2リンク6筋を有する筋骨格システムにおける フィードフォワード位置決めのための 筋配置条件

越 智 裕 章^{*1} 木 野 仁^{*1} 田 原 健 二^{*2} 松 谷 祐 希^{*3}

Muscular Arrangement Conditions of Musculoskeletal System with Two Joints and Six Muscles for Feedforward Position Control

Hiroaki Ochi^{*1}, Hitoshi Kino^{*1}, Kenji Tahara^{*2} and Yuki Matsutani^{*3}

This paper focuses on the feedforward position control for a musculoskeletal system which has two links, two joints and six muscles. This feedforward control method utilizes resultant torque generated by inputting the internal force among muscles balancing at a desired posture. The motion convergence of this control method is extremely sensitive to the muscular arrangement. Using the approximation of Taylor expansion, the previous study clarified the sufficient condition of the muscular lengths for converging at a desired posture. This paper expands this discussion to clarify the geometric conditions of the muscular arrangement.

Key Words: Musculoskeletal, Muscular Arrangement, Feedforward, Convergence, Design Method

1. 緒 言

ヒトのような柔軟な動作をロボットで実現させることはロボット研究における一つの目標である。この目標を実現するため、人体の運動について様々な観点から研究がなされている。例えば人体の運動生成については、多くの運動生成モデルが論じられている。こうしたモデルでは学習に基づくフィードフォワード制御や逆ダイナミクス学習を用い、運動に対する筋張力を出力することにより運動生成を行う [1]~[3]。

一方、人体の持つ構造特有の特性についても研究がなされている。筋骨格構造は骨格の周りに多数の筋が付着しており、筋の張力により姿勢を制御する。対となる拮抗筋の存在により冗長駆動系となり、筋肉間で内力が発生する特徴がある。また、二つの関節へ同時に出力を行う二関節筋により、通常の関節駆動型ロボットと異なる出力特性を有する [4]。

これらを踏まえ木野らは、筋骨格構造の特徴を積極的に利用することにより、学習や逆ダイナミクスを用いないフィードフォ

ワード位置決め制御を提案し、目標姿勢への収束性を議論した [5] [6]。このフィードフォワード制御では、筋冗長性における筋内力の存在をフィードフォワード入力として積極的に利用し、目標姿勢で釣り合う筋内力を一定の筋張力として入力することでセンサ情報によるフィードバックなしで位置決め制御を行う。

この内力を利用したフィードフォワード制御手法の解析は、現在の筋骨格構造ロボットにおける不安定な釣り合い内力による制御性能の劣化防止、フィードバック制御と組み合わせることによる、フィードバック要素の安定性の向上 [7]、変位センサ故障時の危険回避動作などへの応用が期待できる。また、筋骨格構造の有する特性を明らかにすることで、将来的にはヒトの動作生成とロボティクスとの溝を埋め、次世代のロボット開発にも応用が期待できる。

しかしながら、木野らが提案する筋骨格構造のフィードフォワード制御手法では、構造的な特性を積極的に利用するため、目標位置への収束性が筋配置の影響を強く受ける。この筋配置の収束性への影響を明らかにするため、木野らは **Fig. 1** のような2リンク6筋システムに対し、釣り合い筋内力によって生成されるポテンシャルを数値解析的に検証した [5]。さらに、木野らは筋長を関節角度に関する二次のテイラー展開で近似し、ポテンシャル形状を解析することで、目標姿勢への準静的な収束条件を数学的に明らかにした [6]。しかし、過去の研究 [6] で明らかにされた条件は、二次近似におけるテイラー展開の各係数の数学的な条件であり、フィードフォワード位置決め制御が可能

原稿受付 2014 年 10 月 28 日

^{*1}福岡工業大学

^{*2}九州大学

^{*3}熊本高等専門学校

^{*1}Fukuoka Institute of Technology

^{*2}Kyushu University

^{*3}National Institute of Technology, Kumamoto College

■ 本論文は新規性（要素分野）で評価されました。

Fig. 1 Musculoskeletal system (two-links with six muscles)

となる筋構造の幾何学的条件については不明であった。

そこで本論文では、木野らが文献[6]で示したポテンシャル形状の解析に基づく筋長の二次近似安定条件を拡張する。本論文では、2リンク6筋を有する筋骨格システムにおいて、フィードフォワード位置決め制御が可能となる筋構造の幾何学的な条件を明らかにする。これにより、フィードフォワード位置制御が可能となる筋骨格システムの、構造設計の指針となることが期待できる。

次の第2章では、対象とする筋骨格システムの説明を行い、フィードフォワード位置制御の概要を説明する。また、筋内力によって生成されるポテンシャルについて説明する。第3章ではポテンシャル形状の解析に基づいた、筋長の二次近似安定条件を説明する。第4章では第3章で示した安定条件を拡張し、システムが安定となり、フィードフォワード位置制御が可能となる筋配置の幾何学条件を導出する。第5章では具体例を挙げ、シミュレーションで動作の検証を行う。最後に結言として第6章にまとめる。

2. 筋骨格システム

ヒトを含む脊椎動物の大きな特徴である筋骨格構造は、ロボットにおいても多く利用されている。例えば、筋骨格構造を積極的に利用したヒューマノイドロボット[8][9]や、腱駆動ロボット[10][11]などが研究されている。こうした機械システムでは一般に、腱や筋肉の代わりに、アクチュエータでワイヤケーブルを巻き取るなどのアクチュエータユニットを用い、骨格に相当するリンク部へ張力を伝達させることにより、関節トルクを生成する。腱や筋肉、ワイヤケーブルは張力のみしか伝達できないため、テンショナーや重力などの外力を利用しない場合には、冗長駆動となる[12]。つまり、 n 自由度の制御に対し、最低で $n+1$ 本以上の筋肉に相当するアクチュエータユニットが必要となる。この冗長性は、ワイヤケーブル間に内力を発生させる。実際の人体では、筋肉間の内力を調整することで、手先の見かけのインピーダンスを自在に変化させ、外環境に適応している。実際の腱駆動ロボット等においても、ワイヤケーブル間の内力を調整することで、手先の剛性調整が可能となっている[10][11]。

本論文で対象とする筋骨格システムのフィードフォワード位置制御では、目標位置で釣り合う筋張力をステップ入力し、変

位センサ等のフィードバックなしで位置決めを行う。この制御手法は工学的な視点では、筋骨格システムに対し、例えば以下のような利用法が考えられる。

- (1) 変位センサ故障時のセンサレスでの危機回避運動の実現が可能となる。
- (2) 変位センサによるフィードバック制御を用いる場合でも、一般に運動中に釣り合い内力を筋張力に加える。筋配置によってはこの釣り合い内力が不安定となり、制御性能を著しく劣化させる可能性が考えられる[6]。したがって、本研究から得られた筋配置条件は変位フィードバック使用時の位置決め精度向上に役立つ。
- (3) カメラセンサ等を用いてフィードバック位置制御を行う場合では、時間遅れによりシステムが不安定となる場合がある。そのような場合にも、上記(2)の議論を発展させ、本論文で取り扱っているフィードフォワード入力を組み合わせることで、安定性向上などが期待できる[7]。

