

MCP-alapú digitális ikrek fejlesztési keretrendszere gyártási MI-ügynökök számára

Összefoglalás: Az Ipar 5.0 emberközpontú paradigmája új kihívások elé állítja a gyártási MI ügynökök fejlesztőit, akiknek valós gyári adatokra van szükségük, de ezek gyakran nem elérhetők. Munkánkban egy új keretrendszert mutatunk be, amely a Model Context Protocol (MCP) és digitális ikrek integrációjával standardizált fejlesztési környezetet biztosít gyártási MI-ügynökök számára. Az MCP strukturált interfészt nyújt az MI-ügynökök és külső adatforrások között. Keretrendszerünk SmartManPy alapú diszkrét esemény-szimulációt használ valósághű gyártási adatok generálására, amelyet MCP-szerveren keresztül teszünk elérhetővé. Kutatásunk fő hozzájárulása egy újrafelhasználható infrastruktúra létrehozása, amely lehetővé teszi komplex gyártási MI-ügynökök fejlesztését valós gyári hozzáférés nélkül. Bemutatjuk a keretrendszer architektúráját, egy működő prototípust, valamint a jövőbeli fejlesztési irányokat.

Kulcsszavak: Digitális iker, Model Context Protocol (MCP), gyártási MI-ügynökök, Ipar 5.0, diszkrét esemény-szimuláció, szabványosított interfész, peremhálózati MI.

* *Debreceni Egyetem, Műszaki Kar*
Email: tamas.peter.jozsef@eng.unideb.hu
ORCID: 0009-0002-0916-1719

** *Blankfactor SRL*
Email: pocsgeza@gmail.com
ORCID: 0009-0004-2766-1711

[1] Monostori, L. et al. (2020): „Industry 5.0: Human-centric manufacturing,” *CIRP Annals*.

[2] Li, Y. et al. (2025): „AI Agents and Agentic AI – navigating a plethora of concepts for future manufacturing,” *J. Manuf. Syst.*

[3] A. Smith et al. (2025): „Interoperability of AI-enhanced digital twins,” *Sustain. Mater. Technol.*

[4] *Anthropic*, „Introducing the Model Context Protocol,” Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol>

Bevezetés

Az Ipar 5.0 ember–MI-együttműködésre helyezett hangsúlya alapvető ellentmondást vet fel: a hatékony gyártási MI-ügynökök fejlesztéséhez valós üzemeltetési adatokhoz való hozzáférés szükséges, ugyanakkor ezek az adatok gyakran védettek, bizalmasak, vagy egyszerűen nem elérhetők – különösen a kis- és középvállalkozások (KKV-k) számára [1]. Ezt a kihívást három, egymással összefüggő kutatási hiányosság tovább súlyosbítja, amelyek gátolják a terület fejlődését.

Elsőként egy bizonyítéki hiányosság áll fenn az MI-ügynökök KKV-környezetekben történő hatékonyságával kapcsolatban. Míg az ügynökök jelentős teljesítményjavulást mutatnak (15–30%-os átbocsátóképesség-növekedést) fejlett adatinfrastruktúrával rendelkező nagyvállalati létesítményekben [2], addig az erőforrás-korlátozott környezetekben mutatott hatékonyságuk bizonytalan marad a valósághű körülmények közötti korlátozott validáció miatt. Másodsorban módszertani hiányosság létezik az általunk „N×M fragmentációs problémának” nevezett jelenség formájában – a meglévő megvalósítások szabadalmaztatott, nem szabványosított interfészekre támaszkodnak a digitális ikrek és az MI-rendszerek között, ahol N szimulációs platform M különböző adaptert igényel [3]. Ez az eseti jellegű integrációs megközelítés súlyosan akadályozza a reprodukálhatóságot, a kutatások közötti összehasonlítást és a technológiatranszfert. Harmadszor, időbeli hiányosság alakult ki a Model Context Protocol (MCP) 2024 novemberi bevezetésével, amely nyílt szabványként szolgál a nyelvi modellek külső eszközökhöz való csatlakoztatásához [4]. Bár az MCP időszerű megoldást kínál, tudomásunk szerint egyetlen publikált munka sem alkalmazta még gyártási digitális ikrekre, így szakadék keletkezett a kialakulóban lévő MI szabványok és az ipari alkalmazások között.

Ezzel egyidejűleg a peremhálózaton telepíthető, könnyűsúlyú MI-modellek (4–7 milliárd paraméter) terén elért fejlődés stratégiai lehetőséget kínál. Ezek a modellek számos gyártásoptimalizálási feladathoz elegendő következtetési képességgel rendelkeznek, miközben lehetővé teszik az adatvédelmet tiszteletben tartó, alacsony késleltetésű telepítést erőforrás-korlátozott KKV-környezetekben. A peremhálózati MI valósághű gyártási kontextusban történő szisztematikus kiértékelése azonban továbbra is korlátozott.

