

Informatika Ingeniaritzako Gradua

Konputazioa

Gradu Amaierako Lana

Koheteen aireratzea eta lur-hartzea simulatzen eta bistaratzen duen ingurune baten garapena.

Egilea

Manex Darceles Garai

2019

Informatika Ingeniaritzako Gradua

Konputazioa

Gradu Amaierako Lana

Koheteen aireratzea eta lur-hartzea simulatzen eta bistaratzen duen ingurune baten garapena.

Egilea

Manex Darceles Garai

Zuzendaria

Joseba Makazaga Odria

Laburpena

Laburpena

Lan honetan ambizio handiko proiektu baten hastapenak zehazten dira, **koheeten diseinua eta hegaldien-simulazioen bistaratzea** ahalbidetzen duen **ingurune birtual baten garapenaren** hastapenak hain zuzen ere. *Falcon 9* aireratze-ibilgailuaren simulazioak egin dira, hau *LEO (Low Earth Orbit)* orbita batera iristeko. *Julia* ingurunea erabili da horretarako, *DIFFERENTIALEQUATIONS.JL* eta *SATELLITETOOLBOX.JL* paketeen laguntzaz. Datuak *JSON* motako fitxategietan idazten dira, *Unity* motore grafikoa erabiliz sortu den ingurunean kargatu daitezkeelarik bistaratzea gauzatzeko. Madrilgo *UPM (Universidad Politécnica de Madrid)* unibertsitateko *ETSIAE (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio)* fakultateko **Eneko Barandiaran Anda** ikaslearekin elkarlana burutu da, simulazio errealistagoak bistartzeko modeloa diseinatu eta kontrol-sistema bat garatu duelarik.

Abstract

This thesis describes the beginnings of an ambitious project holding the development of a **virtual environment** that provides tools for **rocket-design and flight simulation visualisations**. The *Julia* environment has been used together with *DIFFERENTIALEQUATIONS.JL* and *SATELLITETOOLBOX.JL* packages in order to perform flight simulations of a *Falcon 9* rocket arriving to a *LEO (Low Earth Orbit)*. The flight data is saved in *JSON* files and later read and visualised by the virtual environment developed using *Unity* game-engine. Mr. **Eneko Barandiaran Anda**, student of the *UPM (Universidad Politécnica de Madrid)* from the *ETSIAE (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio)* faculty has contributed to the development of the project improving the flight data by designing a more realistic model and proving it with a control-system.

Gaien aurkibidea

Laburpena	i
Gaien aurkibidea	iii
Irudien aurkibidea	v
Taulen aurkibidea	vii
1 Sarrera	1
1.1 Proiektuaren definizioa	1
1.2 Erabilitako erremintak	2
1.3 Motibazioa	2
2 Proiektuaren Helburuen Dokumentua	3
2.1 Helburuen deskribapena	3
2.2 Irismena	4
2.3 Plangintza	5
2.3.1 Atazak	6
2.3.2 Plangintza berria	6

iii

3	Azalpen teorikoak	11
3.1	Motore grafikoak	11
3.1.1	Unity	11
3.1.2	Ingurune birtualak	12
3.2	Julia	13
3.2.1	DifferentialEquations.jl	14
3.2.2	SatelliteToolbox.jl	14
3.3	Koheteen dinamika	14
3.3.1	Ekuzazio-sistema	14
3.3.2	Erreferentzia-sistema	17
3.4	Falcon 9	21
4	Proiektuaren garapena	23
4.1	Ingurunearen garapena	23
4.2	Falcon9 simulazioak	28
4.2.1	Arazoaren definizioa:	28
4.2.2	Emaitzak:	29
4.3	Elkarlanaren emaitzak	34
4.4	Hasierako helburuengandik desbideratzea	34
5	Ondorioak	37
5.1	Etorkizuna	38
Eranskinak		
Bibliografia		41

Irudien aurkibidea

2.1	Lehen iterazioko atazak ClickUp softwarean	5
2.2	Bigarren iterazioko atazak ClickUp softwarean	5
2.3	Proiektuaren LDE diagrama	7
2.4	Arriskuen ondorio eta probabilitate matrizea.	9
3.1	<i>Unity</i> editorea	12
3.2	<i>Autonomy, interaction, presence in VR – Zeltzer-en kubo</i> a [Zeltzer, 1992]	13
3.3	Erreferentzia-sistema inertziala.	19
3.4	Gorputzaren erreferentzia-sistema.	19
3.5	Bi ardatz-sistemek osatutako erreferentzia-sistema.	20
3.6	Eulerren angeluak (<i>Pitch, Yaw eta Roll</i>) definituz.	20
3.7	<i>Thrust vectoring</i>	21
3.8	<i>Falcon 9</i> kohetea [SpaceX, 2019a]	22
4.1	<i>Unity</i> -ko editorea: Kamerak gehituta	25
4.2	<i>Unity</i> -ko editorea: Ibilbidea gehituta	25
4.3	<i>Unity</i> -ko editorea: Menua	26
4.4	<i>Unity</i> -ko editorea: Konfigurazio menua	26
4.5	<i>Unity</i> -ko editorea: Eszena berria	27
4.6	<i>Unity</i> -ko editorea: jaurtiketa	27

4.7	<i>Unity</i> -ko editorea: Kamera desberdinak pantailan.	28
4.8	Orbita desiragarria urdinez, lortu dena berdez.	31
4.9	Bi orbiten arteko desberdintasuna. Urdinez desiragarria, berdez simula- zioekin lortu dena.	32
4.10	Simulazioaren bistaratzea.	34

Taulen aurkibidea

2.1	Plangintzako atazak	6
2.2	Atazen izenen kodeketa	7
2.3	Plangintzako atazak	8
3.1	Falcon9 aireratze-ibilgailuaren hainbat datu [SpaceX, 2019b]	21
4.3	Algoritmoen desberdinekin lortutako emaitzak	33
4.2	Simulazioaren datuak 2.	35

1. KAPITULUA

Sarrera

2015. urteko abenduan, AEBko *SpaceX* enpresak aeronautikaren industrian aro berri bati hasiera eman zion: Falcon 9 kohetearen aireratze arrakastatsuak 11 satelite kokatu zituen LEO (*Low Earth Orbit*) orbita batean; kohetearen lehen faseko segmentua guztiz berreskuratuz lur-hartze historiko batekin [Wall, 2015]. Une historiko honek errealitate bilakatu zuen ordura arte zientzia-fikzioa zen koheteen lur-hartzea, berrerabiltzeko intentzioarekin. Lur-hartzearekin batera, segmentuak birziklatzearekin batera, jaurtiketa batek suposatzen duen kostua murrizten da. Inpaktu bikoitza du honek: alde batetik ekonomikoki enpresa batentzat satelite bat orbitan jartzeak suposatu dezakeen aurrezpenengatik eta beste aldetik segmentuak jaurtiketa bakarrerako produzitzeak ingurumenean daukan efektuagatik [Stappert and Dumont, 2016].

Azken urteetan gora egin du koheteen lur-hartzea ikertzeko interesak eta proiektu honen helburuetako bat izateaz gain, motibazio nagusienetako bat ere bada. Beharrezkoa da aurrera egin baino lehen proiektuaren definizio zehatz bat egitea bai eta proiektua bera definitzeko jarraitu diren pausuak azaltzea.

1.1 Proiektuaren definizioa

Unity motore grafikoa erabiliz koheteen aireratzea eta lur-hartzea simulatzen dituen ingurune birtual bat garatzen hasi da. Hau aurrera eramateko Madrilgo UPM (*Universidad Politécnica de Madrid*) unibertsitateko ETSIAE (*Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio*) fakultateko **Eneko Barandiaran Anda** jaunarekin elkarlana

funtsezkoa izan da emaitza errealistak lortzeko. Elkarlanaren mugak eta zubiak ondo finkatzea ezinbesteko lana izan da ere bai proiektuaren nondik-norakoak ondo zehazteko. Lan honek ingurunearen garapena zehazten du, bertan bistartzeko simulazioak barne. Bestalde eta errealismoa lortze aldera, Eneko Barandiaran Anda jaunaren lana izan da kohete modelo baten diseinua egin eta kontrol-sistema bat garatzea hegaldiko ibilbideak zehatzak eta desbideraketa minimoarekin simulatzeko.

1.2 Erabilitako erremintak

Ingurunea garatzeko *Unity* motore grafikoa erabili da. Horrez gain *Julia* inguruneko `SATELITETOOLBOX.JL` eta `DIFFERENTIALEQUATIONS.JL` paketeak ere erabili dira simulazioak egiteko. *L3DT* eta *Gaea* erremintaz baliatuta, lurrazalaren garapena egin da. Planifikaziorako *ClickUp* softwarea erabili da, bai eta *LucidChart* interneten eskuragarri dagoen erreminta ere.

1.3 Motibazioa

Historiak erakusten du giza-zibilizazioek hiru motore izan dituztela: handinahia, berekoi-keria eta jakin-mina. Lehen biek sarraskiak ekarri dituzten bezala, bigarrenak eboluzioa ekarri du. Jakin-mina da zientziaren muina, aurrerapen teknologikoen sustraia. Gizakia umea denetik dago jakin-nahiaren bidea jarraitzen. Unibertsoaren mugagabetasunak ikara eta zirrara piztu ditu betidanik. Gizakion adimena eta zuhurtzia nahikoa dira lur planeta utzi eta *kanpoan* dagoena ikertzeko, ulertzeko [Stagl, 1995]. Aeronautika da unibertsoa eta gizakia uztartzen dituen diziplinetako bat: koheteak, espazio-ontziak, satelite artifizialak eta abarrak dira gizakiaren mugak gainditu eta ezarri dituztenak.

Egungo munduan informatika erreminta diziplinartekoa da eta ideia honi men eginez garatu da lan hau. Kohetegintzan erabilgarria izango den erreminta bat sortu nahi izan da, simulazio desberdinak egin eta birtualki bistartzeko erreminta bat hain zuzen ere. Proiektu handi hau aurrera eramateko ezinbestekoa da diziplinartekotasuna, eta hargatik elkarlana aukeratu izana helburuetara iristeko.

2. KAPITULUA

Proiektuaren Helburuen Dokumentua

Atal honetan proiektuaren helburuak zeintzuk izan diren deskribatuko da. Horretarako helburu horiek betetzeko egindako plangintza azalduko da: atazak, denbora estimazioak eta denbora errealak, arriskuak eta abar. Proiektuan zehar jazo diren aldaketak eta hartu diren erabakiak ere zehaztuko dira; lortu den emaitza eta hasierako plangintzaren arteko desberdintasunen xehetasunak emango diren bezala.

2.1 Helburuen deskribapena

Proiektuaren helburu orokorrak zabalak eta anitzak izan daitezke, hots: kohetegintzarako erabilgarria izango den erreminta sortzea, lur-hartzea ikertzea hobekuntzak bilatu nahian, kohetegintzara ateak zabaltzeko erreminta bat egitea...

Hainbeste helbururen artean, GrAL hau burutzeko proiektua modularra bihurtzea beharrezkoa izan da. Egileon elkarlana onuragarria izan dadin, garrantzitsua da, alde batetik bakoitzak egingo duena ondo zehaztea eta bestetik zubiak zeintzuk izango diren ondo azaltzea. Lana bi iteraziotan banatzea erabaki da: Aireratzea eta lur hartzea.

