



Pásztázó Akusztikus Mikroszkóp

Elkészítése LABView Alkalmazásával

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette:

Agócs Mihály

Gépészmérnök hallgató (BSC), 2. évfolyam

Témavezető: Dr. Pór Gábor BME egyetemi docens, DF főiskolai tanár

DUNAÚJVÁROSI FŐISKOLA

MŰSZAKI INTÉZET

2013

Tartalomjegyzék:

1. BEVEZETÉS	4
2. AZ ULTRAHANG ALAPJAI	6
2.1. ULTRAHANG, KÉLTÉSE, DETEKTÁLÁSA.....	6
2.2. A BEMERÍTÉSES ULTRAHANGOS VIZSGÁLATOK SORÁN IS FIGYELEMBE VEENDŐ ULTRAHANG JELLEMZŐK ÉS MEGHATÁROZÁSUK MÓDJA	7
2.3. HAGYOMÁNYOS ULTRAHANGOS MÉRŐFEJEK	13
2.4. ULTRAHANGOS KÉPALKOTÁSI FORMÁK	17
3. AUTOMATIZÁLT BEMERÍTÉSES ULTRAHANGOS RENDSZEREK A VILÁGBAN.....	19
3.1. KC SERIES IMMERSION TANK [6]	19
3.2. LTI IMMERSION TANK [8]	20
3.3. MISTRAS ULTRASONIC SYSTEMS [7].....	21
4. TÁMOP KERETEIN BELÜL FEJLESZTETT RENDSZER	22
4.1. RENDSZER EREDETI HARDVERES ÖSSZEÁLLÍTÁSA ÉS MŰKÖDÉSI ELVE.....	22
4.2. RENDSZER MŰKÖDÉSI ELVE	26
4.3. EREDETI SZOFTVER (V3_4) MŰKÖDÉSE.....	27
4.4. EREDETI HARDVER- ÉS SZOFTVERKÖRNYEZET (V3_4) MÉRÉSI EREDMÉNYEI	30
4.4.1. 2D és 3D modell eredményei:	33
5. RENDSZEREN TÖRTÉNT VÁLTOZÁSOK	34
5.1. HARDVERES VÁLTOZÁSOK.....	34
5.2. SZOFTVERES VÁLTOZTATÁSOK, FEJLESZTÉSEK (V3_8).....	36
5.3. A FONTOSABB SZOFTVER VÁLTOZTATÁSOK.....	38
6. MEGVÁLTOZOTT HARDVER-ÉS SZOFTVERKÖRNYEZET (V3_8) MÉRÉSI EREDMÉNYEIK	42
6.1. 1.MÉRÉS (04-ES JELZÉSŰ MINTA DARAB)	42
6.1.1. 2D és 3D modell eredményei:	42
6.2. 2. MÉRÉS (ALU_H MINTA DARAB)	43
6.2.1. 2D és 3D modell eredményei:	45
6.3. 3. MÉRÉS (ALU_1 MINTA DARAB)	47
6.3.1. 2D és 3D modell eredményei:	48
6.4. 4. MÉRÉS (SRS-0824A ETALON).....	49
6.4.1. 2D és 3D modell eredményei:	50
6.5. 5. MÉRÉS (TOKOZOTT ELEKTRONIKA).....	52
6.5.1. 2D és 3D modell eredményei	53
7. TOVÁBBI FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK	56
7.1. ELÉRT EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE.....	57
8. IRODALOMJEGYZÉK	58
9. MELLÉKLETEK.....	59
9.1. 1. SZÁMÚ MELLÉKLET	59
9.2. 2. SZÁMÚ MELLÉKLET	59
9.3. 3. SZÁMÚ MELLÉKLET	59

Kivonat

A pásztázó akusztikus mikroszkóp egy viszonylag új, ám igen hatékony eszköz lehet ipari feladatokban a gépek, eszközök és akár tokozott elektronikák folytonossági hiányainak felderítésében is. A Dunaújvárosi Főiskola TÁMOP projektjében kiemelt szerepet kapott egy ilyen berendezés fejlesztése, amelynek eredeti munkálatai ipari érdeklődésre indultak meg a MAID laboratóriumban. A téma korszerűségét és fontosságát számos cikk bizonyítja, mint például a nemrég, 2013. júliusában megjelent cikk is [F. Severin et al: Industrial applications of Scanning Acoustic Microscopy, ME Technical Paper Materials Evaluation, July, 2013]. Dolgozatomban először bemutatom, hogy meddig jutott el az ultrahang mikroszkóp fejlesztés nemzetközi szinten, amikor a munkához láttam.

A roncsolás mentes anyag vizsgálatok közül, a hagyományos ultrahang technika automatizáláshoz a bemerüléses (immersion) technika biztosítja a megoldást. A világ illetve az ipari kereslet nagyon nyitott az ilyesfajta integrált ultrahangos rendszerek iránt, hiszen nagyon sok gyártó ezeknek a rendszereknek a gyártásával, fejlesztésével foglalkozik.

A tanulmányban ismertetem az általunk fejlesztett rendszert és a vele elért eredményeket. Ma már automatikus üzemmódban akár 2 mm-nél kisebb anyagfolytonossági hiányokat is tudunk leképezni, - illetve 3D-ban megjeleníttetni. A módszer mentes a szubjektív hibáktól, ami a kézi típusú vizsgálatokról nem mondható el. Az általunk alkalmazott eszközökkel létrejövő rendszer egy nagyságrenddel olcsóbb, mint a piacon ma kapható berendezések. Eredményeim bizonyítják a viszonylag olcsó megoldásokkal felépült berendezés használhatóságát.

A nagy kínálat ellenére úgy gondolom, hogy a mi végső rendszerünk is helyt fog állni olyan ipari szegmensek kis-és közép vállalkozásainak részére, akik kisebb méretű alkatrészeket kívánnak majd ellenőrizni. Azok számára nyújthat majd kedvező megoldást, akik az ellenőrzést akár diagnosztikai akár gyártási ellenőrzés céljából hatékony integrált ultrahangos rendszerekkel kívánják megvalósítani. Továbbá azok számára is kedvező választás lehet, akik az ár/érték arány szempontjából a költséghatékonyságot is szem előtt tartják.

A rendszer már jelenlegi állapotában is alkalmas az MSZ EN ISO 17640-es szabványban előírt Ø3 KHF(keresztirányú hengeres furat) és Ø1- Ø3 mm KTR (körtárcsa reflektor) méretű hibák azonosítására illetve 3D megjelenítésére. De a kutatás további célja, még ennél is kisebb anyagfolytonossági hiányok valósághű geometriáját detektálni, illetve 3D-ban szemléltetni.

1. Bevezetés

TDK munkámat Magyar Akusztikai és Ipari Diagnosztikai Vizsgálólaboratóriumban (MAID Lab) végeztem. Azt a feladatot kaptam, hogy a megkezdett 2D ultrahangos letapogató rendszert fejlesszem tovább. A feladat nagy kihívást jelentett számomra, mert programozói és anyagvizsgálói tudást is megkövetelt az eredményes munkához. A feladatban nagy lehetőségeket és fejlesztési potenciált láttam, így örömmel elvállaltam, amit utólag sem bántam meg.

A roncsolásmentes vizsgálatok célja az anyagban, alkatrészben annak előállítása során esetlegesen keletkezett hiányok (általában folytonossági hiányok vagy zárványok) megtalálása, méreteinek meghatározása. Ezek ismeretében a tervezett üzemeltetési paraméterek figyelembevételével ugyanis elvileg adott annak lehetősége, hogy a feltárt hiba hatásáról dönteni lehessen.

A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy lehetőség van a hibával való üzemeltethetőség mérlegelésére, illetve dönteni lehet abban, hogy a javítást meg kell-e tenni, avagy sem. Számos roncsolásmentes vizsgálati eljárást dolgoztak ki és alkalmaznak a gyakorlatban, ezek mindegyikének megvan a maga előnye és hátránya, alkalmazási területe és korlátja. A roncsolásmentes vizsgálatokat végzők olyan vizsgálatokat folytatnak, amelyek képesek észlelni és lokalizálni a különböző anyaghibákat, defekteket, gyengüléseket, az anyagban lévő különböző folytonossági hiányokat és ritkulásokat. Ha ezeket nem veszik észre idejekorán, akkor a berendezések töréséhez, meghibásodásához, különösen komoly balesetekhez is vezethetnek.

Az ultrahangos technológia sok előnnyel rendelkezik más általánosan alkalmazott karbantartási eljárásokkal szemben [12].

Előnyök:

- a legkorábbi figyelmeztető jeleket adja,
- azonnal használható,
- pontosabb a problémák beazonosítására,
- sokoldalú, flexibilis,
- roncsolásmentes,
- költséghatékony (használati költség),
- automatizálhatósága jó (ami a kézi eljárások szubjektivitását jelentősen csökkentheti),
- környezetkímélő módszer

De mint minden vizsgálati módszernek, vannak hátrányai is.

Hátrányok:

- geometria hatása fontos, így az ebből eredő komplikációkat figyelembe kell venni,
- betanítás költsége magas,
- anyagtól való függés nagy,
- hivatalos jelentés kérése drága,
- kézi eljárások elég szubjektívek, tapasztalat kell a helyes technika alkalmazásához

Egy járműipari elektronikákat gyártó cég felkérése miatt kezdett el foglalkozni ezzel a projekttel a Dunaújvárosi Főiskola. A felkérés tárgya egy úgynevezett tokozott elektronika volt. A tokozott elektronika gyártásánál előfordulhat a fröccsöntéskor történő sérülés, vagy a gyanta tok repedése, benne buborék képződése. A roncsolásmentes technikák közül az ilyen átvilágításhoz a legjobb talán a röntgen vagy gamma sugárral való átvilágítás, esetleg a neutron tomográfia használata lenne. A sugárzások azonban számos esetben nem kívánatosak, használatuk az előírások miatt egy gyárban igen körülményes, neutronforrás elég kevés helyen áll rendelkezésre.

A cég már rendelkezett egy jó minőségű automatizált ultrahangos berendezéssel, legnagyobb problémája a letapogatás sebességével volt, valamint a felbontó képességgel. A megrendelés célja az volt, hogy készítsünk olyan eszközt, amely hozzájárul a termelékenységek növekedéséhez. A kutatás során célul tűztük ki a kapott eredmények háromdimenziós modellé alakítását is, mert így egy vizsgálat során az egész vizsgált térről információt kaphatunk. A hagyományos ultrahang technika automatizáláshoz a bemerüléssel (immerson) technika biztosítja a megoldást.

Az ultrahangos vizsgálat egy gyártás ellenőrzésére igen alkalmas módszer lehet, de a hagyományos kézi letapogatási eljárások igen időigényesek és fárasztóak lennének sok száz, vagy még több gyártmány ellenőrzésére, ezenkívül túl szubjektívek is és ráadásul felbontásuk is némi kívánnivalót hagy maga után. Ezért ipari megoldásként, mindenképpen automatizált megoldásra van szükség, ami nagyobb pontosságot, gyorsabb hibakeresést tesz lehetővé és kiküszöböli a kézi eljárásból eredő szubjektivitást. Többek között ezek lehetnek a főbb okok a nagymértékű ipari keresletre.

A 3. fejezetben szemléltetni fogom, hogy a kereslet nagy az ilyesfajta integrált ultrahangos rendszerek iránt, hiszen nagyon sok gyártó ezeknek a rendszereknek a gyártásával, fejlesztésével foglalkozik.

2. Az Ultrahang alapjai

2.1. Ultrahang, keltése, detektálása

„A hang longitudinális nyomáshullám. Levegőben 330 m/s, vízben 1500 m/s, szilárd anyagokban anyagtól függő sebességgel terjed. A hangot főként a fülünkkel halljuk, de a bőrünk, koponyacsontjaink is részt vesznek az érzékelésben. Nagyjából 20 Hz a legmélyebb, 20 000 Hz a legmagasabb hang, amit még mi, emberek hallani képesek vagyunk.

A 20 Hz-nél alacsonyabb frekvenciájú rezgéseket infrahangnak, a 20 000 Hz-nél magasabb frekvenciájú hangokat ultrahangnak nevezzük. Emberek számára nem hallható, de az állatok közül sokan hallják, közhírt, hogy a kutyák reagálnak rá. A denevérek és a delfinek maguk is állítanak elő ultrahangot a tájékozódásuk során. Az ultrahang igen nagy intenzitású hullám.” [3] A megjelenésével együtt járó nyomáshullám amplitúdója is igen nagy lehet. Az ultrahanghullám hossza igen rövid a nagy frekvencia következtében. Ultrahangot jellemzően a piezoelektromosság vagy a magnetostrikció jelenségét felhasználva állíthatunk elő.

Az ultrahang keltése:

A roncsolásmentes anyagvizsgálatokhoz az ultrahang keltéséhez használt elektromos jel több MHz frekvenciájú szinuszosan változó, néhány periódust tartalmazó rövid hullámcsomag, burkoló görbéje jellemzően impulzusszerű kezdődő és exponenciálisan lecsengő elektromos rezgés. Az elektromos rezgéseket elektromos kábelon vezetik a célnak megfelelően kiképzett sugárzó és egyben detektáló fejbe, az úgynevezett transducerbe (távadóba). Ebben foglal helyet az elektródokkal ellátott piezoelektromos anyag.

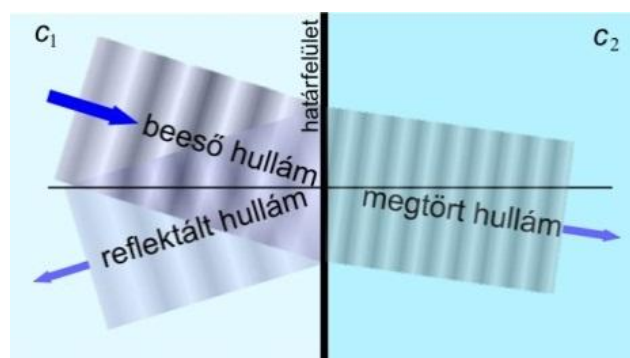
A transducer (távadó) az elektromos energiát ultrahangrezgésekké alakítja (inverz piezoelektromos hatás) amely a vizsgált anyag felé sugárzódik. Ez az ultrahang impulzus („adás”) csak rövid ideig, néhány periódusig tart (hullámcsomag), hasonlóan a denevér impulzusszerű ultrahang-fütttyjeléhez. [3]

Az ultrahang impulzus megszűnte után bekövetkező „csendben” a transducer „vételre kapcsol”, és a vizsgált anyag reflektált visszhangokra (echo) vár. Egy bizonyos idő elteltével a gyengült intenzitású „visszhang” eléri a transducert és deformálja annak piezo kristály elemét (hasonlóan a denevér ultrahangra érzékeny füléhez). A transducerben bekövetkező elektromos polarizáció következtében az ultrahang visszaalakul elektromos rezgéssé (direkt piezoelektromos hatás), ami az elektródákon és a kábelén keresztül visszavezetődik egy elektromos jelerősítőbe. [9]

Amikor az ultrahang egyik közegből a másikba lép, energiája csökken, iránya megtörik, esetleg visszaverődik, úgy viselkedik, mint a többi hullám. Szilárd testekben megbúvó üregeket deríthetünk így fel, távolságokat mérhetünk a tenger alatt, a méhben elhelyezkedő magzatról, a vesében vagy az epében keletkezett kőről készíthetünk képet. Kis energiaigénye miatt az emberi szervezetet sem károsítja. Az ultrahangot felhasználják visszaverődésen alapuló mélység-, illetve távolságmérésre, repülőterek ködmentesítésére vagy éppen lakások levegőjének párásítására is. [3]

2.2. A bemelegítéses ultrahangos vizsgálatok során is figyelembe veendő ultrahang jellemzők és meghatározásuk módja

Különböző akusztikus impedanciájú közegek határfelületén az ultrahang részben visszaverődik (reflexió), részben behatol a határfelület utáni közegbe (1.ábra). Amennyiben az ultrahang terjedési iránya nem merőleges a határfelületre, az ultrahang az újabb közegben (a fény töréséhez hasonlóan) irányt változtat, megtörik (refrakció) [10].



1. ábra: Az ultrahanghullám visszaverődése és törése ($c_1 > c_2$)

Akusztikus impedancia:

Az ultrahang terjedése szempontjából fontos, a közeg akusztikus minőségét jellemző paraméter az akusztikus impedancia (Z):

$Z = \rho \cdot c$, ahol ρ a közeg sűrűsége és c az ultrahang terjedési sebessége az adott közegben. Az egyenlet számos alakot felvehet attól függően, hogy milyen típusú (longitudinális, vagy transzverzális) hullámról van szó.

Néhány hozzávetőleges longitudinális terjedési sebesség különböző anyagokban:

Alumínium: 6320m/s

1020 acél: 5890m/s

Öntöttvas: 4800m/s

Néhány hozzávetőleges transzverzális terjedési sebesség különböző anyagokban:

Alumínium: 3130m/s

1020 acél: 3240m/s

Öntöttvas: 2400m/s

Összevetve a longitudinális és transzverzális sebességeket megfigyelhetjük, hogy a transzverzális sebesség közelítőleg fele a longitudinálisnak. Az ultrahang légnemű és folyékony közegek belsejében longitudinálisan, szilárd anyagokban mind longitudinálisan, mind transzverzálisan terjedő mechanikai hullám.

A longitudinális hullám terjedési iránya megegyezik a rezgés irányával. Ilyen pl. a hanghullám a levegőben, vagy a vízben (itt nem az úgynevezett felületi hullámokra gondolunk).

A transzverzális hullám olyan hullám, ami a haladási irányára merőlegesen kelt rezgéseket a közegben, amiben terjed. Ilyenek például egy húron terjedő hullámok, vagy a szabad elektromágneses hullámok (2.ábra) [3].



2. ábra: A longitudinális és transzverzális hullám szemléltetése

Az érzékenység az a képesség, hogy képesek legyünk kisméretű folytonossági hiányt felderíteni. Az érzékenységet a frekvencia növelésével, azaz a hullámhossz csökkentésével érhetjük el. A felbontás az a képesség, hogy megkülönböztessünk egymáshoz közel eső hibákat, vagy észleljünk olyan hibát, amely közel esik az anyag felületéhez. A felbontás szintén javul, ahogy növeljük a frekvenciát. A frekvencia ezen kívül befolyásolja az ultrahangnyaláb alakját is.

