

Közúti mérések
Eszközök és módszerek a közúti járműforgalom
megfigyelésére

Tettamanti Tamás – Varga István – Csikós Alfréd

Közúti mérések

Eszközök és módszerek a közúti járműforgalom
megfigyelésére



A könyv kiadását a BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kara támogatja.



© Tettamanti Tamás, Varga István, Csikós Alfréd, Typotex, Budapest, 2016
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Horváth Márton Tamás

ISBN 978-963-279-916-2

Témakör: *műszaki tudományok*

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!

Újabb kiadványainkról, akcióinkról

a www.typotex.hu és a [facebook.com/typotexkiado](https://www.facebook.com/typotexkiado)

oldalakon értesülhet.



Kiadja a Typotex Elektronikus Kiadó Kft.

Felelős vezető: Votisky Zsuzsa

Főszerkesztő: Horváth Balázs

Műszaki szerkesztő: Csépany Gergely

Borítóterv: Szalay Éva

Készült a Multiszolg Bt. nyomdájában

Felelős vezető: Kajtor Bálint

Tartalomjegyzék

Előszó	9
1. A közúti forgalmi adatgyűjtésből származó adatok felhasználása	11
1.1. A közúti forgalomirányítás és a mérés kapcsolata	12
1.2. Távfelügyeleti rendszerek és forgalomirányító központok . .	13
1.3. Autópálya-forgalomirányítás	14
1.4. Belvárosi torlódást csökkentő „dugódíj” rendszer	15
1.5. Közlekedésmodellezés és forgalmi előrejelzés	15
1.6. A járművek és a közlekedés fejlődési iránya	16
2. Statisztikai és kapcsolódó alapismeretek a közúti mérésekhez	19
2.1. Adatábrázolási módszerek	20
2.1.1. Térképes megjelenítés	20
2.1.2. Hisztogram	21
2.1.3. Doboz-diagram	23
2.1.4. Pontdiagram	26
2.1.5. Idősor-adatok vonaldiagramos ábrázolása	26
2.2. Statisztikai alapfogalmak	29
2.2.1. Mérési skálák	29
2.2.2. A középértékek	30
2.2.3. A szóródás mértékei	32
2.2.4. Kétváltozós statisztikai összefüggés-vizsgálatok . .	34
2.2.5. Gyakoribb diszkrét valószínűségi eloszlások	37
2.2.6. Gyakoribb folytonos valószínűségi eloszlások	42
2.2.7. χ^2 -próba a feltételezett valószínűségi eloszlás jósa- gának vizsgálatához	52
2.2.8. Magsűrűség-becslési eljárás	57
2.3. A közúti mérési adatok hibái és a pontosság	60
2.3.1. Hibatípusok	60
2.3.2. Igaz érték és elfogadott referenciaérték	61

6 *Tartalomjegyzék*

2.3.3.	A mérési hibák leggyakoribb okai	62
2.3.4.	Pontosság	63
3.	A közúti járműforgalmat jellemző paraméterek mérése és számítása	65
3.1.	A közúti forgalom makroszkopikus tér-idő alapú leírása . . .	66
3.2.	Általánosított forgalmi változók és forgalmi performanciák .	69
3.3.	A közúti forgalmi adatgyűjtés időbeli és térbeli csoportosítása	73
3.4.	Járműforgalom statikus mérése	75
3.4.1.	Statikus mérés egy keresztmetszetben	75
3.4.2.	Mérés egymáshoz közeli, két keresztmetszetben . . .	76
3.4.3.	Mérés hosszabb szakaszon	80
3.4.4.	Az adatgyűjtés mintavételi ideje és a számítási időalap	81
3.5.	Járműforgalom dinamikus mérése	83
3.5.1.	Egyszerű dinamikus mérés	83
3.5.2.	Összetett dinamikus mérés	83
3.6.	Átlagos forgalomnagyság-mennyiségek statisztikai és tervezési célokra	85
3.7.	A közúti járműforgalom károsanyag-kibocsátását jellemző paraméterek	92
3.7.1.	Járműkibocsátási modellek	93
3.7.2.	Kibocsátási függvényt megadó modellek és a szükséges járműdinamikai változók	93
3.7.3.	A forgalmi kibocsátás makroszkopikus tér-idő alapú leírása átlagsebesség-alapú modellek segítségével . .	95
3.7.4.	A forgalmi kibocsátás imissziójának jellemzése a szennyezés terjedésének dinamikus modellezésével	99
3.8.	A közúti járműforgalom által okozott zajterhelés	106
4.	Klasszikus járműérzékelés	113
4.1.	Útpályába épített járműérzékelők	114
4.1.1.	Induktív hurokdetektor – elektromágneses elven alapuló érzékelés	114
4.1.2.	Földmágnesességen alapuló járműérzékelés	120
4.1.3.	Pneumatikus elven működő járműérzékelés	122
4.1.4.	Piezoelektromos járműérzékelés	126
4.2.	Út menti (nem útpályába épített) járműérzékelők	128
4.2.1.	Kamerás képfeldolgozáson alapuló járműérzékelők .	128

