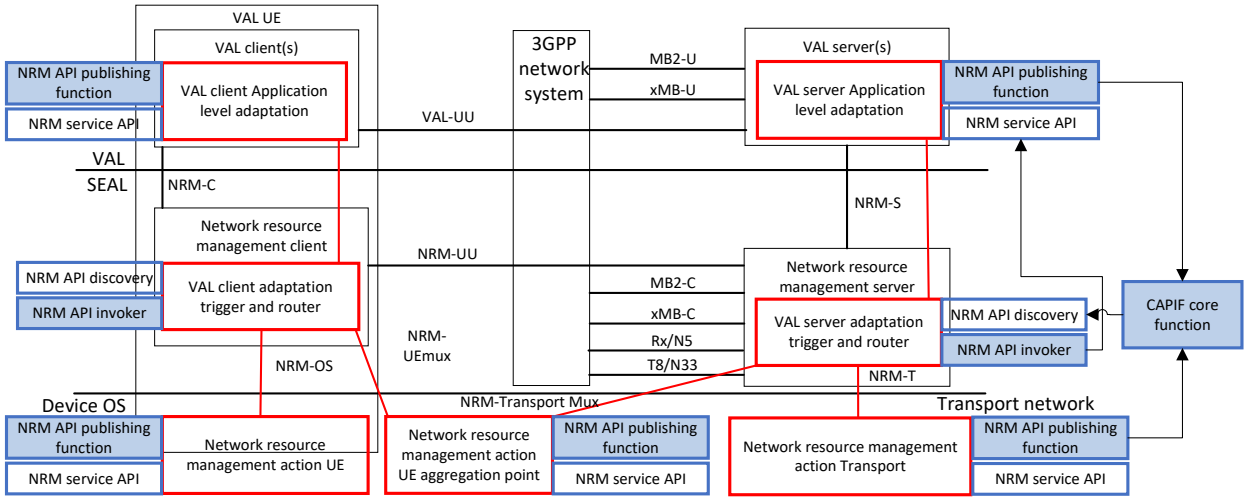
3.3. Tézis. *[J1] Új eljárást dolgoztam ki, amely lehetővé teszi a nem adaptív alkalmazások integrálását a 3GPP NRM tartományba, beleértve azokat is, amelyek nem igazodnak automatikusan a csatorna feltételeihez. A megoldásom a CAPIF-et és annak 3GPP tartományon túli kiterjesztéseit használja ennek elérésére.*

A 3GPP TS 23.434 [6] NRM funkciókat biztosít, amelyek a maghálózatban és a rádiócsatornán valósulnak meg. Bár az NRM befolyásolja a csatorna működését, a rajta áthaladó VAL alkalmazás forgalma semmilyen módon nem változik. Ha a 3GPP NRM kérés nem vált ki adaptív változásokat a VAL forgalomban, és maga a VAL forgalom sem rendelkezik önálló adaptációs képességekkel, akkor jelentős teljesítményromlás léphet fel a VAL forgalomban.

A javaslatomban (15. ábra) összekapcsolom az NRM menedzsmentet az NRM végrehajtásával a VAL-en, és a VAL forgalmat az igényelt csatornához illesztem. A javasolt megoldás végrehajtható az UE VAL rétegében, az operációs rendszerben, illetve a VAL szerveren és az 5G vagy a hatodik generációs mobilhálózat (Sixth generation of mobile communications (6G)) szállítási rétegén is. A javasolt módszer új elemeket és interfészeket ad a 3GPP TS 23.434 [6] funkcionális modelljéhez. Ezzel a meglévő NRM kérési API-t új információelemekkel bővíti ki.

Értékelés. A javasolt módszereket bemutató videók sorozata elérhető a [13] hivatkozáson. A kapcsolódó kódbázis nyílt forráskódú, és a [14] hivatkozáson található.

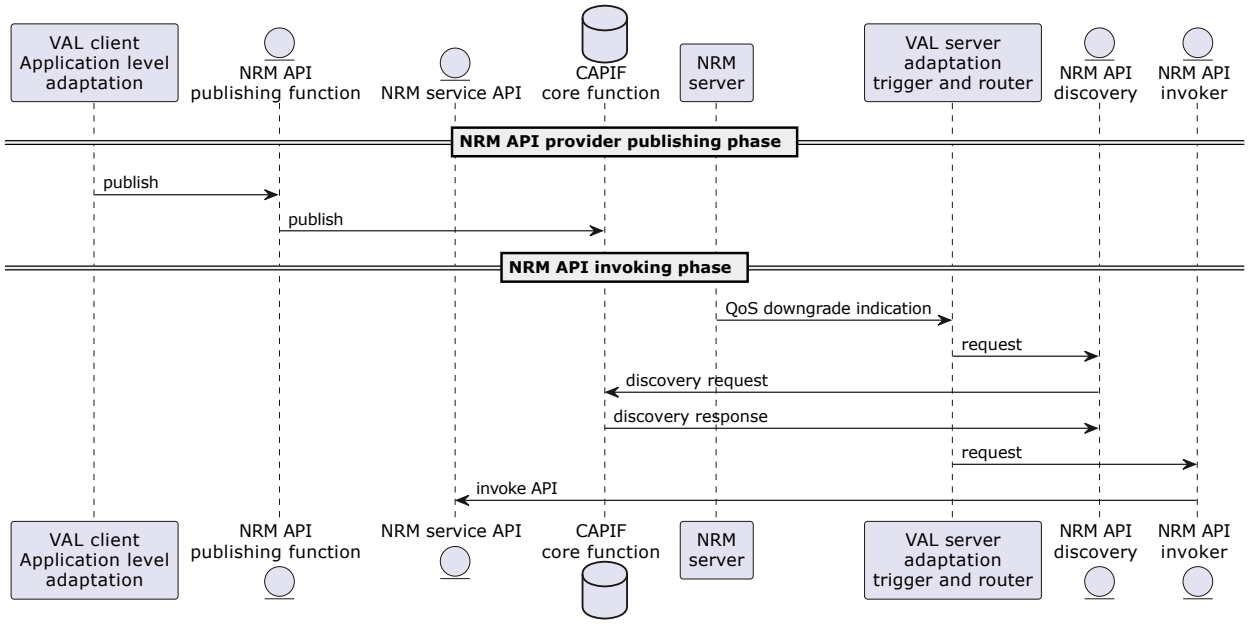
A 16. ábra egy CAPIF szolgáltatás futtatásának szekvenciadiagramját mutatja be, amely illusztrálja, hogyan publikálja egy API-szolgáltató a szolgáltatásait, és hogyan fedezi fel és használja ezeket egy felhasználó. Az NRM API szolgáltató fázisban a “VAL kliens alkalmazásszintű adaptáció” vagy más funkcionális egységek a CAPIF-ben regisztrálják szolgáltatásaikat, olyan részleteket megadva, mint az elérési pontok, támogatott módszerek és



