

力制御機能を備えた油圧駆動ロボットについて

1. 背景

工場はもちろん、建設、医療、福祉、宇宙等、様々な作業現場で人と協調しながら複雑な作業を行う高性能ロボットが求められている。

現状、過酷な環境で大きな力を出して作業できる強靱な機械は、油圧ショベルだけと言っても過言ではなく、日本が現在世界トップシェアを誇る数少ない機械となっている。油圧ショベルは東日本大震災における原発事故の現場でも用いられ、がれき撤去や除染作業にも大いに活躍した。また、油圧ショベルは危険な場所で作業を行えるよう、遠隔で機械の位置を把握し自動的に運転を行うシステムは大手建機メーカーを中心に既に開発が進められている。しかし、油圧を使った単体の機械で高度な作業を自動で行う「ロボット化」はほとんど進んでいないのが現状である（油圧ショベルは、本来人が操縦する機械であるため、複雑な作業の自律化は需要が低い）。

一方、日本が世界トップシェアを誇る産業用ロボットにおいては、自動車組立作業に代用されるように、高精度な繰り返し位置決め制御が要求され、高性能モータと高性能ギヤを組み合わせた電動ロボットが長らくその要求に答えてきた。しかし、大きな力を瞬時に発生させたり、人間のように微妙に力を加減しながら作業する用途には適しておらず、特殊な専用工具を別途取り付けることで対応してきた。最近、ドイツの KUKA 社がはじめて関節に力センサ（ 1 ）を組み込むことで力を自在に制御する産業用ロボットを販売し、シェアを拡大しているが、従来の電動ロボットに力センサを組み込んだものであり、ギヤの出力軸を負荷に直結する場合に必ず直面する脆弱性が克服されていない。

2. 開発の概要

立命館大学理工学部ロボティクス学科・ヒューマノイドシステム研究室は、油圧ショベルの力強さと産業用ロボットの緻密さのそれぞれの利点を統合することで、大きな力を精密かつ自在に操作可能なロボットを実現することを目指してきた。

今回、軽量かつパワフルな油圧駆動ロボットリンク（以下、ロボットと呼ぶ；正確には関節部を含むロボットリンク）と専用制御装置の開発に成功したので公開する。油圧ショベルのような大型のロボットではなく、人と同じくらいのサイズで、人と同じスピードと力で動作し、人と同じように柔軟で細かく力加減でき、しかも軽量で強靱なハードウェアを実現することを目指した。

同様のロボットは米国でも開発中であるが、柔軟に力が制御できて、スピードを兼ね備えたロボットとしては世界でも初めてである。

開発したロボットの概観を図 1 に示す（外装を取り外した状態）。油圧ショベルに似た構造を持ち、軽量で強靱である。重さは 6kg で、成人男性の脚部を参考に設定した。油圧ホースを介して外部のポンプで駆動される。同時に開発した専用制御装置により、位置とスピードの制御はもちろん、力センサによる力覚情報を高速でフィードバックすることによる精密な力制御ができる。リンク部がカーボン繊維強化プラスチック製である点と、力制御による柔軟な運動制御が可能である点が、米国で開発中のロボットと比較した特長である。代表的な実験結果の動画を下記 URL にリンクした。

