



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
MÉRNÖKI KAR

***OBJEKTUMOK POZÍCIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK
MEGHATÁROZÁSÁRA ALKALMAS MAGNETOMÉTER ALAPÚ
RENDSZER MEGVALÓSÍTÁSA***

TDK DOLGOZAT

Bábi Bence

mechatronikai mérnök MSc

hallgató

Témavezető:

Dr. Sarcevic Péter

főiskolai docens

SZEGED

2024

TARTALOMJEGYZÉK

1	Bevezetés	3
2	Irodalmi áttekintés.....	4
2.1	Mágneses tér	4
2.2	Permeabilitás.....	5
2.3	Indukciós tekercsek	6
2.3.1	Induktív érzékelők légmaggal	8
2.3.2	Induktív érzékelők ferromágneses maggal	8
2.4	Hall mágneses érzékelő	9
2.5	Fluxgate	10
2.6	Magnetorezisztív érzékelő	11
2.6.1	Anizotróp magnetorezisztív érzékelő (AMR).....	12
2.6.2	Óriás magnetorezisztív érzékelő (GMR)	13
2.6.3	Alagút effektus alapú magnetorezisztív érzékelő (TMR).....	14
2.7	Mágneses érzékelők alkalmazásai.....	14
2.8	Magnetovision.....	17
2.9	Magnetométer kalibrálás	17
2.9.1	Lágyvas és keményvas hatások.....	18
2.9.2	Kalibrálási lépései	18
3	Megvalósítás	19
3.1	Rendszer architektúrája	19
3.1.1	Hardverkomponensek	20
3.1.2	Szoftverkomponensek.....	21
3.1.3	Tervezési eszközök.....	21
3.2	Szerkezet összeállítása	22
3.3	Motorvezérlés	23
3.3.1	Arduino UNO.....	23
3.3.2	GRBL firmware.....	23
3.3.3	CNC Shield V3.....	24
3.3.4	Motorvezérlők	24
3.3.5	Léptetőmotorok	25
3.3.6	Motorvezérlési folyamat	25
3.4	Szenzortömb felépítése.....	26

3.5	Magnetométerek kalibrálása	27
3.5.1	Ellipszoid illesztés	28
3.5.2	Gömb illesztés	29
3.5.3	A kalibrációs módszer kiválasztása	29
3.6	Felhasználói felület bemutatása	32
3.6.1	Mérési oldal.....	33
3.6.2	Mozgatási oldal	33
3.6.3	Mérés beállításának oldala	34
3.6.4	Kilépés oldal.....	36
3.7	Mérési folyamat	37
3.8	Vizualizáció	37
3.8.1	3D felületábra	38
3.8.2	3D vektorábra.....	38
3.8.3	2D érzékelés és gradiens vektorábra.....	39
3.9	Mérések	41
3.9.1	Pozíció meghatározása.....	42
3.9.2	Orientáció meghatározás főkomponens-analízissel	44
3.9.3	Orientáció meghatározása a gradiensvektor normalizált irányával.....	48
3.9.4	Eredmények	49
4	Összefoglalás	54

1 BEVEZETÉS

Számtalan mérnöki tudományban fontos az objektumok pozíciójának és orientációjának pontos ismerete. Sok esetben olyan környezetben kell ezt megvalósítani, ahol az objektumok közvetlen érzékelése nem megoldható, például veszélyes anyagok jelenlétében (Nowicki & Szewczyk, 2011) vagy régészeti ásatásokon (<https://www.youngwonks.com/>, é. n.). Korlátozott látási viszonyok mellett a hagyományos kamerás rendszerek nem képesek megbízható információt adni, így alternatív megoldások szükségesek, amelyek függetlenek a látási viszonyoktól (<https://www.1stvision.com>, 2024). Erre a problémára a mágneses térérzékelés egy jó megoldást ad, mivel a folyamat nem igényel látómezőt.

A mágneses térérzékelés egyik eszköze a magnetométer, amely manapság odáig miniatürizálták, hogy alacsony költséggel könnyen beépíthetők az integrált áramkörökbe. A legtöbb alkalmazásban a magnetométereket elektronikus iránytűként alkalmazzák, amely képes a mágneses mező erősségének és tájolásának a meghatározásában (<https://www.youngwonks.com>, é. n.). Viszont vannak olyan alkalmazások, ahol a magnetométereket a mágneses tér torzulás változásainak érzékelésére használják, mint ahogy a dolgozatban is megvalósul (<https://gmw.com>, é. n.).

A dolgozat célja, hogy egy olyan magnetométer alapú pásztázórendszer valósuljon meg, amely segítségével az objektumok pontos helyzete és orientációja meghatározhatóvá váljon a munkatérben. Ha objektumok térbeli állapotát szeretnénk meghatározni magnetométer alapú mérőrendszer segítségével, mint ahogy a dolgozatban ez megvalósul, fontos kiemelni, hogy a meghatározandó objektumok kizárólag ferromágneses anyagok lehetnek, melyek torzítják a szenzorok körüli mágneses teret.

Az általam megvalósított Raspberry Pi alapú rendszer képes a szenzortömb kalibrálására, a pásztázás során mért adatok feldolgozására és vizualizálására, illetve az objektumok pozíciójának és orientációjának meghatározására, mindezt úgy, hogy a felhasználó valós időben követheti ezt egy grafikus felhasználói felületen. Az általam fejlesztett rendszer könnyen alkalmazható olyan ipari alkalmazások különböző területein, ahol a mágneses tér precíz pásztázása szükséges.

A dolgozat során elsősorban bemutatásra kerül az irodalmi áttekintés, amely összefoglalja a mágneses anomáliák elméletét, majd a rendszer gyakorlati megvalósításának lépéseit és eredményeit.

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

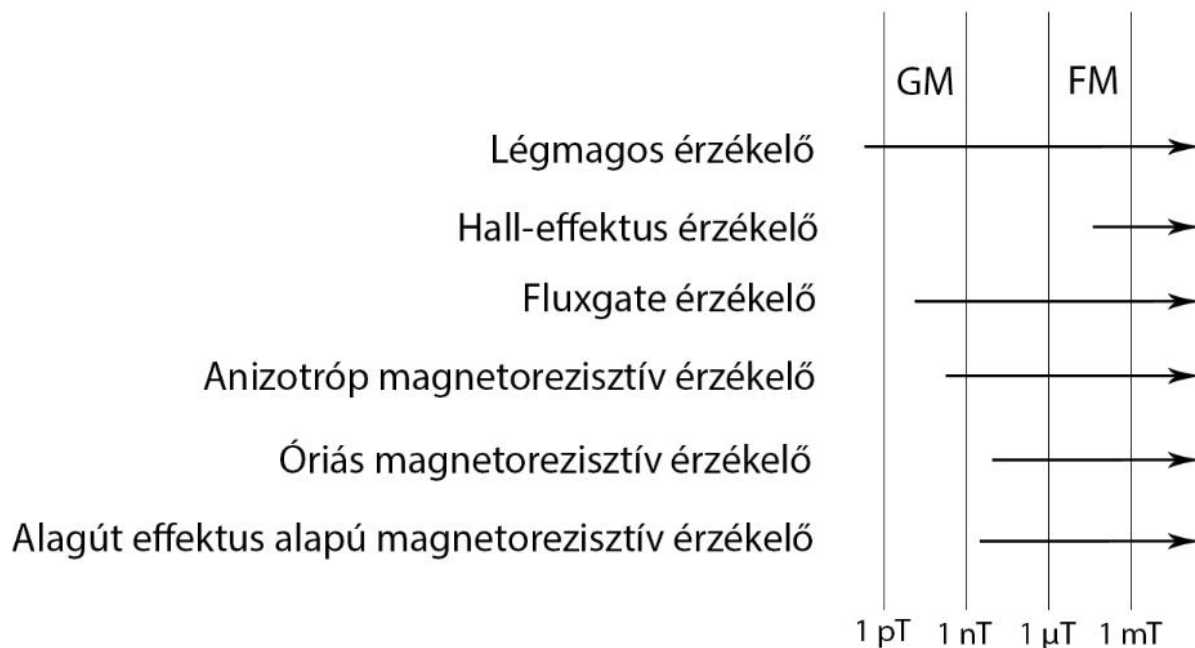
2.1 Mágneses tér

A mágneses tér a legalapvetőbb és mindenhol előforduló fizikai jelenségek egyike, amely könnyen érzékelhető információkat szolgáltat. A mágneses tér mérésére, az SI származtatott mértékegységében szereplő mágneses indukciót használjuk, melynek mértékegysége a tesla (T). A Föld felszíni mágneses mező értéke 20 és 80 μT között van, mely akár 100 nT vagy annál nagyobb tartományban ingadozhat. A mágneses anomáliák gyakran a pT tartományba esnek, vagy akár még kisebb értékeket is elérhetnek, ezért különösen fontos, hogy az érzékelők nagy érzékenységgel rendelkezzenek (Hovde et al., 2013). A Föld mágneses tere a napszél és egyéb tényezők hatására folyamatosan változik, ami napi ingadozásokhoz és mikropulzációkhoz vezet. Ezeket a hatásokat a mérések során általában ki kell szűrni, különösen akkor, ha a mérés több mint 5 percig tart, és az észlelendő anomália kisebb, mint 50 nT.

Számos esetben a Föld természetes mágneses tere elegendő ahhoz, hogy mágneses mezőt hozzon létre olyan tárgyakban, amelyek nem rendelkeznek maradék mágnesességgel (Vyhnánek, 2018). A Föld mágneses tere képes mágnesezni a ferromágneses anyagokat, mivel azok mágneses áteresztőképessége jelentősen meghaladja a levegőét. Ezek az anyagok torzítják a geomágneses fluxusvonalakat. Továbbá, a legtöbb ferromágneses anyagnak saját maradék mágnesessége van, amely mágneses dipólusként viselkedik. Ennek eredményeként egy adott ferromágneses objektum esetében kétféle mágnesező hatás figyelhető meg: a maradék mágnesességből származó és a külső mágneses tér által kiváltott hatás. Ezek kombinációja révén a ferromágneses tárgyak módosítják a környezetük mágneses terét (Nowicki & Szewczyk, 2013).

A mágneses térérzékelők fejlesztését olyan tényezők ösztönzik, mint az érzékenység és megbízhatóság javítása, a kisebb érzékelők kialakítása, valamint az elektronikus rendszerekkel való jobb kompatibilitás. A mágneses térerősség, legyen az egyen- vagy váltakozó áramú, mérésére számos módszer létezik, amelyek mindegyike eltérő jellemzőkkel rendelkezik annak érdekében, hogy különféle alkalmazásokhoz megfeleljenek (Li & Dixon, 2016). A Föld jelentős mágneses tere miatt az érzékeny szenzorok vagy nagy dinamikatartománnyal kell rendelkezzenek, vagy tekercseket kell alkalmazniuk a tér erősségének csökkentése érdekében az érzékelő környezetében. Nagyobb távolságokon, akár kilométeres skálán, a geomágneses zaj térbeli korrelációt mutat, ami olyan jelentős forrásokból ered, mint az ionoszféra árapályai és szelek által hajtott áramlatai. Amennyiben kisebb mágneses térbeli változásokat kívánunk

érzékelni, az egyik lehetséges módszer az, hogy két vagy több, egymástól távol elhelyezett érzékelő adatainak különbségét elemezzük. Az alacsony frekvenciájú tartományban a geomágneses zaj nagysága általában körülbelül 0,1 nT, és hasonló frekvenciaspektrumot mutat (Lenz & Edelstein, 2006).



1. ábra Hozzávetőleges érzékelési tartományok a dolgozatban ismertett érzékelőkről. Forrás: Saját szerkesztés

A mágneses mező különböző szenzortechnológiákkal mérhető. Az 1. ábrán látható különböző érzékelők érzékenységi tartománya a geomágneses zaj erősségének (GM) és a Föld mágneses mező erősségének (FM) tartományaihoz viszonyítva.

Az ábrán felsorolt mágneses érzékelők működése tárgyalva lesz a későbbiekben.

2.2 Permeabilitás

A permeabilitás egy anyag azon tulajdonsága, amely megmutatja, hogy milyen mértékben képes átvezetni a mágneses teret, ezáltal lehetővé teszi az anyagok mágneses viselkedésének leírását.

A mágneses indukció és a mágneses térerősség közötti összefüggés:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1)$$

ahol:

μ : az adott anyag abszolút permeabilitása

$\vec{B}$: a mágneses indukció

$\vec{H}$: a mágneses térerősség

Az anyag relatív permeabilitása a vákuum permeabilitásához viszonyított érték. A vákuum permeabilitása egy alapvető fizikai állandó, amely meghatározza a mágneses tér terjedését vákuumban.

Relatív permeabilitásának meghatározása megmutatja, hogy az anyag hányszor jobb vagy rosszabb a mágneses tér vezetésében, mint a vákuum:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2)$$

ahol:

μ_r : a relatív permeabilitás

μ : az anyag abszolút permeabilitása

μ_0 : a vákuum permeabilitása (fizikai állandó, melynek értéke: $4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

Az anyagok a relatív permeabilitásuk alapján a következő csoportokba sorolhatók:

- Ferromágneses anyagok: Nagyon magas relatív permeabilitással rendelkeznek, amely értéke jelentősen meghaladja az 1-et ($\mu_r \gg 1$). Ez azt jelenti, hogy kiválóan vezetik a mágneses teret, így erősen mágnesessé válhatnak.
- Paramágneses anyagok: Enyhe relatív permeabilitással rendelkeznek ($\mu_r > 1$), ami arra utal, hogy a mágneses tér hatására gyengén mágnesessé válnak.
- Diamágneses anyagok: A mágneses teret enyhén taszítják ezek az anyagok ($\mu_r < 1$).

A permeabilitás az elektromágneses hullámok terjedésében és az elektromágneses jelenségeknél fontos szerepet játszik, mivel a különböző anyagok különböző permeabilitással rendelkeznek. Különböző alkalmazások szempontjából meghatározhatóak lehetnek az anyagok közötti különbségek (Coey, 2009).

2.3 Indukciós tekercsek

Az adott alkalmazáshoz megfelelő érzékelő kiválasztását számos tényező befolyásolja, például az érzékenység, a felbontás, a működési sávszélesség, valamint a működtetési költségek és a környezeti feltételek (Chaofeng, Yang & Yu, 2018).

Az indukciós tekercsek a mágneses érzékelők egyik legrégebbi és legelterjedtebb típusát képviselik. Egyszerűen előállíthatók, különösen a fejlettebb technológiákat igénylő Hall-effektus-alapú, magnetorezisztív vagy fluxgate érzékelőkhöz viszonyítva (Tumanski, 2007). Ezek az érzékelők a Faraday-féle indukciós törvényt alkalmazzák, és előnyük az egyszerű gyártás, valamint a stabil működés, amely lehetővé teszi a paraméterek pontos mérését. A miniatürizálást nyomtatott tekercsek és CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, azaz komplementer fém-oxid félvezető) technológia segítségével érik el. További előnyeik közé

tartozik a végtelen felbontás, a széles hőmérsékleti tartományban való működés és a gyors válaszütem. Az egyik hátrányuk, hogy az átviteli karakterisztikájuk frekvenciától függ, és a kimeneti feszültségük a mágneses tér időbeli változásának mértékével arányos. A felbontás javítása érdekében a tekercs átmérőjének növelése, illetve ferromágneses mag hozzáadása jelenthet megoldást, bár a tekercsek menetszámának növelése nagyobb ellenállást, parazita kapacitást és zajt okozhat (Vyhnánek, 2018).

Az induktív érzékelők működési frekvenciatartománya általában 1 kHz és 100 kHz között helyezkedik el. Magasabb frekvenciák esetén csökken a behatolási mélység, és az érzékelő működésére egyre nagyobb hatást gyakorol a parazita kapacitás. Alacsonyabb frekvenciák esetén ezek az érzékelők csökkent érzékenységgel működnek, mivel az indukció törvénye szerint az indukált feszültség a frekvenciával arányos. Azonban bizonyos alkalmazások esetében kifejezetten előnyös lehet a nagyon alacsony működési frekvenciák használata. Az induktív érzékelő képes meghatározni egy ferromágneses objektum helyzetét akár egy burkolaton keresztül is, ehhez pedig elegendő az alacsony frekvencia és alacsony permeabilitás (Ripka et al., 2014).

Az induktor általában réztekercsből áll, amelyet mágneses maggal is kiegészíthetnek, de mag nélküli működés is lehetséges. Az induktív érzékelő jellemzőit alapvetően a tekercs és a mag anyaga, a tekercs menetszáma, alakja, valamint az alkalmazott gerjesztési frekvencia határozza meg. Ezeknél az érzékelőknél a mérendő mennyiség változását a mező és a vezető közötti viszonylagos mozgás eredményezi, ami általában mechanikai elmozdulás következménye.

Az induktív érzékelők működéséhez nincs szükség fizikai érintkezésre, ami különösen előnyös olyan alkalmazásokban, ahol a hozzáférés korlátozott, vagy a környezet zord körülményeket kínál, például szennyeződéssel, olajjal, porral vagy más anyagokkal szennyezett területeken. Az induktív érzékelők széles körű alkalmazásra találnak a geofizika területén, például a Föld mágneses mezejének mérésében, a földáramok által generált másodlagos mágneses terek vizsgálatában, plazmakísérletekben, az űrkutatásban, tengeralattjárók lokalizálásában, vezetékek nyomvonalának feltérképezésében, elektromágneses megfigyelésekben, végálláskapcsolóként, fémérzékelési célokra, roncsolásmentes anyagvizsgálatok során, valamint számos egyéb alkalmazási területen is (Winncy, 2015).

Az induktív érzékelők feloszthatók mag és mag nélküli, azaz légmagos csoportokra.

2.3.1 Induktív érzékelők légmaggal

A Chattock-Rogowski tekercset először a 19. században használták, és a 20. században újra elővették lágymágneses anyagok tulajdonságainak mérésére. Az ilyen érzékelők méréseit nem zavarják a mágneses elemek és a gerjesztő áramok, ellentétben a ferromágneses maggal rendelkező érzékelőkkel. A légmagos érzékelők a váltakozóáramú mágneses mezőkre különösen érzékenyek, azonban miniaturizálásuk jelentős kihívást jelent. A kívánt nagy érzékenység eléréséhez ezeknek az érzékelőknek általában nagyobb méretre van szükségük.

Ezek az érzékelők a főtengelyükre merőleges mágneses fluxusra érzékenyek. Három egymásra merőleges tekercs használatával lehetővé válik a mágneses térvektor összes iránykomponensének meghatározása (Tumanski, 2007).

A légmagos tekercsek merev huzalból készülnek, és a mágneses mag helyett kerámia vagy műanyag anyagokat alkalmaznak. Ezeket a tekercseket nagyfrekvenciás váltakozó árammal gerjesztik (Winncy, 2015). Mivel nem tartalmaznak nemlineáris mágneses anyagokat, stabilak az időbeli változásokkal szemben, és lineáris amplitúdó-karakterisztikával rendelkeznek. Alacsony frekvenciák esetén a feszültségkimenet, míg közepes frekvenciákon az áramkimenet frekvenciafüggése lineáris (Ripka, 2001).

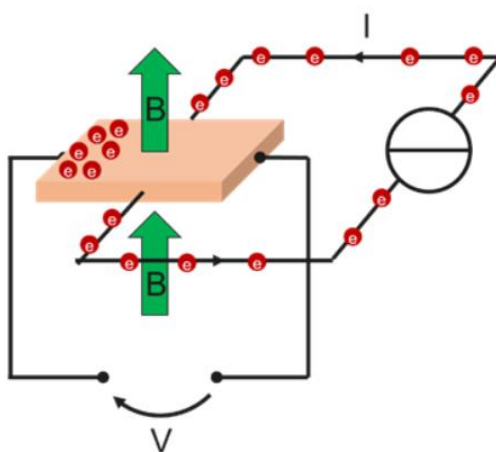
2.3.2 Induktív érzékelők ferromágneses maggal

Ebben a változatban mágneses magot használnak, amelyet nagy permeabilitású ferromágneses fémből készítenek. A mágneses mezőt a mag köré tekert huzaltekerccs állítja elő, amelyen áram halad keresztül. Ez a mágneses mag jelentősen növeli az érzékelő érzékenységét, akár több százszorosára vagy ezerszeresére is, összehasonlítva a légmagos érzékelőkkel. Az ilyen érzékelőket gyakran alkalmazzák olyan területeken, ahol nagy érzékenységre vagy kompakt méretre van szükség (Winncy, 2015).

Ez a megoldás megszünteti a légmagos érzékelők hátrányait, például az alacsony érzékenységet és a nehézkes miniaturizálást, ugyanakkor a linearitás feláldozásával jár. Még a legjobb minőségű ferromágneses magok is nemlineáris hatásokat vezetnek be az érzékelő átviteli karakterisztikájába, például a hőmérséklet, a frekvencia vagy a fluxussűrűség változásának hatására. Emellett a mágneses zaj, például a Barkhausen-zaj, csökkentheti az érzékelő felbontását, és a ferromágneses mag megzavarhatja a vizsgált mágneses teret vagy fluxussűrűséget (Tumanski, 2007).

2.4 Hall mágneses érzékelő

Az egyik legismertebb fizikai jelenségek közé tartozik a Hall-effektus, amelyet Edwin Hall már 1879-ben felfedezett és dokumentált. Az effektus során galvonomágneses hatás lép fel, amit úgy érünk el, hogy egy vezetőn vagy félvezetőn áramot vezetünk át, mágneses tér jelenlétében. A Lorentz-erő eltéríti az anyagban lévő töltéshordozókat és ezáltal a töltéshordozók mozgása szöget zár be a mágneses tér irányának megfelelően (lásd a 2. ábrán). Az anyagban lévő áramsűrűség vektorai és az elektromos tér között jelenik meg ez a szög.



