

二関節筋と筋粘弾性を用いた反力方向制御の実証

木村康人 (東京大学) 呉世訓 (東京大学) 堀洋一 (東京大学)

1. はじめに

生物の機能をロボットに取り入れようという試みは多く、中でも生物の筋骨格構造を模倣しようとする研究は多岐にわたる。こうした研究はロボットに生物のような巧みな動きをさせ、今後必要とされる災害救助や人間のサポートをするようなロボットを実現しようという目標と、生物がなぜ複雑な筋骨格構造を持っているのかを明らかにし、医療や福祉技術の発展に寄与しようという目標を持つ。

生物の筋骨格構造の中で非常に多く存在しているにもかかわらず、ロボット工学者がその存在理由を理解できずに無視してきたものが二関節筋である。二関節筋は2つの関節に跨って配置されており、関節間を拘束してしまう。さらに2つの関節を駆動するには2つの単関節筋対があれば十分であり、二関節筋がもたらす冗長性は不必要であると認識されてきた。

しかし、近年 Kumamoto らのグループによって二関節筋を備えた3対6筋の生物四肢モデルが確立され、さらに二関節筋が四肢先端の出力方向制御、剛性制御に大きく貢献していることが明らかとされ、二関節筋を有する2リンク機構は直線方向の変位と出力が一致し、先端がずれずに屈曲できることがばねを備えた簡単なモデルで示された [1]。Oshima, Toriumi らは下腿部の二関節筋である腓腹筋が跳躍時に他の筋で生じた出力を効率良く直動運動へと変換させることを示した [2]。こうした体幹と末端を結ぶ直線方向の運動 (以下直動運動と呼ぶ) は生物の基本動作である歩行や走行、跳躍のなかに如実に表れており、直動運動と3対6筋構造の関係を見ることで生物の巧みな動作とその複雑な筋骨格構造との関係性が解き明かされると考えられる。

本論文では静力学的な面から2リンクアームの出力特性を解析し、生物の持つ3対6筋構造が2リンクアームの直動運動において非常に有利であることを示し、これらをシミュレーションによって検証する。さらに、遊星歯車を用いた二関節同時駆動機構によって実験的な検証を行う。

2. 生物四肢モデル

2.1 二関節同時駆動

生物四肢の二関節の運動に関与する筋は非常に多く、複雑な筋配列となっている。しかし、肘、もしくは膝関節が蝶番関節である事を考え四肢の運動を平面内に限定すると、筋は機能別に分類され図1のような3対6筋のモデルが得られる。 $f_i, \{i = 1, 2, 3\}$ は屈曲筋であり、 e_i は伸展筋を表す。 f_1, e_1 は第一関節単関節拮抗筋対、 f_2, e_2 は第二関節単関節拮抗筋対、そして f_3, e_3 は二関節筋拮抗筋対である。単関節筋対は1つの関節にのみトルクを發揮し、二関節筋対は2つの関節に跨って配置されており、両関節に同時にトルクを發揮する。

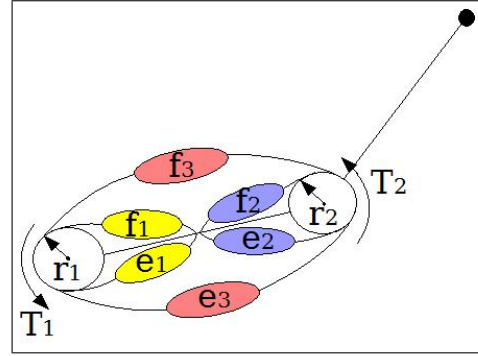


図1 Animal arm model

これらの筋対が関節に發揮するトルクを $\tau_i, \{i = 1, 2, 3\}$ とすると、関節トルク T_1^j, T_2^j は式 (1) で表される。

$$\begin{cases} T_1^j = \tau_1^m + \tau_3^m \\ T_2^j = \tau_2^m + \tau_3^m \end{cases} \quad (1)$$

2つの出力に対して独立な3つの入力があるため二関節同時駆動機構は冗長なシステムとなる。そのためある手先の位置や力の目標値に対する筋トルクの解は無数に存在することとなるが、人間の筋電信号を基にした制御法 [3] や、 ∞ -norm を用いた解法 [4] を提案している。本論文では2リンクアームに直動運動をさせるために1自由度を使用しているため、冗長性の解法に関しては触れない。