15. ábra. A hálózaton belüli funkcionális modell kiterjesztése az NRM-hez (a [6] 14.2.2.1-1 ábrájának kiterjesztése)

azonosítás. A CAPIF ezeket az információkat az API-regiszterben tárolja a felhasználók számára.

Az NRM API használati fázisában, amikor a SEAL NRM szerver "Alkalmazás QoS változásértesítést" küld, a "VAL szerver adaptációs trigger és router" megkeresi a CAPIF API-regiszterben a megfelelő szolgáltatásokat. A keresés olyan szempontok alapján történik, mint a hálózati réteg vagy eszközaggregáció, majd a legjobban megfelelő NRM szolgáltatás API-t indítja el. A CAPIF a regiszterből biztosítja a szükséges hitelesítést a felhasználónak.



16. ábra. Egy példafutás szekvenciadiagramja a CAPIF szolgáltatásokra

4. Téziscsoport. ***A hálózati erőforrás-menedzsment hatása az ipari folyamatokra*** *[J1, C2, C3] Egy MOS-szerű minőségértékelési módszert javaslok különféle ipari folyamatokhoz.*

A hálózatmenedzsment célja, hogy optimalizálja a QoS paramétereket, így egyensúlyba hozva a túlméretezés költségeit a kielégítő QoE biztosításával. A MBB esetében az alkal-

mazások teljesítményét – például a weboldalak betöltési idejét és a videók indulási idejét – a böngésző és a protokoll kialakítása befolyásolja. A QoS és QoE közötti kapcsolat jól ismert, bár ennek gyártási környezetben történő alkalmazása kihívást jelent a szigorú hálózati követelmények miatt. Az 5G megjelenésével – amely valós idejű kommunikációt és megbízhatóságot kínál – a technológia kulcsfontosságú az Ipar 4.0 számára, különösen olyan feladatok támogatásában, mint a távoli ipari robotműveletek. Míg a mobilkommunikációban a QoE-t hagyományosan a felhasználói elégedettséggel mérik hang- és videószolgáltatások esetén, addig a gyártási folyamatok gyakran bináris eredményeket követelnek meg a termékminőség tekintetében. Az 5G alacsony késleltetésű képességeiből származó ismeretek kiterjesztése más ipari folyamatokra növelhetné a hálózat alkalmazkodóképességét, és jobban összehangolhatná a teljesítménymutatókat a gyártási igényekkel.

Számos ipari alkalmazás létezik, amelyek teljesítménymutatói szigorúan folyamat specifikusak. Például egy csiszolási folyamat esetén ilyen mutató lehet a forgács mérete vagy a csiszolófej hőmérséklete. Az ipari folyamatok hálózat által vezérelt működésének megvalósítása – ahogyan azt a 3. téziscsoportban javasoltam – rendkívül nehézkes lenne, mivel minden egyes ipari alkalmazáshoz jelentős doménspecifikus ismeretekre lenne szükség a hálózat üzemeltetőjének részéről. Ezek az ismeretek azonban tipikusan az ipari folyamat üzemeltetőjénél állnak rendelkezésre, nem pedig a hálózatot működtető félnél. Ráadásul egy ilyen szabályozórendszer beállítása és finomhangolása számos elromlott robot és hibás termék árán valósulhatna csak meg. Ebben a téziscsoportban bemutatott megközelítés jelentősen leegyszerűsíti ezt a folyamatot, és megvalósíthatóvá teszi az ipari alkalmazások hálózatvezérelt szabályozását.

