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)	マルチチャンネルEHAによる6自由度駆動と油圧4足歩行ロボットへの 適用
Title(English)	Six Degrees of Freedom Drive with Multi-channel EHA and Application to Hydraulic Quadrupedal Walking Robot
著者(和文)	木村稔輝, Tsai Chia-Yu, 井上淳, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一
Authors(English)	Toshiki Kimura, Chia-Yu Tsai, Kiyoshi Inoue, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori
出典(和文)	第19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予稿 集, Vol. , No. , pp. 2817-2822
Citation(English)	Proceedings of the 19th SICE System Integration Division Annual Conference, Vol., No., pp. 2817-2822
発行日 / Pub. date	2018, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2018 The Society of Instrument and Control Engineers

マルチチャンネル EHA による6自由度駆動と 油圧4足歩行ロボットへの適用

○木村 稔輝(東京工業大学), Tsai Chia-Yu(国立台湾大学), 井上 淳(東京工業大学) 難波江 裕之(東京工業大学), 遠藤 玄(東京工業大学), 鈴森 康一(東京工業大学)

Six Degrees of Freedom Drive with Multi-channel EHA and Application to Hydraulic Quadrupedal Walking Robot

○ Toshiki KIMURA (Tokyo Tech), Chia-Yu TSAI (National Taiwan University) Kiyoshi INOUE (Tokyo Tech), Hiroyuki NABAE (Tokyo Tech)

Gen ENDO (Tokyo Tech), and Koichi SUZUMORI (Tokyo Tech)

Abstract : In this research, we propose "Multi-channel EHA" which is an extension of conventional EHA (Electro-Hydraulic Actuator) system and apply it to hydraulic robot. Unlike the conventional EHA system, this proposed system is capable of driving multiple actuators with one pump motor, and we consider that not only the energy loss is small but also the weight of the robot can be reduced.

1. 緒言

災害現場では、瓦礫散乱した不整地、泥濘地といった悪 環境で動作するロボットが求められている.特に油圧駆動 ロボットは上記の環境下での動作において適しており、油 圧駆動ロボットの例として, TITAN XI[1], HyQ[2], Baby Elephant[3], BigDog[4] といったものが開発されている. 一方、従来の油圧ロボットのシステムに関してはエネル ギー損失の観点で課題がある.従来の油圧ロボットのシス テムの多くはアクチュエータ,サーボバルブ,エンジン,ポ ンプで構成されており、制御はサーボバルブで行っている. しかし、このシステムでは、常にポンプを駆動させるた め,アクチュエータ駆動時以外にエネルギーを損失が発生 する.また、減圧させたい場合にはサーボバルブの絞りの 流路抵抗でエネルギーを損失して減圧する構造となってい る. 一方, Hydra[5] のように, EHA (Electro-Hydraulic Actuator: 電気駆動式油圧アクチュエータ)により駆動す る油圧ロボットの研究も進んでいる. この EHA は, アク チュエータと、直接接続されたポンプ、ポンプ駆動用モー タで構成され、ポンプ制御である.このシステムは、アク チュエータ駆動時のみポンプが駆動するため、エネルギー 損失が発生しない. また, ポンプ制御であるため, サーボ バルブを使用せず、従来のシステムと比較してエネルギー 損失が小さい.しかし、この EHA は、多自由度に対応す るためにはアクチュエータの数に対応してポンプが複数必 要になり、ロボットに適用した際にロボットが高重量化し てしまう.そこで、筆者らは従来の EHA を拡張した「マ ルチチャンネル EHA」システムを提案している. この提 案するシステムは従来の EHA システムとは異なり、1つ



Fig. 1: Constitution and operation example of Multichannel EHA

のポンプで複数のアクチュエータを駆動できるものであり, ポンプで圧力制御を行うためエネルギー損失が小さいだけ でなく,ロボットの軽量化も可能になると考えている.今 まで筆者らは提案するマルチチャンネル EHA システムに より 2 つのアクチュエータの駆動を駆動させることを成 功した [7] が,本報では 6 つのアクチュエータの駆動を確 認する.さらに,この提案するシステムを泥濘地移動を目 的とした油圧 4 足歩行ロボットに適用し,歩行動作を確認 する.



