

Robusztus mérési és becslési eljárások

MTA doktori értekezés tézisei

Simon Gyula

2019

1. Bevezetés

Mérési és becslési eljárások széleskörű műszaki alkalmazhatóságának feltétele, hogy az eljárás ellenálló legyen az alkalmazási környezetben megjelenő zavarokra, az egyes eszközök meghibásodására, vagy akár a felhasználó által elkövetett esetleges hibákra. A robusztusság kifejezést a következőkben ezen általános értelmében fogom alkalmazni: robusztusnak tekintek egy mérőrendszert vagy mérési eljárást, ha az a külső zavarok, hatások ellenére helyes működést produkál, pontossága nem változik érdemben, továbbra is helyes eredményt szolgáltat. Az alábbi tézisekben felsorolt tudományos eredmények két tématerületen született robusztus mérési és becslési eljárásokat mutatnak be: az első tématerület modellparaméterek becsléséhez kapcsolódó új eljárásokat tartalmaz, míg a második tématerület keretében új pozícióbecslő eljárásokat mutatok be.

A tézisfüzet 2. fejezete a problémafelvetéseket és a kitűzött kutatási célokat vázolja. A 3. fejezetben bemutatom az önállóan elért tudományos eredményeimet. A 4. fejezetben a bemutatott eredmények lehetséges és megvalósult hasznosításait mutatom be.

2. Célkitűzések

Robusztus rendszeridentifikációs eljárások

A rendszeridentifikáció folyamatát a következő lépésekre szokás bontani ([1], [2]):

- a rendszer ki- és bemeneteinek megfigyelése,
- a rendszer modelljének meghatározása,
- a modell paramétereinek meghatározása a bemeneti és kimeneti jelek alapján,
- a rendszermodell verifikálása és értékelése.

A vizsgált rendszer bemenetére adandó gerjesztőjel tulajdonságait a rendszerről a priori szerzett ismeretek birtokában, figyelembe véve a rendszer és a mérőrendszer egyéb kényszereit, szükséges meghatározni [1], [2]. A gyakorlatban gerjesztőjelként leggyakrabban impulzus- vagy ugrásjelet, véletlen zajt, pseudo-véletlen bináris szekvenciákat, periodikus chirp jelet és multiszinuszos gerjesztéseket alkalmaznak [3]. Mivel rendszeridentifikációs eljárásokban a determinisztikus gerjesztőjelek általában kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a véletlen, zaj-jellegű gerjesztések [4], így a determinisztikus gerjesztések felhasználása igen széleskörű, melyet hatékony algoritmusok és felhasználásra kész eszközök, eszközkészletek támogatnak [5], [6].

Az alkalmasan megválasztott periodikus gerjesztőjelek előnye, hogy a szivárgás jelensége nem lép fel (így lehetővé válik a frekvenciaválasz függvény pontos mérése); a kívánt gerjesztési sáv pontosan beállítható (különösen a multiszinuszos gerjesztés esetén); valamint alacsony csúcstényező biztosítható, így a mérés során jó jel-zaj viszony érhető el [4]. Ezért a multiszinuszos gerjesztőjelek felhasználása rendszeridentifikáció céljára igen gyakori. Az irodalomban nagyon gyakran hivatkozott multiszinuszos gerjesztőjel a Schroeder-multiszinus [7], illetve ennek optimalizált változatai [8], [9].

Problémafelvetés, célkitűzés:

A hagyományos Schroeder-multiszinusok segítségével tervezett multiszinuszos gerjesztőjelek nemkívánatos tulajdonsága, hogy nem szakszerű felhasználás – nevezetesen a csonkolás, vagyis tört periódusok használata – esetén egyes frekvenciatartományok a vártnál lényegesen

kisebb teljesítménnyel gerjesztődhetnek, ami hátrányosan befolyásolja a mérés jel-zaj viszonyát, és eredőben az identifikációs eljárás pontosságát. A gerjesztőjel csonkolása eredhet abból, hogy a jó szándékú felhasználó a tervezett gerjesztőjelet két részre osztja identifikáció és verifikáció céljára, vagy akár a hosszú mérési folyamatot félbeszakítja. Céлом olyan tervezési eljárás kialakítása volt, amely a multiszinuszos gerjesztőjel csonkolásos felhasználásból eredő teljesítmény-veszteségét olyan alacsony szintre csökkenti, hogy annak már ne legyen érdemi hatása a mérési eljárásra.

A mért gerjesztőjelet és a rendszer mért válaszát számos esetben előfeldolgozásnak vetjük alá, ami frekvenciatartománybeli módszerek alkalmazása esetén a frekvenciatartományba való transzformációt, valamint a kovarianciák és zajparaméterek becslését tartalmazza [2].

A mért periodikus jelek harmonikus tartalmának becslése a DFT (vagy FFT) segítségével egyszerűen megoldható, amennyiben a jel frekvenciája ismert és a mérési rekord egész számú periódust tartalmaz. Amennyiben a jelgenerátor és a mintavételező egység nem szinkronizáltak, akkor egy lineáris legkisebb négyzetek probléma (LS probléma) megoldása szükséges az ismeretlen amplitúdók meghatározása céljából, azonban ha a jel frekvenciája sem ismert, akkor egy nemlineáris LS problémával állunk szemben [10].

Az általános nemlineáris LS (NLS) probléma az irodalomban ismert eszközökkel jól megoldható, amennyiben az adatsor mérete és a frekvenciavonalak száma nem túl nagy (a gyakorlatban ez néhány ezer pontos rekordokat és néhány száz spektrumvonalat jelent) [10]. Ezekkel a módszerekkel a NLS probléma megoldása $O(NM^2)$ számítási műveletet és $O(NM)$ méretű tároló kapacitást igényel, ahol N a rekord hossz és M a becsült spektrumvonalak száma.

Problémafelvetés, célkitűzés:

Nagyméretű (hosszú mérési adatot és sok frekvenciakomponenst tartalmazó) feladatok esetén a hagyományos megoldók alkalmazása nehézkes, vagy lehetetlen az algoritmus lassúsága és extrém memóriaigénye miatt. Céлом olyan NLS megoldó kidolgozása volt, amelynek számítás- és memóriaigénye lényegesen a hagyományos eljárásoké alatt marad, így lehetővé teszi nagyobb méretű feladatok megoldását is.

A rendszerről gyűjtött mérési adatok alapján történik a rendszer modelljének meghatározása. Amennyiben a rendszer fizikai kialakításáról van információnk, a parametrikus modellek kompakt, lényegre törő modellezési környezetet biztosítanak. Kezelhetőségük miatt – amennyiben lehetséges – legtöbbször a lineáris, idő-invariáns rendszerekkel való közelítést használjuk. Parametrikus modellek esetén az alkalmazott modellek fokszámának meghatározása kulcsfontosságú feladat: túl alacsony fokszámmal az elérhető pontosság alacsony lesz, míg túlságosan magas fokszám esetén egyrészt a modell az indokoltnál bonyolultabb (adott esetben költségesebb) lesz, másrészt az illesztés során a rendszer mellett a jelenlévő zaj hatását is – helytelenül – a modellbe építjük [11].

A rendszermodell paramétereinek meghatározása során a modell szabad paramétereit oly módon hangoljuk, hogy a rendszermodell minél jobban illeszkedjen a mérési eredményekre. Az illesztést általában valamilyen költségfüggvény minimalizálásával végezzük [2]. A leggyakrabban a LS elven történő illesztést alkalmazzák [1], [2], de az irodalomban találkozunk

a maximum likelihood és Bayes becslőkkel, és még számos egyéb megközelítéssel is (pl. instrumentális változók, kiterjesztett LS becslő, közelítő ML becslő) is [1], [2], [12], [13], [14].

A megalkotott rendszermodellt minőségi kontrollnak kell alávetni, amely arra a kérdésre keres választ, hogy az illesztett modell vajon megfelelően írja-e le a rendszer működését. A validációs vizsgálatok pl. a költségfüggvény vizsgálatát és korrelációs analízisét tartalmazhatják [1], [2], [11].

Problémafelvetés, célkitűzés:

Rendszermodellek fokszámának és paramétereinek meghatározásához számos módszer és eszköz áll rendelkezésre, de ezek szakszerű alkalmazásához számottevő szakismeret és gyakorlat szükséges, csakúgy, mint a validáció során használt módszerek eredményeinek értelmezéséhez. A rendszeridentifikáció elméletének ilyen mélységű ismerete általában nem várható el az identifikációs eljárásokat alkalmazó széles spektrumú felhasználói körtől. Céлом olyan – az irodalomban rendelkezésre álló módszerekre alapozó, azokat felhasználó, szükség szerint továbbfejlesztő és integráló – automatikus modellszelekciós eljárást kidolgozása volt, amely lineáris idő-invariáns rendszerek identifikációjához használható úgy, hogy a felhasználótól bemenetként csupán a mérési eredményeket várja, kimenetként pedig szolgáltatja a validált rendszermodellt annak könnyen érthető szöveges értékelésével együtt. Az eljárással szemben további követelmény volt, hogy a modellt a felhasználók számára elfogadható időn belül szolgáltatassa.