4.2.2.	Fénymegszakításon alapuló érzékelés	130
4.2.3.	Infravörös járműérzékelők	131
4.2.4.	Ultrahangos detektorok	136
4.2.5.	Radar- és lézervivű járműérzékelés	140
4.3.	Közösségi közlekedési (tömegközlekedési) járművek érzékelése	144
4.3.1.	Tömegközlekedési járművek érzékelési technológiái	144
4.3.2.	Tömegközlekedési járművek érzékelése előnybiztosítás céljából	145
4.4.	Tengelysúlymérés	150
4.4.1.	Tengelysúlymérő rendszerek csoportosítása	151
4.4.2.	Statikus tengelysúlymérés és kis sebességű WIM	154
4.4.3.	Nagy sebességű WIM	155
5.	Alternatív járműérzékelés	159
5.1.	Floating Car Data (FCD)	160
5.2.	Flottamenedzsment rendszerekből származó FCD	162
5.3.	Mobiltelefon-alapú FCD	163
5.4.	Bluetooth-alapú mérés	166
5.5.	Okos menetíró készülék	168
6.	Hatékony becslési módszerek a közúti mérésekhez	171
6.1.	Simítás, szűrés, előrebecslés a mérések javítására	172
6.2.	Mozgóátlag-módszerek	175
6.3.	Legkisebb négyzetek módszere függvényillesztéshez	178
6.4.	Legkisebb négyzetek módszerén alapuló rekurzív szűrő	188
6.5.	Kalman-szűrő	199
6.6.	Kalman-szűrő alkalmazása szenzorfüzióhoz	220
6.7.	Kapcsolt Kalman-szűrő alkalmazása szenzorfüzióhoz	222
6.8.	Kiterjesztett Kalman-szűrő	227
6.9.	Mozgó időhorizontú becslés	236
6.10.	Mintafelismerés-alapú becslés	245
6.10.1.	Mesterséges neurális hálózatok	246
6.10.2.	Neurális hálózatok alkalmazása közlekedési állapotok becslésére	250
6.11.	Automatikus incidensfelismerés autópályán	259
6.11.1.	Az algoritmusok hatékonyságát leíró mérőszámok	259
6.11.2.	Incidensfelismerő algoritmusok típusai	261

8 *Tartalomjegyzék*

6.11.3. Az összehasonlító vagy mintafelismerő algoritmusok 262
6.11.4. Statisztikai vagy idősor alapú algoritmusok 263
6.11.5. Modell alapú algoritmusok 266
6.11.6. Mesterséges intelligenciát alkalmazó algoritmusok . 267

A. Függelék 271

A.1. A χ^2 -táblázat, azaz a χ^2 -eloszlás nevezetes értékei 272
A.2. Az LS-függvény illesztés Matlab-kódja (6.3. fejezet példája) 273
A.3. Rekurzív LS-szűrő Excelben (6.4. fejezet példája) 275
A.4. A Kalman-szűrő Matlab-kódja (6.5. fejezet 2. példája) . . . 277
A.5. A kiterjesztett Kalman-szűrő Matlab-kódja (6.8. fejezet példája) 278
A.6. A mozgó horizontú becslés Matlab-kódja (6.9. fejezet példája) 280

