

■ Egyensúlyozás az egyéni célok és a hálózat egészének hatékonysága között

Mesterséges intelligencia alkalmazása a közúti közlekedésben

Napjainkban óriási figyelmet kap a mesterséges intelligencia (MI) fejlődése és térnyerése. Szinte nincs olyan mérnöki terület, ahol ne volna jelen ez a technológia, amelynek célja általában az optimalizáció, a biztonság növelése és a robusztus működés. Nincs ez másképpen a közúti közlekedési szektorban sem.

nöki területen a forgalomszimuláció tud segíteni az adatok előállításában. Az olyan forgalomszimulációs eszközök, mint pl. a Simulation of Urban MObility (SUMO), mikro-, mezo- és makroszkopikus szinten is képesek a forgalom modellezésére. Jól behangolt szimuláción keresztül a mérnökök képesek pontos eredményeket ki nyerni egy egész autópályáról, vagy akár egy városi szintű úthálózat működéséről is. Ezen eredmények szintetikus adatokat is nyújtanak mind a járművek, mind a hálózat szintjén, amelyek ezáltal a mesterséges intelligencia tanítására és validálására is alkalmazhatók. Többcélú optimalizációs célok elérése érdekében pedig olyan fontos információkra lehet szükségünk, mint a járművek/útszakaszok emissziója, baleseti kockázata, és természetesen a forgalom alapvető paraméterei (pl. forgalomsűrűség, átlagsebesség, várakozási idő). Ezek az információk a szimulátorokból mind ki nyerhetők. A digitális iker technológia – amely során a virtuális leképezés a lehető legnagyobb mértékben fedi a fizikai járművek paramétereit – szintén növeli a szimulációs adatok pontosságát.

A koszmulációs megoldások (több specifikus szimulátor együttes használata) segítségével nagyon pontos környezetet tudunk létrehozni az MI-megoldások fejlesztésére. Játékmotorok (pl. Unity 3D, Unreal Engine) alkalmazásával komplex városi környezetek is pontosan felépíthetők, nagyon nagy részletességgel. Ezek pedig további fontos információkat nyújthatnak az MI-alapú megoldások számára.

A szimuláció további előnye, hogy költséghatékony és biztonságos, továbbá a gyalogosok és mikromobilitási eszközök hatásait is figyelembe vehetjük vele. A részletes forgalomszimuláció segítségével csúcstechnológias megoldások fejleszthetők, melyek a valóságban is telepíthetővé válnak.

A szimulációk mellett természetesen valós adatokra is szükség van. Ezeket összegyűjthetjük klasszikus mérőeszközök-



Komplex kereszteződés

Molnár Attila

Az MI-vel jelentős eredmények érhetők el a forgalom érzékelése, előrebecslése, vagy akár a forgalomirányítás területén is. Ráadásul a mesterséges intelligencia alkalmazásának támogatására ma már olyan technológiák állnak a mérnökök rendelkezésére, mint a digitális iker modellezés, a többszintű koszmulációs rendszerek, valamint a V2X („vehicle-to-everything” jármű-kommunikáció). Ezek segítségével az

MI-alapú megoldások gyorsan fejleszthetők, tesztelhetők és validálhatók is egyben.

Szimuláció, digitális iker, adatok

Az MI-alapú megoldások fejlesztésének egyik alapvető követelménye a nagy mennyiségű adat rendelkezésre állása. Nem elég, hogy óriási adatmennyiség szükséges egy stabilan működő, MI-alapú megoldás tanítására, de az adatok minősége is rendkívül fontos. A közlekedésmér-



Komplex városi hálózat leképezése SUMO forgalomszimulációs szoftverben

ből (pl. úttestbe épített detektorok, kamerák stb.), vagy navigációs rendszerekből is, de akár a mobiltelefon-hálózati (aggregált) adatok is nagyon hasznosak lehetnek a közlekedési áramlatok meghatározásához. A mért adatok közvetlenül is alkalmazhatók MI-alapú forgalmi becslésre/előrejelzésre, de természetesen a simulációk behangolásához is szükségesek.

Városi jelzőlámpás forgalomirányítás MI-vel

Az MI alkalmazhatósága a jelzőlámpás forgalomirányítás szintjén is megjelenik. Számtalan szakcikk értekezik különböző MI-alapú jelzőlámpás megoldásokról, de mára szakterület vállalatai is a fizikai megvalósítás kapujában vannak. Az MI-alapú jelzőlámpa-irányítás legújabb nemzetközi kutatásai és ipari fejlesztései túlnyomórészt a megerősítési tanulásra (reinforcement learning) épülnek, amely képes valós időben alkalmazkodni a dinamikus változó forgalmi mintákhoz.