2.1 問題設定

本論文では、ヒトの腕を模した2リンク筋骨格構造を対象とする。本システムは、Fig. 1のように肩・肘関節の二関節からなり、二つの関節角度制御が可能となっている。骨格となるリンクには、4本の単関節筋と2本の二関節筋の合計6本の筋が付着し、筋の張力によって運動を生成する。ただし、筋は引っ張り方向しか力を伝達できないものとする。対象とするシステムに対し、後の2.3節で説明するフィードフォワード位置制御を実現するための筋骨格の配置条件を明らかにし、設計指針として活用することが本研究の主な目的である。

本論文で対象とするシステムに対して、以下の仮定を設ける。

- 実際の人間の筋肉は、関節・骨格のまわりを複雑に覆っているが、本システムにおいては、筋は近似的にリンクとの付着位置である二端点から直線として配置されているものと近似する。また、筋張力を関節角度に変換する際、プーリなどは介さず、リンクに筋が直接的に付着しているものとする。
- 筋肉の質量は無視できる。あるいは近似的にリンク質量の一部とみなし、リンクの慣性モーメントは筋運動に影響を受けないものとする。筋は張力のみ伝達可能とする。また、本論文では本来生物が持つ筋肉の粘弾性等の特性を無視し、筋は制御入力の張力をそのまま発揮できるものとする。動作中は十分な内力により、筋肉は緩まないものとする。
- 簡略化のためにクーロン摩擦は無視し、重力のない平面内で運動するものと仮定する。ただし、関節部分には適切な粘性摩擦が存在するものとする。
- 対象とするシステムは、運動中に常に“Vector Closure [12]”を満足するとし、特異点およびその近傍での論議は、本論文では行わない。
- 筋配置を議論する上で、対象とする2リンクシステムはFig. 1に示すような人間の上腕を想定する。したがって、著しく人体と形状が異なるような筋配置は想定しないものとする。

2.2 システムの力学関係

次に、対象システムの力学関係を説明する[6]。Fig. 1のよう

にリンク長さを L_1, L_2 , 各筋長を $q_i (i = 1, \dots, 6)$ とする. $q_1 \sim q_4$ は単関節筋, q_5 と q_6 は二関節筋についての筋長である. これらをまとめた筋長ベクトルを $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_6)^T$ とする. i 番めの筋肉に発生する張力を α_i とし, 筋張力ベクトルを $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_6)^T$ とする. 筋肉は張力のみ発生するものとし, 常に $\alpha_i > 0 (\forall i)$ とする. ただし張力は引っ張り方向を正とする. 関節角度 θ_1, θ_2 はそれぞれ肩関節, 肘関節の角度を表し, 関節角度ベクトル $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2)^T$ とする.

関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2)^T$ と筋張力ベクトル $\boldsymbol{\alpha}$ の関係は式 (1) となる.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{W}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\alpha} \quad (1)$$

ここで, 行列 $\mathbf{W}(\boldsymbol{\theta})$ は 2×6 のヤコビ行列であり, 次式で与えられる. なお, 次式において, 筋長 q_i と筋張力 α_i の正方向が逆になることに注意する必要がある.

$$\mathbf{W}(\boldsymbol{\theta}) = -\left(\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right)^T \quad (2)$$

式 (1) の逆関係より, 筋張力 $\boldsymbol{\alpha}$ は,

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{W}^+(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{v}(\boldsymbol{\theta}) \quad (3)$$

と表される. ただし, $\mathbf{W}^+(\boldsymbol{\theta})$ は擬逆行列であり, $\mathbf{W}^+(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{W}^T(\boldsymbol{\theta})(\mathbf{W}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{W}^T(\boldsymbol{\theta}))^{-1}$ で定義される. 右辺第二項のベクトル $\mathbf{v}(\boldsymbol{\theta})$ は, $\mathbf{W}(\boldsymbol{\theta})$ の零空間に属するベクトルであり, 関節角度 $\boldsymbol{\theta}$ において, 駆動トルクを発生させない筋肉間の内力に関する成分を意味する. 内力ベクトル $\mathbf{v}(\boldsymbol{\theta})$ は

$$\mathbf{v}(\boldsymbol{\theta}) = (\mathbf{I} - \mathbf{W}^+(\boldsymbol{\theta})\mathbf{W}(\boldsymbol{\theta}))\mathbf{k}_e \quad (4)$$

となる. $\mathbf{k}_e$ は 6×1 の任意のベクトルである.

2.3 筋張力によるフィードフォワード位置決め制御

本論文で用いる筋骨格システムのためのフィードフォワード位置決め制御では, 目標関節角度 $\boldsymbol{\theta}_d$ で釣り合う一定の筋張力ベクトル $\mathbf{v}_d = (v_{d1}, \dots, v_{d6})^T$ を, 入力する [5]. 筋張力 $\boldsymbol{\alpha}$ に入力する筋張力ベクトル $\boldsymbol{\alpha}_{in}$ は以下のように計算できる.

$$\boldsymbol{\alpha}_{in} = \mathbf{v}_d = (\mathbf{I} - \mathbf{W}^+(\boldsymbol{\theta}_d)\mathbf{W}(\boldsymbol{\theta}_d))\mathbf{k}_e \quad (5)$$

ただし, 制御入力 $\boldsymbol{\alpha}_{in}$ に対して $\boldsymbol{\alpha}$ はステップ的に発揮されるものとする. 式 (5) の張力を筋に入力すると, システムの関節角度が $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_d$ の場合では, $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{W}(\boldsymbol{\theta}_d)\mathbf{v}_d = \mathbf{0}$ となり, $\boldsymbol{\theta}_d$ において平衡点となるため, 関節トルクを発生しない. しかし, $\boldsymbol{\theta} \neq \boldsymbol{\theta}_d$ の場合では, $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{W}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{v}_d \neq \mathbf{0}$ となり, 関節トルクが発生する可能性がある. この関節トルクを利用し, センサなしのフィードフォワード位置決めを実現する.

