

U 字吊りに着想を得た車輪型円柱昇降機構の提案 ～機構の試作と昇降動作の確認～

Proposal of a wheel-type cylinder elevating mechanism inspired by U-shaped suspension

～Prototype of mechanism and confirmation of lifting and lowering motion～

○程島祐哉*, 情野 瑛*, 高橋 隆行*

○ Yuya Hodoshima*, Akira Seino*, Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード : 柱昇降ロボット (Pole Climbing Robot), 車輪型ロボット (Wheel Robot),

連絡先 : 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学 共生システム理工学類 高橋研究室
程島祐哉, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: hodoshima@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

街灯や電柱のインフラ点検, 林業の枝打ちなど, 人間が円柱構造物の上部で作業する場面が存在する. このような作業において, インフラ点検では高所作業車を使用して行うため, 人件費および作業車の使用コストの問題が生じる. また高所作業車が車道にはみ出すことで交通流に影響を与える場合もある. 林業の枝打ちでは, 作業者がロープとスパイクを用いて木を登り, 高所かつ足場が不安定な状態で作業を行うため危険を伴う. これらの作業において, 円柱を昇降し, 人に代わり作業するロボットはコストと安全性の面から有効である. 街灯検査や林業の枝打ちを目的とした円柱昇降ロボット^{1) 2)}が開発され, 実用化されている例もある.

現在研究開発されている円柱昇降ロボットは

昇降方法によって, 車輪型³⁾, 尺取虫型⁴⁾, ヘビ型⁵⁾の3つに大別できる. それぞれの昇降方法の特徴として以下の点が挙げられる. 車輪型は機構がシンプルであるが, 車輪を円柱に押し付けるためのクランプ機構を有するためにロボットの重量が増加する. 尺取虫型は複数のグリッパで交互に円柱を把持しながら移動するため, 曲がった円柱に対応できるが移動速度の高速化が難しい. ヘビ型は自由度が高いがアクチュエータが多数あるため制御が複雑化する.

本研究において提案する昇降機構は, 街灯や電柱のインフラ点検, 林業の枝打ちなどに応用することを想定している. そのため, 昇降速度と制御・機構の容易さの観点から車輪型を採用した.

本研究では車輪型円柱昇降ロボットのデメリッ

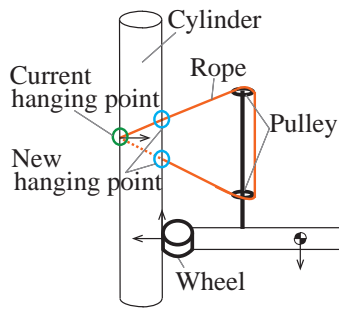


Fig. 1: Elevating principle

トである，クランプ機構を有することで重量が増加するという問題を解決する，新しい昇降法を確立することを目的とする．本稿では，U字吊りに着想を得た新たな円柱昇降機構を提案し，試作機によって提案手法で昇降が可能かを確認する．また，運動学モデル作成のために機構パラメータを変更して昇降実験を行い，機構の特性を確認する．

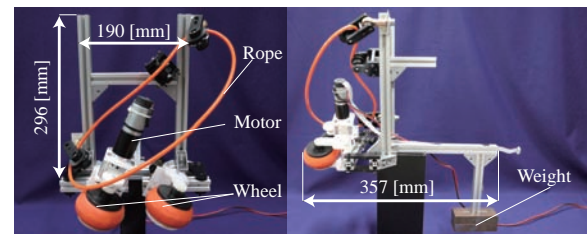
2. 円柱昇降機構の提案

車輪型の円柱昇降ロボットは，自重を支えながら昇降動作を行うために，車輪を円柱に押し付けて摩擦力を発生させる必要がある．これまでに開発されている多くのロボットは，車輪が円柱を取り囲むように配置され，車輪を押し付けるための機構を備えている．そのためロボットの重量が増加しやすいという特徴がある．

そこで本稿では，林業作業や電柱作業がロープを用いて円柱に静止し作業を行う手法であるU字吊りに着目し，この原理を利用した車輪型昇降機構を提案する．U字吊りは，円柱と作業を取り囲むようにロープの輪を掛け，作業の自重でロープが引かれることで足が円柱に押し付けられ，円柱上で静止することができるという方法である．