Fig. 2: Overview of HAM

HAM outer diameter	$15 \mathrm{~mm}$
HAM's rubber tube inner diameter	$9.5 \mathrm{~mm}$
HAM's rubber tube outer diameter	13.1 mm
Fiber material of sleeve	Aramid
Fiber braided angle	$25~\degree$

2. マルチチャンネル EHA

2.1 概要

提案する油圧システム「マルチチャンネル EHA」の構成および動作例を Fig.1 に示す.本システムは1つの電動 モータ、ポンプと複数の電磁切換弁、アクチュエータで構成される.本報では、軽量で、摺動部のない油圧人工筋 (Hydraulic Artificial Muscle: HAM)をアクチュエータ として用いる.Fig.2 に、油圧人工筋の概観を示す.油圧 人工筋は、通常の空圧駆動マッキベン人工筋と同様の構造をしており、ゴムチューブとその外側の繊維で編まれた スリーブによって構成される.Table.1 に油圧人工筋の設 計パラメータを示した.また、動作原理も同様で、ゴム チューブ内部に作動流体を流入させその圧力を増加させ ることで、軸方向に収縮しつつ収縮力を発生させるものである.

本システムは、供給圧力を時間変化させ、ポンプモータ と各油圧人工筋の目標圧力、および各油圧人工筋の実際の 圧力に依存して各電磁切換弁が開閉するというものである. 供給圧力と電磁切換弁の開閉を適切に連動させることで、 各油圧人工筋を別々に駆動させることができる.本システ ムの動作例は Fig.1 に示すように、ポンプ圧力が人工筋1 の目標圧力よりも高い場合では電磁切換弁1が開くことで 人工筋1の圧力が増加し(青矢印)、供給される圧力が人 工筋2の目標圧力よりも低い場合は電磁切換弁2が開くこ とで人工筋2の圧力が減少する(橙矢印)というものであ る.また、本システムは2つ以上の人工筋の駆動も可能で ある.以下、システムの詳細について記す.まず、各人工 筋の圧力を制御するために、電磁切換弁の開閉条件は以下 のように設定している.

 $(P_{ir} > P_i) \cap (P_{sr} > P_{ir}) \Longrightarrow Valve \ open \qquad (1)$

$$(P_{ir} < P_i) \cap (P_{sr} < P_{ir}) \Longrightarrow Valve \ open \qquad (2)$$

ここで、 P_i はi本目の人工筋の実際の圧力で、 P_{ir} はi本目の人工筋の目標圧力を意味する.人工筋の圧力が目標 圧力よりも低くかつ、ポンプの目標圧力が人工筋の圧力よ りも高い場合、電磁切換弁は人工筋の圧力を上昇させ目標 圧力に近づけるために開く.一方,人工筋の圧力が目標圧 力よりも高くかつ、ポンプの目標圧力が人工筋の圧力より も低い場合には、電磁切換弁が開き人工筋の圧力を低くし 目標圧力に近づける. ここで, 人工筋の圧力を上昇させた い場合においても、ポンプ圧力が低いという状況が考えら れる. この時, 電磁切換弁は閉じ, ポンプ圧力が再び上昇 するのを待たなければならないため応答が遅くなってしま う. そこで,以下のようにシステムを構築している. まず, 本システムでは、ポンプの目標圧力に矩形波を用いる. 矩 形波を用いるのは、短時間でポンプ圧力の上昇と下降を行 うことができるためである. また, 人工筋を素早く目標圧 力に到達させるために、矩形波のデューティ比は1周期ご とに変化させ、以下のように設定する.

$$Duty \ ratio = \frac{1}{2} \times \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_{ir} - P_i)}{\sum_{i=1}^{n} |P_{ir} - P_i|} \right)$$
(3)

この式 (3) は, n本の人工筋を伸縮させるマルチチャン ネル EHA システムにおけるものである. この式を用いて, 矩形波のデューティ比を算出し,ポンプの目標圧力を決定 する.人工筋の目標圧力と実際の圧力からデューティ比を 設定することで,効率的に人工筋に圧力を供給することが でき,人工筋の応答をより速くすることができる.

2.2 検証実験

2.2.1 実験システム

マルチチャンネル EHA システムの性能の検証実験を 行った. Fig.3 に実験システムの外観を, Fig.4 に油圧シス テムの模式図と信号接続を示す. 本システムは, ポンプ モーター(Takako 社製, TFH-080-U-SV), 電磁切換弁 (WANDFLUH 社製, BM4D31), 圧力センサ(Trafag 社 製, NAT8252), 6本の人工筋で構成され, 各人工筋に 10 kg の錘を取り付け負荷を与えている.本システムでは, デ ジタルシグナルプロセッサ(dSPACE 社製, DS1104)を 使用し制御する. ポンプの駆動周波数は 1Hz, 矩形波の目 標圧力は 0 MPa~1.2 MPa とした.また, 人工筋の目標 圧力信号はデューティ比は 0.5 で一定の矩形波であり, 周 波数は 0.05 Hz, 目標圧力は 0 MPa 1.0 MPa とした.

