二関節筋機構を有するヒト下肢筋骨格モデルの関節角度制御

Control of joint angle of 4-DOF inverted pendulum model using bi-articular muscle mechanism

○正 三好扶 (岩手大) 学 上路央 (岩手大) 高橋敏将 (岩手大)
湯瀬正輝 (岩手大) 正 萩原義裕 (岩手大)

Tasuku MIYOSHI, Iwate University
Akira JOJI, Toshiyuki TAKAHASHI, Masaki YUZE, Yoshihiro HAGIHARA, Iwate University

In this study, we constructed a 4 degree of freedom (DOF) inverted pendulum model, that is human musculoskeletal mechanism and consisted of bi-articular muscle mechanism. Hip, knee and ankle joint of the human lower musculoskeletal model are actuated by nine pneumatic artificial muscles (PAM). In this study, we developed control systems using PID controllers and supply air pressure derived algorithm of mono- and bi-articular muscle mechanism, respectively. In the case of bi-articular muscles, two PID controllers are selected and the outputs are summed to control the angular displacements. we conducted the joint angle control experiments using the human lower musculoskeletal model, supply air pressure derived algorithm and control systems of mono- and bi-articular muscle mechanism. The result showed that capability for reference of all joints under all experimental conditions and established utility of control systems for bi- and mono- articular muscle mechanism.

Key Words: Skeletal model, Control of artificial muscle, double PID controller

1. 緒言

ヒト筋骨格系は1つの関節に跨って存在する単関節筋と、2つの関節に跨って存在する二関節筋と呼ばれる筋である。ヒト下肢の関節動作の屈曲・伸展のみに着目した場合、股関節と足関節では拮抗制御が可能な単関節筋ペアが存在している。しかしながら股関節の駆動には大腿直筋とハムストリングスの拮抗二関節筋ペアが寄与し、足関節の駆動には腓腹筋が寄与している。さらに膝関節の屈曲にはハムストリングスと腓腹筋の2つの二関節筋が寄与している。すなわち二関節筋の存在によってヒト下肢筋骨格系は冗長なシステムとなっているのである。二関節筋に関する先行研究としては、拮抗二関節筋の存在がヒトや動物の四肢リンク機構に見られる特有の剛性制御、軌道制御機能発現及び生物特有の滑らかで迅速な動作の実現に不可欠な貢献をしていることが報告されている⁽¹⁾など、二関節筋の機能的役割は徐々に解明されつつあるが、二関節筋機構を有する関節角度制御系については解剖学書においても各筋の関節駆動に着目した役割が表現されるにとどまっており、解明されていない。これはヒト下肢筋骨格系が冗長なシステムであるために考慮すべき変数が多く、制御系が複雑であることも原因の1つである。

本研究ではヒト下肢筋骨格系を、空気圧式人工筋肉を駆動源とした倒立振り子モデルとして構築し、二関節筋機構を有する関節角度制御系を構築することを目的とした。

2. ヒト下肢筋骨格モデル

本研究ではヒト下肢筋骨格系を9本の空気圧式人工筋肉を使用した倒立振り子モデルとして構築した⁽²⁾。図1にヒト下肢筋骨格モデルの概要図と写真を示す。空気圧式人工筋肉(以下PAM)は空気圧を引張力に変換するアクチュエータであり、収縮することによって引張力を発生させるというヒト筋に類似した特性を有する。しかしながらその欠点として高い非線形性を有することが挙げられる。そのため、PAMの特性実験を行いPAM挙動の制御に有用なパラメータを考察し、PAM挙動のシミュレーションモデルを式(1)のように構築した。

$$z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Ey^2 + Fxy \quad (1)$$

ここで $z[\%]$ はPAMの収縮率、 $x[\text{kg}]$ は負荷、 $y[\text{MPa}]$ は供給空気圧、 A, B, C, D, E, F はPAMの自然長に依存する係数である。特性実験の結果はシミュレーションモデルと高い相関を示した⁽²⁾。

構築したヒト下肢筋骨格モデルとPAM挙動シミュレーションモデルを使用して単関節筋機構の関節角度制御実験を行った。結果、偏差は発生したが、全ての目標角度に対し、追従性を確認できたことから、構築した単関節筋機構の関節角度系の有用性を確認した⁽³⁾。

3. 二関節筋機構の関節角度制御実験

二関節筋機構の関節角度系を構築した。初めに二関節筋機構の任意の角度におけるPAM長の導出を行った。図2に二関節筋機構の関節周りの概要図を示す。

Fig.1 Human lower musculoskeletal model

Fig.2 Schematic figure for calculating bi-articular muscle PAM

図 2 における PAM 長導出式は次式で示される。

$$L_{hi} = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + 2L_1L_3 \cos \theta_1 + 2L_2L_3 \cos \theta_2 + 2L_1L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

