T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	タフロボット用油圧シリンダを用いた耐衝撃脚機構
Title(English)	Shock-resistant Leg Using a Newly Developed Hydraulic Cylinder for Tough Robots
著者(和文)	谷晃輔, 辺見森象, 廣田 善晴, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一
Authors(English)	Kosuke Tani, Morizo Hemmi, Yoshiharu Hirota, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 予稿集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2019, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

タフロボット用油圧シリンダを用いた耐衝撃脚機構

Shock-resistant leg using a newly developed hydraulic cylinder for tough robots

○学　谷晃輔（東工大）　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）

Kosuke TANI, Tokyo Institute of Technology, tani.k.af@m.titech.ac.jp
Morizo HEMMI, Tokyo Institute of Technology
Yoshiharu HIROTA, Tokyo Institute of Technology
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Robots have a problem of locomotion in extremely rough terrain. Legged robots have a high locomotive ability because it is possible to select a landing point discretely. However, a combination of electric motors and speed reducers adopted in many legged robots has a problem such as low shock resistance. Because of low shock resistance, it is difficult for legged robots to operate motions with high shock such as jump off. Therefore, a leg mechanism which can be applied to legged robots and has high locomotive ability is required. In our previous researches, we developed a hydraulic cylinder for robots. In this paper, we focused on the controllability of this hydraulic cylinder and compared the controllability with the conventional product through measurements of damping performance. We also conducted an experiment for measuring the damping performance with a prototype of the leg mechanism using the hydraulic cylinder.

Key Words: Hydraulic actuators, Leg mechanism, Shock absorption

1　緒言

近年災害対応ロボットの需要が高まりつつあり，人間が立ち入っての作業が難しい環境での活躍が期待されている．災害対応ロボットにおける大きな課題の 1 つとして，極度の不整地での移動が挙げられる．ロボットの移動機構には様々なものが存在するが，その不整地踏破性能は災害地での移動に不十分なものが多い．不整地踏破性能の高い移動機構としては歩行ロボットに用いられる脚式移動機構が挙げられ，着地点を離散的に選ぶことができるため，車輪やクローラでは移動できないような不整地を移動することができる．しかし多くの歩行ロボットに採用されている電磁モータと減速機を用いた駆動方式では，飛び降りや踏み抜きなど，衝撃の加わる動作への対応が課題となっている．そこでこれらの問題を解決し災害時に代表される極限環境下での活動においても，落下や踏み抜きなどによる衝撃で壊れない，また衝撃を和らげる機構を持つタフな 2 足歩行ロボットが求められている．今回は衝撃に強く高出力な油圧駆動の脚機構に着目した．本研究室では軽量・高出力・低摺動という特徴をもつタフロボット用油圧シリンダが開発されており，今回はその制御性の高さに注目し，衝撃吸収性能の測定を通して従来品との制御性の比較を行う．またその油圧シリンダを用いた脚機構の試作機について衝撃吸収性能の測定を行う．

2　タフロボット用油圧シリンダの衝撃吸収性能

2.1　タフロボット用油圧シリンダの構造と特徴

従来の油圧シリンダは重量が重く，摺動抵抗が大きいため制御性の低いものが多かった．これらの問題を解決するため，本研究室では図 1 のタフロボット用油圧シリンダが開発された．このシリンダは従来の標準的な油圧シリンダに比べ約 4 倍の出力重量比と約 30 分の 1 の摺動摩擦を実現しており，本体にバルブと圧力センサを搭載することができる [1]．表 1 はシリンダの概要である．

2.2　「衝撃吸収性能」の定義と衝撃吸収理論

本論文では機構の衝撃吸収性能の評価を主題の 1 つとして扱うが，その評価指標に DP(Damping Performance) という値を定義する．DP の計算には機構の着地時に受ける床反力 (GRF:ground reaction force) の最大値 $\mathrm{GRF}_{\max}$ を用いる．床反力の最大値を衝撃を測る指標として用いることは先行例でも行われており [2][3]，ロボットの構成要素の破損を考える上で重要な指標となる．DP は衝撃吸収機構を適用する前の床反力 $\mathrm{GRF}_{\max}^{\mathrm{rigid}}$ と適用後の床反力 $\mathrm{GRF}_{\max}^{\mathrm{damping}}$ で表される式 (1) の値として定義する．