2. ábra Hall-effektus. Forrás:
<https://community.infineon.com> (2024)

A Hall-effektus érzékelők teljesítménye és alkalmazási lehetőségei jelentős mértékben fejlődtek a félvezető technológia előrehaladásának köszönhetően. Egy új szintre emelte az érzékelők funkcionalitását a Hall-érzékelők integrálása a szabványos szilícium alapú bipoláris áramkörökbe. Az érzékelők vékony félvezető lemezekre vannak integrálva, amelyek négy elektromos érintkezőt tartalmaznak. Ezek az érintkezők az előfeszítő áram és a mért feszültség számára is elérhetők, a lemezhatáron vagy annak közelében lévő ekvipotenciális pontokon (Popovió, 1989). Mágneses tér jelenlétében Hall-feszültség alakul ki az érzékelő érintkezői között. A Hall-szenzor érzékenységét a lemez töltéshordozóinak felületi sűrűsége is befolyásolja, így minden olyan tényező hatással van rá, amely a hordozósűrűséget változtatja (Szalai & Horváth, 2014).

A mai Hall-érzékelők többsége költséghatékony eszköz, amelyek nagy része integrált áramkörök formájában érhető el. Ezek az integrált Hall mágneses érzékelők számos funkcióval rendelkeznek, mint például előfeszítés, eltoláscsökkentés, hőmérséklet-kompenzáció, jelerősítés és jelszint-különbségtétel. Az integrált áramköri technológiával készült Hall-érzékelők eltolása több mT nagyságrendű, amely függ a tápfeszültségtől, a hőmérséklettől és

az alkalmazott feszültségtől. Az eltolás csökkentése érdekében két vagy négy azonos, ortogonálisan elhelyezett Hall elem kombinálása lehetővé teszi, hogy az eltolás értéke akár 1 mT-ra csökkenjen.

A Hall-érzékelőt nemcsak a mágneses tér mérésére használják, hanem alkalmazzák lineáris helyzet, szöghelyzet, sebesség, forgás és áramerősség mérésére is. Emellett autók üzemanyagszintjének érzékelésében, egyenáramú transzformátorokban és lélegeztetőgépekben is megtalálható (Popovic, Randjelovic & Manic, 2001).

2.5 Fluxgate

A fluxgate érzékelők, amelyek az indukció törvényén alapulnak, a mágneses mezők pontos vektorérzékelői, képesek mérni mind a nagyságot, mind az irányt. A magjukhoz lágymágneses anyagot használnak, és ezek az érzékelők mágneses telítettségi állapotban működnek. Amikor a mag telítettségi állapotba kerül, akkor a permeabilitása csökken, ennek eredményeképpen a mágneses térhez kapcsolódó fluxus szintén csökken. Egy szinuszos vagy négyzetes hullámformával gerjesztett tekercs segítségével a mag felváltva, ellentétes irányban ér el mágneses telítettséget. Így egy váltakozó mágneses telítési ciklus alakul ki, amely során a változó mező áramot indukál a második, érzékelő tekercsben.

Amikor nincs jelen külső mágneses tér, akkor a bemeneti és kimeneti áramok megegyeznek. Ha azonban a mag külső mágneses tér hatásának van kitéve, akkor a mágneses tér irányába könnyebben, azzal ellentétes irányban viszont nehezebben telítődik (Winncy, 2015). Telítettségi állapotban az érzékelő ellenállása a külső mágneses térrel szemben növekszik, ezt a változást pedig az érzékelő tekercs érzékeli. Amikor a meghajtó tekercsben az áramot csökkentik, a mag kilép a telítettségi állapotból, és a külső mágneses mező ismét hatással lesz a magra, amit az érzékelő tekercs észlel (Lenz & Edelstein, 2006).

A fluxgate érzékelők kiváló linearitással mérik a mágneses teret a 10^{-10} - 10^{-4} T tartományban. Felbontásuk akár 1 nT nagyságrendet is elérhet, ekkor azonban a mérés pontosságát már a hőmérséklet-stabilitás és az érzékelő zajszintje korlátozza, amely 1 Hz-es frekvencián általában $10 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$ (Vyhnánek, 2018).

A fluxgate érzékelők előnyei közé tartozik, hogy mozgó alkatrészek nélkül működnek, megbízhatóak, alacsony energiafogyasztásúak, és széles hőmérséklettartományban képesek üzemelni. (Ripka, 2001).

2.6 Magnetorezisztív érzékelő

A magnetorezisztív (későbbiekben MR) érzékelő egy parametrikus eszköz, amely képes a mágneses mező jeleit érzékelni egy magnetorezisztív anyag, például permalloy ellenállásváltozásain keresztül (Hunt, 1971). Ezek az eszközök kicsik, nagy térbeli felbontással rendelkeznek, és nyomtatott áramköri lapokba szerelhető tokozásban készülnek (Bánlaki & Lovas, 2012).

A legegyszerűbb árnyékolatlan MR-érzékelő létrehozásához elegendő, ha egy téglalap alakú permalloy elemre vezetékeket helyezünk. Ebben az elrendezésben a jeláram teljes magasságában áramlik a szenzorban, ami alacsony lineáris sűrűségfelbontást eredményez. A felbontás növelése érdekében az MR-elemet általában két lágymágneses árnyékolás közé helyezik.

Az MR-érzékelők esetében a kimeneti feszültség az alkalmazott érzékelési áram függvénye, amelynek mértékét csak a termikus és elektromigrációs tényezők korlátozzák. Az MR-érzékelők használatakor két fő mágneses problémával kell számolni. Először, a kis méretű MR-érzékelők, amelyek nagy adatsűrűségű alkalmazásoknál ideálisak, gyakran zajos válaszokat produkálnak. Ez az úgynevezett Barkhausen-zaj, amely a mágneses tartományi átrendeződésekből származik, és csökkenteni kell. Másodszor, mivel az MR jellemzői alapvetően nemlineárisak, transzverzális előfeszítést alkalmaznak a lineáris jelválasz elérésére (Tsang, 1984). A zaj csökkentése átlagolással lehetséges, de ez csökkenti a működési sebességet és növeli a hőmérséklet-eltolódások hatását.

Az MR-érzékelők érzékenysége és zaj tekintetében a Hall-érzékelők és az indukciós érzékelők közötti tartományba esnek. Kis méretük és nagy térbeli felbontásuk lehetővé teszi a fémdetektálás és tárgyfelismerés alkalmazásait (Vyhnánek, Janosek & Ripka, 2013).

Az újabb generációs MR-érzékelők a Hall-érzékelőkhöz képest számos előnyt kínálnak. Bár mindkét eszköz kompatibilis a CMOS-gyártási technológiával, az MR-érzékelők jobban integrálhatók. Szobahőmérsékleten érzékenyebbek a Hall-érzékelőknél, így nincs szükség további erősítésre. A mágneses ellenállás a klasszikus félvezetőkben, különösen a mágneses félvezetőkben megtalálható, míg a Hall-effektus a Lorentz-erő következménye (Reig et al., 2009).

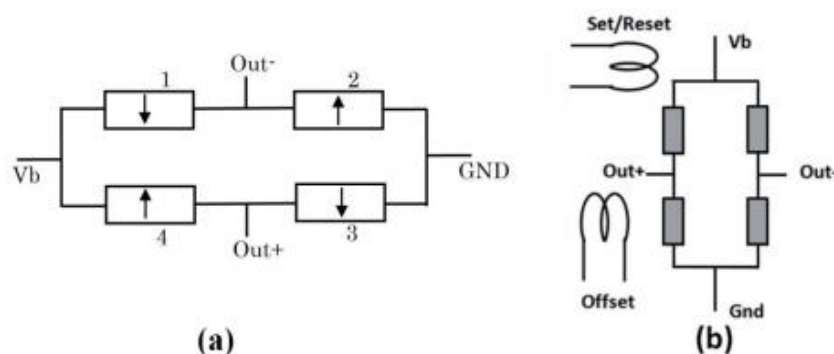
Három fő MR-technológia létezik: az óriás magnetorezisztív (Giant Magnetoresistance – GMR), az alagút effektuson alapuló magnetorezisztív (Tunneling Magnetoresistance – TMR), és az anizotróp magnetorezisztív (Anisotropic Magnetoresistive – AMR) érzékelők. A GMR és TMR érzékelők általában magasabb hiszterézissel és zajszinttel rendelkeznek, mint az AMR

érzékelők (Vyhnánek, Janosek & Ripka, 2013). Bár több különböző magnetorezisztív technológia létezik, itt kizárólag az említett típusok kerülnek bemutatásra.

2.6.1 Anizotróp magnetorezisztív érzékelő (AMR)

A 20. század elején jelentős erőfeszítések történtek az anizotróp hatás modellezésére és megértésére. Az 1960-as években az integrált áramkörök megjelenése és az űrverseny elősegítette a vékonyréteg-leválasztási technológiák fejlődését, lehetővé téve kiváló minőségű mágneses rétegek előállítását (Grosz, Haji-Sheikh & Mukhopadhyay, 2017).

Az anizotróp mágneses ellenállást, amely a ferromágneses anyagok egyik jellegzetes tulajdonsága, William Thomson már 1857-ben felfedezte. Az AMR hatást úgy magyarázzák, hogy az atompályákon történő szóródás változik egy külső mágneses tér hatására (Reig et al., 2009). Külső mágneses tér hiányában a mágnesezés az anizotrópia tengelye mentén rendeződik. A mágnesezés irányának módosításához a mágneses térnek merőlegesnek kell lennie az anizotrópia tengelyére. Ezt az irányt "érzékeny tengelynek" nevezik (Kuijk, Gestel & Gorter, 1975). Az AMR érzékelőkben használt anyagok, mint például a permalloy (egy körülbelül 80% nikkelt és 20% vasat tartalmazó ötvözet), anizotróp mágneses ellenállást mutatnak. Az ilyen anyagok elektromos ellenállása a mágnesezettség és az áram iránya közötti szögtől függ. Külső mező jelenlétében a mágnesezettség a mágneses tér irányába fordul, és az elfordulás mértéke a külső tér nagyságától függ. Amikor a mágnesezés iránya eltér az áram irányától, a permalloy ellenállása csökken, és a legkisebb értéket akkor éri el, ha a mágnesezettség merőleges az áram irányára (Lenz & Edelstein, 2006). A kereskedelmi forgalomban elérhető érzékelők általában négy MR-elemből épülnek fel, amelyeket teljes hídba kötnek, hogy minimalizálják a hőmérséklet-függőséget (Túros, Székely, 2022). Az MR érzékelők hőmérséklet és zaj eltolódása jóval nagyobb a fluxgate érzékelőkhöz képest. (Vyhnánek, 2018).



3. **ábra a)** Wheatstone-hídban rendezett érzékelő elemek. **b)** beállító/visszaállító pántok és eltoló pántok az érzékelőben. Forrás: He (2017)

Az MR érzékelők eltolási és beállító/visszaállító pántokkal rendelkeznek. Az érzékelőelem érzékeny tengelyéhez csatlakozik az eltolási pánt, amely a híd eltolási feszültsége és az egyenáramú mágneses mezők kompenzálásában segít. Az eltolási pánt további előnye, hogy lehetőséget nyújt az AMR érzékelő visszacsatoló áramkörének megvalósítására, ezáltal csökkentve a kimeneti jel torzulásait. A 3. a) ábra az AMR Wheatstone-híd felépítését mutatja be, amelyben az 1. és 3. mágneses ellenállás érzékeny irányai ellentétesek a 2. és 4. mágneses ellenállás érzékeny irányával. Néhány kereskedelmi forgalomban kapható AMR érzékelő esetében az eltolási és a beállító/visszaállító pántokat közvetlenül integrálják az érzékelő chippekkel, ami tovább növeli a rendszer hatékonyságát (lásd 3. b) ábra).

Az AMR-eszközök lineáris válaszkarakterisztikája kellően jó ahhoz, hogy gyakorlati alkalmazásokban is eredményesen alkalmazhatók legyenek (Reig et al., 2009). Az AMR érzékelők kisebb méretűek, mint az indukciós tekercsek, és válaszkarakterisztikájuk bizonyos határfrekvenciától független, így sokkal alacsonyabb frekvenciákon is működhetnek (Ripka et al., 2014).

2.6.2 Óriás magnetorezisztív érzékelő (GMR)

Az óriás magnetorezisztencia (GMR) hatását 1988-ban fedezték fel és azóta számos elméleti és gyakorlati kutatás középpontjában áll (Grosz, Haji-Sheikh & Mukhopadhyay, 2017). A merevlemezek olvasófejeiben a GMR érzékelők fokozatosan kiszorították az AMR érzékelőket, mivel precízebb térbeli felbontást és nagyobb érzékenységet nyújtanak, így jelentősen hozzájárultak a technológiai innovációhoz (Vyhnánek, 2018).

A GMR technológiával készült mágneses térérzékelők nemcsak kompaktak és energiatakarékosak, hanem rendkívül érzékenyek is. Emellett egyszerűbb támogató elektronikával működnek, és költséghatékonyan előállíthatók, ami széles körű alkalmazásukat teszi lehetővé. Hátrányaik közé tartozik a nemlinearitás, a hiszterézis és a hőmérséklet-függő kimeneti jel, amelyek a mérési pontosság csökkenéséhez vezethetnek. Bipoláris mágneses tér mérésénél a hiszterézis és a nemlinearitás különösen erőteljesen jelentkezik. Az érzékelők általában a mágneses térkomponens nagyságát mérik az érzékeny tengely irányában (Li & Dixon, 2016).

A többrétegű struktúrák több mágneses rétegből állnak, amelyek általában vas-, nikkel- és kobaltötvözeteket tartalmaznak. Ezeket a rétegeket rendkívül vékony, nem mágneses vezető rétegek választják el egymástól, például réz. Az elektronok szóródása a rétegek határfelületein jelentős változásokat idéz elő az elektromos ellenállásban (Reig et al., 2009).

Amikor a mágneses rétegek mágnesezettségei párhuzamosak, az ellenállásuk alacsony. Ha viszont a szomszédos rétegek mágnesezettsége ellentétes, az ellenállás növekszik a spinfüggő szóródás miatt. A szomszédos rétegek egymáshoz viszonyított orientációja jelentős mértékben függ a távtartó réteg vastagságától (Grosz, Haji-Sheikh & Mukhopadhyay, 2017).

A GMR érzékelők linearitásának javítása érdekében gyakran fél- vagy teljes híd konfigurációban alakítják ki őket. A külső mágneses tér mellett a megfelelő áramkörök szintén hozzájárulnak az érzékelő optimális előfeszítési pontjának beállításához. Ehhez külső állandó mágnes vagy beépített tekercs is alkalmazható, amely finoman módosítja az érzékelő nyugalmi működési pontját (Reig et al., 2009). Az előfeszítő áram lehet egyenáramú, váltakozóáramú, négyszöghullámú vagy rövid impulzusos jellegű is (Li & Dixon, 2016).

2.6.3 Alagút effektus alapú magnetorezisztív érzékelő (TMR)

Az alagút effektuson alapuló magnetorezisztív érzékelők előállítására 1995-ben kezdődött, és ezek több vékonyrétegű anyagból álló szerkezetekre épülnek. Felépítésük hasonlít a GMR érzékelők négyrétegű szerkezetéhez, ahol két ferromágneses réteget egy vékony, körülbelül 1 nm vastag szigetelő gátréteg választ el. A TMR érzékelők működésének alapja az elektronok alagútjelensége, amely során az elektronok egy vékony szigetelőrétegen keresztül haladnak át. Az ilyen felépítést „mágneses alagút csomópontnak” nevezik (Lenz & Edelstein, 2006). Amikor a szabad réteg mágneses orientációja azonos a rögzített rétegével, az elektronok könnyebben áthatolnak a gátrétegen. A csomópont rövidzárlatát el kell kerülni, akár a gyártás során, akár véletlen elektromos mező alkalmazásakor. Emellett a rétegek felületének simasága kulcsfontosságú a nem kívánt réteghatárolódások minimalizálása érdekében (Chaofeng, Yang & Yu, 2018).

A TMR érzékelőkben az áram merőlegesen halad át a rétegek felületén, míg a GMR érzékelőknél az áram a rétegekkel párhuzamosan áramlik. A rögzített réteg mágneses iránya állandó, míg a szabad réteg mágnesezettsége a külső mágneses tér irányához igazodik, amely az elektromos ellenállást a szabad réteg orientációjának változásával módosítja. Ha a rögzített és a szabad réteg mágnesezési iránya párhuzamos, az ellenállás minimális, ami nagyobb áramáramlást tesz lehetővé a gátrétegen keresztül. Amikor viszont ezek az irányok ellentétesek, az ellenállás nagyon megnő, így az áramáramlás gyakorlatilag megszűnik (<https://product.tdk.com/>, é. n.).

2.7 Mágneses érzékelők alkalmazásai

Mágneses érzékelők hiányában az autók, gépjárművek és számítógépek nem lennének képesek ilyen magas szintű hatékonysággal működni. Az alkalmazási területeket alapvetően három fő

kategóriába soroljuk, melyek elhatárolását a Föld mágneses mezőjének tulajdonságai és jellemzői alapján végezzük. A kategóriákat az 1. táblázat szemlélteti.

Az első kategóriába tartozó alkalmazások a Föld mágneses mezőjénél nagyobb mágneses terekhez kapcsolódnak, és főként alacsony érzékenységű, ipari célokra használatosak, ahol a Föld mágneses tere zavaró háttérként jelentkezik.

1. táblázat Mágneses tér alkalmazási területei érzékenység szerint kategorizálva.

Forrás: Lenz & Edelstein (2006)

	Első kategória Alacsony érzékenység (>100 μT)	Második kategória Közepes érzékenység (100 μT < χ < 0.001 μT)	Harmadik kategória Nagy érzékenység (<0.001 μT)
Meghatározás:	A Föld mágneses mezejénél erősebb mezők mérése	Az indukált vagy állandó dipólusok miatti perturbációk mérése a Föld mezőjének nagyságrendjében és/vagy irányában	Gradiensek, indukált különbségek mérése a Föld mezőjében vagy állandó dipólusmomentumok mérése
Fő alkalmazások:	• Érintésmentes kapcsolás • Árammérés • Mágneses memória kiolvasás	• Mágneses iránytű • Ásványkutatás • Forgalmirányítás	• Agyműködés feltérképezése • Mágneses anomália észlelése
Leggyakoribb érzékelők:	• Légmagos magnetométer • Hall effektus érzékelő • Magnetorezisztív érzékelő	• Légmagos magnetométer • Fluxgate magnetométer • Magnetorezisztív magnetométer	• SQUID gradiométer • Optikailag pumpált magnetométer

A második és harmadik kategória közötti határvonalat a Föld mágneses terének stabilitása határozza meg. A Föld mágneses tere folyamatosan változik, amit a napenergia, a geológiai folyamatok és az árapályhatások befolyásolnak. A második kategóriába tartozó alkalmazások esetében ezek a változások a Föld mágneses terében teljesítménykorlátozó zajként jelennek meg.

A harmadik kategóriába tartozó alkalmazásoknál a szabályozhatatlan mágneses háttérzaj hatásainak csökkentésére gradiométereket vagy véges differenciálási módszereket alkalmaznak. Mindkét technika esetében a Föld mágneses zaját a mérés alapvonalánál egyenrangúnak tekintik. Ebben a kategóriában az érzékelő teljesítményét leginkább maga az érzékelő korlátozza, miközben a véges differenciálás további nehézségeket jelent, például az

érzékelőkimenetek időbeli korrelációja és a Föld mágneses terének térbeli koherenciája miatt (Lenz & Edelstein, 2006).

A magnetométerek alkalmazása azonban messze túlmutat a dolgozatban tárgyalt fémtárgyak észlelésén. Ezek az érzékelők nélkülözhetetlenek a navigációs rendszerekben, a robotikában, az orvosi eszközökben és még a tudományos kutatásban is (<https://www.pnisensor.com>, é. n.). Az alábbiakban bemutatok néhány alkalmazási lehetőséget a mágneses érzékelők felhasználására.

A magnetovision technológia lehetővé teszi a mágneses tér eloszlásának vizualizálását egy adott térben. A mágneses tér indukciójának eloszlása alapján határozható meg, és megjeleníthető kétdimenziós kép vagy háromdimenziós térbeli ábrázolás formájában. A magnetovision technológia hasonló elven működik, mint a hőképfalkotás: az adott pont színe a mágneses fluxussűrűséget vagy a mágneses térerősséget jelzi (Nowicki & Szewczyk, 2013). Ezzel a módszerrel ferromágneses tárgyak és azok mágneses momentumának x , y és z koordinátái pontosan lokalizálhatók (Nowicki & Szewczyk, 2019).

Az 1 és 100 MHz közötti egyenáramú ív elektromágneses sugárzása hatékonyan használható ívérzékelésre, amely lehetővé teszi az ívhibák gyors kimutatását. A TMR érzékelők az áramerősséget a mágneses alagút csomópont ellenállásának változása alapján érzékelik. A csomópont mágneses ellenállása az áram által létrehozott mágneses tér függvényében módosul, ami lehetővé teszi az áramerősség pontos meghatározását ezen a jelenségen keresztül (Miao et al., 2018).

A közlekedésirányítás fontos része a járművekről, a forgalomról és a sebességről történő adatgyűjtés. Az MR érzékelők kis méretüknek köszönhetően könnyen telepíthetők az útfelület megsértése nélkül, és képesek a járművek észlelésére (Kang et al., 2004).