Az ultrahang csillapodása:

Az ultrahangban terjedő energia egy része a testekben elnyelődik, hővé alakul. A sugárzások gyengülésének általános törvénye szerint:

$J = J_0 e^{-\mu \cdot x}$, ahol J és J_0 az intenzitás x , ill. $x = 0$ távolságban, μ pedig az abszorpciók együttható.

Csillapítás:

Amikor egy hanghullám áthalad valamilyen közegen, a távolsággal együtt csökken az intenzitása. Ideális anyagban a hangnyomás, azaz a jel amplitúdója csak a hullám szétterjedése miatt csökken. A valódi, nem ideális anyagokban további hatások is gyengítik a hangot. Ezt a további gyengülést a szóródás és az elnyelés jelensége okozza.

A szóródás az a jelenség, amikor a hang más irányba is elverődik, nem csak az eredeti terjedés irányába. Az elnyelődés az a jelenség, amikor a hangenergia átalakul valami egyéb energiaformává. A szóródás és elnyelődés együttes jelenségét nevezzük csillapításnak. A csillapítás mértéke függ az anyag sajátosságaitól és a gyártás körülményeitől. A csillapítás általában a jel frekvenciájának négyzetével arányos. A csillapítás értékét gyakran egy adott frekvenciához vagy több frekvencia átlagolt értékéhez adják meg. A csillapítási állandó megadott értéke csak egy becslést ad. Általában a csillapítás pontos értékét csak kísérleti úton lehet meghatározni a szóban forgó anyagot megvizsgálva.

Kisméretű hibák felderítése:

Mivel a kisreflektor alakjáról és helyzetéről az ultrahang semmilyen felvilágosítást nem ad, csupán a visszavert energia nagyságából következtethetünk a hiba nagyságára. Emiatt az ismert távolságban lévő, de ismeretlen nagyságú reflektort mindig egy ugyanolyan távol lévő, de ismert méretű reflektorhoz viszonyítunk. Ezek lehetnek természetes és mesterséges reflektorok.

Természetes reflektor lehet az alkarész geometriájából adódó reflektor, egy-egy furat, bevágás vagy akár a lemez éle. Sokkal elterjedtebb azonban a mesterséges reflektorok alkalmazása. Ezek pontosan olyan helyen, méretben és darabszámban készíthetők el, ahogy szükséges. Általában a vizsgált alkatrészszel megegyező anyagból készült próbatestbe munkálják be őket, és egy előzetes próbamérés során veszik fel róluk a viszonyítási szinteket, amiket aztán az alkatrészek éles mérésénél alkalmaznak [10].

Műhibák típusai:

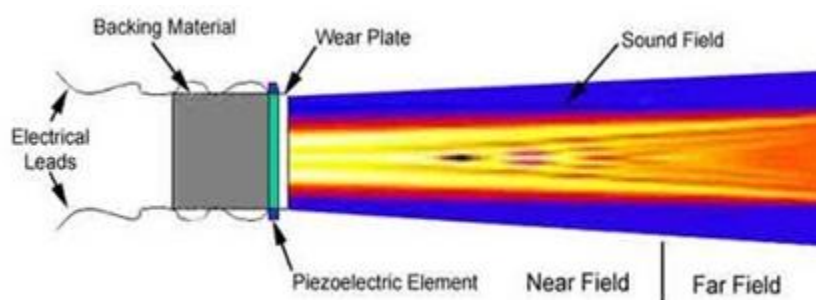
Keresztirányú hengeres furat (KHF): előnye, hogy minden besugárzási szögből alkalmazható, minden irányból ugyanakkora reflektorként jelenik meg.

Körtárcsa reflektor (KTR): a hangnyalábra merőleges fenekű hengeres furat, csupán egy adott besugárzási szög esetén alkalmazható, viszont a róla kapott visszhangjel egyenesen arányos a felületével.

Horony: egyszerű elkészítése miatt alkalmazzák. A róla kapott visszhangjel nagyban függ az alkalmazott frekvenciától, a besugárzási szögtől és a horony mélységétől is.

Hangtér:

Az akusztikai tér azon része, amely a hangforrás közelében tapasztalható. A piezoelektromos vizsgálófejekből kibocsátott hang nem egyetlen pontból, hanem egy piezoelektromos elemekből álló felületről származik. A kör felületű rezgővel rendelkező fejek hengeres hangteret hoznak létre. A 4. ábrán egy ilyen fej hangtere látható, ahol a világosabb színek nagyobb hangintenzitást jelölnek [3].



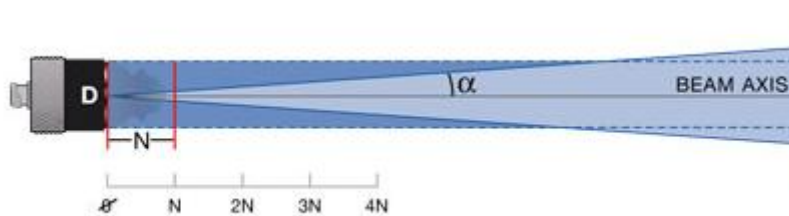
4. ábra: kör alakú rezgő hangtere

Mivel a hangteret sok egymáshoz közel eső hangforrás hozza létre, a rezgő közelében a hangtér intenzitása erősen változó a hang interferenciája miatt. Ezt a területet nevezzük közeltérnek. A hangnyomás inhomogenitása miatt ebben a szakaszban nagyon nehéz volna hibákat felderíteni.

A köztér után a hullámok létrehoznak egy homogénebb hangnyalábot, amelyben a hullámok úgy viselkednek, mintha a rezgő középpontjából indulnának ki, ezt nevezzük távoltérnek. A közel- és távoltér átmenetét a rezgőtől N távolságra találjuk, ezt az N távolságot nevezzük a sík (fókuszálatlan) vizsgálófej „természetes fókuszának”. Ez a távolság nagyon fontos, mivel a közvetlenül ezután található terület az, ahol a hangnyaláb megfelelően homogén, és itt éri el a legnagyobb erősségét is. Emiatt az ezen a területen található hibák detektálhatók a legjobban.

Hangnyaláb széttartása:

A kör alakú rezgővel rendelkező fejek hangtere egy hengerhez hasonló, de a hangenergia az anyagban történő haladása közben kihajlik az eredeti irányából, és kúpszerűen széttartóvá válik. Ezt a széttartást leginkább azzal a szöggel jellemezhetjük, amelyet a hangnyaláb két „széle” zár közre a távoltérben. [9]



5. ábra: A hangnyaláb széttartása

Az ábrán jelölt N fókusz távolságot a következőképpen számíthatjuk:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

A hangnyaláb széttartásának α félszögére pedig az alábbi képlet ad közelítő becslést:

$$\sin \alpha = \frac{0,514c}{2Df}$$

ahol D a rezgőátmérő, f frekvencia, c hangterjedés sebessége, λ a hullámhossz. Ebből látható, hogy a széttartás növekszik, mikor alacsonyabb frekvenciás fejet használunk, illetve ha csökkentjük a rezgőátmérőt.

2.3. Hagyományos ultrahangos mérőfejek

Kontakt fejek:

Használat közben üzemszerűen hozzáérnek a vizsgált felülethez. A rezgőjüket általában robosztus burkolattal látják el, ami megvédi őket, a különböző anyagokon való csúszás közben keletkező sérülésektől. Ezeknek a fejeknek általában ergonomikus kialakítása van, lehetővé téve a szilárd fogást és a könnyű mozgatást a felületen. Sokszor tartalmaznak cserélhető kopólemezeket, hogy megnöveljék az élettartamukat. Használatukkor csatolóanyagot (olaj, zsír, víz stb.) kell alkalmazni, hogy eltávolítsák a légrést a vizsgált felület és a fej közül. [9]

Adó-vevő fejek:

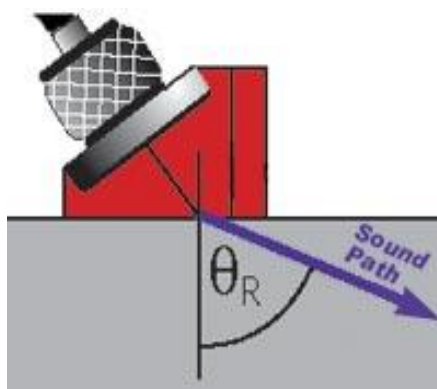
Két egymástól függetlenül működő rezgőt tartalmaznak, az egyik folyamatosan adó üzemmódban, a másik folyamatosan vevő üzemmódban dolgozik. Különösen alkalmasak arra, hogy olyan hibákat tárjanak fel, amelyek közel esnek a felülethez, mivel a normál, impulzus-visszhang üzemmódban dolgozó fejek addig nem tudnak venni, amíg abba nem hagyták az adást. Így a nagyon közeli visszhangokat nem érzékelik, ellenben az adó-vevő fejeknek ilyen korlátja nincs. Ezen kívül, hasonló okok miatt vékony anyagok falvastagság mérésére is ezt a fajta fejet alkalmazzák.

Előtétes fejek:

Az előtétes fejek abban különböznek egy normál mérőleges fejtől, hogy a rezgő elé egy cserélhető előtétet rögzítünk. Ennek többféle célja is lehet. Az előtétet ráköszörülhetjük különböző alakú felületekre, például kis átmérőjű hengerekre, így lehetővé téve a csatolást az ilyen felületek és a sík rezgő között. Egyszerű védőréteget is helyezhetünk a fej elé, amikor üzemszerűen érdes felületen kell használnunk a fejet. Legfőbb alkalmazásuk azonban az, amikor jelentős vastagságú előtétet alkalmazunk, így megnöveljük az ultrahang futási idejét annyira, hogy ne veszítsük el a felület közeli visszhangokat, amik az alatt érnének vissza a fejhez, amíg az még adó üzemmódban van. Így szintén lehetővé válik vékony anyagok vizsgálata, illetve kompozit anyagok rétegeinek elválásának ellenőrzése. Nagy előnye egy hosszabb előtétnek az is, hogy olyan meleg felületeket is vizsgálhatunk a segítségével, amit a vizsgálófej már nem viselne el, mivel az előtét biztosít némi hőszigetelést is.

Szögfejek:

A szögfejeket és szögelőtéteket arra használják, hogy transzverzális hullámot bocsássanak az anyagba.



6. ábra: A szögfejjel végzett vizsgálat keresztmetszete

A fejen feltüntetett szögérték mivel függ a vizsgált anyag akusztikus keménységétől, csak egy adott anyag esetén érvényes, ami többnyire acél. A különböző szögekben besugárzott hangnyaláb a hátfalról visszaverődve lehetővé teszi olyan hibák felderítését, amely merőleges fejekkel lehetetlen lenne. Ilyen hibák többek között a hegesztési varratok hibái.

Merőleges besugárzású transzverzális fejek:

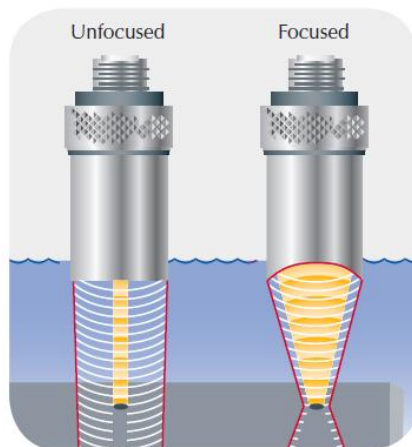
Ezek a fejek lehetővé teszik transzverzális hullámok bocsátását az anyagba szögfej használata nélkül. Ennek azonban az a hátránya, hogy a fej által kibocsátott transzverzális hullámok jelentősen gyengébbek a longitudinális hullámoknál, az átlagos energiájuk mintegy -30dB-lel kisebb.

Festékszóró fejek:

Ezek a hosszú és vékony fejek egy sor kisebb rezgőből állnak, és gondosan össze vannak válogatva, hogy minimálisra csökkentsék a fejen belüli eltéréseket, és azonos érzékenységet érjenek el a fej teljes hosszában. Ezek a fejek lehetővé teszik nagyobb felületek gyors letapogatását.

Bemerítéses fejek:

A bemerítéses fejek nem érnek hozzá a vizsgált felülethez. Ezek a fejeket arra tervezték, hogy folyadékkal körülvéve működjenek, és minden csatlakozásuk vízálló. Általában impedancia illesztő réteggel vannak ellátva, hogy minél több hangenergiát tudjanak a vízbe bocsátani, majd azon keresztül a vizsgált alkatrészbe. A bemerítéses fejek készülhetnek sík, hengeresen fókuszált és gömbszerűen fókuszált kivitelben. A fókuszált fejek kisebb területre fókuszálják a hangenergiát, így megnövelik az érzékenységet, és a tengelyirányú felbontást is. A bemerítéses fejeket többnyire víztartályban használják, esetleg egy befecskendezéses letapogató rendszer részeként.



7. ábra: Fókuszálatlan és fókuszált bemeztéses fejek

Fókuszált távadó:

A fókuszált távadó olyan ultrahangnyalábot képes létrehozni, mely a távadótól bizonyos távolságban keskenyebb lesz, mint a távadó felületnél. Azt a régiót, ahol az ultrahangnyaláb elkeskenyedik – fokális zóna – az ultrahang intenzitása akár 100-szorosára növekedhet a fokális zónán kívüli intenzitáshoz képest. Az intenzitás növekedés miatt a fokális zónában elhelyezkedő visszaverő struktúra lényegesen nagyobb jelet indukál a távadóban. A fokális zónában elhelyezkedő maximális echo és a távadó közti távolságot fokális hosszúságnak nevezik. A fókuszálásért gyakran maga a piezoelektromos kristály felelős, amelyen konkáv felületet képezhetnek ki.

Fázisvezérelt mérőfejek:

A fázisvezérelt mérőfejek több különálló elemből állnak, melyek mindegyike külön pulzál. Ezek lehetnek egyenes vonalban, kör alakban vagy komplexebb alakzatban elrendezve.

A fázisvezérelt mérőfejek a közvetlen érintkezéssel vizsgálathoz lettek tervezve, legyen szó akár szögben sugárzó szenorról vagy bemeztülő mérőfejről. A fázisvezérelt rendszerek tartalmaznak egy kifinomult számítógépes rendszert, mely képes a több elemes mérőfej által fogadott visszatérő jeleket megjeleníteni többféle módon.

A fázisvezérelt rendszer kihasználja a hullám fokozatos megszűnésének elvét, variálva az időt egy sor kimenő ultrahang impulzus között olyan módon, hogy minden egyes hullámot kombinál a többivel, hozzáadva vagy törölve az energiát kiszámítható módon, hogy hatékonyan irányítsa és formálja a hanghullámot. Ezt úgy valósítják meg, hogy az egyes elemeket különböző időben pulzáltatják. Az elemeket csoportokba osztják, így elérve az élesebb fókuszálást. A fázisvezérelt fejek képesek rendezni a visszatérő hullámokat érkezési idő és amplitúdó alapján [4].

Csatolóanyagok:

A csatolóanyag egy olyan anyag (többnyire folyadék), amely lehetővé teszi az ultrahang energiájának átvitelét a vizsgálófejből a vizsgált anyagba. Minden esetben szükséges csatolóanyagot alkalmazni, mivel a levegő és a szilárd anyagok akusztikus impedanciája közötti különbség olyan nagy, hogy szinte az összes hangenergia visszaverődik a légrésről, és elenyésző mennyiség jut csak át a vizsgálati anyagba. A csatolóanyag feladata, hogy annyi energiát engedjen át a vizsgálati anyagba, amennyi csak lehetséges, így módon lehetővé tegye, hogy értékelhető visszhangokat kapjunk vissza. A kontakt fejek esetében általában olajat, zsírt, glicerint vagy vizet alkalmaznak, de megfelel bármely olyan anyag, amely nem károsítja sem a fejet, sem a vizsgált anyagot, és képes kitölteni a légrést.

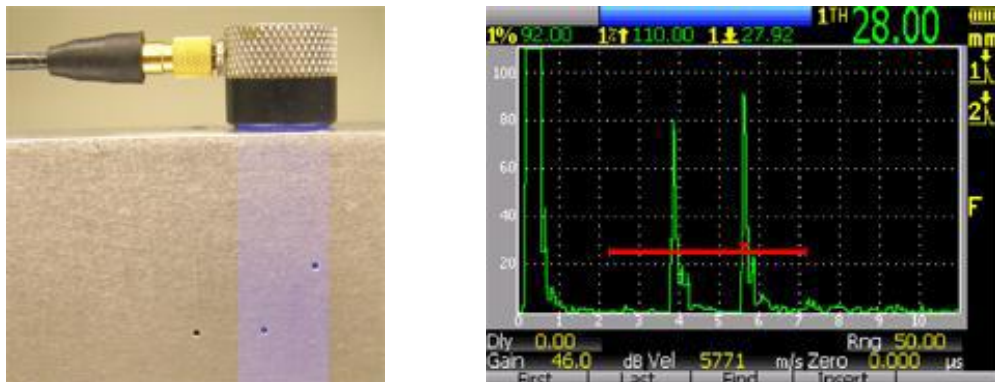
Bemerítéses módszer esetén is alkalmaznak csatolóanyagot, aminek lényege, hogy a teljes alkatrész és a vizsgálófej rezgőt tartalmazó része is belemerül a csatolóanyagba. Általában vizet alkalmaznak erre a célra, mivel ez a legolcsóbb, és tökéletesen megfelel a feladatra. Ez a módszer lehetővé teszi az egyenletes csatolást.

