



MPA-ANTENNAFORGATÓ RENDSZER KIÉPÍTÉSE INTERFEROMETRIKUS IN SITU MÉRÉSEKHEZ

CONSTRUCTION OF MPA ANTENNA ROTATION SYSTEM FOR INTERFERO-METRIC "IN-SITU" MEASUREMENTS

Diós Szabolcs Sándor,¹ Masuk Abdullah,² Dinya Tamás,³ Szántó Attila,⁴ Pettendi Dávid,⁵ Balajti István⁶

¹ Debreceni Egyetem, Mechatronika Tanszék, Debrecen, Magyarország, dios.szabolcs@eng.unideb.hu

- ² Debreceni Egyetem, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, masuk@eng.unideb.hu
- ³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Debrecen, Magyarország, tamasdinya@gmail.com
- ⁴ Debreceni Egyetem, Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Debrecen, Magyarország, szanto.attila@eng.unideb.hu

⁵ Debreceni Egyetem, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, pettendid4@gmail.com

⁶ Debreceni Egyetem, Mechatornika Tanszék, Debrecen, Magyarország, balajti.istvan@eng.unideb.hu

Abstract

The primary objectives of the project are to build a complex antenna rotation facility that will enable the structure to perform in situ interferometric measurements. The objectives include the construction of a stable frame to support and protect the control electronics, the design and fabrication of a 2.4GHz DTMPA (Dual Triangular Microstrip Patch antenna), and the support of the control electronics with the appropriate software background. The finished structure is capable of tracking the orbit of a satellite of your choice, up to NAP orbit depending on the configuration. The implementation can be divided into four steps. First of all, a sufficiently solid frame was designed and built. From the point of view of the use of materials, LEGO construction toys are the right choice, both in terms of weight and strength. The second step is to design and build the DTMPA. This is followed by the selection and implementation of the appropriate control electronics. The stepper motor must have adequate torque to ensure proper rotational motion, and the motor and microcontroller must provide clear instructions to the motors. Finally, the code responsible for controlling the motors must be written and implemented in the microcontroller so that the structure can be controlled by the appropriate external computer.

Keywords: Interferometry, DTMPA, antenna performance measurement, microcontroller.

Összefoglalás

A project elsődleges célja egy olyan komplex antennaforgató berendezés építése, amely lehetővé teszi a szerkezet in situ interferometrikus mérések elvégzését. A célok közé tartozik egy stabil keret/váz megépítése a vezérlőelektronika védelmére, egy 2,4 GHz-es DTMPA (Dual Triangular Microstrip Patch antenna) tervezése és gyártása, valamint az elektronika szoftveres hátterének kialakítása. A kész szerkezet képes a választott műhold pályájának követésére elvi szinten, vagy a konfigurációtól függően akár NAP-pálya is megadható. A megvalósítás négy lépésre osztható. Először is, egy kellően szilárd váz tervezése és építése. Anyaghasználat tekintetében a LEGO építőelemek a megfelelő választás, mind súly, mind szilárdság szempontjából. A második lépés a DTMPA megtervezése és megépítése. Ezt követi a megfelelő vezérlőelektronika kiválasztása és megvalósítása. A léptetőmotornak megfelelő nyomatékkal kell rendelkeznie a forgómozgás biztosításához, ehhez a motorok vezérléséért felelős kódot is meg kell írni és implementálni a mikrokontrollerbe, hogy a szerkezetet a megfelelő külső számítógép vezérelhesse.

Kulcsszavak: interferometria, DTMPA, antennateljesítmény-mérés, mikrokontroller.

1. Bevezetés

A Műszaki Karon a következő években kulcsfontosságúak lesznek a fejlesztések a járművek területén. Kari szinten ilyen irányú kutatások is megkezdődtek az elmúlt években [1–3]. A mesterséges intelligencia területén is történtek előrelépések az edukációs alkalmazásban [4, 5]. A kialakított kiberfizikai rendszerek laboratóriuma biztosított eszközöket a tervezés során, ezzel segítve más kutatások gyorsabb előrehaladását is [6, 7]. A megszabott kutatási iránynak megfelelően készült el ez a dolgozat a járművek radarszenzorainak témakörében.

