

二関節機構制御を用いた起立支援の一考察

○梅村 敦史 (北見工業大学)

要 旨

従来のロボットと異なり、脊椎動物には二関節筋があり、力方向制御に寄与していることがわかってきた。本研究の目的は二関節制御機構を模倣した高齢者のための立位乗乗支援の実現にある。本論文では、二関節駆動機構を三つの電動機と平面2リンク機構でモデル化し、その基礎的な検討をした。三つの電動機のトルクの総和をゼロにすることで、簡単な制御で力方向制御や剛性の制御が可能であることを報告する。

1. はじめに

高齢になると立位の維持はできるが、関節痛などのため起立・着座や歩行が負担となる人が多くなる。積極的に動かない生活を続けると、廃用症候群となり寝たきりになることもありえる。これを避けるためには、自立して自ら操作できる起立支援ロボットを使用するなどの、工学的介入が有効であると考えられる^[1]。

従来のロボットは各関節に各々の関節を動かすサーボモータを配置してきた、ロボットアームと握手をして手を上下に振ろうとすると、アームの先端は上下ではなく斜め方向に力がかかることがある。これは、アーム先端に外力がかかるとき、肩関節と肘関節のそれぞれにトルクが発生し、それぞれの関節がバックドライブする。このとき、肩関節と肘関節の回転によって腕の先端が動くことになるが一般には動作する方向と力の方向が一致しないことによっておこる。

ヒトの四肢の筋群の働きは、これまで複雑で冗長であるとされてきた。

ヒトの四肢の筋群を、二関節(膝関節と股関節)二自由度の二次元平面運動に関与する、二対の拮抗一関節筋と、二関節にまたがる、一対の拮抗二関節筋の三対六筋の機能別実効筋としてとらえる。機能別実効筋による脚先の力は三つの方向の力ベクトルの和で表すことができることが理論的計算とヒトの筋の実測実験によって明らかにされた^[4]。

図1に二関節機構制御を備えた起立支援ロボットを示す。起立支援ロボットは搭乗者が自ら操作することで、床の座位からの起立と着座を支援する。起立する場合、搭乗者はロボットに腰掛け、前傾姿勢となり、自ら立ち上がろうとする力の変化を認識してロボットが搭乗者の起立をパワーアシストする。

起立支援ロボットには膝関節、股関節を動かす電動機と共に膝関節と股関節を同時に動かす二関節駆動電動機を備えている。

起立支援ロボットは、ヒトと同様に三つの電動機を備えた機構制御によりヒトと同様の出力特性をもつことで、ヒトの動きに順じた起立支援を可能とする。

本研究では、二関節機構制御を模倣した高齢者の立位乗乗ロボットの実現を目的とする。本論文では二関節機構制御を模倣した機構をモデル化し、基礎的な検討結果を報告する。

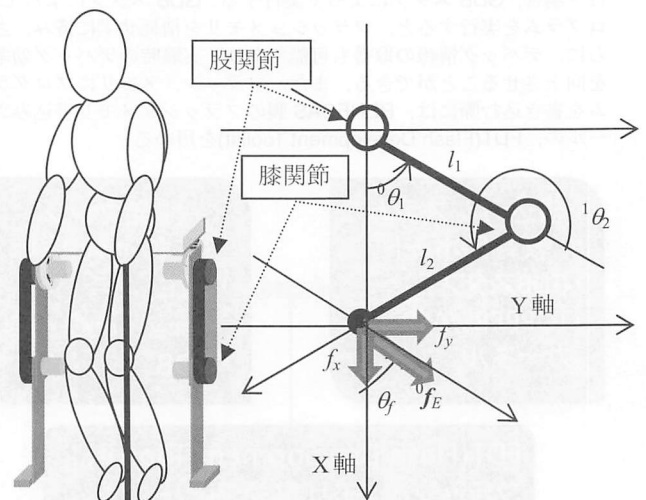


図1 起立支援ロボット基本構想とモデル

2. 起立支援ロボット

2.1 起立支援ロボットのモデル化

本研究のロボットは平面2リンク機構とみることができる。従来の関節駆動の2リンクロボットアームには、各関節に回転電動機を配置する直列リンク形式と基部に回転電動機を配置し、ベルトなどを介して駆動する並列リンク形式がある。二関節駆動回転電動機を配置するにはリンク先端、膝関節そして基部に配置する三つの形式がある。