A mágneses szenzorok a roncsolásmentes vizsgálatok kedvelt eszközei közé tartoznak. A roncsolásmentes vizsgálatokat gyakran alkalmazzák repülőgépek szárnyainak ellenőrzésére is, amit gyakran korlátozott idő alatt kell ellenőrizni. A vizsgálati módszernél általában magnetorezisztív érzékelőket használnak szenzortömbök formájában, mivel nagy térbeli felbontást és érzékenységet mutatnak (Chaofeng, Yang & Yu, 2018). A magnetovision technológia alkalmas a roncsolásmentes vizsgálatokra, lehetővé téve az acél különféle tulajdonságainak és hibáinak pontos meghatározását. Ez hozzájárul a magasabb minőségű anyaggyártáshoz és a gyártási folyamatok optimalizálásához (Tumanski & Stabrowski, 1997).

2.8 Magnetovision

A magnetovision egy innovatív mérési technika, amely lehetővé teszi a mágneses tér indukciójának eloszlásának mérését egy adott síkban vagy térben, és annak két- vagy háromdimenziós képként történő megjelenítését. Az eljárás során a mágneses fluxussűrűség vagy a mágneses térerősség értékeit ábrázolják a képeken, amelyek felbontása a mérési pontok számától függ. Az ilyen típusú képalkotó rendszerek általában kétdimenziós, XY koordináta-rendszerben szkennelő eszközök, amelyek Hall-effektusú vagy magnetorezisztív érzékelőkkel működnek (Nowicki & Szewczyk, 2013).

A magnetovision rendszer központi eleme egy szkennер, amely folyamatosan pásztázza a mérési területet. A vékonyfilm magnetorezisztív érzékelők különösen alkalmasak a magnetovíziós mérésekhez, mivel kis méretük és nagy érzékenyséjük révén pontosan rögzítik a ferromágneses tárgyak jelenléte által okozott mágneses térváltozásokat. Az elemzés eredményeként meghatározhatók a ferromágneses tárgyak x, y és z koordinátái, mágneses momentumaik nagysága és térbeli iránya

A magnetovision technika széles körben alkalmazható a mágneses mezők vizsgálatában és a ferromágneses tárgyak detektálásában. A magnetovision technika egyik fő alkalmazási területe a ferromágneses tárgyak pontos lokalizálása, ahol a mágneses mező eloszlásának mérésével meghatározható a tárgyak pontos helye, ami alapvető a hatékony keresés és azonosítás szempontjából. Különösen hasznosnak bizonyult ez a módszer a víz alatti ferromágneses objektumok feltérképezésében (Nowicki & Szewczyk, 2019).

A magnetorezisztív érzékelők további előnye, hogy a zavarokat passzívan észlelik, így létrehozható egy mérőrendszer, amely lehetővé teszi veszélyes tárgyak észlelését és helyzetük meghatározását anélkül, hogy azok közvetlenül láthatóak lennének. A módszer segítségével mérhetők a Föld mágneses mezejében bekövetkező zavarok, amelyeket ferromágneses tárgyak, például rejtett robbanóeszközök, aknák vagy egyéb veszélyes tárgyak okoznak (Nowicki & Szewczyk, 2011).

2.9 Magnetométer kalibrálás

A mágneses érzékelők a környezeti mágneses tér erősségét és irányát mérik, és pontos adatokat szolgáltatnak a lokális mágneses észak irányára. A magnetométerek használatához azonban elengedhetetlen a kalibrálás, amely biztosítja a mérések pontosságát és korrigálja a potenciális hibákat. A kalibrálás azért fontos, mert különféle tényezők, mint például a hőmérséklet-változás vagy az elektromágneses interferencia idővel torzítják a mérési adatokat. A kalibrálás során az érzékelőt minden lehetséges irányba el kell forgatni. Egy ideális,

megfelelően kalibrált magnetométer esetén a mért mágneses térvektor értékei egy gömbfelületen helyezkednek el, ami pontosabb adatokat biztosít a későbbi felhasználáshoz (Yu et al. 2021). Az eltolás, beállítási hibák, valamint a kemény- és lágyvas hatások gyakran okoznak pontatlanságot a mérésekben, ezért ezen hibák korrekciója szükséges a megbízható eredmények érdekében (Mirzaei, Hosseini & Babaei, 2017).

A magnetométert minden alkalommal újra kell kalibrálni, amikor mágnesesen eltérő környezetbe kerül. Ilyenkor a helyi mágneses tér és a közelben található mágneses anyagok által keltett mágneses tér összegződése figyelhető meg. Ha a magnetométerhez rögzített mágneses anyag jelen van, a kalibrálás során mind a kemény-, mind a lágyvas hozzájárulásait figyelembe kell venni a pontos mérési eredmények eléréséhez (Kok & Schön, 2016).

2.9.1 Lágyvas és keményvas hatások

A lágy- és keményvas torzulások fontos tényezők, amelyek jelentősen befolyásolják a háromtengelyes magnetorezisztív szenzorok mérési pontosságát. A keményvas torzulás egy állandó mágneses mező formájában jelenik meg a szenzor által mért adatokban, amely egy állandó eltérést okoz. A lágyvas torzulás kezelése összetettebb, mivel arányos eltéréseket eredményez a Föld mágneses teréhez viszonyítva. A lágy- és keményvas hatások együttesen befolyásolják a szenzor által mért mágneses teret, és mindkettőt kompenzálni kell a pontos kalibráció érdekében (Guo et al., 2008).

A lágyvas anyagok könnyen mágnesezhetők és lemágnesezhetők, így torzítják a mágneses teret és megváltoztatják a mágneses erővonalak alakját. Ez mérési hibákhoz vezethet, mivel a lokális mágneses tér erősödése vagy gyengülése érzékelhetővé válik, és a mágneses tér mintha deformálna a szenzor elforgatásával. A hatások a magnetométer leolvasásában különféle irányú torzulásokként jelentkeznek, mintha a gömb alakú mágneses tér eltorzulna.

A keményvas anyagok viszont megtartják az állandó mágneses terüket mágnesezés után is, ami tartós torzítást okoz a magnetométer leolvasásaiban. Ez az állandó torzítás egy adott irányba tolja el a mért mágneses teret, függetlenül a szenzor aktuális tájolásától (Ripka, 2001).

2.9.2 Kalibrálási lépései

1. Adatgyűjtés több irányból: A magnetométer forgatása különböző irányokba a nyers adatok begyűjtéséhez.

2. Nullpont beállítása: Az alapzaj és az állandó mágneses terek eltávolítása. A kalibrálás során meg kell határozni az állandó eltolást, amit a keményvas okoz, és ki kell vonni a magnetométer leolvasásából, az előfeszítés korrigálása érdekében.

3. Érzékenység kalibrálása: Az érzékelő érzékenységének beállítása a valós mágneses tér arányos méréséhez.

4. Lineáris korrekció: Az érzékelő nemlineáris viselkedésének korrigálása a pontos mérés érdekében.

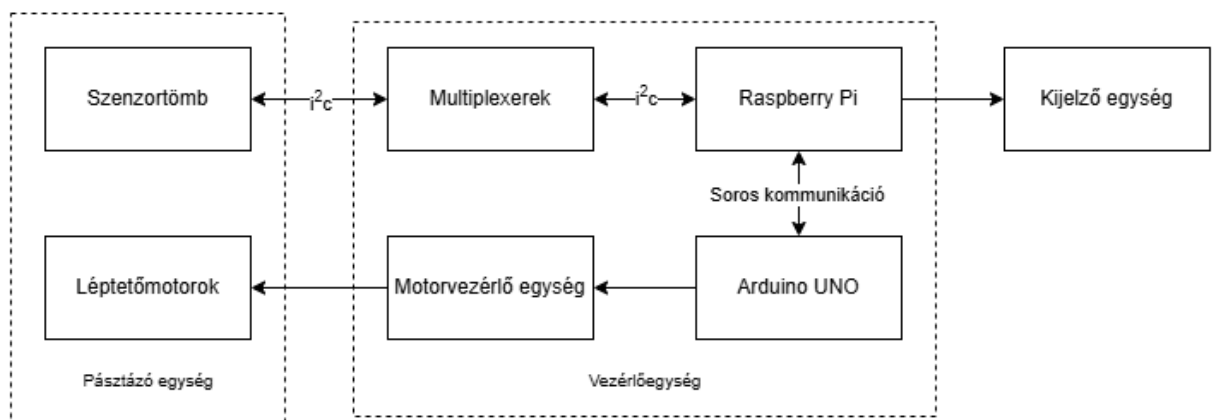
5. Háttér mágneses tér korrekciója: A környezeti mágneses terek eltávolítása, amelyek zavarhatják a méréseket. A kalibrálás magában foglalja a torzítások mérését különböző tájolásokban a lágyvas hatása miatt, és ezek kompenzálását az adatfeldolgozási szakaszban (Yu et al. 2021)

3 MEGVALÓSÍTÁS

A dolgozat célja egy magnetométer alapú pásztázórendszer megvalósítása, amely képes az objektumok pontos pozíciójának és orientációjának a meghatározására. A pásztázás céljából egy olyan szkennelő rendszert alakítottam ki, amely el tudja végezni a síkbeli mozgásokat a magnetométerek mintavételezéseivel. Ebben a fejezetben először bemutatom a rendszer architektúráját, ami egy átfogó képet nyújt a rendszerről. Ezt követően részletezem a rendszer megvalósításnak lépéseit és funkcióit, majd ismertetem a mérések eredményeit.

3.1 Rendszer architektúrája

A rendszerarchitektúra a rendszer elemeinek és kapcsolataik átfogó, strukturált leírása. Meghatározza, hogy a komponensek hogyan működnek együtt a rendszer céljainak elérése érdekében, ezzel egy átfogó képet alkot a rendszer megértéséhez. A rendszer megvalósítása során többféle hardver eszköz került kiválasztásra, amelyek összesége, és a köztük lévő kapcsolatok és adatáramlások láthatóak a 4. ábrán.



4. ábra Rendszerarchitektúra diagramja. Forrás: Saját szerkesztés

3.1.1 Hardverkomponensek

A hardverkomponensek a rendszer működéséhez szükséges fizikai elemek. Ide tartoznak a szenzorok, vezérlők, motorok és a rendszer mechanikai felépítése, amelyek együttesen biztosítják a mérések és mozgások precíz végrehajtását. Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a hardverkomponensek:

1. Raspberry Pi 5: A rendszer központi vezérlőegysége, amely a Python szoftver futtatásáért, a mérési adatok feldolgozásáért és a grafikus felhasználói felület biztosításáért felel. Ez az egység dolgozza fel minden méréssel kapcsolatos beállítást és vezérlést.

2. Érintőképernyős kijelző: Egy Waveshare Electronics típusú 7 inches érintőképernyős kijelző, ami felhasználói interfészként szolgál a Raspberry Pi-hez csatlakoztatva. Lehetővé teszi a rendszer közvetlen vezérlését és a mérési eredmények valós idejű megjelenítését.

3. Arduino UNO: A GRBL firmware használatával képes fogadni a Raspberry Pi által küldött G-kód parancsokat és vezérli a CNC Shield V3 bővítő modulon keresztül a léptetőmotorokat.

4. CNC Shield V3: Az Arduino UNO-hoz könnyen csatlakoztatható bővítő modul, amelyen keresztül megtörténik a léptetőmotorok vezérlése. A CNC shield segítségével az A4988 és a DRV8825 motorvezérlők könnyen csatlakoztathatók a rendszerbe.

5. A4988 és DRV8825 motorvezérlők: Ezek a vezérlők biztosítják a léptetőmotorok léptetési funkcióját, szabályozva a motorok áramát és irányát.

6. NEMA17 típusú léptetőmotorok: A szkanner mozgatásáért felelős motorok, amelyek biztosítják a mérési terület pásztázását egy síkban.

7. Tápegység: A léptetőmotorok és a motorvezérlők energiaellátását biztosítja, amely szükséges a rendszer működéséhez.

8. HMC5883L típusú magnetométerek: A mágneses tér háromdimenziós komponenseit méri az egyes pásztázási pontokon, és az adatokat a Raspberry Pi-hoz továbbítják feldolgozásra. Ez a fajta eszköz tartalmaz egy nagy felbontású HMC118X sorozatú AMR érzékelőt, amely érzékenységgel és linearitással bír a precíziós tengelyen belül. A Föld mágneses mezőjének irányát és nagyságát $0,1 \mu\text{T}$ -tól $800 \mu\text{T}$ -ig ($0,2 \mu\text{T}$ térfelbontással) tudja mérni. Ezen felül alacsony energiafogyasztást ($100 \mu\text{A}$) és alacsony feszültségű működést ($2,16\text{--}3,6 \text{ V}$) biztosít (HMC5883L adatlap, 2010).

9. TCA9548A multiplexerek: Segítségével a magnetométerek egyforma I²C címeit választja el különböző csatornákon.

10. Szenzortömb: Több magnetométert tartalmazó egység, amelyek egy meghatározott elrendezésben vannak rögzítve a szkennerek szerkezetén.

11. Mechanikai szerkezet: A rendszer stabilitását és felépítését biztosító elemek összessége. Ide tartozik az aluprofilból összeállított alapkeret, a trapézmenetes orsók, a vezetőtengelyek, a tengelykapcsolók, a csapágyak és a 3D technikával kinyomtatott elemek, amelyek összekötik a többi mechanikai elemet, olyan módon, hogy a mozgás megvalósuljon.

12. Végálláskapcsolók: Olyan mikrokapcsolók, amelyek a rendszer mozgása során a végpozíciók érzékelésére szolgálnak.

3.1.2 Szoftverkomponensek

A szoftverkomponensek felelősek a rendszer vezérléséért, az adatok feldolgozásáért és a felhasználói felület biztosításáért. Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a szoftverkomponensek:

1. Python nyelven fejlesztett szkriptek: A Python programok rugalmas és hatékony környezetet nyújtanak, amelyek a rendszer központi vezérléséért felelős Raspberry Pi-on futnak. Több szálon futó architektúrát használ a feladatok hatékony megvalósítása érdekében.

2. PyQt: A PyQt egy grafikus felhasználói felület fejlesztésére szolgáló keretrendszer. Az érintőképernyős kijelzőn a GUI (graphical user interface – grafikus felhasználói felület) lehetővé teszi a felhasználó számára a mérési paraméterek beállítását, a mérések elindítását és leállítását, valamint az eredmények valós idejű megtekintését.

3. GRBL firmware: Az Arduino UNO mikrokontrollerre telepített firmware koordinálja a léptetőmotorok mozgását a Raspberry Pi-től kapott utasítások alapján.

3.1.3 Tervezési eszközök

A tervezési eszközök olyan alkalmazások, amelyeket egy rendszer hardver- és szoftverelemeinek létrehozására használtam. Ezek az eszközök biztosítják a precíz mechanikai alkatrészek, elektronikus áramkörök és a grafikus felhasználói felületek pontos és egyszerű tervezését. Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a használt tervezési eszközök:

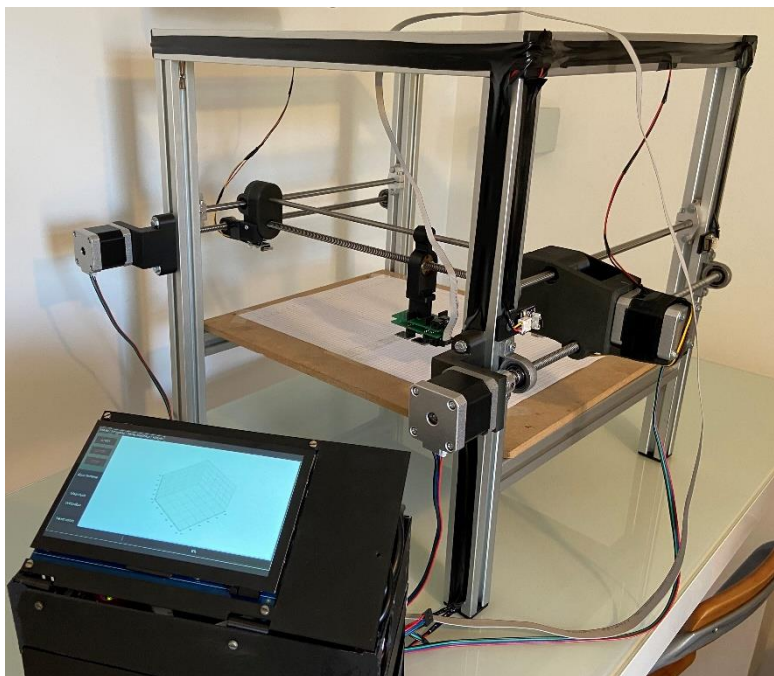
1. KiCad: Nyílt forráskódú elektronikai tervezőprogram, amelyben a szenzortömb nyomtatott áramköre lett megtervezve.

2. Autodesk Inventor: 3D tervezőszoftver, amelyben a pásztázó gépéhez szükséges mechanikai alkatrészek megtervezése történt.

3. PyQt Designer: A PyQt egyik fő eszköze, amely könnyű és felhasználóbarát GUI tervezést kínál a szoftverfejlesztőknek.

3.2 Szerkezet összeállítása

A projekt megvalósítása során egy pásztázógépet terveztem (lásd az 5. ábrán), amely alkalmas síkbeli mozgás végrehajtására. A saját igényeim szerint tervezett pásztázógép teljes egésze az Autodesk Inventor 3D tervező programban terveztem és modelleztem.



5. ábra Megvalósított pásztázó rendszer.

Az alapvázhoz NUT 8-as aluprofilokat választottam, mivel ezek könnyen szerelhetők és az alumínium anyag nem lesz hatással a magnetométerekre. Az aluprofilok egymáshoz rögzítéséhez belső sarokelemeket alkalmaztam, amelyek garantálják a váz megfelelő stabilitását. A vázhoz rögzülnek még a végálláskapcsolók. A végálláskapcsolók garantálják, hogy a gép egy bizonyos határon belül mozogjon, így elkerülve a mechanikai ütközést.

A pásztázógép két tengely mentén mozog, az X és Y irányokban. Az X tengely mentén egy léptetőmotor biztosítja az elmozdulást, míg az Y tengely mentén két léptetőmotort használtam, amelyek a szerkezet két oldalán helyezkednek el, garantálva az egyenletes és szinkronizált mozgást (lásd az 5. ábrán).

A lineáris mozgítás különböző hajtási rendszerekkel valósítható meg, amelyek közül néhány gyakori választás:

- Fogasszíj: Könnyű és gyors mozgást biztosít, de nagyobb terhelés esetén kevésbé pontos.
- Fogasléc: Robusztus megoldás, amely magasabb precizitást tesz lehetővé, ám bonyolultabb karbantartást igényel.

- Trapézmenetes orsó: Kiválóan alkalmas nagy pontosságot igénylő alkalmazásokhoz és nagyobb terhelések átvitelére, bár a mozgási sebesség alacsonyabb lehet más megoldásokhoz képest. (<https://sinadrives.com>, 2020)

A pásztázórendszer mozgatásához végül trapézmenetes orsót használtam. A 8 mm átmérőjű trapézmenetes orsók helikális tengelykapcsolón keresztül csatlakoznak az 5 mm átmérőjű léptetőmotor tengelyéhez. A helikális tengelykapcsoló előnye a merev tengelykapcsolókhoz képest, hogy képesek kompenzálni a kisebb tengelyeltolódásokat, és hatékonyabban kezelik a különböző mechanikai igénybevételeket.

A lineáris mozgáshoz a trapézmenetes orsón kívül, kéregedett lineáris tengelyeket alkalmaztam, melyek rúdtartókkal vannak rögzítve az alapvázhoz. A tengelyek mentén lineáris csapágyak gördülnek, lehetővé téve a sima, akadálymentes mozgást. A lineáris csapágyakat a trapézmenetes orsókön lévő trapézmenetes anyákkal össze kellett kapcsolni, amihez olyan 3D nyomtatott elemeket kellett terveztem, ami által egy egységes elemmé válnak.

3.3 Motorvezérlés

A léptetőmotorok vezérléséhez több hardver- és szoftverelem járul hozzá, amelyeket az alábbiakban ismertetek. Részletesen bemutatom ezek egymással való kapcsolatát, valamint a motorvezérlés folyamatát.

3.3.1 *Arduino UNO*

Az Arduino UNO egy olyan mikrovezérlő alapú fejlesztőplatform, amelyet széles körben használnak elektronikai projektekben. Az UNO alapja egy ATmega328P mikrokontroller, ez mellett 14 digitális bemeneti/kimeneti érintkezővel rendelkezik és 6 analóg bemenettel, amelyek lehetővé teszik a különböző szenzorok és aktuátorok vezérlését. (<https://docs.arduino.cc>, é. n.)

A projekt során az Arduino UNO-t a léptetőmotorok vezérlésére használom. A Raspberry Pi soros kommunikáción keresztül csatlakozik az Arduino UNO-ra, elérve a GRBL firmware-t, mely segítségével tudja biztosítani a rendszer koordinált működését.

3.3.2 *GRBL firmware*

Az Arduino UNO mikrokontroller felel a léptetőmotorok vezérléséért, mely a GRBL 1.1 firmware segítségével valósul meg. A GRBL egy nyílt forráskódú vezérlőszoftver, amely a léptetőmotorok irányítására lett kifejlesztve.

A GRBL firmware telepítéséhez az Arduino IDE (Integrated Development Environment - integrált fejlesztői környezet) szükséges. Az Arduino IDE lehetővé teszi a GRBL

forráskódjának szerkesztését, fordítását és a mikrokontrollerre való feltöltését. A konfigurálás során lehetőség van beállítani a léptetőmotorok lépésszámát, a mozgási sebességet és gyorsulást, az egyes tengelyek irányát és a rendszerhez szükséges egyéb paramétereket. Ezeket a beállításokat a saját könyvtárában található config.h fájl szerkesztésével lehet módosítani, ahol minden fontos rendszerparaméter megtalálható, illetve a vezérlőszoftverből is lehet módosítani úgynevezett \$-parancsokkal. Ezek a parancsok lehetővé teszik a paraméterek finomhangolását közvetlenül a soros porton keresztül (<https://howtomechatronics.com>, é. n.).