Robusztus lokalizációs eljárások

A kültéri lokalizációs feladatok nagy része különféle globális navigációs rendszerek (pl. GPS, GLONASS, Beidu) segítségével megoldható. Ezek a szolgáltatások azonban nem mindenhol elérhetők (különösen beltérben), illetve egyes esetekben ezek az alkalmazás jellegéből fakadóan nem használhatók. Az utóbbi 5-10 évben az okos eszközökben széles körben elérhető érzékelők rohamos terjedése miatt új lendületet kapott az alternatív lokalizációs eljárások fejlesztése. Új módszerek születtek, amelyek elektromágneses jelek (rádióhullámok, fény), akusztikus jelek, a mágneses tér különféle tulajdonságait mérik, vagy éppen a mozgásállapot becslésére alkalmazható mennyiségeket (pl. gyorsulást) érzékelnek.

A GPS mintájára beltérben is elterjedtek a rádióhullámok terjedési idejének mérésén alapuló módszerek [15], míg kisebb pontosságú alkalmazásokban a rádióhullámok térerősségének távolságfüggését használják fel, akár a már létező infrastrukturális elemek (pl. WiFi routerek) felhasználásával [16]. Hanghullámok esetén általában a terjedési idő mérésére visszavezetett módszerek használatosak [17]. A mágneses tér helyfüggését kihasználó módszerek alapulhatnak akár mesterségesen létrehozott mágneses terek [18], akár a Föld mágneses terének mérésén [19].

Személyek mozgás közbeni lokalizálására gyakran alkalmaznak mozgásérzékelő eszközökön (gyorsulásérzékelő, iránytű, giroszkóp) alapuló módszereket (Pedestrian Dead Reckoning – PDR). Mivel ezen megoldásban a felgyülemelő hibák miatt a pontosság fokozatosan csökken, ezért nagyobb távolságokra gyakran más módszerekkel (pl. rádióhullámú abszolút pozícióbecslés) integrálva alkalmazzák ezeket [20].

A fény-alapú módszerek vagy kitüntetett fényforrások (jeladók), vagy a környezet tárgyairól visszavert fény érzékelésén alapulnak. Fényerősség-érzékelők segítségével a jeladók távolsága

becsülhető [21], vagy irányérzékelők segítségével a fényforrás irányszöge mérhető meg [22]. A legmodernebb 3-dimenziós érzékelők (pl. LIDAR, 3D-kamerák) segítségével pedig a környezet 3-dimenziós modellje valós időben előállítható: a mért modell és egy ismert referencia modell (térkép) összehasonlításával a pozíció nagy pontossággal meghatározható [23].

A pozícióbecslés legrégebbi módszerei a háromszögelés és trilateráció, melyek segítségével elemi geometria módszerekkel számítható a pozícióbecslő [24]. A pontosság és robusztusság növelése érdekében gyakran redundáns mérési adatok segítségével történik a becslés: a túlhatározott egyenletrendszert ilyenkor pl. LS értelemben megoldva adódik a becslő. Amennyiben rendelkezésre állnak járulékos a priori ismeretek, akkor lehetőség nyílik maximum likelihood becslők [25] vagy Bayes-becslők [26] alkalmazására is.

Problémafelvetés, célkitűzés:

A fenti pozícióbecslési eljárások mindaddig jól alkalmazhatók, amíg a mérési hibák zajjellegűek, kiugró hibák azonban durva becslési hibákat eredményezhetnek. A kiugró hibák kezelése robusztus rendszerekben elengedhetetlenül szükséges. A legtöbb robusztusnak tekintett lokalizációs eljárás explicit módon keresi és szűri a kiugró hibákat: itt a becslési eljárás mellett különféle anomália-detekciós technikákat és hihetőség-vizsgálatokat alkalmaznak [27]. Céлом olyan becslési eljárások kialakítása volt, amelyek nagyszámú, redundáns mérés kezelésére képesek és önmagukban is robusztusak a kiugró mérési hibák jelenlétére. Az becslési eljárások megcélzott alkalmazási területei az időkülönbségek és szöghkülönbségek mérése alapján működő helymeghatározó rendszerek.

3. Önállóan elért új tudományos eredmények

I. téziscsoport: Robusztus modellparaméter-becslő eljárások

1. tézis. Eljárás robusztus szélessávú multiszinuszos gerjesztőjelek tervezésére

Új eljárást adtam szélessávú multiszinuszos gerjesztőjelek tervezésére. A javasolt módszerrel tervezett jelek előnye, hogy csonkolásuk (azaz egy rövidebb időtartamú részletük alkalmazása) esetén fellépő szivárgás hatásával szemben sokkal robusztusabbak, mint a hagyományos Schroeder módszerrel származtatott gerjesztőjelek, miközben csúcstényezőjük azokéval összemérhető.

- 1.1. Statisztikai alapú becslőt adtam a véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztőjel csonkolás okozta szivárgásából eredő csillapításának számszerűsítésére.*
- 1.2. Kísérleti úton megmutattam, hogy a csúcsérték-optimalizáló algoritmusok az inicializáló véletlen fázisú multiszinuszos jel statisztikai tulajdonságait érdemben nem befolyásolják. Ezen tulajdonság alapján új algoritmust javasoltam robusztus multiszinuszos gerjesztőjelek tervezésére.*

Multiszinuszos gerjesztőjelek felhasználása rendszeridentifikáció céljára igen gyakori, ezek tervezésére jól bevált és gyakran alkalmazott jeltípus a Schroeder multiszinuszos jel, mely egyszerűen tervezhető és igen kedvező csúcstényezőjű [7]. Tapasztalatlan felhasználók által gyakorta elkövetett hiba a gerjesztőjel csonkolása (pl. mérés félbeszakítása, vagy a gerjesztőjel kettéosztása identifikációs és validációs célra), amely az eredetileg teljes periódusú jel helyett tört periódusú jelet eredményez. Megmutattam, hogy a csonkolásos felhasználás során a

Schroeder multiszinusz igen kedvezőtlenül viselkedik, a csonkolás hatására a gerjesztendő frekvenciatartományban igen nagymértékű csillapítás léphet fel, ami a mérés jel-zaj viszonyát kedvezőtlenül befolyásolja.

Statisztikai alapú becslőt adtam az egy teljes periódusból álló, véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztőjelek csonkolásából eredő csillapításának számszerűsítésére. Ennek segítségével megmutattam, hogy a csonkolásból adódó veszteség a véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztőjelek felhasználása esetén alacsony (tipikus paraméterek esetén 1-3 dB), ami lényegesen kedvezőbb, mint a Schroeder multiszinusz (akár 30-40dB nagyságrendű) csillapítása.

Kísérleti úton megmutattam, hogy az irodalomban ismert és széles körben használt csúcstényező-optimalizáló algoritmusok [8], [9] az inicializáló jel statisztikai tulajdonságait érdemben nem befolyásolják: a jelkomponensek véletlenszerű fázisát az optimalizálás megőrzi, így a csillapításra adott statisztika becslők az optimalizálás után is érvényesek maradnak. Ezen tulajdonság alapján új algoritmust javasoltam robusztus multiszinuszos gerjesztőjelek tervezésére: a tervezés véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztőjelből indul, majd erre a jelre alkalmazunk csúcstényező optimalizálást. A tesztek tanúsága szerint a tervezett jelek csúcstényezője hasonló, illetve esetenként jobb, mint a hagyományos tervező módszerek által szolgáltatott jeleké, míg a csonkolásból eredő potenciális veszteség lényegesen alacsonyabb.

A tézis eredményeit leíró saját publikációk: [S1], [S2].

2. tézis. Hatékony számítási eljárás periodikus jelek spektrumának meghatározásához

Hatékony számítási eljárást javasoltam periodikus jelek spektrumának meghatározásához. A módszer alkalmas olyan nagy adatrekordok feldolgozására is, amelyek a korábbi módszerekkel nem voltak kezelhetők. Az eljárás nagyon rövid adatrekordok esetén is kedvező tulajdonságú, mivel ilyenkor is lehetőséget ad az empirikus variancia – fehér zaj esetén torzításmentes – becslésére.

- 2.1. Iteratív számítási eljárást adtam nem koherensen mintavételezett periodikus jelek spektrumának meghatározásához. A módszer számítási igénye $O(MN)$ és memóriai igénye $O(N)$, ahol M a harmonikus komponensek és N a minták száma.*
- 2.2. A bemenő adatrekord méretének függvényében módszereket javasoltam az empirikus variancia-becslő számítására. Rövid adatrekordok esetén megadtam az empirikus variancia-becslő fehér mérési zajra torzítatlan becskőjét.*

Iteratív eljárást javasoltam ismeretlen frekvenciájú periodikus jelek spektrumának hatékony meghatározására. Az első lépésben az alapharmonikus frekvenciájának közelítő ismeretében a lineáris least squares (LS) probléma megoldásával előállítom a spektrum becslőjét, majd ennek ismeretében a második lépésben újabb frekvenciabecslőt készítek egy nemlineáris LS (NLS) megoldás segítségével. A két lépést a konvergenciafeltétel bekövetkezéséig ismételve az LS értelemben lokálisan optimális frekvenciabecslő áll elő.