2.4. Ultrahangos képalkotási formák

A-kép:

Az A-kép a vizsgálófejhez visszaérkező hangenergia erősségét mutatja az idő függvényében. A vett energia relatív értékét jelenítjük meg a függőleges tengelyen, míg a vízszintes tengelyen az adott erősségű visszhang beérkezéséig eltelt időt. Az A-képek alkalmazásakor egy ismeretlen hiba méretének meghatározásakor összevetjük az ismeretlen méretű, de ismert távolságban lévő reflektorról érkező visszhang energiáját, egy ugyanolyan távolságban lévő, de ismert méretű reflektoréval. A reflektor távolságát pedig meghatározhatjuk a visszhang visszaérkezéséig eltelt idő és az anyagban tapasztalható hangsebesség segítségével, amit az A-kép vízszintes tengelyéről olvashatunk le. A modernebb készülékek alkalmasak arra, hogy a vízszintes tengelyen nem az időt, hanem a beállított hangsebességnek megfelelő távolságot jelenítsék meg.

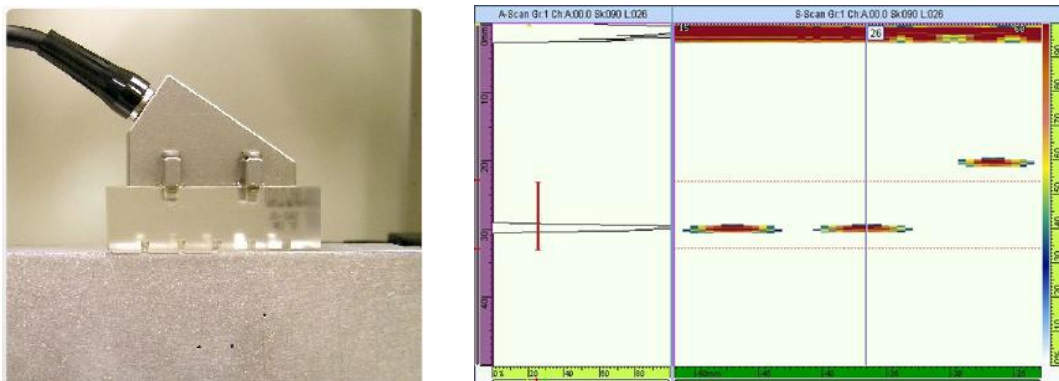
A reflektor és a fej közötti távolságot nevezzük hangút távolságnak, amely a hangútnak éppen fele, mivel oda-vissza megteszi a hang. A vizsgálatok során az A-kép x tengelyén a hangút távolságot szokták mm-ben megjeleníteni. [3]



8. ábra: A-scan képalkotás

B-kép:

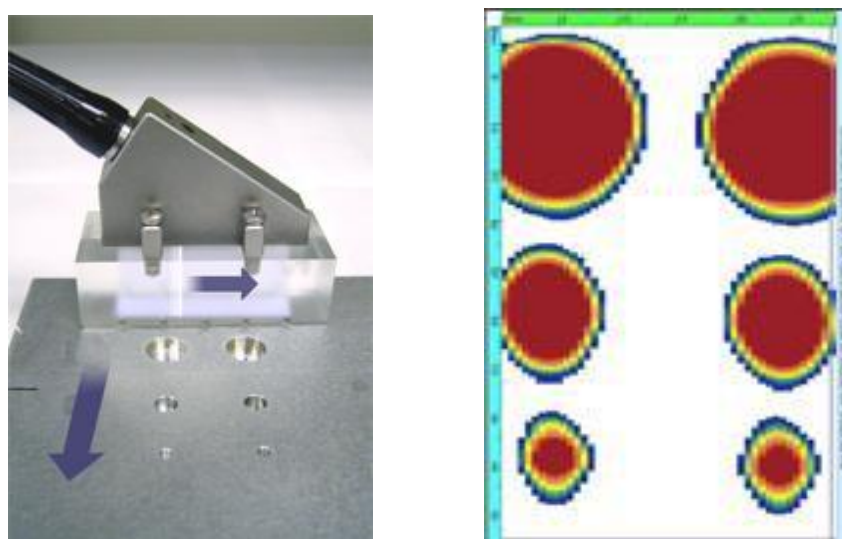
A B-kép lényegében az alkatrész egy keresztmetszeti ábráját mutatja. A függőleges tengelyre az ultrahang futási idejét vagy a hangút távolságot viszik fel, a vízszintes tengelyre pedig a fej lineáris pozícióját. A B-kép alkalmazásakor be kell állítani egy riasztási küszöböt. Amennyiben a küszöbszintet meghaladó visszhangot érzékel a készülék, azt kirajzolja a megfelelő fejpozícióba, illetve hangút távolságra. A 9. ábrán látható az előző alkatrész vizsgálatának B-képes megjelenítése [4].



9. ábra: B-scan képalkotás

C-kép:

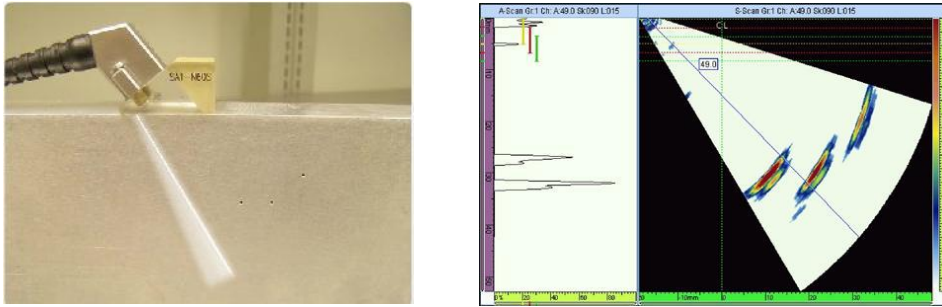
A C-kép egy síkszerű megjelenítése az alkatrésznek, ahol a nézet síkja párhuzamos a felület letapogatásának útvonalával, azaz lényegében a vizsgálati felülettel. A C-képeket automata letapogató rendszerekkel készítik el, mivel folyamatosan ismerni kell a fej pozícióját, illetve az ahhoz tartozó visszhangjelet. A C-képen pontról pontra kirajzolódik a fej útvonala. A pontok színe, (vagy szürkeárnyalat esetén az intenzitása) pedig, vagy az adott pontban lévő hangintenzitást, vagy a vizsgált felületre merőleges hangút távolságot jelöli. Az alábbi képen az alkatrész keresztmetszeti és felülnézeti ábráját láthatjuk, a felülnézeti képen jelölve a fejmozgatás útvonalát is. A C-képes megjelenítés is alkalmazható úgy, hogy riasztási szintet állítunk be, ebben az esetben a színekkel nem a hangintenzitást jelölik, hanem a riasztást kiváltó visszhang hangút távolságát, azaz a mélységét [4].



10. ábra: C-scan képalkotás [4]

S-scan:

Az S-scan vagy más néven szektoriális kép megjelenítés egy kétdimenziós metszeti nézet. A vízszintes tengely megfelel a vizsgálati darab szélességének, a függőleges tengely a mélységének. A hangszugár végigpásztázza a körcikket a vizsgálati darabon, minden irányban A-képet generálva és ebből állítja össze a körcikk alakú keresztmetszeti képet (11.ábra). Előállításához fázisvezérelt fej szükséges [4]



11. ábra: S-scan képalkotás [4]

3. Automatizált bemerítéses ultrahangos rendszerek a világban

Ebben a fejezetben bemutatok néhány, már kapható rendszert, ami mutatja a téma aktualitását, és egyben tippet adott számomra a fejlesztéshez.

3.1. KC Series Immersion Tank [6]

Masszív szerkezet jellemzi, amely behegesztett keretekből és rozsdamentes acél tartályból áll. Alapesetben három modell kapható attól függően, hogy az ügyfél milyen méretű tárgyakat szeretne vizsgálni. Terveznek és gyártanak egyéni méretben is merülési tartályokat az ügyfél egyedi igényeinek kielégítésére. Az egyszerű kezelhetőségre lett tervezve és a könnyű karbantartásra. Kínálnak helyszíni telepítést és képzést az eszköz megismeréséhez. Saját egyedi fejlesztésű szoftvercsomagok vásárlása is lehetséges.

Funkciók:

- teljesen motorizált x-, y- és z tengelyek,
- számítógépesített C- és B-kép alkotás,
- forgatható kardánkeretes manipulátor,
- motorizált forgó állvány,
- komplett K-Scan vagy NUScan adatgyűjtő és mozgás vezérlő szoftver csomagok (a K-Scan számos lehetőséget nyújt optimalizálni a C-kép megjelenítési részleteit)

Alkalmazható:

- különböző repülőgép motoroknál és szerkezeti elemeknél,
- öntvényeknél és kovácsolt fémeknél,
- kompozit anyagoknál,
- acél és alumínium lemezeknél,
- rácsoknál, tuskóknál és rudaknál,
- csöveknél



3.2. LTI Immersion Tank [8]

12. ábra: közepes méretű KC immersion tank

LTI cég által gyártott igazi ipari méretű bemeztetéses

ultrahangos vizsgálatra képes anyagtesztelő rendszer, amely egy 7.3 méter hosszúságú és 1,5 méter szélességű tartályból áll. A két tengely meghajtással működő rendszer képes A-, B-, és C-kép feldolgozására is. Maximum 6 méter hosszú és 60 cm átmérőjű hengeres rudat lehet benne vizsgálni, ami lapos anyag esetén maximum 6 méter hosszú és 1,2 méter széles lehet, a súlyhatár pedig 2270 kg.

A merülő tartály fel van szerelve egy számítógépes alapú felvevő rendszerrel, amely képes kinyomtatni a vizsgálati adatokat és az eredményeket, ez előnyt jelent, a kézi vizsgálatokkal szemben, mert ott nincs lehetőség számítógépes alapú felvevő rendszert használni. Ezenkívül a kézi vizsgálatoknak megvannak a fizikai korlátai ami az anyag méretét illeti, ezért is van nagy kereslet ilyen méretű vizsgáló rendszerekre nagyméretű anyagok vizsgálatánál - a cég állítása szerint.



13. ábra: Ipari méretű LTI immersion tank

3.3. Mistras Ultrasonic Systems [7]

Az egyik legnagyobb automatizált ultrahangos berendezés gyártó a világon, eladásai alapján az első háromban található. Termék palettája nagyon széles, a legkülönlegesebb egyéni és ipari igényeknek is megfelelnek termékeikkel. A bemező rendszerektől egészen a hordozható automatizált ultrahangos rendszerekig, akár több csatornás egyidejű mérési lehetőséggel. A hordozható kisméretű integrált rendszerektől egészen az ipari méretű integrált bemező rendszerekig szinte minden keresleti igényt kielégítenek. Rendszereik közül néhány típus képes hengeres rúd geometriájú nagyméretű anyagok vizsgálatára is.

Hagyományos és fázisvezérelt fejeket is gyártanak a berendezéseikhez, amik kérés szerint fókuszálatlan vagy fókuszált lencsés kivitelben és akár egyedi megrendeléseket is teljesítenek. Hagományos fejekből kontakt fejeket (merőleges vagy szögfej), bemező fejeket és akár gyűrűs kialakítású fejeket is gyártanak.

Egyedi szoftvereivel (UTWIN™ SOFTWARE, TCPWIN™ SOFTWARE), az adatgyűjtéstől a leképezésen át a jelfeldolgozásig valós időben képes megjeleníteni A-, B-, C-képfeldolgozási formában, akár egyszerre az összeset is.

A teljesség igénye nélkül a szoftver képes:

- hullámforma és spektrum grafikon jelentésekre,
- jeladó szimulációkra, teljes karakterisztika elemzésre,
- időtartománybeli és frekvencia tartománybeli eredmények kiértékelésére,
- Excel report kompatibilitás,
- felhasználó által teljesen testre szabható felület,
- akár 16 tengely mozgás vezérlésére

Csak a Mistras termék család részletes bemutatásával meghaladnám e dolgozat oldal limit számát, ezért a teljesség igénye nélkül néhány képpel illusztrálom a termék családjuk sokszínűségét a 1. számú mellékletben.

4. TÁMOP keretein belül fejlesztett rendszer

4.1. Rendszer eredeti hardveres összeállítása és működési elve

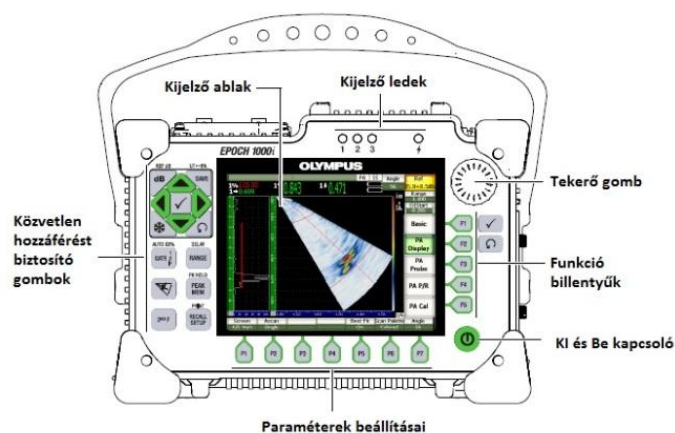
A rendszer része:

- Olympus Epoch 1000i ultrahangos hibakereső
- Isel gyártmányú step controller a hozzá tartozó léptetőmotorokkal felszerelt asztallal és üvegmedencével együtt
- Epiphan VGA2USB típusú framegrabber
- V313-SU típusú bemerítéses ultrahangos fej (15MHz-es nem fókuszált fej)
- megfelelő alkalmazásokat futtató számítógép



14. ábra: a rendszer részei

A rendszer lelke az Epoch 1000i ultrahangos vizsgáló készülék:



15. ábra: Epoch 1000i [11]

Az Epoch 1000i egy hordozható ultrahangos roncsolásmentes anyagvizsgáló készülék, amit főleg fémekben, csövekben és egyéb tárgyakban lévő folytonossági hibák detektálására

használnak. Különböző hagyományos és fázisvezérelt ultrahangos vizsgálatokat képes elvégezni. Robosztus, ipari kivitelű készülék, amely a laborvizsgálatok mellett nyugodtan használható akár a legbarátságatlanabb terepi munkák közben is.

Főbb jellemzők [11]:

- EN12668-1 kompatibilis,
- 37 digitális jelvevő szűrő kiválasztási lehetőség,
- 6 kHz impulzus ismétlési sebesség a nagy sebességű szkenneléshez,
- kódolt vagy idő-alapú C-scan opció,
- automatikus fázisvezérelt fej felismerés,
- intuitív késleltetés és érzékenység kalibrálás,
- programozható analóg / riasztási kimenetek,
- IP66 szerinti védettség,
- digitális magas dinamikus tartományú vevőkészülék,
- full VGA felbontás napfényben is olvasható kijelzővel,
- referencia és mérés kurzorok,
- szabványos dinamikus DAC / TVG,
- szabványos fedélzeti DGS / AVG,
- számítógépes adatkezelés

Isel elemekből összeállított mozgató berendezés:



16. ábra: Isel mozgató berendezés

A mozgatórendszer több egységből épül fel. A platform alsó részén helyezkedik el az Isel cég, mozgatásért felelős IMC-P step kontrollere. Ez a rendszer 2 fázisú léptető motorokat tud programvezérelten irányítani. A szabályozó integrálja az összes szükséges komponenst,

úgy mint a kezelőfelületet, mozgatasért felelős vezérloket, a tápegységet, biztonsági áramkört, és különböző szabályzó elemeket.

A mozgatórendszer második összetevője egy 380x380x150 mm nagyságú üvegből készült medence. A mérés megkezdése előtt fel kell tölteni vízzel, mert a vizsgált tárgy és az ultrahangos fej között kell valamilyen közvetítő közeg.

A harmadik egység pedig a lineáris egységekből álló felépítmény. Ezt vezéreljük egy CNC programmal a step controlleren keresztül.

Az ultrahangos készülék és a számítógép között kapcsolatot az Epiphan VGA2USB frame grabber biztosítja:



17. ábra: Epiphan VGA2USB frame grabber [1]

Erre az eszközre az ultrahangos rendszer, és a fejlesztett szoftver közti kommunikáció miatt van szükség. Alapvető működése az, hogy a bementére érkező analóg VGA jelet digitalizálja, majd egy USB csatlón keresztül továbbítja a számítógép felé. [1]

Resolution	Frame Rate
640×480	28.0
800×600	20.6
1024×768	10.0
1280×1024	5.6
1600×1200	4.3
1920×1200	3.1

1. táblázat: A gyártó által közölt FPS (Frame Per Secundum) adatok

V313-SU típusú vizsgáló fej:



18. ábra: V313-SU típusú 15MHz-es nem fókuszált fej

A fej előnye, hogy éppen ilyen típusú vizsgálatokra készült (bemerítéses) . Hátránya viszont, hogy a mi céljainkra túl nagy a hangnyaláb keresztmetszete, ezért nem a legjobb az x-y irányú felbontóképessége.

Frekvencia [MHz]	névleges rezgő átmérő mérete [inch]	névleges rezgő átmérő mérete [mm]	célpont fókusza [inch]		fókusztartomány [mm] ¹	
			minimum	maximum	minimum	maximum
15	0.25	6	0.5	3.15	12,7	80,01

2. táblázat: A vizsgáló fejről a gyártó által közölt adatok [5]

¹ a „természetes” fókusztávolság minimuma és maximuma

4.2. Rendszer működési elve

Mivel az EPOCH 1000i és egyik általunk ismert hibakereső készülék sem rendelkezik olyan valós idejű csatornával, amin keresztül hozzáférhető lenne az A-kép, vagy az A-képek sorozatára épülő L-kép numerikus formában, ezért a készülék analóg VGA kimenetén lévő képeket digitalizáljuk a framegrabberrel, majd az adatokat továbbítjuk a LabVIEW és ProNC alkalmazást futtató számítógép felé, ahol feldolgozzuk őket.

A rendszer elemeit az általunk fejlesztett LabVIEW program hangolja össze. Ennek fő feladata letapogatás közben az ultrahangos jelek begyűjtése az ultrahangos készülékről a framegrabberen keresztül, majd ezeknek minél gyorsabb eltárolása. A letapogatás végeztével a mentett adatokból alkotjuk meg a szemléletes 2D illetve 3D képeket. A minél gyorsabb tárolásra azért van szükség, hogy maga a letapogatás minél kevesebb időt vegyen igénybe.