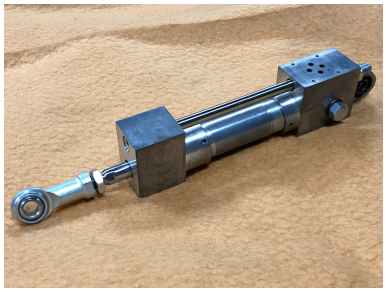


Fig.1 Developed hydraulic cylinder

$$\mathrm{DP} = 1 - \frac{\mathrm{GRF}_{\max}^{\mathrm{damping}}}{\mathrm{GRF}_{\max}^{\mathrm{rigid}}} \tag{1}$$

この値を比較することにより，脚機構に衝撃吸収機構を適用した時の効果の大きさを測ることができる．

質量 M のロボットが跳ね返らずに地面に着地することを想定したとき，ロボットの受ける力積 I は床反力 F と地面との接触時間 Δt，重心の速度変化 Δv を用いて

$$I = F\Delta t = M\Delta v \tag{2}$$

という関係が成り立つ．この関係式より，ロボットが着地時の衝撃を和らげるためには減速距離を長く取り着地動作中の加速度を

Table 1 Specification of the hydraulic cylinder

ピストンパッキン	低摺動パッキン
最低作動圧力 [MPa]	0.01 以下
シリンダ内径 [mm]	20
ロッド径 [mm]	12
ストローク [mm]	100
定格圧力 [MPa]	35
最大推力 [kN]	11.0
質量 [kg]	0.60
F/M 比 [kN/kg]	18.3

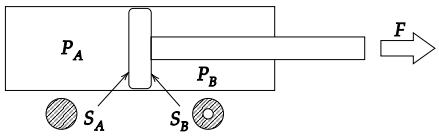


Fig.2 Model for calculating thrust force from pressure and piston area

小さくすることで，地面との接触時間をより長くすることが求められる．一般的に衝撃吸収機構としてはバネとダンパを組み合わせたものが用いられることが多く，今回の動作設計でもこの特性を利用する．

2.3 制御系の設計

一般に衝撃吸収機構にはバネとダンパが用いられる．そこで今回の機構でも油圧シリンダ内の圧力を制御することによりバネと同じ特性を実現することを目標とする．ここでは油圧シリンダのコンプライアンス制御方法として，圧力センサとサーボバルブを用いた広く知られた手法を用いる．ここでシリンダ内の圧力とピストン面積を図 2 のように定義する．

以下ではロボットが行う制御について簡潔に述べる．まず各ポートに取り付けられた圧力センサによりシリンダの推力

$$F = P_A S_A - P_B S_B \tag{3}$$

を計算する．ここで目標とするバネ定数 K を設定し，着地時からのロボットの重心高さの変位 Δh に対して

$$F = K\Delta h \tag{4}$$

となるようにサーボバルブの開口面積を制御する．サーボバルブはポンプからの圧力を A ポートもしくは B ポートへ選択的に接続することができ，その流路の面積を連続的に変化させることができる．ポンプに接続されていないポートはタンクと接続され，大気圧に開放される．油圧シリンダ制御には PD 制御を用い，制御周期はバルブの応答周波数 120 Hz に対して十分速い 1 kHz とした．制御系の構成図が図 3 である．

以上のように油圧シリンダ内圧を制御することでバネのような特性を実現することができる．また実際には作動油の運動により抵抗が発生し，ダンパとしての特性も生み出される．これらの特性により床反力を小さくすると同時に着地動作中にエネルギーを散逸させることが可能である．

2.4 耐衝撃性試験

シリンダ単体の衝撃吸収性能を既存のシリンダと比較することを目的とし，図 4 に示す実験装置を製作した．装置には油圧シリンダを鉛直方向に拘束できるようになっており，タフロボット用油圧シリンダと既製品の油圧シリンダの 2 種類で実験を行なった．今回既製品の実験の際にはミニ油圧シリンダ [4]（JPN 社，PH-1CA20 × 100T）を用い，開発したロボット用シリンダと寸法と配管条件を揃えた．ミニ油圧シリンダはピストンパッキンに O リングを採用しており，低摺動であることから従来品の中でもロボット用に適している．実験では 15 kg の錘を乗せて高さ 300mm から落とし，着地の際の床反力を共和電業のロードセル LUK-A-5KN を用いて測定した．実験は前述の衝撃吸収制御をかけた場合とそうでない場合の 2 条件で行い，衝撃吸収性能 DP を導出した．今回の実験では油圧は 5 MPa を用い，図 3 の PD 制御ゲインとバネ定数は下記のものを用いた．