Az LS probléma megoldásához egy rezonátoros modell-alapú [28], rekurzív számítási eljárást alkalmaztam, míg a második lépésben a rezonátoros kerethez illeszkedő kvadratikus

illesztéssel határoztam meg az új frekvenciabecslőt, ezáltal a javasolt megoldás alacsony memória- és számításigénnyel rendelkezik.

Módszereket adtam az empirikus variancia számítására. Hosszú adatrekordok esetén ez blokkonként történő átlagolással, míg rövid adatrekordok esetén a rekurzív becslő mintánkénti eredményeinek felhasználásával történik. Rövid adatrekordok esetén megadtam a fehér mérési zajra torzítatlan empirikus variancia-becslő számítási módját.

A javasolt módszer előnyei:

- Lényegesen kevesebb erőforrást igényel, mint a hagyományos (mátrix alapú) megoldások: a hagyományos NLS módszer számítási- és memóriaigénye $O(MN^2)$ és $O(MN)$, míg a javasolt módszer esetén ezen értékek rendre $O(MN)$ és $O(N)$, ahol M a harmonikus komponensek és N a minták száma. Mivel valós feladatok esetén mind a memóriafelhasználás, mind a számítási igény nagyságrendekkel kisebb a hagyományos módszerekénél, a javasolt eljárás olyan nagyméretű feladatok megoldására is alkalmas, amelyeket korábban a hagyományos megoldási módszerrel nem lehetett kezelni.
- Hosszú adatrekordok esetén az empirikus középértékek és varianciák kiszámítása a hagyományos blokkos számítási eljárással történhet, de az új módszer előnye, hogy nem igényli az adatok szegmentálását, újraszinkronizálását és újrabecslését.
- Rövid adatrekordok esetén a hagyományos blokkos módszerrel a variancia nem becsülhető, a javasolt eljárással azonban a rekurzív becslő mintánkénti eredményeinek felhasználásával képes az empirikus variancia-becslő meghatározására ilyen esetekben is. A becslő fehér zajra torzítatlan, színes zajra azonban torzított, de a tesztek tanúsága szerint így is hasznos információt képes szolgáltatni a zaj formájáról.

A tézis eredményeit leíró saját publikációk: [S3], [S4].

3. tézis. Automatikus modellszelekción eljárás lineáris idő-invariáns rendszerek identifikációjához

Teljesen automatikus modellszelekción eljárást javasoltam lineáris időinvariáns (LTI) rendszerek paramétereinek frekvenciatartománybeli meghatározására. A javasolt módszer a mérési eredmények alapján minimális felhasználói közreműködéssel szolgáltatja a rendszer validált modelljét; egy csökkentett fokszerű, de még elfogadható minőségű modellt; valamint ezen modellek értékelését.

- 3.1. Az általam kidolgozott, és MATLAB programcsomag keretében megvalósított eljárás a mérési eredményekből, mint bemenetből indul ki, és operátori beavatkozás nélkül megadja a vizsgált rendszer identifikált és validált modelljét, amit egy csökkentett fokszerű, de még jó minőségű modellel, valamint a laikus felhasználók számára is könnyen érthető szöveges értékeléssel is kiegészít.*
- 3.2. Kidolgoztam az automatikus modellszelekción eljáráshoz egy gyors, statisztikai alapú felső fokszerűbecslő, valamint egy gyors fokszerűredukcion eljárást.*

A módszer a következő lépésekből áll:

- Mérési eredmények előfeldolgozása. Itt a mért bemenő és kimenő jel spektrumának számítása, majd ezekből az empirikus középértékek, varianciák és kovarianciák származtatása történik meg az irodalomból jól ismert módszerekkel [2].
- Durva fokszámbecslés. A lépés során egy gyors nemparametrikus algoritmus [11] kiterjesztésével egy hozzávetőleges statisztikai fokszámbecslést végzünk. A módszer gyorsasága abban rejlik, hogy a rendszer hibáját a paraméterek tényleges kiszámítása nélkül becsli. A lépés eredményeképpen egy kezdeti, valószínűleg (de nem biztosan) kissé konzervatív fokszámbecslő áll rendelkezésünkre.
- Paraméterbecslés és modell-validáció. Mivel az előző lépésben alkalmazott gyors algoritmus sztochasztikus, így lehetséges, hogy a kezdetben becsült fokszám a várakozások ellenére mégis túl alacsony. Ebben a lépésben ténylegesen kiszámoljuk a becsült fokszámmal tartozó paramétereket és validációs tesztet hajtunk végre a maradó hibán [29]. Amennyiben a becsülő a teszten megbukik, a fokszámmat növeljük és a lépést addig ismétljük, amíg megfelelő minőségű becslőt nem kapunk. A lépés eredményeképpen egy validált, ám a kelleténél valószínűleg magasabb fokszámú becslőt kapunk.
- Fokszámredukció I. Ebben a lépésben a bemeneti modell fokszámát iteratív módon csökkentjük mindaddig, amíg a redukált modell még mindig kielégítő pontosságú. A fokszámcsökkentést pólusok, zérusok, vagy pólus-zéró párok eliminálásával végezzük, ahol a potenciális gyökök kijelölése Rolain szignifikancia-tesztjének segítségével történik [11]. Minden potenciális gyök eliminálása után ellenőrizzük a maradó modell minőségét: sikeres teszt esetén a csökkentett fokszámú modellel folytatjuk az iterációt, sikertelen teszt esetén pedig másik gyökkel próbálkozunk. A sebesség növelése érdekében a modell minőségét egy gyors nemparametrikus teszt segítségével ellenőrizzük; amennyiben ez a módszer már nem vezet eredményre, egy lassú parametrikus identifikációs lépéssel – a becsülő algoritmus alkalmas inicializálásával – az átviteli függvény gyökeit újra becsüljük és a modellt validáljuk. Minden sikeres validáció után ismét visszatérünk a gyors teszthez. A két módszer váltogatásával gyors konvergencia és pontos becsülő érhető el. A lépés eredményeképpen előáll egy olyan minimális fokszámú parametrikus modell, amely teljesíti egy komplex validációs teszt minden elvárását.
- Fokszámredukció II. Mivel a gyakorlati esetek egy részében előnyösebb lehet az alacsony fokszámú modell alkalmazása akár a pontosság némi csökkentése árán is, ez a lépés tovább csökkenti a modell fokszámát. Az algoritmus a validált fokszámredukciós lépéshez hasonlóan működik, de itt egy – a validált modellből származtatott – enyhébb minőségi tesztet alkalmazunk.
- Validáció. Ebben a lépésben a korábban származtatott modellek validálása és értékelése történik meg. Az elméleti és mért hiba aránya, valamint a korrelációs teszt eredménye alapján a rendszer szöveges értékelést készít, mely alapján a gyakorlatlan felhasználó is képes eldönteni, hogy a származtatott modellek közül melyik modell alkalmas céljai elérésére.

A tézis eredményeit leíró saját publikációk: [S6], [S7].

Az I. téziscsoporthoz szorosan kapcsolódó, egyéb saját publikációk: [S5], [S8], [S9], [S10], [S11], [S12].

II. táziscsoport: Robusztus pozícióbecslő eljárások

4. tázis. Konszenzusalapú robusztus szenzorfüzió futási idő-különbségek alapján történő helymeghatározáshoz

Új elvű, a mérési hibákra nézve nagymértékben toleráns, a mért értékek konszenzusán alapuló füziós eljárást javasoltam futási idő-különbségek (TDOA) alapján működő helymeghatározó rendszerek megvalósítására. Az eljárás diszkrét eseményeket generáló jelforrások helymeghatározására alkalmas.

- 4.1. Definiáltam a TDOA problémakörhöz tartozó konszenzusfüggvényt, amelynek maximumhelye adja a pozícióbecslőt.
- 4.2. Gyors, korlátozás és szétválasztás elvű eljárást adtam a konszenzusfüggvény diszkrétizált közelítésének kiértékelésére.
- 4.3. Bebizonyítottam, hogy a kereső eljárás a diszkrétizált konszenzusfüggvény globális maximumát találja meg.

