

10 CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

10.1 Conclusions

En aquest apartat es presenten les conclusions a les que s'ha arribat després del disseny, caracterització i simulació –en l'aplicació a les articulacions de la pota d'un robot caminador– de l'accionament desenvolupat.

Estat de l'art de l'accionament de robots caminadors

De l'estudi de la bibliografia especialitzada en el camp de l'accionament de robots caminadors, se'n treu la conclusió de que, a dia d'avui, dos dels principals problemes encara per resoldre són l'elevada massa dels accionaments necessaris i l'elevat consum energètic d'aquests.

En relació a transmissions que poden formar part dels accionaments de robots caminadors, a la bibliografia es tenen diversos treballs que tracten de la caracterització del comportament dels reductors *Harmonic Drive*[®] –HD– i de les transmissions per corretja dentada. Els models matemàtics que proposen fan una caracterització parcial de tot un conjunt de fenòmens que es produeixen en aquestes transmissions, però són molt complexos i de dubtosa utilitat quan el que es pretén és analitzar la transmissió des del punt de vista del balanç de potències i del rendiment de la transmissió.

Disseny de la pota i de l'accionament

A partir de la tipologia de robot i del mecanisme de pota escollits, s'ha concebut i dissenyat un accionament rotatiu que dona resposta als requeriments que es tenen a totes les articulacions. Els accionaments s'integren en el disseny de la pota, de manera que cadascun es situa directament a l'articulació que governa.

L'elevada reducció necessària a l'accionament entre el motor elèctric i la sortida, de 400:1, s'aconsegueix amb una combinació en sèrie d'una transmissió per corretja dentada i un reductor *HD*.

S'ha aconseguit que la massa de tot el mecanisme d'una pota sigui bastant reduïda, lleugerament inferior a 4 kg, i que la massa del conjunt de les sis potes i el xassís sigui d'aproximadament 25,6 kg. Llavors dels 40 kg previstos del robot, en queden uns 14,4 kg lliures per a les bateries, els elements de control i regulació i les eines o instruments necessaris per portar a terme la tasca que s'encomani al robot.

Simulació del mecanisme de la pota

A partir de la simulació cinemàtica del moviment de les potes, quan el robot camina a velocitat constant, es dedueix que els components de la força d'inèrcia sobre el conjunt del robot corresponen com a màxim al 2 % del seu pes. A partir d'aquesta dada s'ha adoptat la simplificació de considerar que l'operació del robot és quasiestàtica i que per tant les forces d'inèrcia sobre el conjunt del robot són negligibles en comparació amb l'acció de la gravetat.

La simulació dinàmica del moviment de la pota, suposant l'operació del robot caminant en línia recta, a velocitat constant i sobre un terreny horitzontal, ha permès determinar els parells i les potències que es tenen a cada articulació al llarg d'un cicle de l'anadura. En les tres articulacions hi ha situacions en que l'accionament desenvolupa una potència positiva, impulsant el moviment, i altres en que l'accionament frena el moviment de l'articulació, desenvolupant per tant una potència negativa.

Determinació experimental del comportament mecànic dels components

S'ha construït un prototipus de l'accionament i s'han realitzat diverses sèries d'experiments per tal de determinar el comportament real dels components de l'accionament.

Experimentalment s'ha verificat la proporcionalitat entre el corrent d'alimentació del motor i el parell que aquest exerceix, comprovant que el valor de la constant de parell coincideix amb la dada que proporciona el fabricant del motor, de manera que en els experiments següents s'ha utilitzat la mesura de corrent d'alimentació per determinar indirectament el parell motor en cada punt d'assaig.

Caracterització de les resistències passives

A partir dels assaigs experimentals portats a terme i de les dades obtingudes s'han definit uns models matemàtics que representen les resistències passives que es tenen a cada component de l'accionament.

Segons aquests models les resistències passives queden descrites per tres parells de fregament: un parell de fregament en buit, un parell de fregament proporcional al parell transmès a la sortida i un parell de fregament que depèn de la velocitat de funcionament.

