解 説

無段変速機構を有するマニピュレータ

Robotic Manipulator with Continuously Variable Transmission Mechanism

田 原 健 二* *九州大学

Kenji Tahara* *Kyushu Univ.

1. は じ め に

現在のロボットマニピュレータに、目的タスクの実行に必要な十分な手先力と、接触・衝突などに対する高い柔軟性の両立を求めることは、ある種の矛盾とも言える。それは、主に利用されている回転型の電動アクチュエータ特性に依るところが大きい。すなわち、もし小型でロータ慣性や摩擦が小さく、減速機を使わずとも十分なトルクが出力可能なアクチュエータ、もっと言えば、人間の筋肉のように高出力・高剛性と柔軟性の両方の特性を実現可能なアクチュエータが存在すれば、上記の矛盾は実現可能である。しかし、現状そのようなアクチュエータの実現は難しく、また、柔軟性よりも目的タスクの実行に必要な手先力や精度の実現が、ロボットに要求される仕様の優先順位として高いため、ダイレクトドライブモータ [1] などサイズの大きい一部のアクチュエータを除いては、大きな減速比を持つ減速機を利用せざるを得ない。大きな減速比を持つ減速機を使えば、たとえ小さなモータでも大きなトルクを出力可能であるが、その代償として摩擦やロータ慣性の増大を招き、結果として逆可動性 (Backdrivability) を失うことになる。逆可動性は、マニピュレータ自身がセンサやアクチュエータに頼ることなく本質的・構造的に持つ柔軟性に大きく寄与する。触覚センサやトルクセンサなどを用いた外力フィードバックによって、逆可動性を疑似的に実現する手法もあるが [2] [3]、衝突などの瞬間的な撃力に対応するには超高周波数領域での応答性が要求され、また、電源が入っていない場合やセンサの故障などを起こした場合は、当然ながら疑似逆可動性は喪失し、元の硬いマニピュレータに戻ってしまう。よって、安全性の確保という観点からすれば、マニピュレータ自身が構造的に逆可動性を有していることが望ましいが、上述のとおり、大きな手先力と逆可動性を両立させることは難しい。

一方、マニピュレータは稼働中常に最大出力が必要なわ

けではない。例えば、重量物の運搬等を行う際は十分な手先力が必要であるが、手先に負荷がない状態では、むしろ大きな手先力は危険である。すなわち、必要に応じて減速比を変えることができれば、手先力が必要な場合のみ減速比を高め、不要な場合には減速比を下げることで危険性を極力低減させることも可能である。現在電動モータに利用されている減速機は、基本的に固定減速比のものがほとんどであり、自動車等にみられる変速機構を持つものは少ない。自動車は自重が重く、極低速域から高速域まで幅広い速度レンジを必要とするため、固定された減速比ではそれらをすべて実現することが難しい。また、エンジンなどの内燃機関の出力特性が電動モータに比べて非線形であり、十分なトルクを発生可能な回転域が限られているため、その領域を効率的に有効利用するために変速機は重要な役割を果たす。しかし電動モータの場合は、始動時に最大トルクが得られ、また、マニピュレータは自動車ほど広範囲の速度レンジを必要とせず、変速機という新しい機能の追加による重量やコストの増加等もあり、これまで変速機構の積極的な導入には至っていない。しかし、人間や環境と接触可能性があるロボットの場合、できる限り柔軟性を持つことが望ましく、その意味では、現状のアクチュエータで十分な手先力と柔軟性を使い分ける手法として、変速機の導入は有効であると筆者は考えている。

これまで、高剛性と柔軟性の両方を実現するため、可変剛性機構を持つアクチュエータの開発が積極的に行われている [4]~[6]。変速機は、基本的に速度と力の関係を変えるもの (テコと同等) であり、絶対的な剛性はアクチュエータのサーボ剛性に依存するため、位置と力の関係を直接的に変える可変剛性機構とは厳密には異なるが、サーボ剛性を一定とすれば等価である。さらにサーボ剛性をも可変とすれば、アクチュエータ単体や変速機単体よりも広範囲に剛性を変化させることができる。本稿では、筆者らが提案する無段変速機構を持つマニピュレータについて解説する。提案するマニピュレータは、これまで一般的に用いられている回転型の電動モータではなく、複数の直動型の電動アクチュエータ (リニアアクチュエータ) で構成されており、変速装置を新たに加えるのではなく、マニピュレータの構