E szorosan összefonódó hiányosságok kezelése érdekében ez a tanulmány egy új keretrendszerrel mutat be, amely integrálja az MCP-t a gyártási digitális ikrekkel.

Megközelítésünk lehetővé teszi az MI-ügynökök fejlesztését és kiértékelését fizikai gyári hozzáférés nélkül, miközben empirikus bizonyítékokat szolgáltat a peremhálózati MI gyártásoptimalizálási feladatokban való alkalmazhatóságára vonatkozóan. A fő hozzájárulások négyrétűek: (1) egy új keretrendszer-architektúra, amely integrálja az MCP-t a gyártási digitális ikrekkel, (2) empirikus bizonyíték arra, hogy a peremhálózaton telepíthető MI (4 milliárd paraméter) jelentős javulást (+32,4%-os átbocsátóképesség-növekedést) ér el KKV-releváns forgatókönyvekben, (3) az Ipar 5.0 elveinek validálása, amely igazolja, hogy az ember a hurokba (human-in-the-loop) működési mód minimális teljesítményvesztéssel gyakorlatilag megvalósítható, és (4) átfogó módszertani dokumentáció, amely lehetővé teszi a koncepcionális replikációt és a jövőbeli kutatást.

Kapcsolódó munkák

MI ÜGYNÖKÖK A GYÁRTÁSBAN

Az MI ügynökök gyártási alkalmazása 2023 óta felgyorsult, amit a nagy nyelvi modellek és az eszközökkel kiegészített következtetés terén elért fejlődés hajtott [2]. A gyártásvégrehajtási rendszerekkel (MES) integrált többügynökös rendszerek 15–25%-os átbocsátóképesség-javulást mutattak az autóipari és elektronikai gyártásban [5]. Ezek a sikerek azonban túlnyomórészt fejlett adatinfrastruktúrával rendelkező nagyvállalati létesítményekben fordulnak elő. A KKV-k jelentős akadályokkal szembesülnek, beleértve az adatfragmentációt, az örökölt rendszerek integrációs kihívásait és a korlátozott IT-erőforrásokat [6].

DIGITÁLIS IKREK ÜGYNÖKFEJLESZTÉSHEZ

A digitális ikrek ígéretes megközelítésként jelentek meg a biztonságos MIügynök-fejlesztés és -kiértékelés területén [7]. Lehetővé teszik az ügynökök betanítását és tesztelését a fizikai műveletek zavarása nélkül. A meglévő megvalósítások azonban a digitális ikrek és MI-ügynökök közötti integrációs fragmentációtól szenvednek, jellemzően egyedi REST API-kra vagy szabadalmaztatott függvényhívási mechanizmusokra támaszkodva [8].

[2] Li, Y. et al. (2025): „AI Agents and Agentic AI – navigating a plethora of concepts for future manufacturing,” *J. Manuf. Syst.*

[5] Various authors, „Multi-agent systems in automotive production,” *Int. J. Prod. Res* 2023–2024.

[6] Smith, J. et al. (2024): „The new normal: The status quo of AI adoption in SMEs,” *J. Small Bus. Manag.*

[7] Tao, F. et al. (2019): „Digital Twin in Industry: State-of-the-Art,” *IEEE TII*, 15., (4.).

[8] M. González et al. (2025): „A comprehensive review of AI-based digital twin applications in manufacturing,” *Electronics*.

[4] *Anthropic, „Introducing the Model Context Protocol,”* Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol>

[9] Guo, H.–Hao, Y.–Zhang, Y.–Xu, M.–Lv, P.–Chen, J.–Cheng, X. (2025): „A Measurement Study of Model Context Protocol Ecosystem,” *arXiv preprint arXiv:2509.25292*.

[10] Yin, J.–Huang, R.–Sun, H.–Lin, T. (2023): „A collaborative scheduling model for production and transportation of ready-mixed concrete,” *International Journal of Production Research*, 61., (3.), pp. 774–795.

[11] Tibaldo, A. S.–Montagna, J. M.–Fumero, Y. (2025): „Efficient mixed-integer linear programming model for integrated management of ready-mixed concrete production and distribution,” *Automation in Construction*, 173.

Ez hozza létre az „N×M fragmentációs problémát”, amely közvetlenül motíválja az MCP szabványosítási réteggént való bevezetését.