A LabVIEW programozási környezetet egy, a célnak megfelelő lapon futtatjuk, amely alkalmas arra, hogy egy RS232 porton keresztül, kommunikáljon az ISEL step controllerrel a ProNC nevű alkalmazáson keresztül, illetve elég erőforrása van a framegrabberrel történő kommunikációra is.

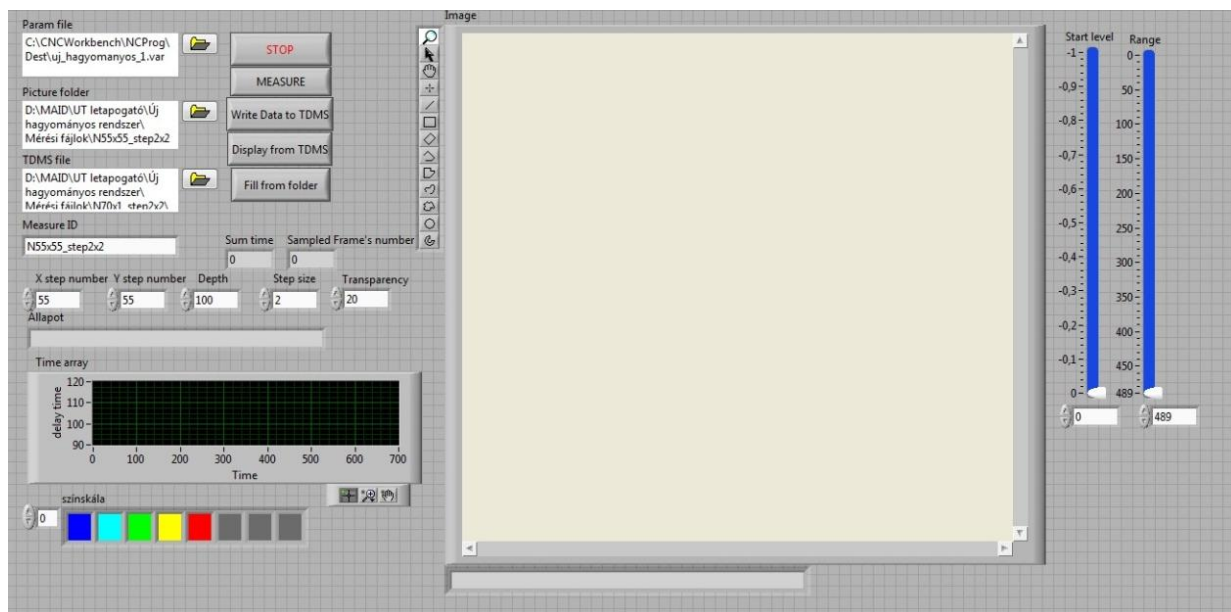
Az ultrahangos rendszer nagyrészt önállóan működik. A letapogatás előtt be kell állítani a megfelelő méréstartományra és érzékenységre, majd a letapogatás során önállóan dolgozik, és adott képfrissítési frekvenciával küldi az ultrahangos adatokat a framegrabberen keresztül a letapogató programnak.

Labview: Grafikus program-fejlesztő, amely elsősorban mérés-technikai és a hozzákapcsolódó jelfeldolgozási feladatok ellátására szolgál, de alkalmas más például szimulációs munkák elvégzésére is, ezenkívül egy általános teljes értékű programozási nyelv. [21]

ProNC: Ez a kód és driver gondoskodik az ISEL rendszer működéséről

4.3. Eredeti szoftver (v3_4) működése

Egy korábbi (v3_4 jelű) Labview alkalmazást elsősorban Doszpod László anyagvizsgáló mérnök fejlesztett ki. Amikor elkezdtem a TDK munkámat (2013.06.01) a MAID Laborban sajnos már nem volt alkalmam találkozni Doszpod Lászlóval, mert munkahelyet váltott. Az általa használt utolsó verziójú fejlesztett Labview alkalmazás a v3_4 volt. Bemutatom az alkalmazás működésének a főbb menetét, lényegét. Nem mindenhol térek ki a forráskódok pontos ismertetésére, ahol szükséges az a jelzett mellékletben megtalálható.



19. ábra: v3_4 felhasználói felülete

A program alapvetően 4 egymástól elkülönült „állapot”-ban működik miután elindítottuk. Egyszerre csak egy állapota lehet aktív, párhuzamosan nem működhetnek. Miután elindítottuk a programot felhasználói beavatkozásra vár. Akkor történik csak művelet, ha megnyomtuk a „Fill from folder” gombot. Ekkor kitöltődnek az előlapi mezők a (TDMS file, Measure ID, X step number, Y step number, Step size) a „Picture folder” elem tartalma alapján. Innen a Stop, Measure, Write data to tdms, Display from tdms állapotokba léphetünk tovább a megfelelő gombok megnyomása esetén.

Állapotok:

Stop: Ebben az állapotban a program leállítja a programot.

Measure: Ebben az állapotban azt vizsgálja a program, hogy a mozgatórendszer éppen álló helyzetben van-e, azaz lehet-e ultrahangos felvételt készíteni. Amennyiben nem, a lehető legkisebb várakozási idővel újra és újra megvizsgálja ezt a feltételt. Amennyiben igen, akkor az aktuális képkockákat (az Epoch 1000i kijelzőjéről) a merevlemezre menti a „Picture folder” elem tartalma alapján megadott helyre, *.bmp formátumban. Ez a ciklus addig tart, amíg ki nem kapcsoljuk a Measure gombot, vagy le nem állítjuk a programot a Stop gombbal. Majd a program megvizsgálja, hogy a Measure gomb kikapcsolásával, vagy a Stop gomb megnyomásával ért véget a Measure állapot ciklusa, és ennek megfelelően visszatér a Start állapotba, vagy befejezi a programot a Stop állapottal.

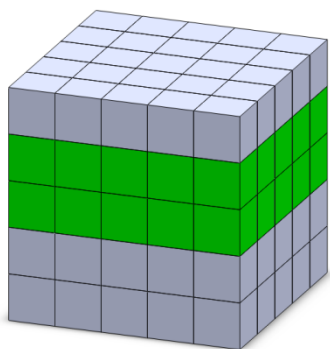
Write data to tdms: Ebben az állapotban a program végighalad a Picture folder mappában lévő, korábban elmentett bmp képfájlokon, kinyeri belőlük az A-képek numerikus értékeit, és létrehoz egy 3D-s tömböt, amelyet kiír egy TDMS bináris fájlba. Ez egy viszonylag lassú folyamat, mivel nagyon sok képet kell pixelről pixelre feldolgozni, a TDMS fájlba mentett adatokból viszont elég gyorsan meg lehet jeleníteni az adatokat. Így egy-egy adatmegjelenítéskor nem kell újra és újra feldolgozni az adatokat, elég a TDMS fájlt beolvasni.

Display from tdms: ebben az állapotban történik a korábban elmentett TDMS fájlból az adatok 3D és 2D megjelenítése. A 3D megjelenítéshez az alkalmazás egy új ablakot nyit meg. Ebbe az ablakba rajzolja bele a 3D-s modellt. A modell mellett kirajzolódik még három tengely is, a jobb vizuális tájékozódás miatt. Az „x” tengelyt reprezentáló vonal színe piros, az „y” tengelyé zöld, és a „z” tengelye kék színűen látható. A 3D modell értelmezésének megkönnyítése érdekében a színkóddal vannak ellátva a különböző mélységből érkező jelek, ezeket a színeket a színskála nevezetű kontrollal lehet beállítani. A 2D megjelenítésben a színek jelentése nem egyezik meg a 3D modellnél alkalmazott színekkel. 2D esetben a piros az intenzívebb ultrahangos reflexiókat jelenti, majd a sárga és a zöld pedig a kevésbé intenzíveket.

A transparency értéket változtatva lehet változtatni az átlátszóságot, 0 esetén átláthatatlan az anyag, 100 esetén teljesen átlátszó és nem látszik semmi, a köztük lévő értékekkel különböző kontrasztossággal jeleníthetők meg az anyagon belüli folytonossági hiányok. Így a felhasználó tudja változtatathatja ezt az értéket tetszése szerint.

Az ablak jobb oldalán lévő Start level csúszkával beállíthatjuk, hogy a vizsgált tárgy milyen mélységű rétegét (felülről lefelé haladva) szeretnénk megnézni a mellette található Image nevű kijelzőn 2D-ban illetve a külön ablakban megjelenő 3D modellben.

A 3D-s tömb a képalkotás sajátosságai miatt minden esetben 489 rétegből áll. Ha például a „Start level” értéknek 100-at, a „Range” értéknek 50-et állítunk be, akkor a program kiválasztja a 100, 101, 102...149 indexű rétegeket. Ezek a rétegek együtt továbbra is egy 3D-s tömböt alkotnak. A Range csúszkával pedig be tudjuk állítani, hogy ennek a rétegnek mekkora környezetét átlagolja egybe a program. Így egy sokkal élesebb képet kapunk, amin jobban kivehetőek a folytonossági hiányok. Ha maximumra állítjuk, akkor végeredményben egy felülnézeti C-képet kapunk a vizsgált tárgyról.



A résztömb kiválasztását a 20. ábra mutatja abban az esetben, ha az eredeti 3D tömb 5,5,5 méretű, a „Start level” értéke 1 (indexelés 0-tól indul), a „Range” pedig kettő:

20. ábra: Start level és range értékének szemléltetése

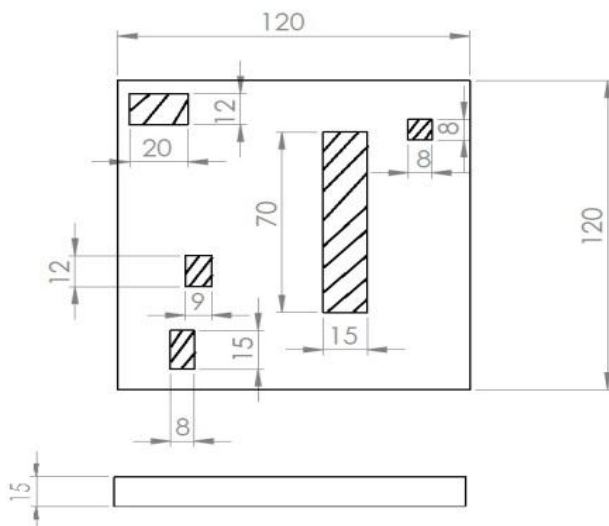
A mintavételezett képek mennyiségét a „Sampled Frame’s number” mező mutatja. A mérés idejét a „Sum time” mezőben ellenőrizhetjük. A Time array diagramon ellenőrizhetjük az A-képek kinyerésének idejét a frame grabberből. Ha egy kép kinyerése túl lassú (több mint 120ms) akkor az alkalmazás nem vár az aktuális A-képre, hanem egy fekete képpel helyettesíti azt.

4.4. Eredeti hardver- és szoftverkörnyezet (v3_4) mérési eredményei

A kutatás megkezdésekor, első dolgom az volt, hogy megismertem a már addig fejlesztett rendszer működését, erősségeit, gyengeségeit. A mérési vizsgálatokat a laborban lévő 04-es jelzésű nem rozsdamentes acélból készült minta darabon kezdtem el (21.ábra), - amelyben a korábbi bevizsgálások alapján meghatározott folytonossági hiányok voltak (lásd 22.ábrát). Számos tesztet ezen a minta darabon végeztem el azért, mert a kapott eredményeket azonnal össze tudtam hasonlítani a tényleges hibákkal.



21. ábra: 04-es jelzésű minta darab



22. ábra: 04-es minta darab műszaki rajza

A bemelegítéses ultrahangos vizsgálatokat az Epoch 1000i kalibrálásával és egyéb információk mérlegelésével kezdtem meg minden esetben:

- A vizsgálat elején figyelembe vettem (vagy esetleg más vizsgálatoknál konkrét feladat illetve előírás alapján tudtam), hogy van-e olyan folytonossági hiány aminek várhatóan tudom a mélységét és a méretét
- Erősítés beállítása: Tudtam, hogy a 04-es vizsgálati tárgyban hol helyezkedtek el a folytonossági hiányok, így azok elhelyezkedései alapján állítottam az érzékenységet (Gain) megfelelő erősségűre. Egyéb esetben, amikor egy „ismeretlen” anyagot vizsgáltam, akkor az erősítést úgy állítom be, hogy a hátfaljel a referencia és azt kell állítani 4/5-ös (80%-os) képernyőmagasságba. Majd ezt az értéket érdemes növelni 6, 12, 18 decibellel, a kisméretű folytonossági hiányok felismeréséhez.
- Az anyagban meg kell határozni a mérés megkezdése előtt az ultrahang terjedési sebességét (Velocity): Az anyagon belüli ultrahang terjedési sebességének értékét vagy táblázatból szoktam megkeresni vagy az értékének a kiszámítását az Epoch 1000i-vel szoktam elvégeztetni. Az Epoch 1000i-n történő anyagon belüli ultrahang terjedési sebesség meghatározása (Velocity) a CALZero és a CALVel opciók egymás utáni bekapcsolásával volt elérhető.
- A gyártó által közölt adatok alapján beállítottam a feltételezhetően megfelelő ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy közötti távolságot.

A későbbiekben minden tárgy vizsgálata előtt ezeket a beállításokat és szempontokat vettem figyelembe illetve állítottam be.

Az eredeti hardver környezet (Epiphan VGA2USB frame grabber, V313-SU típusú 15MHz-es nem fókuszált vizsgáló fej) és az „átvett” szoftver (v3_4) által készített 04-es jelzésű minta darab vizsgálati eredményét mutatom be. A hardver környezetnél azért a frame grabbert és a vizsgáló fejet emeltem ki, mert a következő fejezetben bemutatom milyen változásokat értem el a vizsgálati eredményeket tekintve egy újabb típusú frame grabberrel és vizsgálófejjel, valamint a módosított szoftverrel (minden más hardver elem azonos, az előző fejezetekben ismertetettekkel).



23. ábra: A kijelzőn felvett mérési tartomány képe (A-scan)

A 23. ábrán látható a kijelzőn felvett mérési tartomány kezdő képe, ami csak az anyag homlok és hátfala közötti tartományt tartalmazza. Konkrétan nem látható rajta a homlokfal és a hátfal visszhangja. A később bemutatott 1.,2.,3.,4. mérések során is ezt a mérési tartományt alkalmaztam, kivéve az 5. mérésnél, de ott külön ismertetem a mérési tartományt.

Fontosabb alkalmazott mérési beállítások:

erősítés: 55,1 dB

ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy közötti távolság: 15 mm

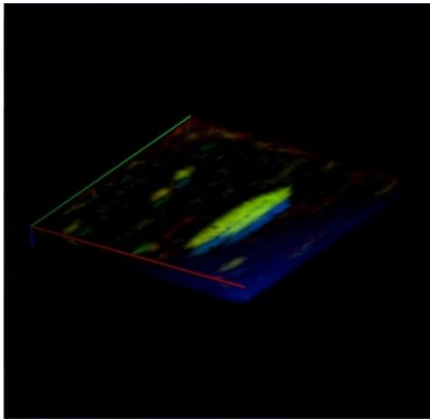
lépésköz: a mérés során X és Y irányban is 1 mm-es lépésközökkel történt a letapogatás

mérés ideje: 43 perc

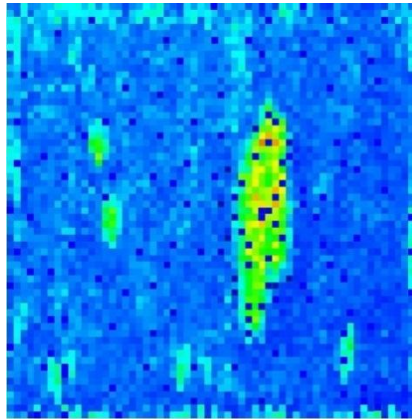
A vizsgálat során alkalmazott Pulser és Receiver beállítások a 2. számú mellékletben találhatók.

4.4.1. 2D és 3D modell eredményei:

3D:



2D:



24. ábra: 04-es minta darab 3D illetve 2D modellje

3D értékelés:

A 3D modell megjelenítésében, az anyag belsejében elhelyezkedő folytonossági hiányok látszanak, bár értelmezésük nem egyértelmű, a sok pici folt megléte miatt. A 3D modell értelmezésének megkönnyítése érdekében színkóddal vannak ellátva a különböző mélységből érkező jelek, ebben az esetben a sárga szín az anyag homlokfalát, a zöld az anyag hátfalát a kék pedig a medence aljáról visszaverődő visszhangot jelenti. A 3D mozgításnak, forgatásnak köszönhetően megfigyelhető a folytonossági hiányok egymáshoz viszonyított helyzete, mélysége is, amit sajnos a képek nem reprezentálnak.

2D értékelés:

A 2D modell egy felülnézeti képet (C-kép) ábrázol a minta darabról. A képen a zöld és sárgás „foltok” reprezentálják a folytonossági hiányokat. A VGA2USB frame grabber adatátviteli kapacitása sajnos a gyártó által ígért 640×480 felbontáson 30 FPS (Frame Per Secundum) adatátvitel helyett a valóságban 10-12 FPS volt, emiatt elég sok úgynevezett üres képet kellett beilleszteni a megjelenítéshez szükséges adatok közé, amik sötétkék pixelek formájában jelennek meg. A sok sötétkék pixelek számunkra nagyon kedvezőtlenek voltak, mert információ veszteséget jelentettek, így nem tudtuk értékelhetően megvizsgálni az anyag minden pontját.

Amennyiben objektíven értékeltem a kapott 3D és 2D modelleket, nagyon nehéz, szinte lehetetlen volt elkülöníteni az anyagon belüli tényleges folytonossági hiányokat és az egyéb megjelenő zavaró foltokat, jelenségeket. Anyagvizsgálati szempontból érdemlegesen több információt nem lehetett kapni azzal a programmal, amelyet „örököltem” a kapott 3D és 2D modellekből. Ezért számos változtatást kellett rajta végezni, hogy jobb feldolgozást tegyünk lehetővé.