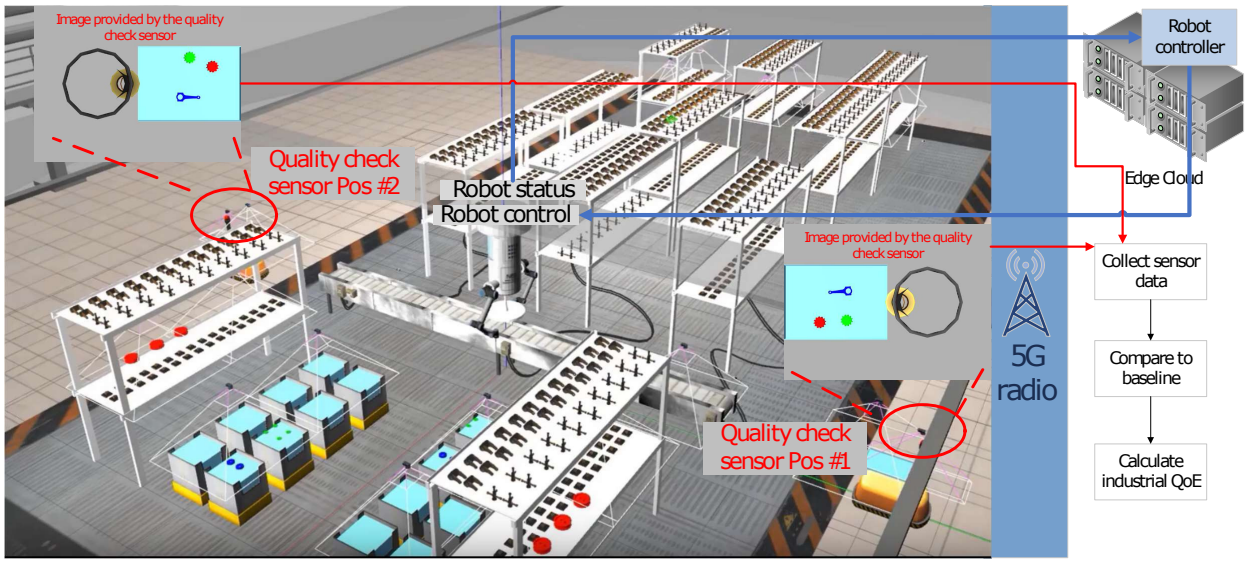
A tézisben bemutatott módszerek alkalmazásával olyan érdekes aspektusokra is rámutatok, hogy az ipari eszközök által támasztott szigorú hálózati követelmények – például az 1–5 ms közötti késleltetés – jelentős, akár nagyságrendi mértékű (50 ms feletti) megsértése esetén is az ipari folyamat végeredménye a felhasználó számára továbbra is teljes mértékben kielégítő maradhat.

4.1. Tézis. *[C2] Új módszert dolgoztam ki a "felvesz és lerak" típusú folyamatok minőségértékelésére, amely figyelembe veszi a hálózati teljesítményt. A módszer egy objektív mérőszámot szolgáltat a robot által lerakott tárgyak elhelyezési pontosságát értékelve, és ennek alapján becslést ad egy szubjektív MOS értékre. A módszer egy robot és a peremfelhőn futó robot vezérlő távirányításának hatását vizsgálja, amely a robot sebességvektor-alapú vezérlését rádiós hálózaton keresztül valósítja meg, miközben a rádiós hálózat késleltetésének hatásait veszi figyelembe.*

A [15] szabvány szigorúan definiálja a mérési elrendezést, beleértve a környezetet, az emberi szakértő képzését és az értékelési kritériumokat. Hasonlóképpen, javaslom az (ARIAC) 2020 környezetben a felvesz és lerak folyamat MOS-ának a hálózati késleltetés függvényében történő meghatározását. Számos hálózati paraméter, például jitter, sávszélesség, rádiós ütemezés stb., mentén végezhetők további mérések. Azonban a 3GPP hálózatokban is alkalmazott, időzítésérzékeny hálózatokhoz (Time Sensitive Networking (TSN)) kapcsolódó "megtart és bufferel" stratégia révén a különféle hálózati hatások egyaránt késleltetésként jelennek meg [4].

Ennek elérése érdekében a következő lépéseket teszem (amelyeket a 17. ábrán is vázoltam): 1) létrehozok egy szimulációs környezetet, amely magában foglalja egy robotkar távoli vezérlését 5G rádió segítségével a perem felhőből; 2) vizsgálom a rendelés teljesítésének végrehajtását különböző hálózati késleltetési körülmények között; 3) bevezetek teljesítmény leírókat (Key Performance Indicator (KPI)) a "felvesz és lerak" típusú folyamat minőségének értékelésére; 4) összehasonlítom a felvesz és lerak folyamat végrehajtások minőségét

különböző hálózati konfigurációk mellett; 5) kidolgozok egy kvantitatív módszert a MOS becslésére.



