

# Autonóm hajtásirányítási rendszerek fejlesztése Ipar 4.0/5.0 környezetben

**Összefoglalás:** Az autonóm járművek fejlesztése egyre fontosabbá válik a modern közlekedéstechnikában, ahol az integrált hajtásirányítás, az energiaoptimalizálás és a közlekedésbiztonság kulcsfontosságú. Ez a kutatás az autonóm hajtásirányítási rendszerek – különösen a hajtásvezérlés, az energiaellátás, a biztonsági mechanizmusok és a döntéshozatali folyamatok – interaktív kapcsolatát vizsgálja. Továbbá megvizsgáljuk, hogy az Ipar 4.0/5.0 által kínált lehetőségek közül melyek integrálhatók: digitális ikrek és valós idejű adatfeldolgozás, adatintenzív vezérlés és prediktív elemzés, valamint fejlett mesterségesintelligencia-alkalmazások [1, 2, 3]. Az Ipar 4.0 által inspirált adatgyűjtési és elemzési módszerek alkalmazásával a rendszer döntéstámogató algoritmusai hatékonyabban tudják előre jelezni a dinamikus változásokat, és szükség esetén automatikusan beavatkozhatnak. Ezek az elemek hozzájárulnak ahhoz, hogy az autonóm hajtásirányítási rendszerek ne csak technológiailag fejlettek legyenek, hanem adaptívak és a működési tapasztalatok révén folyamatosan fejlődjenek is [1].

**Kulcsszavak:** Autonóm járművek, hajtásirányítás, energiaoptimalizálás, ipar 4.0/5.0, mesterséges intelligencia.

**Abstract:** The development of autonomous vehicles is becoming increasingly important in modern traffic engineering, where integrated drive control, energy optimization, and traffic safety are key. This research investigates the interactive relationships of autonomous drive control systems - especially drive control, power supply, safety mechanisms, and decision-making processes. Furthermore, we examine which opportunities offered by Industry 4.0/5.0 can be integrated: digital twins and real-time data processing, data-intensive control and predictive analysis, and advanced artificial intelligence applications [1, 2, 4].

\* *Debreceni Egyetem, Műszaki Kar*  
Email: tiber.tamaspeter@eng.unideb.hu  
ORCID: 0009-0000-1644-7614

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

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Arora–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar. (2024): AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassölkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering. Springer, 4., (2.), pp. 186–191.*

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research, 43., (2.), pp. 116–125.*

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Arora–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar (2024): AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassölkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering. Springer*, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M.–Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks.*

By applying Industry 4.0-inspired data collection and analysis methods, the system's decision-support algorithms can predict dynamic changes more effectively and automatically intervene when necessary [4]. These elements contribute to making autonomous drive control systems not only technologically advanced but also adaptive and continuously improving through operational experience [1].

**Keywords:** autonomous vehicles, drive control, energy optimization, industry 4.0/5.0, sustainability.

## Bevezetés

Az Autonóm Hajtásirányítási Rendszerek (ADCS) képezik azt az alapvető technológiai keretrendszert, amely lehetővé teszi az önvezető képességeket a modern járművekben [4]. Ezek a rendszerek magukban foglalják azokat az integrált hardver- és szoftverkomponenseket, amelyek felelősek a jármű meghajtásának menedzseléséért, az energiafelhasználásért, a biztonsági protokollokért és a környezet észleléséért [5]. A jelenlegi ADCS implementációk jelentős kihívásokkal néznek szembe a valós idejű adatfeldolgozás, a rendszerintegráció és a komplex környezetben történő döntéshozatal terén. Az elmúlt évek jelentős fejlődése ellenére ezek a rendszerek továbbra is küzdenek a megbízhatósággal változatos körülmények között, a működés közbeni energiaoptimalizálással és az alrendszerek közötti zökkenőmentes kommunikációval [6].

Az Ipar 4.0 elvei, amelyeket az összekapcsolhatóság, a digitális ikrek, a valós idejű adatfeldolgozás és az edge computing jellemeznek, robusztus keretet biztosítanak számos ADCS-korlát kezelésére [2, 6]. Ezek a technológiák lehetővé teszik a fejlettebb adatgyűjtési és -feldolgozási képességeket, lehetőséget teremtve reszponzívabb és adaptívabb vezérlőrendszerek létrehozására. Erre az alapra építve az Ipar 5.0 fejlett mesterséges intelligencia és gépi tanulási képességeket vezet be, különösen a nagy nyelvi modellekhez és mélytanulási rendszerekhez hasonló kifinomult modellek integrálásával [1]. Ezek a technológiák elősegítik az adatvezérelt intelligenciát a járműműködés komplex mintázatainak értelmezéséhez, a hagyományos statisztikai módszereken túl-

mutató fejlett prediktív képességeket, az extrém eseteket és újszerű helyzeteket kezelni képes autonóm döntéshozatali rendszereket, valamint a működési tapasztalatok révén fejlődő folyamatos tanulási rendszereket [1].

