

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Msc Önálló laboratórium 2.

Készítette

Gungl SzilárdKonzulens

2017

Tartalomjegyzék

[1. Bevezetés 3](#_Toc500763102)

[1.1. Az alapötlet 3](#_Toc500763103)

[2. Az előzmények 4](#_Toc500763104)

[2.1. A detektált jelek 4](#_Toc500763105)

[2.2. A hullámok fizikai tulajdonságai 5](#_Toc500763106)

[2.3. Detektálási módszerek 7](#_Toc500763107)

[2.4. Egy dimenziós lokalizáció 7](#_Toc500763108)

[2.5. Detektálási módszerek 8](#_Toc500763109)

[2.6. Sebességmérés 10](#_Toc500763110)

[2.7. Mérési eredmények 10](#_Toc500763111)

[2.8. A lábak problémája 13](#_Toc500763112)

[2.9. Az egész asztal feltérképezése 14](#_Toc500763113)

[3. Összefoglalás 15](#_Toc500763114)

[4. Hivatkozások 16](#_Toc500763115)

[5. Függelék 17](#_Toc500763116)

# 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.

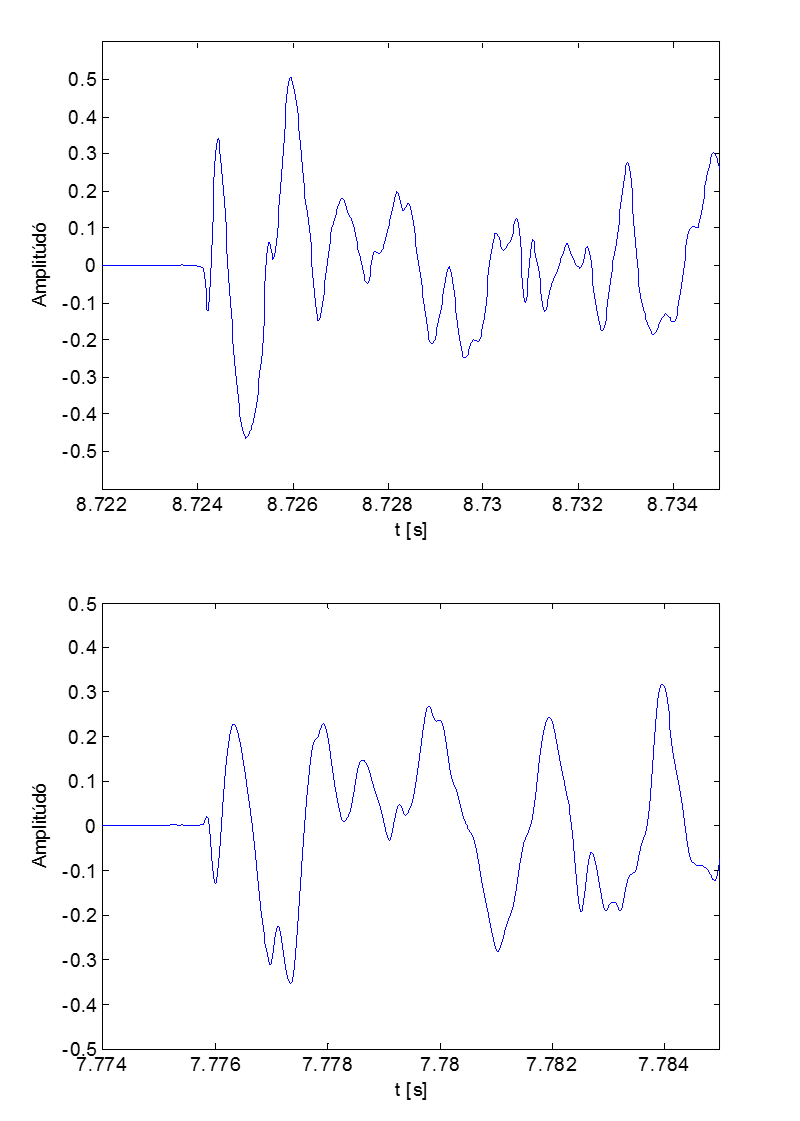
Az Önálló labor 2. tantárgy keretében már a második félévet töltöttem a téma mélyebb tanulmányozásával. Ebben a dolgozatban először röviden ismertetem az első félév eredményeit, a megszerzett ismereteket és a felvetett kérdéseket, majd ezután bemutatom a munka további menetét.

