

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Msc Önálló laboratórium 2.  
  
Pingpong labda lokalizációja rezgésjelek alapján

Készítette

Gungl SzilárdKonzulens

2017

Tartalomjegyzék

[1. Bevezetés 3](#_Toc500934528)

[1.1. Az alapötlet 3](#_Toc500934529)

[2. Az előzmények 4](#_Toc500934530)

[2.1. A detektált jelek 4](#_Toc500934531)

[2.2. A hullámok fizikai tulajdonságai 5](#_Toc500934532)

[2.3. Detektálási módszerek 7](#_Toc500934533)

[2.4. Egydimenziós lokalizáció 7](#_Toc500934534)

[2.5. Detektálási módszerek 8](#_Toc500934535)

[3. Olcsóbb szenzorok tesztelése 9](#_Toc500934536)

[3.1. A felfogatás módja 10](#_Toc500934537)

[4. Összetettebb detektálási algoritmusok 13](#_Toc500934538)

[4.1. Beamforming 13](#_Toc500934539)

[4.2. Burkoló alapú triggerelés 15](#_Toc500934540)

[5. Síkbeli lokalizáció 17](#_Toc500934541)

[5.1. Lokalizációs algoritmus 18](#_Toc500934542)

[5.2. Az asztal feltérképezése 19](#_Toc500934543)

[5.3. Statisztikai mérések 20](#_Toc500934544)

[6. Összefoglalás 22](#_Toc500934545)

[7. Hivatkozások 23](#_Toc500934546)

# Bevezetés

Napjainkban a technikai újításokat egyre szélesebb körben alkalmazzák a különböző sportokban. Gondoljunk csak a mára már természetesnek tekintett automatizált időmérésre az úszás esetében, vagy az összetettebb rendszerek közül például a les jelző rendszerekre a labdarúgásban, vagy a „HawkEye” pattanás észlelő rendszerre a teniszben.

Ezen eszközök egyrészt segítséget nyújthatnak a valós idejű bírói döntésekben, lehetővé teszik a játék monitorozását, kényelmi funkciót biztosítanak a nézők számára. Mindemellett a mért adatokból statisztikák is készíthetők, melyek egyaránt segíthetik a sportolókat, edzőket, vagy a szabályhozó szövetségeket.

Ez az önálló laboratórium is hasonló elgondolás alapján született. Az alapvető célkitűzés egy olyan lokalizációs rendszer létrehozása, mely a pingpongasztalon lepattanó labdát tudja detektálni annak rezgésjelei alapján.

## Az alapötlet

A detektálás elve viszonylag egyszerű. Az asztalon gyorsulásmérő szenzorokat helyezünk el, melyekkel a lepattanó labda által gerjesztett rezgések mérhetők. A rezgésjelek hullámok formájában terjednek az asztalon, és azok az egyes pozícióban levő szenzorokat különböző időpontokban érik el. Ezen időkülönbségekből kikövetkeztethető a lepattanás, vagyis a hullám forrásának pozíciója.

A beérkezési időpontok különbségén alapuló módszereket az angol irodalomban Time Difference of Arrival (TDoA) néven találjuk meg.

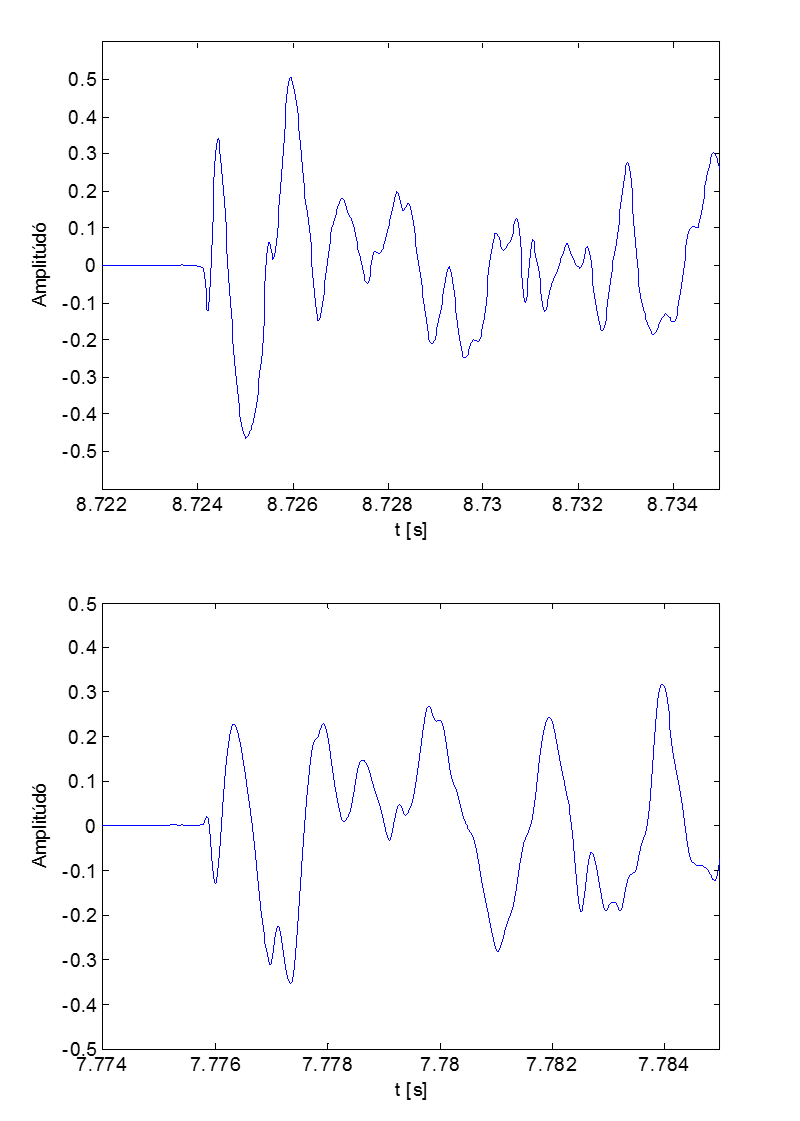
Az Önálló labor 2. tantárgy keretében már a második félévet töltöttem a téma mélyebb tanulmányozásával. Ebben a dolgozatban először röviden ismertetem az első félév eredményeit, a megszerzett ismereteket és a felvetett kérdéseket, majd ezután bemutatom a munka további menetét.

