

# パラレルメカニズムによる跳躍機構 -基本構造と基礎式の検討-

## Jumping motion using parallel link mechanism - basic structure and formulation -

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1225035 田代 和人

### 1. 緒言

#### 1.1. 研究背景・目的

災害現場では災害被害によって障害物が散乱している状況が考えられる。また、農作業の現場においても地面が整地されていない場合が多く、地面の凹凸などといった不整地を踏破する必要がある。そのような状況で活動することを想定したロボットとして、跳躍可能な4足歩行ロボットが利用できると考察した。そのための機構として高剛性で高出力なパラレルメカニズムを利用する事ができると考えた。本研究ではパラレルメカニズムを用いて跳躍を行うことが可能なロボットの開発を目指した。今回はその基本構造を示し、跳躍のための基礎式を導出する。その後計算したロボットの跳躍可能性を検討した。

#### 1.2. パラレルメカニズム

パラレルリンクロボットとは複数のアクチュエータが先端部に対して並列に接続された機構を持つ構造である。特徴として複数のアクチュエータの出力が先端部に集中することから高出力化が容易であること、また複数のリンクが一点を支える構造となるため剛性を高めやすい事が挙げられる<sup>(1)(2)</sup>。これらの特徴は跳躍時に必要な力の確保や、跳躍時及び着地時に機体にかかる負担に耐えうる剛性の確保に有利に働くと考えられる。

#### 1.3. 採用した機構

今回の研究では屈曲型と呼ばれるパラレルリンクロボットの機構を採用した。全体の構造としては図1に示したようにリンク機構を三方対称に配した構造となっている。図2は対称に配されているリンクの概略である。リンクの機構は上部の胴体に固定された一軸の回転を出力するアクチュエータから伸びたリンクが、軸が垂直に交わった二軸関節を2つ介して足先につながる構造となっている。この機構は他の機構と比較して動作範囲が広く動作速度も速いという特徴があり、跳躍における機体加速時の加速距離と機体の最高速度の確保に有利であると考えられる。

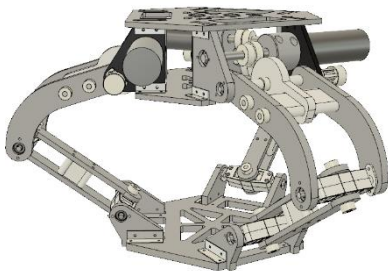


Fig. 1 Structure of parallel link mechanism 1

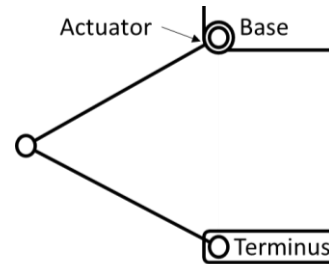


Fig. 2 Structure of parallel link mechanism 2

### 2. 跳躍原理の想定

#### 2.1. 跳躍原理

垂直跳躍時の機体の挙動は基本的に鉛直投げ上げと同じである。よって、跳躍する高さ $Y_M$ に対してロボットが地面を離れる際に必要な速度 $V_0$ は以下となる。

$$V_0 = \sqrt{2Y_M g} \quad \dots (1)$$

機体の質量 $M$ をそれぞれ上部のアクチュエータが搭載されている部位である胴体部の質量 $M_B$ と足先部の重量 $M_L$ に分けて考えた。機体全体が速度 $V_0$ で跳躍するために必要なエネルギーを持つための胴体部の速度を $V_B$ とした。

この速度を達成するために、次のような過程で跳躍が行われると想定した

- ① 関節を曲げて脚を縮めた状態にする。
- ② モータのトルクにより脚が伸びるように動作する。この際、機体の胴体部が持ち上げられ加速することによって運動エネルギーを得る。
- ③ 脚が一定の長さまで伸びたところで伸縮を停止する。この際胴体部が得た運動エネルギーによって機体全体が持ち上げられ跳躍を行う。

ここから $V_0$ と $V_B$ の関係は以下のようなようになる。

$$V_B = \sqrt{\frac{M}{M_B} V_0^2} \quad \dots (2)$$

この式から胴体部の重量 $M_B$ が大きいほど $V_0$ と $V_B$ の乖離が小さくなる事が確認できるため、設計においては胴体部に重量を集中するように設計を行った。