# 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.



1. ábra. Jelalak a pattanástól 30 és 40 cm távolságban

Mint látható a két jel alakja igencsak eltér. Már a jel kezdete is különbözik: közelebbi lokális minimummal, a távolabbi 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

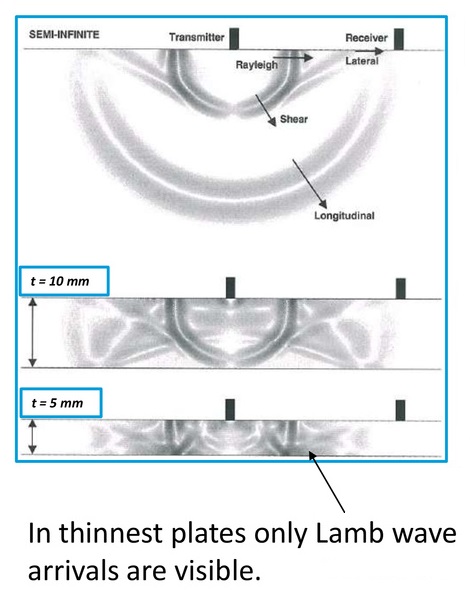
A mechanikai hullámok egy rugalmas közegben jöhetnek létre valamilyen „zavar” tovaterjedésével. A hullámok térben és időben is periodikus jelenségek, több olyan jellegzetes viselkedést is mutatnak, amelyek csak a hullámokra jellemzők (például az interferencia). [1]

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.

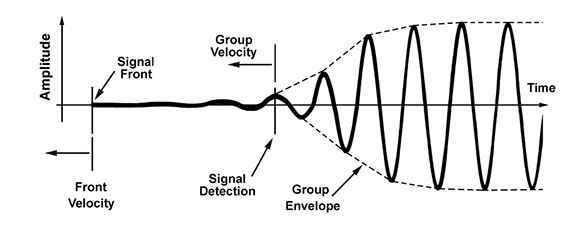
A fázissebesség egy adott hullám azonos oszcillációs fázisban levő pontjainak (például hullámcsúcsok) mozgási sebességét határozza meg. Kiszámolható a hullámhossz és a periódusidő hányadosaként. A csoportsebesség az energia (vagy az információ) terjedési sebessége a hullámcsoport mozgása közben.



2. ábra. Visszaverődés és interferencia [2]

A két sebesség kapcsolata meglehetősen bonyolult. A detektálás szempontjából elegendő úgy tekinteni, hogy a kettő általában (mint 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 időkölünbségeket 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 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, 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.

## Egy dimenziós lokalizáció

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

Az egy dimenziós 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 jelek közti eltérés 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.

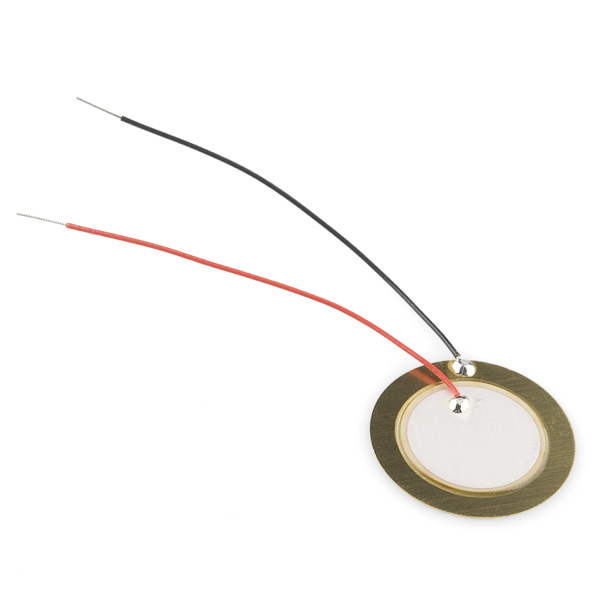
A fenti előzmények tudatában a második féléves munkára a következő célokat tűztük ki:

* 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 ismertebb nevén 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.