17. ábra. A "felvesz és lerak" típusú folyamat mérési elrendezése

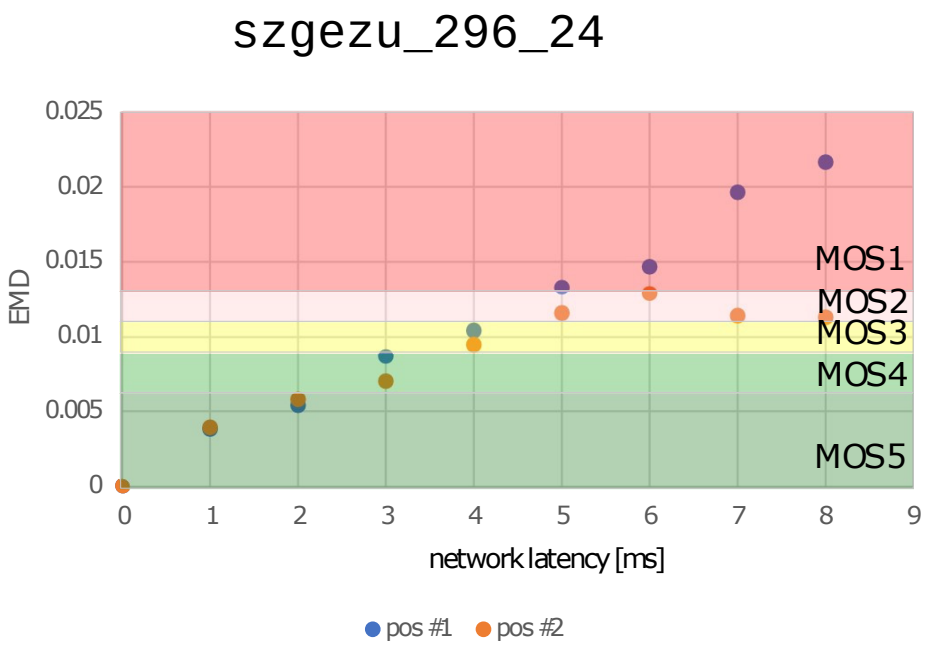
Értékelés. Egy módszert javaslok a MOS pontszámok becslésére Földmozgatási Távolság (Earth Mover's Distance (EMD)) pontszámok alapján. Megközelítésem az EMD pontszámok 0 és maximális érték közötti tartományának öt intervallumra osztását foglalja magában, ahol a MOS pontszámot az intervallum indexe határozza meg, amelybe az EMD pontszám esik. Az intervallumtartományok meghatározásához az ARIAC metrikát veszem figyelembe.

A 18. ábrán az EMD pontszámok MOS pontszámokra történő osztályozását a színkód jelzi. A MOS pontszám a maximális értéken marad 3 ms-os késleltésig, és elfogadható tartományon belül marad 4 ms-os késleltésig.

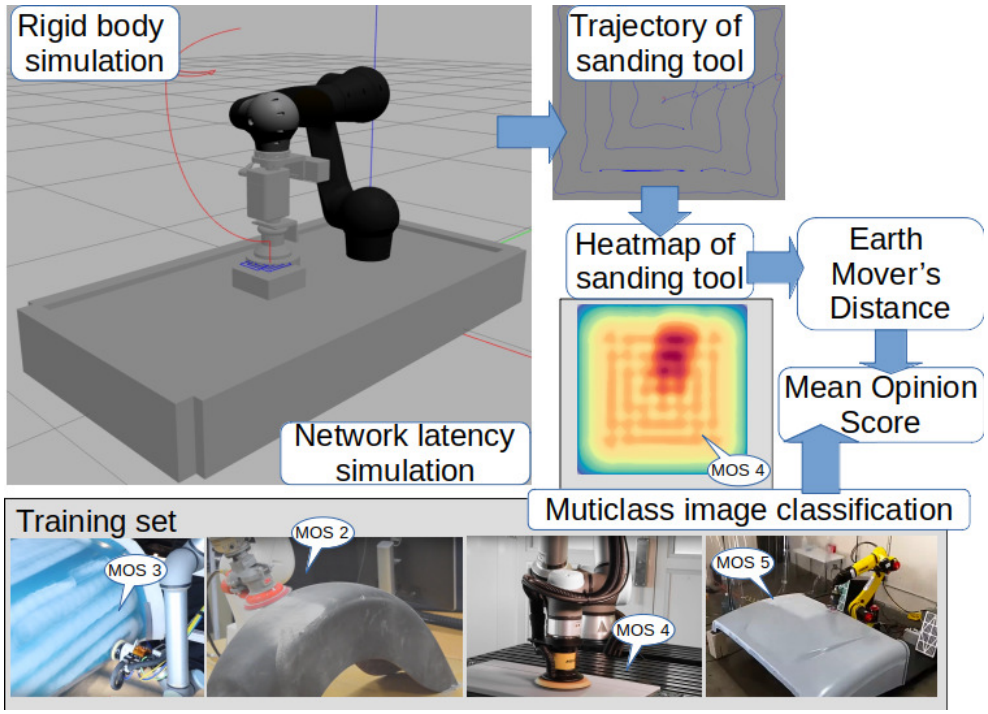
A [16] cikkben javasoltuk a "robot operátor részletes visszajelzésének" keretrendszerét, amelyben a hálózat a QoS paramétereket és azok hasznossági függvényét kapja a robotvezérlő rendszertől. Ezen információk birtokában a hálózati operátor kiszámíthatja és megvalósíthatja az adott felhasználási esetre szabott szükséges QoS paramétereket. Ebben az esetben a QoS_{nw} definíciója a következő:

$$QoS_{nw} = g_{nw}(u_{robot}(), QoS_{robot}) = \left\{ \begin{array}{ll} MOS = 5, & \text{if } 0 < nw_{latency} \leq 0.006 \\ MOS = 4, & \text{if } 0.006 < nw_{latency} \leq 0.009 \\ MOS = 3, & \text{if } 0.009 < nw_{latency} \leq 0.011 \\ MOS = 2, & \text{if } 0.011 < nw_{latency} \leq 0.014 \\ MOS = 1, & \text{if } 0.014 < nw_{latency} \end{array} \right\} \quad (2)$$