Az ADCS fejlesztési kihívásai és az Ipar 4.0/5.0 technológiai megoldásai közötti szinergia jelentős innovációs lehetőségeket rejt magában [1, 2]. A kommunikációs architektúrák, az adatfeldolgozási korlátok, az algoritmikus megszorítások és a döntéshozatali keretrendszerek kezelésével ezen a fejlett ipari technológiákon keresztül az autonóm járművek magasabb szintű teljesítményt, megbízhatóságot és hatékonyságot érhetnek el. Ez a tanulmány az ADCS-fejlesztés kulcsfontosságú kihívásait vizsgálja, és Ipar 4.0/5.0 által inspirált megoldásokat javasol az autonóm járműtechnológia jelenlegi állásának előmozdítására [1, 2, 3].

## Autonóm hajtásirányítási rendszerek architektúrája

Az Autonóm Hajtásirányítási Rendszerek komplex, integrált technológiai környezeteket képviselnek, amelyek több, összehangoltan működő, specializált alrendszerből állnak. Az alapvető architektúra tipikusan három fő funkcionális területet foglal magában: hajtásvezérlő rendszereket, energiagazdálkodási rendszereket és biztonsági rendszereket, amelyeket egy központi vezérlő architektúra koordinál.

A hajtásvezérlő rendszerek a jármű mozgását irányítják a gyorsítás, fékezés és kormányzás funkcióinak integrált vezérlésével. Ezek a rendszerek a magas szintű navigációs parancsokat precíz mechanikai műveletekké alakítják, miközben figyelembe veszik a járműdinamikát, az útviszonyokat és a teljesítményparamétereket. A modern hajtásvezérlő implementációk adaptív algoritmusokat tartalmaznak, amelyek a környezeti feltételek, a jármű terhelése és a vezetési módok alapján módosítják a működési paramétereket. Ezeknek a rendszereknek precíz vezérlést kell fenntartaniuk széles sebességtartományban és változatos vezetési körülmények között, miközben optimalizálják mind a teljesítményt, mind az utasok kényelmét.

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Arora–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar (2024): *AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation*. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassõlkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): *Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0*. *Central European Journal of Engineering*. Springer, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks*.

Az energiagazdálkodási rendszerek felügyelik az energia tárolását, elosztását és felhasználását a járműben. Elektromos és hibrid autonóm járművek esetében ezek a rendszerek szabályozzák az akkumulátor töltési és kisütési ciklusait, figyelik a hőmérsékleti viszonyokat, és energia-visszanyerő mechanizmusokat, például regeneratív fékezést alkalmaznak. A fejlett energiagazdálkodás prediktív útvonalinformációkat épít be az energiafelhasználás optimalizálása érdekében a tervezett utazások során, a várható szintkülönbségek, forgalmi viszonyok és környezeti tényezők alapján módosítva az energiaelosztást. E rendszerek hatékonysága közvetlenül befolyásolja a jármű hatótávolságát, üzemeltetési költségeit és környezeti hatását.

A biztonsági rendszerek aktív és passzív komponenseket tartalmaznak, amelyeket a balesetek megelőzésére és a következmények enyhítésére terveztek, ha a megelőzés sikertelen [3]. Ide tartoznak a környezetérzékelő rendszerek, amelyek különböző szenzormodalitásokat használnak, a veszélyértékelő algoritmusok, a vészhelyzeti beavatkozó mechanizmusok és a rendszer-redundanciák [6]. A biztonsági rendszerek szigorú teljesítménykövetelmények szerint működnek, beleértve a kritikus funkciók determinisztikus válaszidejét és az alapvető vezetési feladatok hibatűrő (fail-operational) képességét. E rendszerek integrációja a hajtásvezérléssel és az energiagazdálkodással az időnként versengő prioritások gondos kiegyensúlyozását igényli [4].

A hagyományos ADCS-implementációk nagymértékben támaszkodnak a Controller Area Network (CAN) protokollokra a rendszerek közötti kommunikációhoz [6]. A Bosch által 1985-ben kifejlesztett CAN robusztus üzenetküldési keretrendszert biztosít, de korlátokkal küzd a sávszélesség terén, amely nagysebességű implementációk esetén körülbelül 1 Mbit/sec [6]. A protokoll busztopológián keresztül működik, ahol az üzeneteket minden csomópontnak továbbítják, ütközéskezelési prioritási mechanizmusokkal. Bár elegendő a hagyományos autóiipari alkalmazásokhoz, a CAN korlátozott sávszélessége szűk keresztmetszetet képez az adatintenzív autonóm rendszerek számára, ahol a nagy felbontású szenzoradatokat minimális késleltetéssel kell megosztani több vezérlőegység között [6].

