



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Híradástechnikai Tanszék

Szeile Aliz

**SZENZORHÁLÓZAT ALAPÚ
HELYMEGHATÁROZÁS
VIZSGÁLATA NAPRENDSZERBELI
ÉGITESTEN**

KONZULENSEK

Dr. Bacsárdi László
Dr. Huszák Árpád

BUDAPEST, 2012

Összefoglaló

Szenzorok alkalmazása nagy segítséget nyújthat a távoli égitestek feltérképezésében, az ott uralkodó viszonyok felderítésében. Ezek által egyre tágabb és részletesebb képet kaphatunk a körülöttünk lévő kisbolygókról. Nem csak új információkat tudunk szerezni róluk, hanem meg tudjuk figyelni, hogy a már meglévő adatok, miként és milyen gyorsan változnak, a bolygó alakulása hogyan történik. Ezért a témámban egy olyan szenzorhálózatot vizsgáltam, ami egy naprendszerbeli égitest felszínén is megállja a helyét.

A szenzorhálózat elméleti kialakításánál figyelembe vettem a költséghatékonyság mellett a hálózat teljesítményét is. Ezért a szenzor boly tartalmaz néhány nagyobb teljesítményű szenzort is, amelyek dedikált feladata az adatok begyűjtése a többi, kisebb teljesítményű szenzortól és ezek átküldése a műhold számára, amely képes azokat továbbítani a Földre.

A szenzorhálózat struktúráját úgy állítottam össze, hogy fontos legyen a szenzorok helyzetének meghatározása. Ezáltal tudjuk bemérni, hogy a mért adatok honnan származnak, így például egy kisbolygón talált víz, talajminta helyzetét nagyrészt pontosan be lehet azonosítani. Tehát a helymeghatározás bármilyen naprendszerbeli égitest feltérképezésében nagy szerepet játszik. A pozicionáláshoz a háromszögelés módszerét használtam. Eszerint három szenzor segítségével meghatározható egy másik szenzor helyzete. A már említett nagyobb teljesítményű szenzorok ismerik saját pozíciójukat, ezáltal kis mérési hibával meghatározható egy kisebb teljesítményű szenzor helyzete is. Azonban több lépcsős pozicionálás esetén a mérési hiba torlódik, így lesznek olyan szenzorok, amelyek helyzete nem határozható meg pontosan, elcsúszik a becslés. Ezt a jelenséget vizsgáltam meg több oldalról is.

Ehhez C++ nyelven készítettem egy szimulációs programot, ami az általam felállított szenzorhálózatot modellezi le. A szimulációs programot úgy terveztem, hogy különböző vizsgálni kívánt elemek paraméteresen legyenek megadhatóak. Így megfigyelhető például, hogy mennyire függ a hiba torlódása a szenzorok számától, mozgásától, a megengedett hibaszázalék növelésével mennyi szenzort veszítünk el a kiszámítható területről. Figyelembe vettem egyes naprendszerbeli égitesteken kialakulható jelenségeket is. Ilyen a talaj domborzatának hatása a mozgékonyagra, illetve a porvihar jelensége, ami azt eredményezi, hogy a szenzorok egy időre elveszítik egymással a kapcsolatot.

Abstract

Sensors can have big advantages in the process of mapping planets and inspecting the prevailing conditions on their surfaces. We can obtain broader and more thorough pictures about the solar system bodies around us. Not only we can gain new information about them, but we can observe how fast and in what way the already known data changes, and how these planets develop. For this purpose, I examined a sensor network that can withstand the environment on a planet in our solar system.

During the abstract development phase I analyzed in the network's performance as well as its cost-effectiveness. The network contains some higher performance sensors, whose dedicated purpose is to collect data from the other-, (smaller) sensors, and forward this information to the satellites, which can send it back to Earth. I created the sensor network's structure in a specific way, which allows to pinpoint the location of these devices. Localization is an essential part of the mapping of any planet in the solar system.

I used the triangulation technique for the positioning which allows to locate a fourth sensor using three other one. The previously mentioned higher performance sensors know their own positions, therefore a smaller sensor's position can be calculated within a small margin of error. However, the measurement errors build up with a multi-level localization method, leading to the malfunction where the sensors' position cannot be calculated precisely, because the prediction has shifted so much. I examined this effect from multiple angles.

For modeling the sensor network, I developed a C++ simulation program. I designed the simulation program in such a way that the different components can be included with their parameters. It can be easily calculated how much the measurement error build-up depends on the number of sensors, their movement and by increasing the allowed error percentage how many sensors do we lose from the trackable area. I considered the different environmental factors which can develop on a planet, e.g., ground relief's effect on the mobility, dust storms which can lead to the sensors losing each other for a period of time.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Úrkutatás és szenzorhálózatok	2
2.1 Úrkutatás.....	2
2.2 Szenzorok, szenzorhálózatok általános bemutatása	5
2.3 Szenzorhálózat alapú pozícionálás módszere.....	7
2.3.1 A helymeghatározás története	7
2.3.2 A helymeghatározás alkalmazása.....	7
2.3.3 A helymeghatározás számításának alapjai	8
2.3.4 A kialakított szenzorhálózat alapvető felépítése	9
2.3.5 Háromszögelés alkalmazása a kialakított szenzorhálózatban	11
2.3.6 Matematikai számítások	11
2.3.7 Hibatorlódás	13
2.3.8 Háromszögelés algoritmus a szenzorhálózatra.....	14
3. Pozícióbecslés hibaterjedésének vizsgálata	15
3.1 A program általános működése	15
3.1.1 Paraméterezés.....	15
3.1.2 Háromszögelés függvény	16
3.2 Szimulációk	17
3.2.1 Szenzorok mozgásának szimulálása.....	17
3.2.2 Hibatorlódás szimulálása.....	18
3.2.3 Gödör szimulálása	18
3.2.4 Porvihar szimulálása	19
3.2.5 Statisztikai adatok	20
4. Vizsgálat eredményei.....	21
5. Összefoglalás	27
Irodalomjegyzék.....	28

Ábrajegyzék

1. ábra: A Holdről alkotott ismereteink régen és napjainkban
2. ábra: A Vénuszról alkotott ismereteink régen és napjainkban
3. ábra: A Mars felszíne egy 2012. szeptember 28-án készült fotón
4. ábra: Háromszögelés szemléltetése
5. ábra: A háromszögelés geometriája
6. ábra: A szenzorhálózat kiinduló környezete
7. ábra: Egy szenzor mozgása a meghatározott területen belül
8. ábra: Szuperszenzorokból számolt szenzorok számának változása a hatótávolság függvényében
9. ábra: Lépésenkénti szenzorokra átlagolt hiba a hatótávolság függvényében
10. ábra: Lépésenként a szenzorokra átlagolt hiba a megengedett hiba maximális értékének függvényében
11. ábra: Kiszámolható pozíciójú szenzorok százalékos értéke a szenzorok számának függvényében
12. ábra: A leszakadó szenzorok száma a porvihar idejének függvényében
13. ábra: A gödör miatti meredeksége a 14-es indexű szenzornak
14. ábra: Szenzorok helyzetének kiszámíthatósága a gödör függvényében

1. Bevezetés

A naprendszerbeli égitestek vizsgálatai, azok módszerei és ezeknek a módszereknek a hatékonysága különösképp foglalkoztatott. Ezek adták az ötletet arra, hogy olyan szenzorhálózatokat vizsgáljak, amelyek egy távoli égitest felszínén helyezkednek el. Kiváltképp érdekelt, hogy ezek mérései milyen körülmények között történnek és a módszerek mennyire hatékonyak. A magyar űrkutatásban nagy előrelépés a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen készült Masat-1 műhold felbocsátása 2012 februárjában, ami a legfőbb kiváltó ok a témám kiválasztásában. Ez volt az egyik legnagyobb inspirációs tényező számomra.

Munkám nagyrészt a távoli égitestek felderítésére használható szenzorhálózatok alkalmazhatóságának és hatékonyságának vizsgálatából állt. Egy olyan szenzorhálózatot feltételeztem, amelyben a pozicionálás elhagyhatatlan jelentőséggel bír, ehhez pedig a szenzorok közötti kapcsolat fenntartása is fontos. A vizsgálataim eszköze egy általam írt szimulációs program volt, ennek a kimeneteli eredményeit használtam fel. Ezeket az eredményeket elemeztem, szemléltettem grafikonokon, amelyek kellően részletes képet adnak a szenzorhálózat hatékonyságának és működésének összefüggéseiről.

A dolgozatom gerince három nagyobb fejezetből áll, majd a végét egy összefoglaló zárja le. A második fejezetben az alapötletem elméleti hátterét mutatom be. Kifejtem, hogy miért is olyan jelentős napjainkban az űrkutatás és ebből kifolyólag a vizsgálatok, mérések megvalósítása érdekében a szenzorhálózatok. Bemutatom, hogy az égitest felszínén elhelyezett szenzorhálózatot, hogyan is érdemes alkalmazni, milyen tulajdonságú szenzorok szükségesek hozzá, hogy hatékonyan működjön. A mért adatok tulajdonságai miatt fontosnak tartom, hogy ismerjük a mérések pozícióját. Ezért építettem bele az ötletembe a háromszögelés módszerét, ami szerint a szenzorok bizonyos feltételek mellett meg tudják határozni egymáshoz viszonyított helyzetüket. Erről egy általánosabb összefoglalót is írtam, és egy a matematikai módszerén alapuló algoritmust állítottam össze. A harmadik fejezetben a pozícióbecslés hibajelenségeit vizsgálom. A helymeghatározás szempontjából fontos, hogy minél pontosabb számításokat végezzünk, a hibákkal tisztában legyünk és tudjuk kezelni őket. A fejezetben röviden, áttekintés szintjén mutatom be az általam használt programot, a hangsúlyt a vizsgálatok mikéntje kapja. Ahhoz, hogy a távoli égitest felszínét jellemezni tudjam, két általánosabb jelenséget vettem alapul. Ezek a szenzorok közti kapcsolat megszakadását eredményező úgynevezett porvihar és az egyenetlen terepviszonyokból fakadó problémák. A negyedik fejezetben magukat az eredményeket elemzem. A számszerű adatokat grafikonokon szemléltetem és az eredményre magyarázatul szolgáló összefüggéseket írom le. Többféle függőséget is megnéztem, amelyek a szenzorhálózat hatékonyságát befolyásolhatják. A dolgozatot egy összefoglaló rész zárja le, amelyben egy áttekintő képet adok a szenzorhálózat alkalmazásáról, az eredményekről és a következtetésekről.

2. Űrkutatás és szenzorhálózatok

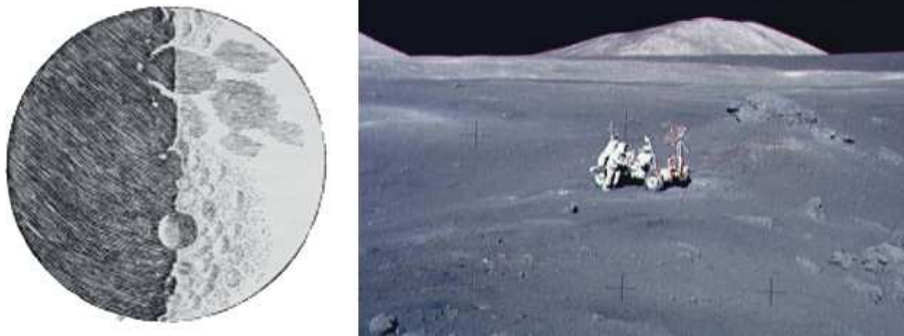
Ebben a fejezetben bemutatom, hogy miért tartom fontosnak szenzorhálózatok alkalmazását a bolygókutatásban, különösen, ha egy távoli égitest felszínére koncentrálunk. Majd egy motiváló áttekintés következik a bolygókutatás néhány oldaláról, ezután ismertetem a szenzorhálózatok általános felépítését, és egy pozicionálási megoldást.