Bakoitzean lana zein izango den deskribatuko da, helburu orokorrak definitzeko bidea zein izan den adierazteko.

Lehenengo iterazioa: **aireratzea**

Simulazioekin hasi baino lehen oinarri bat garatu behar da: ingurune birtuala sortu, bertan simulazioak egingo diren mundu bat inplementatuz.

Lehendabiziko iterazioan Enekok helarazitako datu diskretuak inportatuko dira, JSON formatua erabiliz horretarako. Kohetearen aireratzearen bistaratze bat egingo da horrela. Funtsean, oinarri sendo bat sortzea izango da lehen iterazio honen helburua.

Bestalde, kohete bat orbitan jartzeko simulazioak egingo dira. Kontrol sistemarik gabe eta [Culler and Fried, 1957]-k proposatutako modeloa jarraituz, *SpaceX* enpresaren *Falcon9* kohetea LEO orbitan jartzeko simulazioak egingo dira.

Bigarren iterazioa: **lur hartzea**

Iterazio honetan egin nahi dena azken finean zera da: Enekok sortzen duen kontrol sistema Ingurune birtualean inplementatu.

Hau lortzeko inguruneari ekuazioak ebazteko gaitasuna eman beharko zaio, zenbakizko metodo desberdinak inplementatuz eta aztertuz. Horrela, kohetearen lur hartzea denbora errealean simulatuko da, bai eta bistaratu ere.

2.2 Irismena

Proiektuaren definiziotik, honek bi helburu orokor hauek dituela erauzi daiteke:

1. Koheteen lur-hartzea ikertzea, horretarako suziri modelo txikietan oinarrituz.
2. Simulazio anitzak egiteko erreminta sendoa baina erabilgarria sortzea.

Behin proiektuaren helburuak definituta izanik, hauetara iristeko zehaztutako plangintza deskribatuko da; atazak, denbora-estimazioak, arriskuak, desbideraketak edota denbora-errealak zehaztuko dira.

2.3 Plangintza

Plangintza egiteko *ClickUp* softwarea erabili da. Erreminta honek atazen definizioa, denbora estimazioak, atazen arteko baldintzapenak eta beste hainbeste lan erraz eta txukun egiteko aukera ematen du. [2.1](#) eta [2.2](#) irudietan ikusi daitezke atazak softwarean integratuta.

The screenshot shows the ClickUp interface for a project named 'BVE (Belatza Virtual Environment)'. The current view is 'Lehen Iterazioa' (First Iteration), which is a list view. The tasks are organized into three categories: Completed, In Progress, and Pending. Each task includes a title, a progress indicator, a due date, a priority, and an assignee.

Category	Task Title	Updated	Due Date	Priority	Assignee
COMPLETED	Proiektua sortu eta Unityko APIa ezagutzen hasi.	Apr 26		High	
COMPLETED	Objektuak kargatu.	May 9	Apr 27	Medium	
COMPLETED	Kameraren kontrola implementatu.	May 9	Apr 20	Medium	
IN PROGRESS	Kohetearen 6 askatasun graduak lortu.	May 19	May 18	High	
IN PROGRESS	Ibilbidea irakurri.	May 19	May 11	Medium	
PENDING	User Interface 1.0	Apr 26	May 18	Medium	
PENDING	Eszena txukundu eta prestatu.	Apr 26	May 25	Medium	

2.1 Irudia: Lehen iterazioko atazak ClickUp softwarean

The screenshot shows the ClickUp interface for the same project 'BVE (Belatza Virtual Environment)'. The current view is 'Bigarren Iterazioa' (Second Iteration), which is a list view. The tasks are organized into three categories: Completed, In Progress, and Pending. Each task includes a title, a progress indicator, a due date, a priority, and an assignee.

Category	Task Title	Updated	Due Date	Priority	Assignee
COMPLETED	User Interface 2.0	Aug 27	Jul 17	Medium	
IN PROGRESS	Datu desberdinen tratamendua.	Apr 26	Jul 20	Medium	
IN PROGRESS	Kontrol sistema garatu.	Aug 27	Jul 21	Medium	
IN PROGRESS	Azken ikutuak.	Aug 27	Today	Medium	
PENDING	Lur-hartzeko eszena implementatu.	Apr 26	Jul 27	Medium	
PENDING	Objektuaren datuak kontrol sistemari.	Apr 26	Jul 28	Medium	
PENDING	Kontrol sistemaren ekintzak implementatu.	Apr 26	Jul 28	Medium	

2.2 Irudia: Bigarren iterazioko atazak ClickUp softwarean

2.3.1 Atazak

Atazak definitzeko irismena kontutan hartzen da. Lana bi iteraziotan banatzen den heinean, atazak iterazio hauekin koherenteak dira, 2.1 taulan ikusi daitezke ondo definituta.

Ataza	Iterazioa	Atazak	Burutua	Denbora-estimazioa	Denbora-erreala	Desbiderapena
1	Lehenengoa	Proiektua sortu eta Unityko APIa ezagutzen hasi.	Bai	20h	23h	+3h
2	Lehenengoa	Objektuak kargatu	Bai	10h	10h	0h
3	Lehenengoa	Kameraren kontrola inplementatu	Bai	25h	30h	+5h
4	Lehenengoa	Ibilbidea irakurri	Bai	25h	15h	-10h
5	Lehenengoa	UI 1.0	Bai	15h	10h	-5h
6	Lehenengoa	Eszena txukundu eta prestatu	Bai	30h	20h	-10h
7	Bigarrena	Datu desberdinen tratamendua	Ez	20h	0h	-
8	Bigarrena	UI 2.0	Bai	15h	20h	+5h
9	Bigarrena	Lur-hartzeko eszena inplementatu	Ez	10h	0h	-
10	Bigarrena	Objektuaren datuak kontrol-sistemari	Ez	20h	0h	-
11	Bigarrena	Kontrol-sistemaren ekintzak inplementatu	Ez	35h	0h	-
12	Bigarrena	Azken ukituak	Ez	5h	0h	-

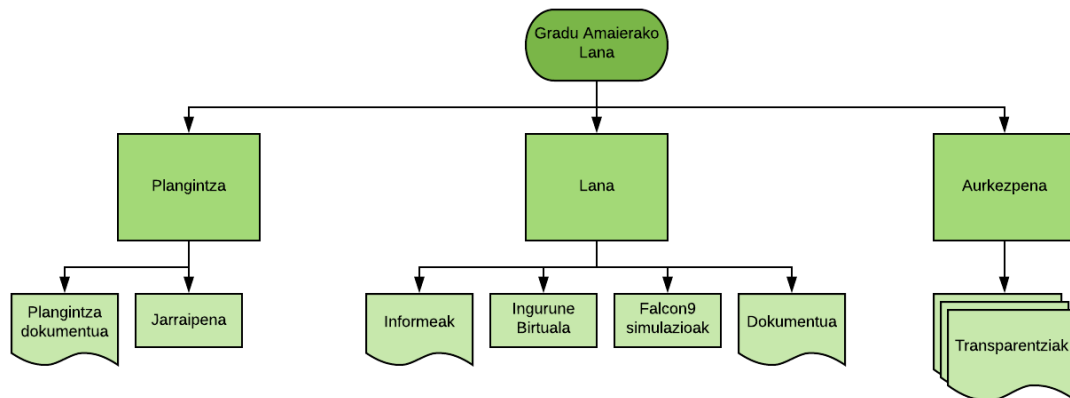
2.1 Taula: Plangintzako atazak

Ataza hauek hasierako plangintzan ezarri ziren, helburu orokorrera iristeko beharrezkoak ziren puntuak lantzeko asmoz sortuak. Lehen iterazioa nahiko txukun atera zen arren, bigarren iterazioarekin aldaketa batzuk etorri ziren. Lanaren hasierako helburuetara iristeko zailtasunak zeudela identifikatu zen eta plangintzaren aldaketa ekarri zuen horrek. Aldaketa horiek kontutan hartuz gero, azken plangintza ondorengo orrietan deskribatzen den gisa izango litzateke.

2.3.2 Plangintza berria

LDE Diagrama

2.3. irudian ikusi daiteke proiektuaren LDE diagrama. Bertan proiektuaren atalak azaltzen dira, bakoitzak bere atazak dituelarik. Ataza berriek kodeketa bat dute, bakoitza zein lanpaketeri egokitzen zaien jakiteko. 2.2. taulan ikusi daiteke kodeketa zein den.



2.3 Irudia: Proiektuaren LDE diagrama

Atala	Kodea	Ataza
Plangintza	P	(Zenbakia)
Lana	IB	(Zenbakia)
	FS	(Zenbakia)
Aurkezpena	A	(Zenbakia)

2.2 Taula: Atazen izenen kodeketa

Atazak

Plangintza definitiboan hasiera batean finkatu eta aurrera eramandako ataza ugari daude, bai eta lanak aurrera egin ahala beharrezkoak izan diren aldaketa zein ataza berriak ere. 2.3. taulan ikusi daiteke zehatz-mehatz azken plangintzako atazak zeintzuk izan diren, bakoitzaren denbora-estimazioa zein denbora-errealaren zenbatekoa izan den adierazita dagoelarik.

Ataza	Kodea	Izena	Denbora-estimazioa	Denbora-erreala	Desbiderapena
1	P1	Plangintza sendo bat sortu, aurrekoari aldaketak gehituz	10h	8h	-2h
2	IB1	Proiektua sortu eta Unityko APIa ezagutzen hasi.	20h	23h	+3h
3	IB2	Objektuak kargatu	10h	10h	0h
4	IB3	Kameraren kontrola inplementatu	25h	30h	+5h
5	IB4	Ibilbidea irakurri	20h	15h	-5h
6	IB5	UI 1.0	10h	10h	0h
7	IB6	Eszena txukundu eta prestatu 1.0	15h	20h	+5h
8	IB7	FX efektuak inplementatu	5h	5h	0h
9	IB8	Datuak pantailaratu	10h	5h	-5h
10	IB9	UI 2.0	15h	20h	+5h
11	IB10	Eszena txukundu eta prestatu 2.0	15h	20h	+5h
12	IB11	Kontrol-sistema integratu	10h	0h	-10h
13	IB12	Lur-hartzeko ibilbideak kargatu eta bistaratu	5h	0	-5h
14	FS1	Julia lengoaiarekin familiarizatu	10h	15h	+5h
15	FS2	Koheteen aireratzeari buruz ikasi	25h	25h	0h
16	FS3	DIFFERENTIALEQUATIONS.JL eta SATELLITE TOOLBOX.JL paketeekin familiarizatu	15h	15h	0h
17	FS4	Inplementazioa	23h	25h	+2h
18	FS5	Emitzak bistaratu, interpretatu eta esportatu Unity-n bistartzeko	10h	10h	0h
19	A1	Proiektua laburtu	2h	4h	+2h
20	A2	Memoria idatzi	40h	50h	+10h
21	A3	Transparentziak egin	5h	5h	0h
TOTALA			300h	315h	+15h

2.3 Taula: Plangintzako atazak

Arriskuak eta erantzunak

Proiektua aurrera eramateko orduan agertu daitezkeen arriskuak deskribatzen dira ondoren. Arriskuak identifikatzeak, proiektua aurrera doan heinean eta gertakari baten aurrean, erantzuna aurredefinituta edukitzeko aukera ematen du. Arriskuak $A(\text{Zenbakia})$ erara kodetu dira eta 2.4. taulan definitutako arriskuen probabilitatea eta ondorioak ikusi daitezke.

