

# Matematikai alapú lokalizációs keretrendszer

Szakács Tamás, Ruzsa Zoltán, Parisek Zsolt,  
Király Roland, Hajagos Henrik  
Eszterházy Károly Főiskola - Matematikai és Informatikai Intézet

szakacstam@gmail.com, ruzsaz@gmail.com, parisek@gmail.com,  
kiraly.roland@ektf.hu, hajagos.henrik@gmail.com

2014. március 27.

## Kivonat

Az általunk végzett kutatásban három, az RFID alapú lokalizációhoz kapcsolódó problémát vizsgálunk meg. Az első, hogy egy viszonylag nagy területet, mint egy repülőtér váróterme, hogyan lehet a lehető legkevesebb RFID olvasó használatával lefedni.

A másik, hogy milyen infrastruktúra és matematikai apparátus segítségével lehet egy jelenleg nem látható, de már korábban detektált transzponderről eldönteni, hogy az a legnagyobb valószínűséggel melyik pontján lehet a vizsgált területnek.

Az előzőekből kiindulva a harmadik probléma, amelyre szintén megoldást keresünk az, hogy az RFID olvasók által nem látható területekre is kiterjesszük a keresést egy speciális eszköz, az un.: Bólogató Antenna felhasználásával.

Ebben a cikkben lokalizáció kiterjesztésének matematikai alapú megoldására teszünk kísérletet, vagyis megpróbáljuk a lokalizációs folyamatok kiterjesztésére készített matematikai modellt, és annak implementációs problémáit ismertetni.

---

<sup>0</sup>A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával a TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0014 FutureRFID - Az RFID/NFC technológia továbbfejlesztési lehetőségei az "Internet of Things" koncepció mentén című projekt keretei között valósult meg.

# 1. RFID alapú lokalizáció és a jelenlétszenzorok problémái

Jelenlétszenzor alatt egy olyan szenzort értünk, amely egy bizonyos tárgy jelenlétét érzékeli, és ezt a jelenlétet binárisan (jelen van, illetve nincs jelen) adja tovább. A való életben számtalan ilyen alkalmazás létezik, erre a célra használhatóak például a WIFI, RFID és NFC technológiát használó rendszerek.

Többek által kutatott probléma [3–6] hogy több, rendszerbe kötött jelenlétszenzor által szolgáltatott jelenlét-információból hogyan lehet az észlelt tárgy helyzetére, mozgására vonatkozó információt előállítani. Más kutatók, például [7], a helymeghatározáshoz felhasználják az észlelés jelerősségét is. A vázolt helyzetre jellemző példa egy irodaház, ahol minden ajtón való áthaladáshoz a jogosultság egy beléptetőkártyával való igazolása szükséges. A beléptetőkártya valójában egy RFID transzponder, míg az ajtóknál RFID olvasók vannak telepítve.

Ezek a leolvasók a hozzájuk kapcsolt antennákkal meghatározott időközönként mérnek, hogy látják-e a transzpontert. Ha az távol van, akkor a leolvasás eredménye feltehetően negatív, de közel lévő tag esetén se garantált az észlelés.

Például, ha valaki a transzponder és az antenna között áll, akkor az általa képviselt víztömeg blokkolja a rádióhullámok terjedését, megghiúsítva a pozitív észlelést. Illetve, ha a tag az antenna leolvasási tartományának a határa közelében helyezkedik el, akkor további bizonytalansági tényezőktől függ az észlelés sikeressége: a levegő páratartalmától, hőmérsékletétől, stb.

Mivel a transzponterek észlelése viszonylag kis méretű területeken is bizonytalan, az észlelés nagyobb területekre való kiterjesztése során a jelenleg ismert RFID alapú eszközök használatával nagy valószínűséggel hamar problémákba ütközünk.

