

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	タフロボット用軽量・低摺動・大出力油圧アクチュエータの開発と特性評価
Title	Development and Test of Lightweight, Low Friction, High Power Hydraulic Actuator for Tough Robots
著者	辺見森象, 廣田善晴, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一
Author	Morizo Hemmi, Yoshiharu Hirota, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori
掲載誌/書名	ロボティクス・メカトロニクス講演会2017講演論文集, Vol. , No. , pp.
Journal/Book name	Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Issue date	2017, 5
URL	<a href="http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html">http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html</a>
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# タフロボット用軽量・低摺動・大出力油圧アクチュエータの開発と特性評価

## Development and Test of Lightweight, Low Friction, High Power Hydraulic Actuator for Tough Robots

○学 辺見森象 (東工大) 廣田善晴(東工大)  
正 難波江裕之 (東工大) 正 遠藤玄(東工大)  
正 鈴森康一(東工大)

Morizo HEMMI, Tokyo Institute of Technology, hemmi.m.aa@m.titech.ac.jp  
Yoshiharu HIROTA, Tokyo Institute of Technology  
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology  
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology  
Kouichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Disaster responding robots mainly uses electromagnetic motors and reducers, but they are weak to shock and spoil robots' toughness. Hydraulic actuators, on the other hand, have not only shock-resistance, but also high F/M ratio and backdrivability. They are useful characters to disaster responding robots. But hydraulic actuators were often used to constructing machines or plant facilities, they are too big, heavy, and high friction to apply them to robots. In this paper, we developed a new hydraulic cylinder for tough robots and conducted evaluation tests. The cylinders realize lightweight by utilizing Multi-Directional Forging magnesium alloy, hi power by setting its driving pressure 35 MPa, and high controllability by applying two types of low frictional pistons: one is utilizing a fluid bearing technology and the other is common combination packing. The cylinder achieved about 4.4 times high F/M ratio to conventional cylinders. And in evaluation tests, they performed minimum driving pressure 0.01 MPa, which is 1/30 smaller friction than conventional cylinders.

**Key Words:** Tough robotics, Hydraulic actuators, light weight

### 1. 緒言

現在多くの災害対応ロボットはアクチュエータに電磁モータと減速器を用いているが、減速器は衝撃に弱く、ロボットのタフさを損なう原因となっている。これに対し、油圧アクチュエータはその仕組みから衝撃に強いだけでなく、高い F/M 比やバックドライバビリティといった、災害環境下で使われるロボットに適した特徴を持っている。ただし、油圧アクチュエータの主な用途は工場機械や建築機械であり、大きく重い、摺動抵抗の高いものが一般的であるため、直接ロボットに応用することは難しい。この研究では、油圧メーカーとの協力の下、ロボット特有の要求に応えた油圧シリンダを開発するとともに、このシリンダの評価実験を行う。

同じようにロボット用油圧アクチュエータを開発した例としては iit の HyQ[1], HyQ2max[2]とアクチュエータ ISA[3]や、SJTU の BabyElephant[4]とアクチュエータ Hy-Mo[5]が知られているが、本研究では特に低摺動、大出力化に重点を置く。

### 2. 軽量・低摺動・大出力油圧アクチュエータの開発

ロボット特有の要求に応えるため、新たな油圧シリンダを油圧メーカーの協力のもと開発した。シリンダを図 1 に示す。

#### 2.1 軽量・大出力化

軽量・大出力化のため、図 2 のように構造材の大部分に多軸鍛造マグネシウム合金を用いた。多軸鍛造(MDF)マグネシウム合金はマグネシウム合金に結晶粒微細化処理を行ったもので、通常マグネシウム合金に対して強度と耐食性が向上している。これにより、表 1 のようにシリンダ本体重量が 600 g

