

2 ESTAT DE L'ART DE L'ACCIONAMENT DE ROBOTS CAMINADORS

Les primeres patents que es coneixen de vehicles caminadors daten de finals del segle XIX i principis del XX, però no es té notícia de que s'arribessin a construir. No va ser fins la dècada dels 60 del segle passat que es construïren els primers prototipus de vehicles caminadors. Els primers dissenys aconseguien el moviment coordinat de les diferents potes a través de mecanismes de barres o lleves. D'aquesta forma no era necessari un sofisticat sistema de control, però la seva operació en terreny irregular quedava fortament limitada a causa de la impossibilitat de moure cada pota de forma independent.

L'evolució dels computadors va permetre que a partir del principi dels 70 comencessin a sorgir desenvolupaments de vehicles caminadors on la coordinació de moviments era controlada a través d'un computador. Cada pota tenia 2 o 3 graus de llibertat i el resultat era una capacitat tot-terreny molt superior. Els primers dissenys eren de vehicles relativament grans, doncs havien de carregar pesats computadors i altres elements de control. En alguns casos també era necessari el comandament per part d'un operador.

No ha estat fins a les últimes dècades del segle passat que els progressos en els computadors i la informàtica han permès afrontar el problema del control en vehicles caminadors autònoms més complexos, i cada vegada més petits. Darrerament s'han desenvolupat bastants projectes de robots caminadors, la majoria de grandària mitjana o petita, amb dimensions, com a molt, de l'ordre d'un metre de llargada o d'amplada. Els principals esforços de recerca es podria dir que es centren en els sistemes de control: generació de seqüències de passa, anadures per terrenys irregulars, transició entre diferents anadures –estàtiques o dinàmiques–, detecció d'obstacles, reconeixement del terreny, etc.

Com s'ha comentat a la introducció, encara avui, es tenen molt pocs exemples de vehicles o robots caminadors útils a la pràctica. Dos dels motius, que no els únics, són la poca capacitat de càrrega, a causa de la gran massa que representen la multitud de graus de llibertat i d'accionaments necessaris, i l'elevat consum energètic, que en limiten l'autonomia de funcionament.

La problemàtica de l'elevat consum és conseqüència de dos factors. El primer és que, en algunes fases, els accionaments, al generar la trajectòria dels peus, funcionen com a fre realitzant un treball negatiu i per tant dissipant importants quantitats d'energia mecànica. Aquesta energia perduda ha de ser generada, simultàniament o posterior, per un altre accionament. El segon factor és el rendiment de motors i transmissions

fins als eixos accionats, que sovint és molt baix per culpa de la gran relació de reducció necessària i de les particulars condicions de funcionament, a velocitats o càrregues baixes.

Al 1r apartat d'aquest capítol es presenten alguns estudis, de configuració general de robots caminadors, que persegueixen l'objectiu de minimitzar el treball mecànic que han de desenvolupar els mecanismes de les potes per fer la seva funció, que és desplaçar el cos del robot. El 2n apartat es centra en els accionaments que han d'impulsar el moviment de les potes. Els dos últims apartats són un recull d'informació i de treballs d'investigació que persegueixen l'objectiu de caracteritzar i modelitzar dos tipus de transmissió mecànica que presenten notables avantatges en l'aplicació a robots caminadors: els reductors *Harmonic Drive*[®] i les corretges dentades.

2.1 Configuració dels robots i estratègies de moviment per a l'eficiència energètica

El primer plantejament que hom considera a l'hora de minimitzar l'energia consumida per una màquina qualsevol, és intentar reduir l'energia mecànica requerida pels mecanismes que realitzen les funcions demanades a la màquina. La funcionalitat d'un robot caminador és desplaçar el cos, i la càrrega que pugui portar a sobre, des d'un punt fins un altre. Així, en el sentit comentat, el primer pas per minimitzar l'energia consumida per un robot caminador és definir els mecanismes de les potes de tal manera que el treball mecànic que hagin de fer durant l'operació de caminar sigui el mínim possible.

2.1.1 Robots caminadors estàtics

Marhefka i Orin (1997) presenten una anàlisi de l'anadura, o seqüència de passos, i de la configuració del mecanisme de pota d'un robot hexàpode estàticament estable. Realitzen un conjunt bastant complet de simulacions dinàmiques per estudiar la influència de diferents paràmetres de disseny i de l'anadura en el consum energètic del robot. El mecanisme de la pota és de barres articulades, tipus insecte, amb tots els motors i transmissions situats propers al cos per minimitzar la inèrcia de les potes. Els accionaments es basen en motors elèctrics i reductors d'engranatges, i el model té en compte el rendiment dels motors. El model no té en compte la inèrcia dels membres que formen les potes. En el seu lloc es suposa que cada pota és una massa puntual situada a la primera articulació de la pota amb el cos, el maluc. Es plantegen una sèrie de simulacions d'anadures tipus ona, caminant en línia recta per un terreny horitzontal. Analitzant la influència de diferents paràmetres d'operació, s'arriba a un conjunt de cinc regles a tenir en compte a l'hora de definir les línies bàsiques de disseny i els paràmetres de funcionament del robot:

1. *Velocitat d'avanç.* Si la potència consumida es deu principalment a efectes estàtics i efectes dinàmics de primer ordre associats a la velocitat del robot, llavors el consum específic, és a dir, per distància recorreguda, es pot minimitzar incrementant la velocitat.
2. *Posició del peu respecte el cos.* La posició del peu a mitja cursa hauria de situar-se sobre un arc amb centre a l'eix vertical passant pel maluc i de radi el resultant quan l'última barra està pràcticament vertical.
3. *Altura del cos.* Per generar les forces de suport requerides amb el mínim parell a l'articulació d'elevació, cal abaixar el cos de manera que el genoll es situï per sobre del maluc, on es troba l'articulació entre cos i primera barra de la pota.
4. *Factor de servei.* Fixada la velocitat del robot, cal establir el valor màxim possible de factor de servei mentre, en fase de transferència, no assoleixi una velocitat del peu excessiva per a les possibilitats de l'accionament.
5. *Cursa del peu.* La cursa del peu ha de tenir un valor intermedi. Cal evitar curses massa petites que provoquen excessives velocitats en la transferència del peu i limiten el factor de servei màxim. I per altra banda cal evitar curses massa llargues que redueixen el marge d'estabilitat i impliquen un consum de potència elevat en les potes que defineixen el costat crític del polígon de suport.

Els resultats demostren que, després de l'optimització de paràmetres de disseny i d'anadura, la despesa energètica es redueix fins un 50% respecte a un conjunt inicial de paràmetres que a priori semblaven raonables.

Zielinska *et al.* (1999) defensen la pota tipus insecte, per aplicar-la a un hexàpode, com la més eficient energèticament i que ofereix millors prestacions de mobilitat. En quant a disseny mecànic proposa que les potes estiguin formades per una cadena cinemàtica de tres barres articulades, seguint la proporció de longituds que hom troba als insectes, 1:4:5 començant per la barra articulada amb el cos. Per aconseguir un funcionament més eficient energèticament recomana una altura del punt del cos on es situa el maluc respecte al terra igual a un 22% de la longitud total de la pota, i una longitud de la passa igual al 20% de la longitud de la pota.

Les recomanacions que resulten d'aquest treball poden ser una base de partida, però sembla evident que optimitzar l'eficiència energètica del robot demana una anàlisi molt més detallada.

Silva *et al.* (2001) realitzen una anàlisi energètica teòrica d'un hexàpode amb potes en disposició tipus mamífer. L'estudi es planteja, com ho fan altres autors, caminant en línia recta i sobre un terra horitzontal. El model utilitzat per a l'estudi és molt senzill. Es considera que tota la massa està concentrada al cos del robot i no es té en compte el fregament a les articulacions. Es plantegen una sèrie de simulacions per a diferents paràmetres d'operació i, per avaluar en cada cas el comportament des d'un punt de vista energètic, es defineixen tres índexs: potència requerida mitjana, desviació de la potència i potència dissipada mitjana. Els millors resultats s'obtenen per a un factor de servei del 50%, una alçada del cos entre el 80 i el 90% de la longitud total d'una pota i una cursa del peu inferior al 10% de la longitud de la pota.

Les hipòtesis considerades, molt simplificadores, fan que els resultats difícilment puguin ser semblants als que es tindrien en un robot real.

Yoneda i Ota (2003) parteixen de l'evidència de que l'elevat número d'actuadors en un robot caminador implica una massa excessiva del conjunt. En els dissenys convencionals, imitant als animals, la mobilitat demanada a cada pota per separat és molt elevada. Per exemple, en un robot de múltiples potes, com un quadrúpede o un hexàpode, es vol que cada peu es pugui moure en un espai de treball tridimensional. Això implica un mínim de 3 graus de llibertat per pota. En el cas d'un robot bípede, el peu també s'ha de poder orientar a voluntat per adaptar la zona de contacte a la forma del terreny on es recolza. Per tant cal sumar 3 graus de llibertat addicionals a cada pota. El resultat és que els robots amb mobilitat semblant als animals tenen 12 graus de llibertat els bípedes, 12 també els quadrúpedes i 18 els hexàpodes.

Realitzen una comparativa entre aquestes tres configuracions amb diferent número de potes. Així es consideren tres dissenys amb prestacions equivalents en quant a velocitat d'avanç i massa total. De la comparació es dedueix que el pes màxim que seria capaç de suportar el robot, en la situació en la que es suma l'efecte de totes les potes, és igual en els tres casos. Això és així perquè, en els tres casos, cal dimensionar els accionaments de tal manera que amb la meitat de les potes es pugui suportar el pes total del robot. En quant a la velocitat màxima de moviment de la pota respecte al cos, també es tenen requeriments equivalents. La velocitat màxima a la que cal moure la pota en la fase de transferència és en els tres casos aproximadament igual a la velocitat d'avanç que es vol aconseguir. La conclusió és que la potència total a instal·lar en robots de disseny convencional és independent del número de potes.

Llavors per aconseguir una menor potència instal·lada, i per tant una menor massa dels actuadors, s'han de seguir estratègies diferents. Els autors en suggereixen tres de diferents:

1. *Actuadors acoblats*. Es tracta de combinar dos actuadors per aconseguir, amb un funcionament conjunt, el moviment vertical o horitzontal del peu (veure la Figura 2.1(b)). L'altra possibilitat seria amb actuadors independents per a cada moviment (Figura 2.1(a)). El moviment vertical és el que demana més potència, i amb els actuadors acoblats i muntats lleugerament inclinats i oposats l'un a l'altre, uneixen els seus efectes al impulsar el moviment en aquesta direcció. Com a conseqüència la potència total instal·lada pot ser menor. L'inconvenient d'aquesta disposició és que, en el moviment horitzontal, un dels actuadors realitza un treball negatiu, dissipant energia mecànica.

