
Sensor Network-Based Countersniper System

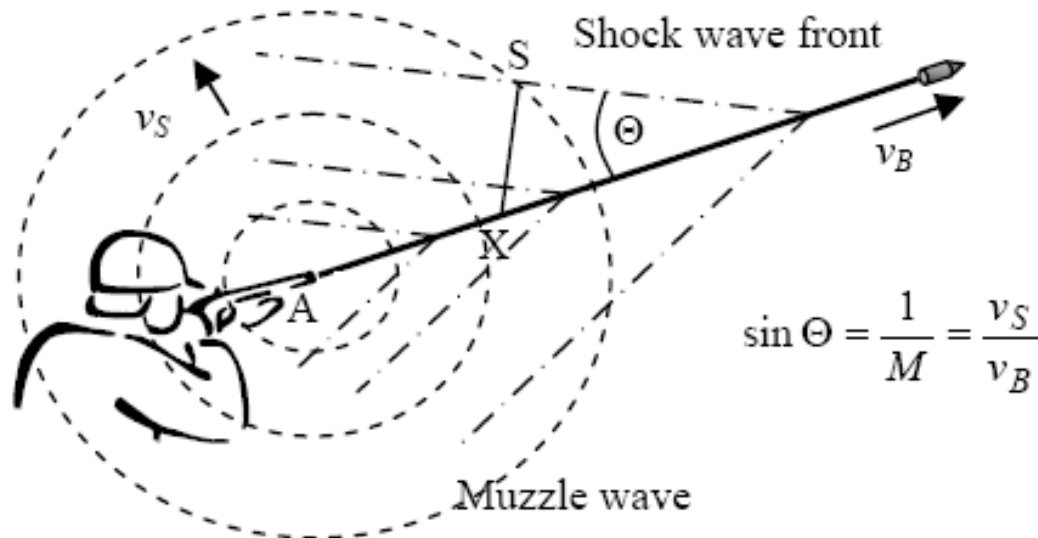
Simon Gyula, Maróti Miklós, Lédeczi Ákos, Balogh
György, Branislav Kusy, Nádas András, Pap Gábor,
Sallai János, Ken Frampton

Előadó: Kincses Zoltán

Bevezetés

- Számost lövész lokalizációs rendszert fejlesztettek ki az elmúlt évtizedben
 - Csak néhány használható városi környezetben
 - szegényes lefedettség
 - az épületek árnyékoló hatása
 - multi-path hatás
 - Viper rendszer
 - infravörös kamera a torkolattűz detektálására
 - mikrofon a torkolati légnyomás alapú távolság becslésre
 - a torkolattűz elfojtása esetén a rendszer nem használható
 - relatíve nagy hibás riasztási arány
 - Más megközelítések
 - a repülő golyó hő-képét mérik
 - az örvlövész megvilágítása lézerrel és a visszaverődések mérése
 - azonban egyik megoldás sem biztosít átfogó megoldást a problémára
-

-
- A legnyilvánvalóbb jelenség amit egy hagyományos fegyver tüzelés közben generál, a légnyomás
 - A torkolati légnyomás egy hangos jellegzetes zaj, ami a torkolattól indul és hangsebességgel egy gömb mentén terjed
 - Egy tipikus puska hangsebességgel lövi ki a lövedéket, amely ezáltal akusztikus lökéseket generál a röppályája mentén
 - Ezeket a lökeshullámokat fel lehet használni a lövedék röppályájának pontos meghatározásához
-



- A torkolati légnyomás egy gömb mentén terjed hangsebességgel (v_s) a torkolattól (A) a szenzorig (S)
- A lökeshullám a lövedék röppályájának minden pontjában generálódik
- Egy csúcs formájú hullámfrontot generál feltéve hogy a lövedék sebessége konstans (v_B)
- Az X pontban generált lökeshullám eléri az S pontban lévő szenzort
- A lökeshullám-kúp szöge a lövedék Mach (M) száma alapján határozható meg

-
- A kereskedelmi akusztikus orvlövész detektáló rendszerek ezt a jelenséget használják
 - Mérik a Time of Arrival-t (TOA) és a lökeshullám néhány jellemzőjét és/vagy a torkolati légnyomás TOA-jét
 - A BBN Bullet Ears rendszere két kis mikrofon tömböt alkalmaz (kaliber, sebesség, lövedék röppálya)
 - irány és távolság pontossága: 1.2° - 3° és 1,6%
 - A francia Pilar rendszer két mikrofon tömböt alkalmaz
 - irány és távolság pontosság: $\pm 2^{\circ}$ és $\pm 10\%$
 - A fenti rendszerek hátránya
 - centralizált (ha néhány szenzor nem detektálja a jelet akkor pontatlan lesz az eredmény)
 - fontos a látószög
 - a lövedék röppályája ne legyen takarásban
 - visszhang
-