2.1 Űrkutatás

Galileo Galilei kutatásai óta a Naprendszerrel alkotott képünk egyre részletgazdagabb és terjedelmesebb lett. Ma már nem csak távcsövekkel, hanem űrszondákkal és műholdakkal is vizsgálják a világűr. Ennek következtében, főleg az utóbbi 40 évben ismereteink egyre gazdagabbak lettek, ugyanakkor egyre több a felvetődő kérdés is.

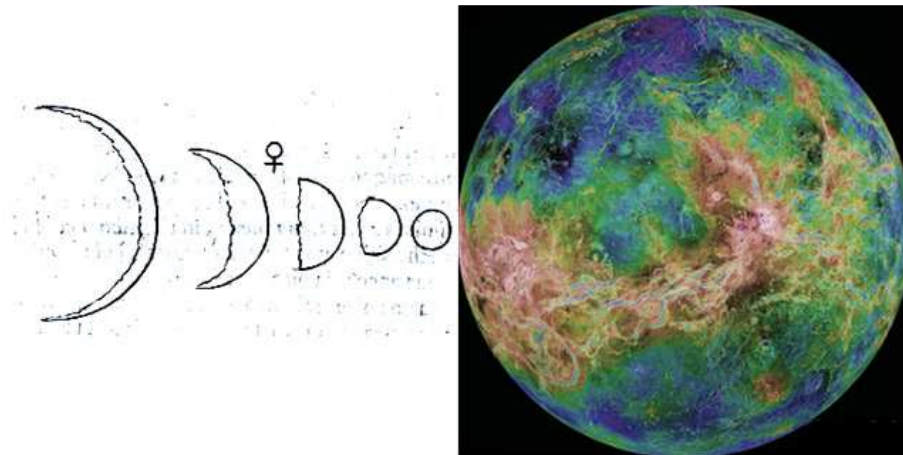
A Nature című folyóirat 2010. július 29-i számában közölt egyik cikke remekül rámutat a Galilei kora óta történt jelentősebb fejlődésekre [1].

Az 1. ábrán és a 2. ábrán látható képek jól mutatják a megfigyelő eszközeink fejlődését. A bal oldali képeken a kezdetleges megfigyelési eredményeket láthatjuk, míg a jobb oldali képeken a korunkbeli megfigyelések eredményeit. A különbség szembeütő, nemcsak részletességében fejlődtek, hanem sokkal pontosabb és hitelesebb képeket kaptunk. Míg Galilei korában még csak vázlatrajzok és becslések alapján dolgoztak a tudósok, ma már pontos mérések és részlet gazdag fényképek segítik a munkájukat.



1. ábra

A Holdről alkotott ismereteink régen és napjainkban
A Hold Galilei távcsövén át (balra) és az Apollo program keretében a helyszíni vizsgálatok során (jobbra)



2. ábra

A Vénuszról alkotott ismereteink régen és napjainkban

A Vénusz fázisainak felismerése (balra) és a bolygó radartérképezése (jobbra)

Ezek a fejlődések következtében mára már jóval több ismeretünk van a bolygókról, és a rajtuk uralkodó körülményekről. Erre nagyszerű szemléltetés az amerikai űrkutatási hivatal, a NASA honlapjáról származó fotó a 3. ábrán, amely 2012. szeptember 28-án készült a Mars felszínéről [2].



3. ábra

A Mars felszíne egy 2012. szeptember 28-án készült fotón

Az űrtevékenységnek köszönhetőek a modern kommunikációs és navigációs rendszerek, és egy új tudományág is született, a planetológia, mely középpontjában bolygókutatás felderítő és felfedező mivolta áll. Ennek eredményeképpen a fizika, kémia és földtudományok ismeretei is gazdagodtak. Nem csak a tőlünk több fényév távolságra lévő bolygókról tudunk meg többet, hanem a saját Földünkről is. A bolygónk alakulásának okait más fényben tudja megvilágítani.

Nem csak az űreszközök fejlődtek, de azok alkalmazása is sokat változott az évek során. Kezdetben még csak a Föld körül keringő megfigyelőket használták. Ezután következett a távolabbi égitestek elérése, például a Hold, távolabbi bolygók, később a kisbolygók is. Itt még az égitestek melletti elrepülés volt a cél, így rövid ideig ugyan, de lehetett felvételeket

készíteni. Az első ilyen elért célpont a Hold volt, 1959. január 2-án. Ezeket követték a becsapódó szondák, amelyek a becsapódás előtti időt használták fel fényképezésre. Később a leszálló, illetve pályára álló szondák következtek. Ezek után a fő cél az volt, hogy felderítsék a terepet az űrhajósok leszállásához. Részletes vizsgálatokat folytattak, ahol lehetett, ott talajmintákat néztek, vizet kerestek, hőmérsékletet mértek, légköri jelenségeket figyeltek meg. Ezáltal tudták meghatározni, hogy egy egy nehezebb szonda például képes-e leszállni az adott égiest felszínére.

2010 nyarán adták hírül, hogy felfedeztek egy, a mi Naprendszerünkhöz hasonló bolygórendszert [3]. Mindez azt mutatja, hogy tanulmányozhatunk komplex bolygórendszereket is. Ez alapján a felszíni vizsgálatok egyre fontosabbá válnak. Előre tekintve ezek a felfedezések maguk után vonzzák az űreszközök további fejlődését, új módszerek kialakítását a vizsgálatokra, megfigyelésekre.

Számos magyar vonatkozású űrtevékenységhez kötődő eszköz is ismert, Az űrkorszak kezdete óta eltelt évtizedekben hozzájárultunk az űrkutatás tudományához, akár műholdátviteli kísérletekről, akár fedélzeti eszközökről, akár olyan sugárzásmérő készülékről is van szó, mint a Pille. Napjainkban, hazánkban egyre nagyobb teret kap az űreszközök fejlesztése is. Erre nagyszerű példa a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen készült Masat-1 műhold is. A szenzorhálózatok irodalma meglehetősen ismert, a modern űrkutatás területén alkalmazható szenzorhálózatok azonban nagyban segíthetik a felszíni megfigyeléseket. A távoli égitest felszínén alkalmazható szenzorhálózatok esetében a költséghatékonyság mellett nagy előny a széleskörű felhasználhatóság. Apróbb változtatásokkal az alap hálózat többféle mérési funkciókat is elláthat. Ezért szeretném mélyebben bemutatni ezt a témát a következő fejezetekben.

2.2 Szenzorok, szenzorhálózatok általános bemutatása

A szenzorhálózatok alkalmazása széles körben elterjedt. Használják őket akár az egészségügy, katasztrófavédelem, tudományos megfigyelések terén is, ezért nagy szükség van a szenzorhálózatokra.

A hálózat építőkövei a szenzorok, amelyek fizikai jelenségek mérésére képesek. (pl. hőmérséklet, fény, páratartalom) és a mért adatokat képes továbbítani egy speciális építőelem, a nyelő felé.

A szenzorhálózatok esetében általában nagy darabszámú, olcsó eszközökre gondolunk. Emiatt általában egyszerű eszközökről beszélünk, amelyeknél az erőforrás utánpótlás nehezen kivitelezhető feladat. Például, ha a szenzorhálózat egy távoli égitest felszínén helyezkedik el, akkor az egyes elemek a költséghatékonyság miatt nem rendelkezhetnek nagy napelemmel illetve nagy generátorral/akkumulátorral. Ezért fontos, hogy a lehető legkevesebb energiafelhasználással használjuk a szenzorok funkcióit. Ezen hatékonyan lehet segíteni, ha a szenzor csak az alapvető funkciókkal rendelkezik, amelyek kevés energiát emésztnek fel. (mérések, kommunikáció, stb.) Illetve a költséghatékonyság szempontjából az is fontos, hogy csak kevés szenzor legyen képes nagy energiatartalékok tárolására. Ilyen jellegű szenzor a nyelő is. Nagyobb energiával rendelkeznek a többi szenzorhoz képest, ez biztosítja a mérési adatok továbbküldésének a lehetőségét. Ebből következik, hogy megfelelő számú nyelőt kiválasztva hatékony hálózatot tudunk felépíteni. Ha a szenzoroknak elég csak a nyelő felé kommunikálni, akkor ez jelentős energiaspórolást eredményezhet.

A szenzoroknak három főbb fajtáját különböztethetjük [4]:

1. eseményvezérelt szenzor,
2. lekérdezés vezérelt szenzor,
3. idővezérelt szenzor.

Az eseményvezérelt szenzor esetében egy adott esemény a katalizátora az adatküldésnek. A lekérdezés vezérelt szenzorokból álló hálózatnál a nyelő intéz egy kérést a szenzorok felé, és ekkor kezdenek adatot küldeni. Az idővezérelt szenzorok esetében pedig egy meghatározott időközönként történik meg az adatküldés.

Magának a szenzorhálózatoknak két nagyobb csoportja van, angol szakszóval a single-hop, illetve a multi-hop. A single-hop esetében a szenzorok csak egy lépcsőben tudnak kommunikálni, azaz közvetlenül a nyelővel tudnak kapcsolatot teremteni. A multi-hop hálózatokban azonban a szenzorok egymás között is tudnak adatot átküldeni, így az adat több lépésben jut el a nyelőhöz.

Napjaink szenzorjainak nagy előnye, hogy nem csak rögzített vagy vezetékes változatuk létezik, hanem a vezeték nélküli összeköttetés révén mozgásra is képesek. Ez két szempontból hasznos: A kezdetben le nem fedett területekre is kerüljenek szenzorok, illetve a szenzorok adott területen belüli egyenletes eloszlását könnyebb legyen fenntartani. Azon pontok halmazát, amelyek az adott szenzorhoz vannak a legközelebb Voronoi tartománynak nevezzük [5]. Ennek a tartománynak a kiszámítása után megállapítható, hogy ha a szenzor érzékelési sugara kisebb, mint a Voronoi tartomány bármely pontjától való távolság, akkor

van olyan térrész, amely nincs lefedve. Ez a megfigyelés a mozgás végrehajtásában játszik fontos szerepet. Az alábbi mobilitási stratégiákat tartom fontosnak megemlíteni [4].

- Első a VEC (VEctor-based algorithm). Ez esetben a célunk az egyenletes eloszlás kivitelezése. Ahol sűrűbben helyezkednek el a szenzorok, onnan átmozgatunk annyi szenzort egy kevésbé lefedett területre, hogy az eloszlás minél inkább kiegyenlített legyen.
- Második mobilitási stratégia a VOR (VORonoi-based algorithm). Itt a szenzorok a Voronoi tartomány segítségével meghatározott „lyukak”, nem lefedett területek felé mozognak.
- Harmadik stratégia a Minimax, ami nagyban hasonlít a VOR-hoz. Itt azonban azt is figyelembe kell venni a mozgás során, hogy ne hagyjanak a szenzorok maguk után lyukakat. Azaz az elmozdulás ne eredményezzen lefedetlen területet.

Az előző három stratégiánál hatásosabb azonban az, ha egy meghatározott útvonal mentél mozognak a szenzorok. Ebben az esetben a szenzor nem csak az aktuális helyzetét ismeri, hanem a következő elérendő pontot is. Erre egyik lehetőség az, ha a saját aktuális helyzetén kívül ki tudja számolni a következő elérendő pont helyzetét is. Másik lehetőség, ha a mostani helyzetét és az eddig megtett utat ismeri, így könnyen meg tudja becsülni a következő lépését.