A modern ADCS szenzor-ökoszisztémája tipikusan több, párhuzamosan működő érzékelési modalitást tartalmaz a környezet átfogó észlelésének megteremtése érdekében [6].

Gyakori szenzortípusok közé tartoznak a radarrendszerek tárgyészleléshez és távolságméréshez, kamerarendszerek a vizuális jelenetértelmezéshez, LiDAR a precíz háromdimenziós térképezéshez, ultrahangos szenzorok a közeli akadályok észleléséhez, valamint különböző járműállapot-szenzorok a belső állapotok figyelésére [6]. Minden szenzortípus specifikus adatformátumokat generál különböző sebességgel, és speciális feldolgozási folyamatokat igényel, ami komplex integrációs kihívásokat teremt. Ezen eltérő szenzorrendszerek szinkronizált működése alapvető követelmény a megbízható autonóm működéshez [5].

Az ADCS rendszerintegrációja gondos figyelmet igényel mind a hardver-, mind a szoftverarchitektúrákra. A hagyományos megközelítések elosztott számítási modelleket alkalmaznak, ahol speciális elektronikus vezérlőegységek (ECU-k) kezelnek specifikus funkciókat. Ez a megközelítés azonban kihívásokat teremt az autonóm működéshez szükséges holisztikus döntéshozatal szempontjából. Újabb tervezések központosítják az alapvető feldolgozási funkciókat, miközben fenntartják az elosztott szenzorokat és aktuátorokat, létrehozva hibrid architektúrákat, amelyek kiegyensúlyozzák a feldolgozási követelményeket a fizikai korlátokkal.

## Adatáramlási követelmények modern autonóm rendszerekben

A modern autonóm hajtásrendszerek példátlan mennyiségű adatot generálnak, amelyeket hatékonyan kell kezelni, feldolgozni és felhasználni a jármű irányításához [5]. Ezen adatáramlások és követelményeik megértése elengedhetetlen az autonóm működést támogató hatékony rendszerarchitektúrák kifejlesztéséhez.

Az autonóm járművek által generált adatmennyiség jelentősen meghaladja a hagyományos járművékét. Egy tipikus, kamerákkal, LiDAR-ral, radarral és ultrahangos szenzorokkal felszerelt autonóm tesztjármű óránként 1,4 terabájt és 19 terabájt közötti adatot generálhat, a szenzor felbontásától és a környezet komplexitásától függően [5]. Egy nagy felbontású LiDAR önmagában 10–70 MB/s adatot generálhat, míg a 4K felbontású, 60 képkocka/másodperc sebességgel működő kamerarendszerek több mint 1 GB/s nyers adatot produkálhatnak. Ez a hatalmas adatgenerálás jelentős kihívásokat teremt a fedélzeti feldolgozási, tárolási és átviteli rendszerek számára. A hagyományos autóiipari hálózatokat soha nem tervezték ilyen átviteli követelményekhez, ami a jármű kommunikációs architektúráinak alapvető újragondolását teszi szükségessé [6].

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M.–Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks*.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks.*

Az autonóm rendszerekben a késleltetési követelmények széles skálán mozognak a támogatott funkciótól függően. A kritikus biztonsági funkciók, mint például az ütközésselkerülés, 10 ezredmásodperc alatti végponttól végpontig tartó késleltetést igényelnek a szenzor bemenetétől az aktuátor válaszáig. A navigációs és útvonaltervezési funkciók tolerálhatják az 50–100 ezredmásodperces tartományba eső késleltetéseket, míg a kényelmi funkciók és a nem kritikus funkciók elfogadhatnak több száz ezredmásodperces késést is. Ez a széles eltérés egy többszintű adatkezelési kihívást teremt, ahol az időkritikus és nem kritikus adatoknak meg kell férniük a megosztott infrastruktúrán, miközben minden adatkategóriához megfelelő szolgáltatási szintet kell fenntartani. A modern ADCS-nek kifinomult szolgáltatásminőségi (quality-of-service) mechanizmusokat kell implementálnia annak biztosítására, hogy a kritikus adatáramlások megfelelő prioritást kapjanak.