-
- Megfelelő megoldást kínálhat sok szenzor együttes használata
 - jó lefedettség
 - nagy valószínűségű jeldetektálás
 - az egyes szenzorok mérései lehetnek pontatlanabbak
 - ezek a kevésbé kifinomult szenzorok kisebbek lehetnek
 - a pontosság mellett a rendszer robosztussága is növelhető
-

-
- Ezt alapul véve jött létre a PinPtr rendszer
 - ❑ ad-hoc szenzorhálózat, olcsó szenzorokból
 - ❑ a szenzorok szinkronizálják az óráikat, ön-lokalizációt hajtanak végre, majd várják az akusztikus lökéshullámokat
 - ❑ detektálják a torkolati légnyomást, akusztikus lökéshullámot, és mérik a TOA-t
 - ❑ TOA továbbítása a base station felé, ahol megtörténik a lövész lokalizáció
 - ❑ a rendszer a valóságban is többször tesztelve lett
-

Rendszer architektúra

- Hagyományos rétegelt architektúra
 - A hardver réteg
 - Mica2 mote
 - 7.3 MHz 8-bit Atmel ATmega 128L
 - 433 MHz, 38.4 kbps Chipcon CC1000 rádió adóvevő
 - 4 kB RAM 128 kB flash
 - szenzorkártya (foto-, hőmérsékletszenzor, páratartalom-, nyomás-, gyorsulásmérő, magnetométer, mikrofon)
 - Operációs rendszer réteg (TinyOS)
 - eseményvezérelt
 - feladat ütemezés
 - rádió kommunikáció
 - óra és időzítés kezelés
 - ADC, I/O és EEPROM absztrakciók
 - energia menedzsment
-

■ Middleware réteg

□ idő szinkronizáció

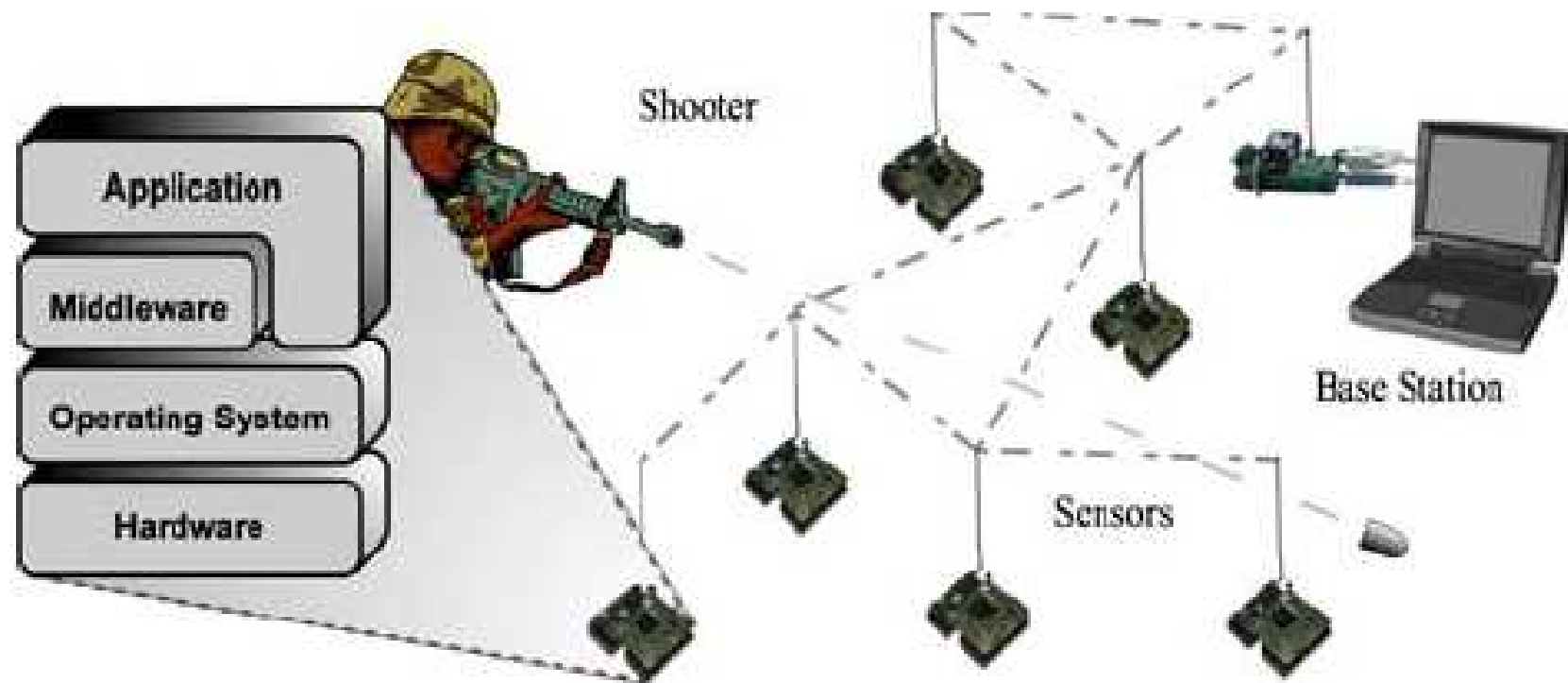
- FTSP idő szinkronizáció (pontosabb időzítés, nagyobb pontosság, kisebb érzékenység a multi-path hatásra)