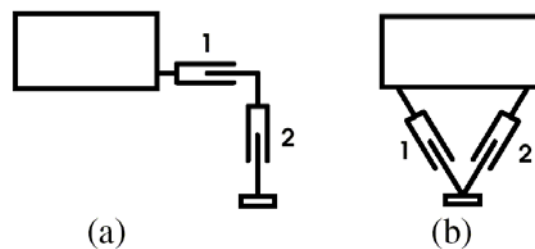


Fig. 2.1. Actuadors desacoblat (a) i acoblats (b) (Yoneda i Ota, 2003)

2. *Accionament comú per a diverses potes*. La idea és que els accionaments estiguin disposats de tal forma que el moviment d'una pota es descriu en referència a altres potes. A la Figura 2.2(a) es té una disposició clàssica de quadrúpede, amb 3 graus de llibertat per pota. En contrast, la disposició de la Figura 2.2(b) té un únic grup de 3 accionaments entre les quatre potes. Si es mantenen tres peus fixes a terra, per exemple situant el centre de masses del robot dins el triangle que formen, el quart peu es pot moure en qualsevol de les tres direccions respecte als tres primers.

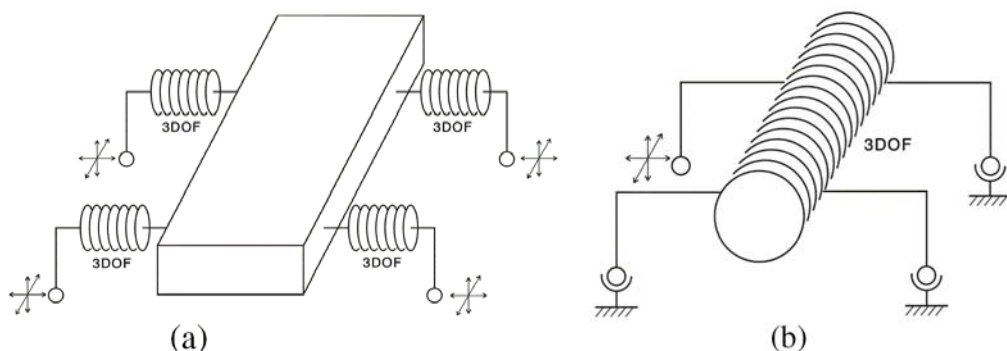


Fig. 2.2. Accionaments independents (a) i accionament comú (b) (Yoneda i Ota, 2003)

3. *Parell nul quan està en repòs*. Aconseguir que la pota suporti part del pes sense necessitat de ser actuada es pot fer per dues vies diferents. Una via és mitjançant una transmissió irreversible en l'actuador. L'altra és imposant una configuració singular del mecanisme de la pota. Un clar avantatge d'aquesta

estratègia és reduir el consum energètic. També permet disminuir la potència instal·lada dels accionaments, doncs al evitar l'escalfament que implicaria exercir un parell sense moure's, n'hi ha prou amb un motor de menor potència.

Els autors presenten diferents exemples de robots caminadors amb un mínim número d'actuadors. Un d'ells, mostrat a la Figura 2.3 i que els autors classifiquen com a hexàpode, és el robot *PARAWALKER II*. Consisteix en dos bastidors amb tres potes cadascun, els quals estan units per un mecanisme de 6 graus de llibertat. Quan un bastidor està recolzat sobre el terra l'altre es pot moure, en qualsevol de les tres direccions, i girar, al voltant de qualsevol dels tres eixos de l'espai, per situar-se en la nova posició d'avanç del robot.

Si bé aquest robot es podria veure també com un senzill bípede amb dos peus triangulars, la veritat és que la seva mobilitat és força interessant, i clarament superior a la d'un vehicle amb rodes.

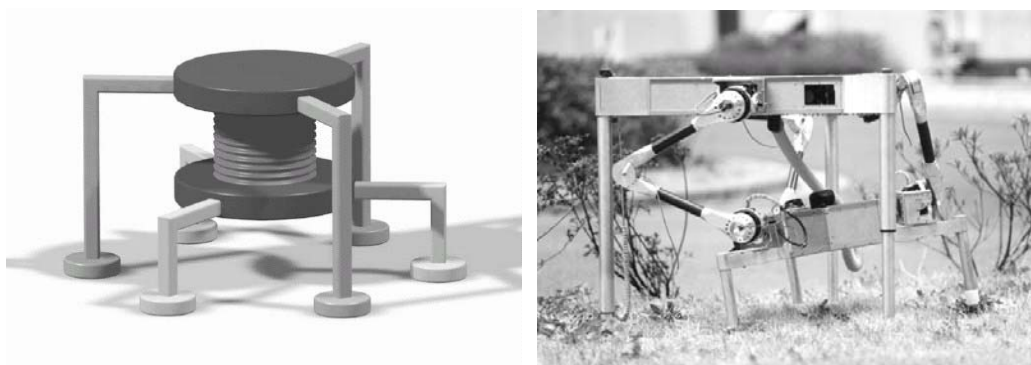


Fig. 2.3. Concepte i prototip del robot *PARAWALKER II* (Yoneda i Ota, 2003)

La majoria de configuracions de robots caminadors estàtics tenen el problema de que en algunes articulacions es realitza treball negatiu, empitjorant així l'eficiència energètica. Per altra banda, la forma de funcionar d'aquest robots, permet els avantatges d'una gran suavitat de marxa i de precisió en el moviment del cos. Aquestes característiques són importants a l'hora de portar a terme moltes de les tasques que es poden encomanar a un robot caminador. Alguns exemples podrien ser tasques d'inspecció i reparació en instal·lacions, de rescat de persones en entorns accidentats o la detecció i desactivació de mines anti-persona.

2.1.2 Robots caminadors dinàmics

McGeer (1990) suggereix un model de robot bípede amb potes rectes i de longitud constant. L'operació de caminar segueix una seqüència tipus compàs, de manera que la trajectòria del cos és una seqüència d'arcs de circumferència amb centre al punt de contacte del peu amb el terra. La idea d'aquest disseny és anar intercanviant energia

cinètica per energia potencial gravitacional i al revés, per aconseguir caminar per una lleugera pendent negativa sense necessitat d'accionament, o per un pla horitzontal únicament amb un petit parell actuant sobre el peu en fase de suport. La velocitat d'avanç en pendent depèn de l'angle d'aquesta pendent i de les condicions inicials de posició i velocitat de les potes.

Raby i Orin (1999) presenten un estudi de configuració de les potes amb l'objectiu també d'emmagatzemar energia potencial quan al mecanisme de la pota es realitza un treball negatiu. Aplicable tant a bípedes com a robots de més potes, la idea del disseny és emmagatzemar energia potencial en funció de l'altura a la que es troba el cos, i també en elements elàstics. L'esquema de la pota proposada es mostra a la Figura 2.4. Consisteix en un element telescòpic i amb el membre superior articulat amb el cos.

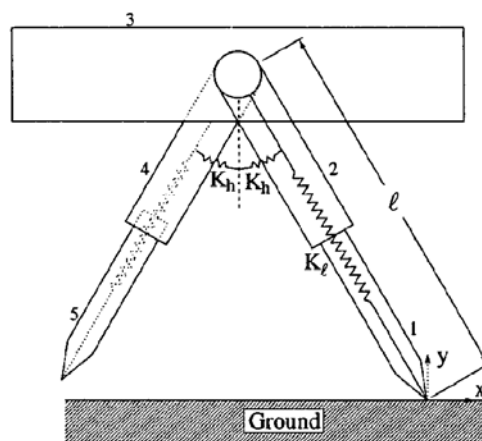


Fig. 2.4. Pota amb molles lineal i torsional (Raby i Orin, 1999)

Els elements elàstics són una molla lineal al parell prismàtic i una molla torsional a l'articulació del maluc. Analitzant la relació entre la velocitat inicial i l'angle de la pota en el moment en que aquesta entra en contacte amb el terra, plantegen una sèrie de càlculs i algorismes per determinar la trajectòria ideal del cos que aporti el seu funcionament a una seqüència cíclica de moviments sense pràcticament necessitat d'accionament.

Nakano *et al.* (1994) proposen una tercera via, més original, per aconseguir un caminar dinàmic energèticament eficient seguint la idea de l'intercanvi entre energia cinètica i potencial. El disseny correspon a un bípede on cada pota consisteix en un element prismàtic elàstic que es pot deformar endavant i endarrera, en lloc dels habituals fèmur i tibia rígids (veure la Figura 2.5). Aquesta deformació de les potes actua com d'articulació al genoll i permet emmagatzemar energia elàstica. Gràcies a aquesta estructura es redueix el pes del conjunt a aproximadament només la meitat del pes que tindria la pota utilitzant sòlids rígids. L'estratègia de moviments

plantejada s'assaja en un prototipus i demostra la seva viabilitat. Experimentalment demostren que amb aquest disseny s'aconsegueix caminar dinàmicament de manera ràpida i estable amb un consum energètic reduït al 70% en comparació amb un robot equivalent format per elements rígids.

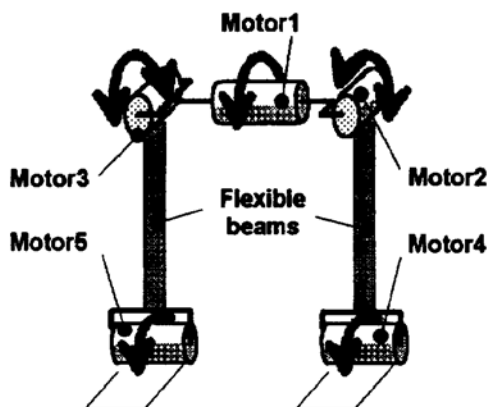


Fig. 2.5. Concepte del robot bípede amb potes flexibles (Nakano *et al.*, 1994)

Waldron (2000) posa de manifest que, si bé s'han construït i assajat bastants robots caminadors estàtics i alguns de dinàmics, cap d'aquests s'apropa encara a les capacitats de locomoció que els exemples biològics poden oferir. La forma com treballen les potes en la majoria de robots caminadors és molt diferent de com ho fan a la natura. Al dissenyar un robot es pensa en les potes com a palanques, amb la funció de suportar esforços en diferents direccions. Això gairebé mai és així en els animals. En aquests, diferents estudis han demostrat que la força de contacte al peu normalment actua aproximadament en la direcció definida entre el peu i l'articulació de la pota amb el cos. Això vol dir que els animals utilitzen les potes per impulsar-se al llarg de l'eix corresponent, i no per resistir components de força normals a aquest eix. No resulta estrany per tant, que les potes dels animals puguin suportar esforços molt més grans en la direcció axial que en les direccions transversals a aquesta. Les potes dels robots caminadors es dissenyen generalment per funcionar com a palanques, i aquest fet és encara més evident en les potes tipus insecte.