2.2 筋粘弾性

図1の各筋は収縮力に応じて変化する粘弾性を有しており、出力 F は式 (2) で表すことができる [5]。

$$f = u - ku\Delta x - bu\Delta \dot{x} \quad (2)$$

ただし、 u, x はそれぞれ筋の収縮力、収縮量であり、 k, b は弾性、粘性係数を表す。この特性と拮抗駆動の様子を図2に表す。

2.3 拮抗駆動

各筋対は関節を収縮筋と伸展筋によって拮抗駆動しているため収縮筋側において $\Delta x = -r\Delta\theta$ とすると、伸展筋側においては $\Delta x = r\Delta\theta$ となり、関節を駆動する筋トルク τ^m は式 (3) となる。

$$\begin{aligned} \tau^m &= r(f^e - f^f) \\ &= r(u^e - u^f) - (u^e + u^f)(K + Bs)r\Delta\theta \end{aligned} \quad (3)$$

θ, r はそれぞれ関節角度、半径を表しており、関節半径は両関節で等しいとする。また、 s は微分演算子を表す。 $\Delta\theta$ は現在の関節角度の平衡位置からの変差であるが、平衡位置を指令値 θ^{ref} として考えれば、パラメー

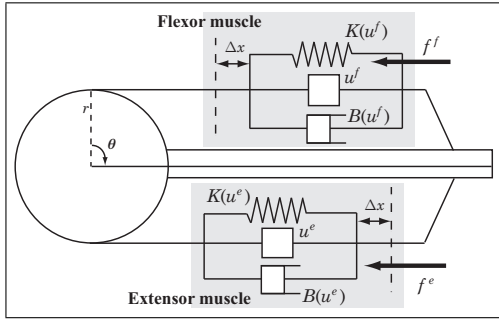


図 2 Segment rotating on a joint driven by a pair of muscles

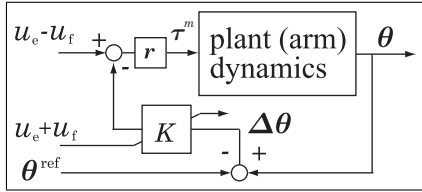


図 3 Two-degree-of-freedom control input characteristic of a muscle pair

タとして持たせた剛性 $K + Bs$ によって, θ は θ^{ref} へと収束していく。

また, 拮抗筋対の出力の差 $u^e - u^f$ は関節にトルクを発生させる役割を持ち, 和 $u^e + u^f$ は関節剛性を制御する役割を持つことが解る。これら 2 つを新たに関節への 2 つの入力 $D_i, S_i, \{i = 1, 2, 3\}$ とし, $K + Bs = K'$ とおくと, 二関節同時駆動機構における関節トルクは以下で記述される。

$$\begin{cases} T_1^j = r(D_1 + D_3) - r(S_1 K_1' \Delta\theta_1 + S_3 K_3' \Delta\theta_{12}) \\ T_2^j = r(D_2 + D_3) - r(S_2 K_2' \Delta\theta_2 + S_3 K_3' \Delta\theta_{12}) \end{cases} \quad (4)$$

$\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2$ である。この構造をブロック図によって表現すると図 3 のように二自由度制御の形となる [6]。次章以降では関節剛性に基づいた反力制御を考えるため, 上記の 2 入力 D_i, S_i のうち S_i のみに着目する。また, 静力学的な解析を行うため粘性は考慮せず弾性のみ考え, さらに簡単のため各筋で等しい弾性 $K_i' = K$ を持つとする。さらに, リンクが完全に伸長した状態を平衡状態と考え, $\theta_i^{\text{ref}} = 0, \{i = 1, 2, 3\}$ とする。以上より, 関節トルクは式 (5) として計算する。

$$\begin{cases} T_1^j = -rK(S_1 \Delta\theta_1 + S_3 \Delta\theta_{12}) \\ T_2^j = -rK(S_2 \Delta\theta_2 + S_3 \Delta\theta_{12}) \end{cases} \quad (5)$$

