T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ポンプの圧力流量特性を考慮した油圧脚ロボットの動作設計
Title(English)	Leg Trajectory Design for A Hydraulic Legged Robot Considering Pump Capacity
著者(和文)	谷晃輔, 難波江裕之, 廣田 善晴, 遠藤玄, 鈴森康一
Authors(English)	Kosuke Tani, Hiroyuki Nabae, Yoshiharu Hirota, Gen Endo, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 予稿集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2020 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2020, 5

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

ポンプの圧力流量特性を考慮した油圧脚ロボットの動作設計

Leg Trajectory Design for A Hydraulic Legged Robot Considering Pump Capacity

○学　谷晃輔（東工大）　正　難波江裕之（東工大）　廣田善晴（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
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Yoshiharu HIROTA, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Hydraulic drive interests many researchers as a drive system that has high impact resistance. The hydraulic system can be roughly divided into two parts: an actuator unit that generates movement and a pump unit that supplies hydraulic oil to each component. The robot needs to operate within the pump unit capacity. However, it is difficult to predict the required pressure and flow rate during the operation of the robot. Especially in the case of legged robots, it is rarely performed because the state of the robot changes drastically in periodic operation. In this study, we estimated the required pressure and flow rate in the walking motion and designed the leg trajectory. The validity was shown experimentally.

Key Words: Hydraulic Actuators, Legged Robots, Leg Trajectory

1　緒言

ロボットの駆動方式の 1 つである油圧駆動システムは大きな力を発生させることができ衝撃にも強いことから，災害対応などの利用を目的とした開発が多く進められてきた．中でも油圧脚ロボットは高い不整地踏破性を持つことから，2 脚ロボット [1] や 4 脚ロボット [2][3] など多くのロボットが開発されてきた．油圧駆動システムは動きを生み出すアクチュエータ部と各コンポーネントに作動油を送り込むポンプユニットの大きく 2 つに分けることができる．この 2 つは密接に関係しており，ポンプユニットの性能に合わせてロボットの動作を設計することが必要となる．特に油圧駆動の歩行ロボットでは必要となる流量と圧力が周期的に大きく変化するため，ポンプの選定とポンプの能力を生かした脚動作の設計は簡単ではない．エネルギーの観点から軌道設計した例も存在するが [4]，ポンプ性能まで考慮した最適化はされていない．また必要なポンプ流量を実験的に推測する手法 [5] では，特定のロボットに対する適用は可能であるが一般的に使用できる手法ではない．必要な流量をシミュレーションで予測することで脚軌道を設計した例 [6] では，圧力も含めたポンプ性能への最適化はできておらず，実機を用いた妥当性の確認もされていない．

ポンプユニットは油を送り出すポンプとポンプを回すための駆動機で構成されており，それぞれの組み合わせによって圧力流量特性が様々に変化する．ポンプユニットの特性は主に吐出圧力と吐出流量の関係で表され，今回は出力一定のタイプ（CP:Constant power type）に注目した．CP はポンプユニットの仕事が一定となる特性であり，ポンプを駆動する DC モータやエンジンの特性によって表れる．自立移動ロボットでは，電磁モータやエンジンを用いて小型軽量化したポンプユニットを用いることが多く，CP の特性内で駆動することが多い．このような特性の中でロボットの動作を最適に設計することで，エネルギー効率の向上や作業速度の向上が期待できる．

そこで本稿ではまず油圧脚ロボットの脚動作と，そのときに必要となる圧力と流量を理論的に導出する．その結果を用いて CP ポンプユニット性能域における動作の最適化手法について述べ，その妥当性を実験で確認する．

