

Habilitációs tézisfüzet

Újszerű adatkommunikációs
megoldások alkalmazási
lehetőségeinek vizsgálata

Dr. Vakulya Gergely



2025

Tartalomjegyzék

1. A kutatás előzményei	3
1.1. Beltéri lokalizáció	3
1.2. Emberi testet mint kommunikációs közeget fel- használó rádiófrekvenciás adatátvitel	6
2. Új tudományos eredmények	8
3. A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja	15
4. Irodalmi hivatkozások listája	17
5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közle- mények	23
6. Rövidítések jegyzéke	26

1

A kutatás előzményei

1.1. Beltéri lokalizáció

A lokalizáció problémaköre egyidős az emberiséggel. Kezdetben az ismert helyzetű tereptárgyak, a Nap, vagy valamely égitestnek a megfigyelőhöz viszonyított helyzete alapján tájékozódunk, később az iránytűt használtunk, majd a hajózás megjelenésével a világítótornyok adtak referenciapontot. Meglepő, de a modern lokalizációs megoldások számos közös pontot tartalmaznak a történelmiekkal. A legtöbb mai lokalizációs rendszer rögzített, ismert pozíciójú infrastruktúra elemek, más néven horgony pontok segítségével határozza meg egy, vagy több lokalizálandó objektum helyzetét. A legismertebb ilyen rendszer a GNSS (Global Navigation Satellite System) [1], aminek infrastruktúra elemei műholdak, a követett objektumok pedig vevőegységek.

A civil felhasználású GNSS-sel elérhető pontosság 2-5 méter, ami a legtöbb szokásos (autós, vagy akár gyalogos) navigációs feladatra jól megfelel, azonban például AMR-ek (Autonomous Mobile Robot) [2] irányítására pontosabb pozícióbecslésre van

szükség. A GNSS másik limitációja, hogy a használatához a műholdakra történő optikai rálátás szükséges, így beltérben nem használható. Az RTK (Real-Time Kinematic positioning) [3] rendszerek további korrekciós adatokkal egészítik ki a vett jelet, így (jelentős költségnövekedéssel) a pozícióbecslés pontossága 2 cm-re szorítható le, beltéri helymeghatározáshoz azonban más megközelítés szükséges.

Beltéri lokalizációra a leginkább költséghatékony megoldások a szinte mindenhol jelen levő WiFi eszközöket használják és a különböző hozzáférési pontok által kibocsátott jelek adott pontban vett erőssége (RSSI, Received Signal Strength Indicator) alapján végzik a pozícióbecslést [4, 5]. Az ilyen típusú rendszerek jellemző hibája a néhány méteres nagyságrendbe esik.

Az UWB (Ultra-Wideband) rádiók a jelek futásidejét (TOF, Time of Flight) mérik, amiből az eszközök közti távolság deciméteres nagyságrendbe eső hibával becsülhető. Erre a távolságmérési módszerre költséghatékony lokalizációs rendszerek építhetők fel [6]. A mérési módszer gyenge pontja a jelutató megzavaró elemek jelenlétére (például az árnyékoló, vagy visszaverő felületekre) való érzékenység.

Lokalizációra hallható, vagy ultrahangok is használhatóak [7, 8]. A legnagyobb kihívást itt is az árnyékolások és a visszaverődések okozzák. Ezzel a mérési módszerrel néhány deciméteres pozícióbecslési pontosságot lehet elérni.

Az inerciális szenzorok (IMU, Inertial Measurement Unit) többtengelyes gyorsulásmérő, giroszkóp és digitális iránytű valamilyen kombinációját jelentik, jellemzően MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) kivitelben. Általában nem önállóan használhatók, hanem más szenzorok jeleit fúzióval kiegészítve

pontosítják a pozícióbecslést [9]. Az ilyen típusú megoldások pontossága nagyban függ a fúzióban részt vevő elsődleges szenzoroktól, de akár két-háromszoros javulás is elérhető, főleg lokális mozgások követése esetén.