**1. Probléma** (Az RFID alapú lokalizáció kiterjesztésén). *A kutatásaink központi eleme az, hogy egy viszonylag nagy területen, mint egy repülőtér, vagy egy vasútállomás váróterme, hogyan lehet a lehető legkevesebb RFID olvasó használatával a lehető legnagyobb területet lefedni és minél több RFID címkével ellátott tárgy helyzetét detektálni. Valamint az, hogy az átmenetileg, vagy permanensen nem lefedett területekre hogyan terjesszük ki az észlelési folyamatot.*

A lokalizációs folyamat során tehát a mozgó, vagy fix pozíciójú címkékkel ellátott eszközöket szeretnénk nagy biztonsággal megtalálni. Az általunk kidolgozott rendszer részeként bevezetjük a mozgó és fix transzponder, és a

mozgó, vagy fix reader fogalmát. Mind a négy fogalom ismert, de a rendszer működése szempontjából fontosnak tartjuk tisztázni ezek jelenlétét a lokalizációra kijelölt területen, mivel mind a szoftver komponensek előállításánál, mind a matematikai modell elkészítésénél számoltunk ezek jelenlétével.

A transzponder jelen esetben bármilyen RFID (Radio Frequency Identification) alapú, lehetőleg UHF technológiát használó transzponder, vagy hétköznapi nevén címke. Az olvasó (*reader*) az említett transzponderek lokalizálására és memóriájának írására alkalmas, szintén RFID alapokon működő eszköz. A mozgó változata ezeknek az eszközöknek egy önjáró robotra, vagy a vizsgált területen random mozgó eszközökre (pl.: a repülőtéren egy csomagok szállítására használt kocsira helyezve) szerelt verziója.

A vizsgált probléma lényege, hogy milyen infrastruktúra és matematikai apparátus segítségével lehet egy keresett, de már korábban (akár többször, több helyen is) detektált transzponderről eldönteni, hogy az a legnagyobb valószínűséggel melyik pontján lehet a vizsgált területnek. Ezt vizsgáljuk abban az esetben is, ha a keresett eszköz éppen egyik olvasó látószögébe sem esik bele, de nagy valószínűséggel az általunk felügyelt területen belül van.

Ezen a ponton fontos megjegyezni, hogy a továbbiakban a lokalizációt olyan környezetben valósítjuk meg, ahol a rendelkezésre álló olvasók nem látják be a teljes területet, és olyan esetekre is felkészülünk, mikor a lokalizációs terület egyes részei átmenetileg nem láthatóak az olvasók számára.

Az előzőekből kiindulva a harmadik problémánk, amelyre szintén megoldást keresünk az, hogy az RFID olvasók által nem látható területekre is kiterjesszük a keresést egy speciális eszköz, az un.: Bólogató Antenna felhasználásával.

A célunk elérése érdekében a lokalizációba bevonunk egyszerű és önműködő robotokat is, amelyek segítségével (RFID olvasóval ellátott önjáró robotok) a Bólogató Antenna által sem látható, vagy ideiglenesen elfedett területekre is automatikusan ki tudjuk terjeszteni a lokalizációt, de csak a szoftveres apparátus által javasolt helyeken, vagyis a lehető leghatékonyabb módon.

A problémák bemutatása során felvetett kérdések megválaszolása érdekében ismertetjük azt a matematikai alapú szoftveres környezetet, amely segít a korábban már detektált transzponderek helyének meghatározására statisztikai módszerek felhasználásával. Ez a szoftver komponens valós időben becsülni tudja egy általa ismert transzponder lehetséges helyét, és így támogatja a lokalizációs folyamatokban résztvevő hardver és szoftver komponenseket.

## 2. A mérési folyamat tervezése és a teszt környezet kalibrálása

A matematikai modell megalkotásához szükségünk van a teszt környezetben használt antennák karakterisztikájának mérésére, és a teszt terület lefedettségének vizsgálatára, mivel ez a két paraméter nagyban befolyásolja a későbbi mérések pontosságát. Mindezt a lokalizációra használt területen 50, majd 25 cm-es pontossággal méréseket végeztünk az antennák által lefedett diszkrét területeken észlelhető jelerősségről (rssi), majd az interferenciákat, és a kioltást is figyelembe véve megkonstruáltuk a lefedettség térképet.

Ez a kalibrálási folyamat fontos a teljes rendszer kialakításához és működtetéséhez, valamint a statisztikai számításokhoz, és kiszámítást végző függvények megkonstruálásához.

A teszt környezet megtervezésekor a területet úgy alakítottuk ki, hogy azon hagyjunk az olvasók által nem látható területeket, és néhány pontján legyen lehetőségünk átmeneti olvasási anomáliák szimulációjára.