A kitűzött célok elérése érdekében az eszköz működéséhez, megtervezésre és legyártásra fog kerülni a

DTMPA, valamint számos, az antenna működéséhez elengedhetetlen validációs mérés is végrehajtásra kerül. Az eszköz pozícióváltásáért felelős hardver- és szoftverelemek integrálása, valamint az eszköz összeszerelése után a berendezés képes egy előre kiválasztott műhold vagy a Nap mozgásának követésére elvi szinten.

2. Radarrendszerek

A soron következő projekt komplexitása a mechatronika témakörét is erőteljesen érinti, amelyet az 1960-as évek óta ismernek. Ez a tudományág ötvözi a mechanikát, az elektronikát és a számítástechnikát, lehetővé téve olyan öszszetett rendszerek létrehozását, mint a robotok, motorok és elektromos járművek [8, 9]. A téma interferometrikus in situ méréseken alapul. Az interferometria azon az elven alapul, hogy szűkebb körben elektromágneses hullámokat



(1. ábra) használnak, majd az általuk létrehozott interferencia jelensége alapján információt nyernek. Az interferometria olyan feladatok elvégzéséhez használt technika, amelyek nagyon nagy mérési pontosságot igényelnek a különböző hullámok, rezgések, hangok, elektromágnesesség vagy a gravitáció tulajdonságának mérésére. Az interferometria leggyakoribb alkalmazási területei a csillagászat, a kvantumfizika, a meteorológia és az oceanográfia [10]. Az iparban elsősorban kis elmozdulások és egyenetlenségek mérésére használják.

3. Követelmények és szempontok

A projekt céljainak elérése érdekében több öszszehangolt területen is feladatokat kell elvégezni. Kiemelt prioritású a kellően stabil alappal rendelkező váz, amely összetartja az alkatrészeket, és mechanikai védelmet biztosít. Lényeges a megfelelő jellemzőkkel rendelkező DTMPA, valamint az antenna forgását biztosító léptetőmotor és a megfelelő vezérlőelektronika és szoftveres háttér megtervezése és megépítése.

A DTMPA megtervezése előtt irodalomkutatás került elvégzésre.

Az antenna olyan átalakító, amely az elektromágneses hullámokat elektromos energiává alakítja át, és ugyanígy fordítva. Képes adó- és vevőantennaként működni. 1888-ban Heinrich Hertz német fizikus megépítette az első antennákat [12]. James Clerk Maxwell elektromágneses elmélete pedig megerősítést kapott, ami szintén fontos mérföldkőnek tekinthető [13].

Az elektromágneses mező összetevőinek megértéséhez szükségesek az alábbi képletek (1), (2), (3), és (4) a későbbi alkalmazásukhoz kiemelten fontos a függvényének felírása [14].

$$E(r,\theta,\varphi) = E_1(r_p,\theta,\varphi) + E_2(r_p,\theta,\varphi) + E_3(r_p,\theta,\varphi) + E_4(r_p,\theta,\varphi)$$
(1)

A távoli mezőben a normalizált skalármező egyenlete a következő:

$$E(r,\theta,\phi) = f(\theta,\phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta,\phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta,\phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta,\phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4}$$
(2)

$$E(r,\theta,\phi) = \left[e^{+jk\cos\psi_1} - e^{+jk\cos\psi_2} + e^{+jk\cos\psi_3} - e^{+jk\cos\psi_4}\right] f(\theta,\phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$
(3),

ahol

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2[\cos(ks \sin\theta \cos\phi) - \cos(ks \sin\theta \sin\phi)]$$

1. ábra. Az interferometria alapelve [11]

Az "azimutális" panel ($\theta = \pi/2$), valamint a teljes "reflektorrendszer" tömbtényezője a következőképpen redukálódik:

$$\frac{E}{E_0} = AF\left(\theta = \frac{\pi}{2}, \phi\right) =$$

$$= 2[\cos(ks \sin\theta \cos\phi) - \cos(ks \sin\theta \sin\phi)]$$
(5)

Az "erősítés" kifejezés egy olyan paraméterre utal, amely azt jelzi, hogy egy antenna sugárzási mintázata mennyire irányított látszólag. Egy kevésbé erősített antenna széles területre sugároz, míg egy nagyobb, részben erősített antenna az elektromágneses hullámok kibocsátása során a teljesítményének nagy részét egy adott irányba irányítja. Zéró hullámszámnál (k = 0) és az azimutális szögnél ($\theta = 90^\circ$), az antennák fázisos tömbjének normalizált teljesítményerősítése (G) a következő:

$$G(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{Nkd}{2}\right)\cos\theta}{N\sin\left(\frac{kd}{2}\right)\cos\theta} \right|^2$$
(6)

A nagyobb erősítésű antenna nagyobb hatótávolsággal és jobb jelminőséggel rendelkezik, de azt a különböző antennarendszereknek megfelelően kell kialakítani, karbantartani és telepíteni (2. ábra).