1. A1. Elkarlanean dependentsiak egotea. **Gorria.**

- **Arazoa:** arazo hau larria izan daiteke, edozein elkarlanek suposatu dezake atazen arteko dependentsia.
- **Erantzuna:** proiektu honetan dependentsia horiek ondo identifikatu dira: Kontrol-sistemaren garapena, bistartzeko datuen esportatze-inportatzea, bistartzaileren egokitasuna kontrol-sistema inplementatzeko... Horrek bermatuko du egoera horietan bestelako atazak eskura edukitzea proiektua gera ez dadin.

2. A2. Proiektua hasierako parametroetan egingarria ez izatea. **Horia.**

- **Arazoa:** arazo hau aurreikusteko erraza da eta ez du zertan larria izan behar, baina arazo bat izan daiteke.
- **Erantzuna:** gradu Amaierako Lan bat izateko beharrezkoa dena burutzea da erantzuna. Ezinezkoa izanez gero hasiera batean planteatzen dena egitea, GrA-Laren minimoetara iristea izango da erantzun egokiena. Horretarako arbuia-

rriak diren atazak alde batera utziko dira eta erreminta simple baina ahalik eta sendoena sortzen zentratuko da proiektua.

3. A3. Bi GrALetako bat ez amaitzea. **Berdea.**

- **Arazoa:** arrisku honek buruhaustea eman ditzazke, baina kontutan hartu behar da funtsean bi GrAL garatzen ari direla proiektu handi baten azpi-lan gisa eta bere osotasunean amaituta ez egotea ez litzatekeela egozpen bat izan beharko GrALa amaitzeko.
- **Erantzuna:** zubia osatzen duten atazak alde batera utziko dira, banakako lanetan zentratuz eta GrALaren minimoak osatzeko lan egingo da.

4. A4. Konputagailua erabilgarri ez izatea. **Horia.**

- **Arazoa:** proiektuan zehar konputagailua hondatzea edo lapurtzea gerta daiteke, arazo handia izan daitekeelarik.
- **Erantzuna:** lehenik eta behin GrALeko dokumentu guztiak hodeiean atzigarri jarriko dira, ezbehar baten aurrean lana ez galtzeko. Bigarrenik, Donostiko Informatikako Fakultatean ikasle izateagatik eskuragarri dauden ordenagailuak erabiltzeko aukera egongo da, lanarekin aurrera egiteko

		PROBABILITATEA				
		Baxua	Ez hain baxua	Ertaina	Ez hain altua	Altua
ONDORIOAK	Arbuigarria	Baxua	Baxua	Baxua	Ertaina	Ertaina
	Baxuak	Baxua	Baxua	Ertaina	Ertaina	Ertaina
	Handiak	Ertaina	Ertaina	Ertaina	Altua	Altua
	Oso handiak	Ertaina	Ertaina	Altua	Altua	Oso altua
	Katastrofikoak	Ertaina	Altua	Altua	Oso altua	Oso altua

2.4 Irudia: Arriskuen ondorio eta probabilitate matrizea.

Lan hau egitera bultzatu duen proiektuak hainbat helburu orokor dituela zehaztu da Proiektuaren Helburuen Dokumentuan. Gradu Amaierako Lan baten irismena kontutan izanda, helburu orokor bat finkatu da ere bai. Ondoren, proiektuaren garapenaren xehetasunak zehaztuko dira, azalpen teoriko batetik hasi eta emaitzen interpretazioarekin amaituz.

3. KAPITULUA

Azalpen teorikoak

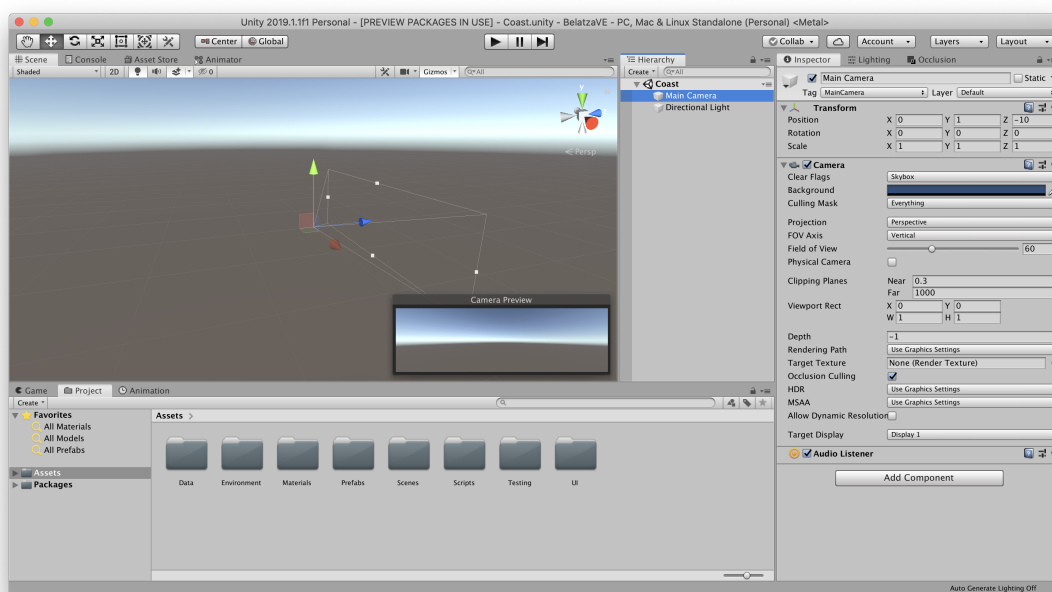
Proiektua aurrera eramateko ezinbestekoa izan da hainbat gaietan oinarri sendo bat sortzea. Oinarri horren azalpen teorikoak emango dira ondorengo orrietan, proiektuaren emaitzak interpretatzeko arazoak egon ez daitezten.

3.1 Motore grafikoak

Motore grafikoak kodez osatutako modulu sorta bat dira. Moduluek osatzen duen softwarea grafikoak erabiltzen dituen ingurune, joko edota beste edozein programa-informatiko sortzeko erabiltzen da. Motorraren moduluek ingurune birtual bat sortzeko beharrezkoak diren ekintzak maneiatzeko daude, hots: sarrera/irteerak (3D errenderizatzea, 2D marrazketa, soinua..), fisika/dinamika simulazioak, lursail maneiatzailea, *shaderrak* eta abarrak [Lewis and Jacobson, 2002].

3.1.1 Unity

Unity (ikusi 3.1. irudia) 2002an sortu zen Nicholas Francis eta Joachim Ante programatzaileen eskutik. Biak zebiltzan motore grafikoekin lanean eta bien lanak elkartzeak eman zion *Unity*-ri sorrera [Haas, 2014]. Egun 2019.1.1f1 bertsioan dago eta bertan landu da ingurune birtuala.



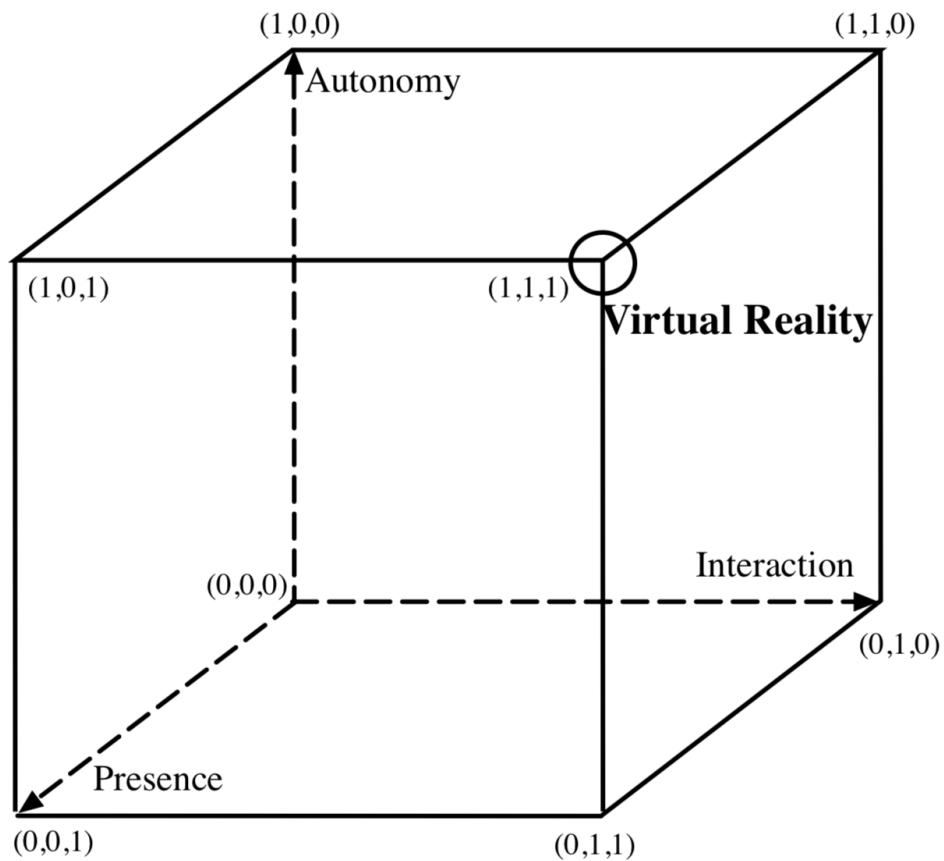
3.1 Irudia: *Unity* editorea

3.1.2 Ingurune birtualak

“Real-time interactive graphics with three-dimensional models, combined with a display technology that gives the user the immersion in the model world and direct manipulation.” [Fuchs, 1992]

Henry Fuchs, University of North Carolina-ko irakasleak 1992. urtean horrela deskribatzen zuen **ingurune birtuala**, edo egun ezagunagoa den errealitate birtuala. Hitz gakoak dira *immersive* (*Fuchs*-ek aipatzen duen *immersion* subjektuaren adjektiboa) eta *interactive*: bi hauek esperientzia simulatu autonomo batean batzean datza-eta ingurune birtualak. Ingurune baten errealismoa neurtzeko *Zeltzer-en kuboa*, 3.2. irudian ikusi daitekeena erabili ohi da.

Ingurune birtualen arrakasta eta erabilgarritasunaren gakoetako bat honek ematen duen gizaki-konputagailu interakzio erraza eta intuitiboa da [Mazuryk and Gervautz, 1999].



3.2 Irudia: *Autonomy, interaction, presence in VR* – Zeltzer-en kuboia [Zeltzer, 1992]

3.2 Julia

"Despite advances in compiler technology and execution for high- performance computing, programmers continue to prefer high-level dynamic languages for algorithm development and data analysis in applied math, engineering, and the sciences." [Bezanson et al., 2012]

Julia lengoia 2012an aurkeztu zen ofizialki. Maila altuko lengoia dinamikoa da. Datu-analisan edota zenbakien-analisan errendimendu altua emateko diseinatuta dago.