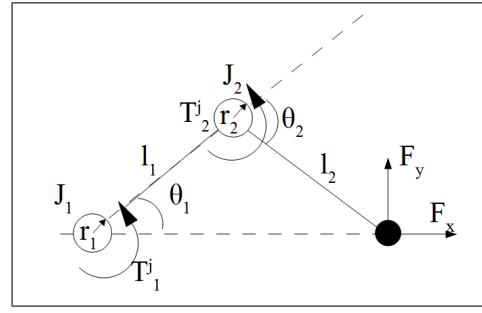


図 4 Two-link Manipulator

3. 反力制御

3.1 手先出力の静力学的解析

図 4 のような平面 2 リンクアームを考えると, 関節トルクによって発生する手先の出力は以下で与えられる。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} l_2 \cos \theta_{12} & -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_{12} \\ l_2 \sin \theta_{12} & -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} \quad (6)$$

これに式 (5) を代入して整理すると, 手先の出力は式 (7) となる。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2l \sin \theta_1} & \frac{1}{l \sin \theta_1} \\ \frac{1}{2l \cos \theta_1} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{rK\theta_1}{2l \sin \theta_1} (S_1 + 4S_2 + S_3) \\ \frac{rK\theta_1}{2l \cos \theta_1} (S_3 - S_1) \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし, $l_1 = l_2 = l$ として計算している。式 (7) より, 二関節筋が無い場合には第一関節単関節筋 (S_1) のみが F_y を出力する。そのため x 方向のみに反力を生成しようとしても S_1 によってバランスがとれない。しかし, 二関節筋 (S_3) が存在する場合には, 二関節筋が y 方向の出力バランスをとり, アームは x 方向のみへ力を出力することができる。また, 式 (7) では, 第二関節単関節筋 (S_2) が x 方向に非常に大きな力を出力できることが示されている。これは, 生物の基本的な動作である直動運動に四肢の第二関節単関節筋が大きく貢献していることを表しており, 体幹に集中させたアクチュエータと腱駆動によって, 第一関節単関節筋と二関節筋の機能のみを持たせた 2 リンクアームでは直動運動に不利になる事を示している。従って, 生体の 3 対 6 筋構造によって図 5 のように 2 リンクアームを強力な直動アクチュエータのように扱うことが可能となる。

3.2 所望する反力の生成

S_i はフリーパラメータであり, 変化させることによって反力を変えることができる。一つの例として, 式 (8) のように設定すると, 反力は x の変位に比例し, 第一関節と手先の間にあたかもばねが存在するような

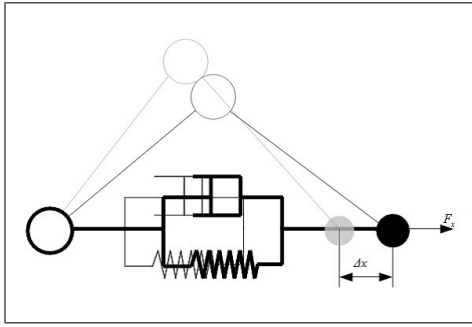


図 5 Two-link Manipulator Driven as Linear Actuator

挙動を示す。 k はゲインである。

$$\begin{cases} S_1 = S_3 = k \frac{\sin \theta_1 (1 - \cos \theta_1)}{\theta_1} \\ S_2 = k \frac{\sin \theta_1 (1 - \cos \theta_1)}{\theta_1} \end{cases} \quad (8)$$

4. シミュレーション結果

4.1 二関節筋の有無の比較

図 6(a) は二関節筋の有無を比較したシミュレーション結果である。ロボットアームは初期姿勢を $\theta_1 = \pi/12[\text{rad}]$ とし、 $\pi/12[\text{rad}]$ ずつ変化させ、 $\theta_1 = 5\pi/12[\text{rad}]$ まで見ている。アームのパラメータは $r = 0.1[\text{m}]$, $l = 0.27[\text{m}]$ として計算した。また、 $S_1 = S_2 = 10[\text{N}]$ としている。

青色の円群は二関節筋が無い場合 ($S_3 = 0[\text{N}]$) の手先出力を表しており、緑色の円群は $S_3 = 10[\text{N}]$ とした場合である。二関節筋が無い場合はアームが屈曲していくに従って第一関節単関節筋による y 方向出力が大きくなり、手先出力が x 方向から逸れて行ってしまう。しかし、二関節筋を備えた場合では y 方向の出力はバランスされ、姿勢が変化しても x 方向のみの力を出力できる。

