
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Gener Rey, Julia Lipin. *Desenvolupament d'un sistema quadrúpede open-source de baix cost amb modelatge i control de locomoció*. Treball de Final de Grau (Universitat Autònoma de Barcelona), 2026 (Enginyeria Informàtica)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/334376>

under the terms of the  license.

Desenvolupament d'un sistema quadrúpede open-source de baix cost amb modelatge i control de locomoció

Julia Lipin Gener Rey

Resum—Els robots quadrúpedes ofereixen avantatges en entorns on altres sistemes de locomoció presenten limitacions, però moltes plataformes existents tenen un cost elevat o una arquitectura poc accessible. Aquest treball presenta el desenvolupament d'un robot quadrúpede open-source de baix cost, orientat a la reproductibilitat i a l'estudi de la locomoció bàsica. El sistema integra una estructura mecànica fabricable mitjançant impressió 3D, components electrònics accessibles, un model cinemàtic directe i invers, i un sistema de control amb calibratge de les articulacions. A més s'ha implementat un patró de trot bàsic per validar el moviment sobre el robot físic. Els resultats mostren que la plataforma és viable, proporcionant una base modular i documentació per poder modificar-la i ampliar-la segons les necessitats de l'usuari.

Paraules clau—Robot quadrúpede, open-source, cinemàtica inversa, locomoció, baix cost, impressió 3D

Abstract—Quadruped robots offer advantages in environments where other locomotion Systems present limitations, but many existing platforms have inflated costs or a less accessible architecture. This work presents the development of a low-cost open-source quadruped robot focused on reproducibility and the study of basic locomotion. The System integrates a 3D-printable mechanical structure, accessible electronic components, a direct and inverse kinematic model, and a control System with servomotor calibration. In addition, a basic trot gait pattern has been implemented to validate movement on the physical robot. The results show the viability of the platform, providing a modular architecture and comprehensive documentation that enable users to modify and extend the System according to their specific needs.

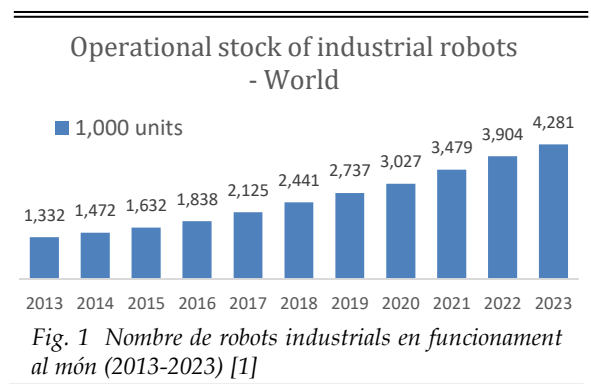
Index Terms—Quadruped robot, open-source, inverse kinematics, locomotion, low-cost, 3D printing

1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

La robòtica ha experimentat un creixement notable en les darreres dècades, impulsada per la necessitat d'automatitzar processos industrials, millorar l'eficiència i desenvolupar noves solucions tecnològiques per a entorns complexos. En aquest context, els sistemes robòtics han evolucionat des de plataformes industrials fixes cap a robots mòbils capaços de desplaçar-se en diferents tipus d'entorns.

Segons dades de la International Federation of Robotics [1], el nombre de robots industrials en funcionament a nivell mundial ha augmentat de manera significativa durant l'última dècada. S'ha passat d'aproximadament 1,3 milions d'unitats l'any 2013 a més de 4,2 milions l'any 2023, com es mostra en la Fig. 1. Aquest creixement, que no mostra signes de desacceleració, reflecteix l'augment de l'automatització en la indústria i l'interès creixent en el desenvolupament de sistemes robòtics avançats.

Aquest creixement a impulsat també al desenvolupament de noves plataformes mòbils dissenyades per operar



en entorns on els robots tradicionals presenten limitacions. Entre aquestes plataformes destaquen els robots quadrúpedes, que ofereixen avantatges respecte a altres sistemes de locomoció com els robots amb rodes, especialment en terrenys irregulars o amb obstacles.

A causa d'aquestes característiques, els robots quadrúpedes han començat a utilitzar-se en aplicacions com la inspecció d'infraestructures, el monitoratge d'instal·lacions industrials o la recerca científica. Paral·lelament en l'àmbit acadèmic han sorgit nombrosos projectes orientats a l'estudi de nous mètodes de locomoció i control.

Tot i aquests avenços, moltes de les plataformes exis-

- E-mail de contacte: generreyjulia4@gmail.com
- Menció realitzada: Computació
- Treball tutoritzat per: Joan Protasio Ramírez (Ciències de la Computació)
- Curs 2025/26

tents presenten limitacions pel que fa a la seva accessibilitat. Les solucions comercials solen tenir un cost elevat i arquitectures propietàries, fet que dificulta el seu ús en entorns educatius o de recerca amb recursos limitats. D'altra banda, alguns projectes acadèmic o open-source no sempre ofereixen una arquitectura clara o una documentació suficient que faciliti la seva reproducció i extensió.

En aquest context, aquest Treball Final de Grau se centra en el desenvolupament d'un quadrúpede open-source de baix cost orientat a la seva reproductibilitat i extensibilitat. El projecte pretén proporcionar una base funcional per a la locomoció en robots quadrúpedes, així com una arquitectura modular que faciliti la seva ampliació amb nous components o funcionalitats.

2 ESTAT DE L'ART

En els darrers anys s'han desenvolupat diverses plataformes de robots quadrúpedes tant en l'àmbit industrial com acadèmic. Aquestes plataformes han permès explorar diferents estratègies de locomoció i han demostrat el potencial dels robots amb potes per operar en entorns complexos.

En l'àmbit industrial, un dels exemples més coneguts és Spot, desenvolupat per Boston Dynamics [2]. Aquest robot quadrúpede està dissenyat per operar en entorns complexos amb una locomoció i integració de sensors realment avançada, però acostuma a tenir un cost elevat i una arquitectura propietària que limiten l'accessibilitat.

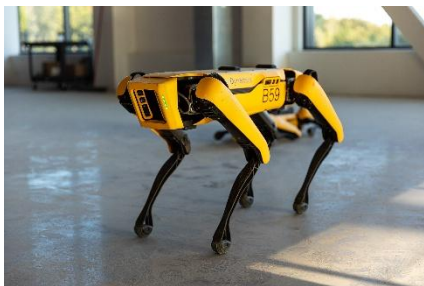


Fig. 2 Spot, quadrúpede desenvolupat per Boston Dynamics [2]

En l'àmbit acadèmic també s'han desenvolupat diverses plataformes experimentals per estudiar el moviment dels robots amb potes. Un exemple és Mini Cheetah, desenvolupat pel Massachusetts Institute of Technology (MIT) [3], que s'utilitza com a plataforma de recerca per investigar locomoció dinàmica amb robots quadrúpedes, cosa que permet moviments complexos com reincorporar-se després d'una caiguda, saltar o realitzar *backflips*, Fig. A1 *apèndix*.