U字吊りにおける作業の足を，機構の車輪に置き換えることで，ロープのみで自重を支え，車輪を円柱に押し付ける昇降機構を実現できるのではないかと考えた．

ここで，提案手法である，ロープを用いた車輪



[1] Front view [2] Side view

Fig. 2: Prototype mechanism

型昇降機構の移動方法について説明する．Fig. 1に提案する機構のイメージ図を示す．車輪を水平に対して斜めに取り付けることで，車輪の駆動力によりらせん状に昇降する．また，ロープを車輪と交差する方向で円柱に対して斜めに掛ける．これにより，上昇の際は車輪の駆動力による機構のらせん上昇にともない，新たに円柱に掛かる高位側のロープが，現在ロープが掛かっている箇所よりも上方に掛かり，ロープが機構に追従して上昇する．下降の際は機構のらせん下降にともない，新たに円柱に掛かる低位側のロープが，現在ロープが掛かっている箇所よりも下側に掛かり，機構に追従して下降するという原理である．この手法は，自重を支え車輪を円柱に押し付けるために必要な要素がロープのみであり，機構の簡略化と軽量化が容易になることが期待される．

3. 機構の試作と昇降動作の確認

提案した手法で昇降動作が可能かを確認するために，Fig. 2に示すような機構を試作した．主な構成部品として昇降用の車輪が2個，車輪駆動用のギヤヘッド付きモータ（RE-max 29，減速比51:1）⁶⁾が1個，自重を支えるためのロープがある．全体の重量は4.2 [kg]である．今回試作した機構で車輪の取り付け角度は，上昇の際の進行方向上向き25 [°]とした．

試作した機構で円柱を上昇・下降することが可能かを確認するための動作確認実験を行った．昇降の対象となる円柱には外径114 [mm]の塩化

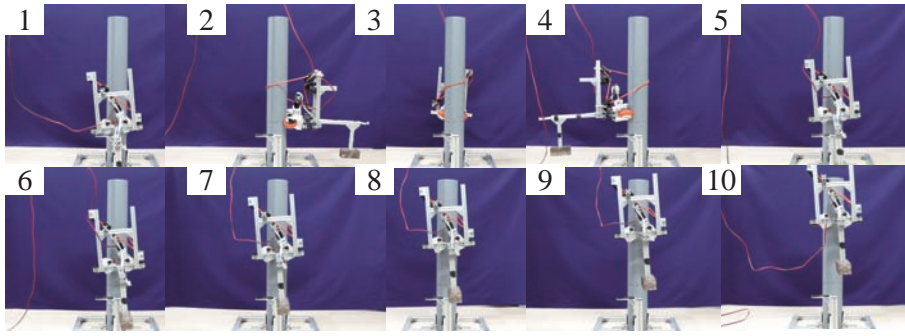


Fig. 3: Ascending movement

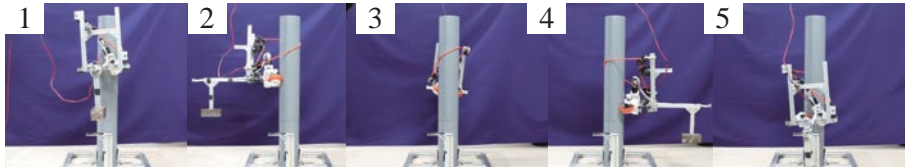


Fig. 4: Descending movement

Table 1: Lifting and lowering experiment results

| Input voltage [V] | 5 | | 3 | | 1 | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|
| Drive wheel | f | r | f | r | f | r |
| Ascending | ○ | × | — | | — | |
| Descending | × | × | ○ | △ | ○ | ○ |

ビニルパイプを使用する。以降の実験においてもこの円柱を昇降の対象とする。実験では、電源装置を用いてモータに 1, 3, 5 [V] の電圧を印加し車輪を駆動させた。試作した機構には車輪が 2 個取り付けられているが、片側の車輪のみ駆動輪となっている。そのため上昇と下降において、駆動車輪を進行方向の前方に配置した場合と、後方に配置した場合の 4 種類で動作確認を行った。

Table 1 に動作確認実験における、各印加電圧での前輪駆動と後輪駆動の場合の動作結果を示す。Table 1 において、駆動車輪を進行方向に対して前方に配置したものを f, 後方に配置したものを r で示している。○は目標の動作を行ったもの、△はモータ駆動開始時に滑りが生じたが後に目標の動作を行ったもの、×はモータ駆動開始時に姿勢が崩れて落下したものを表す。上昇の際の 3 [V], 1 [V] については、トルクが足らずに上昇しなかった。Fig. 3 に駆動車輪