Lokalizáció céljára látható fény is felhasználható. Az ilyen típusú rendszerek horgonypontjai ismert helyzetű fényforrások, a lokalizált objektum pedig általában kamera [10, 11]. Itt az egyik fő kihívást az egyes jeladók azonosítása jelenti, figyelembe véve, hogy a kibocsátott fény villogását, vibrálását az emberi szem lehetőleg ne érzékelje. Egy adott rendszer pontosságát jelentősen befolyásolja az alkalmazott kamera minősége és a rendszer számos egyéb paramétere. Az eddig dokumentált módszerek hibáját általában nem lehetett a deciméteres tartomány alá szorítani.

Főleg mobil robotok navigációjához használják a LiDAR (Light Detection and Ranging) szenzorokat és az ezekre épülő SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) módszert [12], ami a jármű haladása közben folyamatosan térképezi fel a területet és helyezi el benne magát a járművet. A módszer segítségével kis költségű eszközökkel is centiméteres nagyságrendű pozícióbecslési hiba érhető el, azonban egyrészt maga a LiDAR sérülékeny, mozgó alkatrészeket tartalmazó eszköz, másrészt könnyen előídezhető olyan helyzet (például egy hosszú folyosó), ahol a mérési eredmények alapján nem állapítható meg egyértelműen az aktuális pozíció.

Egy igen pontos, de ezzel együtt költséges módszer a háromdimenziós lézerszkennerek alkalmazása. A terület előzetes feltérképezése után a módszer centiméteresnél kisebb pozícióbecslési hibát biztosít [13].

1.2. Emberi testet mint kommunikációs közeget felhasználó rádiófrekvenci- ás adatátvitel

Annak lehetőségét, hogy a testfelszínen modulált elektromos tér segítségével információ továbbítható, Zimmerman vizsgálta először [14, 15].

A klasszikus RF (rádiófrekvenciás) kommunikáció esetén az adó- és a vevőantenna közötti csatolást elektromágneses sugárzás biztosítja. A BCC (Body Channel Communication) esetén a cél az, hogy egy PAN-t (Personal Area Network) hozzunk létre rádiófrekvenciás jelekkel, de azokat ne sugározzuk ki, tehát ne, vagy legalábbis minél kisebb mértékben hozzunk létre elektromágneses sugárzást.

A BCC vizsgálatára használt eddigi módszerek a problémakör egyes aspektusait elszigetelten, illetve számos fontos tényezőt figyelmen kívül hagyva vizsgálták. Bizonyos megoldások szinuszos jeleket generálva mérték az átviteli csillapítást a frekvencia függvényében oszcilloszkóp, vagy spektrum analizátor segítségével. A mérések jellemzően figyelmen kívül hagyták azt a tényt is, hogy maga a mérőműszer, illetve annak galvanikusan nem leválasztott módon történő csatlakoztatása is befolyásolhatja a mérési eredményeket. [16, 17, 18, 19].

A viszonylag kis számú, viselhető eszközöket használó tanulmány sem végez teljeskörű vizsgálatot, például a [20] mindössze három különböző csatolási pontot használ.

Ahhoz, hogy a BCC tulajdonságait átfogóan elemezni lehes-

sen, mindennek előtt szükség van egy flexibilis kommunikációs eszközre, amivel valós kommunikáció valósítható meg úgy, hogy közben az egyes paraméterek szabadon beállíthatóak és tesztelhetők, illetve az eredmények kinyerhetők és feldolgozhatóak. A vizsgálatoknak ki kell terjednie a használt frekvencia-tartományra, a használt csatoló elektródák kivitelére, méretére, elhelyezésére, az alkalmazott teljesítményszükségletre, illetve a lehetséges interakciókra is.

A BCC egy lehetséges felhasználási területe az interaktív környezetek létrehozása, opcionálisan VR (Virtual Reality), vagy AR (Augmented Reality) használatával. Itt az egyik felmerülő feladat az objektumok követése, illetve azonosítása.

A jelenlegi módszerek ennek megoldására gépi látásra támaszkodnak, hagyományos [21, 22, 23, 24] vagy mélységérzékelő kamerával [25, 26]. Az ilyen típusú rendszerek számításgényesek, illetve természetüknél fogva nem működnek, ha a követett objektum takarásba kerül. Az ilyen jellegű rendszerek költségei rendszerint magasak is.

