

INSPHAERA MOTION SZIMULÁTOR KUTATÁS – FEJLESZTÉSE

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE INSPHAERA MOTION SIMULATOR

Dr. Király Zoltán^{0000-0002-6808-3856*}, Balog Péter⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁹¹⁰⁴⁻⁰⁶⁵¹, Balog Barnabás⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰³⁻²⁵⁸⁰⁻⁰⁶⁸¹

¹ Informatika Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Pallasz Athéné Egyetem, Magyarország
² Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Pallasz Athéné Egyetem, Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2023.1.CSC.004>

Kulcsszavak:

INSPHAERA
Szimulátor
Mozgásszimuláció
Giroszkópikus
Kinetika

Keywords:

INSPHAERA
simulator
motion
gyroscopic
kinetics

Cikktörténet:

Beérkezett 2022. október 10.
Átdolgozva 2022. október 31.
Elfogadva 2022. november 5.
Kiegészítve 2023. február 17.

Összefoglalás

Munkatársaink olyan eszközt hoztak létre, amelynek prototípusa a teszteket követően képes megoldani közúti járművek, speciális járművek, jellemzően földi, vízi, vagy légi járművek mozgásszimulációját úgy, hogy zárt, körbe határolt területen folyamatos „G” terhelést szimulál. Az eszköz az eddig alkalmazott szűkös mozgásterű hidraulikus és elektromos mozgatószervek helyett többtengelyes giroszkóp konstrukció és lineáris aktuátorok kombinációját használja. Ennek a kialakításnak köszönhetően több olyan erőhatás modellezhető és valóságúen visszaadható, amelyek az eddig épült szimulátorok esetében kivitelezhetetlenek voltak. Az INSPHAERA berendezéssel lehetőség van valamennyi olyan jármű irányításának kiképző szintű gyakorlására, amelyek használata a valóságban is igényli az egyensúly érzéket, és amelyek használata során a külső erőhatások mérhető hatással vannak az emberi érzékszervekre. A technológiával a reakciók a valóságot megközelítő sebességgel és érzettel adhatnak jóval valóságúbb visszacsatolást. Az INSPHAERA kiképzés során még a földön eljuthat a pilóta arra a szintre, hogy a már begyakorolt műveletek kis költséggel, százszázalékos biztonságban rutinná válhassanak. A kereskedelmi nagygépes szimulátorokhoz hasonlóan vészhelyzeti esetek is gyakorolhatók, azaz a kritikus pillanatokban a pilóta reakcióját nem késlelteti vagy korlátozza a külső erőhatások okozta meglepetés, és a G terhelés alatt jelentősen változó kormányozdulatok, erők megváltozása.

Abstract

Our team has created a prototype device that, after testing, can simulate the motion of road vehicles, special vehicles, typically land, water or air vehicles, by simulating a continuous "G" load in an enclosed area. The device uses a combination of multi-axis gyroscope design and linear actuators instead of the narrow-range hydraulic and electric kinetic motion systems used to date. As an effect of the method, several force effects can be modeled

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: kiru@uniduna.hu

and rendered realistically, which were impracticable in the case of simulators built so far. With the INSPHAERA equipment, it is possible to practice the use of all aircraft at a high level (training level), the use of which in reality also requires a sense of balance, and during the use of which the external forces have a measurable effect on the human senses. With the technology, the reactions can provide much more realistic feedback with a speed and feel close to reality. During the INSPHAERA training, even on the ground, the pilot can reach the level where already practiced operations can become routine at low cost and in 100% safety. Similar to commercial mainframe simulators, emergency cases can also be practiced, i.e., in critical moments, the pilot's reaction is not delayed or limited by surprise caused by external force effects, and significantly changing steering movements and forces under the G load.

1. A fejlesztés célja

A fejlesztés célja egy olyan eszköz prototípusának létrehozása, amely a jelenlegi ismereteink szerint képes megoldani a földi, vízi, légi járművek mozgás szimulációját úgy, hogy képes hosszabb idejű erőhatások létrehozására a giroszkóp konstrukció felhasználásával. A projekt mögötti fő elgondolás a forgó mozgás során fellépő normális irányú gyorsulások alkalmazása szimulációs célokkal.

A módszer hatásaként a több olyan erőhatás modellezhető és hatása valóságosan visszaadható, amelyek az eddig épült szimulátorok esetében nehezen kivitelezhetőek vagy nem költséghatékony módon voltak megvalósíthatóak. A rendszer üzemelésekor folyamatos pozitív és negatív erők visszaadása lehetséges, továbbá olyan mozgások visszaadására nyílik lehetőség, amelyek nagy sebességgel követik egymást. Ezzel megnyílik az út valamennyi olyan légi jármű (műrepülőgép, helikopter, sárkányrepülő siklóernyő stb.) magas szintű kiképző gyakorlására, amelyekben a külső erőhatások az emberi érzékszervekre hatással vannak, és a valóságban is igénylik az egyensúlyi szervek használatát.

A hagyományos rendszerek általában pillanatnyi erőkkel operálnak (valójában a normál gravitáció és a gyorsulási komponenssel) – azt is általában a mozgató rendszer 600-1200 mm-es mozgás tartományán belül – (Stewart platform, pl. <https://dubai.tft.aero/info/blog/full-motion-platform-for-aviasimulator>), így bár adnak visszacsatolást a jármű vezetőjére ható erőkről, ez a legtöbb esetben csak nagyon rövid időre kerül szinkronba a látványvilággal és hanghatásokkal. Jellemzően a gyakorlatban már repült professzionális pilóták, akik már a rendkívül költséges valóságos kiképzést követően próbáltak szimulációban repülni, valamennyien inkább zavarónak érzik a korlátozott mozgást, emiatt kevésbé jól teljesítenek a csak szimulátorban „repült” alanyokkal szemben.

