

非線形受動弾性機構を内包する多関節ロボット用駆動ユニットの開発

電気通信大学 大学院情報理工学研究科機械知能システム学専攻

佐藤 隆紀

1. はじめに

産業用ロボットアームに代表される多関節ロボットは、ヒトの肢のようにエンドエフェクタの位置や力を自在に制御して、人間の作業を代行したり人間と協調作業したりできるため、利用範囲は拡大している。脚型ロボットも多関節ロボットの一種に分類され、多関節を適切に制御することで正確な足先接地位置決めや推進力生成によって安定歩行が実現されている。これまでロボットは、既知環境において事前に決められた作業を行う目的で使われてきたが、近年は人間との協調や未知環境での運用が求められている¹⁾。この要求には、エンドエフェクタに物理的な柔軟性を持たせられることが望ましい。また、従来のような低速な精密制御だけでなく、高速・高加減速を伴う動的運動の需要も高い。しかし、既存の多関節ロボットの多くに見られるような、高剛性のリンクやアクチュエータで構成され、関節毎に関節軸近傍にアクチュエータを配置し、手先力覚センサ情報に基づいて力制御するという設計思想では、これらで要求される柔軟で機敏な運動の実現は難しく、ハードウェア自体がその実現を妨げている。

関節アクチュエータに焦点を当てると、その特性や配置はロボットの運動性能に直接影響する。言い換えると、前述のようにロボットに柔軟性と俊敏性をもたらす関節アクチュエータの開発は、多関節ロボットの運動性能向上に直結する。本研究では、軽量かつコンパクトで、ロボットに柔軟性を持たせる機構を内包した新たな関節駆動機構の開発を目的とする。本稿では、1つのユニットで2つの関節を駆動でき、関節間に柔軟性を付与できる機構を内部空間に備えたモジュールを設計・試作し、その特性評価を行って機構の妥当性を確認する。

2. 駆動ユニットの要件と機能

前章で述べた通り、多関節ロボットに柔軟性を付与でき、動的運動の実現に有利な関節駆動機構の要件と機能を検討する。回転関節への利用を前提として回転駆動機構とする。また、様々な形態の多関節ロボットに導入しやすいユニットにすることも要件の1つとした。

ロボットのエンドエフェクタにおけるコンプライアンス性は、外力に対する応答性やシステムの大きさの観点で、機械的受動弾性機構を使って実現することは有用であり、多関節ロボットの構造に導入される例も多い^{2),3)}。しかし、多くの研究では弾性機構は関節周囲に外付けされており、関節やリンク形状に合わせて機構の固定方法や伝達機構を考えなければならない。

ロボットの運動を考えると、動的な運動ほど関節可動域を広範に使う傾向が高い。線形受動弾性機構の場合、角度と反トルクの関係が決まっているため、可動範囲を広く使う運動では望ましくない反トルクを受ける場面が出てくる可能性があり、弾性特性を自由に設計できる非線形弾性機構を用いることが望ましい。

ロボット全体の構成を考えた際、高加減速を伴う動的動作を行うためにはアーム全体の慣性モーメントを小さくするのが望ましい。全体質量に占める割合が高いアクチュエータは、でき

るだけロボットの基部付近に配置することで、アームの慣性モーメントを小さくすることができ、加減速の際の必要トルクを低減できる．例えば、遠位の関節を駆動するアクチュエータを近位の関節軸上に配置できれば、これを達成できる．質量の分布が基部に寄ることでアームの重力負荷は減少するため、リンクのスリム化と軽量化につながって更なる必要トルク低減やペイロード向上が見込め、設計の好循環をもたらす．

