

Treball de Fi de Màster

MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA INDUSTRIAL

Disseny de noves topologies de potes per a robots quadrúpedes

MEMÒRIA

Autor: Manel Pujol Ibáñez
Directora: Alba Pérez Gracia
Convocatòria: Setembre 2023



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Els robots quadrúpedes cada cop s'implementen més i millor a la indústria actual aconseguint automatitzar una infinitud de processos i fomentant la Indústria 4.0.

Actualment, es troben en un continu desenvolupament i aquest treball se centra en una de les característiques que els diferencien de la resta de robots, el seu mètode de locomoció.

En aquesta memòria es recull pas a pas la metodologia emprada per proposar dissenys innovadors per a potes per robots quadrúpedes.

Inicialment, s'ha determinat que el mètode de locomoció més adient per un robot quadrúpede és el galop dels gossos.

A continuació, mitjançant una tecnologia de captura de moviment, s'han obtingut dades reals del desplaçament dels gossos i, utilitzant programes matemàtics, s'ha generat una trajectòria tridimensional per aconseguir el desplaçament del robot de manera omnidireccional.

Un cop generada la trajectòria a seguir, s'ha realitzat un estudi basat en la teoria de grafs per visualitzar de manera exhaustiva quines combinacions de mecanismes fan viable el moviment proposat. Seguidament, s'han pres una sèrie de decisions raonades per descartar candidats i suggerir uns mecanismes viables.

Finalment, s'ha fet un estudi cinemàtic d'un dels mecanismes prometedors per dimensionar-lo i proposar un disseny final.

Durant les diferents etapes del treball, s'ha necessitat moure una gran quantitat de dades. El tractament d'aquestes, s'ha dut a terme amb els programes MATLAB i Python, i la representació i simulació dels mecanismes s'ha dut a terme amb el programa de CAD SolidWorks.

El resultat final ha estat la creació d'un nou disseny de pota per a robots quadrúpedes. Així i tot, cal destacar que també s'ha proposat un mètode genèric per facilitar l'estudi de trajectòries i generar mecanismes en concordança a aquestes.

Resumen

Los robots cuadrúpedos cada vez se implementan más y mejor en la industria actual consiguiendo automatizar una infinidad de procesos y fomentando la Industria 4.0.

Actualmente, se encuentran en un continuo desarrollo y este trabajo se centra en una de las características que les diferencian del resto de robots, su método de locomoción.

En esta memoria se recoge paso a paso la metodología utilizada para proponer diseños innovadores para patas por robots cuadrúpedos.

Inicialmente, se ha determinado que el método de locomoción más adecuado para un robot cuadrúpedo es el galope de los perros.

A continuación, mediante una tecnología de captura de movimiento, se han obtenido datos reales del desplazamiento de los perros y, utilizando programas matemáticos, se ha generado una trayectoria tridimensional para conseguir el desplazamiento del robot de forma omnidireccional.

Una vez generada la trayectoria a seguir, se ha realizado un estudio basado en la teoría de grafos para visualizar de forma exhaustiva qué combinaciones de mecanismos hacen viable el movimiento propuesto. Seguidamente, se han tomado una serie de decisiones razonadas para descartar a candidatos y sugerir unos mecanismos viables.

Finalmente, se ha realizado un estudio cinemático de uno de los mecanismos prometedores para dimensionarlo y proponer un diseño final.

Durante las distintas etapas del trabajo, se ha necesitado mover una gran cantidad de datos. El tratamiento de éstas se ha realizado con los softwares MATLAB y Python, y la representación y simulación de los mecanismos se ha llevado a cabo con el programa de CAD SolidWorks.

El resultado final ha sido la creación de un nuevo diseño de pata para robots cuadrúpedos. Aun así, cabe destacar que también se ha propuesto un método genérico para facilitar el estudio de trayectorias y generar mecanismos en concordancia a las mismas.

Abstract

Quadruped robots are increasingly being implemented more and better in today's industry, managing to automate an infinite number of processes, and promoting Industry 4.0.

Currently, they are in continuous development and this work focuses on one of the characteristics that differentiate them from other robots, their method of locomotion.

This report covers step by step the methodology used to propose innovative designs for legs for quadruped robots.

Initially, it has been determined that the most suitable method of locomotion for a quadrupedal robot is the canine gallop.

Then, using a motion capture technology, real data of the dogs' movement has been obtained and, using mathematical programs, a three-dimensional trajectory has been generated to achieve the movement of the robot in an omnidirectional manner.

Once the trajectory to be followed has been generated, a study based on graph theory has been carried out to comprehensively visualize which combinations of mechanisms make the proposed movement viable. Subsequently, a series of reasoned decisions have been made to rule out candidates and suggest viable mechanisms.

Finally, a kinematic study has been made of one of the promising mechanisms to size it and propose a final design.

During the different stages of the work, it was necessary to move a large amount of data. The treatment of these has been carried out with MATLAB and Python software, and the representation and simulation of the mechanisms has been carried out with the SolidWorks CAD program.

The result has been the creation of a new leg design for quadruped robots. Even so, it should be noted that a generic method has also been proposed to facilitate the study of trajectories and generate mechanisms in accordance with them.

Contingut

RESUM	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
CONTINGUT	7
GLOSSARI I NOMENCLATURA	10
LLISTAT DE FIGURES	11
LLISTAT DE TAULES	15
LLISTAT DE GRÀFIQUES	16
LLISTAT D'EQUACIONS	18
1. INTRODUCCIÓ	19
1.1. Motivació	19
1.2. Abast del treball	20
1.3. Requisits previs	21
1.4. Objectius del treball	21
2. ELS ROBOTS QUADRÚPEDES	22
2.1. Història i desenvolupament	22
2.1.1. A principis dels 1900	22
2.1.2. A mitjans dels 1900	24
2.1.3. Dècada dels 90	26
2.1.4. Principis dels 2000	27
2.1.5. Robots quadrúpedes actuals	28
2.2. Estat de l'art	31
3. TRAJECTORIA DE LA POTA	34
3.1. Determinació de la trajectòria a seguir	34
3.1.1. Tipologies de galop dels mamífers quadrúpedes	34
3.1.2. Animal a estudiar	35
3.1.3. Desplaçament a simular	36
3.2. Obtenció de dades	36
3.2.1. Ubicació i rellevància dels marcadors	37
3.3. Contingut de la base de dades	38
3.3.1. Obtenció del format adequat	38
3.3.2. Contingut	38

3.4.	Estudi de les dades mitjançant MATLAB.....	40
3.4.1.	Primera representació.....	40
3.4.2.	Canvi de referència.....	41
3.4.3.	Trajectòries estudiades en referència relativa.....	43
3.4.4.	Rotació i adaptació de les trajectòries.....	45
3.5.	Trajectòria final.....	47
3.6.	Trajectòria complementària.....	49
4.	SELECCIÓ DEL MECANISME	52
4.1.	Classificació inicial.....	52
4.2.	Codi emprat.....	53
4.2.1.	Codi utilitzat per a la generació de combinacions de mecanismes.....	54
4.2.1.1.	“main.py”.....	54
4.2.1.2.	“Mech3D”.....	55
4.2.2.	Variables utilitzades.....	55
4.3.	Representació dels resultats mitjançant Grafs.....	56
4.3.1.	Format dels resultats.....	56
4.3.2.	Introducció a la teoria de Grafs utilitzada.....	57
4.3.3.	Introducció a la representació de mecanismes utilitzada.....	57
4.3.4.	Exemples de la representació de mecanismes.....	59
4.4.	Mecanismes obtinguts.....	60
4.4.1.	Resultats obtinguts amb 1 grau de llibertat:.....	60
4.4.2.	Resultats obtinguts amb 2 graus de llibertat:.....	61
4.4.3.	Resultats obtinguts amb 3 graus de llibertat:.....	62
4.4.4.	Mecanismes estudiats mitjançant teoria de grafs.....	63
4.5.	Mecanisme seleccionat.....	65
5.	ESTUDI CINEMÀTIC	68
5.1.	Parametrització del mecanisme global.....	68
5.1.1.	Mecanisme base.....	68
5.1.2.	Pota 1 del mecanisme base parametritzat.....	69
5.1.3.	Pota 2 del mecanisme base parametritzat.....	70
5.1.4.	Mecanisme base complet parametritzat.....	71
5.1.5.	Mecanisme complementari.....	72
5.1.6.	Mecanisme complementari parametritzat.....	72
5.2.	Estudi cinemàtic del mecanisme base.....	73
5.2.1.	Detall de l'estudi cinemàtic de les potes individualment.....	74
5.2.1.1.	Posicions de la trajectòria i Triedre de Frénet.....	74
5.2.1.2.	Inicialització de les variables.....	77
5.2.1.3.	Definició de les opcions del “solver”.....	77

5.2.1.4. Restriccions aplicades a les variables	78
5.2.1.5. Restriccions no lineals.....	79
5.2.1.6. Execució de funcions.....	79
5.2.1.6.1..... “FKequations”	79
5.2.1.6.2..... “UPRcon”	80
5.2.1.6.3..... “fmincon”	81
5.2.1.7. Modificació de les variables.....	82
5.2.1.8. Resultats	83
5.2.2. Exposició i comprovació dels resultats individuals	83
5.2.3. Detall de l'estudi cinemàtic de les potes conjuntament	88
5.3. Estudi cinemàtic del mecanisme complementari	89
5.4. Resultats cinemàtics globals.....	92
6. MECANISME PROPOSAT	96
7. PLANIFICACIÓ	99
8. ESTUDI ECONÒMIC	100
8.1. Despeses de l'autor del projecte.....	100
8.2. Hores del tutor del projecte.....	101
8.3. Llicències de software.....	101
8.4. Resum de les despeses.....	102
9. ESTUDI AMBIENTAL	103
9.1. Impacte ambiental de la realització del treball	103
9.2. Impacte ambiental dels resultats del treball	104
10. OBJECTIUS DE DESENVOLUPAMENT SOSTENIBLE	105
11. CONCLUSIONS	107
12. AGRAÏMENTS	109
13. BIBLIOGRAFIA	110
Bibliografia complementària	116
Software utilitzat	116

Glossari i Nomenclatura

MOCAP: “Motion Capture”. Captura de moviment.

MIT: “Massachusetts Institute of Technology”.

PCA: “Principal Component Analysis”. En català: Anàlisi de components principals. Es tracta d’una tècnica estadística utilitzada en l’estudi de les trajectòries per simplificar les dades mantenint la informació més important.

2-UPR: “2 universal, prismatic, revolute”. Robot paral·lel on la plataforma és sostinguda per dos braços simètrics formats, cada un, per una unió universal, un enllaç prismàtic i un enllaç de revolució.

1-R: “1 revolute”. Mecanisme format únicament per un enllaç de revolució.

FKequations: “Forward Kinematics Equations”. Equacions de cinemàtica directa en Català, és el vessant de la cinemàtica que s’encarrega de calcular la posició i orientació d’un punt o sistema en funció dels seus paràmetres i transformacions geomètriques. Part fonamental de la robòtica i l’animació per computadora.

UPRcon: “UPR constraints”. Funció de restriccions aplicades al mecanisme UPR per analitzar la seva cinemàtica.

fmincon: “Function minimization with constraints”. Minimització de funcions amb restriccions en Català. Es tracta d’una funció interna de MATLAB i s’utilitza per trobar el mínim d’una funció objectiu complint certes restriccions a les variables.

TFM: Treball de Final de Màster.

ETSEIB: Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona.

Llistat de figures

Figura 2.1. Mecanisme Lambda creat per Chebyshev.

Figura 2.2. Cavall mecànic desenvolupat per Lewis A. Rygg.

Figura 2.3. “Walking Truck” desenvolupat per General Electric Corporation (G.E.) basant-se en la idea de Hutchinson.

Figura 2.4. Robot quadrúpede conegut com a “The California Horse” desenvolupat durant la dècada dels 60 per la Universitat del Sud de Califòrnia.

Figura 2.5 i 2.6. “The Big Muskie”, una grua de 13500 tones capaç de desplaçar-se amb quatre potes hidràuliques.

Figura 2.7. PV-II, prototip capaç de pujar escales.

Figura 2.8. “One Legged Hopping robot”, prototip tridimensional d’una sola pota capaç de mantenir-se en equilibri.

Figura 2.9. TITAN-III, prototip capaç d’escalar.

Figura 2.10. TITAN-IV, prototip capaç de trotar.

Figura 2.11. TITAN-XIII, prototip desenvolupat l’any 2016.

Figura 2.12. TEKKEN-2, prototip capaç de caminar i galopar.

Figura 2.13. TEKKEN-4, prototip capaç de caminar i galopar.

Figura 2.14. SILO4, desenvolupat a Espanya i centrat en l’estabilitat.

Figura 2.15. MRWALLSPECT-II, prototip capaç d’escalar amb ventoses.

Figura 2.16. AiDAN-I, prototip desenvolupat a Seoul.

Figura 2.17. AiDAN-III, prototip desenvolupat a Seoul.

Figura 2.18 i 2.19. “Baby Elephant”, robot capaç de transportar càrregues.

Figura 2.20. Star1ETH, robot capaç d’emmagatzemar energia.

Figura 2.21. ANYmal, primer prototip d’una sèrie de robots comercials.

Figura 2.22. MIT Cheetah 2, robot capaç de desplaçar-se a gran velocitat.

Figura 2.23. Mini Cheetah, un robot capaç de fer la tombarella.

Figura 2.24. Big Dog 2nd Generation, robot desenvolupat per Boston Dynamics propulsat amb un motor de combustió interna.

Figura 2.25. Robot Spot. En aquesta imatge en concret porta l'accessori del braç articulat amb 5 graus de llibertat.

Figura 2.26. Scout II amb cames de tipologia RP.

Figura 2.27. Detall del disseny del robot ANYmal. Es poden apreciar els actuadors d'abducció de la cama.

Figura 3.1. Representació dels punts de contacte i la direcció de les forces durant el galop del guepard.

Figura 3.2. Representació dels punts de contacte i la direcció de les forces durant el galop del cavall.

Figura 3.3. Representació dels punts de contacte i la direcció de les forces durant el galop transversal i rotatori del gos.

Figura 3.4. Storm, el gos amb el qual els estudiants de la Universitat de Portsmouth han fet l'estudi de "motion capture". Fotografia presa durant una de les sessions.

Figura 3.5. Gos amb la vestimenta amb marcadors a l'esquerra i gos amb marcadors i "esquelet" digitalitzats a la dreta.

Figura 3.6. Marcadors utilitzats per fer els eixos de la base relativa. En lila els vectors que formen entre ells.

Figura 4.1. Classificació dels mecanismes per famílies, classes i subclasses.

Figura 4.2. Funcionament resumit del codi.

Figura 4.3. Graf genèric.

Figura 4.4. Exemple de la representació que s'ha emprat a la memòria.

Figura 4.5. Graf de la classe [3, 3, 0, 0, 3] i representació esquemàtica del mecanisme amb el "terra" marcat en el node inferior.

Figura 4.6. Graf de la classe [2, 6, 4, 2, 0] amb el "terra" marcat al node inferior.

Figura 4.7. Mecanismes pertanyents a subclasses de la classe [2, 6, 4, 2, 0]. Subclasse 1 / Subclasse 2 / Subclasse 3 / Subclasse 4 / Subclasse 5 / Subclasse 6.

Figura 4.8. Graf / Subclasse 1 / Subclasse 2.

Figura 4.9. Graf / Subclasse 1 / Subclasse 2.

Figura 4.10. Graf / Subclasse 1.

Figura 4.11. Graf / Subclasse 1 / Subclasse 2.

Figura 4.12. Mecanisme base escollit. Forma part de la classe [2,6,4,2,0,1].

Figura 4.13. Mecanisme complementari escollit. Forma part de la classe [1,2,1,0,0,0].

Figura 4.14. Mecanisme global escollit per fer l'estudi cinemàtic.

Figura 5.1. Esquema bàsic del mecanisme base.

Figura 5.2. Esquema parametritzat de la pota 1 del mecanisme base.

Figura 5.3. Esquema parametritzat de la pota 2 del mecanisme base.

Figura 5.4. Esquema parametritzat del mecanisme base.

Figura 5.5. Esquema bàsic del mecanisme complementari.

Figura 5.6. Esquema parametritzat del mecanisme complementari.

Figura 5.7. Vectors tangent i normal a la corba en els punts P1 i P2.

Figura 5.8. En lila, les variables proporcionades pel codi. En taronja, les variables corregides.

Figura 5.9. Representació de diversos resultats mitjançant el programa SolidWorks i Inkscape.

Figura 5.10. Representació dels resultats mostrats a la figura 5.8 únicament amb Inkscape.

Figura 5.11. Representació mitjançant Inkscape del mecanisme complementari proposat.

Figura 5.12. Representació de dues solucions obtingudes amb el codi de l'annex 5, representades juntament amb les dues trajectòries.

Figura 5.13. Representació del mecanisme complementari escollit. En lila apareix la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

Figura 5.14. Representació esquemàtica dels mecanismes base i complementari proposats juntament amb la trajectòria complementària i final.

Figura 5.15. Representació del mecanisme global en SolidWorks i Inkscape. En lila apareix la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

Figura 5.16. Representació final del mecanisme global en Inkscape. En lila apareix la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

Figura 6.1. Proposta d'implementació del mecanisme complet.

Figura 6.2. Proposta de la implementació del mecanisme complet instal·lat en el cos genèric d'un robot quadrúpede en estàtic.

Figura 6.3. Proposta de la implementació del mecanisme complet instal·lat en el cos genèric d'un robot quadrúpede simulant una passa.

Llistat de taules

Taula 2.1. Comparació entre robots amb rodes i amb potes.

Taula 3.1. Petita mostra de les dades obtingudes per captura de moviments.

Taula 4.1. Representació gràfica dels enllaços i unions.

Taula 5.1. Restriccions aplicades a les diferents variables.

Taula 5.2. Valors inicials donats i resultats assolits amb 10.000 iteracions del codi de la pota 1.

Taula 5.3. Resultats finals amb 10.000 iteracions per la pota 1.

Taula 5.4. Valors inicials donats i resultats assolits amb 10.000 iteracions del codi de la pota 2.

Taula 7.1. Diagrama de Gantt amb la planificació del Treball de Final de Màster.

Taula 8.1. Valoració de les llicències de programari utilitzat.

Taula 8.2. Valoració del projecte.

Taula 9.1. Impacte ambiental en forma de CO₂ alliberat a l'atmosfera.

Taula 10.1. Alineament del treball amb els objectius de desenvolupament sostenible (ODS).

Llistat de gràfiques

Gràfica 3.1. Trajectòria registrada pel marcador situat a la pota del darrere esquerre del gos representada mitjançant MATLAB. “LOFOOT” significa “Left Outside FOOT”.

Gràfica 3.2. Trajectòria de les potes representada a l'eix “X”, “Y” i “Z” de coordenades.

Gràfica 3.3. Trajectòria de les potes representada a l'eix “X” i “Y” de coordenades.

Gràfica 3.4. Trajectòria de les potes representada a l'eix “X” i “Z” de coordenades.

Gràfica 3.5. Trajectòria d'una pota i de la seva direcció principal als eixos “X”, “Y” i “Z”.

Gràfica 3.6. Trajectòria d'una pota paral·lela al pla “X” i “Z”.

Gràfica 3.7. Trajectòria de totes les potes del darrere paral·leles al pla “X” i “Z”.

Gràfica 3.8. Trajectòria de totes les potes paral·leles al pla “X” i “Z”. Punts representatius seleccionats a mà.

Gràfica 3.9. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final en “X” i “Z”.

Gràfica 3.10. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final en “X”, “Y” i “Z”.

Gràfica 3.11. Trajectòria del turmell a “X” i “Z”. “LANK” fa referència al turmell esquerre i “RANK” al dret.

Gràfica 3.12. Trajectòria de les potes i els turmells posteriors “LANK” fa referència al turmell esquerre i “RANK” al dret.

Gràfica 3.13. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final complementària en “X” i “Z”.

Gràfica 3.14. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final complementària en “X”, “Y” i “Z”.

Gràfica 5.1. Punts de la trajectòria del turmell amb eixos locals a cada punt.

Gràfica 5.2. Punts de la trajectòria del turmell amb eixos locals a cada punt superposats amb la trajectòria.

Gràfica 5.3. Representació de les trajectòries complementària i final, juntament amb les trajectòries on se situen les potes del mecanisme base.

Gràfica 5.4. Representació de les trajectòries complementària i final, juntament amb les trajectòries on se situen les potes del mecanisme base. S'han afegit els punts del mecanisme complementari ideal i unit al mecanisme base.

Llistat d'equacions

Eq. 3.1. Matriu de canvi de base "T" formada pels vectors "V1", "V2", "V3" i "d".

Eq. 3.2. Expressió utilitzada per canviar els punts de base

Eq. 5.1. Equació per estudiar la cinemàtica d'una pota per separat.

Eq. 5.2. Equació per estudiar la cinemàtica del mecanisme base sencer.

Eq. 5.3. Matriu de posicions.

Eq. 5.4. Càlcul del vector normal a la corba.

Eq. 5.5. Càlcul del vector normal a la corba en MATLAB.

Eq. 5.6. Matriu de variables inicials en format MATLAB.

Eq. 5.7. Equacions que modelen el mecanisme en MATLAB.

Eq. 5.8. Funció en MATLAB per cridar "fmincon".

Eq. 5.9. Equació per estudiar la cinemàtica del mecanisme base sencer i assegurar que les potes no se separen. L'índex "i" fa referència a cada una de les posicions a assolir.

Eq. 5.10. Restricció per obtenir un valor de "d" constant.

Eq. 5.11. Adaptació de la posició inicial.

Eq. 5.12. Equació per estudiar la cinemàtica del mecanisme complementari. L'índex "i" fa referència a cada una de les posicions a assolir.

Eq. 8.1. Valoració de les hores invertides per l'autor del treball.

Eq. 8.2. Càlcul de la despesa en combustible durant tot el projecte.

Eq. 9.1. Càlcul de la quantitat de CO₂ generada per la utilització de l'ordinador.

Eq. 9.2. Càlcul de la quantitat de CO₂ generada en els desplaçaments.

1. Introducció

El sector industrial sempre s'ha caracteritzat per mantenir-se en constant evolució. Des de la revolució industrial fins a la indústria 4.0, s'ha anat evolucionant en cerca d'optimitzar costos, millorar la qualitat, augmentar la producció i minimitzar els riscos.

Actualment, aquesta evolució ens ha portat cap a l'automatització d'una gran varietat de processos. En aquesta automatització, els robots prenen un paper essencial i s'ha pogut veure com en els darrers anys, han guanyat molt protagonisme dins el món industrial.

Dins del gran món de la robòtica, aquest treball es centra en els robots quadrúpedes. Es tracta d'una tipologia de robots ideal per poder desplaçar-se per entorns accidentats i dinàmics on robots amb rodes no poden accedir. A poc a poc, s'estan obrint pas en l'àmbit industrial assumint tasques de seguiment o exploració.

La gran diferència entre els robots quadrúpedes i qualsevol altra tipologia de robot és la facilitat que tenen per poder sortejar terrenys escarpats com escales o terraplens. Per tant, la clau del seu èxit resideix en els mecanismes que utilitzen com a potes.

Les combinacions mecàniques possibles per proporcionar-los locomoció són infinites, i fer un estudi per poder implementar nous mètodes podria dotar-los encara de més habilitats, diferenciant-los més dels seus parents amb rodes o erugues, i fer-los més atractius pel sector industrial.

Cal destacar, que es tracta d'una tecnologia molt innovadora, que compta amb un gran potencial en investigació i que es troba en continu desenvolupament.

Actualment, la gran majoria dels robots quadrúpedes comercials empen mètodes de locomoció molt semblants. En aquesta memòria, es vol profunditzar en la manera d'estudiar diferents mecanismes que poden fer viable el moviment.

Cal destacar, que en aquesta memòria, per tal de poder presentar un disseny innovador o corroborar els dissenys actuals sense veure'ns influenciats pels ja existents, es parteix des de zero. S'han seguit tots els passos necessaris, des de l'estudi de la trajectòria a seguir, fins a l'obtenció d'un mecanisme viable i innovador.

1.1. Motivació

He estudiat el Grau en Enginyeria Industrial a l'ETSEIB i posteriorment el Màster en Enginyeria Industrial amb l'especialitat en Mecànica. A poc a poc, he anat aprofundint en els diferents vessants de l'enginyeria per completar la meva formació.

Tanmateix, la robòtica, és un camp que sempre m'ha cridat l'atenció perquè durant els meus estudis mai l'he tocat de primera mà. Es tracta d'una àrea de l'enginyeria prou àmplia per unir una multitud de disciplines tals com el control numèric, el disseny mecànic o la selecció de materials.

Durant la meva recerca per trobar un tema adequat per fer el treball, sem va presentar aquesta oportunitat. Em va cridar l'atenció perquè em permetia explorar aquest nou camp complementant d'aquesta manera els meus estudis.

Per tant, una de les motivacions principals en l'àmbit personal és que aquest treball de final de màster, m'ha permès relacionar un camp, que fins ara m'era desconegut, amb multituds de coneixements que he anat treballat durant el meu període com a estudiant.

També cal destacar, que a mesura que he anat avançant en el treball, he descobert una motivació afegida. Estudiant l'estat de l'art actual dels sistemes de locomoció implementats en els robots quadrúpedes, he trobat que tots són molt similars. Si bé és veritat que s'ha investigat i evolucionat molt durant molts anys, actualment, totes les metodologies són molt semblants i les innovacions s'han centrat més en l'àmbit del control i el sistema de sensors.

Per aquest motiu, crec que s'ha innovat poc últimament i pot ser una bona oportunitat per proposar sistemes nous.

1.2. Abast del treball

En aquest treball, es parteix des de zero en l'estudi de la locomoció dels robots quadrúpedes.

L'estudi es realitza d'aquesta manera, perquè busca evitar la influència de l'estat de l'art actual i proposar mecanismes alternatius als actuals. Es pretén establir una pauta per estudiar la infinitud de mecanismes que poden ser viables per generar una locomoció en els robots quadrúpedes. La memòria engloba l'explicació dels següents passos:

- S'ha creat un codi polivalent en MATLAB per estudiar qualsevol tipologia de trajectòria i poder representar-la a l'espai.
- S'ha utilitzat un codi en Python per generar totes les combinacions possibles de mecanismes que poden fer possible la trajectòria.
- S'ha introduït una teoria de grafs per estudiar i representar els mecanismes.
- S'ha elaborat i adaptat un codi en MATLAB per estudiar la cinemàtica i dimensionar els mecanismes.

En concret, s'ha estudiat una trajectòria de desplaçament, s'ha escollit un mecanisme que compleixi un mínim de Requisits i s'ha dimensionat. Cal destacar, que el mecanisme

únicament s'ha dimensionat, no s'han determinat els actuadors ni s'ha entrat en detall en el disseny.

1.3. Requisites previs

Aquest treball toca diversos camps i es pot considerar multidisciplinari. Per aprofitar de la millor manera el contingut, cal tenir coneixements en els següents àmbits:

- Calen tenir nocions de locomoció animal perquè la trajectòria a seguir prové del desplaçament d'un gos.
- Per entendre bé com s'han obtingut les dades, és molt recomanable tenir coneixements sobre els processos de "motion capture" o captura de moviment mitjançant tècniques digitals.
- Durant el tractament de dades, s'ha fet un anàlisi de components principals (o PCA). Les nocions sobre aquesta tècnica estadística ajudaran a la comprensió d'aquest apartat.
- Per aprofitar el codi utilitzat, cal tenir coneixements de MATLAB i llenguatge Python.
- Finalment, caldrien també, certes nocions de cinemàtica de robots.

Com s'ha comentat anteriorment, es pretén partir de zero en l'estudi de la locomoció dels robots quadrúpedes. D'aquesta manera, es pretén trobar un mètode innovador o confirmar els sistemes existents en el mercat sense estar influenciats. S'ha tingut molta cura en explicar i justificar cada pas del procés seguit.

1.4. Objectius del treball

L'objectiu principal d'aquest treball és proposar un nou disseny de potes per un robot quadrúpede i establir una metodologia prou general per dinamitzar aquest procés. Així i tot, per aconseguir aquest objectiu, ha estat necessari assolir objectius secundaris. A continuació es detallen tots:

- Estudi bibliogràfic dels mètodes de locomoció actuals dels robots quadrúpedes.
- Comprensió i recopilació d'informació sobre el desplaçament dels animals quadrúpedes.
- Utilització de la teoria de grafs per simplificar la representació i elecció del mecanisme a estudiar en profunditat.
- Adaptació de la síntesi cinemàtica a problemes de locomoció.

2. Els robots quadrúpedes

Els robots que utilitzen cames per desplaçar-se, compten amb un creixent interès en l'àmbit de la investigació internacional. Aquest interès resideix bàsicament en dos motius diferenciats: Desplaçar-se mitjançant potes articulades genera un potencial d'aplicacions per aquest tipus de robots i, al mateix temps, implica un grau de complexitat en el disseny i control d'aquestes, suposant un repte científic.

En concret, els robots amb potes neixen de la falta de capacitat dels robots tradicionals de rodes per desplaçar-se amb eficiència per terrenys escarpats. El principal avantatge que ofereixen, és la gran mobilitat que aporten mitjançant el moviment de les seves potes creant suports discrets sobre el terreny. A conseqüència d'això, un altre avantatge que tenen és l'omnidireccionalitat en el desplaçament. Són capaços de moure's i avançar amb independència de l'orientació del seu cos. Poder orientar el cos del robot amb independència del desplaçament, proporciona una base ideal per instal·lar-hi sensors, eines o manipuladors.

Per tant, les característiques que donen importància als robots amb potes són: gran mobilitat, capacitat per superar obstacles, aïllament dels desnivells del terreny, disminució de l'impacte ambiental i una bona eficiència energètica sobre terrenys accidentats. Cal destacar, que en equips autònoms, aconseguir una eficiència energètica òptima és un factor decisiu.

Tot i que els avantatges que ofereixen són àmplies, també compten amb una sèrie de desavantatges: Tenen una configuració mecànica complicada, poden transportar menys càrrega que un robot amb rodes o erugues, disposen de menys velocitat de desplaçament i tenen un cost elevat. Aquestes limitacions ens indiquen que es tracta d'una tecnologia innovadora, que es troba en desenvolupament i que l'experimentació jugarà un paper clau en els anys vinents.

2.1. Història i desenvolupament

La història dels robots quadrúpedes s'inicia fa molts anys, a continuació es presenta un breu resum. Les dades històriques d'aquesta secció provenen de [Biswal & Mohanty, 2021].

2.1.1. A principis dels 1900

A principis de 1900, nombrosos científics i investigadors van dedicar el seu temps a investigar els mecanismes per aconseguir desplaçaments amb robots de quatre potes. En 1870, Chebyshev va desenvolupar el primer mecanisme que convertia el moviment

rotatiu en moviment de translació amb velocitat constant. Aquest mecanisme es pot apreciar a la Figura 2.1 i es basava en quatre barres. Va rebre el nom de Lambda per la similitud amb la lletra grega.

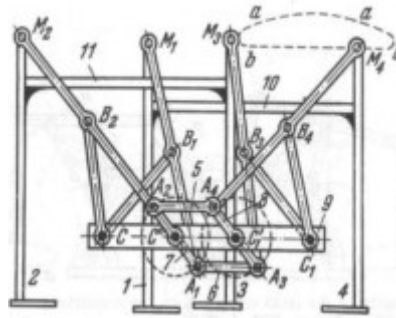


Figura 2.1. Mecanisme Lambda creat per Chebyshev. [Machado & Silva, 2006]

Tanmateix, aquest mecanisme només es podia desplaçar en terrenys plans i comptava únicament amb un grau de llibertat, els moviments de totes les potes eren dependents entre si. Posteriorment, com expliquen [De Santos & Garcia & Estremera, 2006] aquest mecanisme es va utilitzar en les màquines MELWALK i DANTE.

En 1893, Rygg va desenvolupar la màquina coneguda com el cavall mecànic proposat per [Raibert, 1986]. Aquest mecanisme, emprava diferents tipus d'enllaços i manivelles per transmetre potència a la màquina mitjançant uns pedals. Es mostra un dibuix del mecanisme a la Figura 2.2.

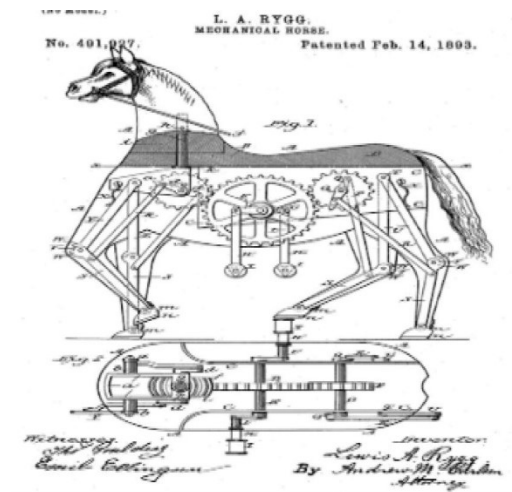


Figura 2.2. Cavall mecànic desenvolupat per Lewis A. Rygg. [Biswal & Mohanty, 2021]

En 1940, com explica [Hutchinson, 1967], Hutchinson va fer el primer intent de construir una màquina locomotora amb potes que es podien controlar de manera independent. El seu model de quatre potes, comptava amb vuit articulacions accionades per cables flexibles manipulats per un operador. Aquest concepte es va utilitzar més endavant per

General Electric Corporation (G.E.) per construir el “Walking Truck” [Mosher, 1968] en la dècada dels 60. A la figura 2.3 es pot veure el prototip de “Walking Truck”, es tractava d'un camió amb quatre potes accionades per un motor tèrmic de 90 cavalls de potència.