En el terme de parell de fregament dependent de la velocitat, aquesta dependència és no lineal. En el cas del reductor *HD* aquest terme també depèn a la vegada del parell transmès a la sortida.

El parell de fregament en buit és independent del parell que es té a la sortida del component que es caracteritza, i tant en el reductor *HD* com en la transmissió per corretja dentada presenta l'efecte Striebeck de pas de fregament estàtic a fregament dinàmic.

Aquest efecte fa que, tant el reductor com la transmissió per corretja, tinguin en cada cas una velocitat de gir, pròxima a zero i independent del parell a la sortida, per sota de la qual el funcionament és inestable.

Com a conseqüència de les resistències passives, el rendiment del reductor *HD* depèn molt de les condicions mecàniques a la sortida. Mantenint constant la velocitat de funcionament, el rendiment augmenta al augmentar el parell transmès a la sortida del reductor, doncs tot i que les resistències passives augmenten lleugerament, el seu efecte relatiu, en relació al parell a la sortida, disminueix. Aquest augment del rendiment és molt pronunciat per a parells baixos i es suavitza progressivament al passar a parells més elevats.

Mantenint constant el parell a la sortida, el rendiment disminueix al augmentar la velocitat de funcionament. Aquesta disminució és més pronunciada per a parells a la sortida baixos.

La dependència del rendiment de la transmissió per corretja en les seves condicions mecàniques de funcionament és similar a la que es té en el reductor *HD*, augmentant al augmentar el parell a la sortida i disminuint al augmentar la velocitat de rotació.

Rendiment del motor elèctric de corrent continu

El rendiment total del motor, definit com la relació entre la potència mecànica a la sortida del motor –una vegada descomptada la potència dissipada per les seves resistències passives– i la potència elèctrica que cal subministrar-li, és lleugerament inferior al rendiment electromecànic per a parells a la sortida del motor elevats. En canvi per a parells a la sortida baixos el rendiment total és clarament inferior, doncs llavors la importància relativa del parell de les resistències passives augmenta.

Simulació dels accionaments i avaluació energètica

Una vegada definits els models dels elements de l'accionament, s'ha realitzat la simulació del funcionament dels tres accionaments d'una pota al llarg d'un cicle de l'anadura del robot. En els quatre casos en que s'ha portat a terme la simulació s'observa que l'energia mecànica involucrada a les articulacions, és a dir a la sortida del reductor *HD*, és molt reduïda.

Es demostra que l'energia transmesa en sentit directe al llarg d'un cicle entre transmissions per corretja i reductors és molt superior a l'energia transmesa en aquest sentit a la sortida dels reductors, ja que una bona part d'aquella es dissipa a les resistències passives dels reductors i una altra bona part es destina a incrementar l'energia cinètica de rotació dels seus arbres d'entrada.

Entre motors i corretges dentades, l'energia transmesa en sentit directe, és també bastant superior a l'energia transmesa entre corretges i reductors, per les mateixes raons de resistències passives i increment de l'energia cinètica dels elements que formen el sistema corretja dentada, que inclou el rotor del motor.

L'energia elèctrica que cal subministrar als motors al llarg d'un cicle és lleugerament superior a l'energia mecànica que aquests proporcionen, el que demostra que el rendiment mitjà dels motors és bastant elevat.

Considerant globalment els tres accionaments, en el primer cas analitzat l'energia elèctrica subministrada als motors equival a més de 30 vegades l'energia mecànica que els accionaments transmeten a la seva sortida per moure les articulacions. Per tant és evident que les resistències passives dissipen la major part de l'energia subministrada a l'accionament.

La fluctuació de l'energia cinètica de les parts internes de l'accionament té un efecte important en el consum energètic del motor. Quan augmenta ho fa a partir de l'energia mecànica que proporciona el motor, i quan disminueix la major part es converteix en energia dissipada per les resistències passives.