MODEL CONTEXT PROTOCOL

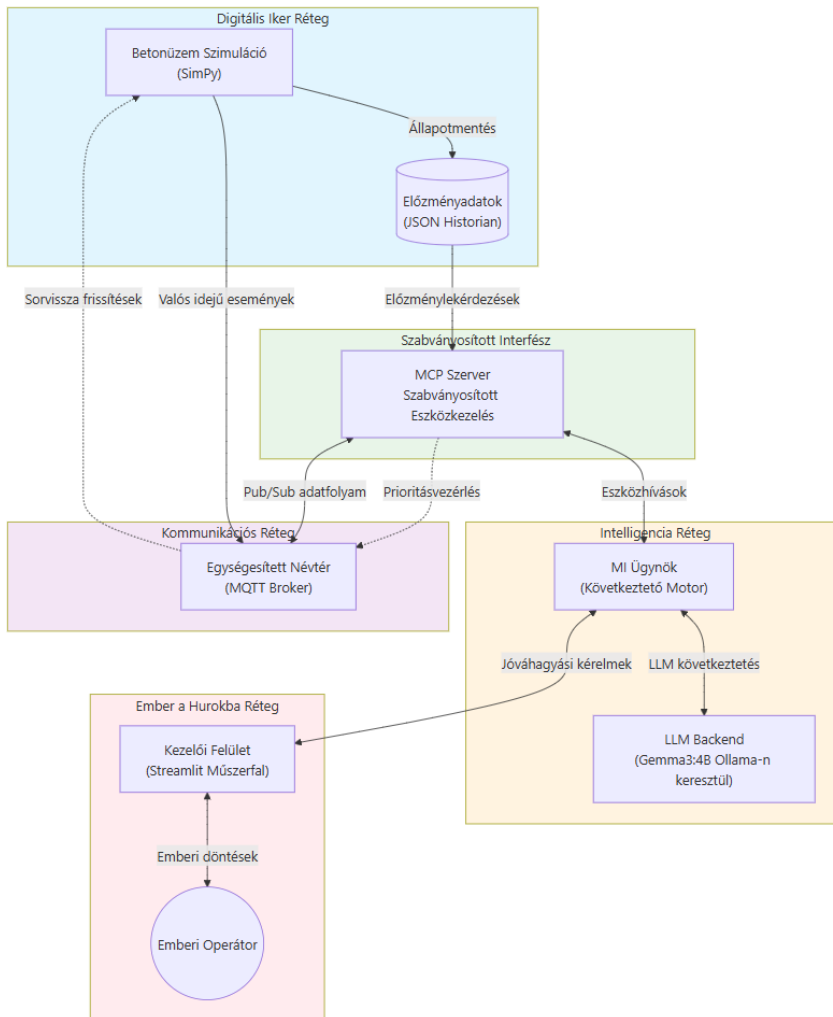
Az MCP szabványosított JSON-RPC-interfészt biztosít az eszközök felfedezéséhez, meghívásához és a kontextuskezeléshez, a Language Server Protocol mintázatra építve [4]. A nagy MI-szolgáltatók általi gyors bevezetés erős ökoszisztéma-lendületre utal [9]. Az alkalmazások kizárólag szoftverfejlesztési kontextusokra összpontosítottak; 2025 decemberéig nem számoltak be akadémiai megvalósításról a gyártásban.

TRANSPORTBETON-ÜZEMEK

A transzportbeton-gyártás ideális esettanulmánynak bizonyul az erőforrás-korlátok (korlátozott keverőkapacitás), az ütemezési összetettség (több betonfajta átállásigénye) és a KKV-relevancia kombinációja miatt. A korábbi munkák elsősorban a járműútvonal-tervezésre és a szállításütemezésre összpontosítottak, nem az üzemen belüli adagolási sorrendezésre [10] [11], így hiányosságot hagyva az MIügynök-alkalmazások terén ezen a területen.

Rendszerarchitektúra

1. ábra. A javasolt MCP-alapú digitális ikerkeretrendszer rendszerarchitektúrája, amely az ötrétegű feladat elkülönítést szemlélteti



Az alapot egy SimPy-alapú betonüzem-szimuláció képezi két keverővel (8 m³ és 24 m³ kapacitás), négy anyagtárolóval és két ürítőhellyel. A szimuláció valóság-hű üzemeltetési dinamikát modellez, beleértve a keverőkihasználtságot, az anyagfogyasztási rátákat és a betonfajta-függő átállási időket. Az állapotváltások JSON-előzménytárba kerülnek mentésre az utólagos elemzéshez, és valós időben publikálódnak MQTT-n keresztül egy Egységesített Névter (Unified Namespace) architektúrában.