Ilyen feltételek mellett kellett megterveznünk azt a matematikai apparátust, amelynek feladata, hogy egy adott transzponderről (mikor az nem látható) nagy valószínűséggel meg tudja mondani, hogy az általunk ismert, éppen nem lefedett területek melyikén található.

Ha a modell megfelelően működik, és a rendszer képes megbecsülni az adott RFID címke helyzetét, akkor a Bólogató Antennát a kiszámolt irányba tudjuk fordítani, vagy az egyik mozgó olvasó egységet intelligens módon a mérések elvégzéséhez szükséges pozícióba tudjuk küldeni a transzponder megtalálásához.

## 3. A lokalizációs folyamat matematikai alapjai

A valós  $H$  térben ( $H \subset \mathbb{R}^2$ , vagy  $H \subset \mathbb{R}^3$ ) létező egyetlen tárgy  $\theta$  helyzetét szeretnénk meghatározni. A tárgyat ismert, állandó helyzetű jelenlétszenzorok bizonyos időpontokban megpróbálják érzékelni, amely érzékelési kísérlet eredménye lehet sikeres (1), vagy sikertelen (0). Egy leolvasási kísérlet eredményét olyan  $X_i$  valószínűségi változónak tekintjük, amely felvett értéke függ  $\theta$ -tól, és egy ismeretlen bizonytalansági tényezőtől. Feltesszük, hogy a különböző szenzorokhoz tartozó  $X_i$  és  $X_j$  valószínűségi változók rögzített  $\theta$  mellett egymástól függetlenek. A megtervezendő lokalizációs rendszertől azt várjuk el, hogy a jelenlétszenzorok által végzett mérések eredményét felhasználva becslést adjon az érzékelendő tárgy helyzetére vonatkozóan. A tárgy helyzetére adandó becslés a legegyszerűbb esetben egy konkrét  $\mathbf{x} \in H$  pozíció.

Ekkor, a jelenlétszenzorok mérési eredményét felhasználva azt állítjuk, hogy a tárgy egy adott időpillanatban a legvalószínűbb, hogy  $\mathbf{x}$ -ben volt.

A probléma egyik lehetséges megközelítése az, hogy a keresett tárgy helyzetére  $\theta \in H$  paraméterként tekintünk, a jelenlétszenzorok olvasási eredményére pedig a paramétertől, és további, ismeretlen tényezőktől függő  $X_i$  bináris (0 vagy 1 értéket felvevő) valószínűségi változóként.  $X_i$ -nek az eloszlása így  $\theta$ -tól függ, de ezt az eloszlást egy konkrét  $\theta$  esetén sem ismerjük. A lokalizációs eljárás során a jelenlétszenzorok jelzéseit megfigyelve próbálunk az eloszlásukat meghatározó  $\theta$  paraméterre következtetni. Egy darabig tegyük fel, hogy csak egyetlen jelenlétszenzorunk van, amely egyetlen észlelési kísérletet végez, melyet az  $X$  valószínűségi változó reprezentál.  $X$ -nek a leolvasás során felvett konkrét értékét jelölje  $x$ , rögzített  $\theta$  paraméter mellett  $X$  eloszlását pedig  $p_\theta$ . (Tehát  $p_\theta(1)$  annak a valószínűsége, hogy ha az észlelendő tárgy  $\theta$ -ban tartózkodik, akkor a jelenlétszenzor érzékeli őt, míg  $p_\theta(0)$  azé, hogy nem.) Ekkor  $\theta \mapsto p_\theta(x)$  függvényt  $\theta$ -nak az  $X = x$  melletti *likelihood-függvényének* nevezzük, és  $\mathcal{L}(\theta; x)$ -vel jelöljük:

$$\mathcal{L}(\theta; x) = p_\theta(x).$$

A továbbiakban feltesszük, hogy mind  $\mathcal{L}(\theta; 0)$ , mind  $\mathcal{L}(\theta; 1)$  ismert. Konkrét alkalmazásban  $\mathcal{L}$  meghatározása történhet méréssel, vagy a jelenlétszenzor jelzési karakterisztikájának ismeretében számítással. Nézzük meg, hogy mi történik, ha a tárgy helyzetét több jelenlétszenzor azonos időpontban végzett észlelése alapján próbáljuk megtalálni.