ここで, 筋骨格システムのフィードフォワード制御の事例を簡潔に紹介する [5]. 2 リンク 6 筋を有する筋骨格構造に対し, Fig. 2(a), (b) に示すような 2 種類の筋配置を考える. これらの筋配置 (a) と (b) の相違点は, 筋付着位置のオフセット ((a): $d = 30$, (b): $d = 0$) だけである. 両者に対し, 目標姿勢 $\boldsymbol{\theta}_d = (90, 90)^T$ にて釣り合う筋内力を式 (5) より求め, 筋張力としてステップ入力した結果を Fig. 3(a) と (b) に示す. ただし,

Fig. 2 Muscular Arrangement (vertically and horizontally symmetry, $h = 50, b_x = 120, b_y = 10, d = 30$ or 0 [mm])

Fig. 3 Simulation results (desired angle $\boldsymbol{\theta}_d = (90, 90)^T$ [deg])

Table 1 Specification of two-link system for simulation

Mass (m_1, m_2) [kg]	(1.93, 1.32)
Length (L_1, L_2) [mm]	(310, 270)
Mass center (L_{g1}, L_{g2}) [mm]	(165, 135)
Moment of inertia (I_1, I_2) [kgm ²]	(0.014, 0.012)
Joint viscosity (μ_1, μ_2) [Ns/rad]	(0.1, 0.1)
Simulation time [s]	20

式 (5) より, $\mathbf{k}_e = (1, \dots, 1)^T$ として入力張力 $\mathbf{v}_d$ を求めた. 今回用いた $\mathbf{k}_e$ は, ラグランジュの未定乗数法により求められる, $\mathbf{v}_d$ のノルムを最小にする最適解の一つである [5]. 本論文では, 筋が張力のみを発生させることから, $v_{di} > 0 (i = 1, \dots, 6)$ を満たす目標姿勢 $\boldsymbol{\theta}_d$ のみを対象とし, これを満たさないものは, 特異姿勢とみなす. シミュレーションで用いる 2 リンク筋骨格システムの物理パラメータを Table 1 とし, 重力の影響や筋の質量, 筋の粘弾性等はないものとしている.

Fig. 3(a) に示すように, センサフィードバックをまったく利用しておらず, 目標位置における釣り合い内力を筋張力としてステップ入力しているにもかかわらず, 目標姿勢に収束していることが分かる. 一方, Fig. 3(b) では, 目標姿勢に収束していない. 同じ制御入力でも, 筋骨格の配置条件によって, 位置制御可能な場合とそうでない場合が存在する [5]. これらの収束性の数学的条件として, 過去の研究では筋長と関節角度の関係をテイラー展開により二次近似し, その係数の満たすべき十分条件を明らかにした [6]. 本報告では, これらの条件を拡張し, システムの満たすべき, 幾何学的な筋骨格の配置条件を明らかにする.

2.4 筋内力によるポテンシャルと筋配置

一般のマニピュレータ制御において, PD 制御などを用いる場合は, システム内に人工的にポテンシャルを形成し, 駆動させることを意味する [13]. 一方, 本研究で用いる制御手法では

Fig. 4 Potential shapes (desired angle $\theta_d = (90, 90)^T$ [deg])

入力した筋内力がシステムにポテンシャルを形成しており、これを積極的に利用することで位置決め制御が可能となる。

本フィードフォワード位置制御において、目標姿勢 θ_d で釣り合うような一定の筋内力ベクトル $\mathbf{v}_d$ をステップ入力することに注意すると、システム内に生成されるポテンシャル P は以下のように定義できる。

$$P(\theta) = (\mathbf{q}(\theta) - \mathbf{q}(\theta_d))^T \mathbf{v}_d \quad (6)$$

このポテンシャル P が目標関節角度 θ_d 近傍で下に凸となり、かつ θ_d で極小値となれば、 θ_d 近傍での局所的収束性が準静的に保証される。

例えば、前 2.3 節で紹介した 2 リンク 6 筋システムの二つの筋配置について、式 (5) のフィードフォワード入力を与えた際の関節角度 θ に対するポテンシャル P の変化を Fig. 4 (a), (b) に示す。目標収束する場合、ポテンシャル P は Fig. 4 (a) のように目標姿勢で極小となる。一方で目標収束しない場合、Fig. 4 (b) のように目標姿勢で極小とならない。ここで注目すべき点としては、この例では、筋配置の違い ((a) が $d = 30$ に対し、(b) が $d = 0$) によって、形成されるポテンシャル形状が大きく変化していることである。本手法ではこの例のように、形成されるポテンシャルが筋配置に強く依存するため、筋配置の変化によって目標位置への収束性が大きく変化する [5]。

3. 平面 2 リンク 6 筋システムの収束条件

先述したように、目標位置への収束性は、準静的には筋入力 $\mathbf{v}_d$ により生成されるポテンシャル P が、目標姿勢 θ_d 近傍で下に凸、かつ極小となればよい。本章では、目標位置へ収束する一般的な数学的条件を紹介する。本章の解析は木野らの過去の文献 [6] で行われているものであるが、本研究において極めて重要であることから、簡単に説明する。

ポテンシャルが θ_d 近傍で下に凸で、なおかつ極小となるためには、以下の二式を同時に満たす必要がある。

$$\text{条件 1: } -\mathbf{W}(\theta)\mathbf{v}_d|_{\theta=\theta_d} = \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_d} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\text{条件 2: } \mathbf{H}(\theta_d) = \frac{\partial^2 P(\theta)}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=\theta_d} > \mathbf{0} \quad (8)$$

第一の条件式 (7) に注目すると、制御入力 $\mathbf{v}_d$ の定義より、式 (7) は常に満足する。したがって、ポテンシャル P が目標姿勢 θ_d 近傍で下に凸となる極小値を持つための条件は、式 (8) のヘッセ行列 $\mathbf{H}(\theta_d)$ の正定性のみが論点となる。ヘッセ行列 $\mathbf{H}(\theta_d)$ が正定となるには、以下の 2 式が成立する必要がある。

$$\text{trace}(\mathbf{H}(\theta_d)) > 0 \quad (9)$$

$$|\mathbf{H}(\theta_d)| > 0 \quad (10)$$

対象とするシステムに対し、式 (9)、(10) を解析するためには、式 (8) で示されるように、ポテンシャル P に対して関節角度 θ で二階偏微分を行う必要がある。その際、強い非線形性のため計算が困難であることから、筋長を二次までのテイラー展開で近似し、解析を簡略化する。 θ^* 周りでの i 番めの近似筋長 q_i^* は、

$$q_i^*(\theta) = q_i(\theta^*) + \mathbf{Q}_{1i}(\theta^*)(\theta - \theta^*) + \frac{1}{2}(\theta - \theta^*)^T \mathbf{Q}_{2i}(\theta^*)(\theta - \theta^*) \quad (11)$$