A megfelelő antenna kiválasztása után meg kell határozni a projektcéloknak megfelelően az úgynevezett táplálási módszert is. Az MPA-antennák legelterjedtebb típusai a műszaki paramétereik és gyártási költségeik miatt a "monopólus"-, a "dipólus"- és a "hurok"-antennák [16]. A négy legelterjedtebb ilyen táplálási módszer a "mikro-szalagvezeték", a "koaxiális probe", a "proximity feed" és az "apertúra-kapcsolt feed" (3. ábra).



2. ábra. A microstrip patch antenna [15]



3. ábra. MPA-táplálási módszerek

Röviden, a "microstrip feed" a leggyorsabb és legegyszerűbb, a "aperture coupling" a legnehezebben gyártható, a "proximity coupling" pedig a legnagyobb sávszélességgel rendelkezik.

Az irodalmi áttekintés során meg kell ismerni az interferencia jelenségét. A méréseket zavaró interferencia jelenségéről akkor beszélhetünk, amikor az antenna által adott sávszélességben vett jelek más zavaró jelekkel keverednek, pl. zaj, modulált vagy más elektromágneses sugárzásforrás által befolyásolt vagy torzított jelek keverednek [17]. Az interferencia többféleképpen is előfordulhat. Okozhatják közeli antennák, egymással kölcsönhatásban lévő fémtárgyak vagy elektronikus eszközök. Ugyanakkor a természetben előforduló villámok és más, közeli épületek és sziklafalak is okozhatnak visszaverődést. Az interferencia gyakori oka az azonos frekvenciatartományban működő más antennák jelenléte és közelsége. A különböző jelforrásokról vagy rólunk, de a környezetünkben lévő tárgyakról visszavert jelek az első fejezetben leírtak szerint zavarják egymást. Ennek következtében az általunk várt jelerősség csökken, torzul és a jel-zaj interferenciaarány teljes jelvesztéshez vezethet. Ezt gyakran elektronikus eszközök, például rádió-televízió adótornyok, elektronikus vezetékek vagy más kommunikációs berendezések és egyéb elektronikus zajforrások okozhatiák (4. ábra).

A megfelelő alkatrészek mozgatásához léptetőmotorokra van szükség [18]. Ez a motortípus kefe nélküli kialakítású, más néven BLDC (brushless DC), amely a forgómozgást elektromos impulzusok sorozatával okozza. Működésüket tekintve két részre oszthatók, egy álló (álló rész) és egy forgó (rotor) részre [19]. Kialakítását tekintve lehet állandó mágneses, ahol a forgó rész egy állandó mágnes, valamint változó reluktanciájú, ahol a forgó rész egy lemezelt vasmag, amelyet elektromos áram mágnesez. A hibrid motor e két kialakítás kombinációja [20, 21]. Működési elve a mágneses vonzáson alapul. Mind az álló, mind a forgó részen vannak fogak és hornyok, amelyeken ellentétes mágneses polaritás kialakulása esetén a fog a térben hozzá legközelebb eső, ellentétes polaritású felé mozog, ha a köztük lévő távolság elég kicsi. Ezt nevezzük lépésnek (step), innen a léptetőmotor kifejezés. Ez a meglépés lehet teljes, felfelé ható vagy micro. A hibrid léptetőmotor (5. ábra) esetében a forgórész maga a tengely, két reluktanciatípusú, egymáshoz képest fele-fele fáziseltolású ferromágnessel és egy közöttük lévő. axiális mágnesezésű állandó mágnessel. A forgórész szegmensei ellentétes mágneses pólusokat képviselnek.