Paral·lelament, també han aparegut projectes orientats a fer més accessible aquest tipus de robots. Un exemple rellevant és Stanford Pupper, una plataforma open-source desenvolupada per Stanford University [4], Fig. 3.

Aquest robot està pensat principalment amb finalitats educatives i de recerca, utilitzant components relativament assequibles. Tot i això, el cost d'aquest tipus de plataforma pot superar fàcilment diversos centenars d'euros, fet que pot limitar la seva adopció en entorns educatius amb recursos reduïts.

Per altra banda, quan parlem de control en robots qua-

drúpedes, es poden diferenciar dues aproximacions: el control basat en model dinàmic, que té en compte les forces i la generació de moviments complexos com córrer o saltar, i el basat en model cinemàtic, que se centra en la geometria del moviment de les potes, sent més senzill i ideal per locomoció bàsica.



Fig. 3 Stanford Pupper, quadrúpede creat per Stanford Students Robotics club [4]

Aquesta diferència en els enfocaments de control subratlla la importància de dissenyar una plataforma que integri un model cinemàtic clar i que permeti als usuaris explorar, entendre i ampliar el sistema amb components addicionals si ho desitgen.

A continuació, la Taula 1 resumeix les principals diferències entre les plataformes esmentades anteriorment i la d'aquest projecte.

TAULA 1
COMPARACIÓ ENTRE PLATAFORMES

Plataforma	Tipus	Cost	Modularitat	Control	Reproductibilitat
Spot	Comercial	~75000€	Baixa	Dinàmic	Baixa
Mini Cheetah	Acadèmic	Alt	Baixa	Dinàmic	Baixa
Pupper	Open-source	>800€	Mitjana	Cinemàtic	Mitjana
Projecte proposat	Open-Source	<300€	Alta	Cinemàtic	Alta

3 ESPECIFICACIÓ DEL SISTEMA

3.1 Objectius

Dissenyar i desenvolupar una plataforma quadrúpede open-source de baix cost, reproduïble en entorns més domèstics, capaç d'executar una locomoció bàsica amb un model cinemàtic formalitzat i arquitectura modular.

- **O1:** Dissenyar l'estructura mecànica del robot modelant el robot en CAD i seleccionant electrònica accessible.
- **O2:** Desenvolupar model cinemàtic de les potes formalitzant i documentant les seves característiques.
- **O3:** Implementar sistema de locomoció bàsic aplicant el model cinemàtic a la pràctica.
- **O4:** Definir una arquitectura modular separant en

mòduls ben definits el sistema.

- **O5:** Garantir la reproductibilitat del projecte elaborant documentació tècnica i un repositori del projecte.

3.2 Requisits

A continuació, es mostren les característiques que el sistema ha de complir per assolir els objectius definits a la subsecció anterior.

TAULA 2
REQUISITS FUNCIONALS

ID	Descripció	Prioritat
RF1	Com a desenvolupador, vull disposar d'un model cinemàtic de les potes que permeti calcular les posicions de les articulacions.	Alta
RF2	Com a robot, vull executar un patró de locomoció bàsic basat en un model cinemàtic per desplaçar-me de manera estable sobre superfícies planes.	Mitja
RF3	Com a robot, vull controlar la posició dels servomotors de les potes per generar els moviments necessaris per caminar.	Mitja
RF4	Com a usuari, vull ampliar el robot amb sensors o actuadors addicionals per adaptar-lo a les funcionalitats que necessito.	Baixa

TAULA 3
REQUISITS NO FUNCIONALS

ID	Descripció	Prioritat
RNF1	Com a usuari, vull que el robot tingui un cost inferior als 300€ per facilitar la seva replicació.	Alta
RNF2	Com a usuari, vull que els components electrònics siguin fàcilment accessibles comercialment per facilitar la construcció.	Alta
RNF3	Com a usuari, vull disposar de documentació tècnica clara per poder comprendre el funcionament i poder modificar el robot.	Alta
RNF4	Com a usuari vull poder reproduir el robot usant els fitxers CAD, el codi i els esquemes proporcionats.	Alta
RNF5	Com a usuari, vull que l'estructura sigui reproducible amb impressió 3D i facilitar la construcció del sistema.	Mitja
RNF6	Com a usuari, vull que l'arquitectura del sistema sigui modular per a facilitar la integració de més components.	Baixa

3.3 Abast i limitacions

Aquest projecte se centra en:

- Disseny mecànic del robot quadrúpede.
- Definició d'un model cinemàtic de les potes.
- Implementació d'un sistema de control per executar la locomoció bàsica.

- Elaboració de documentació per a reproduir el robot.

Així mateix, el projecte no contempla:

- Implementació de locomoció avançada.
- Sistemes de percepció o visió artificial.
- Sistemes de navegació autònoma com SLAM. [5]
- Optimització energètica avançada.
- Implementació d'intel·ligència artificial.

4 METODOLOGIA

4.1 Enfocament

En aquest cas, s'ha adoptat una metodologia Agile basada en Scrum [6], que permet organitzar el treball en iteracions curtes i validar progressivament els diferents components del robot. Aquest enfocament facilita l'adaptació del desenvolupament a mesura que es dissenyen i proven diferents elements del sistema, i per això és un dels motius pel que s'han descartat altres metodologies com Waterfall o Kanban.

El projecte s'ha dividit en sprints de dues setmanes de durada, durant els quals s'ha treballat en diferents tasques relacionades amb el disseny mecànic, el desenvolupament del model cinemàtic i la implementació del sistema de control. Els requisits del sistema s'han gestionat mitjançant un product backlog, definit en forma de tasques que han permès prioritzar les funcionalitats del sistema.

4.2 Estructura de desenvolupament

El desenvolupament del projecte s'ha dut a terme mitjançant sprints, tal com s'ha descrit abans. Tot i això, amb l'objectiu de facilitar la seva comprensió i organització, les tasques s'han agrupat segons els diferents àmbits del sistema desenvolupat.

Aquestes agrupacions han permès estructurar el projecte de manera més clara a nivell conceptual, sense alterar la planificació real basada en sprints.

En aquest sentit es poden identificar els següents blocs de treball:

1. Planificació i disseny:

Definir requisits i dissenyar l'estructura modular inicial, incloent-hi la selecció de components i la creació del model CAD inicial de les parts del robot.