となる。ただし、 $\mathbf{Q}_{1i}(\theta^*)$ と $\mathbf{Q}_{2i}(\theta^*)$ は以下のように定義される係数行列である ($i = 1 \dots 6$)。

$$\mathbf{Q}_{1i}(\theta^*) = (\epsilon_{1i}, \epsilon_{2i}) = \left[\frac{\partial q_i(\theta)}{\partial \theta_1} \frac{\partial q_i(\theta)}{\partial \theta_2} \right] \Big|_{\theta=\theta^*} \quad (12)$$

$$\mathbf{Q}_{2i}(\theta^*) = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ b_i & c_i \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial^2 q_i(\theta)}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 q_i(\theta)}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} \\ \frac{\partial^2 q_i(\theta)}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} & \frac{\partial^2 q_i(\theta)}{\partial \theta_2^2} \end{array} \right] \Big|_{\theta=\theta^*} \quad (13)$$

式 (11) で近似した q_i^* ($i = 1 \dots 6$) を用いて、条件式 (9)、(10) の近似として $\text{trace}(\mathbf{H}^*)$ と $|\mathbf{H}^*|$ を計算すると次式 (14)、(15) を得る。

$$\text{trace}(\mathbf{H}^*) = \mathbf{u} \mathbf{v}_d \quad (14)$$

$$\mathbf{u} = (a_1, a_2, c_3, c_4, a_5 + c_5, a_6 + c_6)$$

$$|\mathbf{H}^*| = \mathbf{v}_d^T \mathbf{N} \mathbf{v}_d \quad (15)$$

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & a_1 c_3 & a_1 c_4 & a_1 c_5 & a_1 c_6 \\ 0 & 0 & a_2 c_3 & a_2 c_4 & a_2 c_5 & a_2 c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 c_3 & a_6 c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 c_4 & a_6 c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 c_5 - b_5^2 & a_5 c_6 + a_6 c_5 - 2b_5 b_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6 c_6 - b_6^2 \end{pmatrix}$$

ここで、筋に入力する筋内力ベクトル $\mathbf{v}_d$ は、筋が張力しか発生できないというシステム上の制約により、 $v_{di} > 0$ ($i = 1 \dots 6$) となり必ず正となる。したがって、少なくとも式 (14)、(15) において、ベクトル $\mathbf{u}$ 、行列 $\mathbf{N}$ の各要素が正となれば、十分条件として式 (9) と式 (10) を満たし、結果として必ずポテンシャル P が目標姿勢 θ_d で極小値となる。

以上より、式 (9) と式 (10) を満たすには、テイラー展開して得られた筋長 q_i^* の各係数 a_i, b_i, c_i ($i = 1 \dots 6$) が以下の条件を満たせば、二次近似の十分条件として必ず式 (9) と式 (10) を満足する。

θ^* 近傍での収束性を満たすテイラー展開の係数条件

$$a_j > 0 \quad (j = 1, 2, 5, 6) \quad (16)$$

$$c_k > 0 \quad (k = 3, 4, 5, 6) \quad (17)$$

$$a_5 c_5 > b_5^2 \quad (18)$$

$$a_6 c_6 > b_6^2 \quad (19)$$

$$a_5 c_5 + a_6 c_6 > 2b_5 b_6 \quad (20)$$

上述したこれらの条件をすべて満たせば、二次近似安定条件の観点からフィードフォワード位置決め制御式 (5) の入力によって生成されるポテンシャル P が、目標姿勢 θ_d で極小値を取り、システムが目標姿勢 θ_d に収束する。特に注目すべきは、式 (16)~(20) は十分条件であるものの、目標姿勢 θ_d や k_e の選定にまったく依存しないため、これらが成立すれば、任意の目標姿勢 θ_d について収束性が主張できる点である。なお、式 (20) は式 (16)~(19) を満たせば必ず成り立つ条件となるため、以降の解析では考慮しないものとする (付録 A 参照)。

4. 収束条件を満たす筋配置解析

二次近似を用いた式 (16)~(19) の収束安定条件はあくまでも、筋長 q_i を関節角度 θ で二次近似した際の各係数が満たすべき条件である。したがって、条件式 (16)~(19) のままでは、具体的な筋配置の条件が不明である。

本論文では、対象とする 2 リンク 6 筋システムに対し、二次近似から得られた (16)~(19) の条件式をさらに解析することで、フィードフォワード位置決めが任意の目標位置 θ_d へ収束する筋配置の幾何学条件を求める。

4.1 収束条件を満たす単関節筋の条件

はじめに単関節筋 (Fig. 1 中の q_1 ~ q_4) の条件について明らかにする。ここでは例として、単関節筋 1 の筋配置の幾何学条件を解析する。

まず、単関節筋 1 の筋配置のパラメータとして、筋肉 1 とリンクとの結合点の座標を Fig. 5 のような極座標系で定義する。 r_1 , l_1 は関節 1 の回転中心から筋肉 1 の上端点・下端点のリンク付着位置までのベクトルとし、各ベクトル長さを r_1 , l_1 とする。 φ_1 はベクトル r_1 からベース部までの角度、 ψ_1 はリンク 1 の中心線からベクトル l_1 までの角度とする。また、 r_1 と l_1 の間の角度を $\theta_{q1} = \pi - \theta_1 - \varphi_1 - \psi_1$ と置く。ここで、筋肉の伸縮によって生じる運動により角度 θ_1 と θ_{q1} は変化するが、角度 φ_1 と ψ_1 は一定となる。このとき、筋長 q_1 は余弦定理より以下の式で表される。

$$q_1 = \sqrt{r_1^2 + l_1^2 - 2r_1 l_1 \cos \theta_{q1}} \quad (21)$$

先述した収束条件式 (16)~(19) のうち、単関節筋 1 に関する条件は式 (16) の $a_1 > 0$ のみである。 a_1 は式 (13) より $a_1 = \frac{\partial^2 q_1(\theta)}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=\theta^*}$ で定義され、式 (21) を代入して計算すると以下を得る。

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\partial^2 q_1}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=\theta^*} \\ &= -\frac{r_1 l_1 (r_1 \cos \theta_{q1}^* - l_1) (l_1 \cos \theta_{q1}^* - r_1)}{q_1^{*3}} \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、 θ_{q1}^* , q_1^* はテイラー展開の基準点 $\theta = \theta^*$ における θ_{q1} , q_1 の値であり、定数である。ここで定義より明らかに $q_1^* > 0$,

Fig. 5 Symbols for q_1 's muscular arrangement

Fig. 6 Geometric condition for the simple muscle q_1

$r_1 > 0$, $l_1 > 0$ であるので、式 (22) において、 $a_1 > 0$ となる条件は、

$$\text{条件 (A): } r_1 \cos \theta_{q1}^* < l_1 \quad \text{かつ} \quad l_1 \cos \theta_{q1}^* > r_1$$

$$\text{条件 (B): } r_1 \cos \theta_{q1}^* > l_1 \quad \text{かつ} \quad l_1 \cos \theta_{q1}^* < r_1$$