を進行方向に対して前方に配置し 5 [V] の電圧で駆動して上昇させた際の様子を示す。Fig. 3 の 1~5 は最初の 1 周の様子を示し、6~10 はそれ以降の様子を 1 周ごとに示したものである。また、Fig.4 に駆動車輪を進行方向に対して後方に配置し 1 [V] の電圧で駆動して下降させた際の様子を示す。Fig.4 の 1~5 は最初の 1 周の様子を示している。

Table 1 より、試作した機構で駆動車輪が片側の場合のみは、駆動車輪を進行方向に対して前方に配置し適切な電圧を印加した場合に昇降することを確認した。また、駆動車輪を進行方向に対して後方に配置した場合においても、車輪を低速で回転させることで下降することを確認した。

4. 重心位置変更実験

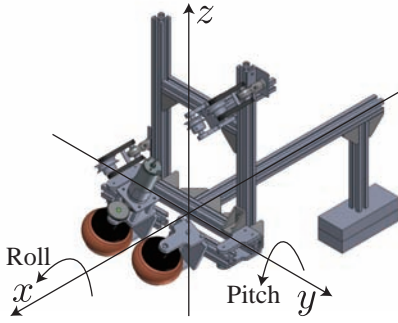
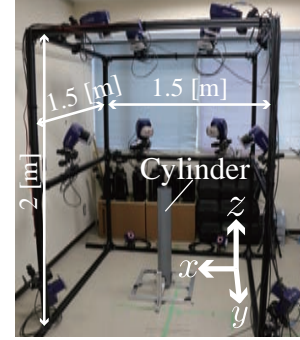
Fig. 5 のように機構の座標系を設定する。このとき x 方向, y 方向の重心位置の変化が上昇動作に及ぼす影響を実験により確認した。上昇動作を評価するために、機構の運動時の移動軌跡と Roll 方向, Pitch 方向の姿勢をモーションキャプチャ (Motion Analysis : Paptor-E, Kestrel1300) を用いて計測した。機構にマーカを貼りつけた状

Table 2: Experiment of changing the position of the center of gravity in the x direction

| Position of the center of gravity [mm] | | Amount of rise [mm] | Roll [°] | Pitch [°] | Wheel angle [°] | Rise angle [°] | rate of up [%] |
|--|------|---------------------|----------|-----------|-----------------|----------------|----------------|
| (-91, 1, -29) | avg. | 61.69 | -5.28 | -4.28 | 30.28 | 9.69 | 32.03 |
| | Cov. | 42.33 | 0.16 | 0.39 | 0.16 | 1.00 | 13.39 |
| (-130, 1, -29) | avg. | 65.85 | -5.45 | -7.94 | 30.45 | 10.33 | 30.93 |
| | Cov. | 29.03 | 0.19 | 1.40 | 0.19 | 0.68 | 8.42 |

Table 3: Experiment of changing the position of the center of gravity in the y direction

| Position of the center of gravity [mm] | | Amount of rise [mm] | Roll [°] | Pitch [°] | Wheel angle [°] | Rise angle [°] | rate of up [%] |
|--|------|---------------------|----------|-----------|-----------------|----------------|----------------|
| (-82, 1, -33) | avg. | 57.90 | -4.00 | -4.04 | 29.00 | 9.14 | 31.52 |
| | Cov. | 20.88 | 0.04 | 0.17 | 0.04 | 0.50 | 6.88 |
| (-82, -37, -33) | avg. | 25.52 | 3.94 | 1.76 | 21.06 | 4.04 | 19.19 |
| | Cov. | 9.76 | 0.01 | 0.38 | 0.11 | 0.24 | 5.61 |
| (-82, 39, -33) | avg. | 28.39 | -11.00 | -1.89 | 36.00 | 4.49 | 12.46 |
| | Cov. | 124.60 | 0.07 | 0.16 | 0.07 | 3.09 | 23.50 |

**Fig. 5:** Coordinate system of the prototype mechanism**Fig. 6:** Measurement environment

態で, Fig. 6 の中央の円柱を 5 周上昇させ, 運動を計測した. また, 姿勢を計測するために機構の x 軸, y 軸に平行になるようにマーカをそれぞれ 2 個ずつ配置した. そして, マーカを結ぶ直線と Fig. 6 のモーションキャプチャ座標系における z 軸との傾きを, 機構の Pitch 方向と Roll 方向の姿勢と設定した. また, 駆動車輪は進行方向に対して前側に配置した. モータに印加する電圧は, 動作確認実験で安定して上昇することを確認した 5 [V] で実験を行った. x 方向の重心位置については Fig. 7 のように, $x = -91$ と $x = -130$ の 2 条件で, y 方向の重心位置については Fig. 8