2. Modelatge i simulació:

Formalitzar el model cinemàtic de les potes i realitzar simulacions per validar el moviment.

3. Construcció i muntatge:

Muntar el robot integrant els diferents components i assegurar que el sistema de control bàsic estigui operatiu.

4. Programació i Control:

Desenvolupar el codi de control específic per a la locomoció, coordinant els moviments de les potes i ajustant l'algorisme.

5. Documentació tècnica:

Completar la documentació tècnica del model cinemàtic, el procés de construcció i el repositori.

5 PLANIFICACIÓ

5.1 Tasques i estimació

Per tal d'organitzar el desenvolupament del projecte, s'han identificat les diferents tasques necessàries, apartat anterior, i s'ha realitzat una estimació aproximada del temps requerit per completar-les.

Tant en la taula A1 com la taula A2, dins de l'apèndix A2, es pot veure aquesta informació en detall, a més de la planificació definida i distribuïda en sprints.

5.2 Riscos

El projecte ha presentat possibles riscos tècnics i de planificació associats al desenvolupament i integració del robot quadrúpede.

- Possibles trencaments de peces impreses o components electrònics durant les proves.
- Parells dels servomotors insuficients.
- Retards en integració i proves.
- Superació del pressupost objectiu.

5.3 Seguiment final

Per analitzar el desenvolupament final del projecte, s'ha fet un seguiment global dels sprints a partir de les hores estimades inicialment i les hores relatives invertides. A més s'ha calculat una velocitat relativa per sprint, definida com la relació entre les hores estimades i les hores reals. Aquesta mètrica s'ha utilitzat com indicador temporal per comparar el ritme de cada sprint respecte la planificació inicial.

TAULA 4
TEMPS ESTIMAT VS REAL

Sprint	T estimat	T real	Velocitat
1	34	36	0,94
2	20	22	0,91
3	40	39	1,03
4	32	39	0,82
5	33	40	0,83
6	22	43	0,51
7	22	15	1,47

Com es pot observar a la Taula4, els primers sprints es mantenen relativament propers a la planificació. El 1 i el 2 presenten desviacions moderades, mentre que el sprint 3 queda lleugerament per sota del temps estimat. A partir del Sprint 4, les desviacions augmenten, coincidint amb l'inici del muntatge físic, la integració electrònica i el desenvolupament del control. En aquesta fase també va caldre reimprimir algunes peces trencades que en el seu moment es van imprimir amb menys resistència de la necessària, fet que va allargar lleugerament el procés de muntatge.

El sprint 6 és el que presenta la desviació més elevada, amb un 95% i una velocitat relativa de 0,51. Aquesta diferència es deu principalment a la complexitat de validar la

interacció entre el control i el robot físic i els ajustos necessaris per suavitzar els moviments. Durant aquest procés es van realitzar nombroses proves i modificacions dels paràmetres de control per aconseguir moviments més fluidos i naturals, fet que va incrementar el temps de validació. A més, durant aquestes proves la PCA9685 va acabar fallant, a causa dels moviments inicials que es van programar, sent aquests massa bruscos, que van fer que els servos demanessin tots alhora massa corrent que la pca no pot aguantar. Aquesta incidència va obligar a aturar temporalment les proves fins a rebre una nova placa, incrementant encara més el temps real de sprints. En canvi, el Sprint 7 és el més ràpid, amb una desviació del -37% i una velocitat relativa de 1,47, ja que part de la documentació tècnica ja s'havia avançat anteriorment a l'hora de fer els informes.

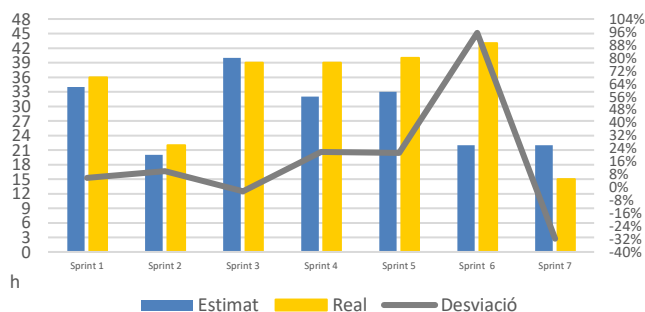


Fig. 4 Desviació de temps de sprints realitzades

Així doncs, la fig. 4 mostra més clar com les desviacions més importants es concentren en les fases d'integració i validació física, mentre que les fases inicials i la documentació s'ha mantingut més properes al temps esperat.

En conjunt, la planificació inicial ha servit com a guia general del projecte, tot i que la velocitat dels sprints no ha estat constant. Les tasques relacionades amb el robot físic han requerit més temps i iteracions, però l'organització per sprints ha permès adaptar el desenvolupament i mantenir el projecte alineat amb els objectius definits.

6 ARQUITECTURA I DESENVOLUPAMENT

En aquest apartat es descriu el disseny i la implementació de les diferents parts del sistema.

Concretament s'expliquen el bloc mecànic, electrònic i de control, així com la seva relació dins del funcionament global del robot.

6.1 Arquitectura del sistema

El sistema desenvolupat es basa en una arquitectura modular dividida en tres blocs principals: mecànic, electrònic i de control. Això, permet separar les diferents funcionalitats i facilitar el desenvolupament progressiu del sistema. A més, aquesta divisió ha facilitat la integració i validació de cada part per separat, així com la detecció d'errors i poder modificar blocs aïlladament sense alterar la resta de l'arquitectura.

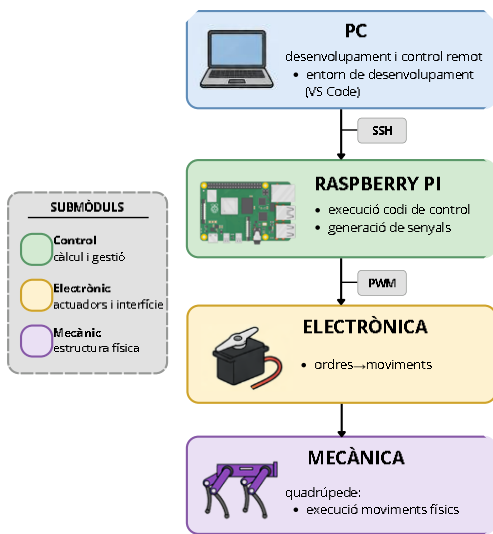


Fig. 5 Esquema de l'arquitectura modular del sistema

6.2 Disseny mecànic (CAD)

En el cas del disseny mecànic, s'ha desenvolupat mitjançant eines de modelatge CAD, concretament Autodesk Fusion 360, amb una configuració quadrúpede formada per un cos central, quatre potes articulades i una carcassa a la part superior i inferior.