ここで, $L_1 = \sqrt{e^2 + h^2}$, $L_2 = \sqrt{g^2 + i^2}$, $L_3 = f$, $\theta_1 = \theta_{21} + \theta_{eh}$,

$\theta_2 = \theta_{22} + \theta_{gi}$ であり, e, f, g, h, i [mm] は関節周りのリンク長である。

導出した PAM 長を実現する収縮率を導出し, PAM 挙動シミュレーションモデルを変形した空気圧導出式を考案した。式(3)に任意の PAM 長を実現する収縮率を導出する式を示し, 式(4)に PAM 挙動シミュレーションモデルを変形して構築した供給空気圧導出式を示す。

$$z = 100 \{1 - (L_{hi} / L_{natural})\} \quad (3)$$

$$y = \left\{ -(C + Fx) + \sqrt{(C + Fx)^2 - 4E(A + Bx + Dx^2 - z)} \right\} / (2E) \quad (4)$$

ここで式(3)における z は収縮率[%], L_{hi} は PAM 長[mm], $L_{natural}$ は PAM の自然長を示し, 式(4)における y は供給空気圧[MPa], x は負荷[kg], A, B, C, D, E, F は PAM 挙動シミュレーションモデル(式(1))で使用した PAM 固有の係数である。各関節の目標角度を設定し, 式(2), (3), (4)に代入することにより, 二関節筋機構における任意の角度を実現する PAM への供給空気圧を導出することが可能になる。

供給空気圧導出アルゴリズム構築後に二関節筋機構の関節制御系を構築した。二関節筋機構の関節角度制御も単関節筋機構と同様に PID 制御を使用した。二関節筋は 2 つの関節に寄与するため, 1 つのアクチュエータにつき 2 つのポテンシオメータ及びコントローラを必要とした。図 3 に二関節筋機構を含む関節角度制御系を示す。

二関節筋機構の出力決定方法は先行研究において二関節筋で主な出力を行い, 残りを単関節筋で出力するという報告⁽⁴⁾や歩行周期中において筋活動のピークに達するまでの時間では単関節筋であるヒラメ筋の方が二関節筋である腓腹筋よりも早いという報告⁽⁵⁾がされている。本研究では単関節筋を出力してから二関節筋を出力するという方法を採択した。

構築した空気圧導出アルゴリズムと図 3 に示した制御系及び二関節筋の出力決定方法を使用した関節角度制御実験を行った。制御対象は股関節, 膝関節, 足関節角度とし, それぞれの関節を屈曲, 伸展させた。本実験では足関節の内反・外反動作は行わなかったため, 腓腹筋内外側に該当する PAM(LG-, MG-PAM)は同一出力とした。目標角度は一定値と正弦波状に変化する値を使用した。図 4 に各条件下における関節角度の結果を示す。目標角度一定値の場合においては股関節, 膝関節及び足関節のそれぞれが目標角度への追従性を示した。実験期間中における目標角度を関節角度の平均偏差は股関節で 5.19 [deg], 膝関節で 3.68 [deg], 足関節で 0.59 [deg]であった。正弦波状の目標角度においては各関節で大きな偏差が確認されたが, 目標角度に準じた挙動を確認した。

4. 結論

本研究では二関節筋機構を有するヒト下肢筋骨格モデルの関節角度系の構築を行うことを目的とした。実機実験の結果, 股関節及び足関節だけでなく, 拮抗単関節筋ペアを有しない膝関節が目標角度に追従できたことから, 本研究で構築した二関節筋機構の制御アルゴリズムの有用性を証明した。

Fig.3 Control system for bi-articular muscle

(a-1) Constant

(a-2) Sine wave

(a) Hip

(b-1) Constant

(b-2) Sine wave

(b) Knee

(c-1) Constant

(c-2) Sine wave

(c) Ankle

Fig.4 Experimental results of angular displacement

謝辞

(株)SMC より, 本研究で使用了システムを構築するための空気圧供給装置を提供して頂いた。記して謝意を示す。

参考文献

- (1) M. Kumamoto et al., *Human Movement Science*, 13, pp.611-634, 1994
- (2) 上路央ら, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2011(ROBOMECH2011), 講演論文集(CD-ROM)2P2-I04, 2011
- (3) 上路央ら, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会論文集(CD-ROM)8B41, 2012
- (4) T. Miyoshi et al., *ICORR2009*, pp.442-446, 2009
- (5) H. Yu et al., *Measurement*, 43, pp.1106-1114, 2010