リンク先端の出力は単関節駆動電動機と二関節駆動電動機の合力となって、次式のように表すことができる。

$${}^0\mathbf{f}_E = (\mathbf{J}_{r1}^{-1})^T \mathbf{T}_{r1} \begin{bmatrix} \tau_C \\ \tau_A \end{bmatrix} + (\mathbf{J}_{r2}^{-1})^T \mathbf{T}_{r2} \tau_S \quad (1)$$

ここで、 τ_A は膝軸の単関節駆動電動機のトルク、 τ_C は股関節軸の単関節駆動電動機のトルクそして τ_S は二関節を同時に駆動する電動機のトルクを表している。

\mathbf{J}_{r1} と \mathbf{J}_{r2} は各々単関節駆動電動機から脚先までのヤコビアン行列と二関節駆動電動機から脚先までのヤコビアン行列を表している。これらのヤコビアン行列は電動機がどのリンクを基準にしてどのリンクを回転させるかによって異なる。

大腿部に対して下腿部を回転させる単関節電動機と体

幹部に対して大腿部を回転させる単関節電動機をもち、大腿部を基準にして下腿部と体幹部を駆動する二関節電動機を配置している場合のヤコビアン行列は次式となる。

$$\mathbf{J}_{r1} = \mathbf{J}_{r2} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin({}^0\theta_1) - l_2 \sin({}^0\theta_1 + \theta_2) & -l_1 \sin({}^0\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos({}^0\theta_1) + l_2 \cos({}^0\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos({}^0\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

上記の機構はヒトと同等の出力特性を有している。

\mathbf{T}_{r1} は膝関節電動機及び股関節電動機から各々の関節軸までの伝達機構を表し、 \mathbf{T}_{r2} は二関節電動機から各関節軸までの伝達機構を表している。

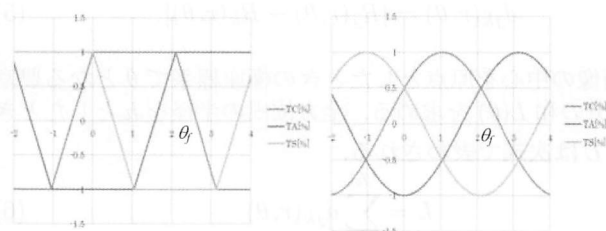
2.3 先端出力

電動機の定格トルクを 1pu とし、横軸を脚先端の力の方向で表した図のトルクを三つの電動機から出力した時の足先の出力の力を図に示す。添え字 C が股関節、A が膝関節駆動の電動機、S が二関節同時駆動の電動機を意味する。脚先出力の図は股関節から脚先へ向かう軸を x 軸とし、それと垂直な軸を Y 軸においている。

いま、脚の形は股関節が 60° 、膝関節が 120° 、かつ大腿部と下腿部のリンク長が同じ 1m 場合の結果を示す。

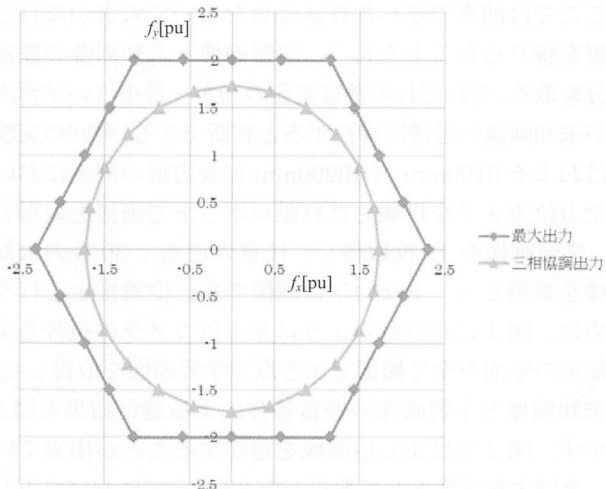
脚の姿勢に関わらず、股関節から足先方向に最大力を出力することが可能であると確認できる。