3.3.3 CNC Shield V3

A CNC Shield V3 egy bővítőkártya, amelyet az Arduino UNO mikrokontrollerhez terveztek, és különösen CNC gépek vezérlésére használják. A bővítőkártya az Arduino alappanelre illeszkedik és lehetővé teszi, hogy egyszerűen csatlakoztassuk a léptetőmotorokat, motorvezérlőkön keresztül. Így G-kód parancsokkal vezérelhető a mozgás.

A bővítőkártyán többfajta csatlakozási pont van. Akár négy léptetőmotort (X, Y, Z és A tengely) lehet csatlakoztatni a panelra, amelyek csatlakozása négyeres vezetékkel valósul meg. A dolgozat során egy síkot pásztázok, így az X, Y és A tengelyeket használom. A CNC Shield V3 lehetővé teszi a tengelyek klónozását is, így bizonyos csatlakozási pontoknak rövidre zárásával könnyen megvalósítható, hogy az A tengelyre csatlakoztatott léptetőmotor szinkronba mozogjon egy másik léptetőmotorral.

A motorvezérlőket a bővítőkártyán kialakított csatlakozókba lehet helyezni, ezek mellett helyet kaptak olyan csatlakozási pontok, melyeknek rövidre zárásával be lehet állítani a motorvezérlők számára a lépésszámot.

Külön csatlakozási pontok vannak a végálláskapcsolók számára, amelyek segítenek a gép mozgási tartományának meghatározásában.

3.3.4 Motorvezérlők

Kétfajta motorvezérlőt használtam a dolgozat alatt, az A4988 és a DRV8825 vezérlőket. Ezeknek a feladata a léptetőmotorok áramának szabályozása és az irány, illetve a sebesség vezérlése.

A motorvezérlők áramkorlátozási beállítása egy fontos lépés, hogy a motorok biztonságosan és hatékonyan működjenek. A V_{ref} feszültség beállítása alapján meghatározható a motorok által felvett maximális áram, amely nem haladhatja meg a motorok névleges áramfelvételét, hogy elkerüljük a túlmelegedést és a meghibásodást.

V_{ref} feszültség meghatározása A4988 motorvezérlő esetén:

$$V_{ref} = I_{max} \cdot 8 \cdot R_s \quad (3)$$

ahol:

V_{ref} – feszültség referencia, amely megfelel a léptetőmotorokhoz áramló maximális áramnak

I_{max} – a maximális kívánt áramerősség, a léptetőmotor fázisáramához igazítva

R_s – áramérzékelő ellenállása

V_{ref} feszültség meghatározása DRV8825 motorvezérlő esetén:

$$V_{ref} = \frac{I_{max}}{2} \quad (4)$$

ahol:

V_{ref} – feszültség referencia, amely megfelel a léptetőmotorokhoz áramló maximális áramnak

I_{max} – a maximális kívánt áramerősség, a léptetőmotor fázisáramához igazítva

(<https://zerotohero.engineering>, 2020)

3.3.5 Léptetőmotorok

A három NEMA17 típusú, 12 voltos léptetőmotor biztosítja a szkennerek X és Y irányú mozgását, melyeknek fázisáramai 1.68 A. A motorok 1,8 fokos lépésszöge elegendő felbontást nyújt a pontos pozicionáláshoz, míg a mikrolépés beállításokkal tovább finomítható a mozgás. A motorok 0.5 Nm tartónyomatéka biztosítja, hogy a szkennerek stabilan és pontosan mozogjon a mérési területen.

A rendszer megfelelő működéséhez és a léptetőmotorok pontos vezérléséért elengedhetetlen a hatékony áramellátása. A 12 voltos tápegység egy ledes billenő kapcsolón keresztül csatlakozik a CNC Shield V3-hoz, amely biztosítja az elegendő teljesítményt a léptetőmotorok felé. A vezérlődobozhoz rögzített kapcsoló a motorok tápellátás mellett, egyidejűleg egy ventilátort is indít, mely az vezérlődoboz hőelvezetéséért szolgál.

3.3.6 Motorvezérlési folyamat

A Raspberry Pi-n futó Python program soros porton keresztül küld G-kód parancsokat az Arduino UNO-n futó GRBL firmware-nek. A G-kód parancsok tartalmazzák a léptetőmotorok mozgási parancsait, az elmozdulás irányát, a távolságát és a sebességét. A GRBL firmware-e dekódolja a kapott parancsokat, és a CNC Shield V3-on keresztül vezérli a motorvezérlőket. A vezérlőszoftver figyeli a rendszer állapotát, beleértve az esetleges hibákat vagy rendellenességeket. Az ilyen események bekövetkezésekor a program leállítja a motorokat, és jelzi a hibát.

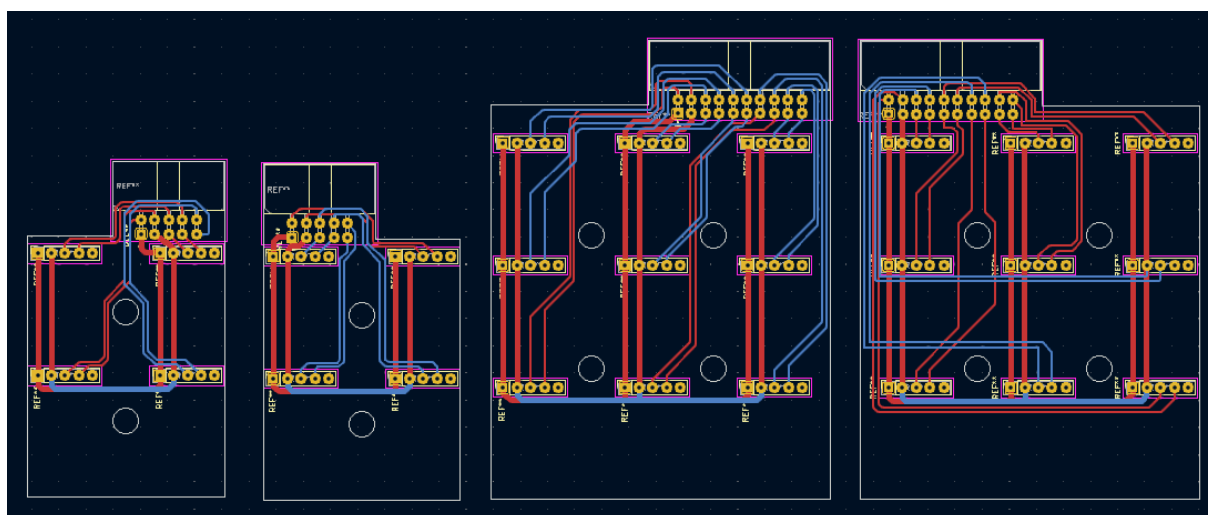
3.4 Szenzortömb felépítése

A dolgozat során a magnetométerek segítségével pásztázom le a mágneses teret. A szenzortömb egy több szenzorból álló egység, melyen a magnetométerek egy előre meghatározott elrendezésben helyezkednek el. A szenzortömb használatával a magnetométerek pontosabb eredményekkel szolgálnak, illetve a nagyobb pásztázási lefedettség miatt a mérés ideje gyorsabb lesz.

A tervezés során az volt a célom, hogy olyan szenzortömböket alakítsak ki, melyeken a magnetométerek könnyen cserélhetőek, illetve a csatlakozás egyszerű és gyors szalagkábeles megoldást biztosítson a Raspberry Pi és a magnetométerek között.

A KiCad elektronikai tervezőszoftverben tervezett NYÁK (nyomtatott áramkör) lapok adták meg a szenzortömbök alapjait. A tervezés folyamán figyelembe kellett venni a magnetométerek elhelyezését, a szenzorok tápellátását és a soros adatvonalak elrendezését. Az áramköri lapok mindkét oldalán oszlanak meg nyomvonalak. A magnetométerek elhelyezkedése a tömbön egy négyzetháló szerint történt, figyelve a szenzorok közötti interferenciára, ugyanakkor biztosítják a térbeli eloszlás pontosságát. Az egyenletes elrendezés által a mért adatpontok egyenletesen lesznek mintavételezve, így megvalósulhat a mágneses tér térbeli interpolációja is.

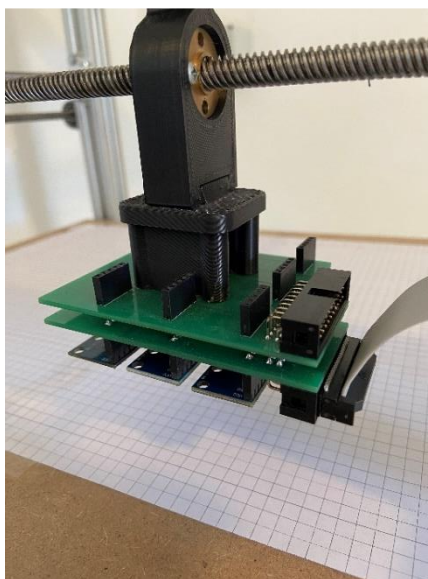
A 6. ábrán négy különbözően megtervezett NYÁK lap látható, melyek segítségével kétfajta szenzortömb egységet valósítottam meg. A mérés során a szenzortömb egységek többfajta térbeli magnetométer rácsként használhatók, melyek 1x1, 2x2, 2x2x2, 3x3 és 3x3x2 elrendezésük szerint oszthatóak fel.



6. ábra KiCad-ben megtervezett szenzortömbök NYÁK lapjai.
Szenzorok közötti távolság 22 mm.

Tervezés után a NYÁK lapok a JLCPCB cég által került legyártásra. A szenzortömb előre meghatározott pontjaira tükessor aljzatok kerültek, amikbe a magnetométerek könnyen behelyezhetők és cserélhetőek. A panelen lévő IDC (insulation-displacement contact) csatlakozókon keresztül szalagkábel segítségével kapcsolat létesíthető a magnetométerek és a multiplexerek között.

A mechanikai rögzítést egy 3D nyomtatott elem biztosítja, ami a trapézmenetes anyához és a lineáris csapágyhoz illeszkedik (lásd a 7. ábrán). A magnetométerek kalibrációjához szükség van a szenzortömb önmaga körüli elforgatásához, ezáltal a rögzítést úgy kellett kialakítani, hogy könnyen lehessen a rendszerhez csatlakoztatni és leválasztani. A szenzortömb rendszerhez való csatlakoztatásakor a magnetométerek párhuzamosan állnak a mérési síkkal.



7. ábra A 3x3x2-es szenzortömb, mely a rendszerhez van illesztve.

A magnetométereket a saját címükön lehet elérni I²C kommunikáción keresztül. A HMC5883L típusú magnetométerek címei nem változtathatóak meg, így a több magnetométer használata miatt multiplexert kellett alkalmazni. Három darab nyolc csatornás TCA9548A multiplexer segítségével a szenzortömbön lévő magnetométerek soros órajelét és soros adatvonalát külön nyomvonalakon értem el. A multiplexerek a vezérlődobozokban helyezkednek el, ahol jumper kábeleken keresztül valósul meg a kapcsolat az IDC csatlakozó és a Raspberry Pi felé.

3.5 Magnetométerek kalibrálása

Elegendhetlen lépés a magnetométerek kalibrálása a pontos mérési eredmény eléréséhez. A szenzorok által mért nyers adatok mágneses torzulásnak vannak kitéve, például a lágy- és keményvas hatások miatt. A keményvas hatások állandó eltolódásokat okoznak a

mérési adatokban, míg a lágyvas hatások a szenzorok érzékenységének irányfüggő torzulását eredményezik. A kalibráció célja ezen hibák kompenzálása, hogy a mért adatok a valós mágneses térhez közelebb álljanak.

A magnetométerek kalibrálása során a cél az, hogy kompenzáljuk a kemény- és lágyvas hatásokat, valamint elvégezzük a szükséges skálázási és eltolási korrekciókat. A kalibráció a magnetométer különböző irányú elforgatásával kezdődik, ami során begyűjtésre kerül a magnetométer nyers értékei. Ez biztosítja, hogy a mágneses tér minden irányban mérhető legyen. Ezt követően meghatározásra kerül az eltolás korrekció, amely kompenzálja a keményvas hatásokat, amely állandó eltolásokat okoz a mérésekben. Végül a skálázási tényezők és esetleges forgatások korrekciója kerül meghatározásra. Ez biztosítja, hogy a szenzor által mért adatok gömb alakban helyezkedjenek el és kompenzálják a lágyvas hatásokat.

A kalibráció során az ellipszoid és a gömb illesztés megközelítését próbáltam ki, amelyek lényegét az alábbiakban bemutatom.

3.5.1 Ellipszoid illesztés

Az ellipszoid illesztésről általánosságban elmondható, hogy egy gyakran alkalmazott módszer a mágneses szenzorok, különösen a magnetométerek kalibrálására. Ez a módszer szükséges a szenzorok mérési pontosságának javítására, mivel a méréseket különböző hibák, például véletlen zaj, állandó eltolódás, nem-ortogonalitás, skálafaktor eltérések, valamint kemény- és lágyvas hatások befolyásolják. Az ellipszoid illesztés célja, hogy a szenzor által mért adatokat egy olyan ellipszoidhoz illessze, amely legjobban reprezentálja a valós mágneses tér adatainak geometriáját.

$$B^T A B + 2b^T B + c = 0 \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ahol:

B: a mért mágneses komponensek vektora,

A: egy szimmetrikus 3×3-as mátrix, amely a skálázási és forgatási torzulásokat modellezi,

b: az eltolási vektor, amely a keményvas hatást kompenzálja,

c: egy konstans, amely a matematikai illesztéshez szükséges

Az ellipszoid illesztés tipikusan a legkisebb négyzetek módszerén alapul. A legkisebb négyzetek módszer azzal a céllal működik, hogy minimalizálja a mérési adatok és az illesztett ellipszoid közötti távolságot. Azonban ez a módszer nem mindig megfelelő, különösen akkor,

ha a mérési adatok zajosak vagy olyan pontokat tartalmaznak, amelyek kívül esnek az érvényes tartományon. Ezek az esetek torzíthatják az illesztett ellipszoid alakját, és a valós eredményektől eltérő illesztést eredményezhetnek (Mirzaei, Hosseini & Babaei, 2017).

3.5.2 Gömb illesztés

A gömbillesztés az eredeti, torzított adatokat egy középpontba helyezett gömb elrendezéséhez igazít, mellyel kompenzálja a keményvas hatásokat. A gömbillesztés hatékony és matematikailag viszonylag egyszerű eljárás, ami időhatékony kalibrációt eredményez. Alkalmazása kevésbé érzékeny az algoritmus kezdeti paramétereire, ami stabilabb konvergenciát eredményez, mint más, bonyolultabb modellek esetén (Wu et al., 2020).

A kezdőpont (x_0, y_0, z_0) , a felületen lévő pont (x, y, z) és az r sugarú gömb egyenlete a következő:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (7)$$

Ha ezt az egyenletet kibővítjük, a következőt kapjuk:

$$x^2 - 2xx_0 + x_0^2 + y^2 - 2yy_0 + y_0^2 + z^2 - 2zz_0 + z_0^2 = r^2 \quad (8)$$

Ami egyenértékű a következővel:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 2xx_0 + 2yy_0 + 2zz_0 - x_0^2 - y_0^2 - z_0^2 + r^2 \quad (9)$$

Ez felírható a legkisebb négyzetek alakjában:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & 2z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ -x_0^2 - y_0^2 - z_0^2 + r^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(<https://mphy0026.readthedocs.io>, é. n.).

3.5.3 A kalibrációs módszer kiválasztása

A dolgozat során egyfajta kalibrációt használtam, így a fent említett módszerek alapján ki kellett választanom a legjobb kalibrációs módszert.

A mintavételezést különböző környezetekben végeztem el, különböző magnetométerekkel úgy, hogy a magnetométereket a saját tengelyei körül forgattam meg. Így a magnetométerek összegyűjtött adatait a következő metrikák alá vetettem:

- Maradékhibák (RSS - Residual Sum of Squares): A maradékhibák négyzetösszegének minimalizálása fontos tényező, mivel jelzi, hogy mennyire illeszkednek az adatok az adott modellhez.

$$RSS = \sum_{i=1}^N (\|x_{cal,i}\| - 1)^2 \quad (11)$$

, ahol $\|x_{cal,i}\|$ a kalibrált adat vektor euklideszi normája:

$$\|x_{cal}\| = \sqrt{x_{cal}^2 + y_{cal}^2 + z_{cal}^2} \quad (12)$$

- Közeponti eltérése: A kalibrált adatok középpontjának eltérése az origótól. Ez az érték azt mutatja meg, hogy a kalibráció mennyire képes korrigálni az eltolásokat.

$$d_{center} = \left\| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{cal,i} \right\| \quad (13)$$

ahol:

d_{center} – középpont eltérés

N – mintavételi pontok száma

$x_{cal,i}$ – i -edik kalibrált adatpont

$\|\cdot\|$ - az euklideszi norma

- Tengelyek varianciája: A kalibrált adatok eloszlásának mértéke az egyes tengelyek mentén. Az alacsony variancia azt jelzi, hogy a kalibráció jobban kiegyenlíti a különböző irányokban jelentkező torzulásokat.

$$\Delta_x = \max(x_{cal}) - \min(x_{cal}) \quad (14)$$

$$\Delta_y = \max(y_{cal}) - \min(y_{cal}) \quad (15)$$

$$\Delta_z = \max(z_{cal}) - \min(z_{cal}) \quad (16)$$

ahol:

$x_{cal}, y_{cal}, z_{cal}$ – x, y , és z tengely menti komponensek kalibrált értékei

$\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ – az x, y , és z tengelyek terjedelme

$$\sigma^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\Delta_i - \mu_{\Delta})^2 \quad (17)$$

ahol:

σ^2 – tengelyek varianciája

Δ_i – a tengelyek terjedelme ($\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$)

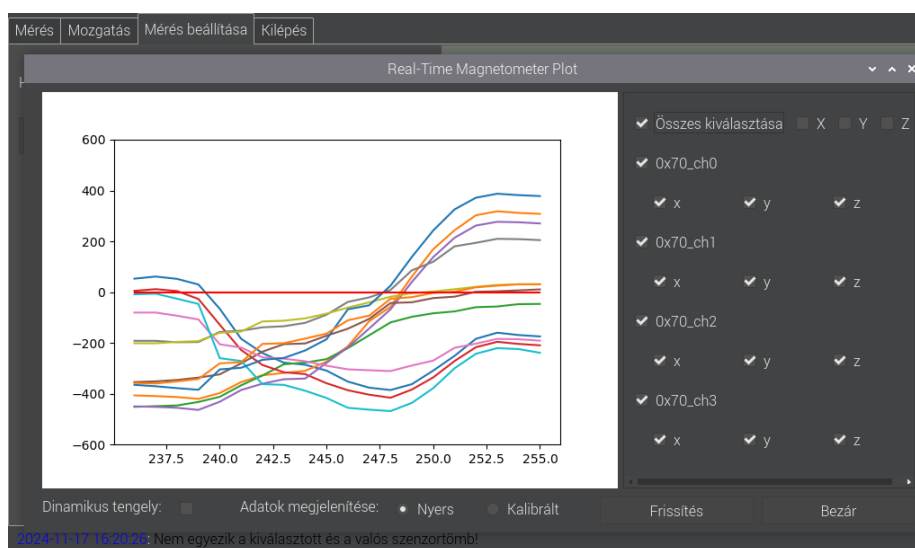
μ_{Δ} – a tengelyek terjedelmének átlaga

A jobb kalibrációs módszer kiválasztásához négy mérést végeztem el, amin elvégeztem az ellipszoid és gömb illesztést. Az egyes metrikák eredményei és az összesített pontszámok a 2. táblázatban figyelhetőek meg. A kisebb értékek jelzik azt, hogy a kalibráció pontosabb, és az adatok jobban illeszkednek a modellhez.

2. táblázat Kalibrációs mérések eredményei. Az adatok normalizált értékben értendő.

