SÁNTHA PÉTER SZAKDOLGOZAT



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK



SZAKDOLGOZAT



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK

Sántha Péter

SZAKDOLGOZAT

Pásztázó detektorszkenner mechanikai fejlesztése

Konzulens:

Nyitrai Gábor Doktorandusz, BME fizika Témavezető: Dr. Magyar Bálint adjunktus

Dr. Hamar Gergő Kutató, tudományos munkatárs MTA-Wigner-REGARD

Budapest, 2019.

Szerzői jog \bigodot Sántha Péter, 2019.

FELADATKIÍRÁS

A feladatkiírást a tanszéki adminisztrációban lehet átvenni, és a leadott munkába eredeti, tanszéki pecséttel ellátott és a tanszékvezető által aláírt lapot kell belefűzni (ezen oldal *helyett*, ez az oldal csak útmutatás). Az elektronikusan feltöltött dolgozatban már nem kell beleszerkeszteni ezt a feladatkiírást.

NYILATKOZATOK

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen szakdolgozatot az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézete által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Kelt, 2019 december 13.

Az intézet részéről:

Nyitrai Gábor

Elfogadási nyilatkozat

Ezen szakdolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E szakdolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2019. december 13.

Dr. Magyar Bálint

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Sántha Péter (C9B7F0), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2019. december 13.

Sántha Péter

Tartalomjegyzék

El	őszó	xi			
Je	lölések jegyzéke	xiii			
1.	Bevezetés	1			
2.	GEM fóliák minőségbiztosítása 2.1. Minőség-ellenőrzés eljárása 2.2. Mérési összeállítás bemutatása 2.3. Fotoelektron-hozam és erősítés térképek	5 5 7 10			
3.	Mechanikai fejlesztés alapjai 3.1. Fejlesztés igénye	 13 13 14 17 20 22 23 			
4.	Mechanikai szimuláció 4.1. A szimuláció célja 4.2. A szimulációs modell felépítése 4.3. A szimuláció eredményei indításra 4.4. A szimuláció eredményei leállásra és kis lépésszámra 4.5. A szimuláció eredményeinek összefoglalása	25 25 26 27 28 30			
5.	Mérés és kiértékelés 5.1. A mérés előkészítése 5.2. A mérés menete 5.3. A mérés kiértékelése 5.4. A mérés eredményei 5.5. A mérés hibaforrásai	31 32 34 39 39			
6.	Összefoglalás	49			
Irc	Irodalomjegyzék 5				
Su	mmary	53			

Melléklet

Előszó

Az elmúlt évtizedekben számos forradalmi eredmény született a kísérleti fizikában. Ennek oka a technológiai fejlődés és a nemzetközi összefogás, amelyek lehetővé teszik olyan beruházások megvalósítását, mint például a svájci CERN¹, amelyben üzemelő kísérletekkel egyre többet tudhatunk meg a minket körülvevő univerzumról. Az itt és a világ más intézményeiben működő részecskedetektor-rendszerek állandó fejlesztés alatt állnak. A szerkezeti anyagok, az elektronika és az informatika fejlődésével újabb és újabb megoldások születnek az elemi részecskék érzékelésére. Ezt mutatja az is, hogy a CERN-ben található hatalmas berendezéseket folyamatosan átépítik és fejlesztik az új mérésekhez.

A nemzetközi összefogásban részt vesz hazánk is. Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontjában számos munkacsoport foglalkozik a témával, köztük a REGARD² Innovatív Detektorfejlesztő kutatócsoport is. Az általuk fejlesztett Leopard detektor szkenner segítségével részecskedetektorok komponenseinek minőség ellenőrzését végzik. A dolgozatom témája ennek a berendezésnek a mechanikai fejlesztése. A Leopard működés közben egy adott felületet pásztáz, melynek során nagy pontosságot kell biztosítani. A szkenner meghajtása rezgéseket kelt, melyek rontják a vizsgálókar végén elhelyezett optika pontosságát és ezáltal a mérések felbontását. Így a fejlesztésem célja olyan vezérlés tervezése, mellyel a léptetések során keletkezett szabad lengéseket csillapítani tudom. A feladat megvalósítására a szakirodalomból az inputshaping elvét gondoltam legalkalmasabbnak. Munkám során megismerkedtem a módszer elméleti hátterével. A feladatomhoz analóg rendszereken vizsgáltam a hatását, majd a saját rendszeremről szimulációt készítettem és végül ennek eredményeit méréssel alátámasztottam.

Dolgozatomban ismertetni fogom a részecskedetektorok működési elvét, az inputshaping módszer matematikai hátterét, a Leopard rendszer mechanikai modelljét, az azon végzett szimulációk és a rajta végzett mérések eredményeit. Ezek alapján fejlesztési javaslatot fogok tenni a detektor szkenner vezérlésére.

¹CERN: Conseil européen pour la recherche nucléaire (European Organization for Nuclear Research) https://home.cern

²REGARD: RMKI ELTE Gaseous Detector Research and Development

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek Nyitrai Gábornak a széleskörű támogatásért és iránymutatásáért. Tapasztalatai, hasznos tanácsai, javaslatai és bátorítása nélkül nem valósulhatott volna meg ez a dolgozat. Továbbá szeretném megköszönni csoportvezetőmnek Dr. Varga Dezsőnek és tudományos munkatársamnak Dr. Hamar Gergőnek odaadó munkáját, tudományos és szakmai segítségüket, idejüket és energiájukat, amit számomra nyújtottak a munkám során. Ezen kívül köszönöm nekik, hogy biztosították kutatómunkámhoz szükséges körülményeket, berendezéseket és műszereket.

Szeretném megköszönni témavezetőm Dr. Magyar Bálint támogatását, segítségét a tanszéki laboratóriumban és bátorítását a dolgozatom megírásához. Köszönet illeti Gera Ádámot, Moncz Dávidot és az MTA Wigner REGARD csoport összes tagját a közös munkáért és támogatásukért.

Végül szeretném még megköszönni Forrai Benedek, Marosi Csaba, Ritter Áron és Sípos Bence segítségét, amit a szakdolgozat megírásában adtak.

Budapest, 2019. december 13.

Sántha Péter

Jelölések jegyzéke

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és angol nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a	gyorsulás	$\frac{m}{s^2}$
G	gain - erősítés	1
s	elmozdulás	$m, \mu m$
t	idő	s, ms
v	sebesség	$\frac{m}{s}$
Y	PE yield - foto-elektron hozam	1

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ζ	csillapítás	1
ω_0	sajátfrekvencia	Hz
ω	frekvencia	Hz

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
i	általános futóindex (egész szám)
RMS	négyzetes közép érték
AVG	átlag érték
MAX	maximális érték

1. fejezet

Bevezetés

A modern nagy energiás fizikában a kutatók folyamatosan arra törekednek, hogy egyre nagyobb teljesítményű részecskegyorsítókat és egyre pontosabb részecskedetektorokat építsenek. Ezen berendezések segítségével a kísérleti fizikusok megerősítik vagy cáfolják jelenlegi részecske modelljeinket. A részecskedetektorokkal az elemi részecskék fizikai paramétereit, pl. energiáját, impulzusát vagy pályáját képesek meghatározni. Az is előfordul, hogy adott esetben egy új részecskét fedeznek fel. Erre példa a 2012-ben a svájci CERN-ben felfedezett Higgs-bozon [1], amely létezését ugyan évtizedekkel ezelőtt megjósolták, de azóta is hiányzó eleme volt a Standard Modellnek.



1.1. ábra. ALICE kísérlet egy ütközés során (balra), az ALICE detektor rendszer szerkezete (jobbra)

A részecskedetektorok első áttörése a CERN-ben dolgozó Georges Charpak [2] nevéhez köthető, ugyanis ő fejlesztette ki 1968-ban az MWPC¹ kamrákat. Az elemi részecskék detektálása a következő módon zajlik: a kamrákat egy meghatározott nemesgáz keverékkel töltik fel ($Ar - CO_2$, $Ne - CO_2$) és kamrában nagyon vékony (néhány 10 μm átmérőjű) szálakat melyekre nagy feszültséget kapcsolnak. A töltött részecskék a gázban haladva elektron-ion párokat hoznak létre, és az ionizáció során keletkezett elektronok sokszorozásával és begyűjtésével vizsgálják az áthaladt részecskéket. A nagyfeszültségű szálakkal ezeket a felszabadított elektronokat tudjuk érzékelni. A szálak egymástól vett távolsága határozza meg a pozíciófelbontást és a holtidőt. Ez a folyamat határozza meg a modern gáztöltésű detektorok működési elvét is.

Az MWPC alapú rendszerek hamar elterjedtek a részecskefizikai kísérletekben és a folyamatos fejlesztésnek hála számos változat készült belőlük, melyekkel képesek voltak a kutatók javítani a mintavételezési időn illetve a pozíció felbontáson. Az alapkutatásokon kívül számos új

¹MWCP - Multi-Wire Proportional Chamber (sokszálas kamrák)

felhasználási területe lett az MWPC kamráknak, ilyen például a müon-tomográfia. Itt a kozmikus müonok áthatolási képességét használják fel a kutatók és ezek segítségével képesek képet alkotni pl. geofizikai mérésekhez (vulkán kutatás) vagy biztonságtechnikai alkalmazásokhoz (nukleáris szállítmányok szűrése).



1.2. ábra. MWPC kamra felépítése (balra) forrás:http: //inspirehep.net/record/1123112/plots, GEM fóliák IROC kamrában (jobbra) forrás:[3]

A technológia fejlődésével az anódszálak egyre közelebb kerültek egymáshoz, a jobb helyfelbontás érdekében, ezzel viszont megnőtt a szikrázások és kisülések száma is, ezzel elérték az MWPC technológia fizikai korlátait. A további fejlesztések során a következő célokat tűzték ki a kutatók: olyan új detektortípus létrehozása melynek növelni tudják a mintavételezési frekvenciáját, a pozíciófelbontását és az élettartamát. Erre kínálnak megoldást a MPGD² detektorok. Ezeknek az innovatív eszközöknek az egyik fő alkotója a GEM³ fólia, melynek feltalálója Fabio Sauli volt [4]. Ez a komponens arra hivatott, hogy az ionizációnál keletkező elektron lavinákat felerősítse.

A GEM-mel szerelt újfajta detektorok annyira sikeresnek bizonyultak, hogy az LHC⁴ leállása során (LS2⁵) az ALICE⁶ kísérlet TPC⁷ detektor-rendszerben található MWCP kamrákat GEM alapú kamrákra cserélik. Ez mérnökileg nem kicsiny feladat, ugyanis az új detektorok beépítésénél a berendezés elektromos illetve gázellátó rendszere változatlan marad, illetve az adatgyűjtő rendszer átalakítása is korlátolt. Az ALICE-on kívül más detektor rendszereknél (ATLAS, CMS) is ezzel próbálkoznak. Az MWPC kamrák üzemelése során keletkező ionok zavart okoznak az elektromos térben (IBF⁸) és ezáltal torzítják a pozíció adatokat. Ezen probléma orvosolására térformáló hálókat helyeznek el a kamrákban melyek elvezetik a keletkező ionok at és stabilizálják a kamrában az elektromos teret. Ilyen megoldást alkalmaznak még például a MicroMEgas detektoroknál. Emellett viszont csökkentik a rendszer kiolvasási frekvenciáját. A GEM alapú kiolvasó kamrák ezzel szemben szinte folytonos adatkiolvasást biztosítanak és több réteg alkalmazása esetén kellőképpen visszaszorítják az IBF-et és ezáltal az elektromos tértorzulások könnyen korrigálhatóak. A fejlesztés eredményeképpen a kutatók reményeik szerint a berendezés adatgyűjtési frekvenciáját ezerszeresre tudják majd növelni (500Hz - 50kHz) és képesek lesznek javítani az elektronsokszorozást, ezáltal a felbontást is.

²MPGD: Micro-Pattern Gaseous Detector

³GEM: Gas Electron Multiplier

⁴LHC: Large Hadron Collider https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider

⁵LS2: Second Long Shutdown

⁶ALICE: A Large Ion Collider Experiment http://alice.web.cern.ch

⁷Time Projection Chamber

⁸IBF: Ion Back Flow (ionok visszaáramlása)

A GEM detektorok sokoldalú és robusztus MPGD-k. Maga a GEM egy 50 μm poliimid fólia (ált. kapton) melynek mindkét oldalát vékony ($2-5 \ \mu m$) fémes vezető bevonat (általában réz) fedi. A szerkezet érdekességét az egymástól kb. 100 – 150 μm -re található 50 – 70 μm átmérőjű lyukak alkotják, melyek belseje általában kúpos kialakítású.

Ez a sajátos geometria lehetővé teszi azt, hogy amennyiben magasfeszültséget kapcsolunk a fólia két oldalára úgy a lyukakban roppant méretű 50 $\frac{kV}{cm}$ térerősség alakul ki, melyben könnyen sokszorozódnak az elektronok. Ennek a sajátságos geometriának a gyártását kémiai maratással végzik a CERN-i MPGD műhelyben. Az ALICE kísérlet fejlesztésénél a detektáló rendszert két részre lehet bontani: belső és egy külső detektor rendszerre (IROC⁹, OROC¹⁰). Ezeknek a kamráknak a pontos műszaki leírása megtalálható az alábbi jelentésben [3]. A kivitelezéshez pontosan 128 m^2 GEM fólia gyártására és minőség- ellenőrzésére van szükség, emellett figyelembe kell venni a csere alkatrészek illetve az előzetesen várható selejtek számát is, ami körülbelül plusz 10 – 15%-ot tesz ki. A következő fejezetben részletesen bemutatom a fóliák minőségbiztosítását.



1.3. ábra. GEM geometriai paraméterei, forrás: [5]

⁹IROC: Inner Readout Chambers

¹⁰OROC: Outer Readout Chambers



1.4. ábra. CERN részecskegyorsító komplexum sematikus rajza forrás: http://cds.cern.ch/record/2117033/plots

2. fejezet

GEM fóliák minőségbiztosítása

2.1. Minőség-ellenőrzés eljárása

A bevezetőben megismerhettük a GEM fóliák alapvető tulajdonságait és felhasználását. Ebben a fejezetben a GEM fóliákon kialakuló felöleti hibákról illetve azok érzékeléséről fogok írni. Ezen kívül kitérek a fóliák minőségbiztosítási folyamatára. Az 2.1. ábrán látható példa egy GEM felületén kialakult jellemző hibára, a lyukak kimaradására.