5. Rendszeren történt változások

5.1. Hardveres változások

A korábbi mérési tapasztalatokra támaszkodva egy újabb típusú frame grabber és egy V376-SU típusú 30 MHz-es fókuszált bemenítéses vizsgáló fej alkalmazásával igyekeztem javítani a mérési eredményeket.

Az új frame grabber típusa: Epiphan VGA 2 USB LR (25.ábra és 3.táblázat)



25. ábra: vga 2 usb lr frame grabber [2]

Resolution	Frame rate [FPS]
640×480	30.0 - 60
800×600	22.6 - 60
1024×768	15.0 - 60
1280×1024	10.0 - 51

3. táblázat: A gyártó által közölt FPS adatok [2]

Ez a digitalizáló ténylegesen képes volt még 60 fps adatátvitelre is (ellenőriztem), az ezzel elért eredményeket a későbbi fejezetekben mutatom be részletesen.

A V376-SU típusú 30 MHz-es fókuszált bemerítéses vizsgáló fej 2013.09.05.-én érkezett a laborba. A vizsgáló fejjel elért eredményeket a későbbi fejezetekben mutatom be részletesen.



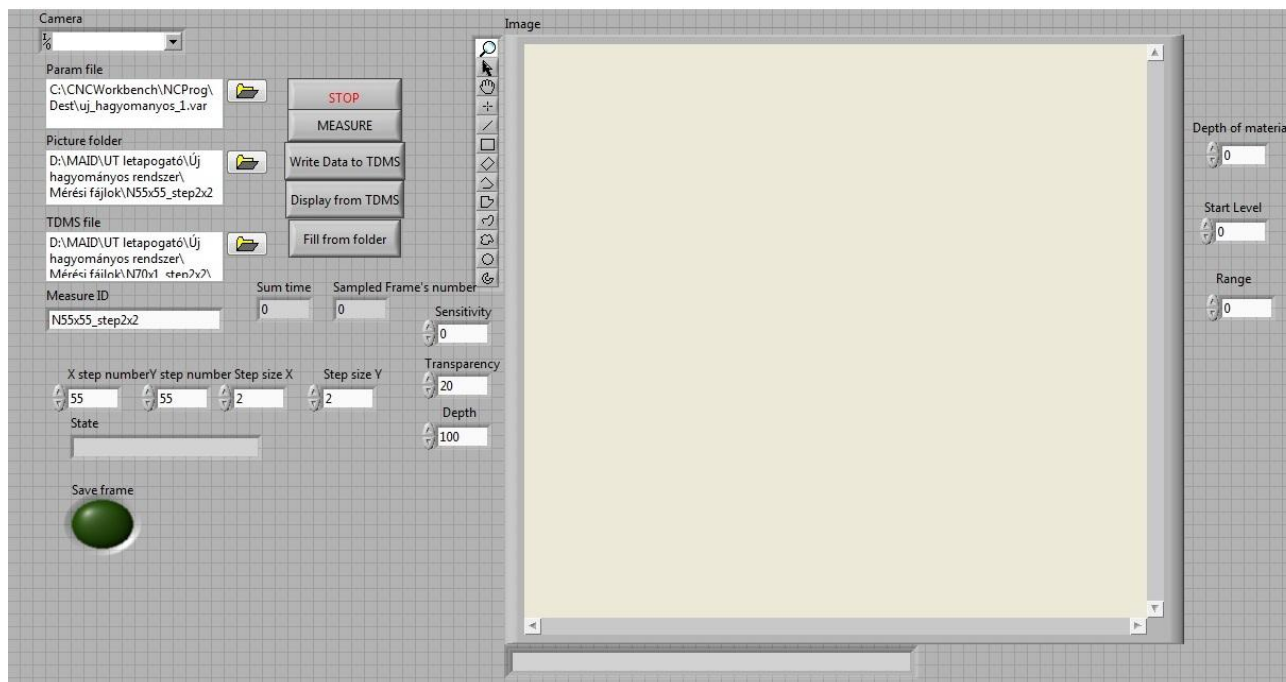
26. ábra: V376-SU típusú 30 MHz-es fókuszált vizsgáló fej [5]

					Fókusz távolság		
Frekvencia [MHz]	névleges átmérő [inch]	rezgő mérete	névleges átmérő [mm]	rezgő mérete	késlelteté s [μsec]	[inch]	[mm]
30	0.25		6		4,25	1.25	32

4. táblázat: a gyártó által közölt adatok, a fókusz távolság értéke víz csatoló közegben lett meghatározva [5]

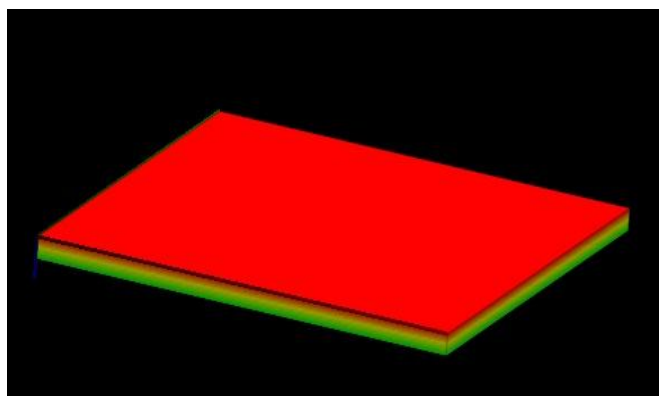
5.2. Szoftveres változtatások, fejlesztések (v3_8)

A sok változtatást verzió számok növelésével jeleztem az alkalmazás fejlesztése során, jelenleg a v3_8 verziót használom, ami számos változtatást takar.



27. ábra: v3_8 felhasználói felülete

Amikor elkezdtem ismerkedni a fejlesztett alkalmazással (V3_4), a számos tesztelés közben azt a hibát tapasztaltam, hogy az 3 dimenziós megjelenítéshez szükséges TDMS típusú bináris fájlt gyakran hibás adatokkal készítette el a fejlesztett alkalmazás, ilyenkor a jobb oldalon látható eredményt kaptuk a 04-es jelzésű minta darab esetén.



28. ábra: A hibás adatokkal elkészült TDMS 3D modellje

A hiba okát sikerült megtalálni és kijavítani. A hiba a program egy alprogramjában volt. Az alprogram (Subvi) fő feladata, hogy a képfájlokból kinyerje az A-képek numerikus értékét. Ebbe a Sub-vi-ban elvégeztem a szükséges módosításokat.

Jelenleg az A-képek numerikus értékét úgy határozza meg, hogy egy-egy kép minden egyes oszlopán végigfut a program és ahol az amplitúdó értékéből adódóan fehér területet talál, ami megfelel egy peremfeltételnek, azt az értéket eltárolja egy tömbben és megvizsgálja a következő oszlopot egészen amíg el nem éri az előre definiált határterületet.

Emellett, egy a megjelenítést kontrasztosabbá tevő ciklust is bele építettem ebbe a Subvi-ba, aminek peremfeltételéhez tartozó értékét egy szabályozható kontrollal változtathatja a felhasználó. Így a Sensitivity nevű kontroll érték változtatásával a felhasználó tetszés szerinti mértékben ki tudja „szűrni” az A-képekből származó felesleges háttér zajokat, ezáltal egy sokkal kontrasztosabb képet kaphatunk. Ez végül is egy nagyságrenddel megbízhatóbb eredményt nyújt mind a 3D és 2D-s modellek esetében.

A megjelenítés értelmezhetőségét a felhasználó szempontjából egzaktabbá akartam tenni, ezért módosítottam a Start Level és Range kontrollok értelmezését. A változtatás eredményeként a felhasználónak csupán az anyag vastagságát kell megadnia mm-ben (Depth of material) majd azután a Start Level és Range értékeit tudja beállítani mm-ben, a számára megjeleníttetni kívánt részt.

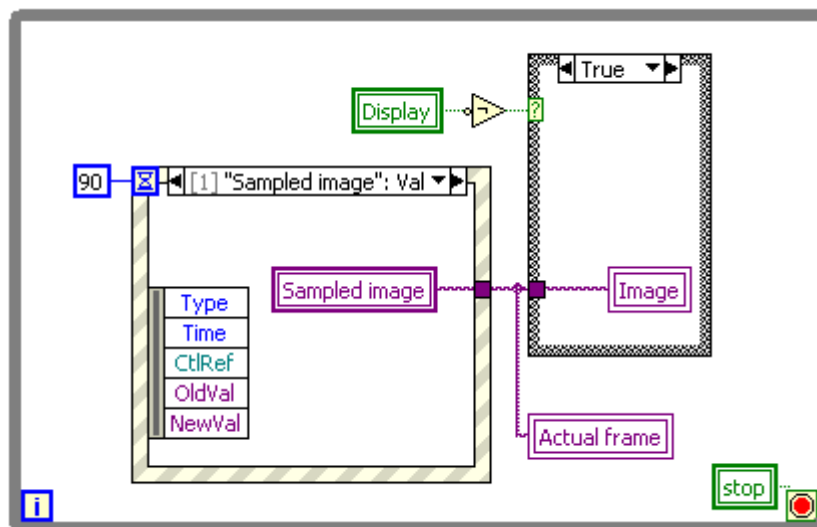
Az újabb verzióba (V3_8) már „feleslegessé” vált a Time array indikátor, hiszen az adatátvitel stabil és determinisztikus folyamattá vált. A színskálát állandó (konstans) értékűvé változtattam a programon belül, így az is feleslegessé vált. Viszont egy Save Frame nevezetű állapot jelző led került a bal alsó részbe, ami felvillanással jelzi vizsgálat közben, mikor történik kép rögzítés.

Az eredeti program (V3_4) úgy lett elkészítve, hogy „csak” olyan típusú vizsgálatokat lehetett vele készíteni, ahol a lépegetés azonos lépésközökkel (X irányban is és Y irányban azonos érték) valósult meg, ebből a szempontból átalakítottam és már akár soronként (X irányban és Y irányban is tetszőleges lépésközzel) is lehetne vele vizsgálatokat végezni folyamatos rögzítéssel. A folyamatos rögzítés még fejlesztés alatt áll a ciklusok létrehozása terén. Próbára vizsgálatokat már készítettem, de még nem állnak rendelkezésre az itt később bemutatott vizsgálati eredményekhez közel hasonló színvonalú eredmények.

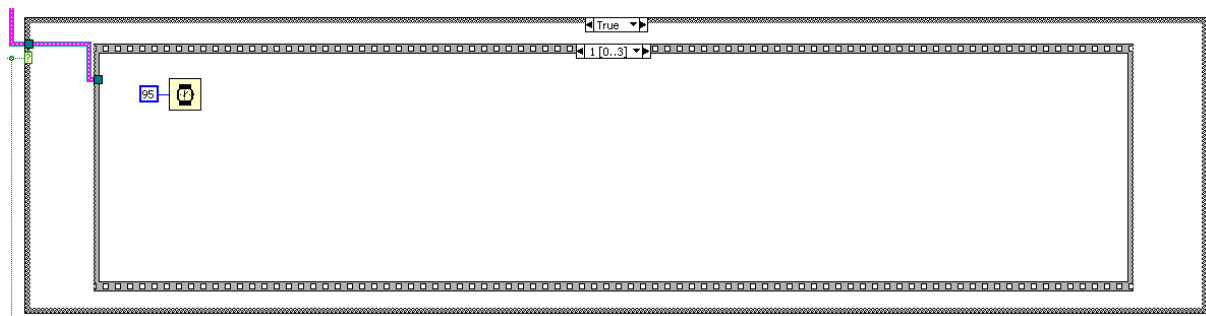
Az új digitalizáló (Epiphan VGA 2 USB LR) sokkal gyorsabb adatátviteli sebessége miatt optimalizálni kellett az alkalmazást, bizonyos ciklus idők tapasztalati úton szerzett értékeinek módosításával, valamint feleslegessé vált események törlésével.

A megfelelőbb erőforrás kezelést is hatékonyabbá tevő ciklus idők létrehozásával illetve változtatásával, **ma már egy vizsgálat 63%-al gyorsabb. A adatfeldolgozás szempontjából** (adatfeldolgozás alatt értem, a sötétkép pixelek számának mértékét, ami megegyezik az információ vesztés mértékével) **100%-os javulást sikerült elérni**, ami nagyon kedvező, hiszen nincs információ vesztés, és az egész vizsgált térről kapunk információt. A programon végzett változtatások blokk diagramja és leírása az 1. számú mellékletben található.

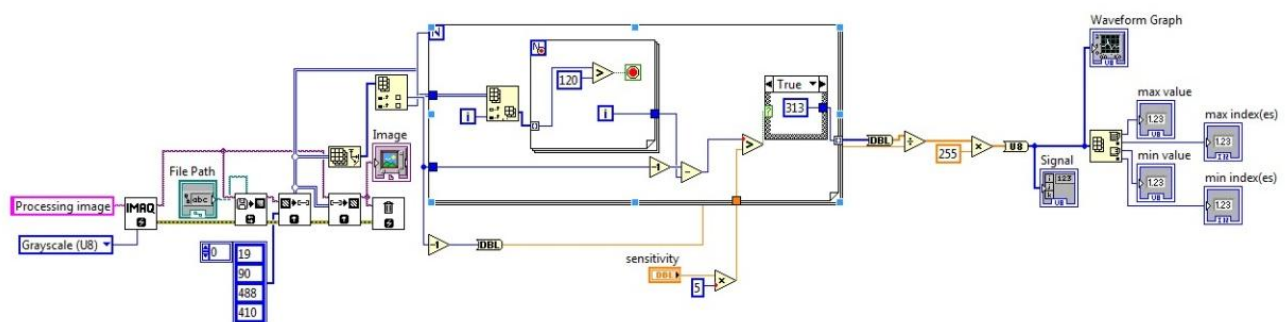
5.3. A fontosabb szoftver változtatások



A ciklus fő feladata az volt, hogy a ciklus futásideje a timeout terminálra adott idő lejártával mindenképpen véget ért (ezredmásodpercben értendő adat). Amennyiben a határidő lejárt előtt megváltozott a Sampled image változó értéke, azaz a képkocka termelőciklus produkált új képkockát, elhelyezte ezt az új képkockát az Actual frame változóban. Amennyiben nem keletkezett, és lejárt a határidő, elhelyezett a területen egy üres, fekete színű képkockát. A ciklust törölni kellett, mert a rögzítési folyamat determinisztikussá vált, így már nem volt rá szükség.



Ezt a ciklus várakozást törölni kellett a determinisztikus rögzítés miatt. Ez a ciklus idő szabályzó a képkockák mentésének szekvenciájában volt. Feladata az volt, hogy a program várt 95ms ideig.

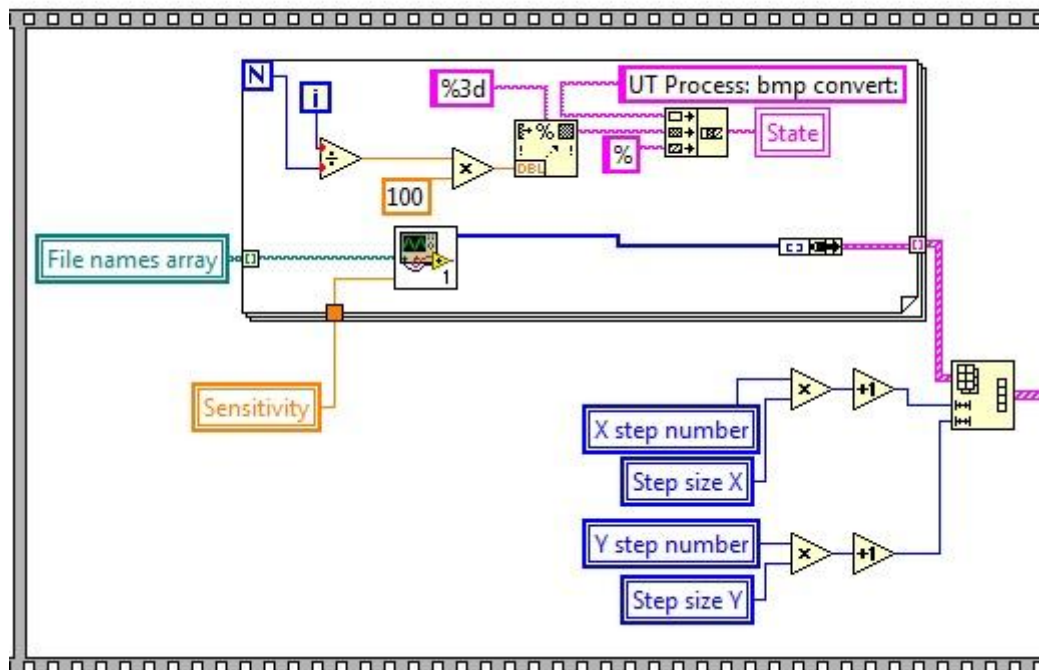


Ez a VI a bemenetére adott elérési útvonalon lévő képfájlból kinyeri az abban található A-kép numerikus vektorát, azaz előállít egy olyan, számokból álló 1D tömböt, ahol az egyes számértékek az adott pontban érzékelhető ultrahangos intenzitással arányosak, a maximális intenzitás 255 értéket ad, a minimális pedig 0-át. Működése:

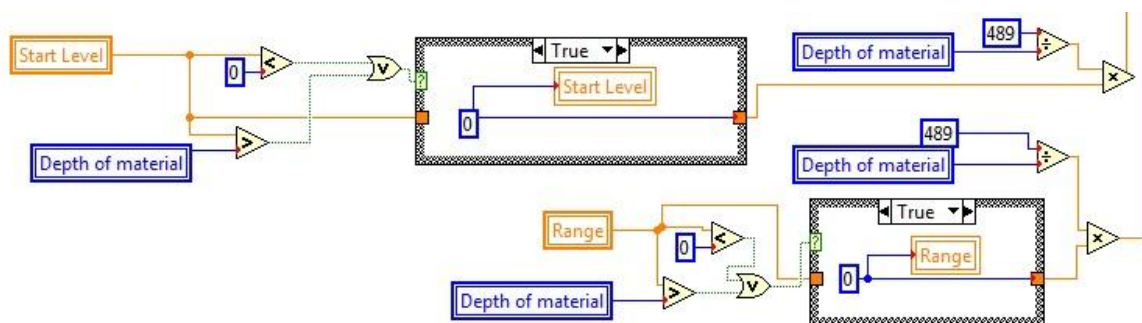
- Lefoglal egy memóriaterületet „Processing image” néven a beolvasott képfájl számára
- A megadott elérési útvonalról beolvassa a fájlt
- A beolvasott fájl egy részterületét átalakítja egy számokból álló 2D tömbbé. A részterületet bal felső és jobb alsó sarkok koordinátaival adjuk meg. Mivel a készülék képernyője fix felbontású, és fix elrendezésű, ezért a sarokpontokat konstanssal adjuk meg. Ennek köszönhető, hogy a numerikus vektor mindig fix hosszú, 489 értéket tartalmaz, ami maga után vonja, hogy a letapogatott tér is mindig 489db x-y helyzetű réteget tartalmaz
- Egy FOR ciklus segítségével megvizsgálja egyenként a kivágott képrészlet oszlopait, megkeresi az adott oszlopban az ultrahangos intenzitás értékét. A bemenetre érkező kép úgy van beállítva, hogy az A-kép alatti terület fehér színű, a felette lévő pedig fekete.