Irodalomjegyzék 285

Előszó

Az emberi természet fontos eleme a térben és időben kötetlen, szabad mozgás lehetősége. Az utazásaink közül talán a legjelentősebb a közúti közlekedés, amely mindannyiunkat körülvesz és életünk szerves részét képezi. Az elmúlt évszázadokban a közúti járműforgalom olyan jelentős mértékben nőtt, hogy szükségessé vált azt szabályoznunk. Ahhoz, hogy biztonságos, hatékony, környezetkímélő forgalomirányítást valósítsunk meg, szükséges a járművek pontos, aktuális térbeli-időbeli mozgását is ismernünk. Az előző „Forgalomirányítás” c. szakkönyvünkben [46] a közúti járműforgalom modellezésével és irányításával foglalkoztunk részletesen. Már abban a könyvünkben is röviden kitértünk a közúti mérések főbb jellemzőire, de e téma mérete miatt ezt a területet a jelen könyvben részletezzük. A kötet megírásához a szakmai törzsanyag sokéves oktatási, kutatási, ill. szakértői munkáink eredményeképpen áll elő. Tulajdonképpen szakmai tapasztalatainkat szeretnénk most egy megfelelően rendezett formában átadni az olvasóközönségnek.

A közúti közlekedési mérések technológiája – mint ahogy a közlekedésmérnöki munka maga is – egy jellemzően interdiszciplináris téma: átfogó ismereteket igényel az alapvető matematikai statisztikától a klasszikus elektrotechnikai mérés technológián át a korszerű irányítástechnikában alkalmazott becslési módszerekig. Ennek megfelelően egy sokrétű, ugyanakkor kifejezetten a közúti közlekedés mérésével kapcsolatos anyagot készítettünk. Könyvünket egyfajta hiánypótlásnak szánjuk a magyar mérnöki szakirodalom számára: egyrészt „közutas” mérési szakkönyvként, másrészt a hazai közlekedés- és járműmérnökök oktatását segítő tananyagként.

A könyvíráshoz nyújtott segítségéért és alapos lektorálási munkájáért külön köszönet illeti Horváth Márton Tamás kollégánkat. Továbbá köszönjük Nagy Zoltán kollégánknak a statisztikai fejezetekhez fűzött hasznos megjegyzéseit.

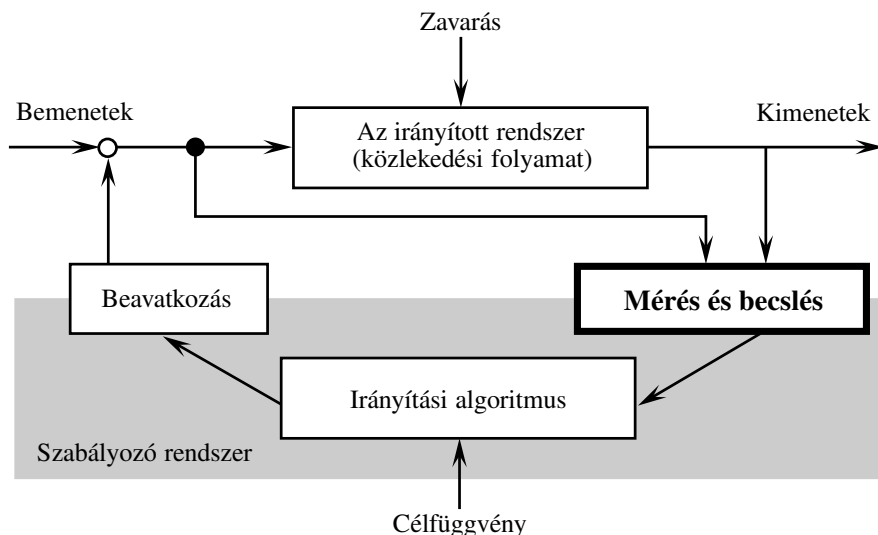
1

A közúti forgalmi adatgyűjtésből származó adatok felhasználása

A forgalmi adatgyűjtésből származó mérések, valamint a mérésekből előállított, számított vagy becsült forgalomtechnikai paraméterek felhasználásának számtalan variációja létezik. Ebben a bevezető fejezetben egyrészt rámutatunk a forgalomirányítás és a mérések kapcsolatára, másrészt példaként felsoroljuk a legjellemzőbb közlekedésmérnöki alkalmazásokat és az azokhoz szükséges adattípusokat. Az alábbiakban ismertetett esetek jól reprezentálják a közúti mérések gyakorlati szükségességét, de természetesen a forgalmi adatoknak ezen kívül még számos felhasználási formái lehetnek.

