

ワイヤを用いたバックドライバブルな足首駆動機構の設計

中野道樹(東京大学) 岡田昌史(東京大学) 中村仁彦(東京大学)

Design of the Wire Driven Ankle Mechanism with High Backdrivability

Michiki NAKANO (University of Tokyo), Masafumi OKADA (University of Tokyo),
Yoshihiko NAKAMURA (University of Tokyo)

Abstract— The traditional humanoid joints are controlled by high gain feedback controllers using the high reduction gear. Therefore the backdrivability of the joint mechanism is low. Consequently, the joints disable the dynamical interaction between the robot body and the environment. In this paper, we design an ankle structure which has high transmission efficiency of power and enables a dynamic interaction between the body and the environment because of the drive mechanism composed of pulleys and wire. The high reduction gear ratio is realized by using the principle of movable pulley.

Key Words: backdrivability, dynamical interaction, ankle structure, pulleys and wire

1. はじめに

一般にヒューマノイドロボットの関節は、目標角度に追従するようハイゲインなフィードバックコントローラで制御され、大きなトルクを発生するために減速比の高いギアによって構成される¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。この関節は、減速比の高いギアを用いているためにバックドライバビリティは低いものとなっている。この結果、ロボットの身体は、環境から加えられる力を関節に働く力として感じる事が困難な機構になっている。これに対し、人間は筋肉の駆動により関節を固定したり負荷に従った方向への運動を行うことができ、また脱力時には可動範囲内で自由に関節を動かすことができる機構を備えている。人間の自然な歩行やダンスなどの動的な動きでは、このような環境からの作用を身体の力学的な変化として感じ、環境との動的な接触によって生み出される。ヒューマノイドロボットにおいても、センサ信号としてのみではなく身体の力学的な現象、つまり各関節に働く力の変化として重力を感じ、運動は既存の目標軌道の再生ではなく、身体と環境との力学的相互作用によって生まれる運動を獲得することが重要である。ここで身体と環境との力学的相互作用とは、身体の運動により環境に力を加えると同時に、環境より身体に加えられる力を関節の運動や力の変化として感じることである。

力センサを用いることで外力に従う運動を実現し、高バックドライバビリティを仮想的に実現することは可能だが、モータの回転速度やセンサの反応速度の限界などにより速い動きや衝撃力には対応できない。このような関節では外力に敏感に反応することで滑らかな動きを可能にしたり、余分な負荷が働いた場合その力に従った運動を行い力を逃がすことができず、環境と身体を相互に作用させることは困難である。また、不整地面を歩行する際、床からの予測できない外力を吸収することが出来ず歩行が困難になるといった問題が生じる。高出力トルク伝達を可能とし、さらに反力に従ったフリーな関節を実現することは、工学的な観点からも必要なことである。これらの点に注目し、これ

までにバックラッシュクラッチが開発された⁵⁾。これは関節にバックラッシュをもたせ、そのギャップを制御することにより完全にフリーな関節を実現するものである。この機構は環境と身体の力学的な相互作用を実現し膝関節のように主に一方のトルクが大きく働く関節においてその有用性が示されている。

一方、プーリ及びワイヤを用いた駆動機構はエネルギーのロスが少ない。したがってバックドライバビリティの高いアクチュエータを構成するためには有効な手段である。ヒューマノイドロボットが余計なエネルギーを浪費することなく効率よく歩行を行ったり、また人に危害を加えないように接触に敏感になるためには、バックドライバブルな関節を備えることは重要である。このことからヒューマノイドロボットの関節にワイヤ拮抗駆動装置を用いることは有用であると言える。

本研究ではプーリ及びワイヤを使用した駆動機構を用い力の伝達効率が高く、環境と身体との力の相互伝達を可能にする足首関節の開発を目指す。この機構ではパラレルワイヤ駆動システムのもとワイヤを足首周りに張り巡らせる。さらに動滑車の原理を利用することで減速器としての機能を実現する。ギアを一切用いないことでエネルギーのロスを減らし、ワイヤにかかる力を分散させることでワイヤの破断を防ぐ。また高バックドライバビリティにより余分な負荷が働いた場合その力に従った運動を行い力を逃がすことを可能にする。これにより予測できない外力が加わっても、その力を吸収することができる。また、張力センサを用いることで関節の剛性を変化させ、状況に応じた関節剛性を実現することが可能である。