# Az előzmények

Az első félév folyamán közelebbről megismerkedtem a pingpong asztalon keletkező jelek jellegével és a terjedés tulajdonságaival. Az elvégzett mérések során a referenciának tekintett Brüel & Kjær gyorsulásmérő szenzorokat használtam, melyek jelét a 24 bites A/D átalakítóként funkcionáló Roland CakeWalk 8 szinkron sávos külső hangkártyával dolgoztam fel, 96 kHz-es mintavételi frekvenciával.

## A detektált jelek

Egy jellemző pattanás képe látható az alábbi ábrákon. A felvételek ugyanazon pattanás két különböző pozíciójából származnak. A két szenzor között 10 cm távolság van, vagyis a két kép közt pusztán annyi a különbség, hogy a jel 10 centiméterrel több utat tett meg az asztalon.



1. ábra Jelalak a pattanástól 30 és 40 cm távolságban

Mint látható a két jel alakja igencsak eltér. Már a jel kezdete is eltérő: közelebbi (30 cm) lokális minimummal, a távolabbi (40 cm) egy kisebb amplitúdójú lokális maximummal indul, tehát úgy tűnik, mintha a jel fázisa *10* cm alatt megfordulna. Majd ezt követően megszűnik a kezdeti periodikusnak látszó, növekvő amplitúdójú hullámzás és a jel „kaotikussá” válik.

Még szemre is nehéz megállapítani, hogy mit tekintsünk a jel kezdetének. Az ablak abszolút maximumát? Az első lokális maximumot? A korreláció így szóba sem jöhet, hiszen a két jel merőben eltér egymástól. A kiszámított keresztkorrelációjuk alig hasonlít a megszokott korreláció függvény alakjára. Erre a látszólag furcsa viselkedésre egyrészt a jel tulajdonságai, másrészt az asztal geometriai jellemzői adnak magyarázatot.

## A hullámok fizikai tulajdonságai

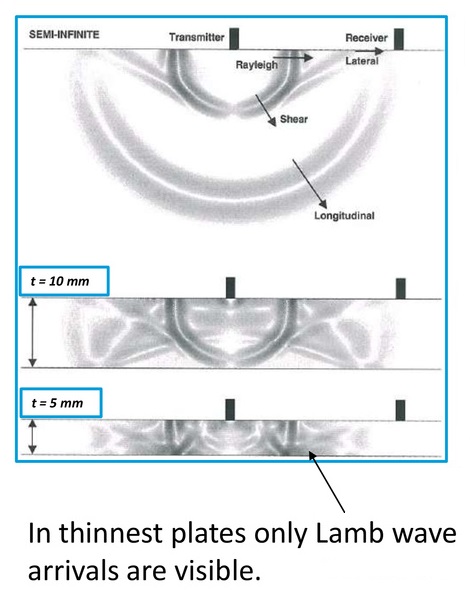
A mechanikai hullámok egy rugalmas közegben jöhetnek létre valamilyen „zavar” tovaterjedésével. A hullámok térben és időben is periodikus jelenségek, több olyan jellegzetes viselkedést is mutatnak, amelyek csak a hullámokra jellemzők, például az interferencia. [1]

Jelen esetben a labda mozgási energiájának egy része adódik át a pattanás során, mely az asztalban rezgéseket kelt és ezek terjednek tovább hullámok formájában.

A szilárd testekben gerjesztett hullámok különböző módusokban, eltérő sebességgel terjedhetnek. Ezekben a módusokban az egyes pontok (részecskék) rezgésének iránya változó, a terjedési irányhoz képest eltérő orientáltságú. Ha ezek a rezgések az asztalban, mint vékony síkszerű testben terjednek, akkor az asztal alsó és felső lapjáról visszaverődnek, és így egymással interferálnak. A fenti jelek második felében tapasztalt „kaotikus” viselkedést ez okozza. E jelenség szimulációjának képe látható az alábbi ábrán (2. ábra).

Azt, hogy miért fordul meg látszólag a fázis és változik a jel elején levő lokális minimum lokális maximumra, a fázis- és csoportsebesség kapcsolata magyarázza.

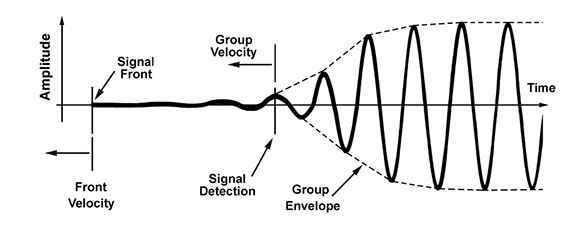
A fázissebesség egy adott hullám azonos oszcillációs fázisban levő pontjainak (például hullámcsúcsok) mozgási sebességét határozza meg. Kiszámolható a hullámhossz és a periódusidő hányadosaként. A csoportsebesség az energia (vagy az információ) terjedési sebessége a hullámcsoport mozgása közben.