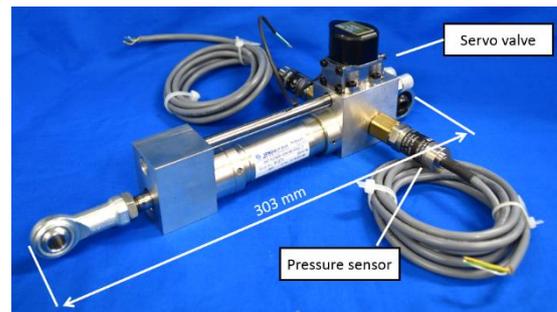


Fig. 1: Developed hydraulic cylinder

でありながら JIS 規格外の 35 MPa での使用が可能であり、シリンダ単体の F/M 比は 11 kN/kg まで向上した。

#### 2.1 低摺動化

位置決めや力制御の精度改善、圧力センサによる発生力推定を行うためには、シリンダの摺動抵抗は低いことが望ましい。しかし従来のシリンダでは、ピストンで区切られた部屋間での漏れである内部漏れを防ぐために強力なパッキンを用いており、摺動抵抗は高くなっていた。本研究では、低摺動化のために主な抵抗元であるピストンパッキンを変更したものを二種類開発した。各シール方法の概略を図 3 に示す。

##### 2.1.1 流体軸受けシリンダ

流体軸受けシリンダは、抵抗のもとであるピストンパッキン

Bore diameter	20 mm
Stroke	100 mm
Driving pressure	35 Mpa
Thrust force	11 kN
Dry weight	0.60 kg
F/M ratio	18.3 kN/kg

Table 1: Specification of the developed cylinder

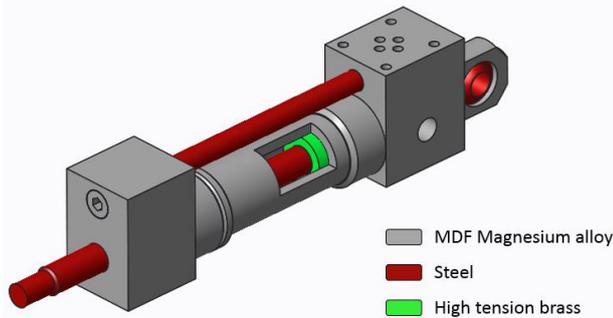


Fig.2: Schematic figure of developed cylinder

ンを取り扱ったシリンダである。内部漏れを軽減するため、ピストン表面にはラピリンスという溝が追加されている。また、従来のシリンダはピストンへの横荷重をウェアリングという部品が受け持ち、ピストンとシリンダ内面の接触を防いでいた。このシリンダではウェアリングも省略し、横荷重に対してはピストン偏心時の内部漏れの流量差から復元力が働くようになっている。

### 2.1.2 低摺動パッキンシリンダ

低摺動パッキンシリンダは、ピストンパッキンを低摺動な組み合わせシールとしたものである。摺動するシールリングはテフロンでできており、JIS規格のUパッキンよりも低い摺動抵抗が期待できる。

## 3. 軽量・低摺動・大出力油圧アクチュエータの評価実験

前章のように開発されたシリンダを、実際に動作させ評価実験を行う。

### 3.1 ステップ応答測定

ステップ応答測定は、図4のような装置で行う。実験システムは油圧ポンプ(標準油圧ユニット, 油研工業製), サーボバルブ(HS210-006, PSC製), サーボバルブ用アンプ(CA250-003-001, PSC製), デジタルシグナルプロセッサ(DSP: DS1104, dSPACE製), ポテンシオメータ(LP-250FJ, 緑測器製)及び試験シリンダにより構成される。制御はポテンシオメータからの位置信号をDSPで処理し、それに基づいた指令電圧をアンプ, サーボバルブに与えることで行い、フィードバック制御系を構成する。また、サーボバルブ用アンプの機