2.1. ábra. GEM fólia elektron mikroszkópos felvétele (balra) [3], kihagyott lyukak optikai mikroszkópos felvételen (jobbra) [6]

A GEM-ek egyik hátránya, hogy a gyártás során nem javítható hibák keletkeznek a felületen, mint például az összeolvadó vagy kimaradó lyukak, szakadások illetve karcok. Mivel az előállítás drága, ezért praktikus szempont, hogy a kisebb hibákkal rendelkező fóliák is felhasználásra kerüljenek. A minőségbiztosítási elveket az alkalmazás korábbi tapasztalatai alapján (COMPASS, CMS, TOTEM, KLOE kísérletek) dolgozták ki. Minőség-ellenőrzés szempontjából fontos a fóliák minden gyártási fázis utáni vizsgálata, mely során arra törekednek, hogy a selejtes darabokat minél hamarabb kiszűrjék és az egyenletes erősítés eloszlással, maximális stabilitással és minimális hibával rendelkező legjobb fóliákat kiválasszák. A teljes kiolvasó rendszer (ROC) gyártása párhuzamosan 2 kontinensen zajlik, ezért gyártáson kívüli, szállításból és raktározásból eredő hibákat is fel kell ismerni a különböző munkaállomásokon. Számos vizsgálati módszert kidolgoztak az ALICE-TPC fejlesztési kollaboráció során. Minden mérési eredményt és vizsgálati információt egy adatbázisban tárolnak, így bármely komponens tönkremenetelénél az előélete visszakereshető. A minőség-ellenőrzés elsősorban két típusra bontható: alapszintű minőségbiztosításra (basic QA^1) és emelt szintű (advanced QA) minőségbiztosításra.

Az alapszintű minőségbiztosítást közvetlenül a gyártási helyen végzik, melynek elemei:

- tisztítás nagyfeszültséggel,
- szemrevételezés (optikai mikroszkóppal),
- áram szivárgás mérése.

Az emelt szintű minőségbiztosítást akkreditált minőségbiztosító laboratóriumokban végzik a következő módszerekkel:

- összetett magasfeszültségű tesztek,
- nagy felbontású optikai szkennelés,
- erősítés eloszlás vizsgálata.

A vizsgált GEM-eket három kategóriába sorolják, "forgalomirányító lámpa" rendszer analógiájára. "Piros" jelzést kapnak azok a fóliák, amelyek nem felelnek meg az alapvető minőségbiztosítási szempontoknak. "Sárga" jelzéssel látják el azokat a fóliákat, amelyek az alapvető teszteknek megfelelnek, viszont nem egyenletes az erősítésük, vagy nem optimális az áramszivárgásuk. "Zöld" jelzést kapnak azok a GEM fóliák, melyek minden vizsgálatnak megfelelnek. A folyamatos ellenőrzéssel a fóliák minősége garantálva van minden munkafolyamat után.

Pár szóban összefoglalnám a minőségbiztosítási vizsgálatokat. A nagyfeszültségű tisztítás esetén a GEM fóliákra 600 V feszültséget kötnek és emellett az indukálódó áramot pár tized μA alatt tartják. Ekkor szikrák keletkeznek, mivel a felületen maradt szennyeződések elégnek. Viszont amennyiben a felületen egy helyen többször is kisülés tapasztalható, ott nagy valószínűséggel valamilyen gyártási hiba található. Szemrevételezésnél egy optikai mikroszkóppal pásztázzák végig a fólia felületét, mély karcok, eltömődések, kémiai szennyeződések, túl maratott vagy összekötött lyukak után kutatva. Ezek a hibák általában orvosolhatóak egy újratisztítással, máskülönben a GEM selejtes lesz. Áramszivárgás mérésénél a GEM fólia minden szektorát párhuzamosan 500 V feszültségre kapcsolják párás környezetben, majd az áramszivárgást többcsatornás picoammeterrel mérik. Egy jó fóliánál az áram értéke hamar 500 pA alá kell esnie. Vizsgálat során minimális szikrázás tolerálható. Az összetett magasfeszültségű tesztről bővebb információ itt [7] található. Nagy felbontású optikai szkennelésnél a GEM fóliát egy 3-tengelyű optikai szkenner alá helyezik, amely végignézi a felületet. Ezzel a vizsgálattal meg tudják határozni minden egyes lyuknak a geometriáját (átmérőjét) illetve bármilyen mikroszkopikus hibát érzékel a rendszer. Ennek segítségével térképek és hisztogramok készíthetőek, melyek a lyukak geometriai paramétereinek eloszlását mutatják a GEM felületén, továbbá az erősítésre nagy hatást gyakorol a lyukak geometriája.

Az erősítés vizsgálattal határozzuk meg a fólia legfontosabb paraméterét. Ez a leghosszadalmasabb minőség-ellenőrzési eljárás, ezért csak néhány GEM fólián végzik el, általában az optikai szkenner által kategorizált fóliák csoportjából egy fólián. Az így kapott erősítéstérképek kalibráció szempontjából relevánsak. Az erősítés mérésnél a GEM fóliát egy kétdimenziós MWPC kamra fölé helyezik és egy elektromágneses nyalábbal gerjesztik a felületén az elektronokat. Ennek egyik megvalósítása a TCPD detektor, amiről később ejtek majd szót. A cél, hogy a felületen

¹QA: quality assurance



2.2. ábra. GEM lyukak geometriai vizsgálata optikai szkennerrel, belső átmérő (balra), külső átmérő (jobbra), forrás: [3]

lehetőleg egységes legyen a lyukak erősítése, aminek a küszöbértékét 10% RMS-ként² határozták meg. Az általam vizsgált Leopard detektor szkenner célja, hogy ezzel az egyedi technikával a GEM erősítését lokálisan, lyukról lyukra haladva meg tudja határozni. Ez a minőségbiztosításon túl detektorfizikai kutatásokra és fejlesztésekre is alkalmazható. A berendezés előnye, hogy egy könnyen szállítható, könnyen telepíthető és olcsó, mely viszonylag jó felbontással rendelkezik.



2.3. ábra. Egy GEM lyuk keresztmetszetének elektromos szimulációja garfield++/megaboltz szoftverrel, forrás: [3]

2.2. Mérési összeállítás bemutatása

Dolgozatom tárgya az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont REGARD^3 kutatócsoport által fejlesztett Leopard pásztázó rendszer. Ez egy acélvázra erősített 3 dimenzióban mozgatható optikai rendszerből és a hozzá tartozó adatkiolvasó rendszerből áll. Ez a berendezés a korábban bemu-

²RMS: Roots Mean Squer (négyzetes közép)

³MTA "Lendület" Innovatív Detektrofejlesző kutatócsoport: http://regard.kfki.hu

tatott optikai és erősítés vizsgálatot látja el a minőség-ellenőrzés során. A szkenner funkciója az alá helyezett MPGD detektorok nagy felbontású 2 dimenziós feltérképezése az UV fotonokkal gerjesztett válaszjelből. Az eszköz nevét az általa kimért lokális erősítési térképek jellegzetes mintája után kapta.

A három egymásra merőleges tengelyt golyós orsós megvezetésen keresztül 2.5 μm felbontású léptetőmotorok hajtják [8]. A mozgatási tartomány vízszintes (X,Y) irányban 200 – 200 mm (30000 step), függőleges (Z) irányban 60 mm (7000 step). A motor vezérlő elektronika is megtalálható a berendezés tetején. A motorok az irányítást végző szoftverből egy négyszög jelet kapnak. A négyszögjel határozza meg, hogy mikor léptessen egyet a motor. Ennek a jelnek egy paramétere változtatható, ez pedig a sleep time, ami megadja két fordítási parancs között eltelt időt mikroszekundumban. Amennyiben a sleep time kicsi, akkor kevés idő telik el két léptetés között, tehát a léptetés sebessége gyors lesz. Ellenkező esetben a sebesség lassú lesz.



2.4. ábra. Az optikai fej és a TCPD kamra sematikus vázlata, forrás: [6]

A berendezés egyik komponense az optikai fej. Ennek eleme az UV forrás, ami 240 nm hullámhosszúságú fény kibocsátására képes LED ⁴. Ennek előnye, hogy impulzus üzemmódban is használható, vagyis megfelelő elektronikával akár több száz kHz-el is. Hátránya a kis fényereje. A LED-ből kilépő sugarak először egy kis átmérőjű (pár tíz μm) diafragmán ⁵ haladnak keresztül, aminek segítségével pontforrásnak tekinthető a sugár. A mérések során jellemzően 30 és 100 μm átmérőjű pinhole-okat alkalmazunk attól függően, hogy lassú vagy gyors mérést szeretnénk végezni. A sugarakat egy 20 – 30 mm fókuszpontú aszférikus kvarc lencsével fókuszáljuk a GEM felületére, ahol a becsapódó fotonok elektronokat gerjesztenek. Az optikai fejnek része még egy kompakt videómikroszkóp, amelyet gyors szemrevételezésre illetve kalibrálásra használunk.

⁴http://www.oceanoptics.us/product/uvtop/

⁵pinhole: tűlyuk



2.5. ábra. A Leopard szkenner felépítése, forrás: [9]

A berendezéshez tartozik a vezérlő elektronika. Ennek része a motorvezérlő panel, a LED impulzust szabályzó kártya, a jelfeldolgozó adatgyűjtő kártya (LRD^6), egy RasberryPi⁷ egykártyás számítógép és egy tápellátó egység.

A Leopard vezérlője a RasberryPi miniszámítógép, amely távolról elérhető, gyors és megbízható, így kiválóan alkalmas a mérőberendezés vezérlésére és adat-feldolgozására. A Linux alapú operációs rendszerén futtatjuk a kollégáim által fejlesztett C++ alapú mérő szoftvert, amellyel vezérelhetjük és automatikusan szabályozhatjuk a rácsatlakozó részegységeket [10]. Az LDR kártya felelős a motorvezérlésért, az analóg-digitális jelátalakításért, valamint a trigger jel adaptálásáért. A Leopard rendszer működési egységeinek folyamatábráját szemlélteti a 2.6. ábra. A manuálisan szabályozható egységek a gázrendszer (palack, reduktor, rotaméter) és a nagyfeszültségű kábelekre kapcsolt nanoamper-mérők.

A LEOPARD-hoz használt TCPD⁸ detektor egy hibrid szerkezet, amely egyrészt egy GEM fólia rétegből és egy úgynevezett CCC⁹ részből áll [11]. Ezek mind a REGARD csoport fejlesztései. A CCC kamrák működésüket tekintve hasonlítanak a klasszikus MWPC detektorokhoz, szerkezete abban különbözik az MWPC-k kialakításától, hogy a szálak síkjában az anódszálak mellett negatív feszültségű térformáló szálak is ki vannak feszítve, valamint a szálsík elhelyezkedése aszimmetrikus, az alsó szegmentált katódlemezhez közelebb helyezkedik el.

A GEM technológia és a CCC szerkezet ötvözéséből született az UV fotonok detektálására szolgáló TCPD detektor. A detektor tetején egy UV-áteresztő kvarc ablakon keresztül jutnak be a fotonok és a felső katódlemez szerepét katódszálak látják el. A CCC réteg feladata a GEM-ből érkező jel további erősítése és kiolvasása [12]. A detektorkamrát 80 : 20 arányú $Ar - CO_2$ gázkeverékkel töltjük, az argonnak és a nemesgázoknak általában megfelelően alacsony az ionizációs potenciáljuk. A lavinaeffektus korlátozására alkalmas a szén-dioxid, ugyanis elnyeli a lavina során keletkezett UV fotonokat. Fontos, hogy az O_2 szint nagyon alacsony (< 0.1%) maradjon,

 $^{^{6}\}mathrm{LRD:}$ Leopard Rasberry Pi Data Acquision System

⁷http://www.rasberrypi.org

⁸TCPD: TGEM CCC Photon DEtector

⁹CCC: Close Cathode Chamber (közel katódos kamra)



2.6. ábra. A LEOPARD rendszer működési blokkdiagramja, forrás: [9]

mert az oxigén könnyen megköti a keletkezett elektronokat és ezáltal rontja az elektronsokszorozást és ezáltal a kamra hatásfokát. Ezért folyamatosan tiszta gázkeveréket áramoltatunk a kamrán $3-5 \frac{l}{h}$ áramlási sebességgel.

2.3. Fotoelektron-hozam és erősítés térképek

Mielőtt az erősítési térképekre rátérnék, ismertetni szeretném azokat a mennyiségeket amelyekkel a GEM fóliákat jellemezzük. Az első és jellemző mennyiség a foto-elektron hozam (Y¹⁰), amely megadja azt, hogy a besugárzott foton elnyelődésekor mennyi foto-elektront gerjesztett a GEM felületén. Mérések során a szkenner egy pontban $10^5 - 10^6$ nagyságrendű mérést végez (ennyiszer villan fel az UV forrás), ebből a keletkező foto-elektronok mennyisége 1 - 10%. Ennek az értéke függ a fényintenzitástól és a felület kvantum-hatásfokától. Impulzus üzemmódban az UV forrás 130 kHz frekvencián villog, ezek alapján egy pontban a mérés másodperc nagyságrendbe esik. A másik és egyben legfontosabb jellemzője a GEM fóliának az erősítés vagy elektron sokszorozás¹¹ (G). Ezt a GEM fólia túloldalán található detektor által detektált lavinából keletkezett elektronok számából származtatjuk. Az 2.7. ábrán látható hisztogram azt mutatja, hogy az egyes jelamplitúdókból (lavinaméretek) mennyit mértünk.

Mérés során az a cél, hogy erősítési térképeket készítsünk a GEM fóliák felületéről, amely megmutatja a fólia lokális tulajdonságait. A GEM elektródáira kapcsolt 300 - 400 V (TGEM¹² esetén akár 1300 V) hatására a lukakban sokszorozódnak az elektronok. A következő CCC rész erősítése egy kalibrációs méréssel meghatározható. Mivel a teljes erősítés a két effektív erősítés szorzata így a GEM erősítése könnyen visszaszámolható [13].