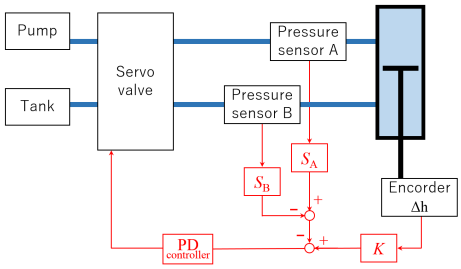


Fig.3 Control system of hydraulic cylinder

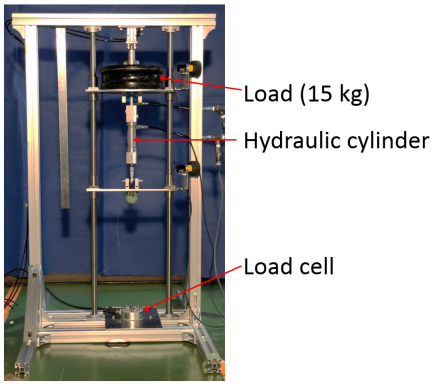


Fig.4 Measuring device of cylinder's DP

$$K_P = 0.23\ [\mathrm{V/N}] \tag{5}$$
$$K_D = 0.15\ [\mathrm{V/N}] \tag{6}$$
$$K = 10\ [\mathrm{N/mm}] \tag{7}$$

実験は 5 回ずつ行い DP の導出にあたっては 5 回の平均値を用いた．なお簡略化のため「タフロボット用油圧シリンダ」,「従来品ミニ油圧シリンダ」をそれぞれ「開発品」,「従来品」とも表記する．また衝撃吸収制御をかけた条件を [Damping]，かけていない条件を [Rigid] と表記する．

実験の結果得られた床反力の測定結果を図 5 に示す．この結果より，開発品は DP = 11.8%，従来品は DP = 9.66% という結果が得られた．これより，衝撃吸収性能を示す DP 値は従来品のミニ油圧シリンダよりタフロボット用油圧シリンダの方が高いことが分かった．しかし受けた床反力自体は従来品の方が小さいという結果になった．これは従来品の方が開発品よりも内部漏れが大きかったことが原因だと考えられる．前述したとおり開発品には特殊樹脂系低摺動パッキンが採用されているのに対し，比較対象とした従来品にはパッキンに O リングが採用されている．これは多くの建設機械に用いられている U パッキンよりも内部漏れが大きく摺動抵抗が小さくなっている．同じ圧力下での内部漏れの量を比べたとき，一般的には定格圧力の小さい方が内部漏れが大きい．今回用いた従来品は開発品よりも定格圧力が小さく設計されていたため，実験の結果に影響したと考えられる．しかし

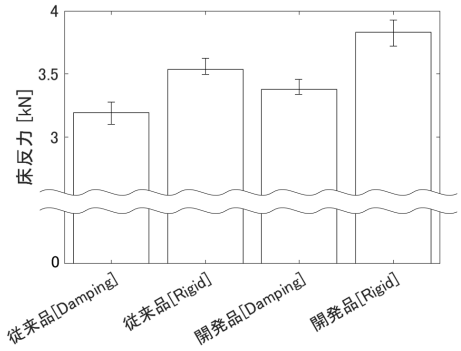


Fig.5 Measured ground reaction force

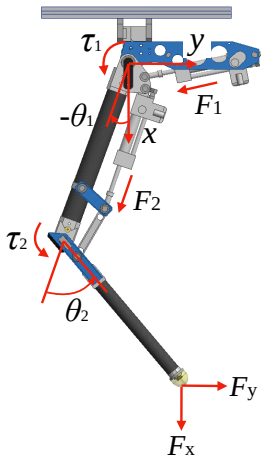


Fig.6 Definition of torque, force, and angle variables

内部漏れが大きいことは制御性の低下に繋がる場合もあるため，本実験の環境においては DP 値を低下させる原因となった．

今回の実験では油圧シリンダ本体のみの DP 値を測定したが，実際にはバルブやセンサををはじめとする各コンポーネントの配管方法によってもシリンダの制御性は変化する．従来品のコンポーネント配管はゴムホースを用いて行う必要があったため実験はこの配管条件に揃えて行ったが，本来開発品は油圧シリンダに直接接続することが可能である．ロボットへの実装の際にはこのようにシリンダに直接コンポーネント接続を行うことにより，さらなる制御性，DP 値の向上が期待できる．