MCP SZERVERRÉTEG

Az MCP-szerver pontosan három szabványosított eszközt tesz elérhetővé a protokoll minimálisan életképes interfész elvét követve, melyek mindegyike sajátos célt szolgál a gyártási kontextusban. A `'get_plant_status()'` eszköz valós idejű rendszerállapot-metrikákat ad vissza, beleértve a keverőkihasználtsági százalékokat és a készletszinteket. A sorvissza elemzéséhez és a döntéshozatal támogatásához a `'get_waiting_queue()'` részletes információkat nyújt a függőben lévő rendelésekről, beleértve a betonfajta, a mennyiséget és az érkezési időt. Végül a `'set_batch_priority()'` dinamikus ütemezési módosításokat tesz lehetővé azáltal, hogy elfogad egy rendelésazonosító-listát a gyártási sorrendben történő átprioritáláshoz. Ez a három eszköz együttesen elegendő kontextust biztosít az intelligens ütemezési döntésekhez, miközben fenntartja az interfész egyszerűségét, közvetlenül kezelve a kapcsolódó munkákban azonosított módszertani fragmentációs problémát.

PEREMHÁLÓZATI MI-ÜGYNÖK ÉS KEZELŐI FELÜLET

Egy helyben futó Gemma3:4B modell Ollaman keresztül szolgál következtető motorként, demonstrálva a peremhálózati MI-telepítés életképességét. A modell elemzi a sorvissza állapotokat és adagolási optimalizálásokat javasol természetes nyelvi következtetésekkel, minden javaslat explicit operátori jóváhagyást igényel egy Streamlit műszerfalon keresztül. Ez az ember a hurokba (human-in-the-loop) tervezés érvényesíti az Ipar 5.0 emberközpontú elveit, miközben az ember-MI-együttműködés gyakorlati megvalósítását nyújtja gyártási kontextusban.

Megvalósítás

BETONÜZEM SZIMULÁCIÓ (SIMPY)

A diszkrét eseményszimuláció egy valóság-hű KKV betongyártó létesítményt modellez, az üzemeltetési paramétereket iparági konzultációból származtatva. A kulcsparaméterek közé tartozik az adagonkénti 25 perces fix keverési idő, a köbméterenkénti 0,5 perces töltési és ürítési ráta, a betonfajta-váltás közbeni 2 perces tisztítási idő, valamint a 8 m^3 és 24 m^3 keverőkapacitások. A szimuláció három betonfajtát támogat (C25, C30, C40) és 4, 6 és 8 köbméteres rendelési mennyiségeket a valóság-hű vevői igények reprezentálására. A rendelések gamma-eloszlásból húzott érkezésközi időkkel érkeznek ($\alpha=2$, $\beta=1,5$), amely valóság-hű igénymintázatokat közelít, fix véletlenszám-generátor maggal (random seed) biztosítva az azonos érkezési sorrendeket a kísérleti feltételek között.

PEREMHÁLÓZATI MI-ÜGYNÖK KONFIGURÁCIÓJA

A Gemma3:4B ügynök peremhálózati telepítési jellemzőkkel működik, amelyek demonstrálják a KKV-megvalósítás gyakorlati életképességét. A 4 milliárd paraméteres modell fogyasztói szintű hardveren fut (RTX 3060 6GB VRAM-mal), körülbelül 5,5 GB VRAM-ot és 20 GB rendszermemóriát igényel, átlagosan 2,5 perces következtetési időt biztosítva döntési ciklusonként 4K tokenes kontextusablakban. Az ügynökdöntések 15 perces időközönként történnek, hibakezeléssel implementálva a válaszok körülbelül 3%-ában előforduló hibás JSON-struktúrára – ez a kisebb paraméterszámú modellek ismert korlátja. A rendszerprompt a gyártás-specifikus következtetést hangsúlyozza, az átállás-minimalizáláson keresztüli átbecsátóképeség-maximalizálásra összpontosítva.

KÍSÉRLETI FELTÉTELEK

Négy kísérleti feltételt értékeltünk ki 480 perces (8 órás) szimulációk során, amelyek egy standard gyártási napot reprezentálnak. Ezek közé tartozott egy alapállapot hagyományos FIFO (Első be, első ki) ütemezéssel, egy MI-vezérelt optimalizálás tipikus igényfeltételek mellett ($\lambda=0,35$ rendelés/perc), és két nagy forgalmú forgatókönyv ($\lambda=0,5$ rendelés/perc), amelyek az emberi jóváhagyási késleltetésben különböztek – az egyik minimális késleltetéssel (0,5–2 perc), a másik valóság-hű emberi döntési késleltetéssel (5–10 perc).