2　ポンプ特性を考慮した脚軌道の最適化手法の提案

この節では脚軌道パラメータと，それを動作させる際の必要圧力と必要流量の関係を導く．その結果を用い，CP ポンプ性能内での脚軌道の最適化手法について検討する．

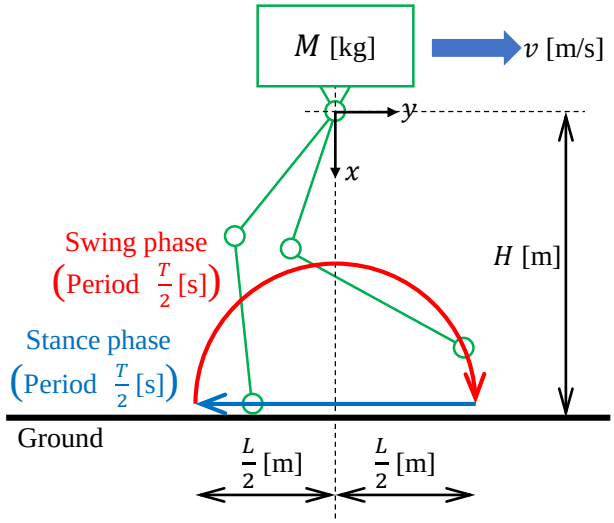

Fig.1 Leg trajectory and parameters

2.1　歩行中の脚軌道

ロボットの歩行動作について，一定速度で一方向に動いているものとし歩行に関係するパラメータを図 1 のように定める．腰関節より上のボディ部分は回転運動を一切行わないものとする．遊脚期は地面に接しておらずボディにかかる重力による力を受けない．立脚期は直線であり地面に接しているためボディの自重を支える必要がある．軌道の中心は腰関節の位置と一致しており，腰関節の高さは H [m] である．この脚軌道を両脚で位相を半分ずらして行うことで歩行動作を行うものとする．このとき歩行速度 v [m/s] は脚軌道の周期 T [s] と立脚期の距離 L [m] を用いて $v = \frac{2L}{T}$ で表される．遊脚期の軌道は Ferguson/Coons 曲線を用いた．Ferguson/Coons 曲線を用いることは北野らにより提案されており [7]，地面とのスリップが起きづらく高速歩行にも向いた脚軌道とされている．

Table 1 設計値に基づくパラメータ

M [kg]	32
l_1, l_2 [m]	0.5
l_{g1}, l_{g2} [m]	0.18
m_1, m_2 [kg]	1.5, 0.6
I_1, I_2 [kg · m^2]	0.039, 0.015

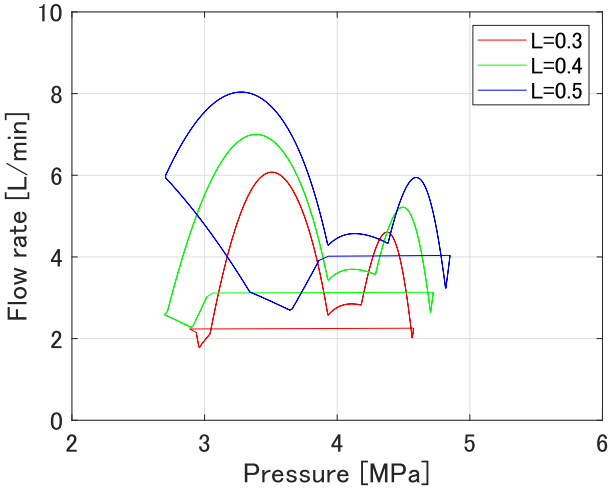

Fig.2 Pressure and flow rate that robot required when L is changed at $T = 1.0$ [s].

2.2 ポンプ特性を考慮した脚軌道設計

ここでこの脚軌道を実現するポンプ特性について議論する．油圧ポンプの特性は主に出力可能な圧力と流量の関係で表され，これらがロボットの動作に必要な圧力と流量を上回っている必要がある．そこで脚軌道上における必要圧力と必要流量を求め，それをポンプ特性内で最適化することを考える．

2.2.1 脚軌道パラメータと必要圧力流量

ある脚軌道を実現する際の必要な流量と圧力を逆動力学解析により算出した．脚機構モデルの各パラメータは本稿での実験に用いたロボットの設計値を元にし，表 1 のように定め，ロボットの高さ H は脚の可動域を広く取ることのできる 0.7 m とした．また遊脚期の最高点は平地の歩行に十分な 0.2 m とした．M は脚機構を除くロボット本体の質量である．使用した油圧シリンダの内径は 20 mm，ロッド径は 12 mm であり，シリンダを制御するサーボバルブの内部漏れも計算に加味した．

