

2019（令和元）年度 修士学位論文

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
-basicstructure and formulation-

2020年3月9日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225035 田代 和人

指導教員 岡 宏一 教授
原田 明德 講師

目次

1. 緒言	1
1.1. 研究背景	1
1.2. 研究目的	1
1.3. パラレルメカニズム	2
1.4. 機構の採用.....	2
1.5. 本論文の構成	3
2. 跳躍動作の想定	4
2.1. 跳躍原理	4
2.2. 機体の設計.....	6
2.3. トルクと加速度の関係	8
2.4. 胴体速度と角速度の関係	10
2.5. 跳躍動作の検討	12
3. 実験機の構成	14
3.1. 製作した機体	14
3.2. 機体の制御について	14
4. 機体の自立	16
4.1. 実験方法	16
4.2. 実験結果	16
4.3. 考察	17
5. 関節を制限した状態での自立	20
5.1. 実験方法	20
5.2. 実験結果	21

5.3. 考察	21
6. 結言	22
6.1. 研究まとめ.....	22
6.2. 今後の展望.....	22
謝辞	22
参考文献.....	23
付録.....	24
付録 A：機体の素材の密度と重量.....	24

1. 序論

1.1. 研究背景

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、農作業の現場などでも地面が整地されていない場合が多く、凹凸のある不整地となっている事が多い。このようにロボットの活動が考えられる現場は必ずしも整地された場所ではない可能性があり、またこれらの状況においてロボットの活動しやすい状況を整えることが難しい場合が考えられる。このような状況においてロボットを導入しようとした場合、一定以上の不整地の踏破能力が求められる。

不整地の踏破性能の高いロボットとして複数の足を利用したロボットが考えられる。⁽¹⁾ これらの歩行脚にはロボットの本体を支える出力と剛性が必要になる。これを達成する手段としてパラレルメカニズムを用いることが挙げられる。パラレルメカニズムは高剛性で高出力化しやすく、⁽²⁾⁽³⁾これらの点に着目したパラレルメカニズムを用いた歩行ロボットの研究が行われている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

今回これらのパラレルメカニズムを用いた歩行ロボットの更なる発展として、跳躍が可能な歩行ロボットを考えた。通常の歩行に加えて跳躍を行うことで不整地の踏破能力の向上が見込んだものである。また、パラレルメカニズムの高剛性で高出力であるという点は跳躍ロボットの脚部として有利な点である。

1.2. 研究目的

不整地を踏破可能なロボットとして跳躍可能な4足歩行ロボットを製作することを目的に、本研究ではパラレルメカニズムを用いて跳躍可能なロボットの開発を目指した。今回は跳躍可能な機体の基本構造を示し、跳躍のための基礎式を導出する。その後、基礎式からロボットの跳躍可能性について検討を行い、実際に機体を製作し動作の確認を行った。

1.3. 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。⁽²⁾特徴としては通常の直列なロボットと比較して、複数のアクチュエータの出力が先端部に集中することにより高出力化が容易であること、複数のリンクが一点を支える構造のため剛性を高めやすいことが挙げられる。⁽³⁾

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荷に耐えうる剛性の確保に有利に働くと考えた。

1.4. 機構の採用

今回の研究では屈曲型と呼ばれるパラレルメカニズムの機構を採用した。これはベースに回転を出力するアクチュエータを固定し、接続されたリンク機構によって先端部につながる構造となっている。この機構の特徴として動作範囲が比較的広く、素早い動作が可能であることが挙げられる。このことから、跳躍時の拘束動作及び機体加速時の加速距離の確保に有利であると考えた。

今回採用した構造の概要を図 1.1 に示す。リンク機構を三方対称に配した構造となっている。図 1.2 は対称に配置されているリンクの概略である。構造としては上部の胴体部に固定された回転を出力するアクチュエータが垂直に交わった回転二軸関節を 2 つ介して足先につながる構造となっている。