4.2 第二関節単関節筋の有無の比較

図 6(b) は第二関節単関節筋の有無を比較したシミュレーション結果である。青色の円群は第二関節単関節筋が無い場合の出力であり、緑色の円群は 3 対 6 筋を備えた場合の出力である。二関節筋と第一関節単関節筋のみを備えた場合では x 方向の出力は著しく小さくなってしまいが、3 対 6 筋を備えた 2 リンクアームでは x 方向の出力が非常に大きく取る事ができ、直動運動において生物の 3 対 6 筋機構が有利であることがわかる。

4.3 所望反力生成

図 7 は $S_1 = S_2 = S_3 = 10[\text{N}]$ とした場合と、式 (8) に基づいて機械的なばねのような反力特性を持たせた場合の比較である。このように S を制御することによって反力の特性を変化させることが可能であり、走行と歩行の間での反力の変化や整地と不整地での変化などに対応させることができると考えられる。

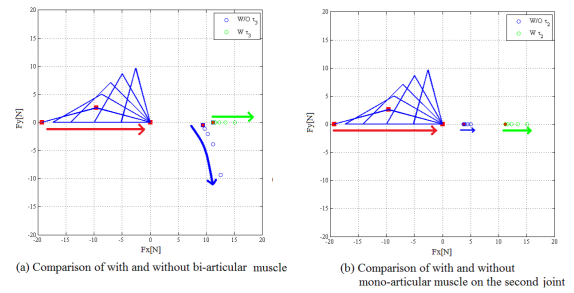


図 6 Simulation Results

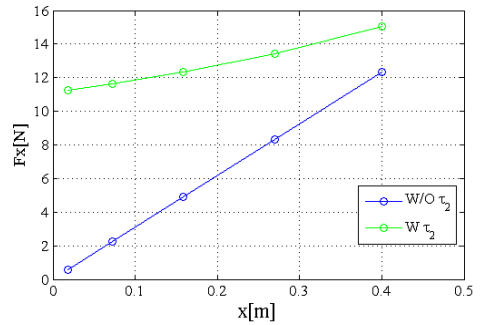


図 7 The Relationship of Δx and F_x

5. 実験機

5.1 遊星歯車機構

二関節同時駆動機構の実現に関する研究は少なくない。しかし筋の粘弾性までを忠実に再現するなどといった非常に複雑な構造のものや、空気圧アクチュエータを用いており、非線形性が大きいものがほとんどである。

本実験機は二関節同時駆動の実現のため回転型モータと遊星歯車機構 (図 8) を用いている。遊星歯車機構は減速機として用いられるほか、自動車の動力分割機構などに用いられており、3 入力 2 出力のシステムが 3 対 6 筋システムに類似している。リングギアへの入力を τ_1^m 、サンギアへの入力を τ_2^m 、そしてキャリアへの入力を τ_3^m とし、リングギアからの出力を T_1^j 、サンギアからの出力を T_2^j として用いている。

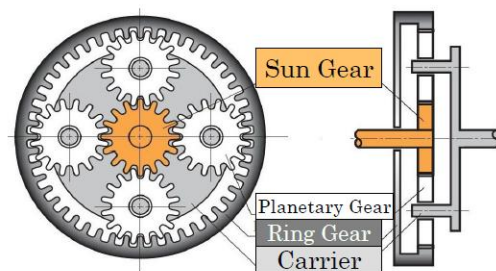


図 8 Planetary Gear System

5.2 開発したアーム

図 9 は製作したロボットアームである。遊星歯車機構は関節間での干渉やギア比により、そのままでは (1)

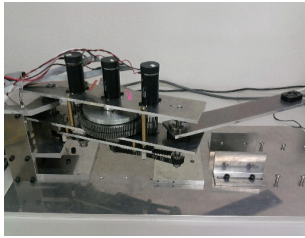


図 9 Robot Arm

の通りのトルク配分ができないため、ソフトウェア的な制御によって補償する必要がある。筆者らは [7] において遊星歯車機構を二関節同時駆動機構として働かせるための制御を提案している。