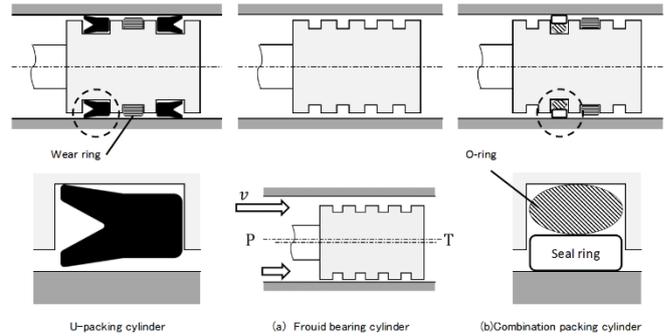


Fig.3: Schematic figures of fluid bearing pistons and combination packing

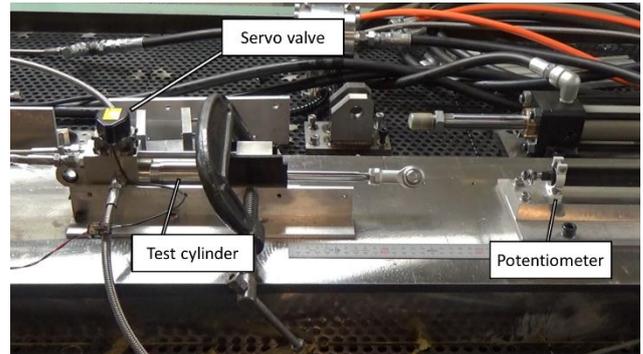


Fig.4: Step response measurement

能により、200 Hzのディザを加えている。ディザは、制御信号に重畳される微小な揺らぎであり、位置制御などの精度改善が期待できる。実験は比例制御で行った。また、サーボバルブの定格圧力が21 MPaであることから、実験は21 MPaで行った。それぞれのシリンダでの結果を図5に示す。低摺動パッキン付きシリンダの結果では、オフセットは0.1~0.2 [mm]と小さく、変位から計測した時定数はそれぞれ0.009である。対して、流体軸受けシリンダでは約4.5 mmのオフセットが発生し、時定数も0.017と低摺動パッキン付きシリンダに対して大きくなっている。これは両シリンダ間の相違点から、内部漏れの影響だと考えられる。特に流体軸受けシリンダでは、位置指令が一定の状態でもサーボバルブがほぼ全開となっており、14 l/min程度の大きな内部漏れがあると考えられる。このような大きな内部漏れが発生した要因として、大径化による相対的な精度や偏心の悪化が考えられる。改善方法としては、工作精度や隙間設計の見直し、さらなる小径化などが考えられる。

### 3.2 最低動作差圧測定

油圧シリンダの摺動抵抗の評価指標として、最低動作差圧がある。これはシリンダ単体がスティック・スリップを起こさず滑らかに動作できる最低の圧力である。最低動作差圧測定を図6のような装置で行った。このシステムは油圧ポンプ(標準油圧ユニット, 油研工業製), 流量比例弁(ELDFG-01EH-20-3C2L-XY-C-D-, 油研工業製), ノンリーク開閉切替弁