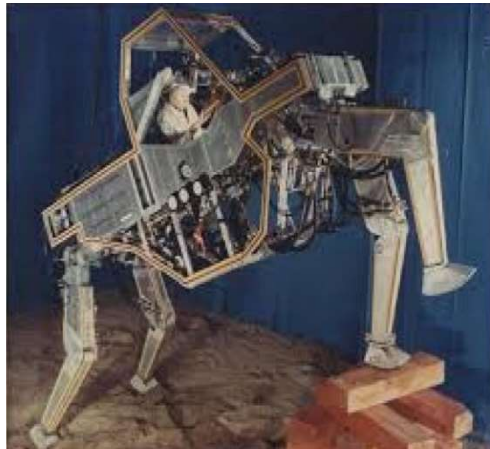


Figura 2.3. “Walking Truck” desenvolupat per General Electric Corporation (G.E.) basant-se en a la idea d’Hutchinson. [Biswal & Mohanty, 2021]

2.1.2. A mitjans dels 1900

Durant la dècada dels 60, en la Universitat del Sud de Califòrnia es va construir el primer robot quadrúpede autònom als Estats Units. Es va anomenar “phony phony” [De Santos & Garcia & Estremera, 2006] o “The California Horse”, es pot apreciar a la figura 2.4. Cada pota d’aquest robot, comptava amb dues articulacions giratòries idèntiques que li permetien dur a terme diferents patrons de marxa, tals com, caminar, trotar i arrossegar-se a velocitat constant. Cal destacar, que també podia mantenir-se dempeus sobre dues potes.

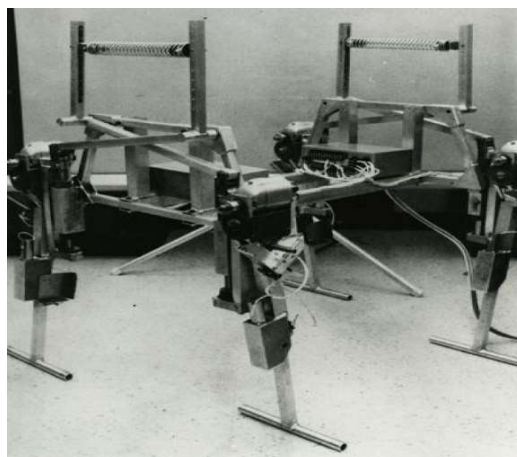


Figura 2.4. Robot quadrúpede conegut com a “The California Horse” desenvolupat durant la dècada dels 60 per la Universitat del Sud de Califòrnia [Biswal & Mohanty, 2021].

En 1969, es va desenvolupar una locomotora gegant amb potes anomenada “The Big Muskie” [www.wikipedia.org]. Comptava amb quatre potes accionades hidràulicament, feia quasi 50 metres d'alçada i la seva velocitat de desplaçament era de 0,16 km·h. Va ser desmantellada en 1990. A la figura 2.5 i 2.6 es pot apreciar les grans dimensions que tenia.



Figura 2.5 i 2.6. “The Big Muskie”, una grua de 13500 tones capaç de desplaçar-se amb quatre potes hidràuliques. [Biswal & Mohanty, 2021] [www.wikipedia.org]

En 1980, s’aconsegueix un gran avanç científic. S. Hirose i K. Kato [Hirose & Kato, 2000] desenvolupen el primer robot quadrúpede capaç de pujar escales utilitzant controladors i sensors. Aquest prototip es va anomenar PV-II i apareix a la figura 2.7.

També en la dècada dels 80, Marc Raibert va produir una revolució en la robòtica [Raibert, 1986]. Gràcies a la seva col·laboració amb l’Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT), van crear una màquina tridimensional que era capaç de córrer i saltar amb una sola cama. Aquesta màquina era capaç de superar obstacles i balancejar el seu cos per no perdre l’estabilitat. A la figura 2.8 es pot apreciar el prototip conegut com a “One Legged Hopping robot”.

Cal destacar que, segons explica la [Redacció de DescubreArduion.com], justament en 1982, Marc Raibert va fundar el “MIT Leg Laboratory” que posteriorment s’acabaria convertint en Boston Dynamics.

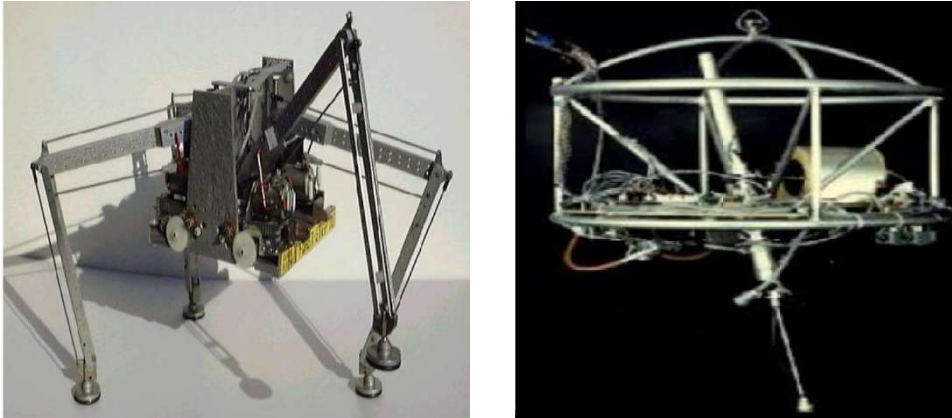


Figura 2.7 i 2.8. A l'esquerre: PV-II, prototip capaç de pujar escales. A la dreta: "One Legged Hopping robot", prototip d'una sola pota capaç de mantenir-se en equilibri.

2.1.3. Dècada dels 90

La patent del principi d'equilibri i dinàmica d'una sola pota creada per Raibert va superar tots els sistemes de potes que hi havia fins al moment. Aquest sistema de control de l'estabilitat va impulsar el desenvolupament dels futurs robots amb potes.

Després del PV-II mencionat anteriorment, es va iniciar la sèrie TITAN de Hirose. Cada prototip de TITAN anava incorporant diferents millores. Primerament, es va desenvolupar el robot TITAN-III [Hirose & Kato, 2000], mostrat a la figura 2.9. Va ser el primer robot capaç d'escalar, anava equipat amb un programa intel·ligent, un sensor tàctil i un sensor d'altitud. El TITAN-IV, mostrat a la figura 2.10 i desenvolupat en 1986, ja era capaç de trotar. Finalment, el robot més recent de la sèrie TITAN és el TITAN XIII [Kitano & Hirose & Endo, 2016], mostrat a la figura 2.11. Es tracta d'un robot quadrúpede, desenvolupat en 2016, capaç de caminar eficientment a una velocitat d'1,38 m/s.

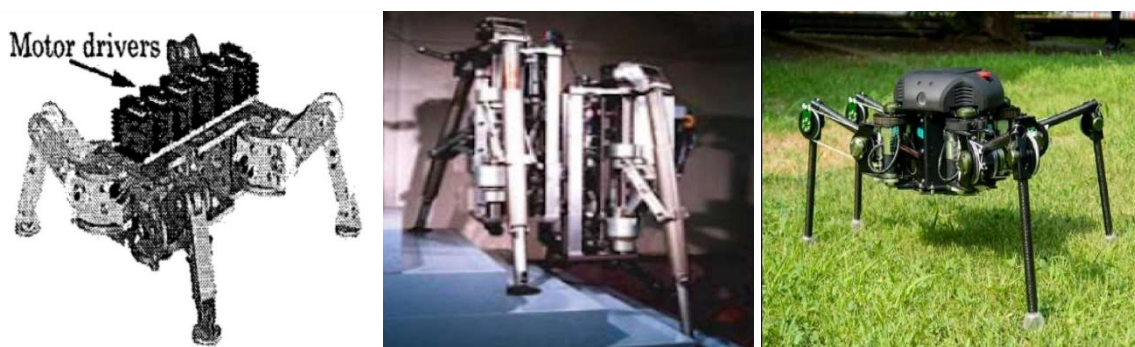


Figura 2.9, 2.10 i 2.11. A l'esquerre: TITAN-III, prototip capaç d'escalar. Al centre: TITAN-IV, prototip capaç de trotar. A la dreta: TITAN-XIII, prototip desenvolupat en 2016 [Biswal & Mohanty, 2021]

Comparant les figures 2.9, 2.10 i 2.11 es pot veure l'evolució de la sèrie TITAN des del 1986 fins al 2016.

2.1.4. Principis dels 2000

A principis dels anys 2000, H. Kimura va iniciar el desenvolupament de la sèrie biomòrfica de robots quadrúpedes anomenada TEKKEN. Amb aquesta sèrie es va aconseguir que un mateix robot fos capaç de caminar, trotar i galopar. A les figures 2.12 i 2.13 es poden apreciar els models TEKKEN 2 [Fukuoka & Kimura, 2009] i TEKKEN 4 [Fukuoka & Kimura, 2009].

De manera simultània, a Espanya, concretament a l'antic Institut d'Automàtica Industrial, conegut actualment com a Centre d'Automàtica i Robòtica (CSIC-UPM), s'acabava de desenvolupar el SILO4 [De Santos & Garcia & Estremera, 2006], un robot centrat en l'estabilitat, capaç d'interactuar amb l'entorn i superar obstacles. Es pot apreciar a la figura 2.14.



Figura 2.12, 2.13 i 2.14. A l'esquerra:TEKKEN-2 [Kimura & Kodono, s.f.], al centre: TEKKEN-4 [Biswal & Mohanty, 2021], els dos prototips capaços de caminar i galopar. A la dreta: SILO4 [Biswal & Mohanty, 2021], desenvolupat a Espanya i centrat en l'estabilitat.

Posteriorment, la Universitat d'Enginyeria Mecànica de Sungkyunkwan, a Corea del Sud, va desenvolupar el MRWALLSPECT-II [Kim et al., 2005] mostrat a la figura 2.15, un robot orientat al món industrial capaç d'escalar utilitzant ventoses i que estava controlat mitjançant dos processadors, un integrat utilitzant Pentium-III i un a temps real utilitzant Linux.

Poc després, en 2007, la mateixa universitat va desenvolupar l'AiDAN-I [Koo et al., 2007], seguit de l'AiDAN-III [Koo et al., 2013] en 2013, mostrats a les figures 2.16 i 2.17. Cada extremitat d'aquest robot té 3 graus de llibertat amb una articulació passiva. Comptaven amb un controlador central i 16 subcontroladors operats per RT-LINUX (Real Time Linux).

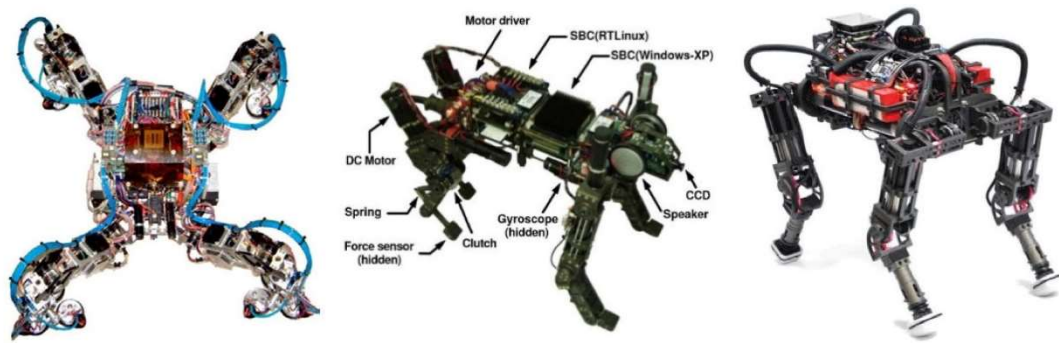


Figura 2.15, 2.16 i 2.17. A l'esquerra: MRWALLSPECT-II, prototip capaç d'escalar amb ventoses. Al centre: l'AiDAN-I i a la dreta l'AiDAN-III, prototips desenvolupats a Seoul [Biswal & Mohanty, 2021]

En 2013, a la Universitat Jiao Tong a Shangai, es va desenvolupar un robot capaç de transportar càrregues pesades sobre diferents tipus de terrenys. Es va anomenar “Baby Elephant” [Gao et al., 2014], a les figures 2.18 i 2.19 es pot apreciar la seva similitud amb l'animal. Estava propulsat per quatre mecanismes híbrids sèrie-paralel actuat amb un innovador actuador hidràulic anomenat Hy-Mo [He & Gao, 2020].

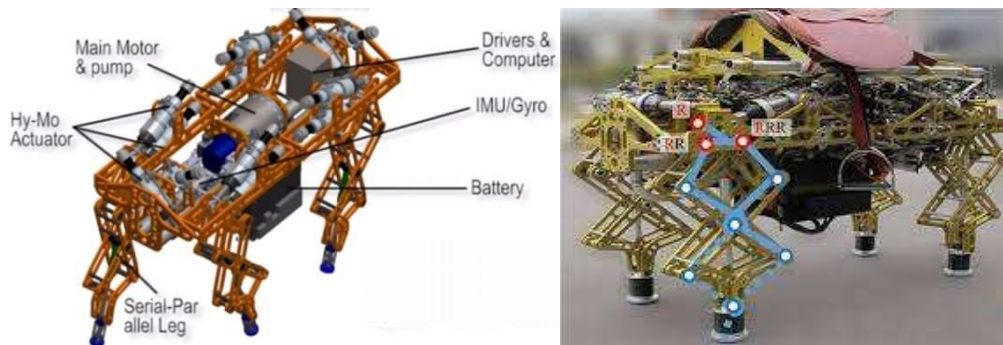


Figura 2.18 i 2.19. “Baby Elephant”, robot capaç de transportar càrregues. [Gao et al., 2014]

2.1.5. Robots quadrúpedes actuals

En 2010, Hutter va dissenyar un robot quadrúpede de mida mitjana anomenat Star1ETH [Hutter et al., 2013] a l'Institut de Tecnologia de Zurich. Aquest robot es pot apreciar a la figura 2.20 i compta amb una sèrie d'actuadors elàstics d'alt rendiment capaços d'emmagatzemar energia temporalment. El robot està equipat amb una unitat de mesura d'inèrcies i envia aquesta informació cinemàtica a les articulacions.

Com explica a la pàgina web “ETH zürich, Robotic Systems Lab” [Trodelia, s.f.], un altra sèrie de robots molt coneguda es va iniciar a conseqüència del Star1ETH també a Zurich, s'anomena ANYmal. A la figura 2.21 es pot veure el prototip. Està dissenyat per fer operacions comercials i industrials en entorns desafiants. Té unes dimensions molt

reduïdes (menys de 30kg), compta amb una gran percepció de l'entorn i és capaç de transportar bateries, càmeres, micròfons, il·luminació i una multitud de sensors.



Figura 2.20 i 2.21. A l'esquerra: Star1ETH, robot capaç d'emmagatzemar energia. A la dreta: ANYmal, primer prototip d'una sèrie de robots comercials. [Biswal & Mohanty, 2021]

En 2013, l'Institut de Tecnologia de Massachusetts (MIT), va desenvolupar el MIT Cheetah [Hyun et al., 2014]. Dos anys més tard, en 2015, va desenvolupar el MIT Cheetah 2 [Park et al., 2015] que es pot apreciar a la figura 2.22. Tots dos prototips estan centrats a aconseguir una alta velocitat sense perdre la maniobrabilitat i mantenint una alta eficiència en el desplaçament. El MIT Cheetah 2 és capaç de córrer fins a 4,5 m/s i saltar obstacles de 400 mil·límetres d'alçada mentre corre a 2,5 m/s.

Com s'explica a [Ackerman, s.f.], actualment, aquesta sèrie de robots ha avançat fins al MIT Mini Cheetah, un robot que pesa tan sols 9 kg i és tan àgil que pot fer una tombarella de 360° en l'aire. Aquesta agilitat és gràcies a uns actuadors desenvolupats també al MIT que ofereixen una gran capacitat de parell amb unes dimensions molt compactes. Aquests actuadors es poden veure a la pàgina web de [ROBOTDIGG Equip Makers] .Pot apreciar-se el prototip en la figura 2.23.

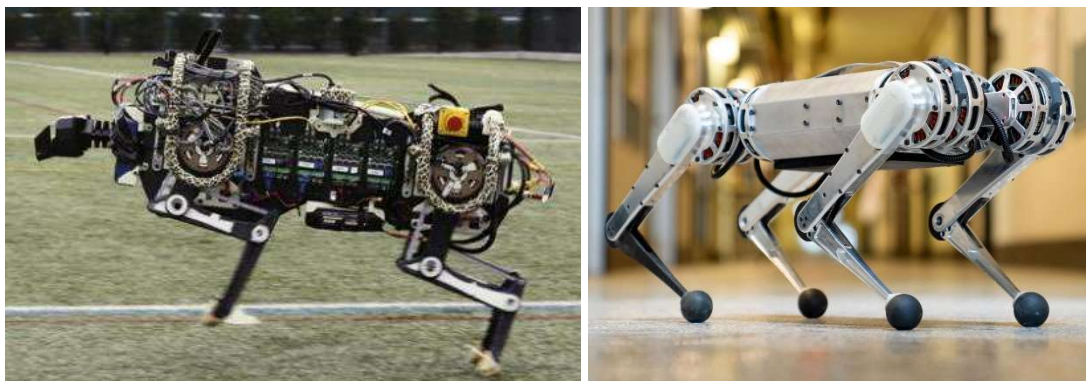


Figura 2.22 i 2.23. A l'esquerra: MIT Cheetah 2, robot capaç de desplaçar-se a gran velocitat. [Biswal & Mohanty, 2021] A la dreta: Mini Cheetah, un robot capaç de fer la tombarella. [Ackerman, s.f.]

Boston Dynamics, que com ja s'ha comentat anteriorment, segons afirma la [Redacció de DescubreArduion.com] es va fundar en 1992 a partir del MIT Leg Laboratory, durant els primers anys del 2000 va començar a desenvolupar la sèrie de robots anomenada Big Dog [Raibert et al., 2008]. Aquests robots estaven orientats al sector militar i, com es pot veure a la figura 2.24, el seu objectiu principal era servir com a mula de càrrega per operacions. Estaven propulsats per un motor de combustió d'uns 11 kW i a causa del gran soroll que produïen, es van descatalogar.



Figura 2.24. Big Dog 2nd Generation, robot desenvolupat per Boston Dynamics propulsat amb un motor de combustió interna. [Biswal & Mohanty, 2021]

Boston Dynamics també ha desenvolupat robots com el Cheetah (que es pot veure al vídeo [Boston Dynamics, 2012]) en 2011, el robot més ràpid fins al moment, capaç de córrer fins a 45 km/h dins un laboratori; o el Wildcat (que es pot veure al vídeo [Boston Dynamics, 2013]) en 2013, que és capaç d'arribar als 32 km/h a camp obert sortejant les irregularitats del terreny.

Finalment, per concloure, Boston Dynamics ha desenvolupat el robot Spot [Boston Dynamics, s.f.], un robot quadrúpede amb una forma similar a la d'un gos. Per la companyia, es tracta d'un canvi de perspectiva en comparació amb el Big Dog o el Cheetah. En comparativa, compta amb unes dimensions i un pes molt més reduït i està accionat mitjançant motors elèctrics alimentats per bateries.

Aquest robot ofereix la possibilitat de carregar fins a 14 kg sobre una plataforma pensada per instal·lar una infinitud d'accessoris, tals com: una càmera, un braç articulat, un grup de sensors, etc. Aquests accessoris combinats amb l'agilitat i precisió que ofereix el fan molt atractiu pel món industrial.

A la figura 2.25 mostrada a continuació, es pot apreciar a Spot amb l'accessori del braç articulat.



Figura 2.25. Robot Spot. En aquesta imatge en concret porta l'accessori del braç articulat amb 5 graus de llibertat. [Biswal & Mohanty, 2021]

2.2. Estat de l'art

Primerament, es vol destacar que una gran quantitat d'informació exposada en aquest apartat s'ha extret de la Memòria Tècnica [PAL Robotics S.L. & DigiFACT, 2022].

Com s'ha comentat en la introducció de la memòria, els robots amb potes mecàniques, tenen un gran potencial per proporcionar més versatilitat i maniobrabilitat en entorns poc estructurats on les rodes resulten ineficients.

Actualment, la recerca i innovació en aquest camp es troba en completa expansió. A continuació s'adjunten un parell de referències [Song et al., 2020] i [Suzuki et al., 2021]. Per aclarir els avantatges i inconvenients entre robots amb potes i amb rodes, Biswal i Mohanty [Biswal & Mohanty, 2021] proposen la taula comparativa 2.1 amb certs criteris tècnics:

<i>Technical Criteria</i>	<i>Wheel Robot</i>	<i>Legged Robot</i>
Maneuverability	X	✓
Transvers ability	X	✓
controllability	✓	X
Terrain Land	X	✓
Efficiency	X	✓
Stability	✓	X
Cost effective	✓	X
Navigation over obstacles	X	✓

Taula 2.1. Comparació entre robots amb rodes i amb potes [Biswal & Mohanty, 2021]

La característica que diferencia i proporciona les habilitats úniques d'aquesta tipologia de robots és l'estructura de les cames.

La cama és la peça bàsica per obtenir rendiment cinemàtic i dinàmic del robot. Determina la quantitat d'energia que necessita consumir el robot per desplaçar-se o mantenir l'equilibri. Per aquest motiu, el disseny de la cama repercutirà directament en la maniobrabilitat, estabilitat, capacitat de càrrega, velocitat i autonomia del robot.

La gran majoria de cames s'enfoquen com un mecanisme pla. En aquest mecanisme s'introdueixen elements d'esmoreïment de molla passius que rebaixen l'impacte del terreny. Les topologies senzilles tenen dos graus de llibertat i acostumen a ser de tipologia revolució-revolute (RR) o la revolució-prismàtica (RP). Un exemple senzill d'aquesta última, serien les cames del robot Scout II [de Lasa & Buehler, 2000] adjuntat a la figura 2.26.

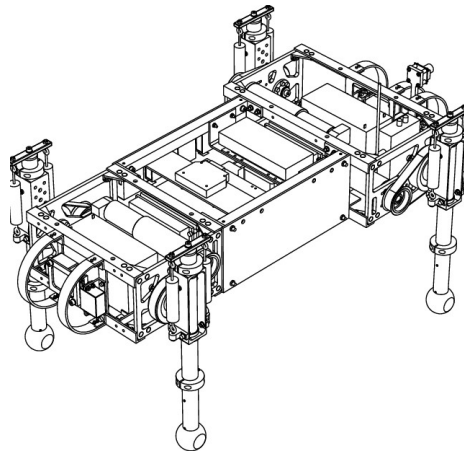


Figura 2.26. Scout II amb cames de tipologia RP. [de Lasa & Buehler, 2000]

A mesura que ha avançat la tecnologia, la majoria dels robots més actuals amb topologia RR han incorporat una tercera articulació. Aquesta articulació els ha proporcionat l'habilitat de desplaçar la cama lateralment (moviment d'abducció). Alguns d'aquests robots són l'ANYmal [Trodella, s.f.] (s'aprecia a la figura 2.27), el Cheetah [Boston Dynamics, 2012] o el TITAN XIII [Kitano & Hirose & Endo, 2016] presentats anteriorment a l'apartat "2.1. Història i desenvolupament".

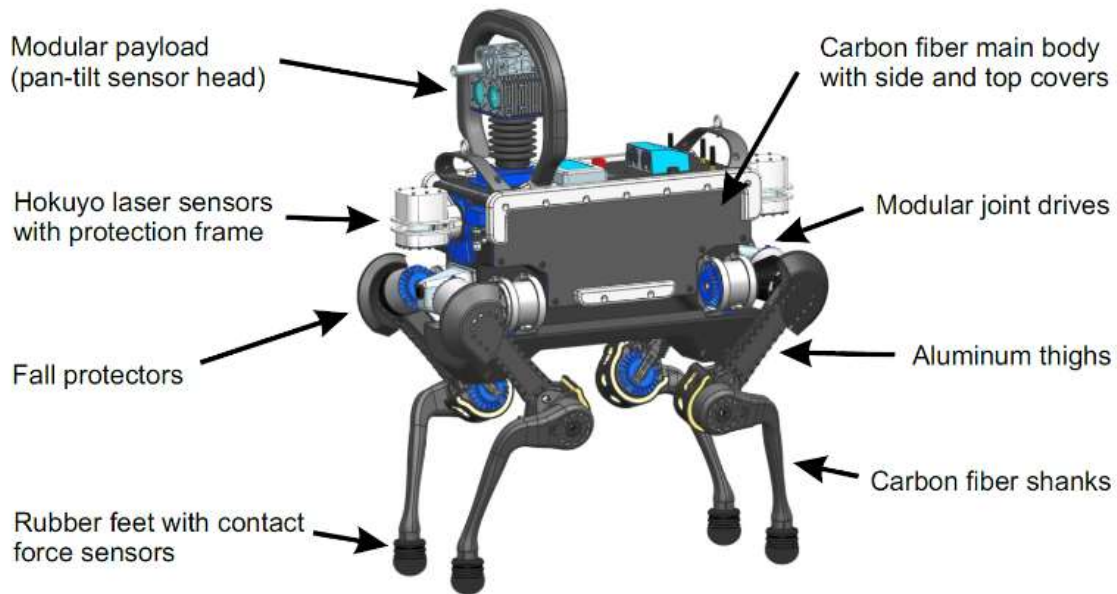


Figura 2.27. Detall del disseny del robot ANYmal, imatge extreta de la pàgina web “ETH zürich, Robotic Systems Lab” [Trodella, s.f.]. Es poden apreciar els actuadors d’abducció de la cama.

En la majoria dels casos excepte en la sèrie ANYmal, els motors es troben ubicats al cos del robot. D’aquesta manera es millora la capacitat de càrrega i disminueix el consum d’energia [Yi et al., 2021].

Per concloure, el disseny de la cama condiona molt les característiques del robot. La investigació de molts equips al llarg dels anys convergeix cap a una topologia de cama en particular: Un primer actuator que permet l’abducció o adducció (desplaçament lateral de la cama) seguit d’una cama plana amb dos o tres graus de llibertat i els elements passius necessaris per absorbir l’impacte repetit amb el terra.

Aquest disseny comú s’ha provat amb èxit en diverses aplicacions com la missatgeria de paquets [Hooks et al., 2020] o la inspecció i reconeixement del terreny en entorns industrials [Stachowiak et al., 2021].

3. TRAJECTORIA DE LA POTA

3.1. Determinació de la trajectòria a seguir

Abans d'estudiar el disseny mecànic de la pota, s'ha determinat la trajectòria que seguirà aquesta per tal de propulsar el cos del robot quadrúpede a l'espai. Per trobar aquesta trajectòria, s'han estudiat els diferents mètodes de desplaçament més utilitzats en mamífers quadrúpedes.

3.1.1. Tipologies de galop dels mamífers quadrúpedes

Segons [Bertram & Gutmann, 2009], el mètode que utilitzen els mamífers per desplaçar-se a certa velocitat s'anomena galop. Entendre la manera com caminen els mamífers terrestres quadrúpedes ha permès centrar la recerca i l'estudi en una espècie i tipus de passa concreta. Cada espècie animal utilitza un galop propi, però es poden resumir i classificar en dues grans famílies: el rotatori i el transversal.

Les dues famílies compten amb un animal que les representa, pel cas del galop rotatori és el guepard, mentre que del galop transversal és el cavall.

Les dues grans diferències entre aquests galops resideixen en com l'animal absorbeix i allibera energia mitjançant les potes frontals i posteriors.

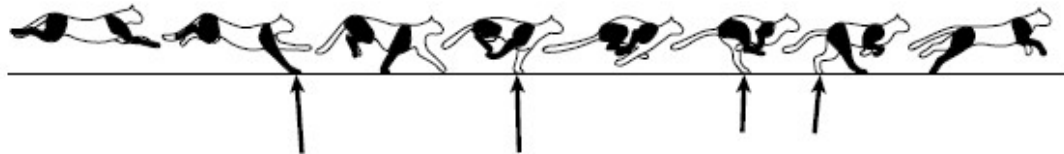


Figura 3.1. Representació dels punts de contacte i la direcció de les forces durant el galop del guepard. [Bertram & Gutmann, 2009]

Com es mostra a la figura 3.1, el galop rotatori, protagonitzat pel guepard, s'inicia esmorteint l'impacte del salt del galop anterior amb les potes de davant. En aquest moment, es generen unes pèrdues d'energia molt importants que el guepard és capaç d'emmagatzemar arquejant la columna vertebral. A continuació, s'allibera tota l'energia emmagatzemada estirant la columna i propulsant-se amb les potes de darrere per fer el salt del galop. Per resumir, es tracta d'un galop molt enèrgic i explosiu on es necessita un acumulador d'energia situat entre les potes de davant i les de darrere.

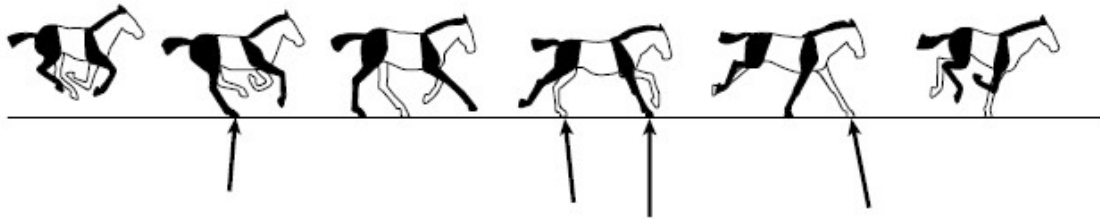


Figura 3.2. Representació dels punts de contacte i la direcció de les forces durant el galop del cavall. [Bertram & Gutmann, 2009]

Per contrari, s'observa en la figura 3.2, com el galop transversal protagonitzat pel cavall, s'inicia esmorteint l'impacte del salt amb les potes de darrere. A continuació, el cavall es propulsa cap endavant efectuant el salt del galop amb les potes davanteres.

El cavall no emmagatzema l'energia perduda en el galop dins el seu cos, per aquest motiu, utilitza un moviment menys explosiu on es premia la conservació de l'energia enfront de l'agilitat del moviment.

En conclusió, comparant els dos galops, s'observa com el galop rotatori del guepard requereix una articulació molt potent a l'esquena. La finalitat de la pota a dissenyar és propulsar un robot quadrúpede, per tant, es premia un galop que requereixi menys articulacions i consumeixi la mínima energia possible per efectuar el desplaçament. Per aquest motiu la trajectòria que s'estudiarà serà la d'un galop transversal.

3.1.2. Animal a estudiar

El gos representa un animal perfecte per l'estudi de la trajectòria de la pota.

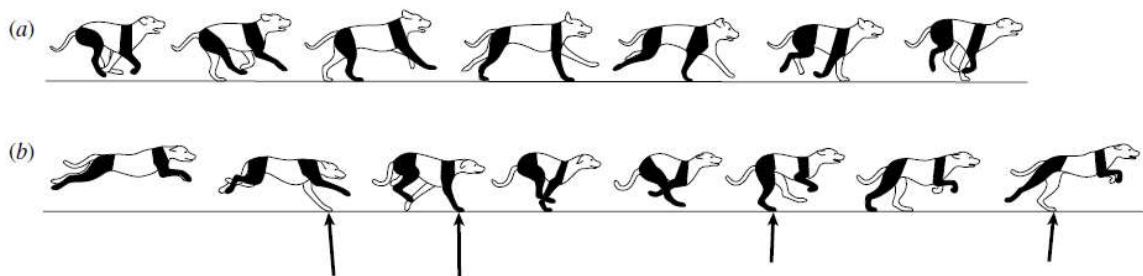


Figura 3.3. Representació dels punts de contacte i la direcció de les forces durant el galop transversal (a) i rotatori (b) del gos. [Bertram & Gutmann, 2009]

Com es pot veure a la figura 3.3, el gos és un animal que, a grans velocitats, galopa de manera rotatòria com un guepard i, a baixes velocitats, ho fa transversalment com els cavalls. Aquesta dualitat en el galop, sumada a què en tractar-se d'un animal domèstic l'obtenció de dades és més senzilla, provoca que sigui l'animal escollit per centrar l'estudi.

3.1.3. Desplaçament a simular

Finalment, un cop estudiades les tipologies de desplaçaments i els animals que les duen a terme, s'ha decidit simular el galop transversal efectuat pel gos. Es tracta d'un moviment utilitzat per un animal fàcil d'estudiar que premia la conservació de l'energia durant el desplaçament.

3.2. Obtenció de dades

La pota dissenyada seguirà la trajectòria que realitzen els gossos per desplaçar-se a baixes velocitats.

Per determinar la trajectòria d'una manera real i òptima, s'ha treballat amb dades obtingudes mitjançant la tecnologia de captura de moviments o "motion capture" en anglès. Com s'explica a la pàgina web d'Adobe Creative Cloud [www.adobe.com] aquesta tecnologia, també coneguda com a "mocap", és una tècnica de gravació de moviments reals, duts a terme generalment per actors i animals vius, amb una posterior conversió del moviment a un model digital.

El funcionament és simple, el subjecte a gravar realitza l'acció en concret portant un vestit amb uns marcadors reflectants incorporats (a la figura 3.4 es pot veure el vestit). Un seguit de càmeres infraroges, fan un seguiment dels marcadors i, mitjançant la triangulació dels raigs de les diferents càmeres, ubiquen els marcadors a l'espai. D'aquesta manera, es poden representar moviments per ordinador aconseguint un gran realisme.

Normalment, les bases de dades de "mocaps" són d'ús privat. Estudis d'animació, realitzen costoses sessions per gravar diferents moviments i vendre'ls a empreses per fer pel·lícules, videojocs, etc. Tanmateix, a la Universitat de Portsmouth, Anglaterra, en 2016, un grup d'estudiants va fer un projecte per capturar el moviment d'un gos fent diferents accions. Al vídeo [Counsell, 2015] es pot veure el procés.



Figura 3.4. Storm, el gos amb el qual els estudiants de la Universitat de Portsmouth han fet l'estudi de "motion capture". Fotografia presa durant una de les sessions [Counsell, 2015].

S'ha contactat amb els estudiants que, molt amablement, han compartit les dades per la realització d'aquest projecte.

3.2.1. Ubicació i rellevància dels marcadors

Durant la captura de moviment, és impossible analitzar tot el cos del subjecte a gravar. Caldria moure massa informació.

Per tenir un nombre finit de dades, s'enregistren només una sèrie de marcadors. Els estudiants de Portsmouth van prendre dades de 57 marcadors. Cada un d'aquests marcadors es troba posicionat estratègicament per tal de captar de la millor manera el moviment del gos.

