

[研究助成 (A)]

環境との高い親和性を実現する拮抗弾性腱駆動型ロボットの設計と運動制御

Design and motion control for a robot with an antagonistic elastic mechanism for better physical interaction with surroundings

2231015



研究代表者

電気通信大学
大学院情報理工学研究科

助 教 佐 藤 隆 紀

[研究の目的]

本研究は、環境などの外界から受ける外力に対して適応的に振舞うことができ、必要に応じて大きな出力を発揮することが可能な、ロボット関節機構の開発を目的とする。

ロボット利用の需要は、従来の生産ラインに固定された産業ロボットのように、人間が近づくかぬように安全柵で囲われた範囲内で作業内容も限定されているものから、人間の生活環境を自在に移動し、状況に応じて人間や物体などの外界と接触して、人間の作業補助や作業代行ができるものへと変化している^[1]。このようなロボットは、人間や環境（以降では統一的に環境という）に対して適応的に振舞う必要がある。従来のパワーアシストロボットや、直接的な接触を伴う協働ロボットのほとんどは、関節やエンドエフェクタに外力を検出可能なセンサを取り付け、その情報に基づいて位置や力を制御する手法がとられていた^[2]。しかし、力を検出するセンサは一般に高価で、衝撃に弱く、定期的に校正する必要があるため、将来的に一般に流通させるロボットへの導入が難しいとされる。また、制御の遅れは環境との安定的な接触を損なう原因となり得る。

人間や動物の運動は、身体に多数備わる筋を駆動することで行われ、これらの巧みな制御によって環境に対して適応的な出力や、瞬発的に

爆発的な力を発揮できる高出力を実現することができている。その筋骨格構造に注目すると、i) 2つの筋が関節の両側に対になって備わり、それらの張力の調整で関節を制御している、ii) 筋周囲の筋膜や筋に接続される腱は受動的な弾性を有する、iii) 2つの関節にまたがるよう備わる二関節筋が存在する、という3点の特徴を捉えることができる。ii)の受動的な弾性は、制御に依らず、機構に備わる機能として環境に即応的かつ適応的に振舞う^[3]ための重要な性質の1つである。また、二関節筋の存在は、手先剛性や出力方向の調整に意味を持つことが知られ^[4]、環境との多様な接触を制御するうえ有効となる可能性が考えられる。以上の特徴は、人間や動物の環境適応的な手先/足先出力調整能力に大きく寄与するものであり、これらの機能をロボット関節に実装できれば、環境に適応的な運動の実現が可能になると考えた。

そこで本研究では、上記3点の特徴を、機械的なばねとロボットに一般的に使われるアクチュエータと、それらの作用を適切にロボットの関節に分配するための機構を備えた、拮抗弾性駆動のロボット関節機構を提案する。提案機構のアプリケーションの1つとして、1脚ロボットを対象として、機構設計とロボットの試作と有効性検証の実験を行った。本報では、機構による1脚ロボット試作機の足先出力の解析と、試作機による実験結果を報告する。

[研究の内容, 成果]

1. 弾性機構を有する関節駆動機構

1.1 本研究での関節駆動機構の設計要件

本研究で開発するロボット関節駆動機構の要求として、先に述べたように、i) 拮抗的に作用する、ii) 受動的な弾性を有する、iii) 二関節に作用する駆動源がある、の3点を掲げる。また、ロボットに搭載することを考えると、駆動機構が大型化することは望ましくなく、これらの機構をユニット化できる構成を検討した。本機構は、2リンク2関節ロボットに適用することを想定し、その2関節に作用するものとする。Ohら^[5]は、遊星歯車システムを利用することで、3つのモータで2つの関節の単関節駆動および二関節駆動を実現する機構を提案した。本研究ではこれを参考として、生物の筋骨格構造に備わるような拮抗弾性機構を導入した、新たな関節駆動機構を考案した。

1.2 提案機構の構成

提案する駆動機構の構成を図1に示す。本駆動機構は、ロボットの2つの関節に作用するものであり、ロボットの関節駆動によく用いられる回転式電磁モータと、ねじりばねを用いた弾性機構、遊星歯車システムで構成される。

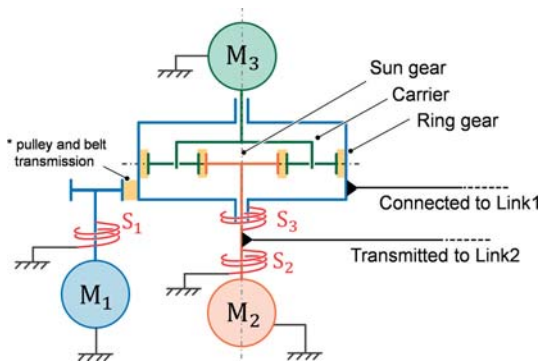


図1 提案機構の概略図

1.3 駆動機構の性質

回転モータには、2つの各関節 Joint 1, Joint 2 に独立に駆動力を与える M_1 , M_2 と、両関節に駆動力を与える M_3 の計3つを使用する。