Al llarg d'un cicle hi ha situacions en que un o diversos motors funcionen com a generadors, encara que l'energia elèctrica que proporcionen al llarg d'un cicle és bastant inferior a la que consumeixen.

En el segon cas analitzat, una pota que segueix la mateixa llei de moviment però sotmesa a càrregues menors, l'energia involucrada a la sortida dels accionaments és clarament menor que en el primer cas. Però l'energia elèctrica que cal subministrar als motors és només una mica inferior, doncs l'energia dissipada per les resistències passives es manté aproximadament igual.

En els casos tercer i quart, en els que es modifica la llei de moviment del peu durant la fase de suport, de manera que s'escurça el recorregut angular del moviment de les articulacions, s'aconsegueix una important reducció de l'energia elèctrica que cal subministrar als motors, doncs es disminueix clarament l'energia dissipada per les resistències passives al llarg d'un cicle.

De l'anàlisi d'aquests quatre casos se'n treu la conclusió de que un percentatge molt elevat de l'energia mecànica proporcionada pels motors es dissipa a les resistències passives dels elements de transmissió, tot i que els rendiments del reductor *HD* i de la transmissió per corretja dentada són molt alts quan operen a càrrega màxima.

Aquest fet s'explica per dues causes diferents. La primera és que, tot i que els elements de transmissió han estat dimensionats segons la càrrega màxima a suportar, en aquesta aplicació aquests elements operen majoritàriament a càrrega parcial, i llavors el seu rendiment és molt inferior al màxim.

La segona causa és la important variació de l'energia cinètica de rotació de les parts giratòries dels elements de l'accionament, que tenen una inèrcia considerable. L'augment d'aquesta energia cinètica s'aconsegueix a partir de l'energia mecànica proporcionada pel motor. Per altra banda, bona part de l'energia mecànica provenint de la disminució d'energia cinètica quan es desaccelera el moviment, es dissipa a les resistències passives de cada element.

Llavors una bona estratègia per minorar la despesa energètica, mantenint la velocitat d'avanç del robot i la cursa longitudinal del peu, és reduir el recorregut i la velocitat angular màxima de les articulacions, disminuint així l'energia dissipada per les resistències passives i les fluctuacions d'energia cinètica de les parts mòbils de l'accionament.

Després d'haver analitzat el comportament dels accionaments en les condicions d'operació, es demostra que la consideració de moviment quàsiestàtic del robot és perfectament vàlida per aquest estudi. L'efecte de les forces d'inèrcia d'arrossegament associades al moviment de tot el robot és petit en comparació amb l'acció de la gravetat, i per tant la seva influència en l'energia involucrada a les articulacions ha de ser poc important. Segons els resultats de les simulacions dels accionaments portades a terme, és evident que encara ha de ser molt menor la seva influència en l'energia elèctrica que cal subministrar als motors.

10.2 Recomanacions

Com a continuació dels treballs portats a terme en aquesta tesi, i tenint en compte les conclusions a les que s'ha arribat, a continuació es presenten les recomanacions proposades per avançar en el desenvolupament d'un robot caminador energèticament eficient:

1. *Analitzar el funcionament del robot caminador en diferents modes d'operació.* Un robot caminador no únicament opera caminant en línia recta,

sobre un terreny pla i horitzontal i a velocitat constant. Per tant és ineludible analitzar el funcionament del robot en diverses situacions, de manera que s'arribin a tractar alguns modes de funcionament que siguin representatius de les condicions reals que es poden donar en l'operació del robot. Aquests modes d'operació podrien ser: caminar a diferents velocitats i amb diferents paràmetres de l'anadura, caminar per pendents de diferent inclinació, pujar escales, elevar el cos des del terra o superar diversos tipus d'obstacles.

2. *Determinar els requeriments a les diferents articulacions de la pota.* Per als diferents modes d'operació considerats, cal determinar els requeriments de parell i velocitat angular que es tenen a cada articulació del mecanisme de la pota. Aquesta determinació es pot realitzar mitjançant la simulació dinàmica del mecanisme, una vegada considerades les hipòtesis que calgui per tal de resoldre les redundàncies que es donen en els punts de contacte dels peus amb el terra.