#### 2.2. 設計

以上の要件を元に機体の設計を行った。跳躍に必要な力を小さくする目的で機体の多くは木材繊維を圧縮した板材であるMDFで設計を行った。また各軸関節間の長さはそれぞれ150mmとして設計した。アクチュエータには3つのDCモータを採用し足先部がXYZの3自由度を持つように設計した。DCモータはヘッド部に減速比 $G_M$ でトルクを伝達するギアヘッドが付属している。ここから必要なトルクを調節する目的で減速比 $G$ のギアをもう一つ介してリンクにトルクを伝達するように設計した。

各部位について以下のように呼称する。

胴体部(body)：機体上部のモータを搭載し上部リンクが3つ接続している部分

上部リンク(L<sub>1</sub>)：胴体部と直接接続しているリンク

下部リンク(L<sub>2</sub>)：足先部と直接接続しているリンク

足先部(end)：機体下部の下部リンクが3つ接続している部分

上部関節(J<sub>1</sub>)：胴体部と上部リンクを接続する1軸の回転軸

中間関節(J<sub>3</sub>)：上部リンクと下部リンクを接続する2軸の回転軸

下部関節(J<sub>2</sub>)：下部リンクと足先部を接続する2軸の回転軸

### 2.3. トルクと加速度の関係

胴体部を加速する際のモータのトルクと胴体部の加速度の関係について計算を行った。この際3本あるリンクの内1本について考える。概略を図3に示す。胴体部を加速するためにリンクにかかる力をF、機体を持ち上げるためにリンクにかけるトルクをT<sub>L</sub>とした。上部のリンクの角度θ<sub>1</sub>が仮想変位dθ<sub>1</sub>だけ微小に変化したときのリンク上端の変位をdLとした。このときdLは以下ようになる。

$$dL = 2L_1 \sin(\theta_1 + d\theta_1) - 2L_1 \sin \theta_1 \quad \dots (3)$$

dθ<sub>1</sub>は微小なのでsin dθ<sub>1</sub> = dθ<sub>1</sub>, cos dθ<sub>1</sub> = 1として計算すると。

$$dL = 2L_1 d\theta_1 \cos \theta_1 \quad \dots (4)$$

仮想変位によって行われた仮想仕事の合計dWは0になるので以下の式を得る。

$$dW = -FdL + T_L d\theta_1 = 0 \quad \dots (5)$$

この式に式(4)を代入する。

$$F = \frac{T_L}{2 \cos \theta_1} \quad \dots (6)$$

リンクは3セットあるため胴体部を加速する力F<sub>B</sub>は

$$F_B = 3F \quad \dots (7)$$

となりここから胴体部の加速度aとT<sub>L</sub>の関係の求めると

$$a = \frac{3T_L}{2M_B \cos \theta_1} \quad \dots (8)$$

モータギアヘッド部の発揮するトルクT<sub>G</sub>は減速比Gのギアを介して伝達されるのでリンクに与えられるトルクT<sub>L</sub>との関係は以下ようになる。