TDOA esetre a konszenzusos becslő származtatása a következő:

- a. Adott N darab érzékelő: S_i , $i = 1, 2, \dots, N$, ahol az S_i érzékelő $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ pozíciója ismert a térben.
- b. A forrás véletlen t_0 időpillanatban jelet bocsát ki a tér ismeretlen $p_s = (x_s, y_s, z_s)$ pontjából. Az ismert sebességgel terjedő jelet a szenzorok érzékelik és a t_i érzékelési időket rögzítik ($i = 1, 2, \dots, N$).
- c. Tegyük fel, hogy az ismeretlen pozíciójú forrás a tér $p = (x, y, z)$ pozíciójában van. Ebben az esetben minden szenzorra (p , p_i , t_i és a jel v terjedési sebességének ismeretében) kiszámítható az a T_i időpillanat, amikor a szenzor mérése szerint a feltételezett p pozícióból a jelnek el kellett indulnia.
- d. Definiáljuk a $w \geq 2(\frac{\Delta s}{v} + \Delta T)$ hibasávot, ahol Δs a szenzorok maximális pozícióhibája, és ΔT az időmérés maximális hibája (amely egyrészt a szenzorok közötti időszinkronizációs hibából, másrészt a detekció és az időmérés pontatlanságából adódik). Legyen az $f_w(\tau)$ ablakfüggvény értéke 1, ha $|\tau| < \frac{w}{2}$, 0 különben.
- e. A $\lambda_w(x, y, z)$ konszenzusfüggvény azon szenzorok számát adja meg, amelyek együttesen támogatják azon hipotézist, hogy a forrás az (x, y, z) pontban van. A konszenzusfüggvény definíciója a következő:

$$\lambda_w(x, y, z) = \max_{t \in \mathbb{R}} \sum_{i=1}^N f_w(T_i(x, y, z) - t).$$

- f. A pozícióbecslő a $\lambda_w(x, y, z)$ konszenzusfüggvény maximumánál van. Általában λ_w a maximumát nem egy pontban, hanem egy Ψ területen veszi fel, amelynek mérete függ w értékétől. Praktikusan a pozícióbecslőt Ψ középpontjába helyezzük, míg Ψ területe, illetve elhelyezkedése jól használható a lehetséges becslési hiba jellemzésére.

A fenti módszer feltételezi, hogy a keresési tér minden egyes pontjában $\lambda_w(x, y, z)$ értékét ki tudjuk értékelni, ezért valós körülmények között praktikusan nem alkalmazható. Valós felhasználásra kidolgoztam a fenti algoritmus iteratív, diszkrétizált változatát, amely a diszkrét konszenzusfüggvény gyors kiértékelését egy korlátozás és szétválasztás (Branch and Bound, B&B) típusú keresés formájában végzi el. Bebizonyítottam, hogy az iteratív diszkrét keresés a folytonos konszenzusfüggvény egyik maximumhelyét adja.

A javasolt eljárás olyan esetekben alkalmazható, amikor a jelforrás jól azonosítható, diszkrét jeleket bocsát ki. Ilyen lehet pl. lövések hangja (akusztikus forrás) vagy impulzus-jellegű rádiójelek (ultra-szélessávú rádió forrás). A módszer tesztelése során akusztikus forrásokat és mikrofonos érzékelőket használtunk.

A módszert valós méretű tesztkörnyezetben (kb. 60x80x10m), nagyszámú akusztikus szenzor ($N > 50$) alkalmazásával teszteltük. Az iteratív diszkrét kereső eljárás ilyen körülmények között is valós időben képes a fúziót elvégezni. Az eljárás nagy előnye a nagymértékű robusztusság: a mérések nagy része lehet hibás (tesztek során a hibaarány sokszor az 50%-ot is meghaladta), a fúzió mégis nagy pontosságú eredményt ad. A fenti környezetben az átlagos hiba mindössze 1.3m volt.

A tézis eredményeit leíró saját publikációk: [S13], [S14], [S15], [S16], [S17], [S18].

5. tézis. Megnövelt pontosságú pozícióbecslés a konszenzusalapú szenzorfüzió kiterjesztésével
Kiterjesztést javasoltam a konszenzusalapú, futási idő-különbségek alapján történő helymeghatározás pontosságának növelésére.

- 5.1. *Módszert javasoltam a konszenzusalapú szenzorfüzió pontosságának növelésére. A módszer első lépésként egy konszenzusalapú pozícióbecslőt állít elő diszkrét értelmezési tartományon, a második lépésben pedig ezen pozícióból kiindulva immár folytonos értelmezési tartományon iteratív keresést hajt végre a konszenzusfüggvény segítségével leszűkített szenzorhalmaz méréseinek felhasználásával.*
- 5.2. *Megmutattam, hogy a becslő közel optimálisnak tekinthető: a kísérletek szerint a becslő átlagos négyzetes hibája nagyon közel van az adott körülmények között elvileg elérhető – a Cramer-Rao alsó korlát által definiált – alsó korláthoz.*

A 4. tézisben javasolt alapalgoritmus a keresést diszkrét térben végzi, így a becslő pontosságát a diszkrét tér felbontása korlátozza. Az elérhető pontosságot a w ablakszélesség paraméter értéke szintén befolyásolja, amelynek a zajmodelltől függő konzervatív beállítása a megfelelő működés feltétele. A fenti, pontosságot korlátozó tényezőket küszöböli ki a módszer kiterjesztése.

A kiterjesztett pozícióbecslő működése a következő (a jelölések megegyeznek a 4. tézisben használtakkal):

- a. Hajtsuk végre a 4. tézisnél leírt algoritmust: legyen $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ a kapott pozícióbecslő.
- b. Állítsuk elő a \hat{t} becsült emissziós időpillanatot, amelyre igaz, hogy

$$\lambda_w(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \sum_{i=1}^N f_w(T_i(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) - \hat{t}).$$

- c. Legyen a $\Gamma \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$ azon konszenzusos szenzorok i indexeit tartalmazó halmaz, melyekre igaz, hogy $f_w(T_i(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) - \hat{t}) = 1$.

- d. Definiáljuk a következő kvadratikus hibafüggvényt:

$$Cf(x, y, z, t) = \sum_{i \in \Gamma} e_i^2(x, y, z, t),$$

ahol $e_i(x, y, z, t) = d_i(x, y, z) - v(T_i(x, y, z) - t)$ és $d_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$.

- e. Határozzuk meg $Cf(x, y, z, t)$ minimumát az $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t})$ kezdőpontból indított gradiens kereséssel. A minimumhely szolgáltatja a pozícióbecslőt (és járulékosan az emissziós idő becslőjét is).

A módszert akusztikus lövész-lokalizáció alkalmazásban teszteltük és pontosságát összehasonlítottuk az alap-algoritmuséval. A tesztek tanúsága szerint a hiba értékét átlagosan 30%-al sikerült csökkenteni. A módszer pontosságát kísérletileg összevettem az elméleti pontossággal: a szimulációs tesztek szerint a javasolt megoldás átlagos négyzetes hibája közel van ahhoz a Cramer-Rao korláthoz, amelyet a hibahatáron belül működő szenzorok segítségével származtathatunk, míg a pontosság természetes elmarad attól az elméleti korláttól, amit az összes szenzor helyes működése esetén kapnánk. Így a módszer közel optimálisnak tekinthető: az adott körülmények között elérhető lehetséges legjobb megoldáshoz közeli eredményt szolgáltat.

A tézis eredményeit leíró saját publikáció: [S19]

6. tézis. Általánosított konszenzusalapú szenzorfüzió futási idő-különbségek alapján történő helymeghatározáshoz

Általánosítottam a futásidő-különbségek alapján működő konszenzusalapú helymeghatározó eljárást olyan esetekre, amikor a forrás többféle eseményt folyamatosan emittál magából. A jel-osztály kiterjesztése lehetővé teszi pl. beszédjelek helymeghatározását is.

- 6.1. *Általánosítottam a TDOA alapú konszenzusfüggvényt többféle eseménytípus és több, egymást követő esemény kezelésére.*
- 6.2. *Gyors kereső eljárást adtam a konszenzusfüggvény közelítő kiértékelésére. Megmutattam, hogy a közelítő kiértékelés a pontos maximumhelyet határozza meg az érzékelési hibákra vonatkozó felső korlát és az események távolságára vonatkozó alsó korlát betartása esetén.*

A 4. tézisben javasolt eljárás olyan esetekben alkalmazható, amikor a jelforrás egy fajta, jól azonosítható diszkrét jelet bocsát ki (pl. lövés hangja). Számos alkalmazásban a forrás nem ilyen jellegű (pl. emberi beszéd esetén sem): ilyenkor nehéz egyetlen olyan eseménytípust definiálni, amely bizonyosan és kellő gyakorisággal előfordul és nagy biztonsággal detektálható minden érzékelőnél. Az általánosított fúziós eljárás erre a problémára ad megoldást.

A TDOA esetre alkalmazott általánosított konszenzusos becslő származtatása a következő:

- a. A forrás az ismeretlen $p_s = (x_s, y_s, z_s)$ pozícióból folyamatosan jelet bocsát ki. Feltételezzük, hogy a forrás a T_M mérési ciklus alatt nem mozdul el és a jel v terjedési ideje ismert.