4. Elemek

A projekt kész, működő berendezéseinek öszszeállítását alapos kutatómunka előzte meg. A 6. ábra a berendezés felépítését szemlélteti.

Fázis + Fázis

4. ábra. Konstruktív és destruktív interferencia



5. ábra. Hibrid léptetőmotor [22]

Az antennaoszlop vezérli a további antennákat, és az általa fogadott jeleket a 4ChVNA-készülékbe küldi, ahol az amplitúdó és a fázis helyes mintavételezése, majd feldolgozása történik. Az R&S jelgenerátor feladata a működtető üzemmódban a kívánt jelstruktúrák és szekvenciák előállítása, majd 50 ohmos kábelen keresztül az antennákhoz való továbbítása.

4.1. A DTMPA-antenna

A projekt fontos eleme a kamera tetején található DTMPA. Ennek az antennának a megépítését több tervezési folyamat előzte meg. Ezek közül a legfontosabb az antenna tervezése a MATLAB szimulációs környezetben. A tervezési folyamat során a szoftverbe épített "antenna array designer" segítségével és a kívánt 2,4 GHz-es frekvencia megadásával a szoftver szimulálta a leendő antenna előzetes vázlatát. Ez a vázlat (7. ábra) a megfelelő működés érdekében számos kézi korrekciót igényelt. (pl. anyaghasználat, szubsztrátvastagság).



6. ábra. Antennaforgató rendszer – blokkdiagram



7. ábra. DTMPA-antennavázlat

4.2. A biztosított antennaelemek

A célkitűzések között szerepelt a tervezési folyamatok végeztével, és az eredmények validációját követően az antennaforgató rendszer legyártása bevont ipari partner segítségével. Költséghatékonysági indokok és a fejlesztési ciklus lerövidítése érdekében ez később készül el. Viszont fontos kiemelni, hogy a tanszék több meglévő antennával is rendelkezett, amelyek közül több is megfelelt a projekt céljainak. Ezért saját rendszerünk kivitelezésénél ezen meglévő antennákat használtuk fel. A következőkben ezek dokumentációját és mérési eredményeit az alábbiakban részletezzük.

A felhasznált két antenna fizikai paraméterei megegyeznek. Mindkettő FR4-hordozót használ, amelyen maga a "slot" található. Ezt követi egy légszubsztrátréteg, majd ez alá kerül egy réz alaplemez. A két lemez közötti távolság, azaz a $\lambda/4$ érték mindkét antenna esetében 5.4 cm. Ennek a kétszerese, azaz a $\lambda/2$ érték lesz az a távolság. amelynek a két antenna táplálási pontjai között kell lennie ahhoz, hogy "tömb"-kialakításban lehessen használni. Mindkét antenna az antenna alján található szabványos koaxiális csatlakozón keresztül kapja a tápellátást. A 8. és 9. ábra az "L" sávos antenna néhány mért értékét mutatja, az 1. táblázat pedig az "L" sávos antenna teljesítményének méréseit mutatja különböző frekvenciákon.

5. Antennateljesítmény-mérés

A projektben használt antennát méréseknek kellett alávetni annak érdekében, hogy bizonyosságot szerezzünk arról, hogy az alkalmas a téma céljainak elérésére. Ebből a célból két mérés történt. Egy egyszerű antennateljesítmény-mérés, valamint egy összetettebb, közeli mezőben végzett antennamérés. A meglévő résrezonátoros antenna jellemzőit két egymástól független méréssel határoztuk meg. Az első mérést rögzített antenna esetén több különböző pozícióban végeztük a 10. ábra szerinti összeállításban. A méréshez több, különböző mérőeszközt használtunk. Az antennát ellátó ROHDE & SCHWARZ SMB 100B jelgenerátor szolgáltatta a szükséges jeleket, először 1,3 majd 2,4 GHz frekvencián. Mindkét beállításnál 4 dBm-es "szint"-érték került beállításra.