Ezzel a technológiával a pilótára ható erők a valóságot megközelítő módon adhatnak visszacsatolást. A kiképzés során még a földön eljuthat a pilóta arra a szintre, hogy a már begyakorolt műveletek aránytalanul kisebb költségen, százszázalékos biztonságban rutinná válhassanak. A kereskedelmi „nagygépes” szimulátorokhoz hasonlóan vészhelyzeti szimulációk is gyakorolhatók, azaz a kritikus pillanatokban a pilóta reakcióját nem késlelteti, korlátozza a külső erőhatások okozta meglepetés, és a G terhelés alatt jelentősen változó kormányozdulatok és erők megváltozása. A nemzetközi összefogás eredményeképpen pl. megépült a Desdemona motion szimulátor (<https://desdemona.eu>), amelyhez nagyon hasonló az INSPHAERA fejlesztés, de rendszerük meglehetősen méretes és kifejezetten a kereskedelmi és katonai repülés szimulálására fókuszál, mind méretben (több tonnás), megawatt nagyságrendű energia igénye egyben a legsúlyosabb korlátja is a felhasználásnak. A szimulálható mozgás terén szükség van az ettől eltérő ultra mozgékony rendszerre, mobil típusokra, amelyek kiszériás sorozatgyártása, modularitása széles körben elérhetővé válik.

Az INSPHAERA szimulátor több különböző alkalmazási területen is hasznosítható előnnyel bír, melyek elsősorban kis méretéből és tömegéből, és a fő funkciók céltudatos tervezéséből adódnak. A gép tervezésének egyik fő kritériuma a nagy nehézségi erők biztonságos előállítás, mely ugyanúgy a repülésoktatási, mint a szórakoztatási felhasználások szempontjából jól hasznosítható funkció. A kutatási célú szimulátorokkal szemben nem szükséges továbbá a laboratóriumi környezet, mely egyszerűsítés lehetővé teszi a szerkezet mozgathatóságra való tervezését. A berendezés részét képező egyszemélyes könnyű kabin miatt a tervezett szimulátor mérete és tömege jelentősen csökkenthető. Különösen jelentős ez a szimulációs mozgás kinetikai tranzienseinek szempontjából. A csökkentett tömeg és a kisebb befoglaló méret több előnyös következménnyel jár, amelyek közül néhányat kiemelhetünk:

- akár mobil verziót hozhatunk létre, szállítható könnyű, gyors telepítéssel,
- sorozatgyártás lehetősége, a tervezett termék piaci pozicionálásának kulcsaként,
- az elhelyezés nem korlátozódik nagyobb csarnokokra, súlyos monolit gépalapokkal,
- jelentősen kisebb teljesítmény igény és energiafelhasználás,
- kedvezőbb irányíthatóság, dinamika.

Összefoglalva elmondható, hogy a projekt sikeres megvalósulása esetén egy olyan repülőgép szimulátor készülhetne el, mely komoly úrtölt ki a szórakoztatásban, oktatásban, kiképzésben.

2. A K+F tevékenység

2.1. Matematikai modellezés, követelmények meghatározása, koncepcionális tervezés

A projekt kezdetén az INSPHAERA kinetikai rendszerének követelményeire, elsősorban a szükséges szabadságfokok meghatározására és a kinetikai háttér feltérképezésére fókuszáltunk. Ehhez szükségünk volt olyan tipikus jármű mozgásokat leíró telemetria adatsorokra, amelyek felhasználásával elemezhetőek voltak az előállítandó erőhatások és az egyes szimulátor modell koncepciók összevethetőek egymással. Az első lépések során kiválasztottuk a projektben alkalmazandó szoftvereket is, a matematikai modellek elkészítéséhez a Matlab szoftvert, a koncepcionális és gépészeti tervezéshez a Creo CAD programot használtuk.

Definiáltuk a szimulátor vezérlés számára szükséges a szimulátor szoftverből érkező input adatokat, azaz meghatároztuk a szimulátor vezérlés általános bemeneti interfészét. Így a különböző szimulátor szoftverekhez már csak illesztéseket kell megvalósítani, amik a szoftver kimeneti adatait, a vezérlés általános interfészéhez alakítják. Az illesztést elsőként az X-Plane 11 repülő szimulátor szoftverhez készítettük el. Próbarepülések alapján előálltak a tesztadatsorok, amelyek alkalmasnak bizonyultak az egyes manőverek azonosításához és a pilótát érő erőhatások statisztikai elemzéséhez. Az így kapott adatok alapján meghatároztuk, hogy a szimulátortól 3G tartós terhelés előállítását várjuk el, és ez az erőhatás tetszőleges irányban hathat a pilótára. További elvárásként rögzítettük, hogy korlátozott mozgástartományban (400 mm) vízszintes és függőleges irányú maximálisan 0.5G nagyságú erőhatásokat is létrehozunk, annak érdekében, hogy a rövid idejű dinamikus hatások szimulálhatóak legyenek (pl. repülés közbeni turbulencia, földet érés, stb.). A kabint forgató tengelyekre 180 fok/s maximális szögsebességet, míg a lineáris mozgásokra 200 mm/s sebességet céloztunk meg.

Elkészítettük a szimulátor kinetikai rendszerének általános matematikai leírását [1] úgy, hogy a matematikai modellben paraméterekkel megválasztható a szabadságfokok száma és az egyes szabadságfokok (szegmensek) elhelyezkedése az öt megelőző szabadságfok koordináta-rendszerében. A szabadságfokok típusuk szerint lineáris elmozdulásra vagy csuklótengely körüli elfordulásra képesek (a továbbiakban: csuklók). A modell alkalmassá vált arra, hogy az inputként kapott pillanatnyi csuklópozíciók, (szög)sebességek és (szög)gyorsulások alapján kiszámítsa a rendszer végpontjának pozícióját.