MEGVALÓSÍTÁSI RÉSZLETEK ÉS MÓDSZERTANI ÁTLÁTHATÓSÁG

A keretrendszer Python 3.14-ben készült SimPy 4.1.1-gyel a szimulációhoz, a 2024 novemberi specifikációt implementáló egyedi MCP-szerverrel, és Gemma3:4B-vel Ollaman keresztül a peremhálózati MI végrehajtáshoz. A kutatási átláthatóság és a koncepcionális reprodukálhatóság biztosítása érdekében teljes dokumentációt nyújtunk a szimulációs paraméterekről és eloszlásokról, az MCP eszközspecifikációkról és interfészekről, a kísérleti feltételekről és kontrollokról, valamint az MI-ügynök konfigurációjáról és döntési logikájáról. A fix véletlenszám-generátor magok használata determinisztikus szimulációs viselkedést biztosít, amely a dokumentált módszertant követve koncepcionálisan reprodukálható.

Kísérleti kiértékelés

FŐ EREDMÉNYEK

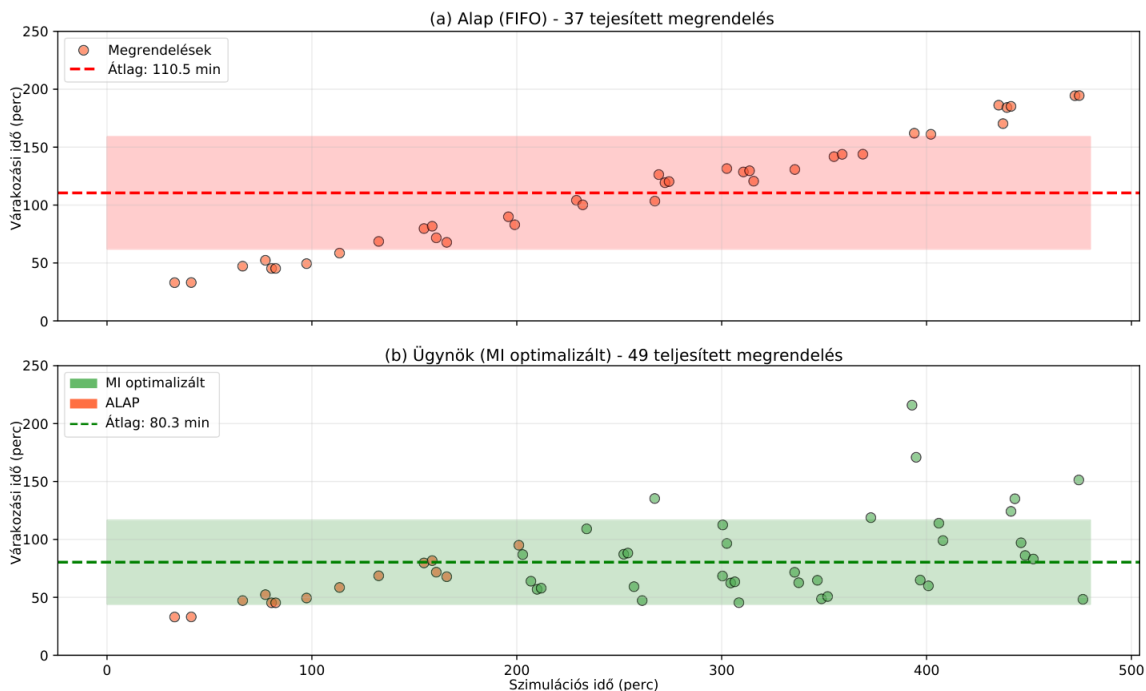
1. táblázat. Alapállapot és MI-optimalizált teljesítmény összehasonlítása (normál forgalmi feltételek)

Metrika	Alapállapot (FIFO)	Ügynök (MI-Optimalizált)	Javulás
Teljesített rendelések	37	49	32.4%
Átlagos várakozási idő (perc)	110.5	80.3	-27.3%
Medián várakozási idő (perc)	119.3	68.4	-42.7%
Várakozási idő szórása (perc)	49.3	36.8	-25.4%
Átlagos adagméret (rendelés)	1.86	2.76	47.7%

2. táblázat. Ember a hurokba-késletelés hatása (nagy forgalmú feltételek)

Metrika	Gyors jóváhagyás (0.5–2 perc)	Lassú jóváhagyás (5–10 perc)	Teljesítmény vesztés
Teljesített rendelések	48	47	-2.10%
Átlagos várakozási idő (perc)	112.7	118.3	5.00%

