

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Objectius de la tesi

L'objectiu principal d'aquesta tesi és desenvolupar i caracteritzar adequadament un accionament pensat per a la seva aplicació a robots caminadors. Les principals especificacions són que ha de ser lleuger, de reduïdes dimensions, fàcilment controlable i d'elevat rendiment.

Es pretén arribar al disseny detallat de tot el conjunt mecànic, essent els principals elements que el formen un motor de corrent continu, una transmissió per corretja dentada i un reductor *Harmonic Drive*[®]. Tot i així no es contempla el dimensionat final de totes les peces ni el càlcul resistent i de duració dels diferents elements.

Es vol caracteritzar l'accionament de manera que es puguin definir uns models matemàtics que representin adequadament el seu comportament dinàmic i energètic. Aquests models han de tenir en compte la inèrcia dels components de l'accionament i les resistències passives, en funció de les condicions de funcionament: el parell i la velocitat a la sortida de l'accionament. Cal analitzar el comportament quan la velocitat i el parell exercit per l'accionament té el mateix sentit i també quan té sentit contrari.

Un pas previ al desenvolupament de l'accionament és la determinació dels seus requeriments, corresponents a les diferents articulacions d'una pota al llarg d'un cicle de l'anadura. Els requeriments són funció de les accions externes sobre la pota i de la inèrcia de la mateixa pota, i la seva determinació s'ha portat a terme a partir d'un model tridimensional del mecanisme de la pota i mitjançant una simulació dinàmica del seu funcionament.

Els models definits són l'eina bàsica per estudiar acuradament el comportament dinàmic de tot el sistema, incloses les inèrcies de tots els components i les resistències passives que s'oposen al moviment. Aquesta anàlisi permet conèixer la potència instantània transmesa a cada element de l'accionament i avaluar el consum energètic del conjunt, que depèn de les condicions d'operació del robot –segons el tipus de terreny per on camina, la velocitat d'avanç o el tipus d'anadura que segueix–.

Els models obtinguts permeten simular el funcionament de diferents dissenys del mecanisme de la pota i diferents condicions d'operació. Es pot analitzar la influència en el consum energètic de multitud de paràmetres com la velocitat d'avanç, el tipus d'anadura, el factor de servei de cada pota, la trajectòria del peu en la fase de

transferència, la longitud dels membres del mecanisme o la posició mitjana del peu respecte al cos del robot.

L'estudi presentat en aquesta tesi es basa en el cas d'un robot caminador hexàpode seguint un funcionament segons un criteri d'estabilitat estàtica. Les consideracions de robot hexàpode i d'estabilitat estàtica s'han tingut en compte a l'hora de determinar les especificacions concretes d'accionament a cada articulació del mecanisme de la pota. La caracterització que després s'ha obtingut de l'accionament és aplicable tant a aquest cas com a altres tipologies de robot, i també a modes de funcionament del robot segons criteris d'estabilitat dinàmica.

1.2 Interès dels vehicles caminadors

Des de la seva invenció, milers d'anys enrera, la roda ha estat la base de pràcticament tots els vehicles i les màquines mòbils terrestres, amb tracció animal o mecànica. La seva simplicitat de funcionament i el fet que permet el desplaçament relatiu entre dos cossos substituint la fricció entre ells per un rodolament, menys agressiu i amb una molt menor resistència a l'avanç, fan de la roda un element gairebé imprescindible en els vehicles terrestres. Si bé els trineus i altres vehicles amb esquís són una important excepció, molt útils quan es tracta de desplaçar-se sobre terrenys amb superfícies lliscants, com neu o gel, amb una mínima pressió superficial sobre el terreny.

No va ser fins al segle XX que, pensant en l'aplicació als vehicles de tracció mecànica, les rodes es van complementar amb cadenes al seu voltant i van aparèixer així els vehicles tipus eruga. Aquests aportaven una millora en les aptitud tot-terreny, incrementant l'adherència amb el terra i disminuint a la vegada la pressió de contacte sobre aquest. Tot i així ni les rodes ni les cadenes són la millor opció quan es tracta d'avançar per un terreny irregular, amb fortes pendents, desnivells bruscs o obstacles. Tant les unes com les altres, encara que a diferent nivell, necessiten un terreny continu sobre el que avançar i la seva adherència és limitada.

Segurament els primers intents d'aconseguir un vehicle o màquina mòbil caminadors, suportats exclusivament sobre potes, es van deure més a un intent de copiar la naturalesa, d'imitar el moviment dels animals, que a l'interès per donar resposta a una determinada necessitat de mobilitat.

Actualment la motivació principal que justifica el desenvolupament de robots caminadors és aconseguir robots o vehicles de major mobilitat en terrenys difícils, com són les pendents pronunciades, escales, terrenys no pavimentats i amb materials solts o espais amb obstacles diversos.

Avui en dia es disposa de modernes infraestructures, com les carreteres i els ferrocarrils, que faciliten enormement els desplaçaments en vehicles sobre rodes. Tot i així, segons Song i Waldron (1989) es calcula que aproximadament la meitat de la superfície terrestre no es accessible ni als més moderns i desenvolupats vehicles tot-terreny basats en rodes o cadenes, quan molts animals caminadors, inclòs l'home, es mouen amb certa facilitat per la major part d'aquest terreny difícil.

1.2.1 Avantatges dels robots caminadors sobre terreny irregular

1. *Major mobilitat i aptituds tot-terreny.* No és necessària la continuïtat de la superfície de suport, doncs n'hi ha prou amb disposar d'un conjunt discret de punts o zones on recolzar els peus. A més es poden afrontar desnivells brusc, com esglaons, elevant o baixant el peu abans de recolzar-lo. La locomoció amb potes permet també avançar en diferents direccions, sense necessitat de maniobrar.
2. *Suavitat de marxa del cos del robot.* Els elements que estan successivament en contacte amb el terra, els peus, tenen una gran mobilitat respecte al cos, no únicament en sentit vertical –com passa gràcies a la suspensió entre les rodes i el xassis en un vehicle convencional– sinó també en sentit longitudinal i transversal. Aquesta mobilitat és a més independent entre els diferents peus i així s'absorbeixen millor les irregularitats del terreny, doncs es pot adaptar en major grau la posició relativa dels punts de contacte amb el terra respecte al cos.
3. *Velocitat de desplaçament més elevada.* En terreny abrupte o irregular la velocitat dels vehicles amb rodes o cadenes està limitada, al haver de seguir aquestes totes les irregularitats. No existeixen encara robots caminadors veloços, però exemples biològics adaptats a aquestes circumstàncies, com els felins o les cabres per citar-ne un parell d'exemples, són una prova de quant ràpid pot ser aquest sistema de locomoció.
4. *Menor afectació del terreny.* Els vehicles amb rodes o cadenes deixen roderes quan avancen per terrenys tous, provocant una important deformació de l'àrea afectada. Aquest problema s'agreuja quan, com a conseqüència d'una adherència limitada, es produeix lliscament entre les rodes o les cadenes i el terra. En canvi en un vehicle caminador, si el disseny del peu és correcte, les petjades provoquen únicament deformacions discretes de menor volum i profunditat.
5. *Major eficiència energètica.* L'empremta que deixa el vehicle al passar, sobretot en terrenys tous, és una deformació provocada al sòl que implica una

despesa energètica. En un vehicle amb potes la superfície i el volum de les empremtes és molt menor, ja que el contacte només es dona en posicions discretes, i per tant pot ser també menor l'energia necessària per avançar. De totes maneres cal remarcar que, per altres raons que es comentaran més endavant, l'avantatge de l'eficiència energètica no es dona, ni molt menys, en els diferents dissenys de robots caminadors existents actualment.