のどちらかを満たせばよい。

今、条件 (A) に注目すると $r_1 > 0$ と $\max\{\cos \theta_{q1}^*\} = 1$ より、 $l_1 \cos \theta_{q1}^* > r_1$ を満たすとき、必ず $l_1 > r_1$ となる。そのため結果的に、 $r_1 \cos \theta_{q1}^* < l_1$ を満たす。一方、条件 (B) に注目すると、同様に $r_1 \cos \theta_{q1}^* > l_1$ を満たせば、結果的に $l_1 \cos \theta_{q1}^* < r_1$ を満たす。したがって、上記の条件 (A) と (B) は下記の条件 (A') と (B') に書き直すことができる。

$$\text{条件 (A'): } l_1 \cos \theta_{q1}^* > r_1 \quad (23)$$

$$\text{条件 (B'): } r_1 \cos \theta_{q1}^* > l_1 \quad (24)$$

ここで、式 (23), (24) の条件を満たすような筋肉 1 の幾何学関係を考える。初めに条件 (A') を考える。このとき、Fig. 6 (a) のように、ベクトル r_1 が属する直線上にベクトル l_1 を投影し、 r_1 方向を正としたときの長さ $l_1 \cos \theta_{q1}^*$ が r_1 より大きいことが条件となる。ここで筋 1 と r_1 , l_1 のなす三角形を考える。ベクトル r_1 と筋 1 との間の角度を β_1 とすると、角度 β_1 が鈍角となることが条件 (A') が成立することと同義となる。同様に条件 (B') の場合も Fig. 6 (b) に図示する。ベクトル l_1 と筋 1 との間の角度を γ_1 とすると、角度 γ_1 が鈍角となることが条件 (B') が成立することと同義となる。なお、他の単関節筋についても同様の結果となる。詳細については誌面の都合により省略する。

結果として単関節筋について、以下の条件が成立すれば筋張力 $\mathbf{v}_d$ を入力したさいに、ポテンシャルが目標位置で極小となり、フィードフォワード位置決め制御の収束条件を満たす。

1. 単関節筋の収束条件

n 番め ($n = 1, 2$) の関節周りの単関節筋について、関節から単関節の付着位置までのベクトルを $\mathbf{r}_s$, $\mathbf{l}_s$ ($s = 1, \dots, 4$) とし、それらのベクトル長さを r_s , l_s とする。また、テイラー展開の基準となる関節角度ベクトル $\boldsymbol{\theta}^*$ における、 $\mathbf{r}_s$, $\mathbf{l}_s$ ベクトルの間の角度を θ_{qi}^* とすると、収束条件を満たす筋配置条件は、以下のどちらかの条件を満たすこととなる。

$$\text{条件 (A): } l_s \cos \theta_s^* > r_s \quad (s = 1, \dots, 4) \quad (25)$$

$$\text{条件 (B): } r_s \cos \theta_s^* > l_s \quad (s = 1, \dots, 4) \quad (26)$$

これらの条件を満たすような筋の幾何学的条件は、ベクトル $\mathbf{r}_s$, $\mathbf{l}_s$ と筋の成す角度 β_s , γ_s のうち一方が鈍角となることである。

4.2 収束条件を満たす二関節筋の条件

次に二関節筋の条件について、二関節筋 5 を例に挙げ、解析を行う。二関節筋 5 の筋配置のパラメータを **Fig. 7** と置く。関節中心から筋付着位置までのベクトルを $\mathbf{r}_5$, $\mathbf{l}_5$ とし、それらのベクトル長さを r_5 , l_5 とする。 φ_5 , ψ_5 はリンクと筋付着位置との間の角度を表している。また、関節 1 から関節 2 までのベクトルを $\mathbf{L}_1$ とする。

ここで、各関節を基準としたリンクと筋付着位置の角度を $\theta_{\varphi 5} = \pi - \theta_1 - \varphi_5$, $\theta_{\psi 5} = \pi - \theta_2 - \psi_5$ と置く。これらの角度は関節角度 θ_1 と θ_2 に依存し、変化する。これらの新たに定義した変数を用いて、 q_5 の筋長は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} q_5 &= |\mathbf{r}_5 - (\mathbf{l}_5 + \mathbf{L}_1)| \\ &= \sqrt{R - 2r_5L_1C_{\varphi 5} - 2l_5L_1C_{\psi 5} + 2r_5l_5C_{\varphi\psi 5}} \end{aligned} \quad (27)$$

ただし、 $R = r_5^2 + l_5^2 + L_1^2$, $C_{\varphi 5} = \cos \theta_{\varphi 5}$, $C_{\psi 5} = \cos \theta_{\psi 5}$, $C_{\varphi\psi 5} = \cos(\theta_{\varphi 5} + \theta_{\psi 5})$ とする。

次に上式を式 (13) に代入し、二関節筋 5 に関する条件の係数 a_5 , b_5 , c_5 を計算すると、以下の式が導出される。

$$a_5 = \frac{\partial^2 q_5}{\partial \theta_1^2} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}^*} = \frac{-r_5X_5(l_5Y_5 + L_1Z_5)}{q_5^3} \quad (28)$$

$$b_5 = \frac{\partial^2 q_5}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}^*} = \frac{-r_5l_5X_5Y_5}{q_5^3} \quad (29)$$

$$c_5 = \frac{\partial^2 q_5}{\partial \theta_2^2} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}^*} = \frac{-l_5Y_5(r_5X_5 + L_1Z_5)}{q_5^3} \quad (30)$$

ただし、

$$X_5 = L_1C_{\varphi 5}^* - l_5C_{\varphi\psi 5}^* - r_5 \quad (31)$$

$$Y_5 = L_1C_{\psi 5}^* - r_5C_{\varphi\psi 5}^* - l_5 \quad (32)$$

$$Z_5 = r_5C_{\varphi 5}^* + l_5C_{\psi 5}^* - L_1 \quad (33)$$

であり、 $C_{\varphi 5}^*$, $C_{\psi 5}^*$, $C_{\varphi\psi 5}^*$, q_5^* は $C_{\varphi 5}$, $C_{\psi 5}$, $C_{\varphi\psi 5}$, q_5 を

Fig. 7 Symbols for q_5 's muscular arrangement

$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^*$ としたときの値であり、式 (11) のテイラー展開の基準点である $\boldsymbol{\theta}^*$ の数値を決めれば、 X_5 , Y_5 , Z_5 は定数となる。

式 (16)~(19) の安定条件に式 (28)~(30) を代入して筋配置の条件を求めると、以下の 2 式を同時に満たすことが条件となる。なお、詳細な計算に関しては付録 B に記載する。

$$\text{条件 (C): } \begin{cases} X_5 = L_1C_{\varphi 5}^* - l_5C_{\varphi\psi 5}^* - r_5 > 0 & (34) \\ \text{かつ} \\ Y_5 = L_1C_{\psi 5}^* - r_5C_{\varphi\psi 5}^* - l_5 > 0 & (35) \end{cases}$$