2.2.2 実験結果

Fig.5 に実験結果を示す.縦軸が圧力 [MPa], 横軸が時間 [s] で,上からポンプ,人工筋 1,2,3,4,5,6の目



Fig. 3: Overview of the hydraulic system



Fig. 4: Schematic diagram of the hydraulic system

標圧力(橙)と測定圧力(青)を示している. Fig.5 に示 すように,適用したアルゴリズムにより,ポンプの目標圧 力の各周期のデューティ比が変化していることが分かる. Fig.5 より,応答の悪さや低圧(目標圧力0 MPa 時)に 到達できない箇所が見受けられるものの、ポンプ圧力、各 人工筋圧力ともに目標圧力にある程度追従していることが わかる.以上より,6自由度でのマルチチャンネル EHA の検証実験を行ったところ、6自由度での駆動が可能であ ることが確認された.応答の悪さに関しては、人工筋の特 性上,目標圧力と人工筋の内圧に遅れが存在するが,ある 程度の与圧がかかっている場合は応答が早くなることが知 られている [8]. 本実験では最低でも 0.2 MPa 程度の与圧 があるため、各人工筋の応答性の悪さは人工筋の特性では なく、配管や人工筋端部での管路抵抗の影響が原因の一つ であると推察される.一方,人工筋の内圧が最低でも 0.2 MPa 程度までしか下げられないのは、ポンプの圧力が0 MPa まで下げ切れていないことが原因として挙げられる. 改善策の1つとしては、モータをより出力の高いものにす ることが挙げられる.

3. 油圧 4 足歩行ロボット

3.1 歩行アルゴリズム

マルチチャンネル EHA を用いて、泥濘地移動を目的と した小自由度な4足歩行ロボットを開発する.まず,小自 由度での歩行が可能な歩行アルゴリズムを Fig.6 に示す. ロボットの機構としては、4節リンクと、上下に昇降する 4 脚で構成されている. この Fig.6 はロボットの 4 節クロ スリンクを上から見たもので、●が足先が接地、○が足先 が接地面から離れることを表している.「Fig.6a→Fig.6b で 一方の対角脚を上げもう一方の対角脚を下げた状態で体幹 を屈曲, Fig.6b→Fig.6c で屈曲は維持して対角脚の昇降を 反転, Fig.6c→Fig.6d で対角脚の昇降を維持した状態で屈 曲」を繰り返すことでロボットが前進することができる. このように、脚の昇降と体幹の屈曲を組み合わせるだけで 前進が可能になると考えられる. また, この歩行アルゴリ ズムでは対角脚を同時に上下に昇降させるため、脚の昇降 に必要な人工筋の本数を削減できる. そのため電磁切換弁 や配管を減らすことができロボットの軽量化が可能になる ため、この歩行アルゴリズムを採用した. なお、ロボット の転倒を防止するために、腹ばいでの移動が前提となって いる.

3.2 構成

提案する歩行アルゴリズムをもとに、マルチチャンネル EHA を適用するロボットを試作した.その外観を Fig.7 に 示す.大きさは *L*×*W*×*H* = 972 mm×600 mm×423 mm, 重量は 12 kg であり、6 本の人工筋が取り付けられている. 脚の昇降に関しては [9] の機構を参考に設計した.機構は Fig.8 に示すように、上下の人工筋を拮抗させることで、 脚の昇降を可能にしている.足先に関しては、提案する歩 行動作を可能にするためには、足先が接地した状態で回転 する必要があるため、脚の軸方向に対し回転自由となるよ うにしている.アクチュエータに関しては、油圧シリンダ といったほかの油圧アクチュエータは摺動部が存在するた め泥濘地での使用には適さないが、油圧人工筋は摺動部が 存在しないため、泥濘地で使用する本ロボットに適したア クチュエータである.また、ロボットの軽量化のために部 材には木材合板を用いロボットを試作する.

3.3 検証実験

3.3.1 実験システム

マルチチャンネル EHA を用い, 試作したロボットの歩 行可能性の検証実験を行った. Fig.9 に歩行の検証実験の



Fig. 5: Experiment result of Multi-channel EHA system



Fig. 6: Walking algorithm

外観を示す.実験システムは 2.2 節と同様のものを用いた. 目標圧力や PID パラメータ等もすべて同様である.なお, 腹ばい移動させるために,腹部底面にキャスターを取り付 けている.