1.2.2 Inconvenients dels robots caminadors

1. *Necessitat de molts graus de llibertat i molts actuadors.* Donades les aptituds tot-terreny demanades al robot, el cos d'aquest haurà de ser capaç de moure's en qualsevol direcció respecte al terra: direcció d'avanç longitudinal, desplaçament lateral i moviment vertical. Per tal de poder modificar la direcció dels moviments anteriors, per exemple la direcció d'avanç, el cos també ha de poder girar respecte a qualsevol del tres eixos principals: guinyada, capcineig i balanceig. En total doncs, el moviment del cos del robot ha de tenir els 6 graus de llibertat possibles d'un sòlid a l'espai.

En el cas concret d'un robot de 6 potes, que és el que s'estudiarà en aquesta tesi, per ser estàticament estable sempre ha de tenir com a mínim 3 peus en contacte amb el terra. Cada peu tindrà doncs la funció d'element de contacte amb el terra i per tant de punt de suport. Així la funció cinemàtica de la pota és poder situar el peu en qualsevol posició respecte al cos del robot, dins evidentment del seu espai de treball. En conseqüència el mecanisme de cada pota haurà de tenir un mínim de 3 graus de llibertat, els que corresponen a les 3 dimensions de l'espai on s'ha de moure el peu respecte al cos. A part el peu també ha de poder variar la seva orientació respecte a l'últim membre de la pota per poder mantenir-la respecte al terra durant la fase de suport. Per tant poden ser necessaris fins a 3 graus de llibertat addicionals per cada peu, però aquests poden ser passius, sense accionament. Així el conjunt del robot hexàpode tindrà 18 graus de llibertat actius i necessitarà de 18 accionaments independents.

2. *Complexitat del moviment de cada peu i pota.* Si el disseny del robot es basa en exemples biològics, com passa en la majoria dels casos, les potes estaran formades per una cadena cinemàtica oberta composta per barres i articulacions. Llavors, aconseguir una trajectòria del peu en línia recta, en una direcció qualsevol com per exemple la direcció d'avanç del robot, implica que totes les articulacions han de moure's de forma coordinada. Les evolucions del moviment a cada articulació han de seguir unes lleis relativament complexes i de forma precisa al llarg del temps. Aquestes lleis complexes de moviment, amb un canvi continu de la velocitat i constants inversions de

sentit de gir, restringeixen els sistemes d'accionament aplicables a aquells que permetin un molt bon control del moviment i de la posició en temps real. Aquesta característica de complexitat de moviment contrasta enormement amb els vehicles o robots amb rodes, on el moviment d'avanç és el resultat d'un simple moviment de rotació a velocitat constant de les rodes respecte al cos.

Uns requeriments ben diferents es tindrien si el moviment d'un únic accionament impliqués la trajectòria del peu en línia recta, com passaria si el mecanisme de pota utilitzes parells prismàtics en lloc d'articulacions.

Sigui quin sigui el mecanisme, quan el robot camina a velocitat constant i en línia recta, les lleis de moviment dels accionaments són periòdiques, corresponent cada període a una passa del robot.

3. *Moviment alternatiu o oscil·lant de les potes.* Per tal de descriure cada passa, els moviments de cadascun dels elements mòbils de les potes han de ser oscil·lants o de vaivé, repetint la mateixa posició al inici de cada passa. Això implica un continu accelerar i desaccelerar la massa dels elements que formen les potes. Els accionaments s'han d'encarregar de proporcionar aquestes contínues acceleracions i han de permetre les successives inversions del sentit de gir.
4. *Energia dissipada pels accionaments en algunes fases del moviment.* Per aconseguir la trajectòria desitjada del peu, en certes fases de cada cicle corresponent a una passa, es tenen accionaments en els que els sentits de velocitat i força o parell són oposats, és a dir, estan frenant l'eix accionat. En aquesta situació l'accionament en qüestió absorbeix energia mecànica i llavors altres accionaments del mateix mecanisme han de proporcionar aquesta energia, a part de desenvolupar la potència necessària per aconseguir el moviment desitjat del peu. A la Figura 1.1 es mostra un exemple de mecanisme en el que, per aconseguir una trajectòria horitzontal del peu, es donen situacions en les que un accionament absorbeix energia (a), en comparació amb un segon mecanisme on no es donen aquestes situacions (b).
5. *Tots els elements de suport –les potes– han de ser accionats.* En un vehicle amb rodes es té la possibilitat de que bona part d'elles siguin no motrius, amb la única funció de suportar part del pes del conjunt i de guiar el moviment respecte al terra. En un robot caminador, en canvi, cada grau de llibertat de cada pota cal que sigui accionat per tal que aquesta compleixi la seva funció de suport i de guiatge del moviment.

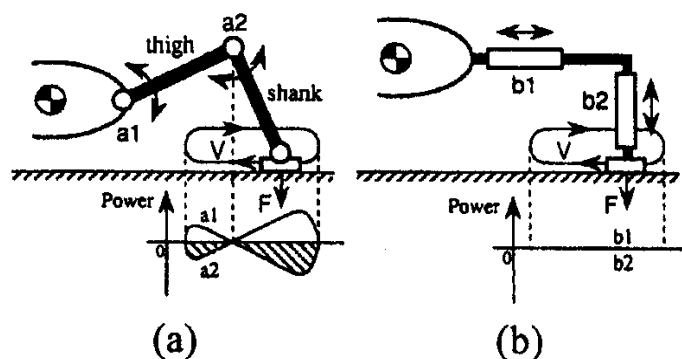


Fig. 1.1. Potència desenvolupada pels accionaments: amb absorció d'energia (a) i sense (b) (Hirose i Arikawa, 2000)

6. *Estabilitat limitada.* Al caminar sempre es tenen alguns peus avançant respecte al cos del robot i per tant elevats respecte al terra. Llavors només poden contribuir a l'estabilitat del conjunt la resta de potes que sí tenen els peus en contacte amb el terra.

1.3 Tipologies de robots caminadors existents

1.3.1 Robots caminadors estàtics i dinàmics

Un primer criteri general de classificació dels robots caminadors podria ser en funció de l'estabilitat durant el seu funcionament. Així es pot diferenciar entre robots caminadors estàtics i robots caminadors dinàmics.

Els robots caminadors estàtics són aquells en els que en tot moment es garanteix el seu equilibri i estabilitat. És a dir, qualsevol posició del robot durant el seu funcionament podria ser una posició de repòs indefinit. En aquests robots, que sempre es mouen a baixa velocitat, les forces d'inèrcia degudes al moviment del cos i de les potes són negligibles a efectes d'estabilitat.

Per tal d'assegurar una situació estable, cal que la projecció vertical del centre de masses del conjunt es trobi dins del polígon de suport, que és el polígon definit pels segments que uneixen els diferents punts de contacte amb el terra (veure la Figura 1.2). Si cada peu es pot considerar que defineix un contacte puntual amb el terra, llavors en caldrà un mínim de 3 en fase de suport per tal d'assegurar l'estabilitat. També es pot tenir una situació estable amb un únic peu en contacte amb el terra, com en un robot bípede, però llavors aquest peu ha de tenir tota una zona o diferents punts de contacte amb el terra que defineixin el polígon de suport.