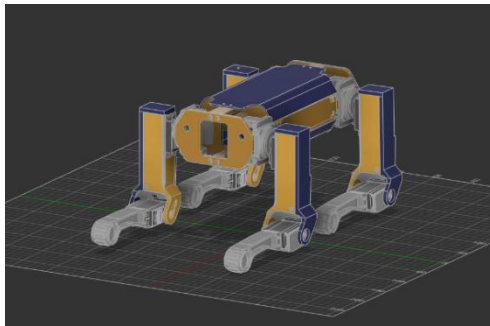


Fig. 6 Disseny CAD del quadrúpede desenvolupat

El disseny s'ha basat en quadrúpedes ja existents com el SpotMicro [2] i altres plataformes esmentades anteriorment. A més, s'han tingut en compte els principis de funcionament dels robots quadrúpedes pel que fa a la configuració mecànica i la locomoció [7], adaptant-los a una arquitectura orientada a la simplicitat.

Cada pota està formada per diversos segments articulats que proporcionen els graus de llibertat necessaris per a la locomoció. També s'han tingut en compte aspectes com la distribució de masses i la posició del centre de gravetat, amb l'objectiu de garantir l'estabilitat del robot i un correcte equilibri durant el moviment.

Així doncs, el disseny s'ha plantejat de manera òptima per a la seva fabricació mitjançant impressió 3D, cosa que permet una fàcil construcció, modificació i adaptació del sistema.

6.3 Electrònica

El sistema electrònic del robot s'ha enfocat a garantir un funcionament fiable, mantenint alhora un cost reduït i una arquitectura senzilla.

Com a unitat principal de control s'ha seleccionat una Raspberry Pi 4B de 8GB, gràcies a la seva capacitat de processament i flexibilitat, especialment adequada per a la possible integració futura d'algoritmes d'intel·ligència artificial. Aquest component es complementa amb un controlador de servos PCA9685, que permet gestionar múltiples servos de manera eficient.

Pel que fa als actuadors, s'han triat els servos MG996R, ja que ofereixen un bon equilibri entre parell, cost i disponibilitat, sent lo prou forts per moure l'estructura del robot.

Així mateix, s'ha triat una bateria LiPo 2S de 5200 mAh, que proporciona una autonomia adequada i la capacitat de subministrar el corrent necessari als servos. La distribució de l'energia es realitza mitjançant una connexió en paral·lel amb connector XT60.

Per adaptar els nivells de tensió als diferents components, s'han buscat dos convertidors step-down, de 5V 5A i de 6V 20 A, destinats a alimentar la Raspberry Pi i els servos, respectivament.

A la Fig. 6 es mostra l'esquema de connexions del sistema electrònic, on es pot observar la distribució de l'alimentació i la interconnexió entre els diferents components, mentre que a la taula A3 es presenta una llista dels components amb les seves quantitats i els preus associats.

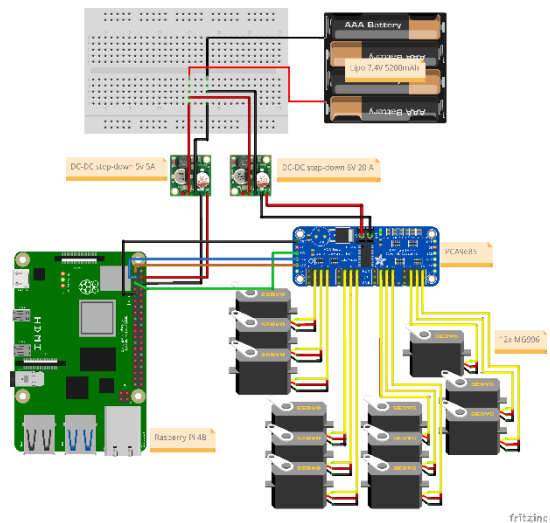


Fig. 7 Diagrama de connexions del robot quadrúpede

6.4 Model cinemàtic

Per poder controlar el moviment del robot, ha estat necessari disposar d'un model que relaciones la posició de les potes amb els angles de les seves articulacions/servos. Aquest model es coneix com a model cinemàtic.

En aquest context, es distingeixen dues "estratègies" computacionals. D'una banda, la cinemàtica directa, que permet calcular la posició de la pota a partir dels angles de les articulacions i, per altra banda, la cinemàtica inversa, sent aquesta el procés contrari: calcular els angles de les articulacions a partir de la posició desitjada de la pota.

Per a la cinemàtica directa, s'ha utilitzat una formulació basada en matrius de transformació homogènies que permeten representar de manera conjunta les rotacions i translacions entre els diferents segments de la pota, molt usades en robòtica.[8]

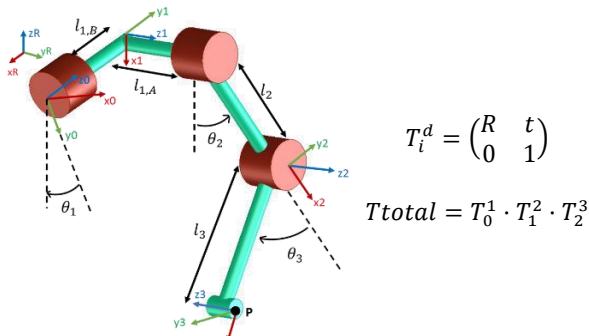


Fig. 8 Representació de la cadena dels diferents sistemes de referència d'una pota robòtica [9]

Com a exemple, la Fig. 8 mostra la representació d'una pota, on cada articulació defineix un nou sistema de referència, d , respecte a l'anterior, i . La relació entre aquests sistemes es descriu mitjançant una matriu de transformació T_i^d , formada per una matriu de rotació R i un vector de translació t .

La matriu $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ descriu com estan orientats els eixos d'un sistema respecte a un altre, mentre que el vector $t \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ representa la translació necessària per passar d'un sistema de coordenades a un altre.

Així doncs, mitjançant la composició successiva d'aquestes matrius de transformació entre segments consecutius, T_{total} , es pot obtenir la posició final del peu a partir del sistema de referència de l'articulació inicial.

Per a la resolució de la cinemàtica inversa, s'ha adoptat una aproximació geomètrica basada en trigonometria. En aquest cas, la pota es modela com un conjunt de segments que formen triangles, i a partir de la posició desitjada del peu es calculen els angles de les articulacions.

Aquests càlculs es poden trobar en l'apèndix A4.