Annak érzékelésére, hogy bizonyos objektumok egymás közelében vannak, lehetőség van valamilyen meglévő vezeték nélküli kommunikációs módszerrel, például RFID-vel [27], vagy Bluetooth-szal [28] is. Az így felépített térbeli felbontása alacsony, válaszideje hosszú.

Interaktív környezetek egyszerű nyomásérzékelő [29, 30], vagy kapacitív szenzorokkal [31] is elképzelhetők. Ezek térbeli felbontása az alkalmazott szenzorok mennyiségétől függ, válaszidejük alacsony, azonban az objektumok, vagy a felhasználók azonosítására nem alkalmasak.

2

Új tudományos eredmények

Tudományos munkám alapját a vezeték nélküli kommunikációs technikák vizsgálata képezi. Bár a vezeték nélküli kommunikáció az esetek többségében rádiófrekvenciás hullámok segítségével valósul meg, kutatásaimban kifejezetten az ettől eltérő technológiákra és azok alkalmazásaira fókuszáltam. Az egyik kutatási irány a látható és infravörös fénnel történő kommunikáció alkalmazásával megvalósított lokalizációs eljárások fejlesztését célozza. A másik kutatási irány ugyan rádiófrekvenciás kommunikációt használ, azonban az adattovábbításhoz az emberi test felszínét mint átviteli közeget veszi igénybe.

1. téziscsoport

Az első téziscsoportban a látható fény alapú kommunikációhoz kapcsolódó eredményeket foglaltam össze, három tézisben.

Egy VLC alapú helymeghatározó rendszer esetén a kommunikáció szerepe a jeladók azonosítása, tehát itt nem nagy mennyiségű adat átvitele a cél, ezzel szemben a hibatűrés és a robusztusság alapkövetelmény. A LED-eknek továbbá nem szabad emberi szem által érzékelhető villódzást mutatniuk. Az így definiált kívánalmaknak megfelelő modulációs, illetve detekciós eljárások kerültek kifejlesztésre, illetve ehhez kapcsolódóan a kamerák bizonyos, a normál használat során kevésbé lényeges, de a VLC szempontjából kulcsfontosságú paraméterei is alapos vizsgálat alá kerültek.

1.1. tézis

Látható fény alapú kommunikációt felhasználó beltéri lokalizációs rendszert hoztam létre, melynek horgonypontjai nagy teljesítményű, OOK modulált fényt kibocsátó LED-ek, lokalizálandó objektuma pedig kamera [P1, P2].

Az általam létrehozott VLC (Visible Light Communication) alapú helymeghatározó módszer horgonypontjai fix és ismert pozícióban elhelyezett LED jeladók, amik modulált jelét egy kamera érzékeli. Az általános adatátvitelre használt VLC rendszerek esetén általában a nagy sávzsélesség az egyik legfontosabb tervezési cél, itt azonban csak a jeladók egyedi azonosítására használt rövid bitminta kerül továbbításra.

A jeladók periodikus OOK (On-Off Keying) alapú modulációt használnak. Az egyik átvitt szimbólum (*mark*) egy rögzített f_m modulációs frekvenciájú négyszögjel (villogás), a másik

(*space*) pedig egy folyamatos fél fényerejű állapot. A LED-ek fényerősségét növelve a kamerán egyre gyorsabb (rövidebb) zár-idő esetén kapunk helyesen exponált képet a jeladóról. Megfelelő beállítások esetén elérhető, hogy az f_s mintavételi frekvenciát használva az f_m frekvenciájú jel $f_m \pm kf_s$ ($k \in \mathbb{N}$) aliasát detektáljuk. Megfelelő f_m modulációs frekvenciát választva a jeladók villogása az emberi szem számára nem látható, ami nagyban megkönnyíti a rendszer alkalmazhatóságát. A mintarendszerekben alkalmazott f_s mintavételi frekvencia 30, illetve 60 Hz, a moduláció mark szimbólumának villogási frekvenciája pedig 165 Hz volt.

A rendszerben használt, felfelé néző kamera halszemoptikával rendelkezik, aminek látószöge 185° . A legpontosabb pozícióbecslés eléréséhez a jeladókat a horizonton érdemes elhelyezni, de a megoldás más elrendezés esetén is használható.