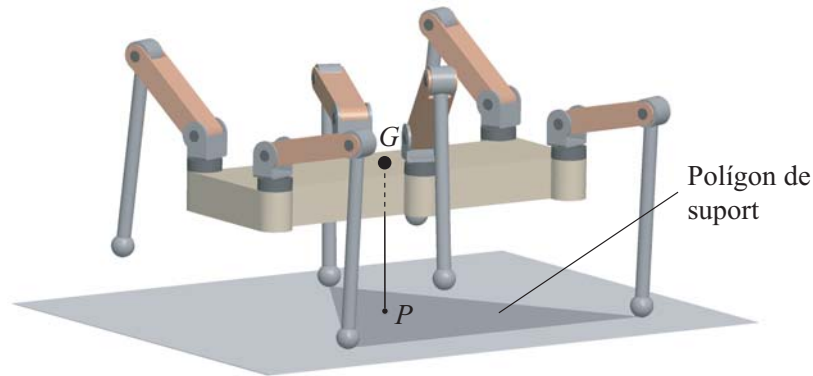


Fig. 1.2. Polígon de suport en un robot caminador estàtic

Els robots caminadors dinàmics són aquells en que, al avançar, es produeixen successius balanceigs entre posicions inestables. S'aprofita l'efecte inercial de les masses en moviment per fer les transicions de forma més o menys suau entre les successives posicions inestables. En aquests robots no és necessari disposar d'un polígon de suport, i per tant pot ser suficient el tenir dos o menys punts de contacte amb el terra. Un cas extrem es dóna quan el robot està corrent o galopant i es presenten fases del moviment en que cap peu està en contacte amb el terra.

1.3.2 Robots inspirats en exemples biològics

Analitzant els exemples que proporciona la natura hom es troba amb una increïble varietat de sistemes de locomoció basats en potes, des dels gran elefants als més petits insectes. El número de potes és força variable, amb bípedes com els humans o les aus, quadrúpedes com molts mamífers i rèptils, hexàpodes i de vuit potes com multitud d'insectes, i animals amb un gran número de potes com el característic centpeus.

La forma de caminar també pot ser molt diversa, fins i tot entre animals amb el mateix número de potes. Per exemple és ben evident el contrast entre el caminar normal d'un ésser humà i l'avanç a salts d'un cangur. Una mateixa espècie pot avançar seguint diferents seqüències de moviment de les potes –diferents anadures– en funció de quina ofereixi més avantatges en cada situació. Per exemple en el cas del cavall es tenen tres formes ben diferenciades de desplaçar-se segons la velocitat a la que es vol avançar, i que corresponen a les anadures de caminar, trotar i galopar.

Molts dels animals amb potes, tant mamífers com rèptils o insectes, gaudeixen d'unes excel·lents aptituds de mobilitat. En alguns casos destaca la velocitat d'avanç, en altres la capacitat de superació d'obstacles o en altres la capacitat de càrrega. Ara bé, tots els animals amb potes sorprenen per l'envejable eficiència energètica del seu sistema de locomoció i l'elevada autonomia, entesa aquesta última com la capacitat

de desplaçar-se llargues distàncies abans d'esgotar l'energia emmagatzemada al seu cos.

Així no és estrany que els exemples biològics hagin estat i siguin encara avui en dia la font d'inspiració per desenvolupar bona part dels dissenys de vehicles i robots caminadors. Les prestacions dels animals són en general molt superiors encara a les dels més moderns robots caminadors.

Els dissenys de robots d'inspiració biològica es poden classificar en dos grups, segons si són robots amb múltiples potes o robots bípedes, a l'estil de l'ésser humà.

i) Robots amb múltiples potes

Entre els robots amb múltiples potes els més comuns són els hexàpodes, com molts insectes, i després els seguirien els quadrúpedes, com els mamífers o els rèptils. La disposició tipus hexàpode té l'avantatge de que es poden tenir dos conjunts de potes, cadascun format per la pota de davant i la de darrera d'un costat i la del mig de l'altre costat, que poden definir dos polígons de suport independents. Així movent les potes alternativament en grups de tres, de manera que quan unes estan en contacte amb el terra les altres estan avançant, es pot definir una anadura molt simple i estàticament estable, que és la que es coneix com anadura de trípedes alternants. A la Figura 1.3 es mostra un exemple de robot caminador hexàpode inspirat en un insecte.

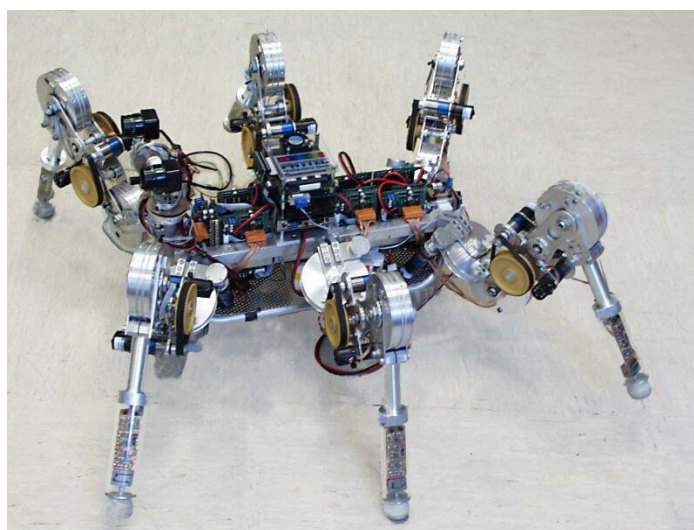


Fig. 1.3. Robot hexàpode *LAURON III*

En el cas dels quadrúpedes també es possible aconseguir diferents anadures estàticament estables. Cal definir la seqüència de moviments de les potes de manera que en cada instant només una pota estigui aixecada i avançant respecte al cos del robot. Les altres tres són necessàries per definir el polígon de suport. El robot *BISAM* de la Figura 1.4 és un exemple de quadrúpede inspirat en un mamífer.

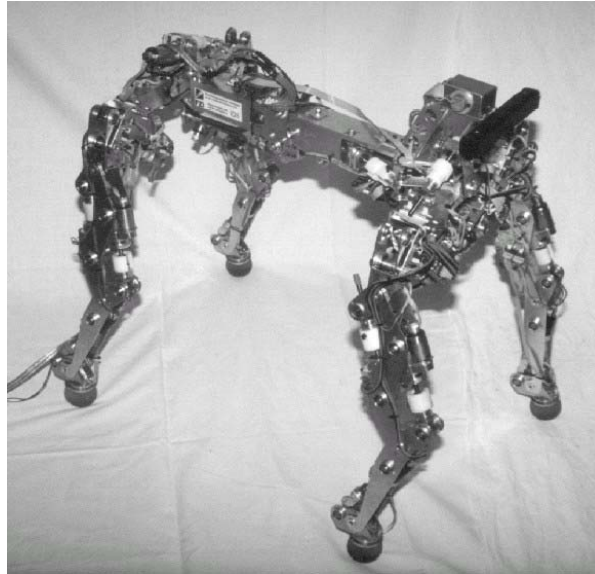


Fig. 1.4. Robot quadrúpede *BISAM*

ii) Robots bípedes

És evident que la principal motivació per desenvolupar robots bípedes és imitar a l'home, més que obtenir un robot amb grans capacitat de mobilitat en terreny irregular. Tot i així l'interès econòmic i propagandístic que aquests dissenys impliquen superen moltes vegades el dels robots de múltiples potes. Uns exemples molt clars són els diferents prototipus de robot bípede de la firma japonesa *HONDA*, l'últim dels quals, la darrera versió del robot *ASIMO* presentat l'any 2004 (veure la Figura 1.5) és segurament un dels robots caminadors més avançat avui en dia.