Matlab, Octave, R, SciPy edota *SciLab* maila-altuko inguruneek produktibitatea eskaintzen duten bitartean, *C* eta *Fortran* dira lengoai estandarrak konputazio handia eskatzen duten problemetarako; maila-altuko lengoaien errendimendu faltagatik. Hau horrela izaki, hutsune bat sortzen da errendimendu altua eta maila-altuko lengoia batek beteko lukee-

na. *Julia* maila-altuko lengoaien diseinuen teknika modernoak erabiliz dago sortuta eta hau da errendimendu altua azaltzen duen gakoa.

Julia-k horrela hutsunea betetzen du, estatikoki konpilatutako lengoiaia baten errendimendua izanik, maila-altuko lengoaien produktibitatea eta elkar-eragitea mantentzen duen bitartean. [Bezanson et al., 2012]

3.2.1 DifferentialEquations.jl

Ekuazio diferentzialak zenbakizko-metodoen bidez ebazteko *Julia* lengoaian erabiltzeko pakete bat da. Helburua *Julia*-n egindako inplementazioak, ekuazio-diferentzial anitzak ebazteko metodoez hornitzea da. [Rackauckas, 2017]

3.2.2 SatelliteToolbox.jl

Egileak, SATELLITETOOLBOX.JL paketea horrela deskribatzen du:

"...I would like to introduce the SatelliteToolbox.jl, which is a package for Julia language with many options to analyze space missions." [Chagas, 2019]

Hainbat aukera zabal eskaintzen ditu paketeak, hots orbita-definizioa hasieratik egitea edo orbita bera hasierako egoera (abiadura orbitala) baten bidez deskribatzen joatea uneoro. [Chagas, 2018]

3.3 Koheteen dinamika

Falcon9 kohetea LEO orbitan jartzeko simulazioetan erabili diren **ekuazio-sistema, erreferentzia-sistema** eta beste hainbat kontzeptu azalduko dira ondoren. Simulazioen emaitzak ulertzeko eta interpretatzeko garrantzitsua dena gailenduko da.

3.3.1 Ekuazio-sistema

Gravity-turn maniobraren teoriaz baliatuz eraman dira aurrera simulazioak. Maniobra hau espazio-ontzi bat satelite baten orbitara igotzeko edo orbitatik jaisteko erabiltzen da. Grabitatea ibilgailua desiraturiko ibilbidean mantentzeko darabilen ibilbide-optimizazio bat

da. Maniobra honek bi abantaila nagusi ditu espazio-ontziaren propulzioaz kontrolaturiko ibilbidearekiko:

- Propulzioa ez da ibilgailuaren norabide eta noranzkoa aldatzeko erabiltzen, azeleratzeko baizik.
- Hasierako igoera bertikalean, eraso-angelua minimoa edo hutsa izan daiteke, aerodinamikaren zeharkako-tentsioa minimizatuz ibilgailuan horrela aireratze arinago bat ahalbidetuz. [Callaway, 2004]

Maniobra hau erabiltzeko kasu edo egoera sinpleena ondorengoa da:

- Ibilgailua masa puntu bat da,
- eremu grabitatorio uniforme batean,
- masa konstantearekin eta
- airearen erresistentzia edota ibilgailuaren azaleraren kurbatura kontutan hartu gabe.
- \vec{F} bultzada bektorea da, magnitudea denbora-funtzio bat delarik eta norabide eta noranzkoa aldakorrak direlarik.

Premisa hauek kontutan hartuta, higidura ekuazio-diferentziala ondorengoa litzateke:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - mg\hat{k}$$

non \hat{k} bektore unitario bat den, norabide eta noranzko bertikalarekin, g azelerazio-grabitazionala den eta m ibilgailuaren masa den. $\frac{d\vec{v}}{dt}$ -k abiaduraren aldakuntza denborarekiko adierazten du eta hemendik aurrera \dot{v} modura adieraziko da.

Bultzada bektorea abiadura bektorearekiko paraleloa den puntu bateraino mugatuz, eta higidura ekuazioa \vec{v} -rekiko paraleloak diren ataletan eta \vec{v} -rekiko elkarzuta diren ataletan banatuz, ondorengo ekuazio-sistema erauzi daiteke [Culler and Fried, 1957]:

$$\dot{v} = \frac{F}{m} - g \cos \beta \quad (3.1)$$

$$v\dot{\beta} = g \sin \beta \quad (3.2)$$

non β abiadura bektorearen eta bertikalaren uneoroko angelua den ($\beta = \arccos(\vec{\tau}_1 \cdot \hat{k})$).

Errealismoa lortzea aldera, kasu sinpleenetik haratago joan eta ondorengo modeloak zehaztu dira; proiektuan berauek inplementatu direlarik emaitzak lortzeko.

Azelerazio-grabitazionalaren aldakuntzak

$$g = g_0 \left(\frac{r_0}{r_0 + h} \right)^2 \quad (3.3)$$

non $g_0 = 9.80665 m/s^2$ azelerazio grabitazionalaren balio estandarra den, $r_0 = 6.3781 \times 10^6 m$ lur planetaren erradio estandarra den eta h uneko altuera den.

Ibilgailuaren masa-galera

$$\dot{m} = - \frac{F_{max}}{I_{sp} g_0} \quad (3.4)$$

non F_{max} ibilgailuaren bultzada maximoa den eta $I_{sp} = 348s$ bultzada espezifikoa den.

Marruskadura atmosferikoa

Marruskadura-indarra modelatzeko, ibilgailuaren marruskadura koefizientea 0 dela suposatuko da. Horrela,

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho A c_d v^2 \quad (3.5)$$

non F_{drag} marruskadura indarra den, ρ atmosferaren dentsitatea den eta A ibilgailuaren erreferentziazko azalera den. Suposatuko da atmosferaren dentsitatea esponentzialki jaiten dela altuerarekiko, eta beraz:

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}} \quad (3.6)$$

non ρ_0 atmosferaren dentsitatea den lurrazalaren altueran eta H atmosferaren altuera-eskala den.

Horrela marruskadura-indarra abiaduraren modeloan txertatu daiteke, bultzadari eragiten dion erresistentzia gisa.

$$\dot{v} = \frac{F - F_{drag}}{m} - g \cos \beta \quad (3.7)$$

3.3. ekuazioarekin azelerazio-grabitazionalaren balio zehatzagoak lortu ditzakegu denboran zehar altuera handitzen doan heinean eta 3.4. ekuazioarekin aldiz, erregaia kontsumitzen doan heinean ibilgailuak jasaten duen masa-galera hartu daiteke kontutan. Azkenik 3.7. ekuazioak atmosferak ibilgailuarengan eragiten duen marruskadura txertatzen du arazoan.

$$\dot{v} = \left(F - \frac{1}{2} \rho_0 e^{-\frac{h}{H}} A c_d v^2 \right) \frac{1}{m} - g_0 \left(\frac{r_0}{r_0 + h} \right)^2 \cos \beta \quad (3.8)$$

$$v \dot{\beta} = g_0 \left(\frac{r_0}{r_0 + h} \right)^2 \sin \beta \quad (3.9)$$

Lortzen den ekuazio-sistema ezin da analitikoki ebatzi eta zenbakizko- metodoen bidez integratu behar da.

Problema hau zenbakizko-metodoak erabiliz ebatzi behar izateaz gainera, emaitza optimoak lortzeko kontrol-sistema bat inplementatu behar da, problema, funtsean, optimizazio problema bat delako: *ahalik eta erregai gutxiena erabiliz, v_t abiaduraz, a_t angeluarekin, h_t altuerara iritsi*. Kontrol-sistemak uneko egoera aztertu eta ibilbide-optimoa bilatzeko ekintzak exekutatu lituzke.

3.3.2 Erreferentzia-sistema

Egin diren simulazioetan zein ingurune birtualean erabiltzen den erreferentzia-sistema ondo definitzea garrantzitsua dela argi dago. Lehenik eta behin *Unity*-k darabilen erreferentzia sistema deskribatuko da eta ondoren simulazioak egiteko aukeratu dena.

1. ***Unity*-ren erreferentzia-sistema.** Mundu errealekin gertatzen den bezala, *Unity*-k bi erreferentzia-sistema darabiltz:

- **Lokala:** uneko objektuaren erreferentzia-sistema: hiru ardatzak ateratzen dira objektuaren zentrotik. ¹

¹Zentroa erlatiboa da eta modu askotan errepresentatu daiteke, hots: masa-zentroa.

- **Globala:** eszena bat sortzean, zentro bat ezartzen da eta hiru ardatzek eszena-mundu horren erreferentzia-sistema sortzen dute; zentrotik hiru ardatz absolutu ateratzen direlarik.

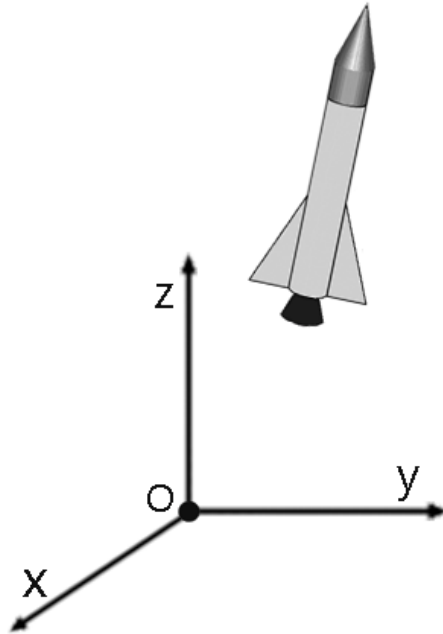
Horrela esan daiteke erreferentzia-sistema globalak munduari egiten diola erreferentzia, lokala bertan dagoen edozein objektu delarik.

2. **Simulazioetan erabili den erreferentzia-sistema.** Aeronautikan estandarra den erreferentzia-sistema erabili da simulazioetan; bi ardatz-sistema definitu direlarik:

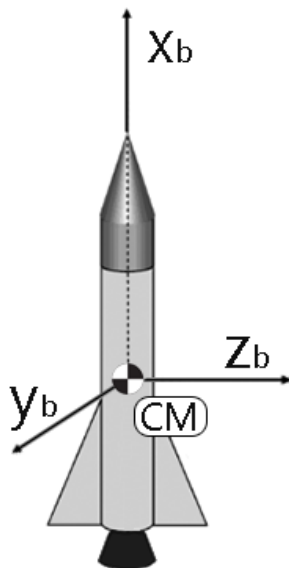
- **Inertziala:** 3.3. irudian ikusi daiteke sisteman ardatzak nola dauden definituta, bertikala Z ardatza izanik.
- **Gorputzarena:** 3.4. irudian bestalde, gorputzaren ardatz-sistema dugu. Kasu honetan bertikala X ardatza da ².

Bi ardatz-sistemak elkarrekin ikusi daitezke 3.5. irudian. Aipagarria da ere bai, egindako simulazioetan kontutan hartu ez den arren (*Gravity-turn* maniobra erabili delako hain zuzen ere), lur-hartzeko bistaratzeetan, *Thrust-vectoring* teknika erabiltzen dela kohetearen ibilbidea kontrolatzeko. Teknika honek toberaren biraketak bi ardatzetan darabiltza uneoro, momentuak aplikatuz, desiragarria den ibilbidean mantentzeko (3.7. irudian ikusgai) [Mason and Crowther, 2002].