- b. A p_i pozíciókban elhelyezett S_i , $i = 1, 2, \dots, N$, szenzorok az előre definiált Π^k , $k = 1, 2, \dots, K$, típusú eseményeket figyelik az érzékelt jelben és ezek érzékelési idejét rögzítik a mérési ciklus alatt. A szenzorok az érzékelt eseményeket a ciklus végén $d_n = \langle i, k, t_n \rangle$ hármások formájában továbbítják a fúziós feldolgozóba, ahol i a szenzor azonosítója, k a detektált esemény típusa, t_n pedig a detektálás ideje. Ezután új mérési ciklus indul.
- c. A 4. tézisben megfogalmazott elvek szerint definiáljuk a w megengedett legnagyobb konszenzus-hibát. Definiáljuk továbbá a Λ minimális konszenzus indexet.
- d. A d_n megfigyelés birtokában kiszámítható a $T_n^k(x, y, z) = t_n - \frac{\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+(z_i-z)^2}}{v}$ becsült emissziós idő, amikor a detektált Π^k típusú eseménynek az S_i szenzor d_n mérése szerint be kellett következnie, feltéve, hogy az esemény forrása az (x, y, z) pontban van. A Π^k eseménytípushoz kapcsolódóan olyan $\Upsilon_w^k(x, y, z)$ sűrűsödési időintervallum-halmazt keresünk, amelynek elemei diszjunktak, legfeljebb w hosszúak, és az e -ik sűrűsödési intervallumban $\tilde{m}_e^k(x, y, z) > \Lambda$ darab becslő található a $T_n^k(x, y, z)$ becslők halmazából. A Π^k eseménytípushoz tartozó $\lambda_w^k(x, y, z)$ konszenzusfüggvény értéke

$$\lambda_w^k(x, y, z) = \max_{\Upsilon_w^k(x, y, z)} \sum_e \tilde{m}_e^k(x, y, z).$$

- e. A teljes eseményrendszerhez rendelt $\lambda_w(x, y, z)$ konszenzusfüggvény a következő:

$$\lambda_w(x, y, z) = \sum_{k=1}^K \lambda_w^k(x, y, z).$$

- f. A pozícióbecslőt a $\lambda_w(x, y, z)$ maximumából származtatjuk a 4. vagy 5. téziseknél leírt módszerek szerint.

A konszenzusfüggvény kiértékelésére a számítási idő csökkentése érdekében a sűrűsödési helyek optimális kiszámítása helyett közelítő heurisztikus módszert (mohó algoritmust) alkalmazunk. Bizonyítottam, hogy a közelítő eljárás a helyes maximumhelyet szolgáltatja, ha a ΔT idő- és Δs pozíciómérési hibákra teljesül a $w \geq 2\left(\frac{\Delta s}{v} + \Delta T\right)$ egyenlőtlenség és az azonos típusú események időbeli távolsága legalább $2w$.

A módszert beszédjelek segítségével teszteltük. A kísérletet beltérben hajtottuk végre, ahol 5 mikrofont alkalmaztunk 6m x 10m-es területen elhelyezve, a helymeghatározás pontossága pedig 0.2m pontosságú volt. A kísérlet során a beágyazott szenzorokon egy szűrőbank futott, az események pedig az egyes sávokban érzékelt gyors energianövekedésnek feleltek meg. Az érzékelt események következtében keletkezett adatforgalom 2 nagyságrenddel volt kisebb, mint amennyi a nyers adat továbbításához lett volna szükséges. Jól mutatja az események definiálásának nehézségét, hogy a kísérlet során detektált események kevesebb, mint 5 százaléka volt $\Lambda = 3$ mellett konzisztens. Ennek ellenére a módszer helyes becslőt ad, ami jelzi a konszenzusos becslési módszer robusztusságát.

A tézis eredményeit leíró saját publikáció: [S20].

7. tézis. Konszenzusalapú robusztus szenzorfüzió szöghkülönbség alapján történő helymeghatározáshoz

Konszenzusalapú fúziós eljárásokat javasoltam szöghkülönbség (ADOA) alapú helymeghatározó rendszerek megvalósítására.

- 7.1. Definiáltam az ADOA problémakörhöz tartozó konszenzuszfüggvényt 2 dimenzióban, amelynek maximumhelye adja a pozícióbecslőt. Megalkottam a 2 dimenziós pozícióbecslőt kiegészítő konszenzusos orientációbecslőt.
- 7.2. Gyors eljárást adtam a konszenzuszfüggvény diszkrét közelítésének kiértékelésére.
- 7.3. Megmutattam, hogy a 2 dimenziós módszer 3 dimenziós térben az egy ismert tengelyű érzékelős ADOA probléma megoldására is hatékonyan felhasználható. Megadtam a magasság konszenzusos becslésére szolgáló összefüggéseket.

Az ADOA mérések esetén a konszenzusos becslő származtatása 2 dimenzióban a következő:

- 2D.a. Adott egy ismeretlen $p'_s = (x'_s, y'_s)$ pozíciójú és ismeretlen φ orientációjú érzékelő a síkon.
- 2D.b. A síkon adott N darab, ismert $P_i = (x'_i, y'_i)$ pozíciójú, J_i , $i = 1, 2, \dots, N$, jeladó. Az érzékelő a jeladók v'_i irányvektorait, így azok α_i irányszögeit, illetve azok $\alpha_{ij} = \alpha_j - \alpha_i$ különbségeit méri saját koordináta-rendszerében.
- 2D.c. A J_i és J_j jeladók α_{ij} mért irányszög-különbségéből, valamint az ismert P'_i és P'_j pozíciókból adódik egy látókör-ív, amelyen az érzékelő szükségszerűen fekszik.
- 2D.d. A síkon lévő tetszőleges $p' = (x, y)$ pontra az $f_{i,j}(x, y)$ függvény értéke legyen

$$f_{i,j}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{ha } |\check{\alpha}_{ij}(x, y) - \alpha_{ij}| < \Delta\alpha_{ij} \\ 0 & \text{különben} \end{cases}$$

ahol $\check{\alpha}_{ij}(x, y) = \angle P'_i p' P'_j$ és $\Delta\alpha_{ij}$ a maximális D mérési hibából származtatott legnagyobb szöghiba a J_i és J_j jeladók esetén.

- 2D.e. A q_{ij} függvény legyen az α_{ij} mérés pontosságát, illetve hihetőségét jellemző (opcionális) mennyiség.
- 2D.f. A konszenzuszfüggvény értéke legyen a következő:

$$\lambda_D(x, y) = \sum_{\forall i, j, i \neq j} q_{ij} f_{i,j}(x, y)$$

Bináris q_{ij} esetén $\lambda_D(x, y)$ azon detektált jeladó párok számát adja meg, amelyek támogatják azt a hipotézist, hogy a keresett pozíció (x, y) , amennyiben a detekciós hiba nem haladja meg D értékét.

- 2D.g. A \hat{p}'_s pozícióbecslő az x-y sík azon pontján van, ahol λ_D felveszi maximumát. Több ilyen pont esetén ezek középpontja alkalmazható becslő gyanánt.
- 2D.h. Az \hat{p}'_s pozícióbecslő segítségével már számítható az érzékelő φ orientációja a következő konszenzusalapú becslő segítségével:

$$\varphi = \frac{1}{|\Gamma|} \sum_{i: J_i \in \Gamma} \varphi^{(i)}$$

ahol

$$\varphi^{(i)} = \beta_i - \alpha_i$$

és β_i a $\hat{p}'_s P'_i$ vektor irányszöge a világ koordináta-rendszerében, Γ pedig a \hat{p}'_s becslőt támogató konszenzusos mérésekhez tartozó jeladók halmaza.

A javasolt módszer implementálására gyors eljárást adtam, amely egy rács felett határozza meg a konszenzusfüggvény diszkrét közelítését $O(A)$ jól párhuzamosítható, egyszerű művelet és legrosszabb esetben $O(N^2)$ nagyobb komplexitású számítási művelet segítségével, ahol A a keresési sík felülete és N a jeladók száma.

A kétdimenziós ADOA fúziós eljárás alkalmazásával a háromdimenziós, egy ismert tengelyű érzékelős ADOA probléma megoldására a következő konszenzusos eljárást javasoltam:

- 3D.a. Adott egy ismeretlen $p_s = (x_s, y_s, z_s)$ pozíciójú érzékelő a térben. Az érzékelő z tengelyének irányvektora ismert. Az érzékelő ezen tengely körüli elfordulása nem ismert.
- 3D.b. A térben adott N darab, ismert $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ pozíciójú, J_i , $i = 1, 2, \dots, N$, jeladó. Az érzékelő a jeladók irányvektorait méri.
- 3D.c. Az érzékelő ismert z irányvektora segítségével a mérési eredmények transzformálhatók egy olyan ideális érzékelő koordináta rendszerbe, amelynek z tengelye párhuzamos a világ koordináta rendszer z tengelyével és az érzékelő elfordulása ezen tengely körül ismeretlen φ szög. Ebben a koordináta rendszerben a J_i jeladó irányvektora legyen $v_i = (vx_i, vy_i, vz_i)$. Alkalmazva a $P_i = (x_i, y_i)$, $p'_s = (x_s, y_s)$, valamint $v'_i = (vx_i, vy_i)$ vetítéseket a probléma a kétdimenziós esetre vezet.
- 3D.d. A kétdimenziós megoldóval (2D.a-2D.h lépések) \hat{p}'_s és $\hat{\varphi}$ adódnak.
- 3D.e. Az érzékelő z_s koordinátájának \hat{z}_s becslője a P_i , v_i és a \hat{p}'_s becslő segítségével meghatározható a következő konszenzusos becslővel:

$$\hat{z}_s = \frac{1}{|\Gamma|} \sum_{i:J_i \in \Gamma} z_s^{(i)}$$

ahol

$$z_s^{(i)} = z_i - vz_i \frac{|\hat{p}'_s P'_i|}{|v'_i|}$$

és Γ a \hat{p}'_s becslőt támogató konszenzusos mérésekhez tartozó jeladók halmaza.