4.2. Tézis. *[C3] Új módszert dolgoztam ki a csiszolási folyamatok minőségértékelésére, amely integrálja a hálózati teljesítmény hatásainak elemzését. A módszer objektív mérőszámot biztosít a robot által megmunkált felületek minőségének értékelésére, és ezen eredmények alapján szubjektív (MOS) értékre ad becslést. Az eljárás a robot és a peremfelhőn futó vezérlőrendszer távirányításának kölcsönhatását vizsgálja, amely során a robot sebességvektor-alapú irányítását rádiós hálózaton keresztül valósítja meg, különös tekintettel a rádiós hálózat késleltetésének hatásaira.*



18. ábra. A “felvesz és lerak” típusú folyamatok EMD és MOS értéke a hálózati késleltetés függvényében



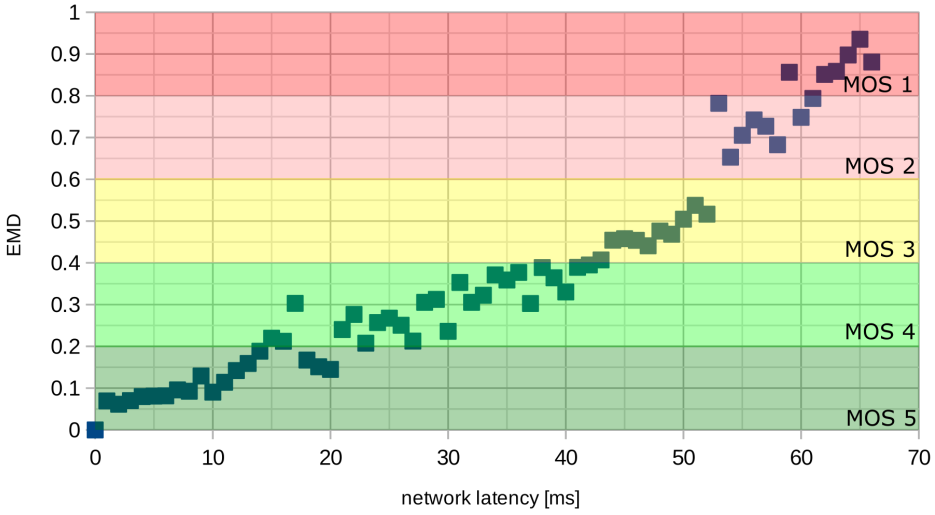
19. ábra. A csiszolási folyamat mérési elrendezése

A vizsgált környezet a “Scan and Sand” [17] által meghatározott csiszolási folyamat. A MOS meghatározása érdekében a következő lépéseket hajtottam végre (amint az a 19. ábrán is látható): 1) létrehoztam egy szimulációs környezetet, amely magában foglalja a csiszoló szerszámmal ellátott robot kar pályájának kiszámítását, 2) megvizsgáltam a pálya végrehajtását különböző hálózati késleltetési hatások mellett, 3) modelleztem a csiszolási folyamatot egy adott felületen, 4) bevezettem KPI-kat a csiszolási minőség mérésére, 5) összehasonlítottam a különböző hálózati beállítások csiszolási minőségét, és bevezettem egy kvantitatív módszert a MOS meghatározására.

Értékelés. A bemutató videó elérhető a [18] hivatkozáson. Az EMD pontszámokat 0 és a maximális érték között öt intervallumra osztom. A MOS pontszám az intervallum indexe, amelybe az EMD pontszám esik. A 20. ábrán az EMD pontszámainak MOS pontszámokra történő osztályozását a színkód jelzi. Ebben a csoportosításban az intervallumok mérete egyenlő. Látható, hogy a folyamat MOS pontszáma még körülbelül 20 ms-os késleltésig is maximális szinten marad, és 40 ms-os késleltésig az elfogadható tartományon belül van.

A csiszolás MOS pontszámának definíciói a következők:

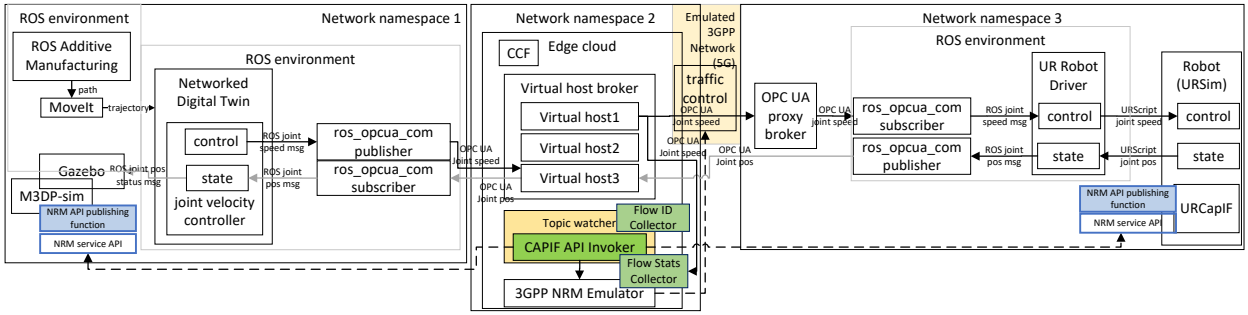
$$QoS_{nw} = g_{nw}(u_{robot}(), QoS_{robot}) = \left\{ \begin{array}{ll} MOS = 5, & \text{if } 0 < nw_{latency} \leq 0.015 \\ MOS = 4, & \text{if } 0.015 < nw_{latency} \leq 0.043 \\ MOS = 3, & \text{if } 0.043 < nw_{latency} \leq 0.052 \\ MOS = 2, & \text{if } 0.052 < nw_{latency} \leq 0.061 \\ MOS = 1, & \text{if } 0.061 < nw_{latency} \end{array} \right\} \tag{3}$$