2. ワイヤを用いた減速機能の実現方法

2-1 動滑車の原理の利用

動滑車の原理を利用して減速器としての機能を実現する。動滑車と定滑車を組み合わせた機構を Fig.1 に示す。図に示すように中央の四角い物体を、そこにかかる力の8分の1の力で持ち上げることができる。また、糸を引っ張り出す長さは四角い物体の移動距離の

8倍となる．このような動滑車と定滑車を組み合わせた機構を足首ジョイントの周りに配置することで減速器としての機能を実現する．このような機構はクレーンにも採用されている．

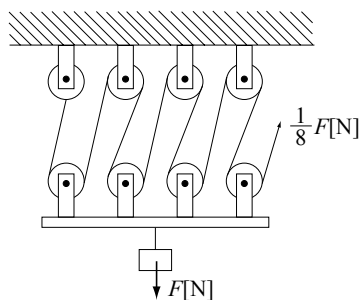


Fig.1 Decelerator mechanism using movable pulley principal

2.2 動力の伝達効率

滑車の軸受けにおける摩擦により動力の伝達効率は低下する．滑車の中心にボールベアリングを埋め込んだ場合，ボールベアリングの静止摩擦係数と動摩擦係数の値は 0.001 ~ 0.007 である⁶⁾．これより静止摩擦係数と動摩擦係数を摩擦係数 μ とおき力のつりあから動力の伝達効率を求めると式 (1) となる．

$$F = \frac{1 - \left(\frac{1 - \mu}{1 + \mu}\right)^{2n}}{1 - \left(\frac{1 - \mu}{1 + \mu}\right)^2} \frac{2}{1 + \mu} f \quad (1)$$

n は動滑車の数を表し， $f[N]$ はワイヤ端に働く力を表す．ここではワイヤに曲げ力が働くことなどによるエネルギーロスは考慮していないが，ワイヤの適切な張り方により効率が 90% 程度まで向上可能であることが知られており，本研究で設計したワイヤ構造でも，91.7 ~ 98.7% の伝達効率が得られることが計算から得られた．ヒューマノイドの関節に用いられるハーモニックドライブは高減速比で動力伝達率は約 70% であり，⁷⁾⁸⁾ 本研究において設計した機構は動力伝達率が 90% 以上と高効率であると言える．

3. 足首関節機構の設計

3.1 動滑車及びモータの配置と全体の設計

設計した足首関節機構を Fig.2 に示す．足首ジョイントの周りに複数の滑車 (ガイドプーリ) を配置している．足首ジョイントの自由度は 2 自由度であり，両側と後側の 3 箇所にガイドプーリによる減速器を配置する．一つ一つのガイドプーリは 2 自由度持つように取り付けられており，ワイヤの向きに従って動くことができる．これにより足首の駆動により生じるプーリ間のねじれを吸収し，ワイヤが容易に外れてしまうことを防いでいる．アクチュエータにはモータを用い，図のように 3 箇所に配置する．モータの軸には丸溝の彫られたプーリをとりつけ，それによってワイヤを巻き取る．

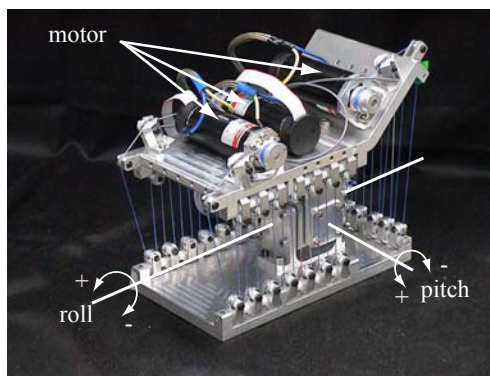


Fig.2 Prototype of the wire driven ankle mechanism

3.2 ガイドプーリの取付機構

ガイドプーリの取付機構を Fig.3 に示す．図に示すようにガイドプーリには 2 自由度ありロール軸とピッチ軸に関して回転できるようになっている．ロール軸に関しては取付機構全体が回転する．ガイドプーリが 2 自由度持つことで，足首が動いた時にワイヤ方向にプーリが追従できるようになっている．この取付機構はブロックの中央にあいた穴にステンレスの棒を通すことで Fig.2 に示すように板に固定する．ガイドプーリの中央には，回転による摩擦を小さくするためにボールベアリングが埋め込んである．