**1. Tétel.** *Legyen  $\theta \in H$  ismeretlen paraméter,  $X_1, \dots, X_n$   $\theta$ -tól függő eloszlású, egymástól független valószínűségi változók,  $x_1, \dots, x_n$  pedig a megfelelő  $X_i$  megfigyeléséből származó kísérletek eredményei. Ekkor*

$$\mathcal{L}(\theta; x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \mathcal{L}(\theta; x_i).$$

$\mathcal{L}(\theta; x_1, \dots, x_n)$  likelihood-függvény maximumhelye adja a tag helyének, mint  $\theta \in H$  paraméternek az ML becslését:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax}_{\theta \in H} \mathcal{L}(\theta; x_1, \dots, x_n).$$

Ez tehát az a  $\theta \in H$ , amely esetén a legvalószínűbb, hogy a szenzorok azt az értéket közlik, amelyet ténylegesen tapasztaltunk.

Eddig azzal, a valós feladatoknál általában nem használható esettel foglalkoztunk, amikor az észlelések egyszerre következnek be, és ebben a pillanatban kell meghatároznunk a keresett tárgy helyzetét is.

A valósághoz sokkal közelebb áll az, hogy a szenzor periodikusan, például másodpercenként körülnéz. Jelöljük az egy szenzor által  $t_0, \dots, t_n$  időpontokban végzett észlelési kísérleteket, mint bináris valószínűségi változókat  $X_0, \dots, X_n$ -vel, a konkrét észlelési kísérleteknél kapott értékeket  $x_0, \dots, x_n$ -vel. Ezeket az  $X_i$ -ket nem tekinthetjük egymástól függetlennek, hanem egy közös, időtől is függő likelihood-függvényt kell, hogy meghatározzanak. Mivel az  $X_i$ -k egymástól való függésére semmilyen használható információval nem rendelkezünk, a közös likelihood-függvényt sem tudjuk kiszámolni. Ehelyett olyan függvényt kell találnunk, amely – bár valójában nem likelihood-függvény, azaz nem igazak rá azok a tételek, amelyek egy valódi likelihood-függvényre kimondhatóak – de alkalmas arra, hogy a likelihood-függvény szerepét betöltse. Legyen  $\tau$  egy tetszőleges, rögzített időpont. Ekkor az  $X_i$  ( $i \in \{1, \dots, n\}$ ) leolvasások mindegyikéhez egymástól függetlenül tartozik egy, a  $t_i$  időpontban érvényes  $\mathcal{L}(\theta; x_i)$  likelihood-függvény. Egy ilyen függvényt annál kevésbé tekintünk érvényesnek, minél távolabb van  $\tau$ -tól  $t_i$ . Így, ha több likelihood függvényt is figyelembe szeretnénk venni az együttes likelihood függvény definiálásakor, akkor célszerű egy olyan mozgó átlagot használni, amely az időben távoli függvényeket kisebb súllyal veszi számításba. Ehhez válasszunk egy  $K(t)$  magfüggvényt, amely szimmetrikus, és  $\tau$  körül vesz fel nagy értékeket. Például a Gauss-féle magfüggvény egy ilyen választás:

$$K(t) = e^{-\lambda(t-\tau)^2} \quad (\lambda \in \mathbb{R}_+).$$

Ekkor elkészíthetjük a *magfüggvénnyel átlagolt likelihood-függvényt*, ami a szenzor által végzett észlelési sorozat közös likelihood függvényének szerepét fogja betölteni:

$$L(\theta)(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n K(t_i) \mathcal{L}(\theta; x_i)}{\sum_{i=1}^n K(t_i)}.$$

Most tegyük fel, hogy egymástól kellően távoli (így függetlennek tekintett valószínűségi változókkal modellezett) jelenlétszenzorok mindegyike időnként megpróbál észlelni egy mozgó tárgyat. Ha a  $k$ . szenzorra a fenti módszerrel meghatározzuk a likelihood-függvény szerepét betöltő  $L_k(\theta)(t)$  függvényt, akkor a különböző szenzorok által végzett észleléssorozatokot egymástól függetlennek tekintve vegyük a

$$L(\theta)(t) = \prod_{k=1}^n L_k(\theta)(t)$$

szorzatot. Az így kapott  $L(\theta)(t)$  függvény rögzített  $t = \tau$ -ra tekinthető a tárgy  $\tau$ -beli helyzetére vonatkozó, az adott észleléssorozathoz tartozó likeli-

hood függvénynek, amelynek maximum helyét a ML-becslés analógiájára a keresett tárgy  $\tau$ -beli helyzetének becsléseként fogadjuk el.