3.3.2 実験結果

Fig.10 に 0 min, 3 min, 6 min におけるロボットの歩 行の様子を示す. Fig.10 からわかるように,時間経過とと もにロボットが前進できている.一方,1 周期が長いこと, そして 1 周期当たりの移動距離が小さいため移動速度が 3×10^{-4} m/s 程度と非常に遅いという課題がある.1 周期 当たりの移動距離に関しては,屈曲に用いられる人工筋を 長くすることである程度改善されると考えられる.以上よ





Fig. 7: Overview of the robot



Fig. 8: Leg movement mechanism



Fig. 9: Overview of walking experiment system

り、マルチチャンネル EHA を用いて、提案する歩行アル ゴリズムで歩行が可能であるということが確認できた.

4. 結言

本稿では、一つのポンプモータで複数のアクチュエー タの駆動を可能とする油圧システム「マルチチャンネル EHA」を提案・検証実験を行った.検証実験では、応答の 悪さ等が見受けられたものの6本の人工筋内圧が目標圧力 におおよそ収束できた.また、マルチチャンネル EHA を ロボットに適用したところ、移動速度は遅いものの、提案 する歩容形態でロボットの前進を確認した.今後は、出力 の大きいモータを使用するなど、マルチチャンネル EHA のシステムを改善し、目標圧力にさらに早く到達、安定的 に維持させる予定である.また、ロボットの関しては人工 筋の配置変更を進め、移動速度を向上させていく.

5. 謝辞

本研究の一部は,総合科学技術・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



(a) 0 min



(b) $3 \min$



(c) 6 min

Fig. 10: Condition of the walking Experiment

(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

- R. Hodoshima, T. Doi, Y. Fukuda, S. Hirose, T. Okamoto, and J. Mori. "Development of titan xi: a quadruped walking robot to work on slopes," In Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004).Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, Vol. 1, pp. 792-797 vol.1, sept.-2 oct. 2004.
- [2] C.Semini, N.G.Tsagarakis, E.Guglielmino, M.Focchi, F.Cannella, D.G.Caldwell, "Design of HyQ - a hydraulically and electically actuated quadruped robot," Journal of Systems and Control Engineering, vol.225, no.6, pp.831-849, 2011.
- quadruped robot," Journal of Systems and Control Engineering, vol.225, no.6, pp.831-849, 2011.
 [3] Jiaqi Zhang, Feng Gao, Xiaolei Han, Xianbao Chen, and Xueying Han. "Trot gait design and cpg method for a quadruped robot," Journal of Bionic Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 18-25, 2014.
 [4] M.Raibert, K.Blankespoor, G.Nelson, R.Playter,
- [4] M.Raibert, K.Blankespoor, G.Nelson, R.Playter, the BigDogTeam: "BigDog, the rough-terrain quadruped robot'," Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, July 6 -11,2008, Korea.
- matic Control, July 6 -11,2008, Korea.
 [5] Hiroshi Kaminaga, Tianyi Ko, Satoshi Yorita, Shunsuke Sato, Ryo Masumura, Mitsuo Komagata, Tatsuya Ishikawa, Taira Miyatake, and Yoshihiko Nakamura "Enhancement of mechanical strength, computational power, and heat management for

fieldwork humanoid robots," 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) Cancun, Mexico, Nov 15-17, 2016

- [6] Tomoya Miyoshi, Kazuhiro Yoshida, Sang In Eom, Shinichi Yokota, "Proposal of a multiple ER microactuator system using an alternating pressure source," Sensors and Actuators A: Physical, pp. 167-175, 2015.
 [7] 木村稔輝, Tsai Chia-Yu, 井上淳, 難波江裕之, 遠藤
- [7] 木村稔輝, Tsai Chia-Yu, 井上淳, 難波江裕之, 遠藤 玄, 鈴森康一. "マルチチャンネル EHA の提案". ロ ボティクス・メカトロニクス講演会 2018 講演論文集, 2P1-M01, 2018.
 [8] 森田隆介, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄, 櫻井良. "
- [8] 森田隆介,鈴森康一,難波江裕之,遠藤玄,櫻井良." 油圧駆動高出力マッキベン型人工筋の開発 第2報 動特性の検証".第17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予稿集,3C3-06,2016.
 [9] 深津時広,遠藤玄,伊藤祐太,小林一樹,斉藤保典."
- [9] 深津時広,遠藤玄,伊藤祐太,小林一樹,斉藤保興." 広域・精細モニタリングのための移動作業型フィー ルドサーバの開発".農業情報研究会,23(4), pp140-153, 2014.