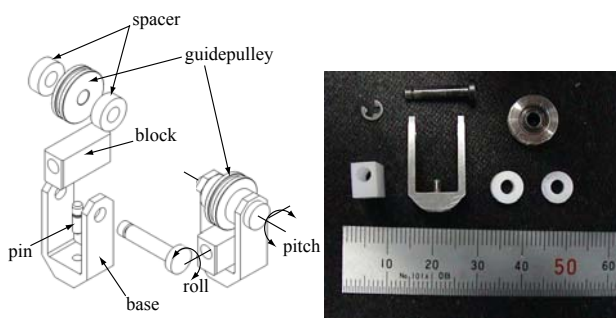


Fig.3 Guidepulley attachment mechanism

3.3 逆運動学解析

足首を制御し動かすには，目標関節角度が与えられた時のモータの回転角度がわかる必要がある．そのためある姿勢におけるワイヤ長を求める計算を行った．Fig.2 に示すようにピッチ軸，ロール軸，正負の方向を定義した．ピッチ軸に関する回転角度を ϕ ，ロール軸に関する回転角度を θ とした時，足首の姿勢行列 R は式 (2) のようになる．

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

このとき基準座標は 2 つ回転軸の交点を原点とし，鉛直上向きに x 軸，水平前方方向に y 軸，水平左方向に z 軸をとる．Fig.4 にワイヤ長を求める際に用いたモデルを示す．図に示すようにガイドプーリの取付機構が

取り付けられている点を a, b , ガイドプリーの中心位置を a', b' とする．足首の下側の板は固定して考える．上述した姿勢行列 R を用いてガイドプリー取付機構の位置 b を求める．点 b' はパイプを軸に回転するが，ワイヤにより引っ張られることで下側のプリーと距離が最短となる位置に来る．このとき， ϕ と θ の組合せにより上下のパイプはねじれた関係になるがそのねじれは微小であるとして無視する．このときワイヤ長を求める問題は，ワイヤがガイドプリーから離れる点 a'', b'' の距離を最小化する問題となるが，この計算は多くの計算時間を要するため，ここでは a', b' の距離を最小化することでこれを近似した． b' は点 a 点 b を結んだ直線とパイプにより作られる平面上にある．また，点 b' はパイプに対して垂直となる位置にあるので，以上の条件より点 a' 及び b' の位置が求められる．求めた a', b' より点 a', b' の距離を求め，上下のガイドプリーを結んでいるワイヤ長 w を以下の式より求める．

$$w = \| a'' - b'' \| = \sqrt{\| a' - b' \|^2 - d^2} \quad (3)$$

$d[\text{mm}]$ はガイドプリーの直径である．以上の計算を全てのワイヤに対して行い全ワイヤ長を求める．この時，プリー周上に巻きついてあるワイヤ長の変化は微小であるので，常に一定であるとした．上述の逆運動学解析より減速比を求めるとロール軸に関しては $1 : 100$ ，ピッチ軸に関しては $1 : 120$ となっており，非常に高い減速比が得られていることがわかる．

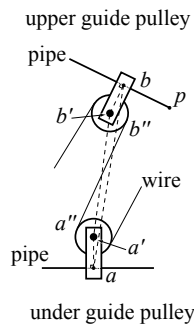


Fig.4 Model of arrangement of guide pulley

3.4 ロードセル内蔵型張力センサ

3.4.1 ロードセルセンサ取付機構

足首周りに張られたワイヤの破断防止や足首関節の剛性調節のためには，ワイヤにかかっている張力を測定する必要がある．そのために，小型のロードセルを用いた張力センサを考案し，製作した．開発した張力センサの全体図を Fig.5 に示す．ベース中央の円筒形の穴にロードセルを入れる．その上にシリンダーをのせシャフトにより溝の彫ってあるベアリングを取り付ける．シャフトの軸径が $3[\text{mm}]$ であるのに対して，ベースに穴あけられたシャフト用の穴の径は $4.5[\text{mm}]$ と大きくなっている．このガタによってわずかだがシリンダーが上下に動くことができる．この張力センサの原理及び使用方法を Fig.6 に示す．Fig.6 のように張力センサに取り付けられているベアリングの上を通すようにワイヤを張る．ワイヤによりベアリングが押しされ，同時