## 4. A matematikai modell felhasználása a lokalizáció kiterjesztésére

A vázolt matematikai algoritmus folytonosnak tekintette a teret. Mivel számítógéppel folytonos függvényeket nem tudunk kezelni, a gyakorlatban alkalmazható módszer megvalósítását a tér diszkretizálásával kezdtük. Így a térre  $\mathbb{R}^2$  helyett egy téglalap-rácsként tekintünk, és az észlelésekhez tartozó ismeretlen likelihood-függvényeket a rács elemi téglalapjain a sikeres észlelések relatív gyakoriságának felhasználásával pótoljuk. A különböző, elemi rács-téglalapokon végzett sikeres észlelések relatív gyakoriságának mérését tekinthetjük az eljárás kalibrálásának.

A modell teszteléséhez el kellett készítenünk egy olyan teszt környezetet, amely tartalmazza a fix kiépítésű RFID olvasókat, a kézi olvasóval ellátott robot egységeket, valamint azt a különleges antennát és olvasót, amelyet Bólogató Antennának neveztünk el. Ez a speciális olvasó képes arra, hogy GPIO (General-purpose input/output) porton keresztül vezérelje azt az antennát, amely három, vagy több patch antennát tartalmaz. Ezeket vezérelve meg tudja változtatni az antenna karakterisztikáját úgy, hogy az mindig a megfelelő irányba nézzen fizikai mozgás nélkül.

Ezáltal két, vagy több területet képes lefedni egyetlen antenna. Amennyiben ezt az antennát a matematikai alapú framework segítségével információval látjuk el, az intelligens módon a megfelelő irányba képes fordulni. Az ilyen módon kiterjesztett lokalizációs eszköz a nem látható, de a teszt környezetben biztosan jelenlévő transzpondereket a fix olvasókkal nem belátott területeken is képes megtalálni.

## 5. A mérési folyamat tesztelése

A mérési szakasz következő fázisa, és egyben fontos pontja a mérőeszközök, és a matematikai apparátus tesztje. Az elsőnél a mérési eredményeket kell visszavezetni a rendszerbe, és megmérni, hogy mekkora pontossággal tudjuk az adott (mért) transzponder helyzetét és helyét megállapítani.

A tesztadatokkal való mérésnél a lefedett terület alaprajzát vizsgálva megadtuk egy virtuális transzponder több ponton mért helyét, majd ebből az adatsorból eltávolítottunk pontokat. Ezzel szimuláltuk azt, hogy az adott

címke nem minden ponton volt mérhető, jelenleg nem látszik, és szeretnénk megbecsülni, hogy merre mozoghatott.

Virtuális környezetben egy 5x5 méteres teremben, amelyet 50cm x 50cm diszkrét térrészekre bontottunk fel elvégeztünk egy kísérletet, amelyben a transzponder mozgásához tartozó függvény 1 másodperc alatt 50 cm megtételét modellezi. A virtuális környezetben 3 db fix elhelyezésű antenna található. Az antennákhoz tartozó likelihood függvények értékét különböző pontokban megadtuk, majd a megadott pontokra interpoláltuk. A virtuális környezet diszkrétizált térrészeire számított likelihood függvényértékeket tároltuk.

A detektálások generálásakor az alábbiakat vettük figyelembe: A vizsgált időszak minden egyes másodpercében, minden antennához generáltunk egy  $[0, 1]$  intervallumba eső véletlen számot, amely az adott olvasás valószínűségét reprezentálta. Ezt követően vettük a tag adott időpontjában lévő térrészére eső adott olvasóhoz tartozó likelihood értékét és vizsgáltuk ennek viszonyát a generált értékhez képest. Ha a generált érték kisebb volt, mint az adott olvasó adott térrészre eső likelihood értéke, akkor azt mondtuk, hogy az olvasó abban a másodpercben detektálta a transzpondert és ezt az eseményt rögzítettük.