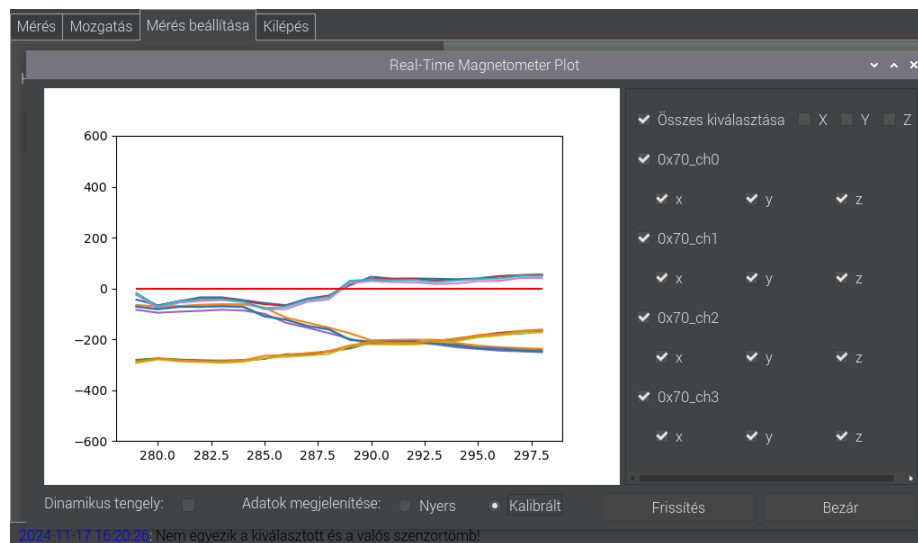
	Maradékhiba [μ T]	Középponti eltérés	Tengelyek varianciája	Összesítés
Mérés 1 – Ellipszoid illesztés	1092.59	76.86	316.62	1486.07
Mérés 1 – Gömb illesztés	1050.12	78.55	1332.91	2461.58
Mérés 2 – Ellipszoid illesztés	1239.06	77.24	238.46	1554.76
Mérés 2 – Gömb illesztés	1224.33	80.81	1851.81	3156.95
Mérés 3 – Ellipszoid illesztés	21.58	79.12	330.97	431.67
Mérés 3 – Gömb illesztés	22.05	79.04	461.25	562.34
Mérés 4 – Ellipszoid illesztés	1168.23	77.54	513.45	1759.22
Mérés 4 – Gömb illesztés	1198.79	82.17	3039.18	4320.14
Ellipszoid illesztés átlag eredményei	1486.07	77.69	431.67	1995.43
Gömb illesztés átlag eredményei	2461.58	80.64	562.34	3104.56

A táblázatban az utolsó két sorban láthatóak a mérések átlag eredményei is. Az ellipszoid illesztés összességében kisebb vagy hasonló RSS értékeket produkált az összes mérésben. Ez azt jelenti, hogy az ellipszoid illesztés során létrejött matematikai modell pontosabban írja le a kalibrált adatokat. Középpont eltérésnél az ellipszoid illesztés minden mérése alacsonyabb eltérést mutatott, ami arra utal, hogy a kalibrált adatok középpontja az origóhoz közelebb helyezkedik el. Az ellipszoid illesztés szintén kisebb tengelyvarianciát mutatott, ami azt jelenti, hogy az adatok tengelyeinek hossza egyenletesebb, azaz szimmetrikusabb eloszlást kapunk.



8. ábra 2x2-es szenzortömb magnetométereinek a nyers adatai valós időben.

Az ellipszoid illesztés módszer bizonyult a jobbnak, így döntöttem ez a módszer alkalmazása mellett. A 8. ábrán látható a szenzortömbön elhelyezkedő négy magnetométer nyers adatainak mintavételezése valós időben. A magnetométerek azonos síkban helyezkednek el és orientációjuk is megegyezik, így megfigyelhető, hogy a négy magnetométer tengelyei együtt mozognak, viszont jelentős eltérésekkel. A 9. ábrán ugyanezeknek a magnetométereknek a kalibrált adatai láthatók, de már ellipszoid illesztés alkalmazásával. Jól látható, hogy a tengelyek értékei közel azonosak, és a mozgásuk is szorosabban együtt halad, ami a kalibrációs módszer sikerességét mutatja.



9. ábra 2x2-es szenzortömb magnetométereinek a kalibrált adatai a valós időben, ellipszoid illesztés által.

3.6 Felhasználói felület bemutatása

A Raspberry Pi-n futó Python szoftver fejlesztése során a célom az volt, hogy egy felhasználóbarát grafikus felületet hozzak létre, amely az érintőképernyős kijelzőn keresztül egyszerűen kezelhető. A GUI fejlesztéséhez a PyQt keretrendszert választottam, amely lehetőséget biztosít könnyen kezelhető és látványos felhasználói interfész kialakítására.

A felhasználói felületet a PyQt Designer eszközzel terveztem meg, amely egy vizuális felületet biztosít a GUI komponenseinek elhelyezésére és beállítására. Ilyen esetben a megtervezett GUI UI (User Interface) fájlként kerül lementésre. Ez a fájl egy XML alapú fájlformátum, amely tárolja a felhasználói felület összes elemét és azok elrendezését. A Python kód az UI fájlt egyszerűen tudja kezelni.

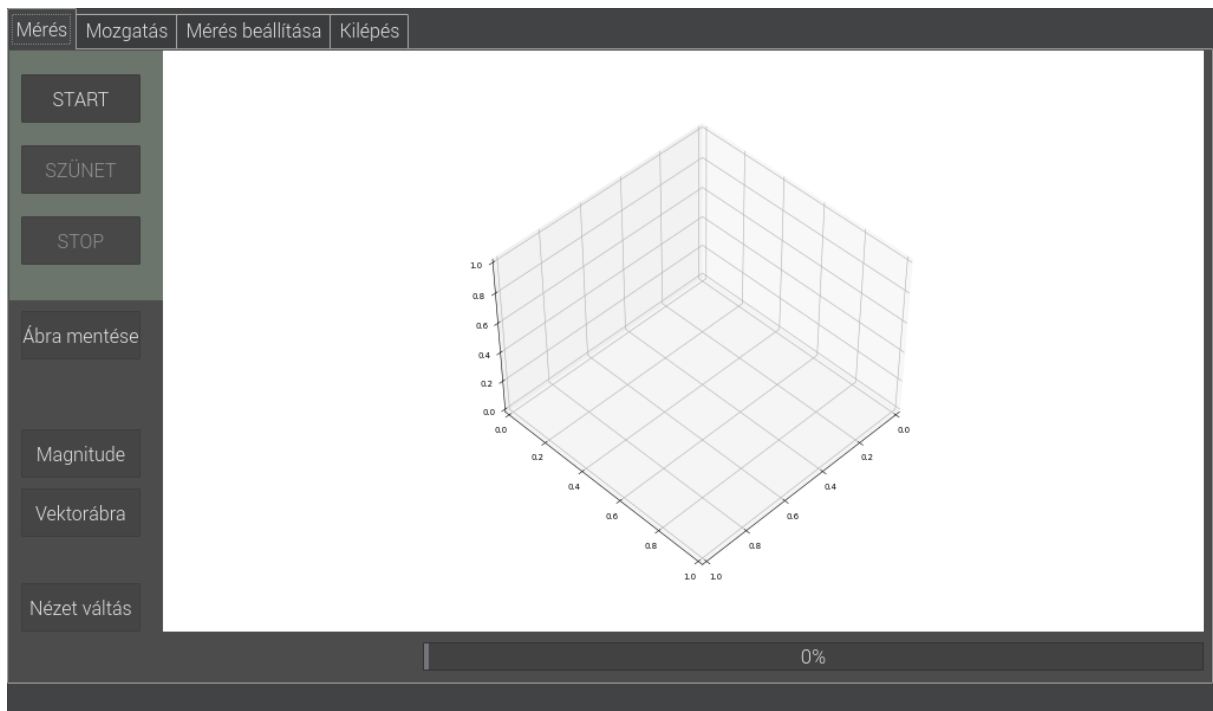
A program indításakor a Raspberry Pi megpróbál csatlakozni az Arduino UNO-hoz. Sikertelen csatlakozás esetén egy hibaüzenet jelenik meg, amely figyelmezteti a felhasználót,

hogy csatlakoztassa az Arduino UNO-t. A program sikeres elindulásakor a felhasználó négy oldalt láthat, amelyek a következőkben bemutatásra kerülnek.

3.6.1 Mérési oldal

A GUI első oldala a mérési oldal, amely a mérési folyamat irányításáért és a valós idejű vizualizációért felelős. A 10. ábrán látható az oldal, melynek a bal oldalon találhatóak a mérés vezérléséhez szükséges gombok, amelyek segítségével a felhasználó elindíthatja, megállíthatja vagy szüneteltetheti a mérést.

A mérési oldal központi eleme a valós idejű vizualizáció, amely mérés során folyamatosan frissül, és a mért adatokat a kijelölt nézet szerint jeleníti meg. A felhasználó gombok segítségével tud váltani az ábra típusán és nézetén. A vizualizációk mentéséhez egy dedikált gomb is rendelkezésre áll, amellyel a felhasználó a jelenlegi vizualizáció pillanatképét mentheti el a méréshez tartozó mappába, biztosítva ezzel az eredmények rögzítését.



10. ábra Saját fejlesztésű GUI mérési oldala.

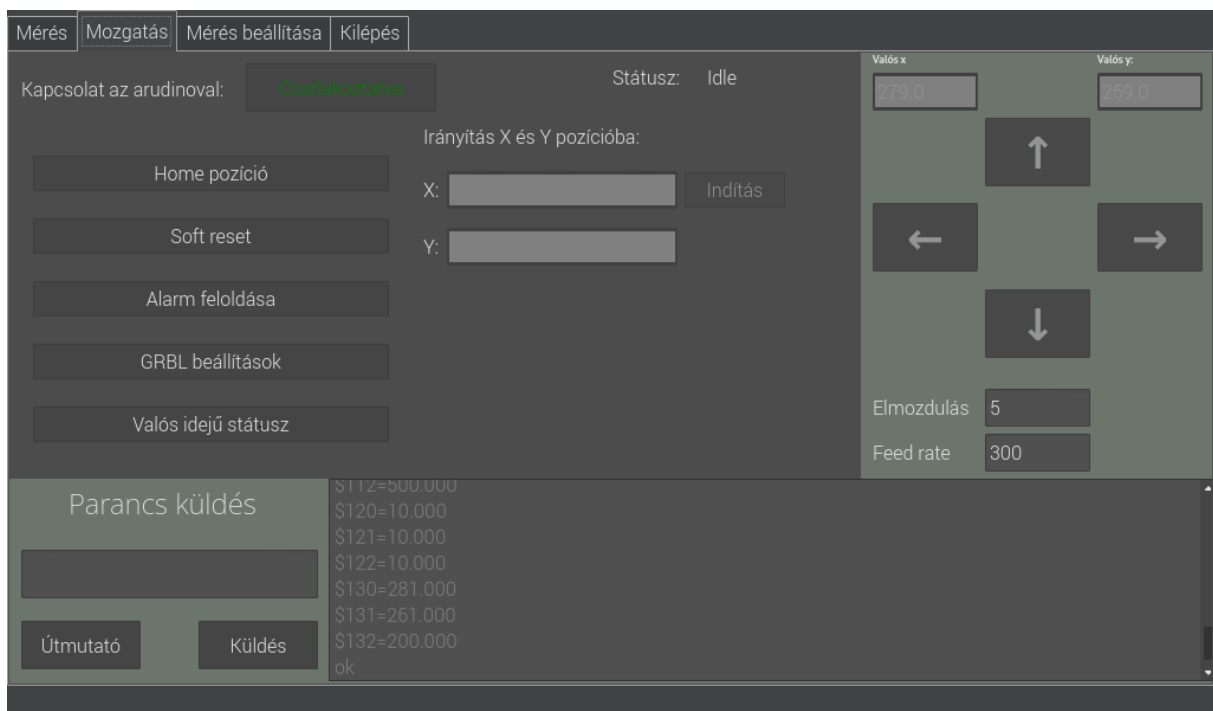
3.6.2 Mozgatási oldal

A GUI második oldala a mozgatási oldal, ahol a felhasználó közvetlenül irányíthatja a rendszert és elérheti a mozgatással kapcsolatos beállításokat.

A 11. ábrán látható a mozgatási oldal, ahol különböző gombok láthatóak, amik a rendszer mozgatásáért felelnek. A csatlakozás gomb a Raspberry Pi és Arduino UNO között, kapcsolatot létesít vagy bont soros porton keresztül. Külön gombok találhatóak a

kezdőpozícióba történő mozgásra, a GRBL szoftveres újraindításra, a riasztások feloldására, a GRBL konfigurációs beállításainak megjelenítésére és a GRBL valós idejű státuszának lekérdezésére. A parancsok és a visszajelzések egy szövegdobozban jelennek meg, amelyen keresztül a soros porton történő kommunikáció nyomon követhető.

A kezdőpontba való pozicionálás elvégzése után a vezérléshez szükséges további gombok feloldódnak, amelyekkel a gép négy irányba való mozgása vagy a kívánt X és Y pozicionálás végezhető el. Ez lehetővé teszi a kézi irányítást, melynek sebességét és az elmozdulását is tudjuk állítani.



11. ábra Saját fejlesztésű GUI mozgatósi oldala.

Ezen az oldalon lehetőségünk van még testreszabott parancsokat is küldeni a GRBL felé soros porton keresztül. Egy ablak formájában egy segédlet is megnyitható a GRBL-ben használt parancsokról, riasztásokról és egyéb információkról.

3.6.3 *Mérés beállításának oldala*

A GUI harmadik oldala látható a 12. ábrán, ahol a mérési folyamat részletes konfigurációját tudjuk beállítani. Ezen az oldalon a felhasználó kiválaszthatja a használni kívánt szenzortömb típusát egy legördülő menüből. A magnetométerek detektálása gomb megnyomásával vizuálisan látható lesz, hogy a szenzortömbön hol érzékelhető magnetométer. Ez a 12. ábra bal felén figyelhető meg, ahol zölddel vannak jelölve a szenzortömbbe helyezett magnetométerek, és sárgával van jelölve, ahol nincs kapcsolat.

Az oldalon található két csúszka, amelyekkel beállítható, hogy a mérési folyamatban a rendszer milyen gyakran végezzen mintavételt és milyen gyorsan történjen a mozgás. Továbbá megadhatók a mozgási határok is mérés során, ami alapértelmezettként a GRBL soft limitjeire vannak beállítva, de szükség esetén könnyedén módosíthatók.

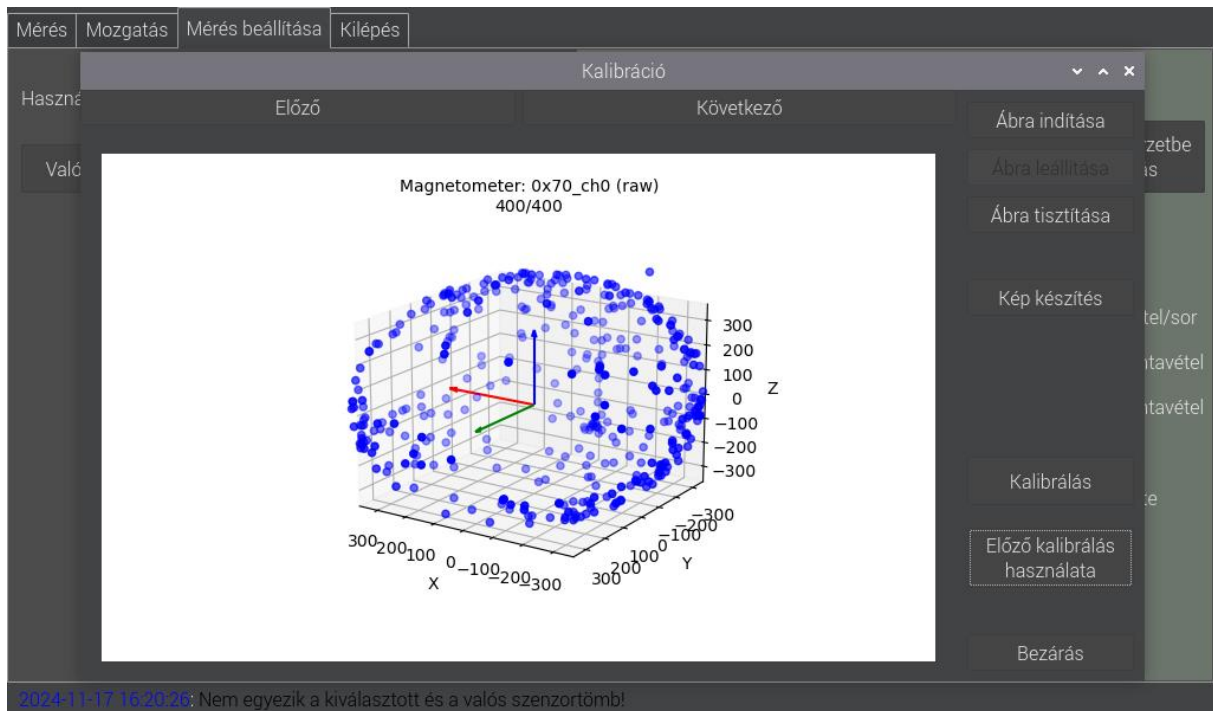
Emellett elérhető egy gomb, amely a korábbi mérésekről szóló ablakot nyit meg. Ebben az ablakban a korábbi mérések áttekinthetők, mivel minden mérés eredménye külön mappában rendeződik. A felhasználó lehetőséget kap a régebbi mérések betöltésére, ami automatikusan beállítja a mérés során alkalmazott paramétereket a mérési oldalra. Ez megkönnyíti a mérések megismétlését. A mérések ezenkívül törölhetők is, így a nem szükséges adatok egyszerűen eltávolíthatók.

12. ábra Saját fejlesztésű GUI mérés beállításának oldala.

A harmadik oldalon található még a valós idejű ábra gomb, amely egy külön ablakban tölti be (lásd a 9. ábrát) az elérhető magnetométereket és azok valós idejű értékeit jeleníti meg. Ebben az ablakban a felhasználó checkbox-szerű választási lehetőségek segítségével kiválaszthatja, hogy mely magnetométereket és mely tengelyek értékeit szeretné megjeleníteni. Az ablakban egy rádiógomb is található, amely lehetővé teszi a kalibrált adatok vagy a nyers adatok közötti váltást, amennyiben a kalibráció korábban megtörtént.

A mérés beállításának az oldalán található még egy külön kalibrálás gomb, amely a 13. ábrán látható ablakot nyitja meg a kalibrációs folyamat vezérlésére. A kalibráció csak akkor indítható el, ha a kiválasztott szenzortömb megfelelően csatlakoztatott és érzékelt magnetométerekkel rendelkezik. A kalibrációs ablak egy vizualizációt is tartalmaz, amely a

magnetométerek adatainak megjelenítésére szolgál. Két navigációs gombbal („Előző” és „Következő”) a felhasználó a különböző magnetométerek között válthat, így az adott szenzorra vonatkozó adatok vizualizációja frissül. A vizualizáció mellett található gombok lehetőséget biztosítanak a vizualizáció elindítására, megállítására, az ábra törlésére és képként való mentésére, amelyeket a rendszer egy kijelölt helyre ment el. A kalibráció ablakában található a kalibrálás gomb, ami elindít egy kalibrációs folyamatot. A folyamat során forgatni kell a magnetométereket a saját tengelyük körül. A mintavételezés után a nyers adatok kalibrálódnak és egy JSON fájlba kerülnek mentésre, így a későbbiekben újra betölthetők. Ha a felhasználó előző kalibrációs adatokat szeretne használni akkor lehetősége van a kalibrálás betöltése gomb segítségével, mellyel a felhasználó egy újabb ablakot nyithat meg, amely az összes korábbi kalibrációt időbélyeggel sorolja fel, lehetőséget adva az adatok megtekintésére, betöltésére vagy törlésére.



13. ábra Saját fejlesztésű GUI kalibrációs ablaka.

3.6.4 Kilepés oldal

A GUI negyedik oldala a Kilepés oldal, ahol az applikáció biztonságos bezárását tudjuk elvégezni. Itt helyet kapott még a naplózás gomb is, mellyel egy ablak nyílik meg. Ebben az ablakban az időbélyeggel ellátott naplózási információk követhetők nyomon, megkönnyítve a rendszeres események és folyamatok ellenőrzését.

3.7 Mérési folyamat

A rendszer mérés során több szálon futó architektúrát alkalmaz, ami által a feladatok párhuzamos végrehajtását és a rendszer hatékonyságát növeli. A felhasználói grafikus felület a fő szálon fut, ami mellett, a mérés során két háttérzál működik. A háttérzálak külön-külön feladatokat látnak el.

Minden mérés indításakor a fő zál létrehoz egy előre definiált mérési mappában egy új mappát, ahol tárolja a jelenlegi mérés információit. Az új mappa elnevezésében egy időbélyeg található, ami lehetővé teszi a könnyebb rendszerezést és keresést. Ebben a mappában a méréskor használt magnetométerek kalibrációinak adatai is belekerülnek JSON fájl formájában. A fő zál a mappa létrehozása után elindítja a két háttérzálát, ami által megkezdődik a mérés.

Az első zál felel a mozgatásért és mintavételezésért. A zál indításakor egy metódus fut le, ami által beolvasásra kerül a GUI felületen meghatározott mérési beállítások. Ezt követően elindul a gép mozgatása és mintavételezése. A mintavételezés szimmetrikus, tehát a mérési pontok előre meghatározott távolságokban helyezkednek el, így biztosítva az egyenletes lefedettséget. Minden mintavételezés után a gép pozíciója és a szenzorok által mért mágneses tér komponensei egy queue-ba kerül, amely biztosítja az adatok zálak közötti biztonságos és szinkronizált átadását. A mintavételezés eredményeként egy négyzethálószerű elrendezésű adatmátrix jön létre, ahol minden cella egy mérési pontot képvisel, és az adott cella tartalmazza a háromdimenziós mágneses tér komponenseit (B_x , B_y , B_z).

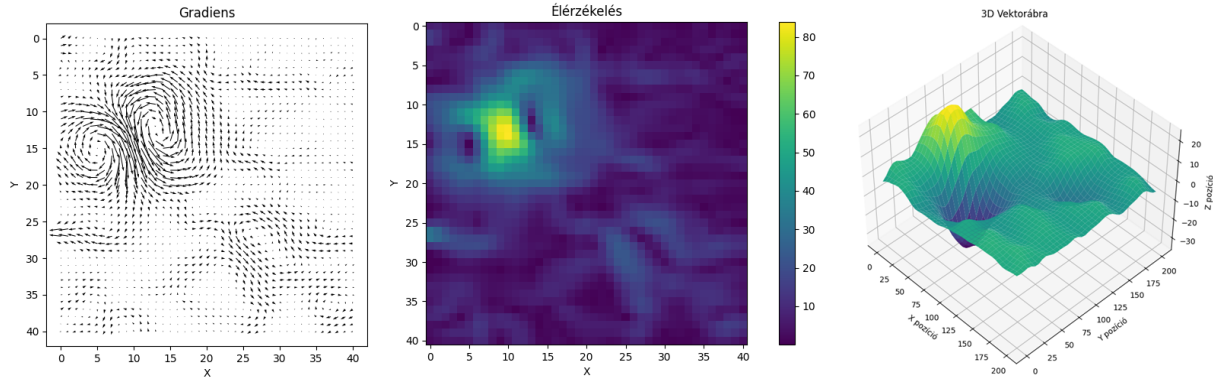
A második zál az első zál által használt queue-ból érkező adatokat dolgozza fel, és végzi el a szükséges feladatokat. Az új mérési eredmények feldolgozásra kerülnek a kiválasztott megjelenítés alapján. Ezt követően frissül a valós idejű ábra, így a felhasználó azonnal láthatja a változásokat.