A hálózat hatékonyságán nagymértékben tud javítani, ha a nyelők is mozognak. Ekkor a szenzorok egy lépésben könnyebben el tudják juttatni a mért adatokat a nyelőnek és így kevesebb energiát kell felhasználniuk. Ekkor a nyelő mozgása igényel valamivel több energia felhasználást. A megfelelő nyelő/szenzor darabszámok meghatározásával energiaspórolást eredményezhetünk. Felvetődik a kérdés, hogy a nyelőt milyen stratégia szerint érdemes mozgatni. Erre három módszer az elterjedtebb. Első a véletlenszerű mozgás. Ilyenkor a nyelő nem előre meghatározott módon, véletlenszerűen mozog. Második a jósolható mozgás. Ebben az esetben a nyelő egy előre kijelölt pályán halad végig. Így a szenzorok mozgásához igazodva tud haladni és a szenzorok adatátküldése hatékonyabb lehet. Harmadik módszer a vezérelt mozgás. Ez hasonlít az előző módszerhez. A különbség annyi, hogy itt a hálózat aktuális állapotát is figyelembe kell venni az útvonal meghatározásakor. Tehát a nyelő útvonala dinamikusan változhat.

Fontos a szenzorok hierarchiába történő meghatározása. Ez azt jelenti, hogy adott szerepeket osztunk a szenzoroknak több szempont alapján. Figyelembe kell venni például, hogy az átküldendő adatoknak mennyire kell frissnek lenniük. Ez az adat nyelőhöz való kerülésének idejét köti meg. Ha a mért adat naprakészen kell, hogy a nyelőhöz kerüljön, akkor lehet érdekesebb a szenzoroknak egymás között is kommunikálniuk, így az adat előbb odaérhet a nyelőhöz, mintha ki kellene várni azt az időt, amíg a nyelő az adott szenzor közelébe ér. Ha viszont a mért adat naprakészsége nem fontos, akkor az energiatakarékosság szempontjából hatékonyabb lehet, ha a szenzorok csak a nyelővel tudnak kommunikálni. Sok szempont alapján meghatározható egy olyan hierarchia, ami leírja, hogy az egyes szenzorok mely másik szenzorokkal tudnak kommunikálni.

2.3 Szenzorhálózat alapú pozícionálás módszere

2.3.1 A helymeghatározás története

Az ember számára régóta létfontosságú, hogy ismerje a körülötte lévő térség földrajzi helyzetét.

Kezdetben a fontosabb, feltűnőbb tereptárgyak (hegyek, fák, folyók) adták a főbb tájékozódási pontokat, később égi objektumokat is használtak ilyen célokra [6]. A felfedezésekkel együtt kialakult a térképészet is, aminek elengedhetetlen feltétele volt a pozícionálás.

Az idő előre haladtával egyre részletesebb térképekre volt szükség, így folyamatosan fejlődtek a helymeghatározás módszerei is. Kezdetben a Nap állását használták fel arra, hogy meghatározzák az észak-dél irányú távolságokat, illetve a kelet-nyugat irányú távolságokat a megtett út idejéből számolták ki. A hajózás is nagy hatással volt a helymeghatározáshoz szükséges eszközök fejlődésére. A kínai eredetű mágneses iránytű tette lehetővé a tenger által elkülönített földrészek felfedezését és a tengeri kereskedelem létrejöttét is. A szélességi koordinátákat a Sarkcsillag állásából és a szextáns segítségével határozták meg. A hosszúsági koordinátákat pedig a John Harrison által feltalált tengerészeti óraművel való időmérésből számították ki. Ezzel együtt a szárazföldi térképészet fejlődése is egyre részletesebb és pontosabb helymeghatározást kívánt. A háromszögelést Tycho Brahe fedezte fel 1589-ben, de a közvélemény nem ismerte fel a jelentőségét, ezért nem is használták. Snellius kezdte el alkalmazni 1617-ben fokmérésre. Ettől kezdve használják elterjedtebben ezt a módszert. A repülés megjelenése új navigációs módszereket követelt. Megjelentek az új rádiós irány- és távolságmérő rendszerek. Később elkezdtek használni a műholdakat is, amik minden eddiginél pontosabb helymeghatározást tettek lehetővé.

2.3.2 A helymeghatározás alkalmazása

A helymeghatározás több fontos célt is szolgálhat. Fontos lehet számunka a saját helyzetünk, akár a körülöttünk lévő tárgyak, emberek helyzetének meghatározása. De akár a navigációnak vagy a tudományos és a diagnosztikai képalkotásnak is fontos elme a pozícionálás. Szenzorok segítségével olyan intelligens ágenseket is építhetünk, amelyek emberi beavatkozás nélkül is működhetnek. Ez sokszor nagyban megkönnyítheti a mi feladatainkat is.

A helymeghatározásnak kültéri és beltéri alkalmazása is egyaránt lehetséges. Kültéri alkalmazás szempontjából fontosak a GNSS rendszerek (Global Navigation Satellite System, globális navigációs műholdrendszer), ilyen például az amerikai GPS (Global Positioning System, Globális Helymeghatározó Rendszer), az orosz GLONASS, a kínai Beidou vagy az európai Galileo rendszer. Sokan használják a GPS-t akár autóvezetésnél, akár túrázás során, hiszen a bolygó egész területén méteres pontosság érhető el polgári célokra. Egy távoli égitest felszínén azonban nem tudunk ilyen jellegű rendszert használni, amíg nem építettük ki a megfelelő műholdas rendszert, ezért más módszerekkel kell a helymeghatározást megoldanunk. Beltéri alkalmazás esetében a rádiós alapú RFID (Radio Frequency IDentification, rádiójeles azonosítás) technológia megfelelő szoftveres támogatással

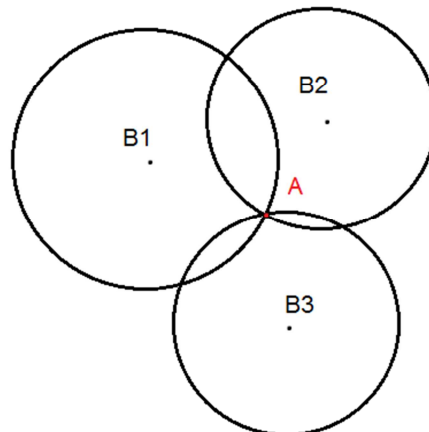
alkalmassá válhat helymeghatározásra. Így létrehozhatók olyan intelligens háztartási gépek, amelyek önállóan képesek elvégezni a feladatukat. A pozicionálás használta nem szűkíthető kizárólag a tájékozódásra. Helyzet érzékeny szolgáltatások és információk hozzáférésehez is elengedhetetlen, valamint biztonsági vagy megfigyelőrendszerek használta is nagyban épít rá.

Ahhoz, hogy meg tudjuk mondani például azt, hogy egy kisbolygón talált víz pontosan hol helyezkedik el, vagy azt, hogy pontosan hol találtuk a nekünk fontos talajmintát, ahhoz ismernünk kell a szenzorok mérési pozícióit. Mindez mutatja, hogy a helymeghatározás igen nagy jelentőséggel bír a témám vizsgálatánál.

2.3.3 A helymeghatározás számításának alapjai

Mivel GPS-jellegű rendszer nem áll rendelkezésre, ezért a pozíció meghatározáshoz a háromszögelés módszerét használtam. A pontok egymáshoz viszonyított helyzete alapján való helymeghatározásra ez az egyik legpontosabb módszer [7]. A háromszögelés valójában nem áll másból, mint háromszögek oldalainak és szögeinek meghatározásából. Ezért bármilyen sok pont esetén is, ha csak a pontok nem esnek egy egyenesbe, akkor meghatározhatóak a nekünk kellő háromszögek. Így ha a háromszögek alkotóelemeit ismerjük, akkor a pontok egymáshoz viszonyított helyzetét is ismerjük.

Az első lépés az úgynevezett bázismérés, ami azt jelenti, hogy ha egy oldalhosszt már megmértük, akkor az alapul szolgál a többi oldalhossz megismerésének is. Ezért ezt a kezdő oldalhosszra, mintegy bázisra támaszkodik a többi oldal hosszának meghatározása. Ezután következhet a szögmérés. A szögek mérése sokkal kevesebb hibával jár, így ha lehetséges, akkor inkább ezzel a módszerrel érdemes mindent meghatározni. Így a helymeghatározás pontossága a lehető legjobb eredményt adja. Esetünkben a háromszögeléses módszer lényege, hogy egy szenzor (legyen ez **A**) a helyzetét három másik szenzor (legyenek ezek **B1**, **B2**, **B3**) segítségével állapítja meg, ez a 4. ábrán látható.



4. ábra
Háromszögelés szemléltetése

A **B1**, **B2** és **B3** szenzorok hatósugarai egy-egy kört alkotnak, amely körön belül a szenzor érzékelt tud egy másik szenzort, így az adatküldés köztük lehetségessé válik. A **B1**, **B2** és **B3** szenzorok és hatósugarai által meghatározott körök egy területet metszenek ki, amelyen belül megbecsülhető az **A** szenzor helyzete. Tehát a **B1**, **B2** és **B3** szenzor referenciapontok az **A** szenzor számára. Szerencsés esetben a három kör egy pontban metszi egymást, így a keresendő **A** szenzor helye pontosan megadható. Ha nem egy pontban metszik egymást, akkor egy bizonyos hibával lehet csak megbecsülni az **A** szenzor helyét. A helyzetbecslés után az **A** szenzor is egy olyan referenciaponttá válik, amely segítségével egy következő **C** szenzor számítható ki. Azonban ha már az **A** szenzor helyzetének meghatározásában jelen volt egy adott hiba, akkor ezt a hibát „továbbviszi” és a **C** szenzor helymeghatározásában is benne lesz valamekkora súlyozással. Tehát a hiba torlódik és halmozódik is, ami azt jelenti, hogy több lépcsős helymeghatározás esetén növekszik is.

2.3.4 A kialakított szenzorhálózat alapvető felépítése

A választott témám egy elég tágan értelmezhető témakör. Ezért nagyon sok kérdés vetődik fel a mérési környezettel kapcsolatban. Összegyűjtöttem a legfontosabbnak talált kérdéseket és a lehetséges válaszok közül kiválasztottam azokat, amelyek az általam vizsgált hálózatra, környezetre jellemzőek.

Egy bolygón mérhető adatok

Fontos megkülönböztetni, hogy olyan adatot is mérhetünk, amelynek nem feltétlenül kell naprakésznek lennie. Például ilyen a talált víz pozíciója, vagy a talajminta, amik egy bizonyos idő eltelté után is érvényesek maradnak. Ezzel szemben olyan adatra is szükségünk lehet, mint például az aktuális hőmérséklet, ahol fontos, hogy azt az adatot mikor mérték és időben fel tudják dolgozni. Ezen kívül meghatározó tulajdonság lehet, hogy mikor érdemes mérni az adott adatot. Periodikusan mérhető adat lehet a hőmérséklet, ahol elég csak meghatározott

időközönként méréseket végrehajtani. Esemény hatására bekövetkező mérést légköri jelenségek mérésénél érdemes választani. A vizsgált hálózatomban olyan adatok mérését választottam, ahol nem kell naprakésznek lennie az adatoknak, a nélkül is érvényesek maradnak. Illetve a méréseket periodikusan hajtják végre a szenzorok.