2. ábra Visszaverődés és interferencia [2]

A két sebesség kapcsolata meglehetősen bonyolult. A detektálás szempontjából elegendő úgy tekinteni, hogy a kettő általában (mint ahogy a mi esetünkben is) nem egyezik meg. Ennek viszont az az eredménye, hogy egy amplitúdómodulációhoz hasonló jelalak jön létre, vagyis berajzolható egy burkoló görbe, mely a hullámcsúcsok egy csoportját reprezentálja. Az egyes hullámfrontok e burkoló görbe alatt, attól eltérő sebességgel haladnak.

Így tehát a beérkező hullám esetében az első néhány hullámcsúcs növekvő amplitúdója e burkolót követi. Ahogy a jel a térben halad, a burkoló gyorsabban mozog, mint az egyes hullámfrontok, ezáltal úgy tűnik, mintha újabb hullámcsúcsok jelennének a jel elején.



3. ábra A beérkező jel burkolója [2]

## Detektálási módszerek

A TDoA lokalizációs technikák a jelek beérkezési időpontjainak különbségéből következtetik ki a forrás, vagyis a lepattanás pozícióját. Ezeket az időkülönbségeket kétféle módon is megkaphatjuk: vagy tekintjük a jelek egészét és kiszámoljuk, hogy egymáshoz képest mekkora lehet az eltolás (ilyenek a korreláció alapú, Delay & Sum technikák), vagy megpróbáljuk meghatározni, hogy hol lehet a jel kezdete (például egy egyszerű triggereléssel) és ezeknek az időpontoknak a különbségét vesszük.

A korábban ismertetett hullámtulajdonságok több problémát is felvetnek. Egyrészt a trigger alapján történő detektálás esetében a lassan növekvő amplitúdó miatt nehéz a megfelelő trigger szintet kiválasztani. Nagy az esély arra, hogy az első néhány, kis amplitúdójú csúcsot nem érzékeli az algoritmus. Egy hullámcsúcsnyi tévesztés a tapasztalatok szerint általában 10-20 minta eltérést jelent a jel valódi kezdetétől, ami közel *600 m/s* sebességgel és 96 kHz-es mintavételi frekvenciával számolva önmagában *10 cm* hibát okoz. Nyilván a lokális maximum keresése sem túl célravezető, hiszen az egyes csúcsok folyamatosan vándorolnak a burkolón belül.

A korreláció alapú technikák gyengesége akkor mutatkozik meg, amikor a jel sokat változik a terjedés során. A módszer alapja a Delay & Sum algoritmus, tehát a jeleket időben eltoljuk, majd összegezzük, és azon eltolás értékek mentén kapunk maximumot, melynél a jelek leginkább hasonlítanak egymásra. Lényegében azt feltételezzük, hogy a jelek alakja megegyező, csupán időben vannak késleltetve. Ezen jelen esetben nem igaz. Mint látható már 10 cm alatt is jelentősen változik a jel formája.

## Egydimenziós lokalizáció

Annak érdekében, hogy az egyes algoritmusok pontosságát tesztelni tudjam, először is egydimenziós lokalizációt valósítottam meg. Ennek előnye, hogy két szenzorral megvalósítható, valamint kicsi a számításigénye.

Az egydimenziós lokalizációhoz a szenzorokat egy egyenesen helyeztem el és a labdát ugyanezen az egyenesen pattogtattam egy mérőszalag mentén, meghatározott pozíciókban. Ezt a mérési elrendezést alkalmazva egy időkülönbség meghatározásával már megkaphatjuk a lepattanás pozícióját. A detektált pozíció pontossága így közvetlenül visszavezethető az időkülönbség-mérés pontosságára, amit a lokalizációs algoritmusok kulcsfontosságú része.

## Detektálási módszerek

A kipróbált egyszerű módszerek a következők:

* *Trigger szint detektálás:*   
  Egy egyszerű trigger szintet beállítva megnézzük, hogy mikor éri el a jel ezt a küszöbértéket.
* *Első lokális maximum detektálás:*Azt az első lokális maximumot tekintjük a jel kezdetének, mely meghalad egy trigger szintet.
* *Illesztett parabola alapú detektálás:*Az első néhány (3) lokális maximumra próbálunk egy parabolát illeszteni, ezzel tulajdonképpen a burkolót közelítjük.
* *Energiaeloszlás szerinti detekció:*A jel teljesítményeloszlása alapján igyekszünk meghatározni a jel kezdetét.

Ezeket a módszereket tesztelve azt tapasztaltam, hogy a trigger szint és parabola szerinti detektálás egészen pontos, viszont gyakran nagyot téved – főként az asztal széleinél, ahol a beérkező jelek útkülönbsége a legnagyobb. Ugyanakkor az energia eloszlás szerinti detektálás a leginkább robosztus.

További probléma még az asztal lábainak torzítása. Ez abból adódik, hogy a lábak – az asztal alján, keresztben futó fém csövek – a nagyobb sűrűségüknek köszönhetően nagyobb sebességgel vezetik a rezgéseket. Így az asztal nem tekinthető anizotrópnak, tehát a hullámok terjedési sebessége függeni fog a terjedés irányától.