A legkorszerűbb megközelítések már nemcsak izolált kereszteződésekben gondolkodnak, hanem hálózati szintű, koordinált, többágenses (multi-agent RL) rendszereket alkalmaznak a városi folyosók áteresztőképességének maximalizálására.

A technológiai élvonalat képviselő megoldások egyre nagyobb arányban integrálják a jármű-infrastruktúra (V2X) kommunikációjából származó adatokat és a pályamenti szenzorok (kamerák, LiDAR) fúzióját a pontosabb környezetérzékelés érdekében. A legfrissebb paradigmaváltás a fizika- és szabályalapú kényszerek beépítése, amelyek garantálják, hogy a mély neurális

hálók döntései soha ne sérthessék meg a merev közlekedésbiztonsági előírásokat.

Az alkalmazhatósági korlátot jelenleg leginkább még a skálázhatósági problémák és a transzfer tanulás kérdései jelentik: hogyan lehet általános megoldást adni különböző típusú csomópontokra, hogyan lehetne gyorsan bárhol alkalmazni egy adott, feltanított AI-motort, amely előre betanított, általános alapmodelleket finomhangol az egyedi kereszteződések geometriájára és forgalmi dinamikájára, radikálisan csökkentve a mérnökórákat.

Útvonalválasztás többcélú optimalizáció segítségével

Az optimális útvonalválasztás a jövő autonóm közlekedésének is kiemelt kérdése, ahol valamilyen társadalmi kompromiszumra kell törekedni. Azaz, hogyan választhat meg az autonóm járművek az útvonalait úgy, hogy az ne csak az egyéni érdeket (gyakorlatilag a legrövidebb út), de egyfajta szociális optimumot is kövessenek.

Az MI alkalmazása ebben a kérdéskörben is kézenfekvő megoldást jelent a mérnökök számára. A jövő forgalomirányítása olyan komplex szemléletmódot alkalmazhat, amely egyszerre veszi figyelembe az autósok egyéni céljait és a közösség érdekeit – például a torlódások csökkentését vagy a városi hálózat emissziós terhelhetőségét. Fontos cél lehet tehát a teljes közlekedési rendszer gördülékenységének biztosítása, ahol minden egyes autó egyfajta önálló, „tanuló” ügynökként (pl. mélytanulási megerősítési tanulási algoritmus alkalmazásával) folyamatosan figyeli a környezetét, és korábbi tapasztalatai alapján

finomhangolja mozgását. Ebben a megközelítésben az egyéni célok és a hálózat egészének hatékonysága közötti egyensúlyozás a rendszer kulcsa. Amikor az algoritmus dönt, nem csupán az adott jármű számára keresi a leggyorsabb utat, hanem „megtanulja” azt is, hogyan járulhat hozzá a városi forgalom torlódásának csökkentéséhez. Így válik egyetlen autó önálló mozgása a teljes forgalmi áramlás szerves, segítő részévé, kiszámíthatóbbá és gördülékenyebbé téve az utazást mindenki számára. A kutatási eredmények azt mutatják meg, hogy a tradicionális „legrövidebb út”-megközelítéssel szemben az MI képes jelentősen jobb eredményeket elérni, különösen a szociális alapú megközelítés során.

Ha a járművek beszélni tudnának

Felmerülhet a kérdés, hogyan tudjuk a rengeteg szükséges információt a gyakorlatban, valós időben összegyűjteni. A problémára a V2X vezeték nélküli járműkommunikációs technológia alkalmazása tud hatékony választ adni. A V2X technológia lehetőséget nyújt arra, hogy a járművek képesek legyenek egymással és az infrastruktúrával szabványos és biztonságos módon „beszélgetni”. A legfrissebb ún. C-V2X (cellular vehicle-to-everything) technológia segítségével a mobilhálózaton keresztül is összekapcsolható a kommunikáció a forgalom résztvevői között, így a gyalogosok, kerékpárosok, de akár a mikromobilitási eszközök (pl. elektromos roller) is bekapcsolódhatnak az információk megosztásába. A mobilhálózat segítségével a teljes városi környezet lefedhető, így az ágensek valós időben tájékozódhatnak a forgalom aktuális állapotáról. A V2X emellett lehetővé teszi a biztonsági kritikus adatok alacsony késleltetésű cseréjét, ami nélkülözhetetlen az autonóm járművek döntéshozatali folyamataiban és a hálózati szintű optimalizációban. A V2X technológia közeljövőbeli felfutása az MI-alapú forgalomirányítás fontos eleme lesz, hiszen a több és pontosabb adat a nagyobb hatékonyságot segíti majd.

Kontextusalapú megoldások, avagy mit tartogat a jövő?

A közlekedésirányítás következő nagy ugrását a nagy méretű nyelvi modellek (LLM – large language model) integrációja ígéri.