Per altra banda, en un robot que es vol que sigui estàticament estable, la reacció sobre el peu sempre serà vertical, mentre la direcció de l'eix de la pota ha de canviar per definir així la trajectòria del peu respecte al cos. Al caminar, els animals efectuen un continu intercanvi d'energia cinètica per potencial i al revés, de tal manera que en la majoria de les situacions cap d'ells és estàticament estable, ni tan sols caminant a poca velocitat. En un robot, mantenir constant l'alçada i la velocitat d'avanç del cos es veu com una forma de simplificar el control. Però aquesta forma de dissenyar els robots caminadors implica un cost en termes de pes de l'estructura i complexitat mecànica del conjunt que dificulten l'apropament a les prestacions dels exemples biològics.

Amb l'objectiu d'explorar les possibilitats de realitzar un sistema locomotriu semblant al dels animals, plantegen el desenvolupament d'un robot quadrúpede saltador (veure la Figura 2.6). Aquest no únicament ha de ser capaç de seguir una anadura estàticament inestable, sinó també de corre galopant. Això implica que les potes han de poder impulsar enèrgicament el cos fent-lo saltar. Per això estan dissenyades de forma que la potència màxima la desenvolupen estirant pota, en la direcció entre maluc i peu.

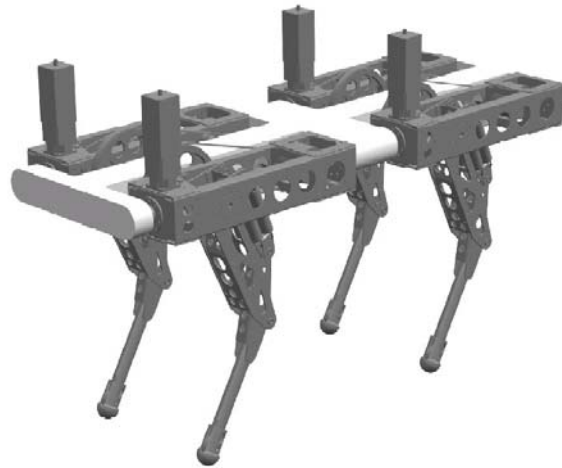


Fig. 2.6. Model tridimensional del robot quadrúpede saltador (Waldron, 2000)

En els robots caminadors dinàmics es té l'avantatge de l'intercanvi d'energia cinètica i potencial. La capacitat d'emmagatzematge d'energia, en forma d'energia potencial gravitacional o energia elàstica, permet una major eficiència energètica global. Els senzills sistemes de locomoció mitjançant un caminar tipus compàs poden ser eficients energèticament, però no són capaços d'avançar per terrenys irregulars. Calen dissenys més complexos, per exemple amb accionaments que permetin controlar la longitud de cada pota, per oferir algun avantatge respecte a un clàssic sistema de locomoció amb rodes. Els robots saltadors sí que poden tenir la capacitat de superar obstacles o avançar per terreny irregular. Els inconvenients en aquest cas són una major complexitat del sistema de control i la poca suavitat del moviment d'avanç del robot.

2.2 Estudi cinemàtic i dinàmic d'actuadors aplicats a robots caminadors

Una vegada triats la configuració i l'estratègia de moviments de les potes, queden fixats el parell a exercir i la velocitat de rotació de cada articulació. Aquests parells i velocitats evolucionen al llarg d'un cicle d'anadura. Per a cada articulació hi ha intervals en que el treball realitzat és positiu i altres en que es negatiu. L'accionament encarregat de governar el moviment de cada articulació és el responsable d'efectuar aquests treballs.

Un segon plantejament per reduir el consum energètic del robot caminador és procurar la màxima eficiència energètica dels accionaments. Cal minimitzar l'energia que l'accionament requereix al llarg del cicle per tal de realitzar els treballs demanats. Una forma és tenir un bon rendiment de l'accionament, és a dir, una relació favorable entre la potència mecànica que l'accionament transmet al mecanisme i la potència que li entra. Una altra possibilitat, utilitzada en alguns exemples que es comentaran en aquest apartat, és emmagatzemar l'energia corresponent al treballs negatius en l'articulació per poder utilitzar-la més endavant.

Hirose (1993) presenta un mètode general de disseny d'accionaments per a robòtica que es basa en la idea d'evitar el consum d'energia en el procés de frenat de l'eix de sortida de l'accionament. En el mecanisme de la pota d'un robot caminador, una forma d'aconseguir-ho és que els accionaments estiguin totalment desacoblats pel que fa al moviment vertical, com passa per exemple en el mecanisme de pantògraf tridimensional, anomenat *PANTOMECA* (veure la Figura 2.7), introduït l'any 1985 pel mateix autor en el disseny del robot quadrúpede *TITAN-III*.

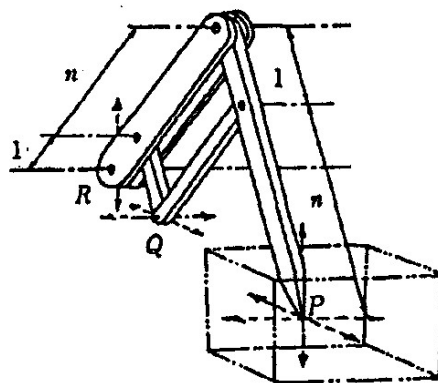


Fig. 2.7. Mecanisme de pota *PANTOMECA* (Hirose, 1993)

Una altra forma d'evitar que es dissipï energia en el mecanisme és un interessant disseny d'accionament rotatiu, mostrat a la Figura 2.8, compost per un motor, una molla torsional i una transmissió per engranatges amb dos embragatges que actuen sobre l'eix de sortida en sentits oposats. El resultat és que connectant un o l'altre embragatge es pot invertir el sentit de gir de l'eix de sortida, connectant els dos a la vegada es bloqueja la sortida, i connectant l'embragatge adequat es pot fer que el treball de frenada s'acumuli en forma d'energia potencial a la molla torsional. Així després es pot utilitzar aquesta energia per accionar l'eix de sortida.

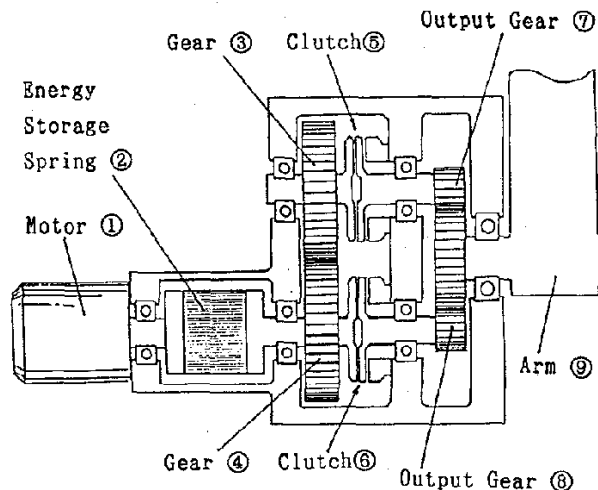


Fig. 2.8. Accionament amb molla per emmagatzemar energia (Hirose, 1993)

Hirose i Arikawa (2000) diferencien entre accionaments per a robòtica acoblats, quan tots ells influencien en el moviment, i accionaments desacoblats, que generen moviments totalment independents dels altres actuadors. Els accionaments acoblats permeten disposar de més potència en el moviment. Si actuen en paral·lel el resultat és que es sumen les forces i si actuen en sèrie el resultat és una major velocitat. L'inconvenient principal del acoblats és que, en realitzar certs moviments, un dels accionament actua com a fre, absorbeix potència, i llavors l'altre, a part d'accionar el moviment de la càrrega, ha de compensar l'efecte negatiu del primer. El muntatge d'accionaments desacoblats evita les situacions en que un accionament pugui dissipar part de la potència que transmet l'altre. Per contra no permet sumar els seus efectes en cas de necessitat d'una potència elevada. Els autors exposen la possibilitat de que un mateix mecanisme pugui funcionar amb accionaments acoblats o desacoblats segons la posició en que se'l faci treballar. Es proposa un disseny de quadrúpede el mecanisme de pota del qual treballa amb accionaments desacoblats quan camina en terreny pla, per tenir poc consum, i amb accionaments acoblats per escalar parets, quan és necessària una potència elevada.

Garcia i González de Santos (2001) presenten un experiment per avaluar el rendiment d'una transmissió utilitzada per accionar una articulació en un robot caminador. L'accionament es compon d'un motor elèctric, un reductor planetari i a la sortida d'aquest un reductor de vis sense fi. L'experiment consisteix en fer girar l'eix de sortida diverses voltes a velocitat constant, sense cap càrrega sobre ell, mesurant el parell que ha de fer el motor per mantenir aquesta velocitat. El mateix experiment es repeteix per a tota una gamma de diferents velocitats. Per anàlisi d'espectre de freqüències s'identifiquen oscil·lacions del parell motor relacionades amb les velocitats de gir dels diferents eixos: de sortida del vis sense fi, sortida del planetari i eix del motor. S'arriba al resultat de que el parell de fricció és aproximadament constant al reductor planetari. En canvi la fricció decreix al reductor de vis sense fi quan augmenta la

velocitat, fenomen aquest que s'atribueix a una millor lubricació per efecte Striebeck. El problema principal d'aquest experiment és que s'ha fet sense aplicar cap parell resistent a la sortida. Aquesta condició de funcionament és ben diferent en una articulació real d'un robot caminador, i forçosament ha d'influir en el valor de les resistències passives als reductors.

Guardabrazo *et al.* (2003) es proposen modelitzar la pota d'un robot caminador i els seus actuadors des del punt de vista del consum energètic. Per descriure el sistema defineixen dos models. El primer és un model dinàmic del robot, que no especifiquen, a partir del qual es determinen les càrregues a les articulacions de la pota. Aquestes càrregues venen definides per l'evolució dels parells i de les velocitats angulars al llarg d'un cicle d'anadura. El segon és un model del parell de fricció a l'articulació, que vol englobar totes les resistències passives que afecten al moviment d'aquesta articulació. Això vol dir que ha de representar l'efecte de la fricció als rodaments que defineixen l'articulació, als elements que formen tota la cadena de transmissió i als rodaments del motor. El model de fricció proposat pels autors es representa a la Figura 2.9. Es considera que el seu comportament és diferent segons el sentit de rotació de l'articulació, i per tant és asimètric. A velocitat nul·la es té un parell de fricció estàtic, al incrementar lleugerament la velocitat de l'articulació el parell de fricció disminueix per efecte Striebeck, i després augmenta segons una llei de fregament viscos, proporcionalment a la velocitat. En el model no es considera la influència del parell actuant a l'articulació.