Az autonóm járműkommunikáció megbízhatósági igényei egy másik kritikus szempontot képviselnek. A biztonságkritikus funkciók determinisztikus kommunikációt igényelnek garantált üzenetkészséssel meghatározott időkorlátokon belül [4]. A hagyományos autóiipari hálózatok, mint a CAN, bizonyos megbízhatósági funkciókat biztosítanak hibafelismerési és automatikus újraküldési mechanizmusokon keresztül [6]. Az autonóm rendszerek adatáramlásainak komplexitása és volumene azonban kifinomultabb megközelítéseket igényel. A redundáns kommunikációs útvonalak, hibajavító mechanizmusok és hibatűrő protokollok az autonóm kommunikációs ketrendszerek alapvető komponenseivé válnak [3]. Az olyan funkcionális biztonsági szabványok, mint az ISO 26262, szigorú követelményeket támasztanak a kommunikáció megbízhatóságára a biztonságkritikus funkciókban részt vevő rendszerek esetében, szükségessé téve a kommunikációs protokollok formális verifikálását [4].

A sávszélességgel kapcsolatos megfontolások talán a hagyományos autóiipari hálózatok legsúlyosabb korlátját jelentik autonóm rendszerekre alkalmazva [6]. A CAN-protokoll maximális 1 Mbit/s átviteli sebessége nem képes kezelni a modern szenzoradat-mennyiségeket, leküzdhetetlen szűk keresztmetszetet teremtve a rendszereintegráció számára. Újabb protokollok, mint a CAN-FD (Flexible Data-rate), körülbelül 8 Mbit/s-ra növelik a sávszélességet, de még ez a megnövelt kapacitás is messze elmarad az autonóm rendszerek követelményeitől [6]. Az Automotive Ethernet megoldásként jelent meg erre a kihívásra, 100 Mbit/s-tól 10 Gbit/s-ig terjedő sávszélességet kínálva az implementációtól függően [6]. Ezek a nagy sávszélességű hálózatok lehetővé teszik a nyers szenzoradatokat továbbítását a feldolgozó csomópontok között, támogatva a centralizáltabb és hatékonyabb rendszerarchitektúrákat.

A biztonsági követelmények további dimenziót adnak az autonóm járművek adatáramlási megfontolásaihoz. Az összekapcsolt autonóm járműveknek védekezniük kell mind az adatlopás, mind a jármű működésébe történő rosszindulatú beavatkozás ellen. A kommunikációs protokolloknak erős titkosítást, hitelesítési mechanizmusokat és behatolásérzékelő képességeket kell tartalmazniuk a rendszer teljesítményének vagy megbízhatóságának veszélyeztetése nélkül. A kiberbiztonsági követelmények és a rendszer teljesítménye közötti feszültség komplex mérnöki kompromisszumokat teremt, amelyeket gondosan kell kezelni.

Ezen eltérő adatáramlási követelmények integrációja átfogó kommunikációs architektúrát tesz szükségessé, amely képes támogatni a változó késleltetési, megbízhatósági, sávszélességi és biztonsági igényeket a különböző járműfunkciókban [3]. A hagyományos pont-pont vagy egyszerű busz architektúrák nem tudják hatékonyan kielégíteni ezeket a komplex követelményeket, ami az Ipar 4.0 elvei által inspirált kifinomultabb megközelítések elfogadását ösztönzi [2, 3].

## Döntéshozatali folyamatok az ADCS-ben

Az Autonóm Hajtásirányítási Rendszerekben a döntéshozatali folyamatok kifinomult hierarchikus struktúrákat képviselnek, amelyeket arra terveztek, hogy a nyers szenzoradatokat biztonságos, hatékony járművezérlési műveletekké alakítsák [4, 5]. Ezeknek a folyamatoknak integrálniuk kell a különböző információforrásokat, figyelembe kell venniük a bizonytalanságot, és egyensúlyt kell teremteniük a versengő célok között, miközben szigorú időzítési korlátok között működnek.

Az ADCS hierarchikus vezérlési architektúrái tipikusan több döntéshozatali szintet valósítanak meg, amelyek különböző időléptékekben és absztrakciós szinteken működnek. Stratégiai szinten az útvonaltervezési funkciók optimális útvonalakat határoznak meg a célállomás követelményei, a forgalmi viszonyok és az energetikai megfontolások alapján, tipikusan másodpercekben vagy percekben mért frissítési ciklusokkal működve. A taktikai szint a manővertervezést kezeli, beleértve a sávváltásokat, előzési döntéseket és kereszteződésben való navigációt, száz milliszekundumos nagyságrendű frissítési rátákkal. Az operatív szint a pillanatról pillanatra történő járművezérlést irányítja kormányzási, gyorsítási és fékezési parancsokon keresztül, milliszekundumokban mért magas frekvenciákon működve.

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassölkín–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering*. Springer, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M.–Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavasoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M.–Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

Ez a hierarchikus megközelítés lehetővé teszi a rendszer számára, hogy a komplex vezetési feladatokat kezelhető komponensekre bontsa, miközben fenntartja a jármű viselkedésének általános koherenciáját.