原稿受付 2013 年 4 月 15 日

キーワード: Backdrivability, Continuously Variable Transmission, Variable Stiffness

*〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

*Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

造自体が変速機能を包含している。リニアアクチュエータは減速機を持たないため、逆可動性が高い反面、出力が弱く単体での使用では十分な手先力が得られ難い。提案するマニピュレータでは、逆可動性というリニアアクチュエータの長所をうまく取り込みながら、短所を補う手段として一つの関節の駆動に複数のアクチュエータを同時に利用し、かつ、構造を利用した無段変速機構を導入している。

2. 直動アクチュエータ

直動アクチュエータの動作原理は、基本的にブラシレス DC モータと同じである。磁性を持つシャフトの周囲にコイルが巻かれており、流れる電流によってシャフトに力が発生し、直動する。構造上減速機を持たず、高精度な位置決めができることから、これまで工作機械の位置決め等に利用されている。しかし、占有する体積が大きく（シャフトが直動するための空間が必要）、減速機付き回転モータに比べて出力が弱いいため、マニピュレータなどの多関節構造体に利用された例は少ない。また、これまでの用途（位置決め）から、力制御可能なものが少なく、位置検出も別途リニアエンコーダ等を用意する必要があるなど、単体で力制御によるサーボ機能を有するものが少ないため、現在のところマニピュレータへの利用はそれほど容易ではない。一方で、多関節構造体への利用を前提としたリニアアクチュエータも近年開発されており[7]、今後の展開が期待される。提案するマニピュレータでは、FAULHABER 社製リニア DC サーボモータの QUICKSHAFT シリーズを使用した。本製品はホール素子による位置検出が可能のため、単体で位置および速度制御が可能であるが、やはり厳密な力制御モードを有していないため、最大発揮力の制限を利用した速度制御モードにより、疑似的な力制御を行っている（詳細は文献[8] 参照）。

3. 無段変速機構

筆者らが提案している無段変速機構は、自動車等に利用されているよく知られた無段変速機（CVT: Continuously Variable Transmission）と、目的は同じであるが構造はまったく異なる。提案する機構は、1 自由度の回転機構に対して二つのリニアアクチュエータを使用する。図 1 に、提案する機構の最も簡単な例として、1 自由度マニピュレータを示す。図に示すように、台座に受動回転軸を介して主リンク（出力軸）が接続されており、それを挟んで拮抗配置されたリニアアクチュエータの本体部分が、受動回転軸を介して台座に接続されている。一方、各リニアアクチュエータシャフトの主リンク側端点は、主リンク上を受動的にスライド可能なリニアブッシュと受動回転軸を介して接続されている。本機構に含まれる回転軸はすべて受動軸であり、能動回転する軸は存在しない。各リニアアクチュエータが

図 1 無段変速機構を持つ 1 自由度マニピュレータ

推力を発揮することにより、リニアブッシュを介して主リンクに回転モーメントが加わり、その結果、主リンクが受動回転軸を中心として回転運動を行う。本機構は、二つのリニアアクチュエータの協調動作による、リニアブッシュの二次元平面内位置制御であり、リニアブッシュが主リンク上に拘束されているため、結果として、1) 主リンクが回転運動する、2) リニアブッシュが主リンク上をスライドする、という 2 種類の運動がそれぞれ独立して発生する。直動運動するアクチュエータの拮抗配置によるメカニズムとしては、ワイヤや空気圧アクチュエータを用いたパラレルメカニズムが一般的によく知られている（例えば文献[9]～[11] 等）。これらは、単一方向（引張もしくは収縮方向）のみに力を発生するため、複数のアクチュエータで拮抗駆動を行う場合がほとんどであり、この場合、関節駆動力として寄与しない力成分（内力）を生成する冗長駆動系となる。一方リニアアクチュエータは、ワイヤや空気圧アクチュエータと違い、双方向（収縮・伸展方向）に力を発生させることができるため、基本的にはアクチュエータ一つで 1 自由度の制御が可能である。しかし、提案するマニピュレータでは、あえてリニアアクチュエータを拮抗配置し、複数のアクチュエータ推力を足し合わせることによって、アクチュエータ単体での出力の弱さを補っている。また、内力を生成する冗長駆動部分に相当する自由度を、リニアブッシュが主リンク上をスライドする自由度として割り当てることにより、リニアブッシュの位置による可変モーメントアーム構造によって、無段変速機構を実現している。すなわち、リニアブッシュの位置を高くすれば、モーメントアームが長くなるため、主リンク先端部分で発揮可能な手先力が大きくなり（増トルク）、逆に位置が低い場合には、手先力は小さくなり、その代わりにリニアアクチュエータの変位量に対するアーム角度変位が大きくなる（増速）。図 2 に、