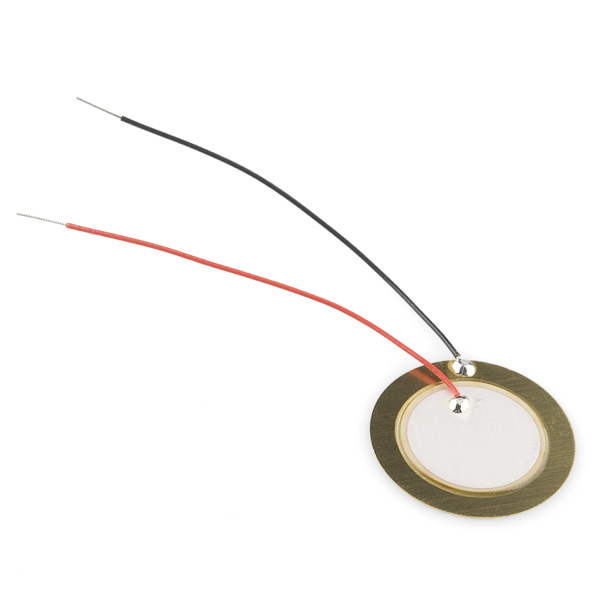
A fenti előzmények tudatában a második féléves munkára a következő célokat tűztük ki:

* Olcsóbb szenzorok tesztelése
* Összetettebb algoritmusok kipróbálása
* 2 dimenziós lokalizáció megvalósítása több szenzorral

# Olcsóbb szenzorok tesztelése

Azért tartottuk fontosnak az olcsóbb szenzorok tesztelését, mivel ezek használata közelebb áll a beágyazott szemlélethez, valamint ezekből akár többet is fel tudtunk helyezni az asztalra a mérések során, így további lokalizációs lehetőségeket biztosítanak számunkra.

Az olcsóbb eszközök közül a piezo lapkákra esett a választás. Ez a lapka, vagy más neéven zümmer, egy egyszerű hangszóróként funkcionál. Tartalmaz egy piezoelektromos kristályt, mely a rákapcsolt feszültség hatására deformálódik. Ha a rákapcsolt feszültséget periodikusan változtatjuk, akkor az periodikus deformációt fog eredményezni, amely végsősoron hanghullámokat kelt a lapkát körülvevő levegőben.



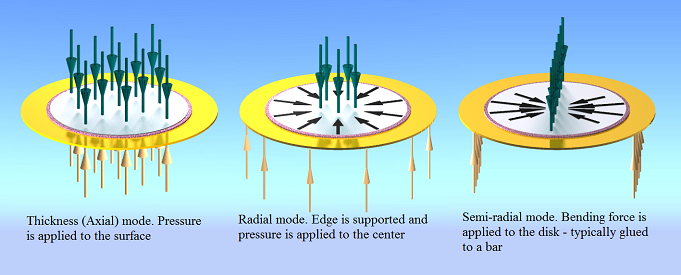
4. ábra Piezo lapka [3]

Ha ezt az egész folyamatot megfordítjuk, vagyis valamilyen külső mechanikai hatással deformáljuk a kristályt, akkor az a behatás mértékével arányosan feszültséget fog generálni. Így tehát ezek a zümmerek felhasználhatók rezgések elektromos jellé történő átalakítására is. Akusztikus hangszerek – például gitár – hangjának rögzítésére is szokták ezeket az eszközöket alkalmazni.

A piezo lapkák nagy előnye, hogy tényleg olcsók, 100 forint alatt hozzájuk lehet jutni, valamint nagy kimeneti jellel rendelkeznek. A nagy kimenet jó jel-zaj viszonyt eredményez, valamint nem szükséges külön analóg áramkörrel feldolgozni a jelet, hanem az közvetlenül ráköthető az A/D átalakító bemenetére.

## A felfogatás módja

A szenzor működési elve egyszerű: a külső mechanikai hatás a kristályt deformálja, mely feszültséget generál. Viszont ha eltérő módon fejtünk ki erőt a lapkára, akkor eltérő működési tulajdonságokat mutatnak.



5. ábra Különböző felfogatásokból eredő erőhatások [3]

Mint az a fenti ábrán látható különböző módokon deformálhatjuk a kristályt. Az egyik lehetőség az, hogy teljesen az asztal lapjára simítva rögzítjük a szenzort, így a keletkezett rezgések tulajdonképpen a felületre merőlegesen, az egész lapkát préselik össze.

A másik lehetőség, hogy a lapkának csak a szélét rögzítjük – például egy karimát illesztünk rá – és a közepét egy membránhoz hasonlóan hagyjuk szabadon lengeni. Ezáltal a felületre merőleges erőhatás nem közvetlenül a kristályt préseli össze, hanem az egész lapkát hajlítja meg a sárgaréz alappal együtt. Ez a hajlítás a kristályra nyíró irányú erőként hat és így generál feszültséget.

A két felfogatás átvitelre gyakorolt hatását láthatjuk az alábbi diagramon. A képen két különböző módon rögzített piezo lapka jelét láthatjuk a frekvenciatartományban. A karimás felfogatás hatása egyértelműen látszik: a membránszerű szerkezet érzékenyebb a nagy frekvenciás komponensekre, így egyenletesebb átvitelt eredményez. Emiatt a további mérések során is ezt a konstrukciót alkalmaztam.