1.1. A közúti forgalomirányítás és a mérés kapcsolata

Egy általános közúti közlekedési irányítórendszer felépítését és a mérésekkel való kapcsolatát mutatja be az 1.1. ábra. Jól látható, hogy a szabályozó rendszer (az ábrán szürke színnel jelzett terület) működésének szerves részét képezi a közlekedési folyamatok megismerése, tehát a megfelelő forgalomtechnikai paraméterek mérése és szükség szerinti becslése. Természetesen csak ezután következhet az irányítási stratégiának megfelelő szabályozási algoritmus lefutása. Az utolsó lépés pedig a beavatkozás, amely a rendszer adottságaitól függően többféleképpen történhet (pl. jelzőlámpás irányítás). A



1.1. ábra. A közúti közlekedési folyamat általános szabályozórendszere

közúti közlekedés jellege más a gyorsforgalmi utakon és más a városi közlekedésben. Az egyes területek irányító rendszereiben mások a célok és mások a beavatkozási lehetőségek is. Ezért ezek irányításában és mérési technológiájában ugyan gyakran alkalmazunk azonos módszereket, de egyes feladatok eltérő eszközök alkalmazását is igényelhetik.

Az általában túlszűfolt városi forgalom irányítása az egyik legnagyobb kihívás. A városokban leggyakrabban a bonyolult és összetett úthálózatok a jellemzőek, ugyanakkor itt kis területre nagy járműforgalom koncentrálódik. A dinamikus beavatkozás hatékonysága szempontjából még mindig a jelzőlámpa bizonyul a legjobbnak, hiszen annak jelzéseképeit a járművezetőknek

kötelező betartani. A megfelelő forgalomfüggő, városi forgalomirányítás kialakításához természetesen szükséges a forgalmi adatok folyamatos és időszakos mérése, ill. becslése.

Ma már a gyorsforgalmi utak forgalomirányítása is kiemelten fontosá vált, különösen a városi bevezető szakaszokon. Az autópályák leggyakrabban használt eszköze a változtatható jelzéseképű táblák alkalmazása, de természetesen előretörőben van a különböző járműfedélzeti rendszereken keresztül történő forgalombefolyásolás is. Nyilvánvaló, hogy a közúti mérés ez esetben is alapvető szerepet játszik.

Külön meg kell említeni a közösségi közlekedési járművek irányítását és detektálását, amely során – a klasszikus menetirányítás feladatai mellett – valamilyen fajta előny biztosítása a cél a buszok és a villamosok minél zavartalanabb közlekedtetése érdekében. Az előnybiztosítási folyamatban egyrészt elsőrendű a dedikált jármű pozíciójának ismerete. Másrészt – hatékony forgalomirányítás esetén – a jármű környezetének forgalmi ismerete is fontos paraméter. Így elmondható, hogy a közúti forgalom mérése vagy becslése ezen a területen is elengedhetetlen.

1.2. Távfelügyeleti rendszerek és forgalomirányító központok

A közúti jelzőlámpás irányításhoz szorosan kapcsolódnak az ún. távfelügyeleti rendszerek, amelyeket alapvetően a forgalomirányító berendezések állapotának automatikus monitorozására használnak (pl. berendezéshiba, jelzőlámpaizzó-kiégés felügyelete). A távfelügyeleti rendszerek az elmúlt évtizedben néhány egyéb funkcióval is kiegészültek, pl. kézi jelzőlámpa-program kapcsolása vagy forgalmi tendenciák vizsgálata hurokdetektoros mérések alapján. A távfelügyeleti szolgáltatásokon is túlmutatva a forgalomirányító központok már teljes mértékben egy hálózati irányítási koncepció megvalósítására hivatott rendszerek. Egy központ a funkciójától függően nagyon sokféle lehet. Egyrészt ez jelenthet csupán néhány szervert, amely optimálisan irányítja például egy kisváros néhány tíz csomópontból álló jelzőlámpás hálózatát. Más esetben a szerverek mellett egy diszpécserszoba is működik, ahol például a valós idejű forgalomfigyelő kamera képeit lehet monitorozni. A lehetőségek persze határtalanok, hiszen egy fejlett forgalomirányító központ komplett városok hálózati irányítását is megvalósíthatja, magába foglalva a közösségi közlekedési rendszer előnyben részesítési feladatait vagy egyéb utazói információs szolgáltatások ellátását. A fentiek alapján látha-

tó, hogy mindkét rendszer számára elengedhetetlen a megfelelő „online” és „offline” forgalmi mérés. Főleg, hogy a forgalomirányító központok célja a forgalomfüggő („traffic responsive control”), optimális irányítás megvalósítása összetett matematikai optimalizáló algoritmusok mentén. Ehhez pedig gyakorlatilag minden mérési adat szükséges. A szolgáltatási színvonalat ugyanis jellemzően a mért és becsült forgalomtechnikai paraméterek mennyiségének és minőségének kombinációja biztosítja.