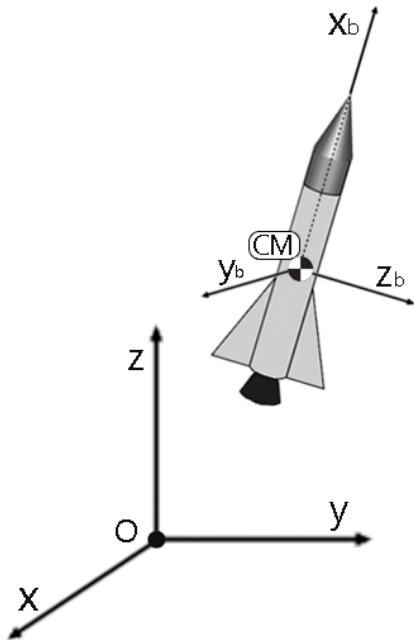
²Hau horrela da hiru ardatzetan jasan daitezkeen biraketen definizioagatik. Aeronautikan biraketa horiek izen bana dute XYZ ardatzetan eta hurrenez-hurren, *Pitch, Yaw, Roll* 3.6. irudian ikusi daitezke. Hiru izenek ardatz-sistema bat osatzen dute, muturrarekiko paraleloa den ardatza beti X izanik.



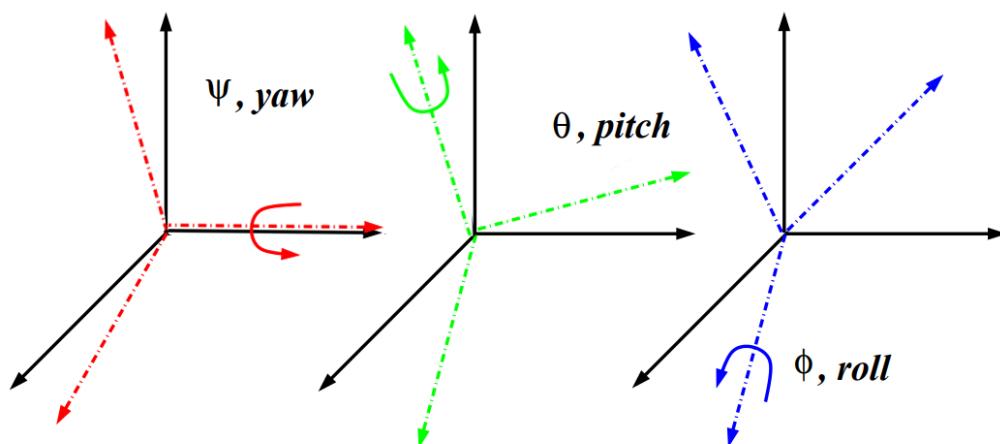
3.3 Irudia: Erreferentzia-sistema inertziala.



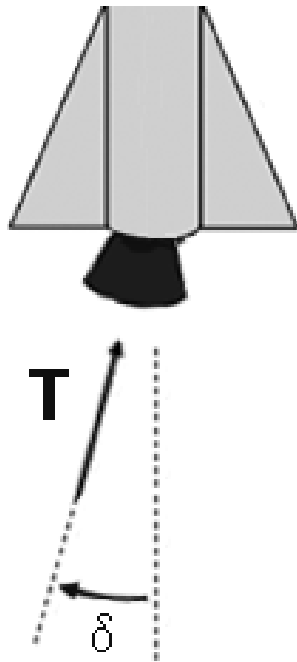
3.4 Irudia: Gorputzaren erreferentzia-sistema.



3.5 Irudia: Bi ardatz-sistemek osatutako erreferentzia-sistema.



3.6 Irudia: Eulerren angeluak (*Pitch, Yaw eta Roll*) definituz.



3.7 Irudia: *Thrust vectoring.*

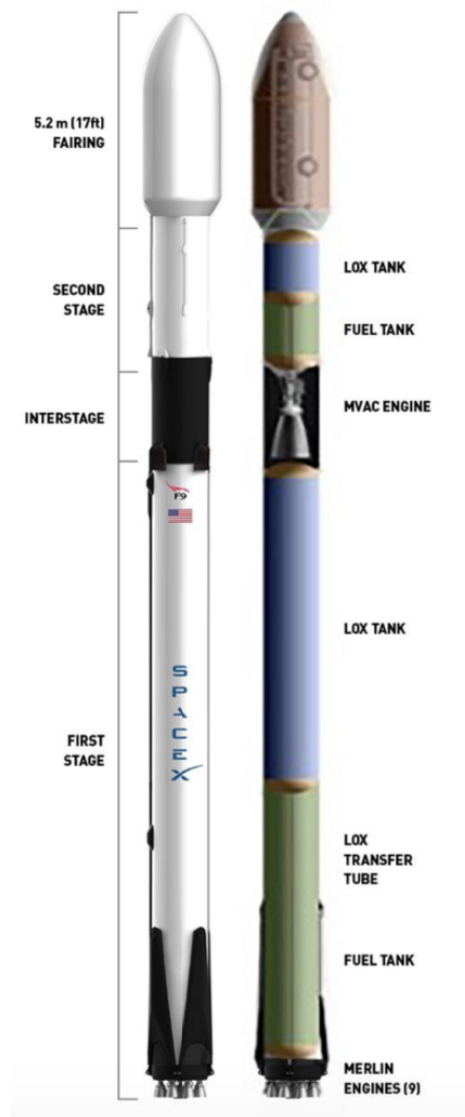
3.4 Falcon 9

Falcon 9a (Ikusi 3.8. irudia) oxigeno-likidoz (LOX) eta kohete-kerosenoz (RP-1) dabilen aireratze-ibilgailua da. *SpaceX* enpresak diseinatu, eraiki eta darabilena, *Falcon 9* aren lehen jaurtiketa 2010. urtean izan zen; 11 satelite orbitan injektatu ostean, lur hartu zuen lehen aldia 2015ko Abenduan izan zelarik.

Falcon 9ak 22T inguru altxa ditzake LEO orbitara eta 8 GTO (*Geostationary Transfer Orbit*) orbitara. 3.1. taulan ikusi daitezke simulazioetan erabilgarriak izan diren hainbat datu.

Ezaugarria	Balioa
Ibilgailuaren masa jaurtiketan(Tona)	549
Diametroa(m)	3.66
Altuera(m)	70
Hasierako-bultzada(kN)	7,600
Bultzada espezifikoa(s)	348

3.1 Taula: Falcon9 aireratze-ibilgailuaren hainbat datu [SpaceX, 2019b]



3.8 Irudia: *Falcon 9* kohetea [SpaceX, 2019a]

4. KAPITULUA

Proiektuaren garapena

Ondorengo orrietan proiektuan zehar egindakoak deskribatuko dira: ingurunearen garapena zehaztuko da bai eta simulazioen nondik norakoak; horretarako emaitzen grafikoez baliotuz. Azkenik elkarlanaren emaitzak azalduko dira.

4.1 Ingurunearen garapena

Aipatu bezala *Unity* motore grafikoaz garatu da proiektuaren zati hau. Aipagarria den kontzeptu bat da *asset*-a. Baliabideak dira funtsean eta ezinbestekoak dira proiektuan zehar lana errazteko. *Unity*-k *on-line* denda bat dauka eta bertan komunitateak sortutako baliabideak daude eskuragarri. Proiektuan zehar hainbat baliabide erabili dira.

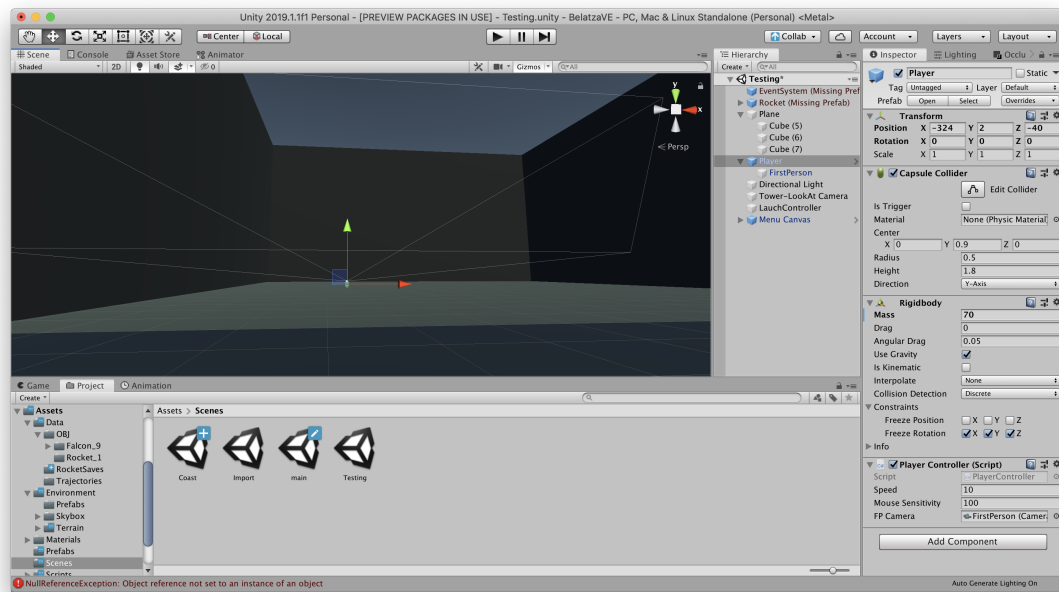
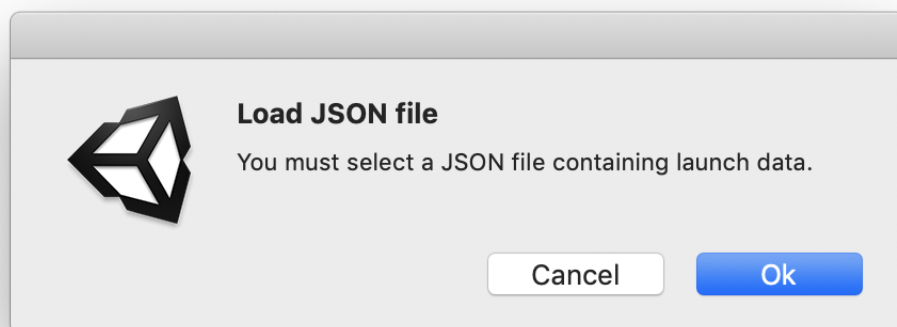
Unity motorra lan hau garatzeko hainbat arrazoi desberdinengatik aukeratu da. Alde batetik erreminta ezaguna izateak *bug* eta arazo teknikoak izateko arriskua jaisten du, talde handia baitago motorra lantzen etengabe. *Unity*-k interneten daukan komunitate erraldoia izan da aukeratzeko beste arrazoi bat. Arazoren baten aurrean aukera handiak daude interneteko erabiltzailearen batek arazo berdinari lehenago aurre egin izateko. Ikasteko tutorialak, material eta *asset* erabilgarriak izan dira beste arrazoi batzuk.