2. ábra. Várakozási idő alakulása a szimulációs periódus során

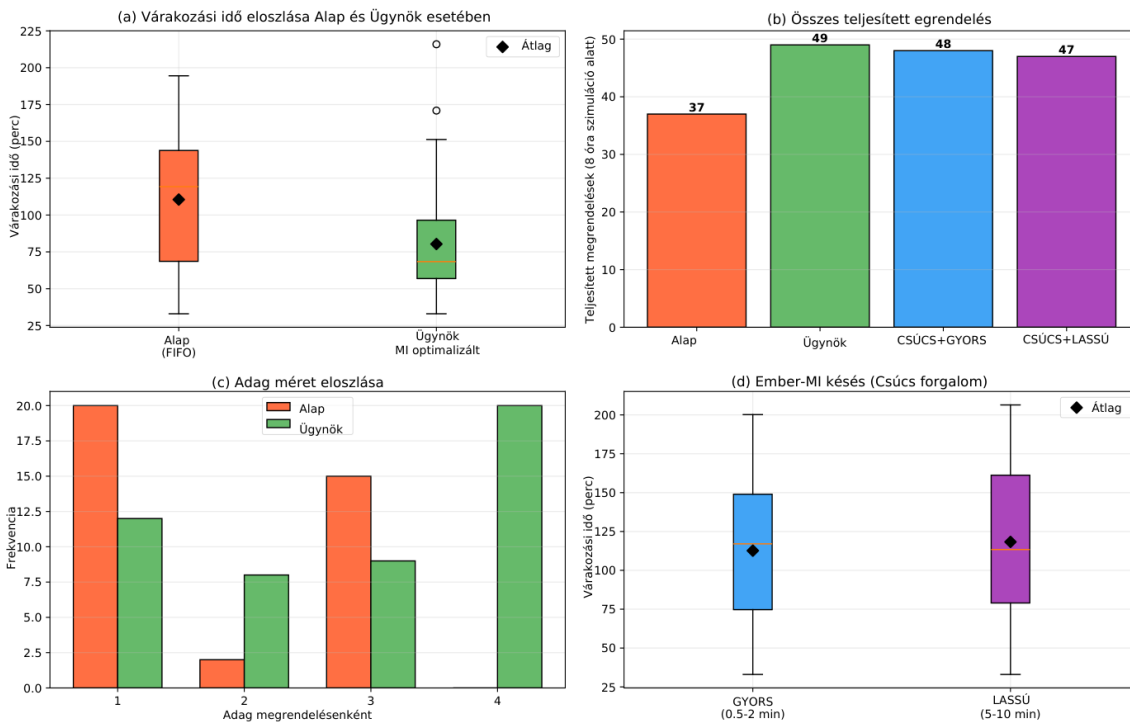


(a) Az alapállapot FIFO-ütemezés az egyedi rendelési várakozási időket mutatja a szimulációs periódus során 110,5 perces átlaggal.

(b) Az MI-optimalizált ütemezés csökkentett várakozási időket demonstrál 80,3 perces átlaggal és a rendelésteljesítések szorosabb időbeli csoportosulásával.

3. ábra. Teljesítménymetriák összehasonlítása.

MCP-alapú digitális iker kísérleti eredmények



- (a) Várakozásiidő-eloszlás összehasonlítása, amely az MI-optimalizálás melletti csökkentett szórást mutatja.
 (b) Átbocsátóképeség-javulás összehasonlítása: az alapállapot 37, az ügynök 49 rendelést teljesített.
 (c) Adagméret-eloszlás, amely az átlagos adagméret növekedését mutatja 1,86-ról 2,76 rendelésre adagonként.
 (d) Ember a hurokba-késletetés hatása nagy forgalmú feltételek mellett, összehasonlítva a gyors (0,5–2 perc) és lassú (5–10 perc) jóváhagyási időket.

PEREMHÁLÓZATI MI-TELJESÍTMÉNYJELLEMZŐK

A peremhálózaton telepített Gemma3:4B ügynök számos kulcsfontosságú teljesítményjellemzőt mutatott, amelyek alátámasztják a peremhálózati MI gyártási alkalmazhatóságát. Az ügynök 32,4%-os átbocsátóképesség-javulást ért el a modell 4 milliárd paraméteres korlátja ellenére, demonstrálva, hogy a könnyűsúlyú modellek jelentős hatékonyságnövekedést képesek elérni. A rendszer adaptív viselkedést mutatott: a beavatkozási ráta normál forgalmi feltételek mellett 71%-ról nagy forgalmú forgatókönyvek esetén 91% fölé emelkedett. A robusztus működés megmaradt az alkalmanként előforduló JSON-elemzési problémák ellenére is, a válaszoknak mindössze 3%-a igényelt újrapróbálkozási logikát. A gyakorlati telepítés szempontjából talán a legfontosabb, hogy az ügynök döntési ciklusonként 2,5 perces gyakorlati következtetési időt tartott fenn fogyasztói hardveren, demonstrálva, hogy a valós idejű optimalizálás megvalósítható speciális számítási erőforrások nélkül.