A mérés során keletkezett jelet az adatfeldolgozó rendszer ADC egységekben méri, amely a sokszorozódási folyamat végén keletkezett töltések számával arányos. A rendszer nulla jelre (nem keletkezik lavina) adott válasza nem zérus, hanem egy valamekkora pozitív ADC egység, amit *pedesztálnak* hívunk. A nulla jelre kapott hisztogram a rendszer zajára jellemző adott szórású

 $^{^{10}}$ Y: photo-electron (PE) yield

 $^{^{11}}$ gain

 $^{^{12} \}rm \widetilde{TGEM}$: Thick GEM, vastag GEM, jellemzően 800 μm vastag és 400 μm átmérőjű lukakkal rendelkezik



2.7. ábra. PE válasz egy GEM mérésnél [9]

Gauss-görbe, amelynek várható értéke a pedesztál. Mivel a Gauss-csúcs jól kivehető, így a jel könnyen leválasztható.

A kétdimenziós térképeket úgy készítjük el a berendezéssel, hogy az optikát a léptetőmotoros hajtással a GEM egy kiszemelt pontja fölé állítjuk. Itt megadott ideig sugározzuk a pontot a fókuszált UV nyalábbal, eközben mérjük a fotoelektron hozamot. A szoftver ebből kiszámítja a lokális erősítést a korábban megadott módszerrel, majd vezérlés továbbléptet a következő pontra. A kétdimenziós ábrán minden letapogatott ponthoz hozzárendelünk egy adott színt egy skáláról az erősítés vagy fotoelektron-hozam nagyságának megfelelően. Az PE-hozam térképeken jól kirajzolódnak az egyes lyukak kontúrjai, mivel a lyukba lőtt foton akadály nélkül áthalad azon és nem gerjeszt további elektronokat. Ezért ott az erősítés értéke szinte nullára esik. Ekkor a térképen egy sötét folt rajzolódik ki, a lyukak helyén. Az erősítés térképeken pedig a lyukhoz tartozó hatszög alakú környezetben az erősítés közel konstans, ezért definiálható a lyukerősítés, amelyet a lyukhoz tartozó területen mért erősítések súlyozott átlagaként számolhatunk ki. Ezt az értéket a térképeken a lyuk közepén fel is tüntetjük. A lyukerősítés értéke általában 1000 ADC körül alakulnak, ahol az ADC^{13} az érzékelt töltésmennyiséggel arányos mértékegység.

¹³ADC: Analog-Digital Converter reference voltage



2.8. ábra. GEM fólia felületi felvételei, videomikroszkóp (fent), PEhozam térkép (közép), erősítés (gain) térkép (lent), forrás:[14], [15]

3. fejezet

Mechanikai fejlesztés alapjai

3.1. Fejlesztés igénye

A Leopard működésekor fontos biztosítani a pontos pozíció felbontást. Abból fakadóan, hogy a GEM-ek geometriája mikronos nagyságrendbe esik az UV nyalábot is megfelelően pontosan kell az adott vizsgálati pont fölé állítani a felbontás növelésének érdekében. Ez több nehézségbe ütközik. Először is a szerkezet felépítése miatt a lelógó fém tömb, amely végére az optika van erősítve, a szakaszos léptetések hatására szabadlengésbe kezd, melynek amplitúdója adott esetben akár 200 μ m-es nagyságrendű is lehet. Mivel a gyorsulásérzékelők az optikai fej magasságában mérték a kitéréseket, a GEM fólia felületére a geometriából átszámított pontatlanság még ennél az értéknél is nagyobb (átlagosan 200 – 300 mm-es tárgytávolság mellett). Emiatt a rezgések nagyon rontják a felbontást, főleg ha azt tekintjük, hogy ez a TGEM fóliák lyukátmérőjével összeegyeztethető méret, és az átlagos GEM fóliák lyukátmérői ennél sokkal kisebbek. Mivel az optikai rendszer felfüggesztése viszonylag merev, ezért a kialakuló rezgések a felfüggesztés szögelfordulásából adódik. Az elfordulás tovább rontja a felbontásunkat.

A mechanikai fejlesztés célja a felbontás növelése, a mérési eljárás pontosabbá és gyorsabbá tétele, ugyanis egy fóliáról a nagy felbontású térkép készítése sok időt vesz igénybe. Mindezeket az eredményeket a konstrukció komolyabb változtatása nélkül kellene elérni. A feladat első lépése a valóságot jól közelítő mechanikai modell létrehozása.

Az léptető rendszer két egymásra kapcsolt vízszintes és egy a függőlegesen lelógó tömb belsejében elhelyezett léptető motorral van hajtva egy golyós orsós hajtáson és kettő lineáris megvezetésen keresztül. A motorok szögfelbontása a léptetés során megengedi a 2.5 μ m-es felbontást, ami önmagában elegendő lenne optikai felbontás tekintetében, viszont a valóságban jóval nagyobb amplitúdójú rezgések keletkeznek, ezért a kitűzött cél a 5 – 10 μ m-es felbontás elérése. A kétszeres lineáris megvezetés kellő stabilitást eredményez, de ezek mellett egy minimális 1°-os szögelfordulást megenged. A fentiek alapján a valóságot jól közelíti egy egyik végén befogott merev rúd modellje, melynek befogott végénél adott útgerjesztést viszünk bele a rendszerbe. A következő képen az optikát tartó oszlop és a rajta bejelölt mérési pontok láthatók. Ezekben a mérési pontokban voltak elvégezve a modális analízis mérései.

Fejlesztés során felmerül annak a kérdése, hogy hol tudunk beavatkozni a rendszerbe, milyen módon tudjuk csökkenteni a kialakuló szabad lengések amplitúdóit? A kérdések megválaszolására irányuló munkám során egyik kollégám dolgozata alapján indultam el [9]. A mechanikai fejlesztés eszközeként korábban elvégezték a berendezés modális analízisét, mely során sikerült feltárni a rendszer sajátfrekvenciáit, csillapításait valamint lengésképeit. A dolgozat fontos eredményeit az alábbi táblázatban foglaltam össze. Mivel a jelen dolgozat probléma felvetése már korábban



3.1. ábra. A Leopard szkenner optikai feje és a bejelölt mérési pontok a modális analízisnél [9]

is megfogalmazódott ezért kollégáim a modális analízises mérések mellet végeztek pár léptetési profilos mérést is. A feladatmegoldásnál figyelembe vettem ezeket az eredményeket, illetve a mérés kiértékelésénél a régi adatsorokat felhasználva alkottam meg a kiértékelő programot. Erről a mérés kiértékelés fejezetében fogok bővebben írni.

A rezgéscsillapítás témakörét körüljárva találtam meg az úgynevezett Input Shaping eszközét. A feladat szempontjából azért nyújt alkalmas megoldást, mert a hardver módosítása nélkül csupán a megfelelő irányítási módszerrel képesek vagyunk csökkenteni a kialakult lengéseket. A Leopard jelen rendszerében egy alkalmas vezérlést kellett terveznem, ugyanis a szabályozáshoz szükséges visszacsatolásokkal jelenleg nem rendelkezik a berendezés. Voltak próbálkozások ultrahangos távolságmérők beszerelésére, viszont ezek a mérőfej pozíciójára adnak durva becslést, a kialakult relatíve kis amplitúdós rezgéseket nem tudjuk ezzel a módszerrel vizsgálni. A végső feladat tehát a következő volt: egy vagy több alkalmas léptetés tervezése az input shaping¹ módszer segítségével, illetve a rendszer modális tulajdonságainak figyelembevételével.

3.2. Input shaping elméleti alapjai

Számos eljárás létezik, melynek célja az üzem közben kialakuló rezgések csillapítása pusztán megfelelően tervezett vezérlő jelekkel, ezek közül az egyik legegyszerűbb és leghatékonyabb az intput shaping módszere. Az 1950-es években kezdték el vizsgálni a rezgések csillapítását különböző vezérlési elvekkel, az input shaping módszer alapjait pedig 1988-ban Singer és Seering [16] fektették le. Ez egy könnyen algoritmizálható, automatizálható és rendszerekbe beágyazható módszer. Az eljárás alkalmazásához nincs másra szükség csak a rendszerünk sajátfrekvenciájára illetve csillapítására. Mivel ezek az adatok a korábban végzett modális analízis eredményeiként rendelkezésre állnak, ezért lehetőség nyílik az input shaping használatára. A legtöbb lengő-rendszer mechanikai modellje jól közelíthető egy egy vagy két szabadságfokú lengőrendszerrel, amelyben szerepelhet csillapítás. A shaping során a rendszerbe bevitt időfüggő gerjesztést (út vagy sebesség jel) változtatjuk meg úgy, hogy konvolúciót hajtunk végre a kiindulási parancs idő

¹Input shaping: bemeneti/vezérlő jel formázása

függvénye és a dirac-deltához hasonló impulzusok sorozata között. Az impulzusokat előre meghatározott amplitúdóval kell alkalmazni a megfelelő időpillanatokban annak érdekében, hogy a maradó szabadlengéseket csillapítsuk. Az impulzusokkal azt használjuk ki, hogy a kialakuló harmonikus szabadlengések ellen fázisban találkozzanak és így az amplitúdók kioltsák egymást. Ez látható az 3.3. ábrán is. Az input shaping legelterjedtebb ipari alkalmazása különféle ipari darurendszerek irányítása [17], ezen felül egyre többször találkozhatunk vele CNC megmunkáló központok pozicionáló egységeinél [18] és ipari robotok irányításánál.²

Az input shaping módszere a lineárisan rugalmas rendszerek elméletéből vezethető le legegyszerűbben. Az első lépés, egy olyan bemeneti jel generálásánál, amellyel elérhető a rezgésmentes állapot, hogy megvizsgáljuk a rugalmas rendszer impulzus válaszát. A nem csatolt, lineáris, tetszőleges szabadságfokú rezgőrendszer impulzusválasza a következő egyenlettel írható le:

$$y(t) = \left(A\frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} * Exp(\omega_0(t-t_0))\right) \sin\left(\omega_0\sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)\right),$$
(3.1)

ahol A a gerjesztő impulzus amplitúdója, ω_0 a csillapítatlan sajátfrekvencia, ζ a csillapítási tényező, t az idő, t_0 pedig az impulzus gerjesztés időpontja. Tehát ez esetben egy csatolt, kéttárolós, alul csillapított rendszerről beszélhetünk. Az impulzus általában valamilyen nyomaték vagy sebesség parancs egy aktuátor számára. Ebben a fejezetben az egyszerűség kedvéért csak



3.2. ábra. A Leopard rendszer mechanikai modelljének impulzusválasza

egy módust vizsgálok. Az 3.3. ábrán két ellen fázisú impulzusválasz szuperpozíciója látható, a rendszer rezgés nélkül halad tovább az indítás után. Ugyanez az eredmény elérhető matematikai úton a következő trigonometrikus összefüggésekkel:

$$B_1 sin(\alpha t + \phi_1) + B_2 sin(\alpha t + \phi_2) = A_{amp} sin(\alpha t + \psi), \qquad (3.2)$$

²Input shaping szemléltetése lineáris motoron: https://www.youtube.com/watch?v=GxjKSlof-cc

ahol

7

$$A_{amp} = \sqrt{\left(B_1 cos(\phi_1) + B_2 cos(\phi_2)\right)^2 + \left(B_1 sin(\phi_1) + B_2 sin(\phi_2)\right)^2},\tag{3.3}$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{B_1 \cos(\phi_1) + B_2 \cos(\phi_2)}{B_1 \sin(\phi_1) + B_2 \sin(\phi_2)}\right)$$
(3.4)

Az 3.3. ábrán is látszódik, a második impulzust a lengés periódusidejének felekor kell alkalmazni.



3.3. ábra. Két impulzusválasz függvény szuperpozíciója, forrás:[19]

Több impulzus bemenet esetén az amplitúdók a következőképen alakulnak:

$$A_{amp} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{N} B_j cos(\phi_j)\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{N} B_j sin(\phi_j)\right)^2}$$
(3.5)

$$\phi_j = \omega_0 \sqrt{(1 - \zeta^2)} t_j \tag{3.6}$$

Itt B_j jelöli a szinuszos tag együtthatóját mindegyik N impulzusnak, és t_j jelöli ezeknek az impulzusoknak a beavatkozási időpillanatát és a ϕ_j a csillapított sajátfrekvenciákat. Annak érdekében, hogy a rezgés zérus legyen az vezérlő jel végén, az A_{amp} kifejezésnek zérusnak kell lennie a vezérlőjel végét jelző időpontban azaz t_N -ben. Ez akkor lehetséges, ha a 3.5. gyökjel alatti kifejezései egymástól függetlenül zérusok, azaz:

$$B_1 cos(\phi_1) + B_2 cos(\phi_2) + \dots + B_N cos(\phi_N) = 0$$
(3.7)

$$B_1 sin(\phi_1) + B_2 sin(\phi_2) + \dots + B_N sin(\phi_N) = 0, \qquad (3.8)$$

ahol az említett B_j :

$$B_j = \frac{A_j \omega_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} Exp(-\zeta \omega_0 (t_N - t_j)), \qquad (3.9)$$

ahol A_j az N-edik impulzus amplitúdóját jelöli, t_j az N-edik impulzus beavatkozási időpontját jelöli ki és a t_N időpont pedig a vezérlő jel végét jelöli. A 3.7. egyenletek tovább egyszerűsíthetőek a következő módon:

$$\sum_{j=1}^{N} A_j Exp(-\zeta \omega_0(t_N - t_j)) sin\left(t_j \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}\right) = 0,$$
(3.10)

$$\sum_{j=1}^{N} A_j Exp(-\zeta \omega_0 (t_N - t_j)) \cos\left(t_j \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}\right) = 0,$$
(3.11)

Amennyiben N darab impulzust használunk a vezérlőjelnél, akkor az N-edik tagot is bele kell venni az előző egyenletbe. Egyszerű esetben, ha az vezérlőjelnél kettő impulzust szeretnénk használni, akkor az első impulzust időhelye legye $t_1 = 0$ amplitúdója pedig legyen $A_1 = 1$, és ekkor a 3.10.-ban szereplő két egyletrendszer kétismeretlenes lesz (A_2, t_2) és ezeket a megoldásokat könnyen meg lehet találni. Az A_2 értéke lineárisan függ a kezdetben megválasztott A_1 értékétől. Az ilyen paraméterekkel üzemelő vezérlőjelek az 3.3. ábrához hasonló hatást váltanak ki. Mivel elméletileg ezzel a módszerrel zérus szabad lengéseket kapunk vezérlőjel bekapcsolása után, ezért ezt az input shaper típust ZV³-nek nevezzük. A következő bekezdésben a különböző típusú input shapereket fogom bemutatni.