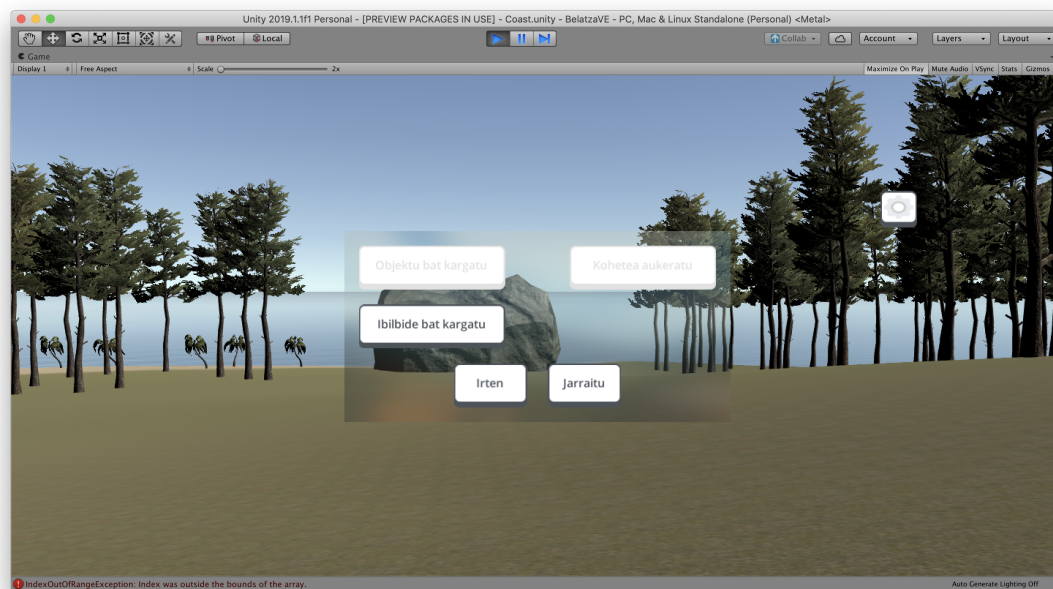
Ordena kronologikoan deskribatuko dira sortu diren garapenak eta hobekuntzak:

1. Proiektua ireki eta 4.1. irudian ikusi daiteke hasiera-hasieran sortutako eszena. Ber-

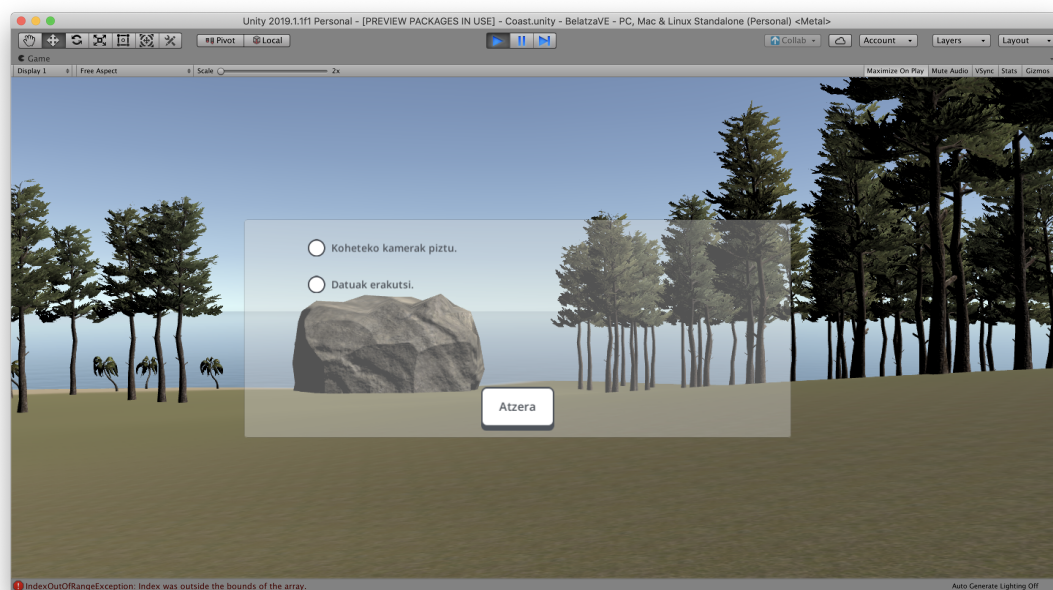
tan hainbat proba egin dira eta amaierako eszena nagusian baliagarriak diren hainbat ezaugarri garatu dira, hots: erabiltzailea, kamerak edota menu nagusia.

2. Hurrengo garapena ibilbide datuak *JSON* motako fitxategi bidez irakurtzea eta interpretatzea da. Erabiltzaileari eskatzen zaio *JSON* motako fitxategi bat kargatzea 4.2. irudian ikusi daitekeen bezala. Jasotako datuak *Unity*-n sortutako datu-motabatean kargatzen dira eta hauek eszenako objektu baten posizioa aldatzen doaz, finkatutako *frame-rate* eta interpolazioaren arabera bistaratuz.
3. Menua gehitu da hurren, honek erabiltzailearen eta ingurunearen arteko elkar-ekintza ahalbidetzen du eta simulazioak egiteko beharrezko testuinguruan kokatzen du proiektua. 4.3. irudian ikusi daiteke menua. Sei botoi dauzka, 4 funtzionalak direlarik.
 - *Ibilbidea kargatu*: erabiltzaileak ibilbidea kargatzeko.
 - *Objektua kargatu (Ez funtzionala)*: erabiltzaileak *.obj* motako objektuak eszenan kargatzeko.
 - *Jarraitu*: menutik atera eta ingurunera itzultzeko.
 - *Irten*: menutik atera eta ingurunetik ateratzeko.
 - *Konfigurazioa*: konfigurazioko menua irekitzen du. 4.4. irudian ikusi daiteke.
 - *Kohetea aukeratu (Ez funtzionala)*: bistaratzeak egingo dituen kohetea aukeratzeko menua irekitzen du.
4. Eszena berria sortzen da, errealismo puntu bat emateko. 4.5. irudian ikusi daiteke pantaila-irudia.
5. Datuen bistaratzea eta kamera desberdinen pantailaratzea jaurtiketean implementatzen da hurrena. 4.7. irudian ikusi daiteke hori: pantaila bera kamera desberdinen ikusmenarekin banaturik dagoela nabari da.

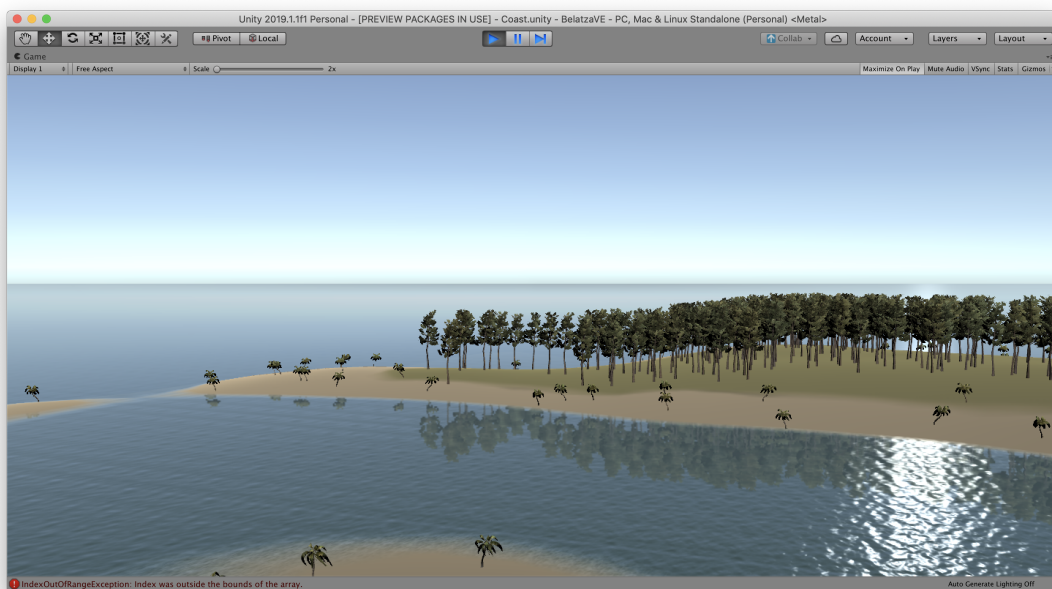
4.1 Irudia: *Unity*-ko editorea: Kamerak gehituta4.2 Irudia: *Unity*-ko editorea: Ibilbidea gehituta



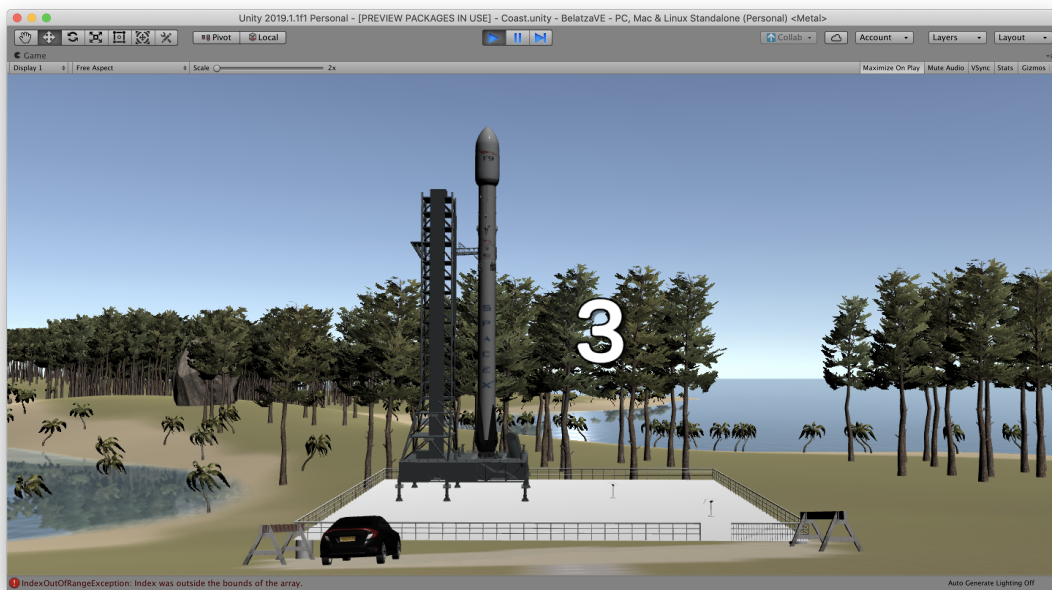
4.3 Irudia: *Unity*-ko editorea: Menua



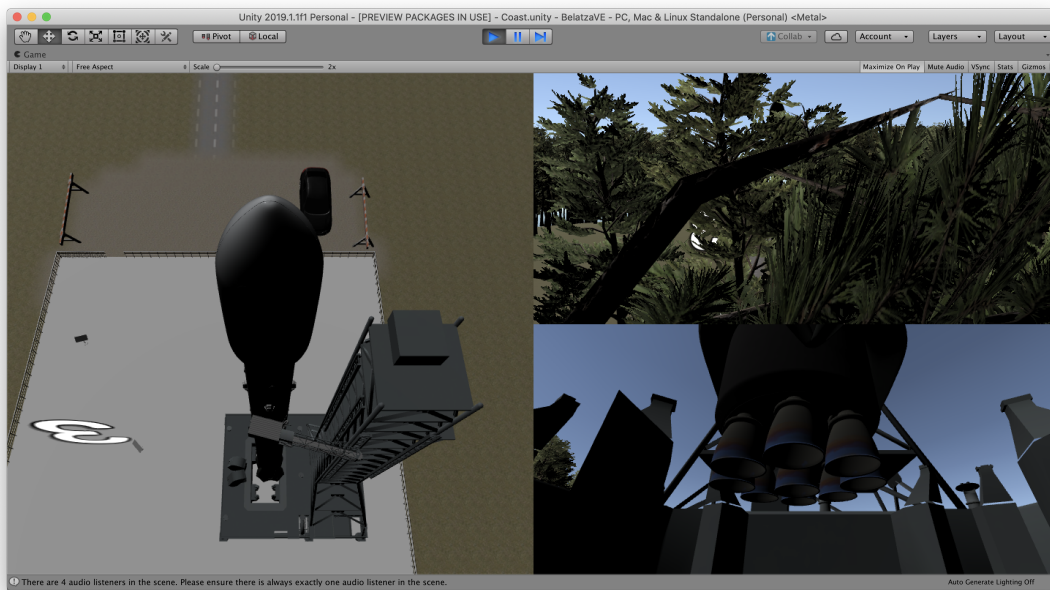
4.4 Irudia: *Unity*-ko editorea: Konfigurazio menua