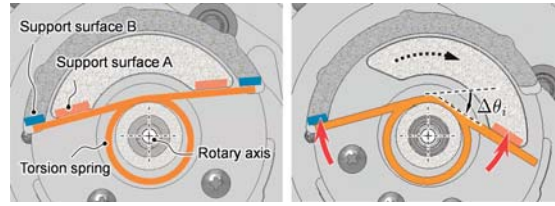


図2 弾性機構の構造

モータ M_1 の出力軸は、ロボットの Link 1 と接続された遊星歯車システムのリングギヤに接続される。モータ M_2 の出力軸は、太陽ギヤに接続され、その出力は Link 2 に伝達される。二関節駆動の役割を果たすモータ M_3 の出力軸はキャリアに接続され、遊星歯車システムの性質によってリングギヤと太陽ギヤと互いに干渉し、出力が各関節に分配される。

また、モータ M_1 , M_2 の駆動力に対して並列に作用する弾性機構 S_1 , S_2 が、それぞれの出力軸に接続されており、各関節の角度に応じた復元力を発生する。弾性機構 S_3 は、リングギヤと太陽ギヤに接続され、これらの角度差に応じた復元力を発生させ、これが2つの関節に分配される。この弾性機構は図2に示すように、それぞれが2つのねじりばねで構成される。例えば弾性機構 S_3 では、図中の支持面 A が太陽ギヤ軸に、支持面 B がリングギヤ軸に固定されており、角度差 $\Delta\theta_3$ が発生するとそれぞれの接触面の片側がねじりばねのアームを押し当てることで、それに比例した反トルクが生じる。逆方向の回転でも同様に機能するため、設定したつり合い角度からの変位角度に応じて両方向の復元トルクを発生させることができる。さらに、遊星歯車システムと初期ねじり角の設定によって、弾性機構の復元トルクが拮抗的に作用する状況が生じる。ここで、各弾性機構で発生する復元トルク $\tau_{Si}(\theta_i)$ は、式(1)で計算される。

$$\tau_{Si} = \begin{cases} -k_i(\Delta\theta_i + \theta_{0,i}) & (\Delta\theta_i \geq 0) \\ -k_i(\Delta\theta_i - \theta_{0,i}) & (\Delta\theta_i < 0) \end{cases} \quad (1)$$

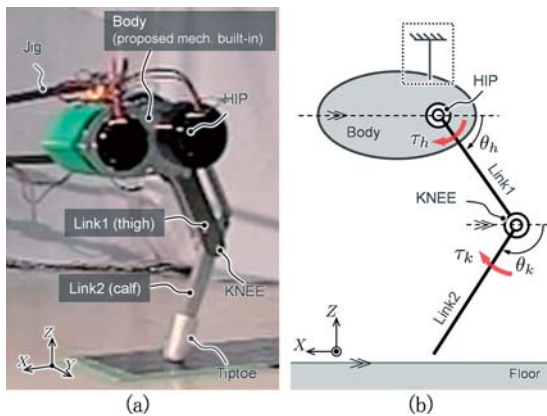
ただし、 k_i は弾性機構のばね定数、 $\theta_{0,i}$ はばねの初期ねじり角度である。

2. ロボットの試作機と駆動機構の出力特性

脚移動ロボットの定常歩容では、環境（地面）との接触を間欠的に繰り返し行う。また、運動によっては環境に弱い接触力でアプローチしたり、強い接触力を発揮して瞬発的な運動を行ったりするため、提案機構の効果を活用し得るアプリケーションの1つである。そこで本研究では、応用対象として、提案する拮抗弾性駆動機構を搭載した1脚ロボットを採用した。

2.1 試作機の製作

機構の詳細設計を行い、製作したロボットの試作機を図3(a)に示す。ロボットは2関節2リンクを持ち、これは近年の脚ロボットで最も一般的に用いられるのリンク構成である。提案機構は、Bodyの内部に収められており、図1の M_1 および S_1 のトルクはHIPに、 M_2 および S_2 のトルクはKNEEに伝達され、 M_3 と S_3 のトルクはそれぞれの関節に分配される。試作機の遊星歯車システムは炭素鋼材料を、フレームには主にジュラルミン材を使用して十分な強度を確保した。各モータには、減速比、モータドライバ、エンコーダを内蔵した、市販のロボット用アクチュエータを用いた。試作機の総重量は3.1 kgで、先端最大到達長さは0.3 mである。



