解説

高バックドライバビリティを実現する油圧駆動システム

Hydraulic Actuation for Enhanced Backdrivability

中村 仁彦* 神 永 拓* *東京大学

Yoshihiko Nakamura* and Hiroshi Kaminaga* *The University of Tokyo

1. はじめに

ロボットを力に敏感にしたいという要求は人と接触するロボットにおいてはかなり初期のころから存在した。ところが、定型作業が求められるロボットは手先の位置を正確に制御することが重要であったため、ロボットは外界から受ける力の影響をいかに排除するかが重視されてきた。すなわち、手先部など限られた部位を除いてロボットは受ける力に敏感でないことが望ましかった。

この思想は機構設計にも現れている。マニピュレータ型ロボットの多くは剛性が高いフレームに剛性が高い駆動系を組み合わせる。さらに、制御系の目標値追従性能を高めるためイナーシャ比を大きくとるため大きな減速比が選択される。この設計思想はロボット全体の重量を、その可搬重量に比べ大きくするほか、伝達系のバックドライバビリティを悪化させるという結果を招いた。

DLR Light Weight Robot [1] は、各関節に配置したトルクセンサを用いて駆動系の剛性も考慮した制御を行うことで、いわば力感受性を使って精度を向上した。バックドライバビリティの欠如は力感受性に不感帯や非線形性を生じ、制御性を悪化させる。ところが制御を使って駆動系のバックドライバビリティを高めても、衝撃など制御帯域を越える外乱に対しては制御が有効に働かず、機構的な特性としてのバックドライバビリティが支配的になる。これに対処するために Series Elastic Actuator (SEA) [2] などの弾性アクチュエータが用いられている。

バックドライバビリティを高める方法として電気静油圧アクチュエータ (Electro-Hydrostatic Actuator, EHA) と呼ばれる油圧アクチュエータの使用が提案されている [3]。EHA は容積制御型の分散油圧駆動系であり、摩擦低減と内部漏れの許容により上記項目を満たすことができるほか、強度が高い、従来の油圧駆動に比べ効率がよいといった特長がある。風力発電では EHA のバックドライバビリティ

と強度を生かして増速機に用いられている [4]。

本研究は力感受性が高く、制御性や信頼性に優れた実用性の高いロボットアクチュエータを開発することを目的としており、そのために EHA を用いたロボットの構成法を探っている。本稿では EHA の基本構造を示し、バックドライバビリティとの関係、実際の設計例について紹介する。

2. バックドライバビリティ

2.1 バックドライバビリティという性質

バックドライバビリティとは逆可動性とも呼ばれることがあるが、駆動系の出力端に外力を加えることで出力端を駆動できる能力のことを示す。図 1 に示す駆動系の概念図において、 $1 \rightarrow 2$ の方向の駆動が通常の減速動作であるとき、バックドライバビリティは $2 \rightarrow 1$ (増速動作) が可能であるか、またはその程度を表す。ただし $i = \{1, 2\}$ として M_i は質量、 θ_i は一般化座標、 τ_i は θ_i に対応する一般化力 (外力)、 τ_{fb_i} は τ_i の次元でのガイドやベアリングの摩擦力であり、通常十分小さい。伝達に際する摩擦は斜面で発生する摩擦 τ_{ft} であり、その静止摩擦は摩擦円すい ϕ_f 、法線力は n_{tf} で表現する。図 2 に図 1 の摩擦円すい近傍の拡大図を示す。

駆動系の摩擦によりバックドライバビリティは損なわれることがある。よく知られた例ではウォームギアは特殊な設計をしない限りバックドライバビリティが失われる例であり、ダイレクトドライブ (DD) モータ [5] は極めて高いバックドライバビリティを実現できる例である。通常、バックドライバビリティは上記の両極端な例の間に位置する。

図 1 Conceptual diagram of transmission with reduction ratio

原稿受付 2013 年 4 月 10 日

キーワード: Backdrivability, Electro-Hydrostatic Actuator

*〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

図2 Close-up view of force balance in backdrivable and non-backdrivable actuators

駆動系のバックドライバビリティが十分でない場合はバックドライバビリティを高める力制御が用いられる。Ott ら [6] のイナーシャスケリングや Tien ら [7] の摩擦補償などはこの制御の典型的な例である。制御によるバックドライバビリティと駆動系の受動的な特性を区別するために特に明記しない場合にはバックドライバビリティは受動的な特性のことを示すことにする。制御によりバックドライバビリティを高めても、衝突など広帯域な外力が加わった場合には駆動系の受動的なバックドライバビリティが特性を決定し、これが低いと制御系の不安定化や駆動系の破損の原因となりうる。