Az ultrahangos intenzitást az adott oszlopban úgy lehet megtalálni, hogy fentről lefelé haladva megkeressük az első olyan értéket, aminek a fehér intenzitás értéke a 120-at el nem éri.

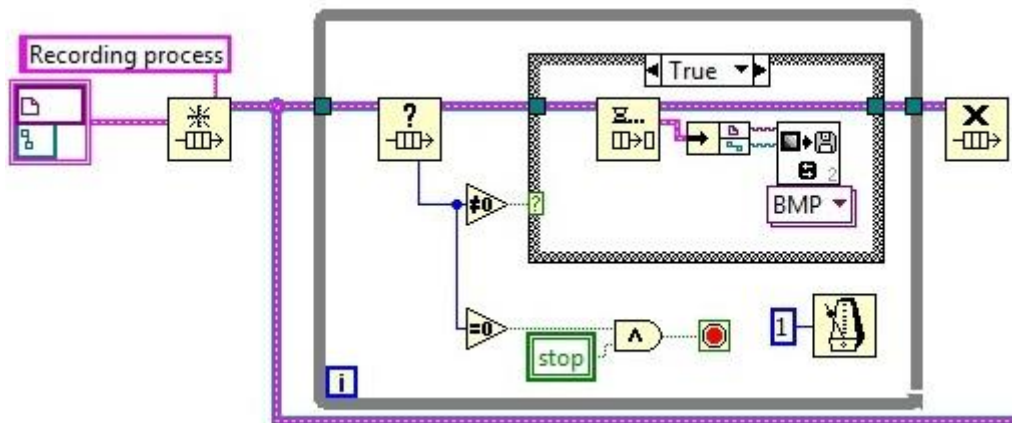
- Továbbá a Sensitivity kontrollal szabályozhatóvá válik az adatok tömbbe írása előtt, azok értékének feltételhez kötése. Ha a Sensitivity kontroll szorozva 5-el kapott eredmény meghaladja a for ciklusból kimenő adat, akkor az értékét 313-ra állítja a VI, különben 0 értéket ad neki és úgy helyezi el a tömbbe.



Az X step number és Y step number, valamint a Step size X és Step size Y megfelelő össze szorzásával és megfelelő elhelyezésével lehetővé válik a soronkénti letapogatás is, aminek pontos rögzítési peremfeltétele még kísérleti stádiumban van.



A start level, range, dept of material kontroll és indikátor lokális változók megfelelő feltételekkel összekötése lehetővé teszi, hogy a megjelenítést a 489 réteg helyett, mm-ben ábrázolja a program az Image nevű kijelzőn a 2D modellt.



Ez a rész egy sorstruktúra fogyasztó ciklusa, itt történik a képkockák rögzítése bmp formátumban a merevlemezre. A ciklusba betettem egy ciklus idő várakozást szabályzót, aminek értékéül 1 ms adódott a leghatékonyabbnak. Ezzel a CPU erőforrás kezelése nagymértékben javult, a 60%-os leterheltség 30%-ra csökkent. Ez a megoldás lehetővé teszi majd a későbbiekben további Real time opciók beépítését a programba.

A ciklus a rendszer által megengedett legkisebb ciklusidővel futott (azaz nem volt ciklus idő várakozási szabályzó), és úgy vizsgálta folyamatosan, hogy volt-e rögzítésre váró képkocka. Az így alkalmazott eljárás nagymértékbe túlterhelte feleslegesen a CPU-t.

6. Megváltozott hardver-és szoftverkörnyezet (v3_8) mérési eredményei

Az itt bemutatott méréseket (1,2,3,4,5 mérés) már a gyorsabb Epiphan VGA 2 USB LR-el és a V376-SU típusú 30 MHz-es fókuszált bemeztéses vizsgáló fejjel végeztem.

6.1. 1.mérés (04-es jelzésű minta darab)

A mérést a már ismertetett 04-es jelzésű minta darabon végeztem el. A vizsgálat során a letapogatott tér megegyezett az előző fejezetben lévőekkel.

Fontosabb alkalmazott mérési beállítások:

erősítés: 55 dB

ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy közötti távolság: 25 mm

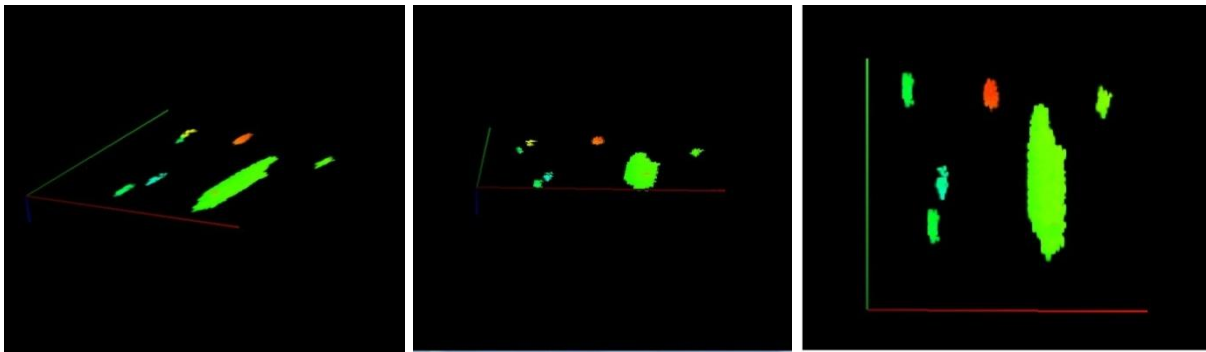
lépésköz: a mérés során X és Y irányban is 1 mm-es lépésközökkel történt a letapogatás

mérés ideje: 16 perc

A vizsgálat során alkalmazott Pulser és Receiver beállítások a 3. számú mellékletben találhatók. Az ebbe a fejezetbe felsorolt mérések (1,2,3,4,5 mérés) során is ezeket a Pulser és Receiver beállítások alkalmaztam

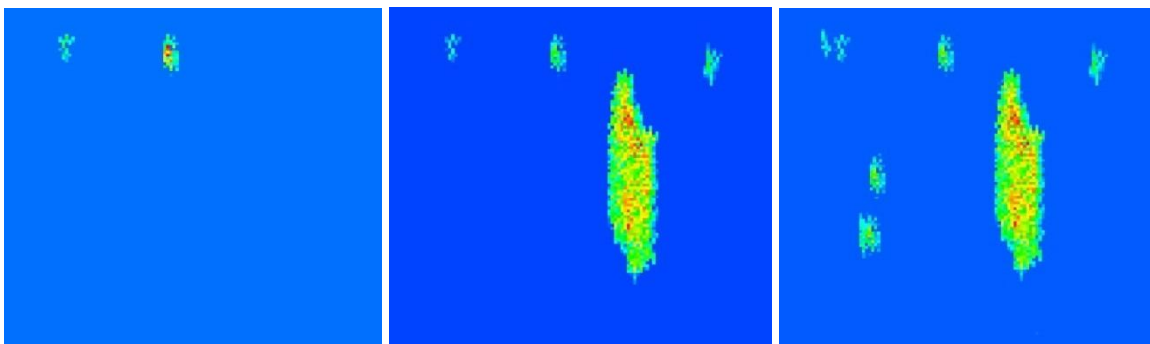
6.1.1. 2D és 3D modell eredményei:

3D eredmények:



29. ábra: 04-es minta darab 3D modelljei

2D eredmények:



30. ábra: 04-es minta darab 2D modellje, átlagolt metszetek 5, 8, 15 mm mélységből

3D értékelés:

A 29. ábrán mutatom be a 3D modell nézetét. A 3D modell megjelenítésében, az anyag belsejében elhelyezkedő folytonossági hiányok sokkal jobban kivehetőek illetve látszanak, mint az eredeti hardver és szoftver környezet során készült vizsgálati eredményekben.

A folytonossági hiányok értelmezése könnyebbé vált, az utófeldolgozás során szoftveresen tisztított eljárás következtében. A 3D modell értelmezésének megkönnyítése érdekében színkóddal vannak ellátva a különböző mélységből érkező jelek, ebben az esetben a sárga szín az anyag homlokfalát, a zöld az anyag hátfalát a kék pedig a hátfalat jelenti.

2D értékelés:

A 30. ábrán a 2D modell különböző mélységből (ami rendre 5, 8, 15 mm) származó átlagolt metszeti képeket ábrázol a minta darabról. A képen nem láthatóak sötétkek pixelek, tehát az egész vizsgált térről információt kaptunk, ami nagyon fontos.

Figyeljük meg, a folytonossági hiányok egymáshoz viszonyított helyzete is felmérhető akár, ami a hibák helyzetének pontos ismeretét teszi lehetővé. Valamint a különböző mélységből származó átlagolt metszetek is nagy segítségre lehetnek a folytonossági hiányok rétegenkénti elkülönítésére, ami nagy vastagságú anyagoknál kifejezetten előnyt jelenthetnek.

Az itt ismertetett vizsgálati eredmények és a „Eredeti hardver- és szoftverkörnyezet (V3_4) mérési eredményei” című részben ismertetett vizsgálati eredmények azonos megjelenítési beállítások mellett kerültek szemléltetésre, pontosan azért, hogy érzékeltessem a szoftver fejlesztés és hardver változások mekkora különbséget eredményeztek.

Amennyiben objektíven értékelem a kapott 3D és 2D modelleket, fel lehet ismerni az anyagon belüli tényleges folytonossági hiányokat. Anyagvizsgálati szempontból szignifikánsabban több információt tudnék meg a kapott 3D és 2D modellekből, ami alapján akár egy szabványos hiba kereső vizsgálat is indokolt lehetne.

6.2. 2. mérés (ALU_H minta darab)

A kapott eredmények után készítettem az iskola keretein belül egy később ALU_H-nak elnevezett minta-darabot. A minta-darab mint ahogy a nevében is benne van alumíniumból készült, a H elnevezés a H betűket tartalmazó beírásokból adódott.

A minta-darabot abból a célból készítettem, hogy a mintadarabban lévő folytonossági hiányok geometriáját mennyire tudja kezelni a fejlesztette alkalmazás (v3_8) illetve reprezentálni a kapott 3D modell.

[illegible]

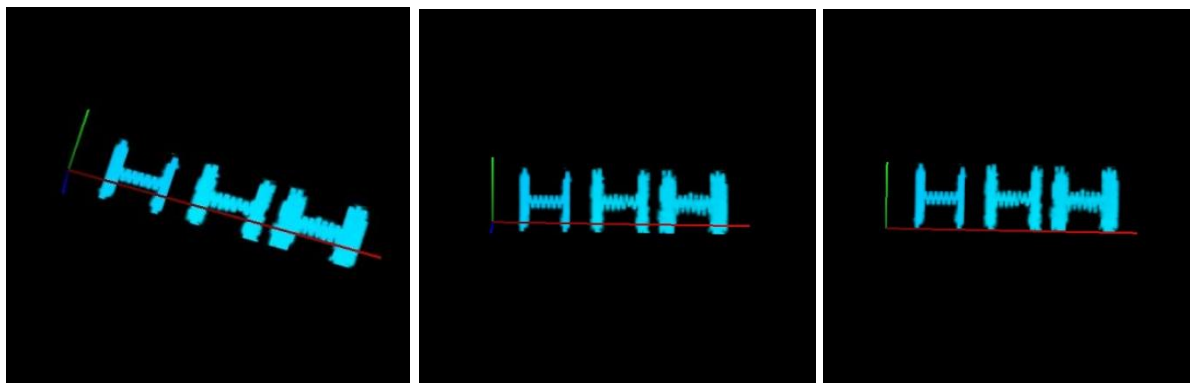
SECTION A-A

mérés ideje: 4 perc

A mérés során a H betűket képező bemarkásos oldal lefelé nézve volt elhelyezve az akváriumba.

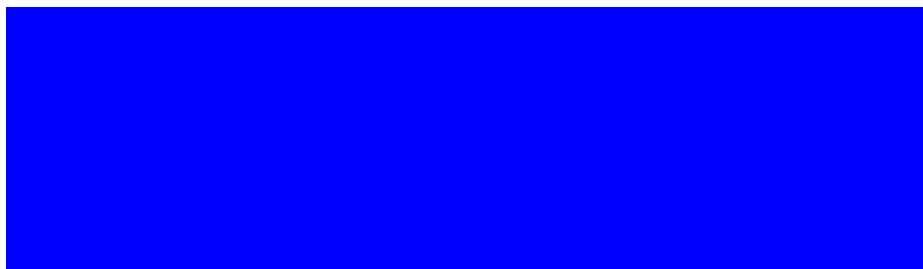
6.2.1. 2D és 3D modell eredményei:

3D eredmények:

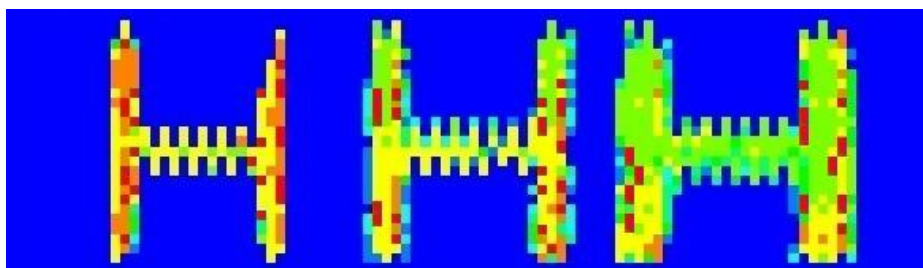


34. ábra: ALU_H minta darab 3D modellezésével készül képek

2D eredmények:



35. ábra: ALU_H minta darab 2D modellje, átlagolt metszet 5 mm mélységből



36. ábra: ALU_H minta darab 2D modellje, (C-kép)

3D értékelés:

A 3D modell megjelenítésében (34.ábra), az anyag belsejében elhelyezkedő folytonossági hiányok jól látszanak. Kifejezetten elkülöníthetők a H betűket alkotó bemarkások. A legvékonyabb és legvastagabb H betű közötti különbség szemmel is érzékelhető, a közöttük lévő távolság is realisztikus.

2D értékelés:

A 36. ábra egy felülnézeti képet ábrázol a minta-darabról. A H betűket alkotó vonalak szélén lévő piros pixelek a legnagyobb reflexiókból erednek, aminek oka a bema-rás sajátosságából adódik. Hiszen a bema-rások végei, nem derékszöget alkotó felületek, így a kerek felületekről máshogy verődik vissza az ultrahang.

A 36. ábrán kapott geometria közel teljes mértékben leköveti a 32. ábra alapján meghatározott bema-rások helyét, alakját. A 35. ábrán lévő 5mm-es mélységből származó átlagolt metszeti képen nem látható reflexióból eredő geometriai alakzat, az anyag ott még folytonossági hiányt mentes.

A kapott eredményeket értékelve a fókuszált fejjel készült 3D modell szinte teljesen leköveti az anyagon belüli folytonossági hiány valódi geometriáját. Ami alapján kijelenthető, hogy a V376-SU fókuszált fejjel képes (az érzékenységi határai között) a fejlesztett Labview alkalmazás az anyagon belüli, a fejre ténylegesen merőleges folytonossági hiány valódi geometriáját megjeleníteni.

Továbbá a kapott eredményekből bizonyos, hogy az ultra-hangos rendszer x,y irányú felbontása minimum 4 mm.

A 3D illetve 2D modelleket elnézve úgy gondolom, hogy a 4 mm-es felbontásnál többre is képes lenne a fókuszált fej, de sajnos az a vizsgálat - megfelelő minta-darab hiányában- még várat magára, így a jelenleg kapott vizsgálati eredményekből vonok le konzekvenciát.

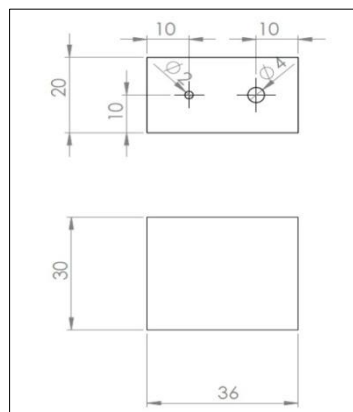
A mérés abból a szempontból is érdekes volt, hogy még a legvékonyabb H betűt alkotó vonalak (3x13 mm) geometriája is tükrözte a valóságot a kapott 3D modellben, míg az 1. mérésben ismertetett 04-es jelzésű minta-darab legnagyobb (70x15 mm) folytonossági hiánya a kapott 3D modellben nem tükrözte valósághűen egy téglalap geometriáját. A jelenség okát egyelőre nem értjük, egy sokkal pontosabb, átfogóbb vizsgálat lenne szükséges a 04-es minta-darabon, hiszen annak a belsejébe „nem látunk bele”, mint az ALU_H esetében. Korábban a 04-es minta-darabot kézi eljárással vizsgálták meg, ami szubjektív hibákhoz is vezethetett, viszont ez a mi rendszerünk esetében nem fordulhatott elő.