3.4. ábra. A vezérlőjel és a dirac impulzusok konvolúciója, forrás: [20]

3.3. Input shaperek típusai

A következőkben szeretném bemutatni a szakirodalomban talált, illetve később általam alkalmazott input shapereket. A különböző elvű impulzus sorozatok amplitúdóit és időhelyeit úgy kaphatjuk meg, hogy az előző fejezetben használt egyenlethez hasonlóakat oldunk meg különféle kezdeti értékekkel, peremfeltételekkel és megszorításokkal úgy, hogy eközben igyekszünk minimalizálni a beavatkozási teljesítmény kritériumát. A megszorításokat leíró egyenletek tipikusan a megengedhető amplitúdóknak adnak küszöbértéket valamint a modellezési hibákkal szembeni robusztusságot fejezik ki. A teljesítmény kritérium legtöbbször az input shaper beavatkozásának időtartama. Ez akkor jó, ha nem haladja meg az eredeti vezérlő jel hosszát, vagy ennél kisebb értéket vesz fel. A következő módszerekhez az előző fejezetben megismert egyenletek egy általános alakját fogom használni a kialakuló szabad lengések leírására:

³ZV: Zero Vibration command

$$V(\omega,\zeta) = Exp\left(-\zeta\omega t_N\right)\sqrt{\left[C(\omega,\zeta)\right]^2 + \left[S(\omega,\zeta)\right]^2},\tag{3.12}$$

$$C(\omega,\zeta) = \sum_{j=1}^{N} A_j Exp(\zeta \omega t_j) cos\left(\omega t_j \sqrt{1-\zeta^2}\right), \qquad (3.13)$$

$$S(\omega,\zeta) = \sum_{j=1}^{N} A_j Exp(\zeta \omega t_j) sin\left(\omega t_j \sqrt{1-\zeta^2}\right), \qquad (3.14)$$

ahol a $C(\omega, \zeta)$ és $S(\omega, \zeta)$ a kialakuló szabad lengés harmonikus komponensei. A következő input shaperek mind kielégítik a következő kényszeregyenleteket:

$$\sum_{j=1}^{N} A_j Exp\left(-i\omega t_j\right) = 0, \qquad (3.15)$$

$$\sum_{j=1}^{N} A_j = 1, \tag{3.16}$$

Az első input shaper az előzőekben bemutatott ZV, amely az 3.12. egyenlet zérussá tételével kapunk. Ez egy két darab impulzusból álló vezérlési sorozat, amelynél a kettő impulzus egymást fél periódussal követik. Ezt a legegyszerűbb módszert M.Smith dolgozta ki 1957-ben. A shapereket mátrixos alakban fogom felírni, ahol a sorok lesznek az impulzus sorozat amplitúdói illetve az időhelyek, az oszlopok pedig az adott sorszámú impulzust fogják jelenteni j = 1, ...N (2xN-es mátrixok). Ezeket a sorozatokat kell konvolúciónál alkalmazni a vezérlőjelen, ami a mi esetünkben egy egységugrás jel.

$$ZV = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & \frac{t_d}{2} \end{bmatrix},$$
(3.17)

$$K = Exp\left(-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right),\tag{3.18}$$

Itt t_d a kialakuló lengés periódusideje, ζ pedig a rendszer csillapítását jelöli. Gyakorlatban nehéz találni olyan paramétereket egy modellhez, amelyek segítségével a tolerálható rezgéstartományt el tudjuk érni, mivel a ZV nagyon érzékeny a sajátfrekvencia hibájára. A modellezett sajátfrekvencia gyakran eltér a valós esettől, ezért az elméletben kitalált input shapereknek robusztusnak kell lennie a lengéstani paraméterek hibájával szemben. Erről az érzékenységről később részletesebben fogok írni. Ez a feladat motiválta a robusztus shaperek megalkotását [16]. A következő módszerek alapvetően két csoportra oszthatók, derivált illetve tolerálható rezgésszint módszerekre. Az összes robusztus shapernél számolnunk kell azzal a kompromisszummal, hogy a robusztusság növelésével nőni fog a beavatkozó jel ideje is. Az egyik első robusztus shaper a ZVD⁴, amelynél peremfeltételnek az 3.12. egyenlet ω szerinti parciális deriváltját tesszük zérussá:

$$\frac{\partial}{\partial\omega} \left(Exp\left(-\zeta\omega t_N\right) \sqrt{\left[C(\omega,\zeta)\right]^2 + \left[S(\omega,\zeta)\right]^2} \right) = 0, \qquad (3.19)$$

⁴ZVD: Zero Vibration Derivative

Így a ZVD paraméterei a következők lesznek:

$$ZVD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & \frac{2K}{C} & \frac{K^2}{C} \\ 0 & \frac{t_d}{2} & t_d \end{bmatrix},$$
(3.20)

$$K = Exp\left(-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right),\tag{3.21}$$

$$C = 1 + 2K + K^2, (3.22)$$

Meg kell jegyezni, hogy ez a beavatkozás kétszer olyan hosszú ideig tart, mint az előző ZV módszer, viszont a modellezési hibákra kevésbé érzékeny. Amennyiben tovább szeretnénk növelni a vezérlés érzéketlenségét akkor szabad lengéseket leíró egyenlet magasabb rendű deriváltjait kell zérusnak választani. Így alakultak ki a zérus rezgéssel és kétszeres deriválttal rendelkező ZVDD⁵, illetve a háromszoros deriválttal rendelkező ZVDDD⁶. Ezek alakja a következő:

$$ZVDD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} \\ 0 & \frac{t_d}{2} & t_d & \frac{3t_D}{2} \end{bmatrix},$$
(3.23)

$$K = Exp\left(-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right),\tag{3.24}$$

$$C_2 = 1 + 3K + 3K^2 + K^3, (3.25)$$

illetve:

$$ZVDDD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_3} & \frac{4K}{C_3} & \frac{6K^2}{C_3} & \frac{4K^3}{C_3} & \frac{K^4}{C_3} \\ 0 & \frac{t_d}{2} & t_d & \frac{3t_D}{2} & 2t_d \end{bmatrix},$$
(3.26)

$$K = Exp\left(-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right),\tag{3.27}$$

$$C_2 = 1 + 4K + 6K^2 + 4K^3 + K^4, (3.28)$$

Ahogy itt is látszik, a robusztusságnak ára van, minden egyes magasabb szintű deriválttal egy fél periódusidőnyivel nőtt a beavatkozás ideje.

Eddig olyan shapereket mutattam be, amelyeknél zérus maradó rezgést engedélyeztünk elméletben egy adott modellezési frekvencián. Ennek ellenére a valóságban nagyon nehéz olyan modellt alkotni, ami eléri a tervezési frekvenciát, ezért az eltérés miatt nagyon rossz rezgés válaszok is születhetnek. Annak érdekében, hogy meg tudjunk valósítani egy robusztus vezérlést meg kell engednünk egy tolerálható rezgésszintet. Ezt a rezgésszintet V_{tol} -al jelöljük és azt fejezi ki, hogy a impulzus válasznál kialakult rezgés maximális túllendülésének hány százalékát engedjük meg. Az első ilyen eljárást Singhose [21] dolgozta ki a 90-es évek elején és az EI⁷ nevet adta neki. Ennek paraméterei a következők:

$$EI = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 1 - (A_1 + A_3) & A_3 \\ 0 & t_2 & t_d \end{bmatrix},$$
 (3.29)

⁵ZVDD: Zero Vibration Double Derivative

⁶ZVDDD: Zero Vibration Triple Derivative

⁷EI: Extra Insensitive shaper

Multi-hump EI Shapers for $V_{tol} = 5\%$.					
$t_i = (M_0 + M_1\zeta + M_2\zeta^2 + M_3\zeta^3)t_d$, $t_d = \frac{2\pi}{\omega}$					
$\ddot{A}_{j} = M_{0} + M_{1}\zeta + M_{2}\zeta^{2} + M_{3}\zeta^{3}$					
Shaper		M_0	M_1	M_2	M_3
Two-hump EI	t_2	0.49890	0.16270	-0.54262	6.16180
	t_3	0.99748	0.18382	-1.58270	8.17120
	t_4	1.49920	-0.09297	-0.28338	1.85710
	A_1	0.16054	0.76699	2.26560	-1.22750
	A_2	0.33911	0.45081	-2.58080	1.73650
	A_3	0.34089	-0.61533	-0.68765	0.42261
	A_4	0.15997	-0.60246	1.00280	-0.93145
Three-hump EI	t_2	0.49974	0.23834	0.44559	12.4720
	t_3	0.99849	0.29808	-2.36460	23.3990
	t_4	1.49870	0.10306	-2.01390	17.0320
	t_5	1.99960	-0.28231	0.61536	5.40450
	A_1	0.11275	0.76632	3.29160	-1.44380
	A_2	0.23698	0.61164	-2.57850	4.85220
	A_3	0.30008	-0.19062	-2.14500	0.13744
	A_4	0.23775	-0.73297	0.46885	-2.08650
	A_5	0.11244	-0.45439	0.96382	-1.46000

3.1. táblázat. EI shaperek paraméterei

$$t_2 = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta}} \left(0.499 + 0.462V_{tol}\zeta + 4.262V_{tol}\zeta^2 + 1.756V_{tol}\zeta^3 + 8.578V_{tol}^2\zeta^2 + 336.989V_{tol}^2\zeta^3 \right),$$
(3.30)

Az EI shapernek vezérlési ideje megegyezik a ZVD-vel, de a különböző amplitúdó értékek növelni tudták a vezérlés robusztusságát. A megengedett rezgésszint általában 5%körül alakul. A robusztusság növeléséhez további impulzusokat kell beletenni a vezérlő jelbe, így alakultak ki a többlépcsős EI⁸ shaperek [22] . Ezek közül a kétlépcsős EI_2 -t és a háromlépcsős EI_3 -t emelném ki. Ezek vezérlési ideje megegyezik a ZVDD és ZVDDD-ével. Ezek a paraméterek a 3.1. táblázatban láthatók:

Az előzőekben részletezett alapvető input shapereken kívül még egy fajta input shapert használtam, amelyeket G típusú shapereknek neveztem el. Ez az elnevezés onnan ered, hogy ezen a shapereknek a paramétereit genetikus algoritmussal optimalizálták. Ehhez a [18] cikkben foglalt eredményeket használtam.

3.4. Genetikus algoritmussal optimalizált input shaperek

Ahogy az előző fejezetben láthattuk, az impulzusok sorozata kielégíti a 3.15. kényszeregyenleteket. Amennyiben a vezérlési sorozat több mint kettő impulzusból áll, ezekkel a kényszeregyenletekkel végtelen sok megoldást kapnánk az amplitúdókra illetve a beavatkozási időpontokra. Ennek érdekében kellett bevezetni a többi kényszer egyenleteket, hogy kiválasszuk a megfelelő megoldásokat és kizárjuk a triviális és egyéb megoldásokat. Nyilvánvalóan a kényszeregyenle-

⁸Multi-hump Extra Insensitive shaper

teket előzetesen kell definiálni a rendszer vezérlőjelekre adott válaszainak alapján. A genetikus algoritmus (GA⁹) egy numerikus optimalizáló módszer, amely a kialakuló szabad lengéseket minimalizálja. Az algoritmus célfüggvényében a következő mennyiségekre adhatunk feltételt: pozíció hiba vagy sebesség hiba. Az input shaper robusztussága növelhető a vezérlő impulzusok számának növelésével. Emellett természetesen számolni kell a beavatkozási idő növekedésével. Ez a probléma megoldható úgy, hogy a paramétereket optimalizáljuk a célfüggvénnyel és emellett kielégítjük a 3.15. egyenletet:

$$C\acute{e}lf\ddot{u}ggv\acute{e}ny = f(kromosz\acute{o}ma), kromosz\acute{o}ma = [A_1...A_N, t_1...t_N]$$
(3.31)

A [18] cikkben egy kéttengelyű precíziós maró pozicionálását vizsgálták, ez a Leopard szkenner pontosságának növelésével analóg feladat. A megírt célfüggvény a szerszámpálya kontúrhibáját minimalizálta, mivel a kontúrhiba nem mondható meg egzaktan, ezért ezt egy becsült kontúrhibával helyettesítették. Ez a következőképpen nézett ki:

$$C\acute{e}lf\ddot{u}ggv\acute{e}ny = \sum_{j=1}^{N} \hat{\epsilon_j}, \qquad (3.32)$$

ahol $\hat{\varepsilon}_j$ a becsült kontúrhiba a j pontban. Becsült kontúrhiba alatt az aktuális pont és a referencia pontban levő pályaérintő távolságát értjük.

A genetikus algoritmusban az extrapoláció és a keresztezéses módszerek vegyítésével hoztak létre új változókat a utódok kereszteződési pontjaihoz. Tegyük fel, hogy mindegyik kromoszóma N darab amplitúdóval és időponttal rendelkezik. Az amplitúdó változó és a időváltozó párok véletlenszerűen választódnak ki a szülők közül:

$$\alpha_A = ceil \{random * N_j\} \tag{3.33}$$

$$\alpha_t = ceil \{random * N_j\} \tag{3.34}$$

Az új változók a keresztezési pontokban a következőképpen jönnek létre:

$$A_{new1} = A_{mA} - \beta_A \left(A_{mA} - A_{dA} \right), \tag{3.35}$$

$$A_{new2} = A_{dA} - \beta_A \left(A_{mA} - A_{dA} \right),$$
(3.36)

$$T_{new1} = T_{mA} - \beta_t \left(T_{mt} - T_{dt} \right), \tag{3.37}$$

$$T_{new2} = T_{dA} - \beta_t \left(T_{mt} - T_{dt} \right), \tag{3.38}$$

ahol A_{mA} az α_A -dik amplitúdó az anyai kromoszómából, A_{dA} az α_A -dik amplitúdó az apai kromoszómából, T_{mt} és T_{dt} az α_t -dik időváltozó az anyai illetve apai kromoszóma ágon, β_A és β_t tetszőleges számok az [0, 1] intervallumon.

Az optimalizációs eljárás az egységugrás gerjesztésről indul, tehát az első generációban az időváltozó zérus értéket az amplitúdó pedig 1 értékét veszi fel. Az optimalizáció végén a kiszámított amplitúdóknak teljesíteniük kell a 3.15. kényszeregyenleteket. Szimulációim és méréseim során 10, 50, 70, 100 lépésben optimalizált shapereket használtam, ezek a neve rendre G10, G50, G70 és G100.