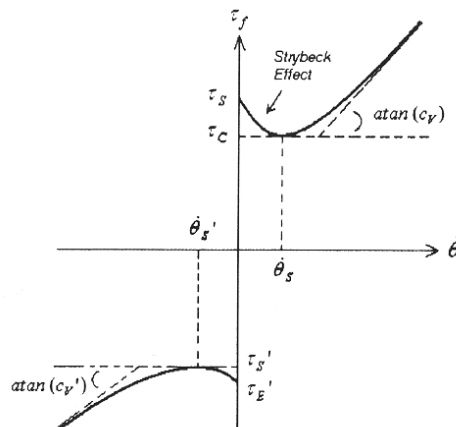


Fig. 2.9. Model de parell de fricció en funció de la velocitat (Guardabrazo *et al.*, 2003)

Amb l'objectiu de verificar el model realitzen diferents experiments amb una pota del robot *SIL04* (Galvez *et al.*, 2000), que és de tipus insecte i té 3 graus de llibertat. A partir de les dades experimentals identifiquen els paràmetres del model, per a cadascuna de les articulacions, de tal manera que aquest s'ajusti al comportament real.

Els paràmetres resultants de la identificació són una mica sorprenents. Els valors dels paràmetres que s'obtenen implicarien que una mateixa articulació presentaria un comportament, en quant a la fricció, totalment diferent en un i altre sentit de rotació.

Takahama i Inagaki (1997) analitzen la problemàtica de la poca autonomia dels robots caminadors. Les causes les identifiquen en la gran quantitat de graus de llibertat necessaris, normalment amb un accionament independent per a cadascun, i la pobra relació entre potència i pes que ofereixen els accionaments basats en motors elèctrics, en comparació amb els motors de combustió. En el mateix sentit comparen les bateries elèctriques amb els dipòsits de combustible. A la Taula 2.1 es pot observar com la relació entre l'energia emmagatzemada i la massa de l'acumulador és molt desfavorable en el primer cas. Mencionen també els cilindres hidràulics com a possible accionament controlable amb precisió, però la seva aplicació es restringeix normalment a casos en que és necessària una gran potència.

Taula 2.1. Comparació entre motors CC i motors de combustió (Takahama i Inagaki, 1997)

Relació entre potència i pes [W/kg]	
Motor CC	20 – 120
Motor de combustió	1500 – 4000
Densitat d'energia [Wh/kg]	
Bateria elèctrica	30 – 45
Gasolina	1250 – 3750

Com a alternativa als dissenys clàssics amb motors elèctrics, proposen un disseny que utilitza un motor d'explosió com a generador d'energia mecànica. La novetat és que, per controlar el moviment de cada grau de llibertat, es té un complex sistema format per una transmissió amb un engranatge, dos embragatges magnètics i una corretja dentada (veure la Figura 2.10). Segons si s'activa un o altre dels embragatges, aquest sistema permet fer girar l'eix de sortida en un o altre sentit, tot mantenint constant el sentit de rotació de l'eix d'entrada. Cada pota té 3 graus de llibertat i per tant són necessaris 6 embragatges per pota.

El mecanisme de pota proposat tampoc és molt habitual en robots caminadors. Dos graus de llibertat queden definits per un mecanisme de 5 barres articulades formant una cadena cinemàtica tancada en el pla horitzontal, essent la barra fixa el cos del robot i situant-se el peu a l'extrem oposat del pentàgon (veure la Figura 2.11).

El moviment vertical del peu s'aconsegueix amb un mecanisme de cargol de boles i femella. Els accionaments de moviment horitzontal estan totalment desacoblats de l'accionament vertical i per tant no han de suportar el pes del cos. Dos avantatges d'aquest mecanisme són que és de cadena tancada, i per tant més resistent a l'extrem més allunyat del cos, i que tots els embragatges d'actuació es poden situar al cos del robot. Una característica important d'aquest sistema és que els accionaments en

funcionament es van alternant al llarg del cicle, però el número d'accionaments funcionant simultàniament és més o menys constant. Per tant també és més o menys constant la potència demanada al generador, i sempre molt inferior a la potència total dels accionaments instal·lats o a la potència total dels motors elèctrics que serien necessaris en un disseny clàssic.

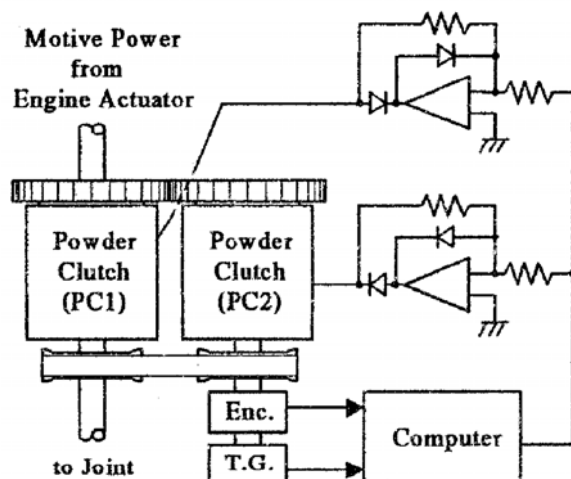


Fig. 2.10. Transmissió per a l'accionament de cada grau de llibertat (Takahama i Inagaki, 1997)

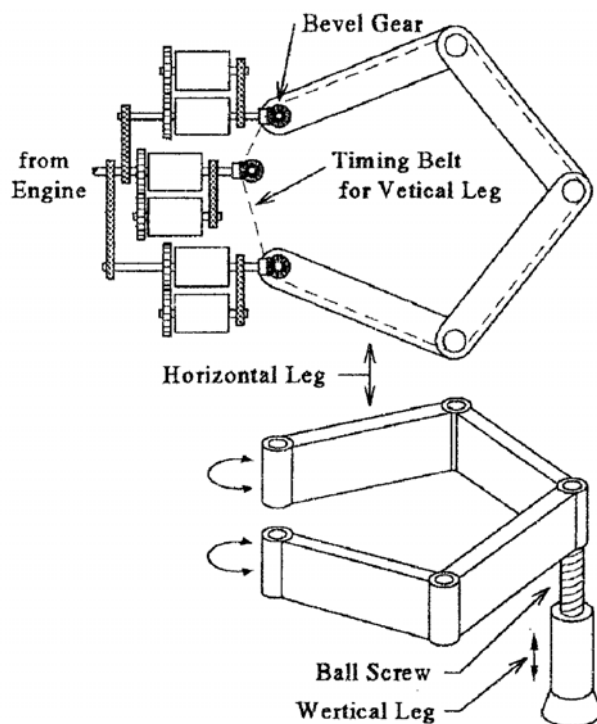


Fig. 2.11. Mecanisme d'una pota (Takahama i Inagaki, 1997)

Un inconvenient important de la utilització d'aquest sistema d'accionament és la limitada capacitat de dissipació d'energia als embragatges, necessària quan en aquests es produeix lliscament. Després d'analitzar per simulació el funcionament de tot el sistema, i una vegada dimensionats correctament els embragatges, s'arriba a una massa total del conjunt similar a la que es tindria amb accionaments formats per motors elèctrics de corrent continu i reductors *Harmonic Drive*[®]. En el que sí s'obté una millora considerable és en l'autonomia del robot. Dels resultats de la simulació es dedueix que l'autonomia amb motor de combustió i embragatges magnètics seria aproximadament tres vegades superior a la que es tindria amb motors CC, reductors i bateries.

2.3 Els reductors *Harmonic Drive*[®]

El principi de funcionament del reductor *Harmonic Drive*[®] (HD) va ser patentat per Walter Musser als Estats Units l'any 1955. Al principi tots els desenvolupaments i la producció del nou reductor estaven destinats exclusivament a aplicacions aeronàutiques de la *NASA (National Aeronautics and Space Administration)*. Durant els anys setanta i vuitanta del segle passat el seu ús es va estendre a altres àmbits tecnològics, essent les principals aplicacions al principi els robots industrials, les màquines-eina de mecanitzat i la maquinària industrial d'impressió.

2.3.1 Descripció i principi de funcionament

A la Figura 2.12 es mostren els tres elements principals en el funcionament d'un reductor HD: el *circular spline* (o corona rígida), el *flexspline* (o roda flexible) i el *wave generator* (o generador d'ones).

El *circular spline* és una corona rígida dentada interiorment. El *flexspline* és una peça flexible en forma de got, que té un dentat exterior a la zona oberta, amb un diàmetre lleugerament inferior al diàmetre interior del *circular spline* i amb dues dents menys que aquest. El *wave generator* està compost d'un cub de forma exterior el·líptica i un rodament de boles, muntat al seu voltant, amb l'anell exterior de petit gruix i que es pot deformar per adaptar-se al cub i a l'anell interior el·líptics quan aquests giren.

Els tres elements van muntats coaxialment. El *wave generator* està inserit en l'interior del *flexspline*, obligant a aquest a adoptar una forma el·líptica a la zona del dentat. *Flexspline* i *circular spline* engranen en les dues regions oposades que coincideixen amb el diàmetre major de l'el·lipse.

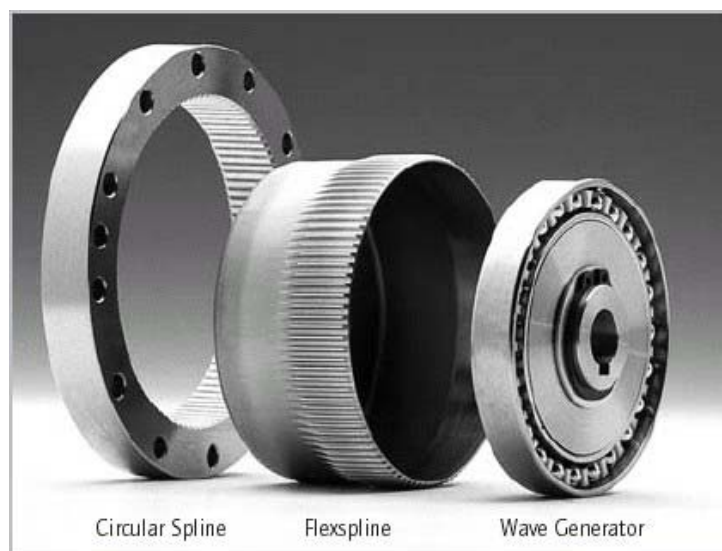


Fig. 2.12. Components principals d'un reductor *Harmonic Drive* (Harmonic Drive AG, 2003)

La Figura 2.13 representa el principi de funcionament del reductor *HD*. Al fer girar el *wave generator* la zona d'engranament es desplaça amb el diàmetre major d'aquest fent engranar progressivament les diferents dents del *flexspline* i el *circular spline*. Al tenir el primer dues dents menys que el segon, quan el *wave generator* i la zona d'engranament s'han desplaçat 180°, el *flexspline* ha girat en sentit contrari una dent respecte al *circular spline*. Per cada volta completa del *wave generator* el *flexspline* gira, en sentit contrari, únicament dues dents en relació al *circular spline*.