6.3. 3. mérés (ALU_1 minta darab)

Furat vizsgálat céljából készítettem, egy később ALU_1-nek elnevezett minta-darabot. A minta-darab mint ahogy a nevében is benne van alumíniumból készült. Az 1-es jelölést a sorszámozásnak megfelelően adtam neki. A rendszer illetve fókuszált fej keresztirányú hengeres furatra való érzékenységét akartam az ALU_1-es minta darabbal megvizsgálni. A minta darabon két furat található, az egyik 2 mm a másik 4 mm átmérőjű (1 mm-es furatot szerettem volna készíttetni, de azt már nem technikai okokból nem tudták kivitelezni).



37. ábra: ALU_1 minta darab



38. ábra: ALU_1 minta darab műszaki rajzai

Fontosabb alkalmazott mérési beállítások:

erősítés: 52 dB

ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy közötti távolság: 25 mm

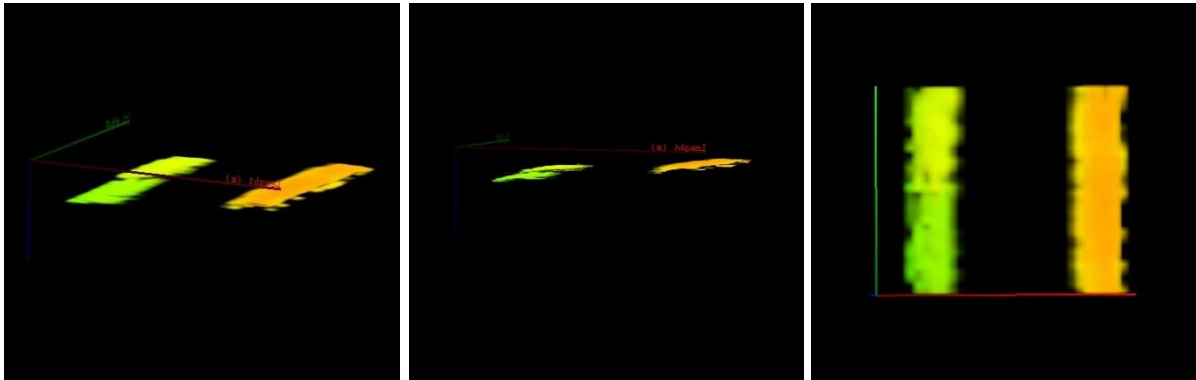
lépésköz: a mérés során X és Y irányban is 1 mm-es lépésközökkel történt a letapogatás

mérés ideje: 1,5 perc

A mérés során a minta darab a 37.ábrának megfelelően volt behelyezve az akváriumba (bal oldali furat 2 mm, jobb oldali furat 4mm).

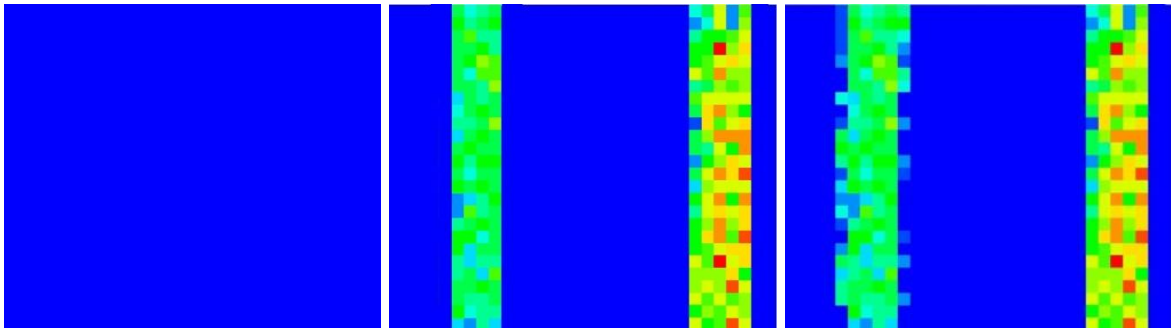
6.3.1. 2D és 3D modell eredményei:

3D eredmények:



39. ábra: ALU_1 minta darab 3D modelljei

2D eredmények:



40. ábra: ALU_1 minta darab 2D modellje, átlagolt metszetek 5, 10,mm mélységből ill. C-kép
A 3D és a 2D modellek esetében a bal oldali (3D-ban az alacsonyabban lévő) furat a 2mm-es furat, a másik (jobb oldali) a 4mm-es furat.

3D értékelés:

A 3D modell megjelenítésében (39.ábra), az anyag belsejében elhelyezkedő furatok jól látszanak. A második 3D modellen megfigyelhető a furatok mélységi elhelyezkedésének különbsége is, ami ilyen kisméretű furatoknál figyelemre méltó.

2D értékelés:

A 2D modell 5, 10 mm mélységből származó átlagolt metszeti képeket ill. C-képet ábrázol a minta darabról (40.ábra). A jobb szélső (C-kép) képen a furatok teljes mértékben lekövetik a 38.ábra alapján meghatározott furatok helyét, alakját. A C-kép és 10 mm-es képeken a furatok színei alapján a jobb oldali furat (4mm-es) nagyobb ultrahangos intenzitás értékekkel rendelkezett a mérés során, mivel több sárga pixelből áll, elvértve még egy-két piros is előfordul. Annak ellenére, hogy a mérés során kisebb ultrahangos intenzitással rendelkezett a 2 mm furat (sok zöld pixel) geometriája szabályos, alakja felismerhető. A bal szélső (5 mm-es) képen nem látható reflektálódásból eredő geometriai alakzat, mivel az anyag 5 mm-es mélységig még nem tartalmaz folytonossági hiányt.

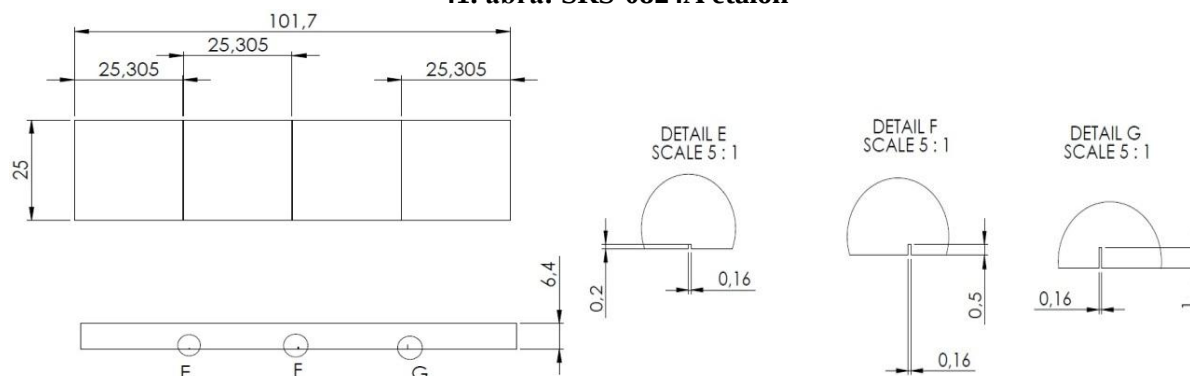
A kapott eredményeket értékelve bizonyos, hogy az ultra-hangos rendszer képes a 2 mm-es keresztirányú hengeres furat detektálására illetve megjelenítésére. A 3D illetve 2D modelleket elnézve úgy gondolom, hogy a 2 mm-es furatnál kisebb furatot is képes lenne érzékelni illetve megjeleníteni a rendszer, de sajnos az a vizsgálat - megfelelő minta-darab hiányában- még várat magára, így a jelenleg kapott vizsgálati eredményekből vonok le konzekvenciát.

6.4. 4. mérés (SRS-0824A etalon)

A laborban lévő SRS-0824A etalont (lásd 41.ábrát) a fókuszált fej érzékenysége miatt vizsgáltam meg. Az etalonon 3 db nagyon keskeny (0,16 mm) bemetszés található, amiknek mélységük különböző (1mm ; 0,5 mm ; 0,2 mm).



41. ábra: SRS-0824A etalon



42. ábra: SRS-0824A etalon műszaki rajzai

Fontosabb alkalmazott mérési beállítások:

erősítés: 48 dB

ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy közötti távolság: 30 mm

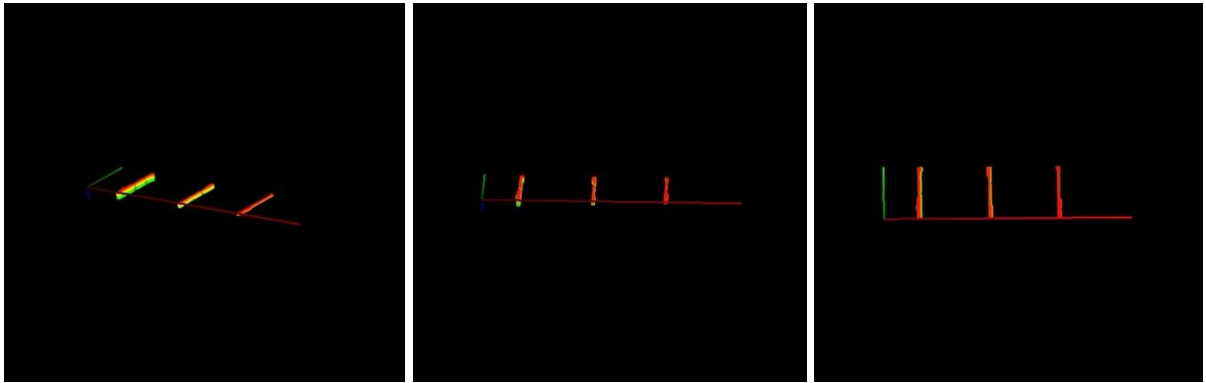
lépésköz: a mérés során X és Y irányban is 0,5 mm-es lépésközökkel történt a letapogatás

mérés ideje: 9 perc

A mérés során a bemetszéseket tartalmazó oldal felfelé nézve volt behelyezve az akváriumba, úgy hogy a 42.ábrán lévő G pont (1mm mély bemetszés) a bal szélén volt.

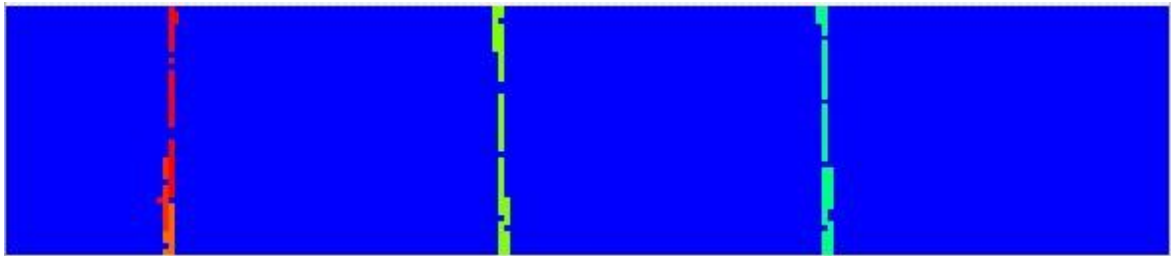
6.4.1. 2D és 3D modell eredményei:

3D eredmények:



43. ábra: SRS-0824A etalon 3D modelljei

2D eredmény:



44. ábra: SRS-0824A etalon 2D modellje, C-kép

A 3D illetve a 2D képeken a bal szélső az 1 mm mély bemetszés, majd rendre a 0,5-ös és 0,2-es bemetszés látható.

3D értékelés:

A 3D modell megjelenítésében, az anyag belsejében elhelyezkedő vékony bemetszések jól látszanak és elkülöníthetők. Amennyiben jobban megfigyeljük a bal szélső (1mm-es) bemetszés a legmélyebb, majd pedig rendre kisebb mélységűek a többi bemetszés a modellben. Ez különösen az első 3D modellen figyelhető meg.

2D értékelés:

A 44.ábra egy felülnézeti képet ábrázol a minta-darabról, amiben még a 0,2 mm mély bemetszés is megfigyelhető. Jól elkülöníthetők ebben az esetben a színek alapján kapott eredmények. A bal szélső 1mm mély bemetszés piros pixelekből áll, itt volt a legnagyobb mértékű az ultrahangos visszaverődés. Majd a középső bemetszés (0,5 mm mély) már kisebb intenzitással rendelkezett (→sárga pixelek). Végül a legkisebb reflexiója a zöld pixelekből álló 0,2 mm mély bemetszésnek volt, ami a többihez képest kisebb reflexióval rendelkezett mégis elkülöníthető az anyag többi, homogén részétől.

A kapott eredményeket értékelve látható, hogy az ultrahangos rendszer mélység irányú felbontása 1mm-nél is kisebbnek bizonyult, ami úgy gondolom, nagyon jónak számít.

A fókuszált fej érzékenysége meglehetősen nagynak adódott, de az objektivitás miatt, nagyon fontosnak tartom megjegyezni, hogy nagyon nehéz volt ilyen kisméretű folytonossági hiány észre vétele az ultrahang vizsgáló berendezés kijelzőjén. A homlokfal csúcsa és a bemetszés csúcsa szinte egybe olvadt és nehéz volt őket megkülönböztetni. Ebből arra következtek, hogyha nem tudom, hogy azokon az adott helyeken bemetszésekből eredő folytonossági hiány van, akkor szinte bizonyos, hogy nem vettem volna észre.

Így „az ultra-hangos rendszer mélység irányú felbontása 1mm-nél is kisebbnek bizonyult” kijelentés, bár a felületen lévő folytonossági hiányokra igaz, viszont a fentebb leírt okokból egyáltalán nem biztos, hogy ha ilyen kisméretű folytonossági hiányok vannak a vizsgált tárgy belsejében akkor is igaz lenne ez a kijelentés. Érdemes lenne olyan tárgyakat vizsgálni, amiben bizonyosan lehet tudni, hogy ilyen kisméretű folytonossági hiányok vannak, de az iskola technikai okokból ilyen nem tud előállítani, így az a vizsgálat még várat magára.

6.5. 5. mérés (Tokozott elektronika)

Az ultrahangos rendszer „képességeinek” tesztelésének végső próbája az az alkatrész volt, amelynek vizsgálata során a letapogató rendszer építésének igénye felmerült.

Ez egy fröccsöntött műanyag házzal rendelkező elektronikai alkatrész, amelynek gyártása során különböző hibák keletkezhetnek. Ilyen hiba lehet például egy légzárvány a műanyagban, vagy az elektronikai alkatrészek sérülése. A végső cél az volt, hogy ezeket a hibákat felismerhessük. Igen kisméretű, a tokozott elektronika, csatlakozó felületek nélkül 30x35mm méretű.

Fontosabb alkalmazott mérési beállítások:

A kijelzőn felvett mérési tartományt ebben az esetben az elektronika fekvő helyzetében a legmagasabb geometriai pontjából származó visszhang és a medence sorozatvisszhangja közötti tartományt állítottam be, így kizárólag a vizsgált alkatrészt tapogattam le.

jelerősség: 57 dB

ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy (legnagyobb sík felületét képező rész) közötti távolság: 30 mm

lépésköz: a mérés során X és Y irányban is 0,5 mm-es lépésközökkel történt a letapogató

mérés ideje: 15 perc

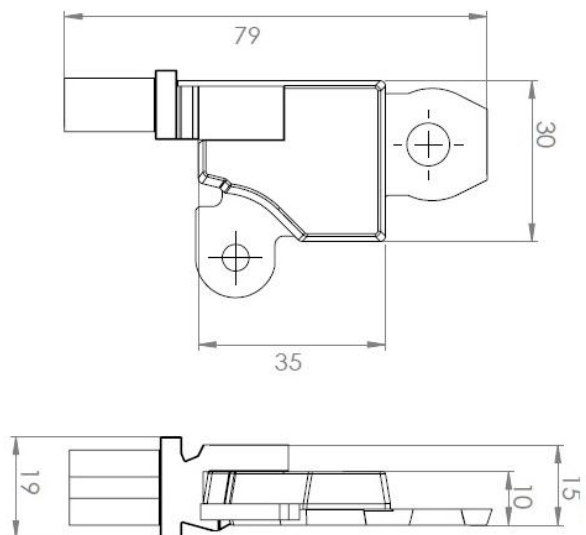
A mérés során az elektronika a 48.ábrának megfelelően volt behelyezve az akváriumba.