A kinetikai modellre alapozva létrehoztuk a rendszer dinamikai modelljét, amelyben már figyelembe vesszük a rendszer tömegeit és tehetetlenségi nyomatékait és az aktuális dinamikai állapotát is. Az inputként megadható csuklóerők, illetve nyomatékok, valamint az időlépés alapján a modell számítja a rendszer új dinamikai állapotát. Ezzel a hardver nélkül is lehetővé vált a leendő vezérlési algoritmus működésének elemzése.

A vezérlő szoftver fejlesztéséhez [2] kialakítottunk egy iteratív metódust, amivel a szimulátor vezérlése a különböző szimulált járműfajtákhoz vagy konkrét járműtípusokhoz optimalizálható. A

módszer figyelembe veszi az érzékszerv átviteli függvényét [3][4][5] (a tapasztalt érzetet), és az érzékszervekben keletkező érzetet súlyozni lehet aszerint, hogy az mekkora hatással van az érzet összképében. A szoftver az érzékelési modell segítségével összehasonlítja a szimulátor szoftver kimenetéről közvetlenül tapasztalható érzetet és a vezérelt szimulátor hardverben tapasztalható érzetet, és egy hibafüggvény használatával mutatószámokká alakítja, így jellemezve a szimuláció „jósaág” -át.

Meghatároztuk a vezérlő szoftver komponenseit, ezek az alábbi feladatokat hajtják végre:

Interfész a szimulátor szoftver illesztő programhoz: Fájlból olvasva az adatsort a vezérlés tesztelése a szimulátor szoftver nélkül is lehetséges, és így a különböző paraméterezéssel vagy szabályozó modullal történő futások eredményei összevethetők.

Input adatsor korrekciója: Mivel a szimulátor szoftverek nem mindig szolgáltatnak minden szükséges adatot a vezérlésnek, az adatok viszonylag nagy és nem egyenletes időközönként érkeznek, ezért interpolálással, az adatok kiegészítésével és újra mintavételezésével tesszük a vezérlés számára használhatóvá az adatsort.

Korrigált input adatok szűrése: Alkalmassá a zajok eltávolítására, szétválasztja a gyors és lassú változású erőhatásokat, így a legnagyobb tehetetlenségű giroszkóp tengely vezérlése csak a lassú hatások alapján történik.

Érzékelési modell kezelése: Az érzékelési pontokban keletkező dinamikai hatásokat és az érzékszervek átviteli karakterisztikáját felhasználva a keletkező érzeteket számítja, így a szimulátorban elhelyezkedő személy testrészein, érzékszerveiben keletkező hatások modellezhetők.

Szabályozás: A pillanatnyi rendszerállapot és a dinamikai modell ismeretében minden időlépésben kiszámítja az input adatok alapján elvárt új rendszerállapotot és ennek eléréséhez az egyes csuklóknál szükséges beavatkozóerőket, illetve nyomatékokat a paraméterezett limit értékeket is figyelembe véve.

Beavatkozó interfész: A beavatkozó jeleket átalakítja motorvezérlő parancsokká és továbbítja a szimulátor hardver motorvezérlőinek.

Jeladó interfész: Ezen keresztül a vezérlő szoftver kiolvassa a hardver pozícióját, hibajelzését vagy vészleállítást. Ha a hardver nem áll rendelkezésre, helyette a dinamikai modell állapotát használjuk.

Paraméterek kezelése: Meghatározzák a vezérlő egyes komponenseinek működését.

Ekkor tehát elkészült a szimulátor szoftver illesztő program egy mintája, amely az X-Plane 11 repülés szimulátor szoftverhez kapcsolódva a szükséges adatokat átveszi, és továbbítja a vezérlő szoftver felé. Az illesztő program használatával repülési adatsorokat készítettünk, köztük olyat, amelyik egy műrepülés program során jellemző manővereket tartalmazza beazonosítva a manőverek kezdő és vég pontját, a vezérlés működését így egy-egy manőverre vonatkoztatva is meg tudtuk figyelni és hangolni.

A legintenzívebb igénybevételt reprezentáló műrepülés adatsor felhasználásával elemeztük a vezérlés által előállított beavatkozó jelek nagyságát, statisztikai eloszlását. Az így nyert információk most már alkalmasak lettek arra, hogy méretezni tudjuk a beavatkozók teljesítményét, és a szerkezetet. A méretezést iterációval hajtottuk végre, a szerkezet becsült tömegéből kiindulva meghatároztuk a keletkező igénybevételt, ennek alapján a tartószerkezetet méreteztük és megkaptuk annak tömegét. Ennek megfelelően módosítottuk a dinamikai modell tömeg paramétereit és újra kiszámítottuk a keletkező igénybevételt, amíg az már nem változott számottevően.

2.2. A szimulátor részletes terveinek elkészítése

Ezt követően kezdődhetett a gépészeti tervezés és a formatervezési feladat, ami kézzelfogható eredménye a már elvégzett feladatoknak. Elkészítettük a szimulátor kabinjának formatervét, látványtervét. A látványtervet figyelembe véve többféle kabin vázszerkezeti és héjazási megoldást is megvitattunk, így kiszűrve azokat, amik az elvárásoknak valamilyen okból nem felelnek meg. A szerkezetnek meglehetősen komplex elvárásoknak kellett megfelelni, ilyenek például a lehető legkisebb tömeg, anyag és gyártási költség, megfelelő szerkezeti teherbírás és merevség, ergonómia és vizuális megjelenítés, könnyű szerelhetőség, részegységekben történő szállíthatóság, be- és kiszállás biztosítása. A követelményeknek megfelelő szerkezet kialakításról statikus modellt készítettünk, amivel a maximális terhelések és várható terhelési ciklusok alapján keletkező

szerkezeti feszültségek és anyagfáradások számíthatók és elemezhetők voltak. A modell módosítását és számításokat iteratívan végezve optimalizáltuk a kabin tömegét.