Ezt követően a rendszerrel megbecsültettük a transzponder koordinátáit, és az eredményeket összevetettük az eredetileg elképzelt mozgásokkal. Az így kapott eredményeken elindulva el tudtuk kezdeni a valós környezetben és valós időben működő tesztkörnyezet kialakítását.

A célunk megvalósításához, a kutatás jelenlegi szakaszában implementáltuk az RFID olvasóktól érkező, transzponderek helyzetét leíró adatok fogadására és tárolására alkalmas szerver alkalmazást. A rendszer komponensei REST protokoll használata mellett XML alapokon küldik és tárolják az adatokat a platform függetlenség érdekében.

Elkészítettük a labor környezetet, amely tartalmaz három fix kiépítésű antennát [2], több Intelliflex [1] típusú olvasót, és a korábban már említett bólogató antenna egy prototípusát. Mindezek mellett elkészítettük a tesztlabor lefedettségi térképét, és a résztvevő antennák karakterisztikájának a mérését is elvégeztük, vagyis kalibráltuk a teszt környezetet.

## 6. Jövőbeli tervek

Az eddigi eredmények felhasználásával szeretnénk a lokalizációs folyamatot további hozzáadott eszközökkel kiterjeszteni. Ilyen eszköz a transzponderek geolokációs információval való ellátása az észlelések pontosítása érdekében, és a bólogató antenna lokalizációs képességeinek javítása a több irányba való elfordítással, és az észlelési távolság megváltoztatásának lehetőségével.

A transzponderek geolokációs információkkal, vagyis az azok helyzetét meghatározó GPS alapú, és a rendszer által használt információkkal való ellátására a Bánlaki, J., Hoffmann, M., Juhász, T.: UHF RFID tags with user interface – the ability of individual control and a new source of information, RFID Journal, 2014 cikkében leírtak alapján az antennák Broad Cast alapú üzenetszórási képességeit fogjuk kihasználni, és ezzel a módszerrel biztosítani az információ áramlását az olvasók, valamint a transzponderek között.

A matematikai modellt is pontosítani szeretnénk, és a transzponderek becslésére használt függvények kiszámítási idejét felgyorsítani, hogy egyszerre minél több transzponder helyzetét ki tudjuk számítani valós időben.

Véleményünk szerint az általunk megkonstruált rendszer használható az RFID alapú lokalizációs folyamatok kiterjesztésére, és lehetőségünk nyílik a bevezetőben meghatározott cél elérésre, vagyis a viszonylag nagy területek lefedésére minél kevesebb olvasóval, így a lehető legkevesebb költséggel és erőforrás felhasználásával.

## Hivatkozások

- [1] INTELLIFLEX On-Demand Data Visibilty, <http://www.intelleflex.com/Products.asp>
- [2] INTERMEC By Honeywell, <http://www.intermec.com/>
- [3] QIANG LE AND LANCE M KAPLAN. Design of operation parameters to resolve two targets using proximity sensors. In *Information Fusion (FUSION), 2010 13th Conference on, pages 1–8. IEEE, 2010.*
- [4] QIANG LE AND LANCE M KAPLAN. Target localization using proximity binary sensors. In *Aerospace Conference, 2010 IEEE, pages 1–8. IEEE, 2010.*
- [5] J MIGUEZ AND A ARTES-RODRIGUEZ. Monte carlo algorithms for tracking a maneuvering target using a network of mobile sensors. In *Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, 2005 1st IEEE International Workshop on, pages 89–92. IEEE, 2005.*
- [6] RUIXIN NIU AND P VARSHNEY. Target location estimation in wireless sensor networks using binary data. In *Proceedings of the 38th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, 2004.*
- [7] RUŞEN ÖKTEM AND ELIF AYDIN. An rfid based indoor tracking method for navigating visually impaired people. *Turk J Elec Eng and Comp Sci*, 18(2),2010.
- [8] MAHESH VEMULA, JOAQUÍN MIGUEZ, AND ANTONIO ARTES-RODRIGUEZ. A sequential monte carlo method for target tracking in an asynchronous