Koszimuláció forgalomszimulátor (SUMO) és Unity 3D játékmotor között

ri. Míg a jelenlegi megerősítéses tanulási algoritmusok – mint a DDPG (deep deterministic policy gradient) vagy a MAPPO (multi-agent proximal policy optimization) – kiválóan teljesítenek numerikus optimalizációs feladatokban, az LLM-ek képessége a komplex, szemantikus kontextus megértésére teljesen új dimenziót nyithat.

Egy LLM-alapú forgalomirányító rendszer például képes lehet egyszer „elolvasni” és értelmezni a városi forgalomhoz kapcsolódó, nem strukturált adatokat is: például híreket útlezárásokról, időjárás-előrejelzéseket, vagy akár a közösségi médiában megjelenő, forgalmat érintő bejegyzéseket. Míg egy hagyományos algoritmus csak a forgalom változására reagál, egy LLM megértheti az események kiváltó okát, és proaktívan javasolhat forgalomszervezési módosításokat még azelőtt, hogy a dugó kialakulna.

Bár a technológia ígéretes, számos akadály áll a széles körű bevezetés előtt. Az LLM-ek futtatása rendkívül erőforrás-igényes. A felhőalapú (cloud) feldolgozás helyett elengedhetetlen lenne az „edge computing” (peremhálózati számítás) fejlesztése, ahol a modell lokálisan, a kereszteződés közelében fut. Továbbá kritikus kérdés a robusztusság: az LLM-ek „hallucinációs” hajlama jelenleg elfogadhatatlan kockázatot jelentene egy forgalomirányító rendszerben, így a jelen kutatások a modell kimenetének szigorú matematikai korlátozására (hard-constrained output) is irányulnak.

A jövő útja tehát egy olyan hibrid rendszer lehet, ahol az LLM a stratégiai döntéshozatalért és kontextusértékelésért felel, míg a biztonsági és taktikai műveleteket továbbra is robusztus, megerősítéses tanuláson alapuló algoritmusok végzik.

Közlekedési MI-fejlesztés

A Lillyneir Kft. részt vesz az M1-es autópályája Budapest és Győr közötti szakaszának fejlesztésében, ahol a sávok számának bővítésén túl a high-tech ITS-infrastruktúra tervezését és kivitelezését vezeti az ország legterheltebb tranzitfolyosóján. A háromsávú kiépítés mellett a negyedik, dinamikusan nyitható/zárható ún. ITS-sáv alkalmazása kiváló példája a modern, hardveres és szoftveres elemeket ötvöző aktív forgalommenedzsmentnek. Ez a megoldás – amelyet külföldön gyakran „hard shoulder running” néven ismernek – lehetővé teszi, hogy csúcsidőszakokban vagy incidensek esetén a leállósávot ideiglenesen forgalmi sávvá alakítsák, ezáltal rugalmasan növelve az út kapacitását. Ennek a fejlesztésnek a részeként digitális iker megoldás kialakítására is sor kerül, amely a teljes rendszert letükrözi az irányítórendszerből a valós forgalmi méréseken alapuló forgalommodellezésig. A rendszer biztonságos működtetéséhez persze elengedhetetlen a sűrűn telepített, megbízható szenzorhálózat, a precíz forgalomdetektálás, a baleseti kockázatokat elemző szoftveres háttér, valamint a járművezetők egyértelmű tájékoz-

tatását szolgáló, változtatható jelzésképű táblák összehangolt irányítása. Ebben a komplex rendszerben is megjelenik természetesen az AI – az automatikus incidensfelismeréstől kezdve a forgalmi előrebecslésen át egészen a forgalomirányítási beavatkozások támogatásáig.

A fenti mellett cégünk egy DIMOP PLUSZ k+f-projektet is vezet „Mesterséges intelligencia alapú, valós idejű komplex közlekedésirányítási rendszer fejlesztése” címmel. A projekt célja egy olyan MI-alapú, moduláris közlekedésmenedzsmentrendszer fejlesztése, amely valós idejű adatokra építve teszi lehetővé a proaktív, adatvezérelt beavatkozásokat a városi közlekedésirányításban. A megoldás nemcsak a közlekedési infrastruktúra teljesítményének értékelését és az események automatikus felismerését teszi lehetővé, hanem aktívan be is avatkozik a közlekedési folyamatokba. A projekt kulcseleme egy gyártófüggetlen, middleware-re épülő adatplatform, amely képes többféle, különböző típusú és gyártótól származó szenzoradatot egységes szerkezetben kezelni. A platform strukturált tárolást, folyamatos előfeldolgozást és API-alapú szolgáltatásokat biztosít a forgalomirányító rendszerek, városi operatív központok és egyéb szoftvermodulok számára. A fejlesztés során külön figyelmet fordítunk arra, hogy a rendszer nyílt interfészekkel illeszthető legyen a meglévő közlekedési infrastruktúrákhoz.