1.3. Autópálya-forgalomirányítás

Természetesen az autópályák esetében is szóba jönnek forgalomirányító központok, amelyek feladatai és céljai nagyjából azonosak az előző fejezetben leírtakkal, csupán az alkalmazott eszközök különbözőek.

Autópálya-forgalomirányító rendszer esetén is minél több forgalmi mérés teszi lehetővé a minél magasabb szolgáltatási színvonalat. Néhány ilyen jellemző célt és a szükséges forgalomtechnikai paramétert gyűjtöttük össze az alábbi táblázatban.

Célok	Szükséges forgalmi paraméterek
változtatható jelzéseképű táblák alkalmazása útvonalajánlás, utazói információ nyújtása, dinamikus sebességhatárolás céljából	jellemzően kamerával, hurokdetektorral meghatározott célforgalmi adatok, utazási idő, forgalomnagyság, forgalomsűrűség
automatikus incidensdetektálás a torlódások minél gyorsabb felismerésére	hurokdetektoros méréssel meghatározott sebesség, forgalomnagyság, forgalomsűrűség-adatok
autópályakapacitás-növelés változtatható sebességhatárolással, változtatható irányú sávok alkalmazásával, felhajtáskorlátozással	
autópályadíj és tengelysúlyterhelés ellenőrzése	rendszámfelismerő kamerarendszerrel történő járműazonosítás és útpályába épített érzékelőkkel történő tengelysúlymérés

1.1. táblázat. Célok és forgalmi paraméterek összerendelése

1.4. Belvárosi torlódást csökkentő „dugódíj” rendszer

A nagyvárosok egyes területeinek (tipikusan belváros) sűrű közúti forgalma rendszeres forgalmi torlódásokat okoz a világ minden táján. Ez a jellemző folyamat ráadásul fokozódó tendenciát mutat a városok méretének és ezzel együtt a mobilitási igény növekedése miatt. A probléma részleges kezeléseként számos nagyvárosban alkalmaznak behajtási díjat („dugódíjat”), pl. London, Milánó, Szingapúr. A díjalapú szabályozás célja tulajdonképpen a közlekedési igények befolyásolása – azok teljes körű kielégítése helyett.

Az ilyen rendszerek megtervezése, fenntartása, valamint szükség szerinti módosítása egyaránt megfelelő mennyiségű historikus, ill. valós idejű forgalmi adatot igényel. Elsőként a védendő zónák meghatározásához szükséges minimálisan: célforgalmi mátrix, jellemző utazási idő adat, ill. releváns forgalomnagyság (igény) adatok. Ezeket jellemzően kamerás és hurokdetektoros mérésekkel állítják elő, amelyeket kikérdezésen alapuló statisztikai adatokkal is kiegészítenek. A már kiépített rendszer pedig rendszámfelismerő kamerákon alapuló, folyamatos ellenőrzéssel üzemel. Egy „dugódíj” rendszer bevezetése után azonban számolni kell a forgalmi igények és folyamatok átrendeződésével, aminek következtében lehetséges, hogy a meglévő zónák módosítása vagy újabb védendő zónák kijelölése szükséges. Ehhez természetesen ugyanazon forgalmi adatok folyamatos feldolgozását kell elvégezni, amelyet a rendszer tervezésekor is használnak.

1.5. Közlekedésmodellezés és forgalmi előrejelzés

A forgalommodellezés a korszerű közlekedésmérnöki munka egyik alapvető tevékenysége. A ma már kielégítően gyors számítási kapacitással dolgozó, korszerű szimulációs szoftvereknek köszönhetően elmondható, hogy a forgalommodellezés gyakorlatilag bármilyen közlekedésfejlesztési projekt szerves része; legyen az előzetes hatástanulmány, fejlesztés, hatáselemzés vagy felülvizsgálat. Alapvetően makro- és mikroszkopikus modellezést különböztethetünk meg. Az előbbivel a forgalom egészének vizsgálatát lehet elvégezni, akár egy egész országra vonatkozóan is. Utóbbi pedig a forgalom dinamikájának részletes szimulációjára alkalmas, jellemzően néhány összefüggő csomópont vagy akár adott városrészek vizsgálatához.