以上を元に動作において必要な圧力と流量を片脚ずつ計算し，両脚での動作を加味して必要圧力は両者の大きい方，必要流量は両者の合計値とした．歩行中の圧力と流量は歩行パラメータ L と T に大きく影響される．各パラメータの変化に対する各時刻での圧力と流量をプロットすると，図 2,3 のようになった．L を大きくすると必要な圧力と流量がともに上昇し，T を小さくすると必要流量が上昇することが分かる．T がは小さすぎる場合には脚慣性の効果が大きくなり必要な圧力も増加してしまう．しかし脚慣性の効果が大きくなる周期はポンプの性能やロボットの動作としては現実的ではなく使用されることが少ないため，今回は脚慣性の効果が大きく表れない領域でのみ議論を行う．

2.2.2 脚軌道の最適化

これらの知見を用いて，あるポンプの特性を最大限に使って歩行速度が最大となるように脚軌道を最適化することを考える．特定の脚軌道を実現するためには両脚での必要圧力，必要流量を出せるポンプを使用する必要があり，ポンプは軌道中の圧力と流量をどの時刻においても出せることが求められている．ここでは固定吐出量ポンプとし，それに合わせてロボットの歩行速度を最大化する手法を説明する．まず適当な脚軌道について必要な圧力と流量を計算し，次にその軌道から L をポンプの圧力の最大に達するまで増やしていく．更にその軌道からポンプの流量の最大値に達するまで T を増やす．この操作によりポンプの特性に最適な脚軌道となり，ポンプ性能を最大限活かして最速で歩行することができる．例えば図 4 のようにポンプの特性が最大圧力 10 [MPa]，最大流量 18 [L/min] であるとき，L と T をポンプ性能に合わせて最大化すると $L = 0.7$ [m], $T = 0.6$ [s] のとき歩行速度 v が最大の 2.3 m/s となる．この最適化では L は 0.1 m ずつ，T は 0.1 s ずつ変化させた．そのときの操作の様子を図 4 に示す．このようにポンプの特性に合わせて歩幅と歩行周期を最適化することで，ロボットの歩行性能を最大限引き出すことができると考えられる．

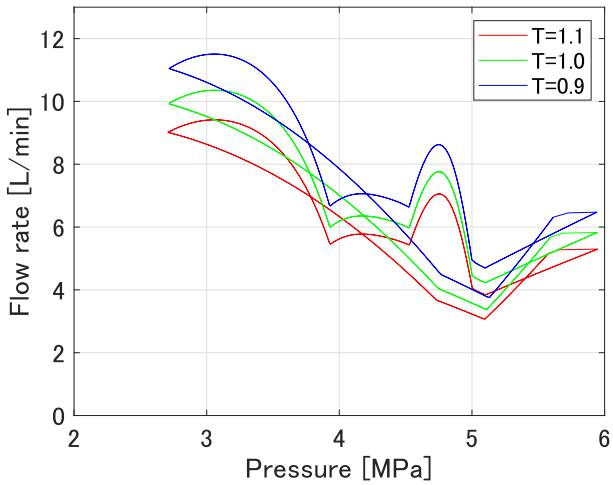

Fig.3 Pressure and flow rate that robot required when T is changed at $L = 0.7$ [m].

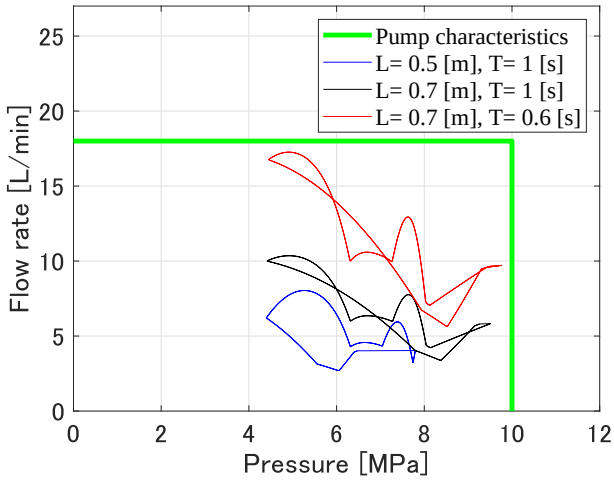

Fig.4 Optimization for a pump with maximum pressure 10 [MPa] and maximum flow rate 18 [L/min].