A mozgató szerkezet kialakításához is több iteratív lépésben jutottunk el. Az első szerkezeti modelleknél a motorok, hajtóművek tömegét csupán megbecsültük, hiszen nem volt ismert a kialakuló szerkezet tömege és ezáltal a hajtások teljesítményének méretezése és kiválasztása sem lehetséges. A mozgatott tömeg optimalizálása érdekében többféle szerkezeti kialakítást is megvizsgáltunk, ezek között voltak alapvetően különbözőek (például a giroszkóp tengely körüli forgás során a kabint villa tartja konzolosan, vagy a kabin vezető sínen fut), vagy kisebb mértékben eltérők (például a giroszkóp tengely körül forgó tartóvilla rácsos, illetve dobozos tartószerkezetű vagy anyagában különböző). Az elkészült statikus modellek segítségével vizsgáltuk a maximális terhelések során a szerkezetben ébredő feszültségeket, a szerkezet merevségét. Végül a mozgó szerkezeti elemek (kabint tartó villa, a kocsi és a kabint forgató gyűrűk) anyagának alumíniumot, az alapváz és a sín anyagának pedig acélt választottunk. A szerkezet hajtásának kiválasztásánál szintén több alternatívát vizsgáltunk meg, elemezve a lehetséges hajtási módok (szervomotoros, hidraulikus), elrendezések előnyeit és hátrányait. A kialakított szerkezeti és gépészeti szempontból kedvező hajtás elrendezésben azonban a két irányban működő lineáris hajtás egymással párhuzamosan működik, ez viszont nem várt problémát okozott. A kinetikai modell kialakításakor feltételeztük, hogy a beavatkozók sorosan lesznek elrendezve, így a modell a párhuzamos beavatkozókat nem tudja kezelni, így a későbbiekben szükségessé vált a modell átalakítása. Összegyűjtöttük az alkalmazható hajtások gyártóit, forgalmazóit, motortípus és hajtómű választékot, és a hajtással szemben támasztott követelmények alapján kiválasztottuk a megfelelő motor és hajtómű típusokat. A 6 szabadságfokú rendszer forgó tengelyeinek és a lineáris aktuátorainak hajtását összesen 9 db Kollmorgen szervó motor és motorvezérlő végzi (a központi főtengelyt 3, a függőleges mozgatást 2, a többi tengelyt 1-1 motor hajtja). A hajtások a tengelyeken a következő maximális nyomatékokat és erőket tudják létrehozni: főtengely 7000 Nm, vízszintes aktuátor 14000 N, függőleges aktuátor 7000 N, kabint forgató tengelyek kívülről befelé 1500 Nm, 1000 Nm és 400 Nm.

Az alap tartószerkezetet a mozgató szerkezethez igazodva azzal együtt alakítottuk, ennek megfelelően ebből is több változat született. A kiválasztott szerkezeti megoldást statikus modell segítségével tömeg optimalizáltuk a terhelések, a szerkezeti merevség és az anyagfáradás figyelembevételével. Számítást végeztünk a szerkezet stabilitására vonatkozóan és meghatároztuk a szükséges ballaszt tömeget, amit a tartószerkezeten szükséges elhelyezni.

Elkészítettük a fentiekben meghatározott szerkezet dinamikai modelljét és futtattuk rajta a műrepülés adatsor alapján a vezérlés által meghatározott terhelési adatsort (beavatkozó erők és nyomatékok a csuklópontokban). Elemeztük a keletkezett dinamikus feszültséglengéseket, rezgéseket, csillapításokat.

Finomítottuk a szabályozás működését, szinguláris helyzetek elkerülésére, manipulálhatóság maximalizálására. Megvizsgáltuk, hogy a giroszkóp forgásirány váltása felhasználható-e a szimuláció minőségének javítására. A tesztadatsorok felhasználásával elemeztük a motorok várható hőterhelését.

Összegyűjtöttük több szimulátor szoftver a szimulátor vezérlés céljára felhasználható, kívülről hozzáférhető szimulációs változóit és összehasonlítottuk azokat. Ennek alapján egységes csatolófelületet alakítottunk ki. Az egységes csatoló felület és a szimulátor szoftver közé egyszerűen megvalósítható egyedi illesztést kell implementálni.