Finalment, cal destacar que la cinemàtica directa i inversa, tot i ser processos inversos l'un de l'altre, en el nostre cas són complementàries. Per al càlcul de la cinemàtica inversa és necessari expressar la posició desitjada del peu en el sistema de referència local de cada pota, fet que es realitza mitjançant les transformacions associades a la cinemàtica directa. D'aquesta manera, la cinemàtica directa també permet transformar coordenades entre el sistema global (tot el robot), i local (cada pota), facilitant la correcta resolució dels angles del model.

6.5 Locomoció

La locomoció del robot s'ha plantejat a partir del model cinemàtic anterior. És a dir, en lloc d'assignar directament angles als servomotors, el sistema parteix de les coordenades objectius dels peus i, a partir d'aquesta, calcula els angles necessaris per arribar-hi.

Per generar aquestes coordenades, s'ha implementat un mòdul de marxa anomenat TrotGait, que és l'encarregat de calcular la següent posició de cada peu respecte a la seva posició actual. Aquest mòdul rep com a paràmetre la longitud de pas, l'alçada a la qual s'ha d'aixecar el peu i el període del cicle de marxa i, a partir d'aquests valors i del temps transcorregut, genera les noves coordenades que posteriorment s'envien al model cinemàtic per calcular els angles corresponents.

La marxa implementa en el gait a sigut del tipus trot, en què les potes es mouen per parelles diagonals i en dues fases diferents:

1. Fase de suport: el peu es manté a terra i es desplaça respecte al cos del robot.
2. Fase de balanceig: el peu s'eleva i avança seguint una trajectòria suau.

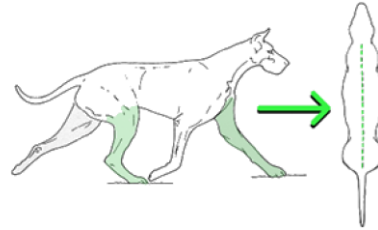


Fig. 9 Demostració gràfica de les dues fases de trot, on les potes verdes estan en la fase de suport. [10]

Abans d'executar el moviment, també s'ha definit una postura inicial estable per a les quatre potes. Aquesta postura serveix com a punt de partida del patró de marxa, de manera que el gait calcula les posicions següents dels peus a partir d'aquesta configuració inicial i no d'una posició que pogués comprometre el seu equilibri.

6.6 Control

Per enviar els angles calculats pel model cinemàtic al robot físic, ha fet falta una conversió prèvia, ja que els valors obtinguts a la simulació no coincideixen necessàriament amb els angles reals dels servomotors. Aquesta diferència es deu principalment a la posició física en què s'ha muntat cada servo, a l'orientació de les articulacions i el fet que cada pota no està disposada exactament de la mateixa manera dins l'estructura del robot.

Per aquest motiu, abans d'executar la locomoció s'ha realitzat un calibratge. Bàsicament, s'ha definit una posició de referència per a cada articulació i s'ha comprovat, de manera individual, quin angle real de servo corresponia a la posició esperada pel model. Això ha permès obtenir dos grups d'angles equivalents: un grup de la simulació i un altre del robot real.

Un cop obtinguts aquests dos grups, que els anomenarem de referència, quan el model cinemàtic genera nous angles, es calcula les diferències respecte als angles de referència de la simulació, per a després aplicar-les als angles de referència del robot real i posteriorment ser enviats als servos a través de PCA9685.

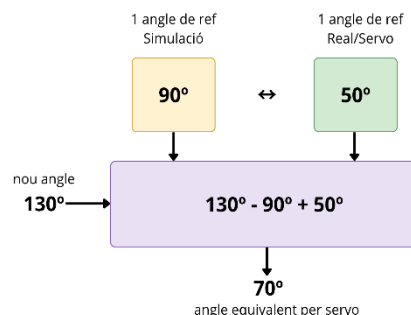


Fig. 10 Transformació d'un angle de simulació a un "real"

En altres paraules, al rebre un nou angle de la simulació, es mira quant desplaçament ha fet respecte a l'angle de referència corresponent i se li afegeix al angle de ref. del servo i així aconseguir l'angle equivalent del nou en el món real.

A més, s'ha limitat el rang d'angles enviats als servomotors entre 0 a 180°, evitant valors fora de rang físic admès i reduint el risc de forçar articulacions.

6.7 Arquitectura del codi

El codi del robot s'ha estructurat modularment, separant les diferents responsabilitats en mòduls o classes facilitant el desenvolupament i la detecció de possibles fallades.

El flux de funcionament és el següent:

1. **Robot:** és una classe que representa el robot complet, integra les quatre potes i rep les coordenades globals dels peus.
2. **Leg:** cada pota del robot. Rep les coordenades globals i les passa a locals per usar la cinemàtica inversa i retornar els angles de les articulacions, a part de guardar-los com atributs.
3. **kinematics:** es el mòdul que implementa les transformacions geomètriques i la cinemàtica inversa.
4. **matrixTransformations:** genera les matrius de rotació, translació i transformacions homogènies, per passar les coordenades globals a locals, com es menciona en l'apartat 6.4 sobre la cinemàtica directa.
5. **TrotGait:** calcula les següents coordenades a les que ha d'anar cada peu respecte a les actual per poder caminar.
6. **ServoControler:** al rebre els angles calculats pel model cinemàtic els converteix en els angles reals per als servomotors i els envia a la PCA.
7. **walking:** es un script que coordina tot el sistema, des de inicialitzar les diferents classes fins al enviament dels angles al controlador de servos.

També s'ha programat tres scripts per a poder visualitzar prèviament quins angles, posició i/o animació de moviments obtindria el robot al donar-li diferents coordenades.

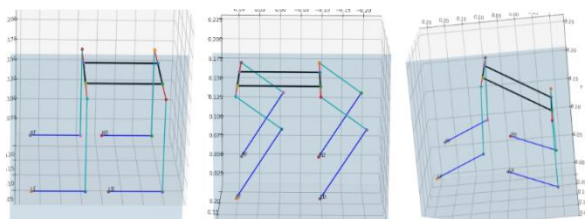


Fig. 11 Previsualització amb el codi de posicions

6.8 Testing

Per comprovar el correcte funcionament del sistema, s'ha realitzat diferents proves de manera progressiva, començant per la simulació i acabant amb la validació sobre el robot físic. En primer lloc, s'ha verificat que els angles calculats mitjançant cinemàtica inversa coincidissin amb els valors esperats obtinguts matemàticament per a diferents configuracions de les potes, assegurant així la correcció dels càlculs abans de la seva aplicació al robot real. També

s'ha verificat el model cinemàtic mitjançant scripts de visualització, comprovant que les posicions dels peus generessin angles coherents i que el robot adoptés la postura esperada abans d'enviar cap ordre als servomotors

Un cop validada la part de simulació, s'han fet proves individuals dels servos per verificar la connexió amb la PCA9685 i comprovar que cada canal corresponia a l'articulació esperada. Aquestes proves també han servit per realitzar el calibratge dels angles, comparant les posicions de referència del model amb les posicions reals del robot.