20. ábra. A csiszolás folyamatok EMD és MOS értéke a hálózati késleltetés függvényében

4.3. Tézis. *[J1] Új módszert dolgoztam ki a 3D nyomtatás folyamatok minőségértékelésére, amely magában foglalja a hálózati teljesítmény hatásainak részletes elemzését. A módszer objektív mérőszámot nyújt a robot által nyomtatott objektumok formai torzulásainak értékeléséhez, összehasonlítva az alapként szolgáló, késleltetésmentes hálózati környezetben végzett nyomtatással. Az így kapott eredmények alapján a módszer becslést készít egy szubjektív (MOS) értékre. Az eljárás a robot és a peremfelhőn futó vezérlőrendszer távirányításának interakcióját vizsgálja, amely során a robot sebességvektor-alapú vezérlése rádiós hálózaton keresztül történik, különös figyelmet fordítva a rádiós hálózat késleltetésének hatásaira.*

Ennek elérése érdekében a 21. ábrán látható architektúrát javaslom. A mérés során egy csillag alakú tárgy 3D nyomtatását hajtom végre távvezérelt robotkar segítségével öt rétegen keresztül. Ezzel a mérési elrendezéssel egy szimulált 3D nyomtatást végzek, amelyet később az alap esetként veszek figyelembe. A mérés második szakaszában célom a hálózati teljesítmény befolyásolása és a nyomtatott 3D-s objektum összehasonlítása az alap esettel.



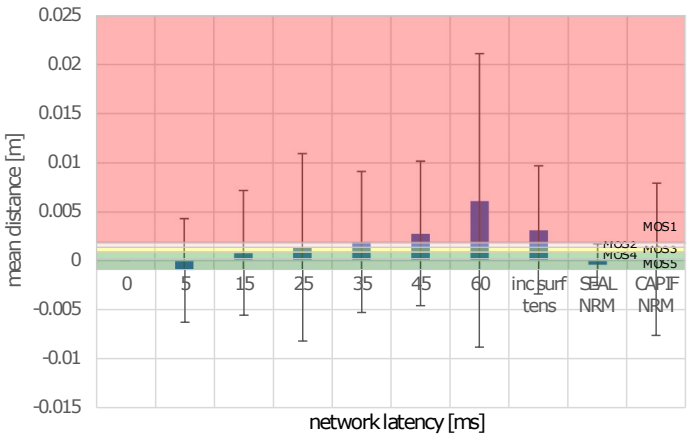
21. ábra. A 3D nyomtatás során alkalmazott mérési elrendezés

Értékelés. Egy sor bemutató videó, amely a javasolt módszereket mutatja be, elérhető a [13] hivatkozáson. A 22. ábra a CloudCompare [19] által kiszámított átlagos távolságot és szórásértéket mutatja az alap objektum és az adott késleltetéssel 3D nyomtatott objektum között. Láthatjuk, hogy a késleltetésnek közvetlen hatása van a 3D nyomtatott tárgyakra, és nagyobb késleltetéssel a különbség nő az alapesethez képest.

Ezeknek a kísérleteknek az eredményei kiemelik a 3D nyomtatás érzékenységét a csiszolás robusztus jellegéhez képest, különösen nagyobb késleltetési értékek esetén. A 22. ábra azt mutatja, hogy a legjelentősebb eltérések a 3-5 cm-es tartományon belül jelentkeznek. Az ilyen eltérések alacsonyabb késleltetési értékek esetén ritkák, de a késleltetés növekedésével gyakoribbakká válnak.

A 3D nyomtatási felhasználási eset MOS pontszámának definíciói a következők:

$$QoS_{nw} = g_{nw}(u_{robot}(), QoS_{robot}) = \left\{ \begin{array}{ll} MOS = 5, & \text{if } 0 < nw_{latency} \leq 0.005 \\ MOS = 4, & \text{if } 0.005 < nw_{latency} \leq 0.015 \\ MOS = 3, & \text{if } 0.025 < nw_{latency} \leq 0.035 \\ MOS = 2, & \text{if } 0.035 < nw_{latency} \leq 0.045 \\ MOS = 1, & \text{if } 0.045 < nw_{latency} \end{array} \right\} \tag{4}$$



22. ábra. Az átlagos távolság és a szórás, összehasonlítva az alap objektumot és az adott késleltetéssel 3D nyomtatott objektumot a CloudCompare [19] által számítva, illetve a MOS értékek a hálózati késleltetés függvényében

4. Az eredmények alkalmazása

Az Villamos- és Elektronikai Mérnökök Intézete (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)) P2940 Robot Agilitás Mérésére vonatkozó Szabvány [20] alelnökeként és a szabvány kommunikációs aspektusának közreműködőjeként a fenti téziseket ajánlások formájában vezetem be a robotrendszerek agilitásának kommunikációs szempontból történő kialakításához. A VASEAL architektúra interfészei és a MOS mérési példák mind a részletes ajánlások részét képezik.