$$T_L = GT_G \quad \dots (9)$$

モータギアヘッド部の発揮するトルクT<sub>G</sub>と加速度aの関係は以下ようになる。

$$a = \frac{3GT_G}{2M_B \cos \theta_1} \quad \dots (10)$$

モータの発揮するトルクT<sub>M</sub>は減速比G<sub>M</sub>でギアヘッドから出力される。同じように考えて

$$a = \frac{3GG_M T_M}{2M_B \cos \theta_1} \quad \dots (11)$$

となりモータのトルクと胴体部の加速度の関係となる。

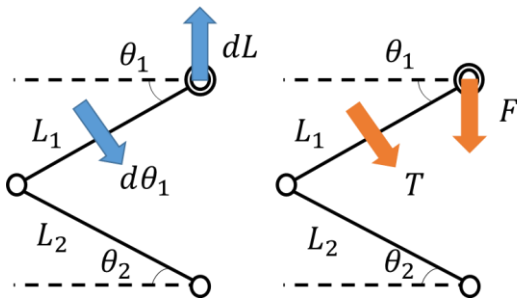


Fig. 3 Structure of link

### 2.4. 胴体速度と角速度の関係

リンク上端の速度Vに対する上部リンクの角速度ω<sub>1</sub>の関係を求めた。

このとき以下のように定義する。

V<sub>1</sub>：L<sub>1</sub>上端に対するL<sub>1</sub>下端の垂直方向の速度

ω<sub>1</sub>：L<sub>1</sub>の角速度

V<sub>1</sub>'：ω<sub>1</sub>によるL<sub>1</sub>下端の円周方向の速度

V<sub>2</sub>：L<sub>2</sub>上端に対するL<sub>2</sub>下端の垂直方向の速度

ω<sub>2</sub>：L<sub>2</sub>の角速度

V<sub>2</sub>'：ω<sub>2</sub>によるL<sub>2</sub>下端の円周方向の速度

このときV<sub>1</sub>'を求める。

$$V_1' = L_1 \omega_1 \quad \dots (12)$$

V<sub>1</sub>'よりω<sub>1</sub>とV<sub>1</sub>の関係は以下ようになる。

$$V_1 = L_1 \omega_1 \cos \theta_1 \quad \dots (13)$$

L<sub>2</sub>についても同様に考えて

$$V_2 = L_2 \omega_2 \cos \theta_2 \quad \dots (14)$$

L<sub>1</sub>上端に対するL<sub>2</sub>下端の速度Vは

$$V = V_1 + V_2 = L_1 \omega_1 \cos \theta_1 + L_2 \omega_2 \cos \theta_2 \quad \dots (15)$$

L<sub>1</sub> = L<sub>2</sub>, θ<sub>1</sub> = θ<sub>2</sub>なのでω<sub>1</sub> = ω<sub>2</sub>となり

$$\omega_1 = \frac{V}{2L_1 \cos \theta_1} \quad \dots (16)$$

よってリンク上端の速度Vに対する上部リンクの角速度ω<sub>1</sub>の関係が求まった。

ここから減速比Gのギアを介してギアヘッドから回転が伝達されているためギアヘッドの出力する角速度ω<sub>G</sub>は以下ようになる。

$$\omega_G = \frac{GV}{2L_1 \cos \theta_1} \quad \dots (17)$$

更にモータの回転は減速比G<sub>M</sub>でモータから伝達されているためモータの出力する角速度ω<sub>M</sub>は以下ようになる。

$$\omega_M = \frac{GG_M V}{2L_1 \cos \theta_1} \quad \dots (18)$$

### 2.5. 跳躍動作の検討

以上の式から跳躍時の機体の挙動について検討を行った。

機体の挙動としては跳躍原理の項でも述べたとおり垂直跳躍を想定した。機体の加速を始める最初の姿勢としてθ<sub>1</sub>が10[deg]の状態から脚を0.14[m]伸ばすことで加速を行うものとし、足を伸ばした距離を加速距離lとした。

機体胴体部の加速度aは一定で加速するものとした。これにより加速開始からの経過時間ごとの機体の姿勢がわかるため、式(10) (11)から経過時間ごとのモータ及びギアヘッドの出力するトルクを求めた。同じように経過時間ごとの姿勢から式(17) (18)を利用してモータ及びギアヘッドの回転数の推移を求めた。

モータギアヘッド部のトルクの85%が胴体部を持ち上げる力になっているものとして計算を行った。このため式(10)を以下のように変更して計算を行った。

$$a = \frac{3GT_G \times 0.85}{2M_B \cos \theta_1} \quad \dots (19)$$

モータの出力したトルクの90%がギアヘッドから出力されているとして式(11)を以下のように変更して計算を行った。

$$a = \frac{3GG_M T_M \times 0.85 \times 0.9}{2M_B \cos \theta_1} \quad \dots (19)$$

この他の各条件については以下の表1の通りに設定を行った。機体の重量に関しては設計した部品の密度と体積から計算して求めた。計算時のM<sub>B</sub>は胴体部と上部リンクの重量を足したものを使用した。