A szenzorfüziós technikák a döntéshozatali folyamat kritikus komponensét képviselik, egyesítve a több érzékelési modalitásból származó adatokat a jármű környezetének átfogó megértése érdekében [5]. A korai füziós megközelítések a nyers szenzoradatokat egyesítik a feldolgozás előtt, maximalizálva a környezeti modellezéshez rendelkezésre álló információt, de jelentős számítási erőforrásokat igényelve. A késői füzió minden szenzorból származó adatot külön dolgoz fel az eredmények egyesítése előtt, csökkentve a számítási igényeket, de potenciálisan elveszítve a szenzorbemenetek közötti korrelációkat. A hibrid megközelítések szelektíven implementálják a korai füziót a komplementer szenzorok esetében, miközben késői füziót használnak a független érzékelési modalitásokhoz. A megfelelő füziós architektúra kiválasztása jelentősen befolyásolja a rendszer teljesítményét, megbízhatóságát és számítási hatékonyságát [5].

Az autonóm rendszerekben a predikciós követelmények túlmutatnak az egyszerű tárgykövetésen, és magukban foglalják a jövőbeli állapotok és viselkedések előrejelzését [5]. A modern rendszereknek előre kell jelezniük az észlelt járművek, gyalogosok és más közlekedési szereplők pályáját több száz milliszekundumtól több másodpercig terjedő időhorizontokon. Ezeknek az előrejelzéseknek figyelembe kell venniük a fizikai korlátokat, a tipikus viselkedési mintákat és a környezeti kontextust. Továbbá a rendszereknek bizonytalansági becsléseket kell rendelniük az előrejelzésekhez, lehetővé téve a kockázattudatos döntéshozatalt [4]. Ezen előrejelzések pontossága közvetlenül befolyásolja a biztonságot, a hatékonyságot és az utasok kényelmét, így a prediktív képesség kulcsfontosságú megkülönböztető tényező az autonóm rendszerek teljesítményében.

A járműdinamikai modellezés döntő szerepet játszik a magas szintű döntések hatékony vezérlési műveletekké történő átalakításában. Ezek a modellek megragadják a vezérlési bemenetek és a jármű válaszai közötti komplex kapcsolatokat, figyelembe véve a gumiabroncsok jellemzőit, a felfüggesztés viselkedését, a súlyeloszlást és a környezeti feltételeket, mint például az útfelület súrlódását. A hagyományos megközelítések fizikai alapelvekből származtatott, fizikaalapú modelleket használnak, de pontosságukat korlátozza a valós kölcsönhatások komplexitása. Újabb implementációk adatvezérelt technikákat építenek be, amelyek a működési tapasztalatokból tanulják meg a jármű viselkedését, lehetővé téve a jármű válaszában pontosabb előrejelzését változatos körülmények között.

Ezen modellek integrálása a döntéshozatali folyamatba biztosítja, hogy a tervezett manőverek a jármű fizikai képességein belül maradjanak.

A döntés-validálási és verifikációs rendszerek biztosítják, hogy az autonóm vezérlési döntések megfeleljenek a biztonsági és teljesítménykövetelményeknek a végrehajtás előtt [4]. Ezek a rendszerek tipikusan többrétegű validálási megközelítéseket implementálnak, ahol az elsődleges döntési algoritmusok vezérlési terveket generálnak, amelyeket ezt követően független biztonsági felügyeleti rendszerek ellenőriznek. A validálási folyamat ellenőrzi, hogy a javasolt műveletek biztonságos távolságot tartanak-e az akadályoktól, betartják-e a közlekedési szabályokat, és a jármű működési képességein belül maradnak-e. Potenciális szabálysértések észlelésekor a biztonsági rendszerek felülbírálati műveleteket hajthatnak végre, vagy átadhatják az irányítást csökkentett funkcionalitású, de garantált biztonsági tulajdonságokkal rendelkező tartalék rendszereknek [4].

A jelenlegi autonóm rendszerek döntéshozatali keretrendszerei jelentős kihívásokkal néznek szembe a determinisztikus, szabályalapú megközelítések és az adaptív, tanulásalapú módszerek közötti egyensúly megteremtésében. A szabályalapú rendszerek átláthatóságot és ellenőrizhetőséget biztosítanak, de nehezen kezelik azokat az újszerű helyzeteket, amelyeket nem explicit módon kezeltek a programozásuk során. A tanulásalapú megközelítések nagyobb alkalmazkodóképességet kínálnak, de hiányozhat belőlük a magyarázhatóság és a formális verifikációs képesség [1]. E korlátok kezelése új megközelítéseket igényel, amelyek egyesítik mindkét paradigma erősségeit, miközben mérséklék azok gyengeségeit.