(a) 試作機の外観、(b) ロボットの運動学モデル

図3 提案機構を搭載した2リンク脚ロボットの試作

2.2 出力特性解析

提案駆動機構の有効性の検証のため、試作した2リンク2関節ロボットを図3(b)のように

モデル化して、先端出力特性を求めた。ここで、ある姿勢において各モータにトルクを印加した際の先端力 f は式(2)で算出できる。

$$\begin{aligned} f &= (J_t^T)^{-1} \begin{bmatrix} \tau_h \\ \tau_k \end{bmatrix} \\ &= (J_t^T)^{-1} \left(\begin{bmatrix} \tau_{M1} - \frac{\gamma}{1+\gamma} \tau_{M3} \\ \tau_{M2} + \frac{1}{1+\gamma} \tau_{M3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{S1} - \tau_{S3} \\ \tau_{S2} + \tau_{S3} \end{bmatrix} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

ただし、 $J_t(\theta)$ はヤコビ行列、 τ_{Mi} はモータ M_i のトルク、 γ は遊星歯車システムの減速比を表す。二関節駆動モータ M_3 の駆動力の分配比が、減速比の大きさによって決まることがわかる。すなわち、提案機構の弾性機構および二関節駆動の効果は、先端力の向きと大きさに現れる。

試作機を用いて、先端出力を測定する実験を行った。図3(b)のように、試作機のBodyを地面に固定し、同様に力覚センサを足先位置で地面に固定して、各モータに一定のトルク（1 Nm または -1 Nm）を印加した際に、足先がセンサ検出面に及ぼす力を測定した。関節角度を変えた2種類の姿勢において、二関節駆動(BA)の有無、および弾性機構(EM)の有無を変えて、その結果を比較した。

例として、1種類の姿勢($\theta_h = 45.27^\circ$, $\theta_k = 135.12^\circ$)における測定結果を、図4に示す。矢印に沿って付された数値が、各モータに指令したトルク(τ_{M1} , τ_{M2} , τ_{M3})を表す。薄く示したら矢印が計算値を、濃い矢印が実測値を表す。図4(a)と(b)を比較すると、二関節駆動があることによって、出力可能な領域が主に x 軸正負方向に広がっていることがわかる。これは二関節筋の効果^[4]と一致し、適切にその機能を機構に実装できていることが示された。また、図4(b)と(d)を比較すると、弾性機構を用いることで、出力可能な領域が z 軸正方向には狭くなり、 z 軸負方向に広がっていることがわかる。弾性機構の弾性係数の大きさや、初期ねじり角度の大きさによって、偏向角度や大

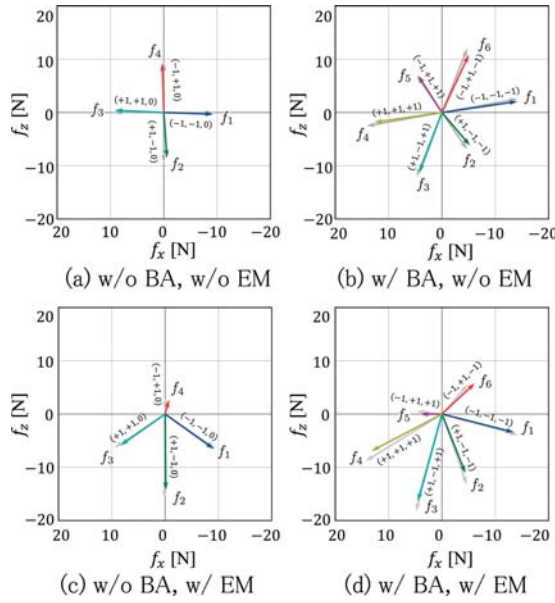


図4 先端出力特性

きは調整することができる。脚ロボットへの応用を考えた場合、自重を支えるためには z 軸負方向の力を常に発揮しておく必要があり、本設計では弾性機構によって自重を支える補助力を得ることができていると言える。また、計算値と実測値の矢印を比較すると、どの場合でも概ね一致していることがわかる。以上より、試作した提案機構は設定した設計要件の通り、正しく機能していることが確認された。

3. ロボットの運動制御

本機構の出力は式(2)のように、3つのモータ M_1 , M_2 , M_3 の出力と、各弾性機構の変位で決定する。しかし、ロボットの運動の中には、タスクが決まっても軌道が決まらないことがほとんどである。ここでは、1脚ロボットの跳躍という動的な運動の運動制御を説明する。