A módszer tesztelését 3 dimenzióban egy 3 tengelyű gyorsulásérzékelővel integrált halszem optikás kamera segítségével végeztük el. A tesztek során a kamera körülbelül felfelé nézett, a dőlésszög-kompenzációt a gyorsulásérzékelő jele segítségével végeztük el. A rendszer pozícióbecslési hibája több száz négyzetméter nagyságú lefedés esetén is 3-4 jeladóval a deciméter tartományban van, ami a más elvű rendszerekkel való összevetésben nagyon jó ár/pontosság arányú megoldásnak tekinthető.

A tézis eredményeit leíró saját publikációk: [S21], [S22].

A II. téziscsoporthoz szorosan kapcsolódó egyéb saját publikációk: [S23], [S24], [S25],[S26], [S27], [S28].

4. Az eredmények hasznosítási lehetőségei és hasznosulása

Robusztus rendszeridentifikációs eljárások

Periodikus jelek gerjesztésként való alkalmazása, illetve a válaszjelek mérése számos alkalmazási területen típusfeladatnak számít: a precíziós mérés technika területén pl. eszközök kalibrációjára alkalmaznak multiszinuszos jeleket [30], analóg-digitális átalakítók tesztelése során a nagy tisztaságú szinuszos gerjesztés torzított periodikus válaszjelét mérik [31], sőt rendszerek nemlineáris torzításának mérésére is multiszinuszos jelek alkalmazását javasolták [32]. Az impedanciamérő alkalmazások jelentős része szintén multiszinuszos jelekkel operál [33], legyen az elektromos vagy bio-impedancia. Különböző mérnöki rendszerek átviteli tulajdonságainak mérése során is gyakori megoldás a multiszinuszos gerjesztés [34].

Multiszinuszos jelekkel gerjesztett rendszerek kimenetének méréséből a rendszer állapotára, illetve egyes hibaállapotaira is lehet következtetni, pl. transzformátorok, szigetelések, akkumulátorok tesztelésekor, különböző mechanikai rendszerek vizsgálata során, vagy akár fémek korróziós állapotának ellenőrzése esetén is [35].

Modellparaméterek becslése számos alkalmazási területen felmerülő probléma, ahol a felhasználók tipikusan az alkalmazási terület szakemberei, de a rendszeridentifikáció témakörében nem feltétlenül rendelkeznek mély ismeretekkel: a fentebb említett állapotmonitorozás esetén is alapvető módszertan a modell-alapú megközelítés, amikor is a mérések alapján a megfigyelt rendszer parametrikus modelljét felépítve a paraméterek változásából következtethetünk strukturális meghibásodásokra [36]. Számos irányítási feladatban szükséges az irányított berendezés mechanikai modelljének ismerete, ilyenkor a rendszer modelljét azonosítás segítségével építik fel [37]. Igényes audio-rendszerek létrehozásakor vagy telepítésekor gyakori feladat akár a környezet, akár a berendezés akusztikus modelljének felállítása [38], de hangszerek szoftveres szimulációjához is a hangszer modelljének ismerete szükséges [39]. Az azonosítás alkalmazása olyan egészen távoli területeken is felmerül, mint pl. gazdasági folyamatok modellezése és prognosztizálása [40].

A javasolt módszerek mindezen széles alkalmazási környezet felhasználói számára adnak reális lehetőséget szakszerű és pontos modellalkotás végrehajtására.

A kidolgozott azonosítási módszerek a gyakorlati alkalmazására és továbbfejlesztésére a Kollár I., J. Schoukens és R. Pintelon által kifejlesztett Frekvenciatartománybeli Azonosítás (FDIDENT) Toolbox-ban került sor [5]. További – itt nem részletezett – eredményként kialakításra került egy felhasználóbarát, grafikus felhasználói környezet, amely integrálja és intuitív módon segíti a megfelelő módszerek kiválasztását, felhasználását ([S8], [S9], [S10], [S11], [S12]). A Toolbox jelenleg is kereskedelmi forgalomban kapható, illetve non-profit célra ingyenesen felhasználható [5].

Robusztus lokalizációs eljárások

A TDOA alapú helymeghatározás alkalmazási területe nagyon széles. Napjainkra az ultraszélessávú rádióhullámok (UWB) alkalmazásával működő futásidő-alapú távolságmérő eszközök ipari tömegtermékké váltak. Ezen eszközök nagyobb léptékű, skálázható alkalmazása során a futásidők helyett inkább futásidő-különbségeket mérnek, ami TDOA feladatra vezet [41]. Ilyen rendszereket sikerrel alkalmaztak személyek, tárgyak, járművek, illetve drónok követésére [42]. A rádióhullám-alapú mérések nagyméretű kültéri alkalmazásokat is lehetővé

tesznek: pl. szoftver-rádiók alkalmazásával különféle rádió források TDOA-alapú helymeghatározását és követését lehetővé tevő rendszereket fejlesztettek ki [43].

Akusztikus források lokalizálása is gyakori alkalmazási lehetőség: pl. a beszélő-követés [44] vagy az impulzív akusztikus források (pl. bomba, fegyver) pozíciójának meghatározása [45] TDOA problémaként kezelhető csakúgy, mint számos passzív radar alkalmazás [46], vagy a földrengések epicentrumának meghatározása [47].

Sok mérési eljárás és alkalmazási környezet vezet ADOA feladatra is: rádióhullámú források [48], illetve akusztikus források [49] lokalizációja esetén is használnak ADOA megközelítést. A fény-alapú lokalizációs eljárások egy része fotodióda-alapú iránybecslést használ [50], mások speciális irányérzékelőket alkalmaznak [51], a legpontosabb megoldások pedig kamerákat használnak [52]: ezen mérésekből szintén ADOA megközelítéssel adhatók pozícióbecslők.

A konszenzusalapú fúziós technika alkalmazása nagyon sikeres volt akusztikus orvlövész lokalizációs alkalmazásokban TDOA mérések segítségével [S13], [S14], [S15]. A módszer nagy pontosságú eredményt adott még olyan helyszíneken is, ahol a visszhangok igen jelentősen megnehezítik a becslést. A rendszer kifejlesztése előtti lövész-lokalizációs rendszerek nagyvárosi környezetben nagyon megbízhatatlanul működtek, tudomásom szerint az általunk kifejlesztett rendszer volt az első, ilyen környezetben is jól alkalmazható mérőrendszer.

Az ismertetett konszenzusalapú TDOA fúziós alapeljárást az [S18] USA szabadalom védi.

Az ADOA alapú konszenzusalapú fúziós technikát sikeresen alkalmaztuk beltéri lokalizációs feladatok megoldására. A technológia jó ár/érték arányúnak bizonyult: pontossága vetekszik, illetve nem sokkal marad el a lényegesen drágább technológiai megoldásokétól. A technológia a Microsoft Indoor Localization Contest 2015 versenyén a nemzetközi mezőnyben elért előkelő helyezéssel bizonyította létjogosultságát [53]. Az eljárás továbbfejlesztett változatát ipari autonóm járművek helymeghatározására alkalmaztuk [S22], [S25].

A javasolt konszenzusalapú becslő több irányban is továbbfejlesztésre és hasznosításra került újabb megoldásokban:

- A konszenzusalapú becslő adaptív kiterjesztése lehetővé teszi a szenzorok megbízhatóságának figyelembe vételét [S23].
- Egy sztochasztikus-alapú gyorsítással a kiértékelés sebességét további 3 nagyságrenddel sikerült növelnünk [S24].
- A TDOA konszenzuszfüggvényt továbbfejlesztették a TDOA adatok mellett érkezési irányszögek egyidejűleg kezelésére és így sikeresen alkalmazták védősisakon viselhető rendszerekben is [54].
- Az ADOA alapú beltéri lokalizációs rendszer jeladó- és érzékelő-oldali továbbfejlesztésével teljesen valós idejű (másodpercenként akár 90 becslést szolgáltató) szolgáltatást sikerült biztosítani, amely autonóm járművek költséghatékony lokalizációs eljárásaként is alkalmazható [S22].
- Amennyiben többféle mérés áll rendelkezésre (pl. AOA és TOA), ezek fúziója egységesen, egyetlen konszenzusalapú becslési eljáráson belül is kezelhető [54], [S21].