3. *Revisar i optimitzar el disseny de l'accionament per a cada articulació.* El disseny dels accionaments s'haurà de revisar per tal d'adaptar-los als requeriments més restrictius que es tinguin a cada articulació tenint en compte els diferents modes d'operació. Aquest pas suposarà un procés iteratiu de redisseny i simulació del mecanisme fins arribar a l'accionament més adequat per a cada articulació. Molt probablement això implicarà diferents dissenys d'accionament per a les diferents articulacions de la pota.

En quant a la tipologia dels components a utilitzar en els accionaments, sembla aconsellable mantenir la mateixa, amb motors de corrent continu, transmissions per corretja dentada i reductors *HD*, doncs presenten característiques adequades i un rendiment màxim elevat. Tot i així també caldria plantejar-se la conveniència d'utilitzar transmissions no reversibles, com reductors de vis sens fi, ja que llavors s'aconseguiria un consum nul dels motors quan les articulacions no giren, per exemple quan el robot està en una determinada posició en repòs. En quant als motors, també s'han de tenir en compte els motors elèctrics síncrons sense escobretes, que per a potències mitjanes i altes ofereixen característiques similars o fins i tot millors que els de corrent continu de gamma alta, tot i que el seu control és més complex.

Per a cada articulació s'ha de triar la combinació de motor i transmissió que, responnent als requeriments de parell i velocitat angular, ofereixi la mínima massa del conjunt, elevat rendiment i, també molt important, mínima inèrcia de les parts internes giratòries. Cal minimitzar l'energia cinètica de rotació que arriba a acumular-se en l'accionament, doncs reduint l'energia involucrada en l'acceleració i la desacceleració dels components interns de

l'accionament s'aconsegueix un considerable estalvi en l'energia elèctrica que cal proporcionar al motor al llarg d'un cicle. Existeixen dues vies per reduir l'energia cinètica de rotació de l'accionament: baixa relació de reducció entre motor i sortida, per reduir la velocitat de gir del motor, i baixa inèrcia de motor i transmissió. Evidentment la primera via és més efectiva, si és possible, doncs l'energia cinètica depèn del quadrat de la velocitat.

4. *Caracteritzar les resistències passives dels nous components dels accionaments.* S'haurà de portar a terme la caracterització dels nous components que integrin els dissenys revisats dels accionaments de cada articulació. Aquesta caracterització es faria de manera equivalent a com s'ha fet amb els tres components analitzats en aquesta tesi: construcció d'un prototipus, assaig experimental en diferents condicions mecàniques de funcionament i definició d'un model matemàtic amb l'ajust de paràmetres.
5. *Simular el funcionament dels nous accionaments tot realitzant-se una avaluació energètica.* Després de definir els models globals del comportament mecànic dels components, integrant la inèrcia de les parts giratòries, es portarà a terme la simulació dels diferents accionaments segons el nou disseny de la pota. Aquestes simulacions permetran estimar el consum energètic dels motors de cada pota i s'haurien de portar a terme per a diversos dels modes d'operació previstos del robot caminador.

Una vegada completats aquests passos, seria interessant la construcció d'un prototipus de la pota completa amb els tres accionaments i l'assaig experimental d'aquesta en les condicions d'operació plantejades, aplicant càrregues equivalents a la pota. D'aquesta manera es podrien comparar les dades experimentals amb l'estimació dels models globals definits i avaluar així la qualitat de la caracterització. Una altra possibilitat per comprovar la validesa dels models definits seria la construcció d'un prototipus complet del robot.

Un enfocament diferent del problema seria estudiar la possibilitat d'utilitzar motors, rotatius o lineals, de baixa velocitat, com per exemple els motors o els cilindres hidràulics. Amb aquests no seria necessària una transmissió amb relació de reducció elevada, que implica importants resistències passives, i es reduiria considerablement la variació d'energia cinètica dels components de l'accionament.