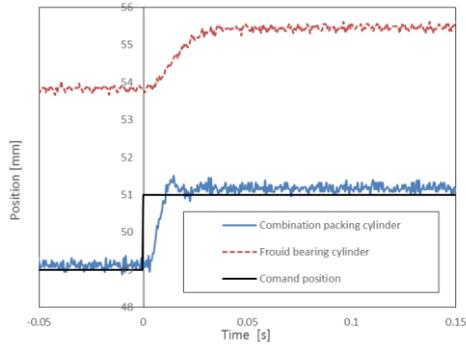


Fig.5: result of step response measurement

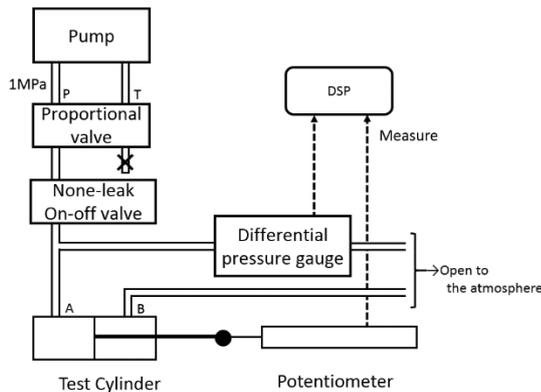


Fig.6: Experimental system for measuring minimum driving pressure

(LVSH-203G-WD24, フジエンジニアリング製), デジタルシグナルプロセッサ (DSP: DS1104, dSPACE 製), 微差圧計 (PDU-A-1MP, 共和電業製), 動ひずみ測定器 (DPM-913B, 共和電業製), ポテンシオメータ (LP-250FJ, 緑測器製) 及び試験シリンダにより構成される。配管や比例弁の絞りによる抵抗が計測されることを防ぐため, 油圧の戻り (T) 側と微差圧計の低圧側を大気圧に開放したうえで, 電磁弁によって瞬間的に油路を開放し, 実験を行った。測定には DSP を用いるが, 制御は行わない。また, この状態では実験後にシリンダの動作によって初期位置に復帰できないため, 手でピストンを押し戻すことで計測を繰り返す。この方法ではピストン速度の制御が行えないため, それぞれのシリンダで実験中に記録された最低の動作差圧を結果として採用する。このとき, 読み取りは 0.01 MPa 単位で行う。サンプリング周波数は 2 kHz であり, ノイズ除去のためカットオフ周波数 2 Hz, 2 次のローパスバタワースフィルタを用いる。また, ポテンシオメータの計測値によってピストンの動作とスティック・スリップの発生を判定する。また, この実験の結果を表 2 に纏めた。ただし ( ) 内の数値は内部漏れが無く, 摺動抵抗が一定という仮定の下カタログ値からピストンの面積比によって換算したものである。表 2 のように, 二種類のシリンダはどちらも低い最低動作差圧を達成することができた。また, この実験中にスティック・スリップは確認されなかった。低摺動パッキン付きシリンダと流体軸受けシリンダを比較する

Table.2: result of minimum operating pressure measurement

	Minimum operating pressure [Mpa]	
	push side	pull side
Fluid bearing cylinder	less than 0.01	0.04
Combination packing cylinder	less than 0.01	0.01
Conventional JIS cylinder	0.3	(0.4)

と, シリンダの押し側では同等, 引き側では低摺動パッキン付きシリンダの最低動作差圧の方が低いという結果になった。

#### 4. 結論

構造材に MDF マグネシウム合金を用いるなどの工夫により, 従来よりも軽量, 高出力, 小型といった, ロボット用途に適した油圧シリンダを作ることができた。また, 開発した二種類のシリンダについて基礎特性試験を行い, 内部漏れの影響や低摺動化の効果を確認した。

#### 5. 謝辞

本アクチュエータの詳細設計, 試作において, JPN 株式会社 の多大な協力を頂いたので深謝する。本研究は, 総合科学・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」により, 科学技術振興を通して委託されたものです。

#### 参考文献

- [1] Claudio Semini, Nikos G. Tsagarakis, Emanuele Guglielmino, Michele Focchi, Ferdinando Cannella, Darwin G. Caldwell, "Design of HyQ – a Hydraulically and Electrically Actuated Quadruped Robot," IMechE Part I: J. Systems and Control Engineering, 2011
- [2] Claudio Semini, Victor Barasuol, Jake Goldsmith, Marco Frigerio, Michele Focchi, Yifu Gao, Darwin G. Caldwell, "Design of the Hydraulically-Actuated, Torque-Controlled Quadruped Robot HyQ2Max," TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 2016
- [3] Claudio Semini, Mike Baker, Kulkarni Laxman, Venugopal Chandan, T Maruthiram, Robert Morgan, Marco Frigerio, Victor Barasuol, Darwin G. Caldwell, Gonzalo Rey, "A Brief Overview of a Novel, Highly-Integrated Hydraulic Servo Actuator with Additive-M F. Gao, C. Qi, Q. Sun, X. Chen, and X. Tian, "A quadruped robot with parallel mechanism legs," in Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014, pp. 2566–2566. anufactured Titanium Body," IROS, 2016.
- [4] J. Wang, F. Gao, and Y. Zhang, "High power density drive system of a novel hydraulic quadruped robot," in ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014, pp. V05AT08A093–V05AT08A093.