5. A tézisekhez kapcsoló publikációk jegyzéke

- [S1] G. Simon and J. Schoukens, „Robust broadband periodic excitation design,” *16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/99)*, Venice, 1999, vol. 2, pp. 1217-1221.
- [S2] G. Simon and J. Schoukens, „Robust broadband periodic excitation design,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 49, no. 2, pp. 270-274, April 2000.
- [S3] G. Simon, R. Pintelon, L. Sujbert and J. Schoukens, „An efficient nonlinear least square multisine fitting algorithm,” *18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2001)*, Budapest, 2001, vol. 2, pp. 1196-1201.
- [S4] G. Simon, R. Pintelon, L. Sujbert and J. Schoukens, „An efficient nonlinear least square multisine fitting algorithm,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 51, no. 4, pp. 750-755, Aug. 2002.
- [S5] L. Sujbert, G. Péceli and G. Simon, „Resonator-based nonparametric identification of linear systems,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 54, no. 1, pp. 386-390, Feb. 2005.
- [S6] G. Simon, J. Schoukens, and Yves Rolain, „Automatic Model Selection for Linear Time-Invariant Systems,” *12th IFAC Symposium on System Identification, (SYSID 2000)*, Santa Barbara, CA, USA, 21-23 June 2000, Vol. I., pp. 379-384.
- [S7] J. Schoukens, Y. Rolain, G. Simon and R. Pintelon, „Fully automated spectral analysis of periodic signals,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 52, no. 4, pp. 1021-1024, Aug. 2003.
- [S8] I. Kollár, J. Schoukens, R. Pintelon, G. Simon and G. Román, „Extension for the Frequency Domain System Identification Toolbox: Graphical User Interface, Objects, Improved Numerical Stability,” *12th IFAC Symposium on System Identification, (SYSID 2000)*, Santa Barbara, CA, USA, 21-23 June 2000, vol. II., pp. 699-702.
- [S9] I. Kollár, R. Pintelon, Y. Rolain, J. Schoukens, and G. Simon, “Frequency Domain System identification Toolbox for MATLAB: Automatic Processing – From Data To Models,” *13th IFAC Symposium on System Identification SYSID (2003)*, Rotterdam, The Netherlands, August 27-29, 2003.
- [S10] I. Kollár, R. Pintelon, J. Schoukens and G. Simon, „Complicated procedures made easy [GUI],” *IEEE INSTRUMENTATION & MEASUREMENT MAGAZINE*, vol. 6, no. 3, pp. 19-26, Sept. 2003.
- [S11] T. Dabóczy, I. Kollár, G. Simon and T. Megyeri, „How to test graphical user interfaces,” in *IEEE INSTRUMENTATION & MEASUREMENT MAGAZINE*, vol. 6, no. 3, pp. 27-33, Sept. 2003.
- [S12] T. Dabóczy, I. Kollár, G. Simon and T. Megyeri, „Automatic testing of graphical user interfaces,” *20th IEEE Instrumentation Technology Conference (IMTC 2003)*, Vail, Colorado, USA, 2003, pp. 441-445.
- [S13] G. Simon, M. Maróti, Á. Lédeczi, G. Balogh, B. Kusy, A. Nádas, G. Pap, J. Sallai, and K. Frampton, „Sensor Network-Based Countersniper System,” *Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, Baltimore, MD, USA, Nov. 2004, pp. 1-12.
- [S14] M. Maróti, G. Simon, A. Lédeczi and J. Sztipanovits, „Shooter localization in urban terrain,” *COMPUTER*, vol. 37, no. 8, pp. 60-61, Aug. 2004.

- [S15] Á. Lédeczi, A. Nádas, P. Völgyesi, G. Balogh, B. Kusy, J. Sallai, G. Pap, S. Dóra, K. Molnár, M. Maróti, and G. Simon, „Countersniper System for Urban Warfare,” *ACM TRANSACTIONS ON SENSOR NETWORKS*, Vol. 1, No. 2, pp. 153-177, Nov. 2005.
- [S16] Á. Lédeczi, P. Völgyesi, M. Maróti, G. Simon, G. Balogh, A. Nádas, B. Kusy, S. Dóra, and G. Pap, „Multiple simultaneous acoustic source localization in urban terrain,” *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005)*, Boise, ID, USA, 2005, pp. 491-496.
- [S17] G. Balogh, Á. Lédeczi, M. Maróti, and G. Simon, „Time of Arrival Data Fusion for Source Localization,” *WICON Workshop on Information Fusion and Dissemination in Wireless Sensor Networks, (SENSORFUSION 2005)*, Visegrád, Hungary, July 14, 2005
- [S18] A. Ledeczi, M. Maróti, G. Simon, and G. Balogh: Acoustic source localization system and applications of the same. *United States Patent Nr. 7,433,266*. October 7, 2008.
- [S19] G. Vakulya and G. Simon, „Efficient Sensor Network Based Acoustic Localization”, *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2011)*, Hangzhou, China, May 10-12, 2011, pp.582-586.
- [S20] G. Simon and L. Sujbert, „Acoustic source localization in sensor networks with low communication bandwidth,” *Fourth International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, (WISES 06)*, Vienna, Austria, June 30, 2006, pp. 155-163.
- [S21] G. Simon, G. Zachár and G. Vakulya, „Lookup: Robust and Accurate Indoor Localization Using Visible Light Communication,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol.66, no.9, pp. 2337-2348, Sept. 2017.
- [S22] M. Rátosi and G. Simon, „Real-Time Localization and Tracking using Visible Light Communication,” *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nantes, France, Sept. 24-27, 2018. pp. 1-8.
- [S23] G. Vakulya and G. Simon, „Adaptive acoustic localization algorithm for sensor networks,” *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference (I2MTC 2010)*, Austin, TX, 2010, pp. 407-411.
- [S24] G. Vakulya and G. Simon, „Fast Adaptive Acoustic Localization for Sensor Networks,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 60, no. 5, pp. 1820-1829, May 2011.
- [S25] G. Zachár, G. Vakulya and G. Simon, „Design of a VLC-based beaconing infrastructure for indoor localization applications,” *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2017)*, Torino, Italy, May 22-25, 2017, pp.1005-1010.
- [S26] M. Maróti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, „The Flooding Time Synchronization Protocol,” *Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04)*, Baltimore, MD, USA, Nov. 03-05, 2004, pp. 39-49.
- [S27] G. Zachár, G. Vakulya, and G. Simon, „Long Distance VLC-based Beaconing for Indoor Localization Applications, „ *7th International Conference on Indoor positioning and indoor navigation, (IPIN 2016)*, Alcala de Henares, Spain, Oct. 4-7, 2016, Paper ID 179_WIP, pp. 1-4
- [S28] M. Rátosi and G. Simon, „Towards Robust VLC Beacon Identification in Camera Based Localization Systems”, *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Pisa, Italy, Sept. 30 – Oct. 3, 2019. 8 pages. (Megjelenés előtt)

6. A témakörhöz tartozó legfontosabb irodalom

- [1] L. Ljung: System identification: Theory for the user. Prentice Hall, 2nd Edition, 1999.
- [2] R. Pintelon, J. Schoukens: System Identification: A Frequency Domain Approach. Wiley-IEEE Press, 2nd Edition, 2012.
- [3] H. Van Brussel, J.W. Peters, „Comparative assessment of harmonic, random, swept sine and shock excitation methods for the identification of machine tool structures with rotating spindles,” CIRP ANNALS, vol. 24, no.1. pp 291-296, 1975.
- [4] J. Schoukens, P. Guillaume, R. Pintelon, „Design of Broadband Excitation Signals,” Chapter 3 in: „Perturbation Signals for System Identification,” edited by K. Godfrey. Prentice Hall, 1993.
- [5] I. Kollár, Frequency Domain System Identification Toolbox homepage. Online: https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/frequency-domain-system-identification-toolbox.html (letöltve: 2019.03.06)
- [6] L. Ljung: System Identification Toolbox for Use with Matlab. The MathWorks, Inc., Sherborn, MA, 1986.
- [7] M. R. Schroeder, „Synthesis of Low-Peak Factor Signals and Binary Sequences with Low Autocorrelation,” IEEE TRANS. ON INFORM. THEORY, vol. IT 16, no.1, pp. 85-89, 1970.
- [8] E. Van der Ouderaa, J. Schoukens, R. Renneboog, „Peak Factor Minimization Using a Time-Frequency Domain Swapping Algorithm,” IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS, vol. 37, no. 1, pp 145-147, 1998.
- [9] P. Guillaume, J. Schoukens, R. Pintelon, I. Kollár, „Crest-Factor Minimization Using Nonlinear Chebishev Approximation Methods,” IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS., vol. 40, pp. 982-989, Dec. 1991.
- [10] R. Pintelon and J. Schoukens, „An Improved Sine-Wave Fitting Procedure for Characterizing Data Acquisition Channels,” IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS., vol. 45, pp. 588-593, Apr. 1996.
- [11] Y. Rolain, J. Schoukens, and R. Pintelon, „Order estimation for linear time invariant systems using frequency domain identification methods,” IEEE TRANS. ON AUTOMATIC CONTROL, vol. 42, No. 10, pp. 1408- 1417, 1997.
- [12] T. Söderström, P. Stoica, „Comparison of some instrumental variable methods— Consistency and accuracy aspects,” AUTOMATICA, vol. 17, No 1, pp. 101-115, 1981.
- [13] T. Lai and C.-Z. Wei, „Extended least squares and their applications to adaptive control and prediction in linear systems,” IEEE TRANS. ON AUTOMATIC CONTROL, vol. 31, no. 10, pp. 898-906, 1986.
- [14] S. Barembruch, A. Garivier and E. Moulines, „On Approximate Maximum-Likelihood Methods for Blind Identification: How to Cope With the Curse of Dimensionality,” IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, vol. 57, no. 11, pp. 4247-4259, 2009.
- [15] L. Zwirello, T. Schipper, M. Jalilvand and T. Zwick, „Realization Limits of Impulse-Based Localization System for Large-Scale Indoor Applications,” IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS., vol. 64, no. 1, pp. 39-51, Jan. 2015.
- [16] H. Lim, L. C. Kung, J. C. Hou and H. Luo, „Zero-Configuration, Robust Indoor Localization: Theory and Experimentation,” *IEEE INFOCOM 2006*, Barcelona, Spain, 2006, pp. 1-12.
- [17] P. Lazik, N. Rajagopal, B. Sinopoli, A. Rowe, „Ultrasonic time synchronization and ranging on smartphones,” *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, (RTAS)*, May 2015, Art. 7108422, pp. 108-117.
- [18] G. Pirkl and P. Lukowicz, „Resonant magnetic coupling indoor localization system,” *2013 ACM Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing adjunct publication (UbiComp '13 Adjunct)*, 2013, pp. 59-62.