6. ábra A különböző felfogatások hatása a frekvenciatartományban

Bármely felfogatást is vizsgáljuk, a kristály deformációja két tényezőből tevődik össze. Egyrészt az asztal lapja mozdul el a terjedő rezgések hatására, amely megmozgatja a hozzá fogatott szenzorokat is, de ez önmagában még nem okozna deformációt. Fizikai változás azért jön létre, mert a lapkáknak tömegükből adódóan van egy tehetetlenségük, mely mindig a testre ható erő irányával ellentétesen hat. Tulajdonképpen ez a két erő nyomja össze a kristályt, vagy hajlítja meg az egész lapkát.

Ha növeljük a szenzorok tehetetlenségét, ez az erő is megnő, mely nagyobb alakváltozást eredményez, ami végsősoron nagyobb feszültséget hoz létre. Ezt egyszerűen a tömeg növelésével érhetjük el. A vizsgálat során különböző tömegű súlyokat helyeztem a lapkák felületére, majd ezek jelét a referenciának tekintett Brüel & Kjær szenzorok jelével vetettem össze.

A piezo lapkák eleve aluláteresztő jellegűek, tehát a magasabb frekvenciákon kevésbé érzékenyek. Emellett rendelkeznek egy rezonancia frekvenciával is ~5000 Hz körül, ami kiemelést eredményez a detektált jelek spektrumában.

7. ábra A hozzáadott tömeg hatása idő- (felül) és frekvenciatartományban (alul)  
tömeg nélkül (balra), 3g hozzáadott tömeggel (jobbra)

Az ábrákon jól látszik, hogy a piezo lapkáknak aluláteresztő hatásuk van, melyet a hozzáadott tömeg még inkább felerősít. A megnövelt tömeg ugyan alacsony frekvenciákon egy jelentős kiemelést eredményez, viszont az áteresztőtartomány lecsökken, illetve zárótartományban az elnyomás megnő.

Az aluláteresztő jelleg a lapkák tehetetlenségével magyarázható: minél nagyobb a tömeg, annál kevésbé tudja követni a tehetetlen membrán a gyors, nagy frekvenciás rezgéseket.

Az egyenletesebb átvitele miatt a mérések során a hozzáadott tömeg nélküli változatot használtam. A tapasztalatok szerint az időtartománybeli módszerek pontosabban megtalálták a jel kezdetét, amikor a magasabb frekvenciás összetevők is jelen voltak.

# Összetettebb detektálási algoritmusok

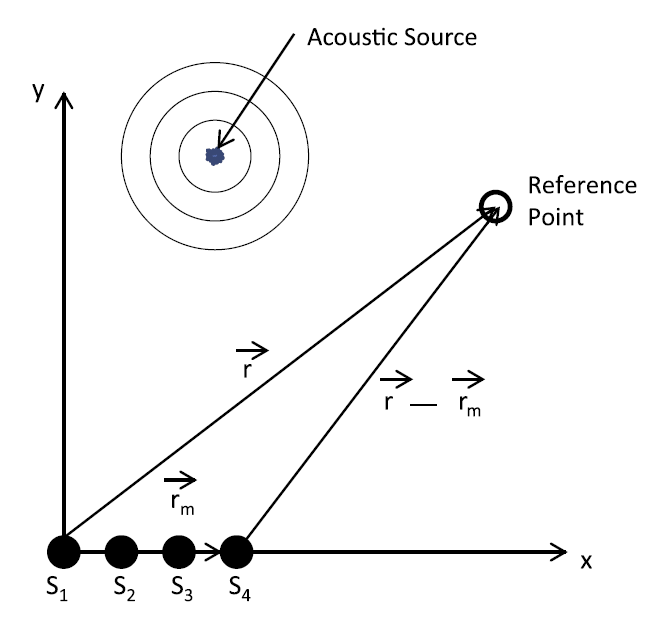
A szenzorok vizsgálata mellett a félév másik főbb célkitűzése az összetettebb algoritmusok kipróbálása volt. Az első félévben főként időtartománybeli módszerekkel foglalkoztam, így szinte természetes volt, hogy elsőként egy frekvenciatartománybeli technikát teszteljek.

## Beamforming

A beamforming egy olyan jelfeldolgozási technika, melyet széleskörben alkalmaznak az irányfüggő jel sugárzásnál és vételnél.

Adás esetén több antennát használnak, melyek jeleit úgy késleltetik, hogy az azok által okozott interferencia a megfelelő irányban képezzen erősítési, illetve gyengítési sávokat.

Ezt az elvet megfordítva, a beamforming felhasználható a forrás irányának azonosítására vétel esetén. A működés elve az alábbi ábrán látható.



8. ábra A beamforming alapelve

A beamforming alapvetően a Delay & Sum technikán, tehát a késleltetett jelek összegzésén alapul. Az ábra alján helyezkednek el a szenzorok (*S1, S2, …*), ezt nevezzük szenzor tömbnek. Koncentrikus körökkel van feltüntetve a forrás pozíciója.

Az elgondolás az, hogy felveszünk egy tetszőleges referenciapontot (Reference point), ahova a pattanás helyét képzeljük. Ha ebből a pontból indulnának a hullámok, akkor azok a szenzorokat eltérő időpontokban érnék el, jelen esetben *S4*-et legelőször, *S1*-et utoljára. A beérkezési időpontok különbségét a szenzorok és a referenciapont helyzetéből, valamint a terjedési sebességből ki tudjuk számolni. Ez után a jeleket ennek megfelelően késleltetjük, hogy újra fázisba kerüljenek, majd összegezzük őket. Ez az összeg nyilván akkor lesz maximális, ha az általunk feltételezett késleltetési értékek pont megfelelnek a valóságnak, tehát a felvett referencia pont egybeesik a lepattanás (forrás) pozíciójával.