Al mateix temps, s'indica quins marcadors són adjacents. D'aquesta manera, es genera un "esquelet" digital que ajuda a diferenciar els marcadors, perquè en determinades ocasions, poden ser molt propers.

A continuació, es presenta la figura 3.5, on apareix el gos real amb els marcadors a l'esquerra, i el gos amb "l'esquelet" digitalitzat a la dreta:

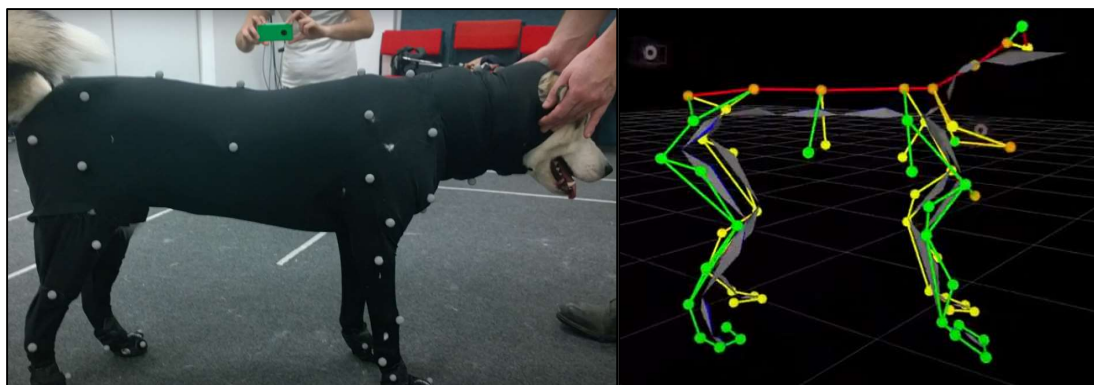


Figura 3.5. Gos amb la vestimenta amb marcadors a l'esquerra i gos amb marcadors i "esquelet" digitalitzats a la dreta (cada un dels nodes és un marcador). [Counsell, 2015]

En aquest projecte, els marcadors més importants són els ubicats a les potes. Així i tot, s'han utilitzat altres marcadors per crear referències relatives. En l'apartat "3.4 Estudi de les dades obtingudes per captura de moviment" s'explica detalladament.

3.3. Contingut de la base de dades

A continuació s'explica detalladament el contingut de la base de dades i com s'ha extret la informació rellevant.

3.3.1. Obtenció del format adequat

Les dades de captura de moviment s'han aconseguit en format C3D. Com comenta el personal de la pàgina web [FILExt, s.f.], aquest format d'arxiu emmagatzema dades biomecàniques i s'utilitza comunament en programes destinats a l'anàlisi de moviments d'objectes en tres dimensions.

Per tractar de manera correcta les dades i poder analitzar-les, convé passar-les a Excel. Mitjançant una eina de transformació de formats ubicada a la pàgina web C3D Tools [C3D Tools] s'han transformat a format TRC. L'Excel és capaç d'importar el format TRC i tractar-lo com una base de dades.

3.3.2. Contingut

Durant una sessió de captura de moviments, l'actor, animal o objecte a gravar, empra una vestimenta monocromàtica amb uns marcadors enganxats. Mitjançant tècniques de fotometria i càmeres preparades, es registra la posició de cada un d'aquests marcadors a l'espai. Normalment, es prenen 120 mesures o fotogrames cada segon.

Per aquest motiu, la base de dades consta de tres columnes per cada un dels marcadors. Cada una d'aquestes columnes, és la distància de la càmera al marcador en els diferents

eixos de coordenades.

Per explicar-ho més detalladament es presenta un fragment de les dades:

Data	Camera	Num	Num	Units	OrigData	OrigData	OrigNum
Rate	Rate	Frames	Markers		Rate	StartFrame	Frames
120.00	120.00	3605	57	mm	120.00	1	3605
Frame#	Time	Storm:CNECK		Storm:CNECK1			
		X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
1	0.000000	574.305.969	-1.567.635.742	-609.545.532	693.840.698	-1.550.848.022	-627.913.818
2	0.008333	578.135.681	-1.562.718.506	-609.876.099	697.755.798	-1.545.124.146	-628.370.667
3	0.016667	581.950.562	-1.557.806.396	-610.281.250	701.503.845	-1.539.386.597	-628.884.338
4	0.025000	585.722.107	-1.552.929.810	-610.738.770	705.197.144	-1.533.692.505	-629.412.476
5	0.033333	589.510.803	-1.548.045.166	-611.205.444	708.690.125	-1.527.972.656	-630.064.514
...

Taula 3.1. Petita mostra de les dades tal com s'obtenen de la base de captura de moviments.

La taula 3.1 recull informació molt important sobre com es va dur a terme la captura de moviments. A continuació s'expliquen breument els valors més rellevants situats a la capçalera de les dades:

- **Data Rate, Camera Rate, Orig. Data Rate:** Tenen un valor de 120, significa que es prenen dades 120 vegades cada segon.
- **Num. Frames:** Té un valor de 3605, significa que es van registrar un total de 3605 posicions per cada marcador.
- **Units:** les unitats són mil·límetres. Cal aclarir que, els punts que contenen les dades de posició no s'han importat correctament. Cal reduir els valors en 10^6 . Per exemple, si apareix $-1.567.635.742$, realment signifiquen 1.567,63 mil·límetres en l'eix negatiu corresponent, respecte el centre de coordenades.
- **Orig. Data Start Frame:** Té un valor d'1 i significa el fotograma d'inici de la presa de dades.
- **Orig. Num. Frames:** Té un valor de 3605 i significa el nombre total de fotogrames registrats.

Cada columna té un títol associat:

- **Frame#:** Cada un dels fotogrames registrats. Significa cada una de les fotografies que es capten cada segon per formar un vídeo d'un objecte en moviment. En

aquest cas no es tracta de fotografies com a tal, sinó de dades d'ubicació de cada marcador.

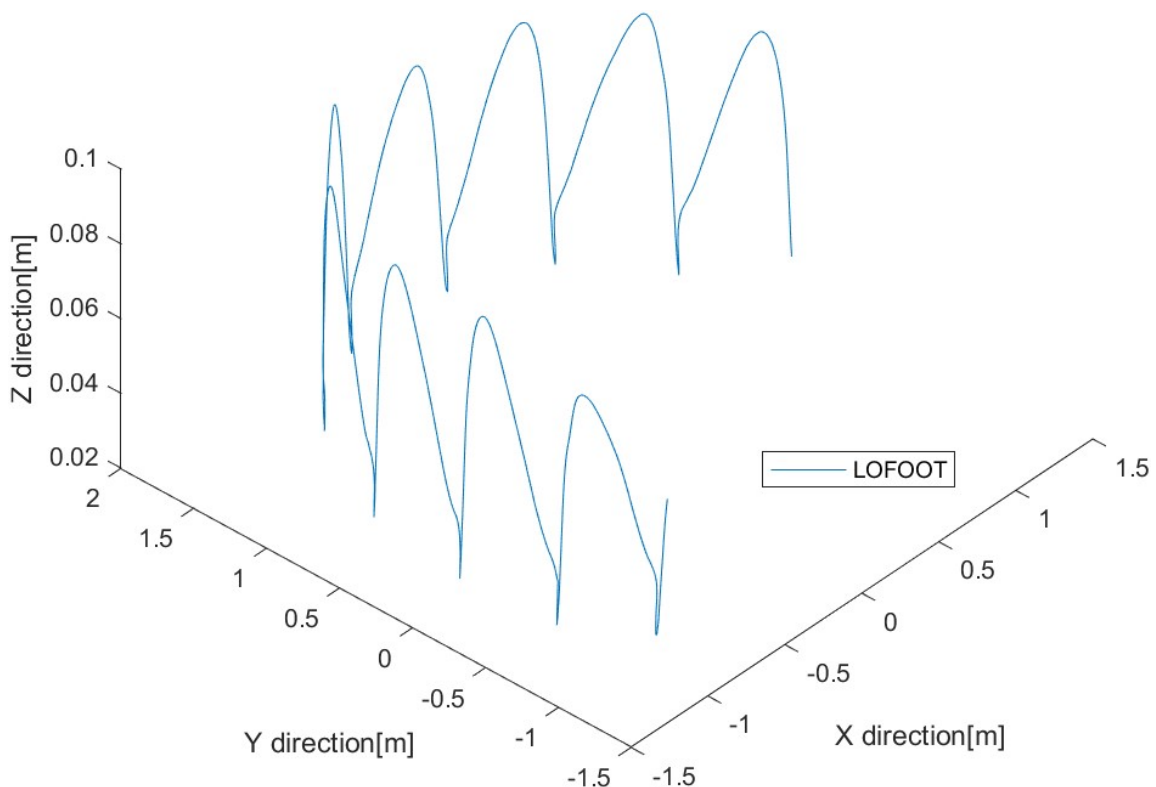
- **Time:** temps en segons, el punt separa els decimals.
- **Storm:CNECK i Storm:CNECK1:** Significa, que les següents columnes són dades preses del marcador situat allà on diguí el títol, en aquest cas, els dos marcadors estan situats al coll de Storm.
- **X1, Y1, Z1 i X2, Y2, Z2:** Cada una d'aquestes columnes descriu la distància, en cada eix de coordenades, del marcador a la càmera que enregistra el moviment.

3.4. Estudi de les dades mitjançant MATLAB

La base de dades, compte les diferents distàncies entre els marcadors i un sistema de referència fix. Per tal d'estudiar les dades s'han hagut de fer diversos processos i transformacions amb el programa MATLAB. A continuació s'expliquen amb detall els passos seguits:

3.4.1. Primera representació

Si es representen gràficament les dades d'un dels marcadors a l'espai s'obté la gràfica 3.1:



Gràfica 3.1. Trajectòria registrada pel marcador situat a la pota del darrere esquerre del gos representada mitjançant MATLAB. "LOFOOT" significa "Left Outside FOOT".

Durant la presa de dades, el gos ha fet mig cercle caminant. A la gràfica 3.1, s'ha representat cada una de les dades de coordenades del marcador LOFOOT. Aquest marcador està situat a la pota del darrere esquerre.

Estudiant la gràfica 3.1, veiem un total de 9 passes en una regió d'uns 10 m². Si s'observa l'eix Z, es veu com la pota no s'aixeca més de 10 centímetres del terra. Aquest desplaçament vertical tan petit pot ser degut al fet que està caminant a molt baixa velocitat.

3.4.2. Canvi de referència

La gràfica 3.1 proporciona informació general del moviment, però, per obtenir una trajectòria vàlida per dissenyar una pota que serà fix al cos del robot, cal veure la trajectòria de la pota des del cos del mateix gos.

En altres paraules, cal canviar les dades de base de referència i analitzar la trajectòria des d'una referència relativa ubicada al cos del gos.

Per a cada fotograma captat, caldrà anar actualitzant la referència relativa. A continuació, s'explica com s'ha fet una única transformació. Aquest procés s'ha automatitzat amb MATLAB, a l'annex 2.1 s'adjunta el codi del programa.

Els passos a seguir han estat els següents:

1. Vectors per la referència relativa:

- Interessa que els eixos de la referència relativa siguin tan estables com sigui possible. És a dir, tinguin molt poc moviment en Z. D'aquesta manera, la trajectòria serà més nítida.
- També és important que siguin ortogonals entre ells. Així la magnitud de la trajectòria als diferents eixos no es distorsionerà.

Analitzant les dades i la ubicació [Counsell, 2015] dels marcadors, s'ha decidit fer els eixos amb els punts situats a la columna vertebral i la pelvis. A la figura 3.6 es mostren els marcadors utilitzats:

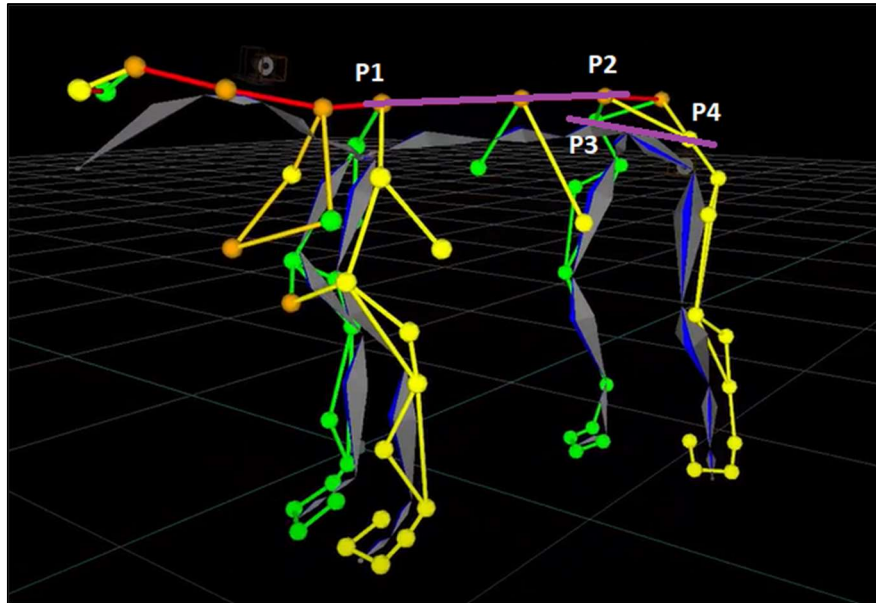


Figura 3.6. Marcadors utilitzats per fer els eixos de la base relativa. En lila els vectors que formen entre ells. [Counsell, 2015]

Els marcadors de la columna vertebral s'anomenen P1 i P2. Els ubicats a la pelvis, P3 i P4. A la figura 3.6 s'ha pintat en lila els eixos que formen entre ells. Sent l'eix de P2 a P1 el vector $V1$ i de P3 a P4, el vector $V2$.

El tercer vector, que marcarà la direcció vertical de desplaçament, serà el producte vectorial dels dos anteriors. L'anomenem $V3$.

2. **Ortogonalització:** Mitjançant el teorema de Gram-Schmidt s'assegura l'ortogonalitat dels eixos sense distorsionar la direcció. A l'annex 2.1 queda més detallat.
3. **Punt d'intersecció entre els dos eixos:** Per fer el canvi de base, també es necessari establir un punt que marcarà l'origen de la referència relativa. S'utilitzen les rectes anteriors en coordenades de Plucker i mitjançant transformacions geomètriques s'obté el punt de tall. Aquest punt s'anomena "d" i el vector "d" està definit per l'origen de coordenades i el mateix punt "d".
4. **Matriu de canvi de base "T":** Amb els tres vectors ortogonals entre si i el punt d'origen de la referència relativa, s'elabora la matriu de canvi de base "T". Amb la forma següent:

$$[T] = \begin{array}{c|ccc|c} & | & | & | & | \\ & \bar{v}_1 & \bar{v}_2 & \bar{v}_3 & \bar{d} \\ & | & | & | & | \\ \hline & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Eq. 3.1. Matriu de canvi de base "T" formada pels vectors "V1", "V2", "V3" i "d".

- 5. Efectuar el canvi de base:** Per canviar cada un dels punts de coordenades de la base de dades que es vulguin estudiar, s'utilitza l'expressió següent:

$$p_i = ([T])^{-1} \cdot P_i$$

Sent "P_i" el punt a canviar de base.

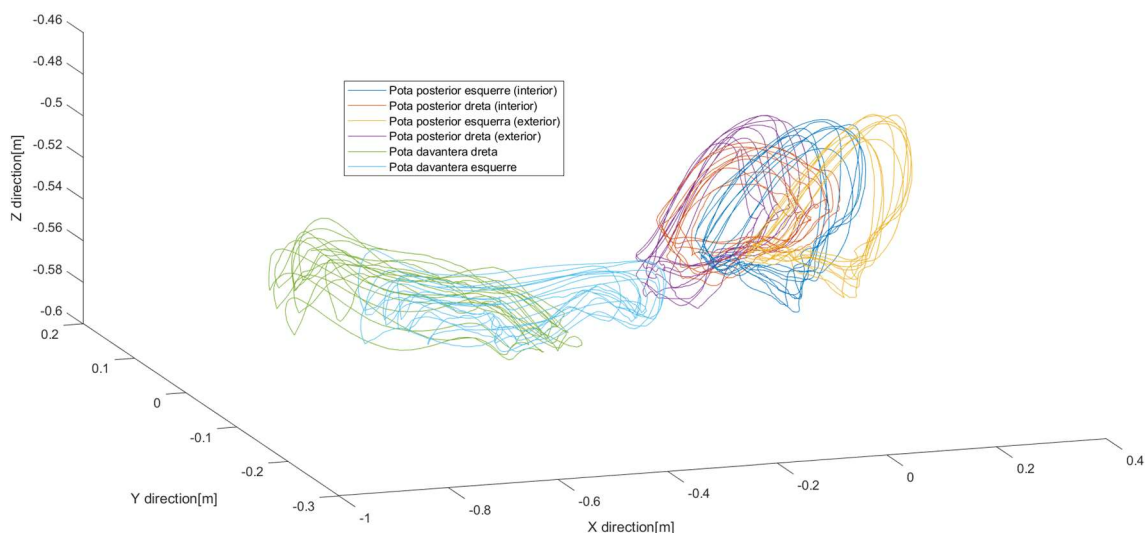
Eq. 3.2. Expressió feta servir per canviar els punts de base

Aquests passos s'han realitzat per cada un dels punts de coordenades obtinguts a la base de dades. Com s'ha mencionat anteriorment, el procés s'ha automatitzat mitjançant MATLAB. El codi utilitzat es pot veure a l'annex 2.1.

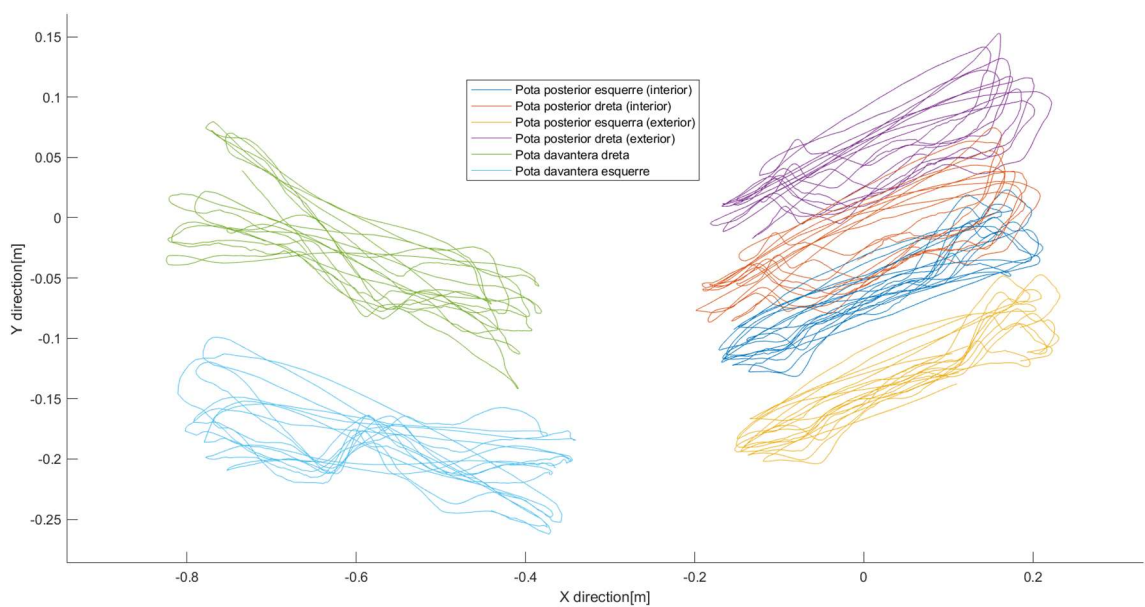
3.4.3. Trajectòries estudiades en referència relativa

Un cop feta la transformació de canvi de base absoluta a relativa al cos del gos, cal decidir quines dades representar i estudiar. En aquest treball s'ha dissenyat una pota per un robot quadrúpede, per aquesta raó, s'estudien les dades referents a les trajectòries de les potes del gos.

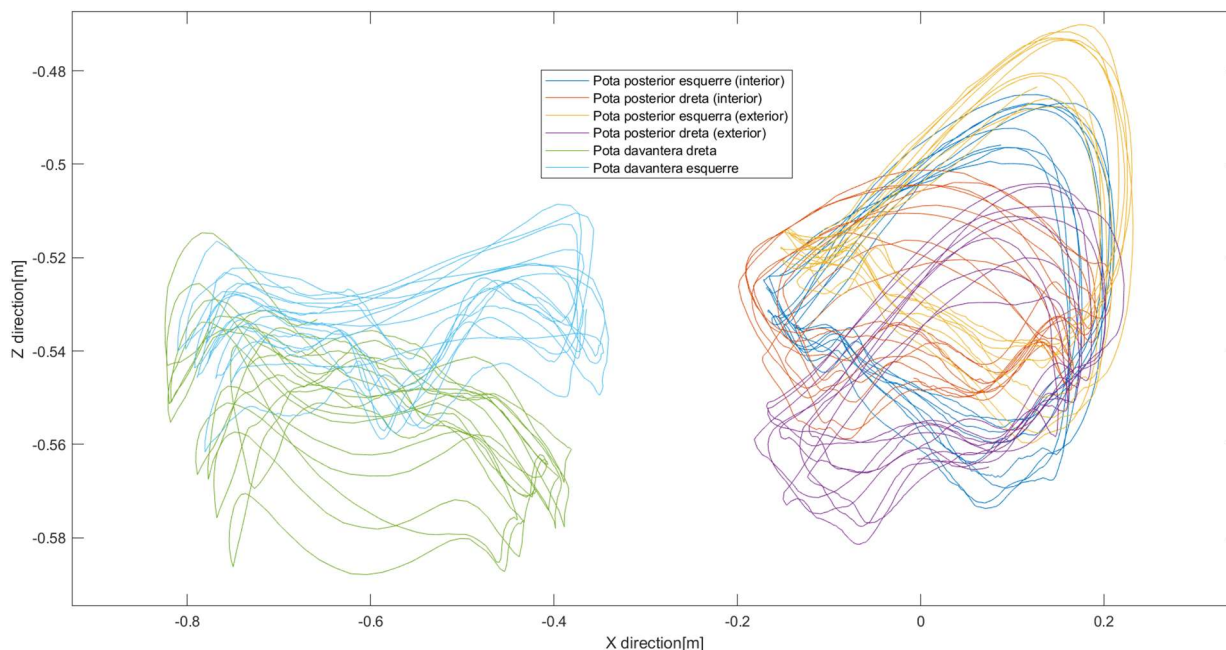
A continuació, a la gràfica 3.2, 3.3 i 3.4, es mostra la representació de les trajectòries de les potes vistes des de la referència ubicada al cos del gos en els diferents eixos:



Gràfica 3.2. Trajectòria de les potes representada a l'eix "X", "Y" i "Z" de coordenades.



Gràfica 3.3. Trajectòria de les potes representada a l'eix "X" i "Y" de coordenades.



Gràfica 3.4. Trajectòria de les potes representada a l'eix "X" i "Z" de coordenades.

Observant la gràfica 3.2, es poden diferenciar les trajectòries de les quatre potes a l'espai.

Cal destacar que, com s'ha explicat anteriorment a l'apartat 3.4.2, l'origen de coordenades és el punt on es tallen les dues rectes utilitzades per fer la referència relativa. Aproximadament es troba a la cintura del gos. Per aquest motiu, a l'eix "Z" apareixen valors negatius i a l'eix "X" el zero està ubicat a les trajectòries de les potes posteriors.

3.4.4. Rotació i adaptació de les trajectòries

Representant gràficament les trajectòries de les potes als eixos "X" i "Y" s'ha observat que es troben rotades un cert angle. Observant la gràfica 3.2, s'aprecia que les trajectòries no segueixen la direcció d'"X". Això pot ser degut al fet que durant la presa de dades, el gos estava realitzant cercles.

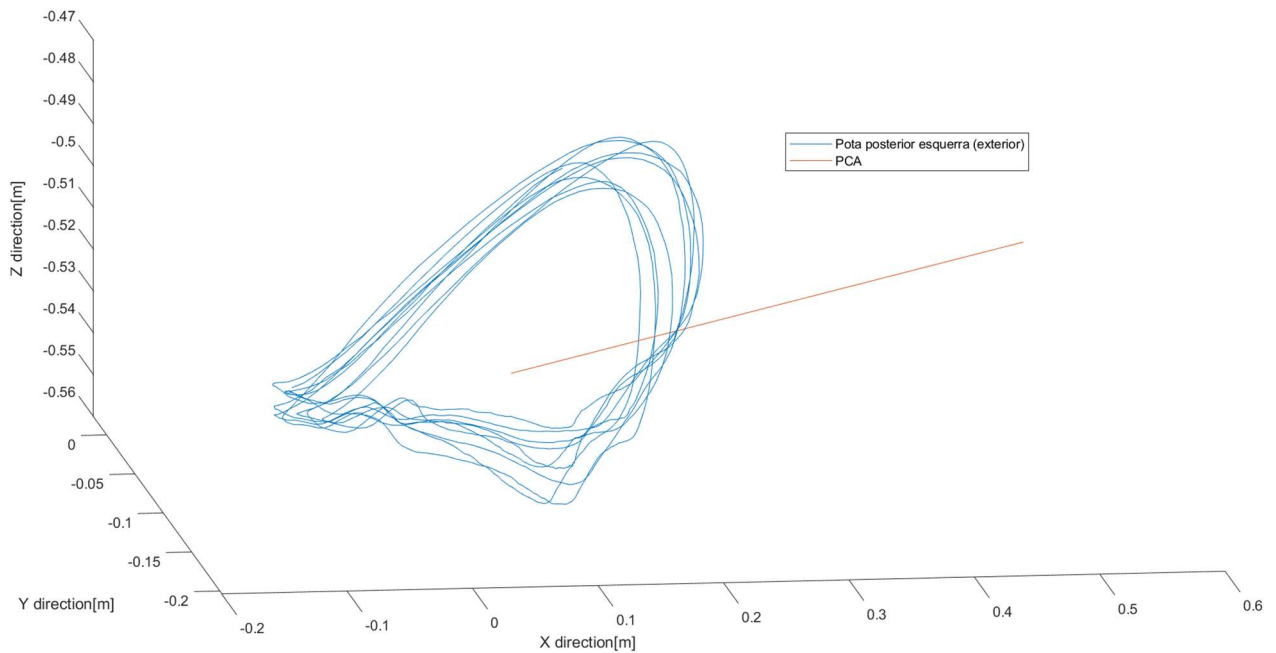
Per tal d'estudiar les trajectòries d'una manera més senzilla, es roten per ubicar-les paral·leles al pla format per l'eix "X" i "Z". D'aquesta manera serà més fàcil controlar la direcció en la que avança el robot al seguir la trajectòria.

La metodologia emprada per fer la rotació ha estat la següent (El codi de MATLAB utilitzat es troba a l'annex 2.2):

1. Primerament, s'ha fet una anàlisi de PCA (anàlisi de components principals). Aquesta anàlisi, busca conèixer les direccions principals de la trajectòria (o components principals) que són les direccions on les dades varien més i

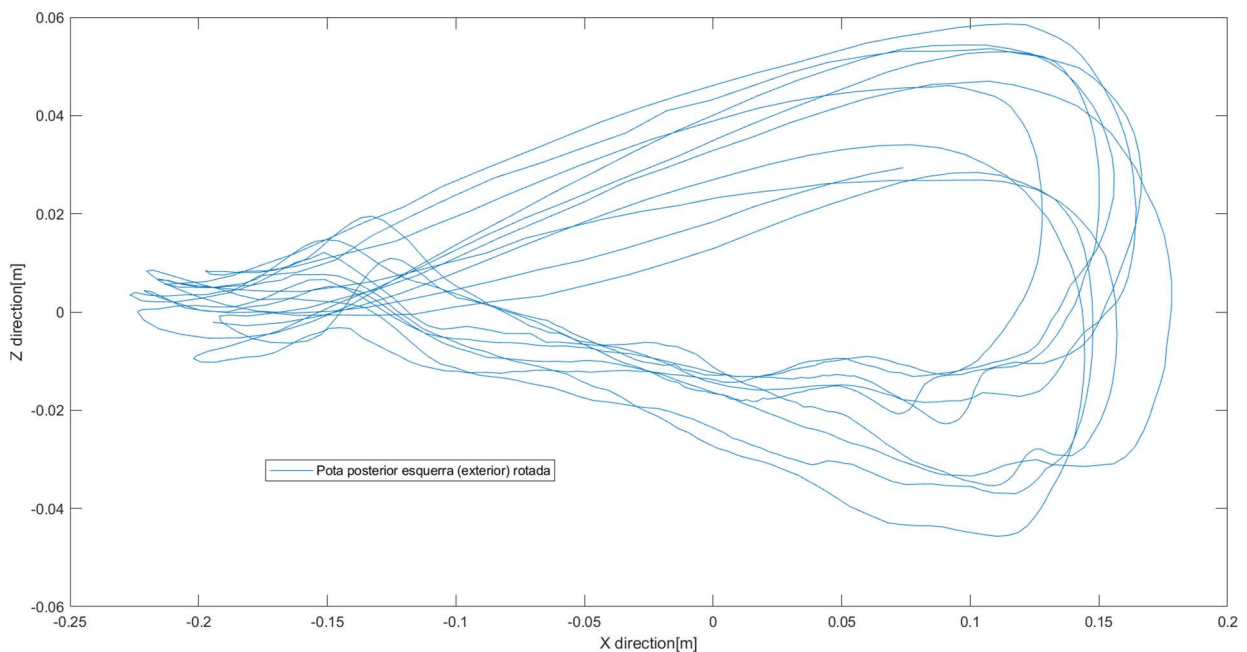
projectar-les. D'aquesta manera, es redueix la quantitat d'informació, es manté la més rellevant i s'afavoreix l'estudi de les dades.

A continuació, s'adjunta una gràfica 3.5 on es pot veure representat el vector de components principals per la trajectòria d'una de les potes:



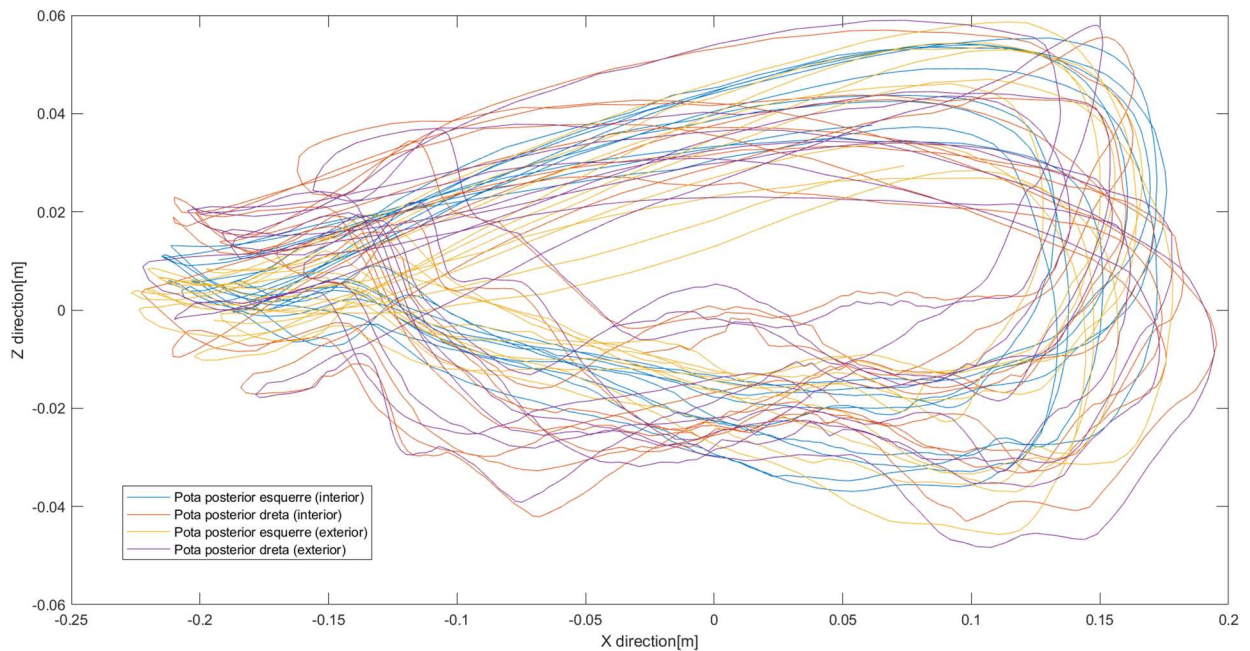
Gràfica 3.5. Trajectòria d'una pota i de la seva direcció principal als eixos "X", "Y" i "Z".

2. A continuació, per cada punt de cada trajectòria s'ha dut a terme la rotació segons la direcció que descriu el vector de components principals (marcat a la gràfica 3.5 en taronja). Es mostra el resultat sobre una de les trajectòries a la gràfica 3.6.



Gràfica 3.6. Trajectòria d'una pota paral·lela al pla "X" i "Z".

3. Finalment, s'efectua la rotació de cada una de les trajectòries tal com s'ha explicat al punt 1 i 2. Es representen totes juntes a la gràfica 3.7:



Gràfica 3.7. Trajectòria de totes les potes del darrere paral·leles al pla "X" i "Z".