油圧駆動ロボットの動画 URL <http://p.tl/clyN>

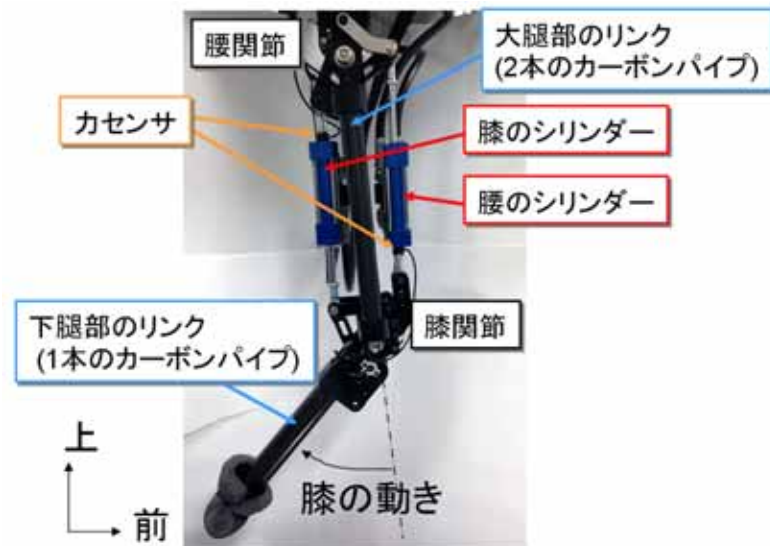


図1 ロボットの概観。ただし、外装ははずしている。大腿部と下腿部とで構成されている。2本の油圧シリンダがリンク機構を介して腰関節と膝関節を駆動。関節には角度センサが、油圧シリンダには力センサがそれぞれ組み込まれている。リンクはカーボン繊維強化プラスチックでできている。腕ロボット（マニピュレータ）としても利用可能。

3. 技術の詳細

1) 軽量化と強靭化

土木工事で活躍している油圧ショベルを参考に、油圧シリンダをトラス構造（2）の一部として利用し、油圧シリンダと構造部材にかかる力を一方向に整え、その方向にカーボン繊維強化プラスチック素材の強度を持たせることで、軽量化と強靭化を実現した。カーボン素材は茨木工業株式会社と東名工業株式会社の協力を受けた。

2) 油圧シリンダによる力制御の実現

油圧シリンダの力を測定する力センサと独自開発した専用制御装置を使って油圧シリンダの発生力を細かく操作することにより、関節のトルク（回転力）を自在に制御できる。例えば図1のロボットは0 Nm（脱力状態）から最大300 Nm（腕を横に伸ばして10kgの米俵を6つぶら下げるときに肩にかかる力）までの大きなトルクが発揮することが可能である。人間は走行時にこれだけの大きなトルクを発揮すると言われている。

従来の電動ロボットではギヤを使ってトルクを稼ぐが、ギヤが持つ慣性が邪魔をしてアクチュエータの応答性が大きく低下するため、このような大きなトルク制御は実現困難である。例として、同じ本体質量の歩行ロボットを仮定し、現在の典型的な構成であるモータとハーモニックギヤ（3）の組合せと同スピード条件で比較した場合（ただし、バッテリーと油圧ポンプは搭載せず）提案した油圧駆動では、3倍以上のトルクが発揮できることがわかっている（研究室の独自調査結果）。

油圧シリンダには小型で高応答なサーボバルブ（4）が取り付けられている。これにより、シリンダの速度を応答性良く操作可能であるが、シリンダに力センサを追加し、その力情報をフィードバックしてバルブを操作することで力制御が実現可能である（高性能油圧プレス等で利用されている）。今回、油圧の複雑なダイナミクスを考慮した制御アルゴリズムを10kHzで高速に演算する制御装置の開発に成功したため、このような応答性の高い力制御が実現できた。なお、サーボバルブの開発はPSC株式会社の協力を得た。また、力センサは東洋測器株式会社の協力を得た。力を応答性良く制御できる様子を図2に示す。また、連続跳躍の様子を図3に示す。いずれも上記映像の中にある。

力制御を用いた多関節ロボットの全身運動制御アルゴリズムは、JST 計算脳プロジェクトにおいて開発され、特許公開された技術で、学術論文[1]で発表済みである。一方、今回独自に開発した専用制御装置に搭載された力制御技術は特許出願を検討中。なお、本成果の一部は5月30日の平成25年春季フルードパワーシステム講演会での講演（参考文献[2][3]）で発表することを予定している。