次に式 (34), (35) の条件式について、幾何学的に考察する。

初めに式 (34) を考える。式 (34) の中辺第一項 $L_1C_{\varphi 5}^*$ は **Fig. 8(a)** のように、ベクトル $\mathbf{L}_1$ をベクトル $\mathbf{r}_5$ の属する直線上に投影し、 $\mathbf{r}_5$ 方向を正としたときの長さを意味する。次に中辺第二項 $-l_5C_{\varphi\psi 5}^*$ について考える。**Fig. 8(b)** のように、各角度を考慮すると、 $\mathbf{l}_5$ をベクトル $\mathbf{r}_5$ の属する直線上に投影し、 $\mathbf{r}_5$ 方向を正としたときの長さ[†]となる。結果として式 (34) は、**Fig. 8(c)** のように、ベクトル $\mathbf{r}_5$ の属する直線上にベクトル $\mathbf{l}_5 + \mathbf{L}_1$ を投影し、 $\mathbf{r}_5$ 方向を正としたときの長さ $L_1C_{\varphi 5}^* - l_5C_{\varphi\psi 5}^*$ が r_5 より大きいことが条件となる。ここで **Fig. 9(a)** 中に示す、筋 5 と $\mathbf{r}_5$ のなす角 β_5 に着目する。式 (34) の成立条件は、幾何学的な条件を考慮すると、角度 β_5 が鈍角となることと同義となる。

式 (35) も式 (34) と同様に解析を行うと、**Fig. 9(b)** のように、ベクトル $\mathbf{l}_5$ の属する直線上にベクトル $\mathbf{r}_5 + \mathbf{L}_1$ を投影し、 $\mathbf{r}_5$ 方向を正としたときの長さ $L_1C_{\psi 5}^* - r_5C_{\varphi\psi 5}^*$ が l_5 より大きいことが条件となる。この条件は、ベクトル $\mathbf{l}_5$ と筋 5 との間の角度を γ_5 とすると、角度 γ_5 が鈍角となることと同義となる。

なお、もう一方の二関節筋 6 についても同様の結果となる。詳細については紙面の都合により省略する。結果として二関節筋について、以下の条件が成立すればフィードフォワード位置決め制御の収束条件を満たす。

[†]ベクトル $\mathbf{l}_5$ をベクトル $\mathbf{r}_5$ の属する直線上に投影し、 $\mathbf{r}_5$ 方向を正としたときの長さは $l_5 \cos((\pi - \theta_{\psi}^*) - \theta_{\varphi}^*)$ となる。展開すると、 $l_5 \cos((\pi - \theta_{\psi}^*) - \theta_{\varphi}^*) = -l_5 \cos(-\theta_{\psi}^* - \theta_{\varphi}^*) = -l_5 \cos(\theta_{\psi}^* + \theta_{\varphi}^*)$ となり、式 (34) の中辺第二項 $-l_5C_{\varphi\psi 5}^*$ と同じとなる。

Fig. 8 The geometric relationship of condition (34)

Fig. 9 Geometric conditions for the biarticular muscle q_5

II. 二関節筋の収束条件

関節 1 から二関節筋のベース側の付着位置までのベクトルを $\mathbf{r}_{bi}$ ($bi = 5, 6$), 関節 2 から二関節筋の 2 リンク側の付着位置までのベクトルを $\mathbf{l}_{bi}$ とし, それらのベクトル長さを r_{bi} , l_{bi} とする. また, テイラー展開の基準となる関節角度ベクトル $\boldsymbol{\theta}^*$ における, $\mathbf{r}_{bi}$ とリンク 1 の間の角度を $\theta_{\varphi bi}^*$, $\mathbf{l}_{bi}$ とリンク 1 の間の角度を $\theta_{\psi bi}^*$ とすると, 収束条件を満たす筋配置条件は以下となる.

$$\text{条件 (C): } \begin{cases} L_1 \cos \theta_{\varphi bi}^* - l_{bi} \cos(\theta_{\varphi bi}^* + \theta_{\psi bi}^*) - r_{bi} > 0 \\ \text{かつ} \\ L_1 \cos \theta_{\psi bi}^* - r_{bi} \cos(\theta_{\varphi bi}^* + \theta_{\psi bi}^*) - l_{bi} > 0 \end{cases} \quad (36)$$

$$\text{条件 (C): } \begin{cases} L_1 \cos \theta_{\varphi bi}^* - l_{bi} \cos(\theta_{\varphi bi}^* + \theta_{\psi bi}^*) - r_{bi} > 0 \\ \text{かつ} \\ L_1 \cos \theta_{\psi bi}^* - r_{bi} \cos(\theta_{\varphi bi}^* + \theta_{\psi bi}^*) - l_{bi} > 0 \end{cases} \quad (37)$$

Table 2 Parameters of muscular arrangement

	A	B
$r_{1...6}$ [mm]	60, 60, 60, 60, 60, 60	60, 60, 60, 60, 60, 60
$l_{1...6}$ [mm]	120, 120, 120, 120, 60, 60	120, 120, 120, 120, 60, 60
$\varphi_{1...6}$ [deg]	30, 30, 30, 30, 30, 30	0, 0, 0, 0, 0, 0
$\psi_{1...6}$ [deg]	10, 10, 10, 10, 30, 30	10, 10, 10, 10, 0, 0

Table 3 Coefficients of muscular arrangement and comparison with conditions

A		
	Simple joint muscles	Biarticular muscles
Conditions [deg]	$\beta_{1...4} > 90$ or $\gamma_{1...4} > 90$	$\beta_{5,6} > 90$ and $\gamma_{5,6} > 90$
$\beta_{1...6}$ [deg]	100.6, 100.6, 100.6, 100.6	120.0, 120.0
$\gamma_{1...6}$ [deg]	29.4, 29.4, 29.4, 29.4	120.0, 120.0

B		
	Simple joint muscles	Biarticular muscles
Conditions [deg]	$\beta_{1...4} > 90$ or $\gamma_{1...4} > 90$	$\beta_{5,6} > 90$ and $\gamma_{5,6} > 90$
$\beta_{1...6}$ [deg]	71.7, 71.7, 71.7, 71.7	90.0, 90.0
$\gamma_{1...6}$ [deg]	28.3, 28.3, 28.3, 28.3	90.0, 90.0

これらの条件を満たすような筋の幾何学的条件は, ベクトル $\mathbf{r}_{bi}$, $\mathbf{l}_{bi}$ と筋の成す角度 β_{bi} , γ_{bi} の両方が鈍角となることである.