最後に、上述の弾性機構と低慣性リンクの効果を運動に活用し、俊敏で外力に対して柔軟な運動の実現には、アクチュエータが高い逆駆動性を持つことが望ましい．

以上を踏まえ、本研究で開発する関節駆動機構には以下の要件を定義した．

- ・ 機械的受動弾性機構を駆動ユニットに内包する．
- ・ 関節角度に対して非線形な受動弾性を有する．
- ・ ユニット 1 つで 2 つの関節を駆動できるアクチュエータを有する．
- ・ 逆駆動性が高い回転アクチュエータを使用する．
- ・ ユニットはロボットに搭載しやすいよう小型・軽量．

以降では、卓上サイズの多関節ロボットへの利用を想定し、一般的な関節アクチュエータと比べて弾性機構の導入による体積増大を最小限に抑えた関節駆動機構を考える．

3. 非線形受動弾性機構

回転関節に非線形弾性を持たせる方法として、非線形弾性腱を用いる方法⁴⁾や線形ばねの案内棒の形状を工夫することによって非線形化する方法⁵⁾などが提案されている．文献⁶⁾で提案された同軸上の 2 枚の円盤間の機構の構造的な特異性を利用した可変剛性機構は、回転角度に対して非線形な受動弾性を示している．機構はとてもシンプルでコンパクトな形状に作製可能であることから、本研究の目指す関節駆動機構に内包する非線形弾性にも利用できると考えた．この構造を参考にした本研究で用いる非線形受動弾性機構の概略図を図 1 に示す．本機構は、モータの入力軸と出力軸の間の関係を想定した同軸上の 2 つの円盤に対して、回転軸から一定のオフセットを持たせた位置に引張ばねをステンレスワイヤを介して取り付けたものである．回転して 2 つの円盤に回転角度差が生じると、引張ばね両端の距離が変わるため復元力

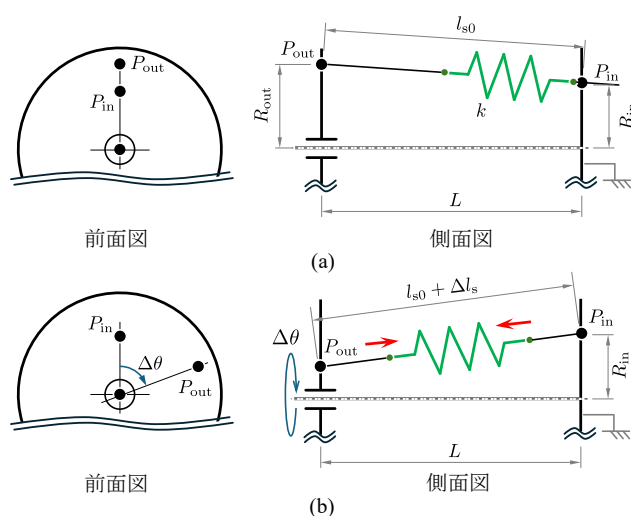


図 1．非線形弾性機構の概略図．(a)回転角度差が 0 の時，(b)回転角度差が $\Delta\theta$ の時

が発生し、それが 2 つの円盤間にトルクを生じさせる．ここで、引張ばね（ばね定数 k 、初張力 F_{ini} ）の伸張量 Δl_s から弾性トルク τ_s は式(1)で算出できる．

$$\tau_s = (k\Delta l_s + F_{ini})R_{in}R_{out} \sin \Delta\theta \quad (1)$$

本機構の特徴は、取り付け位置によって回転角度差に応じた弾性トルクの特性を設計可能である．ここで、径方向の取り付け位置 R_{in} や R_{out} は駆動機構に使用するモータの大きさによって範囲が決まるが、本研究では簡単化のために $R_{in} = R_{out}$ になるように設計した．また、駆動機構の長さによって円盤間の距離 L の範囲が決まる．