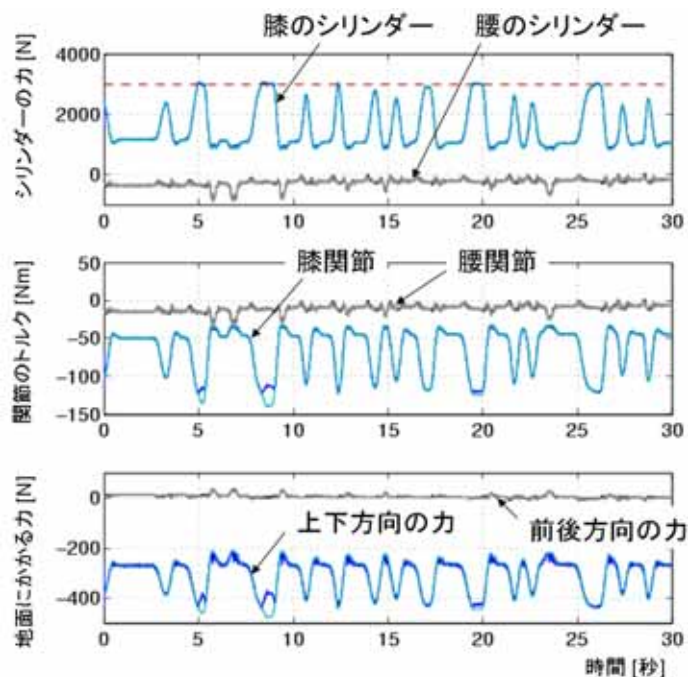


図2 力制御の様子を示したグラフ。人が手でロボットを上から押したときの反応を示している（ビデオ参照）。上からシリンダーの力（腰と膝）、関節トルク（腰と膝）、床反力（前後方向と上下方向）で、それぞれ目標値（薄い線）と実際値（濃い線）で示されている。トルクと床反力の目標値と実際値に所々誤差がある理由は、安全のためにシリンダーの力を制限しているからである。この例では、地面にかかる力は約400N（40 kgf）となっている。

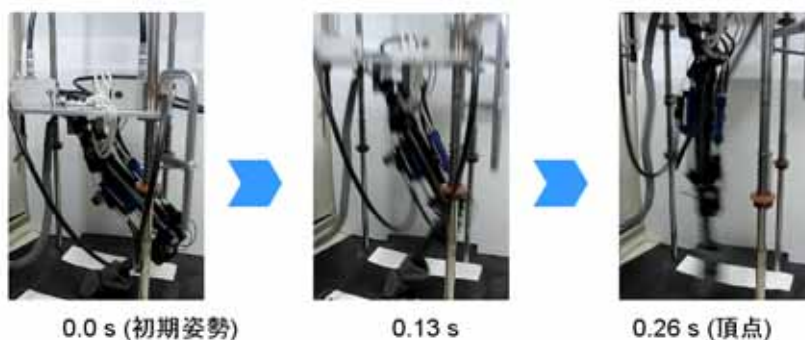


図3 連続跳躍実験の様子（ビデオの最後）

3) メリット

- ・ロボットの重量、複雑さ、脆弱さは、これまで、ロボットの全体の動き（2足歩行など）を制御するソフトウェア開発の障害になっていたが、今回、軽量かつ強靱なロボット開発に成功したことにより、安全かつスピーディにソフトウェア開発ができるようになる。
- ・同じ体重と寸法で、人間と同等のスピードと力を出せることが可能になった。実際、この関節を用いて人間の大腿部を模して作った図1のロボットは0.05秒で90度動かせるスピードを持ち、本体重量6kgでありながら、最大200kg（直立姿勢を除く）の荷重を支えることができる。
- ・同じ本体重量の電動ロボットの3倍の力が発揮できる。壊れにくく、環境にも強い。
- ・部品点数が少ないため、従来の電動ロボットよりも低価格で製造可能と予想される。
- ・力制御により、ユーザーが自分の身体を想像しながら直感的にロボットを操作可能で、難しい作業を直接教示したり学習させたりすることができる。一部はJST 計算脳プロジェクトにおいて発表されている（参考文献[4]）。
- ・油圧を採用しているため、スケールアップが極めて容易である。つまり、サイズを変更するだけで、何ら追加技術開発なしに必要なサイズで必要な力を出せるロボットが実現できる。