5. 筋配置条件の例

本章では, 前章までに得られた条件について, 実際に位置決めシミュレーションにより筋配置条件の例を示す. シミュレーションで用いる 2 リンク筋骨格システムの物理パラメータは Table 1 と同じとする. ただし, シミュレーション中では重力の影響を考慮しない. また, 筋配置は Fig. 5, Fig. 7 のように極座標で定義し, 二つの筋配置 (A), (B) を用いる. これらの筋配置の各パラメータを Table 2 とする. 今回はテイラー展開における基準角度を $\boldsymbol{\theta}^* = (90, 90)^T$ [deg] として解析を行う. この場合の二つの筋配置の安定条件は Table 3 (A), (B) となる. Table 3 より, 筋配置 (A) では各筋に対して, $\beta_{1...4} > 90$ [deg] or $\gamma_{1...4} > 90$ [deg], $\beta_{5,6} > 90$ [deg] and $\gamma_{5,6} > 90$ [deg] が成立し, すべての安定条件を満たすが, 筋配置 (B) は条件を満たさない.

次に, これら二つの筋配置でのシミュレーションを行い, 目標姿勢への収束性を検証する. なお, 本論文でのシミュレーションでは第 2.1 節で示された仮定を満たすものとする. シミュレーションでは, $\mathbf{k}_e = (1, \dots, 1)^T$ として式 (5) より入力張力 $\mathbf{v}_d$ を求め, 張力を各筋にステップ入力してシミュレーションを行う. また, 初期角度は $\boldsymbol{\theta}_o = (70, 70)^T$ [deg], 目標角度は $\boldsymbol{\theta}_d = (90, 90)^T$ [deg] である.

Table 3 (A) で与えられた収束条件を満たす筋配置でのシミュレーション結果を Fig. 10 に示し, Table 3 (B) で与えられた条件を満たさない筋配置での結果を Fig. 11 に示す. シミュレーション結果より, Fig. 10 では目標位置に収束しているが, Fig. 11 の筋配置では収束していない. 本論文では誌面の都合で省略するが, 筋配置の収束条件を満たすその他の場合でも, 目標姿勢に収束することを確認している.

以上の結果より, 今回導出した筋配置条件を満たせばフィードフォワード位置決めが可能であることが分かる. ただし, 本

Fig. 10 Simulation result of arrangement (A) ($\theta_o = (70, 70)^T$ [deg], $\theta_d = (90, 90)^T$ [deg])

Fig. 11 Simulation result of arrangement (B) ($\theta_o = (70, 70)^T$ [deg], $\theta_d = (90, 90)^T$ [deg])

論文で求めた筋配置条件はフィードフォワード位置決めが収束安定するような十分条件であるため、筋配置条件を満たさない場合でも目標収束する可能性があることに注意が必要である。

6. 結 言

本報告では筋骨格システムについて、ポテンシャル形状により決定される安定条件をもとに、フィードフォワード位置決めが安定となる筋配置の幾何学条件を解析した。今回の解析では、初めに筋長を二次のテイラー展開で近似し、ポテンシャル形状から目標姿勢に収束する際の近似係数の条件を示した。次に、近似係数の条件を満たす筋配置の幾何学的な条件を明らかにした。今回の条件では、テイラー展開の基準角度における筋配置条件であり、目標姿勢に依存しない点が大きな特徴である。

今回得られた結果は、フィードフォワード位置決め制御を行う筋骨格システムの設計論に用いることが可能となる。また、通常のフィードバック制御を前提とした筋骨格システムでも、不安定な筋配置では、内力により位置制御性能が劣化することが考えられ、この観点から通常の筋骨格システムにおいても重要な論議であると考えられる。

今後は、本報告で導き出された結果の適応範囲の検証や実験機による動作確認を行う必要がある。

謝 辞 この研究の一部に 科研費（基礎研究 (C) 26330303）の助成を受けている。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] A.G. Feldman: "Once more on the equilibrium point hypothesis (λ model) for motor control," J. Motor Behav., vol.18, no.1, pp.17-54, 1986.
- [2] N. Hogan: "An organizing principle for a class of voluntary movements," J. Neurosci., vol.4, no.11, pp.2745-2754, 1984.
- [3] M. Kawato, K. Furukawa and R. Suzuki: "A Hierarchical

Neural-Network Model for Control and Learning of Voluntary Movement," Biol. Cybern., vol.57, pp.169-185, 1982.

- [4] 熊本水瀬：ヒューマノイド工学—生物進化から学ぶ 2 関節筋ロボット機構—, 東京電機大学出版局, 2006.
- [5] H. Kino, S. Kikuchi, Y. Matsutani, K. Tahara and T. Nishiyama: "Numerical Analysis of Feedforward Position Control for Non-pulley-musculoskeletal System: a case study of macular arrangements of a two-link planar system with six muscles," Adv. Robotics, vol.17, no.16, pp.1235-1248, 2013.
- [6] 木野仁, 越智裕章, 田原健二, 松谷祐希, 石橋良太: "筋骨格システムのフィードフォワード位置決め制御における筋長の近似を用いた準静的収束条件の解析", 日本ロボット学会誌, vol.32, no.4, pp.372-379, 2014.
- [7] Y. Matsutani, K. Tahara, H. Kino, H. Ochi and M. Yamamoto: "Set-point control of a musculoskeletal arm by the complementary combination of a feedforward and feedback Manner," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.5908-5914, 2014.
- [8] T. Kozuki, H. Mizoguchi, Y. Asano, M. Osada, T. Shirai, J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada and M. Inaba: "Design Methodology for Thorax and Shoulder of Human Mimetic Musculoskeletal Humanoid Kenshiro—A Thorax with Rib like Surface—," Proc. IEEE Int. Conf. IROS, pp.4367-4372, 2012.
- [9] K. Hosoda, S. Sekimoto, Y. Nishigori, S. Takamuku and S. Ikemoto: "Anthropomorphic Muscular-Skeletal Robotic Upper Limb for Understanding Embodied Intelligence," Adv. Robotics, vol.26, no.7, pp.729-744, 2012.
- [10] H. Kobayashi and R. Ozawa: "Adaptive Neural Network Control of Tendon-Driven Mechanisms with Elastic Tendons," Automatica, vol.39, no.9, pp.1509-1519, 2003.
- [11] K. Koganezawa and Y. Shimizu: "Stiffness Control of Tendon Driven Multi-DOF Joint by Actuator with Non Linear Elastic System (ANLES)," Proc. IEEE The 11th ICAR, pp.1184-1189, 2003.
- [12] H. Kino, T. Yahiro, F. Takemura and T. Morizono: "Robust PD Control Using Adaptive Compensation for Completely Restrained Parallel-wire Driven Robots: Translational Systems Using the Minimum Number of Wires Under Zero-gravity Condition," IEEE T. Robot., vol.23, no.4, pp.803-812, 2007.
- [13] 有本卓：ロボットの力学と制御, pp.114-119, 朝倉書店, 1994.