4. 非線形受動弾性機構を内包する駆動ユニットの試作

前章で設計した受動弾性機構と、2 つの関節を駆動するアクチュエータを搭載した駆動ユニットの設計断面図を図 2(a)に示す．アクチュエータとして、本研究ではダイレクトドライブモータを使用した．図中右のモータは第 1 関節駆動用でアウターロータ式ブラシレスモータ RO60 (CubeMars 社製)を使用し、図中左のモータは第 2 関節駆動用でインナーロータ式ブラシレスモータ RI70 (CubeMars 社製)を使用した．2 つのモータは本駆動ユニット内で直列に接続されており、ユニット外側フレームが第 1 関節アクチュエータの出力軸に、ユニット中央内部の軸が第 2 関節アクチュエータの出力軸になっている．第 2 関節アクチュエータ出力軸からは、タイミングベルトやワイヤ駆動機構を介してロボットの第 2 関節に動力伝達する．モータには、非接触中空ロータリーエンコーダである AksIM-2 (Renishaw 社製)と VLX-60 (Netzer 社製)がそれぞれ取り付けられおり、回転角を検出できる．本駆動ユニットの特徴は、扁平で大口径のモータの使用によってユニット長さは最小限になり、ロボット駆動に必要なトルクを直接駆動方式で確保しつつ高逆駆動性を持たせている．回転軸周囲は中空構造になっていて、内部空間を受動弾性機構に利用可能である．

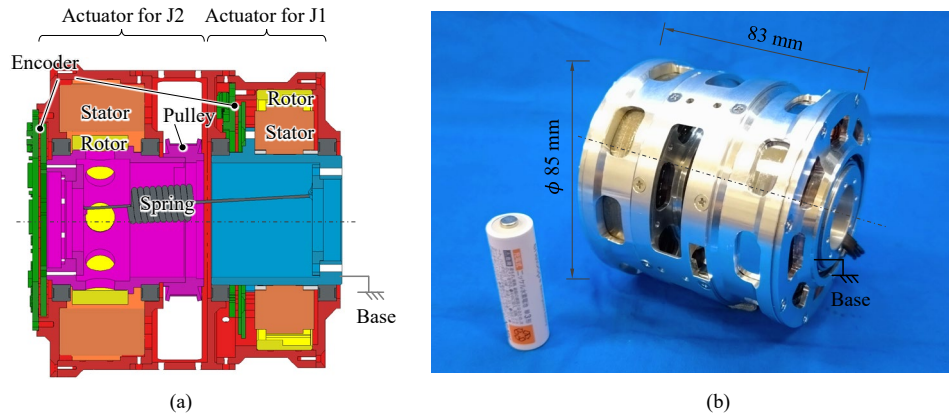


図 2. 非線形弾性機構を内包した関節駆動ユニット．(a)設計断面図、(b)試作機の外観

受動弾性機構は、本研究では基部固定部と第 2 関節出力軸との間に設けることとした．すなわち、弾性トルクは基部と第 2 関節の間に発生し、2 つの関節を跨ぐ弾性機構である．このような機能をロボットに導入しようとするとき、通常はリンクに沿って弾性機構を用意する必要があるが、本機構は駆動ユニット内で完結し省スペースで導入がしやすい．

上述の詳細設計を基に試作した関節駆動ユニットの外観を図 2(b)に示す．筐体にはジュラルミン材を使用した．本駆動ユニットは、最大外径 85mm、長さ 83mm、重量 810g である．サーボ制御用基板には ODrive Pro (ODrive Robotics 社製)を使用し、駆動ユニット外部に設置した．

受動弾性機構には、外径 10mm、ばね定数 3.39N/mm、初張力 12.75N のコイル引張ばねを使用し、ステンレスワイヤを介して両端を各接続部に固定した。

5. 駆動ユニットの基礎特性実験

関節駆動ユニットに搭載した非線形受動弾性機構の特性を確認するために、弾性トルク測定実験を行った。実験では、第 1 関節入力角度を変化させ、第 2 関節出力軸に取り付けられた固定長さの剛体リンクの先端を力覚センサに押し当てたときの力を測定してトルクを算出し、角度差との関係を求めた。