のように, $y = 1$, $y = -37$, $y = 39$ の 3 条件で実験を行った. x 方向, y 方向に重心位置を変更させた際の計測結果をそれぞれ **Table 2**, **Table 3** に示す. **Table 2**, **Table 3** の値は, 各重心位置において 5 周上昇させた際の 1 周ごとの各計測値の平均値と分散を 5 周分示している. 上昇量は 1 周あたりに上昇する高さ, 車輪角度は水平に対する車輪が円柱に接する角度, 上昇角度は 1 周する際の水平に対する平均の移動角度を示している. また, 車輪角度が異なる運動を評価するため, 上昇率 u を定義した. 上昇率 u は, 上昇角度を θ_u , 車輪角度を θ_w とした

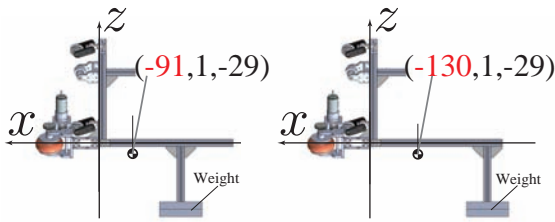


Fig. 7: Conditions for the position of the center of gravity in the x direction

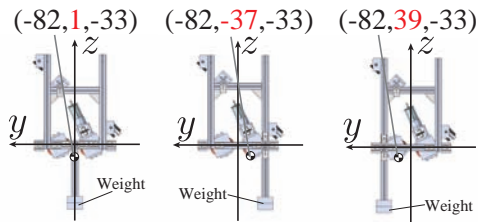


Fig. 8: Conditions for the position of the center of gravity in the y direction

ときに,

$$u = \frac{\theta_u}{\theta_w} \times 100 \quad (1)$$

で表される値であり、車輪が z 軸方向に滑らない場合を 100 としたときの実際に上昇した割合を表す。

x 方向の重心位置を変化させた場合の Table 2 の上昇率に関して、大きな差は見られなかった。 x 方向の重心位置は、車輪を円柱に押し付ける方向のモーメントに寄与していることが予想された。しかし上昇率に大きな差がなかったことから、今回の実験における x 方向の重心位置の変化量では、車輪の押しつけ力に影響しないことを確認した。

y 方向の重心位置を変化させた場合の Table 3 の Roll 角を見ると重心が移動した方向に機体が傾いていることから、 y 方向の重心位置は機体の Roll 周りの傾きに寄与していることがわかる。また上昇率を見ると、 y 方向の重心位置が機構の中心付近にある $y = 1$ の場合の上昇率が最も高く、中心から離れた $y = -37$, $y = 39$ の位置では上昇率が低くなっている。このことから、 y 軸方向の重心位置は、上昇率の観点から両車輪

にバランスよく荷重がかかる中心付近がよいと考えられる。

5. 結言

本稿では、U字吊りの原理で自重を支える円柱昇降機構を提案し、試作機を用いた実験により提案した手法で昇降することが可能なことを確認した。機構の重心位置を変化させた上昇実験において機構の運動を計測した。その結果、 x 方向の重心位置について今回の実験における移動量では上昇率に影響しないことを確認した。 y 方向の重心位置は機構の Roll 方向の姿勢変化に寄与することを確認した。また y 方向の重心位置は、両車輪にバランスよく荷重がかかる中心付近に配置するのがよいのではないかとということを確認した。

今後は、 z 方向の重心変化も加え、重心位置の条件増やして実験を行うほか、ロープを掛ける角度、車輪の取り付け角度などの機構パラメータを変更して実験を行い、機構の特性を調べ、機構のモデル化を行う。

参考文献

- 1) "枝打ちロボット, やまびこ" https://itasan.at.webry.info/201011/article_19.html (2020/11/30 アクセス)
- 2) 草島, 平田: 磁石を有する全方向車輪を用いた街灯検査ロボットの登攀性能の検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2P1-A12(2020)
- 3) A. Baghani, M. Ahmadabadi, A. Harati : Kinematics model-ing of a wheel-based pole climbing robot (UT-PCR), IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2099-2104(2005)
- 4) M. Tavakoli, A. Marjovi, L. Marques, A.T. de Almeida : 3DCLIMBER: A climbing robot for inspection of 3D human made structures, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4130-4135(2008)
- 5) Pongsakorn, P. and Thavida, M. : Development of a Helical Climbing Modular Snake Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation(2011)

- 6) "RE-max 29" <https://www.maxongroup.co.jp/maxon/view/product/motor/dcmotor/remax/remax29/226802> (2020/11/30 アクセス)