付録 A. 収束条件式 (20) の証明

式 (20) が式 (16)~(19) を満たせば必ず成立することを示す。式 (18) と式 (19) の両辺同士を掛けると以下の関係式を得られる。

$$a_5 a_6 c_5 c_6 > b_5^2 b_6^2 \quad (\text{A.1})$$

式 (16), (17) より $a_5 > 0$, $a_6 > 0$, $c_5 > 0$, $c_6 > 0$ であり、以下を得ることができる。

$$\sqrt{a_5 a_6 c_5 c_6} > |b_5 b_6| \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $\sqrt{a_5 c_5} - \sqrt{a_6 c_6} > 0$ より、次式を得る。

$$a_5 c_5 + a_6 c_6 > 2\sqrt{a_5 a_6 c_5 c_6} \quad (\text{A.3})$$

式 (A.2), 式 (A.3) より、

$$a_5 c_5 + a_6 c_6 > 2\sqrt{a_5 a_6 c_5 c_6} > 2|b_5 b_6| \quad (\text{A.4})$$

式 (A.4) は式 (20) の十分条件となる。以上より、式 (16)~(19) を満たせば式 (20) が成立することが分かる。

Fig. 12 The parameter of Z_5

付録 B. 二関節筋の条件

二関節筋 5 に関する安定条件は、式 (16)~(18) の $a_5 > 0$, $c_5 > 0$, $a_5 c_5 > b_5^2$ である。

初めに、式 (18) の安定条件に式 (28)~(30) を代入し、展開すると次式を得る。

$$\frac{r_5 l_5 L_1 X_5 Y_5 Z_5 (r_5 X_5 + l_5 Y_5 + L_1 Z_5)}{q_5^{*3}} > 0 \quad (\text{B.5})$$

一方、式 (27) に式 (31)~(33) を代入すると、以下の関係式を得ることができる。

$$r_5 X_5 + l_5 Y_5 + L_1 Z_5 = -q_5^{*2} \quad (\text{B.6})$$

したがって、式 (B.5) に式 (B.6) を代入することで、式 (B.5) を新たに以下のように書き直すことができる。

$$-\frac{r_5 l_5 L_1 X_5 Y_5 Z_5}{q_5^*} > 0 \quad (\text{B.7})$$

$q_5^*, r_5, l_5, L_1 > 0$ より式 (B.7) を満たすための条件は、最終的に

$$X_5 Y_5 Z_5 < 0 \quad (\text{B.8})$$

となる。

ここで、式 (33) で定義される Z_5 の幾何学的関係に着目する。 Z_5 は Fig. 12 のように、テイラー展開の基準角度 θ^* において、関節から筋付着位置のベクトル r_5 , l_5 を、リンクベクトル L_1 上の直線状に投影した長さと、 L_1 の長さについての関係式である。

もし $Z_5 > 0$ ならば、テイラー展開の基準関節角度 θ^* において Fig. 13 のように骨格同士が干渉する、あるいは人体構造と著しく異なる構造となる。そのため、以降の解析では $Z_5 < 0$ が成り立つと仮定する。 $Z_5 < 0$ を考慮すると式 (B.8) より、 X_5 , Y_5 が同符号であることが条件となる。

Fig. 13 The case of $Z_5 > 0$

初めに、 $X_5 < 0$, $Y_5 < 0$ の場合を考える。式 (16) の条件式に式 (28) を代入して展開すると、 $-r_5 X_5 > 0$ より以下の条件を得る。

$$l_5 Y_5 > -L_1 Z_5 \quad (\text{B.9})$$

同様に式 (17) に式 (30) を代入すると、 $-l_5 Y_5 > 0$ より以下の条件を得る。

$$r_5 X_5 > -L_1 Z_5 \quad (\text{B.10})$$

しかし、仮定より $X_5 < 0$, $Y_5 < 0$, $Z_5 < 0$ なので $l_5 Y_5 < 0$, $r_5 X_5 < 0$, $-L_1 Z_5 > 0$ となり、結果として式 (B.9), (B.10) は仮定と矛盾して成立しない。

次に $X_5 > 0$, $Y_5 > 0$ と仮定し、式 (16), 式 (17) の条件式に式 (28), 式 (30) を代入して同様に展開すると、

$$l_5 Y_5 < -L_1 Z_5 \quad (\text{B.11})$$

$$r_5 X_5 < -L_1 Z_5 \quad (\text{B.12})$$

となる。式 (B.6) に留意して、両辺に $-r_5 X_5 - l_5 Y_5$ を加えると次式を得る。

$$-r_5 X_5 < -(r_5 X_5 + l_5 Y_5 + L_1 Z_5) \quad (\text{B.13})$$

$$-l_5 Y_5 < -(r_5 X_5 + l_5 Y_5 + L_1 Z_5) \quad (\text{B.14})$$

したがって、

$$-r_5 X_5 < q_5^{*2} \quad (\text{B.15})$$

$$-l_5 Y_5 < q_5^{*2} \quad (\text{B.16})$$

を得る。仮定より $X_5 > 0$, $Y_5 > 0$ であることに注目すると、 $-r_5 X_5 < 0$, $-l_5 Y_5 < 0$, $q_5^{*2} > 0$ となる。以上より、 $X_5 > 0$, $Y_5 > 0$ を満たせば二関節筋 5 に関する安定条件 (16)~(19) を満たす。

越智裕章 (Hiroaki Ochi)

2013 年福岡工業大学大学院工学研究科知能機械工学専攻修士課程修了。同年同研究科物質生産システム工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。ワイヤ駆動ロボット、筋骨格構造などの研究に従事。日本機械学会の会員。(日本ロボット学会学生会員)

木野 仁 (Hitoshi Kino)

1997 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程退学。2000 年同課程修了。2001 年福岡工業大学工学部講師。2003 年同助教授。2007 年同准教授を経て、2011 年同教授。現在に至る。パラレルワイヤ型ロボットなどの研究に従事。IEEE などの会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

田原健二 (Kenji Tahara)

2003 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年理化学研究所 BMC 研究センター研究員，2007 年九州大学大学院システム情報科学研究院特任准教授を経て，2011 年より同大学大学院工学研究院機械工学部門准教授，現在に至る。多指ハンドによる動的物体操作などの研究に従事。IEEE などの会員。博士（工学）。
(日本ロボット学会正会員)

松谷祐希 (Yuki Matsutani)

2015 年九州大学博士後期課程修了。同年熊本高等専門学校機械知能システム工学科助教，現在に至る。筋骨格系の制御の研究に従事。IEEE，日本機械学会の会員。博士（工学）。
(日本ロボット学会正会員)