□ üzenet route-olás és adat aggregáció

- a kis multi-hop késleltetés elérésére
- az ütközések kiküszöbölésére (a lövéskor minden szenzor egyszerre adna)

□ ön-lokalizáció

- szenzor pozíció biztosítása az adat fúziós algoritmusnak
-





- A Mica2 mote-ok a fenti többcélú akusztikus szenzor kártyához csatlakoznak
 - Három független akusztikus csatorna
 - minden csatornához mikrofon, erősítő, állítható erősítés, ADC
 - Xilinx Spartan-II FPGA
 - jelfeldolgozás
 - osztályozó algoritmus az akusztikus események megkülönböztetésére (torkolati légnyomás, lökeshullám, egyik sem)
 - TOA mérése
-

Idő szinkronizáció

- Az RBS megközelítés csak a vevő oldalon végez időbélyegzést
 - a küldő oldali véletlen késleltetések kiküszöbölése
 - pontosság 29.1 us single-hop esetben
 - A TPSN megközelítés eltávolítja a
 - hozzáférési késleltetést
 - terjedési késleltetést
 - pontosság 16.9 us
 - Nem veszik figyelembe
 - kódolási, dekódolási időket
 - megszakítás kezelési időket
-

-
- Az FTSP növeli az RBS és a TPSN pontosságát, az elküldött üzenetek többszöri időbélyegzésével
 - ❑ kevesebb kommunikációs overhead
 - ❑ multi-hop esetben minden node egy root node-hoz szinkronizál
 - ❑ pontosság 1,4 us single-hop esetben 1,6 us multi-hop esetben hop-onként
 - ❑ broadcast hierarchia
-

Üzenet route-olás

- A rendszer pontosságának biztosítása érdekében a TOA üzeneteket maximális kézbesítési aránnyal kell továbbítani
 - A mérések a lövész és a golyó pályagörbéje körüli területről származnak és azonos időben továbbítódnak
 - Gyors gradiens alapú „best effort” converge-cast protokoll alkalmazása beépített adat aggregációval
 - ❑ adatcsomagok route-olása egy kiválasztott node-tól a root-ig
 - ❑ egy node 0-szor, 1-szer , vagy többször küld újra egy csomagot amíg vissza nem kapja egy a root-hoz közelebbi node-tól
 - ❑ a protokoll emlékszik minden egyes adat csomagra egy bizonyos ideig
-