Després, s'han validat postures estàtiques, especialment la posició inicial estable, per assegurar que el robot podia mantenir-se recolzat correctament abans d'executar el patró de locomoció. Finalment, s'han fet proves de moviment amb el TrotGait sobre el robot físic, ajustant paràmetres com l'alçada del pas, la longitud de pas, el període del cicle i la suavitat del moviment. Aquest procés ha permès detectar diferències entre la simulació i el comportament real, així com corregir moviments massa bruscos i millorar progressivament l'estabilitat del sistema.

7 RESULTATS

Fins al moment, el projecte ha completat la majoria dels objectius i requisits definits inicialment, integrant els diferents avenços que s'han anat fent.

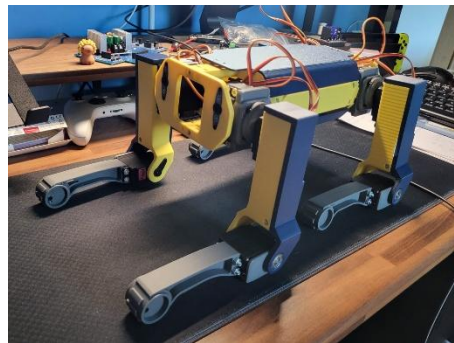


Fig. 12 Estat final del robot després del muntatge

El disseny mecànic s'ha finalitzat amb èxit, incloent-hi el cos central i les quatre potes articulades complint amb l'objectiu O1 de crear una estructura estable i reproducible, a part d'haver-lo pogut muntar a partir d'impressió 3D. El model CAD, fig.6 ha permès validar la geometria del robot i assegurar la mobilitat necessària perquè cap articulació es quedi encallada.

L'electrònica està completament integrada, amb Raspberry Pi, PCA9685 i els 12 servos MG996R, complint l'objectiu O4 i els requisits RNF1 i RF2 de components fàcils de trobar i cost accessible. La taula A2 indica que els costos s'han mantingut un 25% per sota del límit establert.

En el cas del model cinemàtic, ha estat implementat completament, amb cinemàtica directa i inversa, cosa que permet calcular els angles de les articulacions a partir de la posició dels peus, a més de poder veure la posició que adoptaria, complint O2 i RF1. La locomoció implementada amb TrotGait també s'ha pogut validar sobre el robot físic. El robot aconsegueix desplaçar-se d'un punt A a un punt B en línia recta sobre una superfície plana, fet que permet considerar assolits O3, RF2 i RF3. Tot i això, el moviment

encara presenta marge de millora, especialment pel que fa a estabilitat i suavitat.

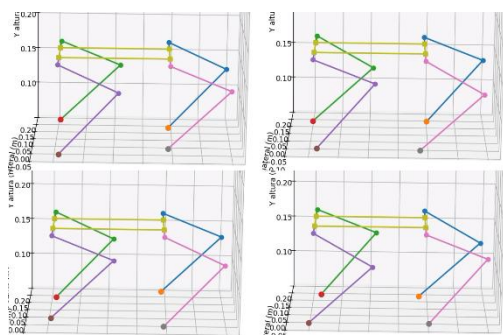


Fig. 13 Frames de la simulació de trot. Simulació completa a [11].

Un altre resultat rellevant és la documentació tècnica de muntatge, disponible a [12], de la qual també s'inclouen algunes pàgines en l'A5. Aquesta documentació explica el procés d'assemblatge del robot amb un enfocament principalment visual, utilitzant el mínim de text possible i mostrant els passos de manera seqüencial. A més, s'han tingut en compte diferents punts de vista per facilitar la comprensió de l'orientació i la posició de cada peça durant el muntatge. D'aquesta manera, les instruccions permeten que el procés sigui més clar i fàcil de seguir, reforçant encara més l'objectiu O5.

Finalment, l'organització d'un repositori, juntament amb el codi de cinemàtica, els fitxers CAD i la documentació tècnica generada, permeten disposar del material necessari perquè el robot pugui ser reproduït i adaptat per altres usuaris.

8 CONCLUSIONS

Els resultats obtinguts mostren que el projecte ha establert una plataforma quadrúpede open-source de baix cost, funcional i reproduïble, amb una integració mecànica i electrònica coherent i un model cinemàtic capaç de calcular els angles de les articulacions segons la posició dels peus. La majoria d'objectius i requisits inicials s'han complert, incloent-hi el muntatge mitjançant impressió 3D, la integració de l'electrònica, la implementació del model cinemàtic, la validació bàsica sobre el robot físic i l'elaboració de documentació.

Durant el desenvolupament del projecte han aparegut tant aspectes que han facilitat el treball com dificultats. La integració electrònica s'ha pogut realitzar sense grans complicacions gràcies al disseny previ de les connexions i a l'ús de components coneguts com la Raspberry Pi i el controlador. En canvi, la fase de validació física ha posat de manifest diverses limitacions del robot real, relacionades amb el pes, la distribució de masses, el parell dels servos, la tolerància i la brusquedat dels moviments, que la simulació no té en compte. A més, durant el desenvolupament s'han produït incidències com la fallada de la PCA9685 i el trencament d'algunes peces impreses.

D'altra banda, tot i que aquestes incidències han provocat alguns endarreriments, s'han pogut detectar i aïllar ràpidament, donant encara més importància al fet d'haver

estructurat el sistema de manera modular i fer la validació progressivament.

Pel que fa la locomoció, el robot ha aconseguit desplaçar-se, fet que confirma la integració entre el model cinemàtic, el sistema de control i l'estructura física. Tot i això, cal remarcar que el moviment obtingut és bàsic i no optimitzat, ja que el patró implementat correspon a un algorisme de trot molt senzill pensat per comprovar el funcionament conjunt del sistema, i no per aconseguir una marxa avançada o comparable a la d'un robot comercial.

Finalment, encara que el desplaçament sigui aquest, el resultat reforça la viabilitat de la plataforma i el seu caràcter open-source. El fet de disposar d'una base clara i modular permet que el sistema pugui ser modificat, ajustat i ampliat de diverses maneres, de manera que les limitacions actuals es puguin abordar en futures versions dependent de la funcionalitat que se li vulgui donar a aquest sistema.

Com a línies futures, un dels passos importants seria millorar la simulació perquè tinguí en consideració aquestes limitacions del robot físic. Això permetria representar millor el comportament del sistema i facilitar encara més la implementació d'altres patrons de locomoció, així com per exemple tècniques d'aprenentatge automàtic, com ara l'aprenentatge per reforç, per estudiar l'evolució i optimització de la locomoció.