2.2.3 CP ポンプ特性での最適化

小型ポンプユニットを用いた自律駆動における歩行動作を想定し，CP ポンプ特性において脚軌道の設計を行った．対象としたポンプ特性と最適化した脚軌道を表 2 に示す．最適化していない軌道は比較実験用の脚軌道である．このポンプに関して提案した手法を用いて脚軌道設計を行った．その結果が図 5 の赤線である．この脚軌道を実際にロボットに実装することによって妥当性を示

Table 2 最適化対象のポンプ特性と脚軌道の結果

Pump	Maximum pressure	10 [MPa]
	Maximum flow rate	7 [L/min]
	Characteristic	Constant power ($P \cdot Q = 21$)
Leg trajectory	Optimized	$L = 0.71$ [m] $T = 2.9$ [s] $v = 0.49$ [m/s]
	Non-optimized	$L = 0.71$ [m] $T = 1.2$ [s] $v = 1.2$ [m/s]

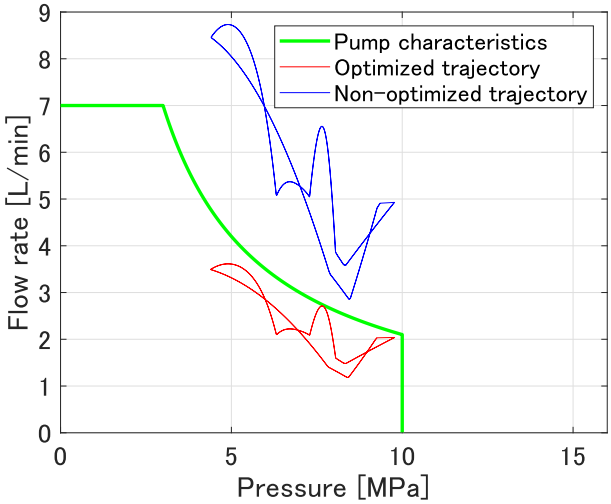

Fig.5 Optimization results for CP. Blue line is the non-optimal trajectory for comparative experiments.

す．また青線は実験の比較対象として，最適化をしていない，ポンプ容量から外れた軌道を示している．最適化した軌道では目標の脚軌道に追従することができ，最適化していない軌道ではポンプの性能が足りず目標の脚軌道が実現できないと考えられる．

3　ロボットの歩行実験

ロボットを姿勢拘束具に取り付け，トレッドミル上で歩行実験を行った．実験の様子が図 6 であり，歩行中の圧力，流量，脚軌道のデータを記録した．

実験の結果得られたロボットの圧力流量と脚先位置のデータを図 7,8 に示す．まず図 7 について，最適化した軌道においては理論値と近い領域の圧力と流量を示しているが，最適化してない軌道においては理論より遥かに低い流量と圧力になっている．これは目的の動作を行うためにはポンプの性能が低すぎることを示している．図 8 を見ても，最適化していない軌道では目標に追従できていない．歩行速度は最適化軌道で $v = 0.5$ [m/s]，非最適軌道で $v = 0.7$ [m/s] であり最適軌道は目標とよく合っている．これより最適化軌道ではポンプの性能内で目標の動作を実現できているが，非最適軌道ではポンプの特性にあった動作ができていないと言える．以上よりこの実験においても最適化手法が妥当であることが示された．

4　結論

ロボットの逆動力学解析によって脚軌道パラメータと必要圧力，必要流量の関係を明らかにし，それを用いて特定ポンプ容量内での脚軌道の最適化手法を構築した．実験により脚軌道の脚軌道設計手法の妥当性が示された．

今後はロボットに小型ポンプユニットを搭載し今回の手法を用いて独立動作を行わせる．また 4 脚ロボットなど他のタイプのロボットにも理論を拡張し，動作設計の適用先を更に広げていく．

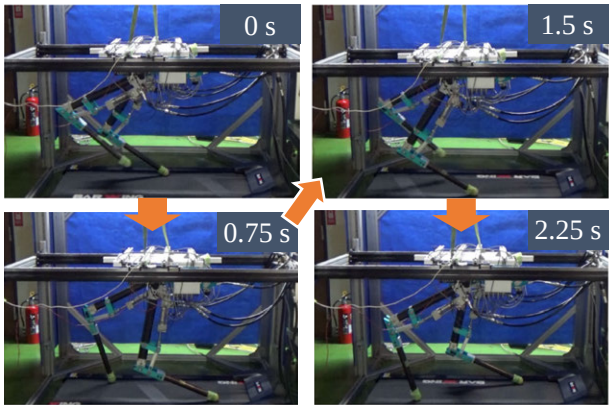

Fig.6 Experiment on the optimized trajectory.