Table 1 Setting conditions

Overall weight	$M$ [kg]	5.29
Body weight	$M_B$ [kg]	4.15
Jumping height	$Y_M$ [m]	0.08
Acceleration distance	$l$ [m]	0.14
Reduction ratio	$G$	2
Gear head reduction ratio	$G_M$	26

実際に今回使用するモータは「DCX35L GB KL 36V」とし、ギアヘッドは「GPX37 A 26:1」を使用するものとした。

ギアヘッドの断続最大トルクは6.8[Nm]であり、最大断続入力回転数7500[r/min]及び減速比 $G_M = 26$ から最大断続回転数は288.4[r/min]である。モータの最大断続トルクは252[mNm]であり、最大許容回転数は12300[r/min]である。

これらの条件から加速開始から終了までのモータのギアヘッド発揮するトルクと回転数の関係を図4に、モータの発揮するトルクと回転数の関係を図5にそれぞれ示す。また図4, 5には特定のトルクと回転数のときの胴体速度 $V$ も示す。加速が終了するまでの時間は0.198[s]となった。

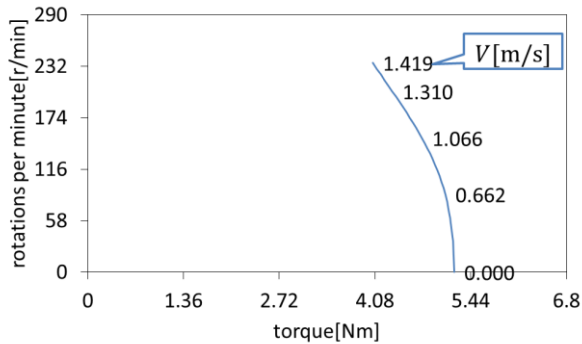


Fig. 4 Gear head torque and speed

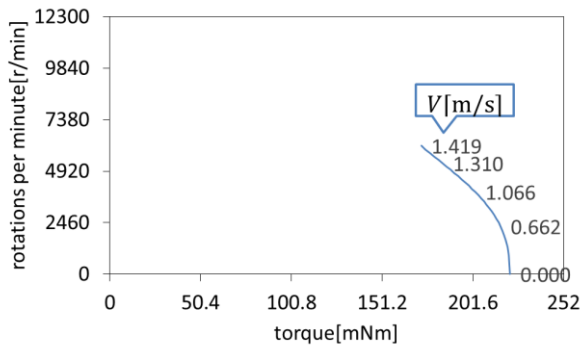


Fig. 5 Motor torque and speed

モータの発揮するトルクと回転数の推移として、トルクは時間の経過とともに小さくなっていき回転数が大きくなっていくことが確認できた。

トルクと回転数は採用したモータの動作可能な範囲に収まっていることが確認できたため跳躍可能であると言える。

### 3. 機体の製作と自立

#### 3.1. 製作した機体

以上の想定をもとに実際に機体を製作した。図6に機体の画像を示す。

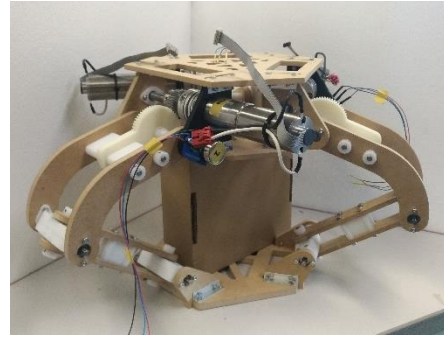


Fig. 6 Produced parallel link mechanism

組み立てた後コード類を除いた機体全体の重量は5.11 kgとなり、胴体部及び上部リンクを合わせた重量は4.13 kgとなった。

#### 3.2. 機体の制御

モータを制御はArduinoとMATLABのシリアル通信を利用、モータドライバには” ESCON 70/10”を使用した。システムの概略を図7に示す。

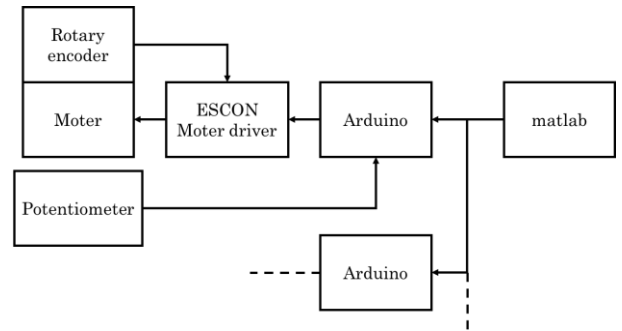


Fig. 7 Control system structure

機体の状態を観測するセンサとしては上部関節に装着したポテンシオメータを利用して機体の上部リンクの姿勢角を計測し、モータ後部のロータリーエンコーダを利用してモータの速度を観測している。