リニアブッシュの位置を変えると最大手先力・剛性が変化

図2 リニアブッシュ位置の変化による手先剛性の変化（アクチュエータのサーボ剛性が一定で静的な場合）

アクチュエータのサーボ剛性が一定で静的な場合における、リニアブッシュ位置の変化と手先剛性の変化を示す。

4. 制 御

提案する機構では、基本的にリニアブッシュの位置を制御することになる。無段変速機構は、絶対的な剛性を可変とするものではなく、剛性は基本的にアクチュエータのサーボ剛性に依存する。サーボ剛性も可変とすれば、より広範囲に剛性を変化させることも可能であるが、ここでは最も簡単な制御として、ゲインを固定としたPDフィードバックとしてみる。具体的には、以下のように与える。

$$\mathbf{f} = -\mathbf{J}_b^{-T} \mathbf{K} \Delta \mathbf{q}_b - \mathbf{C} \dot{\mathbf{i}} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{f} = [f_1, f_2]^T$ はリニアアクチュエータへの入力であり、以後、添え字の数字は各リニアアクチュエータの番号（1：左側，2：右側）を表すとする。リニアブッシュ位置は、極座標位置ベクトル $\mathbf{q}_b = [r, \theta_b]^T$ で表し、 $\Delta \mathbf{q}_b = \mathbf{q}_b - \mathbf{q}_{bd}$ は目標リニアブッシュ位置 $\mathbf{q}_{bd} = [r_d, \theta_{bd}]^T$ と現在位置との誤差ベクトルを表す。リニアブッシュは主リンク上をスライドするため、リニアブッシュの姿勢角 θ_b は、常に主リンクの姿勢角 θ_a と等しい。また、 $\mathbf{K} = \text{diag}[k_r, k_\theta] > \mathbf{0}$ は位置フィードバックゲイン、 $\mathbf{C} = \text{diag}[c_1, c_2] > \mathbf{0}$ は速度フィードバックゲインをそれぞれ表しており、 $\dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_1, \dot{i}_2]^T$ はリニアアクチュエータの伸縮速度を表す。一方、 $\mathbf{J}_b \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ はリニアアクチュエータ伸縮速度 $\dot{\mathbf{i}}$ に関するリニアブッシュ速度 $\dot{\mathbf{q}}_b$ のヤコビ行列を表しており、以下の関係を満たす。

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{J}_b \dot{\mathbf{q}}_b \quad (2)$$

ここで本稿では、 $^{-T}$ 記号は転置行列の逆行列を表す。すなわち、 $\mathbf{J}_b^{-T} = (\mathbf{J}_b^T)^{-1}$ である。提案機構では主リンク可

図3 二つの無段変速機構を持つ2自由度マニピュレータ試作機（文献[12]参照）

動範囲を $0 < \theta_a < \pi$ と設定しており、この範囲において正方行列 $\mathbf{J}_b$ はフルランクとなり、逆行列が存在する。

本機構は、主リンク角度とリニアブッシュ高さ位置が運動学的に独立しており、制御入力もそれぞれ独立して設定することが可能である。しかし、動力学的には干渉しており、例えば角度を変えながら同時にリニアブッシュの位置を変えた場合、お互いの運動が干渉する。よって、変速しながら位置を制御する場合は、これら動力学的な干渉を考慮する必要がある。

5. 試 作 機

図3に試作機を示す。試作機は、二対（計四つ）のシャフトモータをそれぞれ直交配置し、主リンクと台座部分の間にユニバーサルジョイントを用いた2自由度システムとして製作した。使用したリニアアクチュエータは、FAULHABER社製 QUICKSHAFT シリーズ LM1247-080-01、モーションコントローラは同社製 MCLM3003/06 である。本試作機を用いた無段変速機構の効果を検証した結果、主リンク上のリニアブッシュ位置が最も低い場合と、最も高い場合を比較して、およそ1.6倍の手先力増幅効果が得られた。これらの詳細は文献[12]を参照されたい。なお、前述のとおり、利用したアクチュエータは厳密な力制御ができないため、最大力の制限を利用した速度制御モードで疑似的な力制御を行っている。一般的なモータドライバの位置や速度制御モードは、基本的に電圧制御であり、電流制御による力・トルク制御モードと比較して、いわゆる“硬い制御”となってしまうが、それでも本試作機は、歯車等を用いた一般的な減速機を持たないため、摩擦等の影響が少なく、十分な逆可動性を有している。すなわち、トルク・