Szenzor lokalizáció

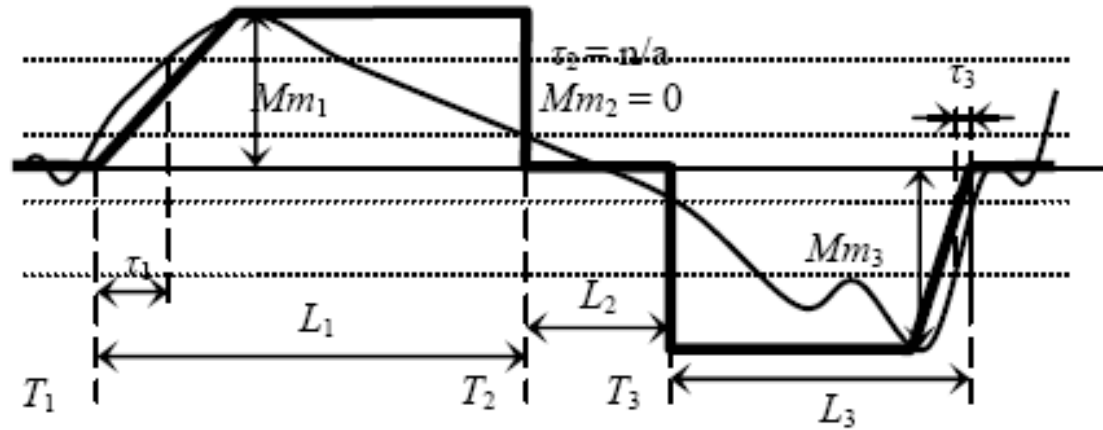
- Az ön-lokalizációs algoritmus node párok közötti akusztikus távolságmérésen alapszik
 - Az itt alkalmazott eljárás a Mica2 mote-okon található mikrofonra és csipogóra alapszik
 - a forrás node egy rádió és többszörös „chirp”-et küld
 - a cél node mintavételezi a mikrofont és összeadja a mintákat
 - sáváteresztő szűrőt és csúcsdetektálást alkalmaz hogy meghatározza a „chirp” kezdetét
 - a távolság végül a „chirp” TOF-ja alapján határozható meg
 - Slot negációs algoritmus alkalmazása az akusztikus távolság mérés ütemezésére
 - Pontosság: 11 cm
 - Legnagyobb hiba: 25 cm
-

-
- A pontosság megfelelő az orvlövész detektáló rendszernek azonban
 - 4 szomszéd szükséges 10 méteres körzetben a pontos 3D-s lokalizációhoz
 - a csipogó megnöveli a szenzorkártya méretét és a fogyasztását
 - a hallható frekvencia könnyebben felfedezhetővé teszi a mote-okat
 - A fenti problémás kiküszöbölésre alkalmazható
 - passzív akusztikus szenzor lokalizáció
 - A lokalizáció nem egyszeri feladat
 - a node elmozdulhat, új node kerülhet a rendszerbe
 - újraszámítás szükséges
 - gyorsulásmérő jelzései alapján
 - a fúziós algoritmus alapján
-

Jel detektálás

- Az akusztikus jel detektáláshoz egy akusztikus kártyát használtak 3 független csatornával
 - A kezdeti terv detektálni a TDOA-t és az AOA-t mind a lökéshullám, mind pedig a torkolati hullám esetében
 - A szög detektáláshoz precíziós magnetométer kell
 - Ezért az egy csatornás TOA mérés és a base station-on történő szenzor adatfúzió mellett döntöttek
-

-
- A jelfeldolgozást egy Xilinx Spartan-II FPGA végezte
 - Az akusztikus jel tömörítése a ZC kódolással
 - Az akusztikus esemény TOA-jét az FPGA belső órája alapján határozták meg és tárolták el
 - A Mica2 mote kiolvasta ezeket az adatokat, és időszinkronizációt végzett az akusztikus kártyával
 - A jeldetektáló algoritmus robosztus
 - a training események 100%-át felismerte
 - több mint 90%-át az egyéb felvett lövéseknek
 - nehéz hibás jelzést kicsikarni, a mikrofon megütése nélkül
 - néhány kártya érzékeny volt a szélre, de ez kiküszöbölhető volt a mikrofonok érzékenységének állításával
-



- Az akusztikus jel zero-crossing (ZC kódolása)
- A vékony vonal az eredeti jel
- A szaggatott vonalak a komparálási szintek
- A vastag vonal a kódolt jel
- Jelölések
 - T az indulási idő, Mm az amplitúdó, L a hossz, τ a felfutási idő

Szenzor fúzió

- Kétlépes technika alkalmazása
 - TDOA meghatározás
 - hely meghatározás
 - a szükséges sáv szélesség igény elfogadható
 - Mivel egy szenzor-pár adatai egy hyperboloid felületet adnak, négy mérés elegendő a 3D-s pozíció meghatározásához
 - hiba a detektálásban, a lokalizációban, és az idő szinkronizációban
 - több mérés alkalmazásával javíthatóak ezek a hibák
 - A konvencionális eljárások jól működnek a zajos helyeken, de rosszul ha nincs direkt rálátása a szenzoroknak
 - A városi területeken a szenzor adatok 10-50%-a hibás
-