出力方向を二相三相変換した三相波形を三つのモータのトルクとすると、任意の方向の力をだすための三つのモータのトルクを一意に決めることができ、方向は脚の姿勢によらない。



(a) 最大出力

(b) 三相協調



(c) 足先出力ベクトル軌跡

図2 三相協調脚先出力

2.4 先端剛性

与えたモータの三つのトルクの総和がゼロとなる機構にすれば自由度は2であり、直交座標系に対応させることができ、機構で与えられるヤコビアン行列による変換が可能である。

直交座標系のインピーダンス行列 \mathbf{Z}_{xy} が与えられたとき、三つのモータトルクと回転角度変化の関係は次式で表すことができる。

$$\mathbf{C} \begin{bmatrix} \tau_C \\ \tau_A \\ \tau_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{r1}^{-1} \mathbf{T}_{r1} \\ \mathbf{J}_{r2}^{-1} \mathbf{T}_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_C \\ \tau_A \\ \tau_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{xy} \mathbf{C} \begin{bmatrix} \theta_C \\ \theta_A \\ \theta_S \end{bmatrix} \quad (3)$$

例えば、インピーダンス行列 $\mathbf{Z}=\mathbf{I}$ が与えらると、これを実現する各モータのインピーダンス行列は \mathbf{I} になる。

この場合、任意の方向から 1pu の力を加えた時の変位を図3に示す。

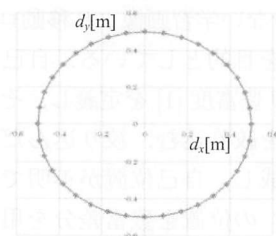


図3 足先端剛性

与えた直交座標のインピーダンスは全方位に一定であるので、任意の方向の外力に対して一定の変位となっている。

脚の姿勢が変わると、x 方向（股関節から足先方向）には変位が小さく、剛性が高まる。そして、その

変位の方向は脚の姿勢にかかわらず一定であるという特徴が確認できた。

3. おわりに

本論文では二関節機構制御を模倣した起立支援のための脚機構を平面2リンク機構でモデル化し、基礎的な検討を行った。従来と異なる二関節駆動機構を組み込むことで起立支援に必要な上下方向の出力を大きくすることが期待できる。また、三つの電動機の出力の総和がゼロとなるように機構を設計することで、機構的な直交変換が可能となり、脚先端の直交座標系での出力方向を三相変換することで簡単に電動機のトルク指令を生成することが可能である。加えて、脚先端のインピーダンスを容易に指定することが可能であることも確認できた。

参考文献

- [1] 山海嘉之:「最先端の開拓者たち 山海嘉之氏筑波大学大学院教授 CYBERDYNE CEO 医療機器で普及を狙う人体装着ロボット IT 複合領域を開拓」, 日経コンピュータ(日経 BP 社), No. 827, pp78-80, 2013.
- [2] 「2012 年度版福祉機器ガイドブック」, 第 39 回国際福祉機器展(H.C.R2012)(一般社団法人 保険福祉広報協会), pp85,89,pp91, pp94, pp119, pp123,pp145, pp146, pp156, pp158, pp185, 2012.
- [3] 梅村敦史, 羽根吉寿正:「立位乗ロボットのパワーアシスト基礎特性」, 生活支援医療工学系学会連合大会 2012(LIFE2012), No. GS1-1-2. (CD-ROM), 2012.
- [4] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼:「一関節及び二関節を含む筋座標系による機能別実効筋力評価(筋力と四肢先端の出力)」, 精密工学会誌, vol. 65, No. 12, pp1772-1777,