A megjelenítés mellett a mért adatok egy CSV fájlba kerülnek elmentésre az adott mérés mappájába. Mentés során egy többszintű dataframe-ben kerülnek tárolásra, amely segít rendszerezni és könnyen elérhetővé tenni a mérések eredményeit. Az adatstruktúrában az első szint a mérési pontokat jelenti a térben. A második szint egy multiplexeres cím és csatorna szám, ami által be lehet azonosítani, hogy melyik szenzor szolgálta az adatokat. A harmadik szinten az adott magnetométer tengelyein mért nyers x, y, z adatok találhatóak.

3.8 Vizualizáció

A mérések folyamán valós idejű adatmegjelenítés is történik, ami által látszik a rendszer állapota és a mérés minősége. A felhasználó észlelni tudja a mágneses tér változásait,

felismerve a potenciális hibákat vagy torzulásokat, és szükség esetén módosítsa a mérési paramétereket. A különböző megjelenítési formák (lásd a 14. és 15. ábrán) segítenek a mágneses tér eloszlásának és irányának megértésében és elemzésében. Vizualizáció felbontása függ a mintavételezési pontok számától.



14. ábra Különböző vizualizációk (balról jobbra haladva gradiens vektorábra, gradiensből származó érzékelés, 3D felületábra).

3.8.1 3D felületábra

Ebben az ábrázolási módszerben a mágneses tér nagyságát jeleníti meg a mérési területen (lásd a 14. ábrán a jobb szélső vizualizációt). Az ábra vízszintes tengelyei az X és Y irányokban vett pásztázási pozíciók, míg a függőleges tengely a mágneses tér nagyságát ábrázolja. Ez a vizualizáció segít felismerni a mágneses tér eloszlását és a lokális maximumokat, illetve minimumokat, valamint az esetleges torzulásokat a mérési területen.

A mágneses tér nagyságát az alábbi képlettel lehet kiszámítani:

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (18)$$

$|B|$ - mágneses tér nagysága

B_x , B_y , és B_z - a mágneses tér komponensei az adott mérési pontban.

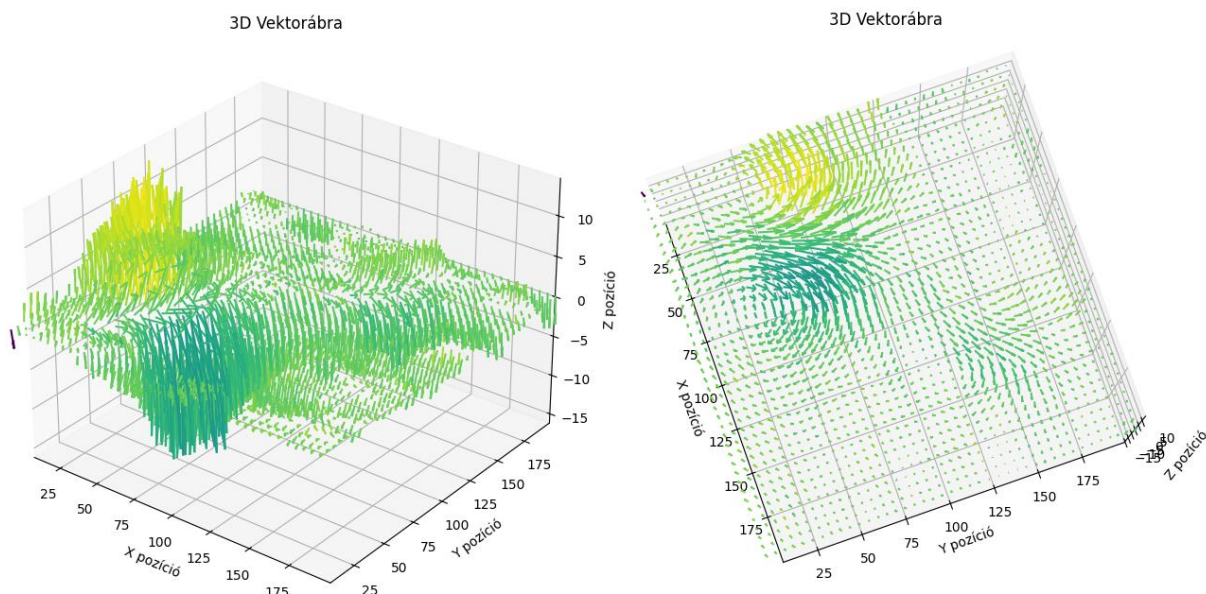
3.8.2 3D vektorábra

A vektorábra a mágneses tér irányát és nagyságát egyszerre jeleníti meg minden mérési pontban, ami megtekinthető a 15. ábrán. Minden egyes pontból egy nyíl (vektor) indul ki, amelynek hossza a mágneses tér nagyságát reprezentálja, iránya pedig a mágneses tér aktuális irányát mutatja.

A vektorábra segít vizualizálni, hogy a mágneses tér milyen irányba és milyen erősséggel változik a mérések során. A vektorábra elemei az alábbi módon definiálhatók:

- A vektor kezdőpontja a mérési pont pozíciója: $(x_i, y_i, 0)$
- A vektor iránya a mágneses tér komponensei által meghatározott vektor: (B_x, B_y, B_z)

- A vektor hossza arányos a mágneses tér nagyságával: $|B|$



15. ábra 3D vektorábra oldalirányból (balról) és felülről (jobbról).

3.8.3 2D érzékelés és gradiens vektorábra

A mágneses térben található ferromágneses anyagok a felületábrákon lokális minimumok és maximumok formájában jelennek meg. A gradiens ábrák ezzel szemben a mágneses tér nagyságának intenzitáskülönbségeit mutatják, amelyek az élek és a gyors változások kimutatására szolgálnak.

A mágneses tér nagyságának gradiense numerikus differenciálás segítségével került kiszámításra. A belső pontokon a gradiens számítása a következő képlettel történt:

$$G_{x,i} \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h} \quad (19)$$

$$G_{y,j} \approx \frac{f_{j+1} - f_{j-1}}{2h} \quad (20)$$

ahol:

$G_{x,i}$ – az x-irányú intenzitásváltozás az i-edik pont körül.

$G_{y,i}$ – az y-irányú intenzitásváltozás az i-edik pont körül.

f_i – a mágneses tér nagysága az i-edik ponton,

h – mintavételezés közötti távolság az adott tengely mentén

A rácshálózat szélső pontjaira alkalmazott képletek:

$$G_{x,0} \approx \frac{f_1 - f_0}{h} \quad (21)$$

$$G_{x,n-1} \approx \frac{f_{n-1} - f_{n-2}}{h} \quad (22)$$

$$G_{y,0} \approx \frac{f_1 - f_0}{h} \quad (23)$$

$$G_{y,n-1} \approx \frac{f_{n-1} - f_{n-2}}{h} \quad (24)$$

A gradiens vektorára a mágneses tér nagyságának irányított változását ábrázolja (lásd 14. ábra bal szélső vizualizációját). A gradiens vektor komponensei (G_x , G_y) megmutatják az intenzitásváltozás irányát és az intenzitásváltozás nagyságát. A vektorábrán a nyilak hossza az intenzitásváltozás nagyságát mutatja, az iránya pedig az intenzitásváltozás irányát jelzi. Ez az ábrázolás segít az élek irányának és nagyságának pontos vizsgálatában, így különösen hasznos a ferromágneses anyagok jelenlétének és helyzetének elemzésében.

Az érzékelés az intenzitáskülönbségek alapján azonosítja a szomszédos mintavételi pontok közötti változásokat, ezáltal az élek erősségét mutatja meg. Evvel az ábrázolási módszerrel könnyen láthatjuk a lokális minimumok és maximumok közötti különbséget (lásd a 14. középső vizualizációját).

Az érzékeléshez Sobel-operátor lett alkalmazva:

Az x-irányú Sobel-mátrix:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Az y-irányú Sobel-mátrix:

$$S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Gradiens komponensek számítása:

$$G_x = I * S_x \quad (27)$$

$$G_y = I * S_y \quad (28)$$

ahol:

I – intenzitásmátrix (jelen esetben a mágneses tér nagysága)

S_x – x-irányú Sobel-mátrix

S_y – y-irányú Sobel-mátrix

A Sobel-operátor az intenzitásváltozás diszkrét gradiensét számítja ki, amely az euklideszi norma alapján határozható meg:

$$\|G\| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (29)$$

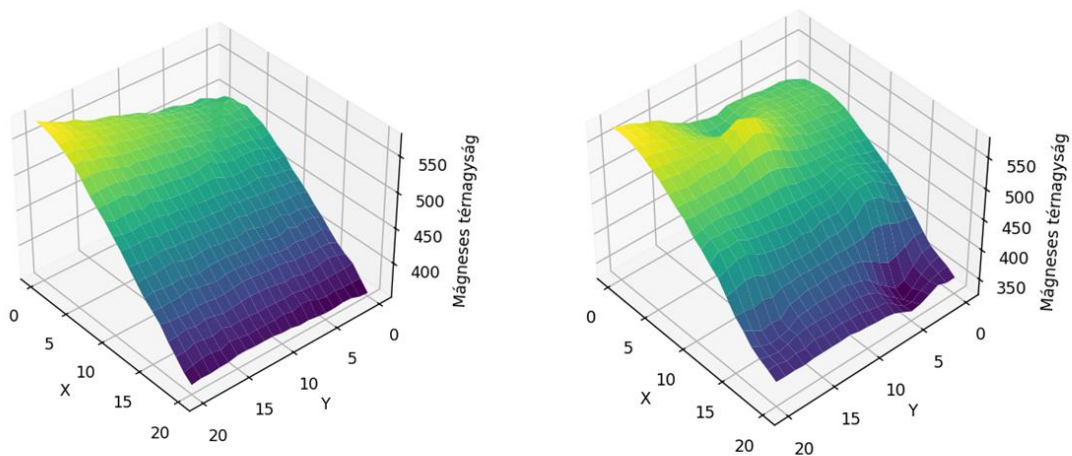
ahol:

G_x : az x-irányú intenzitásváltozás,

G_y : az y-irányú intenzitásváltozás.

3.9 Mérések

Egy magnetométerrel végeztem mérést a síkban, amit olyan környezetben végeztem el, ahol nem volt ferromágneses anyag jelenléte a munkatérben. A 16. ábrán két mérés látható a mágneses tér nagyságáról. A bal oldali ábra egy olyan mérést mutat, ahol nincs ferromágneses objektum jelenléte a munkatérben, ellenben a jobb oldali ábrán, ahol van. Megfigyelve a bal oldali ábrát, a mágneses tér nagysága az X tengely mentén csökken. Az X tengely 0 pontja a pásztázó gép munkatérének a szélére esik, aminek közelében csapágyak, tengelyek, csavarok és rúdtartók vannak. Ezek az elemek mágneses torzulást okoznak a mágneses térben, ezektől távolodva pedig csökken a mágneses tér nagysága. Az ábrán még megfigyelhető egy enyhe növekedés a kezdőpozíció vonalában, az Y tengely mentén, amit a léptetőmotor mágneses torzítása okoz, hozzá való közelítés által.



16. ábra Mágneses tér nagysága egy 200x200 mm munkatérben. Bal oldalt objektum jelenléte nélkül, míg jobb oldalt objektum jelenlétében.

A 16. ábra jobb oldalán egy olyan mérés eredménye látható, amely során a munkatérben már jelen voltak objektumok. A mágneses tér nagysága hasonlít az előző felületábrához, viszont megfigyelhetők apró változások rajta, amit az objektumok jelenléte okoznak. A változások megfigyeléséhez és a jobb vizualizálás érdekében, érdemes a két mérés különbségét venni. A későbbiekben a pásztázás során ezt az egyszerű módszert alkalmazom, amelynek hátránya, hogy objektummal történő mérés előtt, el kell végezni egy alap mérést, melyben nincs objektum jelenléte. Ennek a kétfajta mérésnek megegyező mintavételezési ponttal kell rendelkeznie.

A munkatérben egy asztal helyezkedik el, amin 5 milliméteres beosztással skálázott papír van, az objektumok pozicionálása érdekében.

A szenzortömb használata lerövidíti a mérés idejét, mivel egy nagyobb mérési terület fed le és egyszerre több magnetométer mintavételez. Ebben az esetben a mintavételezési pontokat a szenzortömbhöz kell állítani és figyelembe kell venni a szenzortömbön lévő magnetométerek közötti távolságot. A szenzortömböt átfedéses módszerrel is tudjuk használni, ahol átfedéseket képzünk a mintavételezési pontokon. Evvel a módszerrel ki tudjuk küszöbölni egy hibásan mintavételezett pontot, ami által egy megbízhatóbb mérést kapunk. A méréseim során nem alkalmaztam átfedést, mivel az adott ponton vett egyszeri mintavételezés és a teljes mérésre vett utószűrések elegendőek voltak az objektumok észlelésére.

Az ábrák vizualizálása előtt medián és Gauss-szűrést végeztem el, amely segít a zajcsökkentésben és a simításban. A medián szűrő egy nemlineáris szűrési módszer, amelyet alkalmaztam a kiugró értékek kiszűrésére. A szűrő az aktuális mintavétel körül lévő $n \times n$ tartományon hat. Az értékek összeadódnak, majd az összeg elosztásra kerül n^2 -vel, így átlagolandók a szomszédos mintavételezett pontok.

Átlagoló szűrő mátrixa:

$$H = \frac{1}{n^2} \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

ahol:

H – a mintavételezés pont, ahol átlagolást végzünk.

n – mátrix dimenziójának szélessége

A Gauss-szűrést a zajok csökkentésére és az adatok simítására használtam. A két dimenziós Gauss-függvény képlete:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (31)$$

ahol:

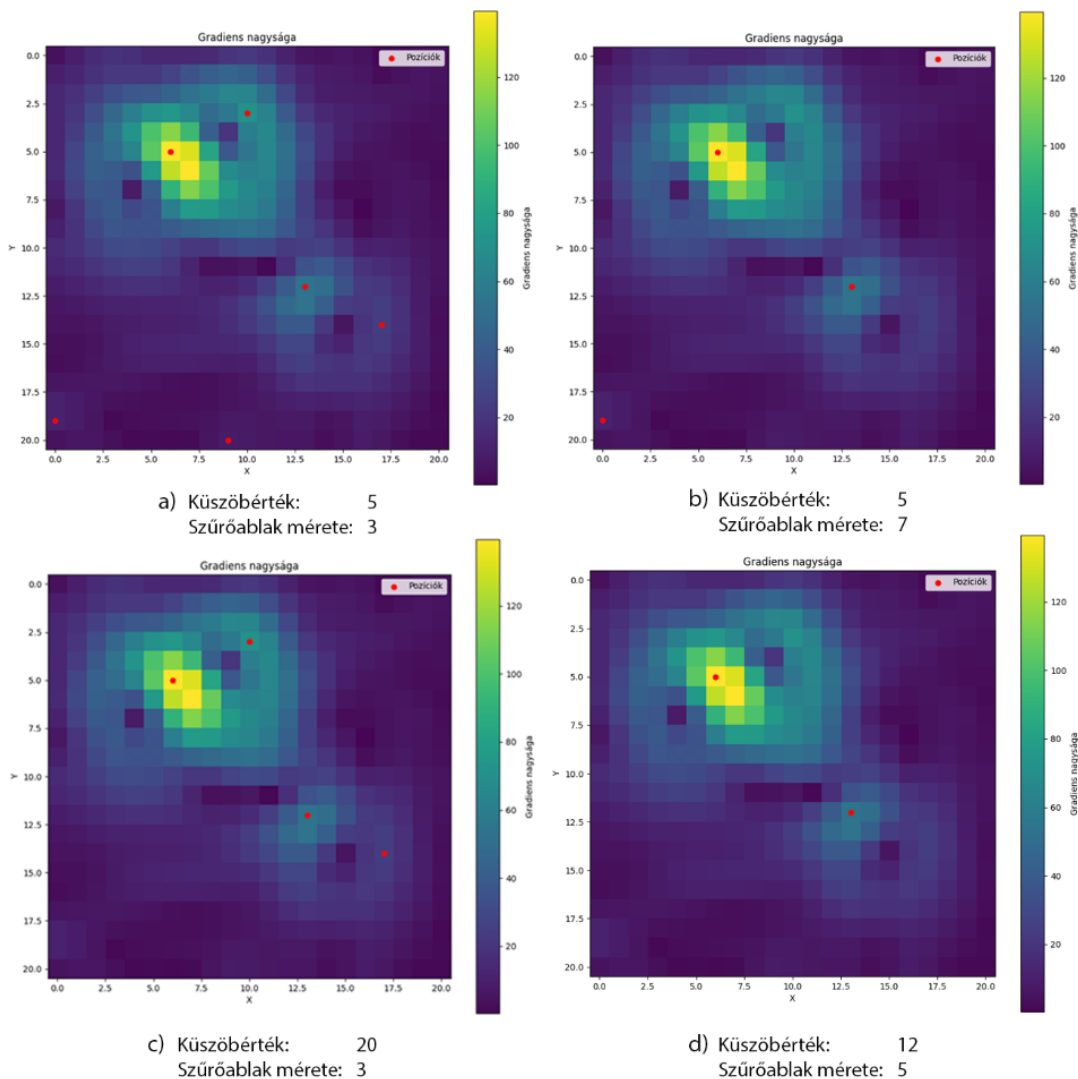
x, y – mintavételezési pontok

σ - az eloszlás szórása

3.9.1 Pozíció meghatározása

A pozíciók meghatározása a gradiens nagyságának a térképéből történt, mivel a nagy intenzitásváltozások jellemzően ferromágneses tárgy jelenlétére utalnak. Mivel a munkatérben több objektum is előfordulhat, elengedhetetlen a lokális maximumok detektálása. Az egyes objektumok eltérően torzíthatják a mágneses teret, így különböző intenzitásváltozások jelenhetnek meg. Ennek megfelelően a lokális maximumok keresése finomhangolható a küszöbérték és a szűrőablak méretének beállításával. A gradiens nagyságtérképen alkalmazott maszk segítségével azonosíthatók azok az X és Y pozíciók, ahol jelentős intenzitáskülönbség

figyelhető meg, ezáltal következtetni lehet az objektumok jelenlétére és helyzetére. Így a pozíciók meghatározása a lokális minimum és maximum értékek középvonalára esnek.



17. ábra Pozíció meghatározása különböző küszöbértékekkel és szűrőablak méretekkel.

A 17. ábrán különböző küszöbértékekkel és szűrőablak méretekkel végzett pozíciómeghatározás látható. A munkatérben két objektum helyezkedett el. A 17. a) ábrán a küszöbérték 5, a szűrőablak mérete pedig 3. Ennek eredményeképpen 6 objektum került meghatározásra. Ez azért történt, mert a kis szűrőablak lehetővé tette a lokális maximumok sűrűbb detektálását és az alacsony küszöbérték miatt ez meghatározásra is került. A 17. b) ábrán a szűrőablak mérete növekedett, ami az objektumok számát háromra csökkentette. Ez azért történt, mert a kisebb lokális maximumokat egyesítette a nagyobb szűrőablak, így azok már nem számítottak különálló detektált pozícióknak. Ugyanakkor egy további pozíció detektálásra került, mint a valós pozíciók száma, mivel az egyik lokális maximum meghaladta a

küszöbértéket. A 17. c) ábra esetében a küszöbérték jóval megnövekedett, míg a szűrőablak mérete maradt 3. Az a) ábrához képest csak azok a helyek maradtak meg, amelyek értéke meghaladta ezt a nagyobb küszöbértéket. Ez által az alacsony intenzitású maximumok kiszűródték, viszont a kis szűrőablak miatt az objektumok környezetében több pozíció továbbra is fennállt. A 17. d) ábrán nagyobb küszöbérték és szűrőablak együttes alkalmazása két pozíciót határozott meg, amelyek megfeleltek a munkatérben lévő két objektumnak. A nagyobb küszöbérték kiszűrte az alacsony intenzitású maximumokat, míg a nagyobb szűrőablak csak a valódi objektumok középpontjának közelében hagyott meg lokális maximumokat.

A mérések során meg kellett határozni egy olyan szűrőablak méretet és küszöbértéket, amely pontosan reprezentálta az objektumok számát és pozícióját. Így küszöbértéknek a 15, szűrőablak méretnek pedig a 7 lett meghatározva.

3.9.2 *Orientáció meghatározás főkomponens-analízissel*

A pozíciók meghatározása után az objektumok orientációját kell meghatározni. Az orientációk meghatározásához kétféle módszert próbáltam meg, amiből az egyik a főkomponens-analízis (PCA - Principal Component Analysis). Először az azonosított lokális pozíciók körül egy előre definiált méretű ablakot vágtam ki, amely az objektum közvetlen környezetét tartalmazza. Az így kapott lokális régióban a mágneses tér intenzitásának gradiens vektorai kerültek kiszámításra, amelyek az intenzitásváltozások irányát és nagyságát reprezentálják.