KULCSMÉGÁLLAPÍTÁSOK ÖSSZEFOGLALÁSA

Kísérleti kiértékelésünk négy kulcsmegállapítást eredményezett. Először, a könnyűsúlyú peremhálózati MI-modellek jelentős hatékonyságjavulást képesek elérni az alkalmazható gyártási felhasználási esetekben, megkérdőjelezve azt a feltételezést, hogy csak nagy, felhőalapú modellek képesek értelmes optimalizálást nyújtani. Másodsor, az MCP-n keresztüli szabványosított interfészek konzisztens ügynökteljesítményt tesznek lehetővé változó forgalmi feltételek mellett módosítás nélkül, kezelve a módszertani fragmentációs problémát. Harmadsor, az ember-MI-együtműködés gyakorlatilag megvalósíthatónak bizonyul, az 5–10 perces jóváhagyási késleltetések mindössze körülbelül 5%-os teljesítményromlást okoznak – ez elfogadható kompromisszum az emberi felügyeletért cserébe Ipar 5.0 kontextusban. Végül, a keretrendszer módszertani alapot teremt, amely lehetővé teszi a kísérletezést fizikai gyári hozzáférés nélkül, csökkentve az akadályokat a jövőbeli kutatás és a KKV-adaptáció előtt.

Diszkusszió

KUTATÁSI HIÁNYOSSÁGOK ÚJRALÁTOGATÁSA

Keretrendszerünk közvetlenül kezeli a bevezetésben azonosított három kutatási hiányosságot. A bizonyítéki hiányosságot jelentős mértékben kezeli a konkrét bizonyíték, hogy az MI-ügynökök jelentős javulást (+32,4%-os átbocsátóképességet) képesek elérni egy valóság-hű KKV-forgatókönyvben. Bár egyetlen területre korlátozódik, az esettanulmány demonstrálja a hatékonyságot a számos KKV-művelethez hasonló erőforrás-korlátozott környezetekben. A módszertani hiányosságot az MCP-szabványosítás teljes mértékben kezeli, amely kiküszöböli az $N \times M$ fragmentációs problémát azáltal, hogy bármely MCP-kompatibilis ügynök bármely MCP-képes digitális ikerrel interfészelt. Ez lehetővé teszi az értelmes kutatások közötti összehasonlítást – a kumulatív tudományos előrehaladás szükséges feltételét. Végül a időbeli hiányosságot teljes mértékben kezeli az, amit az MCP első dokumentált gyártási alkalmazásának tartunk, áthidalva a protokoll bevezetése (2024 november) és az ipari alkalmazás közötti késedelmet, miközben demonstrálja hasznosságát a szabványosított MI ügynökfejlesztéshez.

KÖVETKEZMÉNYEK A PEREMHÁLÓZATI MI-GYÁRTÁSI ALKALMAZÁSÁRA

Eredményeink empirikus támogatást nyújtanak a peremhálózati MI gyártási alkalmazásokba történő kutatás kiterjesztéséhez. A 4 milliárd paraméteres modellel elért 32,4%-os átbocsátóképesség-javulás számos fontos következményre utal. Először, az erőforrás-korlátozott telepítés életképes – a korlátozott számítási erőforrásokkal rendelkező KKV-k profitálhatnak az MI-optimalizálásból anélkül, hogy felhőalapú nagy modelleket igényelnének. Másodszor, a specializáció kompenzálhatja a méretet, mivel egy közepes méretű, specifikus gyártási területre összpontosító modell a szakirodalomban nagyobb modellekre jelentett eredményekhez hasonló eredményeket ért el. Harmadszor, a szabványosított interfészek lehetővé teszik a peremhálózati telepítést – az MCP könnyűsúlyú JSON-RPC-protokollja megfelelően bizonyult a sávszélesség-korlátozott peremhálózati környezetekhez. Végül, az emberi felügyelet praktikus marad, mivel az emberi döntési késleltetésből fakadó minimális teljesítményvesztés megvalósíthatóvá teszi az ember a hurokba konfigurációjú peremhálózati MI-t időérzékeny műveletekhez.

Ezek a megállapítások számos területen indokolják a kiterjesztett kutatást: a gyártási területekre optimalizált modellspecializációs technikák, peremhálózat-felhő együttműködési minták, ahol a peremhálózati ügynökök kezelik az időérzékeny döntéseket, míg a felhőmodellek stratégiai útmutatást nyújtanak, valamint infrastruktúra-mint-kód módszertanok a peremhálózati MI-rendszerek reprodukálható telepítéséhez kutatási és fejlesztési kontextusokban.