## Kihívások és Ipar 4.0/5.0 megoldások

Az autonóm hajtásirányítási rendszerek fejlesztése számos kulcsfontosságú kihívással néz szembe, amelyeket hatékonyan lehet kezelni az Ipar 4.0 és 5.0 technológiák alkalmazásával [1, 2, 3]. Ez a szakasz ezeket a kihívásokat vizsgálja, és fejlett ipari koncepciókra és technológiákra támaszkodó megoldásokat javasol.

Az alrendszerek közötti fejlett kommunikáció és interaktív kapcsolatok alapvető kihívást jelentenek az ADCS fejlesztésében. A hagyományos autóiipari kommunikációs hálózatok, mint a CAN, korlátozott sávzélességet és viszonylag egyszerű interakciós modelleket biztosítanak, amelyek nem tudják támogatni az autonóm rendszerek komplex, adatintenzív követelményeit [6].

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Aroara–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar (2024): AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassölkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering. Springer*, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassölkín–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering*. Springer, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M.–Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

[6] Kardos K.–Pétek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks*.

Az Ipar 4.0 számos megoldást kínál erre a kihívásra fejlett hálózati koncepciók és adatkezelési megközelítések révén [2, 3]. Az Ethernet-alapú járműhálózatok biztosítják a szenzoradatok és vezérlési parancsok továbbításához szükséges nagy sávszélességet, a Time-Sensitive Networking (TSN) kiterjesztések pedig determinisztikus késleltetést garantálnak a kritikus üzenetek számára [6]. Egy Unified Namespace (UNS) architektúra, egy alapvető Ipar 4.0-koncepció, megvalósítása közös adatmegosztási környezetet teremt, ahol az alrendszerek hozzáférhetnek egy közös információs modellhez és hozzájárulhatnak ahhoz [3]. Ez a megközelítés lehetővé teszi a kifinomult eseményvezérelt interakciókat, ahol az egyik alrendszer állapotának változása azonnali válaszokat válthat ki más rendszerekből komplex pont–pont-integrációk nélkül. Az MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) és az OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) protokollok könnyűsúlyú, megbízható kommunikációs mechanizmusokat biztosítanak, amelyek támogatják az eseményvezérelt architektúrákhoz elengedhetetlen publish–subscribe-mintákat [6]. Ezek a technológiák együttesen átalakítják a hagyományos, silókban működő jármű-alrendszereket egy integrált információs ökoszisztémává, ahol az adatok szabadon, de biztonságosan áramlanak a komponensek között, lehetővé téve kifinomultabb vezérlési stratégiákat és gyorsabb reagálást a változó körülményekre [2, 3, 6].

Az integrált szenzoradat-kezelés egy másik jelentős kihívást jelent az autonóm rendszerek számára [6]. A több nagy felbontású szenzor által generált hatalmas adatmennyiség a hagyományos autóiipari számítási architektúrák képességeit meghaladó feldolgozási, tárolási és elemzési követelményeket teremt. Az Ipar 4.0 edge computing koncepciói hatékony megoldásokat kínálnak a feldolgozási kapacitás rendszeren belüli elosztásával, lehetővé téve az adatredukciót és -elemzést a keletkezési pont közelében [2, 3]. A helyi feldolgozási képességeket magukban foglaló okos szenzorok elvégezhetik a kezdeti adatszűrést és jellemző-kinyerést, csak releváns információt továbbítva a nyers adatfolyamok helyett. Az elosztott számítási csomópontok implementálhatnak szenzor-specifikus feldolgozási algoritmusokat, amelyeket adott adattípusokra optimalizáltak, az eredményeket pedig központi fúziós és döntési rendszerekbe táplálva [5]. Az Edge-to-cloud architektúrák kiterjesztik ezt a koncepciót a járműrendszerek háttérinfrastruktúrához való csatlakoztatásával, lehetővé téve a számításigényes elemzések kiszervezését, amikor helyénvaló, miközben fenntartják a helyi feldolgozást az időkritikus funkciókhoz. Ezek a megközelítések jelentősen csökkentik a kommunikációs sávszélesség-igényeket, miközben javítják a rendszer válasz készségét és megbízhatóságát.

A változó forgalmi helyzeteket kezelni képes robusztus prediktív vezérlőalgoritmusok fejlesztése talán az autonóm rendszerfejlesztés legnehezebb aspektusa. A hagyományos vezérlési megközelítések küzdenek a valós vezetési környezetek komplexitásával és kiszámíthatatlanságával, különösen a változatos közlekedési szereplőkkel rendelkező városi környezetben. Az Ipar 5.0 fejlett mesterséges intelligencia és gépi tanulási technológiái hatékony megoldásokat kínálnak ezekre a kihívásokra [1].