Az így felépített rendszer elsősorban beltérben (például üzemcsarnokokban) tesz lehetővé akár centiméteres pontosságú, valós idejű pozícióbecslést és követést, de emellett kültérben is használható.

1.2. tézis

Eljárásokat dolgoztam ki digitális kamerák zársidejének non-invazív mérésére [P3, P4, P5].

A VLC alapú lokalizációs megoldások egyik kulcsa az emberi számára villogásmentesnek tűnő moduláció létrehozása és annak detektálása. A detekciós algoritmusok tervezéséhez és finomhangolásához elengedhetetlen a kamera mintavételi modell-

jének pontos ismerete. Erről a gyártói adatlapok nem adnak kellően részletes tájékoztatást, így a modell validálása és a modellparaméterek meghatározása csak méréssel lehetséges.

A javasolt mérési módszerek non-invazívak, vagyis használatukhoz nem szükséges a kamera szerkezetének megbontása.

1.3. tézis

Eljárást dolgoztam ki pozíció és irányszög mérésére infravörös fény és egy körkörös fotodióda tömb felhasználásával [P6, P7].

A VLC témaköréhez szokás sorolni az infravörös fénnel működő rendszereket is. Az általam kidolgozott beltéri lokalizációs módszer jeladói infravörös LED-ek, a vevő pedig egy fotodiódából álló egység (PCPA, Planar Circular Photodiode Array). A fotodiódák egy kör mentén helyezkednek el, így mindegyikre más és más beesési szögben érkezik az egyes jeladókból érkező fény. A vevőegység pozícióját az így mért jelszintbeli eltérésekből tudjuk megbecsülni. Ezzel a módszerrel ugyan csak deciméteres nagyságrendű pontosság érhető el, viszont lényegesen olcsóbb lehet kamerás társához képest.

A jeladók egy programozható négyszögjel-generátorból, egy teljesítményfokozatból és nagy teljesítményű infravörös LED-ből állnak. Az egyes jeladókat a négyszögjel frekvenciája azonosítja. A vevőegységből kétféle prototípus készült el; 6, illetve 16 fotodiódával. Az analóg frontend csatornánként egy-egy transzimpedancia erősítőt, illetve egy-egy aktív aluláteresztő szűrőt tartalmaznak. A 6, illetve a 16 analóg csatorna ezután

egy multiplexeren keresztül egy mikrovezérlő analóg-digitális átalakítójára kerül. Csatornánként 1024 minta gyors Fourier-transzformációja után meghatározható, hogy az egyes jeladók jeleit a különböző szögben álló fotodiódák mekkora intenzitással detektálták. Az egy jeladóhoz tartozó intenzitás értékek egymáshoz vett arányából az adott jeladó irányszöge megbecsülhető, majd a csatornákhöz tartozó irányszögekből pozícióbecslés végezhető.

A prototípus rendszerek pozícióbecslési hibáját számos paraméter (jeladók száma, helyzete, vevőegység helyzete, irányszöge, zavaró tárgyak jelenléte, látható fény jelenléte) változtatása vizsgáltam.

2. téziscsoport

A második téziscsoport az emberi testet mint kommunikációs közeget felhasználó rádiófrekvenciás adatátvitelhez kapcsolódó eredményeket tartalmazza két tézis formájában.

2.1. tézis

Eljárást dolgoztam ki emberi testet mint kommunikációs közeget felhasználó rádiófrekvenciás adatátvitel megvalósítására [P8].

Annak lehetőségét vizsgáltam, hogy hogyan lehet az emberi bőrön mint kommunikációs közegen keresztül kapcsolatot teremteni viselhető eszközök, illetve speciálisan felszerelt, de

egyébként mindennapi eszközök, objektumok között. Bár e témában voltak előzetes vizsgálatok, nem készültek megbízható prototípusok, illetve a használatot bemutató demonstrációs elrendezések. Ezek elkészítése során számos paraméter, illetve körülmény hatását megvizsgáltam.

A technológia alapelve az, hogy a modulált rádiófrekvenciás jeleket nem rádióhullámok segítségével továbbítjuk, hanem az emberi test felületén. Így a felhasználó a legtermészetesebb módon, egyszerű érintkezés útján hozhatja létre és szüntetheti meg az adatátviteli csatornát.