3.1 手法

本手法は、運動制御を所望の運動を実現するトルク軌道を導出するという最適化問題に置き換え、3つのモータのトルクの時間変化を自由曲線関数として表現して、その制御点を最適化変数とした非線形最適化で求めるものである。本研究では、3つのモータと弾性機構が2関節に及ぼす影響と、各リンクの慣性情報を取り入

れた1脚ロボットの動力学モデルを用いることで、動的な運動において影響が大きなりリンクの慣性や環境との接触を考慮できるシミュレーション環境を構築した。1回の跳躍運動におけるモデル重心位置の移動距離の最大化を目的関数として置き、最適化を実行した。

3.2 結果

運動制御で得られた3つのモータのトルク軌道と、その運動の関節角度軌道および各弾性機構の変位を図5に示す。図中の網掛け部は、足先が地面についていない空中期を表す。この制御によって生成された運動の跳躍距離は0.95 mであり、最大脚長の3倍以上の跳躍となった。

図5より、3つのモータがそれぞれトルクを発揮して、特にJoint 2で大きな運動を行っていることがわかる。また、弾性機構は S_2 と S_3 が大きく作用し、運動に貢献したと考えられる。二関節駆動と二関節弾性機構は、各関節にトルクを分配し、さらに一方の関節から他方の関節へのトルク伝達の機能を果たしたと考えられる。以上の結果より、提案機構の効果を活用した運

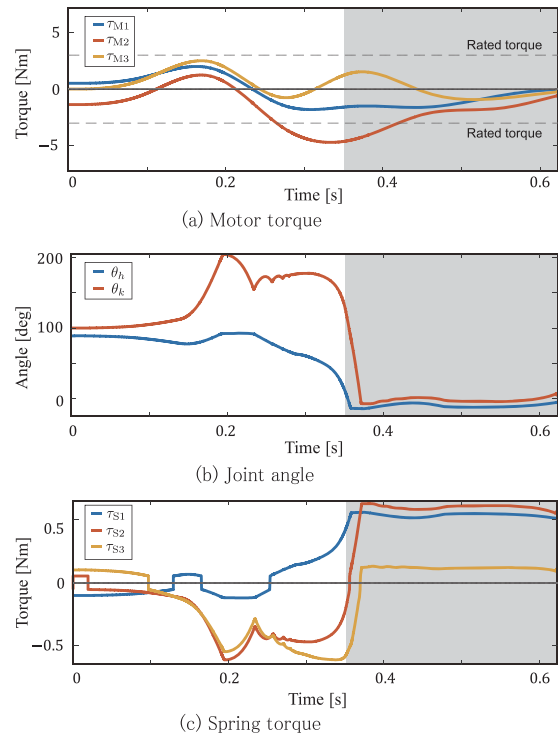


図5 跳躍運動制御の動力学シミュレーション結果

動制御をシミュレーション上で確認することができた。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では, 単関節駆動および二関節駆動に対して並列に作用して関節で拮抗する弾性力を発揮する弾性機構を導入することと, 二関節駆動機能を導入することを, 初期の設計要件として, 関節機構を設計した。

今後の研究では, 機構の効果を活用して環境とのよりリッチな接触を実現するために, 固有受容覚情報に基づく接触力推定と接触力制御手法を検討する。また, ロボットの形態や実行するタスクによって異なるロボットの機構パラメータの設計最適化に取り組む。

本機構は, ロボットが環境に対して一方的に力を及ぼす場面だけでなく, 外界から力を受けてそれに適応した作用力を発揮する場面で有効であり, 複雑環境下での作業や人間との接触を伴う協働ロボットでの利用に期待できる。機構の最適化と, 3つのアクチュエータのトルクとばねによる復元力との合成を考慮した機構の制御方法の確立によって, より環境に対して親和的なロボットの実現を目指す。

[参考文献]

- [1] G. Pang, G. Yang and Z. Pang, "Review of Robot Skin: A Potential Enabler for Safe Collaboration, Immersive Teleoperation, and Affective Interaction of Future Collaborative Robots," in IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, vol. 3, no. 3, pp. 681-700, 2021.
- [2] A. Cherubini, N. A. David, "Sensor-based control for collaborative robots: Fundamentals, challenges, and opportunities," Frontiers in Neurorobotics, vol. 14, 576846, 2021.
- [3] R. M. Alexander, "Tendon elasticity and muscle function," Comparative biochemistry and physiology part a: Molecular & integrative physiology vol. 133, issue 4, pp. 1001-1011, 2002.
- [4] 熊本水頼, 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] S. Oh, Y. Kimura and Y. Hori, "Force control based on biarticular muscle system and its application to novel robot arm driven by planetary gear system," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 4360-4365.

[成果の発表, 論文など]

国際会議論文1編を投稿中