Fig. 1.5. Robot bípede *ASIMO* (<http://world.honda.com/ASIMO/>, 2004)

Els robots bípedes tenen l'inconvenient de que, per ser estàticament estables, el peu ha de ser molt gran i el cos s'ha de desplaçar lateralment a cada passa per situar el centre de masses sempre sobre el polígon de suport.

1.3.3 Robots de concepció alternativa

És clara la motivació del exemples biològics per desenvolupar robots caminadors a la seva semblança. Però aquesta via també comporta alguns inconvenients. Els elements constitutius d'una pota biològica i els d'una pota artificial per a un robot tenen poques similituds. Són diferents els elements estructurals, els elements que defineixen les unions mòbils i, per descomptat, també són molt diferents els elements que impulsen els moviments: múscles en els animals i accionaments en els robots. Llavors el fet d'intentar imitar la naturalesa amb els components tecnològics de que es disposa actualment comporta nombroses dificultats afegides.

Hi ha un altre plantejament alternatiu i que pot oferir solucions completament diferents als exemples biològics. La qüestió és pensar en el robot caminador com un vehicle que es vol que es pugui desplaçar d'un lloc a un altre. El cos és l'element principal del robot que s'ha d'aconseguir desplaçar i per a tal fi es pot disposar de mecanismes als extrems dels quals es poden recolzar sobre diferents punts del terreny per on s'avança i actuar així com a elements de suport mòbils. Llavors el disseny mecànic ha de combinar els components necessaris de manera que s'aconsegueixi la mobilitat demanada del cos del robot i amb la màxima efectivitat i senzillesa del muntatge.

Una possibilitat és definir el robot com a dos cossos o plataformes amb moviment relatiu entre ells. Cadascun ha de tenir la capacitat de, recolzant-se sobre el terra, aixecar a l'altre, suportar-lo i desplaçar-lo en diferents direccions fins dipositar-lo en una nova posició sobre el terra. Llavors s'intercanvien els papers i així successivament. La mobilitat del robot depèn dels graus de llibertat del moviment relatiu entre els cossos. El robot *PARAWALKER II*, mostrat a la Figura 1.6, té 6 graus de llibertat i per tant una de les plataformes es pot desplaçar i orientar en qualsevol direcció respecte a l'altra.

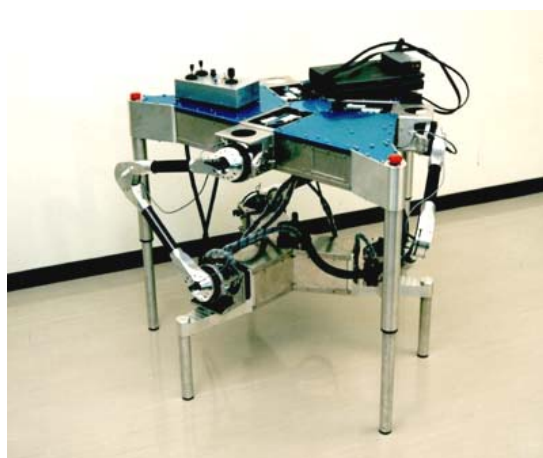


Fig. 1.6. Robot *PARAWALKER II* compost per dues plataformes amb moviment relatiu (Yoneda i Ota, 2003)

Els sistemes de locomoció amb rodes i potes es poden combinar en un mateix robot amb l'objectiu d'integrar part dels avantatges d'ambdós. Per una banda les rodes suporten part del pes del robot i guien el seu moviment de forma ben senzilla, i per altra banda les potes permeten seleccionar els punts concrets de suport i superar així grans obstacles. Una forma de combinar aquests sistemes de locomoció és disposar de diverses rodes en una part del robot i de potes en una altra (veure la Figura 1.7). Una altra forma és situar rodes als extrems de les potes, a mode de peus que poden rodolar sobre el terra quan aquest no és excessivament irregular. Quan es presenten obstacles més importants cada pota es pot aixecar fins recolzar la roda, que actua com a peu, per sobre o més enllà de l'obstacle (veure la Figura 1.8).



Fig. 1.7. Robot *WHEELLEG* amb potes i rodes (Guccione i Muscato, 2001)



Fig. 1.8. Robot *WORKPARTNER* amb rodes a l'extrem de les potes (Halme *et al.*, 2001)

1.4 Mecanismes de les potes

1.4.1 Requeriments del mecanisme de la pota

El disseny del mecanisme de la pota ha de donar resposta a una sèrie de requeriments que se li demanen:

1. *Espai de treball del peu.* El mecanisme de pota té la funció de moure el peu respecte al cos en qualsevol direcció i definint un espai de treball tridimensional suficient per a les prestacions i mobilitat demanades al robot. Per tant, en un robot amb múltiples potes, cadascuna d'elles ha de tenir en general un mínim de 3 graus de llibertat.
2. *Resistència i rigidesa del conjunt.* El mecanisme ha de ser capaç de suportar els esforços a que sigui sotmès sense trencar-se ni deteriorar-se. Com a conseqüència d'impacte imprevistos del peu amb el terra aquests esforços poden ser en ocasions clarament superiors als nominals.

La importància de la rigidesa del mecanisme dependrà de l'operació que porti a terme el robot. Si interessa controlar de forma molt precisa el moviment i la posició del cos del robot, com per exemple quan aquest realitza una tasca delicada, és necessari que el mecanisme tingui una elevada rigidesa i no es deformi com a conseqüència de les càrregues aplicades. En canvi si el robot està avançant en una determinada direcció però sense una prescripció estricta de la seva trajectòria, com per exemple per desplaçar-se fins un nou destí, no és cap inconvenient que l'estructura del mecanisme s'arribi a deformar lleugerament dins de la seva zona elàstica. Fins i tot hi ha dissenys del mecanisme de la pota que fan ús de l'elasticitat dels seus membres per emmagatzemar energia potencial en algunes fases de l'anadura.

3. *Relació adequada entre el moviment dels accionaments i el del peu.* En les operacions en que cal controlar acuradament la posició del robot, és necessari tenir una relació precisa entre els moviments dels accionaments i el moviment del peu. Des del punt de vista de la simplicitat de programació de moviments i de control també seria preferible, encara que moltes vegades no és possible, que el moviment del peu implicat individualment per un accionament sigui exactament en una de les direccions principals respecte al robot: longitudinal, transversal o vertical.
4. *Mínima energia mecànica dissipada a les articulacions.* Aquest és el primer punt a tenir en compte a l'hora d'optimitzar l'eficiència energètica d'un robot

caminador. Cal evitar les situacions en que la velocitat i el parell actuant a les articulacions tenen sentit contrari.

A l'hora de valorar les càrregues a suportar per les potes d'un robot hexàpode es pot suposar la hipòtesi de que entre el terra i els peus no es donen forces tangencials antagòniques. En cas de possibles redundàncies en la determinació de les reaccions tangencials als peus es suposa que aquestes es reparteixen proporcionalment a la reacció normal en cada peu. Aquestes hipòtesis permeten simplificar el tractament dinàmic de tot el conjunt, i es correspon a priori amb la situació més avantatjosa en quan a esforços a suportar per les potes.