⁹GA: Genetic Algorithm

3.5. Modális analízis eredményei

Nyitrai Gábor kollégám korábban elvégezte a Leopard berendezés modális analízisét[9], melynek eredményeként meghatározta a berendezés koordináta-rendszerében az adott irányú sajátfrekvenciákat és csillapításokat, valamint az optikát tartó oszlop lengésképeit. Arra a következtetésre jutott, hogy az oszlop elcsavarodása nem számottevő, a lengésképek lineáris jellegűek, tehát az optikát tartó oszlop nem hajlik hanem egy tömbként fordul el. A kihajlás szinte teljes egészében a felfüggesztéseken (golyósorsó, lineáris megvezető tengelyek) jön létre. A kísérleti modális analízis eredményei a 3.2. táblázatban elérhetőek. Ezek alapján kijelenthető, hogy az X irányú gerjesztésnek van a legkisebb lengésképe az 3.6. ábrán és legnagyobb csillapítása tehát mérések során ezt az irányt érdemes előnyben részesíteni.

Mérési irány	Első sajátfrekvencia	Csillapítás	Lengéskép minimum
X	15.4Hz	$22\pm6.4\%$	-0.65ADC
Υ	11.1Hz	$14\pm6.4\%$	-0.95ADC



3.2. táblázat. Modális analízis eredményei, forrás: [9]

3.5. ábra. Genetikus algoritmussal optimalizált input shaperek: G10, G50, G70, G100, forrás: [18]


3.6. ábra. A Leopard oszlopának lengésképei, forrás: [9]

3.6. Input shaperek robusztussága

Korábban láthattuk, hogy a shaperek amplitúdói és időhelyei hogyan függenek a lengéstani paraméterektől (ω , ζ). Amennyiben minimális eltérés lesz a modellezett és a valódi paraméterek között, akkor a vezérlés lefutása után nem feltétlen oltódnak ki a szabad lengések. Sőt, ahogy arra korábban kitértem például a ZV-nél nagy az érzékenység a modellezési hibákra. A robusztusság szemléltetésére érzékenységi diagramokat alkalmaznak, amelyek a maradó rezgés szintet ábrázolják a rendszer információk függvényében. A 3.7. ábrán látható 3D-s felület egy rögzített



frekvencia, forrás: [19]

csillapítási tényezőjéhez tartozó síkmetszet a jobb oldali ábra. Az adott shaper robusztusságát a frekvencia sáv szélessége határozza meg. Választani kell egy rezgésszintet, amit elfogadhatónak

tartunk és meg kell nézni, hogy az adott eljárás milyen frekvencia tartományon belül tud üzemelni. Itt is látszik, hogy a zérus rezgésekre törekedő input shaperek érzékenyek a frekvenciára, míg egy más elvű pl. EI shaper nagyon széles frekvencia tartományon működik , tehát kellően robusztus. Itt ismét szeretném megjegyezni, hogy abszolút jó megoldás nem létezik, kompromisszumok árán tudjuk csak biztosítani a megfelelő rezgéscsillapítást, ugyanis a robusztusság növelésével nőni fog a vezérlőjel beavatkozási időtartama. Ezért a vezérlés tervezésénél mérlegelnünk kell melyik a fontosabb számunkra.

4. fejezet

Mechanikai szimuláció

4.1. A szimuláció célja

A korábbi mérésekből meghatározott sajátfrekvenciák és csillapítások ismeretében megalkotható a rendszer mechanikai modellje. Munkám során azzal a következő egyszerűsítésekkel, közelítésekkel éltem:

- a rendszernek csak az egyik irányú rezgéseit vizsgáltam, így visszavezettem a problémát egy egy szabadságfokú lengőrendszerre,
- a kiválasztott irány az volt, amely irányú léptetésnél nagyobb amplitúdók keletkeztek,
- a rezgés válaszokat az adott bemenetre frekvencia tartományban vizsgáltam, a rendszert pedig annak átviteli függvényével jellemeztem,
- a gerjesztések a valósághoz hasonlóan sebességszintek megadásával történt.

A szimulációt *MatlabR*2019[©] program *Simulink*[©] moduljával végeztem. Ezen belül a *Control*- $SystemToolbox^{\odot 1}$ -ot használtam. Ahogy említettem a rezgéseket csak egy irányban modelleztem. Ennek az az oka, hogy a modális analízis mérésénél a kollégáim lemértek néhány léptetést is és ezeknek az adatoknak a feldolgozása után a következőket állapítottam meg: a léptetések szempontjából kritikus irány a műszer X iránya, ugyanis ez a mozgatási láncban a legmagasabban levő elem. Erre az optikát tartó oszlopon kívül még a másik, Y irányú mozgatásért felelős motor és annak tengelye és megvezető tengelyei is csatlakoznak, ezért a tiszta X irányú mozgatás során nagyobb tömeget kell mozgatni. A mérési adatokból az is kiderült, hogy az X irányú mozgatások kevésbé csatolódnak az Y irányú rezgésekre, ezzel szemben az Y mozgatások nagy mértékben csatolódnak az X irányú rezgésekre. Ez abból következik, hogy a tisztán Y irányú léptetéseknél is nagyobbnak bizonyultak az X irányú amplitúdók, mint az Y irányúak. Tiszta X irányú mozgatás esetén a kialakuló Y irányú rezgések nagyjából egy nagyságrenddel kisebb amplitúdókat értek el, mint az X irányúak. A mechanikai szimuláció célja, hogy a Leopardot közelítő lengőrendszernél meg tudjam mutatni azt, hogy a szakirodalomban talált input shaperek alkalmasak a kialakuló rezgések csillapítására. Az itt kapott eredményeket használtam a mérés előkészítésénél, valamint jó becslést adtak a megfelelő léptetési stratégia kiválasztásához.

¹Matlab Control-System Toolbox : https://uk.mathworks.com/products/control.html

4.2. A szimulációs modell felépítése

A szimulációt $Simulink^{\odot}$ -ben készítettem és ennek a kapcsolási vázlata a függelékben megtalálható 7. Az itt található egységek mind egy-egy input shapert reprezentálnak. Az input shapereket közvetlen a forrásokba helyeztem el lépcsős sebességjel gerjesztésként. Ezeknek a jeleknek a pontos felépítéséről később fogok szót ejteni. A gerjesztő jelek áthaladnak a rendszert reprezentáló átviteli függvényen, majd a rendszer válaszait egy scope-ban jelenítem meg. Az egyszabadságfokú lengőrendszer mozgási egyenlete a következő:

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \tag{4.1}$$

Az irodalomkutatás során számos lengőrendszert annak átviteli függvényével vizsgáltak és a rendszer válaszait az irányítástechnikából már ismert Laplace-tartományban vagy Ztartományban vizsgálták [19] [23] [20]. Ezek alapján a lengőrendszerre felírható átviteli függvény a következőképpen néz ki:

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2},\tag{4.2}$$

$$\omega^2 = \frac{K}{m}, \zeta = \frac{C}{2\sqrt{mK}},\tag{4.3}$$

ahol m a lengőrendszer redukált tömege, K a rendszer merevsége, C a rendszer csillapítási tényezője. Mivel a lengéstani paraméterek ismertek a modális analízisből, ezért az X irányú átviteli függvény² könnyen meghatározható:

$$G(s) = \frac{237.2}{s^2 + 6.776s + 237.2} \tag{4.4}$$

Ennek az impulzusválasza látható a 3.2. grafikonon.

A sebességparancsok úgy lettek betáplálva a rendszerbe, hogy a Source-ok közül kiválasztottam a RepeatingSequenceStair nevű bemeneti jelgenerátort, majd ebbe meghívtam a workspaceben definiált input shaper impulzus sorozatokat. Ezeket igyekeztem első körben úgy beírni, hogy a vezérlő jelek ne érjenek össze, kellő időt adva annak, hogy a kialakuló szabad lengések lecsillapodjanak. Az input shaperek időparamétereit a sajátfrekvenciából számolt periódusidőnek választottam. A modellezésnél a vezérlő parancsok sebesség gerjesztést visznek a rendszerbe. Ezek a sebességparancsok az 4.1. ábrán láthatók összefoglalva. Az ábrán is jól látszik, hogy a robusztusabb vezérlőjelek megnövekszik a beavatkozási ideje.

Fontos leszögeznem, hogy az ábrákon látható vezérlőjeleknek nem a léptetőmotoroknak adott feszültségjeleket értem, hanem a léptetési profilt definiáló sebesség jeleket. Ezek a jelek úgy kapcsolódnak össze a motoroknak kiadott feszültségjelével, hogy az adott forgatási sebességhez szükséges sleeptime-ot adom meg. A sleeptime a léptetőmotornak adott négyszögjelnek az a paramétere, amely definiálja, hogy két léptetés között mennyi idő teljen el. Ez a sleeptime a Leopard esetében 100 – 1500 μs között változik. Értelemszerűen a sleeptime növelésével csökken a léptetés sebessége.

²transfer function: átviteli függvény



4.1. ábra. Különböző input shaperek vezérlőjelei, sorban : ZV, ZVD, ZVDD, ZVDDD, EI2, EI3

4.3. A szimuláció eredményei indításra

Ezekre a gerjesztőjelekre adott választ a 4.2. ábra foglalja össze. Itt látszódik, hogy a sebességamplitúdók a shaperek használata esetén kisebbek, mint az egységugrás gerjesztésé. Ez a szimuláció a valóságnak úgy felel meg, hogy az álló állapotból (0. sebességszint) a rendszer felgyorsul egy adott utazósebességre (1. sebességszint). Ezt legegyszerűbb esetben egységugrás gerjesztéssel teszi meg (Step), másik esetekben pedig vezérlőjel impulzus sorozatával. Itt is látszik, hogy ezzel a módszerrel szintén igazoltam a 3.15. egyenletet. A válaszfüggvények közül ígéretes módszernek tűnik a ZV, EI2 és EI3 módszer. Az is látszódik, hogy hiába növekszik meg a vezérlőjelek beavatkozási ideje a robusztusság növelésével, rezgések lecsengési ideje nem haladja meg az egységugrás gerjesztés által generált referencia jelet. A növelt érzéketlenségű ZVDD és ZVDDD input shaperek hozták a legrosszabb teljesítményt. A megnövelt beavatkozási idő mellett a kialakult amplitúdók is meghaladták a többi módszernél kialakult amplitúdókat. Annak érdekében, hogy az itt kapott eredményeket össze tudjam majd hasonlítani a későbbi mérési eredményekkel, a túllendülés értékét normalizáltam az egységugrás gerjesztésre adott válasz maximális amplitúdójával, így a 4.1. táblázatban összefoglalt eredményeket kaptam. A szimulációs eredményeket felhasználtam a méréseknél elvárt eredmények becslésére. A mérés célja, hogy a

Mennyiség	ZV	ZVD	ZVDD	ZVDDD	EI2	EI3
Max [%]	75.02	79.52	90.38	90.87	74.35	70.15

4.1. táblázat. Szimuláció eredményei: normalizált amplitúdók indítási esetben

Leopard vezérlő rendszerébe implementált input shaperek segítségével a nagyjából ilyen mértékű rezgéscsökkentést érjek el.



4.2. ábra. Különböző gerjesztésre adott válaszfüggvények, indítás esetén

4.4. A szimuláció eredményei leállásra és kis lépésszámra

Az előző szimuláció során azt vizsgáltuk, hogy milyen a lengőrendszer egység ugrás válasza. Gyakorlati szempontból a következő két eset még relevánsabb: a rendszer leállása egy adott sebességszinten való haladás után illetve a rendszer rezgései kis lépés szám alatt, ahol a lépések száma a léptető profilokban összeér. Ez azért fontos számunkra, mert a Leopard rendszer vezérlő szoftverében az előre definiált sebességprofilok adott lépésszámmal rendelkeznek. Ha a parancsban kiadott lépésszám kisebb a gyorsító illetve lassító léptetőprofil lépésszámánál, akkor a szoftver a gyorsító és lassító ágban levő sebességszinteket összeadja. A szimulációban megadott lassulás profil megegyezik az előzőekben definiált gyorsulásprofilokkal, csak ez esetben fordítva egy adott sebességszintről fog lelassulni a 0 sebességszintre.

$$IS_{lass}(A_j, t_j) = 1 - IS_{qyors}(A_j, t_j)$$

$$(4.5)$$

Azt várjuk, hogy a lassulásnál kialakuló sebesség túllendülések ugyanazt a profilt kövessék le, mint a gyorsításnál. Ezért is lett volna elegendő az indítási esetet vizsgálni, mert ebben az esetben, ha így néz ki a lassulás profil, ugyanazok a lengések fognak kialakulni. Ahogy ez az 4.3. ábrán is látszódik a gyorsító és lassító ágak rezgései jellegre megegyeznek, ha a lassulás egy lecsillapodott, állandósult sebességszintről indul. Minimális csúszás látható az EI2 és EI3 shapereknél, ennek oka, hogy ezek periódusidejei eltérnek a többi shaperétől és ezért nem tudtam szinkronizálni az ő időjelüket a többiével. Ez a fáziscsúszás minimális és az eredményeket nem befolyásolja. Ez esetben a lecsengéseknél kialakult maximális amplitúdóra normáltam a többi időjelet, hogy megkapjam mekkora maradó lengések maradtak a leállás után. Ez a maximális túllendülés az előzőekhez hasonlóan szintén az egységugrás jelnél alakult ki.

Mennyiség	ZV	ZVD	ZVDD	ZVDDD	EI2	EI3
Max [%]	24.28	12.31	72.12	72.41	21.77	8.975

4.2. táblázat. Szimuláció eredményei: normalizált amplitúdók kis lépésszám esetén



4.3. ábra. Különböző gerjesztésre adott válaszfüggvények, teljes léptetési szakasz során(normalizált értékek)

A másik érdekes vizsgálati tartomány a szkenner módban használt kis lépésszámok. Általában ha egy GEM lyukat szeretnénk pásztázni, akkor nagyjából 10-50 léptetést kell használnunk. Ahogy korábban említettem ilyen lépési tartományban összeérhetnek a gyorsítást és lassulást definiáló léptető profilok. A szimuláció esetében ezt nem tettem meg, csupán annyit vizsgáltam, hogy mi történik akkor, ha a két léptetési profil összeér, és nem lép fel állandósult utazó állapot. Ennek eredményei a 4.4. ábrán láthatóak. Itt elmondható, hogy a ZV és ZVD shaperek bizonyultak a legjobbnak, mivel ezeknek minimális a beavatkozó impulzus számuk és náluk alakultak ki a legkisebb amplitúdók. Az előzőhöz hasonlóan itt is a lecsengésnél kialakult maximális amplitúdóra normáltam az időjeleket.