Egy új irány, hogy a 3GPP SA6 szabványosítás kapcsán a hagyományos kutatás, termékfejlesztés, szolgáltatás sorrendet szeretném megtörni azzal, hogy a 3GPP SA6 felhasználásának belépési szintjét jelentősen csökkentem, így növelve az Ipar 4.0-ból érkező felhasználók számát. A tézisekhez kapcsolódó implementációkat nyílt forráskódúvá tettem, ezáltal mind a kutató közösség, mind az ipari partnerek számára hozzáférhetővé válnak. A 2.,3. téziscsoportok nyílt forráskódként érhetők el a [11] és [14] címeken.

A szabadalmazott részek közé tartoznak azok az elemek, amelyek nem elérhetők nyílt forráskódú formában. Ezek a részek részei a publikációnak, de nem kerültek kiadásra a GitHub tárolóban. A [P1] által tárgyalt tantervi tanulás technológia bejegyzésre került az Egyesült Államok és az Európai Unió szabadalmi hivatalánál. A bejegyzés már nyilvános, de a szabadalom még nem került megadásra. Egy másik szabadalom, amely a MOS/QoS optimalizálóval foglalkozik, bejegyzésre került az Egyesült Államok szabadalmi hivatalánál. Ez a szabadalom még nem nyilvános.

Az 2. téziscsoportban javasolt megoldás moduláris interfészt kínál az Ericsson Felhőalapú Maghálózati Expozíciós Szerver (Ericsson Cloud Core Exposure Server (CCES)) [21] integrálásához, különös figyelmet fordítva a termék sajátos jellemzőinek kihasználására. A CCES egy felhőalapú, kettős üzemmódú hálózati és szolgáltatás-expozíciós funkció. A CCES standardizált és innovatív funkciókat, valamint API-kat biztosít, amelyek lehetővé teszik a szolgáltató kulcsfontosságú negyedik generációs mobilhálózat (Fourth generation of mobile communications (4G)) és 5G hálózati képességeinek expozícióját az ökoszisztémában részt vevő partnerei számára. A megoldás egy teljes standard API-készletre épül, amely mind a 4G, mind az 5G hálózatokra vonatkozik (a 3GPP Szolgáltatásképesség-expozíciós Funkció (Service Capability Exposure Function (SCEF)) és NEF szabványoknak megfelelően). Az Ericsson megoldás további Szolgáltatás-expozíciós Engedélyezővel is rendelkezik, amely lehetővé teszi az API-k biztonságos és ellenőrzött módon történő expozícióját a partnerek és alkalmazási funkciók számára, a konkrét alkalmazási esetekhez igazítva. Ez lehetőséget ad az ügyfeleknek saját szolgáltatás API-k létrehozására (a szabványos API-kon alapulva), és opcionálisan előre definiált, szabadalmaztatott, valamint CAMARA [22] alapú szolgáltatás API-kat kínál.

5. Publikációk

Folyóiratok

[J1] **G. Szabó**, “Towards The Automatic Network Resource Management of OPC UA in 5G Private Networks”, *Computer Networks*, 250. évf., 110581. old., 2024, ISSN: 1389-1286. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110581. cím: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128624004134.

[J2] **G. Szabó**, “Toward The Automatic Network Resource Management of Robot Operating System in Programmable Mobile Networks”, *IEEE Access*, 11. évf., 65934–65955. old., 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3289922.

[J3] **G. Szabó** és J. Pető, "Intelligent Wireless Resource Management in Industrial Camera Systems: Reinforcement Learning-based AI-extension for Efficient Network Utilization", *Computer Communications*, 216. évf., 68–85. old., 2024, ISSN: 0140-3664. DOI: 10.1016/j.comcom.2023.12.026. cím: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366423004607.

Konferencia cikkek

[C1] **G. Szabó**, G. Seres, M. L. Mikecz, M. Hortobágyi, S. Rácz, J. Pető és T. Cinkler, "Assessment of the Efficiency of 5G Network Exposure for the Industrial Internet of Things", *2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2021, 52–58. old. DOI: 10.1109/CSCN53733.2021.9686079.

[C2] **G. Szabó**, M. Balogh és A. Vidács, "Impact of Network Resource Management on The Quality of Pick and Place Processes", *2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 2024, 1–5. old. DOI: 10.23919/SpliTech61897.2024.10612562.

[C3] **G. Szabó**, Z. Trombitás, J. Pető, T. Lohmar, I. Komlósi, T. Pepó, A. Vidács és M. Andó, "Impact of Network Resource Management On Quality of Industrial Processes", *NOMS 2023-2023 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 2023, 1–4. old. DOI: 10.1109/NOMS56928.2023.10154396.

Szabadalmak

[P1] **G. Szabó** és P. József, "Methods And Apparatus For Network Coverage Configuration", WO2024054135A1, 2023. cím: https://worldwide.espacenet.com/patent//search/publication/WO2024054135A1.

6. Hivatkozások

[1] *The 3rd Generation Partnership Project*, 2021. cím: https://www.3gpp.org/.

[2] *3GPP TS 29.522, 5G System; Network Exposure Function Northbound APIs; Stage 3*, 2021. jún. cím: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.522/29522-h20.zip.

[3] *Network Configuration Protocol (NETCONF)*, 2011. jún. cím: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6241.

[4] *3GPP TS 23.501, System architecture for the 5G System (5GS)*, 2021. jún. cím: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.501/23501-h11.zip.

[5] *3GPP TS 23.502, Procedures for the 5G System (5GS)*, 2021. jún. cím: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.502/23502-h10.zip.

[6] *3GPP TS 23.434, Service Enabler Architecture Layer for Verticals (SEAL); Functional architecture and information flows*, 2021. jún. cím: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23%5C_series/23.434/23434-h20.zip.