A valóságban nyilván nem tudunk végtelen finomsággal, minden egyes pontra kiszámolni egy összeget. A gyakorlatban előre felveszünk egy rácsot, meghatározott felbontással, és ezekben a pontokban számítjuk a függvény értékét. Ez meghatározza a detektálás pontosságát is.

Mindemellett a beamforming annyit csavar még az algoritmuson, hogy a késleltetést a frekvenciatartományban végzi el. Ennek egyik előnye, hogy nem csak egész mintát tudunk késleltetni, valamint, hogy az egyes frekvenciakomponensekkel történő számítás egymástól függetlenül, külön-külön történik.

Az algoritmus az alábbi egyenletekkel írható le. Először is vesszük a jel Fourier-transzformáltját, majd ezt egy exponenciális taggal szorozzuk, mely megfelel az időtartománybeli késleltetésnek. Ez a késleltetés () természetesen függ a felvett referenciapont *x,y* koordinátáitól. Az egyes szenzorok jeleit aztán komponensenként összegezzük, majd kiszámítjuk az összeg teljesítményét. Ennek a helyfüggő teljesítményfüggvénynek a maximuma abban a rácspontban lesz, mely legközelebb esik a forrás tényleges pozíciójához.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | () |
|  |  | () |
|  |  | () |

Egy másik megközelítés szerint, az exponenciális taggal történő szorzásra késleltetés helyett tekinthetünk úgy is, mintha az egész szenzor tömböt forgatnánk el virtuálisan a térben. Ez a folyamatosan forgatott „lokátor” akkor fog maximális amplitúdóval venni, ha pontosan a pattanás felé néz, tehát az egy vonalban levő szenzorok pont derékszöget zárnak be a hullámok terjedési irányával.

A frekvenciatartománybeli vizsgálódás hátránya a nagyobb számításigény, melyet tovább fokozhat a rács felbontásának finomítása. Könnyen belátható, hogy a Dealy & Sum módszerre építő beamforming a korrelációhoz igencsak hasonló, így annak gyengepontjaiban is osztozik. Egy trade-off szituációval állunk szemben: minél közelebb helyezzük a szenzorokat, annál hasonlóbb jelalakokat kell összevetnünk, viszont így ezek egymáshoz viszonyított késleltetése is sokkal kisebb lesz – akár néhány minta – melyet nehéz pontosan detektálni. Ellenkező esetben, ha a szenzorokat távol helyezzük el, akkor pontosabban tudnánk meghatározni az irányt, viszont a nagy távolság miatt a jelalak is jelentősen meg fog változni, ami viszont ismét lerontja a pontosságot.

## Burkoló alapú triggerelés

Az előző félév tapasztalatai alapján a jel energiája szerinti detektálás volt az egyik legmegbízhatóbb algoritmus. Erre építve, egy új időtartománybeli módszert dolgoztunk ki, mely a jel energia-eloszlása alapján próbálja közelíteni a burkolót.

Az algoritmus meglehetősen egyszerű: először vesszük a jel teljesítményét – vagyis négyzetre emeljük az értékeket – majd ezt a teljesítmény függvényt próbáljuk meg simítani mozgóátlagolással. Ez lényegében a jel burkolójának lesz egy közelítő függvénye. Végül a simított függvény alapján triggereléssel állapítjuk meg a jel kezdetét.

Azért a mozgóátlagolásra esett a választás, mivel ez kis számításigényű és szép jelet eredményez az időtartományban. Ugyan a frekvenciatartományban kevésbé jól teljesít, de ez számunkra nem probléma, hiszen a triggerelés is időtartományban történik.

A jelből számított burkoló és a detektált pozíció az alábbi ábrán látható.



9. ábra Eredeti jel (kék) és a számított burkoló (piros)

A simítás, melyet jelen esetben mozgóátlagolással valósítottunk meg, láthatóan időtartománybeli késleltetést okoz. Viszont ez nem probléma, hiszen a TDoA lokalizáció esetében a jelek egymáshoz viszonyított helyzetét használjuk fel, tehát ez a késleltetés ki fog esni.

A mozgóátlag ablak méretét a jel elején megfigyelhető növekvő amplitúdójú periodikus szakasz fél periódusidejének hosszára választottuk meg. Ez a méret pont elegendő ahhoz, hogy az ablak kiátlagolja a hullámcsúcsokat, viszont még elegendően rövid, hogy kellően dinamikusan tudja követni a jelet. Ahhoz, hogy a jel kellően sima legyen a mozgóátlagolást kétszer végeztük el.

A trigger szintet a simított jel maximumának egy ezredére választottuk.