Quan el robot camina sobre un terreny horitzontal en línia recta i a velocitat constant les forces horitzontals als peus són nul·les i les càrregues verticals a que estan sotmeses les potes són les que resulten de suportar la part corresponen del pes del robot que descansa sobre cadascuna d'elles. Si avança per una pendent llavors les reaccions tenen una component perpendicular al terra i una component en la direcció d'avanç.

Si el robot és simètric i segueix una anadura en trípodos alternants, el valor més elevat de la reacció vertical sobre el peu el reben cadascuna de les potes intermèdies. Quan una d'aquestes està en fase de suport les altres dues del mateix costat estan en fase de transferència, sense contacte amb el terra, i a la intermèdia li toca suportar la meitat del pes del robot.

1.4.2 Classificació dels mecanismes de pota segons diferents criteris

i) Segons el pla principal de moviment del mecanisme

A la Figura 1.9 es representa un exemple de robot caminador amb el sistema de coordenades que habitualment s'utilitza per estudiar el seu moviment. L'eix x correspon a la direcció i el sentit d'avanç del robot i l'eix z a la direcció vertical. També es representen, amb la nomenclatura corresponent, els tres plans principals definits pel sistema de coordenades.

Observant els diferents exemples de potes, tant en animals com en els diferents desenvolupaments de robots, s'aprecia que habitualment dos dels tres graus de llibertat del mecanisme corresponen a moviments en el mateix pla. A partir d'aquesta observació es pot establir una primera classificació dels mecanismes de pota segons quin és el pla en que es tenen dos graus de llibertat. Es presenten les següents situacions:

- a. *Pla vertical sagital*. Pla definit per la vertical i la direcció d'avanç del robot. És la disposició típica en els mamífers.

- b. *Pla vertical frontal*. Pla normal a la direcció d'avanç. És la disposició dels rèptils o de molts insectes.
- c. *Pla horitzontal*. S'utilitza en alguns robots amb l'objectiu d'independitzar la component vertical del moviment del peu.

Aquesta classificació no és exhaustiva, però ajuda a comparar diferents conceptes de disseny de pota. A la Figura 1.10 es mostra un exemple de cada tipus.

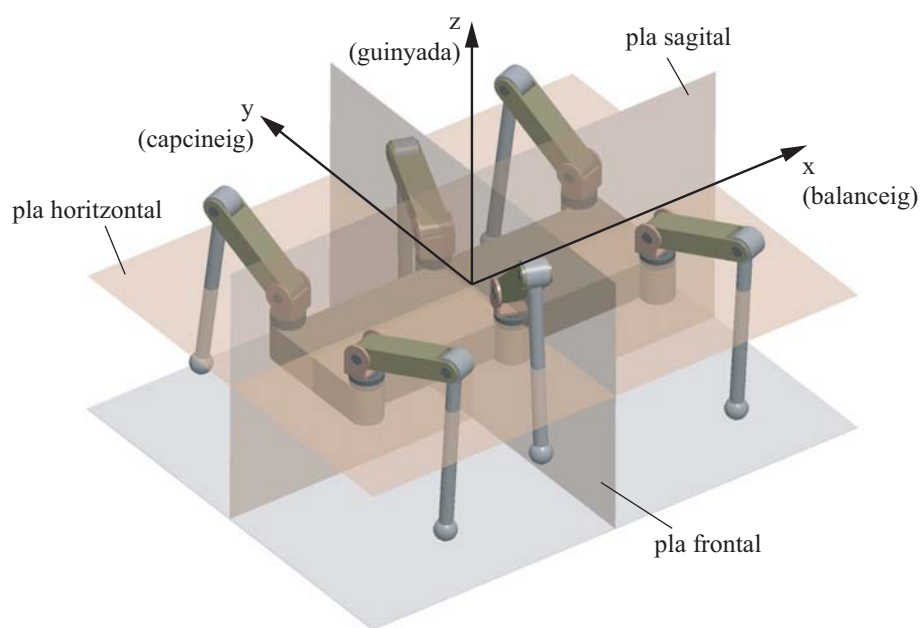


Fig. 1.9. Eixos i plans de referència per definir el moviment del robot

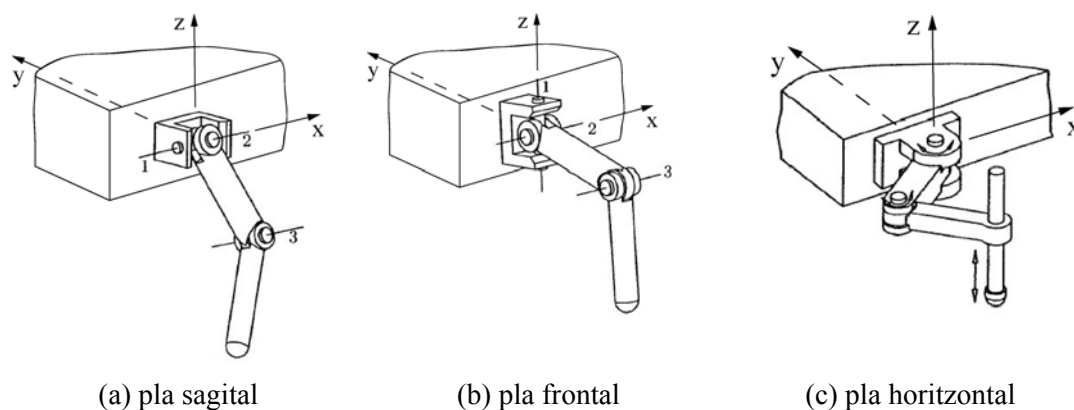


Fig. 1.10. Exemples de mecanismes de pota situats en diferents plans

ii) Segons el tipus de parells cinemàtics entre membres

Per definir els graus de llibertat entre membres, en el mecanisme de la pota es poden utilitzar diferents tipus de parells cinemàtics:

- a. *Únicament parells de revolució (o esfèrics)*. Pràcticament totes les unions mòbils a les potes dels animals són parells cinemàtics que permeten únicament el gir d'un membre respecte a l'altre. En alguns casos es poden considerar articulacions, amb un únic grau de llibertat, i en altres s'arriba a dos o tres graus de llibertat com en un parell esfèric. La majoria de les potes de robots caminadors s'implementen utilitzant únicament parells de revolució. Tenen l'avantatge de que són més molt més fàcils de materialitzar, més resistents i fiables i el manteniment és menys delicat. A les Figures 1.10 (a) i (b) es tenen dos mecanismes en els que només participen parells de revolució.
- b. *Amb parells prismàtics o altres*. L'avantatge d'un parell prismàtic és que s'aconsegueix una trajectòria del peu en línia recta amb un únic accionament, sense necessitat de coordinar els moviments de diverses articulacions. El mecanisme de la Figura 1.10 (c) compta amb un parell prismàtic per guiar el moviment vertical del peu. A la Figura 1.11 es mostren tres dissenys de potes basats en pantògrafs. En els casos (a) i (b) cada mecanisme inclou dos parells prismàtics. En el cas (c) per cadascun dels tres graus de llibertat del mecanisme hi intervé un parell prismàtic.