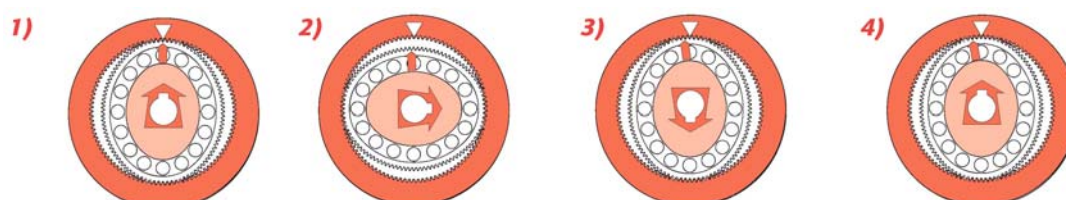


Fig. 2.13. Seqüència de moviments en el funcionament d'un reductor *HD* (Harmonic Drive AG, 2003)

El curiós principi de funcionament d'aquest reductor implica que es pot obtenir una important relació de reducció en una única etapa. Una altra particularitat és que, al engranar diverses dents a la vegada, els esforços de contacte es reparteixen i el parell transmissible és molt elevat.

En un reductor *HD* es tenen tres eixos de moviment diferenciat, que són els corresponents als tres elements principals. L'ús més comú del reductor és com a transmissió mecànica d'un grau de llibertat. Es poden obtenir diferents configuracions establint diferents combinacions d'eixos fix, d'entrada i de sortida. Les dues configuracions més comuns són amb el *wave generator* (*wg*) com a eix d'entrada. En una d'elles el *circular spline* (*cs*) és l'element fix i el *flexspline* (*fs*) és l'eix de sortida, i en l'altra aquests dos elements s'intercanvien la funció. El conjunt també pot

funcionar com a multiplicador, amb el *wave generator* com a eix de sortida, o com un mecanisme diferencial, amb els tres eixos mòbils i amb dos graus de llibertat.

La relació cinemàtica entre la velocitat de rotació dels tres eixos ve definida per l'Equació (2.1), on N és la relació de reducció de catàleg.

$$\omega_{wg} = (N + 1) \cdot \omega_{cs} - N \cdot \omega_{fs} \quad (2.1)$$

Suposant un reductor ideal sense fricció, els parells transmesos als diferents eixos quedarien relacionats per l'Equació (2.2).

$$\Gamma_{wg} = \frac{1}{N + 1} \cdot \Gamma_{cs} = -\frac{1}{N} \cdot \Gamma_{fs} \quad (2.2)$$

2.3.2 Característiques i prestacions segons el subministrador

El fabricant, *Harmonic Drive AG*, subministra els reductors de dues formes diferents: únicament els tres components principals, sense muntar, o una unitat muntada que integra també el rodament i l'anell d'estanquitat entre el *circular spline* i el *flexspline* (veure la Figura 2.14). Amb els tres components individuals es té l'inconvenient de que cal afegir-hi els elements per definir l'enllaç d'articulació, però amb l'avantatge de que el disseny del conjunt es pot adaptar a cada aplicació particular.

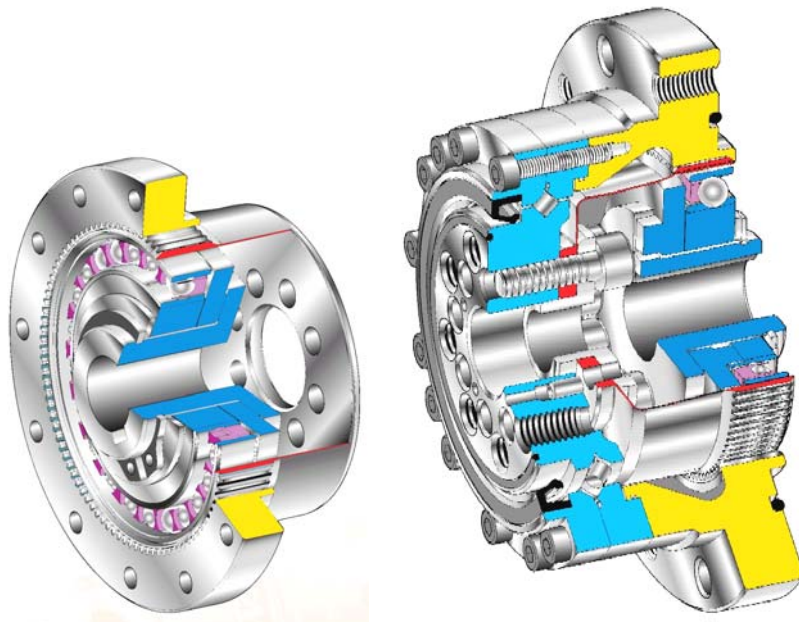


Fig. 2.14. Components i unitat muntada de la sèrie *HFUC* del reductor *HD* (Harmonic Drive AG, 2003)

A la Taula 2.2 es resumeixen les característiques principals, d'alguns models de la sèrie *HFUC* del reductor *HD*, corresponents als components principals sense muntar. A la Taula 2.3 es tenen les dades equivalents pel cas dels conjunts muntats.

Taula 2.2. Característiques dels components de la sèrie *HFUC* del reductor *HD* (Harmonic Drive AG, 2003)

Model	Relació de reducció	Parell màxim		Massa [kg]	Dimensions [mm]	
		[Nm]			diàmetre	longitud
		mig	de pic			
11	30 50 100	8,9	11	0,05	40	25,8
14	30 50 80 100	11	28	0,09	50	28,5
17	30 50 80 100 120	39	54	0,15	60	32,5
20	30 50 80 100 120 160	49	92	0,28	70	33,5

Taula 2.3. Característiques dels conjunts muntats de la sèrie *HFUC* del reductor *HD* (Harmonic Drive AG, 2003)

Model	Relació de reducció	Parell màxim		Massa [kg]	Dimensions [mm]	
		[Nm]			diàmetre	longitud
		mig	de pic			
14	30 50 80 100	11	28	0,49	73	41
17	30 50 80 100 120	39	54	0,64	79	45
20	30 50 80 100 120 160	49	92	0,98	93	45,5

Els reductors *HD* tenen una rigidesa considerable. Tot i així hi ha aplicacions en que és important preveure la deformació angular que es pot produir. Per això el fabricant proposa una corba de tres trams rectes, amb pendent decreixent, per aproximar la deformació angular del reductor en funció del parell aplicat a la sortida d'aquest.

Es tenen força dades del parell de fricció en buit, que és el parell que cal aplicar a l'entrada quan el parell a la sortida és nul. Per una banda es dona el valor de parell de fricció a l'arrencada i per altra banda la fricció en buit per a alguns valors concrets de la velocitat de gir i per a diferents temperatures de funcionament. També es dona el parell de fricció en buit en funcionament invers, és a dir, el parell que cal aplicar al costat de baixa velocitat, per tal que comenci el moviment, quan el parell al costat d'alta velocitat és nul.

Les dades de rendiment previst del conjunt es donen suposant un funcionament a parell nominal a la sortida (η_{nom}). De la mateixa manera que en les dades de fricció, es tenen les dades de rendiment per a alguns valors concrets de la velocitat de gir i per a diferents temperatures de funcionament. El rendiment disminueix amb la velocitat de gir i augmenta amb la temperatura. A més es defineix un factor *K*, en funció de la relació entre el parell mig aplicat i el parell nominal de cada model, per corregir el

rendiment real previst (η_{real}) segons l'Equació (2.3). S'observa com el rendiment decreix al disminuir el parell transmès, i ho fa més dràsticament com més s'allunya del parell nominal.

$$\eta_{\text{real}} = \eta_{\text{nom}} \cdot K \quad (2.3)$$

En general les dades que ofereix el fabricant són força interessants i completes per a l'enginyer que ha de projectar la màquina o el robot que incorpora un d'aquests reductors. Però la cosa canvia quan es pensa en modelitzar i caracteritzar acuradament el comportament dinàmic del reductor. En aquest sentit les dades proporcionades són insuficients. Per exemple només es tenen dades del rendiment previst i del fregament en buit per a quatre valors concrets de la velocitat a l'eix d'entrada.

Altres mancances per poder caracteritzar correctament el reductor són:

- a. No es tenen dades del reductor girant i actuant com a fre, és a dir, quan es realitza un treball negatiu a l'eix de sortida.
- b. No es tenen en compte les càrregues –radials, axials i de moment flector– sobre els rodaments dels eixos d'entrada i de sortida.
- c. El factor K , que corregeix el rendiment real respecte al rendiment en condicions de parell nominal, es considera igual per a tots els models i versions del reductor. Cal recordar que el muntatge real es pot adaptar a les necessitats de cada aplicació, i pot ser molt diferent de la unitat muntada subministrada pel fabricant.

2.3.3 Aplicació a l'accionament de robots caminadors

Els reductors *Harmonic Drive*[®] són una alternativa de sistema de transmissió cada vegada més utilitzada, en camps com l'industrial o l'aeronàutic, gràcies principalment a l'elevada relació de reducció en unes dimensions relativament compactes. Una altra característica que se'n deriva, i d'un interès igualment important, és una molt favorable relació entre el parell transmissible i la massa del conjunt.

Altres avantatges són un joc pràcticament nul, una acurada precisió de moviment i un reduït efecte d'adhesió-lliscament (*stick-slip*) en el moviment a baixa velocitat. Característiques aquestes que el fan adequat també en altres camps com la robòtica, equipament mèdics, equips de mesura o altres sistemes mecatrònics que requereixen un control precís de l'element accionat.