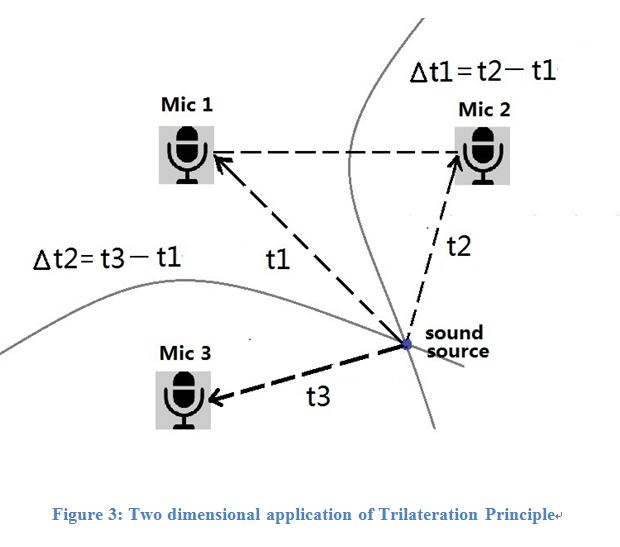
# Síkbeli lokalizáció

A pozíció meghatározásához a burkoló alapú detektálást használtam fel, melynek segítségével meghatároztam a jel kezdetét és ezt tekintettem a beérkezés időpontjának (Time of Arrival).

Az előzetes tesztek során alkalmazott 1 dimenziós lokalizáció után a tényleges, 2 dimenziós, síkbeli pattanás detektálás megvalósítása volt a feladat. Ehhez első sorban meg kellett határozni, hogy beérkezési időkülönbségekből, hogy számítjuk ki a lepattanás koordinátáit. A vonal menti (1D) lokalizáció esetén ez egyszerű volt, hiszen a mért időkülönbséget a terjedési sebességgel megszorozva közvetlenül megkaptuk az útkülönbséget, ami az egyenes mentén meghatározza a szenzortól való távolságot.

A síkbeli lokalizáció esetén ez kicsivel összetettebb. Két szenzort felhasználva a beérkező jelek útkülönbségeiből csak egy parabolát (hiperbolát) tudunk meghatározni, mely megadja azon pontok halmazát, mely az egyik szenzortól *x*, a másiktól *x + d* távolságra van, ahol *d* az útkülönbség.

Ha egy 3. szenzort adunk hozzá a rendszerhez, akkor az előzőek alapján egy új független parabolát tudunk kirajzolni. Ahol ezek a parabolák metszik egymást, ott lesz a forrás pozíciója.

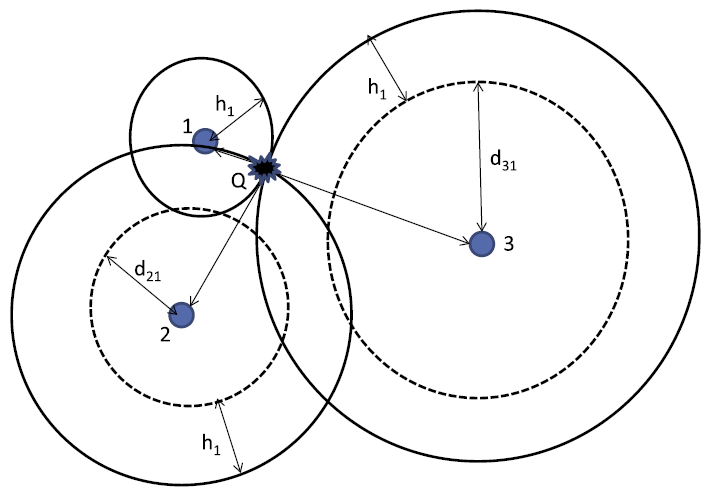


10. ábra Az útkülönbségekből felrajzolt parabolák [2]

## Lokalizációs algoritmus

A fenti módszer elviekben szép és működő, viszont gyakorlati megvalósítása kissé bonyolult. A parabolák felrajzolása, valamint a metszéspont megkeresése sem triviális. Gondoljunk csak bele: a diszkrét pontokban felrajzolt egyeneseknek minden egyes pontjára meg kellene vizsgálni, hogy metszik-e egymást vagy sem, ez igencsak számításigényes művelet.

Ehelyett a mérések során egy beamforming-hoz hasonló algoritmust valósítottunk meg. Ez a módszer „brute force” jellegű, tehát a számítási igénye ennek is magas, ugyanakkor a működése sokkal átláthatóbb és az implementáció is egyszerű.



11. ábra A megvalósított „brute force” jellegű lokalizáció elve

A beamforminghoz hasonlóan először is felveszünk egy referenciapontot, majd a szenzorok és a referenciapont helyzetéből kiszámítjuk a jelutak hosszát, vagyis az egyes szenzorok és a referenciapont távolságát. Ez után az egyik kitüntetett szenzorhoz tartozó távolságot – például az *1.* szenzorhoz tartozó *h1* távolságot – kivonjuk a többiből. Így az *1.* szenzorhoz viszonyított útkülönbségeket kapunk: *d21, d31*.

Ezeket az értékeket kell összehasonlítanunk a tényleges mérésből számolt útkülönbségekkel. Kézenfekvő módszer, hogy vegyük a négyzetes eltérésüket, vagyis a távolságok különbségének négyzetét. Ha ezt a négyzetes eltérést egy rács minden referenciapontjában kiszámítjuk, az alábbi ábrát kapjuk.



12. ábra Az útkülönbségek négyzetes eltérése

Mint látható ez egy két dimenziós, skalár függvény, melynek minimuma épp a forrás pozíciójában lesz, hiszen ekkor a legkisebb az útkülönbségek eltérése.

Ez a módszer abból a szempontból is előnyös, hogy a szenzorok számának növelése esetén sem kell attól tartani, hogy a kirajzolt parabolák esetleg nem egy pontban metszik egymást.