2.2. tézis

Eljárásokat dolgoztam ki objektumok érintéssel történő azonosításával történő interaktív környezetek megvalósítására az emberi testet mint kommunikációs közeget felhasználó rádiófrekvenciás adatátvitel segítségével [P9].

A technológia egyik, általam is vizsgált alkalmazási területe az érintéssel történő azonosítás lehet (például beléptetés). Itt egy olyan ajtót képzelhetünk el, aminek kilincset kulcs használata nélkül elég megérinteni, ezáltal létrehozva egy adatátviteli csatornát a bőrfelületünkhöz érintkező (például csuklón, egy okosórához hasonló módon viselt), illetve az ajtóba épített (a kilinccsel érintkező) egység között. A kommunikáció két, egymással érintkező személy között is hasonlóan működik, ha mindketten egy-egy kommunikációs egységet viselnek csuklóikon, így például elérhetőségi információ (virtuális névjegykártya) cseréje

történhet meg.

Emellett számos egyéb interaktív alkalmazás is lehetséges. A kutatás későbbi fázisában igény kínálkozott arra, hogy virtuális valóság (VR) és kiterjesztett valóság (AR) környezetbe ültessük rendszerünket tárgyak azonosítása, illetve a fizikai érintkezés felismerése céljából. Ez a módszer lehetővé teszi azt, hogy bármilyen látható eltérés (például marker) nélkül megkülönböztessünk személyeket, vagy tárgyakat, illetve megfigyeljük azok interakcióját [P10].

3

A kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja

A bemutatott beltéri lokalizációs megoldás első használható protoípusa (a LookUp!) 2015-ben a Microsoft Research által szervezett Beltéri Lokalizációs Versenyen, Seattle-ben lett bemutatva, ahol számos ipari résztvevőt és neves kutatóintézetet megelőzve a 6. helyet szerezte meg. Később a rendszer folyamatos fejlesztést követően a GINOP-2.2.1-15-2017-00097 *Vezető nélküli targoncaflotta kifejlesztése szinergikusan együttműködő navigációs technológiák alkalmazásával* című kutatás-fejlesztési projekt keretében került alkalmazásra.

A PCPA (Planar Circular Photodiode Array) eszközt bemutató poszter 2019-ben elnyerte a Pisaban megrendezett IPIN konferencia legjobb poszterének járó 2. díjat.

Az emberi testet mint kommunikációs közeget felhasználó rádiófrekvenciás adatátvitel alkalmazásához USA szabadalom

kapcsolódik.

A két téziscsoporthoz kapcsolódó eredmények összesen 12 konferenciakötetben és 4 folyóiratcikkben kerültek publikálásra. Rájuk összesen 99 független hivatkozás történt.

4

Irodalmi hivatkozások listája

- [1] Norman Bonnor. “A brief history of global navigation satellite systems”. *The Journal of Navigation* 65.1 (2012), 1–14. old.
- [2] Spyros G Tzafestas. “Mobile robot control and navigation: A global overview”. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 91 (2018), 35–58. old.
- [3] Sunil Bisnath. “Relative Positioning and Real-Time Kinematic (RTK)”. *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications* 1 (2020), 481–502. old.
- [4] Krishna Chintalapudi, Anand Padmanabha Iyer és Venkata N Padmanabhan. “Indoor localization without the pain”. *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*. 2010, 173–184. old.