A PCA módszer segítségével a gradiens vektorok alapján meghatároztam a domináns irányt, amely azt az irányt jelöli, ahol a legnagyobb variancia található. Ez az irány az objektum által a mágneses térben okozott torzulás fő irányát jelöli, és így közvetett módon az objektum orientációjára utal. A PCA során az első főkomponens az adott lokális régió legfontosabb irányát jelzi, amely a legnagyobb szóródást mutatja a gradiens vektorok között.

A PCA a kovarianciamátrixon alapul:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i v_i^T \quad (32)$$

ahol:

v_i : a gradiens vektorok az adott sorra

A PCA két fő eredményt ad, amelyből az egyik a főkomponensek iránya, amely a kovarianciamátrix sajátvektorból származik:

$$v_1 = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (33)$$

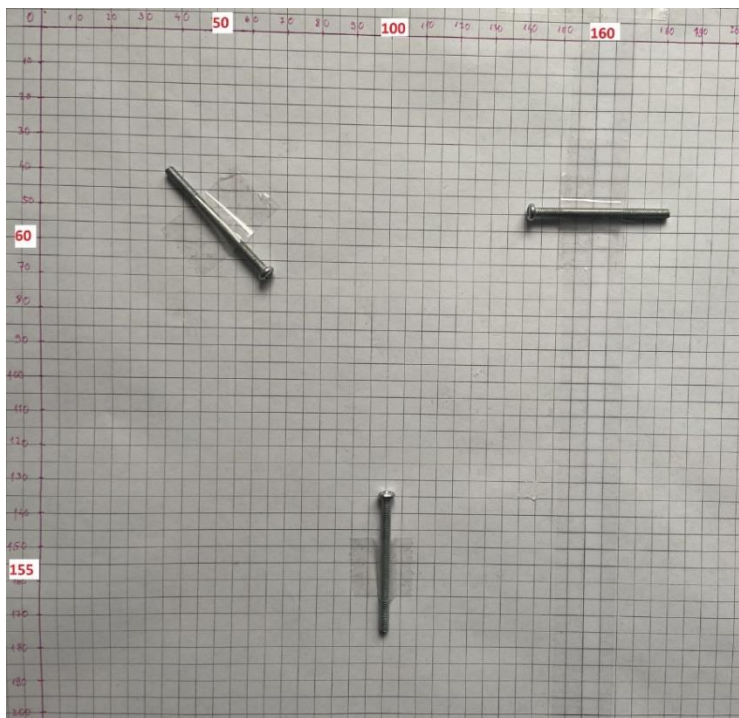
Amelyből az irány fokban:

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (34)$$

A PCA második eredménye az első főkomponens magyarázott variancia aránya:

$$\text{magyarázott variancia}_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (35)$$

ahol λ_i a sajátértékek.

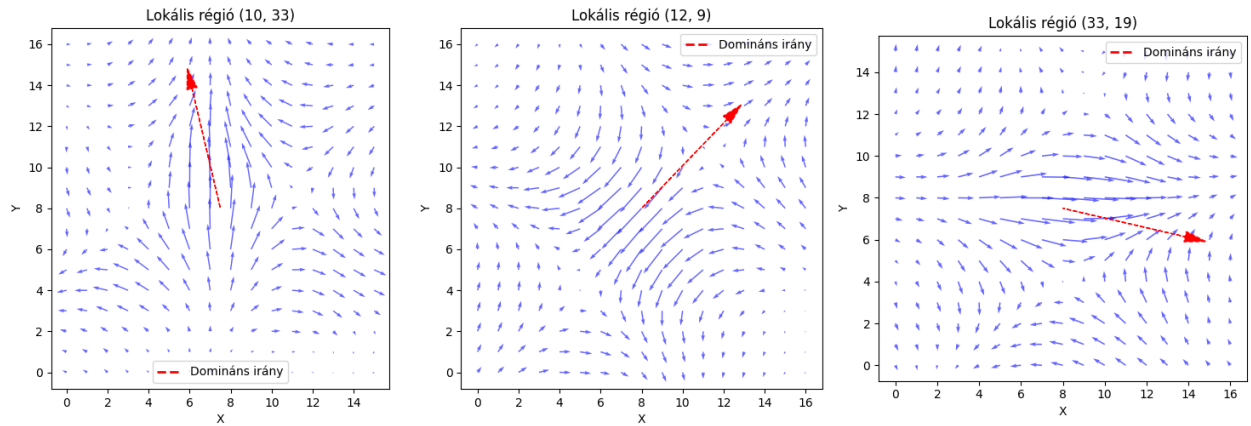


18. ábra Három csavar különböző orientációkban, egy 200x200 mm-es térben.

A 18. ábrán három darab csavar látható a munkatérben, különböző orientációkban. A pásztázási területének mérete 200x200 mm, 5 mm-es mintavételezéssel, ezért mintavételezés során egy 40x40-es mátrixot kapunk. A pozíciók ebben a mátrixban értendők.

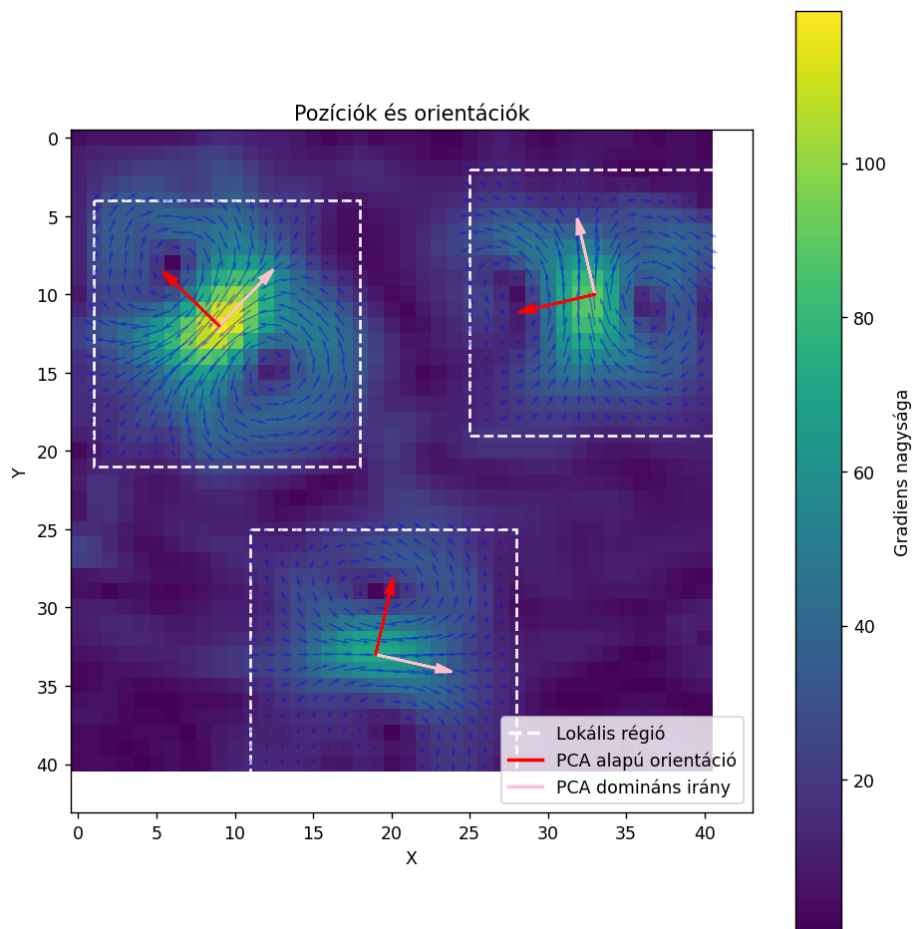
A 20. ábra a mágneses tér nagyságának változásából származó érzékelést mutatja. Az ábrán jól látható, hogy a csavarok két végén lokális maximumok és minimumok jelentkeznek, amelyek nagy intenzitásváltozást eredményeznek. Ezeken a nagy gradiensű területeken detektálhatók a pozíciók, amelyek körül el tudjuk végezni a főkomponens-analízist.

Viszont először a lokális régiókat kell kialakítani, ami a pozíciók körül a mátrixban minden irányban nyolc mintavételi pontnyi távolságban definiálunk. Ezekre a lokális régiókra alkalmazunk főkomponens-analízist, aminek eredményei a 19. ábrán láthatók. A pozíciókból induló domináns irány a gradiens vektorára vektorjainak irányába húzódik.



19. ábra Lokális régiókban lévő domináns irányok.

Mivel a mágneses tér lokális maximumai és minimumai a csavar két végén helyezkednek el, a főkomponens-analízisből kapott domináns irányok a csavar tengelyéhez képest 90 fokos eltérést mutatnak. A 20. ábrán láthatóak a domináns irányok rózsaszín színnel és a valós irányok piros színnel, amik a domináns irányokhoz képest 90 fokkal vannak elforgatva, amik jól közelítik a csavarok tényleges pozícióit és orientációit a munkatérben.



20. ábra Orientáció meghatározása PCA módszerrel és rávetítve a gradiens ábrára.

A 3. táblázat összegzi a három csavar pozícióit, orientációit és a magyarázott varianciákat. Az első két oszlopban a mátrixban meghatározott pozíciók koordinátái láthatóak, míg a harmadik és negyedik oszlopban a valós térre átszámolt koordináták szerepelnek, milliméterben.

3. táblázat A fenti példából meghatározott objektumok pozíciói, orientációi és a magyarázott varianciái.

X pozíció	Y pozíció	X pozíció [mm]	Y pozíció [mm]	Orientáció [°]	Magyarázott variancia	Magyarázott variancia [%]
33	10	165	50	193,14	0.6754	67.54
9	12	45	60	136.00	0.7166	71.66
19	33	95	165	77.21	0.7239	72.39

A mátrix mérete a mintavételezési pontok számától függ, ezért a valós pozíciók meghatározásához az alábbi képletet kell alkalmazni:

X irányú valós pozíció:

$$x_{valós} = x_{mátrix} \frac{d_x}{n_x} \quad (36)$$

Y irányú valós pozíció:

$$y_{valós} = y_{mátrix} \frac{d_y}{n_y} \quad (37)$$

ahol:

$x_{valós}$, $y_{valós}$ – a valós pozíció az adott irányban a pásztázási területen (milliméterben)

$x_{mátrix}$, $y_{mátrix}$ – a mátrixban meghatározott koordináták az adott irányban

d_x , d_y – a pásztázási terület valós mérete az x és y irányban (milliméterben)

n_x , n_y – a mátrix x és y irányú mérete (a mintavételezési pontok száma)

A táblázat ötödik oszlopa az orientációkat tartalmazza, amelyek az x-tengellyel bezárt szögeket mutatják. Ezek az orientációk a csavarok valós irányát írják le.

Az utolsó két oszlop a magyarázott varianciát tartalmazza. Az első főkomponens varianciája megmutatja, hogy a domináns irány az adatok hány százalékát magyarázza. Minél nagyobb ez az érték, annál jelentősebb az adott irány. Az alacsonyabb értékek kevésbé megbízható domináns irányra utalhatnak, míg a magasabb értékek erősebb, egyértelmű orientációt jeleznek.

3.9.3 Orientáció meghatározása a gradiensvektor normalizált irányával

Az orientáció meghatározására alkalmazott második módszer a gradiensvektor normalizált irányán alapul. A pozíciómeghatározás után az adott pozícióban a mágneses tér intenzitásának gradiensét vizsgáljuk. A gradiens komponenseit kiszámítjuk, majd normalizáljuk a vektor nagyságával, hogy egy egységvektort kapjunk, amely az intenzitásváltozás normalizált irányát jelzi.

Gradiensvektor komponensei az (x, y) pozícióban:

$$dx = G_x[x, y] \quad (38)$$

$$dy = G_y[x, y] \quad (39)$$

ahol:

$G_x[x, y]$ – a gradiens x-irányú komponense

$G_y[x, y]$ – a gradiens y-irányú komponense

Gradiensvektor hossza, amely az adott pont intenzitásváltozás nagyságát adja meg:

$$\|G\| = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (40)$$

A normalizált egységvektor segítségével meghatározható, hogy a gradiens iránya merre mutat, függetlenül a nagyságától:

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (41)$$

ahol:

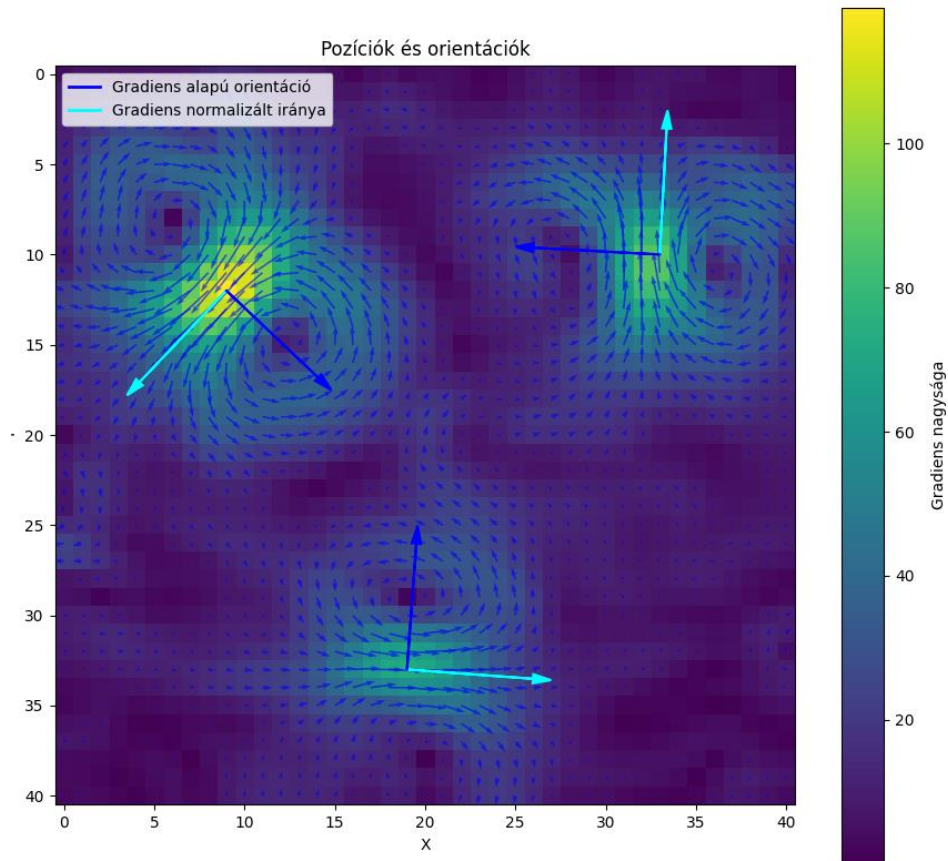
$$u_x = \frac{dx}{\|G\|} \quad (42)$$

$$u_y = \frac{dy}{\|G\|} \quad (43)$$

Az orientáció meghatározása az egységvektor komponensei arányából:

$$\theta = \arctan\left(\frac{u_y}{u_x}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (44)$$

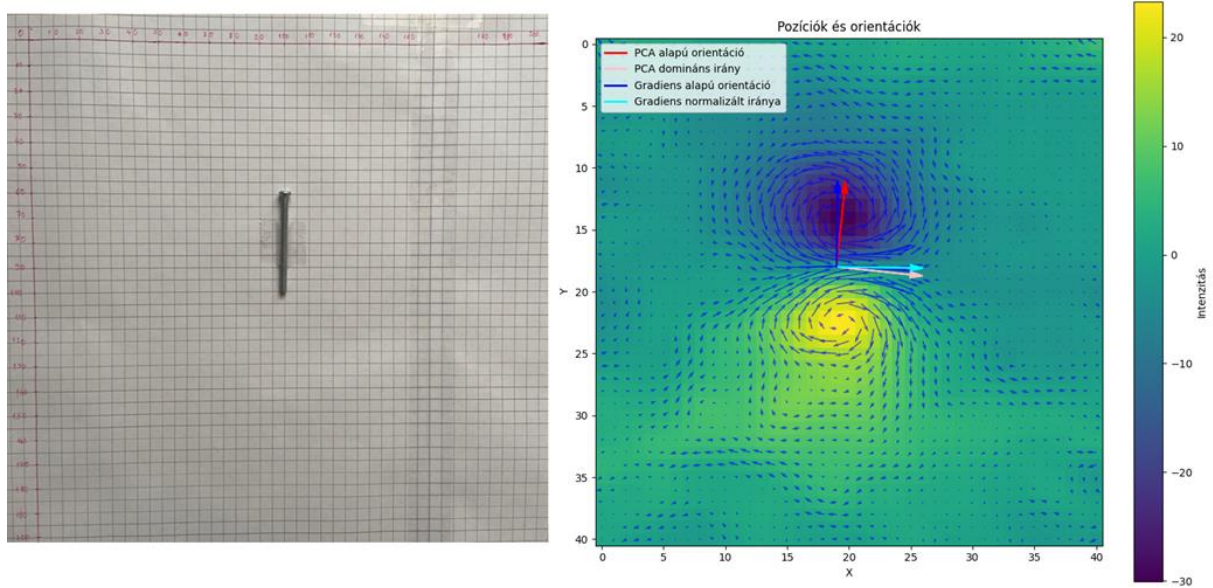
A 21. ábrán látható a három csavar (18. ábra alapján) orientációjának meghatározása gradiensvektor normalizált irányának módszerével. Ez egy egyszerűbb módszer, mivel az adott pozícióban lévő gradiensvektor komponenseit veszi alapul és ebből határoz meg normalizált egységvektort. Az előző orientációs módszerhez hasonlóan, itt is 90 fokos elforgatás szükséges az objektum pontos irányának meghatározásában. A normalizált irányt a cián színű nyilak, az objektumok orientációját pedig a kék nyilak mutatják.



21. ábra Orientáció meghatározása gradiensvektor normalizált irányával.

3.9.4 Eredmények

A mérések során azonos típusú csavarokat használtam objektumként. Minden mérés alkalmával a munkatérben elhelyezett asztal és a magnetométerek síkja közötti távolság állandóan 35 milliméter volt. A pásztázás 200x200 mm-es területen történt, két különböző mintavételezési sűrűséggel. A csavarokat különböző pozíciókba és orientációkban helyeztem el. A valós pozíció meghatározása a munkaasztal 5 mm-es beosztása alapján történt. A valós orientáció meghatározása a lefényképezett objektum képfeldolgozásával történt. A következőkben bemutatom ezeket a méréseket, úgy, hogy minden esetben ábrázolom a valóságban elhelyezett objektum pozícióját és orientációját. Ezen kívül ábrázolom a mágneses tér nagyságát a gradiens vektorára kombinálásával, amely jól szemlélteti a mágneses tér változásait és irányait. Az ábrákon megfigyelhető cían színnel a gradiens normalizált iránya, amelyhez kék színnel a valós orientáció tartozik, ezenkívül rózsaszínnel a PCA által meghatározott domináns irány, és a hozzá tartozó piros színnel jelölt domináns irányból számított valós orientáció.



22. ábra Az objektum helyzete az első mérés során, balról a valós térben és jobbról a becsült.

Az első mérés a 22. ábra szemlélteti, amelyen egy darab csavart látunk a pásztázási terület közepén. A csavar tengelye párhuzamos a pásztázási Y tengellyel. A pásztázás 5 mm-es mintavételezéssel történt. A PCA alapú orientációmeghatározáshoz a lokális régió kijelölése során egy 16x16-os mátrixot használtam.

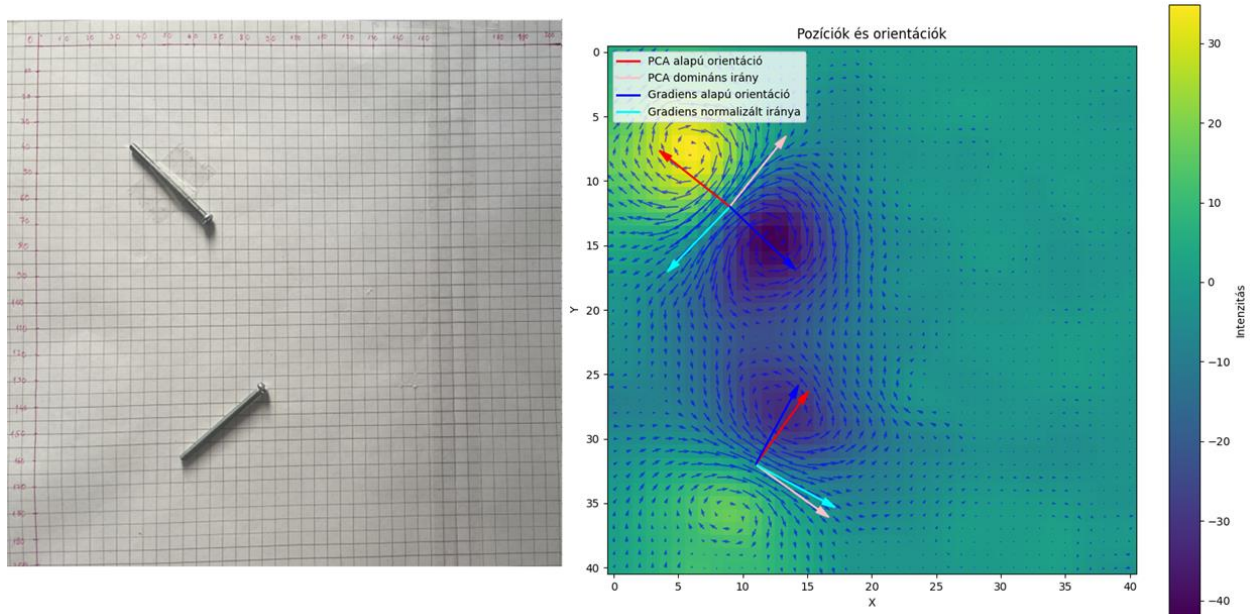
4. táblázat Az első mérés eredménye

Objektum	Valós pozíció* ¹ [mm]	Becsült pozíció* ¹ [mm]	Valós orientáció [°]	Becsült GNIA* ² orientáció [°]	Becsült PCA orientáció [°]	PCA magyarázott variancia [%]
1	[100, 80]	[90, 95]	90	89.27	84.02	67.57

*¹: A pozíció első tagja az objektum X tengely menti, a második tagja az Y tengely menti helyzete [x, y].