## Az asztal feltérképezése

A lokalizációs algoritmust úgy teszteltem, hogy a pingpong asztal bal oldalán felvettem egy rácsot, kb. 20 centiméteres osztásokkal, és ezekben a pozíciókban pattogtattam végig a labdát. Azért csak egy oldalon végeztem el a mérést, mert így egyrészt kevesebbet kellett pattintani, így könnyebb volt egy felvételen rögzíteni az összes pattanást, másrészt az asztalt függőlegesen szimmetrikusnak tekinthetjük (a lábak horizontálisan futnak az asztal alatt).

A lokalizáció eredménye az alábbi ábrán látható.



13. ábra Lokalizáció az asztal bal oldalán

Az ábra origója az asztal középpontjának felel meg, tehát a jobb oldal, a nulla *x* érték mentén reprezentálja az asztal függőleges felező egyenesét. Mint látható a jobb oldalon levő pattanások detektációja pontosabb, míg a bal oldalhoz közelítve – ahogy az útkülönbség növekszik – egyre pontatlanabbá válik.

Az algoritmus viszonylag pontosan megtalálja az asztal közepén történő pattanásokat, körülbelül 10 centiméteres hibán belül, viszont esettenként, a sarkokhoz közel nagyot téved.

## Statisztikai mérések

Annak érdekében, hogy az algoritmus stabilitásáról is képet kapjunk, statisztikai méréseket végeztünk. Ezt úgy valósítottuk meg, hogy a fenti térképről kiválasztott néhány pontban sokszor pattintottunk (kb. 100-szor), és vizsgáltuk, hogy a detektált pozíciók mennyire szóródnak szét.

Az alábbi ábrán látható két mérés eredménye, a *(– 20, – 20)* és *(– 75, 60)* pontokban.

14. ábra Statisztikus mérések

Mint látható, jó esetben a megtalált pozíciók a tényleges pattanás körül helyezkednek el, 10-15 centiméteres szórással, viszont egy pontatlan detektációt vizsgálva ez az érték akár 30-40 centiméter is lehet.

A bal felső sarokban vizsgált esetnél a detektált pozíciók befele tolódását az okozhatja, hogy az asztal lábai horizontális irányban gyorsabban vezetik a rezgéseket, így ebben ez irányban a hullámok gyorsabban elérik a szenzorokat.

Ezen anizotróp tulajdonságok kiküszöbölése lehet az egyik jövőbeli fejlesztési cél.

# Összefoglalás

Az Önálló laboratórium tantárgy célkitűzése egy olyan lokalizációs eljárás megvalósítása volt, mely a lepattanó pingpong labda pozícióját képes meghatározni az asztalon terjedő rezgésjelek alapján.

A munkát a jelek természetének megismerésével, valamint a terjedés fizikai tulajdonságainak feltérképezésével indítottuk. Ennek során rengeteg olyan tényezőre derült fény, melyek a feladat kiírása során még ismeretlen volt. Ilyen például a terjedő módusok interferenciája, vagy az asztal lábainak torzítása, melyek mind nehezítik a lokalizációt.

A munka következő állomása az olcsóbb piezo szenzorok tesztelése volt. Megvizsgáltuk a különböző rögzítési módok hatását, valamint a hozzáadott tömeg okozta viselkedésbeli változást.

A pozíció kiszámításához felhasznált TDoA algoritmus alapja a jelek beérkezési időkülönbségeinek meghatározása, ám ez, a jelek viselkedése miatt korántsem triviális. Először az egyszerűbb algoritmusokat teszteltem: triggerelés, korreláció, energiaeloszlás. Ezt követően kipróbáltam az összetettebb beamforming algoritmust, valamint egy burkoló alapú triggerelést is.

Ez utóbbit felhasználva egy „brute force” jellegű módszerrel megvalósítottuk a síkbeli lokalizációt. A tesztelés során egy előre felvett rácson pattogtattuk végig a labdát, annak érdekében, hogy az asztalt fel tudjuk térképezni. A kapott eredmények nem elborzasztók. Jó esetben a lepattanás helyét 10 centiméteres pontossággal meg tudjuk határozni. Ugyanakkor az asztal széléhez közel a pontosság jelentősen leromlik.

A jövőbeli munka célkitűzési közt szerepel egyrészt az asztal anizotróp tulajdonságainak kompenzálása, valamint több szenzor felhasználása, mellyel pontosítani lehetne a lokalizációt. Emellett távlati cél az egész rendszer valós idejű implementálása is.

# Hivatkozások

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | „Rezgések és hullámok” 2015. [Online]. Elérhető: http://fizipedia.bme.hu/index.php/Rezg%C3%A9sek#Rezg.C3.A9sek\_.C3.A9s\_hull.C3.A1mok. |
| [2] | Boris Muravin, „Acoustic Emission Wave Propagation And Source Location” 2009. [Online]. Elérhető: http://www.muravin.com/. |
| [3] | „Sparkfun - Piezo element” SperkFun Electronics Inc, [Online]. Elérhető: https://www.sparkfun.com/products/10293. |
| [4] | Dirk Aljets, Alex Chong, Steve Wilcox és Karen Holford, Acoustic Emission Source Location In Plate-Like Structures Using a Closely Arranged Triangular Sensor Array, University of Glamorgan, Faculty of Advanced Technology, Department of Engineering, 2010. |
| [5] | RepRap, „Underbed Piezo-electric sensors” [Online]. Elérhető: http://reprap.org/wiki/Underbed\_Piezo-electric\_sensors. |
| [6] | T. Kundu, „Acoustic source localization” *Ultrasonics* 1. kötet 54, pp. 25-38, 2013. |