Finalment, més enllà dels objectius d'aquest treball, una millora que també m'interessaria seria dissenyar una PCB pròpia per ordenar millor el cablejat intern. Tenint en compte que no és imprescindible i que en cas de voler afegir nous components, aquesta hauria de ser també modificada.

ÚS DE LA IA GENERATIVA

Aquestes eines s'han usat per a millorar la claredat i coherència del text, així com per ajudar a l'organització del contingut. No obstant això, totes les decisions tècniques, el desenvolupament i la implementació han sigut realitzats íntegrament sense l'ajut d'aquestes.

En concret han sigut un suport lingüístic i no han influït en el contingut tècnic ni els resultats.

AGRAÏMENTS

Vull agrair al meu tutor el seguiment i els comentaris aportats durant el desenvolupament del projecte, especialment en la revisió dels diferents apartats i en la manera de presentar-los.

També vull donar gràcies a l'equip d'Open Labs per haver-me facilitat l'espai i algun component necessaris per treballar en el muntatge i les proves del robot, així com per ajudar-me a resoldre algun problema puntual que hagi pogut sorgir o donar-me idees.

Finalment, agraeixo a la meua família i amics que m'han donat suport durant tot el procés, sent comprensius i pacients especialment en les fases on pitjor ho he passat.

Bibliografia

- [1] International Federation of Robotics, "World Robotics 2024 – Industrial Robots." Available: <https://ifr.org> [Accessed: Mar.2026].
- [2] Boston Dynamics, "Spot® – The Agile Mobile Robot," Available at: <https://www.bostondynamics.com/products/spot>. [Accessed: Jan. 2026].
- [3] Massachusetts Institute of Technology, "Mini Cheetah: A High-Performance Quadruped Robot," Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8593885>. [Accessed: Mar. 2026].
- [4] Stanford University, "Stanford Pupper: An Open-Source Quadruped Robot," Available at: <https://pupper-v3-documentation.readthedocs.io>. [Accessed: Mar. 2026].
- [5] MathWorks, "SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)," Available at: <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>. [Accessed: Feb. 2026].
- [6] K. Schwaber and J. Sutherland, "The Scrum Guide," Available at: <https://scrum.org>. [Accessed: Feb. 2026].
- [7] S. Mathew, "Spot Robot: Design and Engineering," Available at: <https://sabinmathew.com/spot-robot-design-and-engineering/>. [Accessed: Mar. 2026].
- [8] J. Nassour, "Transformation Matrices," Available at: <https://www.tu-chemnitz.de/informatik/KI/edu/robotik/ws2017/trans.mat.pdf>. [Accessed: Mar.2026]
- [9] "Schematic representation of the open chain kinematics of the robotic leg," ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-open-chain-kinematics-of-the-robotic-leg-leftSketch-of_fig1_375315092 [Accessed: Mar.2026]
- [10] Canine Conditioning Coach, "The Truth About Pacing in Dogs: A Sign of Compensation, Not Efficiency," Available at: <https://canineconditioningcoach.com/the-truth-about-pacing-in-dogs-a-sign-of-compensation-not-efficiency/>. [Accessed: Apr, 2026].
- [11] J. Gener, "Animació del patró TrotGait del robot quadrúpede," Material creat per l'estudiant, Available at: <https://youtube.com/shorts/mIFCHWnmA-A?feature=share>
- [12] J. Gener, "Instruccions de robot quadrúpede," Material creat per l'estudiant, Available at: <https://drive.google.com/file/d/1JGGL9OVxO3q5nr2eejpmzw3syaBnxjxs/view?usp=sharing>

APÈNDIX

A1. MINI CHEETAH



Fig. A1 Mini Cheetah en estat normal, realitzant un salt i rebent un cop per demostrar estabilitat [3]

A2. PLANIFICACIÓ

TAULA A1
TASQUES I ESTIMACIÓ DE TEMPS

Bloc	Tasca	Temps Estimat
Planificació i disseny	1. Definició de requisits i especificacions	20
	2. Disseny model CAD	18
	3. Selecció de components	10
	4. Disseny connexions	6
Modelatge i simulació	5. Desenvolupament model cinemàtic	20
	6. Simulacions per validar moviment bàsic	20
Construcció i muntatge	7. Muntatge de les parts mecàniques	16
	8. Integració dels components electrònics	16
	9. Configuració inicial del sistema de control bàsic	12
Programació i control	10. Desenvolupament codi de control per locomoció	11
	11. Validar interacció entre control i robot	20
	12. Realitzar ajustos necessaris per millorar el rendiment i estabilitat del moviment	12
Documentació tècnica	13. Redactar documentació sobre algoritme de locomoció	8
	14. Redactar documentació de construcció i muntatge	8
	15. Organització repositori i revisió final	6

TAULA A2
SPRINTS

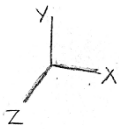
Sprint	Inici	Fi	Treball
Sprint 1	17/02	02/03	Definició de requisits i especificacions i inici de disseny del model CAD.
Sprint 2	03/03	16/03	Finalització model CAD, selecció de components i disseny de connexions del sistema.
Sprint 3	17/03	30/03	Desenvolupament del model cinemàtic de les potes i simulacions per validar el moviment bàsic.
Sprint 4	31/03	13/04	Muntatge de les parts mecàniques i integració dels components electrònics del robot.
Sprint 5	14/04	27/04	Configuració inicial del sistema de control i desenvolupament del codi de locomoció.
Sprint 6	28/04	11/05	Validació de la interacció entre el control i el robot i ajustos per millorar l'estabilitat del moviment.
Sprint 7	12/05	25/05	Elaboració de la documentació tècnica del projecte i organització del repositori final.