5.3 各筋による手先出力

以下の図 10 は製作したロボットアームの手先出力測定結果である。二関節同時駆動機構で顕著な六角形の手先出力特性が得られていることが解る。

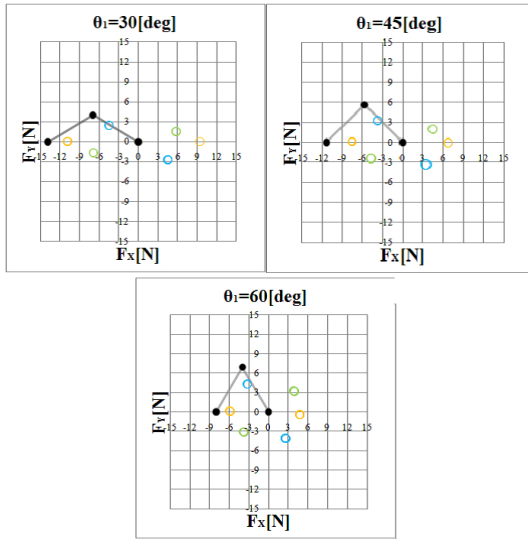


図 10 手先出力

6. 実験結果

図 11 は $\theta_1 = 60[\text{deg}]$ における反力をロボットアームによって測定した図である。図を見て解るように、二関節筋に出力させない場合の手先反力は y 方向にずれてしまうが、二関節筋を持つ場合は手先反力が x 方向に是正されているのが解る。

7. まとめ

本論文では生物特有の機構である二関節筋の特徴である手先出力の方向制御に関して、特に体幹関節と末端とを結ぶ直線方向への反力について静力学的に解析し、シミュレーションおよび実験によって二関節筋の有無を比較した。二関節筋の存在によって 2 リンクアームは直線方向への反力を出力できるようになり、さらに関節剛性を変化させることによって所望の反力を得ることができることを示した。

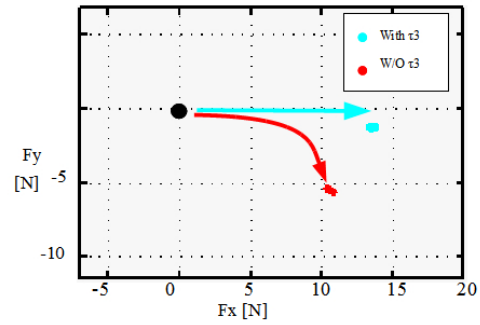


図 11 手先反力の測定結果

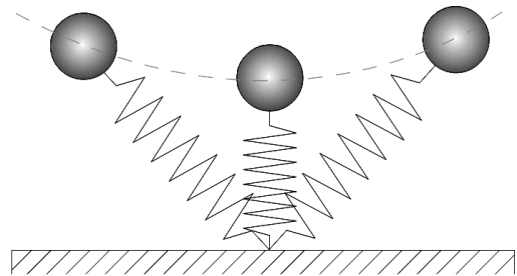


図 12 倒立振り子走行モデル

図 12 に、生物の歩行や走行のモデルとしてよく用いられる SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) モデルを示す。今後は、動力学的な解析を進めるとともに、SLIP モデルと合わせて最適な剛性 S とトルク出力 D を求め、二関節筋を用いた動的歩行メカニズムの解明を図る。

参考文献

- [1] Minayori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto, "Control properties induced by existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles -Mechanical engineering model analyses", *Human Movement Science* 13, pp611-634, 1994
- [2] T. Oshima, K. Toriumi and T. Fujikawa and N. Mose, "Jump Mechanism using Coordination Function of Bi-articular Muscle in Knee and Ankle Joint" (in Japanese), *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineer, C*, vol. 71, No. 712, pp. 176-182, 2005.
- [3] T. Tsuji, "A model of antagonistic triarticular muscle mechanism for lancelet robot", *The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, 2010.
- [4] V. Salvucci, S. Oh, Y. Hori, "Infinity Norm Approach for Precise Force Control of Manipulators Driven by Bi-articular Actuators", *36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, 2010.
- [5] 伊藤 宏司, 辻 敏夫, "筋骨格形の大線型特性と義肢制御への応用", *電気学会論文誌 C 編*, Vol.105, No. 10, pp. 201 - 208, 198
- [6] S. Oh and Y. Hori, "Development of Two-Degree-of-Freedom Control for Robot Manipulator with Biarticular Muscle Torque", *Proc. of American Control Conference*, pp.325-330, 2009.
- [7] 木村 康人, 呉 世訓, 堀 洋一, " ", 平成 21 年度電気学会産業応用部門大会, 2008. 8, 東京