以上より，開発したタフロボット用油圧シリンダは従来品のミニ油圧シリンダよりも高い出力と本体の軽量化を実現しながらも，衝撃吸収制御において重要となる制御性が高いことが示された．

3　試作機による着地動作実験

3.1　脚機構の制御

試作した脚機構において，衝撃吸収性能を発揮するための制御方法について述べる．また実装した着地動作の衝撃吸収性能を評価するための DP 測定実験に関して述べる．

脚機構の制御を考えるにあたり，関節トルクと関節角度，シリンダ推力，脚先推力を図 6 のように設定した．脚機構への適用では脚先推力 F_x，F_y に異なるコンプライアンスを持たせ，着地時の衝撃を和らげる．脚先推力の目標値をそれぞれのバネ定数 K_x , K_y を用いて下式のように定める．

$$F_x = -K_x(x - x_0) \tag{8}$$
$$F_y = -K_y y \tag{9}$$

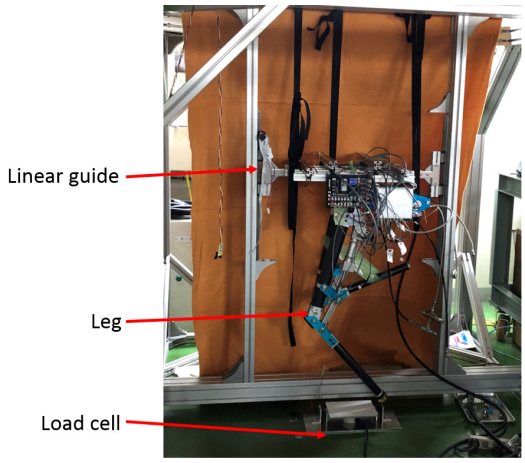


Fig.7 Measuring device of leg's DP

これを実現するために必要とする関節トルクを導く．今回 x_0 は脚を伸ばした状態である 850 mm とした．必要な関節トルクをヤコビ行列 $\boldsymbol{J}$ を用いて表すと以下の通りである．

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \boldsymbol{J}^t \begin{bmatrix}F_x\\ F_y\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix}-l\sin\theta_1 - l\sin(\theta_1+\theta_2) & -l\sin(\theta_1+\theta_2)\\ l\cos\theta_1 + l\cos(\theta_1+\theta_2) & l\cos(\theta_1+\theta_2)\end{bmatrix} \tag{11}$$

これらの値と膝関節，腰関節の各リンクでの関係式を用いてシリンダ推力 F_1, F_2 を導出する．各関節リンクでの 1×1 のヤコビアン $\boldsymbol{J_1}$，$\boldsymbol{J_2}$ を用いると，シリンダに必要な推力は下式の通りになる．

$$F_1 = \boldsymbol{J_1}\tau_1 \tag{12}$$
$$F_2 = \boldsymbol{J_2}\tau_2 \tag{13}$$

導出した F_1, F_2 を目標として，第 2 章と同様に各シリンダの推力を制御することで着地時の衝撃吸収動作を実現した．今回脚先のばね定数は

$$K_x = 2.3\,[\mathrm{N/mm}] \tag{14}$$
$$K_y = 4\,[\mathrm{N/mm}] \tag{15}$$

とした．鉛直方向のバネ定数は衝撃吸収に必要な減速距離が脚の可動範囲に収まる中で，できるだけ高いコンプライアンス性を持つよう設定した．水平方向には脚がずれにくいようにするため，鉛直方向の 2 倍近くのバネ定数を設定した．この設定値に関しても今後より最適化が可能であるであろう．

3.2　衝撃吸収試験

脚機構を図 7 のような装置に固定した．この装置は機構を鉛直方向のみの動作に拘束することができ，地面に配置した床反力計により床反力を測定することができる．この装置に脚機構を拘束し，脚先が地面から高さ 150 mm となる位置より落下させた．実験に用いた油圧は 15 MPa である．このときの着地時床反力を床反力計により測定し，DP 値を求めた．測定した結果が表 2 であり，代表的な測定値を図 8 に示した．