-
- Ennek megoldása érdekében fel kell használni a lökéshullámok és a torkolati légnyomás TOA méréseit
 - Ezek alapján a szenzorok pozíciója egy 4 dimenziós konzisztencia függvényel definiálható
 - Gyors kereső eljárással a maximum meghatározható
 - intervallum aritmetikán alapuló általánosított Bisection eljárás
 - A maximum lesz a lövész becsült pozíciója
 - A konzisztencia függvény automatikusan osztályozza és kiküszöböli a hibás méréseket és a multi-path hatást
 - A konzisztencia függvényben a többszörös lövés többszörös lokális maximumként jelentkezik
-

Konzisztencia függvény

$$C_{\tau}(x, y, z, t) = \text{count}_{i=1, K, N} (|t_i(x, y, z, t) - t_i| \leq \tau)$$

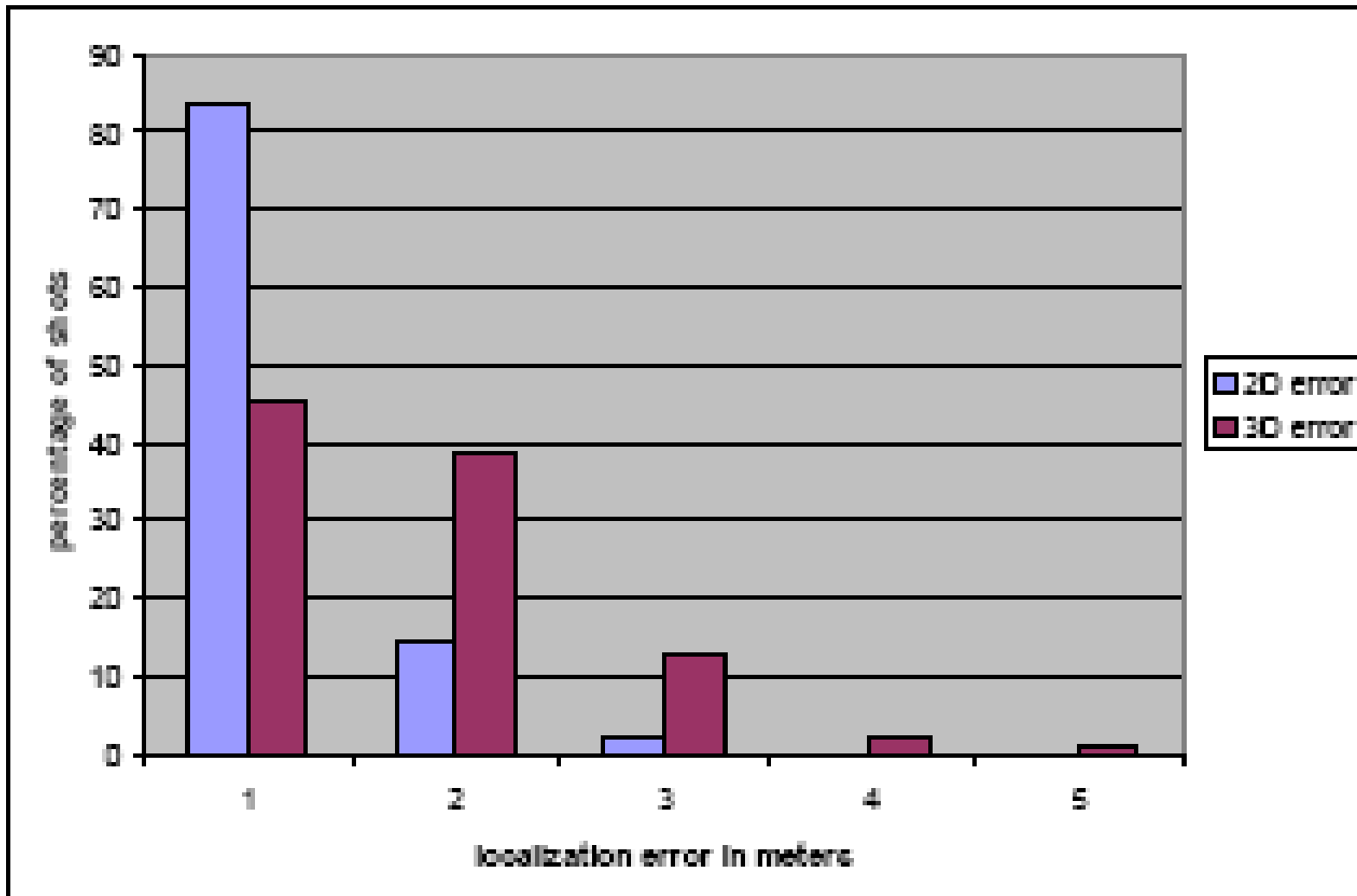
ahol

$$t_i(x, y, z, t) = t + \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{v}$$