4.5 Irudia: *Unity*-ko editorea: Eszena berria



4.6 Irudia: *Unity*-ko editorea: jaurtiketa



4.7 Irudia: *Unity*-ko editorea: Kamera desberdinak pantailan.

Aipagarria da proiektu honetan [Fuchs, 1992]-ek aipatzen duen *display-technology*-a ordenagailuko pantaila dela, eta nahiz eta egun errealitate birtuean gehiago murgiltzeko tresnak egon badauden, sinpletasunagatik eta egingarritasunagatik aukeratu da hau. Aipagarria da ere bai sortu den ingurune birtualak interfaze grafiko bat duela, murgiltze puntu bat ematen diolarik, esperientzia guztiz errealista izan ez arren. [Mazuryk and Gervautz, 1999]

4.2 Falcon9 simulazioak

Bistaratzeko egiteko datuak beharrezkoak dira, simulazioak beharrezkoak dira. *Julia* lengoia erabiliz, DIFFERENTIALEQUATIONS.JL eta SATELLITETOOLBOX.JL paketeen laguntzaz, Space X enpresaren *Falcon 9* kohetea LEO orbitan jartzeko simulazio bat egin da. 3.1. taulan ikusi daitezkeen koheteari buruzko datuak erabili dira simulazioa egiteko.

4.2.1 Arazoaren definizioa:

Kohete bat 500km inguruko altueran dagoen LEO orbita polar batean jarri nahi da. Lu-rrazaletik atera eta *Gravity-turn* maniobraz baliatuz iritsiko da orbita deskribatzerara.

Informazioa eta erazi daitezkeen datuak:

1. LEO orbitek 200Km-tatik, 2000Km-tarainoko altuera daukate.
2. Orbita polarra izateak bertan orbitatzen ari den objektu bat bi poloetatik pasatzen dela esan nahi du eta ondorioz erazi daiteke horrelako orbita batek 90°-ko inklinazioa edukiko duela ekuatorearen planoarekiko.
3. Simulazioa egiteko erabaki da *Falcon 9* kohetearen datuetatik abiatzea. (3.1. taulan ikusgai).
4. Egoera-bektorea horrela definitu da: $u = [x, z, v_x, v_z, m, v, \beta]$, non x eta z aldagaiek posizio bat definitzen duten, v_x eta v_z aldagaiek ardatz bakoitzean abiadurak definitzen dituzten, m ibilgailuaren masa den, v abiaduraren modulua den eta β Z ardatz bertikala eta \vec{v} bektorearen arteko angelua den.
5. Pitch-over maniobra bataz-beste 10Km-ko altuerara iristean egiten da. [of Technology, 2007]
6. Kohetearen jaurtiketatik 300 segundo simulatzea erabaki da injekzio puntura iristeko.
7. Denbora diskretizazioari dagokionez, 30 datu lortuko dira segunduko.

Premisa hauek kontutan hartuta, aldagai aske gisa gelditzen dira β -ren balioa eta hasierako masaren balioa (kargamenduaren arabera aldatzen dena). Simulazioak ondorioz aldagai hauen balio desberdinentzat egin dira, desiragarriak diren balio hurbilak bilatuz maniobra exekutatzeko.

Daukagun informazioarekin eta deskribatu den modeloa erabilita (3.1-tik 3.9-rako ekuazioak hain zuzen ere), simulazio sorta bat egin da hainbat emaitza lortuz.

4.2.2 Emaitzak:

?? eta 4.2. taulatan ikusi daitezke hasierako datu desberdinekin lortzen diren emaitzak; hauek *Tsitouras 5/4 Runge-Kutta metodoa* (+ *2/3 ordenako Rosenbrock-W metodoa integrazioan zehar zurruntasuna topatzen bada*) algoritmoak erabilita lortu dira, altuera desiragarriarekiko desbiderapen txikiena eman baitute denbora onargarri batean. 4.3. taulan

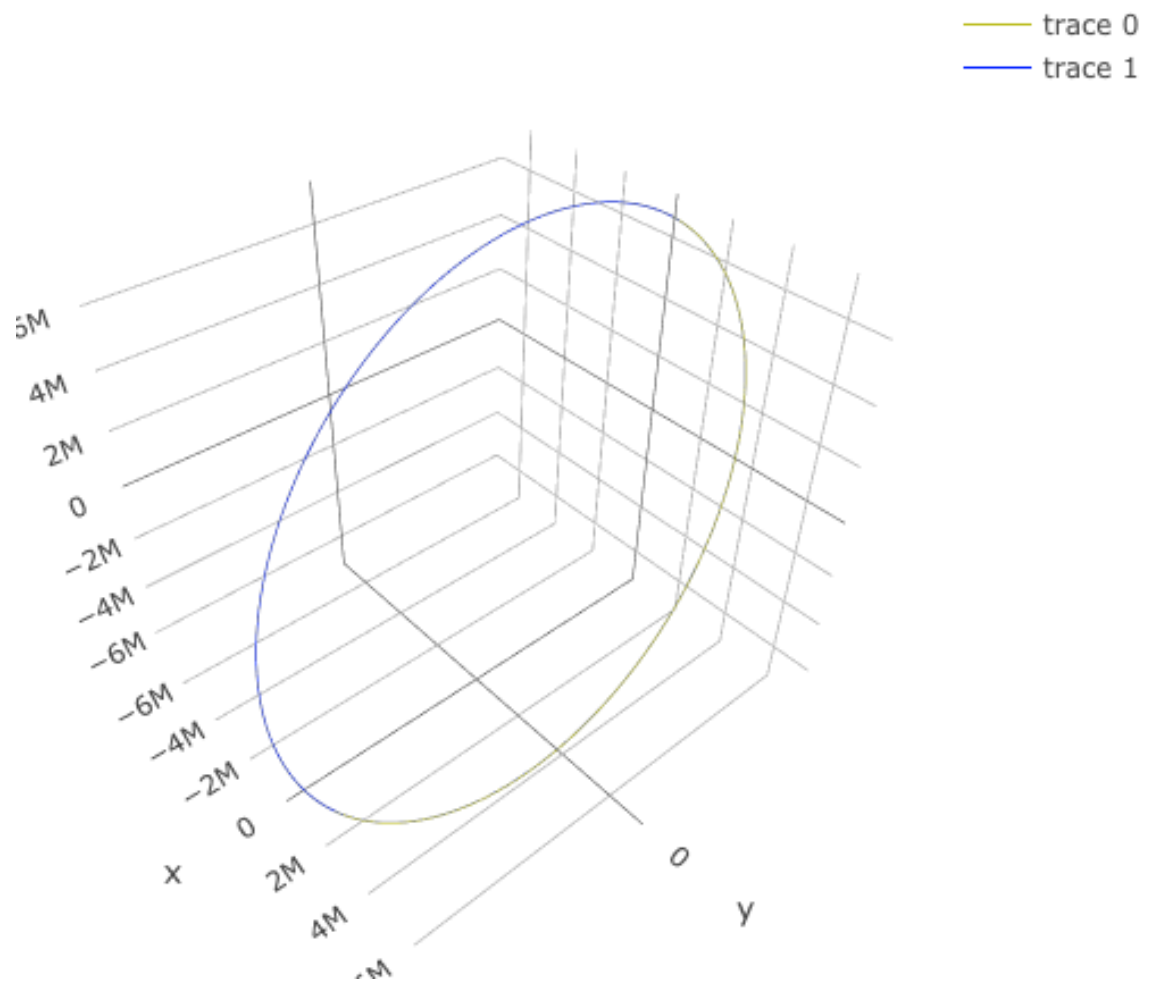
ikusi daitezke algoritmo desberdinen exekuzioek emandako emaitzak, berdez desbiderapen baxuena eta exekuzio-denbora baxuena eman duten algoritmoak.

Lehen simulazioak egin ostean [??](#). taulan ikusten den bezala, lortu nahi den emaitzatik (LEO orbita 500Km-tara) gertuen dagoen egoera $\beta = 15.0$ denean daukagu. Hori kontutan hartuta kargamenduaren balio desberdinekin egingo dira orain simulazioak.