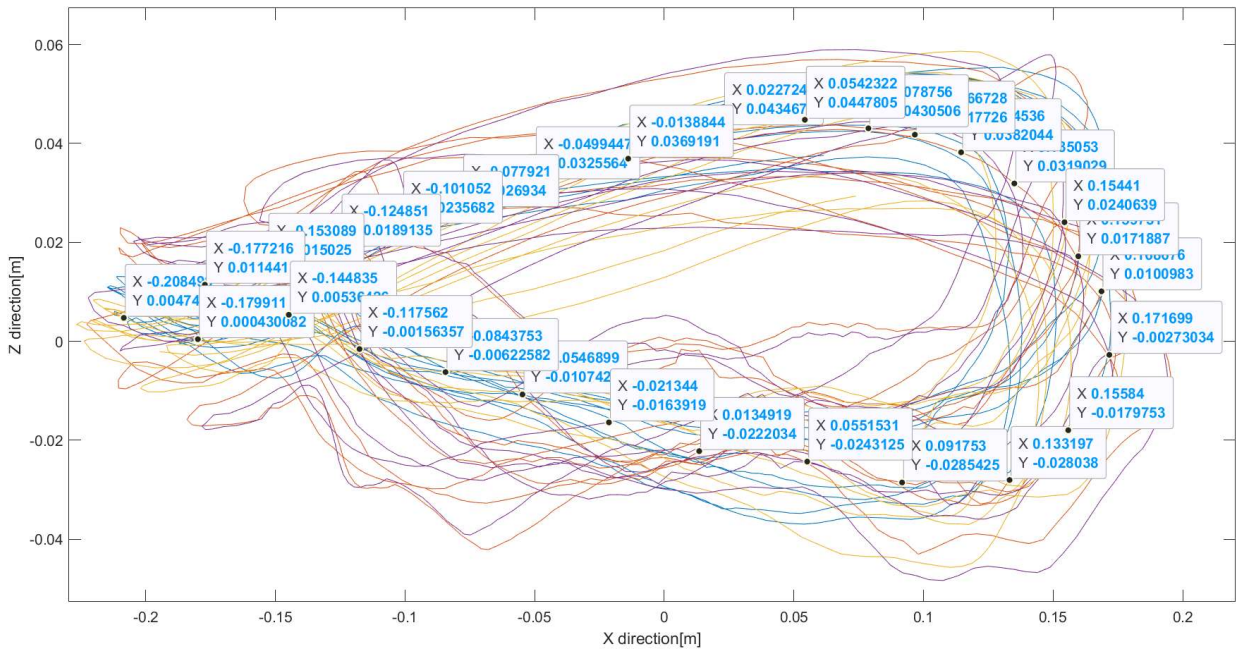
A la gràfica 3.7, es poden veure les 4 trajectòries dels marcadors situats a les potes del darrere. S'han rotat i superposat per tal d'estudiar-les al pla de dues dimensions format per l'eix "X" i "Z". S'han obviat les trajectòries de les potes del davant perquè són diferents de les del darrere i es troben més distorsionades. S'adjunten a l'annex 1 juntament amb una gràfica de totes les trajectòries superposades.

3.5. Trajectòria final

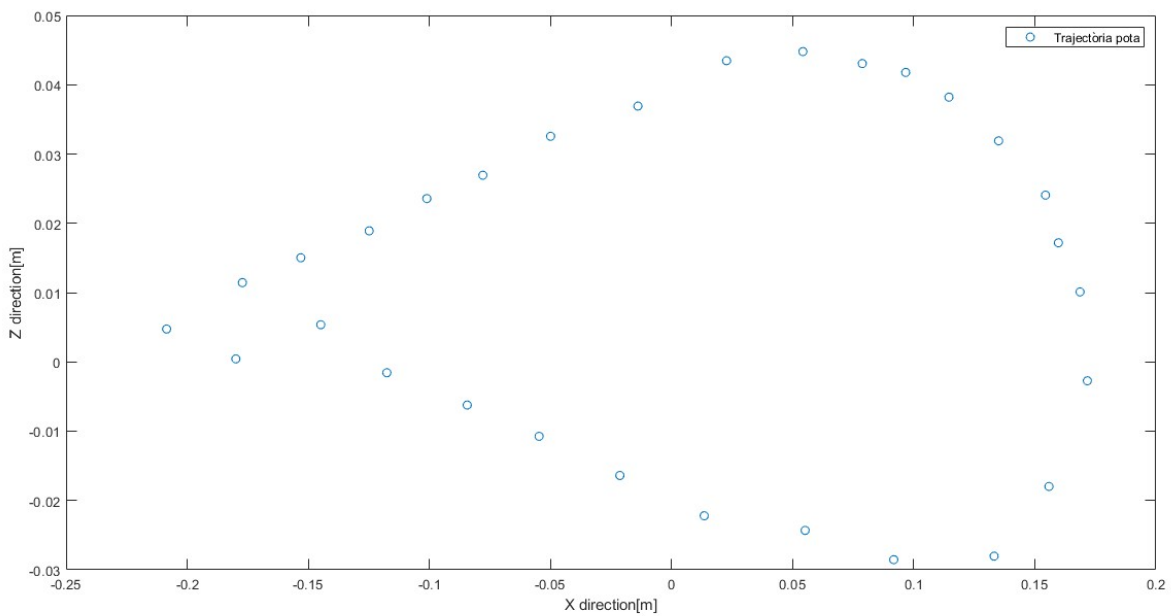
Un cop s'han superposat totes les trajectòries, cal simplificar-les en una de sola. Aquesta trajectòria serà la que seguirà la pota del robot quadrúpede per desplaçar-se cap endavant a l'espai.

La metodologia més rigorosa per condensar la trajectòria múltiple en una de sola és calcular la mitjana entre totes elles. Tanmateix, cada passa que fa el gos no triga el mateix temps i, com que la presa de dades es fa amb relació al temps, cada passa compta amb una quantitat diferent de punts. Aquest fet fa molt complicat sincronitzar les trajectòries.

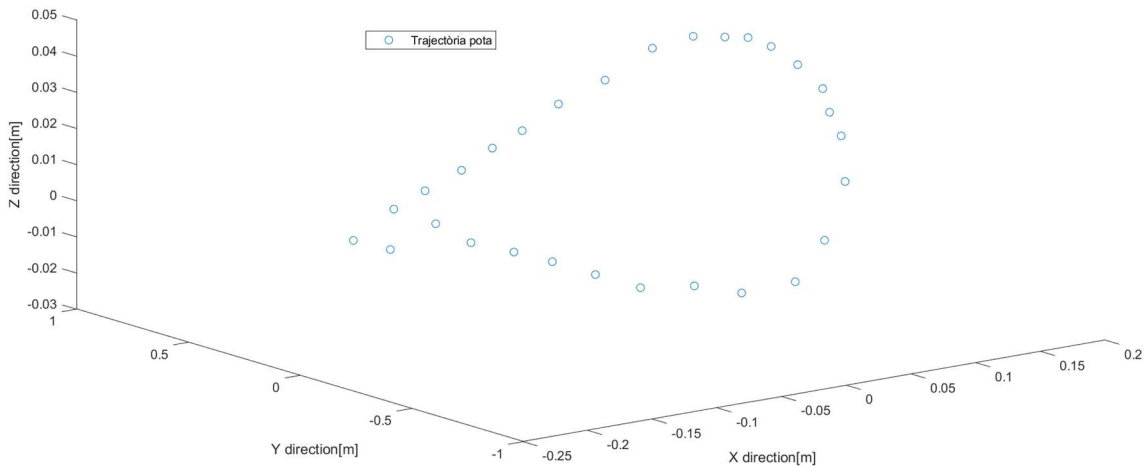
Per tal d'obtenir una trajectòria representativa, s'han seleccionat una sèrie de punts combinant totes les trajectòries. La trajectòria final es pot veure a continuació a les gràfiques 3.8, 3.9 i 3.10:



Gràfica 3.8. Trajectòria de totes les potes paral·leles al pla "X" i "Z". Punts representatius seleccionats a mà.



Gràfica 3.9. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final en "X" i "Z".



Gràfica 3.10. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final en "X", "Y" i "Z".

3.6. Trajectòria complementària

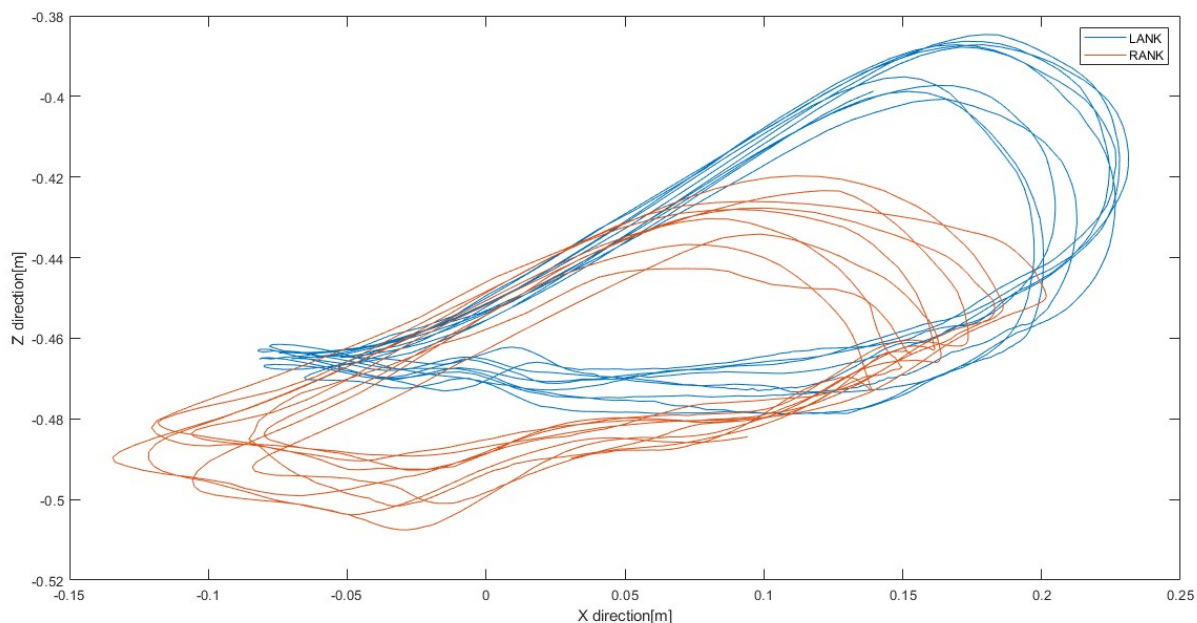
La pota del robot ha de poder moure's en les tres dimensions de l'espai i ser capaç de superar obstacles.

Per aconseguir aquests dos objectius, s'ha decidit unir dos mecanismes diferents. El primer serà un mecanisme paral·lel que proporcionarà dos graus de llibertat i oferirà estabilitat. El tercer grau s'ha afegit mitjançant un mecanisme format únicament per un enllaç de revolució. Aquest últim permetrà al robot aixecar-se del terra quan sigui necessari.

Per poder generar el primer mecanisme, es necessita una trajectòria diferent de la final, però propera. Estudiades les trajectòries dels marcadors propers a la pota posterior, s'ha decidit utilitzar la trajectòria del turmell.

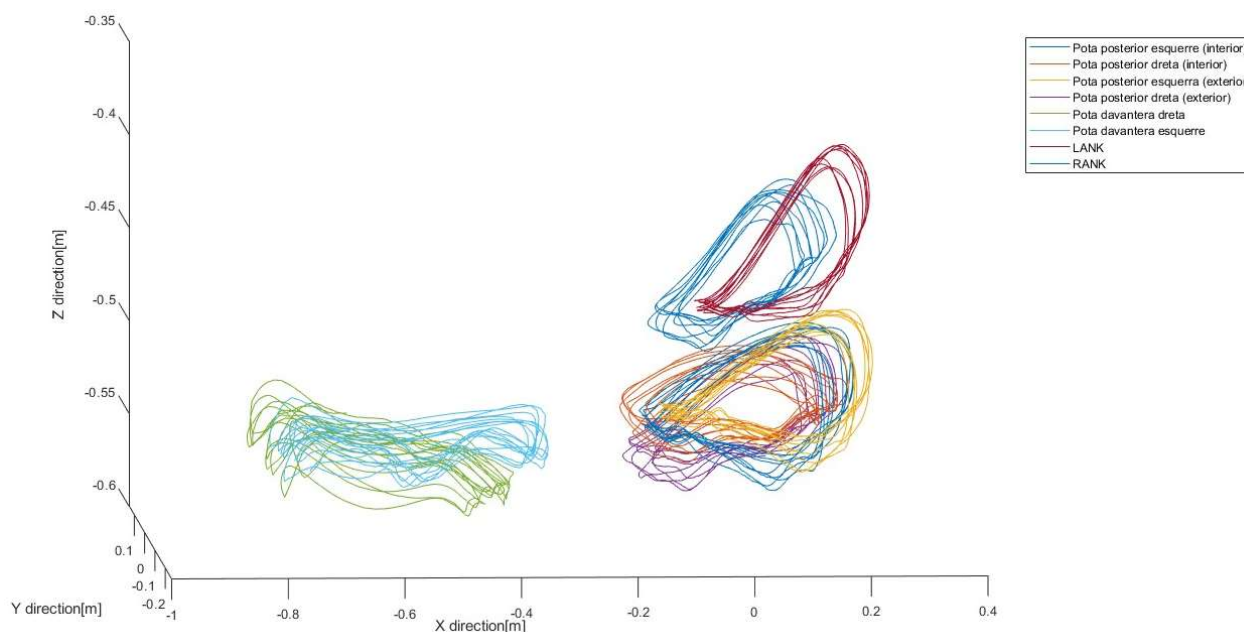
En aquest cas, no serà necessari rotar aquesta trajectòria perquè no determina de manera directa la direcció del desplaçament, però, sí que s'ubicarà en el pla que forma la trajectòria final per tal de mantenir la relació entre turmell i pota.

Seguint els mateixos passos que s'han emprat per obtenir la trajectòria final a partir de la base de dades, descrits a l'apartat 3.4.3. en endavant, s'obté la trajectòria del turmell. A la gràfica 3.11 es presenta el resultat:



Gràfica 3.11. Trajectòria del turmell a "X" i "Z". "LANK" fa referència al turmell esquerre i "RANK" al dret.

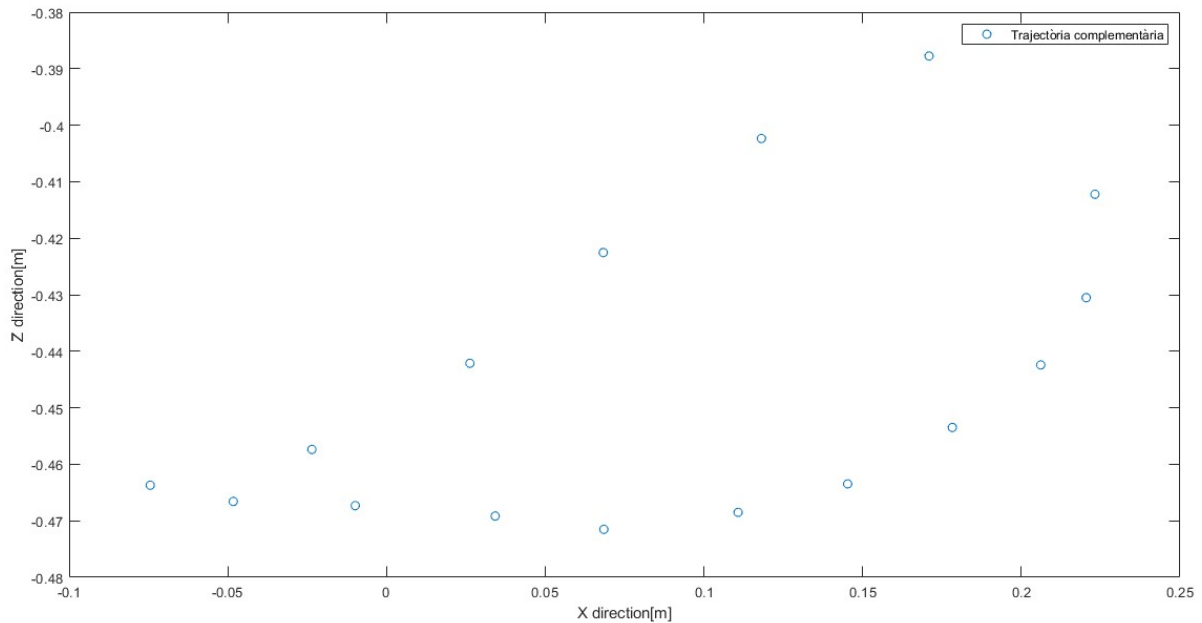
S'ha trobat interessant afegir la gràfica 3.12, on apareixen les trajectòries de les quatre potes amb les dels turmells posteriors.



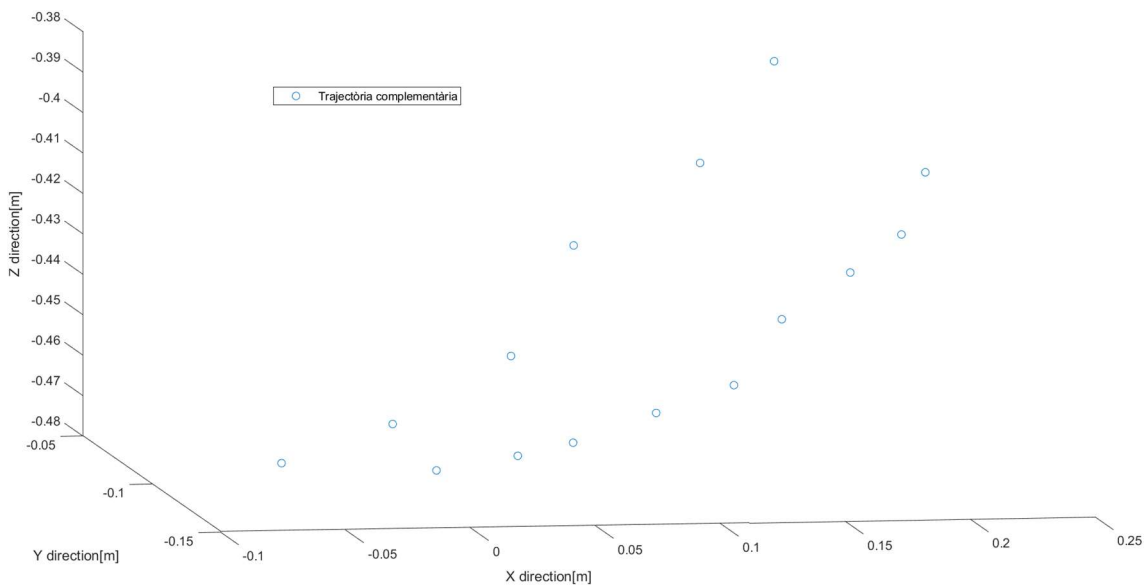
Gràfica 3.12. Trajectòria de les potes i els turmells posteriors "LANK" fa referència al turmell esquerre i "RANK" al dret.

A l'annex 2.3 apareix el codi de MATLAB utilitzat.

Finalment, pels mateixos motius que s'han exposat a l'apartat "3.5 Trajectòria final" amb la trajectòria final, s'han escollit uns punts a mà alçada de la gràfica per generar el mecanisme. En concret, s'han escollit del turmell esquerre perquè es tracta d'una trajectòria més definida i amb menys dispersió. A continuació es presenten les gràfiques 3.13 i 3.14 on es pot apreciar la representació dels punts de la trajectòria complementària a l'espai.



Gràfica 3.13. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final complementària en "X" i "Z".



Gràfica 3.14. Punts representatius seleccionats a mà per formar la trajectòria final complementària en "X", "Y" i "Z".

Tant els punts de la trajectòria com el codi utilitzat per fer aquesta última gràfica es troben a l'annex 2.4.

4. Selecció del mecanisme

En aquest apartat es realitza la selecció del mecanisme. S'ha seguit un procés en el qual es generen estructures mecàniques o mecanismes que compleixen amb un conjunt específic de requisits o funcions. En concret i d'una manera més acurada, la selecció del mecanisme és el que s'anomena síntesi de tipus [Tsai, 2000]. En essència, s'ha seguit una metodologia general per crear un disseny mecànic que s'ajusti a un propòsit en particular.

Existeix un nombre elevat de mecanismes funcionals, capaços de reproduir els moviments i trajectòries desitjades respectant els requisits necessaris. Es poden considerar vàlids tant mecanismes simples com podria ser una cadena sèrie amb tres graus de llibertat, com mecanismes més complexos com robots paral·lels o híbrids.

Per tal de visualitzar totes les opcions d'una manera senzilla i establir els requisits necessaris, s'ha seguit un procés computacional. Amb aquest procés, s'han pogut aplicar una sèrie de filtres per acotar les opcions dins d'un rang. Amb una quantitat raonable de propostes, s'han representat esquemàticament mitjançant una teoria de Grafs i, seguint uns criteris, s'ha pogut reduir la llista de candidats.

Finalment, amb el candidat més prometedor, s'ha realitzat un estudi cinemàtic.

4.1. Classificació inicial

Per facilitar l'estudi, s'han classificat en diferents nivells segons les propietats de cada un:

1. **Famílies:** Agrupen els mecanismes per propietats molt genèriques. Per exemple, una família estaria formada per tots aquells mecanismes que formen una cadena cinemàtica tancada. Una altra família serien tots els que en formen una cadena oberta.
2. **Classes:** Dins de cada família, trobem les classes. En aquest nivell s'agrupen tots els mecanismes d'una mateixa família que comparteixen les característiques següents:
 - a. Nombre de graus de llibertat
 - b. Nombre de sòlids
 - c. Nombre d'enllaços d'1 grau de llibertat
 - d. Nombre d'enllaços de 2 graus de llibertat
 - e. Nombre d'enllaços de 3 graus de llibertat
 - f. Nombre d'anells del mecanisme.
3. **Subclasses:** Classificació més acurada. Dins de cada subclasse, es poden trobar tots aquells mecanismes amb les mateixes característiques però diferent ordre o

tipologia en els enllaços i sòlids. Per exemple, un mecanisme amb dos sòlids i un enllaç d'un grau de llibertat, pot ser una barra articulada a terra amb una revolució o amb un pistó. Cada un d'aquests mecanismes és una subclasse.

Per fer més entenedora aquesta explicació, s'adjunta la figura 4.1 extreta de les diapositives de "Síntesi estructural" proporcionades per Alba Pérez Gracia, la tutora d'aquest treball. (Referència adjuntada a la bibliografia complementària).

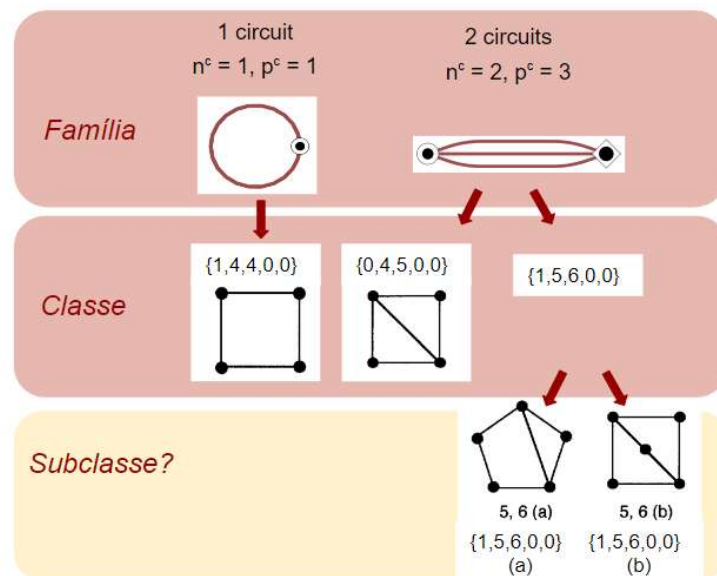


Figura 4.1. Classificació dels mecanismes per famílies, classes i subclasses. La numeració que apareix entre parèntesis esta explicada al apartat 4.2.2.

Com es pot observar a la figura 4.1, una família engloba moltes classes diferents de mecanismes i, cada classe, pot englobar multitud de subclasses.

4.2. Codi emprat

Com s'ha mencionat anteriorment, per agilitzar el procés de selecció, s'ha utilitzat un procés computacional per generar totes les possibles combinacions de mecanismes.

El codi està escrit en llenguatge Python, s'ha fet us d'Anaconda Prompt [www.anaconda.com] per executar-lo i el programa Notepad ++ [www.notepad-plus-plus.org] per modificar-lo.

Cal destacar, que el codi ha estat proporcionat per la tutora d'aquest treball, l'Alba Pérez Gracia. En concret per aquest treball, únicament s'ha adaptat amb les variables que ens interessin i executat per obtenir uns resultats.

De manera senzilla, el funcionament del codi és el següent:

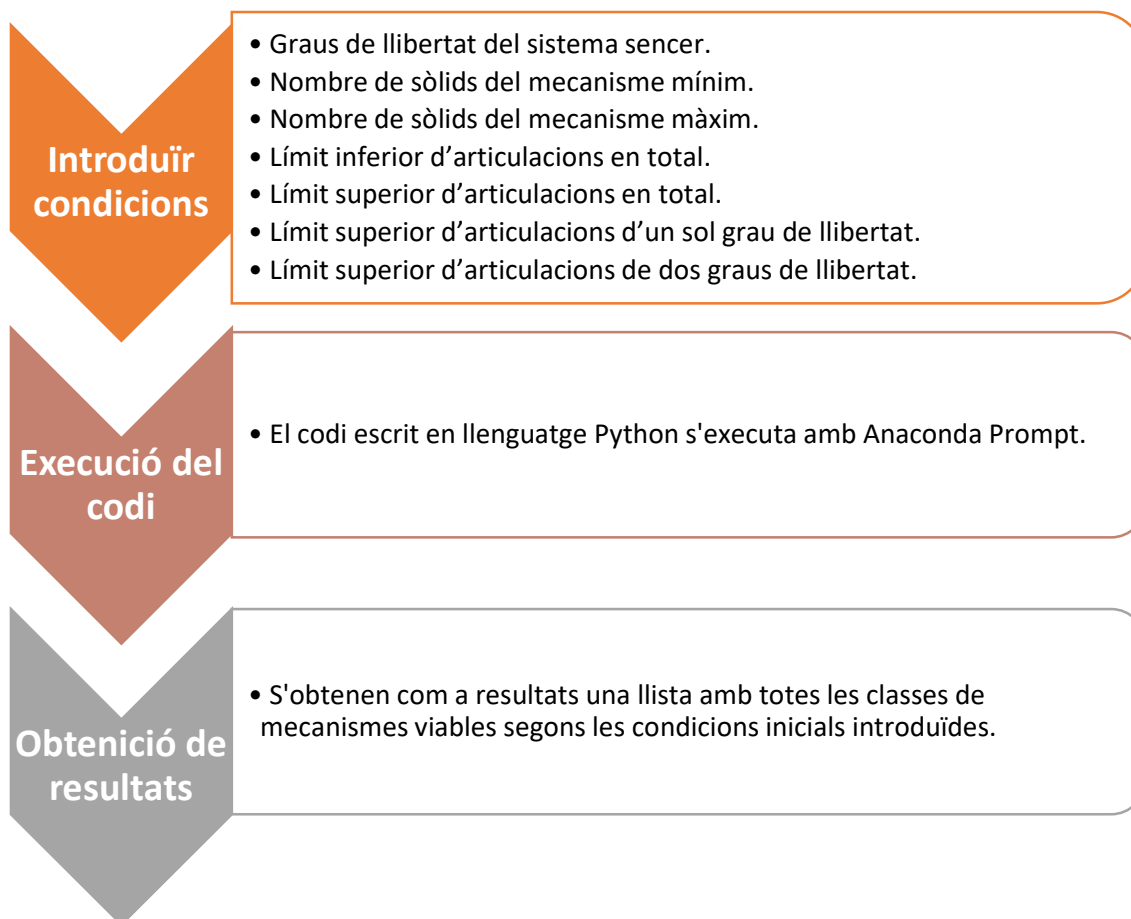


Figura 4.2. Funcionament resumit del codi.

A continuació, en l'apartat 4.2.1 s'explica de manera més extensa.

4.2.1. Codi utilitzat per a la generació de combinacions de mecanismes

El codi utilitzat es basa en dos programes, "main.py" i "synth3d.py" adjuntats a l'annex 3.1.

4.2.1.1. "main.py"

El programa s'inicia amb la importació de les llibreries i els mòduls necessaris per al seu funcionament: "numpy", "itertools", "operator" i els mòduls "synth2d" i "synth3d". El mòdul "synth2d" s'empra per generar combinacions de mecanismes amb 2 dimensions i "synth3d" de tres dimensions. Únicament s'han tingut en consideració les solucions que es mouen en les tres dimensions de l'espai.

A continuació, s'inicialitzen els paràmetres que determinen les condicions dels mecanismes. Són: "**M**", "**nmin**", "**nmax**", "**plo**", "**pup**", "**pu1**", "**pu2**" i "**pu3**". Paràmetres que s'expliquen posteriorment a l'apartat 4.2.2.

Un cop iniciades les variables, s'executa el programa principal i crida diverses funcions dels mòduls "synth2d" i "synth3d":

- **"mech = synth_type (M,nmin,nmax,plo,pup,pu1,pu2)", "mech2 = synth_type_fam (M, nmin, nmax, plo, pup, pu1, pu2)" i "synth_type_fam(M, nmin, nmax, plo, pup, pu1, pu2)"** generen i proporcionen informació sobre mecanismes en 2 dimensions. En aquest treball no s'utilitzaran.
- **"mech3D = synth_type3D(M,nmin,nmax,plo,pup,pu1,pu2,pu3)"** Genera mecanismes en 3 dimensions i és el mòdul que s'ha utilitzat per obtenir combinacions.

Finalment, un cop ha executat les funcions, imprimeix les dades en forma de matrius.

4.2.1.2. "Mech3D"

El mòdul "mech3D" és molt més complex que el "main". S'explicarà breument el funcionament, sense entrar en profunditat en els detalls. Es pot trobar el codi complet a l'annex 3.1.

Primerament, importa les llibreries i variables que necessita per funcionar.

A continuació, executa una sèrie de funcions:

- **"synth_type3D"**: Genera mecanismes 3D que compleixin totes les condicions establertes per les variables inicials. Crea totes les combinacions possibles d'enllaços i articulacions, verifica en cada cas que compleixin les restriccions i posteriorment els afegeix a la llista "mech".
- **"synth_type_fam"**: Genera les famílies de cada mecanisme utilitzant la funció "synth_subclass" que li proporciona la subclasse d'aquests. Finalment, imprimeix informació sobre cada família.
- **"synth_subclass"**: Identifica les diferents combinacions de cadenes d'enllaços i genera subclasses amb mecanismes que compleixin unes determinades condicions.
- **"adj_matrix"**: Crea una matriu que representa les connexions dins un mecanisme.

4.2.2. Variables utilitzades

Les variables utilitzades al model es poden dividir en dues categories, les que cal entrar a mà i les que et proporciona el codi com a resultat. A continuació es presenten:

Variables d'entrada:

- **M**: graus de llibertat del sistema sencer.

- **nmin**: Nombre de sòlids del mecanisme mínim.
- **nmax**: Nombre de sòlids del mecanisme màxim.
- **plo**: Límit inferior d'articulacions en total.
- **pup**: Límit superior d'articulacions en total.
- **pu1**: Límit superior d'articulacions d'un sol grau de llibertat.
- **pu2**: Límit superior d'articulacions de dos graus de llibertat.
- **pu3**: Límit superior d'articulacions de tres graus de llibertat.

Variables obtingudes:

- **M**: Nombre de graus de llibertat del mecanisme.
- **n**: Nombre de sòlids.
- **p1**: nombre d'enllaços d'un grau de llibertat.
- **p2**: nombre d'enllaços de dos graus de llibertat.
- **p3**: nombre d'enllaços de tres graus de llibertat.

El resultat que genera el codi és una matriu on cada fila és un mecanisme proposat i cada columna una variable de resposta en l'ordre que s'han presentat.

4.3. Representació dels resultats mitjançant Grafs

Per poder estudiar els resultats, s'ha emprat una teoria de Grafs. D'aquesta manera s'aconsegueix explorar les diverses opcions d'una manera més senzilla i intuïtiva.

4.3.1. Format dels resultats

Com a resultats, s'ha obtingut una llista on cada component és una classe de mecanismes. Cada component de la llista te el següent format:

[A, B, C, D, E] on:

- A.** Nombre de graus de llibertat (M).
- B.** Nombre de sòlids contant el terra (n).
- C.** Nombre d'enllaços que permeten 1 grau de llibertat (p1).
- D.** Nombre d'enllaços que permeten 2 graus de llibertat (p2).
- E.** Nombre d'enllaços que permeten 3 graus de llibertat (p3).

Per poder fer l'estudi correcte dels resultats s'afegeix una variable nova, "L". Aquesta variable descriu el nombre de "loops" o cadenes tancades del mecanisme i es calcula com: " $p1 + p2 + p3 - n + 1$ ".

Els resultats ens indiquen la quantitat de sòlids, enllaços d'1, 2 o 3 graus de llibertat i cadenes que forma el mecanisme. Tanmateix, no concreten l'ordre de cada enllaç

respecte dels diferents sòlids. Per aquest motiu, cada resultat obtingut és una classe de mecanismes que pot derivar en multitud de mecanismes amb condicions similars anomenats subclasses.

4.3.2. Introducció a la teoria de Grafs utilitzada

Un graf, és un conjunt de vèrtex anomenats nodes connectats entre si amb arestes. Aquestes connexions poden ser simples o múltiples i formen cadenes obertes i tancades.

Com s'afirma a la pàgina web [Graph Everywhere], la finalitat dels grafs és estudiar les relacions existents entre unitats que interactuen les unes amb les altres.

A continuació, es presenta la figura 4.3 com a exemple d'un graf genèric:

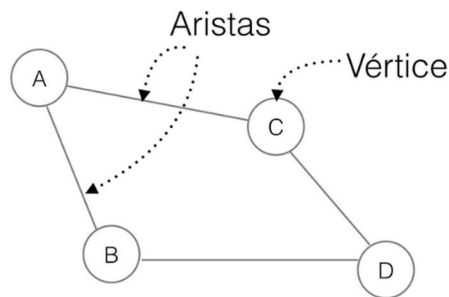


Figura 4.3. Graf genèric. [Portilla, 2017]

En el nostre cas en particular, les arestes són enllaços i els vèrtexs són elements com per exemple barres, plataformes o el propi cos del robot (considerat el "terra"). Aquest últim, com es comenta a [Tsai, 2000], serà sempre el vèrtex encerclat.

Per tal de simplificar el mètode, s'han tingut en compte una sèrie de consideracions que redueixen el nombre possible de mecanismes per classes:

- Per simplicitat no s'han considerat circuits redundants.
- Considerem tots els enllaços com a binaris (únicament es relacionen dos sòlids).
- El nombre mínim d'enllaços a cada sòlid és 1.