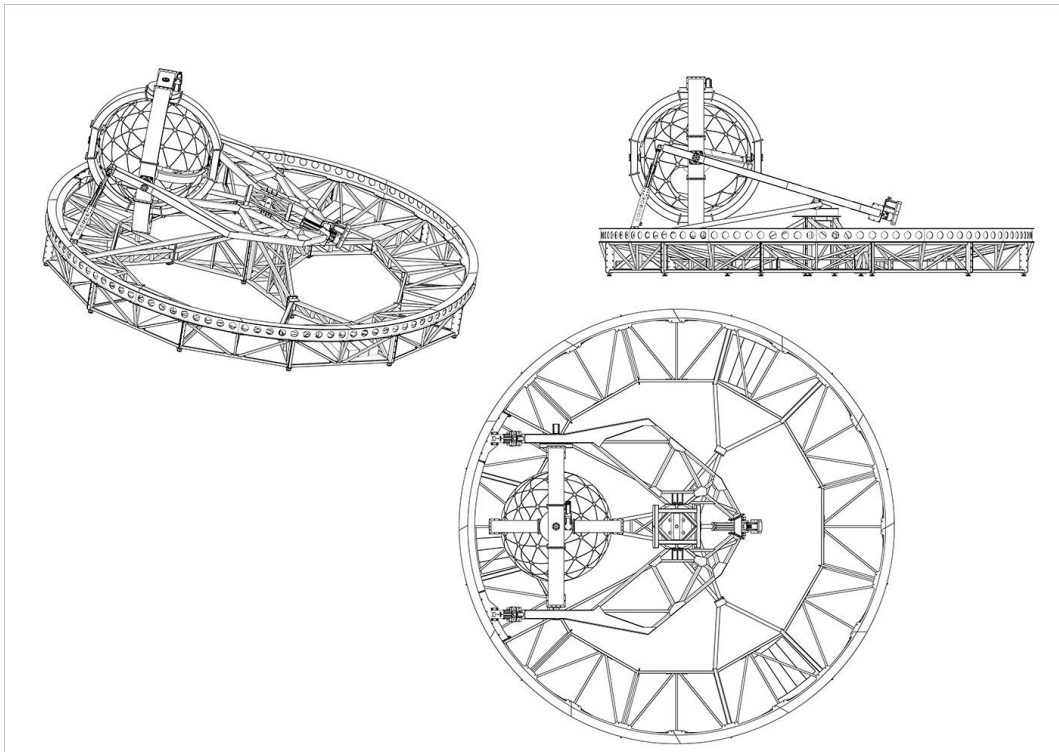
Az előző munkaszakaszban elvégeztük a szerkezeti kialakítások elemzését. Ennek megfelelően elkészültek a gépészeti főtervek. Azonban a projekt kezdetén feltételezett nyílt hurkú rendszer helyett a kialakult megoldás már zárt hurkú szerkezetet tartalmazott. Ennek következtében a szimulátor vezérlő szoftverébe beépítendő dinamikai modell már nem felelt meg az elvárásainknak, mert a nyílt hurkú matematikai modell már nem kellő pontossággal írta le a zárt hurkú rendszer dinamikáját. Így ebben a munkaszakaszban kidolgoztuk a szimulátor zárt hurkú kialakításának megfelelő dinamikai modelljét. Ennek során a korábbi matematikai leírást átdolgoztuk, megfogalmaztuk az alkalmazandó merevtest kényszerek matematikai összefüggéseit, és az új szerkezeti kialakításra alkalmazva elkészítettük a rendszer mechanikájának megfelelő matematikai modellt. A részletes gépészeti tervezés során előállt pontos tömeg és tehetetlenségi

nyomaték adatok alapján definiáltuk a dinamikai modell pontos működéséhez szükséges tömegmátrix jellemzőket.

A gravitáció és a beavatkozó erők és nyomatékok modellezésével kaptuk meg a zárt hurkú rendszer működő dinamikai modelljét. Az új modell tesztelését követően a korábban kidolgozott szabályozást sikeresen illesztettük a modellhez. Meghatároztuk a modellhez a szűrő és szabályozó paraméterek elméleti optimumát, és integráltuk a korábban kidolgozott érzékelési modellt. A biztonságtechnikai megfontolásokkal összhangban meghatároztuk és implementáltuk a modellbe a szükséges szabályozási módokat, amely a normál működésen túl lehetővé teszi a szimulátor vészleállítását, pozíciótartását, tesztelését, manuális vezérlését. A továbbiakban pontosítottuk a hajtás modellezését, hogy jobban figyelembe vegye a hajtás karakterisztikája szerinti limitációkat (nyomaték, sebesség, teljesítmény limitek). A modell működését teszteltük, a rendellenes működést okozó hibákat feltártuk és javítottuk. Elemeztük a fizikai rendszer állapotának visszacsatolási lehetőségeit a valós idejű működés során. Előkészítettük a fizikai rendszer tesztelése során alkalmazandó teszteseteket, repülési manővereket.

Részletes gépészeti tervezés során a korábban a gépészeti főtervben meghatározott elemeket a CAD szoftverben részletesen megterveztük, hogy abból az alkatrészek gyártása, összeállítása elvégezhető legyen. A gépészeti tervezés során szoros interakció volt szükséges a statikai és fáradás vizsgálatot végző munkatársakkal, mert a vizsgálatok során feltárt nem megfelelőségek esetén a javasolt változtatásoknak megfelelően a gépészeti tervet módosítani kellett, és azt újra ellenőrizni egy iteratív folyamatban, amíg minden oldalról elfogható megoldás született. A tervezés alapvetően „belülről-kifelé” történt, azaz a kabin irányából a vázszerkezet irányába, főbb egységek szerint a tervezés lépései: belső, középső és külső gyűrű (szegmensek, csapágyazás és tengely, hajtás, csúszógyűrűs forgó átvezetők); főtengely (főtengely befogása, csapágyazása, főhajtás, billenő keret és lineáris csapágyazás, csúszógyűrűs forgó átvezető); alapváz (külső és központi rácsos tartó szegmensek, ballaszt, sín); forgatókar (szegmensek, lineáris csapágyazás, külső gyűrű hajtása és lineáris hajtás); kocsi szerkezet (kocsik, összekötő szegmens, kocsi vezető rudak, kerék tengelyek, csapágyazás, magasságállító szerkezet, lineáris hajtás és alsó csuklós befogás, lineáris vezető és forgatókar csuklós kapcsolódás); kabin kezelőszervek (kézi kezelőszerv adapterek, tartó konzolok, pedál adapterek, lineáris vezetők, tartókonzolok, ülés adapter és konzol).

A fentebb említetteknek megfelelően a részletes gépészeti tervezéssel összhangban történt a statikai és fáradásvizsgálathoz szükséges modellek elkészítése, terhelések modellezése, elemzése, módosítási javaslatok elkészítése. A kialakult szerkezet végső változata az 1. ábrán látható.