にシリンダーも押しされる．このシリンダーが押しされる力を底に取り付けたロードセルで測り，張力を求める．張力センサ機構が斜めに取り付けられているのは，ワイヤにより加えられる力がロードセルに対して垂直となるようにするためである．

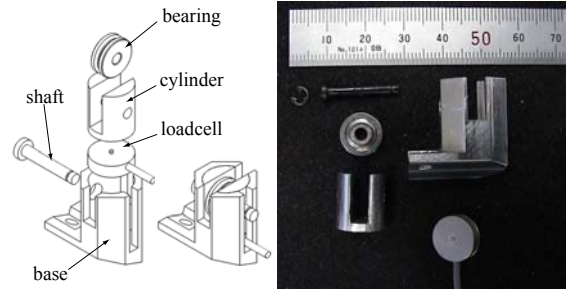


Fig.5 Tension sensor

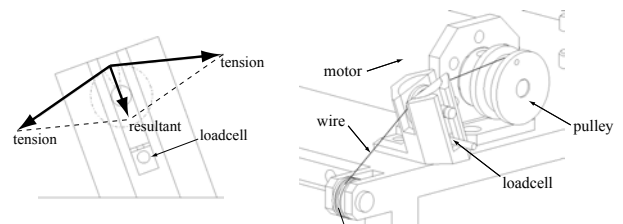


Fig.6 Principle of calculating tensile force

3.4.2 ロードセルセンサ信号の増幅回路

ロードセルの出力電圧は $0[\text{mV}] \sim 3[\text{mV}]$ と非常に小さく，そのままの電圧では PC の AD 変換器では読み取ることができない．この電圧を，AD 変換器が読み取ることのできる上限である $10[\text{V}]$ まで増幅する回路の作成を行った．その回路図を Fig.7 に示す．図の左側にあるブリッジ回路はロードセル内部の等価回路である．図中にある AD623 の IC は，インスツルメンテーションアンプであり計測用に広く用いられる差動増幅回路を含んだ IC である．この IC により出力電圧を $0[\text{V}] \sim 3[\text{V}]$ まで増幅する．次に AD623 の先にあるオペアンプ OP-07 を使って $0[\text{V}] \sim 10[\text{V}]$ まで増幅する．AD623 と OP-07 の間にはセンサ信号に混入するノイズを除去するためのローパスフィルタを加えた．ローパスフィルタ及び増幅回路の伝達関数 G は式 (4) となる．

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{1}{s + \frac{1}{C_1 R_3}} \quad (4)$$

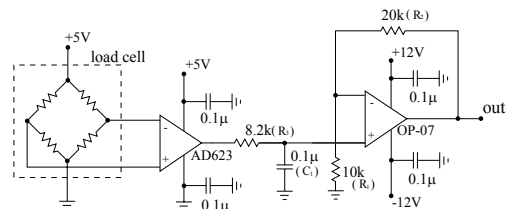


Fig.7 Circuit diagram of voltage amplifier

3.5 脛部構造体の設計

見た目をより人間らしくするために，脛部構造体及び足首と脛部を接続するための構造体にはマグネシウ

Al合金を3次元形状に鋳造・切削したものをを用いて製作した。実際に製作した構造体を Fig.8 に示す。図上段の構造体が脛部構造体である。下段の構造体は足首の上部板に取り付けられているモータ及び張力センサのカバーであり、脛部構造体と足首との接続の役割を担う。足首、脛部構造体、カバーを組み立てた写真を Fig.9 に示す。大きさの比較のために、サイズ 26[cm] のシューズを横に置く。