この結果から前述の制御により機構に加わる衝撃が大きく緩和できていることが確認された．また油圧シリンダ単体での実験のときより DP 値が向上していることも確認できた．これは脚機構によってシリンダの変位が拡大されたことで，着地中の速度にシリンダがより追従できるようになったためだと考えられる．衝撃吸収制御をかけた場合には床反力の振動が見られるが，これは圧力制御において目標値に収束する際に振動が起こっているためで

Table 2 Measured ground reaction force and DP

	Rigid	Damping
1 回目 [N]	1320	923.3
2 回目 [N]	1356	910.7
3 回目 [N]	1328	863.2
平均 [N]	1335	899.1
DP [%]	32.64	

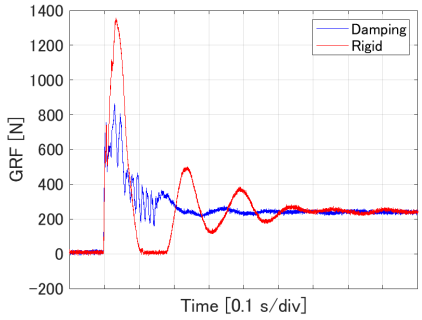


Fig.8 Data of ground reaction force

ある．これはバルブの応答性が 100 Hz 程度であることが原因の 1 つとなっていると推測されるが，圧力の制御手法の改善により振動を減らすこともできると考えられる．

この値をバネと MR ダンパを用いた衝撃吸収脚機構 [2] の DP（約 69%）と比較すると衝撃吸収性能は劣っていることが分かる．しかし今回検討した脚機構は衝撃吸収用の機械要素を必要とせず，脚の動作に最低限必要なアクチュエータのみで実装可能である．脚構造の簡略化，そして軽量化を実現しながら衝撃吸収性能を発揮できるという点では有用であると考えた．

また油圧シリンダの制御によって衝撃吸収を行った例 [5]，では DP 値が 36% という結果であり，今回の結果と同等の値となった．この例での構成は関節に力センサを取り付けることで脚先の制御を行っており，今回行ったシリンダ内圧を圧力センサで測定する方法とは構成が異なる．今回の構成はシリンダ内圧から推力を制御した方法であり，一般には圧力から算出された推力は誤差が大きいが，タフロボット用油圧シリンダの摺動抵抗の低さゆえ同程度の衝撃吸収性能を発揮できたものと推察できる．また脚機構の質量もタフロボット用油圧シリンダを用いることで約 3 kg の軽量化に成功している．今回は簡単な制御によって実装を行ったため，制御方法の改善によっても更に衝撃吸収性能を高めることもできると考えた．

4　結論

本研究では極度の不整地に対する移動機構に適用可能なアクチュエータとして，本研究室で開発したタフロボット用油圧シリンダに注目した．タフロボット用油圧シリンダと既存の油圧シリンダの衝撃吸収性能を測定し，その比較を行うことでタフロボット用油圧シリンダの優位性を確認した．またタフロボット用油圧シリンダを搭載した脚機構についての衝撃吸収性能の測定実験を行った．実験の結果よりバネやダンパ等の要素を追加することなく，脚機構が衝撃吸収性能を発揮できることを実験的に示した．

謝辞

本研究は JPN 株式会社，共栄産業株式会社と協力して進めたものです．関係各位に深く感謝いたします．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，科学技術振興機構を通して委託されたものです．

参考文献

[1] H. Nabae, M. Hemmi, Y. Hirota, T. Ide, K. Suzumori, and G. Endo, “Super-low friction and lightweight hydraulic cylinder using multi-directional forging magnesium alloy and its application to robotic leg,” *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 9, pp. 524–534, 2018.

[2] R. Shu, “Design and analysis of a biped leg to survive high-impact falls,” Master’s thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 2016.

[3] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa, “Ukemi: falling motion control to minimize damage to biped humanoid robot,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, Sep. 2002, pp. 2521–2526 vol.3.

[4] “JPN 株式会社 ミニ油圧シリンダ 製品一覧,” http://www.j-p-n.co.jp/product/fa_01_index.html 2019 年 2 月 4 日閲覧.

[5] F. Wang, H. An, H. Ma, C. Li, and Q. Wei, “Active variable impedance control for hydraulic-driving articulated robotic leg,” *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, July 2018, pp. 1561–1565.