2.2 バックドライバビリティの阻害原因

駆動系のバックドライバビリティを損ねる主な原因は摩擦と慣性である。ロボットアクチュエータとして多く用いられている歯車型の駆動系では入力軸側の摩擦は出力軸からは見かけ上減速比倍、慣性は減速比の二乗倍になるため、これを出力軸から駆動するためには大きな力が必要となる。特に問題となるのは歯車のすべり摩擦などの駆動系内の固体摩擦である。固体摩擦は伝達トルクに比例するので大きな慣性を駆動するためにはより大きな摩擦に抗わなければならない。例えば、図1においてベアリングの摩擦が0である理想的な場合を考える。このとき、図2において、(a)はウォームギアのように駆動力が $\mathcal{C}_f$ に入る場合水平方向の力のつりあいは摩擦力で保たれるため M_1 は駆動されず非バックドライバブルとなる。(b)の場合、バックドライバブルであるが、減速比が高い場合など駆動力が円すい面に近い場合には大きな力を加えないと静止摩擦に打ち勝って駆動されず、バックドライバビリティは低い。これは単純な摩擦円すいだけでは説明できず、LuGre モデル [8] など摩擦面の微小変形を考慮したモデルが必要である。後述する EHA を用いると図2(c)のように本質的に摩擦が小さくなりバックドライバビリティが改善する。

バックドライバビリティという観点のみから考えると DD

図3 Conceptual models of various backdrivable actuators

モータが理想的だが、実際にはモータが効率よく動作する回転数・トルク領域と、ロボットが必要とする回転数・トルク領域には乖離があり、これらを合わせるためにも減速機はなくてはならない。特に、ロボット用小型高パワーモータは高回転数・低トルク型であることが多く、このようなモータを用いるためには高い減速比が必要となる。

2.3 弾性や消散性を用いたバックドライバビリティ

減速比によって関係付けられた出力軸から見たモータの摩擦とトルクの関係の崩すために Pratt と Williamson [2] は SEA を開発した。SEA の諸問題を解決し性能を高めるために可変剛性アクチュエータ [9] が考案され、ロボットに用いられてきている [10]。SEA やその派生形のアクチュエータで実現されるバックドライバビリティは駆動系の出力と入力周波数選択的に切り離しているのに等しい。

ダイナミクスを切り離す作用にダンパを用いる方法も提案されている [11][†]。明示的なダンパを用いなくとも同様の作用が実現できることも報告されている [12]。ところが、弾性や消散性により実現されるバックドライバビリティはダイレクトドライブモータのバックドライバビリティと本質的に異なる (図3 参照)。

2.4 全・出力バックドライバビリティ

上記の違いは、DD モータのようにアクチュエータの被駆動イナーシャ全体が駆動されるか SEA のようにその一部が駆動されるかの差で理解できる。被駆動イナーシャ全体が駆動されるバックドライバビリティを全バックドライバブルと呼び、被駆動イナーシャの一部が駆動される場合を出力バックドライバブルと呼ぶ [13]。

出力バックドライバブルであるが全バックドライバブルでない駆動系は、被駆動状態であるときに供給されたエネルギーを駆動系内で蓄積、もしくは消費する必要があるが、これには限度があり、出力バックドライバビリティの限界を決める。この限度を超えると駆動系は破壊に至る可能性がある。これに対して全バックドライバブルな系は加えられたエネルギーが全イナーシャの運動エネルギーに変換されるかモータで回生されるため駆動系の信頼性が高い。

[†]後述するが Chew ら [11] の Series Damping Actuator は図3(c)の一つの例であり、実現例はこれにとどまらない。

図 4 Structure of electro-hydrostatic actuator

3. 電気静油圧アクチュエータ (EHA)

電気静油圧アクチュエータ (EHA) は容積制御型の分散油圧駆動系であり、ハイドロスタティックトランスミッション (HST) をサーボモータなどで駆動する (図 4 参照)。EHA に対して歯車型の駆動系は EMA (Electro-Mechanical Actuator) と呼ばれる。EHA は Fly-by-Wire の航空機で用いられている。EHA を用いたロボットの研究は Bobrow ら [14] の研究が先駆的である。