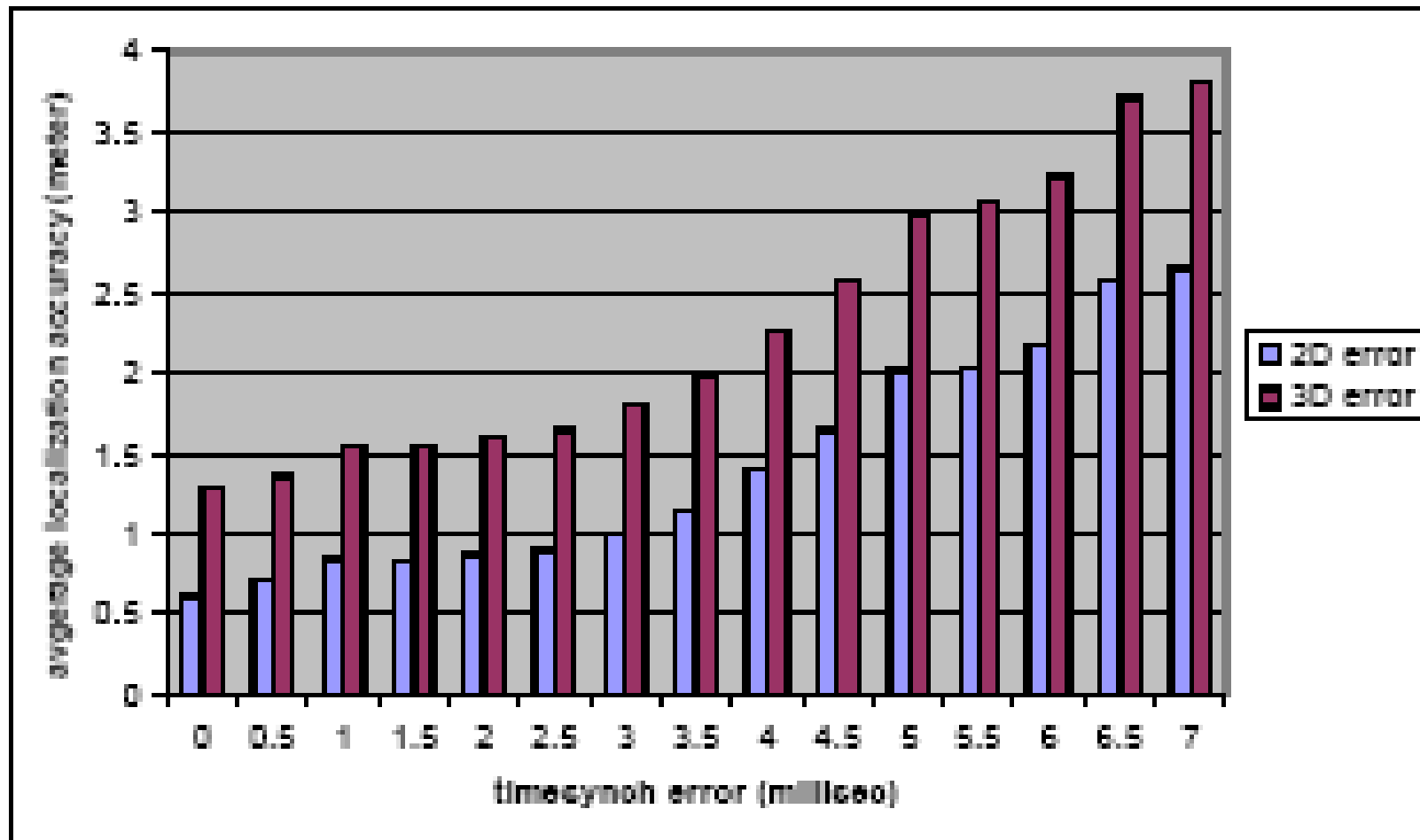
Eredmények

- A rendszer a McKenna MOUT tréning központban lett tesztelve
 - A rendszer FTSP-t és gradiens alapú converge-cast eljárást használt
 - A tesztben 56 mote-ot használtak
 - A hiba meghatározására 20 különböző előre meghatározott lövész pozíciót használtak
 - 171-szer lőttek a kísérlet alatt
 - 101 vak tölténnyel
 - 70 SRTA-val
 - nem volt a két eset között különbség
-