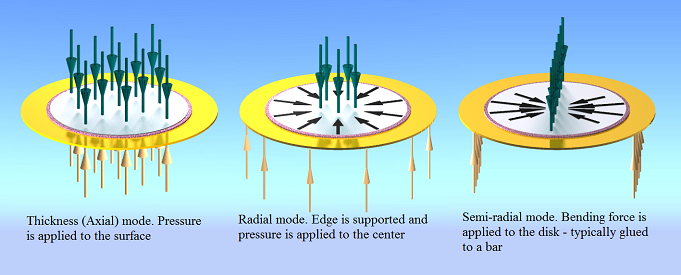
4. ábra Piezo lapka [3]

Ha ezt az egész folyamatot megfordítjuk, vagyis valamilyen külső mechanikai hatással deformáljuk a kristályt, akkor az feszültséget fog generálni, mely arányos lesz a behatás mértékével. 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. Az eltérő módon deformált kristályok viszont 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 mód az, 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 kettő közti különbséget az alábbi ábra szemlélteti. A képen két különböző módon rögzített piezo lapka jelét láthatjuk a frekvenciatartományban. A karimás felfogatás hatása egyértelműen látszik: a membrán szerű szerkezet érzékenyebb a nagy frekvenciás komponensekre, valamint kis frekvencián is nagyobb amplitúdóval visz át.

A fenti pozitív tulajdonságai miatt a mérések során is ezt a felfogatást 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 rezgéseknek megfelelően, 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 szerkezetet.

Ha növeljük a szenzorok tehetetlenségét, ez az erő is megnő, mely nagyobb alakváltozást eredményez, ami végsősoron nagyobb feszültséget hoz létre. Ezt 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 (jobbra), 3g hozzáadott tömeggel (balra)

Rez freki változik, kiemelés, + aluláteresztés

# Összefoglalás

Az önálló labor első félévének célja a tájékozódó mérések elvégzése volt. Ennek során rengeteg olyan tényezőre, problémára derült fény, melyek a feladat kiírása során még ismeretlenek voltak.

A TDoA alapú lokalizáció legfontosabb eleme a jel időbeli pozícionálása. Ez még szemmel megállapítva is nehézkes.

Munkám során megismerkedtem a szilárd anyagokban terjedő rezgések különböző módusaival és ezek tulajdonságaival, valamint a vékony, síkszerű testekben jelentkező interferenciajelenségekkel.

Ezen hatások mind nehezítik a detektáció folyamatát. Például a korreláció elve, mely a levegőben terjedő hang esetén jó eredménnyel kecsegtet, ebben az esetben használhatatlannak bizonyult.

A félév során teszteltem az alapvető detektálási metódusokat (korreláció, trigger, első lokális maximum, abszolút maximum), valamint sikerült egy, a jel természetére építő algoritmus kezdetleges elkészítése is.

Az asztal szerkezeti felépítése további nehézségeket jelent. A széleken az élekről történő visszaverődés okozta interferencia, a lábak esetén pedig az anizotróp terjedési sebesség okoz problémát. Így egyes módszerek kiemelkedően teljesítettek pontosság tekintetében, viszont az asztal szerkezetéből adódóan ez a teljesítmény a pozíció függvénye.

A jövőbeli munka célkitűzése egyrészt egy kifinomultabb, összetettebb algoritmus megalkotása, valamint az asztal nemlineáris hatásainak ellensúlyozása. További kihívást jelenthet a teljes rendszer megvalósítása, esetleg az egész projekt implementálása beágyazott környezetben.

# Hivatkozások

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | „Rezgések és hullámok,” 2015. [Online]. Available: 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]. Available: http://www.muravin.com/. |
| [3] | 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. |

# Függelék

Az asztalon