A forgalmi modellezéshez (legyen az mikro- vagy makroszkopikus) a forgalmi igények, jellemzően a célforgalmi mátrix („Origin-Destination”: OD-mátrix) ismerete szükséges. Ennek meghatározása kikérdezéses és egyéb statisztikai módszerrel, hurokdetektoros mérésekkel, ill. rendszámfelisme-

rő kamerarendszerrel történhet, továbbá egy korszerű lehetőségként adódik a mobiltelefon cellainformációinak felhasználása is. Mindemellett a modellezés egyre inkább elérhető alapinformációja ma már az FCD-adat (Floating Car Data), pl. útszakaszok pontos utazási idejének meghatározásához. Az FCD-információk jellemzően közösségi közlekedési járművekből, taxi- vagy egyéb járműflottákból származhatnak.

A közlekedésmodellezés egy érdekes felhasználási formája a rövid és hosszú távú forgalmi előrejelzés a meglévő historikus és valós idejű forgalmi adatok alapján. Megfelelő becslési algoritmusok alkalmazásával például akár megbecsülhetők a hálózatban kialakuló torlódások, még azok megjelenése előtt.

Napjaink egy másik érdekes kutatási iránya a közlekedés kiszámíthatóságának vizsgálata. Barabási Albert-László – többek között – a mobiltelefonok mozgásának a megfigyelése alapján az emberek jövőbeli helyváltoztatásának becslhetőségét vizsgálja [10]. Az ilyen és hasonló kutatások is mind hozzájárulnak a közlekedési folyamatok alaposabb megértéséhez és tervezéséhez.

1.6. A járművek és a közlekedés fejlődési iránya

A közlekedési kutatások és alkalmazások jelenleg az intelligens közlekedési rendszerek (Intelligent Transport Systems: ITS) irányában bővülnek. Az ITS-rendszerekben megjelennek az intelligens közlekedési infrastruktúrák is, amelyek az intelligens funkciókkal felruházott vagy akár teljesen autonóm járművekkel közösen rendkívül bonyolult hálózatot hoznak létre.

A járművek és különösen a közúti gépjárművek fejlődése az elmúlt időszakban felgyorsult. A változás egyik kézzelfogható eredménye, hogy a gépjárművekben egyre több a számítástechnikai feldolgozóegység. Egy mai, átlagosnak nevezhető, középkategóriás gépkocsiban például 40–50 darab ECU (Electronic Control Unit), azaz gyakorlatilag miniszámítógép található. Ezek a jármű alapvető működtetésén (pl. motorvezérlés) túl, növelik a jármű biztonságát (pl. menetstabilizáló rendszer), segítik a járművezetőt (pl. gépjárművezetés-támogató rendszer), és nem utolsósorban emelik a vezető és az utasok komfortját az utazás során. Természetesen ezek az egységek is egyre intelligensebbé válnak, így egyre több funkció integrálódik bennük. Mindemellett a legtöbb mai új járműben már megjelenik valamilyen kommunikációs rendszer is, amely más járművekkel, vagy a környező infrastruktúrával képes kapcsolatot létesíteni. Ezek az ún. V2V (Vehicle to Vehicle, azaz jár-

művek közötti) és V2I (Vehicle to Infrastructure, azaz jármű és infrastruktúra közötti) kommunikációs technológiák.

A kifejezetten közlekedésspecifikus műszaki megoldások mellett ma már kulcsszerepet játszanak a közlekedő személyek által generált adatok is. Egyre több és részletesebb információ keletkezik az utazásokról, amelyeket egyelőre leginkább szeparáltan használnak fel. Ugyanakkor a közlekedésszervezés szempontjából óriási lehetőségek nyílnak meg ezen – ma már gyakran csak *big data* néven illetett – információk intelligens kiaknázásával. Például megfelelő adatfúziós eljárással a mindenhol érkező „adatmorzsákból” a jelenleginél sokkal pontosabb forgalmi modellezés és előrejelzés érhető el, továbbá a forgalmi igények befolyásolásával – és nem kényszerítésével – az adott közlekedési hálózatok kapacitáskihasználása is optimalizálható (pl. dinamikus útdíjrendszer).

Ezek a kutatások és fejlődési irányok várhatóan már a következő években jelentős hatással lesznek a közúti járműforgalom mérési technológiáira.