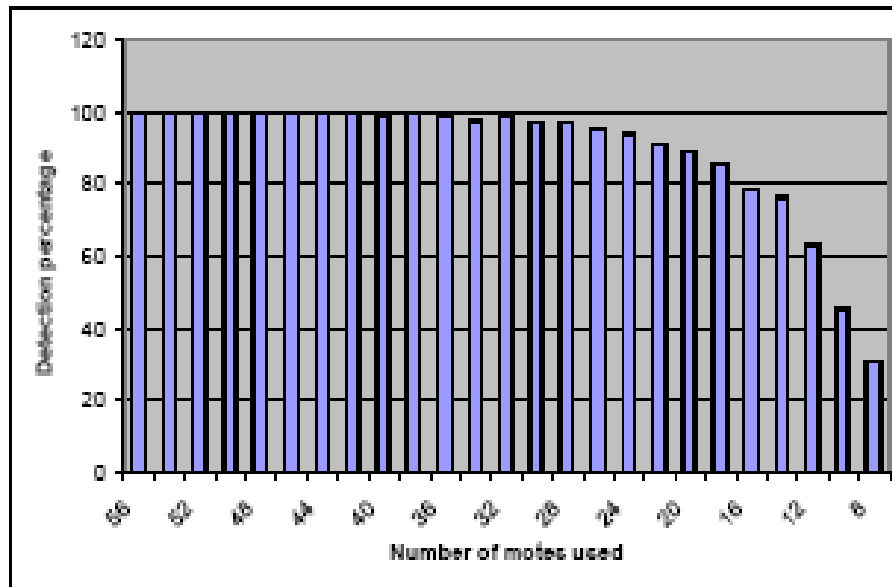




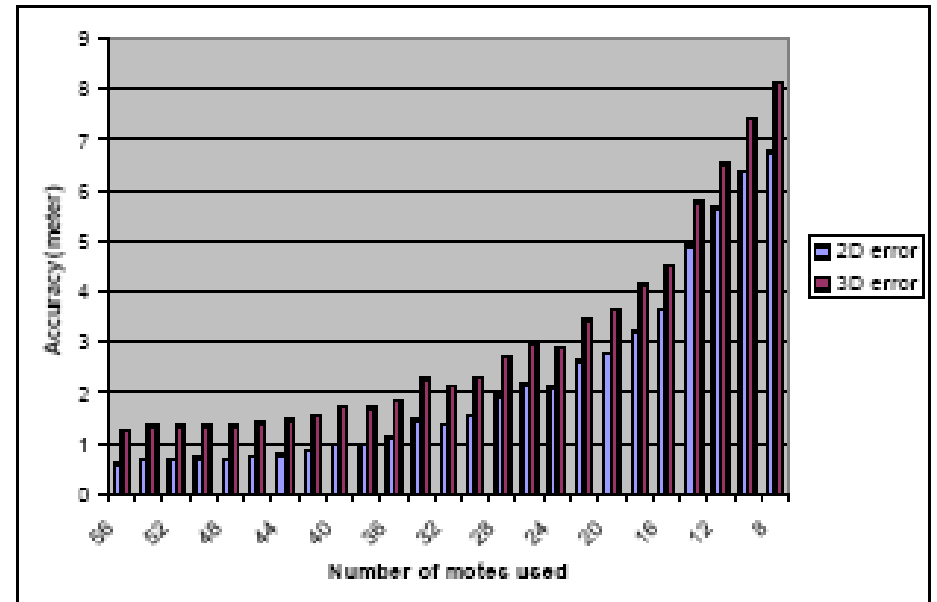
Hibaforrások



Szenzor sűrűség



Detekciós arány szemben a használt szenzorok számával

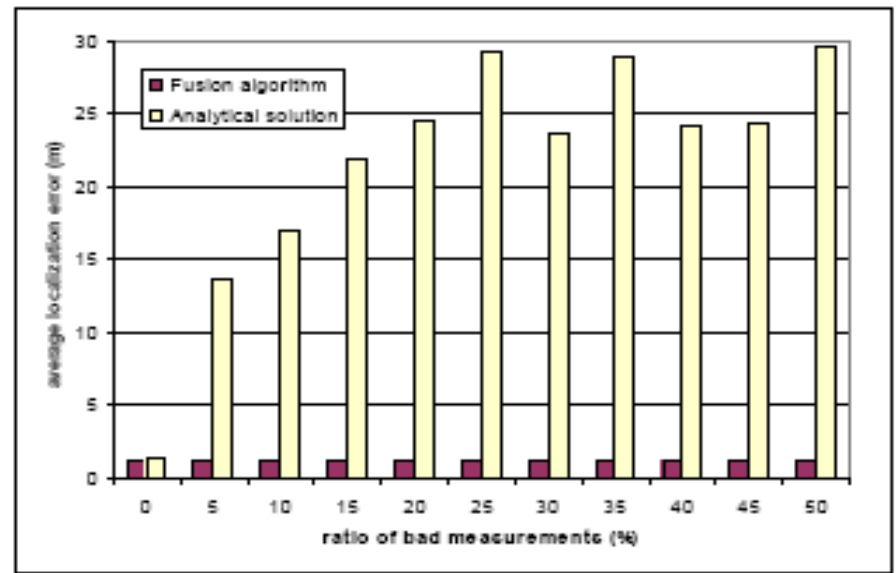


Lokalizációs pontosság szemben a használt szenzorok számával

Szenzor fúzió

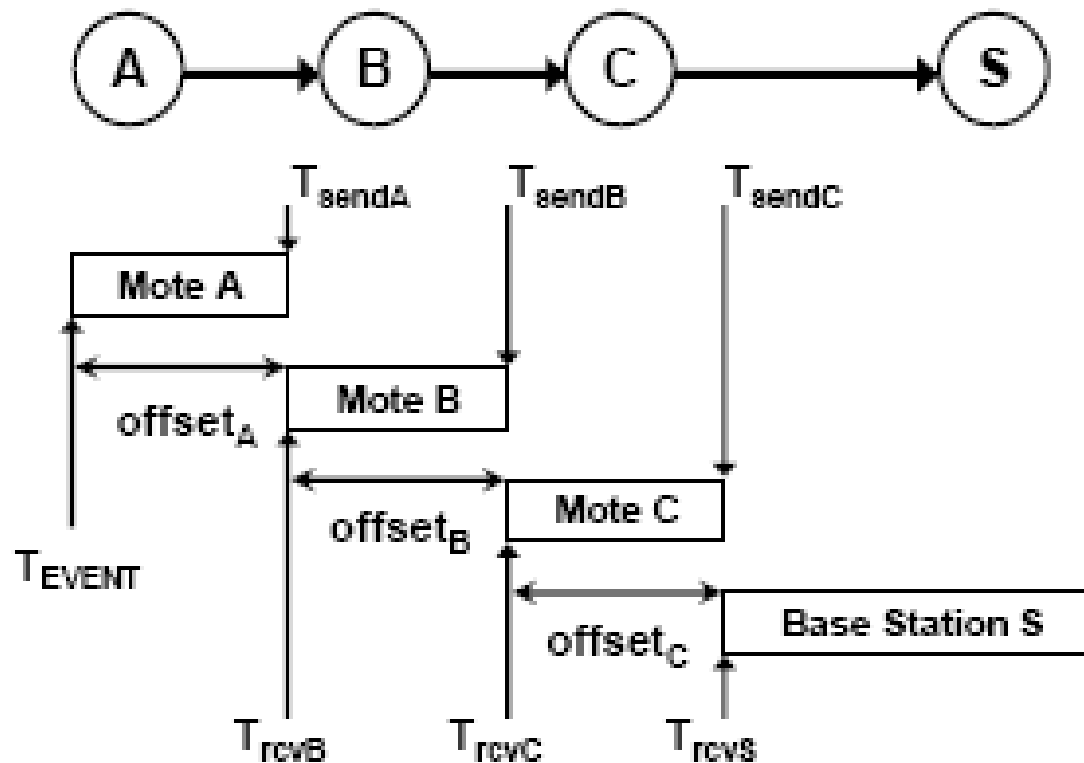


A lokalizációs hiba hisztogramja a fúziós és az analitikus megoldások esetén



Az átlagos lokalizációs hiba szemben a rossz és a jó mérésekkel

Idő szinkronizáció



Jövőbeli tervek

- Energia menedzsment
 - Többszörös lövések kezelése
 - Folyamatos szinkronizáció helyett post-facto szinkronizáció
 - Dinamikus passzív re-lokalizáció
 - CONOPS
 - konvoj útvonalának védelme
 - felderítő egységek védelme
-

Köszönöm a figyelmet