45. ábra: A tokozott elektronika felülnézetben



46. ábra: A tokozott elektronika felülnézetben

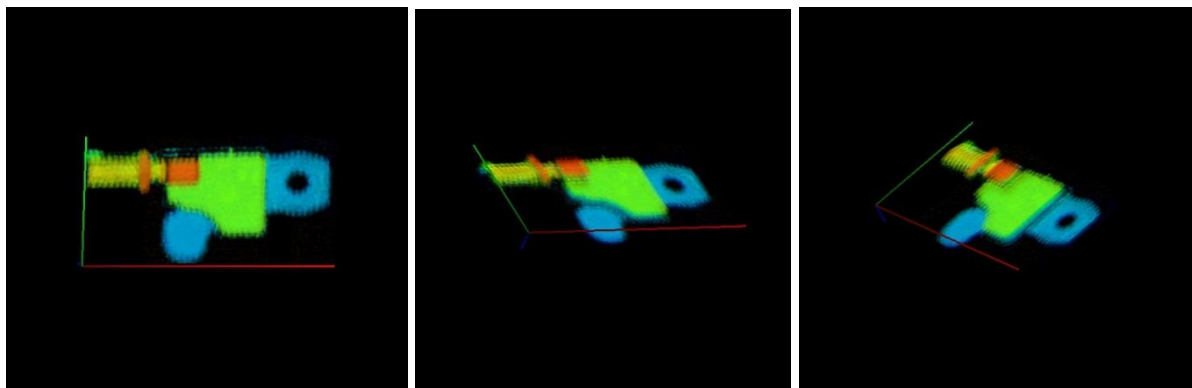


47. ábra: A tokozott elektronika műszaki rajzai

6.5.1. 2D és 3D modell eredményei

3D modellek:

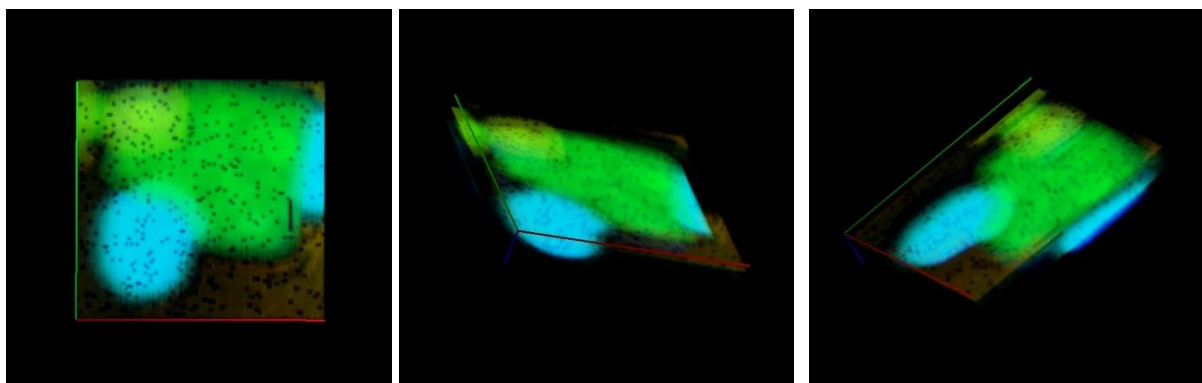
Megváltozott hardver-és szoftverkörnyezet (v3_8) mérési eredményei:



48. ábra: A tokozott elektronika 3D modelljei javított rendszerrel

Vessük ezt egy pillanatra össze az általam végzett fejlesztések előtti mérések ábráival.

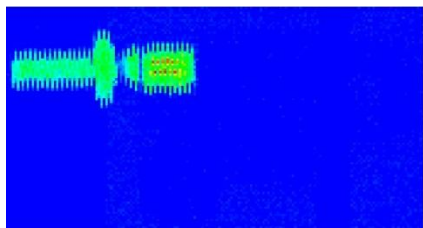
Eredeti hardver- és szoftverkörnyezet (v3_4) mérési eredményei:



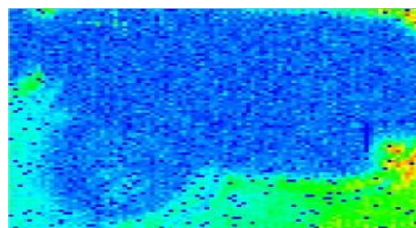
49. ábra: A tokozott elektronika 3D modelljei az eredeti rendszerrel

2D modellek:

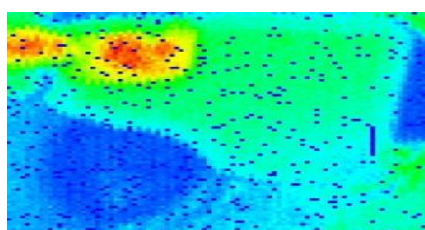
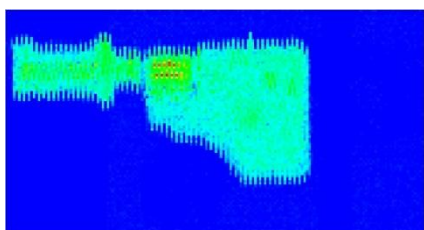
Megváltozott hardver-és szoftverkörnyezet:



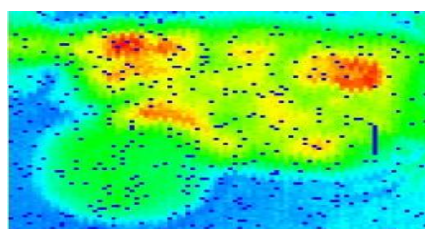
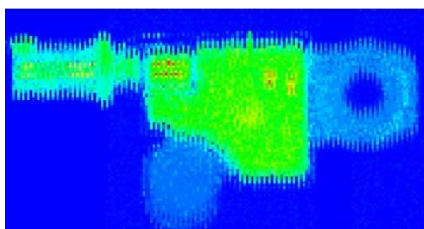
Eredeti hardver- és szoftverkörnyezet:



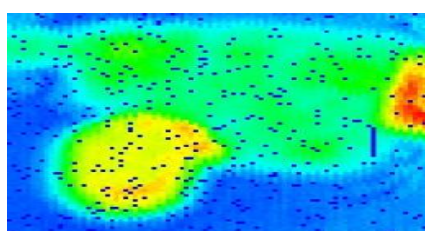
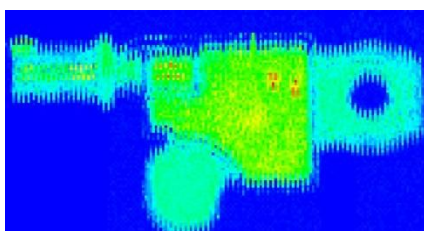
50. ábra: 5 mm mélységből származó átagolt metszetek a javított és az eredeti rendszerben



51. ábra: 10 mm mélységből származó átagolt metszetek a javított és az eredeti rendszerben



52. ábra: 15 mm mélységből származó átagolt metszetek a javított és az eredeti rendszerben



53. ábra: 19 mm mélységből származó átagolt metszetek a javított és az eredeti rendszerben

Kapott eredmények kiértékelése:

Ebben az esetben kapott vizsgálati eredmények mellett a jobb összehasonlíthatóság miatt az eredeti hardver- és szoftverkörnyezet (v3_4) mérési eredményei is láthatók.

Az itt ismertetett vizsgálati eredmények azonos megjelenítési beállítások mellett kerültek szemléltetésre, pontosan azért, hogy érzékeltessem a szoftver fejlesztés és hardver változások mekkora különbséget eredményeztek.

Az biztos, hogy a végső cél (kisméretű hibák felderítése) még messze van, de az is biztos, hogy a megváltozott hardver-és szoftverkönyezettel készült eredmények nagyságrendekkel több hasznosítható információt hordoznak, mint az eredeti hardver- és szoftverkönyezettel készültek.

3D értékelés:

A 3D modellek a 50.ábrán közel egy az egybe lekövetik az elektronika valódi geometriáját. A későbbiekben problémák adódhatnak még az 49.ábrán is jól látható, különböző geometriai eltérésekből és ferde élekből. Az ilyen felületekről az ultrahang visszaverődési sajátosságai miatt.

2D értékelés:

A 2D modellek esetében az összes ábrán látható intenzív, pirosas színnel jelölt reflexiók valószínűleg különböző elektronikai alkatrészekről (ellenállások, kondenzátorok) származnak. Az egymás mellett ábrázolt 2D metszeti képek azonos mélységből származnak, a jobb összehasonlíthatóság miatt. Ami rendre 5,10,15 és 19 mm (C-kép) mélységből származnak.

Jelenleg nem rendelkezünk pontos információval az alkatrész belsejéről, a továbbiakban viszont valószínűleg elkészítjük az alkatrész belső térképét roncsolásos eljárással, hogy összevethessük a valóságot az ultrahangos eredményekkel. Ezenkívül, folyamatban van több tokozott elektronika beszerzése is, olyanok, amikről ténylegesen lehet tudni, hogy hibás és természetesen olyan, amikről ténylegesen lehet tudni, hogy megfelelő. Így, majd ha lesz szignifikáns különbség a selejtes és megfelelő darabok között, az szintén nagy előre lépést fog jelenteni.

Az elkövetkező időben arra is fogok koncentrálni, hogyan lehetne akár 0,1 mm-es lépésközökkel hatékonyan (erőforrások jobb kihasználása) megvizsgálni az elektronikákat. Mivel a jelenlegi 0,5 mm-es letapogatás során rögzített képkockák száma meghaladja a 15.000 darabot (ami hozzá vetőlegesen 5 GB területet foglal el a merevlemezen).

Ez még nem tűnik soknak, de egy 0,2 mm-es letapogatás során rögzített képkockák száma már meghaladja a 90.000 darabot (ami hozzá vetőlegesen 30 GB területet foglal el a merevlemezen). Ami (30 GB) nem beszélve arról, hogy jelentős adatmennyiség, nagymértékben lassítja a számítógépet és jelentős mértékben növeli a merevlemez fragmentáltságát (töredezettségét).

Kidolgozás alatt van egy olyan eljárás, aminek lényege, hogy a vizsgálat közben nem történne ténylegesen képkockák mentése a merevlemezre, ezzel az imént említett problémákat el lehetne majd kerülni.

7. További fejlesztési lehetőségek

Fejlesztési lehetőségek közül említésre méltó:

- automatizált Z irányú mozgítás,
- pontosabb, precízebb mozgatórendszer kétirányú kommunikációval,
- fókuszált fázisvezérelt fejek alkalmazása

Automatizált Z irányú mozgítás:

Tervezés fázisában van egy automatizált Z irányú mozgató rendszer beépítése vagy esetleg egy más gyártó által kivitelezett mozgató rendszer (3 mozgatási tengellyel) összeszerelése. Az automatizált Z irányú mozgítás nagy előnye lenne, hogy sokkal jobban ki tudnánk használni a fókuszált vizsgáló fej nyújtotta lehetőségeket, előnyöket. Amivel a vizsgálati eredmények pontosságát, megbízhatóságát lehetne növelni.

Pontosabb, precízebb mozgatórendszer kétirányú kommunikációval:

A sok mérési vizsgálat alatt nagyon sokszor felmerült az a probléma, hogy a lépegető motor által keltett mechanikai rezgés befolyásolta vagy megghiúsította a mérés eredményét. Nagyobb méretű tárgyaknál, elég volt, ha csupán 0,1 mm-t elmozdult a vizsgálati tárgy a mérés közben, mert az a kijelzőn felvett mérési tartományon azonnal látszódott (ami az anyag homlok és hátfala közötti tartományt tartalmazta, konkrétan nem volt látható rajta a homlokfal és a hátfal visszhangja). A probléma legkönnyebben úgy lenne orvosolható, ha a mozgató rendszert és az akváriumot külön választanánk (például az akváriumot egy külön állványra), de tervezés alatt van egy másik mozgató rendszer alkalmazása, aminek tervezési fázisában vagyunk, és a kivitelezés során már erre a problémára is oda fogunk figyelni. A kétirányú kommunikáció alkalmazása során, a fej pozícióba állásakor a mozgató rendszer jelezne a képbegyűjtő rendszer felé, hogyan készíthet képet, majd annak végeztével a begyűjtő program visszajelezne a mozgató rendszer felé, hogy tovább mehet a fej. Mindenképpen hasznos lenne egy platformba integrálni a mozgatasért felelős rendszer irányítását és a fejlesztett alkalmazást (v3_8).

Az integrációból számos előny származna:

- két irányú kommunikáció
- könnyebb és jobb kontrolálhatóság
- erőforrások felszabadítása ami által újabb opciókat lehetne beépíteni a programba, amit elvégezhetne Real time-ban a vizsgálat ideje alatt

7.1. Elért eredmények értékelése

A MAID laborba érkezésem óta a fő feladatommak és célommak tartottam az addig fejlesztett rendszer továbbfejlesztését, hogy egy vizsgálat minél gyorsabb, pontosabb és megbízhatóbb legyen. Úgy gondolom, hogy az új hardver elemek (digitalizáló, vizsgáló fej) és a szoftver módosítások segítségével ezt részben meg is tudtam valósítani. **Az eredeti hardver és szoftver környezethez képest 63%-os gyorsulást és 100%-os adatfeldolgozást sikerült elérni** (minőség alatt értem, hogy nincs információ-vesztés, így az egész vizsgált térről kapunk információt). Az utófeldolgozás során alkalmazott **szoftveres „tisztítás” segítségével pedig a 2D-s, 3D-s modellek értelmezése könnyebbé vált a tisztább, kontrasztosabb képek miatt.**

Az itt bemutatott méréseket fontosnak tartottam elvégezni, azért hogy a rendszer korlátait, „képességeit” fel tudjam mérni illetve be tudjam mutatni. Ez részben sikerült és megállapítható, hogy ma már 2 mm-nél jobb a felbontásunk. A mérések bemutatásánál (lásd 2,3,4 mérések) ismertetett technikai okokból eredő - a rendszer esetleg ténylegesen szélsőséges értékeit meghaladó - vizsgálati tárgyak hiánya miatt ma még nem tudjuk a pontos „korlátokat”. A vizsgálati eredmények kiértékelése során mindvégig törekedtem az objektivitásra, hogy a rendszer tényleges, valós jellemzőit valósághűen szemléltessem. A dolgozatot, a kronologikus sorrendet szem előtt tartva állítottam össze, az események, fejlesztések könnyebb értelmezhetőségének reményében. Minden itt bemutatott vizsgálati eredményről részletesebb vizsgálati jegyző könyvet is készítettem, a pontosan alkalmazott beállításokkal, ami egy-egy mérés reprodukálhatóságát nagyban megkönnyíti. Az elkészített szoftver, illetve ultrahangos rendszer alkalmas arra, hogy egy vizsgált alkatrészt különösebb emberi beavatkozás nélkül, automatikusan letapogasson, majd a mérési eredményeket megfelelő formátumban eltároljon, így azok később is felhasználhatóak. Az elkészült 2D-s, 3D-s modellek megfelelnek arra a célra, hogy egy átfogó képet kapjunk az alkatrész folytonossági hiányairól, ami alapján elvégezhető egy nagyobb pontosságú, szabványos hibakereső vizsgálat. A kapott eredményeket látva (különösen a tokozott elektronikai mérés), úgy gondolom, kijelenthetem, hogy egy mérföldkőhöz érkeztünk ennek a fejlesztésnek a területén, ahonnan minden apró hasznos újítással tovább lépünk az eredeti célhoz, ami nem más, mint a tokozott elektronikák kisméretű hibáinak felismerése, ábrázolása 3D-ben.

Az már most is elmondható, hogy a rendszer, ha még egyelőre nem is képes az eredeti feladatának megfelelni (tokozott elektronika vizsgálata), más alkatrészek előzetes szűrésére már most is megfelelne.

8. Irodalomjegyzék

[1] VGA2USB [weboldal] [2013.10.11]

<<http://www.epiphan.com/products/frame-grabbers/vga2usb/specifications/>>

[2] VGA2USB LR [weboldal] [2013.10.06]

<<http://www.epiphan.com/products/frame-grabbers/vga2usb-lr/>>

[3] Ultrahangos anyagvizsgálat [weboldal] [2013.10.10]

<<http://www.controllabor.hu/ultrahangos-vizsgalat>>

[4] Bevezetés az Ultrahangos Fázisvezérlésbe [weboldal] [2013.10.09]

<<http://www.olympus-ims.com/hu/ultrasonics/intro-to-pa/>>

[5] Immersion Transducers [weboldal] [2013.10.08]

<<http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/immersion/>>

[6] KC Series Immersion Tanks [weboldal] [2013.10.12]

<<http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/integrated-systems/immersion-tanks.html>>

[7] Mistras UT Solutions Catalog [weboldal] [2013.10.12]

< <http://www.mistrasgroup.com/products/solutions/ut-ultrasonics/> >

[8] Immersion Ultrasonic Testing for Materials to 5,000lbs. [weboldal] [2013.10.15]

<http://www.labtesting.com/1254/immersion-ultrasonic-testing-for-materials-to-5000lbs/#.U17j_W0lFF9>

[9] Az ultrahang diagnosztikai és terápiás alkalmazása [Word dokumentum] [2013.10.11]

<<http://biofiz.sote.hu/run/dl.php?id=829>>

[10] Dr. Mészáros István, Roncsolásmentes hibakereső anyagvizsgálati eljárások [PDF dokumentum] [2013.10.09]

<http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAGM5/letoltes/Roncsolasmentes_jegyzet.pdf>

[11] Epoch™ 1000 Series User's Manual [PDF formátum] [2013.10.11]

<[ftp://ftp.olympusndt.com/public/Portable%20Flaw%20Detectors/Manuals/EPOCH%201000/910-269-EN_rev_A--EPOCH_1000_Series_\(EN\).pdf](ftp://ftp.olympusndt.com/public/Portable%20Flaw%20Detectors/Manuals/EPOCH%201000/910-269-EN_rev_A--EPOCH_1000_Series_(EN).pdf)>

[12] Dr. Békési László - Kavas László - Vonnák Iván Péter: RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSÁNAK TAPASZTALATAI

[PDF formátum] [2013.10.14]

<http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/Roncsolasmentes_anyag_vzsg.pdf>

9. Mellékletek

9.1. 1. számú melléklet

- Mistras Ultrasonic Systems termék családjából néhány Ultrahangos rendszer [7]:



9.2. 2. számú melléklet

- Az „eredeti hardver- és szoftverkörnyezet (v3_4) mérési eredményei” című fejezetben a 04-es jelzésű minta-darab vizsgálat során beállított Pulser és Receiver értékek:

Filter Group	Standard
Filter	5.0-15.0
Rect	Full
Reject	0 [%]

6. táblázat: Alkalmazott receiver beállítások

PRF Mode	auto high
PRF	3270 [Hz]
Energy	300 [V]
Damp	400 [Ω]
Mode	P/E
Pulser	Square
Freq	14.29 [MHz]

5. táblázat: Alkalmazott pulser beállítások

9.3. 3. számú melléklet

Az „1.mérés (04-es jelzésű minta darab)” című fejezetben a 04-es jelzésű minta darab vizsgálat során beállított Pulser és Receiver értékek:

Filter Group	Standard
Filter	2.0-21.5
Rect	Full
Reject	0 [%]

7. táblázat: Alkalmazott receiver beállítások

PRF Mode	auto high
PRF	3400 [Hz]
Energy	300 [V]
Damp	400 [Ω]
Mode	P/E
Pulser	Square
Freq	20 [MHz]

8. táblázat: Alkalmazott pulser beállítások

A freq értéke azért 20 [MHz]-re volt beállítva, mert a készülékben (Epoch 1000i) nagyobb értéket nem lehetett beállítani (nem kezel 20 MHz-nél nagyobb frekvenciájú vizsgáló fejeket)