4.3.3. Introducció a la representació de mecanismes utilitzada

Per representar els mecanismes d'una manera entenedora, s'han utilitzat els dibuixos adjuntats a la taula 4.1 que es mostra a continuació:

Tipologia d'enllaç	Graus de llibertat que permet	Representació gràfica de l'enllaç	Representació gràfica de l'enllaç unit amb el terra
Prismàtic	1		
Revolució	1		
Universal	2		
Esfèric	3		

Taula 4.1. Representació gràfica dels enllaços i unions utilitzada.

Les barres seran línies i les unions de 3 enllaços amb una mateixa barra es representen ombrejats en negre. A continuació s'adjunta un exemple (figura 4.4):

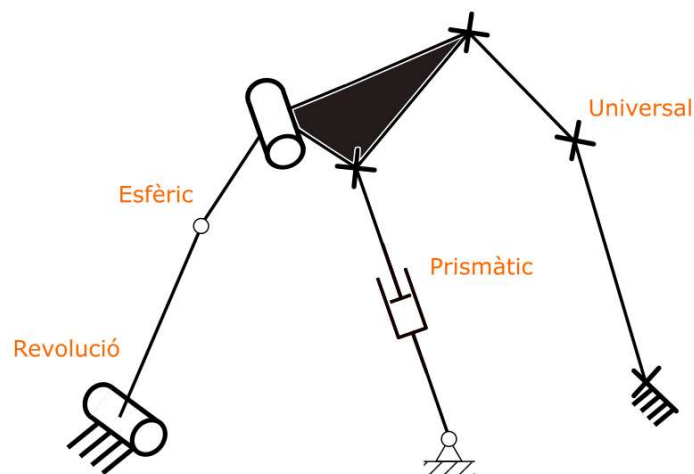


Figura 4.4. Exemple de la representació de mecanismes que s'ha utilitzat a la memòria.

Cal destacar, que per les representacions gràfiques dels grafs i els mecanismes que apareixen en la memòria, s'ha emprat el programa Inkscape i la plantilla de l'assignatura Teoria de Màquines i Mecanismes del Grau de l'ETSEIB.

4.3.4. Exemples de la representació de mecanismes

Amb aquestes consideracions, per mostrar d'una forma senzilla la representació d'un mecanisme, es posa un exemple:

Prenent com a referència el resultat obtingut a l'apartat 4.4.3, la representació de la classe $[3, 3, 0, 0, 3]$, que només compta amb una única subclasse, es fa de la següent manera (figura 4.5):

- **M:** 3
- **n:** 3
- **p1:** 0
- **p2:** 0
- **p3:** 3
- **L:** 1

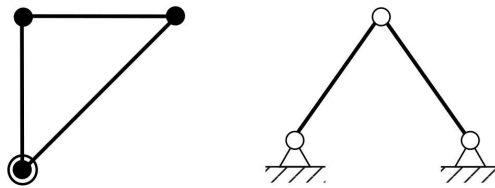


Figura 4.5. A l'esquerre, graf de la classe $[3, 3, 0, 0, 3]$, a la dreta, representació esquemàtica del mecanisme amb el "terra" marcat en el node inferior.

A continuació, s'ha presentat un exemple amb més subclasses, $[2, 6, 4, 2, 0]$ (figures 4.6 i 4.7):

- **M:** 2
- **n:** 6
- **p1:** 4
- **p2:** 2
- **p3:** 0
- **L:** 1

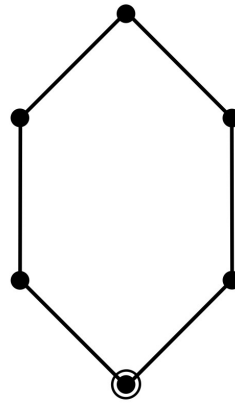


Figura 4.6. Graf de la classe $[2, 6, 4, 2, 0]$ amb el “terra” marcat al node inferior.

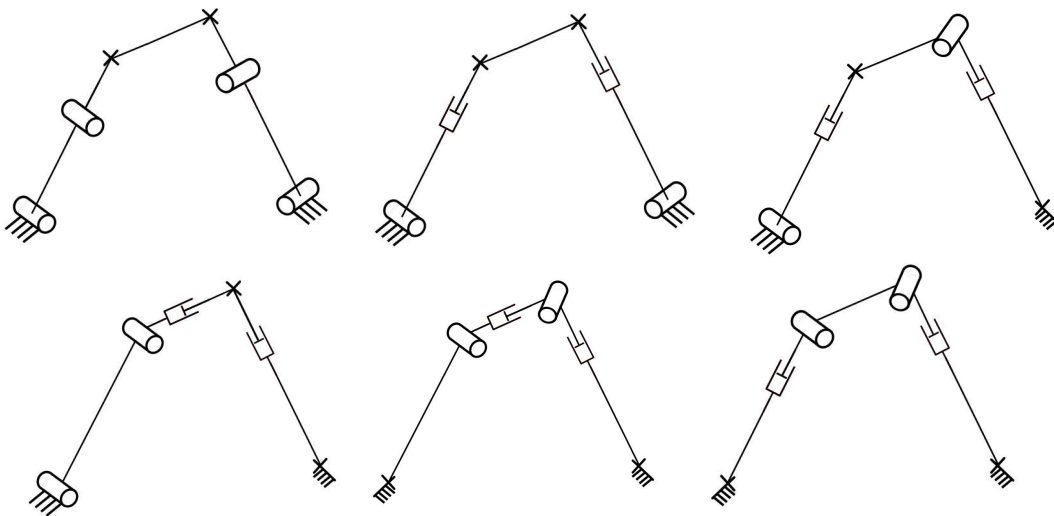


Figura 4.7. Mecanismes pertanyents a subclasses de la classe $[2, 6, 4, 2, 0]$. Subclasse 1 / Subclasse 2 / Subclasse 3 / Subclasse 4 / Subclasse 5 / Subclasse 6.

Cal destacar, que encara faltarien més subclasses.

4.4. Mecanismes obtinguts

Per tal d'obtenir una gran quantitat de resultats, s'ha executat el codi tres vegades variant alguns paràmetres. D'aquesta manera, s'han aconseguit combinacions més variades i s'han pogut estudiar més mecanismes.

4.4.1. Resultats obtinguts amb 1 grau de llibertat:

L'elecció de les diferents variables s'ha pres en conseqüència als mecanismes que es pretenen obtenir. El valor de les variables i el raonament ha estat el següent:

- **M: 1**
Es comença per estudiar els sistemes amb 1 grau de llibertat.
- **nmin: 2**
Permet poder explorar els mecanismes més senzills amb 1 barra i el terra.
- **nmax: 6**
Nombre prou alt perquè la quantitat màxima de sòlids vingui determinada pel nombre d'enllaços. Per aclarir-ho, cada cos necessita contactar amb mínim una articulació i cada articulació pot contactar amb un màxim de dos sòlids. Per tant, s'ha limitat el nombre de sòlids indirectament limitant el nombre d'articulacions.
- **plo: 1**
S'ha establert en 1 per explorar tots els mecanismes possibles.
- **pup: 8**
Es considera aquest valor tenint en compte que cada articulació implica més pes i un augment en la complexitat dels controladors.
- **pu1: 5**
D'aquesta manera es poden generar mecanismes amb tots els seus enllaços idèntics i les possibles combinacions.
- **pu2: 5**
D'aquesta manera es poden generar mecanismes amb tots els seus enllaços idèntics i les possibles combinacions.
- **pu3: 0**
Per seguir la trajectòria caldran 3 graus de llibertat, així que les propostes de mecanismes que s'han generat amb 1 grau de llibertat únicament són viables per acoblar-se a un mecanisme de 2 graus de llibertat. Per tant, per reduir els resultats obtinguts, es limita l'ús d'enllaços de 3 graus de llibertat.

Els resultats aconseguits un cop executat el codi són els següents:

[[1, 2, 1, 0, 0], [1, 3, 2, 0, 1], [1, 4, 2, 0, 4], [1, 4, 3, 0, 2], [1, 4, 4, 0, 0], [1, 5, 3, 0, 5], [1, 5, 4, 0, 3], [1, 5, 5, 0, 1]]

*Marcats en **negreta**, els mecanismes estudiats a l'apartat 4.3.4. Marcats en blau, els mecanismes estudiats a l'annex 4.

4.4.2. Resultats obtinguts amb 2 graus de llibertat:

L'elecció de les diferents variables s'ha pres en conseqüència als mecanismes que es pretenen obtenir. El valor de les variables i el raonament ha estat el següent:

- **M: 2**
Es pretenen estudiar els mecanismes amb 2 graus de llibertat.
- **nmin: 3**
Permet poder explorar els mecanismes més senzills amb 2 barres, el terra i dues o tres articulacions.

- **nmax: 11**
Nombre prou alt perquè la quantitat màxima de sòlids vingui determinada pel nombre d'enllaços. Per aclarir-ho, cada cos necessita contactar amb mínim una articulació i cada articulació pot contactar amb un màxim de dos sòlids. Per tant, s'ha limitat el nombre de sòlids indirectament limitant el nombre d'articulacions.
- **plo: 2**
S'ha establert en 2 per explorar tots els mecanismes possibles.
- **pup: 8**
Es considera aquest valor tenint en compte que cada articulació implica més pes i un augment en la complexitat dels controladors.
- **pu1: 7**
D'aquesta manera es poden generar mecanismes amb tots els seus enllaços idèntics i les possibles combinacions.
- **pu2: 7**
D'aquesta manera es poden generar mecanismes amb tots els seus enllaços idèntics i les possibles combinacions.
- **pu3: 3**
Els enllaços de tres graus de llibertat acostumen a ser passius o són molt complicats de controlar amb un únic motor. Per aquest motiu, s'ha establert el nombre màxim en 3 per a tot el mecanisme.

Els resultats aconseguits un cop executat el codi són els següents:

[[2, 3, 0, 1, 2], [2, 3, 0, 2, 1], [2, 3, 0, 3, 0], [2, 3, 1, 0, 2], [2, 3, 1, 1, 1], [2, 3, 2, 0, 0], [2, 4, 0, 2, 3], [2, 4, 0, 3, 2], [2, 4, 0, 4, 0], [2, 4, 1, 1, 3], [2, 4, 1, 2, 1], [2, 4, 1, 3, 0], [2, 4, 2, 0, 2], [2, 4, 2, 1, 1], [2, 4, 2, 2, 0], [2, 4, 3, 0, 1], [2, 5, 0, 4, 2], [2, 5, 0, 5, 1], [2, 5, 0, 6, 0], [2, 5, 1, 2, 3], [2, 5, 1, 3, 2], [2, 5, 1, 4, 1], [2, 5, 2, 1, 3], [2, 5, 2, 2, 2], [2, 5, 2, 3, 0], [2, 5, 3, 0, 3], [2, 5, 3, 1, 1], [2, 5, 3, 2, 0], [2, 5, 4, 0, 1], [2, 5, 4, 1, 0], [2, 6, 0, 5, 3], [2, 6, 0, 6, 2], [2, 6, 0, 7, 0], [2, 6, 1, 4, 3], [2, 6, 1, 5, 1], [2, 6, 1, 6, 0], [2, 6, 2, 3, 2], [2, 6, 2, 4, 1], [2, 6, 2, 5, 0], [2, 6, 3, 1, 3], [2, 6, 3, 2, 2], [2, 6, 3, 3, 1], [2, 6, 4, 0, 3], [2, 6, 4, 1, 2], [2, 6, 4, 2, 0], [2, 6, 5, 0, 1], [2, 6, 5, 1, 0], [2, 6, 6, 0, 0], [2, 7, 2, 6, 0], [2, 7, 3, 4, 1], [2, 7, 3, 5, 0], [2, 7, 4, 2, 2], [2, 7, 4, 3, 1], [2, 7, 4, 4, 0], [2, 7, 5, 0, 3], [2, 7, 5, 1, 2], [2, 7, 5, 2, 1], [2, 7, 6, 0, 2], [2, 7, 6, 1, 0], [2, 7, 7, 0, 0]]

*Marcats en **negreta**, els mecanismes estudiats a l'apartat 4.3.4. Marcats en blau, els mecanismes estudiats a l'annex 4.1.

4.4.3. Resultats obtinguts amb 3 graus de llibertat:

L'elecció de les diferents variables s'ha pres en conseqüència als mecanismes que es pretenen obtenir. Respecte a la iteració del codi amb 2 graus de llibertat (apartat 4.4.2.) només s'ha variat la variable "M" per tant, només s'explica el raonament d'aquesta.

El valor de les variables i el raonament ha estat el següent:



- **M: 3**
Es pretenen estudiar els mecanismes amb 3 graus de llibertat.
- **nmin: 3**
- **nmax: 11**
- **plo: 2**
- **pup: 8**
- **pu1: 7**
- **pu2: 7**
- **pu3: 3**

Els resultats aconseguits un cop executat el codi són els següents:

[[**3, 3, 0, 0, 3**], [3, 3, 0, 1, 2], [3, 3, 0, 2, 1], [3, 3, 1, 0, 2], [3, 3, 1, 1, 0], [3, 3, 2, 0, 0], [3, 4, 0, 2, 3], [3, 4, 0, 3, 1], [3, 4, 0, 4, 0], [3, 4, 1, 1, 2], [3, 4, 1, 2, 1], [3, 4, 1, 3, 0], [3, 4, 2, 0, 2], [3, 4, 2, 1, 1], [3, 4, 3, 0, 0], [3, 5, 0, 3, 3], [3, 5, 0, 4, 2], [3, 5, 0, 5, 1], [3, 5, 1, 2, 3], [3, 5, 1, 3, 2], [3, 5, 1, 4, 0], [3, 5, 2, 1, 3], [3, 5, 2, 2, 1], [3, 5, 2, 3, 0], **[3, 5, 3, 0, 2]**, [3, 5, 3, 1, 1], [3, 5, 3, 2, 0], [3, 5, 4, 0, 1], [3, 6, 0, 5, 3], [3, 6, 0, 6, 1], [3, 6, 0, 7, 0], [3, 6, 1, 4, 2], [3, 6, 1, 5, 1], [3, 6, 1, 6, 0], [3, 6, 2, 2, 3], [3, 6, 2, 3, 2], [3, 6, 2, 4, 1], [3, 6, 3, 1, 3], [3, 6, 3, 2, 2], **[3, 6, 3, 3, 0]**, [3, 6, 4, 0, 3], **[3, 6, 4, 1, 1]**, [3, 6, 4, 2, 0], [3, 6, 5, 0, 1], [3, 6, 5, 1, 0], [3, 7, 1, 7, 0], [3, 7, 2, 5, 1], [3, 7, 2, 6, 0], [3, 7, 3, 3, 2], [3, 7, 3, 4, 1], [3, 7, 3, 5, 0], [3, 7, 4, 1, 3], [3, 7, 4, 2, 2], [3, 7, 4, 3, 1], [3, 7, 5, 0, 3], [3, 7, 5, 1, 2], [3, 7, 5, 2, 0], [3, 7, 6, 0, 1], [3, 7, 6, 1, 0], [3, 7, 7, 0, 0], [3, 8, 7, 1, 0]]

*Marcats en **negreta**, els mecanismes representats a l'apartat 4.3.4. Marcats en blau, els mecanismes representats a l'annex 4.

4.4.4. Mecanismes estudiats mitjançant teoria de grafs

Inicialment, per visualitzar els mecanismes obtinguts i estudiar algunes de les possibles opcions, s'ha escollit a l'atzar una mostra de resultats i s'han estudiat. L'estudi s'adjunta a l'annex 4.

Cal destacar, que a l'annex 4, apareixen mecanismes que no figuren a l'apartat 4.4. perquè s'han realitzat iteracions del codi amb diferents restriccions.

Un cop estudiats alguns resultats, com que la quantitat de mecanismes obtinguts és molt nombrosa, s'han establert uns criteris per fer un cribratge. Els criteris han estat els següents:

- Les potes del mecanisme han de ser simètriques. Aquesta restricció facilitarà el control, fabricació i assemblatge.
- No pot tenir més de 3 enllaços de 3 graus de llibertat. Els enllaços que permeten 3 graus de llibertat són molt difícils de controlar i acostumen a ser passius. Una quantitat molt elevada fa que el mecanisme no es pugui orientar a voluntat.

- A terra (cos del robot) només s'ubicaran enllaços d'1 sol grau de llibertat. Aquesta restricció facilita el control i la fabricació del mecanisme. Els enllaços d'1 sol grau de llibertat es poden acoblar directament a un motor o pistó. D'aquesta manera, s'aconsegueix una pota més senzilla de controlar i es poden ubicar els actuadors a la bancada.

Finalment, s'han adjuntat els grafs i les representacions esquemàtiques més significatives que compleixin les restriccions. Com s'ha comentat anteriorment, la classificació segueix la forma $[M,n,p1,p2,p3,L]$:

[1,2,1,0,0,0]

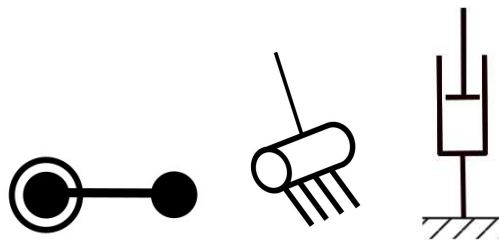


Figura 4.8. Graf / Subclasse 1 / Subclasse 2.

[2,6,4,2,0,1]

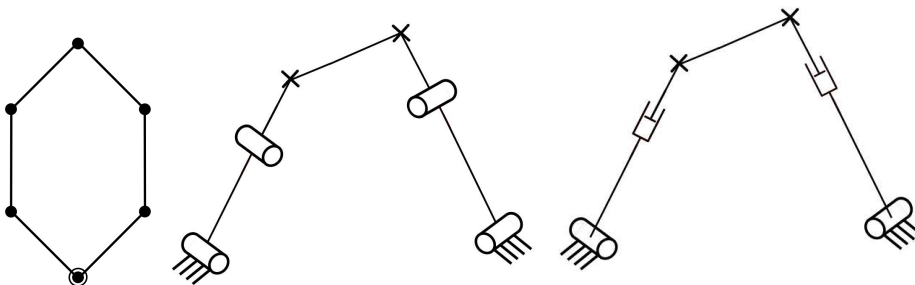


Figura 4.9. Graf / Subclasse 1 / Subclasse 2.

[3,8,3,6,0,2]

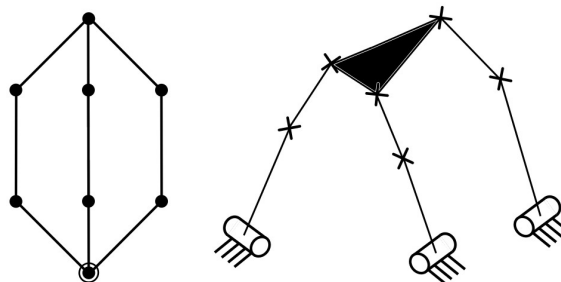


Figura 4.10. Graf / Subclasse 1.

[3,8,6,0,3,2]

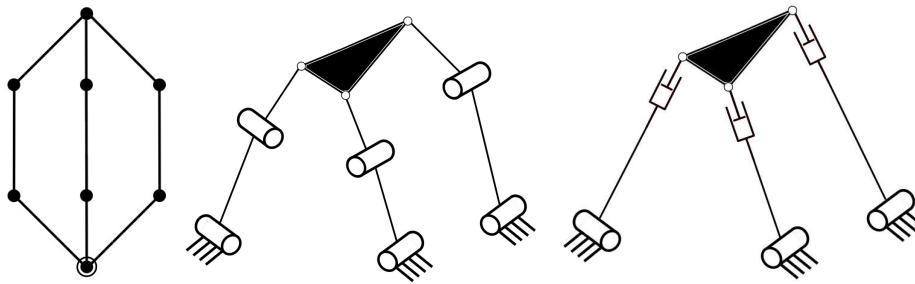


Figura 4.11. Graf / Subclasse 1 / Subclasse 2.

4.5. Mecanisme seleccionat

En aquest treball, es busca establir un mètode general per visualitzar d'una manera fàcil tots els mecanismes per fer possible una trajectòria. Un cop contemplats els mecanismes vàlids, cal escollir-ne alguns per fer l'estudi cinemàtic.

Per simplificar el projecte, s'ha escollit i estudiat en profunditat únicament un candidat. Cal destacar, que l'estudi cinemàtic es podria fer per la resta de mecanismes fins a trobar aquell que s'adapti millor als requisits establerts.

El mecanisme escollit per estudiar en profunditat és la unió de dos mecanismes. Aquesta elecció, ens permet donar llibertat a la pota per allunyar-se del terra i sortejar obstacles amb facilitat, mentre que es proporciona estabilitat.

Visualitzant els mecanismes mitjançant la teoria de grafes descrita en l'apartat 4.3, s'ha escollit el mecanisme 2-UPR (de la classe [2,6,4,2,0,1] com a mecanisme base paral·lel) en conjunt amb l'1-R (de la classe [1,2,1,0,0,0] com a mecanisme complementari) per fer l'estudi cinemàtic.

El 2-UPR (presentat a la figura 4.12) es tracta d'un mecanisme simètric i senzill però que al mateix temps compta amb 6 sòlids i 6 enllaços que proporcionarà una base estable i dos graus de llibertat. Se l'anomena mecanisme base.

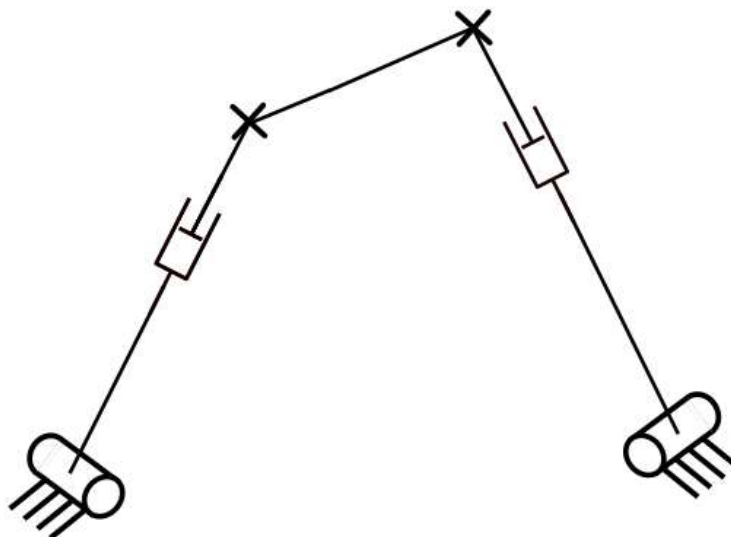


Figura 4.12. Mecanisme base escollit. Forma part de la classe [2,6,4,2,0,1].

L'1-R (presentat a la figura 4.13) es tracta d'un mecanisme format únicament per un enllaç de revolució. Proporcionarà el tercer grau de llibertat i la possibilitat d'allunyar la pota del terra per superar obstacles. Se l'anomena mecanisme complementari.



Figura 4.13. Mecanisme complementari escollit. Forma part de la classe [1,2,1,0,0,0].

La unió dels dos mecanismes es presenta a la figura 4.14 mostrada a continuació:

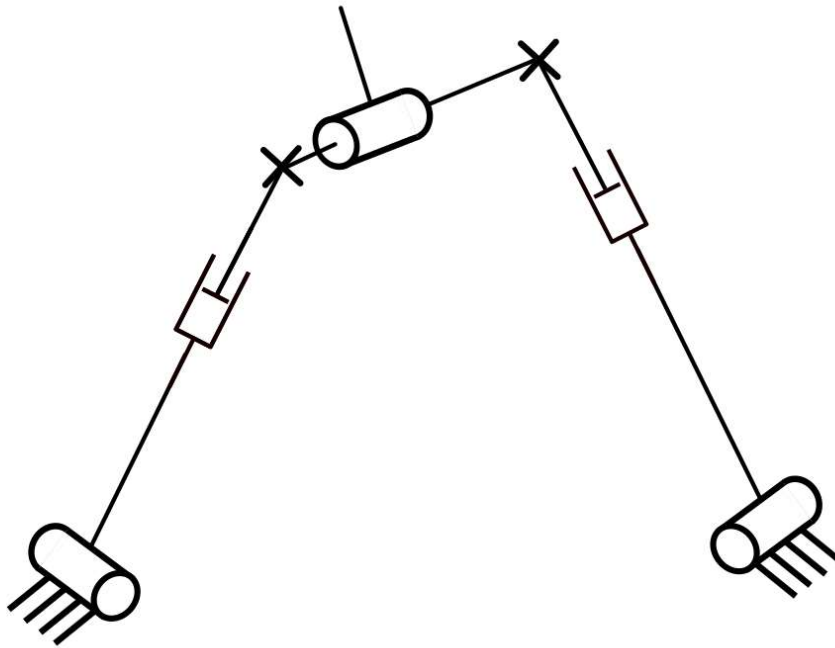


Figura 4.14. Mecanisme global escollit per fer l'estudi cinemàtic.

Les propietats més destacables d'aquest mecanisme són que és simètric i senzill.

Al ser simètric, permet reduir la complexitat i els costos en la seva fabricació. També afavoreix la simplicitat del disseny mecànic i del programari de control.

Un altre aspecte interessant d'aquesta elecció, és que es pot reduir la massa en moviment en oferir la possibilitat de col·locar els motors i actuadors al cos del robot ("terra"). D'aquesta manera el mecanisme a moure és més lleuger, àgil i eficient.

Cal destacar, que l'actuador del tercer grau de llibertat ubicat al mecanisme 1-R, pot estar situat al cos del robot i traslladar el moviment mitjançant una cadena cinemàtica complementària.

Finalment, es poden col·locar tant pistons hidràulics com motors, depenent de la càrrega i precisió que es desitgi.

5. Estudi cinemàtic

Un cop seleccionat el mecanisme o combinacions de mecanismes, s'ha realitzat un estudi cinemàtic mitjançant el programa MATLAB 2023a i anells vectorials per determinar les posicions, longituds i distàncies dels diferents elements.

Per simplificar els càlculs i reduir el temps en simulacions, tant la parametrització com l'estudi cinemàtic s'han fet individualment per cada tram del mecanisme conjunt.

5.1. Parametrització del mecanisme global

Primerament, ha calgut determinar quines són les variables, vectors i equacions que modelen el comportament del mecanisme.

El mecanisme base és un mecanisme paral·lel format per dues branques simètriques que connecten la base, en aquest cas fixa al cos del robot, amb la plataforma mòbil, que es connectarà a l'element final de la pota o mecanisme complementari.

Per tant, el mecanisme base s'ha dividit en dos i parametritzat per separat. Les diferents parametritzacions s'han fet mitjançant vectors, constants i canvis de referència.

A continuació, s'adjunten les figures 5.4 i 5.6 on es poden veure les diferents variables i la seva interacció entre l'origen i el punt de la trajectòria complementària i final.

5.1.1. Mecanisme base

Primerament, a la figura 5.1 s'exposa l'esquema del mecanisme base 2-UPR format per dues unions de revolució (R_1 i R_2), dos pistons (T_1 i T_2) i dues unions universals (U_1 i U_2). Aquest esquema, posteriorment s'ha parametritzat. També es pot apreciar el punt de la trajectòria complementària on es vol arribar P_i .

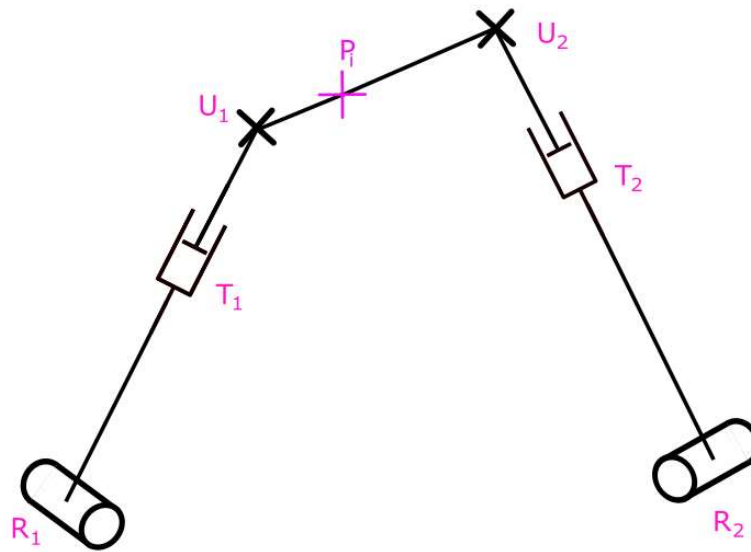


Figura 5.1. Esquema bàsic del mecanisme base.

5.1.2. Pota 1 del mecanisme base parametritzat

Les variables utilitzades han estat:

- \mathbf{C}_1 : Vector que ubica el punt Q_1 de l'eix de l'enllaç R_1 . És perpendicular a l'eix de l'enllaç R_1 des de l'origen de coordenades.
- \mathbf{S}_1 : Vector unitari que marca la direcció de l'eix de l'enllaç R_1 .
- \mathbf{k}_1 : Constant que situa el punt d'intersecció entre l'eix de l'enllaç R_1 i la direcció de l'enllaç T_1 .
- \mathbf{d}_1 : Vector que va des de la posició final fins al punt d'intersecció de l'enllaç universal U_1 . Expressat en els eixos locals de la posició P_i .
- t_{1i} : Constant que descriu el valor, en magnitud, que pren el pistó T_1 , per a cada posició, al llarg de la seva direcció.
- ϕ_{1i} : Angle que descriu l'orientació de l'enllaç T_1 a partir dels eixos locals (x_{r1} , y_{r1} , z_{r1}).
- P_i : Punt de la trajectòria que es vol seguir.

Per entendre millor la descripció s'adjunta la figura 5.2.

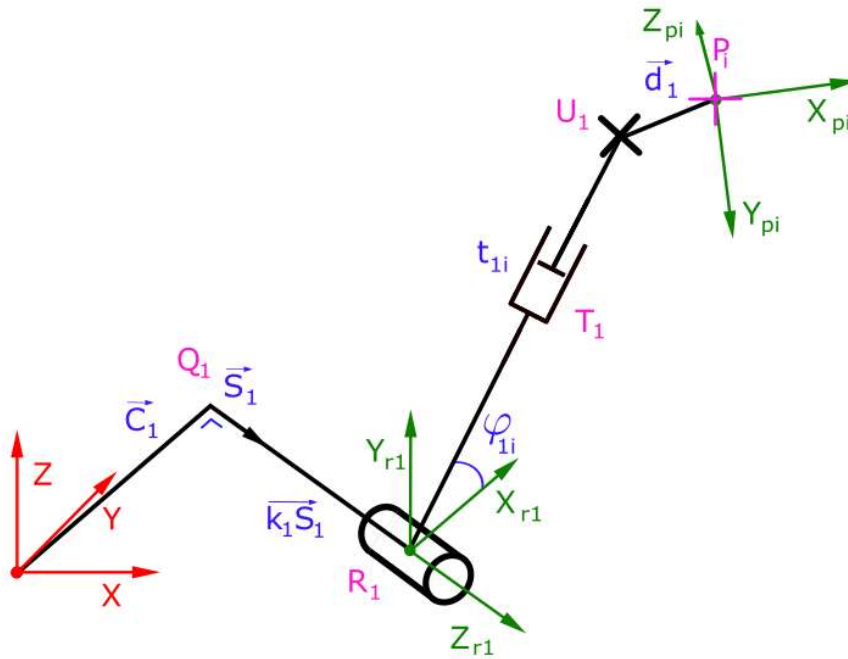


Figura 5.2. Esquema parametritzat de la pota 1 del mecanisme base.

També s'han construït dues referències locals:

- Uns eixos de referència locals al punt d'intersecció dels enllaços R_1 i T_1 i, amb la direcció Z al llarg de l'eix de l'enllaç R_1 . Utilitzats per orientar la direcció de T_1 fent servir l'angle φ_{1i} .
- Uns eixos de referència locals a P_i .

5.1.3. Pota 2 del mecanisme base parametritzat

Les variables utilitzades han estat:

- C_2 : Vector que ubica el punt Q_2 de l'eix de l'enllaç R_2 . És perpendicular a l'eix de l'enllaç R_2 des de l'origen de coordenades.
- S_2 : Vector unitari que marca la direcció de l'eix de l'enllaç R_2 .
- k_2 : Constant que situa el punt d'intersecció entre l'eix de l'enllaç R_2 i la direcció de l'enllaç T_2 .
- d_2 : Vector que va des de la posició final fins al punt d'intersecció de l'enllaç universal U_2 . Expressat en els eixos locals de la posició P_i .
- t_{2i} : Constant que descriu el valor, en magnitud, que pren el pistó T_2 , per a cada posició, al llarg de la seva direcció.
- φ_{2i} : Angle que descriu l'orientació de l'enllaç T_2 a partir dels eixos locals (x_{r2} , y_{r2} , z_{r2}).
- P_i : Punt de la trajectòria que es vol seguir.

Per entendre millor la descripció s'adjunta la figura 5.3.