力制御モードを持たず、位置や速度制御モードのみを持つ比較的安価なモータドライバでも、逆可動性と変速機能を得ることができる。

6. お わ り に

本稿では、リニアアクチュエータを複数利用した、無段変速機構を有する逆可動性の高いマニピュレータについて、その構造と原理の解説、および試作機の紹介を行った。リニアアクチュエータの配置や、モーメントアームをより効果的に可変とする構造等、設計に関してはまだ改良の余地があるが、直感的に理解しやすく簡単であり、汎用性は高い。また、特に制御則を選ばないため、本稿で説明したPDフィードバック制御以外の手法も導入可能である。一方で試作機は、2自由度とは言え本当の意味での多リンク構造ではないため、実用性を考えた場合、関節をシリアルに接続した多リンク構造への拡張が必要である。

リニアアクチュエータは、使い方次第ではあるが、多関節構造体を持つロボットシステムにとって有効な駆動源となり得る。また変速機構は、これまでの産業用ロボットが必要としていた“硬さ”だけではなく、また、人や環境との接触に対する“柔らかさ”だけでもなく、その両方を実現可能な手段の一つとして、我々の生活空間での稼働を前提としたロボットには有効であると筆者は考えている。前述の通り、近年可変剛性機能を持つアクチュエータの開発が盛んに行われており[4]~[6]、また、変速機構に関する研究[13]~[16]や、逆可動性を重視した研究[17][18]も行われている。我々の周りで稼働するロボットには、逆可動性を持つか否かが非常に重要であり、今後、これらの研究がより一層活発に行われるであろう。

参 考 文 献

- [1] 小林ら：ロボット制御の実際。計測自動制御学会編，コロナ社，1997.
- [2] A. Albu-Schaffer, et al.: “From torque feedback-controlled lightweight robots to intrinsically compliant systems,” IEEE Robot. Automat. Magazine, vol.15, no.3, pp.20-30, 2008.
- [3] 長阪ら：“理想関節ユニットを有したロボットへの一般化逆動力学の適用”，第14回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp.152-158, 2009.

- [4] A. Albu-Shaffer, et al.: “Dynamic modeling and control of variable stiffness actuator,” IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.2155-2162, 2010.
- [5] L.C. Visser, et al.: “Energy-efficient variable stiffness actuator,” IEEE Trans. Robotics, vol.27, issue 5, pp.865-875, 2011.
- [6] B.-S. Kim and J.-B. Song: “Design and control of a variable stiffness actuator based on adjustable moment arm,” IEEE Trans. Robotics, vol.28, issue 5, pp.1145-1151, 2012.
- [7] M. Mishima, et al.: “Development of a new linear actuator for androids,” IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.3594-3599, 2008.
- [8] FAULHABER, <http://www.faulhaber.com/>
- [9] 小澤，小林：“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.
- [10] 木野ら：“ワイヤ張力の機械的拘束方向への干渉を利用したワイヤ駆動システムの剛性増加法”，日本ロボット学会誌，vol.19, no.6, pp.753-759, 2001.
- [11] 近藤，細田：“空気圧人工筋によって駆動される6自由度人間型ロボットアームの開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 予稿集，DVD-ROM, IA2-M, 2007.
- [12] 田原ら：“無段変速機構を有する逆可動性の高いパラレルマニピュレータ”，日本ロボット学会誌，vol.30, no.1, pp.99-106, 2012.
- [13] 高木，小俣：“ロボットハンドのための負荷感応型無段変速機”，日本ロボット学会誌，vol.23, no.2, pp.238-244, 2005.
- [14] 高木，小俣：“負荷感応無段変速機を用いた100[g]-100[N]指の開発”，日本ロボット学会誌，vol.24, no.2, pp.263-269, 2006.
- [15] 山田浩也：“2個のリンクで駆動されるクランク式無段変速機構の提案”，第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3O3-2, 2010.
- [16] 高山俊男：“ロボットハンドの速度と力を両立させる工夫”，日本ロボット学会誌，vol.29, no.6, pp.512-515, 2011.
- [17] 神永ら：“バックドライバブルなヒューマノイドロボット用大出力液圧関節駆動機構の設計”，第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，DVD-ROM, 1K3-6, 2008.
- [18] 千葉ら：“バックドライブ可能な把持力増大機構の開発”，第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1P1-1, 2011.

田原健二 (Kenji Tahara)

2003年立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール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年より九州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，筋骨格系の運動モデリングと制御，冗長劣駆動系の制御などの研究に従事。IEEE, SICE等の会員，博士（工学）。

(日本ロボット学会正会員)