Műholdak igénybevétele és azok mozgása

Ez a kérdés leginkább a költséghatékonyság szempontjából fontos. Ha több műholdat használunk a hálózatban, akkor ugyan könnyebben fenntartható a műhold-szenzor kapcsolat, de ez jóval drágább megoldás. Ha kevesebb műholdat használunk, az jóval olcsóbb, ellenben nem tartható fent egy állandó kapcsolat a szenzorokkal. A Földre csak meghatározott időközönként lehet eljuttatni az adatokat, mert a nyelők csak bizonyos időszakokban képesek a műholdakat fenntartani a kapcsolatot. Mivel az előző kérdésnél meghatároztam, hogy az adatok érvényessége sokáig fenn áll, így a vizsgált hálózatomban kevesebb műhold használatát feltételezem.

Szenzorok mozgása

Két, az előző fejezetben már említett fő csoportra osztottam a mozgás fajtáit. Egyik a véletlenszerű mozgás, ahol előre nem meghatározott pályán mozognak a szuperszenzorok, másik az adott pályán való mozgás. A két mozgásfajtának egy kombinációját vettem. Eszerint a szenzorok kezdetben egy véletlenszerű irányba kezdenek el mozogni és ezen a vonalon haladnak tovább egy előre meghatározott pont síkjá felé. Egy sávot is megadtam, amelyen belül a szenzorok mozoghatnak. Így nem lesz olyan szenzor, amelyik a sávtól eltávolodna, és ezért kiesne a szenzorbolyból. Ha a szenzor elérte ennek a sávnak a határát, akkor irányt vált, az eddigi irányának a mínusz egyszeresére vált.

Nagyobb teljesítményű szenzorok a hálózatban

A nagyobb teljesítményű szenzorokra ezentúl szuperszenzorokként fogok hivatkozni. Ha nincsenek szuperszenzorok a hálózatban, akkor a szenzorok energiaellátás szempontjából olcsóbbak, ugyanakkor mindegyik szenzornak képesnek kell lennie kommunikálni a műholdakkal, hogy az mérési adatok eljuthassanak a Földre. Ha vannak a hálózatban szuperszenzorok, akkor némely szenzor energiaellátása drágább, de csak annak a pár szuperszenzornak kell tudnia kommunikálni a műholdakkal, ez jelentős költségcsökkenést eredményez. Ezért az utóbbi megoldást választottam, a szuperszenzorok lesznek a szenzorhálózat nyelői.

Szuperszenzorok mozogása

Ha a szuperszenzorok képesek a mozgásra, akkor plusz energiát igényel, de könnyebben összegyűjti a mérési adatokat a szenzoroktól. Így kevésbé léphet fel adatvesztés. Ha nem tudnak mozogni, akkor kevesebb energiaellátás szükséges nekik, de sok olyan szenzor lehet, akik nem tudják eljuttatni hozzájuk az adatokat. Ebből kifolyólag úgy döntöttem, hogy a vizsgált hálózatomban a szuperszenzorok mozoghatnak. A mozgás mikéntjére ugyanazokat a lehetőségeket vettem figyelembe, mint a szimpla szenzorok esetében és ugyanarra a megoldásra is jutottam.

Szenzorok közötti kommunikáció (Single- és multi-hop hálózat)

Ha a szenzorok egymással is képesek kommunikálni (multi-hop hálózat), az jóval több energiafelhasználást igényel, mintha csak a szuperszenzorokkal tudnának kapcsolatba lépni (single-hop). Ellenben ha a hálózat multi-hop, akkor az adatok gyorsabban elérnek a nyelőhöz és előbb jutnak továbbításra. Mivel előzőleg meghatároztam, hogy az adatok érvényessége sokáig kitart, ezért az energiatakarékosság szempontjából a hálózatom single-hop lesz.

2.3.5 Háromszögelés alkalmazása a kialakított szenzorhálózatban

A pozicionáláshoz a háromszögelés módszerét alkalmaztam. Az előző fejezetben leírtak szerint egy szenzor helyzetének meghatározásához szükség van másik három szenzor helyzetének ismeretére. Ez alapján kiválasztottam három szuperszenzort, amelyek helyzete kezdettől fogva ismert. Ezekből megállapítható azoknak a szenzoroknak a helyzete, amelyek belesznek a szuperszenzorok hatótávolságaiba, azaz abba a távolságba, amelyen belül még látják egymást és képesek kommunikálni.

Ez a három szuperszenzor kezdettől fogva referencia pontnak minősül a szenzorhálózatban. A belőlük kiszámított helyzetű pontok is a továbbiakban referencia pontok lesznek, ők is felhasználhatóak lesznek olyan szenzorok helyzetének meghatározására, amelyek a hatótávolságukon belül vannak. Ezt a ciklust folytatva egy idő után szinte az egész szenzorbolyban lévő szenzorok helyzete meghatározhatóvá válik. A szenzorboly azoknak a szenzoroknak az összessége, amelyek a szenzorhálózat részei. Egyedül azoknak a szenzoroknak a pozícióit nem lehet kiszámolni, amelyek kívül esnek bármelyik másik szenzor hatótávolságán, azaz leszakadtak a bolytól. Lehetséges, hogy ezek a szenzorok egy idő után visszatérnek a bolyba és akkor ismét meghatározhatjuk a helyzetüket. Ha viszont nem térnek vissza, akkor végképp leszakadnak, így ezek a szenzorok veszteségként lesznek számon tartva.

2.3.6 Matematikai számítások

A háromszögeléses módszer alkalmazásához az alábbi számításokat használtam fel.

Legyen a $B1$, $B2$ és $B3$ szenzor helyzetének koordinátája rendre $(x1, y1)$, $(x2, y2)$, $(x3, y3)$, az A szenzor helyzetének koordinátája (x, y) , és az $AB1$, $AB2$, $AB3$ távolság $d1$, $d2$, $d3$. A következő egyenletekből állítottam fel egy egyenletrendszert, melynek megoldásai a keresett A pont (x,y) koordinátái.

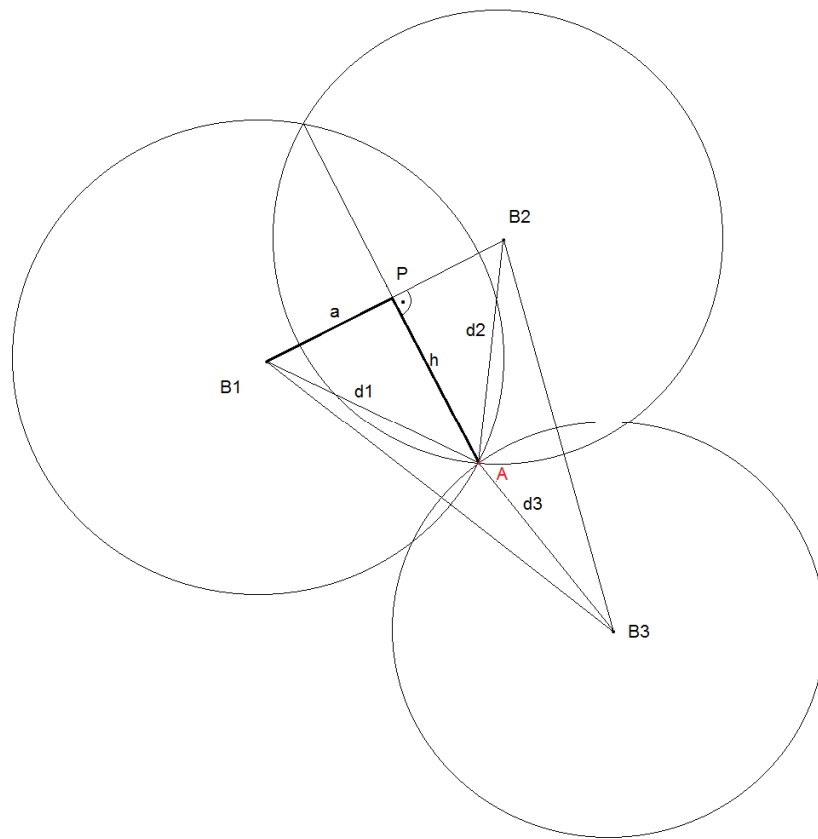
$$d1 = \sqrt{(x1 - x)^2 + (y1 - y)^2} \quad (1)$$

$$d2 = \sqrt{(x2 - x)^2 + (y2 - y)^2} \quad (2)$$

$$d3 = \sqrt{(x3 - x)^2 + (y3 - y)^2} \quad (3)$$

Geometriai ábrázolással és számításokkal sokkal látványosabb és programozhatósági szempontból egyszerűbb egyenleteket kaptam, ezért ezekkel vezettem le a megoldás menetét.

Az 5. ábrán láthatóak a geometriai összefüggéseket megadó alakzatok.



5. ábra
A háromszögelés geometriája

A $B1$ és a $B2$ pont távolságát az alábbi módon tudjuk kiszámolni:

$$tav_{B1B2} = \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2} \quad (4)$$

Ezután a $B1PA$ és a $B2PA$ háromszögek segítségével kiszámolható az a oldal hossza:

$$a = \frac{d1^2 - d2^2 + tav_{B1B2}^2}{2 * tav_{B1B2}} \quad (5)$$

Ebből következik a h oldal hossza Pitagorasz-tétellel:

$$h = \sqrt{d1^2 - a^2} \quad (6)$$

Ezután már csak a P pont koordinátáit kell kiszámolni és onnan megkapható a keresett A pont koordinátája is.

$$b = 1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2 \quad (7)$$

$$px_1 = \frac{2 \cdot x_1 + \sqrt{4 \cdot x_1^2 - 4 \cdot x_1^2 + 4 \cdot a/b}}{2} \quad (8)$$

$$px_2 = \frac{2 \cdot x_1 - \sqrt{4 \cdot x_1^2 - 4 \cdot x_1^2 + 4 \cdot a/b}}{2} \quad (9)$$

$$py_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (px_1 - x_1) + y_1 \quad (10)$$

$$py_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (px_2 - x_1) + y_1 \quad (11)$$

Ez a megoldás, amint látható két eredményt ad a P pontra, mert a két kör két pontban metszi egymást. E két pont közül azt választjuk, amelyik nekünk megfelelőbb a keresett A pont kiszámításához.

$$Ax_1 = px + \frac{h \cdot (y_2 - y_1)}{tav_{B1B2}} \quad (12)$$

$$Ax_2 = px - \frac{h \cdot (y_2 - y_1)}{tav_{B1B2}} \quad (13)$$

$$Ay_1 = py + \frac{h \cdot (x_2 - x_1)}{tav_{B1B2}} \quad (14)$$

$$Ay_2 = py - \frac{h \cdot (x_2 - x_1)}{tav_{B1B2}} \quad (15)$$

Itt is két eredményt kapunk, ezek közül pedig szintén a nekünk megfelelőt kell kiválasztani. Esetünkben ez az a pont lesz, amelyik benne van a harmadik kör hatósugarában, azaz a $B3$ és a $W1$ vagy $W2$ pont távolsága kisebb vagy egyenlő, mint $d3$.

Ezzel megkaptuk a keresett A szenzor helyét.

2.3.7 Hibatorlódás

A helymeghatározás számításánál felléphet némi eltérés az eredeti helyzettől. A háromszögelés számításával ugyan meglehetősen pontosan egy pontot, ami a keresett szenzor helyzete, de ennek a pontnak a meghatározásánál előfordulhat mérési hiba is és számítási hiba is. Mérési hiba esetében az AB_i távolság mérésénél nem feltétlenül pontos értéket kapunk, számítási hiba esetén pedig a kerekítések miatt adódó eltérések módosíthatják az eredményt. Ezek ugyan minimális eltérések és a kiszámított helyzetű szenzor koordinátáit is csak minimálisan tolják odébb, de több lépcsős helymeghatározásnál nagyobb problémát okozhat.