En l'aplicació a l'accionament d'articulacions en robots caminadors s'aprofiten bona part dels avantatges dels reductors *HD* :

1. *Elevada relació de reducció en una única etapa.* La velocitat màxima de moviment de les articulacions és molt més baixa que la velocitat nominal de qualsevol motor elèctric. Així és molt convenient una elevada relació de reducció en la transmissió.
2. *Massa reduïda i parell transmissible elevat.* En un robot caminador, al ser mòbil, és evident l'interès d'una massa reduïda dels accionaments. Per altra banda, el parell transmissible requerit en algunes articulacions serà important, doncs hauran de suportar bona part del pes del robot.
3. *Dimensions compactes.* També són convenientes unes dimensions compactes, ja que aquests robots integren molts actuadors i poden comportar problemes d'interferència. Cal recordar que alguns actuadors poden anar muntats en les potes, que es mouen durant el funcionament, i que llavors la problemàtica de les interferències es complica.
4. *Joc mínim i reduït efecte stick-slip.* Aquestes característiques faciliten el control acurat de l'accionament, i són interessants en aquesta aplicació concreta com ho són també per a qualsevol tipus de robot.
5. *Rendiment elevat.* Ja s'ha comentat la importància de l'eficiència energètica en els robots caminadors. Els reductors *HD* ofereixen rendiments superiors a altres reductors amb relacions de reducció semblants i prestacions equivalents.

La característica de precisió en el moviment és en general un punt fort. Però per a aquesta aplicació té poca importància, doncs el fet que la trajectòria real del peu es desviï lleugerament de la trajectòria programada no suposa cap problema.

La reversibilitat de la transmissió també pot ser un punt fort en algunes aplicacions. Però en aquest cas és més aviat un inconvenient. Les transmissions irreversibles impliquen l'avantatge de que una articulació es pot mantenir fixa sense necessitat de frenar l'entrada de l'accionament. Això vol dir que es pot mantenir una posició del robot, per exemple aixecat respecte al terra, sense cap despesa energètica. Utilitzant un reductor *HD*, si es vol mantenir fixa l'articulació, caldrà frenar el motor o aplicar a l'entrada un parell contrari al sentit en que tendiria a moure's.

La utilització de reductors *HD* en robots caminadors també presenta una sèrie de problemes. Un dels principals és la complexitat de disseny i de construcció de tot el

conjunt, que ha d'integrar-se en el mecanisme de la pota. Aquest problema s'accentua si es parteix únicament dels elements principals del reductor i cal dissenyar expressament tot el conjunt, amb els rodaments i altres elements auxiliars. Cal tenir present que, si es connecta el reductor directament a un motor elèctric, la longitud total del conjunt pot ser excessiva, complicant la integració de l'accionament.

Un altre problema és que la fricció i l'esmorteïment intern presenten un comportament no lineal, i complicat de caracteritzar. Això dificulta el poder tenir un model dinàmic acurat a partir del qual definir el control de l'accionament.

Per últim, l'elevat preu d'aquests reductors també dificulta el seu ús. Una causa important de l'elevat preu és que la patent pertany a una única corporació d'empreses, que té els drets exclusius de fabricació i comercialització d'aquest tipus de reductor.

Alguns exemples de prototips de robots caminadors que incorporen reductors *HD* en els seus accionaments són el robot hexàpode *TUM* i el bípede *JOHNNIE*, ambdós desenvolupats a la *Technische Universität München* a Alemanya, i els famosos robots humanoides de la multinacional japonesa *HONDA*.

El primer disseny de l'hexàpode *TUM* (Weidemann *et al.*, 1994) es va realitzar l'any 1993. Es tracta d'un robot amb configuració de les potes imitant, a escala i en tot el possible, l'insecte hexàpode *Carausius Morosus*. El robot (veure la Figura 2.15) té una longitud total d'aproximadament 700 mm i una massa de 23 kg, però no inclou les bateries, ja que s'alimenta a través d'un cable extern. Les sis potes són de disseny idèntic, les de l'esquerra simètriques a les de la dreta. Les articulacions primera i segona, que són les que reben més càrrega, són accionades a través d'un reductor *HD*. La massa total de cada pota és de 2,8 kg. A la Figura 2.16 es representa un tall de l'accionament de la segona articulació de la pota, que és l'encarregada de moure el fèmur amunt i avall. Està compostat d'un motor elèctric CC connectat directament al *wave generator* del reductor *HD*. Es pot observar la peça en forma de got que uneix el *flexspline* amb el membre accionat i els dos rodaments de boles de gran diàmetre que materialitzen l'enllaç de l'articulació.

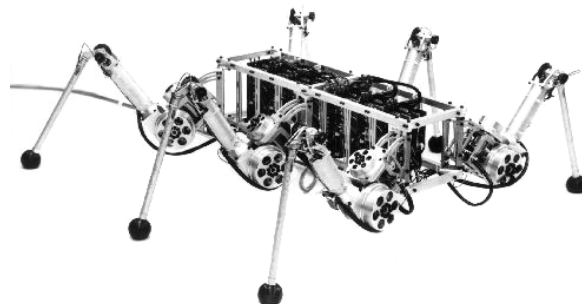


Fig. 2.15. Robot hexàpode *TUM* (Weidemann *et al.*, 1994)

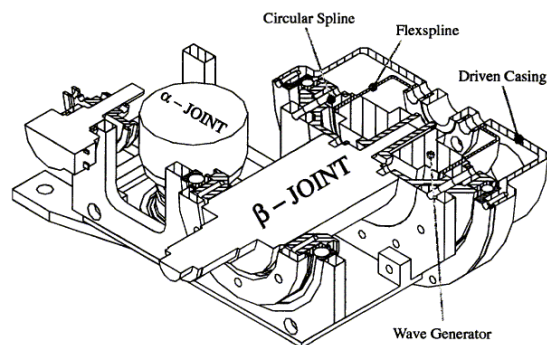


Fig. 2.16. Accionament de la pota del robot *TUM* (Weidemann *et al.*, 1994)

El robot *JOHNNIE* (Gienger *et al.*, 2001) és un bípede amb 6 graus de llibertat per pota –3 articulacions al maluc, 1 articulació al genoll i 2 al turmell– i amb un total de 17 graus de llibertat (veure la Figura 2.17).

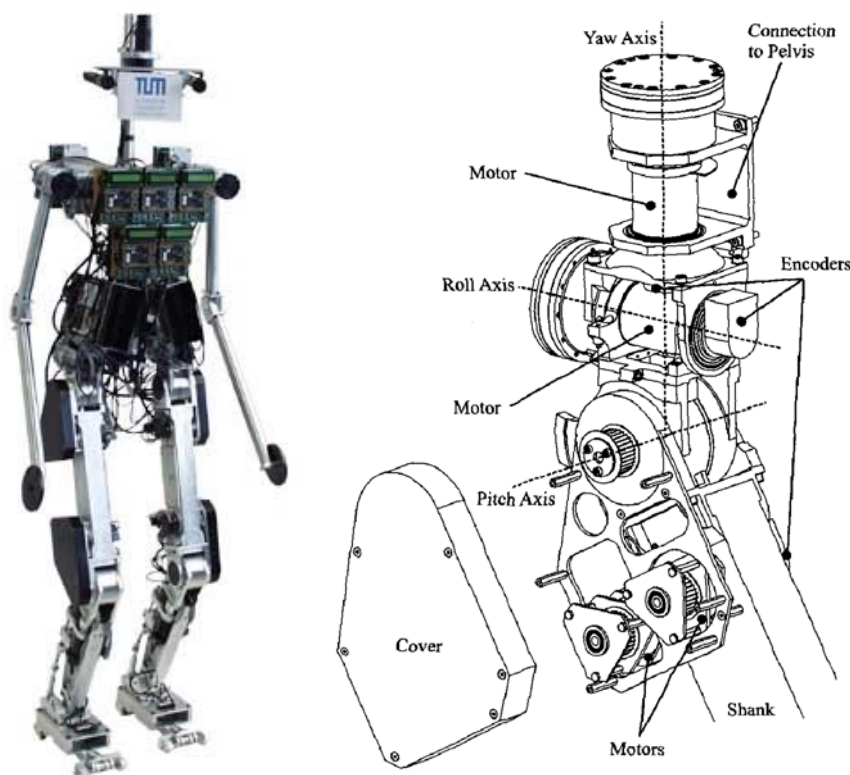


Fig. 2.17. Robot *JOHNNIE* i esquema de la triple articulació al maluc (Gienger *et al.*, 2001)

Les dimensions del *JOHNNIE* són semblants a les d'un humà, amb 1,8 metres d'alçada, i amb una massa total de 40 kg, sense incloure tampoc les bateries. En totes les articulacions s'utilitzen motors elèctrics, i en totes, excepte les dues articulacions del turmell, reductors *HD*. La integració d'aquests en el mecanisme és una evolució del disseny de les articulacions del robot *TUM*. Els reductors corresponen a un desenvolupament específic per a aquest robot, amb un disseny més lleuger, en el que el *circular spline* i el *wave generator* estan fabricats en un aliatge d'alumini.

L'articulació del genoll i la del maluc segons l'eix de capcineig (el *pitch axis* a la Figura 2.17) són les que tenen uns requeriments de parell més importants. Per això en aquests casos es tenen dos motors units en paral·lel i mitjançant una corretja dentada amb l'entrada del reductor *HD*.

L'any 1986 la companyia *HONDA* va iniciar el desenvolupament de robots caminadors bípedes. L'objectiu, en quant a mobilitat, era aconseguir un robot autònom que es pugues desplaçar per alguns dels entorns en que ho fa habitualment un ser humà, com són l'interior d'edificis, escales o pendents poc pronunciades. S'han arribat a construir onze models diferents, i tots, excepte el primer, utilitzaven motors elèctrics i reductors *HD* com a accionaments.

L'últim model, anomenat *ASIMO* i la primera versió del qual va aparèixer l'any 2000 (veure la Figura 2.18), és probablement el robot caminador més avançat que s'ha construït fins a dia d'avui. Cada pota té 6 graus de llibertat i el robot en té 24 en total. En totes les articulacions s'utilitzen reductors *HD*, essent aquest un factor que ha de contribuir en bona part a la lleugeresa de tot el conjunt. El robot té una alçada de 1,2 metres, i amb una massa total de 52 kg, integra tots els elements de control i les bateries que alimenten els accionaments. Malauradament, la companyia que l'ha desenvolupat no dona gaire informació dels detalls constructius.

És un dels pocs robots caminadors existents que no necessita alimentació externa. Tot i així, l'autonomia és limitada, amb un temps màxim de funcionament d'aproximadament 15 minuts abans de que es descarreguin les bateries.



Fig. 2.18. Robot *ASIMO* desenvolupat per *HONDA* (<http://world.honda.com/ASIMO/>, 2004)

2.3.4 Modelització dels reductors *HD*

Tot i l'estès ús en diferents camps, els reductors *HD* presenten una sèrie de característiques en el seu comportament dinàmic que no han estat encara prou estudiades. Els fenòmens més importants que hi tenen lloc, des del punt de vista del control i de la relació entre les variables a l'entrada i a la sortida del reductor, són la histeresi i la fricció.