A **11. ábrá**n látható mérés során egy 360 fokban elforgatható mérőpadot használtunk (**12. ábra**) az antenna 360 fokos karakterisztikájának meghatározása érdekében. "Adó"-antennaként egy 4ChVNA jelgenerátorhoz csatlakoztatott R&S HE

1. táblázat. "L" sávú-antennateljesítmény-mérések különböző frekvenciákon

"L" sávú antenna		
Frekvencia	1.3 GHz	2.4 GHz
Back radiation	-46.6dB	-43.6dB
Turned 60° to the right from the main beam	-39.5dB	-37.5dB
Turned 60° to the left from the main beam	-37.6dB	-36.2dB
Main beam maximum (horizontal polarization)	-25.6dB	-24.6dB
Cross polarization value	-58.6dB	-58.2dB
Main beam maximum (vertical polarization)	-25.8dB	-22.6dB



8. ábra. A mért "L" sávú antenna sugárzási mintázata



9. ábra. Az "L" sávú antenna mért sugárzási mintázata x-polarizációval



10. ábra. Egyszerűsített antenna jellemző mérése



11. ábra. A mérési környezet diagramja



12. ábra. "L" antennák a forgatható mérőpadon

300 antennát használtunk. Az adatokat a jelgenerátorhoz csatlakoztatott számítógépen értékeltük ki. A "vevő"- és az "adó"-antenna közötti távolság 2,6 m volt. A mérés során a forgatható mérőpadot többször lassan megfordítottuk, majd ugyanezt a mozdulatsort az ellenkező irányban is elvégeztük.

5.1. Léptetőmotoros alrendszer

A keretet két mini-léptetőmotor mozgatja. Mozgásukat tekintve vízszintes és függőleges körkörös mozgás. Az alsó motor biztosítja a keret tengely körüli forgását, míg a felső az antennatartó panelt függőlegesen a kívánt szögben forgatja. A **13. ábra** mutatja a megadott pozíciószög és oldalszög maximális lépésszámát, valamint a deklarált változókat, amelyeket a főszál ír a motorok működtetéséért felelős szál utasítására.

A két, használt SM-28BYJ-48-5V motor [23] négyfázisú, egypólusú. Nyomatéka a fent említett súlyproblémát figyelembe véve megfelelő, így képes biztosítani a megfelelő forgómozgást. A szerkezet tetején elhelyezett motor közvetlenül az antenna függőleges forgásáért, míg az alsó a teljes keret vízszintes forgásáért felelős. A 14. ábra mutatja azt a kódrészletet, amely a motorok óramutató já-



13. ábra. A léptetőmotorok lépésszáma



14. ábra. Programrész a motorok mozgatásához



15. ábra. ULN2003 motorvezérlő

rásával megegyező és ellentétes irányú mozgását okozó funkcióért felelős.

A motor két motorvezérlővel, névlegesen egy ULN2003-mal vezérelhető (15. ábra). Fizikai megjelenése az alábbi képen látható:

5.2. Léptetőmotor programozása

A projekt egy NI USB 6001-es adatgyűjtő kártyát használ, amelyet egy számítógéphez csatlakoztattunk, amely vezérlőparancsokkal látta el. Ezen a számítógépen egy Python programozási nyelven írt alkalmazás fut. Az NI DAQMX könyvtárat importáltuk az említett Python-kódba, amely az adatgyűjtő kártya vezérléséhez szükséges funkciókat tartalmazza. A hamLib könyvtár által a TCP/ IP alkalmazási rétegben használt kommunikációs protokollt ugyanebben a kódban implementálták.

A motorvezérlés alapjául a gpredict nyílt forráskódú szoftver került kiválasztásra.

A gpredict egy valós idejű műholdkövető és -előrejelző alkalmazás. Figyeli és megjeleníti a műholdak pozícióit és adatait listákon, táblázatokon, térképeken és poláris ábrákon keresztül. Előrejelzi a jövőbeli műholdátvonulásokat, és egyedülálló módon a műholdakat testre szabható modulokba csoportosíthatja a személyre szabott megjelenés és funkcionalitás érdekében. Ráadásul a Gpredict több megfigyelőhelyről is képes egyidejűleg követni a műholdakat, de a legfontosabb előnye, hogy képes kezelni az antennaforgatókat és a hamLib-protokollt támogató rádiókat.

A gpredict tehát követi a kiválasztott műholdat, kiszámítja a saját helyzetünknek megfelelően az azimutális és magassági szögeket a forgó részhez, és TCP/IP-n keresztül továbbítja, a hamLib-protokollt használva az alkalmazási rétegben.