A3. PRESSUPOST

TAULA A3
PRESSUPOST COMPONENTS DEL ROBOT

Component	Quantitat	Preu
Raspberry Pi 4B 8GB	1	84,95€
PCA9685	1	24,46€
Servo MG996R	12	38,93€
Cable paral·lel XT60	1	2,97€
LiPo 2S 5200mAh 80C	1	20,99€
Step-down 5V 5A	1	24,46€
Step-down 6V 20A	1	26,24€
Adaptadors XT60	2	2,98€
Cargoleria i Cablejat		15€
PREU TOTAL		223,72€

A4. MODEL CINEMÀTIC

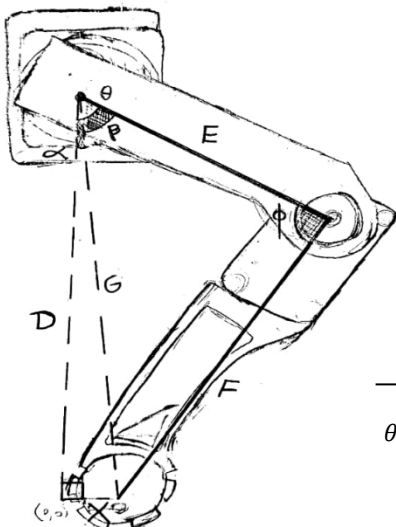


$$\alpha = \arctan\left(\frac{Z}{Y}\right)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{D}{A}\right)$$

$$\omega = \alpha + \beta$$

$$\omega = \arctan\left(\frac{Z}{Y}\right) + \arctan\left(\frac{D}{A}\right)$$



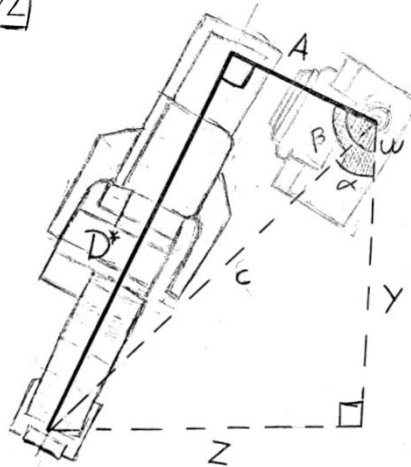
$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{D}\right)$$

$$\frac{\sin\beta}{F} = \frac{\sin\phi}{G}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{F \cdot \sin\phi}{G}\right)$$

$$\theta = \alpha + \beta$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{x}{D}\right) + \arcsin\left(\frac{F \cdot \sin\phi}{G}\right)$$



$$C = \sqrt{Z^2 + Y^2}$$

$$D = \sqrt{C^2 - A^2}$$

$$D = \sqrt{(\sqrt{Z^2 + Y^2})^2 - A^2}$$

$$D = \sqrt{Z^2 + Y^2 - A^2}$$

$$G = \sqrt{D^2 + X^2}$$

$$G^2 = E^2 + F^2 - 2 \cdot E \cdot F \cdot \cos\phi$$

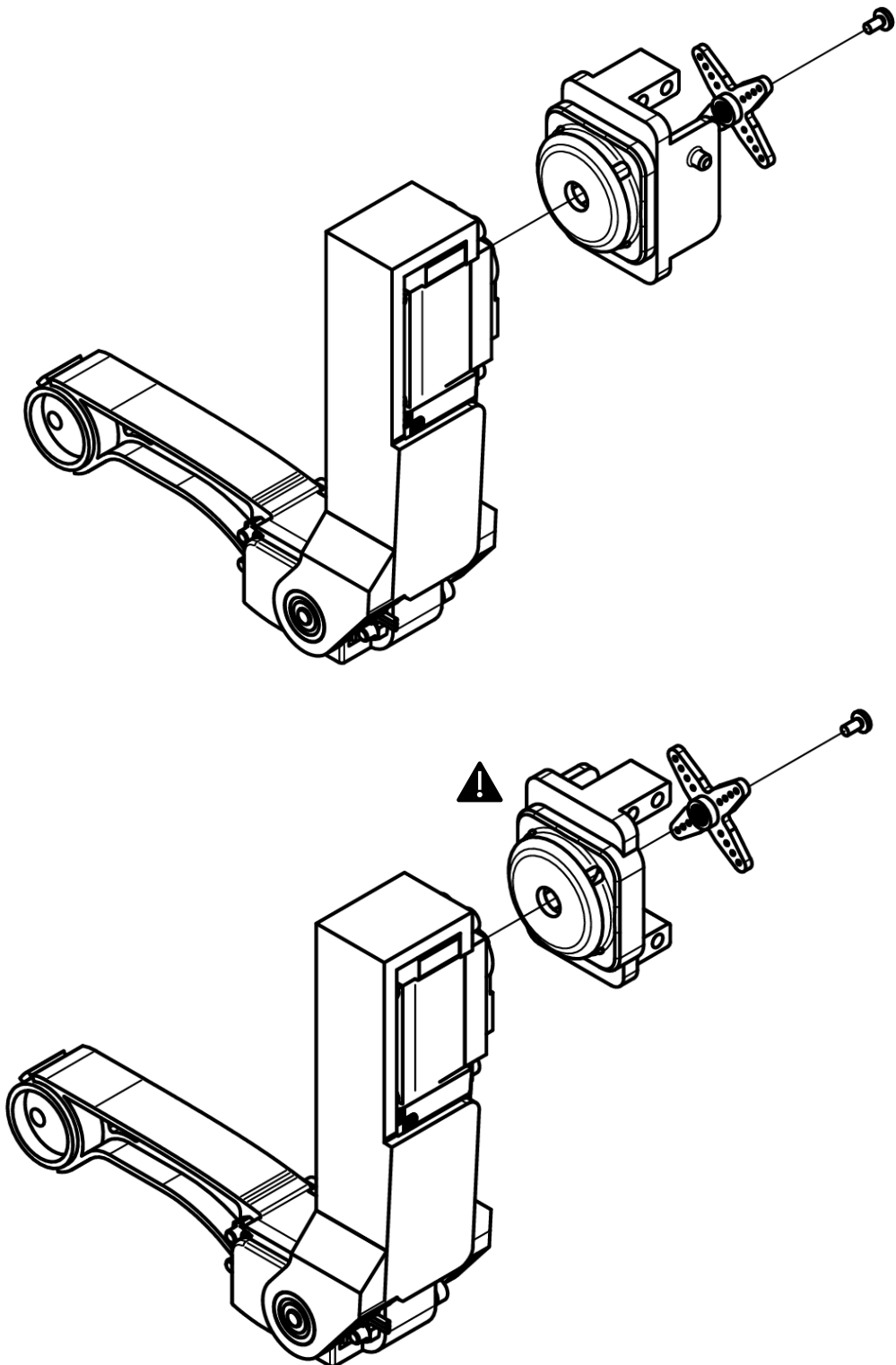
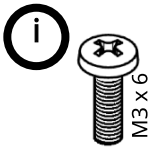
$$G^2 - E^2 - F^2 = -2 \cdot E \cdot F \cdot \cos\phi$$

$$\frac{G^2 - E^2 - F^2}{-2 \cdot E \cdot F} = \cos\phi$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{G^2 - E^2 - F^2}{-2 \cdot E \cdot F}\right)$$

Fig. A2 Càlculs trigonomètrics per a la resolució de la cinemàtica inversa en sistema de referència local

A5. INSTRUCCIONS ESPATLLES ESQUERRES



⚠ This shoulder is not the same type as the one from the front left.