A kezdeti referencia pontok, a szuperszenzorok helyét pontosan ismerjük, hiba nélkül. Így a belőlük számított szenzorok koordinátái minimális hibát kapnak. Ezután azonban ezek a számított helyzetű szenzorok is referencia ponttá válnak. Azaz belőlük is számolódnak további szenzorok koordinátái. A hiba, így továbbvívódik a következő számításba, ugyanakkor abból a számításból is származhat hiba, így ezek összegződnek. Több lépcsős számításnál tehát a hibák felhalmozódnak és már nagymértékben eltérhet a számolt koordináta a valóstól. Ez több megfigyelésnél is gondot okozhat. Ha például az szenzor már a megengedett sávon kívül van, de a számított koordinátája még azt mondja, hogy sávon belül van, akkor az irányváltás nem történik meg és a szenzor könnyen leszakadhat a bolytól. Ha a két szenzor távolsága még megfelelő lenne a kommunikációra, de a hibatorlódás miatt a

számított koordinátákból már az jön le, hogy túl messze vannak, akkor nem történik meg a kommunikáció és adatvesztés lép fel. Tehát a hibatorlódásból adódó következmények súlyosak is lehetnek és ezért tartom fontosnak foglalkozni ezzel a témával. Munkám során ezt a jelenséget vizsgáltam meg több oldalról és a következő fejezetben szimulációval is alátámasztom a jelenlétét.

A hibatorlódás mértéke többek között az alábbi okoktól függhet. Ha a szenzorok hatósugara nagyobb, akkor a hibatorlódás kisebb lehet, hiszem több szenzor számolható ki az eredeti három szuperszenzorból és így kevesebbszer épülnek egymásra a hibák. Ha viszont a hatósugár kisebb, akkor kevesebb szenzor helyzetét lehet kiszámolni a szuperszenzorokból, így a többi szenzor a helyét kénytelen a már később kialakult referencia pontokból kiszámítani. Vagyis több hiba torlódik egymásra. Függhet ugyanakkor a megengedett mérési hiba maximális mértékétől. Értelemszerűen minél nagyobb ez a megengedett érték, annál nagyobb hibaértékek torlódhatnak.

2.3.8 Háromszögelés algoritmus a szenzorhálózatra

Kezdetben csak három referenciapontunk van, ezek a szuperszenzorok. Ezeknek a helyük mindig pontosan ismert. Ha ezeknek a szenzoroknak a hatósugaraiba beleesik egy másik szenzor, azaz olyan távol vannak egymástól, hogy a kommunikáció lehetséges, akkor ki lehet számolni a háromszögeléssel a koordinátáit. A kiszámítás matematikai módja a korábbiakban írtak alapján történik. Ezután a kiszámolt helyzetű szenzor is referenciaponttá válik és így az ő segítségével is lehet tovább számolni a többi szenzor koordinátáit. Ha a szenzor helymeghatározásában szerepet játszik egy bizonyos hibaérték, akkor a belőle tovább számított szenzorok helymeghatározásában is szerepelni fog ez a hiba valamilyen súlyozással, azaz a hiba torlódik.

A helymeghatározási folyamatot rekurzívan folytatva meghatározhatjuk az egész boly helyzetét. Ha azonban valamelyik szenzor olyan messze kerül a bolytól, hogy nincs három olyan másik referenciapont, amelyek hatósugaraiban benne lenne, akkor az ő helyzete már nem határozható meg, vagyis leszakad a bolytól. Később visszatérhet és újra kiszámolható lesz a helyzete, de ez nem garantált. Ennek a kiküszöbölésére vezetünk be egy megadott sávhatárt, amit ha átlép a szenzor, akkor már nagy valószínűséggel nem határozható meg a helyzete. Ezért a sávhatár átlépésekor a mozgásának iránya ellentettjére változik, ezáltal visszakerül a bolyba. Gond csak akkor léphet fel, ha a hibatorlódás miatt elcsúszik egymástól a számolt és a valós koordináta érték.

3. Pozícióbecslés hibaterjedésének vizsgálata

Azért, hogy az előző fejezetben bemutatott szenzorhálózatot megfelelően tudjam vizsgálni, egy szimulációs programot írtam C++ nyelven. A szimulációs programot úgy írtam, hogy minél inkább hasonlítson a működése a szenzorhálózat viselkedésére. Különböző paramétereket értékét lehet változtatni a programban a vizsgálandó eseteknek megfelelően. Ezek egy olyan kimenetet generálnak, amelyekből számszerű értékek kaphatók meg. Ezeket ábrázoltam grafikonokon és elemeztem őket.

3.1 A program általános működése

3.1.1 Paraméterezés

A szimulációs programom alapja egy osztály, ami egy szenzor paramétereit tárolja. Ezek a szenzor helyzetének valós x és y , koordinátája, illetve a szenzor háromszögeléses módszer által kiszámolt koordinátái. Van még egy szenzorazonosító, az index, egy igaz-hamis érték, ami azt mondja meg, hogy az adott szenzor már referencia érték-e. Tárolom még az elmozdulás x és y koordinátáját és azokat a szenzorokat, amelyek segítségével kiszámolható az aktuális szenzor helyzete. Az osztály függvényei a paraméterek értékének beállításai a legelső és a további lépések esetében. A szenzorokból álló boly elemeit egy ilyen osztályú tömbben tároljuk.

Globális paraméterek az alábbi táblázatban láthatóak. A táblázatban szereplő értékek a paraméterek alapértékei. A szimuláció során is ezekkel az értékekkel dolgoztam, kivéve ott, ahol majd más értéket adok meg a vizsgálat céljából.

A paraméter neve	A paraméter értéke [mértékegység]
Szenzorok száma	20 [db]
Terület	20 [m]
Elmozdulás maximális értéke	4 [m]
Szenzorok hatótávolsága	30 [m]
Hiba maximális mértéke	1 [m]
D pont távolsága	1000 [m]

A *szenzorok száma* (n) magában foglalja a szuperszenzorokat is. Ez adja meg, hogy hány szenzorral végezzük a méréseket.

A *terület* (w) azt a felszíni részt foglalja magában, amelyen a szenzorok elhelyezkednek, és amely területet vizsgálnak a naprendszerbeli égitesten. Ez jelöli ki azt a már fentebb említett sávot, amely meghatározza, hogy a szenzorok milyen térrészen mozoghatnak még anélkül,

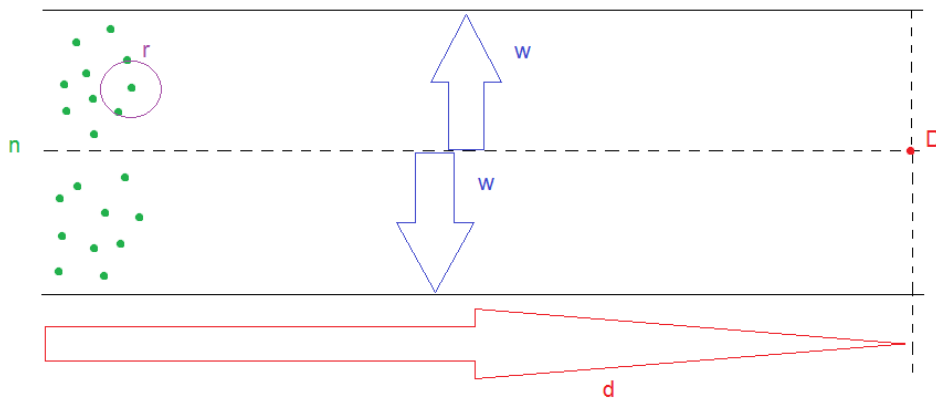
hogy könnyen leszakadjanak a bolytól. A sáv az y tengelyt határolja be „ $y +$ terület” érték és „ $y -$ terület” érték szerint.

Az *elmozdulás maximális értéke* azt a számot adja meg, amely egy felső korlátja a mozgásvektor értékének. Mivel a szenzorok mozgása kezdetben véletlenszerű irányba indul el, ezért ezt egy randomszám generátorral oldottam meg. Ez alapján a kezdeti elmozdulás értéke 0 és ez a maximális érték közötti véletlenszerű egész számot vesz fel.

A *szenzorok hatótávolsága* (r) az a távolság, amelyen belül egy másik szenzort még lehet érzékelni és így képes a vele való kommunikációra. Ez a hatótávolság minden szenzorra ugyanúgy jellemző, és ugyanazt az értéket kapja. Tehát minden szenzor (a szuperszenzorok is) hatótávolsága megegyezik.

A *hiba maximális értéke* azt az értéket adja meg, amit a hiba maximális felvehet egy számítás esetében. Ez is egy véletlenszerűen kiválasztott szám, aminek a felső korlátja ez a maximális érték. A hiba x és y koordinátára külön generálódik, de mindkettőnek ez az érték szab határt.

A *D pont távolsága* (d) pedig azt a távot határozzák meg, amelyet el kell érnie legalább egy szenzornak, ahhoz, hogy a szimuláció véget érjen. Ezt a távolságú területet kell a szenzoroknak feltérképezniük, itt végzik el a méréseket. Ezeknek a paramétereknek az illusztrálása az 6. ábrán látható.



6.ábra

A szenzorhálózat kiinduló környezete

3.1.2 Háromszögelés függvény

A háromszögelés algoritmusára egy függvényt írtam, ami addig hívódik meg, amíg nullára le nem csökken a kiszámolható szenzorok száma. A függvény két ciklusra épül. Az egyik azokat a szenzorokat válogatja ki, amelyek még nem referencia pontok, azaz még nem volt sikeresen meghatározva a helyzetük. Ezekre a válogatott szenzorokra próbálja meg lefuttatni a helymeghatározó algoritmust. Ha ez sikerrel jár, akkor beállítja a szenzort referencia pontnak, ha nem sikerült, akkor tovább keres egy másik meghatározandó helyzetű szenzort. A másik ciklus azokat a szenzorokat válogatja ki, amelyek már referencia pontok és ezeket vizsgálják meg, hogy alkalmasak-e az előzőleg kiválasztott nem referencia szenzor helyének meghatározásához.

Egy referencia szenzor akkor alkalmas számításra, ha a kiszámítandó helyzetű szenzortól való távolsága kisebb vagy egyenlő, mint a hatósugara, tehát látja egymást a két szenzor. Ha talál három alkalmas referencia szenzort, akkor elkezd futtatni a háromszögelés algoritmusát az előző fejezetben bemutatott matematikai módszerrel. Ha már nincs több olyan szenzor, amelynek a helyzetét meg lehetne határozni, akkor a függvény kilép és folytatódik a program. Ilyen helyzet két esetben fordul elő. Az egyik, amikor már az össze szenzorra sikerült lefuttatni a helymeghatározó algoritmust, tehát minden szenzor helye ismert. A másik eshetőség, ha vannak olyan szenzorok a bolyban, amiknek a helyzetét nem lehet meghatározni, mert nincs másik olyan három szenzor, amelyekkel megfelelő távolságban lennének (hatósugáron belül). Tehát ezek a szenzorok leszakadtak a bolytól, de ezeken kívül már az összes többi szenzor helye ismert.