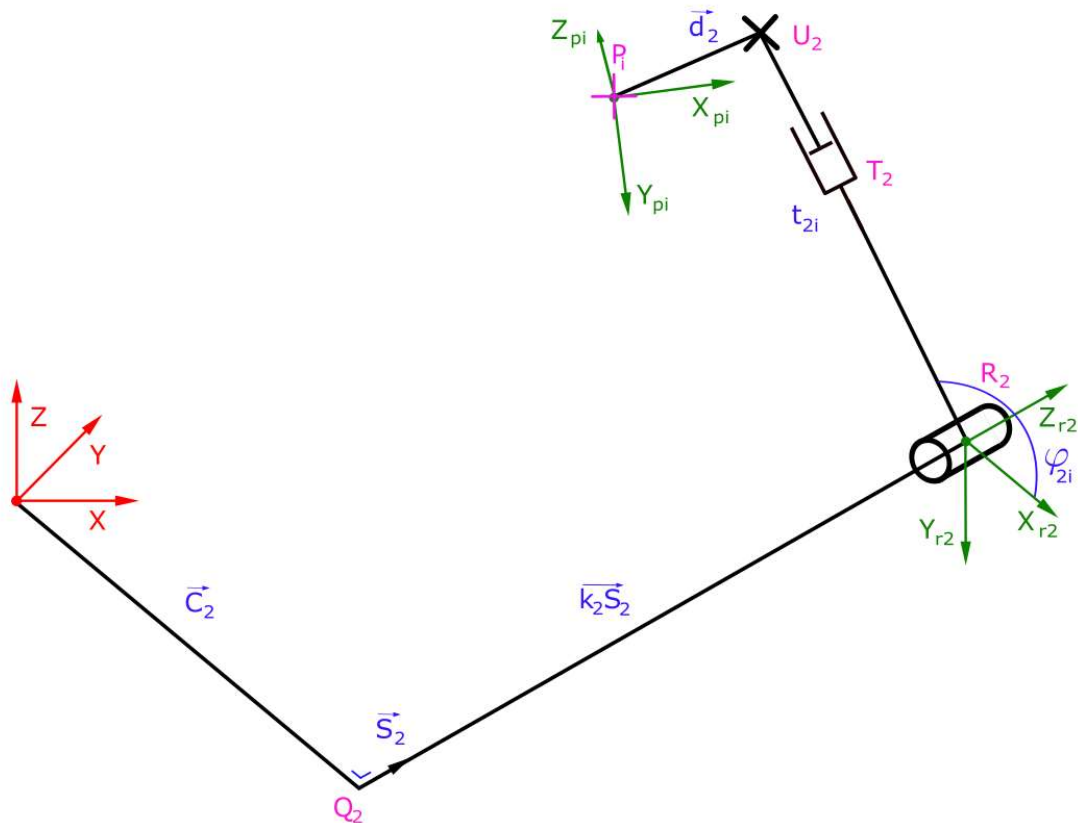


Figura 5.3. Esquema parametritzat de la pota 2 del mecanisme base.

També s'han construït dues referències locals:

- Uns eixos de referència locals al punt d'intersecció dels enllaços R_2 i T_2 , amb la direcció Z al llarg de l'eix de l'enllaç R_2 . Utilitzats per orientar la direcció de T_2 fent servir l'angle φ_{2i} .
- Uns eixos de referència locals a P_i .

5.1.4. Mecanisme base complet parametritzat

Finalment, la representació del mecanisme base complet parametritzat és la següent:

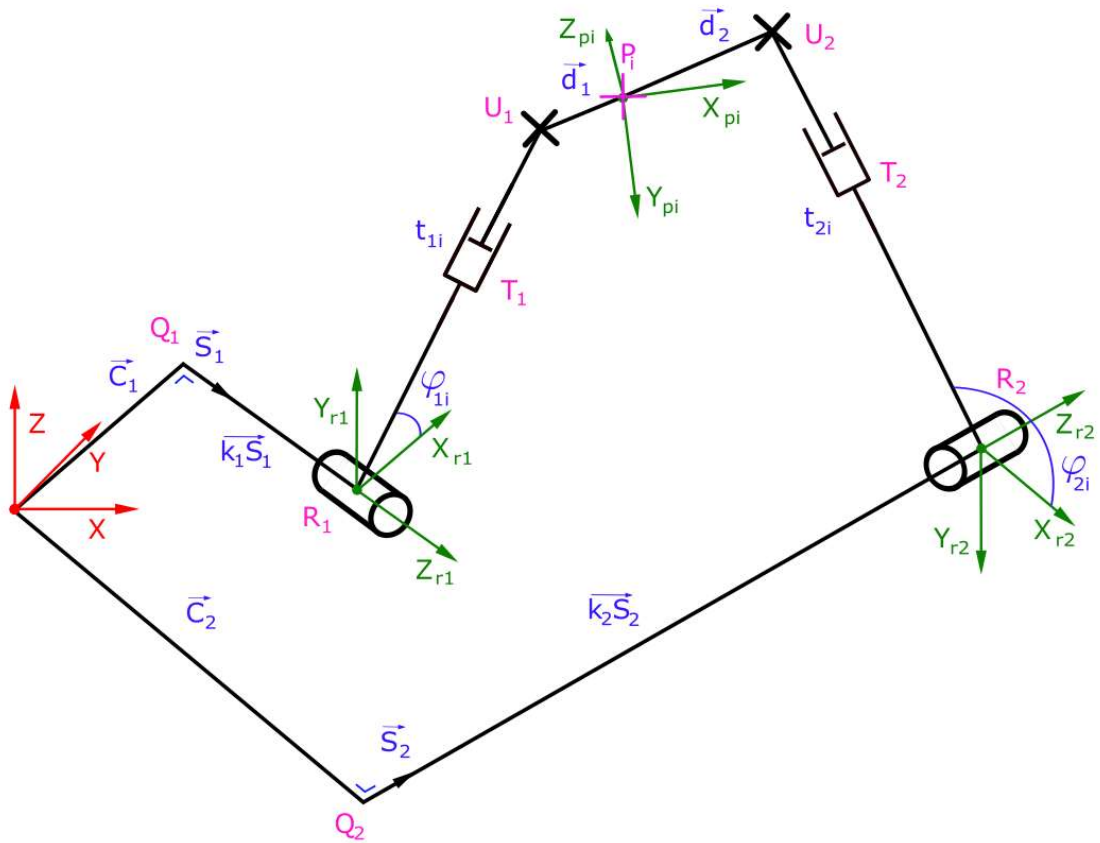


Figura 5.4. Esquema parametritzat del mecanisme base.

5.1.5. Mecanisme complementari

A continuació, a la figura 5.5, s'exposa l'esquema del mecanisme complementari 1-R format únicament per un enllaç de revolució (R_3), posteriorment s'ha parametritzat.

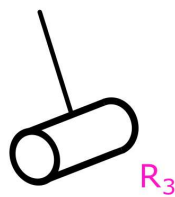


Figura 5.5. Esquema bàsic del mecanisme complementari.

5.1.6. Mecanisme complementari parametritzat

A continuació, es presenta el mecanisme complementari parametritzat:

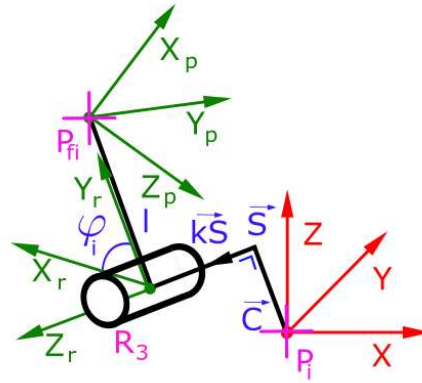


Figura 5.6. Esquema parametritzat del mecanisme complementari.

S'ha afegit el punt on el mecanisme base col·locarà el mecanisme complementari (P_i) i el punt de la trajectòria final on tot el conjunt de mecanismes ha d'arribar (P_f).

5.2. Estudi cinemàtic del mecanisme base

Per estudiar la cinemàtica del mecanisme, s'han elaborat unes equacions que modelen l'anell vectorial que segueix el mecanisme. Des de l'origen de coordenades fins al punt de la trajectòria.

A continuació es presenten les equacions que s'han utilitzat per fer l'estudi cinemàtic del mecanisme base:

$$\vec{C} + k \cdot \vec{S} + [T] \cdot \begin{bmatrix} t(i) \cdot \cos(\varphi(i)) \\ t(i) \cdot \sin(\varphi(i)) \\ 0 \end{bmatrix} = [R] \cdot \vec{d}$$

Eq. 5.1. Equació per estudiar la cinemàtica d'una pota per separat. L'índex "i" fa referència a cada una de les posicions a assolir.

$$\begin{aligned} & \vec{C}_1 + k_1 \cdot \vec{S}_1 + [T_1] \cdot \begin{bmatrix} t_1(i) \cdot \cos(\varphi_1(i)) \\ t_1(i) \cdot \sin(\varphi_1(i)) \\ 0 \end{bmatrix} - [R] \cdot \vec{d}_1 \\ & = \vec{C}_2 + k_2 \cdot \vec{S}_2 + [T_2] \cdot \begin{bmatrix} t_2(i) \cdot \cos(\varphi_2(i)) \\ t_2(i) \cdot \sin(\varphi_2(i)) \\ 0 \end{bmatrix} - [R] \cdot \vec{d}_2 \end{aligned}$$

Eq. 5.2. Equació per estudiar la cinemàtica del mecanisme base sencer. L'índex "i" fa referència a cada una de les posicions a assolir.

Per entendre millor com modela el mecanisme es pot veure la figura 5.4.

Per fer tots els càlculs de l'estudi cinemàtic s'ha utilitzat el programa MATLAB. S'ha creat un codi per definir de manera iterativa les diferents variables del sistema fins a trobar la configuració òptima per resseguir la trajectòria.

5.2.1. Detall de l'estudi cinemàtic de les potes individualment

A continuació, s'explica pas a pas el funcionament del codi utilitzat per estudiar la cinemàtica del mecanisme base. El codi s'adjunta a l'annex 2.5.

5.2.1.1. Posicions de la trajectòria i Triedre de Frênet

Per iniciar el codi, s'han introduït les posicions de la trajectòria que es vol seguir. S'ha utilitzat un nombre significatiu de punts prou gran per poder definir totes les incògnites del sistema.

Les posicions de la trajectòria formen un vector columna de tres columnes i "n" files. Cada columna s'empra per una coordenada "X", "Y" i "Z" de l'espai, i cada fila per una posició.

Els punts utilitzats han estat extrets de la trajectòria complementària detallada a l'apartat 3.6. Corresponen al moviment del turmell del gos. A continuació s'adjunta la matriu que es forma en format MATLAB (Eq. 5.3).

$$\begin{bmatrix} \text{Posició 1 component X,} & \text{Posició 1 component Y,} & \text{Posició 1 component Z,} \\ \text{Posició 2 component X,} & \text{Posició 2 component Y,} & \text{Posició 2 component Z;} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Posició n component X,} & \text{Posició n component Y,} & \text{Posició n component Z]} \end{bmatrix}$$

Eq. 5.3. Matriu de posicions en format MATLAB.

A continuació, s'ha utilitzat el Triedre de Frênet per generar uns eixos locals a cada punt de la trajectòria.

Com explica el professor [Del Pino], el Triedre de Frênet s'utilitza quan es volen obtenir vectors significatius com el tangent o la curvatura. Es tracta d'uns eixos de coordenades locals que es poden definir a les corbes i tenen en compte la seva geometria diferencial.

A continuació, a la figura 5.7, es mostra una imatge genèrica d'exemple d'una corba amb els vectors tangents i normals en dos punts diferents:

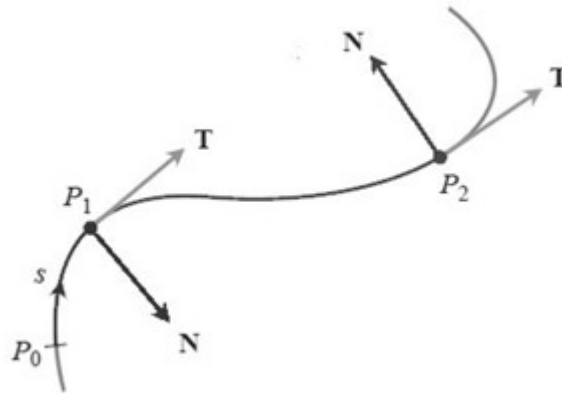


Figura 5.7. Vectors tangent i normal a la corba en els punts P1 i P2. [Del Pino]

Gràcies a aquests vectors, es coneix per on s'acosta el mecanisme a cada una de les posicions donades. Es tracta d'una informació molt útil per poder fer en un futur un estudi cinemàtic de tot el conjunt.

En el nostre cas en particular, per a cada punt, el triedre de Frénet es defineix sent l'eix "X" la tangent, l'eix "Y" la normal que apunta cap al centre de curvatura, i l'eix "Z" la binormal, és a dir, la perpendicular al pla que formen els altres dos eixos.

D'aquesta manera, el vector tangent s'ha calculat com el vector unitari entre el punt actual (P_i) i el següent (P_{i+1}), i el vector normal a la corba, s'ha calculat com el producte vectorial entre el vector tangent unitari i el vector unitari que va entre el punt actual (P_i) i l'anterior (P_{i-1}). S'adjunta l'equació pertinent (Eq. 5.4):

$$z_i = (P_i - P_{i-1}) \times (P_{i+1} - P_i)$$

Eq. 5.4. Càlcul del vector normal a la corba. L'índex "i" fa referència a cada una de les posicions a assolir.

En MATLAB (Eq. 5.5):

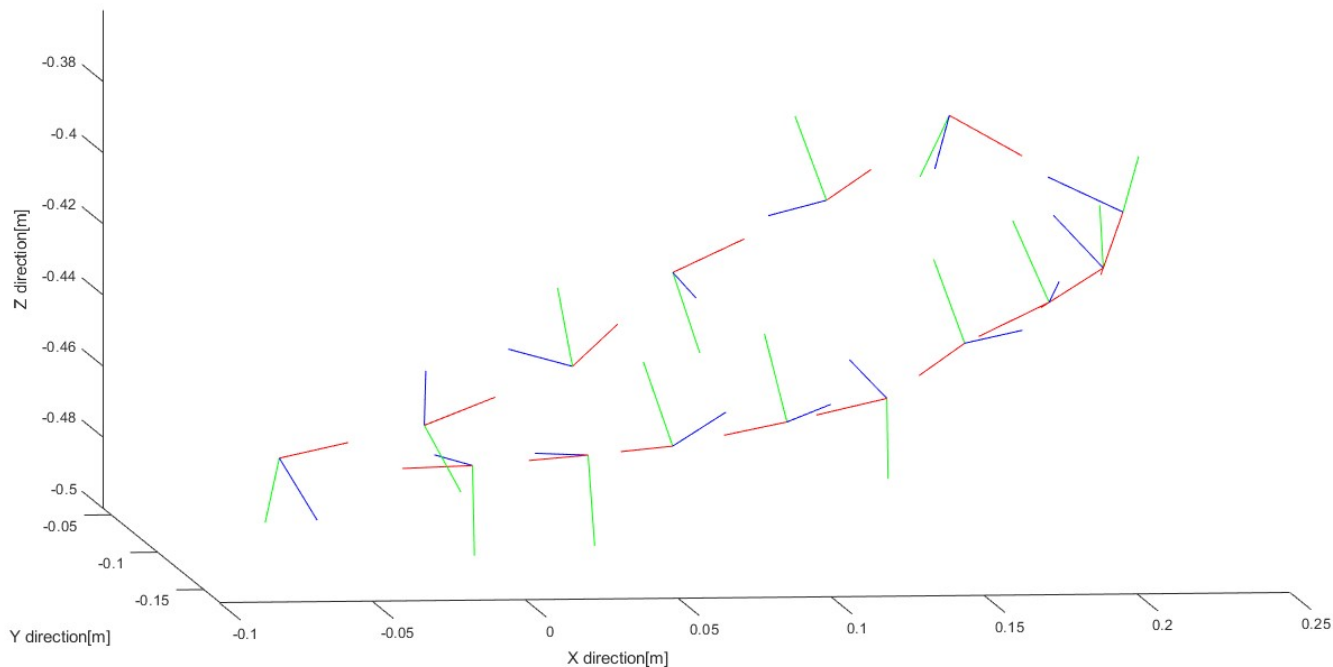
$$z_i = \text{cross}((p_i - p_{i-1}), (p_{i+1} - p_i)) / \text{norm}(\text{cross}((p_i - p_{i-1}), (p_{i+1} - p_i)));$$

Eq. 5.5. Càlcul del vector normal a la corba en MATLAB.

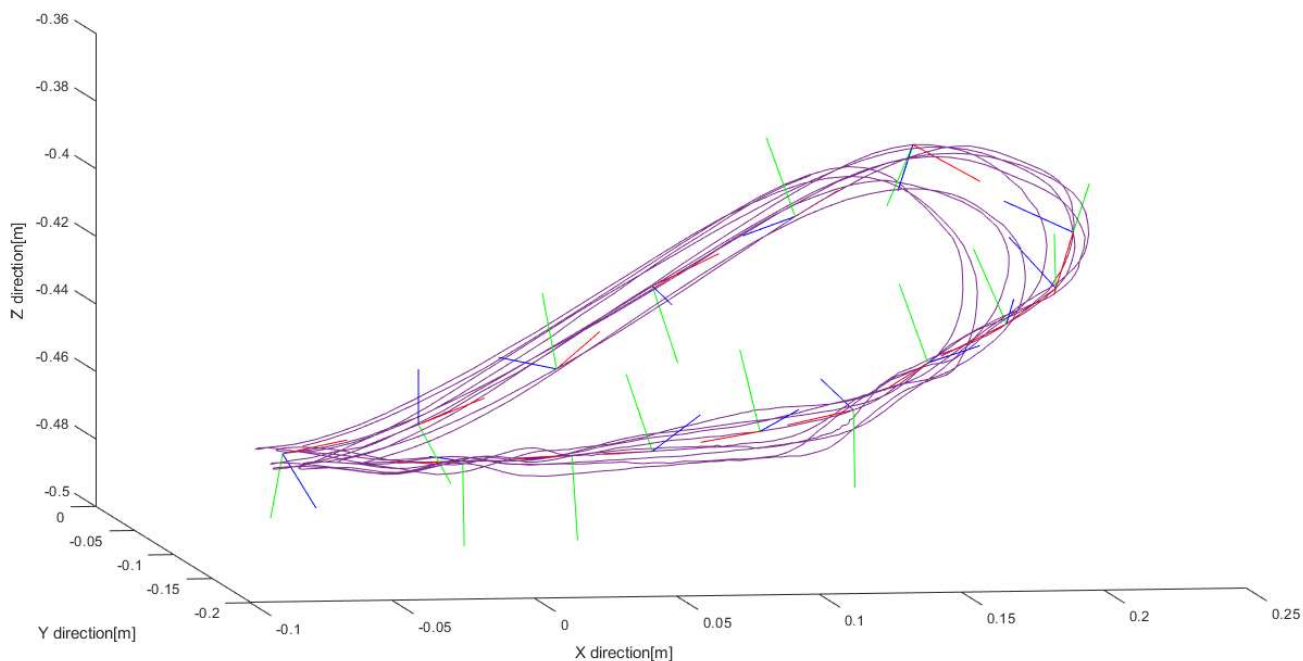
Finalment, es calcula un vector normal als dos anteriors.

Per tant, en el cas pràctic, s'ha definit un pla local on se situa la corba i s'ha calculat primer el vector binormal abans de calcular el normal. Per aquest motiu, la direcció del vector normal, pot no coincidir amb el centre de curvatura, però, en aquesta aplicació no perjudica la solució.

D'aquesta manera s'han obtingut uns eixos locals a cada punt de la trajectòria. S'adjunta la gràfica 5.1 on es poden apreciar els eixos a cada punt i la gràfica 5.2 on es veuen els eixos juntament amb la trajectòria. El codi emprat exclusivament per la representació s'adjunta a l'annex 2.6.



Gràfica 5.1. Punts de la trajectòria del turmell amb eixos locals a cada punt.



Gràfica 5.2. Punts de la trajectòria del turmell amb eixos locals a cada punt superposats amb la trajectòria.

En vermell està marcat l'eix tangent a la trajectòria, en blau l'eix normal a la curvatura i en verd l'eix perpendicular als dos anteriors. Cal destacar que, en tractar-se d'una trajectòria amb multitud de curvatures locals i en 3 dimensions, la normal a la curvatura, pot trobar-se localment apuntant fora de la trajectòria o en la direcció global "Y".

5.2.1.2. Inicialització de les variables

El programa realitza moltes iteracions variant els valors inicials fins a trobar l'òptim local. Però, per poder iniciar-se per primer cop, necessita que se li proporcionin un valor inicial a cada variable.

Les variables inicials s'han anat canviant per orientar el codi cap a algun òptim. S'ha executat dues vegades amb variables inicials diferents per obtenir les dues potes simètriques del mecanisme. Més endavant a la memòria, a l'apartat 5.2.2, es presenten els valors utilitzats. Les variables a inicialitzar són les següents:

Cx0; Cy0; Cz0; k0; Sx0; Sy0; Sz0; dx0; dy0; dz0; t0; phi0;

Tant les variables "t0" i "phi0" són una matriu d'una columna i tantes files com posicions de la trajectòria. D'aquesta manera hi ha un valor de "t" i "phi" per cada posició.

A continuació es col·loquen totes les variables en una sola matriu:

$$\text{initval} = [\text{Cx0}; \text{Cy0}; \text{Cz0}; \text{k0}; \text{Sx0}; \text{Sy0}; \text{Sz0}; \text{dx0}; \text{dy0}; \text{dz0}; \text{t0}; \text{phi0}];$$

Eq. 5.6. Matriu de variables inicials en format MATLAB.

5.2.1.3. Definició de les opcions del "solver"

En aquest codi s'ha utilitzat la funció "fmincon" (detallada més endavant, apartat 5.2.1.6.) per optimitzar de manera no lineal. Aquesta funció és pròpia de MATLAB i permet aplicar paràmetres i posar restriccions.

Les opcions pel "solver" que s'han imposat són les següents:

- Algoritme d'optimització: S'ha utilitzat el mètode de punts interiors o "interior-point". Es tracta d'un mètode d'optimització que permet a la funció treballar únicament en l'interior de l'espai restringit pels límits superiors i inferiors donats a les variables.
- Comprovació dels gradients: Apareix al codi com a "CheckGradients", s'ha establert amb el valor "true". Durant l'optimització, la funció busca minimitzar o maximitzar una funció objectiu ajustant les variables d'entrada. Una manera de fer-ho és mitjançant gradients. Els gradients de la funció són les direccions en què aquesta creix de manera més ràpida. L'algoritme calcularà els gradients

numèricament utilitzant petits increments en les variables i després els compararà. Si es busca minimitzar la funció objectiu, modificarà les variables en sentit oposat al gradient. Activar aquesta opció permet detectar errors en la implementació de la funció objectiu i les restriccions.

- **Tolerància de la funció**: S'ha establert en 0,1. L'algoritme acabarà quan el canvi en la funció objectiu sigui menor que 0,1.
- **Tolerància de pas**: S'estableix en 1×10^{-10} la tolerància de pas. Aquest valor fa referència a la magnitud en què canvien les variables d'optimització en cada iteració de l'algoritme. Si s'estableix un valor molt gran, l'algoritme convergeix més ràpidament. Valors petits garanteixen major precisió. En efectes, l'algoritme entén que ha arribat a una solució, si el pas és menor que aquest valor.
- **"FinDiffType"**: Fa referència al tipus de diferències finites utilitzades en l'optimització. Podria prendre el valor de: "forward", "backward" i "central". S'ha escollit "central" perquè pren valors "endavant" i "enrere" del punt actual i proporciona resultats més precisos.
- **"DiffMinChange"**: Representa el valor mínim per canviar les diferències finites. S'ha establert en 0.0001 per garantir la precisió dels resultats.
- **"options.MaxIterations"**: Estableix el nombre màxim d'iteracions per l'algoritme d'optimització per cada iteració de les variables inicials. Pren el valor de 1000.
- **"options.MaxFunctionEvaluations"**: Estableix el nombre màxim d'avaluacions de la funció objectiu a cada iteració de l'algoritme d'optimització. Pren el valor de 1000.
- **"maxIter"**: Fa referència al nombre màxim d'iteracions que s'executa el codi. Aquest valor es va variant per obtenir diferents resultats o valors més precisos. S'ha variat entre 100, 1.000, 5.000, 10.000 i 50.000, depenent de la qualitat dels resultats obtinguts i dels valors inicials introduïts.

5.2.1.4. Restriccions aplicades a les variables

Les variables inicials van canviant aleatòriament a cada iteració. Aquesta variabilitat s'explica en l'apartat 5.2.1.7. Al variar, poden prendre valors no desitjables com poden ser distàncies negatives o massa grans per un robot quadrúpede. Per tant, cal aplicar unes restriccions.

Les restriccions inferiors i superiors o "bounds" de les variables han estat les següents (Taula 5.1):

Variable	Valor mínim [mm]	Valor màxim [mm]
c	[-200, -200, -200]	[200, 200, 200]
k	0	1000
S	[-1, -1, -1]	[1, 1, 1]
d	[-200, -200, -200]	[200, 200, 200]
t	0	500
φ	-pi	pi

Taula 5.1. Restriccions aplicades a les diferents variables.

5.2.1.5. Restriccions no lineals

A continuació, el codi ofereix la possibilitat d'introduir restriccions no lineals dins les matrius "A", "b", "Aeq" i "beq". En aquest problema en particular no cal afegir-ne cap i s'han deixat en blanc.

5.2.1.6. Execució de funcions

Un cop creades les restriccions, s'inicia l'execució de les diferents funcions.

Per cada iteració del codi, s'executen les funcions "FKequations", "UPRcon" i "fmincon". Les dues primeres generen resultats per "fmincon" i, aquesta última, busca el mínim d'una funció objectiu complint, al mateix temps, amb unes restriccions donades a l'apartat 5.2.1.5.2 per condicionar les variables.

5.2.1.6.1 "FKequations"

La funció principal de "FKequations" és calcular la distància acumulada entre les posicions de la trajectòria donada i els punts calculats segons les equacions que representen el mecanisme. Es tracta de la funció objectiu que es busca minimitzar.

La funció pren com arguments d'entrada:

- Les posicions de la trajectòria a seguir.
- Els eixos de la referència relativa generada a cada punt de la trajectòria a seguir.
- Les variables inicials de la iteració en la qual es troba el codi en aquell moment.

Primerament, la funció s'inicia extraient les variables del vector donat a l'entrada.

A continuació inicia un bucle per cada posició donada.

Dins d'aquest bucle, assegura la perpendicularitat entre els vectors "C" i "S" i genera una matriu anomenada "Ar" per orientar "t" mitjançant l'angle "φ" utilitzant uns eixos de referència locals. Es genera una matriu "Ar" per cada posició de la trajectòria mitjançant els vectors "C", "S" i el producte vectorial entre ells.

Cal destacar, que la segona matriu per crear una referència local que es necessita per orientar el vector "d", ve donada amb els arguments d'entrada anomenats "EixosPunts" creats anteriorment i detallats a l'apartat 5.2.1.1.

Finalment, calcula la distància entre les posicions donades com argument d'entrada i la posició real calculada mitjançant les equacions que modelen el mecanisme (presentades a l'inici de l'apartat 5.2.). Aquestes equacions, escrites per executar-se en MATLAB, són les següents:

$$\begin{aligned} & [Cx + k*Sx + Ar(1,:) * [t(i)*\cos(\phi(i)); t(i)*\sin(\phi(i)); 0] - EixosPuntsX(:,i)] * [dx; dy; dz], \\ & Cy + k*Sy + Ar(2,:) * [t(i)*\cos(\phi(i)); t(i)*\sin(\phi(i)); 0] - EixosPuntsY(:,i)] * [dx; dy; dz], \\ & Cz + k*Sz + Ar(3,:) * [t(i)*\cos(\phi(i)); t(i)*\sin(\phi(i)); 0] - EixosPuntsZ(:,i)] * [dx; dy; dz]; \end{aligned}$$

Eq. 5.7. Equacions que modelen el mecanisme en MATLAB.

L'equació 5.7 conta amb tres components, una per cada eix de coordenades globals. Per entendre millor com modela el mecanisme, es pot veure la figura 5.2.

Un cop executada, la funció retorna com a valor de sortida, la variable "dist". Aquesta variable recull la suma de totes les distàncies del punt final del mecanisme a les diferents posicions de la trajectòria. En altres paraules, recull l'error entre les posicions a les quals arriba el mecanisme amb les variables donades i les posicions on hauria d'arribar segons la trajectòria desitjada.

Aquesta distància "dist" és el que es pretén minimitzar mitjançant "fmincon".

5.2.1.6.2 "UPRcon"

La finalitat de la funció "UPRcon" és definir les restriccions del mecanisme base d'una sola pota (formada per una unió universal, un pistó i un enllaç de revolució) per poder fer una anàlisi posterior de la seva cinemàtica.

La funció pren com arguments d'entrada:

- Les posicions de la trajectòria a seguir.
- Les variables inicials de la iteració en la qual es troba el codi en aquell moment.

Primerament, igual que la funció “FKequations”, s’inicia extraient les variables del vector donat a l’entrada.

A continuació, genera dues variables noves:

- **“c”**: Una variable que s’utilitza per representar les restriccions de desigualtat. En aquest treball en particular no s’utilitza i es deixa buit.
- **“ceq”**: S’utilitza per definir les restriccions d’igualtat. Bàsicament, la funció “fmincon” buscarà igualar a 0 les restriccions que es col·loquin dins “ceq”. Les restriccions que s’han introduït pel mecanisme base són les següents:
 - S’ha forçat que el vector “S” sigui unitari perquè únicament defineix una direcció.
 - S’ha forçat que els vectors “C” i “S” siguin perpendiculars. D’aquesta manera es pot generar una referència relativa al punt “C+K·S” per definir les posicions de “t” i “φ”. (Si s’observa la figura 5.4 pot quedar més clar aquest concepte).

Finalment, aquesta funció no retorna res més que la creació d’aquestes dues variables per definir les restriccions.

5.2.1.6.3 “fmincon”

La funció interna de MATLAB “fmincon” és la funció principal del codi. Com s’ha comentat anteriorment, busca trobar el valor mínim per una funció objectiu mentre les variables d’entrada han de respectar unes restriccions donades.

La funció es crida al codi de MATLAB (afegit a l’annex 2.5) de la següent manera (Eq. 5.8):

```
[solution,objectiveValue,~,exitflag]=
fmincon(objfun,initval,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)
```

Eq. 5.8. Funció en MATLAB per cridar “fmincon”.

En tractar-se d’una funció interna, no es descriurà pas a pas el seu funcionament, únicament s’expliquen les entrades i les sortides.

La funció com a entrades d’informació té:

- **“objfun”**: Es tracta de la funció objectiu a minimitzar. En aquest cas en particular, es tracta de “FKequations” i es busca minimitzar el resultat d’aquesta.
- **“initval”**: Són els valors inicials de les variables per començar a optimitzar.
- **“A”, “b”, “Aeq” i “beq”**: Matrius per introduir les restriccions lineals. En aquest treball no s’utilitzen.

- **“lb”** i **“ub”**: Vectors que defineixen les restriccions aplicades als valors que poden prendre les variables.
- **“nonlcon”**: Es tracta de la funció que introdueix les restriccions no lineals. Anteriorment, s’ha descrit com **“UPRcon”** a l’apartat 5.2.1.6.2.
- **“options”**: Conjunt de paràmetres definits a l’apartat 5.2.1.3 que apliquen la configuració per fer l’optimització.

Un cop s’executa la funció, entrega les variables següents:

- **“solution”**: Es tracta del resultat de l’optimització, és a dir, el conjunt de variables que fan que la funció objectiu sigui mínima.
- **“objectiveValue”**: És el valor de la funció objectiu en la solució mínima trobada durant la iteració actual. En altres paraules, és l’error mínim de la distància entre les posicions de la trajectòria donada i les posicions on arriba el mecanisme. Sempre tenint en compte que s’ha calculat amb les variables donades en aquella iteració.
- **“~”**: Fa referència a valors en la sortida de la funció que s’ignoren perquè no són rellevants per l’objectiu del codi. En concret s’ignora la variable de sortida **“lambda”** que conté els multiplicadors de Lagrange associats a les restriccions lineals del problema d’optimització.
- **“exitflag”**: Es tracta d’un indicador que dona informació sobre l’estat en finalitzar l’optimització. Avisa si l’optimització s’ha finalitzat prematurament perquè les restriccions no s’han complert entre d’altres.

5.2.1.7. Modificació de les variables

Un cop executades les funcions, es modifiquen les variables per llançar la següent iteració amb valors inicials diferents. D’aquesta manera, es pot fer una escombrada per multitud de valors fins a trobar els que generen un resultat òptim.

Les variables inicials es modifiquen de dues maneres diferents depenent de la iteració on es trobi:

- Fins a la meitat de les iteracions, els valors es modifiquen aleatòriament dins d’un rang definit per cada variable.
- Un cop sobrepassades la meitat de les iteracions, els valors de **“C”**, **“k”** i **“S”** es mantenen constants en la millor solució trobada. En canvi, la resta de valors continuen variant aleatòriament.

A continuació, s’han afegit unes línies de codi per procurar que els nous valors de les variables inicials es mantinguin dins de les restriccions.

5.2.1.8. Resultats

Finalment, el codi emmagatzema els valors trobats a cada iteració i comprova si són millors que els trobats en la iteració anterior. Si ho són, substitueix aquests resultats i els guarda en una variable de sortida anomenada “bestsol”.

Per concloure, suma una unitat al nombre d’iteracions actual i torna a executar les funcions.

5.2.2. Exposició i comprovació dels resultats individuals

El codi s’executa amb MATLAB dues vegades variant les condicions inicials. D’aquesta manera s’obtenen resultats per les dues potes.

Els valors introduïts inicialment provenen d’un estudi previ realitzat mitjançant el programa de CAD SolidWorks.

Els valors de les variables inicials i els resultats obtinguts per la pota 1 són els següents (Taula 5.2):

Variable	Valor inicial [mm]	Resultat final [mm]
C_1	[-98.68, -25.32, -41.85]	[-121.96, -49.24, -47.47]
k_1	200	289.72
S_1	[0.4267, -0.6826, -0.5933]	[-0.0047, -0.0101, -0.0021]
d_1	[-10, -10, -10]	[-10.09, -26.63, 9.53]
t_{1i}	273.93	Entre 52.46 i 432.27
φ_{1i}	0.9165	Entre -0.1544 i 0.0842
Nombre iteracions	10000	
Error total	2820 mm	
Error per posició	188 mm	

*A l’annex 5.1 s’adjunten els resultats de t i φ complets. S’han marcat en blau els resultats que es corregeixen a continuació.

Taula 5.2. Valors inicials donats i resultats obtinguts amb 10.000 iteracions del codi de la “pota 1”.