モータに対してはモータドライバがロータリーエンコーダでフィードバックした回転数をもとにArduinoから受けた回転数の指令と同じ回転数になるように回転数制御が行われている。またArduinoはポテンシオメータからのフィードバックをもとに位置制御を行っている。

#### 3.3. 機体の自立

跳躍のためにはまず機体が自立していることが必要であるため、製作した機体に自立する能力があるかを検証した。

機体を持ち上げた状態で上部関節の角度を一定の状態に保つように制御を行い、その状態で地面に接地させた。上部関節の角度は40 degから60 degの間で5 degずつ変化させて検証を行った。

以下図8に実験結果を示す。

上部リンクの角度が60~50 degの際は、胴体に対して足先部が傾いており機体を支えることができていないことが確認できた。またそれ以下の角度の場合は足先部がねじれており機体を支えることができていないことが確認された。



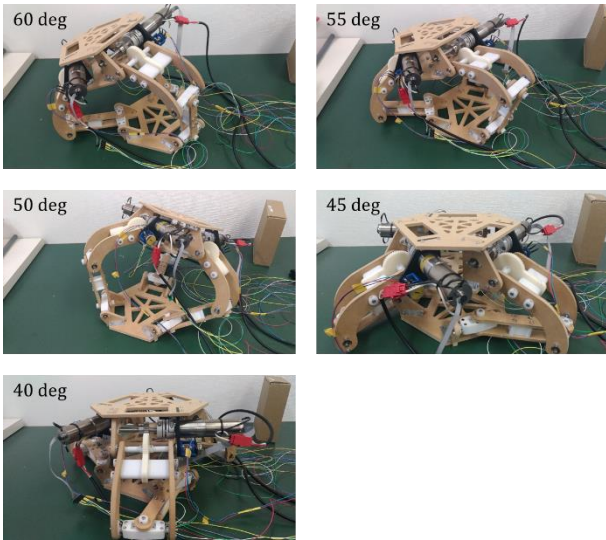


Fig. 8 Upright experimental results 1

足先が傾いた原因としては製作時の工作精度と、機体の構造による剛性不足の 2 つの要因によって引き起こされたがたつきと、がたつきが足先部の傾きとして現れてしまう構造が原因であると考えられる。

足先の姿勢がねじれた原因としては、リンク機構の構造が足先がねじれた状態になりうる構造となっていることが原因である。上部リンクの角度が浅い場合足先がねじれた場合と近い姿勢になっているため、リンクのがたつきと合わせてリンクが負荷に耐えきれず本来の姿勢から足先がねじれた状態へ変化してしまうためであると考えられる。

解決策として下部リンク周りの構造を図 9 左側の現在の構造から図 9 右側のような構造に変更することによって、がたつきが足先部の傾きとしてあらわれないような設計に変更することが考えられる。中間関節( $J_3$ )に対して下部関節( $J_2$ )が常に平行になるような構造となっており、これによって足先の傾きを抑制することが可能であると考えられる。