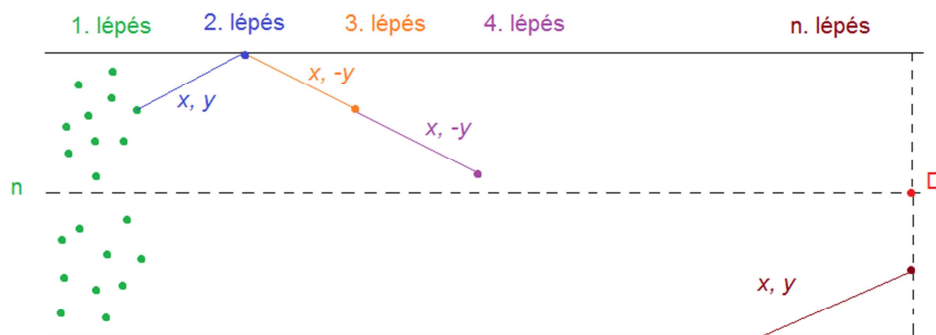
3.2 Szimulációk

3.2.1 Szenzorok mozgásának szimulálása

A szenzorhálózatot a fenti fejezetekben úgy építettem ki, hogy a benne lévő szenzorok (a szuperszenzorokkal együtt) mozogjanak. A mozgás megvalósítására egy-egy véletlenszerű számpárt rendeltem a szenzorokhoz. Ezek lettek a kezdeti elmozdulás vektor értékei. A helymeghatározás után ezek az értékek hozzáadódnak a megfelelő koordinátákhoz, így szimulálva a szenzorok elmozdulását. Egy lépés egy időegység alatt tevődik meg, vagyis egy időegység alatt halad a szenzor a megadott elmozdulás vektor értékének megfelelően egy lépést. Az elmozdulás koordinátái mindig a valós értékekhez adódnak hozzá. A számolt értékek meghatározásához minden lépés esetében lefut a háromszögelés algoritmus. Ez azért van, mert a szenzorok (a szuperszenzorokat kivéve) nem tudják, hogy merre mozognak el, mindig csak a többi szenzor helyzetéhez viszonyítva tudják meghatározni, hogy éppen hol vannak.

A szenzorok egy adott D pontot próbálnak meg elérni. A szimuláció addig tart, amíg legalább egy szenzor nem éri el ennek a D pontnak a síkját. Ez esetben ez azt jelenti, hogy legalább egy szenzor számított x koordinátája el nem éri a D pont x koordinátáját. Ha a szenzor úgy véli, hogy ezt elérte, akkor a mozgása leáll, és a szimuláció befejeződik.

Az adott szenzorhoz tartozó elmozdulás vektor értéke minden lépés során ugyanaz, változatlan marad, egészen addig, amíg a szenzor el nem éri a kijelölt sávhatárt. Ha a szenzor úgy érzékeli, hogy elérte ezt a határt, akkor irányt vált. Azaz az elmozdulás y koordinátája mínusz egyszerese lesz az eredetinek. Az elmozdulás x koordinátáját azért hagyjuk meg változatlanul, mert a fő haladási irány nem változik, ugyanúgy a D pontot próbálják elérni a szenzorok. A mozgás illusztrálása a 7. ábrán látható.



7. ábra

Egy szenzor mozgása a meghatározott területen belül
 x, y koordináta az elmozdulás koordinátái

3.2.2. Hibatorlódás szimulálása

A fenti fejezetekben említettem a hibatorlódás jelenségét. A helymeghatározás során fellépő hiba a több lépcsős helymeghatározásnál megmarad, és további hibákkal torlódik. Ez akkor alakul ki, amikor egy szenzor számolt koordinátáit használjuk egy másik szenzor helymeghatározásában, így az előzőleg kialakult számítási hiba benne lesz az újabb számításokban.

Ezt a jelenséget a programomban úgy szemléltettem, hogy a helymeghatározás algoritmusánál kiszámított értékekhez hozzáadódik egy véletlenszerűen generált szám. Ennek a számnak a korlátai alulról a nulla, felülről pedig a paraméterként megadott hiba maximális értéke. A hiba ez által hozzáadódik a kiszámolt értékhez és a továbbiakban ezzel az összegzett értékkel számolok tovább. Így egy további lépések kiszámításánál a valós koordinátától való eltérés nőni fog.

Ez akkor okozhat nagy gondot, ha a szenzorok helymeghatározásánál a valós értékek alapján ugyan két szenzor távolsága megfelelő lenne a kommunikációra, de a számolt koordináták ettől való eltérése miatt már kívül esnek ezen a távon. Így a háromszögelés algoritmus nem is fut le a kiszámolandó helyzetű szenzorra és úgy tartja számon, hogy az ő helyzetét nem lehet meghatározni. Így bár a valóságban nem szakad le a bolytól, mégis úgy érzékeli.

3.2.3. Gödör szimulálása

Egész idáig sík terepen haladó szenzorokról beszéltem, egy naprendszerbeli égitest felszíne azonban tipikusan nem ilyen. Ahhoz, hogy jellemezni tudjam ezt a felszínt, egy úgynevezett gödröt tettem bele a szimulációba. Ennek a gödörnek a funkciója, hogy megfigyelhető legyen, mi történik, ha a szenzorok „beleesnek” egy ilyen gödörbe. A szenzorok a bejárt útjuk során több, eltérő méretű gödörrel is találkozhatnak. Munkám során általánosságban vizsgáltam meg ezt a jelenséget, a szimulációim során egy gödröt szimuláltam egy megadott mérettel. Már ez is jól szemlélteti a jelenséget.

A gödör két megadott x koordináta között helyezkedik el. Ha a szenzor beleér ebbe az intervallumba, akkor attól függően, hogy a gödörnek melyik részén van, változik az elmozdulásának értéke. Ha a gödör elején van, akkor annak megfelelően gyorsul a mozgása, hiszen a talaj leejt. Ha a gödör alján van, akkor a talaj vízszintes, így az elmozdulása megint az eredeti értékeket veszi fel. Ha a gödör végén jár a szenzor, akkor a talaj emelkedik, a szenzor mozgása lassul. Kérve a gödörből szintén felveszi az eredeti elmozdulás értékeit.

Ez a jelenség sok mindent befolyásolhat. Ha a szenzorok sebessége változik, akkor az a köztük lévő kommunikációs kapcsolatra is kihat. Ahol a szenzorok gyorsulnak, ott összesűrűsödnek egy helyen, így ott kisebb hibával tudják elvégezni a helymeghatározást, hiszen könnyebben beleesnek egymás hatósugarába. Ha viszont a mozgásuk lelassul, akkor könnyebben távolodnak el egymástól, így egyre inkább kikerülhetnek egymás hatósugarából, tehát a helymeghatározás nagyobb hibával fog bekövetkezni. Az ebből adódó eredmények a következő fejezetben lesznek szemléltetve.

3.2.4. Porvihar szimulálása

A porvihar jelensége szintén egy naprendszerbeli égitestet jellemez, ezért ezt is beépítettem a szimulációmba. A porvihar egy megadott lépésnél jelentkezik, így ezt időben helyeztem el a szimulációban, ellentétben a fenti gödörrel, ami térben lett elhelyezve. A porvihar esetében a szenzorok közötti kapcsolat megszakad, nem látják egymást. Így a jelenség megszűnésekor a kapcsolatot újból fel kell építeni. Ennek az lehet a következménye, hogy pár szenzor leszakadhat a bolytól, hiszen amíg nem volt kapcsolat, nem tudták meghatározni a helyzetüket sem. Ezért könnyen lehet, hogy időközben a szenzorok olyannyira eltávolodnak egymástól, hogy kiesnek egymás hatótávjából. Így azt sem tudják érzékelni, hogy a megadott sávon kívülre érnek. A sávon kívül viszont már nagy eséllyel olyan távol lesznek, hogy nem tudják újból meghatározni a helyzetüket, leszakadnak. Az általam „porviharnak” nevezett jelenség tehát veszteségekkel jár, ezért tartottam fontosnak megvizsgálni.

A kivitelezése az alábbiak alapján történik. Ha elérkezik a megadott időintervallum kezdete, akkor a szenzorokra a háromszögelés függvény helyett egy másik függvény hívódik meg. Így az időegységenkénti lépéseket megtartja a szenzor, csak a helymeghatározás módját változtatja meg. A porvihar ideje alatti helymeghatározás annyiból áll, hogy minden lépésnél az előző helyzetéhez simán hozzáadódik az elmozdulás értéke. Így a mozgása ugyanúgy folytatódik, mint eddig, csak a szenzor helyzetbecslése lesz másmilyen.

Ha a porvihar véget ér, akkor ugyanúgy meghívódik a háromszögelés függvénye, mint eddig. Csak itt már nem biztos, hogy mindegyik szenzor megtalálja a másikat úgy, mintha nem lett volna porvihar.

3.2.5 Statisztikai adatok

Ha a helymeghatározás függvénye befejeződött, akkor a program a további lépéseket hajtja végre. Egy statisztikát állít össze erről a lépésről. A statisztika a következő adatokat tartalmazza:

- a szenzorok indexét,
- a valós és a számolt koordinátáit
- megadja, hogy a szenzor *referencia pont-e*. Ez azért fontos, mert így meg lehet állapítani, hogy sikerült-e kiszámolni a szenzor helyzetét és azt is lehet látni, hogy hány szenzor szakadt le a bolytól.
- Illetve azt, hogy *melyik három szenzort* használta fel referencia pontként a helymeghatározáshoz.
- Kiszámolja a program, hogy mekkora *az eltérés a valós és a számolt koordináták között* külön x és y koordinátára. Ebből megállapítható, hogy mekkora hibával dolgozott a helymeghatározó algoritmus.
- Megadja az *elmozdulás koordinátáit*. Ezek a mozgás során változhatnak, ezért tartottam fontosnak az ismeretüket.
- Az egyes lépések statisztikájába beletartozik még az *átlagos különbség a valós és a számolt koordináták között*. Ez az összes a lépésben szereplő szenzorra nézve egy átlagos értéket ad. A program még megadja azt is, hogy az eredeti három szuperszenzor segítségével hány másik szenzor helyzete lett kiszámítva közvetlenül. Tehát hány szenzor helymeghatározásához lettek felhasználva a szuperszenzorok referencia pontként.

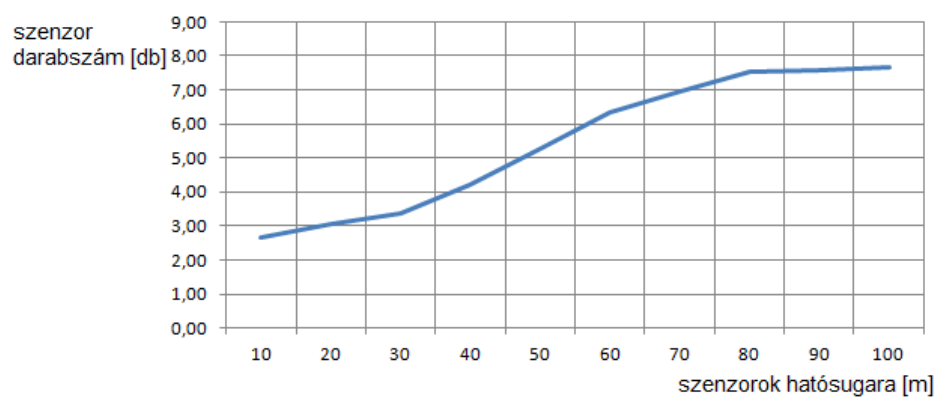
Ezen adatok közül választottam ki azokat, amelyek a szimulációs vizsgálataimhoz szükségesek és az eredmények szemléltetésében fontosak.

4. Vizsgálat eredményei

A szimuláció során a fenti paramétereket és értékeit tartalmazó táblázatot vettem alapul. Ha másként nem jelzem, akkor a paraméterek a táblázatban szereplő értékeket vették fel. A vizsgálatok céljából fontosnak tartott paramétereket változtattam meg a különböző esetekben.

Minden esetben, minden vizsgálandó paraméter értékre tízszer futtattam le a szimulációs programot. Erre azért volt szükség, mert a véletlenszerűen generált számok minden futás alkalmával más értékeket kaptak. A kapott eredményeket ezért a vizsgálandó paraméterenként átlagoltam és azzal dolgoztam tovább, az ábrázolásban is ezek szerepelnek. Így sokkal általánosabb adatok kaptam.