Mennyiség	ZV	ZVD	ZVDD	ZVDDD	EI2	EI3
Max [%]	24.1	34.5	68.57	87.74	22.24	14.56

4.3. táblázat. Szimuláció eredményei: normalizált amplitúdók kis lépésszám esetén

4.5. A szimuláció eredményeinek összefoglalása

A szimulációk során láthattuk, hogyan viselkedik a lengő rendszer a különböző vezérlési parancsok hatására. A legígéretesebb input shapereknek az EI2, EI3, ZV és ZVD shaperek tűnnek. Ezek nagymértékben csökkentik a kialakuló sebességamplitúdókat és viszonylag rövid a beavatkozási idejük. Ez a kis lépésszámoknál is nagy előnyt jelent. Amennyiben az input shaperek robusztusságát is figyelembe vesszük az EI2 és EI3 shaperek tűnnek a legjobb választásnak. A genetikus algoritmusok által elért eredményeket és diagramokat3.5 az előző fejezetben ismertettem.



4.4. ábra. Különböző gerjesztésre adott válaszfüggvények, kis lépésszám esetén(normalizált értékek), függőleges vonal jelöli a leállás kezdetét

5. fejezet

Mérés és kiértékelés

5.1. A mérés előkészítése

A Leopard rendszer felépítését és működését a korábbi fejezetekben ismertettem. A mérés célja, hogy bebizonyítsam az általam javasolt rezgés csillapítási eljárások hasznát és a szerkezet léptetéskor kialakuló rezgéseit csupán szoftveres megoldásokkal csökkenteni tudom. A kiértékelés célja, hogy az általam illetve a kollégáim által végzett korábbi mérések eredményeit kvantitatív módon meg tudjam vizsgálni, és ezek alapján javaslatot tegyek egy megfelelő léptetésprofilra, melyet később a Leopard rendszer vezérlésébe tudunk implementálni.

A mérés előkészítésének része volt a különböző léptetési stratégiák parancssorainak generálása. Olyan scripteket kellett készítenem, melyek egy adathordozóval betáplálhatóak a Leopard vezérlésébe(RPi) és ott az előre definiált SpeedProfiles paranccsal be tudjam olvasni. Itt a sebességprofilok scriptjei olyan .ini kiterjesztésű fájlok, melyekben egy oszlopban vannak leírva azok a sleeptime-ok, amik a sebességszinteket jelölik a felfutási illetve leállási szakaszokon. Az *ini* fájl felépítése a következő : Accceleration mellette a profil lépéseinek száma, egy oszlopban a. gyorsító profil sleeptime-jainak sorozata, majd Deceleration mellette előzőhöz hasonlóan a profil léptetéseinek a száma, majd egy oszlopban a megállási profil sleeptime-jainak sorozata. Ezek létrehozására egy MatlabR2019[©] scriptet hoztam létre. Ennek bemenő paraméterei a kezdő sebességszint (zérus vagy nagyon alacsony 1500-2000 sleeptime) és egy utazó sebességszint. Ezek mellett ügyeltem arra is, hogy a lépések a sebességszintek között akkor menjenek végbe, amikor a input shaper előírja. Ezt úgy valósítottam meg, hogy egy adott sebességszinten több léptetést írtam elő. Ettől függetlenül létrehoztam olyan léptetési profilokat, amelyek a szükségesnél kevesebb léptetésből állnak, így vizsgálni tudtam a kis lépésszámú léptetéseket is, amelyeket a szkennelésnél használtam. Az általam használt sebességprofilokat a 1. táblázatban foglaltam össze. Ezen kívül előkészítettem egy mérési jegyzőkönyvet.

5.2. A mérés menete

A Leopard rendszert átszállítottuk a KFKI¹-ból a Tanszékre, és összeszereltük az összeállítást. A berendezést gumitéglákra helyeztük, ezzel elszigeteltük a környezeti rezgésektől. A tanszéki laboratóriumban gyorsulásérzékelőket helyeztünk el a berendezés adott pontjaiban. Ezek a pontok a 3.1. ábrán jelölt pontok közül az A1 illetve B1 pontok, valamint Z irányban az A1 ponttól 1 cm-re az árnyékoló lemezen. A piezo-elektromos gyorsulásérzékelőket egy kikönnyített kábellel csatlakoztattam egy többcsatornás adatgyűjtőkártyára², amely egy számítógépnek továbbította a jeleket. A szenzorokat a helyszínen kalibráltam³. A tanszéki számítógépen futó adatgyűjtő programmal mentettük ki az adatsorokat MatlabR2019[©] objektumként, amely magában tárolta a három irányú gyorsulásjeleket és egy idővektort. A mintavételezési frekvenciát $F_s = 51.2$ kHz-nek választottuk. A Leopard optikai fejét a szkenner közepére pozicionáltuk(X=30000, Y=30000) és az összes mérést ebben a középső helyzetben végeztük. A mérések során a rendszert pozitív X irányban mozgattuk. Végeztünk pár negatív irányú mérést is, hogy ezzel össze tudjam vetni a pozitív irányú lépéseket. A léptetések során az optikai Z pozícióját fejnek állandó értéken tartottuk (Z=6000) annak érdekében, hogy lengőkar állandó hosszúságú legyen. Léptetések során általában 10 darab léptetést végeztünk a megadott pozitív X irányban, különböző sebességszinteken, lépésszámmal és sebességprofillal. A léptetéseknél általában 2 s-t vártunk két léptetés között, ugyanis ennyi idő alatt biztosan lecsengenek a szabad lengések. Minden léptetési sorozat végén visszaállítottam az optikai fejet a középső(default) állásba. A lépési sorozatot és a gyorsulásmérést két külön gépről (RPi,tanszéki) indítottam, ügyelve a minimális időkésésre. A tanszéki adatgyűjtő program kimeneti objektumait futási sorszámuknak megfelelően Run-NNoknak neveztem el, ahol az NN-t a mérés sorszámát jelöli.

Fontos megjegyeznem, hogy a méréseket két külön időpontban végeztem el, és két különböző gyorsulásmérőt használtam. Az első alkalommal 3db egyirányú ⁴, második alkalommal 1db háromirányú⁵ gyorsulásszenzorral végeztem a méréseket. Ezek adatai megtalálhatók a következő táblázatban (illetve a mérési jegyzőkönyvben).

Eszköz neve	Gyártó	Modell	Azonosító	megjegyzés
Gyorsulásszenzor	PCB Piezotronics INC.	352C23/NC	LW192001	CH1 X, $m = 0.2 \ g$
				$s = 0.583 * 10^{-3} \frac{V}{\frac{m}{2}}$
Gyorsulásszenzor	PCB Piezotronics INC.	352C23/NC	LW192091	CH2 Y, $m = 0.2 g^{s^2}$
				$s = 0.5916 * 10^{-3} \frac{V}{\frac{m}{2}}$
Gyorsulásszenzor	PCB Piezotronics INC.	352C23/NC	LW192090	CH1 Z, $m = 0.2 g^{s^2}$
				$s = 0.4982 * 10^{-3} \left[\frac{V}{\frac{m}{s^2}} \right]$
Gyorsulásszenzor	Br ü el & $Kjaer^{\textcircled{C}}$	4504A	10135	3 irányú, $m = 19.5 g$
				$s = 1 * 10^{-3} \frac{V}{\frac{m}{s^2}}$
Kalibrátor	Br ü $el\&K jaer^{\textcircled{C}}$	4294		5
Adatgyűjtő kártya	National Instruments	NI 9234		AI $\pm 5 V$ IEPE

5.1. táblázat. Méréshez használt eszközö
--

¹Központi Fizikai Kutatóintézet https://www.kfki.hu

²NI:https://www.ni.com/hu-hu/support/model.ni-9234.html

 $^{{}^{3}\}mathrm{B\&K:https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/calibrators/4294}$

⁴PCB Piezotronics: https://www.pcb.com/products?m=352C23

 $^{^5\}mathrm{B\&K:https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4504-A$



5.1. ábra. Mérési összeállítás: Kommunikáció az RasberryPi-vel, Leopard felműszerezve, adatgyűjtő kártya, tanszéki laptop(kalibrációs ábra)

Az első mérési alkalommal jó néhány próbálkozás után sikerült használható eredményeket generálnom. Ezek a futtatások a Run40-től kezdődnek. Itt néhány referencia mérést végeztünk a környezeti zaj mérésére, a pozitív és negatív irányok összehasonlítására, valamint azokon a sebes-ségszinteken végeztem léptetéseket egységugrásra hasonlító sebesség profillal, amelyeken később az input shaperes léptetéseket is alkalmaztam. Ezek után alkalmaztam az input shaperek ál-tal meghatározott sebességprofilokat különböző sebességszinteken és különböző lépés hosszok mellett. A léptetések adatai 5.2. táblázatban találhatók. A második mérési alkalommal sikerült összeszedettebben végezni egymás után a méréseket, így könnyebb volt az adatokat rendszerez-nem. A mérések körülményeit minden Run esetében rögzítettem a jegyzőkönyvben (logbook).

A helyszínen írtunk egy kódot, amely képes volt beolvasni két már elkészült adatsort és ezeket egymáshoz képest az idő tengely mentén eltolni, így a helyszínen a mérések után rögtön összevethető volt két különböző módszer. Ezek az eredmények a nyers időjelekkel ígéretesnek ígérkeztek a végső kiértékelés szempontjából. A 1. ábrán kettő szűrt időjel összehasonlítása látszódik. Amint az a 3. ábrán is látható egy futás általában 10 léptetésből állt. Ennek oka, hogy több adatunk legyen a lecsengésekről, az azonos típusú jelekre kiszámított eredmények átlagolhatóak legyenek, és hogy egy általánosabb képet kapjunk az alkalmazott shaperek működéséről. Ezzel a módszerrel kiküszöbölhetőek a mérési pontatlanságok, melyek okait később. A nyers adatokon észrevehető volt a shaperek hatása, kisebb amplitúdók alakultak ki és elmondható volt, hogy hamarabb lecsengtek a szabad lengések. Míg a referencia méréseknél 6-7 periódus kellett

Profil kategória	Utazó sebesség[sleep]	Léptetések száma[step]	Run-ok
1	100	1000	41, 43, 49, 50, 51, 52, 55, 57, 60, 62,
			$64,\!67,\!68,\!71,\!72,\!75,\!76,\!79,\!80$
1	100	200	53, 56, 58, 59, 65, 66, 69, 70, 73, 74,
			77,78,81
2	100	1000	41,43,126-137
3	1000	10	45,46, 138-148
4	100	1000	149-159
4	400	1000	44, 45, 160-171
4	400	200	172-182
4	400	100	183-193

5.2. táblázat. Mérések paraméterei

a rezgések lecsengéséhez, a jobb fajta shaperek képesek voltak 4-5 periódus alatt csökkenteni a lengéseket.



5.2. ábra. Mérési összeállítás: Gyorsulásmérők elhelyezése

5.3. A mérés kiértékelése

A legtöbb munkát a mérési eredmények kiértékelése igényelte. Ebben a fejezetben a mérést kiértékelő program fejlesztését, annak pontos működését és a vele szerzett eredményeket szeretném ismertetni. Célom az volt, hogy a Leopard felbontását növeljem a léptetéskor kialakuló

rezgések csökkentésével. Ami számomra egy fontos kérdés volt, hogy nagyságrendileg mekkora amplitúdójú rezgések alakulnak a léptetések során, illetve ezek mennyi idő alatt csengenek le. A mérést kiértékelő script fejlesztését a korábban lemért adatsorok feldolgozásával kezdtem. A végleges kiértékelő program vázát az itt alkalmazott lépések adják. Az adatelemző programot $MatlabR2019^{\textcircled{C}}$ környezetben írtam, a végleges scriptet a mellékletben csatoltam. Az adatfeldolgozás menete a következő:

- a kiértékelést az adatsorok beolvasásával illetve átalakításával kezdtem. Ez a régi adatsorok esetében egy .dat formátumról Matlab[©] array-ra való áttérést jelentett, melyben az oszlopokban az X,Y,Z irányú gyorsulásadatok voltak megadva. Ehhez egy idővektort kellett definiálnom, amelyet a mintavételezési frekvencia segítségével tudtam meghatározni,
- nyers adatok ábrázolása az összehasonlíthatóság érdekében,
- nyers adatsorok szűrése egy sávszűrővel. A szűrés pontos menetét a végleges adatfeldolgozó leírásánál fogom részletezni,
- szűrt gyorsulás adatokból sebesség és elmozdulás adatok számítása numerikus integrálással,
- ezeknek az ábrázolása és tendenciák összehasonlítása,
- kvantitatív mérőszámok megállapítása a lecsengésekre, melyek képesek jellemezni a különböző léptetési profilokat és lehetővé teszi a különböző módszerek összehasonlítását.

Ezek után szeretném részletesen kifejteni a kiértékelő program működését.

Az adatok beolvasásakor létrehozok egy tömböt, amely tárolja a 3 irányú sebesség tömböket. Mivel az adatgyűjtő program .m fájlokat generált, ezért nincs szükségem különösebb adatkonverzióra. Ezzel szemben, ha a régi mérési eredményeket kell vizsgálnom, akkor át kell térnem .dat formátumról valamilyen $Matlab^{\odot}$ formátumra. A programban meg kell adnom egy Run számot, ami alapján be tudja olvasni az adatsorokat, valamint a kiértékelő kimeneti fájljainál (grafikonok, táblázatok) frissíti a sorszámot. Beleírtam a programba egy olyan feltételt, amely csak akkor engedi lefutni a kódot, ha a Run sorszáma megfelel a valóságnak (használható Run-ok: 40-191). Ezek mellett az időjeleket nulla középpontúvá teszem.

Ezek után a beolvasott nyers adatsoron egy szűrőt alkalmazok. Ennek a szűrőnek olyannak kell lenni, hogy a számomra releváns adatokat hagyja meg a lengésekből. Korábbi tapasztalatok alapján egy sávszűrőt alkalmaztam, ezzel a magas frekvenciás elektromos zajt le tudtam vágni az időjelekről, valamint az alacsony frekvenciás zajokat is sikerült leválasztanom. Erre azért volt szükség mert a numerikus integrálásnál, azt tapasztaltam, hogy elcsúsznak a sebesség és elmozdulás jelek a zérustengelytől. A szűrő megalkotásához $Matlab^{\odot}$ beépített filterDesigner funkcióját használtam. A sávszűrő vágási frekvenciáinak meghatározásához az időjelek FFT-jét⁶ vettem és megvizsgáltam a spektrumot. A spektrum alapján egy Butterworth⁷ szűrőt használtam, melynek alsó vágási frekvenciája $Fc_1 = 10 Hz$, felső vágási frekvenciája pedig $Fc_2 = 500 Hz$. Egy adatsorhoz tartozó nyers és szűrt adatsor frekvencia spektruma látható a 5.3. ábrán. A magas mintavételezési frekvencia miatt beépítettem egy mintavételező függvényt is a programba, amely képes arra, hogy az argumentumának megfelelő számú elemeit emelje ki az adatsornak, így csökkentve annak méretét és ezzel a számolások gyorsabban lefuthatnak. Természetesen ez információ vesztéssel járhat.