Com es pot observar, el codi ha variat molt els valors inicials fins a convergir en els valors mostrats a la taula 5.2. Totes les variables s’han mantingut dins els rangs establerts però

tant la condició de perpendicularitat entre “C” i “S” com que “S” sigui un vector unitari no s’han complert.

La funció “fmincon” pot convergir en solucions que cauen fora de les restriccions no lineals. Així i tot, no es tracta d’un problema important ni invalida les solucions.

Per corregir aquests errors, s’ha normalitzat “S” i s’ha obligat a “C” i “S” a ser perpendiculars mantenint la direcció d’“S”. Al fer això, la constant “k” també es veu afectada. S’afegeix un croquis (figura 5.8) per aclarir el procediment:

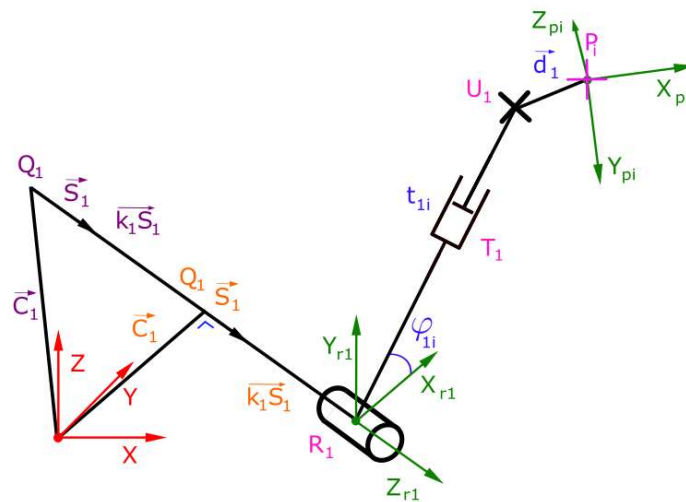


Figura 5.8. En lila, les variables proporcionades pel codi. En taronja, les variables corregides.

Cal destacar, que el canvi de direcció de “C” afecta a la component “X” dels eixos locals “Xr”, “Yr” i “Zr”. Com s’ha comentat amb anterioritat a l’apartat 5.2.1.6.1, s’ha tingut en compte i per la creació d’aquests eixos prèviament s’assegura la perpendicularitat entre “C” i “S”.

Per tant, els valors finals per als vectors “S” i “C” i per la constant “k” són:

S₁: [-0.4146, -0.8909, -0.1852]

C₁: [-79.16, 42.73, -28.35]

k₁: 392.93

Els valors de les variables inicials i els resultats obtinguts per la pota 2 són els següents (Taula 5.3):

Variable	Valor inicial [mm]	Resultat final [mm]
C₂	[98.68, -25.32, -41.85]	[38.59, -57.71, -117.83]
k₂	200	59.74
S₂	[0.4267, -0.6826, -0.5933]	[0.0304, 0.0039, -0.0119]
d₂	[-10, -10, -10]	[56.97, 5.93, -17.58]
t_{2i}	273.93	Entre 63.82 i 376.08
φ_{2i}	0.9165	Entre -0.1772 i 0.0653
Nombre iteracions	10000	
Error total	3551 mm	
Error per posició	237 mm	

*A l'annex 5.2 s'adjunten els resultats de **t** i **φ** complets. S'han marcat en blau els resultats que es corregeixen a continuació.

Taula 5.3. Valors inicials donats i resultats obtinguts amb 10.000 iteracions del codi de la "pota 2".

Cal destacar que dels valors inicials únicament s'ha variat el sentit de "Cx", el valor marcat en negreta a la taula 5.3.

De la mateixa manera que amb la "pota 1", cal fer perpendiculars "C" i "S". Per tant, els valors finals són:

S₂: [0.9246, 0.1186, -0.3619]

C₂: [-27.51, -66.19, -91.96]

k₂: 131.22

Els resultats de la taula 5.2 i 5.3, presenten un error absolut d'entre 2 i 3 metres per trajectòria. Dividint aquest error entre les 15 posicions treballades, apareix una variació en la posició obtinguda pel mecanisme d'entre 188 mm i 236,7 mm per cada punt. Per millorar els resultats i aconseguir uns valors més exactes, caldria afinar més el codi modificant les variables inicials, els límits inferiors i superiors, el nombre d'iteracions, la manera en com les variables inicials es modifiquen i les condicions de convergència de "fmincon".

A continuació, s'avaluen els resultats representant-los a l'espai utilitzant el programa de CAD SolidWorks. Cal destacar, que el codi s'ha llançat diverses vegades i s'han representat diverses propostes. D'aquestes propostes, s'han escollit les dues més prometedores en base a la viabilitat de la geometria.

Un cop verificades amb SolidWorks, s'han editat amb el programa Inkscape per fer més entenedora la figura. S'adjunten a continuació (figura 5.9 i 5.10):

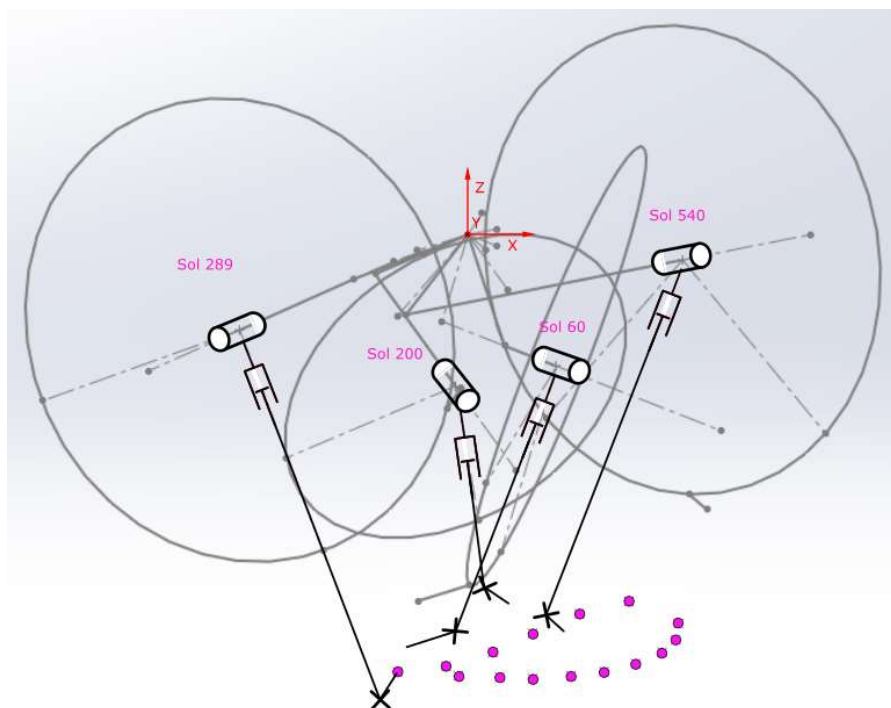


Figura 5.9. Representació de diversos resultats mitjançant el programa SolidWorks i Inkscape.

El número que apareix en rosa al costat de la solució, és la mesura de la variable "k" utilitzada per diferenciar les diferents solucions.

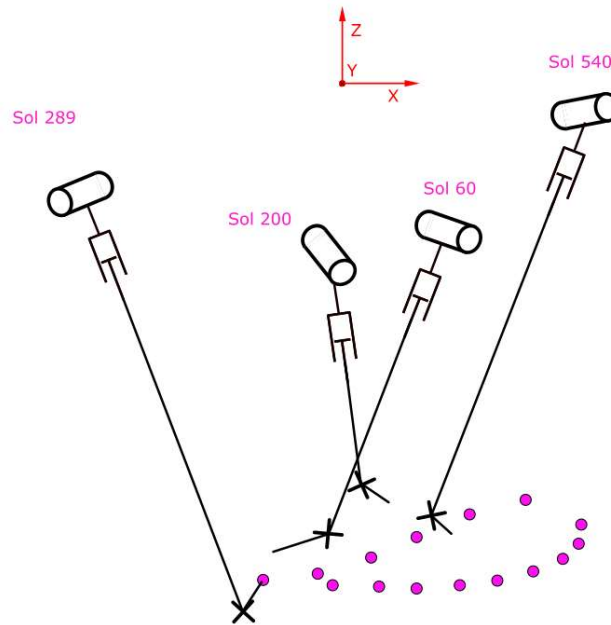


Figura 5.10. Representació dels resultats mostrats a la figura 5.9 únicament amb Inkscape.

S'ha considerat interessant afegir la figura 5.10 per mostrar les solucions obtingudes d'una manera més clara.

Estudiades les diferents propostes, per compatibilitat i ubicació al cos del robot, s'han escollit les solucions mostrades anteriorment a les taules 5.2 i 5.3. Es mostren unides a continuació:

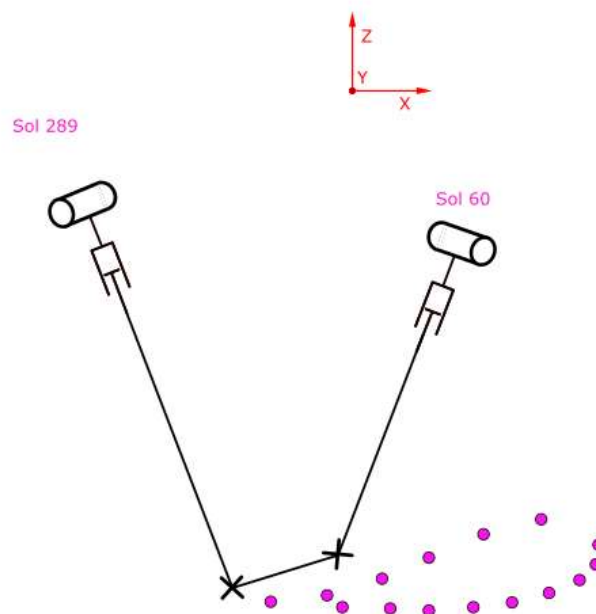


Figura 5.11. Representació mitjançant Inkscape del mecanisme complementari proposat.

5.2.3. Detall de l'estudi cinemàtic de les potes conjuntament

Un cop trobades possibles solucions per la pota 1 i 2, cal determinar una solució compatible conjunta. En aquesta solució, la posició dels enllaços de revolució ja està definida amb els estudis per separat. Únicament, es determinaran les direccions i longituds dels pistons de manera conjunta.

Utilitzant com a base el codi de MATLAB presentat amb anterioritat a l'apartat 5.2.1.6.1, s'han fet una sèrie de modificacions.

Primerament, s'ha modificat l'equació a minimitzar que descriu el mecanisme per estudiar la cinemàtica de les dues potes simultàniament. Aquesta equació s'ha presentat anteriorment amb la referència 5.2. S'adjunta novament però igualant tot a zero per obligar el mecanisme a estar tancat:

$$\vec{C}_1 + k_1 \cdot \vec{S}_1 + [T_1] \cdot \begin{bmatrix} t_1(i) \cdot \cos(\varphi_1(i)) \\ t_1(i) \cdot \sin(\varphi_1(i)) \\ 0 \end{bmatrix} - [R] \cdot \vec{d}_1 - \vec{C}_2 - k_2 \cdot \vec{S}_2 - [T_2] \cdot \begin{bmatrix} t_2(i) \cdot \cos(\varphi_2(i)) \\ t_2(i) \cdot \sin(\varphi_2(i)) \\ 0 \end{bmatrix} + [R] \cdot \vec{d}_2 = 0$$

Eq. 5.9. Equació per estudiar la cinemàtica del mecanisme base sencer i assegurar que les potes no se separen. L'índex "i" fa referència a cada una de les posicions a assolir.

Cal destacar, que en aquest cas "C", "k", "S" ja no són incògnites, són els valors obtinguts amb els estudis de les potes per separat i mostrats a les taules 5.2 i 5.3.

Per cada posició a estudiar, el valor de "d" serà constant. D'aquesta manera, s'ha forçat al mecanisme a mantenir-se tancat i oferir una base estable per ubicar el mecanisme 1-R. Per tal de complir aquest requisit, s'ha afegit la restricció que aplica al valor de "d" i obliga a que sigui constant en tot moment.

La manera d'implementar la restricció no és immediata. Primerament, cal calcular les posicions a les quals arriba el mecanisme sense la variable "d". A continuació, es força a que la diferència entre les posicions calculades anteriorment per la pota 1 i 2 sigui igual al valor desitjat (en aquest cas la suma dels mòduls dels valors de "d₁" i "d₂" trobats anteriorment). Es presenta l'equació que iguala la diferència entre aquests punts amb el mòdul desitjat a continuació:

$$(\text{posició pota 1 sense "d"}) - (\text{posició pota 2 sense "d"}) = 79,32$$

Eq. 5.10. Restricció per obtenir un valor de "d" constant.

Per aclarir el concepte, observant la figura 5.4 presentada anteriorment, s'estaria igualant la diferència entre els punts "U₁" i "U₂" representats en color lila a la figura a 79,32.

Cal destacar, que el valor del mòdul de “d” s’ha obtingut de la suma dels mòduls de “d₁” i “d₂” obtinguts amb les solucions de les potes simulades per separat anteriorment (taules 5.2 i 5.3).

Finalment, el programa s’executa per trobar els valors de “t”, “phi” i “d” conjunts. Malauradament, en implementar tantes restriccions i tan concretes, el programa no és capaç de trobar cap solució millor que la inicial. Cal aclarir que la solució inicial és la que es genera amb els valors inicials donats. Aquests valors són els resultats de les simulacions fetes anteriorment amb el mecanisme base per separat.

Com que el programa ofereix com a solució els resultats obtinguts per separat, (exposats a les taules 5.2 i 5.3) que s’han estudiat a l’apartat 5.2.2 on s’ha corroborat la seva viabilitat, es consideren vàlids i s’adopten per generar el mecanisme base complet.

Així i tot, queda obert un estudi addicional, on es poden variar toleràncies, restriccions i valors inicials del programa, fins a aconseguir uns resultats diferents dels inicials.

El codi utilitzat per la simulació de les potes conjuntament s’adjunta a l’annex 2.7.

5.3. Estudi cinemàtic del mecanisme complementari

Un cop determinades totes les variables del mecanisme base, s’ha elaborat un codi per modelar i calcular les variables que determinen el mecanisme complementari.

El codi redactat és molt similar a l'utilitzat en l'apartat 5.2.1.

Les diferències més significatives són les següents:

1. És necessari veure els punts de la trajectòria final des de la trajectòria complementària. Per aquest motiu, el programa s’inicia fent el canvi següent:

$$posició = P \text{ trajectòria final} - P \text{ trajectòria complementària}$$

Eq. 5.11. Adaptació de la posició inicial.

2. Adequació del codi a les variables mostrades a la figura 5.6.
3. Modificació de l’equació que modela el mecanisme. Es presenta a continuació:

$$\vec{C} + k \cdot \vec{S} + [T] \cdot \begin{bmatrix} l(i) \cdot \cos(\varphi(i)) \\ l(i) \cdot \sin(\varphi(i)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Eq. 5.12. Equació per estudiar la cinemàtica del mecanisme complementari. L’índex “i” fa referència a cada una de les posicions a assolir.

El codi s'executa amb MATLAB amb uns valors inicials provinents d'un estudi previ realitzat mitjançant el programa de CAD SolidWorks. S'ha adjuntat el codi sencer a l'annex 2.8.

Els valors de les variables inicials i els resultats obtinguts pel mecanisme complementari són els següents (Taula 5.4):

Variable	Valor inicial [mm]	Resultat final [mm]
C	[-28, 64.50, -143.70]	[-71.12, 81.90, -149.98]
k	0	45.06
S	[0.3580, -0.8240, -0.4397]	[0.0062, 0.1759, 0.0011]
I	160	131.36
φ_i	0.9165	Entre -0.1194 i 0.0625
Nombre iteracions	10000	
Error total	1656 mm	
Error per posició	110 mm	

*A l'annex 5.3 s'adjunten els resultats de φ complets. S'han marcat en blau els resultats que es corregeixen a continuació.

Taula 5.4. Valors inicials donats i resultats obtinguts amb 10.000 iteracions del codi del mecanisme complementari.

De la mateixa manera que amb els resultats anteriors, "C" i "S" no són perpendiculars i "S" no és un vector unitari. A continuació es presenten els resultats corregits:

S: [0.035, 0.999, 0.006]

C: [-13.78, 0.66, -28.06]

k: 59.62

Finalment, s'han avaluat els resultats utilitzant el software de CAD SolidWorks. S'han editat amb el programa Inkscape per fer més entenedora la figura:

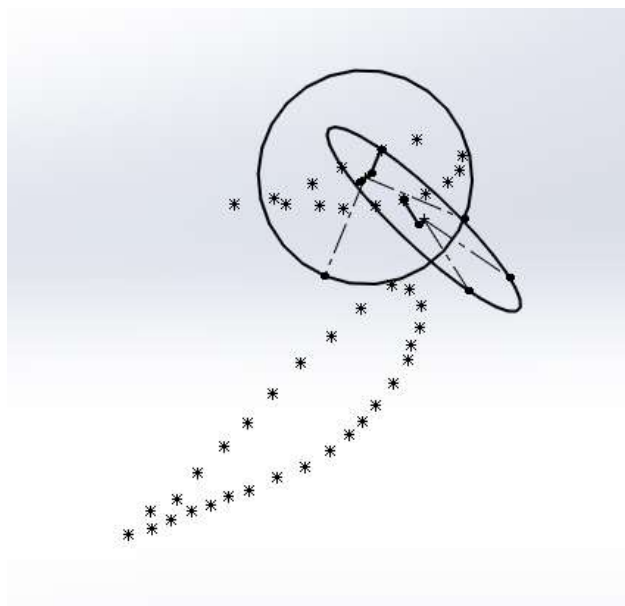


Figura 5.12. Representació de dues solucions obtingudes amb el codi de l'annex 5.3, representades juntament amb les dues trajectòries.

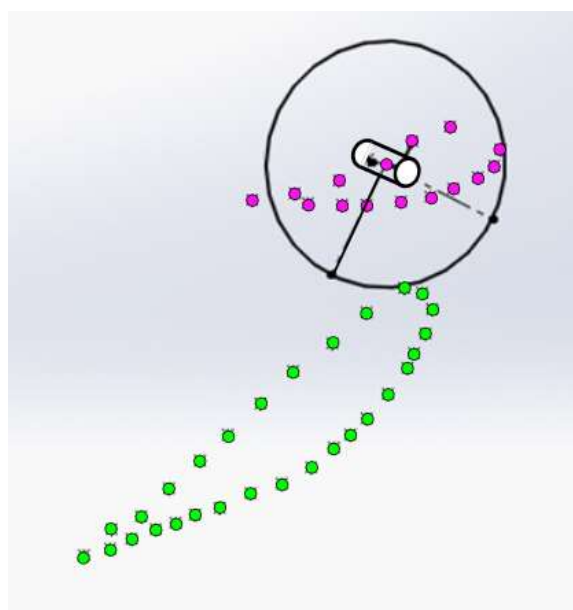


Figura 5.13. Representació del mecanisme complementari escollit. En lila apareix la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

Com es pot observar a la figura 5.12, s'ha executat el programa dues vegades per obtenir diversos resultats i escollir el que s'adeqüi millor. Finalment, a la figura 5.13, s'observa el mecanisme complementari seleccionat. Els valors es troben a la taula 5.4 presentada anteriorment.

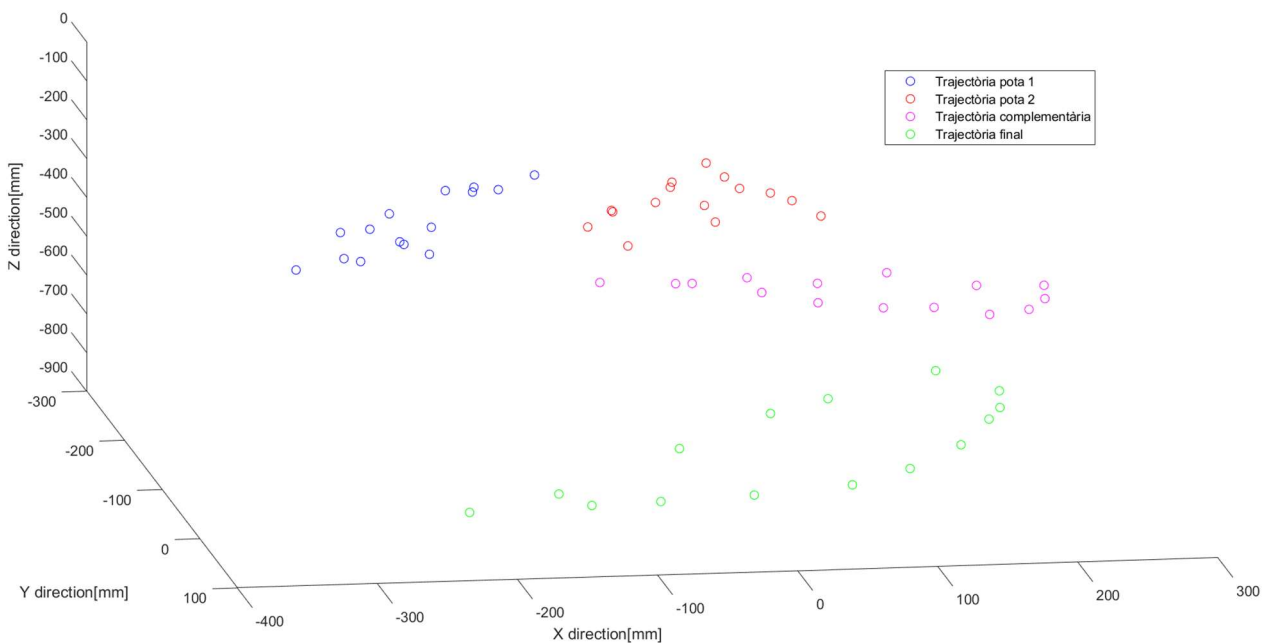
5.4. Resultats cinemàtics globals

Un cop estudiats els dos mecanismes per separat, cal verificar la viabilitat d'unir-los.

Per tal de comprovar que la unió dels dos mecanismes és factible i viable, es verifica que l'espai de posicions que genera el mecanisme base és compatible amb el mecanisme complementari i la trajectòria final desitjada.

Primerament, s'han posicionat en una mateixa gràfica les dues trajectòries (complementària i final) juntament amb les posicions on arriben les potes del mecanisme base amb les solucions obtingudes i mostrades a les taules 5.2 i 5.3.

A continuació, es presenta la gràfica, elaborada amb el programa MATLAB, on es mostren aquestes trajectòries i posicions:



Gràfica 5.3. Representació de les trajectòries complementària i final, juntament amb les trajectòries on se situen les potes del mecanisme base.

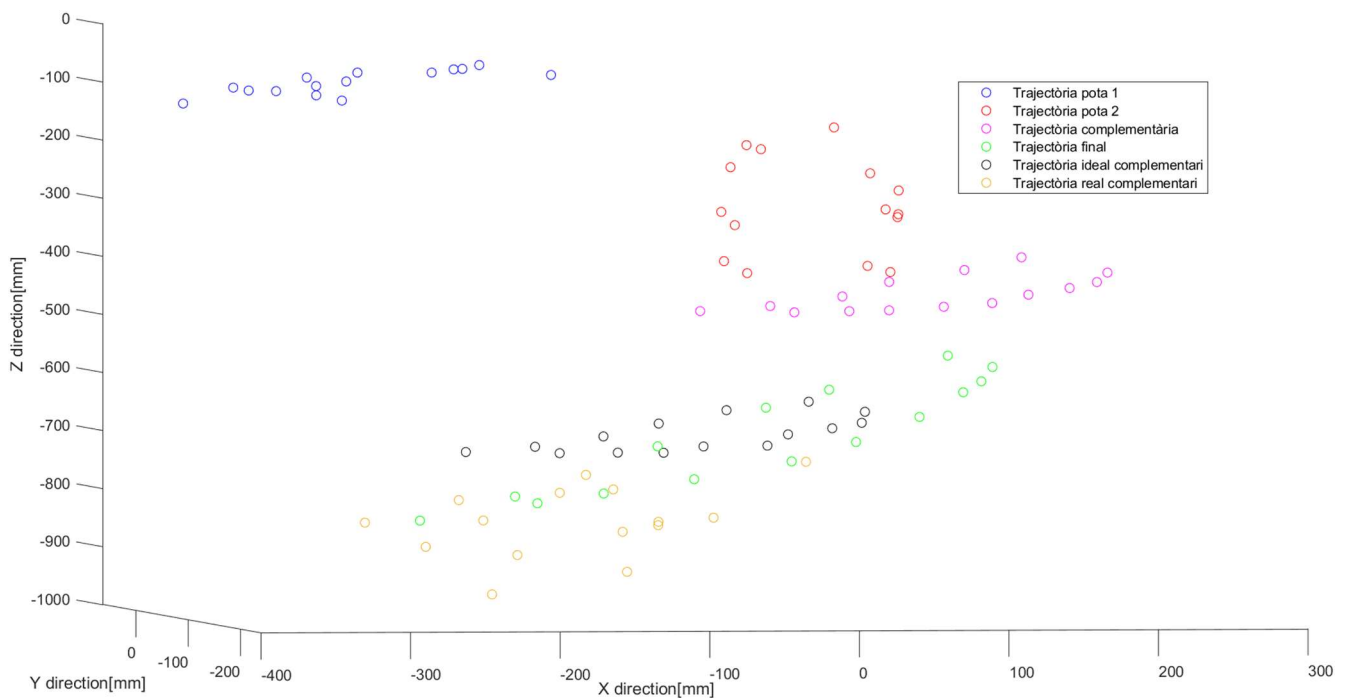
S'observen en blau i vermell les posicions finals del mecanisme base per les solucions obtingudes amb l'algorisme descrit en l'apartat 5.2 mostrades a l'annex 5.1 i 5.2. En lila s'aprecia la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

Estudiant la gràfica 5.3, es pot veure com el mecanisme base arriba a posicions properes a la trajectòria complementària, però no es posicionen mai de manera exacta. Com s'ha vist a les taules 5.2 i 5.3, els resultats compten amb un error d'entre 188 mm i 237 mm per cada punt. Això provoca aquesta desviació en les trajectòries. Cal destacar, que en futurs projectes, caldria afinar els programes per obtenir resultats amb menys desviació.

Així i tot, els punts obtinguts són propers a la trajectòria complementària.

Idealment, l'estudi cinemàtic del mecanisme complementari, s'ha dut a terme situant l'origen d'aquest directament en punts de la trajectòria complementària. Com es pot veure a la gràfica 5.3, aquesta trajectòria no podrà ser l'origen perquè el mecanisme base no arriba a la trajectòria complementària de manera exacta.

Per poder veure clarament les desviacions, s'ha generat una nova gràfica 5.4 afegint els punts de les trajectòries que genera el mecanisme complementari si es pren com a origen la trajectòria complementària o la generada pel mecanisme base.



Gràfica 5.4. Representació de les trajectòries complementària i final, juntament amb les trajectòries on se situen les potes del mecanisme base. S'han afegit els punts del mecanisme complementari ideal i unit al mecanisme base.

A la gràfica 5.4, s'han afegit respecte a la gràfica 5.3 els punts pintats en color negre de la trajectòria ideal del mecanisme complementari. Són aquells que s'han mostrat a la taula 5.4 com a solució. Es tracta dels punts als quals arriba el mecanisme complementari si es pren com a origen la trajectòria complementària.

També es poden veure representats en color groc els punts reals de la trajectòria complementària. Aquests punts són als que arriba el mecanisme complementari si està lligat al mecanisme base (punts vermells i blaus). En altres paraules, són els punts de la trajectòria que pot generar el mecanisme global amb les dimensions i mides presentades a les taules 5.2, 5.3 i 5.4. La trajectòria que formen es presenta més desviada de la trajectòria final que la ideal, això està causat per l'acumulació de l'error del mecanisme base en suma amb el mecanisme complementari.

Per comparar-ho de manera numèrica, la trajectòria ideal de color negre presenta un error global de 1656 mil·límetres (sumant l'error dels 15 punts amb una mitjana de 110 mil·límetres d'error per cada punt) mentre que la trajectòria real presenta un error global de 2677 mil·límetres (una mitjana de 178 mil·límetres d'error per cada punt).

Arribats a aquest punt, es decideix continuar amb la solució utilitzant com a origen del mecanisme complementari la trajectòria complementària. S'ha considerat que acumular error devalua els resultats i que en futurs projectes, es refinarà el programa adjuntat en els Annexos 2.5 i 2.7 per reduir al màxim l'error i procurar que el mecanisme base sigui més fidel a la trajectòria complementària.

El codi per generar les trajectòries a partir dels resultats d'apartats anteriors i calcular l'error global s'adjunta a l'annex 2.9.

Finalment, s'ha fet un estudi mitjançant SolidWorks per visualitzar el mecanisme complet. S'adjunten els resultats a continuació:

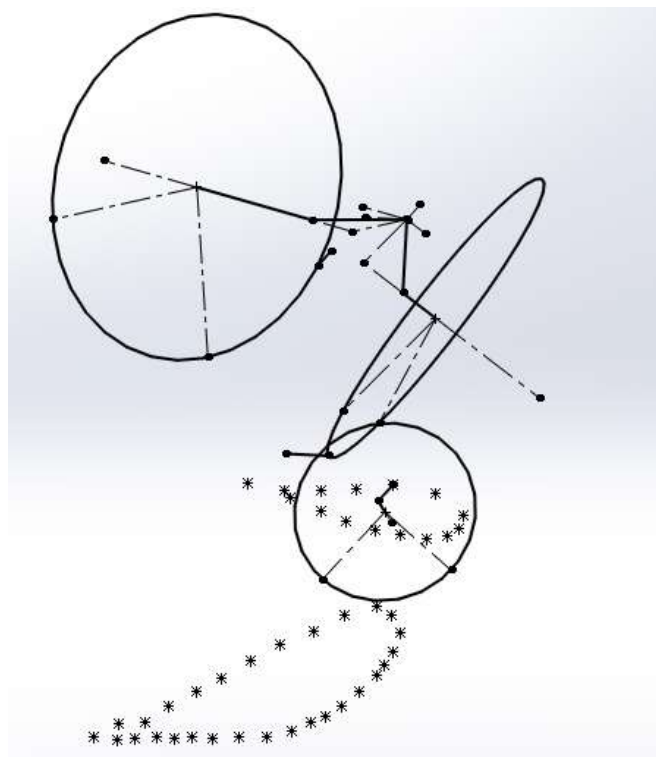


Figura 5.14. Representació esquemàtica dels mecanismes base i complementari propoats juntament amb la trajectòria complementària i final.

Per fer més entenedora la representació dels resultats que s'ha fet amb el programa SolidWorks, s'edita el resultat amb Inkscape afegint els components dels mecanismes:

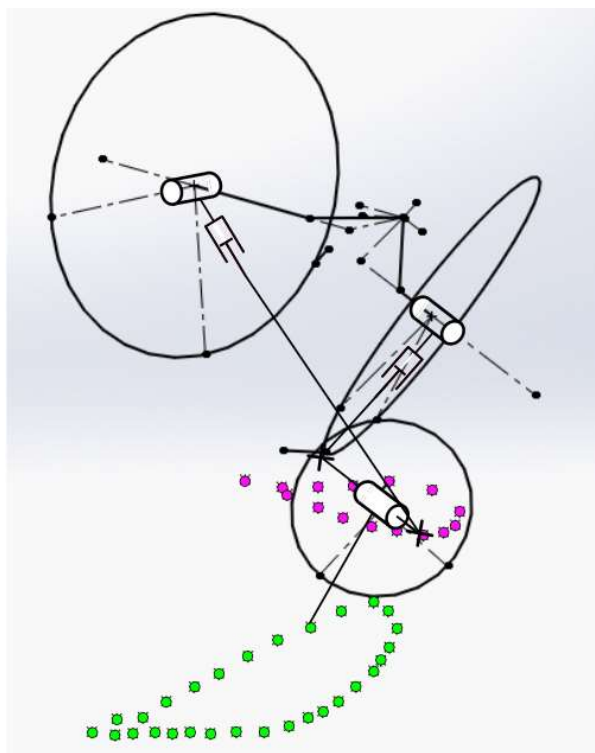


Figura 5.15. Representació del mecanisme global en SolidWorks i Inkscape. En lila apareix la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

Per concloure, es presenta únicament el mecanisme final amb les dues trajectòries de manera esquemàtica:

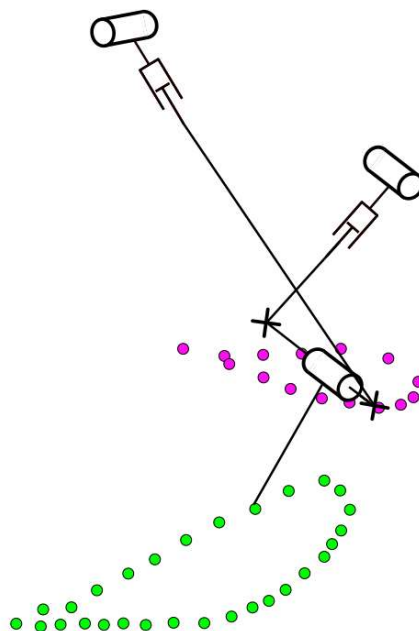


Figura 5.16. Representació final del mecanisme global en Inkscape. En lila apareix la trajectòria complementària i en verd la trajectòria final.

6. Mecanisme proposat

Un cop estudiades en profunditat les diferents parts del mecanisme final per separat, com s'ha descrit anteriorment a l'apartat 5.4, s'han unit i estudiat conjuntament. D'aquesta manera, s'han pogut obtenir uns resultats vàlids per generar un mecanisme amb les característiques desitjades i capaç de seguir la trajectòria final. Les dimensions d'aquest mecanisme s'han exposat en apartats anteriors i es recullen en detall a l'annex 5.1, 5.2 i 5.3.

A continuació, per motius visuals i finalitzar la part pràctica del treball, s'ha elaborat un disseny simplificat amb el programa SolidWorks. S'adjunta a continuació:



Figura 6.1. Proposta d'implementació del mecanisme complet.

A la figura 6.1 es pot apreciar el disseny simplificat 3D del mecanisme global. Aquesta representació únicament té finalitats estètiques, però pot ajudar a visualitzar d'una manera més realista el mecanisme proposat.