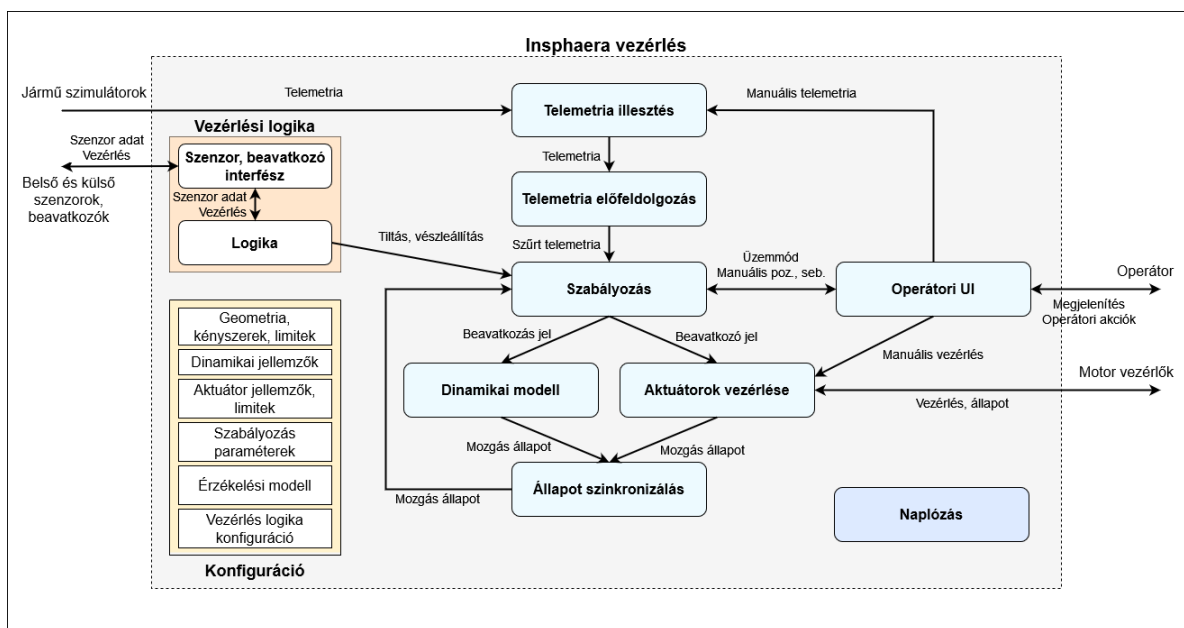


1. ábra A szimulátor szerkezeti felépítése

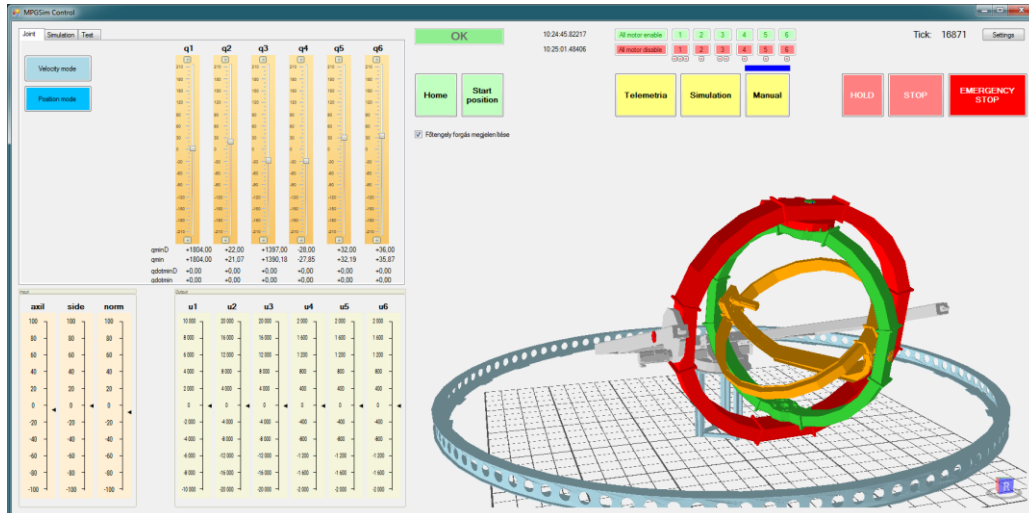
Megterveztük a szimulátor energiaellátásának, elektromos rendszerének kialakítását. Az energiaellátáshoz a tervek szerint 3x63A maximális áramfelvételre alkalmas háromfázisú hálózati forrást építettünk ki. A hajtások kiválasztásánál figyelembe vettük, hogy a motorvezérlők alkalmasak legyenek energia visszanyerésre is, ezáltal az energiaigény jelentősen csökkenthető.

2.3. A szimulátor és szimulátor vezérlés megvalósítása

A szimulátor működtetéséhez szükséges szoftver fejlesztése során két nagyobb rész kialakítását végeztük el. A szimulátorvezérlő szoftver [6][7][8] végzi a rendszer közvetlen működtetését, a szimulátor szoftverből érkező telemetria feldolgozását, a szabályozási algoritmus és üzemmódoknak megfelelően a motorok vezérlését (2. és 3. ábra).