4) 応用可能性

上記のメリットにより、産業用ロボットはもちろん、過酷な環境でスピーディかつ高負

荷な作業達成が要求される重作業支援ロボットや災害対応ロボットへの応用が期待される。

しかも、ハイパワーでありながら、人間のようには、脱力したり、小さい力から大きい力まで、微妙に力を加減することができるので、ユーザーが自分の身体を想像しながら直感的に操作可能で、難しい作業を教示したり学習させる用途に威力を発揮し、福祉機器、宇宙医学、スポーツシミュレータなどへの応用が期待される。

5) 他の技術との違いと競合

米国ポストダイナミクス社において軍の支援をうけて油圧ロボットの開発が進んでいるが、軍用であり、技術の詳細は明らかにされていない。仮に米国のロボットが本開発のような精密なトルク制御を実装し、トルク制御に基づく運動制御を実現した場合でも、技術的には同レベルである。制御装置の内部以外はずでに公開されている技術であり、実用化の障害にはならない。米国に続き、イタリア、韓国でも同様のロボット開発が進められており、熾烈な国際的競争が始まりつつあるが、本開発により、幅広い応用可能性のある油圧ロボットが完全に国産化され、国際的競争の最前線に立つことができた。

4. 今後の展開

現在、本開発の有効性を国内の一般の方や企業に知っていただくため、本ロボットを利用した人型2足歩行ロボットと4脚歩行ロボットを同時開発中で、年度内に様々なパフォーマンスを披露する予定。内燃機関またはバッテリー駆動の油圧ポンプを搭載した場合のスピード限界やエネルギー消費について詳細に調べる予定である。

油圧はシリンダーの径を2倍に増やせば力が4倍に増えるので、油圧ショベルと同じく、小型から大型まで、簡単に必要なロボットをラインナップすることができる。

最後に、本ロボットは大学の研究室で設計され、協力企業の製品を複数組み合わせで製作されたものである。現時点では開発コストは電動ロボットとほぼ同等であるが、一旦メーカーが開発に乗り出せば、大幅な低コスト化と高性能化が可能である。技術力のあるメーカーとともに一刻も早く実用化したい。

5. 参考文献

- [1] 玄相昊, 複数の接地部分と冗長関節を有するヒューマノイドロボットの受動性に基づく最適接触力制御, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.2, pp.178-187, 2009
- [2] 末若大輔, 石田浩基, 玄相昊, 油圧式軽量2足歩行ロボットの開発(第1報): 機構設計とシミュレーション. 平成25年春季フルードパワーシステム講演会, 5月, 2013.
- [3] 米田知生, 細山貴弘, 玄相昊, 油圧式軽量2足歩行ロボットの開発(第2報): カサーボ駆動試験, 平成25年春季フルードパワーシステム講演会, 5月, 2013
- [4] JST 国際共同研究「計算脳プロジェクト」 終了報告書, 2009

6. 用語説明

1. 力センサ

力を測定するためのセンサ。代表的なものにひずみゲージがある。

2. トラス構造

家屋や橋梁などで用いられる構造形式のひとつで、梁同士の接続部をピン接合(自由に回転する支点)としたもの。この構造により、梁には主に長手方向に引張と圧縮の力がかかり、曲げる力はほとんどかからない。

3. ハーモニックギヤ

楕円と真円の差動を利用した減速機で、波動歯車装置とも呼ばれる。ハーモニックドライブはハーモニック・ドライブ・システムズ社の登録商標。他の歯車と比較して軽量・コンパクトでありながら高い減速比を持ち、バックラッシュも少ないという特徴がある。多くの産業ロボットや2足歩行ロボット等に用いられている。

4. サーボバルブ

油圧バルブの一種で、油の流れの方向を高応答かつ無段階に制御できるもの。油圧駆動の試験機やプレス、航空機やF1レーシングカーの翼の制御等に用いられている。