Fig.8 Photos of shin



Fig.9 Photo of leg

4. 実機を用いたワイヤ拮抗駆動の検証

4.1 張力と位置の制御

足首を駆動させる際に、張力と位置の制御が必要である。しかし、張力と位置は独立な関係であるのに対し制御変数がモータ回転角度のみであるため、張力と位置を同時に制御することは困難である。従って本機構の制御には目標関節角度を目標張力に変換し、張力のフィードバックによる制御を行う。制御のブロック線図を Fig.10 の上図に示す。 $\hat{\theta}$ は関節目標角度、 θ は現在の関節角度、 ψ はモータの回転角度である。図中の J はヤコビアンである。本実験では計算量の問題から各姿勢におけるヤコビアンを求めることは困難であるため、ピッチ軸及びロール軸共に 0 度の基準姿勢時におけるヤコビアンを用いることとした。 K_P 及び K_D は関節のコンプライアンスを決定するパラメータである。 N はヤコビアン J の零空間であり、張力の値が負になることを防いでいる。 F は張力の値をモータ指令値へと変換する行列であり、対角行列となっている。モータの回転角度から順運動学により足首の関節角度を求めることは非常に困難であるため、実際にはモータの現在の回転角度と目標角度の差を取り、ヤコビアンを掛けることで θ の偏差を求めている。このブロック線図を Fig.10 の下図に示す。 $\hat{\psi}$ はモータの目標回転角度である。

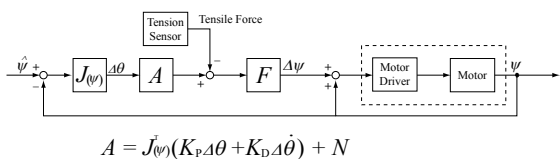
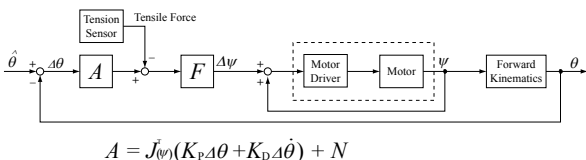


Fig.10 Block diagram of feedback controller

4.2 制御実験

まず、 K_P 及び K_D の値を 0 にした制御を行った。その実験の様子を連続写真を Fig.11 に示す。手により加えられた外力に対してワイヤを弛ませることなく足首を追従させることができた。また、設計時に意図した広い可動範囲が得られていることが確認できた。

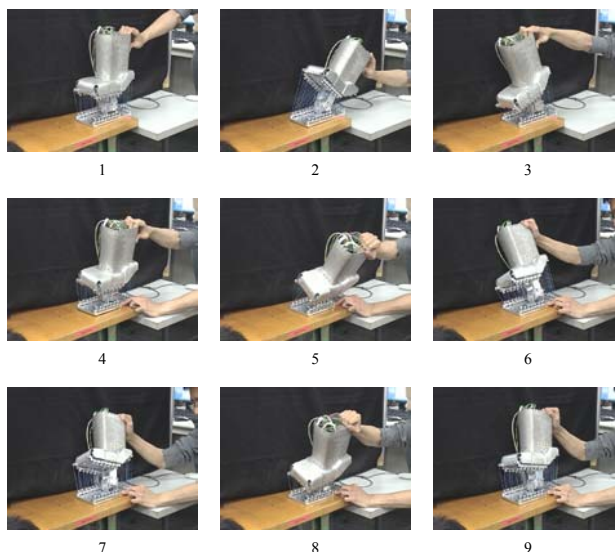


Fig.11 Motion of the experimental system

5. おわりに

本研究では、動力の伝達効率の高いワイヤとプーリーを用い、さらに動滑車の原理を用いることで減速比を稼ぎギアを一切用いずエネルギーのロスを減らし、身体と環境の力学的相互作用を可能にした足首関節機構の設計を行った。また、これらの制御系の設計を行った。

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 「脳を創る」「自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」(代表: 中村仁彦)、文部科学省科学研究補助金 (特定領域研究 A03) 「力学的情報処理の階層化に基づく知能ロボットのリアルタイムカーネルの構築」(代表: 岡田昌史) の支援を受けた。

参考文献

- 1) 広瀬, 竹中, 五味, 小沢. 人間型ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1997.
- 2) Honda Motor Co. <http://www.honda.co.jp/asimo/>.
- 3) Sony Corporation. <http://www.sony.co.jp/sonyinfo/qrio/>.
- 4) NISHIWAKI, SUGIHARA, KAGAMI, KANEHIRO, INABA, INOUE. Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1559-1564, 2000.
- 5) 岡田, 後藤, 中村. 歩行ロボットの従反力運動を実現する膝関節機構. 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会, 2002.
- 6) 石川二郎. 機械工学全書 第 8 巻 機械要素設計. 株式会社コロナ社, 1982.
- 7) 株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ. Harmonic drive catalog, 2003.
- 8) 丸山. ハーモニックドライブの最新技術動向. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 1, pp. 19-21, 2003.