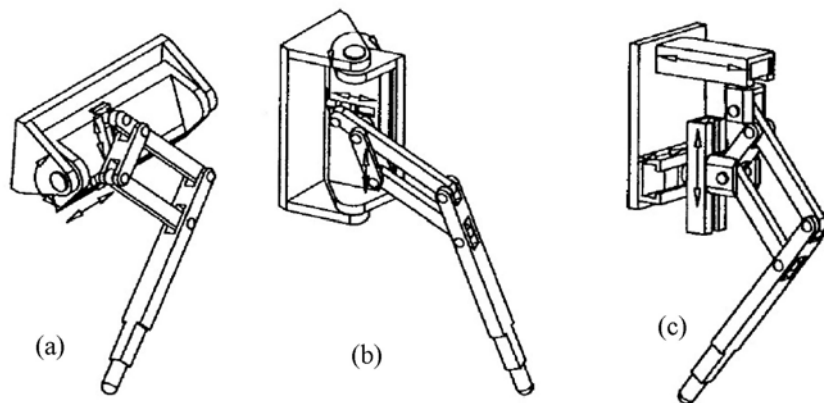


Fig. 1.11. Mecanismes de pota basats en pantògrafs

iii) Segons la disposició dels accionaments

En cada mecanisme es tenen diversos graus de llibertat, i els corresponents accionaments, encarregats de controlar la posició del peu respecte al cos en les tres direccions possibles de moviment. Segons la implicació dels diferents accionaments en el moviment vertical del peu es tenen les següents tipologies:

- a. *Gravitacionalment acoblats*. Per aconseguir un moviment del peu estrictament en direcció vertical cal coordinar el moviment de dos o més graus de llibertat del mecanisme. Els mecanismes de la Figura 1.10 (a) i (b) són dos exemples d'aquesta tipologia.
- b. *Gravitacionalment desacoblats*. El desplaçament en direcció vertical del peu correspon a un dels graus de llibertat del mecanisme, i per tant depèn d'un únic accionament. Diversos exemples són el mecanisme de la Figura 1.10 (c) i els tres mecanismes de la Figura 1.11.

1.5 Accionaments per a les articulacions dels robots caminadors

1.5.1 Definició d'accionament

S'entén per accionament tot el conjunt d'elements necessaris per aconseguir el moviment de l'eix d'entrada d'un receptor o màquina receptora. El receptor és un element que rep energia mecànica i la transforma en un conjunt de moviments i forces que tenen una determinada utilitat.

A l'accionament se li subministra energia, que pot ser de diferent tipus, i que es transforma en energia mecànica al motor. La transmissió transforma l'energia mecànica mitjançant canvis en la velocitat i força –o parell– i canvis en la direcció o sentit de moviment per tal d'adaptar-los als requeriments del receptor. També formen part de l'accionament el sistema de control, amb els elements auxiliars necessaris, i el mòdul de regulació, encarregat de dosificar l'energia proporcionada al motor segons les ordres del control (veure la Figura 1.12).

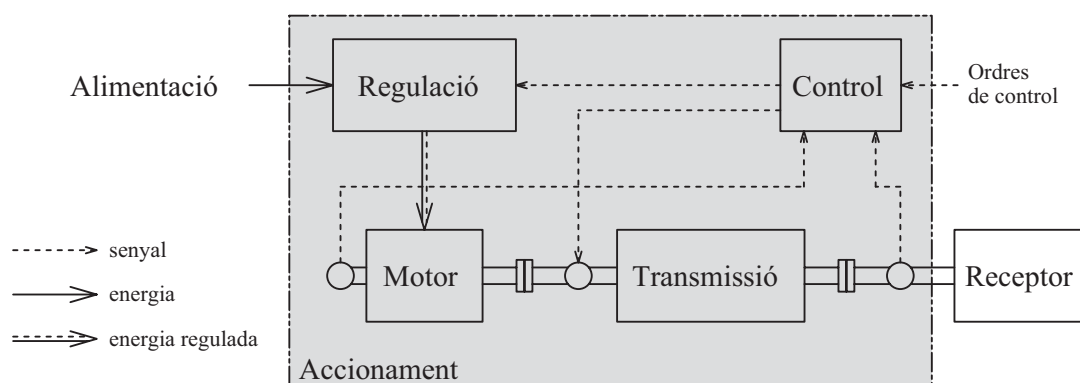


Fig. 1.12. Esquema general d'un accionament amb els elements que el componen

1.5.2 Requeriments dels accionaments segons el règim de funcionament

Una anàlisi dels requeriments del mecanisme o màquina a accionar porta a la següent classificació segons el tipus de règim de funcionament de l'accionament:

- a. *Funcionament a règim constant.* En el moment de l'arrancada el motor i el receptor han de passar de velocitat nul·la a la seva corresponent velocitat nominal. En aquest procés d'arrancada se li demana a l'accionament que funcioni a règim variable. Quelcom equivalent, però desaccelerant, passa en el moment de l'aturada. Una vegada en el punt d'equilibri l'accionament funciona en condicions pràcticament constants, per tant cal que aquest hagi estat dissenyat de manera que, sobretot en aquestes condicions, ofereixi un bon rendiment. Les inèrcies de motor, transmissió i receptor tenen una importància relativa, doncs només cal accelerar-les en el moment de l'arrancada. Fins i tot, en alguns casos, pot interessar que la inèrcia del conjunt sigui elevada per millorar així la regularitat de funcionament.
- b. *Funcionament intermitent.* La situació pot ser semblant al cas anterior, però amb la diferència de que ara els processos d'arrancada i aturada es poden donar amb certa freqüència. Cal que l'accionament ofereixi unes bones prestacions en l'arrancada: parell alt i consum contingut. Les inèrcies són més importants, perquè reduir-les facilita els processos d'arrancada i aturada.
- c. *Moviments ràpids de posicionament precis.* Són moviments ràpids o molt ràpids per canviar la posició de peces o eines des d'una posició inicial a una posició final. El moviment ha de ser ràpid en conjunt, però a més sovint parteix del repòs per acabar també en repòs. El que principalment cal tenir en compte en aquests casos són el parell o força necessaris per accelerar i desaccelerar les masses dels elements mòbils. Els parells i les forces resistents del receptor, inclosos els que són resultat de les resistències passives, sovint es consideren negligibles en comparació amb els que provoquen les elevades inèrcies. Exemples típics són els moviments de molts robots industrials.
- d. *Moviments a velocitat variable i amb control precis.* És la situació que es dóna als accionaments per a robots caminadors. El règim de funcionament és molt variable, sovint a càrregues o velocitats molt per sota de les nominals. Hi ha situacions en que les inèrcies són pràcticament negligibles, però també altres en que són el factor més important. És important el rendiment dels motors i de les transmissions, però no en el seu punt òptim de funcionament sinó a partir del moment en que s'inicia el moviment. Des d'aquest punt de vista, la millor solució d'accionament dependrà de l'evolució dels requeriments i del règim de funcionament al llarg de tot el cicle d'operació.

1.5.3 Especificacions dels accionaments pels moviments de les potes

Una de les característiques principals demanades a un accionament per a la pota d'un robot caminador és l'elevat parell que ha de ser capaç de proporcionar. La raó és que el pes del robot ha de ser contrarestat pel parell exercit en algunes articulacions de les potes en fase de suport. Això contrasta amb el cas dels vehicles amb rodes, on el pes senzillament recolza, directament o a través de la suspensió, sobre l'eix de les rodes.

La velocitat de l'eix de sortida de l'accionament és molt variable i amb continus canvis de sentit de gir, però sempre de petita magnitud. La longitud d'una pota és clarament més gran que el radi de la roda en un vehicle convencional equivalent, i llavors les velocitats angulars a les articulacions de la pota són menors. A més cal pensar que un robot caminador, donat l'estat actual de desenvolupament, es desplaça lentament, i per tant els eixos impulsats pels accionaments es mouen a baixa o molt baixa velocitat.