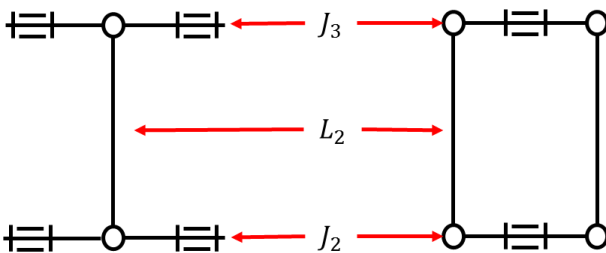


Fig. 9 Proposed structural changes

### 3.4. 関節を制限した状態での自立

先述の実験結果から中間・下部関節横方向回転軸が自立を妨げる原因であると考えたことから、回転軸を固定した場合機体が自立できるかどうかを検証した。

中間関節及び下部関節の構造を図 10 のように変更し、関節横方向の回転を固定した。この状態で 3.3 の実験と同じく機体を持ち上げた状態で上部関節の角度を 20deg の状態に保つように制御を行い、その状態で地面に接地させた。その後自立が確認できた場合、上部関節の角度を 60deg にまで低速で変化させ、60deg の状態で 2 秒待機させた後 30deg にまで低速に変化させた。これは跳躍時に行う胴体部の持ち上げ動作と着地時に行う足先の持ち上げ動作を想定した動作である。

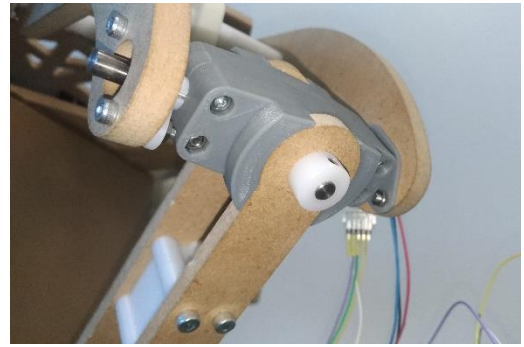


Fig. 10 Changed joint

以下に実験結果を図 11 に示す。

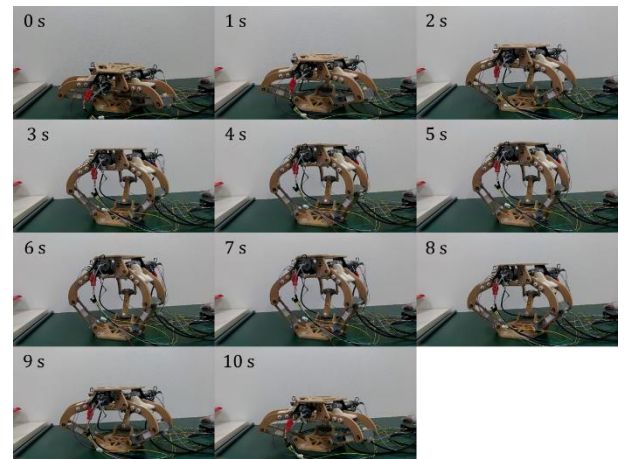


Fig. 11 Upright experimental results 2

自立し、胴体部を持ち上げる動作ができたことから基礎式の導出において想定した跳躍動作が可能な機構であると言える。

横方向の関節を固定することで足先部のがたつきがほとんどなくなったことから、足先部のがたつきの原因はほぼ中間関節及び下部関節の横方向の回転軸に起因するものであることがわかった。このことから第 4 章の考察で示した機構の改善案について足先部の傾きが発生しづらだけでなく、がたつきを発生しづらい設計にすることを強く意識して設計する必要があるといえる。

## 4. 結言

パラレルメカニズムを用いたロボットの跳躍に関して、機体の構造の決定と跳躍の可能性について検討を行った。パラレルメカニズムで跳躍可能な力を発生させることができることが確認できた。

しかし実際の機体では跳躍の前段階である自立ができず、改良が必要であることが確認された。原因として関節の設計に起因するがたつきと、そのがたつきが足先部の傾きとしてあらわれてしまう中間・下部関節の構造の問題が挙げられ、改良の必要があることが確認された。

### 謝辞

本研究の一部は、高知県プロジェクト[「IoP (Internet of Plants)」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化]の助成により行っています。

## 文献

- (1) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所「パラレルメカニズム」  
<https://staff.aist.go.jp/koseki-y/tutorial/parallel/parallel-j.htm>  
(最終検索日：2020年1月17日)
- (2) 楠田喜宏, ”パラレルメカニズム実用化の展望”,  
日本ロボット学会誌, 第30巻 第2号(2012), 118-122
- (3) 田代和人, 岡宏一, 原田明德 “パラレルメカニズムを用いたロボットの跳躍に関する検討”, 計測自動制御学会(2019年)