Egy Python nyelven írt program, amely szerverként a hamLib-protokollon keresztül fogadja a parancsokat, és egy NI USB 6001 eszközön keresztül vezérli és felügyeli a léptetőmotorokat. Első lépésben a program inicializálja és betölti a megfelelő könyvtárakat az NI USB 6001 vezérléséhez, majd betölti a konfigurációs fájlt, amely meghatározza, hogy hány lépést tud tenni a két tengelyen, és a végső állapotokban a szögeket, amelyeknek a lépések a hamLib szerint megfelelnek.

Kalibrációs üzemmódban a tengelyek egymástól függetlenül mozgathatók; ha az egyik tengelyen eléri a végállást, a számláló lenullázódik; ha az ellenkező irányba mozgatja, a számláló minden egyes lépésutasítást számol.

Ha úgy gondoljuk, hogy elértük a maximálisan lehetséges lépést egy adott tengelyen, vagy a végállást ismét megnyomjuk, akkor a maximálisan lehetséges lépéseket egy konfigurációs fájlba menthetjük el.

Normál üzemmódban a konfigurációs fájl betöltése után elindul egy TCP/IP szerver, amely dekódolja a hamLib-parancsokat, és megkapja a szöghelyzeteket. Ezeket a szögeket a konfigurációs fájlnak megfelelően lépésszámokká alakítja át. Innentől kezdve a vezérlés úgy működik, mint egy CNC-gép; a program pontosan tudja, hogy a motor hány lépést tesz a végálláshoz képest, "szabályozza" azt, hogy a beállított lépéseket ne lépje túl, és tudja, hogy az új pozícióhoz képest hány lépést kell tenni egyik vagy másik irányba. A 16. ábra a szoftver topológiáját mutatja.



16. ábra. Szoftvertopológia



17. ábra. NI-NT-USB-6001

5.3. Mérési adatgyűjtő kártya

A léptetőmotorokat egy mikrokontroller vezérli, amely ütemezi és ellátja a motorokat a megfelelő utasításokkal. A választás egy NI-NT-USB-6001es eszközre esett. Lásd a **17. ábrá**t, az NI-NT-USB-6001 egy sokoldalú eszköz, amely számos alkalmazáshoz alkalmas, beleértve a laboratóriumi kísérleteket, a kutatást és fejlesztést, valamint az ipari automatizálást. Kis mérete, hordozhatósága és könnyű kezelhetősége miatt ideális megoldást kínál számos mérési és vezérlési feladatra, például az interferometerállvány antennarendszerének mozgatására. Az NI-NT-USB-6001 a National Instruments (NI) által tervezett és gyártott többfunkciós adatgyűjtő eszköz. Az eszköz egy kis méretű, hordozható USB-alapú adatgyűjtő modul, amely analóg és digitális bemeneteket és kimeneteket, valamint számláló-/időzítőfunkciót biztosít. Az NI-NT-USB-6001 8 analóg bemeneti csatornával rendelkezik, 14 bites felbontással és 48 kS/s mintavételi sebességgel. Rendelkezik 2 analóg kimeneti csatornával, 16 bites felbontással és 2 kS/s maximális frissítési sebességgel [24].

5.4. Megépített területi egység

A különböző elektronikus alkatrészek összetartásához, valamint az antenna rögzítéséhez egy kellően stabil keretre van szükség. Ahhoz, hogy a megfelelő elemek rögzíthetők legyenek, egy olyan összetett keretet kellett létrehozni, amely több szempontnak is megfelel. Először is gondoskodni kellett a két léptetőmotor megértéséről, hiszen ezeknek köszönhetően valósul meg a forgó mozgás. Ezenkívül a mikrokontroller és a szerelőpanel megfelelő rögzítése is kulcsfontosságú. A keret egyik legkritikusabb jellemzője a súlya. A léptetőmotorok maximális terhelhetőséggel rendelkeznek. Ezt túllépve, a rendszer nem képes megfelelően működni, ami a forgó mozgást illeti. Bár a fémház a legtartósabb és legstabilabb, a súlyhatár miatt a LEGO nevű műanyag építőeszközre esett a döntés.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a LEGO ABSből, egy ipari műanyagból készül. Az antennakeret megépítése előtt 3D-modellezés ment végbe. Ez megkönnyíti az újratervezést és a megépítendő keret virtuális keretben való megjelenítését. Elkészíthetjük a szükséges alkatrészlistát is. A modellezéshez az ingyenes BrickLink studio [26] került használatra, amely lehetővé teszi az egyedi alkatrészek tervezését, a modellek importálását és exportálását, valamint építési útmutatók készítését.