La histeresi, que resulta de la combinació de la flexibilitat i de la fricció interna del conjunt, ambdós de comportament no lineal, és un fenomen força complex de tractar i que no ha estat encara del tot interpretat. En el funcionament d'un reductor *HD* apareix en dues situacions clarament diferenciades.

La primera és per deformació torsional al aplicar un parell oscil·lant o variable al *flexspline*, i independentment de que aquest giri o es mantingui fix. Es dona principalment al *flexspline*, al ser un element que clarament sofreix deformació durant el funcionament, però també hi influeix la fricció entre les diferents parts que tendeixen a moure's una respecte a l'altra. La problemàtica que presenta aquest cas és poder preveure quina és la deformació angular del conjunt, i per tant la posició exacta de l'eix de sortida, en funció del parell aplicat al reductor.

La segona manifestació de la histeresi és per deformació radial, al girar el *wave generator* i obligar al *flexspline*, i a l'anell exterior del rodament del *wave generator*, a adaptar la seva forma a una el·lipse que gira. Per tant es produeix independentment del parell transmès. L'interès d'aquest cas és la seva influència en la resistència al moviment i la dissipació d'energia mecànica que provoca.

En una típica configuració del conjunt *HD* treballant con a reductor hi intervenen com a resistències passives que s'oposen al moviment els següents efectes:

1. Resistència al rodolament als rodaments, i fricció a l'anell d'estanquitat, de l'eix d'entrada, que és el cub del *wave generator*.
2. Fricció a l'acoblament d'Oldham entre el cub del *wave generator* i el rodament el·líptic del *wave generator*.
3. Resistència al rodolament al rodament el·líptic.
4. Histeresi per deformació radial del *flexspline* i de l'anell exterior del rodament el·líptic.
5. Fricció entre les dents que engranen del *flexspline* i del *circular spline*.

6. Resistència al rodolament als rodaments, i fricció a l'anell elàstic, de l'eix de sortida, entre el *flexspline* i el *circular spline*.

Un altre fenomen que també pot ser important en algunes aplicacions és l'anomenat *error cinemàtic*. Aquest es defineix com la diferència entre l'angle real girat per l'eix de sortida i l'angle previst en funció del gir de l'eix d'entrada. De totes maneres aquest valor sempre es manté en uns valors molt baixos, per sota de 1,5 minuts d'arc, i no implica cap problema en l'aplicació a robots caminadors.

Diversos equips d'investigació s'han plantejat l'objectiu d'obtenir un model racional i simple, però efectiu i acurat a la vegada, que permeti caracteritzar el comportament dinàmic d'un reductor *HD*. El principal fenomen a modelitzar és la fricció, però també la flexibilitat i la histeresi del conjunt. Pensant en l'aplicació dels reductors *HD* a l'accionament de robots caminadors, l'interès principal d'aquest model serà poder estimar la relació entre els parells transmesos a l'entrada i a la sortida del reductor.

Seyfferth (1995) es proposa obtenir un model acurat que descriu el comportament dinàmic d'un reductor *HD*, descrivint els fenòmens de rigidesa torsional, fregament sec, histeresi i fregament viscos. Realitza una sèrie d'experiments amb la sortida bloquejada i aplicant un parell a l'entrada segons una llei sinusoidal de baixa freqüència i centrada al zero. Es repeteixen els experiments per a diferents amplituds del parell d'entrada i es mesura la relació entre la deformació angular i el parell a la sortida. Per altra banda es determina, també experimentalment, el parell de fregament a l'arrencada –al iniciar el moviment– i el parell viscos en funció de la velocitat a l'entrada.

A partir de les dades experimentals presenta diversos models matemàtics per descriure el comportament de tot el sistema:

- a. Per descriure la rigidesa torsional, el parell a la sortida s'expressa com una funció cúbica de la deformació angular.
- b. La corba d'histeresi es descriu afegint a la rigidesa torsional la combinació del fregament sec de Coulomb –el parell de frec és únicament funció del sentit de rotació– i una funció hiperbòlica que representa la influència del historial de càrrega, és a dir, de l'evolució, prèvia a l'estat actual, del parell a la sortida i la deformació angular. En el model el fregament sec es suposa tot reduït a l'arbre de sortida.
- c. Els parells de fricció a l'arrencada i el parell viscos es suposen reduïts a l'arbre d'entrada, i són modelitzats mitjançant una funció quadràtica de la velocitat angular a l'entrada.

Finalment realitza diferents conjunts d'experiments i a partir de les dades obtingudes determina tots els paràmetres del model a través d'un ajust no lineal per mínims quadràtics. L'autor no indica el model de reductor assajat ni els valors dels paràmetres obtinguts.

Tuttle i Seering (1996) proposen un estudi força acurat de la resposta dinàmica d'un reductor *HD*. El primer pas és analitzar i monitoritzar experimentalment la resposta real del reductor quan es sotmet a unes determinades condicions de funcionament. El procediment escollit és mesurar l'evolució real de la velocitat a l'entrada, el *wave generator*, com a resultat d'un esglaó de parell actuant sobre aquest eix.

Es repeteixen diversos experiments per a diferents magnituds de l'esglaó d'entrada. Al accelerar s'observen fluctuacions de la velocitat que indiquen una certa elasticitat del sistema. També apareix una important contaminació per vibració, probablement deguda a les inevitables imperfeccions en la fabricació dels components. Quan aquesta vibració entra en ressonància es dissipa molta energia per fregament sec entre les dents de l'engranatge. Això fa que calgui augmentar considerablement el parell a l'entrada per incrementar la velocitat de rotació i superar la zona de ressonància.

Un segon pas en el treball desenvolupat per aquests autors és la definició d'un enginyós i molt interessant model per representar el funcionament d'un reductor *HD*. El model consisteix en un mecanisme pla amb tres membres apart del terra (veure la Figura 2.19). Cada membre representa un dels tres components principals del *HD*: *wave generator*, *circular spline* i *flexspline*, i el moviment horitzontal de cadascun és l'analogia del moviment de rotació dels components en el sistema real.

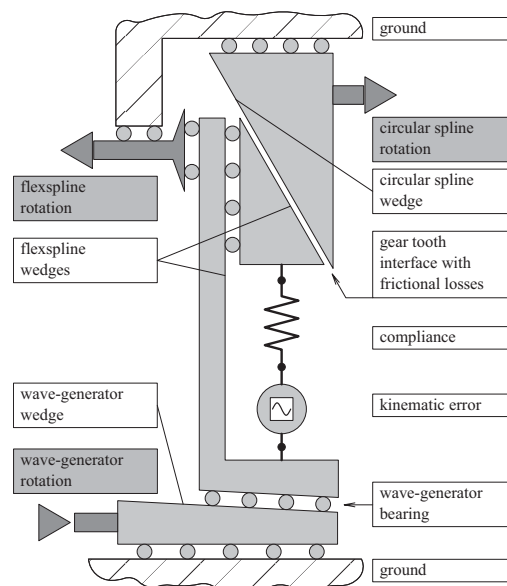


Fig. 2.19. Model de mecanisme pla amb analogia al reductor *HD* (Tuttle i Seering, 1996)

La relació cinemàtica entre els components queda representada pel contacte, lliscant o mitjançant elements rotatoris auxiliars, entre plans inclinats dels diferents membres. Així, si s'analitza per exemple el cas en que el *circular spline* està bloquejat, el desplaçament cap a la dreta del *wave generator* –que correspon en el model real a un gir en sentit positiu– obliga a que el *flexspline* es desplaci en vertical lleugerament cap amunt. Donat el contacte a través d'un pla inclinat amb el *circular spline*, el moviment ascendent implica un lleuger moviment horitzontal cap a l'esquerra del *flexspline*, el que en el sistema real equival a una rotació en sentit negatiu a baixa velocitat.

En el model proposat tota la fricció del conjunt s'associa únicament a l'engranament entre les dents del *flexspline* i del *circular spline*. Es considera que en aquesta fricció hi contribueixen els quatre termes següents:

1. *Fregament en buit*. És constant i degut al fregament sec entre parts mòbils, com per exemple al contacte amb precàrrega entre les dents de l'engranatge.
2. *Fregament viscos*. Mostra una dependència no lineal de la velocitat, que es pot aproximar a una funció cúbica de la velocitat de lliscament entre les dents.
3. *Fregament dependent de la posició de l'element de sortida*. Experimentalment es demostra que el fregament varia lleugerament i de forma cíclica al llarg de cada volta de l'arbre de sortida. Els autors proposen modelitzar-la mitjançant una funció sinusoïdal de la posició angular a la sortida.
4. *Fregament resultat de la vibració en ressonància*. El provoca l'increment en el parell d'entrada requerit que fa que augmenti també el fregament sec al contacte entre les dents.

El comportament flexible del conjunt s'associa exclusivament al *flexspline*, i per tant s'aplica la consideració de que la resta d'elements són perfectament rígids. Tal i com fan altres autors, per descriure la rigidesa torsional, el parell a la sortida s'expressa com una funció cúbica de la deformació angular.

Finalment els diferents models matemàtics comentats s'integren a l'equació de moviment del sistema per tal d'obtenir les expressions que relacionen els parells als tres arbres del mecanisme amb la posició i la velocitat d'aquests arbres. El model resultant descriu qualitativament la complexa resposta del *HD* a un esglaó de parell, però no pot representar amb precisió quantitativa el seu funcionament real. Un altre problema és que el model és molt sensible al valors concrets d'alguns dels paràmetres, que a més s'han de determinar a partir de precises mesures en els

experimentos realitzats, i que per tant no es poden suposar constants ni tan sols per a diferents unitats fabricades del mateix model i versió de reductor *HD*.

S'han assajat tres models diferents de reductor *HD*, i els autors indiquen de quins models es tracta però sense acabar d'especificar de quina versió, de les varies possibles, es tracta en cada cas. Tampoc indiquen en el treball quins rodaments s'han utilitzat en el muntatge del conjunt, i per tant és impossible diferenciar quina és la influència atribuïble a aquests en els resultats globals. Donen els resultats del paràmetres identificats per definir el model d'un dels reductors assajats, però no indiquen de quin dels tres reductors assajats es tracta.

Així es pot dir que aquest és un model força interessant per continuar desenvolupant l'estudi detallat de la resposta dinàmica de la transmissió. Però per a aplicacions on, per exemple, no s'observa una apreciable ressonància del sistema, altres models menys detallats poden ser més adequats.