Finalment, es presenta la representació de la possible implementació del mecanisme en un robot quadrúpede genèric:



Figura 6.2. Proposta de la implementació del mecanisme complet instal·lat en el cos genèric d'un robot quadrúpede en estàtic.

A continuació, s'adjunta una figura del robot fent una passa endavant amb dues de les potes:

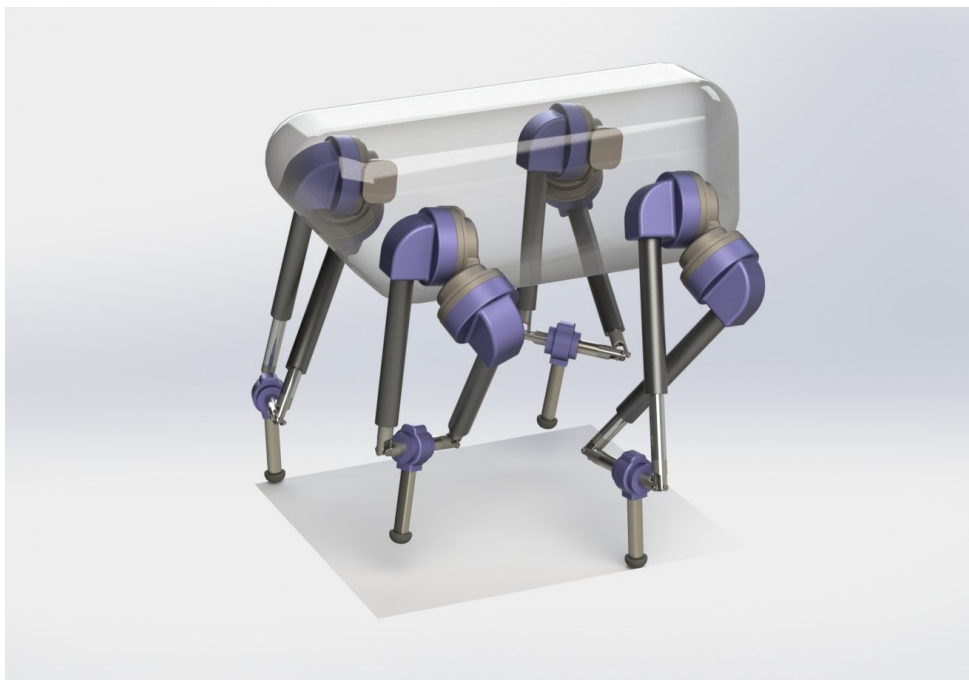


Figura 6.3. Proposta de la implementació del mecanisme complet instal·lat en el cos genèric d'un robot quadrúpede simulant una passa.

És interessant observar la figura 6.3 i comparar les potes que toquen el terra amb les que no. Es pot veure com la pota s'allunya del terra combinant la rotació dels enllaços de revolució amb els pistons.

Un cop proposada aquesta implementació, es pot observar un disseny preliminar que encara podria estudiar-se i afinar-se molt més. Arribats a aquest punt i amb les eines que s'han desenvolupat, es poden estudiar més trajectòries i adaptar, si és necessari, el disseny del mecanisme perquè les pugui seguir. Algunes propostes serien estudiar una trajectòria de desplaçament lateral o adaptada per poder pujar i baixar escales.

Queden moltes portes obertes de cara a continuar el treball que s'ha fet, millorar el mecanisme actual o proposar-ne de nous.

7. Planificació

Setmana de projecte	Febrer		Març					Abril					Maig					Juny					Juliol				Agost				Setembre		
Activitat:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Estudi bibliogràfic sobre robots quadrúpedes	■	■																															
Estudi dels sistemes de propulsió actuals per robots quadrúpedes		■																															
Definir els objectius i abast del projecte		■																															
Estudi i determinació del mètode de locomoció més adient			■																														
Adquisició de dades per generar una trajectòria				■	■																												
Ampliació de coneixements del software Matlab					■	■												■	■	■	■	■	■	■									
Tractament i estudi de les dades de trajectòries					■	■	■	■																									
Generació de les trajectòries finals							■	■																									
Ampliació de coneixements sobre teoria de grafs								■																									
Adaptació de codi per generar mecanismes								■	■																								
Estudi de mecanismes utilitzant la teoria de grafs										■	■	■	■																				
Estudi cinemàtic dels mecanismes finals (determinació de variables, anells vectorials, representació, etc)													■	■	■																		
Creació de codi Matlab per estudiar la cinemàtica dels mecanismes																		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
Llançar diferents iteracions de codi per obtenir resultats variats																									■	■							
Estudi i comprovació de resultats																												■					
Quadrar format i revisió general																													■	■			
Entrega																															■		

Taula 7.1. Diagrama de Gantt amb la planificació del Treball de Final de Màster.

8. Estudi econòmic

La realització d'aquest treball de final de màster, no genera cap benefici econòmic directe. Tanmateix, sí que pot generar un estalvi econòmic important per investigadors del sector de la robòtica que puguin utilitzar els mètodes explicats i aprofitar els programes redactats. Per altra banda, s'ha realitzat un estudi de les despeses en l'elaboració de tot el projecte.

8.1. Despeses de l'autor del projecte

El Treball de Fi de Màster, suposa 12 crèdits ECTS (European Credit Transfer System) [ECTS, 2015]. Segons la regularització europea, un crèdit ECTS representa entre 25 i 30 hores de feina. Per comptabilitzar les hores totals, s'utilitza la mitja d'aquests dos valors. Per tant, s'assumeix que un crèdit ECTS correspon a 27,5 hores de feina per part de l'estudiant. Tenint això en consideració, 12 crèdits corresponen a 330 hores.

El conveni col·lectiu nacional d'empreses d'enginyeria, publicat al BOE [BOE, 2023], especifica que un enginyer superior d'enginyeria industrial amb un màster habilitant, ha de cobrar un mínim de 27.113,82 €/any. Això suposa 12,84 €/hora, per tant, les hores invertides per l'autor en aquest projecte estan valorades en un total de 4.237 €. Tot seguit s'adjunta el càlcul fet:

$$27.113,82 \text{ €/any} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot \frac{1 \text{ mes}}{22 \text{ dies}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{8 \text{ hores}} = 12,84 \frac{\text{€}}{\text{hora}} \cdot 330 \text{ horas} = 4.237 \text{ €}$$

Eq. 8.1. Valoració de les hores invertides per l'autor del treball.

A continuació, cal valorar les despeses que comporten els desplaçaments fets per part de l'autor del projecte. Durant el període de realització del treball, exceptuant els mesos d'estiu i les festes de Setmana Santa, s'ha dut a terme una reunió de seguiment setmanal. Per tant, en total s'han fet 20 reunions.

El trajecte des del domicili particular de l'autor fins a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, on s'han fet les reunions, és de 14,2 km. Cal destacar, que són 28,4 km si es té en compte que el desplaçament total és anar al destí i tornar al domicili. Tots aquests desplaçaments s'han fet amb un vehicle privat que té un consum mitjà de benzina de 5,6 l/100 km. Tenint tot això en consideració, s'han recorregut 568 km i consumit 31,81 litres de benzina.

El preu mitjà de la benzina de 95 octans a Barcelona durant el 2023 és de 1.630€/l segons la pàgina web [ClickGasoi, 2023], per tant la despesa en combustible ha estat de 51,85€.



Els càlculs s'adjunten a continuació:

$$14,2 \frac{km}{1 \text{ viatge}} \cdot \frac{2 \text{ viatges}}{1 \text{ reunió}} \cdot 20 \text{ reunions} \cdot \frac{5,6 \text{ litres de 95}}{100 km} \cdot \frac{1,630 \text{ €}}{1 \text{ litre de 95}} = 51,85 \text{ €}$$

Eq. 8.2. Càlcul de la despesa en combustible durant tot el projecte.

Finalment, les despeses en consums energètics de l'ordinador i la climatització, comparades amb la resta de despeses, es consideren negligibles.

8.2. Hores del tutor del projecte

Està establert, que les hores que ha d'invertir el tutor del projecte són, aproximadament, entre un 10 i un 15 % de les invertides per l'autor. Com s'ha fet anteriorment, s'escull com a valor la mitja, 12,5 %. El 12,5 % de 330 suposa que el tutor del projecte ha invertit 41,25 hores.

Assumint que el tutor del projecte pot cobrar 15 €/hora, es calcula que la dedicació del tutor en aquest projecte equival a un cost de 618,75 €.

8.3. Llicències de software

El software utilitzat i la valoració econòmica es presenta a la taula 8.1:

Software	Preu Llicència mínima
MATLAB 2023a	860 € (anual)
SolidWorks Standard	1.044 € (trimestral)
Word, Excel, Powerpoint (Paquet Office 365)	69,99 € (anual)
Anaconda Prompt	Gratuït
Notepad ++	Gratuït
Inkscape	Gratuït
TOTAL	1.973,99 €

Taula 8.1. Valoració de les llicències de software utilitzades.

Els valors s'han extret:

- MATLAB 2023a - [MATLAB, 2023]
- SolidWorks Standard - [SolidWorks, 2023]
- Word i Excel (Paquet Office) - [MICROSOFT OFFICE 365, 2023]

- Anaconda Prompt - Gratuït [Anaconda, 2023]
- Notepad + + - Gratuït [Notepad++, 2023]
- Inkscape – Gratuït [Inkscape, 2023]

8.4. Resum de les despeses

Tot seguit s'adjunta un resum (taula 8.2) de les despeses del projecte:

	Quantitat	Preu unitat [€]	Preu total [€]
Hores autor	330	12,84	4.237
Hores tutor	41,25	15	618,75
Desplaçaments	20	2,59	51,85
Llicències	5	-	1.973,99
		TOTAL	6.881,59 (IVA incl.)

Taula 8.2. Valoració del projecte.

9. Estudi ambiental

L'estudi realitzat en aquest treball de final de màster per si sol, no genera cap impacte ambiental. Es poden contemplar les hores invertides en feina d'ordinador i els desplaçaments realitzats fins la universitat que han generat un impacte negatiu.

Per altra banda, els resultats del treball sí que poden tenir un impacte ambiental positiu.

9.1. Impacte ambiental de la realització del treball

Per calcular l'impacte ambiental generat durant la realització del treball, s'ha comptabilitzat la feina de l'autor i els desplaçaments.

Com s'ha calculat anteriorment a l'apartat 8, les hores invertides en el treball per part de l'autor han estat 330 i sempre s'ha utilitzat un ordinador. A aquestes hores, cal afegir les 41,25 hores de la tutora del projecte, que de la mateixa manera que l'autor, sempre ha dedicat temps al TFM ha utilitzat un ordinador.

Tenint tot això en consideració i assumint un consum mitjà de 250W per ordinador com proposa [Escobar, 2023], s'han consumit un total de 92,81 kWh. Tenint en consideració que l'impacte de la generació d'energia elèctrica a Espanya durant el 2022 ha estat de 273 grams de CO₂ equivalent per cada kWh [Gencat, 2023], s'han alliberat 25,35 kg de CO₂ a l'atmosfera. S'adjunta l'equació utilitzada:

$$(330 + 41,25) h \cdot 250W \cdot \frac{1 kWh}{1000 Wh} \cdot \frac{273 gCO_2}{1 kWh} \cdot \frac{1 kgCO_2}{1000 gCO_2} = 25,34 kgCO_2$$

Eq. 9.1. Càlcul de la quantitat de CO₂ generada per la utilització de l'ordinador.

A continuació, s'ha tingut en compte l'impacte del combustible consumit durant els desplaçaments per fer reunions. En total, s'han consumit 31,81 litres de benzina i, segons l'Institut per la Diversificació i l'estalvi de la Energia (IDAE), un vehicle privat genera una mitja de 2,35 kg de CO₂ per litre de benzina consumit [IDAE]. Per tant, s'han alliberat a l'atmosfera 74,75 kg de CO₂ en concepte de desplaçaments. S'adjunta l'equació utilitzada:

$$31,81 l \cdot \frac{2,35 kgCO_2}{l} = 74,75 kgCO_2$$

Eq. 9.2. Càlcul de la quantitat de CO₂ generada en els desplaçaments.

Finalment, s'adjunta una taula 9.1 resum:

	Quantitat	Consum unitari	Consum total	Impacte unitari en CO ₂	CO ₂ alliberat a l'atmosfera
Hores d'ordinador	371,25	250 W	92,81 kWh	273 g CO ₂ /kWh	25,34 kg
Desplaçaments en motocicleta	20	1,59 litres benzina	31,81 litres benzina	2,35 kg CO ₂ /litre benzina	74,75 kg
				TOTAL CO₂	100,09 kg

Taula 9.1. Impacte ambiental en forma de CO₂ alliberat a l'atmosfera.

9.2. Impacte ambiental dels resultats del treball

Pel que respecta als resultats obtinguts, amb aquest treball s'ha establert una metodologia i elaborat una sèrie de codis que generen, en l'àmbit experimental, diferents topologies viables per robots quadrúpedes.

Aquestes eines permeten afinar la investigació i ofereixen l'oportunitat d'estalviar temps i recursos en la recerca de noves topologies i la fabricació de prototips.

En conseqüència, aquest estudi no genera un canvi directe en l'impacte ambiental actual del sector de la robòtica però busca contribuir a agilitzar la investigació dins d'aquest camp. Agilitzar el procés d'investigació i reduir la quantitat de prototips a fabricar, genera una reducció de l'impacte ambiental en el sector.

10. Objectius de desenvolupament sostenible

El treball fet pot contribuir d'alguna manera en algun dels objectius de desenvolupament sostenible (ODS) [United Nations, 2023] . A continuació s'adjunta la taula 10.1 on es recullen:

REPTE		ALINEAMENT AMB EL REPTE	ARGUMENT RELACIONAT AMB EL TREBALL
1	Fi de la pobresa	No	-
2	Fam zero	No	-
3	Salut i benestar	No	-
4	Educació de qualitat	No	-
5	Igualtat de gènere	No	-
6	Aigua neta i sanejament	No	-
7	Energia neta i assequible	No	-
8	Treball digne i creixement econòmic	No	-
9	Indústria innovació i infraestructures	Si	Com s'ha comentat al llarg de la memòria, els robots quadrúpedes es troben integrats en el món de la indústria realitzant tasques molt variades com poden ser la inspecció o el manteniment. Tant el disseny innovador de topologia proposat, com la metodologia general seguida, es poden aprofitar en futurs estudis i prototips. D'aquesta manera, aquest treball contribueix en la innovació de la indústria i els equips industrials.
10	Reducció de les desigualtats	No	-
11	Ciutats i comunitats sostenibles	No	-

12	Consum i producció responsables	Si	Com s'ha mencionat amb anterioritat, la metodologia que s'ha seguit és completament general. Per tant, es pot utilitzar per desenvolupar moltes altres topologies de pots i mecanismes per seguir qualsevol trajectòria. Per aquest motiu, l'estudi fet i la metodologia proposada, contribueixen en fomentar una producció responsable minimitzant la necessitat de fabricar prototips i reduint les hores de futurs estudis.
13	Acció climàtica	No	-
14	Vida submarina	No	-
15	Vida terrestre	No	-
16	Pau, justícia i institucions sòlides	No	-
17	Aliances per aconseguir els objectius	No	-

Taula 10.1. Alineament del treball amb els objectius de desenvolupament sostenible (ODS).

11. CONCLUSIONS

La clau de l'èxit dels robots quadrúpedes resideix en la seva capacitat per superar obstacles i desplaçar-se per terrenys escarpats. Per aquest motiu, el disseny de les potes d'aquests robots és de gran importància.

Amb aquest treball, s'ha estudiat i proposat de manera satisfactòria una topologia completament nova per proporcionar aquestes característiques als robots.

S'han estudiat els diferents mètodes de locomoció animal fins a escollir el que es considera més recomanable segons les necessitats i requisits del robot.

A continuació, s'ha aconseguit una base de dades amb multitud de trajectòries enregistrades i s'han pogut generar trajectòries interessants per fer diferents desplaçaments.

Un cop s'ha decidit quina és la trajectòria que es vol seguir, s'ha fet un estudi utilitzant la teoria de grafs per determinar els mecanismes viables.

Finalment, s'ha fet un estudi cinemàtic exhaustiu amb el mecanisme seleccionat, per determinar les característiques del mateix i poder proposar un mecanisme nou i innovador per fer viable el moviment.

Per tant, es pot afirmar de manera satisfactòria, que s'ha proposat un nou disseny de potes per a robots quadrúpedes.

Així i tot, per assolir l'objectiu principal, ha estat necessari generar un gran nombre de programes, codis i estudis. Cal destacar, que s'ha posat especial cura en obtenir que tots els estudis realitzats siguin genèrics i es puguin emprar en futurs estudis amb diferents trajectòries o mecanismes.

Finalment, es creu que aquest treball deixa la porta oberta a continuar l'estudi. Algunes de les futures tasques suggerides són:

- Estudiar més trajectòries com per exemple: desplaçaments laterals, trajectòries de salt o moviments que permetin al robot seure o tombar-se. (La base de dades conté molta més informació de la que s'ha estudiat en aquesta memòria.)
- Afinar l'estudi cinemàtic per assolir uns resultats més exactes. En altres paraules, fer més iteracions, ajustar les restriccions o modificar els valors inicials fins a obtenir un mecanisme capaç de resseguir la trajectòria amb un error mínim.
- Continuar l'estudi amb una anàlisi d'interferències. No s'ha estudiat la possibilitat que el mecanisme col·lideixi amb si mateix mentre es genera el moviment. Es proposa com a continuació directa d'aquest treball.

- Estudiar en profunditat altres mecanismes trobats amb la teoria de Grafs.
- Continuar l'estudi amb un disseny mecànic de la solució suggerida.

En conclusió, s'ha assolit l'objectiu final del treball, però queden moltes oportunitats per estudiar, millorar i desenvolupar en profunditat, tant el mecanisme proposat, com les eines utilitzades durant l'estudi.

12. Agraïments

Un cop finalitzats quasi vuit mesos de feina, es té un sentiment d'orgull cap a la feina feta i el resultat obtingut. S'han assolit objectius gràcies a una dedicació constant i a un alt interès personal. Però, cal destacar que tot i les hores dedicades, aquest projecte no hagués estat possible sense ajuda.

En primer lloc, es vol agrair el suport i l'ajuda que s'ha rebut per part de la família i la parella. El seu suport incondicional ha estat clau per aconseguir el projecte de la millor manera possible. Durant aquests mesos, hi ha hagut diferents sensacions de cara al projecte, tan bones com dolentes. Punts en els quals no se sabia com continuar o moments en què tot sortia malament. Gràcies per recolzar-me en tot moment.

En segon lloc, cal agrair la gran feina i ajuda que ha proporcionat la directora del projecte, l'Alba Pérez Gracia. Ha tingut la paciència necessària per explicar-m'ho tot sempre des de 0 i estar segura que entengués tots els conceptes correctament. Ha sabut en tot moment quin és el següent pas i com sortir dels diferents entrebancs. Sense la seva ajuda i grans coneixements en la matèria, aquest projecte no hauria arribat a bon port. Gràcies per la teva feina i dedicació.

Finalment, cal agrair el suport als companys de la universitat que sempre han estat un gran suport i una font de bons consells.

13. Bibliografia

[Biswal & Mohanty, 2021]

Biswal, P., & Mohanty, P. K. (2021). Development of quadruped walking robots: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2017-2031.

[Machado & Silva, 2006]

Machado, J. T., & Silva, M. F. (2006, April). An overview of legged robots. In *International symposium on mathematical methods in engineering* (Vol. 48, No. 2.3). Ankara, Turkey: MME Press.

[De Santos & Garcia & Estremera, 2006]

De Santos, P. G., Garcia, E., & Estremera, J. (2006). *Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots* (Vol. 1). London: springer.

[Raibert, 1986]

Raibert, M. H. (1986). *Legged robots that balance*. MIT press.

[Hutchinson, 1967]

Hutchinson, A. C. (1967). Machines can walk. *The Chartered Mechanical Engineer*, 11(10), 480-484.

[Mosher, 1968]

Mosher, R. (1968). Test and evaluation of a versatile walking truck. In *Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium, Washington DC, 1968* (pp. 359-379).

[www.wikipedia.org]

Wikipedia contributors. (2022). Big Muskie. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Recuperat de: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Big_Muskie&oldid=1120832396 [16 de juny de 2023]

[Hirose & Kato, 2000]

Hirose, S., & Kato, K. (2000, April). Study on quadruped walking robot in Tokyo Institute of Technology-past, present and future. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)* (Vol. 1, pp. 414-419). IEEE.

[Kitano & Hirose & Endo, 2016]

Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A., & Endo, G. (2016). TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. *Robomech Journal*, 3, 1-16.

[Fukuoka & Kimura, 2009]

Fukuoka, Y., & Kimura, H. (2009). Dynamic locomotion of a biomorphic quadruped 'Tekken' robot using various gaits: walk, trot, free-gait and bound. *Applied Bionics and Biomechanics*, 6(1), 63-71.

[Kimura & Kodono, s.f.]

Kimura, H. & Kodono, K. (s.f.). The Quadruped Robot "Tekken-II". *Robot Locomotion Lab*. Recuperado de: <http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/research/Quadruped/photo-movie-tekken2-e.html> [16 de juny de 2023]

[Kim et al., 2005]

Kim, H., Kang, T., Loc, V. G., & Choi, H. R. (2005, April). Gait planning of quadruped walking and climbing robot for locomotion in 3D environment. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2733-2738). IEEE.

[Koo et al., 2007]

Koo, I. M., Trong, T. D., Kang, T. H., Vo, G., Song, Y. K., Lee, C. M., & Choi, H. R. (2007, October). Control of a quadruped walking robot based on biologically inspired approach. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 2969-2974). IEEE.

[Koo et al., 2013]

Koo, I. M., Tran, D. T., Lee, Y. H., Moon, H., Koo, J. C., Park, S., & Choi, H. R. (2013). Development of a quadruped walking robot AiDIN-III using biologically inspired kinematic analysis. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 11, 1276-1289.

[Gao et al., 2014]

Gao, F., Qi, C., Sun, Q., Chen, X., & Tian, X. (2014, May). A quadruped robot with parallel mechanism legs. In *2014 IEEE international conference on Robotics and automation (ICRA)* (pp. 2566-2566). IEEE.

[He & Gao, 2020]

He, J., & Gao, F. (2020). Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33(1), 1-30.

[Hutter et al., 2013]

Hutter, M., Gehring, C., Bloesch, M., Hoepflinger, M., & Siegwart, R. (2013). Walking and running with StarlETH. In *The 6th international symposium on adaptive motion of animals and machines (AMAM)* (No. CONF).

[Trodezza, s.f.]

Trodezza, M. (s.f.). ANYmal. *ETH zürich. Robotic Systems Lab*. Recuperat de: <https://rsl.ethz.ch/robots-media/anymal.html> [17 de juny de 2023]

[Hyun et al., 2014]

Hyun, D. J., Seok, S., Lee, J., & Kim, S. (2014). High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah. *The International Journal of Robotics Research*, 33(11), 1417-1445.

[Park et al., 2015]

Park, H. W., Park, S., & Kim, S. (2015, May). Variable-speed quadrupedal bounding using impulse planning: Untethered high-speed 3d running of mit cheetah 2. In 2015 IEEE *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5163-5170). IEEE.

[Ackerman, s.f.]

Ackerman, E. (s.f.) Mini Cheetah. *ROBOTS. IEEE Spectrum*. Recuperat de: <https://robotsguide.com/robots/minicheetah> [17 de juny de 2023] [Fotografia de: Vickmark, B.]

[ROBOTDIGG Equip Makers]

(s.f.) MIT Robot Dog high torque Joint Motor or DD Motor. *ROBOTDIGG Equip Makers*. Recuperat de: <https://www.robotdigg.com/product/1667/MIT-Robot-Dog-high-torque-Joint-Motor-or-DD-Motor> [17 de juny de 2023]

[Redacció de DescubreArduion.com]

Redacció de DescubreArduino.com (s.f.) Boston Dynamics: todo sobre esta empresa de robòtica. DescubreArduino.com. Recuperat de: <https://descubrearduino.com/boston-dynamics/#:~:text=La%20idea%20de%20Boston%20Dynamics,sin%C3%B3nimo%20de%20rob%C3%B3tica%20din%C3%A1mica%20avanzada.> [17 de juny de 2023]

[Raibert et al., 2008]

Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., & Playter, R. (2008). Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 10822-10825.

[Boston Dynamics, 2012]

(2012). Cheetah Robot Gallops at 18 mph. *Boston Dynamics*. Recuperat de: <https://www.youtube.com/watch?v=83ULlgpT1UQ> [17 de juny de 2023] [Vídeo]

[Boston Dynamics, 2013]

(2013). Introducing WildCat. *Boston Dynamics*. Recuperat de: <https://www.youtube.com/watch?v=wE3fmFTtP9g> [17 de juny de 2023] [Vídeo]

[Boston Dynamics, s.f.]

(s.f.). Spot® - The Agile Mobile Robot. *Boston Dynamics*. Recuperat de: <https://bostondynamics.com/products/spot/> [26 de febrer de 2023]

[PAL Robotics S.L. & DigiFACT, 2022]

PAL Robotics S.L. & DigiFACT. (2022). CaBot- Robot quadrúpede industrial i robust per navegar en terrenys irregulars. Memòria *Tècnica sol·licitud RD 2022*.

[Song et al., 2020]

Song, X., Yang, Y., Choromanski, K., Caluwaerts, K., Gao, W., Finn, C., & Tan, J. (2020, October). Rapidly adaptable legged robots via evolutionary meta-learning. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3769-3776). IEEE.

[Suzuki et al., 2021]

Suzuki, S., Kano, T., Ijspeert, A. J., & Ishiguro, A. (2021). Sprawling quadruped robot driven by decentralized control with cross-coupled sensory feedback between legs and trunk. *Frontiers in Neurobotics*, *14*, 116.

[de Lasa & Buehler, 2000]

de Lasa, M., & Buehler, M. (2000, October). Dynamic compliant walking of a quadruped robot: preliminary experiments. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots* (pp. 153-160).

[Yi et al., 2021]

Yi, H., Xu, Z., Zhou, L., & Luo, X. (2021). Leg design for delivery quadruped robots based on ema and energy optimization. In *Intelligent Robotics and Applications: 14th International Conference, ICIRA 2021, Yantai, China, October 22–25, 2021, Proceedings, Part III 14* (pp. 771-780). Springer International Publishing.

[Hooks et al., 2020]

Hooks, J., Ahn, M. S., Yu, J., Zhang, X., Zhu, T., Chae, H., & Hong, D. (2020). Alphred: A multi-modal operations quadruped robot for package delivery applications. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *5*(4), 5409-5416.

[Stachowiak et al., 2021]

Stachowiak, M., Koperska, W., Stefaniak, P., Skoczylas, A., & Anufriiev, S. (2021). Procedures of detecting damage to a conveyor belt with use of an inspection legged robot for deep mine infrastructure. *Minerals*, *11*(10), 1040.

[Bertram & Gutmann, 2009]

Bertram, J. E., & Gutmann, A. (2009). Motions of the running horse and cheetah revisited: fundamental mechanics of the transverse and rotary gallop. *Journal of the Royal Society Interface*, *6*(35), 549-559.

Adobe Creative Cloud [www.adobe.com]

(s.f.)¿Qué es la captura de movimiento y cómo funciona?. *Adobe*. Recuperat de: <https://www.adobe.com/es/creativecloud/animation/discover/motion-capture.html> [11 de

març de 2023]

[Counsell, 2015]

Counsell, A., & estudiants de la universitat de Portsmouth. (2015). Dog Motion Capture. Recuperat de: <https://www.youtube.com/watch?v=OYh0jBDjNf4> [12 de març de 2023]
[Vídeo]

[FILExt, s.f.]

(s.f.) Abrir un archivo C3D. *FILExt*. Recuperat de: <https://filext.com/es/extension-de-archivo/C3D#:~:text=Es%20un%20formato%20de%20archivo,captura%20de%20movimi ento%20de%20objetos> [18 de març de 2023]

[C3D Tools]

(s.f.) Free Web Services. *C3D Tools*. Recuperat de: <https://c3dtools.com/> [18 de març de 2023] [Recurs online per transformar arxius de format C3D a TRC]

[Tsai, 2000]

Tsai, L. W. (2000). *Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function*. CRC press.

[Graph Everywhere]

(s.f.) Qué son los grafos. *GRAPH EVERYWHERE*. Recuperat de: <https://www.grapheverywhere.com/que-son-los-grafos/> [1 de Juliol de 2023]

[Portilla, 2017]

Portilla, E. (2017). Grafos o Graphs en JavaScript. *MEDIUM, al blog: LABORATORIA DEVS*. Recuperat de: <https://medium.com/laboratoria-developers/grafos-o-graphs-1e575c89f17> [1 de Juliol de 2023]

[Del Pino]

Del Pino, C., Triedro de Frênet. 6. Recuperat de: <http://matesup.cl/portal/apuntes/cal-vectorial2/066-76-triedro-de-frenet.pdf> [24 de juny de 2023]

[ECTS, 2015]

European Commission, Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, (2015). *ECTS users' guide 2015*, Publications Office.

[BOE, 2023]

BOE (2023). Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería, 59(3), 36040. Recuperat de: <https://www.eic.cat/noticies/-sha-publicat-al-boe-el-xx-conveni-col%C2%B7lectiu-de-les-empreses-d> [11 d'agost de 2023]

[ClickGasoil, 2023]

ClickGasoil. (2023) *Evolución del precio de Gasolina 95 Barcelona*. Recuperat de: <https://www.clickgasoil.com/m/evolucion-del-precio-de-gasolina-95-barcelona> [11 d'agost de 2023]

[MATLAB, 2023]

Pricing and licensing. (s.f.). *MATLAB & Simulink*. Recuperat de: <https://www.mathworks.com/pricing-licensing.html> [25 d'agost de 2023]

[SolidWorks, 2023]

SolidBi. (2023). *Precio SOLIDWORKS - SolidBI*. Recuperat de: <https://solid-bi.es/precio-solidworks/> [25 d'agost de 2023]

[MICROSOFT OFFICE 365, 2023]

fnac (2023). *MICROSOFT OFFICE 365* Recuperat de: <https://www.fnac.es/Microsoft-Office-365/Software/nsh131750> [25 d'agost de 2023]

[Anaconda, 2023]

Anaconda. (s.f.) *Prompt Anaconda.org*. Recuperat de: <https://anaconda.org/conda-forge/prompt>

[Notepad++, 2023]

NotePad++. (s.f.) *Downloads | NotePad++*. Recuperat de: <https://notepad-plus-plus.org/downloads/> [25 d'agost de 2023]

[Inkscape, 2023]

Developers, I. W. (s.f.). *Inkscape 1.3 - Windows : 64-bit*. Recuperat de: <https://inkscape.org/release/inkscape-1.3/windows/64-bit/msi/?redirected=1> [25 d'agost de 2023]

[Escobar, 2023]

Escobar, A. (2023). *Cuánta electricidad consume un ordenador*. *CHC Energía*. Recuperat de: <https://chcenergia.es/blog/cuanto-consume-un-ordenador-o-pc/#:~:text=Cuanta%20electricidad%20consume%20un%20ordenador&text=Y%20es%20que%20al%20igual,en%208%20horas%20de%20trabajo> [11 d'agost de 2023]

[Gencat, 2023]

Gencat. (2023). *Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico*. Recuperat de: https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/index.html#:~:text=El%20mix%20de%20la%20red%20el%C3%A9ctrica%20espa%C3%B1ola%20publicado%20por%20la,g%20CO2eq%2FkWh [11 d'agost de 2023]

[IDAE]

IDAE. (s.f.) Consumo y emisiones de CO₂. Recuperat de:
<https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones#:~:text=Por%20cada%20litro%20de%20gasolina,64%20kg%20de%20CO2.>
[11 d'agost de 2023]

[United Nations, 2023]

United Nations (2023), *Sustainable development goals*. Recuperat de:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/> [22 d'agost de 2023]

Bibliografia complementària

- (2023). Centro de ayuda. *MATLAB*. Recuperat de:
<https://la.mathworks.com/help/MATLAB/>
- Pérez Gracia, A. (2023). Síntesi estructural. *SynthesisCourse – Projectes II*.
[PowerPoint]
- Pérez Gracia, A. (2023). Síntesi estructural II. *SynthesisCourse – Projectes II*.
[PowerPoint]
- Pérez Gracia, A. (2023). Cinemàtica dels robots. *SynthesisCourse – Projectes II*.
[PowerPoint]
- (2023). Unleash Your Innovation. ANACONDA. Recuperat de:
<https://www.anaconda.com/> [Abril de 2023]
- Streefkerk, R. (2021). Guía de citas en el texto según el formato APA. *Scribbr*.
Recuperat de: [https://www.scribbr.es/normas-apa/citas-en-el-texto/#:~:text=La%20abreviatura%20et%20al.,et%20al.%2C%202018\).](https://www.scribbr.es/normas-apa/citas-en-el-texto/#:~:text=La%20abreviatura%20et%20al.,et%20al.%2C%202018).) [25 d'agost de 2023]
- Counsell, A. (s.f.) Motion Capture Studio. Recuperat de:
<http://mocap.port.ac.uk/index.html> [25 d'agost de 2023] [pàgina web del projecte de mocap]

Software utilitzat

- Anaconda. (2023). *Anaconda. The World's Most Popular Data Science Platform*.
Recuperat de: <https://www.anaconda.com>
- Notepad++. (s.f.). *What is Notepad++*. Recuperat de: <https://notepad-plus-plus.org/>
- SOLIDWORKS. (s.f.) *Software de disseny CAD 3D | SOLIDWORKS*. Recuperat de: <https://www.solidworks.com/es>
- MathWorks. (s.f.) *MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico*. Recuperat de:

<https://es.mathworks.com/products/MATLAB.html>

- Microsoft. (s.f.) *Microsoft – Cloud, Computers, Apps & Gaming*. Recuperat de:
<https://www.microsoft.com/>
- Developers, I. W. (f.f.). *Draw Freely | Inkscape*. Recuperat de:
<https://inkscape.org/es/>