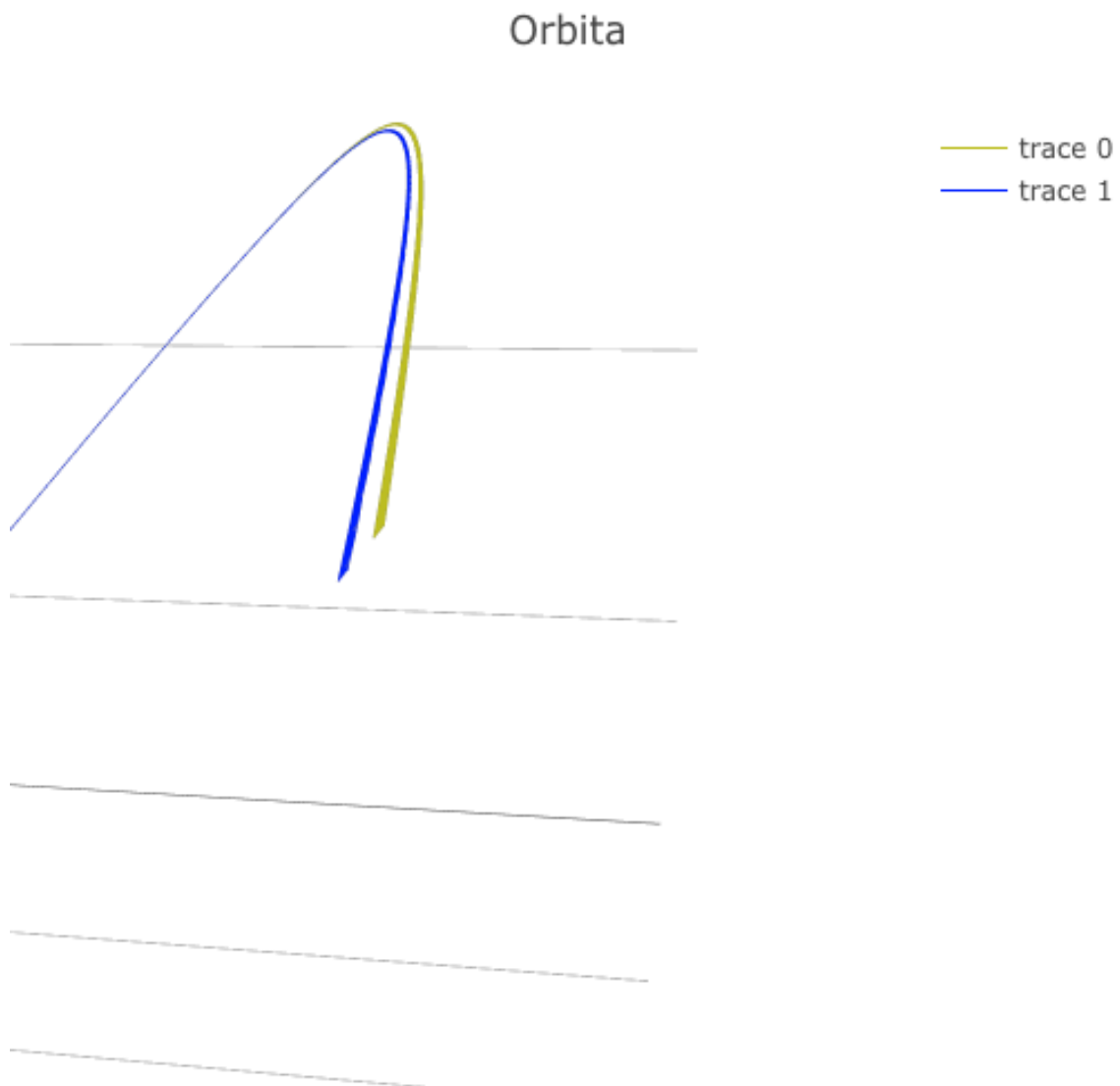
Bigarren simulazio sorta honekin ([4.2](#)) argi eta garbi ikusten da $30000Kg$ -ko zamarekin eta $\beta = 15$ izanik, $500Km$ -tara dagoen LEO orbitara asko hurbiltzen dela simulazioa eta beraz hori erabiliko dugu orbita deskribatzeko.

Deskribatuko duen orbitaren inklinazioa 90° -koa dela justifikatu da dagoeneko eta orain simulazioetatik erauzi da $5.0460 * 10^5 = 504.6Km$ -ko altuerara iristen direla emaitzak dauzkagun datuekin. Datu hauek erabilita [4.8](#). irudian ikusi daiteke SATELLITETOOL-BOX.JL erreminta erabiliz lortutako orbitak. Emaitza nahiko zehatza lortu den arren, [4.9](#). irudian ikusi daiteke desberdintasuna badagoela.

Orbita



4.8 Irudia: Orbita desiragarria urdinez, lortu dena berdez.



4.9 Irudia: Bi orbiten arteko desberdintasuna. Urdinez desiragarria, berdez simulazioekin lortu dena.

Algoritmoa	Integrazio pausuak segundoko	Exekuzio denbora(s)	Desbiderapen-altueran(m)
2/3 ordenako Rosenbrock-W metodoa	30	2.502163	751
Tsitouras 5/4 Runge-Kutta metodoa	30	1.504515	47
Tsitouras 5/4 Runge-Kutta metodoa (+ 2/3 ordenako Rosenbrock-W metodoa integrazioan zehar zurruntasuna topatzen bada)	30	2.973122	46
Owren-Zennaro 5/4 interpolazio metodo optimizatua	30	3.503341	84
4. ordenako zurruntasun establea mantentzen duen Rosenbrock metodoa	30	4.705729	392
Verner-en "Most Efficient"7/6 Runge-Kutta metodoa	30	5.514171	569
Verner-en "Most Efficient"7/6 Runge-Kutta metodoa + (2/3 ordenako Rosenbrock-W metodoa integrazioan zehar zurruntasuna topatzen bada)	30	5.102347	471

4.3 Taula: Algoritmoen desberdinekin lortutako emaitzak

Azkenik, *JSON* motako fitxategiez baliatuta, datuak ingurune grafikora pasa dira egindako simulazioen bistaratzea gauzatuz. 4.6. irudian ikusi daiteke jaurtiketa horren bistaratzearen pantaila-argazki bat.



4.10 Irudia: Simulazioaren bistaratzea.

4.3 Elkarlanaren emaitzak

Elkarlanaren arrazoia helburu orokorrak betetzeko bakoitzaren gaitasunak aprobetxatzea izan da. Enekok kohete modeloen aireratzea simulatu du, kontrol-sistema zurrun bat garatuz. Simulazioen datuak (kohetearen posizioa eta biraketak denbora diskretizatuan zehar) *JSON* datu-mota gisa gorde dira eta *Unity*-n sortutako ingurune-birtualean kargatu daitezke aireratzea bistartzeko. 4.6. irudian Enekok simulatutako jaurtiketa baten hasiera ikusi daiteke.

4.4 Hasierako helburuengandik desbideratzea

Hasiera batean jaurtiketa simulatzeaz gain, lur-hartzea simulatu nahi zen; horretarako ingurunea simulatzeko gaitasunaz ahalbidetuz. Gradu Amaierako mugek eta ataza hori burutzeak dakarren zailtasunak ezinezkoa egin du hori aurrera eramatea. Ondorioetan azalduko da hartutako erabakien zergatia, hausnarketa bat eginez haren inguruan.

Emaitzen taula				
β (grad)	m (Kg)	Injekzio-puntua(m) (x_i, z_i)	Injekzio-unea(s) (t)	Ibilbidea
15.0	549054.0 (549054.0 + 0 Kg zama)	(6.10518 * 10 ⁶ , 1.19132 * 10 ⁶)	158.1970	
15.0	549054.0 (549054.0 + 10000 Kg zama)	(3.63981 * 10 ⁶ , 8.2779 * 10 ⁵)	139.6175	
15.0	549054.0 (549054.0 + 30000 Kg zama)	(1.8311 * 10 ⁶ , 5.0460 * 10 ⁵)	119.2975	

4.2 Taula: Simulazioaren datuak 2.

5. KAPITULUA

Ondorioak

Atal honetan proiektuaren garapenetik zein emaitzetatik erauzi daitezkeen ondorioak azalduko dira. Proiektuan zehar egon diren helburuen aldaketek eta lortu diren emaitzen interpretazioak bi ondorio nagusi planteatzea dakar:

1. **Anbizio handiko hasierako planteamendua.** Hasiera batean helburua, ingurunea simulazioak egiteko gaitasunaz hornitzea zen, aireratzea zein lur-hartzea simulatu-ko zirelarik. Helburu hori ez da bete eta horrek plangintzan etengabeko aldaketak eta eguneraketak suposatu ditu. Emaitzak positiboki baloratzen diren arren, hasiera batean espero zenetik aldentzen dira. Egingarritasuna proiektuaren hastapenetik ondo neurtzeak daukan garrantzia azpimarragarria dela ondoriozta daiteke beraz.
2. **Emaitzen inguruan.** Aireratze errealistak bistaratzen dituen erreminta txukun bat garatu da, hainbat funtzionalitate desberdinekin. Gainera emaitza positiboak lortu dira egindako simulazioekin, espero zenetik gertu dauden emaitzak lortuz; horrek modeloaren zuzentasuna berresten duelarik. Esan behar da kontrol-sistema baten garapenak oraindik eta emaitza zehatzagoak eta errealistagoak lortzea ahalbidetuko lukeela, hasierako datuak eta amaierako datu desiragarriak emanda, kohetea ibilbide optimoan zehar mantenduko lukeen kontrol-sistemaren garapenak hain zuzen ere. Halaber, elkarlanak fruituak eman ditu eta kontrol-dun aireratze baten bistaratze dezente errealistak lortu dira Enekok garatu duen modeloaren eta kontrol-sistemaren eskuetatik.

Hasierako helburuetara ez iristeak ez duela emaitza positiboak lortzea galarazi esan daiteke, beraz. Egiteke daude ingurunearen garapen zabalagoa lortzeko funtzionalitateak, lan honetan ekin den bidea jarraituz tresna sendo bat sortzeko aukerak daude, interesgarria izateaz gain erabilgarria ere izango dena.

5.1 Etorkizuna

Proiektua ez da hemen bukatzen. Ingurunea garatzen jarraitzeko hainbat funtzionalitate gehitzeko aukera dago eta lan egiteko asko dago. Aipagarriak dira, hots: hasierako helburuak betetzeko inguruneari simulazioak egiteko ahalmena gehitzea, kohete modelo desberdinak sortu, aldatu edo ingurunera inportatzea, bai eta erabiltzaile-ingurune arteko elkar-ekintza hobetzea ere. Etorkizunean funtzionalitate horiek zerrendatu, planifikatu eta egikaritzeko aukera izango da, ingurunearen garapenean aurrera egiteko beharrezkoak diren pausuak jarraituz.

Eranskinak

Bibliografia

- [Bezanson et al., 2012] Bezanson, J., Karpinski, S., Shah, V. B., and Edelman, A. (2012). Julia: A fast dynamic language for technical computing. *CoRR*, abs/1209.5145.
- [Callaway, 2004] Callaway, D. W. (2004). Coplanar air launch with gravity-turn launch trajectories.
- [Chagas, 2018] Chagas, R. A. J. (2018). Satellitetoolbox.jl documentation.
- [Chagas, 2019] Chagas, R. A. J. (2019). The satellite toolbox for julia.
- [Culler and Fried, 1957] Culler, G. J. and Fried, B. D. (1957). Universal Gravity Turn Trajectories. *Journal of Applied Physics*, 28:672–676.
- [Fuchs, 1992] Fuchs, H. (1992). Research directions in virtual environments.
- [Haas, 2014] Haas, J. K. (2014). A history of the unity game engine.
- [Lewis and Jacobson, 2002] Lewis, M. and Jacobson, J. (2002). Game engines in scientific research. *COMMUNICATIONS OF THE ACM*, 45(1):27–31.
- [Mason and Crowther, 2002] Mason, M. S. and Crowther, W. J. (2002). Fluidic thrust vectoring of low observable aircraft.
- [Mazuryk and Gervautz, 1999] Mazuryk, T. and Gervautz, M. (1999). Virtual reality - history, applications, technology and future.
- [of Technology, 2007] of Technology, D. U. (2007). rocket-motion-and-reentry-systems.
- [Rackauckas, 2017] Rackauckas, C. (2017). Differentialequations.jl – a performant and feature-rich ecosystem for solving differential equations in julia. *Journal of Open Research Software*.

[SpaceX, 2019a] SpaceX (2019a). *Falcon user's guide*. Rocket Rd. Hawthorne, CA 90250.

[SpaceX, 2019b] SpaceX (2019b). Space launch report: SpaceX falcon 9 v1.2 data sheet.

[Stagl, 1995] Stagl, J. (1995). *A History of Curiosity, the theory of travel 1550-1800*. Routledge.

[Stappert and Dumont, 2016] Stappert, S. and Dumont, E. (2016). Reusability of launcher vehicles by the method of SpaceX.

[Wall, 2015] Wall, M. (2015). Wow! SpaceX lands orbital rocket successfully in history first.

[Zeltzer, 1992] Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction, presence. *Presence*, 1(1):127–132.