Miután a terv elkészült, rendelkezésre állt a megépítéshez szükséges elemek listája. A fizikai antennaforgatót minimális mértékben kellett módosítani (lásd a **19. ábrá**t).

A projekt megépítése és tesztelése után megállapítható, hogy az megfelel-e az elvárt és meghatározott követelményeknek. A motorok megfelelően képesek forgatni a keretet, a Python alkalmazás megfelelően kezeli és továbbítja a jeleket, és az antenna mért jellemzői is megfelelnek a célkitűzéseknek.



18. ábra. Az antennakeret 3D-s kialakítása



19. ábra. Antennaforgató rendszer

6. Konklúzió

A projekt során több irányban is felmerültek továbbfejlesztési lehetőségek. Ezek közül talán a legfontosabb egy még tartósabb fémváz kialakítása, de ez jelentősen megnöveli mind az anyag-, mind pedig – ami még fontosabb – a szállíthatóságot befolyásoló súlytényezőt.

A léptetőmotoroknak meghatározott nyomatéka van, amelyet a konstrukció során szem előtt kellett tartani. Ez a probléma erősebb motorokkal kiküszöbölhető, de ez egyben a súly növekedésével is jár, ezért fontos a megfelelő egyensúly megtalálása. Meg kell említeni, hogy ha egy kódot építenek be a rendszerbe, akkor még pontosabb motorpozicionálás érhető el.

További fejlesztési lehetőség egy másik irányba, egy teljesen vízálló külső burkolat, amelynek köszönhetően a szerkezet időjárástól függetlenül kültéri működésre válik alkalmassá. További fejlesztési lehetőség egy nagyobb nyereségű, irányított fázisvezérlésű antennarendszer előerősítővel, amely pontosabb méréseket tesz lehetővé.

Ez a kutatás segítséget jelenthet olyan járműtémában, amelyet korábban az egyetemen végeztünk, mint például a könnyű repülőgépek és antennák tervezése [27, 28].

Köszönetnyilvánítás

Külön köszönet a támogatásért, a Debreceni Egyetem, Műszaki Karnak.

Szakirodalmi hivatkozások

- T. I. Erdei, Z. Molnár, N. C. Obinna, G. Husi: A Novel Design of an Augmented Reality Based Navigation System & Amp; Its Industrial Applications. ACTA IMEKO, 7/1. (2018) 57. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i1.528
- [2] T. I. Erdei, N. C. Obinna, Z. Molnar, G. Husi: Surveillance and Security System in the Building Mechatronics Research Center. In: 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), IEEE, Jun. 2017. 509–512. https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8279928
- [3] T. I. Erdei, Z. Molnár, G. Husi: Selecting Equipment and Supplies for Self-Replicating 3D Printer. ACTA Tech. CORVINIENSIS - Bull. Eng., 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/296696614_Selecting_Equipment_and_Supplies_for_Self-Replicating_3D_Printer
- [4] T. P. Kapusi, T. I. Erdei, G. Husi, A. Hajdu: Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection. Robotics, 11/4. (2022) 69. https://doi.org/10.3390/robotics11040069

[5] T. I. Erdei, G. Husi: Singularity Measurement in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory. Int. Rev. Appl. Sci. Eng., 11/2. (2020) 82–87.