Taghirad i Bélanger (1996) presenten un estudi teòric i experimental amb l'objectiu d'obtenir un model que representi el comportament dinàmic d'un reductor *HD*. Els fenòmens que es volen caracteritzar són la flexibilitat, la histeresi i la fricció del reductor.

Realitzen diferents experiments per analitzar el comportament del reductor. Part dels experiments es realitzen amb l'arbre de sortida bloquejat i altres amb l'arbre de sortida sense bloquejar. S'experimenten dues configuracions diferents. L'eix de baixa velocitat, el del *wave generator*, és en els dos casos l'entrada de la transmissió. En un cas la sortida és el *flexspline* i en l'altre la sortida és el *circular spline*.

La fricció al motor elèctric la suposen composta per una fricció en buit i un fregament viscos. Amb la particularitat de que consideren que la fricció en un i en l'altre sentit de rotació no és igual, i per tant en el model hi apareixen diferents paràmetres que descriuen la fricció en cada sentit de rotació.

Després d'analitzar els resultats dels experiments, arriben a la conclusió de que un model de rigidesa lineal combinat amb un model d'esmoreïment dependent de l'arrel quadrada de la velocitat de torsió del *flexspline* pot reproduir prou acuradament el comportament d'histeresi del conjunt.

En quant a l'energia dissipada al reductor, aquesta és el resultat de la fricció al rodament del *wave generator*, la fricció entre les dents que engranen, la fricció als rodaments de sortida i l'esmoreïment intern del *flexspline*. Segons els autors la component principal és la fricció entre les dents que engranen. Aquesta es modelitza com la suma de la fricció en buit, independent del parell transmès, amb efecte

Striebeck i del fregament viscos, proporcional a la velocitat de rotació. També en aquest cas es considera que el comportament de la fricció no és simètric en quan als sentits de rotació.

Una conclusió curiosa dels experiments que porten a terme és que l'efecte Striebeck observat és en el sentit contrari a l'habitual. És a dir, al reductor *HD* el coeficient de fregament estàtic sembla ser inferior al dinàmic.

2.4 Les transmissions per corretja dentada

2.4.1 Característiques de les transmissions per corretja dentada

Les transmissions per corretja dentada ofereixen una combinació dels avantatges de les transmissions per corretja de fricció i de les transmissions per cadena de corrons. Per al seu correcte funcionament no requereixen de lubricació, com tampoc en requereixen les corretges de fricció, i la transmissió és síncrona –sense lliscament entre els arbres d'entrada i de sortida–, com en el cas de les cadenes.

La principal aplicació d'aquests tres tipus de transmissions és la transmissió entre arbres d'eixos paral·lels, si bé les corretges, tant les dentades com les de fricció, també es poden utilitzar entre eixos creuats. En totes elles la distància entre els eixos es pot adaptar fàcilment als requeriments que es tinguin en cada cas variant la longitud de la corretja o de la cadena.

Les transmissions per corretja dentada s'utilitzen tant per a la transmissió de potència com per a la transmissió de moviment en aplicacions en les que es necessita una acurada precisió de posicionament. Donada la relació exacta i constant de velocitats entre els arbres d'entrada i de sortida, es pot controlar de manera precisa el moviment de l'arbre de sortida actuant sobre l'arbre d'entrada. Això fa que aquestes transmissions siguin força utilitzades en robòtica i automàtica.

Hi ha diferents tipus de corretges dentades segons els materials amb que estan fabricades. Per al material base que dona la forma a la corretja els materials més utilitzats són les gomes de policloroprè i de poliuretà. Les cordes encarregades de suportar els esforços de tracció a la corretja poden ser de cable d'acer de molt petit diàmetre o de fibra de vidre. Les dents de la corretja poden tenir diverses formes, essent les més comuns les trapezoïdals i les semicilíndriques.

Respecte a les corretges de fricció, les corretges dentades ofereixen l'avantatge del contacte positiu entre les dents de la corretja i les dents de les politges. A part d'assegurar el sincronisme de la transmissió, això implica que el parell transmissible no està limitat per l'adherència entre la corretja i les politges. Per aquest motiu la

tensió inicial requerida en les transmissions per corretja dentada és menor que en les transmissions per corretja de fricció. D'aquesta manera les càrregues i tensions en els altres components del sistema també són menors.

L'absència de lliscament contribueix a un major rendiment de les transmissions per corretja dentada en comparació amb les corretges de fricció, sobretot quan transmeten parells elevats. El rendiment de les corretges dentades és menys sensible a les condicions de càrrega que el rendiment de les corretges de fricció.

Respecte a les transmissions per cadena de corrons, les transmissions per corretja dentada presenten els avantatges següents:

- Joc nul
- Necessiten poc manteniment i no requereixen lubricació
- Menys vibracions i soroll
- Poc sensibles a condicions ambientals de pols i humitat
- Menys desgast

Com a inconvenient cal dir que el parell transmissible és menor si es comparen transmissions amb les mateixes dimensions de diàmetres –de les politges i els pinyons– i d'amplada –de la corretja i de la cadena–. Tot i així avui en dia s'estan aconseguint corretges dentades d'altres prestacions que, amb amplades de corretja lleugerament superiors, permeten transmetre parells similars a transmissions per cadena de diàmetres equivalents.

Un altre inconvenient és que per assegurar el bon funcionament d'una transmissió per corretja dentada cal garantir el correcte paral·lelisme dels arbres d'entrada i sortida i l'alineació dels plans mitjos de les politges. Això desaconsella la seva aplicació en muntatges en els que es puguin produir flexions dels suports dels arbres d'entrada o de sortida.

2.4.2 Aplicació a l'accionament de robots

Les particulars característiques de les transmissions per corretja dentada fan que siguin molt utilitzades en màquines en les que es requereix transmetre el moviment de manera síncrona entre arbres d'eixos allunyats. Alguns exemples són l'aplicació a tot tipus de robots, des dels típics robots antropomòrfics industrials a prototipus de moderns robots caminadors.

La relació de reducció que es pot obtenir amb una transmissió per corretja dentada està limitada, doncs, de la mateixa manera que passa amb les corretges de fricció i les cadenes, la reducció ve donada per la relació de diàmetres de les politges. Pel

diàmetre de la politja petita es té un valor mínim imposat per la curvatura màxima a la que pot treballar la corretja. Llavors una relació de reducció elevada implica un diàmetre de l'altra politja molt gran, i això sovint no és possible per culpa de la limitació d'espai. Per aquesta raó, quan s'utilitza aquest tipus de transmissió en robots caminadors és sempre en combinació en sèrie amb una altra transmissió.

El robot caminador hexàpode *LAURON III* (Gassmann, 2001), desenvolupat a la Universitat de Karlsruhe a Alemanya, utilitza la mateixa tipologia d'accionament a les tres articulacions de cada pota. Cada accionament consta d'un motor elèctric, una transmissió per corretja dentada com a primera reducció i una transmissió per tambors i cable. A la Figura 2.20 es mostra una de les potes del robot *LAURON III*.



Fig. 2.20. Pota del robot caminador *LAURON III*

Un altre exemple de robot caminador que utilitza transmissions per corretja dentada és el robot bípede *JOHNNIE* ja comentat a l'apartat anterior. En aquest robot es té una combinació de transmissió per corretja dentada i reductor *HD* en dues de les articulacions de la pota. En aquestes articulacions es requereix una elevada potència, i llavors es munten dos motors per articulació i la transmissió per corretja dentada que transmet la potència d'ambdós motors cap al reductor (veure la Figura 2.17). Aquesta combinació permet muntar els dos motors en paral·lel a l'articulació accionada.

2.4.3 Modelització de les transmissions per corretja dentada

Les transmissions per corretja dentada han experimentat els darrers anys un important creixement en quant a número d'aplicacions, que van des de l'accionament de capçals d'impressores a la transmissió final fins a la roda de motocicletes, passant per tot tipus de robots o pel sistema de distribució de la majoria de motors alternatius de quatre temps. Tot i així a la bibliografia es troba poca informació que tracti del rendiment de la transmissió en funció de les condicions d'operació.

El comportament a nivell de rendiment de la transmissió per corretja dentada depèn de la tensió inicial amb la que es munta. També depèn de les resistències passives als arbres d'entrada i de sortida, i per tant del muntatge de rodaments i altres elements en contacte amb aquests arbres.

Segons alguns fabricants (Gates, 2004), el rendiment màxim en condicions nominals de funcionament pot ser molt elevat, de fins al 98 %, i no disminueix al llarg de la vida útil de la corretja. L'elevat rendiment s'aconsegueix gràcies, entre altres factors, a una baixa histeresi per deformació de la corretja, doncs la secció prima d'aquesta implica una baixa tensió per flexió.

Karolev i Gold (1995) analitzen el comportament d'una transmissió per corretja dentada sotmesa a parells fluctuants. Per fer-ho defineixen un complex model de la interacció entre cada dent de la corretja i la dent de la politja que hi està en contacte. El model té en compte l'elasticitat de les cordes de tracció, la força de fricció entre la ranura de la corretja i el cap de la dent de la politja, el joc entre l'amplada de la dent de la corretja i la ranura de la politja i l'elasticitat de la dent de la corretja quan entra en contacte amb el flanc de la dent de la politja. Amb aquest model s'aconsegueix una discretització de la transmissió que permet estudiar que passa a cada punt de la corretja en funció de la càrrega a que està sotmesa i de la posició relativa d'aquest punt de la corretja en la zona d'engranament amb una o altra de les politges. D'aquesta manera es pot analitzar la distribució d'esforços a la corretja i a les politges i veure com evolucionen si es canvien les condicions de càrrega. Un dels resultats importants a que arriben és la dependència de la distribució de càrregues que es tenen, en un instant determinat, en la distribució que es tenia en instants anteriors. Això es degut a la histeresi per fricció que es dona a la corretja.

El resultat d'aquest treball és força interessant i pot ser molt útil per entendre la resposta dinàmica a nivell de vibracions de la transmissió. Però el model que proposen sembla molt complex per utilitzar-lo des del punt de vista d'estimar el rendiment de la transmissió de potència en el sistema.

Callegari *et al.* (2003), proposen una modelització per elements finits del comportament mecànic de la corretja. En aquesta modelització es tenen en compte l'elasticitat i l'amortiment intern de la corretja, el fregament en el contacte entre corretja i politges i la flexió de la corretja.

L'objectiu principal d'aquest estudi és estimar el soroll provocat per una transmissió d'aquest tipus segons la configuració de politges escollida i la tensió inicial de la corretja. Experimentalment demostren que el model proposat permet comparar, de manera qualitativa, el soroll provocat per diferents configuracions de la transmissió. També en aquest cas el model a que s'arriba sembla massa complex per utilitzar-lo amb la finalitat d'estimar el rendiment de la transmissió.