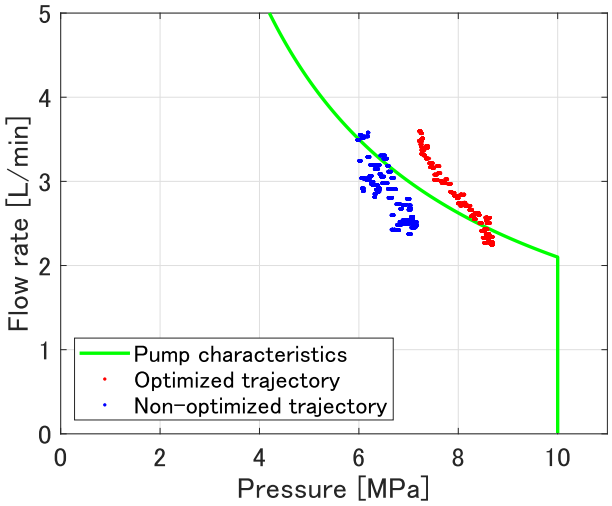

Fig.7 Pressure and flow rate applied to the robot by CP.

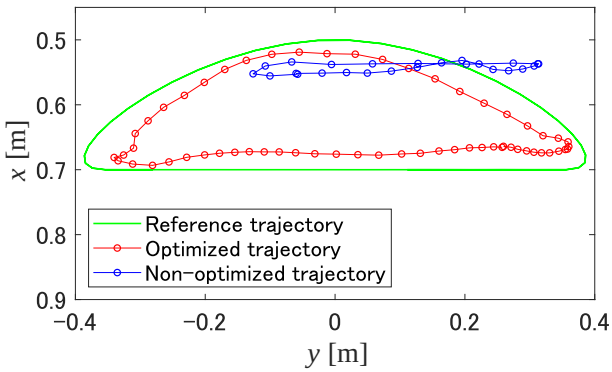

Fig.8 Leg trajectory recorded. The target leg trajectory and the leg position are recorded every 50 ms.

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．

参考文献

[1] S. Hyon, D. Suewaka, Y. Torii, and N. Oku, "Design and experimental evaluation of a fast torque-controlled hydraulic humanoid robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 2, pp. 623–634, April 2017.

[2] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell, "Design of hyq - a hydraulically and electrically actuated quadruped robot."

[3] M. Raibert, "Bigdog, the rough-terrain quadruped robot," vol. 17, 07 2008, pp. 10 822–10 825.

[4] Z. Deng, Y. Liu, L. Ding, H. Gao, H. Yu, and Z. Liu, "Motion planning and simulation verification of a hydraulic hexapod robot based on reducing energy/flow consumption," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, no. 10, pp. 4427–4436, 2015.

[5] H. Khan, S. Kitano, Y. Gao, D. G. Caldwell, and C. Semini, "Development of a lightweight on-board hydraulic system for a quadruped robot," in *14th Scandinavian International Conference on Fluid Power-SICFP*, 2015.

[6] X. Rong, Y. Li, J. Meng, and B. Li, "Design for several hydraulic parameters of a quadruped robot," *Applied Mathematics and Information Sciences*, vol. 8, pp. 2465–2470, 09 2014.

[7] S. Kitano, S. Hirose, G. Endo, and K. Suzumori, "Fastwalking with consideration of an acceleration and a deceleration for a quadruped robot," *The Abstracts of the international conference on advanced mechatronics : toward evolutionary fusion of IT and mechatronics : ICAM*, vol. 2015.6, pp. 206–207, 2015.

[8] 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.