En qualsevol vehicle mòbil és important que l'accionament sigui lleuger, amb una elevada potència específica per unitat de massa. En els robots caminadors encara ho és més, doncs cada accionament només funciona a elevada potència parcialment al llarg del cicle, i llavors la potència total instal·lada és molt superior a la d'un vehicle de rodes.

La combinació d'elevat parell, baixa velocitat i lleugeresa demanades a l'accionament fa que sovint la millor solució sigui utilitzar una transmissió amb una elevada relació de reducció, multiplicant el parell i permeten que el motor treballi a més velocitat. També interessa que el rendiment global sigui elevat, per tal de reduir el consum energètic i augmentar l'autonomia, entesa com la distància que pot recorre o el temps que pot funcionar el robot sense recarregar la font d'energia.

El sistema de control ha de permetre regular fàcilment i amb precisió el funcionament de l'accionament. A part de la complexitat i cost dels elements de control en si mateixos, també cal tenir en compte altres aspectes com la massa i el volum de tot el sistema de control, el seu consum energètic i les pèrdues que es puguin produir al mòdul de regulació.

1.5.4 Tipus d'accionaments per a robots caminadors

i) Accionaments rotatius

En els accionaments rotatius la sortida es pot connectar directament a una articulació del mecanisme. El sentit de gir cal que sigui invertible, i la velocitat fàcilment regulable, per això els motors elèctrics són gairebé l'única alternativa com a generadors de l'energia mecànica.

Els motors elèctrics giren a una velocitat molt més elevada que el que requereix el moviment de les potes. Llavors és necessari acoblar-los a una transmissió amb elevada relació de reducció. A la Taula 1.1 es resumeixen les principals combinacions, de motors i transmissions mecàniques, amb característiques adequades a aquesta aplicació.

Taula 1.1. Accionaments rotatius disponibles per a robots caminadors

Motor	Transmissió
Elèctric CC Elèctric sense escobretes	Engranatge Eixos fixos Planetari Vis sens fi i corona Hipoide Harmonic Drive Cyclo Corretja dentada Cadena Cable i tambors

A les Taules 1.2 i 1.3 s'analitzen qualitativament els avantatges i els inconvenients dels dos tipus de motors elèctrics que millor s'adapten a la seva utilització en robots caminadors.

Taula 1.2. Característiques dels motors elèctrics de corrent continu

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Simplicitat de regulació: mitjançant la tensió i la intensitat d'alimentació •Sentit de rotació reversible •Elevat rendiment en condicions nominals de funcionament, sobretot en motors de gamma alta amb imants de Neodini •Amplia gamma disponible al mercat 	<ul style="list-style-type: none"> •Velocitat nominal molt elevada •Relació potència/pes baixa •Baix rendiment a baixa velocitat i elevat parell motor •Guspises a les escobretes d'alimentació del rotor •Preu elevat dels motors amb imants de Neodini

Taula 1.3. Característiques dels motors elèctrics síncrons sense escobretes

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Múltiples possibilitats de control del parell i de la velocitat •Sentit de rotació reversible •Elevat rendiment en condicions nominals de funcionament •Manteniment reduït, al no haver-hi escobretes •No es produeixen guspises 	<ul style="list-style-type: none"> •Velocitat nominal molt elevada •Relació potència/pes baixa •Complexitat de regulació: l'estator consta de diferents fases amb commutació electrònica •Baix rendiment a baixa velocitat i elevat parell motor •Preu elevat

A les Taules 1.4 a 1.11 s'analitzen qualitativament els avantatges i els inconvenients de diferents transmissions des del punt de vista de la seva utilització en un accionament rotatiu per a robots caminadors.

Taula 1.4. Característiques dels trens d'engranatges epicicloïdals

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Els esforços es reparteixen entre els diversos satèl·lits, i de forma simètrica •Rendiment elevat en condicions nominals •Rigidesa •Lleugeresa en comparació amb altres trens d'engranatges 	<ul style="list-style-type: none"> •Per a una reducció elevada es requereixen varies etapes i molt espai en longitud •Joc •El rendiment disminueix al augmentar les etapes

Taula 1.5. Característiques dels engranatges de vis sens fi i corona

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Elevada reducció en una única etapa •Dimensió reduïda en longitud •Eixos d'entrada i sortida perpendiculars •Irreversibilitat: consum nul quan està parat 	<ul style="list-style-type: none"> •Parell limitat al concentrar-se els esforços en una única zona d'engranament •Baix rendiment •Joc

Taula 1.6. Característiques dels engranatges hipoides

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Elevada reducció en una única etapa •Dimensió reduïda en longitud •Eixos d'entrada i sortida perpendiculars •Irreversibilitat: consum nul quan està parat •Joc regulable 	<ul style="list-style-type: none"> •Parell limitat, al concentrar-se els esforços en una única zona d'engranament •Baix rendiment

Taula 1.7. Característiques dels reductors *Harmonic Drive*

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Elevada reducció en una única etapa •Parell transmissible elevat •Els esforços es reparteixen simètricament entre dues zones i diverses dents •Lleugeresa •Dimensió reduïda en longitud •Rendiment elevat en condicions nominals •Rigidesa •Mínim joc 	<ul style="list-style-type: none"> •Complexitat de muntatge •Preu molt elevat •Eixos d'entrada i sortida alineats

Taula 1.8. Característiques dels reductors *Cyclo*

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Parell transmissible elevat • Els esforços es reparteixen simètricament entre dues zones d'engranament • Dimensió reduïda en longitud • Rendiment elevat en condicions nominals • Rigidesa • Mínim joc 	<ul style="list-style-type: none"> • Massa elevada • Preu molt elevat • Eixos d'entrada i sortida alineats

Taula 1.9. Característiques de les transmissions per corretja dentada

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Joc nul • Lleugeresa • Dimensió reduïda en longitud • Eixos d'entrada i sortida en paral·lel i a distància regulable 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensió excessiva en diàmetre • Reducció molt limitada • Parell transmissible limitat • Baixa rigidesa

Taula 1.10. Característiques de les transmissions per cadena

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Lleugeresa • Dimensió reduïda en longitud • Eixos d'entrada i sortida en paral·lel i a distància regulable 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensió excessiva en diàmetre • Reducció molt limitada • Joc • Vibracions i soroll • Necessita lubricació i manteniment

Taula 1.11. Característiques de les transmissions per cable i tambors

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Lleugeresa • Joc nul • Dimensió reduïda en longitud • Eixos d'entrada i sortida en paral·lel i a distància regulable 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensió excessiva en diàmetre • Reducció limitada • Parell transmissible limitat • Baixa rigidesa

ii) Accionaments lineals

En els accionaments lineals la sortida és un moviment de translació entre dos membres, per tant són perfectes per accionar un parell prismàtic. Si es vol accionar una articulació, amb un moviment oscil·lant entre dos membres, cal disposar l'accionament entre dos punts dels mateixos separats del punt d'articulació. D'aquesta manera la força que generen es tradueix en un moment respecte a l'eix de l'articulació.

Existeixen diversos motors lineals que funcionen a velocitat relativament baixa i es poden adaptar directament als requeriments. En canvi si el motor és elèctric i rotatiu cal una transmissió per reduir la velocitat i convertir el moviment en lineal. A la Taula 1.12 es resumeixen les principals combinacions possibles, de motors i transmissions mecàniques, per formar accionaments lineals aplicables a robots caminadors.