[7] *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP*, 2012. ápr. cím: https://www.iso.org/standard/57623.html.

[8] *The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP*, 2001. szept. cím: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3168.

[9] *Az 1. téziscsoporthoz tartozó demonstrációs videó*, 2023. jan. cím: https://youtu.be/ZzzCjnnDRxY.

[10] A. Downs, Z. Kootbally, W. Harrison, P. Pilliptchak, B. Antonishek, M. Aksu, C. Schlenoff és S. K. Gupta, "Assessing Industrial Robot agility through international competitions", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 70. évf., 102113. old., 2021, ISSN: 0736-5845. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102113.

[11] *A 2. téziscsoporthoz tartozó implementáció nyílt forráskódja*, 2023. ápr. cím: https://github.com/Ericsson/ros2-3gppSA6-mapper.

[12] *A 2. téziscsoporthoz tartozó demonstrációs videó*, https://youtu.be/JXGAHvDSU4o, 2023.

[13] *A 3-4. téziscsoporthoz tartozó demonstrációs videó lista*, 2023. szept. cím: https://www.youtube.com/playlist?list=PLl1UXvs61i-GtR29ZgM2-GY9BYSGUeM34.

[14] *A 2-3. téziscsoporthoz tartozó implementáció nyílt forráskódja*, 2024. jún. cím: https://github.com/EricssonResearch/opcua-3gppSA6-mapper.

[15] *P.800.1 : Mean Opinion Score (MOS) terminology*. cím: https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800.1-200303-S/en (elérés dátuma 2003. 03. 16.).

[16] A. Vidács, Z. Trombitás és G. Szabó, "Network Resource Management For Cyber-Physical Production Systems Based On Quality Of Experience", *EMS 2023 37th European Simulation and Modelling Conference*, 2023, 1–7. old. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.06008.

[17] *Next-generation Simulation Technology To Accelerate The 5G Journey*. cím: https://github.com/rosin-project/automatica18%5C_scan%5C_and%5C_plan%5C_demo (elérés dátuma 2022. 07. 31.).

[18] *Az 4.2 tézishez tartozó demonstrációs videó*. cím: https://youtu.be/5sMFZLwDU68 (elérés dátuma 2022. 09. 16.).

[19] *CloudCompare*, 2023. aug. cím: https://www.danielgm.net/cc/.

[20] *IEEE P2940 - Standard for Measuring Robot Agility*, 2024. cím: https://standards.ieee.org/ieee/2940/10411/.

[21] *Cloud Core Exposure Server*. cím: https://www.ericsson.com/en/portfolio/cloud-software-and-services/cloud-core/communication-services-udm-and-exposure/cloud-network-exposure/cloud-core-exposure-server (elérés dátuma 2024. 09. 19.).

[22] *CAMARA, Telco Global API Alliance*, 2023. máj. cím: https://camaraproject.org/.

Betűszavak

3GPP Third Generation Partnership Project. 2–4, 8–12, 14, 15, 17, 22

4G fourth generation of mobile communications. 22

5G fifth generation of mobile communications. 2–5, 11, 15, 17, 22

5GC 5G Core. 2

6G sixth generation of mobile communications. 15

AI Artificial Intelligence. 6, 14

API Application Programming Interface. 2, 3, 10, 15, 16, 22

ARIAC Agile Robotics for Industrial Automation Competition. 6, 17, 18

CAPIF Common API Framework. 2, 15, 16

CCES Cloud Core Exposure Server. 22

CL Curriculum Learning. 7

CSP Communication Service Provider. 2

CSR Customer Service Request. 2

DASH Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP. 4

DT Digital Twin. 5

ECN Explicit Congestion Notification. 4

EMD Earth Mover's Distance. 18–20

EMOS Estimated Mean Opinion Score. 12

GPU Graphics Processing Unit. 6

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. 22

IIoT Industrial Internet of Things. 3

IP Internet Protocol. 9, 12

KPI Key Performance Indicator. 17, 19

MBB Mobile Broadband. 3, 16

MOS Mean Opinion Score. 12–22

MQTT Message Queuing Telemetry Transport. 12

MTC Machine Type Communication. 2

NEF Network Exposure Function. 2, 10, 22

NF Network Function. 2

NRM Network Resource Management. 2, 4, 6, 11, 15, 16

NSA Non-Stand Alone. 11

OM Operations and Maintenance. 2

OPC Open Platform Communications. 3, 4, 11, 12

PPO Proximal Policy Optimization. 15

QCI QoS Class Identifiers. 10–12

QoE Quality of Experience. 14, 16, 17

QoS Quality of Service. 7, 9–14, 16–18, 22

RL Reinforcement Learning. 5–8, 14

ROS Robot Operating System. 3, 4, 6, 9–11, 13, 14

SA System Aspects. 2

SBA Service-Based Architecture. 2

SBI Service-Based Interface. 2

SCEF Service Capability Exposure Function. 22

SEAL Service Enabler Architecture Layer. 2–4, 9–14, 16

TS Technical Specifications. 2, 10, 15

TSG Technical Specification Group. 2

TSN Time Sensitive Networking. 17

UA Unified Architecture. 3, 4, 11, 12

UE User Equipment. 4, 11, 15

UFTR Unique Flow Topic Relay. 9–11, 13, 14

VAL Vertical Application Layer. 3, 4, 9, 11–16

VASEAL Vertical Application Service Enabler Architecture Layer. 12–14, 22