EHA は一対のポンプと油圧モータから構成される。サーボ弁を用いる抵抗制御型の油圧駆動と異なり、駆動に必要なエネルギーのみをポンプで供給し油圧モータを制御するため効率が低い。また分散油圧系であるので長い配管が必要なく設計が単純化でき、故障が駆動系全体に影響しない長所がある。ポンプは各関節に配置するが、油圧モータとポンプの接続は流体で行われるので、ポンプの配置自由度は高くこの点でも EMA に対しても優位である。EHA は動力伝達原理が単純で応力集中が少ないため、EMA に対して耐衝撃性や信頼性に勝る。また、作動油の圧力を計測することで発揮トルクの推定を行える長所もある。

4. EHA のバックドライバビリティ

EHA の減速作用はパスカルの原理とてこの原理 (受圧部のモーメントアームの違い) により行われるので、伝達トルクに比例した摩擦力が発生せず、優れたバックドライバビリティを実現できる (図 2(c) 参照)。

油圧ポンプや油圧モータには高圧側から低圧側への内部漏れがある。体積効率の観点からは内部漏れは望ましくないが、バックドライバビリティを高める効果がある。いま、内部漏れが Couette-Poiseuille 流で近似できたとし、その隙間が十分小さいとレイノルズ数も小さくなり内部漏れの流れが層流であると近似できる。このとき内部漏れの流量とポンプもしくはベーンモータの圧力差は比例関係になり、これは、EHA に作用する外力とポンプ・油圧モータ間の速度差に比例関係があることを意味するため、EHA が図 3(c) で表される駆動系の一種であり出力バックドライバブルであることを示す。この考えは Series Damping Actuator [11] を内包するさらに一般的な概念であるので Series

図 5 Structure of trochoid pump

図 6 Structure of double vane motor

Dissipative Actuator と呼ぶ [12]。Series Damping Actuator は大きな外力が加わったときにアクチュエータが破壊に至る可能性があるが、EHA は全バックドライバブルであるので、この欠点を克服している。

すなわち、EHA は出力バックドライバブルかつ全バックドライバブルであり、これらが異なる外力状態で発揮されるため、バックドライバビリティに優れるのである。

5. バックドライバブルな EHA の開発

EHA のバックドライバビリティを高めるためにはトロコイドポンプと揺動ベーンモータを用いた構成法が有効である。トロコイドポンプは歯数が 1 異なるトロコイド内歯歯車と外歯歯車を組み合わせたもので図 5(a) に示す構造を持つ。トロコイド歯車間のすべりは非常に小さくポンプの低摩擦化に有効であるほか、構造が単純で小型軽量化に向いている。歯車と壁面の接触を防ぐだけでなく、歯車の軸間を正確に保持することが低摩擦性の向上で重要である。軸間が不正確だと歯車間のすべりが大きくなり摩擦ロスの増大を招く。歯車を正確に、かつ高い剛性で保持するため、本研究では図 5(b) に示すように各歯車をスラスト予圧を施した一対のボールベアリングで保持した。低摩擦油圧モータは回転型のピストンである揺動ベーンモータが適している (図 6 参照)。ベアリングを用いてピストンに相当するベーンをケースに対して正確に支持でき、隙間の設計で漏れと摩擦の最適化が可能になる。本研究ではベーンもポンプと同様、スラスト予圧したボールベアリングで支持した。

図 7 Outlook of developed EHAs in various scales

開発した EHA の一例を図 7 に示す。このように上記原理を用いたアクチュエータは様々なスケールのロボットに使用可能であり、すべての例において高いバックドライバビリティを実現できている。

6. お わ り に

油圧駆動は歯車減速機にない様々な利点を持っている。本研究ではそのなかで力制御におけるバックドライバビリティの重要性に注目し、これを高める EHA の構成法を研究しその有効性を示してきた。本稿では駆動系のバックドライバビリティを解説し、EHA が有効である理由ならびに、バックドライバビリティを高めた構成例を説明した。