A kiterjedt vezetési adathalmazokon tanított mély neurális hálózatok képesek felismerni olyan komplex mintákat és forgatókönyveket, amelyek meghaladják a szabályalapú rendszerek képességeit. A megerősítéses tanulási technikák olyan vezérlési stratégiákat tesznek lehetővé, amelyek folyamatosan javulnak a működési tapasztalatok révén, alkalmazkodva a változó körülményekhez és felhasználói preferenciákhoz. A nagy nyelvi modell által inspirált architektúrák képesek integrálni a különböző információforrásokat, beleértve a vezetési környezet szemantikai megértését, lehetővé téve emberszerűbb döntéshozatalt komplex forgatókönyvekben [1]. Ezek az MI-vezérelt megközelítések alapvetően átalakítják a jármű képességét a környezetének megértésére és navigálására, túllépve a merev, programozott válaszokon, és adaptív, kontextuális viselkedést tesznek lehetővé, amely nagyobb robusztussággal képes kezelni újszerű helyzeteket [1, 5].

A digitális iker implementációja fenntarthatósági dimenziókkal egy feltörekvő kihívást és lehetőséget jelent az autonóm rendszerfejlesztésben. Átfogó digitális modellek létrehozása, amelyek pontosan rögzítik a járműdinamikát, az energiaáramlásokat és a környezeti kölcsönhatásokat, kifinomult szimulációs képességeket és kiterjedt validálást igényel. Az Ipar 4.0 digitális ikerkonceptiói keretrendszereket biztosítanak ezen modellek fejlesztéséhez, míg az Ipar 5.0 MI-képességei növelik azok pontosságát és hasznosságát [1, 2, 3]. A fizika-informált neurális hálózatok kombinálják az elméleti modelleket adatvezérelt megközelítésekkel, létrehozva hibrid modelleket, amelyek fenntartják a fizikai hihetőséget, miközben alkalmazkodnak a megfigyelt viselkedéshez. A felhőalapú szimulációs környezetek lehetővé teszik a kiterjedt virtuális tesztelést változatos forgatókönyvekben, jelentősen csökkentve a fizikai tesztelési követelményeket. A jármű működése közbeni valós idejű modelladaptáció lehetővé teszi a folyamatos finomítást a működési adatok alapján, biztosítva, hogy a digitális reprezentáció összhangban maradjon a fizikai valósággal. Ezek a digitális modellek lehetővé teszik a kifinomult optimalizálást több célkitűzés mentén, beleértve az energiahatékonyságot, az alkatrészek élettartamát és a környezeti hatást, támogatva a fenntarthatóság-orientált tervezést és működést [1].

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Arora–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar (2024): AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassõlkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering*. Springer, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M. –Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Arora–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar (2024): AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassölkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering. Springer*, 4., (2.), pp. 186–191.

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[4] Mahmud, S. M. S.–Ferreira, L.–Hoque, M. S.–Tavassoli, A. (2019): Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 43., (2.), pp. 116–125.

[5] Brummelen, J. V.–O'Brien, M.–Gruyer, D.–Najjaran, H. (2018): Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89., pp. 384–406.

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks.*

[7] Sheridan, T. B. (2016): Human-robot interaction: *Status and challenges. Human Factors*, 58., (4.), pp. 525–532.

Az autonómia és a biztonság egyensúlyának megteremtése a döntéshozatali folyamatokban feszültséget teremt aközött, hogy a rendszereknek elegendő szabadságot engedjünk a hatékony működéshez, miközben fenntartjuk a szükséges biztonsági korlátokat [6]. Az Ipar 5.0 MI-vezérelt döntési keretrendszerei átlátható logikával ígéretes megközelítéseket kínálnak erre a kihívásra [1]. A magyarázható MI (Explainable AI) technikák lehetővé teszik, hogy a komplex döntési rendszerek ember által érthető indoklást adjanak cselekedeteikre, megkönnyítve a biztonsági ellenőrzést és a felhasználói bizalmat [7]. A bizonytalanságtudatos algoritmusok explicit módon modellezik a megbízhatósági szinteket értékeléseikben, lehetővé téve a megfelelő óvatosságot kétértelmű helyzetekben, miközben fenntartják a hatékonyságot a jól értelmezett forgatókönyvekben. A neurális hálózatalapú rendszerekhez adaptált formális verifikációs módszerek matematikai garanciákat nyújtanak a viselkedésre meghatározott működési paramétereken belül [4]. Ezek a technológiák együttesen lehetővé teszik az autonóm rendszerek számára, hogy kifinomult döntéseket hozzanak, miközben fenntartják az átláthatóságot és ellenőrizhetőséget, kezelve a biztonságkritikus alkalmazások kulcsfontosságú aggályait [1, 4].