*²: GNIA – gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer

Az első mérés eredményeit a 4. táblázatban láthatjuk, amiben megfigyelhető, hogy a detektált pozíció 10-15 mm eltérést mutatott a valós pozíciótól. Itt meg kell jegyezni, hogy a pozíció meghatározása függ a mintavételezés nagyságától. A gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer jobb becslést adott az orientációra, mint a PCA-val meghatározott. A PCA magyarázott varianciája 67.57%, ami az irány dominanciájának erős jelenlétét mutatja.



23. ábra Az objektumok helyzete a második mérés során, balról a valós térben és jobbról a becsült.

A második mérés a 23. ábra szemlélteti, amelyen két darab csavart látunk a munkatérben. A csavarok tengelyei egymáshoz képest szögben helyezkednek el. A pásztázás 5 mm-es mintavételezéssel történt. A PCA alapú orientációmeghatározáshoz a lokális régió kijelölése során egy 16x16-os mátrixot használtam.

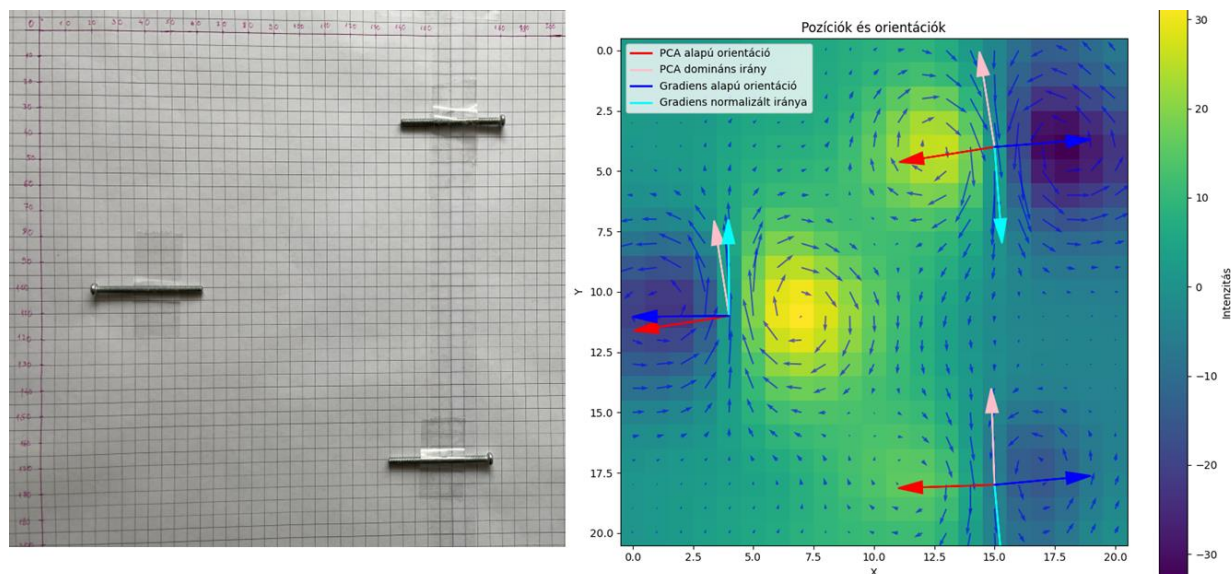
5. táblázat A második mérés eredménye. Orientációnál a zárójeles érték, az átszámított fok a valós orientáció irányításának megfelelően.

Objektum	Valós pozíció* ¹ [mm]	Becsült pozíció* ¹ [mm]	Valós orientáció [°]	Becsült GNIA* ² orientáció [°]	Becsült PCA orientáció [°]	PCA magyarázott variancia [%]
1	[50, 55]	[45, 60]	135.6	316.21 (136.21)	141.49	71.99
2	[70, 150]	[55, 160]	41.2	61.67	54.29	74.10

*¹: A pozíció első tagja az objektum X tengely menti, a második tagja az Y tengely menti helyzete [x, y].

*²: GNIA – gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer

A második mérés eredményeit az 5. táblázatban láthatjuk, ahol megfigyelhető, hogy a második objektum nagyobb eltérést mutatott X és Y irányban, mint az első objektum. Az orientációknál megfigyelhetjük, hogy nagy eltérések vannak, viszont az objektumok orientációinak meghatározására, csak az irányokat nézzük, irányítás nélkül. Így az első objektum GNIA orientációja egyenértékű a 136.21°-kal, ami egy elég közeli becslés a valós orientációhoz képest. Evvel szemben a második objektum közel 20° orientációs eltérést mutat.



24. ábra Az objektumok helyzete a harmadik mérés során, balról a valós térben és jobbról a becsült.

A harmadik mérés a 24. ábra szemlélteti, amelyen három darab csavart látunk a munkatérben. A csavarok tengelyei párhuzamosak az X tengelyre. A pásztázás 10 mm-es mintavételezéssel történt, ezért a PCA alapú orientáció meghatározáshoz a lokális régió kijelölése során egy 8x8-os mátrixot használtam.

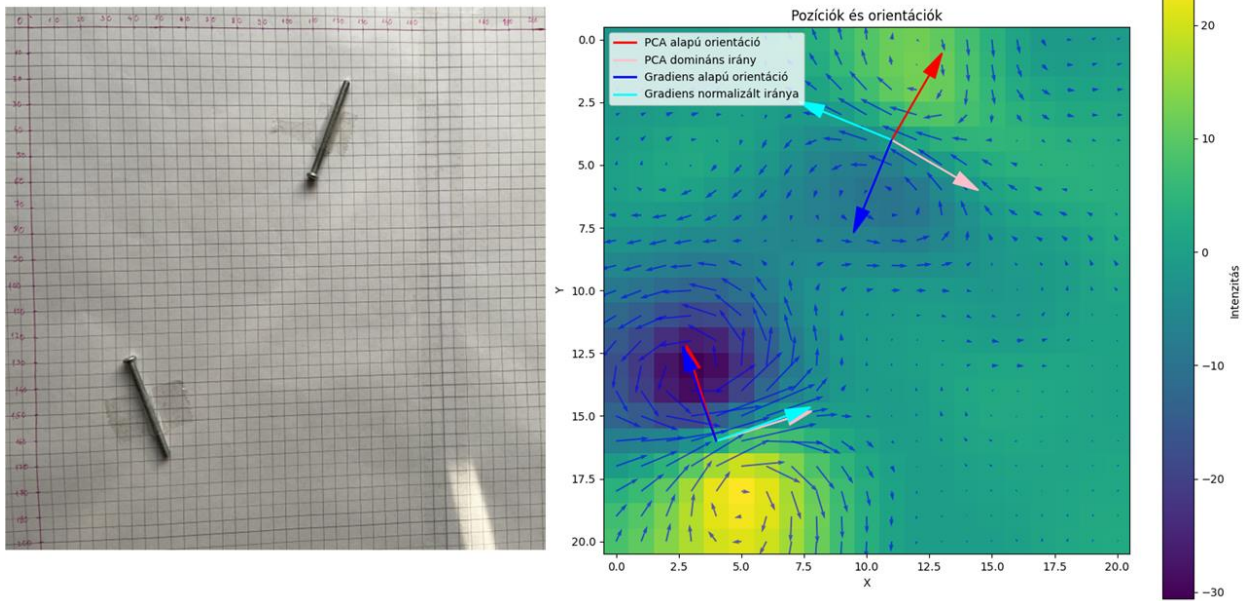
6. táblázat A harmadik mérés eredménye. Orientációnál a zárójeles érték, az átszámított fok a valós orientáció irányításának megfelelően.

Objektum	Valós pozíció* ¹ [mm]	Becsült pozíció* ¹ [mm]	Valós orientáció [°]	Becsült GNIA* ² orientáció [°]	Becsült PCA orientáció [°]	PCA magyarázott variancia [%]
1	[160, 35]	[150, 40]	180	4.46 (184.46)	189.04	70.21
2	[40, 100]	[40, 110]	180	180.49	188.99	62.77
3	[155, 170]	[150, 180]	180	5.34 (185.34)	181.98	81.73

*¹: A pozíció első tagja az objektum X tengely menti, a második tagja az Y tengely menti helyzete [x, y].

*²: GNIA – gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer

A harmadik mérés eredményeit a 6. táblázatban láthatjuk. A valós és a detektált pozíciók között a legnagyobb eltérés 10 mm. Orientáció meghatározásában a gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer becsülte meg pontosabban. Viszont a harmadik objektumnál a PCA orientáció egy elég közeli becslést eredményezett 1,98° eltéréssel a valós orientációtól, 81.73 %-os magyarázott varianciával, ami az adatok egyértelmű domináns irányát jelzi.



25. ábra Az objektumok helyzete a harmadik mérés során, balról a valós térben és jobbról a becsült.

A negyedik mérés a 25. ábra szemlélteti, amelyen két darab csavart látunk a munkatérben. A csavarok tengelyei szögben helyezkednek el egymáshoz képest. A pásztázás 10 mm-es mintavételezéssel történt. A PCA alapú orientációmeghatározáshoz a lokális régió kijelölése során egy 8x8-os mátrixot használtam.

7. táblázat A negyedik mérés eredménye. Orientációnál a zárójeles érték, az átszámított fok a valós orientáció irányításának megfelelően.

Objektum	Valós pozíció* ¹ [mm]	Becsült pozíció* ¹ [mm]	Valós orientáció [°]	Becsült GNIA* ² orientáció [°]	Becsült PCA orientáció [°]	PCA magyarázott variancia [%]
1	[115, 40]	[110, 40]	68.3	247.61 (67.61)	59.86	74.71
2	[42.5, 150]	[40, 160]	111.1	109.67	107.37	72.77

*¹: A pozíció első tagja az objektum X tengely menti, a második tagja az Y tengely menti helyzete [x, y].

*²: GNIA – gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer

A negyedik mérés eredményeit az 7. táblázatban láthatjuk, ahol 10 mm-es becsült pozíciót láthatunk. Becsült orientációra a gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer közelebbi megoldásokat eredményezett.

A négy mérés során 8 darab objektum helyzete lett meghatározva, melyek különböző pozíciókba és orientációkba voltak lehelyezve a munkatérben. A becsült pozíciók a mintavételezés sűrűségétől függően legfeljebb 15 mm eltérést mutattak a valós pozícióktól. A kapott orientációs becslések alapján a gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer közelebbi becslést eredményezett, néhány kiugró eltéréssel. Így ezek az orientációk átlagos

eltérése a valós orientációktól 4.28° . A becsült PCA orientációk esetében a valós orientációhoz viszonyított átlagos különbség 7.14° , amely tovább csökkenthető a módszerben alkalmazott lokális régiók finomhangolásával.

A mérések nagyon közeli becslést adnak a pozíció és az orientáció meghatározására.

4 ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat célja egy magnetométereken alapuló rendszer megvalósítása volt, amely képes ferromágneses tárgyak pozíciójának és orientációjának pontos meghatározására.

A mérések eredményeinek feldolgozásához gradiensvektor-alapú érzékelést és főkomponens-analízist alkalmaztam. A pozíciók meghatározása a mágneses tér gradiensének nagyságtérképéből történt, és a becsült pozíciók a mintavételezés sűrűségétől függően legfeljebb 15 mm eltérést mutattak a valós pozícióktól. Az orientációk meghatározását a lokális régiókban végzett PCA elemzés által és a gradiens normalizált irányaként is meghatároztam. A becsült PCA orientációk esetében a valós orientációhoz viszonyított átlagos különbség 7.14° , míg a gradiensvektor normalizált irányán alapuló módszer átlagos eltérése a valós orientációktól 4.28° . Az orientációk esetében mindkét módszer jól mutatta az objektumok irányát. A PCA által számított magyarázott varianciák 62-81% közötti értékei az adatok megbízhatóságát és az iránymeghatározás hatékonyságát igazolják. A módszer alkalmazható valós objektumok orientációjának és pozíciójának meghatározására, különösen homogén mágneses térben.

A szenzortömb használatának egyik legnagyobb előnye az volt, hogy egyszerre több mintavételezés történt, így jelentősen csökkent a teljes pásztázási idő. Ez különösen nagy területeken és nagyobb mintavételezési sűrűségnél mutatkozott előnyösnek, hiszen a gyorsabb adatgyűjtés mellett a mérési pontok közötti összefüggések is jobban értelmezhetővé váltak.

A megvalósított magnetométer alapú rendszer rendelkezik grafikus felhasználói felülettel, ami által könnyen beállíthatók a mérések, és valós idejű megjelenítést is biztosít. A használt technikák, algoritmusok, és a felhasználóbarát felület az iparban számos területen alkalmazható lenne. A rendszer kiválóan alkalmas ferromágneses tárgyak, például csavarok, szegek vagy egyéb szerkezeti elemek gyors és pontos lokalizálására, valamint azok orientációjának meghatározására. Az automatizált adatgyűjtés és a több szenzorból álló szenzortömb hatékonysága révén a technológia alkalmazható minőségellenőrzési folyamatokban, ahol a precíziós pozíció- és orientációérzékelés elengedhetetlen.

A rendszer pontossága és a robusztussága tovább javítható a további fejlesztésekkel, ezáltal a jövőben többféle objektumtípus vizsgálhatóvá válna. Továbbá, a rendszer

kiegészíthető gépi tanulási algoritmusokkal, amelyek segítségével az objektumok típusának és állapotának azonosítására alkalmazható.

A kutatás során nem találtam olyan szakirodalmat, amely kifejezetten olyan megközelítéssel foglalkozna, amely ilyen pontosan meghatározza az objektumok orientációját magnetométerek segítségével. Bár több cikk is foglalkozik a magnetovision technológiával, a legtöbbjük elsősorban a mágneses tér feltérképezésére vagy az objektumok pozíciójának meghatározására összpontosít. Az általam kidolgozott megoldás azonban egy új szemléletet képvisel, amely nemcsak a pozíciók, hanem az orientációk pontos meghatározását is megbecsüli, ami jelentős újítást jelent a területen.

A rendszer megvalósítása során elért eredmények hozzájárulnak a magnetométer alapú pozíció- és orientációmérés technológiájának fejlesztéséhez, és új lehetőségeket nyitnak meg a kapcsolódó mérnöki és tudományos alkalmazások számára.

IRODALOMJEGYZÉK

- Bánlaki, P., & Lovas, A. (2012). Szenzorika és anyagai. Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, 141–145.
- Chaofeng, Y., Wang, Y., & Tao, Y. (2018). High-density large-scale TMR sensor array for magnetic field imaging. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–7.
- Coey, J. M. D. (2009). Magnetism and magnetic materials. 39–40.
- Du, W. Y. (2015). Resistive, capacitive, inductive, and magnetic sensor technologies. San Jose State University, 153–299.
- Grosz, A., Haji-Sheikh, M. J., & Mukhopadhyay, S. C. (2017). High sensitivity magnetometers. 1–565.
- Guo, P., Qiu, H., Yang, Y., & Ren, Z. (2008). The soft iron and hard iron calibration method using extended Kalman filter for attitude and heading reference system. 1167–1174.
- He, D. (2017). AMR sensor and its application on nondestructive evaluation. 134–153.
- Hovde, D. C., Prouty, M. D., Hrvoic, I., & Slocum, R. E. (2013). Commercial magnetometers and their application. In *Optical Magnetometry* (pp. 387–405).
- Hunt, R. P. (1971). A magnetoresistive readout transducer. 150–154.
- Kang, M. H., Choi, B. W., Koh, K. C., Lee, J. H., & Park, G. T. (2004). Experimental study of a vehicle detector with an AMR sensor. *Department of Control and Measurement Engineering*, 278–284.
- Kok, M., & Schön, T. B. (2016). Magnetometer calibration using inertial sensors. 1–10.
- Lenz, J., & Edelstein, A. S. (2006). Magnetic sensors and their applications. *Sensors Journal*, 631–649.
- Li, Z., & Dixon, S. (2016). A closed-loop operation to improve GMR sensor accuracy. *Sensors Journal*, 1–5.
- Miao, W., Liu, X., Lam, K. H., & Pong, P. W. T. (2018). DC-arcing detection by noise measurement with magnetic sensing by TMR sensors. *Department of Electrical and Electronic Engineering*, 1–5.
- Mirzaei, M., Hosseini, I., & Babaei, R. (2017). MEMS magnetometer calibration using modified ellipsoid fitting method. Shiraz University, 1–5.
- Nowicki, M., & Szewczyk, R. (2011). Application of magnetovision for detection of dangerous objects. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, 7, 70–74.

- Nowicki, M., & Szewczyk, R. (2013). Ferromagnetic objects magnetovision detection system. 5593–5601.
- Nowicki, M., & Szewczyk, R. (2019a). Determination of the location and magnetic moment of ferromagnetic objects based on the analysis of magnetovision measurements. *Institute of Metrology and Biomedical Engineering*, 1–13.
- Nowicki, M., & Szewczyk, R. (2019b). Determination of the location and magnetic moment of ferromagnetic objects based on the analysis of magnetovision measurements. *Warsaw University of Technology*, 1–13.
- Popovic, R. S. (1989). Hall-effect devices. *Sensors and Actuators*, 39–53.
- Popovic, R. S., Randjelovic, Z., & Manic, D. (2001). Integrated Hall-effect magnetic sensors. *Department of Microengineering, Swiss Federal Institute of Technology*, 46–49.
- Reig, C., Cubells-Beltrán, M.-D., & Ramírez Muñoz, D. (2009). Magnetic field sensors based on giant magnetoresistance (GMR) technology: Applications in electrical current sensing. 7919–7942.
- Ripka, P. (2001). Magnetic sensors and magnetometers. 1–453.
- Ripka, P., Vyhnánek, J., Janosek, M., & Vcelak, J. (2014). AMR proximity sensor with inherent demodulation. *Sensors Journal*, 14(9), 3119–3123.
- Syntakas, S., Vlachos, K., & Likas, A. (2022). Object detection and navigation of a mobile robot by fusing laser and camera information. 557.
- Szalai, I., & Horváth, B. (2014). Mechatronikai rendszerek speciális érzékelői és aktuátorai. *Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Fizika és Mechatronika Intézet, Veszprém*, 26–27.
- Tsang, C. (1984). Magnetics of small magnetoresistive sensors (invited). *Magnetic Recording Institute*, 2226–2231.
- Tumanski, S. (2007). Induction coil sensors – a review. *Member*, 1–14.
- Tumanski, S., & Stabrowski, M. (1997). The magnetovision method as a tool to investigate the quality of electrical steel. *Warsaw University of Technology*, 488–494.
- Túros, L.-Z., & Székely, G. (2022). Érzékelők és mérőhálózatok. 157–160.
- Vyhnánek, J. (2018). Magnetic sensors and gradiometers for detection of objects. *Doctoral Thesis*, 1–98.
- Vyhnánek, J., Janosek, M., & Ripka, P. (2013). Low frequency noise of anisotropic magnetoresistors in dc and ac-excited metal detectors. *Journal of Physics: Conference Series*, 450, 1–5.

Wu, H., Pei, X., Li, J., Gao, H., & Bai, Y. (2020). An improved magnetometer calibration and compensation method based on Levenberg–Marquardt algorithm for multi-rotor unmanned aerial vehicle. *Measurement and Control*, 1–11.

Yu, X., Wang, Y., Xiao, C., Liu, S., Zong, Q., Qu, Y., Chen, H., Zou, H., Shi, W., Song, S., Gao, S., & Shao, S. (2021). A practicable method for calibrating a magnetic sensor array. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1–6.

<https://product.tdk.com/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

<https://product.tdk.com/en/techlibrary/productoverview/tmr-angle-sensors.html>

<https://docs.arduino.cc/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>

<https://mphy0026.readthedocs.io/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

https://mphy0026.readthedocs.io/en/latest/calibration/pivot_calibration.html

<https://www.pnisenor.com/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

<https://www.pnisenor.com/understanding-magnetometers-and-their-uses/>

<https://sinadrives.com/>. (2020. 11.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

<https://sinadrives.com/en/belts-spindles-racks-pinion/>

<https://zerotohero.engineering/>. (2020. 06. 05.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

<https://zerotohero.engineering/setting-vref-for-drv8825-and-a4988-motor-drivers/>

<https://howtomechatronics.com/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 12, forrás:

<https://howtomechatronics.com/tutorials/how-to-setup-grbl-control-cnc-machine-with-arduino/>

<https://www.youngwonks.com/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 17, forrás:

<https://www.youngwonks.com/blog/What-is-a-Magnetometer-and-How-Does-It-Work>

<https://gmw.com/>. (é. n.). Letöltés dátuma: 2024. 11 17, forrás:

<https://gmw.com/magnetometers/?srsId=AfmBOop9tyoCK1Dd-aWCLo4uDbudotC7iDA7MMwNfT6KVO9IBBuvkKhb>

<https://www.1stvision.com/>. (2024. 08. 25.). Letöltés dátuma: 2024. 11 17, forrás:

<https://www.1stvision.com/machine-vision-solutions/2018/03/machine-vision-industrial-camera.html>

<https://community.infineon.com/>. (2024. 09. 04.). Letöltés dátuma: 2024. 11 18, forrás:

<https://community.infineon.com/t5/Blogs/Magnetic-Marvels-Hall-AMR-GMR-amp-TMR-Technologies/ba-p/847112>

HMC5883L adatlap (2010.10.)