Első vizsgálatom, hogy a szenzorok hatósugarának változtatása esetén hogyan változik azoknak a szenzoroknak a darabszáma, amelyek helyzete közvetlenül a szuperszenzorokból lett számolva. Ebben az esetben azt vizsgáltam, hogy ha a szenzorok hatósugarát változtatom (azaz azt az értéket változtatom, amelyen belül még képesek kommunikálni a többi szenzorral), akkor az hogyan hat arra a darabszáma, ami a három szuperszenzorból közvetlenül kiszámítható helyzetű szenzorokat jellemzi. Másképpen hány szenzor helyét lehet kiszámolni úgy, hogy csak a szuperszenzorokat használom fel rá. Ez úgy lehetséges, hogy ezek a szenzorok a szuperszenzoroktól olyan messze vannak, ami még belefér a hatótávolságukba. Átfogalmazva a kérdést, azt is mondhatom, hogy hány szenzor fél bele a három szuperszenzor hatótávolságába attól függően, hogy változtatom ezt a hatótávolságot.

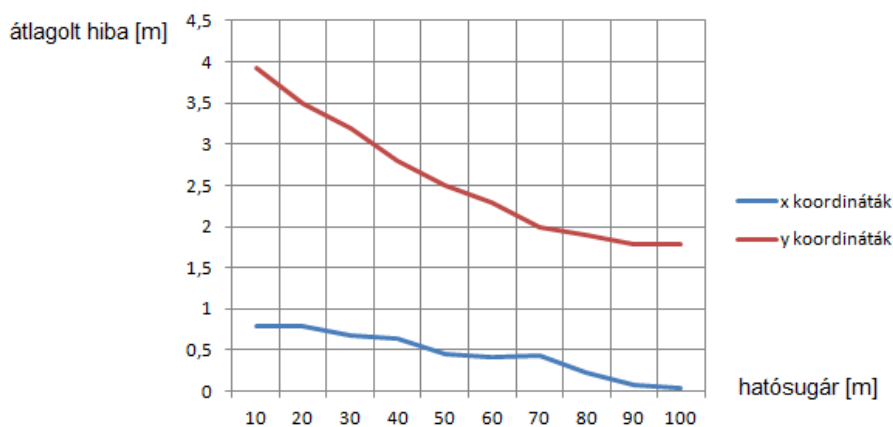


8. ábra

Szuperszenzorokból számolt szenzorok számának változása a hatótávolság függvényébe
szenzor darabszám: szuperszenzorokból kiszámolt helyzetű szenzorok darabszáma átlagolva

Az 8. ábra jól látható, hogy minél nagyobb a szenzorok hatótávolsága, annál több olyan szenzor van, amelyek helyzetét meg lehet határozni a szuperszenzorok helyzetéből. Ez azért van, mert a szuperszenzorok hatósugara is növekszik, így egyre több szenzorral képesek közvetlenül kommunikálni, vagyis egyre több szenzor helyzetét képesek meghatározni a

háromszögelés módszerével. Megfigyelhető, hogy egy bizonyos hatósugár értékénél feljebb már nem nagyon változik a vizsgálni kívánt szenzorok darabszáma. Sőt ez a darabszám megegyezik az összes szenzor darabszámával. Ennél a határértéknél már az összes szenzor helyzetét ki lehet számolni a szuperszenzorokból. Ennek az oka, hogy itt már az összes szenzor beleesik a szuperszenzorok hatósugarába, így egy lépcsőben meg lehet határozni a helyzetüket. Második vizsgálatom, hogy a szenzorok hatósugarának változtatása esetén hogyan változik lépésenként a szenzorokra átlagolt hiba. Ebben az esetben szintén a szenzorok hatósugarát változtattam, azaz annak a távolságnak az értékét, amelyen belül a szenzorok még látják egymást. Azt vizsgáltam, hogy ettől függően hogyan változik egy átlagos hiba érték. Ez a hiba érték lépésenként külön a szenzorokra összesített érték, ahol a hiba a valós és a számolt koordináták közötti eltérést mutatja. Ezeket a hiba értékeket külön átlagoltam a szenzorokra nézve minden lépésben, majd a lépésenkénti értékeknek is vettem az átlagát. Így tudtam szemléletesen ábrázolni ezeket az eredményeket külön az x és külön az y koordinátára.



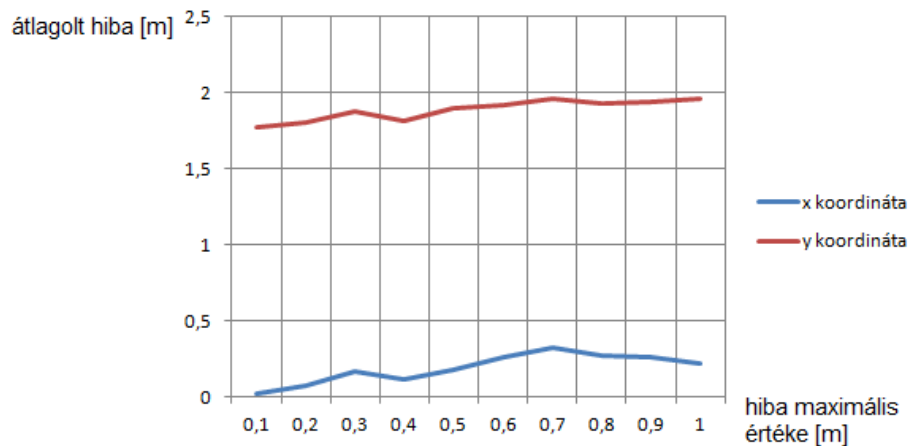
9. ábra

Lépésenkénti szenzorokra átlagolt hiba a hatótávolság függvényében

A 9. ábrán láthatóak a kapcsolódó eredmények. Ha nagyobb értéket vesz fel a szenzorok hatósugara, akkor kisebb az átlagos hiba, mert így a szuperszenzorokból több szenzor helyzetét lehet kiszámolni a háromszögelés módszerével. Ezek az értékek pontosabbak lesznek, kisebb hibával rendelkeznek. Ezekből lehet utána tovább számolni a többi szenzor helyét. Mindez azt jelenti, hogy kevesebb lépésben torlódik a hiba, így az átlagolt hiba is kisebb lesz. Ha viszont a hatótávolság értéke kisebb, akkor az átlagos hiba értéke nő, hiszen így több lépcsőben lehetséges kiszámolni a szenzorok helyét, több lépcsőben torlódik a hiba.

Itt is látható egy stagnáló érték, ami azt mutatja, hogy ha a hatótávolság elég nagy, akkor a hiba átlagos értéke beáll egy konstans értékre. Ez azért van, mert ha a hatótávolság olyan nagy, hogy egy lépcsőben meg lehet határozni a többi szenzor helyzetét, azaz az össze szenzort látják a szuperszenzorok, akkor csak abban a lépcsőben keletkező minimális hibával kell számolnunk.

Következő megfigyelésem témája, hogy a megengedett hiba maximális értékének változtatása esetén hogyan változik lépésenként szenzorokra átlagolt hiba. Ebben a vizsgálatban azt néztem meg, hogy ha változtatom a megengedett hiba maximális értékét, azaz azt az értéket, ami felső korlátot ad a háromszögelésnél adódható hibának, akkor ez minként befolyásolja az előzőleg is említett átlagos hibát. Az x és y koordinátát szintén külön ábrázoltam.

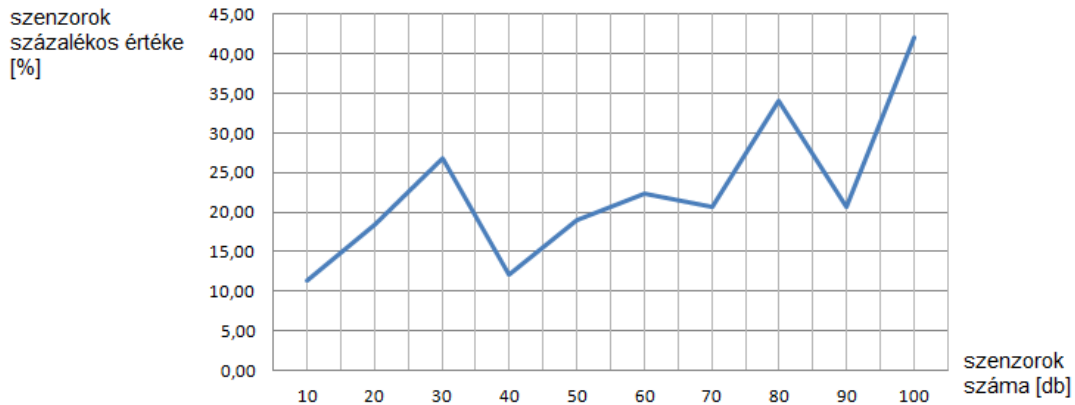


10. ábra

Lépésenként a szenzorokra átlagolt hiba a megengedett hiba maximális értékének függvényében
hiba maximális értéke: megengedett hiba maximális értéke, felső korlát

A 10. ábra mutatja ennek a vizsgálatnak az eredményeit és azok szemléltetését. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb ez a megengedett maximális érték, általában annál nagyobb az átlagos hiba is. Ez annak tudható be, hogy nagyobb maximális érték esetén egy tágabb intervallumból vehet értékeket a hibát generáló random függvény, így az átlagolandó hibaértékek is nagyobbak lehetnek.

Ez utáni vizsgálatom tárgya, hogy a szenzorok számának változtatása esetén hogyan változik lépésenként azoknak a szenzoroknak százalékos értéke, amelyek pozíciója kiszámolható bármelyik másik három szenzor helyzetéből. Ebben az esetben azt vizsgáltam, hogy ha változtatom a szenzorok számát, akkor az hogyan hat azoknak a szenzoroknak a darabszámára, amelyek helyét ki lehet számolni bármelyik másik három szenzorból. Másképpen mennyire függ a helymeghatározás sikeressége az összes szenzor számától. A szemléltetés céljából a kiszámolható helyzetű szenzorokat százalékos értékben ábrázoltam.

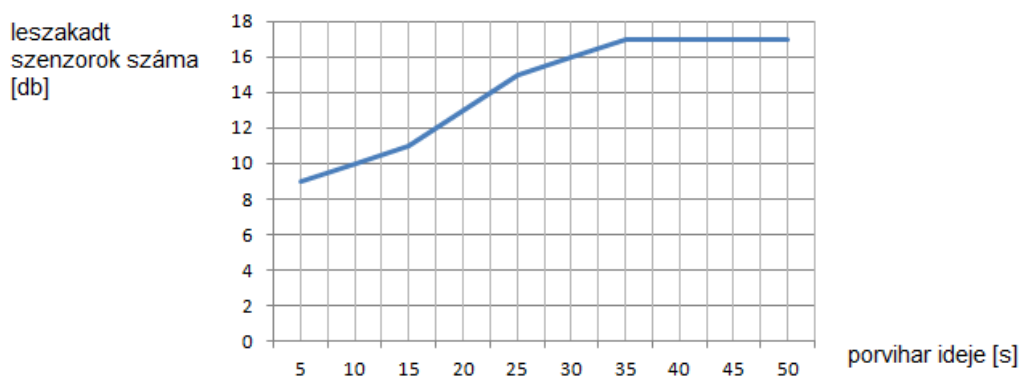


11. ábra

Kiszámolható pozíciójú szenzorok százalékos értéke a szenzorok számának függvényében
 szenzorok százalékos értéke: kiszámolható pozíciójú szenzorok száma/összes szenzor száma * 100

A 11. ábrán az látható, hogy ugyan az értékek ugrálnak, de összegésében emelkednek az értékek. Tehát összesítve minél több szenzor van a szenzorhálózatban, annál több szenzor helyzetét lehet kiszámolni. A helymeghatározás sikeressége nem függ ez esetben attól, hogy szuperszenzor vagy későbbi referencia szenzor által lett meghatározva.