- [19] H.S. Kim, W. Seo, K.R. Baek, „Indoor Positioning System Using Magnetic Field Map Navigation and an Encoder System,” *SENSOR*, vol. 17, no. 3, pp. 651, March 2017.
- [20] A. Colombo, D. Fontanelli, D. Macii and L. Palopoli, „Flexible Indoor Localization and Tracking Based on a Wearable Platform and Sensor Data Fusion,” *IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS.*, vol. 63, no. 4, pp. 864-876, April 2014.
- [21] L. Li, P. Hu, C. Peng, G. Shen, and F. Zhao, „Epsilon: a visible light based positioning system,” *11th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'14)*, pp. 331-343, Seattle, WA, USA, 2014
- [22] T. Raharijaona, et al., „Local Positioning System Using Flickering Infrared LEDs”, *SENSORS*, vol. 17, no. 11, Art. 2518, 2017.
- [23] C. Sánchez, P.Taddei, S. Ceriani, E. Wolfart, V. Sequeira, „Localization and tracking in known large environments using portable real-time 3D sensors,” *COMPUTER VISION AND IMAGE UNDERSTANDING*, vol. 149, pp. 197-208, Aug 2016
- [24] A. Mahajan, M. Walworth, „3-D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers,” *IEEE TRANS. ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, vol. 17, pp. 91–94, 2001.
- [25] O. Bialer, D. Raphaeli and A. J. Weiss, „Maximum-Likelihood Direct Position Estimation in Dense Multipath,” *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 62, no. 5, pp. 2069-2079, Jun 2013.
- [26] C. Kreucher, B. Shapo, „Multitarget Detection and Tracking Using Multisensor Passive Acoustic Data,” *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, vol. 36, no. 2, pp. 205-218, Apr. 2011.
- [27] M. A. Fischler, R. C. Bolles, „Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *COMMUN. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981.
- [28] G. Péceli, „A Common Structure for recursive Discrete Transforms,” *IEEE TRANS. CIRCUITS SYST.* vol. CAS-33, No. 10, pp. 1035-1036, Oct. 1986.
- [29] J. Schoukens, T. Dobrowiecki, and R. Pintelon, „Identification of linear systems in the presence of nonlinear distortions. A frequency domain approach,” *IEEE TRANS. ON AUTOMATIC CONTROL*, vol. 43, No.2, pp. 176-190, 1998.
- [30] W. Van Moer and Y. Rolain, „Multisine Calibration for Large-Signal Broadband Measurements,” *IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS.*, vol. 57, no. 7, pp. 1478-1483, July 2008.
- [31] I. Kollár, J. Márkus, „Standard environment for the sine wave test of ADCs”, *MEASUREMENT*, vol. 31, no. 4, pp. 261-269, 2002.
- [32] K. Vanhoenacker, T. Dobrowiecki and J. Schoukens, „Design of multisine excitations to characterize the nonlinear distortions during FRF-measurements,” *IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS.*, vol. 50, no. 5, pp. 1097-1102, Oct. 2001.
- [33] B. Sanchez, G. Vandersteen, R. Bragos, J. Schoukens, „Basics of broadband impedance spectroscopy measurements using periodic excitations,” *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 23, no. 10, paper 105501, 2012.
- [34] N. B. Carvalho, K. A. Remley, D. Schreurs and K. G. Card, „Multisine signals for wireless system test and design [Application Notes],” *IEEE MICROWAVE MAGAZINE*, vol. 9, no. 3, pp. 122-138, June 2008.
- [35] J. Gertler: *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. CRC Press, 1998.
- [36] D. Goyal, B.S. Pabla, „The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review,” *ARCH COMPUTAT METHODS ENG*, vol. No. 4, pp. 585-594, 2016.
- [37] J. Swevers, W. Verdonck and J. De Schutter, „Dynamic Model Identification for Industrial Robots,” *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, vol. 27, no. 5, pp. 58-71, Oct. 2007.

- [38] S. Spors H. Buchner R. Rabenstein, W. Herbordt, „Active listening room compensation for massive multichannel sound reproduction systems using wave-domain adaptive filtering,” *J ACOUST SOC AM*, vol. 122, No. 1, pp. 354-69, 2007.
- [39] B. Bank and L. Sujbert „Generation of longitudinal vibrations in piano strings: From physics to sound synthesis,” *J ACOUST SOC AM.*, vol. 117, No. 4, pp. 2268-78, Apr. 2005.
- [40] B. Petrevska, „Predicting tourism demand by A.R.I.M.A. models,” *ECONOMIC RESEARCH*, vol. 30, no. 1, pp 939-950, 2017.
- [41] L. Song, H. Zou, T. Zhang, „A Low Complexity Asynchronous UWB TDOA Localization Method,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF DISTRIBUTED SENSOR NETWORKS*, vol. 11, no. 10, 2015.
- [42] J. Tiemann and C. Wietfeld, „Scalable and precise multi-UAV indoor navigation using TDOA-based UWB localization,” *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sapporo, 2017, pp. 1-7.
- [43] Public LoRa Network,” *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING*, vol. 2018, Art. 1864209, 9 pages, 2018.
- [44] Wing-Kin Ma, Ba-Ngu Vo, S. S. Singh and A. Baddeley, „Tracking an unknown time-varying number of speakers using TDOA measurements: a random finite set approach,” *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, vol. 54, no. 9, pp. 3291-3304, Sept. 2006.
- [45] X. Cui, K. Yu and S. Lu, „Direction Finding for Transient Acoustic Source Based on Biased TDOA Measurement,” *IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS.*, vol. 65, no. 11, pp. 2442-2453, Nov. 2016.
- [46] Q. Liang, B. Zhang, C. Zhao and Y. Pi, „TDoA for Passive Localization: Underwater versus Terrestrial Environment,” *IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS*, vol. 24, no. 10, pp. 2100-2108, Oct. 2013.
- [47] K. Lee, H. Kwon, K. You, „Laser-Interferometric Broadband Seismometer for Epicenter Location Estimation,” *SENSORS*, vol. 17, no. 10, Art. 2423, 2017.
- [48] Xiaonan Li, Li Bai and Jing Li, „ADOA / TDOA combined positioning with dual-antenna over fading channel,” *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, 2009, pp. 9-12.
- [49] S. A. L. Glegg, M. P. Olivieri, R. K. Coulson and S. M. Smith, „A passive sonar system based on an autonomous underwater vehicle,” *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, vol. 26, no. 4, pp. 700-710, Oct. 2001.
- [50] A. Arafa, S. Dalmiya, R. Klukas, J. Holzman, „Angle-of-arrival reception for optical wireless location technology,” *OPT. EXPRESS*, vol. 23, pp. 7755-7766, 2015
- [51] Rodríguez-Navarro, David et al., „Indoor Positioning System Based on a PSD Detector, Precise Positioning of Agents in Motion Using AoA Techniques,” *SENSORS*, vol. 17, no. 9 Art. 2124, Sep. 2017.
- [52] Y. Li, Z. Ghassemlooy, X. Tang, B. Lin and Y. Zhang, „A VLC Smartphone Camera Based Indoor Positioning System,” *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 30, no. 13, pp. 1171-1174, July, 2018.
- [53] Microsoft Indoor Localization Competition – IPSN 2015. Online: <https://www.microsoft.com/en-us/research/event/microsoft-indoor-localization-competition-ipsn-2015/> (letöltve: 2019.03.06.)
- [54] P. Völgyesi, G. Balogh, A. Nadas, C. Nash, and A. Ledeczki, „Shooter Localization and Weapon Classification with Soldier-Wearable Networked Sensors,” *5th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, June 11–13, 2007, San Juan, Puerto Rico, pp. 113-126.