## Következtetések és jövőbeli kutatási irányok

Az Ipar 4.0 és 5.0 technológiák integrációja az autonóm hajtásirányítási rendszerekkel átalakító lehetőségeket kínál a járműautomatizálás előmozdítására [1, 2, 3]. A kifinomult kommunikációs architektúrák, az edge computing, a mesterséges intelligencia, a digitális ikrek és az átlátható döntési rendszerek alkalmazása kezeli a jelenlegi autonóm implementációk kulcsfontosságú kihívásait, lehetővé téve a képesséesebb, megbízhatóbb és hatékonyabb működést [1, 2, 3, 4, 5, 6].

A hagyományos autóiipari architektúrákról az Ipar 4.0 által inspirált megközelítésekre való áttérés alapvetően megváltoztatja a jármű-alrendszerek közötti kapcsolatot [2, 3]. A korlátozott interakciójú, silókban működő komponensektől a közös információs teret megosztó integrált rendszerek felé történő elmozdulás lehetővé teszi a kifinomultabb vezérlési stratégiákat és a gyorsabb alkalmazkodást a változó körülményekhez.

Az Ipar 5.0 mesterséges intelligencia képességeinek beépítése tovább javítja ezeket a rendszereket, lehetővé téve számukra komplex mintázatok felismerését, jövőbeli állapotok előrejelzését és a működési tapasztalatok révén történő folyamatos fejlődést [1].

Számos ígéretes kutatási irány rajzolódik ki az autonóm hajtásrendszerek és a fejlett ipari technológiák metszéspontjában. A szabályalapú biztonsági garanciákat a tanulásalapú alkalmazkodóképességgel ötvöző hibrid döntési architektúrák fejlesztése kritikus területet jelent a további vizsgálatokhoz. Az autonóm rendszerek ellenőrzésére szolgáló szabványosított keretrendszerek létrehozása, amelyek képesek kezelni az emergens viselkedésű MI komponenseket, egy másik jelentős kihívást jelent. A föderált tanulásban rejlő lehetőségek feltárása a járműflották között, miközben megőrizzük az adatvédelmet és a biztonságot, szintén jelentős lehetőségeket kínál a rendszerfejlesztés felgyorsítására.

A jelenlegi rendszereknek ezen fejlett architektúrák felé történő átmenetének implementációs szempontjai gondos figyelmet igényelnek. A meglévő járműrendszerekkel való visszamenőleges kompatibilitás, az inkrementális telepítési stratégiák és a biztonságot megőrző, miközben a képességeket növelő migrációs útvonalak mind további fejlesztést igényelnek. Ezen egyre inkább összekapcsolt és szoftveresen definiált rendszerek biztonsági szempontjait alapvető architektúrális szintekről kell kezelni, nem pedig utólagos gondolatként.

A folyamatos kutatást igénylő nyitott kihívások közé tartozik a megfelelő bizalmi modellek létrehozása az MI-vezérelt autonóm rendszerek számára, a folyamatos tanulást és alkalmazkodást befogadó szabályozási keretek kidolgozása, valamint hatékony ember-gép-interfészek létrehozása ezekhez az egyre képesséesebb járművekhez [7]. Ezenkívül a gyártók közötti autonóm rendszerkommunikáció közös szabványainak és protokolljainak létrehozása elengedhetetlen lépés az olyan közlekedési ökoszisztémák felé, ahol a különböző fejlesztőktől származó járművek biztonságosan kölcsönhatásba léphetnek [6].

Az autonóm hajtásirányítási rendszerek és az Ipar 4.0 és 5.0 technológiák konvergenciája példátlan lehetőségeket teremt a járműautomatizálás előmozdítására [1, 2, 3]. A jelenlegi korlátok kezelésével a kifinomult összekapcsolhatóság, az elosztott intelligencia és a fejlett mesterséges intelligencia révén ezek az integrált megközelítések kikövezik az utat a biztonságosabb, hatékonyabb és képesséesebb autonóm járművek felé.

[1] Verstina, Natalia–Yashwant Singh Bisht–Pranav, Kumar Prabhakar–Rishabh, Aroora–Sudipta K.–Mishra, N. Rajasekhar (2024): AI and Autonomous Systems: An Experiment in Industry 5.0 Transformation. *BIO Web Conf.*

[2] Raivo, Sell–Anton, Rassõlkin–Ruxin, Wang–Tauno, Otto (2019): Integration of autonomous vehicles and Industry 4.0. *Central European Journal of Engineering. Springer, 4., (2.), pp. 186–191.*

[3] Mourtzis, D.–Angelopoulos, J.–Panopoulos, N. (2022): *Industry 4.0 and smart manufacturing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

[6] Kardos K.–Péntek L. Z. (2019): Gépjármű-kommunikációs hálózatok. *Automotive communication networks.*

[7] Sheridan, T. B. (2016): Human-robot interaction: Status and challenges. *Human Factors, 58., (4.), pp. 525–532.*