- [5] Hyuk Lim, Lu-Chuan Kung, Jennifer C Hou és Haiyun Luo. “Zero-configuration, robust indoor localization: Theory and experimentation”. (2006), 1–12. old.
- [6] Lukasz Zwirello, Tom Schipper, Malyhe Jalilvand és Thomas Zwick. “Realization limits of impulse-based localization system for large-scale indoor applications”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 64.1 (2014), 39–51. old.
- [7] José Carlos Prieto, Antonio Ramón Jiménez, Jorge Guevara, Joao L Ealo, Fernando Seco, Javier O Roa és Francisco Ramos. “Performance evaluation of 3D-LOCUS advanced acoustic LPS”. *IEEE transactions on instrumentation and measurement* 58.8 (2009), 2385–2395. old.
- [8] Patrick Lazik, Niranjini Rajagopal, Bruno Sinopoli és Anthony Rowe. “Ultrasonic time synchronization and ranging on smartphones”. *21st IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*. IEEE. 2015, 108–118. old.
- [9] Alessio Colombo, Daniele Fontanelli, David Macii és Luigi Palopoli. “Flexible indoor localization and tracking based on a wearable platform and sensor data fusion”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63.4 (2013), 864–876. old.
- [10] Ye-Sheng Kuo, Pat Pannuto, Ko-Jen Hsiao és Prabal Dutta. “Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light”. *Proceedings of the 20th annual*

- international conference on Mobile computing and networking*. 2014, 447–458. old.
- [11] Liqun Li, Pan Hu, Chunyi Peng, Guobin Shen és Feng Zhao. “Epsilon: A visible light based positioning system”. *11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 14)*. 2014, 331–343. old.
 - [12] Pileun Kim, Jingdao Chen, Jitae Kim és Yong K Cho. “SLAM-driven intelligent autonomous mobile robot navigation for construction applications”. *Advanced Computing Strategies for Engineering: 25th EG-ICE International Workshop 2018, Lausanne, Switzerland, June 10-13, 2018, Proceedings, Part I 25*. Springer. 2018, 254–269. old.
 - [13] Carlos Sánchez, Pierluigi Taddei, Simone Ceriani, Erik Wolfart és Vítor Sequeira. “Localization and tracking in known large environments using portable real-time 3D sensors”. *Computer Vision and Image Understanding* 149 (2016), 197–208. old.
 - [14] Thoams Guthrie Zimmerman. “Personal area networks (PAN); near-field intra-body communication”. Dissz. 1995.
 - [15] Thoams Guthrie Zimmerman. “Personal area networks: Near-field intrabody communication”. *IBM systems Journal* 35.3.4 (1996), 609–617. old.
 - [16] MirHojjat Seyedi, Zibo Cai és Daniel TH Lai. “Characterization of Signal Propagation through Limb Joints for Intrabody Communication”. *International Jour-*

nal of Biomaterials Research and Engineering (IBRE)
1.2 (2011), 1–12. old.

- [17] Joonsung Bae, Hyunwoo Cho, Kiseok Song, Hyungwoo Lee és Hoi-Jun Yoo. “The signal transmission mechanism on the surface of human body for body channel communication”. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 60.3 (2012), 582–593. old.
- [18] Željka Lucev, Igor Krois és Mario Cifrek. “A capacitive intrabody communication channel from 100 kHz to 100 MHz”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61.12 (2012), 3280–3289. old.
- [19] Tim CW Schenk, Nafiseh Seyed Mazloun, Luc Tan és Peter Rutten. “Experimental characterization of the body-coupled communications channel”. *2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*. IEEE. 2008, 234–239. old.
- [20] Ruoyu Xu, Wai Chiu Ng, Hongjie Zhu, Hengying Shan és Jie Yuan. “Equation environment coupling and interference on the electric-field intrabody communication channel”. *IEEE Transactions on biomedical engineering* 59.7 (2012), 2051–2059. old.
- [21] Kaj Grønbæk, Ole Sejer Iversen, Karen Johanne Kortbek, Kaspar Rosengreen Nielsen és Louise Aagaard. “Interactive floor support for kinesthetic interaction in children learning environments”. *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*. Springer. 2007, 361–375. old.

- [22] Ole Sejer Iversen, Karen Johanne Kortbek, Kaspar Rosengreen Nielsen és Louise Aagaard. “Stepstone: an interactive floor application for hearing impaired children with a cochlear implant”. *Proceedings of the 6th international conference on Interaction design and children*. 2007, 117–124. old.
- [23] Peter Krogh, Martin Ludvigsen, Andreas Lykke-Olesen és tsai. “” Help Me Pull That Cursor” A Collaborative Interactive Floor Enhancing Community Interaction”. *Australasian Journal of Information Systems* 11.2 (2004).
- [24] Jörg Müller, Dieter Eberle és Constantin Schmidt. “Baselase: An interactive focus+ context laser floor”. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2015, 3869–3878. old.
- [25] Suk Lee, Kyoung Nam Ha és Kyung Chang Lee. “A pyroelectric infrared sensor-based indoor location-aware system for the smart home”. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 52.4 (2007), 1311–1317. old.
- [26] Ryan Ulyate és David Bianciardi. “The interactive dance club: Avoiding chaos in a multi-participant environment”. *Computer music journal* 26.3 (2002), 40–49. old.
- [27] Soonshin Han, HyungSoo Lim és JangMyung Lee. “An efficient localization scheme for a differential-driving mobile robot based on RFID system”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54.6 (2007), 3362–3369. old.