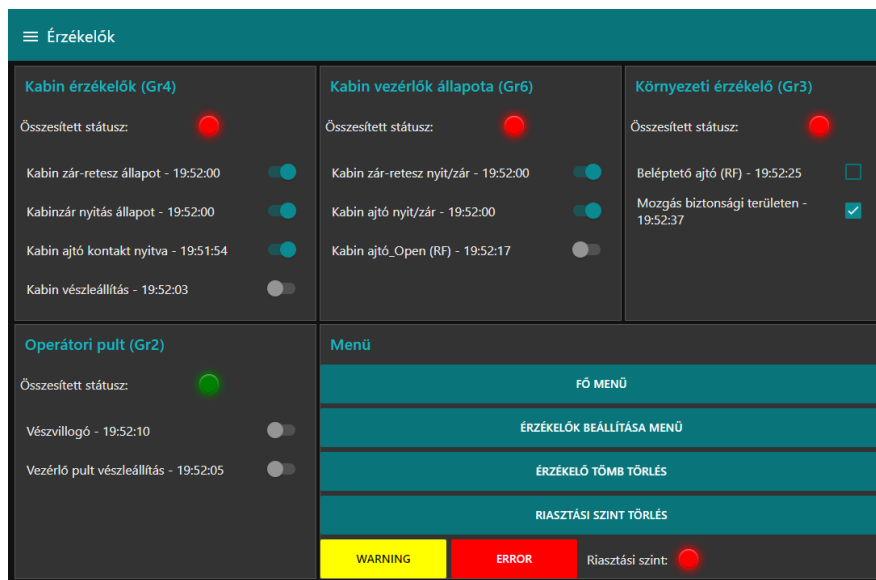
2. ábra A vezérlés logikai felépítése



3. ábra A vezérlés operátori felületének fő képernyője

A biztonságtechnikai modulnak ilyen közvetlen ráhatása nincs a szimulációra. Kezeli a szimulátoron vagy annak környezetében elhelyezett érzékelőket, beavatkozókat és az azokat működtető logikát. Érzékelő lehet a kabin reteszelés visszajelzése, a kabinban elhelyezett vészleállító vagy a szimulátor környezetét védő infrasarompó, és beavatkozó lehet a kabin zár nyitása vagy figyelmeztető fény és hangjelzés. A modul szintén kapcsolódik a vezérlőhöz, és üzemmódváltás hozhat létre a paraméterezett logikai összefüggéseknek megfelelően, például leállíthatja a szimulátor működését, mert valaki a működő szimulátor veszélyes közelségébe lépett be.

Specifikáltuk a biztonságtechnikai modullal kapcsolatos elvárásokat, a lehetséges hardver elemeket és azok kommunikációját, a működés logikáját, a paraméterezési lehetőségeket és az operátori felhasználói interfészt. Ennek megfelelően kiválasztottuk a szükséges szoftver elemeket és implementáltuk a megoldást. A 4. ábrán a biztonságtechnikai modul operátori felületének egyik panelje látható.



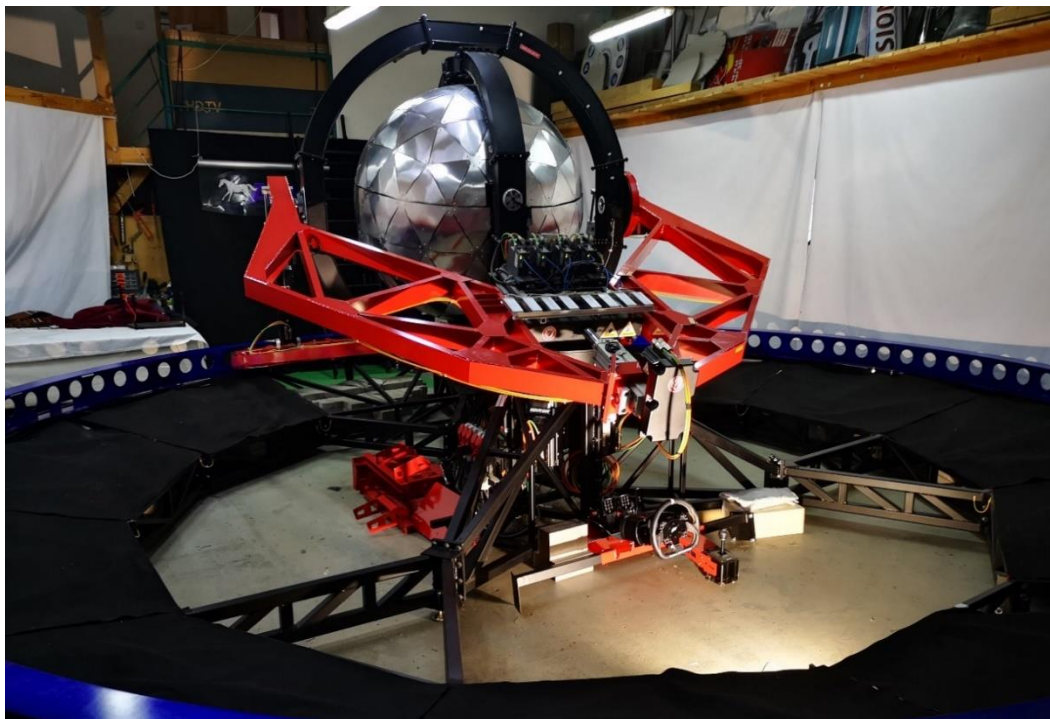
4. ábra A biztonságtechnikai modul operátori felülete (Érzékelők panel)

A szimulátorvezérlő esetében a Matlab-ban kidolgozott szabályozást és dinamikai modellt átültettük C++ kódba, illetve .NET C# környezetbe, ahol elvégeztük a valós idejű működés implementálását. A futásidő optimalizálásával a Matlab-hoz képest 3-4x gyorsabb futást tudtunk elérni, így nem volt szükség az algoritmusok átalakítására vagy további optimalizálásra.