⁶FFT: Fast Fourier Transform, gyors Fourier transzformáció

⁷Butterworth: https://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter, https://uk.mathworks.com/help/ signal/ref/butter.html



5.3. ábra. A Run133 nyers és szűrt időjelének frekvencia spektrumainak összehasonlítása Butterworth10-500 as szűrő alkalmazásakor

Minden adatsor több léptetést tartalmaz, általában 10-et. Annak érdekében, hogy minél több információt kinyerjek az adatsorokból a lehető legtöbb léptetést meg kell vizsgálnom. Ehhez a rendelkezésre álló adatsort feldaraboltam az általam definiált getDataPieces függvénnyel. A függvény bemenetéhez szükséges definiálni azokat a pontokat, ahol elvágja az időjeleket. Ezeket a pontokat a getStartTimes függvény határozza meg. Ez nem csinál mást, mint hogy végig fut az adatsoron és keresi azokat a pontokat, ahol az időjel meghalad egy előre definiált határ-értéket (bound). Ezzel megkereshetőek azok a pontok, ahol a léptetések elkezdődnek, ugyanis ekkor ugrásszerűen megnő a gyorsulás értéke. Ezeket a kezdeti időpillanatokat és egy adott hosszúságú időablakot betáplálva a getDataPieces függvénybe megkapjuk a feldarabolt időjelet. Az eredeti időjelen megjelölt vágási pontok láthatók a 3. ábrán, a feldarabolt adatsort pedig a 4. ábra szemlélteti. A vágási pontokat az X irányú adatsoroknál kerestem meg, a többi irányú adatsorokra is ugyanezeket a vágási pontokat használtam annak érdekében, hogy a különböző irányú jelek ne csússzanak el időben egymáshoz képest.

Következő a lecsengések vizsgálata. Annak érdekében, hogy a lecsengéseket megkapjuk meg kell állapítani, hogy mikor érnek véget a léptetések. Ha abban az időpontban levágjuk a gyorsulásjelet akkor megkapjuk a szabad lengések időjelét. A motor mozgatásakor egy nagyfrekvenciás komponens figyelhető meg a gyorsulásjelen. Ennek az amplitúdói csökkennek, amint a motor abbahagyja a léptetést. A *PeakToPeakInWindow* függvény azt csinálja, hogy végig megy az adatsorokon és azt vizsgálja, hogy egy adott szélességű ablakban mekkora a rezgések peak-peak értékei. A "végig söpört" ablak szélessége a gyors komponens periódusidejének kétszerese, annak érdekében, hogy mindig találjon csúcsokat. A 4. ábra alsó grafikonján látható ennek a peakpeak értéknek az időbeli változása. Ezek után egy az előzőhöz hasonló daraboló függvénnyel, a *getStartofSat* -al megkeressük azokat a pontokat, ahol a peak-peak értékek egy adott szint alá csökkennek és ekkor kijelenthető, hogy a motor már nem lépteti a rendszert és a szabad lengéseket elértük. Az 5.4. ábrán látható függőleges vonal jelöli a vágási időpontok átlagát. A lecsengések



5.4. ábra. Run133 motor léptetés miatt kialakuló gyors komponens

vizsgálatához meghatároztam a sebességek és elmozdulások időjeleit is. Ezeket azután az előző bekezdésben tárgyalt paraméterekkel szintén feldaraboltam. A sebesség és elmozdulásokat a $Matlab^{\odot}$ beépített $cumtrapz()^{8}$ függvényét használtam (melléklek 5. ábra). Az integrálást az eredeti időjelen hajtottam végre és az így kapott adatsorokat daraboltam tovább az előzőekben említett módon. Próbálkoztam a fordított verzióval is, hogy a feldarabolt jeleken alkalmaztam a numerikus integrálást, de abban az esetben nem null közepű időjeleket kaptam és ezért maradtam az előző módszernél. Ezek után mindegyik futáson belüli adatsort külön vizsgáltam. Erre azért van szükség, mert még ezzel a módszerrel se tudtam pontosan azonos fázisba hozni a gyorsulásjeleket, mivel az adataim koránt sem koherensek. Amennyiben az értékeket kiátlagolnám és ezt vizsgálnám, akkor nagyon alulbecsülném a különböző paramétereket, ugyanis az egymáshoz képest eltolt periodikus jelek átlagolásánál az amplitúdók csökkentik egymást. Ezért döntöttem amellett, hogy az értékeket külön minden egyes futtatásnál, minden egyes lecsengési adatsorra kiszámítom és a végén átlagolom ki a kapott eredményeket. Itt felmerül a kérdés, hogy milyen kvantitatív mennyiségekkel lehet jellemezni az adott lecsengéseket. Első ilyen mennyiség a kialakuló lengések maximum értékei. Ezeket a beépített max() függvénnyel állapítottam meg, majd az eredmények abszolút értékét vettem. Ezt az értéket mind a gyorsulásra, mind az elmozdulásokra kiszámoltam X és Y irányban. Következő mérőszám az RMS⁹, ez egy változó mennyiség nagyságának statisztikai mérőszáma, melyet gyakran használnak hullámok vagy más rezgések jellemzésére. Ezt az rms() beépített függvénnyel határoztam meg szintén az X és Y irányú gyorsulás és elmozdulás adatsorokra. A fentieken kívül, ami a feladat szempontjából fontos adat a rezgések lecsengéseinek meghatározása. Ennek meghatározása nem egy triviális feladat mivel az időjelek sosem fogják elérni a tartósan nulla szintet. Másrészt az optikai fej megfelelő pontossága érdekében a síkbeli rezgéskomponenseket, az X és Y irányokat egyszerre kell vizsgálni.

⁸cumtrapz: https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/cumtrapz.html

⁹RMS: Root Mean Squer, négyzetes közép https://hu.m.wikipedia.org/wiki/Négyzetes_közép

Ezért amellett döntöttem, hogy ezt a problémát grafikusan oldom meg. Definiáltam egy adott sugarú környezetet, amely a gyorsulás adatoknál $a_h = 0.1 \frac{m}{s^2}$, ez a gyorsulásszint körülbelül a szűrések után megmarad minimális nyugalmi zaj sávszélességének kétszerese. Az elmozdulásokra megadott sugár pedig $s_h = 5 \ \mu m$, ami a szkennelés során elérni kívánt pozíció pontosságot jelöli. Egy fázisképen időben egyszerre jelenítettem meg az X, Y adatok értékeit és azt vizsgáltam, hogy mikor fogják tartósan elérni az előre definiált környezetet. Lecsengési időnek vettem azt az időpillanatot, amely után az eredmények már nem lépnek ki az adott sugarú környezeten kívül. Ezt a beépített find() függvénnyel értem el, melynek argumentumába az előzőeket leíró logikai kifejezés került. Egy ilyen fázis diagram látható a 5.5. ábrán. Mivel ez egy elég kaotikus megjelenítése az adatoknak, ezért itt a többi esetben mindig a kiátlagolt jelet jelenítettem meg. Itt is beigazolódott, hogy a kiátlagolt adatjel bőven alulról becsüli a valósan kialakult lecsengéseket. Ez onnan látható, hogy az átlagos lecsengési idővel megjelenítve a kiátlagolt időjeleket azt kapjuk, hogy a lecsengést jelző szakasz bőven a határértéken belül van.



5.5. ábra. Run133 lecsengési fázisképe elmozdulás komponensekre

A kiértékelő program utolsó lépésében pedig kimentem az összes hasznos információt a mérési adatsorokról. Ezek a kimenetek alapvetően két csoportra oszlanak. Egyik csoport a kimentett grafikonok, ezek .*fig* és .*pdf* formátumban állnak rendelkezésemre, a másik csoport pedig egy .*csv* fájl, amelyben az egyes lecsengések számszerű adatai vannak összefoglalva. Ezek te léptetési típusonként táblázatokba gyűjtöttem és összehasonlító grafikonokat készítettem. Ezek alapján látszik, hogy az EI2, EI3 input shaperek nagyon jól teljesítenek, átlagosan 50%-al csökkentik a lecsengési időket illetve átlagosan 30 – 40%-al csökkentik a kialakuló amplitúdók RMS és maximum értékeit. Esetenként kiugró eredményeket értek el a genetikus algoritmusok által optimalizált léptetési profilok is (Melléklet: 2. ábra).

5.4. A mérés eredményei

A mérések elemzéséből a következő eredményeket kaptam. A szimuláció meglehetősen jól közelítette a mért eredményeket. A legjobban teljesítő input shapernek továbbra is az EI2,EI3, valamint a szimulációkból kihagyott G100 bizonyultak. Ez nem meglepő, ugyanis a genetikus algoritmusnak pont az volt a lényege, hogy az input shaper paramétereit optimalizálja. Nyilvánvalóan a maximális számú iterációból álló optimalizált paraméterek mellett fog a legjobban viselkedni a rendszerünk. A gyorsulásjeleken is jól kivehetők az input shaperek beavatkozásai, ugyanis a szabad lengéseket megelőző lassulási szakaszban a referencia időjelekhez képest kisebb amplitúdók és a fluktuációkban pedig törések figyelhetőek meg. Néhány kivételnél ugyan nagyobb amplitúdók is kialakultak a referencia méréshez képest, viszont ezekben az esetben a lecsengés volt kisebb értékű. A következő 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13. grafikonokon az azonos paraméterek mellett végzett futtatások lecsengési jellemzői láthatóak. A következő jellemzőket használtam összehasonlításra: X irányú gyorsulás RMS és maximumok, lecsengési ideje a gyorsulás(a) és elmozdulás(s) jelnek. Néhány mérési pontban nem sikerült használható eredményeket kapnom, ugyanis a mért jelek hibásak voltak és a kiértékelő program nem tudta őket kezelni (5.6. ábra).

A gyakorlat szempontjából legfontosabb szkennelési üzemmódhoz tartozó eredmények igazolták azt az egyértelmű tényt, hogy ebben az esetben minél nagyobb sleeptime-ot kell alkalmazni (lassú léptetések), viszont ebben az esetben is javítottak a léptetéseken a kis léptetésszámhoz generált input shaperek.

5.5. A mérés hibaforrásai

A Leopard szkenner működése nem triviális, számos apró dolog befolyásolja az üzemelést. Az első ilyen hibaforrás, hogy a szkenner léptetései a léptető motorokkal pozitív és negatív irányban eltérőek. Gyakorlati szempontból érdemes negatív X irányban léptetni, ugyanis ekkor nagyobb a csillapításunk, mint pozitív irányban. A szimulációs modell nem veszi figyelembe a rendszer felfüggesztését: két oldalon lineáris megvezetést, középen a golyós-orsós hajtást. Itt az illesztésekből adódó megengedett szögelfordulásokat egy bizonyos hibával tudjuk becsülni. A következő hibaforrás az, hogy különböző sebességszinteken (sleep) másmilyenek lesznek a léptetések. Ez abból következik, hogy nagyon más és más hangokat ad ki a léptetőmotor, és ezek nem csupán hangmagasságban különböznek egymástól, hanem hangerőben is. Azoknál a léptetéseknél, ahol hangosabb volt a motor járása, ott a jelre ráülő gyors komponens amplitúdói (peak-peak) jóval nagyobbak voltak, mint a többi esetben. Tehát tisztán a léptetés nagyobb útgerjesztést vitt be a rendszerbe. Következő hibaforrás a rendszer sajátfrekvenciájának hibája. Mint azt láttuk, az input shaperek akkor működnek jól, ha a lengéstani paraméterek viszonylag pontosak. Ez elsősorban a nem robusztus shapereket érinti. A sajátfrekvencia eltérését okozhatja az optikai kar hosszának vagy tömegének a megváltozása. Továbbá magának a gyorsulásérzékelőknek is van egy bizonytalansági tartománya. Ezek mind megtalálhatóak az alkalmazott mérőműszerek adatlapjain.

További hibalehetőségre példa, hogy az időjelek azonos futtatási paraméterek mellett is inkoherensek lesznek. Ennek az egyik magyarázata az, hogy a léptetéseket végző RasberryPi adja ki a parancsokat. Ezen az eszközön a háttérben fut egy kernel¹⁰, emellett a léptetésen kívül a TCPD kamrából érkező adatgyűjtést is végezhet, akkor a hardver korlátai miatt időkésés léphet fel. Emiatt előfordulhatnak ezred másodperces pontatlanságok, amelyek elegek ahhoz,

¹⁰kernel: rendszermag https://hu.wikipedia.org/wiki/Rendszermag

hogy az egymást követő periodikus időjelek fázisai eltolódnak. Az eltol fázisú időjelek pedig a kiértékelésnél tárgyal problémákat okozzák.

A kiértékelésnél felmerülő hibákat okozhatják azok a manuálisan beállított paraméterek pontatlanságai, amelyek értékeit én olvastam le egy kezdeti grafikonról. A numerikus integrálások csak nagyságrendi becslés szintjén adják meg a sebesség és elmozdulás időjeleket. A pontos időjelek meghatározására más módszerrel, például egy megfelelő felbontású elmozdulás mérő műszerrel lehetne pontosabb eredményeket kapni. Ezeket összegezve a kilengések becsült hibája 10%.