弾性トルクの計算値と測定結果を図 3 に示す。グラフより、角度差 45 度程度までは計算値に概ね一致している。それ以降では計算値よりも測定したトルクが小さくなり、角度増加に対するトルク増加率の減少度合いが大きくなる結果となった。これは、角度差が大きくなるにしたがって引張ばねとステンレスワイヤとの接続位置が変化したことで理論上の引張ばねの変位より小さくなったことが原因であると考えられる。固定点間を結ぶ直線と引張ばねの中心軸とが常に一致するように、引張ばねの両端を直接固定点に接続できる構造に改良することで解決できる可能性がある。計算値との誤差があるものの、内包した機構による非線形受動弾性の特性が確認できた。

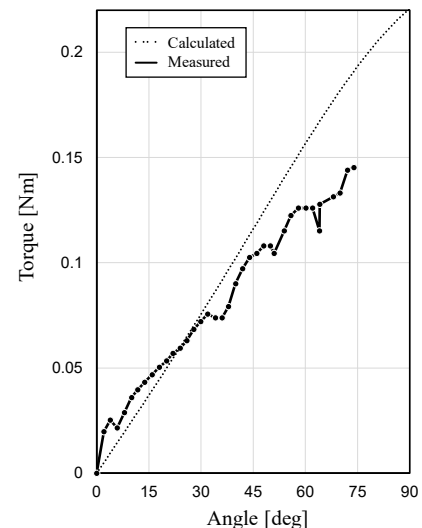


図 3. 弾性トルク測定結果

6. まとめ

本研究では、多関節で構成されるロボットの構造のスリム化と手先出力増大および手先コンプライアンス向上を目的として、2つのモータと受動弾性機構を搭載した駆動ユニットを開発した。駆動ユニットの要件を検討し、それに基づいてモータの選定および弾性機構を提案し、機構の詳細設計を行った。これらを一体にした2関節駆動ユニットを試作し、受動弾性機構による発生トルクを実験にて測定した。本駆動ユニットは1つで2関節を駆動できるため、これをロボットの基部の近位に配置することでアーム自体は軽量化でき、ペイロードの確保と動作高速化につながる。

今後の研究では、多関節ロボットへの採用を前提とした非線形弾性特性の設計方法の確立と非線形弾性を考慮したロボットの運動制御法を検討し、これを搭載したロボットによるダイナミックな運動の実現を目指す。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Ashwin Verma, Pronaya Bhattacharya, Nirav Madhani, Chandan Trivedi, Bharat Bhushan, Sudeep Tanwar, "Blockchain for Industry 5.0: Vision, Opportunities, Key Enablers, and Future Directions," in IEEE Access, vol. 10, pp. 69160-69199, 2022.
- 2) Maxime Marchal, Raphaël Furnémont, Bram Vanderborght, Ghilès Mostafaoui, Tom Verstraten, "Optimization of Mono- and Bi-Articular Parallel Elastic Elements for a Robotic Arm Performing a Pick-and-Place Task," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 8, pp. 5061-5068, Aug. 2023.
- 3) Akira Fukuhara, Yoichi Masuda, Megu Gunji, Kenjiro Tadakuma, Akio Ishiguro, "Development of Quadruped Robot That Can Exploit Shoulder Hammock Structure," 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Honolulu, HI, USA, 2020, pp. 1139-1143.
- 4) 小澤隆太, 小林博明, "非線形弾性腱を持つ腱駆動ロボット機構の定力制御," 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 3, pp.372-379, 2001.
- 5) Koich Koganezawa, Yuki Shimizu, Hiroaki Inomata and Toshiki Nakazawa, "Actuator with Non-Linear Elastic System (ANLES) For Controlling Joint Stiffness on Antagonistic Driving," 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China, 2004, pp. 51-55.
- 6) Masafumi Okada, Shintaro Kino, "Torque Transmission Mechanism with Nonlinear Passive Stiffness using Mechanical Singularity," 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1735-1740, Pasadena, CA, USA, May 2008.