Megvalósítottuk a vezérlő operátori felületét, ahol lehetőség van a szabályozási módok váltására, a szimulátor állapotának követésére, vészleállításra, manuális működtetésre, működési paraméterek megváltoztatására. A vezérlő a megvalósított szimulátor szoftver interfészen keresztül fogadja a külső telemetria adatokat, és a motorvezérlő interfészen keresztül adja ki a motorvezérlők felé a parancsokat és kérdezi le az állapot információkat.

A következő munkaszakaszban elvégeztük a fizikai prototípus összeszerelését: központi váz elemek, mint a főtengely, annak hajtását és csapágyazását, az erre épült billenő keretet. Ez utóbbi lineáris csapágyakkal rögzült a hajtóvillához. A váz külső szegmensei, sín, kocsi, kocsiszerkezet is megépítésre és behelyezésre került. A képen látható lineáris aktuátorok a rövid, de nagy energiájú gyorsulások átadásáért felelnek. Sorrendben a műszaki, gépészeti tervek alapján legyártott gyűrűk, gyűrű hajtások, a kabin, kezelőszervek, vizuális megjelenítők, energiaellátás és elosztószekrény, elektromos szerelés jelentették a prototípus megépítésének egyes munkafázisait. Az összeszerelés előrehaladása során a szabadságfokok mechanikai mozgását folyamatosan ellenőriztük. A hajtások motorvezérlőivel történő kommunikációját minden fázisban tesztelni volt szükséges, ezért ezeket beépítés előtt és után önállóan ellenőriztük, paraméterezését elvégeztük. Az első mozgatási tesztek a hajtások gyártó által biztosított vezérlőszoftverével végeztük el hajtásonként és baleseti, sérülés elkerülő megfontolásból korlátozott teljesítménnyel. A sikeres tesztek követően a szimulátor vezérlést alkalmazva limitált teljesítményű (50%-os terheléssel) tesztek hajtottunk végre manuális vezérlés módban szabadságfokokként külön, majd együttesen.

A biztonságtechnikai modul tesztelése során ellenőriztük a szenzor állapot jelzések megfelelőségét, a paraméterezett logikai működést, leállítási, tiltási protokollt. Következő tesztelési lépésként telemetria adatsorok alapján vezéreltük a szimulátort, végül a teljes rendszerrel a szimulátor szoftverből valós időben átvett telemetria felhasználásával teszteltük a rendszert.



5. ábra Az elkészült szimulátor

3. Összefoglalás

A teljes folyamat összességében mintegy 735 munkanapot vett igénybe úgy, hogy a komplett rendszer beüzemelése és tesztfutások súlyos problémát nem hoztak felszínre. A tesztelés során jelentkező kisebb hibákat, amelyek jellemzően a vezérlő szoftvert érintették folyamatosan javítottuk, és a próbafutások során tapasztalt érzeteket is felhasználva pontosítottuk a rendszer paraméterezésén is. A termékfejlesztések és prototípus építés együttesen határozottan sikeresnek

tekinthető, hiszen a tesztek során a tervezettnek megfelelő eredményeket kaptunk vissza, súlyos meghibásodással, rendszer szintű problémával nem szembesültünk.

Az INSPHAERA motion szimulátor teljesítette a projekttől és a prototípustól elvárt teljesítményt, mindösszesen a pozitív és negatív irányban fellépő G hatások előidézését mintegy 3G mértékben, a repülés, mint komplex mozgás környezetében. A fejlesztéssel a továbbiakban a projekt tulajdonosa az Appaloosa Communication Group Kft. a következő időszakban a már piaci, értékesítési fázisban mintegy 300 órányi tesztfutást követően valós potenciállal számol. A fejlesztés nem jöhetett volna létre az NKFIH, így a Magyar Kormány és az Európai Unió támogatása nélkül.

Irodalomjegyzék

- [1] B. Siciliano and O. Khatib, Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. DOI: [10.1007%2F978-3-319-32552-1_1](https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-32552-1_1)
- [2] F. Cardullo, R. Telban, and J. Houck, "Motion Cueing Algorithms: A Human Centered Approach," NASA Langley Technical Report Server, 2004.
- [3] H. Asadi, S. Mohamed, C. P. Lim, S. Nahavandi, and E. Nalivaiko, "Semicircular canal modeling in human perception," Rev. Neurosci., vol. 28, no. 5, Jan. 2017. DOI: [10.1515/revneuro-2016-0058](https://doi.org/10.1515/revneuro-2016-0058)
- [4] H. Asadi, S. Mohamed, C. P. Lim, and S. Nahavandi, "A review on otolith models in human perception," Behav. Brain Res., vol. 309, pp. 67–76, Aug. 2016. DOI: [10.1016/j.bbr.2016.03.043](https://doi.org/10.1016/j.bbr.2016.03.043)
- [5] J. W. Grant and W. A. Best, "Mechanics of the otolith organ-dynamic response," Ann. Biomed. Eng., vol. 14, no. 3, pp. 241–256, May 1986. DOI: [10.1007/BF02584273](https://doi.org/10.1007/BF02584273)
- [6] M. Kurosaki, "Optimal Washout for Control of a Moving Base Simulator," IFAC Proc. Vol., vol. 11, no. 1, pp. 1311–1318, 1978. DOI: [10.3390/s21238079](https://doi.org/10.3390/s21238079)
- [7] R. PARRISH, J. DIEUDONNE, R. BOWLES, and D. MARTIN, JR., "Coordinated adaptive washout for motion simulators," in Visual and Motion Simulation Conference, 1973. DOI: [10.2514/6.1973-930](https://doi.org/10.2514/6.1973-930)
- [8] W. R. Sturgeon, "Controllers for Aircraft Motion Simulators," J. Guid. Control. Dyn., vol. 4, no. 2, pp. 184–191, Mar. 1981. DOI: [10.2514/3.56070](https://doi.org/10.2514/3.56070)