KORLÁTOK ÉS JÖVŐBELI IRÁNYOK

Tanulmányunknak számos korlátja van, amelyek a jövőbeli kutatás irányait jelölik ki. Az egyterületes validáció transzportbeton-üzemekkel nem feltétlenül általánosítható minden gyártási kontextusra, bár a keretrendszer-architektúra területközi alkalmazásra készült. A szimulációalapú validáció, bár kontrollált fejlesztési környezetet biztosít, fizikai üzemi validációt igényel alapvető jövőbeli munkaként. Az algoritmikus megközelítés mohó (greedy) adagolási heurisztikát alkalmaz, amely bár hatékony, nem képviseli a legkorszerűbb optimalizálási technikákat. Ezenkívül a determinisztikus kiértékelés fix véletlenszám-generátor magokkal kontrollált összehasonlítást tesz lehetővé, de korlátozza a statisztikai általánosítási állításokat.

A munkából kirajzolódó jövőbeli kutatási irányok közé tartozik a területközi validáció – a keretrendszer alkalmazása műhelyütemezésre, prediktív karbantartásra és minőségsszabályozási forgatókönyvekre; a peremhálózati MI-specializáció – finomhangolási megközelítések és prompt-mérnöki minták fejlesztése gyártásra optimalizálva; hierarchikus MI-architektúrák feltárása, ahol a peremhálózati ügynökök kontextus-kurátorként szolgálnak központi szakértői rendszerek számára; infrastruktúra-mint-kód módszertanok fejlesztése skálázható kísérletezéshez; valamint közösségi szabványosítási erőfeszítések MCP gyártási profilok és összehasonlító MI-kutatási benchmark-készletek fejlesztésére.

GYAKORLATI AJÁNLÁSOK

A hasonló megvalósításokat fontolgató gyakorlati szakemberek számára több ajánlás is kirajzolódik tapasztalatainkból. A minimálisan életképes eszközkészlettel való indulás – ahogy három MCP-eszközünk elegendőnek bizonyult jelentős javuláshoz – csökkenti a megvalósítási komplexitást, miközben értelmes előnyöket nyújt. A peremhálózati telepítést komolyan mérlegelni kell, mivel a könnyűsúlyú modellek értelmes optimalizálást képesek nyújtani, miközben kezelik a KKV adatvédelmi és késleltetési aggályokat. Az ember a hurokba interfészeket emberi mérlegelésre kell tervezni, egyensúlyozva az automatizálás előnyeit az operátori bizalommal és helyzetismerettel. Végül a meglévő szabványok, mint az MCP kihasználása bevált mintákra épít, csökkentve a megvalósítási kockázatot az egyedi megoldásokhoz képest, miközben biztosítja a kompatibilitást a fejlődő MI-ökoszisztémákkal.

Összefoglalás

Ez a tanulmány egy új keretrendszert mutat be, amely integrálja a Model Context Protocolt a gyártási digitális ikrekkel, szabványosított fejlesztési környezetet teremtve MI ügynökök számára. A korábbi munkákat akadályozó kritikus módszertani fragmentációs probléma kezelésével megközelítésünk lehetővé teszi intelligens gyártási rendszerek fejlesztését és tesztelését fizikai gyári hozzáférés igénye nélkül.

A keretrendszer betonüzem-forgatókönyvre történő alkalmazása demonstrálja, hogy a peremhálózaton telepíthető MI-modellek jelentős működési javulást képesek elérni – 32,4%-os átbocsátóképesség-növekedést és 27,3%-os várakozási idő csökkentést –, miközben fenntartják a kompatibilitást az Ipar 5.0 ember a hurokba követelményeivel. Ez a bizonyíték támogatja a peremhálózati MI gyártás optimalizálási alkalmazásaiba irányuló kutatás kiterjesztését, különösen az erőforrás-korlátozott KKV-környezetekben, ahol a hagyományos felhőalapú megközelítések megvalósítási akadályokkal szembesülnek.

Előretekintve a keretrendszer alapot teremt számos ígéretes kutatási irány számára: a peremhálózati MI hatékonyságának területközi validálása, hierarchikus MI-architektúrák feltárása, ahol a peremhálózati ügynökök előfeldolgozzák az adatokat központi szakértői rendszerek számára, valamint infrastruktúra-mint-kód módszertanok fejlesztése skálázható kísérletezéshez. Az belépési korlátok csökkentésével, miközben biztosítja a módszertani átláthatóságot, ez a munka az akadémiai kutatás és a gyakorlati innováció felgyorsítását célozza az Ipar 5.0 ember-MI együttműködési paradigmájában, végső soron hozzájárulva a hozzáférhetőbb és hatékonyabb MI-integrációhoz minden méretű gyártási környezetben.