- [28] J Hvizdoš, J Vaščák és A Brezina. “Object identification and localization by smart floors”. *2015 IEEE 19th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. IEEE. 2015, 113–117. old.
- [29] Sumi Helal, William Mann, Hicham El-Zabadani, Jeffrey King, Youssef Kaddoura és Erwin Jansen. “The gator tech smart house: A programmable pervasive space”. *Computer* 38.3 (2005), 50–60. old.
- [30] Joseph Paradiso, Craig Abler, Kai-yuh Hsiao és Matthew Reynolds. “The magic carpet: physical sensing for immersive environments”. *CHI'97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. 1997, 277–278. old.
- [31] Miguel Sousa, Axel Techmer, Axel Steinhage, Christl Lutterbach és Paul Lukowicz. “Human tracking and identification using a sensitive floor and wearable accelerometers”. *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*. IEEE. 2013, 166–171. old.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [P1] Gyula Simon és Gergely Vakulya. “Lookup: Robust and Accurate Indoor Localization Using Visible Light Communication”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 66.9 (2017), 2337–2348. old.
- [P2] Gergely Zachár, Gergely Vakulya és Gyula Simon. “Design of a VLC-based beaconing infrastructure for indoor localization applications”. *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE. 2017, 1–6. old.
- [P3] Márk Rátosi, Gergely Vakulya és Gyula Simon. “Measuring camera exposure time using equivalent sampling”. *2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE. 2021, 1–6. old.

- [P4] Gyula Simon, Márk Rátosi és Gergely Vakulya. “Automatic Measurement of Digital Cameras’ Exposure Time Using Equivalent Sampling”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71 (2022), 1–10. old.
- [P5] Gyula Simon, Gergely Vakulya és Márk Rátosi. “The way to modern shutter speed measurement methods: A historical overview”. *Sensors* 22.5 (2022), 1871. old.
- [P6] Gergely Zachár, Gergely Vakulya és Gyula Simon. “Azimuth estimation for indoor localization using redundant planar circular photodiode array”. *IPIN (Short Papers/Work-in-Progress Papers)*. 2019, 149–156. old.
- [P7] Gergely Zachár, Gergely Vakulya és Gyula Simon. “Bearing estimation for indoor localization systems using planar circular photodiode arrays”. *Applied Sciences* 10.11 (2020), 3683. old.
- [P8] V. Varga, M. Wyss, G. Vakulya, A. Sample és T. R. Gross. “Designing groundless body channel communication systems: Performance and implications”. *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2018, 683–695. old.
- [P9] V. Varga, G. Vakulya, B. Bürgisser, N. Riopelle, F. Zund, R.W. Sumner, T.R. Gross és A. Sample. “Real-time capture of holistic tangible interactions”. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. 2021, 1–15. old.

- [P10] V. Varga, G. Vakulya, A. Sample és T. R. Gross. “Enabling interactive infrastructure with body channel communication”. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 1. köt. 4. 2018, 1–29. old.

Rövidítések jegyzéke

AMR	Autonomous Mobile Robot
AR	Augmented Reality
BCC	Body Channel Communication
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
LED	Light Emitting Diode
LiDAR	Light Detection and Ranging
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
OOK	On-Off Keying
PAN	Personal Area Network
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency IDentification

RTK Real-Time Kinematic positioning

RSSI Received Signal Strength Indicator

SLAM Simultaneous Localization and Mapping

TOF Time of Flight

UWB Ultra-Wideband

VLC Visible Light Communication

VR Virtual Reality