https://doi.org/10.1556/1848.2020.20001

- [6] T. I. Erdei, R. Krakó, G. Husi: Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm. Appl. Sci., 12/17. (2022) 8862. https://doi.org/10.3390/app12178862
- [7] A. Masuk, I. Balajti: Mechatronics Engineering Aspects of VHF Band Antenna Design of Industry 4.0 Applications. In: 23rd International Radar Symposium (IRS), IEEE, Sep. 2022, 77–82. https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9905051
- [8] D. A. Bradley, N. C. Burd, D. Dawson, A. J. Loader: Mechatronics Electronics in Products and Processes. 1st ed. London, Routledge, 2018. https://doi.org/10.1201/9780203747735
- [9] U. S. Dixit, M. Hazarika, J. P. Davim: History of Mechatronics. In: A Brief History of Mechanical Engineering. Springer, 2017. 147–164. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42916-8 7
- [10] P. Hariharan, K. Creath: Basics of Interferometry. Phys. Today, 46/1. (1993) 75–75. https://doi.org/10.1063/1.2808787.
- [11] "How Do Interferometric Systems Work," Renishaw. [Online]. Available: https://www. renishaw.com/en/how-do-interferometric-systems-work--38612
- [12] M. M. Wang, J. Zhang: Machine-Type Communication for Maritime Internet-of-Things. Springer International Publishing, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77908-5
- [13] D. L. Sengupta, T. K. Sarkar: Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the Early History of Electromagnetic Waves. IEEE Antennas Propag. Mag., 45/2. (2003) 13–19.

https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1203114.

- [14] B. A. Kemp: Resolution of the Abraham-Minkowski Debate: Implications for the Electromagnetic Wave Theory of Light in Matter. J. Appl. Phys., 109/11. (2011) 111101. https://doi.org/10.1063/1.3582151
- [15] Y. Liu, H. Yang, S. Mao, J. Zhu: A Multibeam Dual-Band Orthogonal Linearly Polarized Antenna Array for Satellite Communication on the Move. Int. J. Antennas Propag., 2015. 1–8. https://doi.org/10.1155/2015/102959.
- [16] D. F. Sievenpiper et al.: Experimental Validation of Performance Limits and Design Guidelines for Small Antennas. IEEE Trans. Antennas Propag., 60/1. (2012) 8–19.

https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2167938.

[17] N. I. Miridakis, D. D. Vergados: A Survey on the Successive Interference Cancellation Performance for Single-Antenna and Multiple-Antenna OFDM Systems. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 15/1. (2013) 312–335.

https://doi.org/10.1109/SURV.2012.030512.00103.

- [18] A. Szántó, S. Hajdu, G. Á. Sziki: Dynamic Simulation of a Prototype Race Car Driven by Series Wound DC Motor in Matlab- Simulink. Acta Polytechnica Hungarica, 17/4. (2020) 103–122. https://doi.org/10.12700/APH.17.4.2020.4.6.
- [19] C. Pollock, J. D. Wale: *Hybrid Stepping Motors and Drives*," Power Eng. J., 5/1. (2001). 5–12. https://doi.org/10.1049/pe:20010101.
- [20] G. Á. Sziki, A. Szántó, J. Kiss, G. Juhász, É. Ádámkó: Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen. Appl. Sci., 12/19. (2022) 10095. https://doi.org/10.3390/app121910095.
- [21] A. Szántó, É. Ádámkó, G. Juhász, G. Á. Sziki: Simultaneous measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia. Measurement, 204. (2022) 112135.

https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135

[22] I. Don Labriola P.E. President, QuickSilver Controls, "The Hybrid Servomotor: Stepping up to Closed Loop," Motion Control Tips. [Online]. https://www.motioncontroltips.com/the-hybridservomotor-stepping-up-to-closed-loop/

- [23] "28BYJ-48-64 64:1 Stepper Gearmotor," Solarbotics. [Online]. https://www.solarbotics.com/ product/22310/
- [24] "NI USB-6002 Low-Cost DAQ USB Device," NI. [Online]. https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ usb-6002-specs/resource/374371a.pdf
- [25] T. Istvan Erdei, R. Krako, N. David Peter, G. Husi: 3D CAD Design of KUKA Robot Arm & Amp; Integration into AR Environment to Educational Purposes. In: IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), IEEE, Sep. 2022, 590–596.

https://doi.org/10.1109/PEMC51159.2022.9962864

- [26] "LEGO® Digital Designer," BrickLink Studio. [Online]. Available: https://www.bricklink.com/ v3/studio/download.page
- [27] A. Masuk, H. Géza: Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV. Recent Innovations in Mechatronics, 9/1. (2022).

https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4.

 [28] A. Masuk, H. Géza: Uses of Aero Graphene and CNT in Modern Aircraft. AIP Conf. Proc., 2941. (2023) 020029.
 https://doi.org/10.1062/5.0181254

https://doi.org/10.1063/5.0181354.