Taula 1.12. Accionaments lineals més comuns en robots caminadors

Motor	Transmissió
Cilindre pneumàtic Cilindre hidràulic Muscle pneumàtic	-
Elèctric CC Elèctric sense escombretes	Cargol i femella lliscants Cargol i femella de boles

A les Taules 1.13 a 1.15 s'analitzen qualitativament els avantatges i els inconvenients de diferents motors lineals des del punt de vista de la seva utilització com a accionaments per a robots caminadors.

Taula 1.13. Característiques dels cilindres pneumàtics

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Consum nul quan està parat •Net •Amplia gamma disponible al mercat 	<ul style="list-style-type: none"> •Complexitat de control, sobretot la posició i la velocitat •Soroll •Necessita un grup, d'elevada massa, que generi la pressió i el cabal d'aire

Taula 1.14. Característiques dels cilindres hidràulics

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Molt elevada relació potència/pes •Control acurat •Velocitat de sortida baixa •Consum nul quan està parat 	<ul style="list-style-type: none"> •Requereix una molt bona estanquitat •Necessita un grup, d'elevada massa, que generi la pressió i el cabal d'oli •Gamma limitada en les baixes potències

Taula 1.15. Característiques dels muscles pneumàtics

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Elevada relació potència/pes •Velocitat de sortida baixa •Consum nul quan està parat •Similitud amb els muscles biològics •Net 	<ul style="list-style-type: none"> •Només actua en un sentit, per tant es necessiten dos actuadors per articulació •Control poc precís de la posició •Soroll •Necessita un grup, d'elevada massa, que generi la pressió i el cabal d'aire

A les Taules 1.16 i 1.17 s'analitzen qualitativament els avantatges i els inconvenients de diferents transmissions que converteixen un moviment rotatiu en un moviment lineal a baixa velocitat.

Taula 1.16. Característiques de les transmissions per cargol i femella lliscants

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Dimensió reduïda en diàmetre •Irreversibilitat: consum nul quan està parat 	<ul style="list-style-type: none"> •Baix rendiment •Espai requerit en longitud •Massa elevada •Joc

Taula 1.17. Característiques de les transmissions per cargol i femella de boles

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> •Elevat rendiment •Dimensió reduïda en diàmetre •Joc nul 	<ul style="list-style-type: none"> •Reducció limitada •Espai requerit en longitud •Massa elevada

1.6 Interès de l'eficiència energètica en robots caminadors

Els robots caminadors, com a robots mòbils que són per definició, s'han de poder desplaçar i operar en espais diferents. Interessa, doncs, que puguin funcionar de forma el més autònoma possible, a poder ser incorporant en el mateix cos del robot la font o acumulador d'energia i tot el sistema de control.

Els combustibles fòssils com a dipòsit d'energia i els motors de combustió com a generadors d'energia mecànica són, encara avui en dia, la millor solució per aconseguir un vehicle mòbil lleuger i d'elevada autonomia. Però l'aplicació al robots caminadors d'aquest sistema no és la millor solució, sobretot per la dificultat extrema

de controlar de forma precisa el moviment de cadascun dels graus de llibertat. Un altre inconvenient, almenys en l'aplicació en ambients tancats, és l'emissió dels gasos de combustió.

Com s'ha mencionat anteriorment, un robot caminador té molts graus de llibertat que han de ser governats independentment. Els accionaments ideals, des del punt de vista del control, es basen en motors elèctrics, un per cada grau de llibertat, amb bateries com a font d'energia. El problema és que les relacions potència/pes dels motors i energia/pes de les bateries no són gens favorables.

Altres problemes són l'energia que dissipen els accionaments quan aquests frenen l'eix accionat i el baix rendiment dels elements de la cadena d'accionament, motor i transmissions, donades les especials condicions de funcionament a que es veuen sotmesos en aquesta aplicació.

La immensa majoria de robots caminadors desenvolupats fins avui no poden funcionar de forma autònoma, sinó que han de rebre l'alimentació a través d'una connexió exterior. Només algunes contades excepcions de robots amb motors elèctrics poden funcionar, amb una autonomia limitada, amb bateries ubicades al mateix cos del robot.

Els vehicles caminadors amb major autonomia construïts fins avui utilitzen motors de combustió. Per distribuir la potència i controlar el moviment dels diferents graus de llibertat s'han emprat solucions clàssiques com cilindres hidràulics amb el corresponent circuit de control (Song i Waldron, 1989), o complexes sistemes d'embragatges i transmissions mecàniques (Takahama i Inagaki, 1997).

En un futur proper, la tecnologia de les piles de combustible, com a font d'energia elèctrica, s'apunta com una interessant alternativa a les bateries, amb una capacitat d'emmagatzematge molt superior i un temps de recàrrega mínim. La tecnologia de les piles de combustible genera tantes expectatives que, en combinació amb motors elèctrics de corrent continu, es preveu que substituiran als motors de combustió en els vehicles convencionals. El seu desenvolupament afavorirà, sens dubte, l'ús de motors elèctrics de corrent continu i de motors sense escombretes per a l'accionament de robots caminadors.

Optimitzar el consum energètic dels robots caminadors pot fer-se per dues vies ben diferenciades. La primera és minimitzar l'energia mecànica necessària als mecanismes de les potes per efectuar els moviments, el que implica reduir la potència mitjana necessària. El primer pas per aconseguir aquest objectiu és minimitzar la massa del robot i la inèrcia de totes les parts mòbils. Aquesta tasca no és gens senzilla, doncs cal recordar que en un robot caminador es necessiten molts actuadors

independents. En un disseny clàssic de robot caminador la potència total instal·lada al robot, resultat de sumar la potència de tots els motors, és molt superior a la que el robot desenvoluparà simultàniament al caminar. Es tenen molts motors, i per tant molta massa, amb un grau d'utilització molt menor que en robot o vehicle amb rodes. El segon pas, plantejat en molts treballs de recerca existents, és minimitzar l'energia mecànica necessària a partir d'analitzar diferents dissenys, diferents dimensions dels membres de la pota, i de realitzar estudis d'optimització energètica del cicle d'anadura.

Fixades la potència i l'energia mecàniques requerides a cada grau de llibertat accionat del mecanisme de la pota, la segona via per optimitzar el consum energètic és millorar el rendiment de tot el sistema d'accionament des del magatzem d'energia fins l'eix accionat. Aquesta segona via no està tan explotada. El motiu pot ser que no es tracta senzillament d'obtenir un bon rendiment en unes condicions nominals de funcionament, sinó que cal tenir un bon rendiment per a qualsevol de les condicions de velocitat i càrrega que es poden donar en aquests accionaments. I això es força més complex, sobretot quan l'accionament treballa a baixa velocitat o poca càrrega, ja que llavors la majoria de motors i transmissions tenen uns rendiments limitats com a conseqüència de les resistències passives que s'oposen al moviment i de l'efecte Joule en el motor elèctric.

La pitjor situació pel consum energètic en el mecanisme de la pota d'un robot caminador és quan l'accionament absorbeix potència mecànica, al haver de frenar aquest el moviment de l'articulació. La primera via de recerca que s'ha comentat hauria de resoldre aquest problema fent que no es donessin situacions de frenat. Això no sempre és possible, i llavors la solució ideal seria poder reconvertir aquesta energia de frenat per emmagatzemar-la i utilitzar-la posteriorment.