5.6. ábra. Sleep = 100, Step = 1000, Run:41-80

41







5.7. ábra. Sleep = 100, Step = 200, Run:53-81



Gyorsulás értékek X



Lecsengési idők

5.8. ábra. Sleep = 100, Step = 1000, Run:127-137





5.9. ábra. Sleep = 1000_{44} Step = 10, Run:139-148





Lecsengési idők

5.10. ábra. Sleep = 100, Step = 1000, Run:149-159

45







5.11. ábra. Sleep = 400, Step = 1000, Run:45-171





5.12. ábra. Sleep = 400, Step = 200, Run:172-182





5.13. ábra. Sleep = 400, Step = 100, Run:183-193

6. fejezet Összefoglalás

Munkám során a Leopard detektor-szkenner berendezés rezgéseinek csillapításán dolgoztam. A műszert a kísérleti fizikában, a modern részecskedetektor rendszerekben alkalmazott GEM fóliák minőség-ellenőrzésére használják. Az optikai szkenner egy UV nyalábbal pásztázza végig a GEM fóliák felületét és a mérőrendszer vizsgálja a gerjesztés hatására kialakult fotoektron hozamot. Ebből a GEM fóliák egyik fontos jellemzőjét az erősítést tudjuk meghatározni. Ezen kívül alkalmas a kialakuló gyártási hibák feltérképezésére. Az szakirodalom áttekintése során megismerkedtem a jelenkori részecskedetektorok felépítésével, működési elvével és gyártásával. Részletesen megismertem a GEM fóliák előállítási és minőség-ellenőrzési folyamatát, az itt alkalmazott mérőberendezések felépítésével, működésével és az üzemeléssel szemben támasztott elvárásokkal. Ezek után áttanulmányoztam a dolgozatom tárgyát képező Leopard szkenner működését és vezérlését. Megismerkedtem a mechanikai tulajdonságaival és megfogalmaztam a fejlesztésem célját, miszerint a vezérlés átalakításával szeretném csökkenteni a kialakuló szabad lengéseket az optikai felbontás növelése érdekében. Ehhez a korábbi mérésekből származó adatsorokat tanulmányoztam.

A mechanikai fejlesztésem gerincét az input shaping módszer adja. Megismertem ennek a rezgés csökkentő módszernek az elméleti alapjait. Párhuzamot vontam számos ipari alkalmazás (ipari daruk, kéttengelyű CNC maró, robotok, stb.) és a fejlesztési feladatom között. Az itt alkalmazott módszereket próbáltam beágyazni a saját feladatomba. Készítettem egy mechanikai szimulációt annak érdekében, hogy előre meg tudjam becsülni a későbbi mérési eredményeket. A szimulációt Simulink[©]-ben végeztem, számos irányítástechnikai módszert bevetve. A szimulációs eredményeket felhasználva léptetési profilokat generáltam a Leopard vezérléséhez és kidolgoztam a mérési tervet.

A Műszaki Mechanikai Tanszék laboratóriumában a konzulenseim segítségével összeraktunk egy mérési összeállítást, melyben gyorsulás szenzorokat helyeztünk el a Leopard szkenneren és különböző léptetési profilok mellett lemértük a kialakuló szabad lengéseket. A mérési adatok kiértékelésére írtam egy kiértékelő programot, mely segítségével a lecsengésekről kvantitatív információkat, a léptetésekről pedig szemléletes ábrákat tudtam készíteni. Az összes futtatáshoz tartozó ábrát tároltam, így a későbbiekben, további fejlesztések során felhasználható információkat biztosítanak majd. A mérési eredmények alapján összehasonlítottam a különböző input shaperek hatását és kiválasztottam a feladatra legalkalmasabb módszert. Ez az EI3-as (Melléklet:1. ábra) input shaper, ami a Three hump Extra Insensitive input shaper nevet viseli. Ez szinte az összes általam használt léptetési paraméter mellett megállta a helyét és nagyon jó eredményeket ért el. Ez az eredmény összhangban volt a szimulációnál kapott eredményekkel. Az eredmények teljessége érdekében megvizsgáltam a mérés és a kiértékelés során felmerülő hibaforrásokat.

Javaslatok, kitekintés

Az eredmények alapján a Leopard detektor szkenner vezérlésébe mindenképpen érdemes input shaper által alakított vezérlést létrehozni, mert ezzel a kialakuló szabad lengések csökkenthetők. További feladat lesz a jövőben az említett EI3-as input shaper általános felhasználása a Leopard vezérlésében. Az átalakított vezérléssel a megismert erősítési térképeket el kell készíteni, hogy összevethessük a szkennelés felbontásának változását. Szeretném tovább folytatni a berendezés és más hasonló minőség-ellenőrző berendezés mechanikai fejlesztését. A gépészet alkalmazása a kísérleti fizika területén számomra egy nagyon érdekes kutatási irány. Látva azt, hogy a hazai kutatók milyen egyedülállóan magas színvonalú munkát végeznek arra ösztönöz, hogy a jövőben folytassam a munkámat a detektorrendszerek fejlesztése, gyártása és minőség-ellenőrzése területén.

Budapest, 2019. december 13.

Sántha Péter

Irodalomjegyzék

- The ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the standard model higgs boson with the atlas detector at the lhc. 08 2012. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.020.
- Georges Charpak and F. Sauli. Multiwire proportional chambers and drift chambers. Nucl. Instrum. Meth., 162:405–428, 1979. DOI: 10.1016/0029-554X(79)90726-2.
- The ALICE Collaboration. Technical design report for the upgrade of the alice time projection chamber. march 2014. https://cds.cern.ch/record/1622286/files/ ALICE-TDR-016.pdf.
- [4] Fabio Sauli. Gem: A new concept for electron amplification in gas detectors. 386:531–534, 02 1997. DOI: 10.1016/S0168-9002(96)01172-2.
- [5] Jacob Snäll. Tests and simulations of gem foils for use in an active target gaseous detector. 2016. Student Paper.
- [6] Galgóczi Gábor Varga Dezső Nyitrai Gábor, Hamar Gergő. Mpgd hole-by-hole gain scanning by uv excited single photoelectron detection. 09 2019. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162726.
- [7] Timo Hildén Erik Brücken. Gem foil quality assurance for the alice tpc upgrade. 174, 04 2017. DOI: 10.1051/epjconf/201817403004.
- [8] Qmot qsh5718-56-28-126 stepper motor manual v 2.3,9. 2010. https://www.trinamic. com/fileadmin/assets/Products/Motors_Documents/QSH5718_manual.pdf.
- [9] Nyitari Gábor. Detektorszkenner mechanikai analízise, msc diplomaterv. 2017.
- [10] Hamar Gergő. User's and Developer's Guide for the LEOPARD RasberryPi Based Data Acquisition System and its Graphical User Interface. Wigner Research Center for Physics, Dept. High Energy Physics Detectorphysics Group, Budapest, 2014.
- [11] Varga Dezső Hamar Gergő. Tcpd: A micropattern photon detector hybrid for rich applications. 849:25–30, 2017.
- [12] Varga Dezső Hamar Gergő. Tcpd, a tgem based hybrid uv photon detector. 8, 2013.
- [13] Galgóczi Gábor. Tgem alapú cserenkov-detektorok fejlesztése. 2014.
- [14] Varga Dezső Hamar Gergő, Nyitrai Gábor.
- [15] Hamar Gergő. Nagy impulzusú részecskék vizsgálata nehézion-ütközésekben.

- [16] W.P. Seering N.C. Singer. Preshaping command inputs to reduce system vibration. 03 1988. DOI: 10.1115/1.2894142.
- [17] José Ramón Beltrán Ramón Piedrafita, Diego Comín. Simulink® implementation and industrial test of input shaping techniques. pages 1–21, 10 2018. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.06.021.
- [18] P. Hubinsky D. Vozak M. Matuga Q. K. Duong, L. Chovanec and P. Varga. Comparison of input shaper based on genetic algorithms with analytical approach. 15:21–32, 03 2017.
- [19] Tarunraj Singh and W.E. Singhose. Tutorial on input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures. *Proceedings of the American Control Conference*, 3:1717 – 1731 vol.3, 02 2002. DOI: 10.1109/ACC.2002.1023813.
- [20] Maciej Gniadek and Stefan Brock. Basic algorithms of input shaping autotuning. MM Science Journal, 2015:627–630, 09 2015. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201509.
- [21] W.E. Singhose, Warren Seering, and Neil Singer. Shaping inputs to reduce vibration: A vector diagram approach. pages 922 – 927 vol.2, 06 1990. DOI: 10.1109/R0B0T.1990.126108.
- [22] Joshua Vaughan, Aika Yano, and W.E. Singhose. Performance comparison of robust negative input shapers. Proceedings of the American Control Conference, pages 3257 – 3262, 07 2008. DOI: 10.1109/ACC.2008.4586994.
- [23] Kristen Andrea Bohlke. Using input shaping to minimize residual vibration in flexible space structures. 06 1995.

Summary

Results

The subject of my thesis was to reduce the residual vibrations of the LEOPARD detector surface scanner. The instrument is used for the quality assurance of GEM (Gas Electron Multiplier) detectors, used in high energy particle detectors in the field of experimental particle physics. The surface of the GEM foils are scanned with the UV optics of the LEOPARD to measure the UV excited photoelectron response of the GEM. The scanner takes $10^5 - 10^6$ measurement, than calculates the photoelectron yield and gain from the histogram. The LEOPARD scanner is used for measuring the local variations of the gain which is the most important parameter of the GEM. The inhomogeneity of the GEM can arise from manufacturing defects or other local geometrical causes which can bring instability in the detectors. I became familiar the basic principles of the operation and structure of different particle detectors. I studied the control system of the LEOPARD detector scanner. After I acquired the basic knowledge of the operation, I specified the objective of my research. I wanted to reduce the residual vibrations of the system during the scan. I had to come up with a new solution of movement-control method.

The applied method is based on the input shaping principle. This includes series of impulses convolved with the original command for the system. Firstly I studied the theoretical basics of the method. Also I searched for analogue industrial problems such as overhanging cranes, two-axis CNC milling machine, robotics etc. I made a mechanical simulation of the system and input commands in $Simulink^{\textcircled{C}}$ software package. Here I used the basic elements of the $ControlSystemToolbox^{\textcircled{C}}$. Using the result from the simulation I could create predictions on the possible outcomes of the later measurements performed under realistic conditions with the Leopard device.

At the Department of Applied Mechanics laboratory I performed the measurement of the residual vibrations with the help of my consultants. We placed pieso-electric accelerometers onto the device and completed several runs with different scan profiles. I wrote a data processing code in $Matlab^{\odot}$ in order to collect and process data on the residual vibrations. I compared the results of different runs in spite of choosing the best method from the input shaped commands. The best performing input shaper was the EI3 (Three Hump Extra Insensitive) input shaper. The data of the measurement corresponded well with the predictions of the previuos simulations. For the integrity of the results I studied the source of errors in the system and the data processing.

Motivation

Based on my data obtained by our simulations and realistic measurements I recommend the use of pre shaped commands in the coltrol system of the LEOPARD surface scanner device. In the future I would like to integrate the chosen commands into the control system, and determine the new position resolution and scanning time. I am keen to continue the work on the development of the system. I am fascinated by the translation of engineering knowledge in particle science and I am motivated to continue on with my job of developing, manufacturing and assuring the quality of different particle detector systems.

My interest is growing on the field of input shaping. I find the several applications of the method amazing and I am motivated to dig deeper in the field of control designing. The application of input shaping in robotics is the most relevant field for me. I feel enthusiastic about trying myself in this field.

Keywords: vibration analysis, input shaping, heavy ion detectors, quality assurance, modal analysis

Melléklet



1. ábra. Input shaping hatása: referencia (41) és EI3 (67) időjelek összehasonlítása



2. ábra. Input shaping hatása: referencia (45) és G10 (168) időjelek összehasonlítása





3. ábra. EI3 (133) időjele abszolút értékben, a vágási pontok jelölése



4. ábra. EI3 (133) feldarabolt időjele és peak-peak gyors komponensek vizsgálata\$58\$


5. ábra. EI3 (133) lecsengései X irányú gyorsulás, sebesség és elmozdulás komponensekre\$59\$



6. ábra. El
3(133)esetén a Leopard optikai fejének síkmozgása a lec
sengés során

Kategória	Profil neve	típus	sleep(kezdő, utazó)[μs]	step [db]
1	XzyTableSpeedProfile1	ZV	0-100	76
	XzyTableSpeedProfile2	ZVD	0-100	43
	XzyTableSpeedProfile3	ZVDD	0-100	49
	XzyTableSpeedProfile4	ZVDDD	0-100	60
	XzyTableSpeedProfile5	EI2	0-100	216
	XzyTableSpeedProfile6	EI3	0-100	163
	XzyTableSpeedProfile7	G10	0-100	90
	XzyTableSpeedProfile8	G20	0-100	119
	XzyTableSpeedProfile9	G30	0-100	124
	XzyTableSpeedProfile10	G40	0-100	152
	XzyTableSpeedProfile11	G50	0-100	108
	XzyTableSpeedProfile12	G60	0-100	135
	XzyTableSpeedProfile 13	G70	0-100	81
	XzyTableSpeedProfile14	G100	0-100	89
2	XzyTableSpeedProfile15	ZV	1500-100	76
	XzyTableSpeedProfile16	ZVD	1500-100	43
	XzyTableSpeedProfile17	ZVDD	1500-100	49
	XzyTableSpeedProfile18	ZVDDD	1500-100	60
	XzyTableSpeedProfile19	EI2	1500-100	216
	XzyTableSpeedProfile20	EI3	1500-100	163
	XzyTableSpeedProfile21	G10	1500-100	90
	XzyTableSpeedProfile22	G50	1500-100	108
	XzyTableSpeedProfile23	G70	1500-100	81
	XzyTableSpeedProfile24	G100	1500-100	89
3	XzyTableSpeedProfile25	ZV	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile26	ZVD	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile27	ZVDD	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile28	ZVDDD	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile 29	EI2	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile30	EI3	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile31	G10	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile32	G50	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile33	G70	2000-1000	10
	XzyTableSpeedProfile34	G100	2000-1000	10
4	XzyTableSpeedProfile35	ZV	1000-100/400	38
	XzyTableSpeedProfile36	ZVD	1000-100/400	22
	XzyTableSpeedProfile37	ZVDD	1000-100/400	25
	XzyTableSpeedProfile38	ZVDDD	1000-100/400	30
	XzyTableSpeedProfile39	EI2	1000-100/400	108
	XzyTableSpeedProfile40	EI3	1000-100/400	82
	XzyTableSpeedProfile41	G10	1000-100/400	45
	XzyTableSpeedProfile42	G50	1000-100/400	54
	XzyTableSpeedProfile43	G70	1000-100/400	41
	XzyTableSpeedProfile44	G100	1000-100/400	45

1. táblázat. Generált léptetési profilok, .ini fájlok

Kapcsolási rajzok



7. ábra. A mechanikai szimuláció kapcsolási rajza Simulink környezetben. Source-Transfer function-Bus-Normalize-Scope