謝 辞 本研究は文科省科研費「身体運動と言語を統一した人間・機械コミュニケーションの成立」(代表：中村仁彦, 20220001) ならびに JSPS 科研費「二関節筋と並列弾性要素を有する大出力油圧脚機構の研究」(代表：神永拓, 23760219) の支援を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- [1] G. Hirzinger, J. Butterfaß, M. Grebenstein, M. Hähle, H. Liu, I. Schaefer and N. Sporer: "A Mechatronics Approach to the design of light-weight arms and multifingered hands," Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.46–54, 2000.
- [2] G. A. Pratt and M. M. Williamson: "Series Elastic Actuators," Proc. of IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.399–406, 1995.
- [3] 神永, 田中, 甘利, 丹羽, 中村: "感度関数増大によるアシスト制御を行う静油圧駆動膝用パワーアシストの開発", 日本ロボット学会誌, vol.29, no.7, pp.609–618, 2011.
- [4] 本間, 浦井: "フルードパワーシステムのエネルギー関連への技術展望", 日本機械学会年次大会講演論文集, F112001, 2012.
- [5] H. Asada and T. Kanade: "Design of Direct-Drive Mechanical Arms," Trans. ASME J. Vib. Acoust., vol.105, no.3, pp.312–316, 1983.
- [6] C. Ott, A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger: "A passivity based

- cartesian impedance controller for flexible joint robots. Part I: Torque feedback and gravity compensation," Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.2659–2665, 2004.
- [7] L. Tien, A. Albu-Schäffer, A. De Luca and G. Hirzinger: "Friction Observer and Compensation for Control of Robots with Joint Torque Measurement," Proc. of IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3789–3795, 2008.
- [8] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Åström and P. Lischinsky: "A New Model for Control of Systems With Friction," IEEE Trans. on Automatic Control, vol.40, no.3, pp.419–425, 1995.
- [9] K.F. Laurin-Kovitz, J.E. Colgate and S.D.R. Carnes: "Design of Components for Programmable Passive Impedance," IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.1476–1481, 1991.
- [10] M. Grebenstein, M. Chalon, G. Hirzinger and R.Y. Siegwart: "Antagonistically driven finger design for the anthropomorphic DLR Hand Arm System," Proc. of 10th IEEE-RAS Intl. Conf. on Humanoid Robots, pp.609–616, 2010.
- [11] C.-M. Chew, G.-S. Hong and W. Zhou: "Series Damper Actuator: A Novel Force/Torque Control Actuator," Proc. of 4th IEEE-RAS Intl. Conf. on Humanoid Robots, pp.533–546, 2004.
- [12] 神永, 甘利, 片山, 中村: "アクチュエータの力伝達原理と構造的バックドライバビリティ—減衰結合型液圧アクチュエータとロボットハンドへの応用—", 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.467–468, 2010.
- [13] 神永, 片山, 甘利, 小野, 下山, 中村: "バックドライバブルな油圧駆動ロボットハンドにおけるインピーダンス制御と把持", 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3A1-06, 2009.
- [14] J. E. Bobrow and J. Desai: "Modeling and Analysis of a High-Torque, Hydrostatic Actuator for Robotic Applications," Experimental Robotics, pp.215–228, 1989.

中村仁彦 (Yoshihiko Nakamura)

東京大学大学院教授, 情報理工学系研究科知能機械情報学専攻, 京都大学工学博士。1982 年京都大学大学院博士課程退学。京都大学助手, カリフォルニア大学サンタバーバラ校助教授, 準教授を経て, 1991 年 4 月より東京大学に勤務。ロボットの運動学, 動力学, 制御, 脳型情報処理, 特にヒューマノイドや人間の運動・力学・記号情報の計算論の研究に従事。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本コンピュータ外科学会などの会員。IFTOMM, President (2012–2015)。TUM Distinguished Affiliated Professor of Technische Universität München. Foreign Member of Academy of Engineering Science of Serbia. 日本機械学会フェロー。IEEE Fellow. Fellow of World Academy of Arts and Science. 防災害ロボティクスタスクフォースアンカーマン。(日本ロボット学会正会員・フェロー)

神永 拓 (Hiroshi Kaminaga)

東京大学大学院助教, 情報理工学系研究科知能機械情報学専攻, 東京大学情報理工学博士。1997 年 3 月上智大学理工学部機械工学科卒業。1999 年 3 月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 同年 4 月アジレント・テクノロジー株式会社入社。2002 年 5 月株式会社ゼットエムピー入社。2009 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。2008 年 4 月日本学術振興会特別研究員 (PD)。同年 10 月より東京大学に勤務。ロボットの力感受性を高める駆動機構およびロボットの歩行に関する研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE 会員。(日本ロボット学会正会員)