Következő vizsgálatom, hogy a porvihar idejének változtatása esetén hogyan változik azoknak a szenzoroknak a száma, amelyek a porvihar következtében leszakadnak a szenzorbolytól. A vizsgálatom célja az, hogy látni lehessen, hogy a porvihar idejének változtatásával mennyire változik azoknak a szenzoroknak a száma, akik leszakadnak a bolytól. A leszakadás leginkább azért történhet meg, mert a porvihar ideje alatt nincs kapcsolat a szenzorok között és ezért lehet olyan szenzor, aki a meghatározott sávon kívülre téved anélkül, hogy ezt észrevenné. A sávon kívül viszont már nagy valószínűséggel nem lesz olyan három szenzor, akinek a hatótávolságába beleesik.

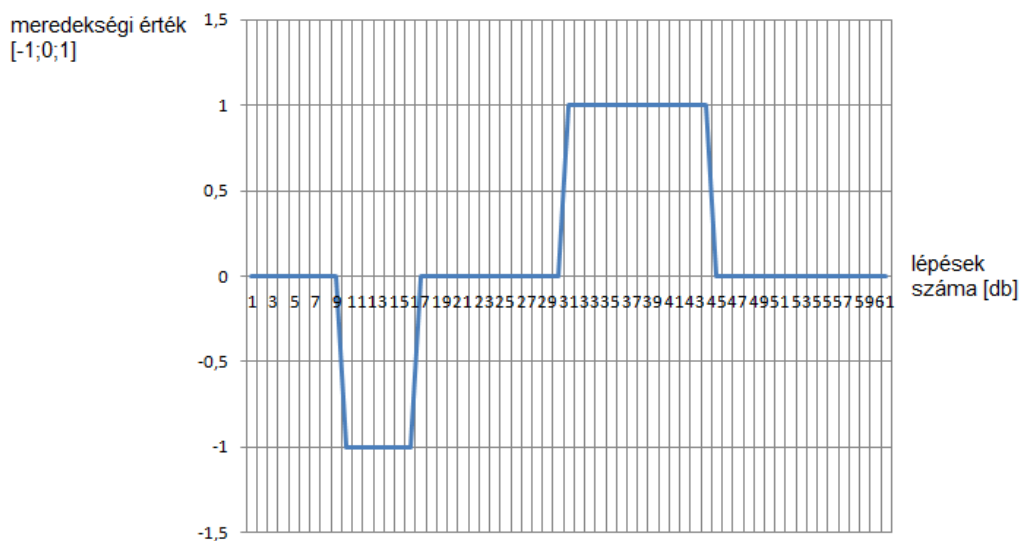


12. ábra

A leszakadó szenzorok száma a porvihar idejének függvényében

Az 12. ábra látszódnak a vizsgálatom eredményei. Leolvasható, hogy minél tovább tart a porvihar, annál több szenzor szakad le a bolytól. Ez azért van, mert tovább tartó porvihar esetén több ideig nincs kapcsolat a szenzorok között. Tehát több ideig nem képesek meghatározni a helyzetüket, nem tudnak a pozíciójukról pontosabb adatot. Ezért azt sem veszik észre, hogy a meghatározott sávon kívülre érnek, vagy esetleg leszakadnak a bolytól és ezért tovább mozoghatnak a rossz irányba. Ez eredményezi azt, hogy több szenzor is leszakadhat. Látszódik, hogy egy magadott érték (~33 időegység) után az eredmény stagnál, azaz itt már az összes (a szuperszenzorokon kívül) szenzor leszakadt a bolytól, ennyi ideig tartó porviharnál elveszik szinte az egész szenzorhálózat.

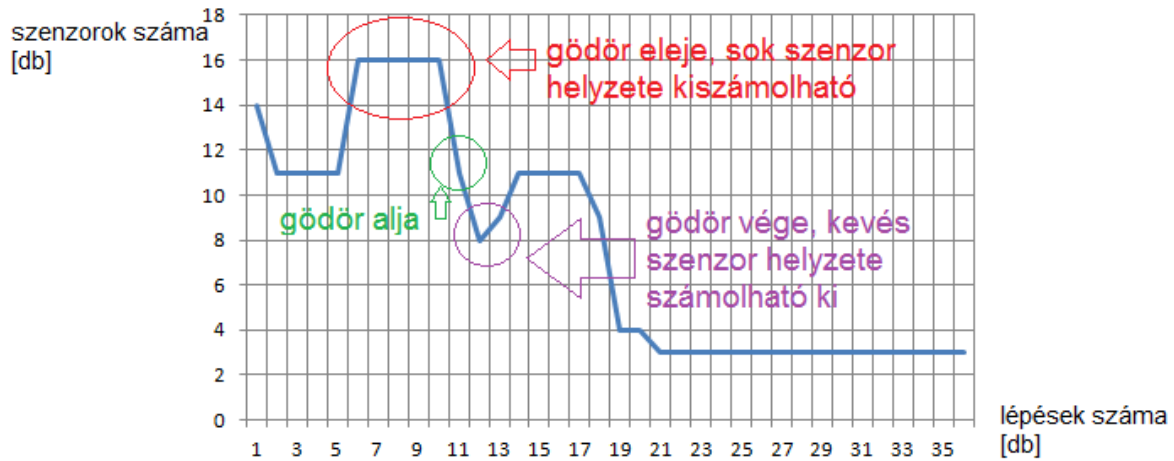
Utolsó vizsgálatom a gödör hatása a szenzorhálózatra.



13. ábra

A gödör miatti meredeksége a 14-es indexű szenzornak

A 13. ábrán jól látszik a véletlenszerűen kiválasztott 14. számú szenzor meredekségi értékének változása. A -1-es érték azt jelenti, hogy lejtőn lefele halad a szenzor, a 0 érték azt jelenti, hogy sík terepen halad, az 1-es érték pedig azt, hogy felfele halad a szenzor. Ez alapján látható, hogy a 9. lépés után elindul a lejtőn lefelé a szenzor, majd a gödör alján halad tovább és végül felfele jön a gödörből.



14. ábra

Szenzorok helyzetének kiszámíthatósága a gödör függvényében
lépések száma – x tengely
kiszámolt helyzetű szenzorok száma [db] – y tengely

A gödör hatása leginkább az alábbi 14. ábrán látszik. Itt megfigyelhető, hogy hol van a gödör, a szenzorok melyik lépésnél érik el és meddig maradnak benne. Ahol belelép, ott azoknak a szenzoroknak a száma, amelyeknek a pozícióját meg lehet határozni a háromszögeléses módszerrel megnő. Ez azért van, mert itt a szenzorok összesűrűsödnek egy kisebb területre a gyorsuló mozgásuk miatt. És ez alatt az idő alatt egyre több szenzor fér bele a másik hatótávolságába.

Ugyanígy látható az is, hogy a gödör hol ér véget, hiszen itt azoknak a szenzoroknak a száma, amelyeknek a pozícióját meg lehet határozni, lecsökken. Itt a szenzorok mozgása az emelkedő miatt lelassul, jobban szétszóródnak, lemaradnak egymáshoz képest, ezért több olyan szenzor lesz, aki leszakad adott lépésben a bolytól.

5. Összefoglalás

A dolgozatom zárásaképp szeretném összefoglalni a leglényegesebb lépéseket és eredményeket.

A távoli égitestek feltérképezése egyre nagyobb szerepet kap nemcsak a nemzetközi tekintetben, hanem hazánkban is. A gyors fejlődés maga után vonja az űreszközök fejlesztését is, ami egyre részletgazdagabb és pontosabb eredményeket produkál. Ezek inspiráltak arra, hogy kifejtssem a szenzorhálózatok alkalmazhatóságát egy ilyen feladaton belül. Egy olyan szenzorhálózatot feltételeztem a munkám során, amiben fontos szerepet kap a helymeghatározás, hiszen a mért adatok megkívánják, hogy a mérési helyzetüket ismerjük és képesek legyünk kalkulálni velük. A pozícionálásra a háromszögelés módszerét alkalmaztam, amelyet matematikai egyenletekkel és geometriai ábrákkal szemléltettem. Ezek alapján kialakítottam egy olyan algoritmust, amelyet követve az szenzorhálózat tagjai képesek egymáshoz viszonyított helyzetüket meghatározni. Ez azonban nem ad maradandó és pontos eredményeket, hiszen mérési és számítási hibákkal mindig kell számolnunk. Ezen hibáknak a meglétére és torlódására fókuszáltam, ami azt eredményezte, hogy meg tudtam állapítani egyes összefüggéseket az alkalmazás hatékonyságának terén. A hibatorlódás több lépcsős helymeghatározás esetén egyre nagyobb mértékben van jelen és egyre inkább eltérő eredményeket ad a valós helyhez viszonyítva. Ez olyan problémákat vet fel, amelyek veszteségekkel is járhatnak. A bolytól leszakadó szenzorok számának, az eredmények pontosságának, a számítási hibák nagyságának és a pozíciók kiszámíthatóságának változásait vizsgáltam. Az ezekből adódó eredmények elemzése egy általam írt szimulációs programmal történt. A kapott számszerű adatokat nem csak szövegesen értelmeztem, hanem grafikonokon is szemléltettem. Így részletesebb és kézzelfoghatóbb képet kaptam a választott szenzorhálózat működéséről, hatékonyságáról. Az eredmények felhasználásával könnyen lehet növelni egy ilyen szenzorhálózat hatékonyságát.

Nemcsak a szenzorhálózat által adott helyzeteket vizsgáltam, hanem a távoli égitesten felléphető jelenségekre is kitértem. Olyan általános helyzeteket választottam, amelyek a legtöbb égitesten előfordulhatnak. A jelenségek következményei között szerepel a szenzorok közötti kommunikáció megszakadása, az egymás hatósugarától való távolodás és ahhoz való közeledés, illetve a bolytól leszakadó szenzorok megléte is. Az általam választott két jelenség ezek bemutatására a porvihar és a felszínen megjelenő gödör.

Dolgozatomban igyekeztem törekedni arra, hogy aktuális problémát közelítsek meg és ennek a problémának minél részletesebb és hatékonyabb vizsgálatára törekedjek. A továbbiak során a kutatási eredményemet szeretném a szakmai közösség előtt is publikálni akár egy magyar nyelvű könyvfejezetben, illetve nemzetközi konferencián.

Irodalomjegyzék

- [1] Joseph A. Burns, “The four hundred years of planetary science since Galileo and Kepler”, Nature, 2010. július 29.
- [2] NASA honlapja, <http://www.nasa.gov>, 2012. szeptember 28-ai fotója (*Utolsó látogatás: 2012. október 24.*)
- [3] European Southern Observatory honlapja, <http://www.eso.org>, 2010. augusztus 24-ei cikke (*Utolsó látogatás: 2012. október 24.*)
- [4] F. Aurenhammer, “Voronoi Diagrams — A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure”, ACM Computing Surveys (CSUR), 1991
- [5] Vincze Zoltán, Vida Rolland, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Távközlési és Médiainformatikai Tanszék “Mobil eszközök alkalmazása szenzorhálózatokban”, http://web.tmit.bme.hu/~vida/cv/hiradastechnika_v6.pdf, 2007. június (*Utolsó látogatás: 2012. október 24.*)
- [6] Guoqiang Mao, Baris Fidan, Brian D.O. Anderson, „Wireless sensor network localization techniques”, Elsevier, Computer Networks, Science Direct, 2007
- [7] Zafer, Sahinoglu, Sinan Gezici, Ismail Güvenc, “Ultra-wideband Positioning Systems”, Cambridge University Press, 2008