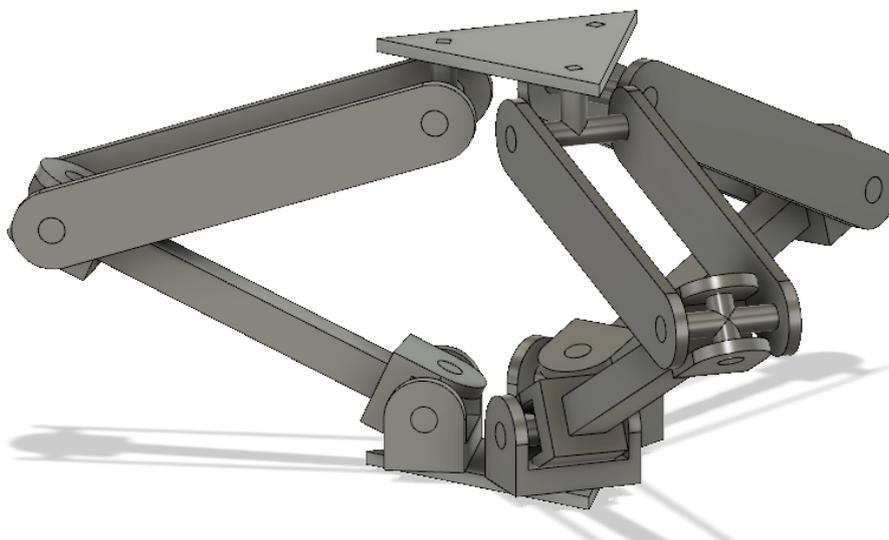


Fig. 1.1 Structure of parallel link mechanism 1

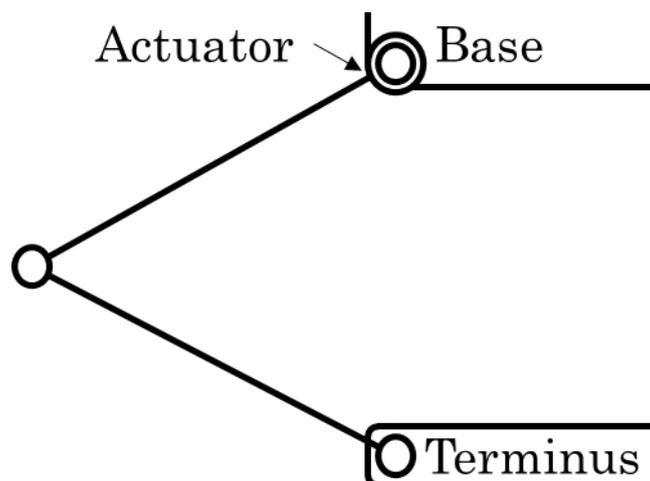


Fig. 1.2 Structure of parallel link mechanism 2

1.5. 本論文の構成

本論文の2章で跳躍動作の想定を行い，跳躍可能な機体の設計と跳躍のために必要な機体の挙動について述べる．第3章では実際に製作した機体を提示し，どのように制御を行ったかを述べる．第4章では実際に製作した機体を動作させた結果について述べる．第5章にて本研究のまとめと今後の課題について述べる．

2. 跳躍動作の想定

2.1. 跳躍原理

今回の研究では垂直跳躍を想定して跳躍の検討を行った。垂直跳躍時の機体の挙動は鉛直投げ上げと同じである。ここから跳躍する高さ 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。

$$V_0 = \sqrt{2Y_M g} \quad (3)$$

モータの搭載された部位を胴体部として、機体全体がこの速度を達成するために以下の様な過程で跳躍が行われると想定した。それぞれの過程を図 2.1 に示す。

- 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。

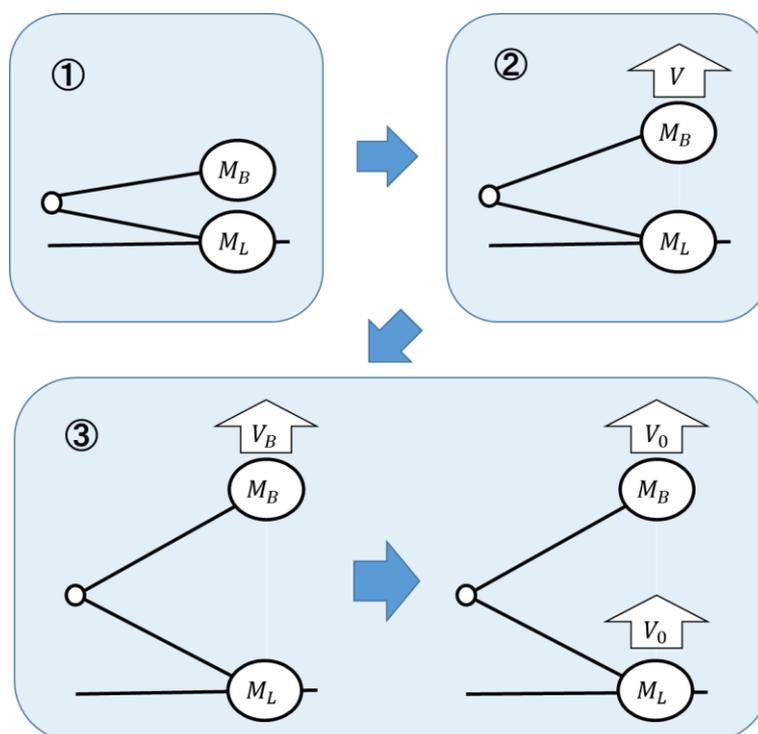


Fig. 2.1 Jumping process

機体全体の質量を M として胴体部の質量を M_B とし、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。このとき V_0 と V_B の関係は以下のようになる

$$V_B = \sqrt{\frac{M}{M_B}} V_0 \quad (3)$$

この式から、胴体部の質量 M_B が大きいほど V_0 と V_B の乖離が少なく V_B の大きさを小さくできることが確認された。

2.2. 機体の設計

設計した機体を図 2.2 に示す.

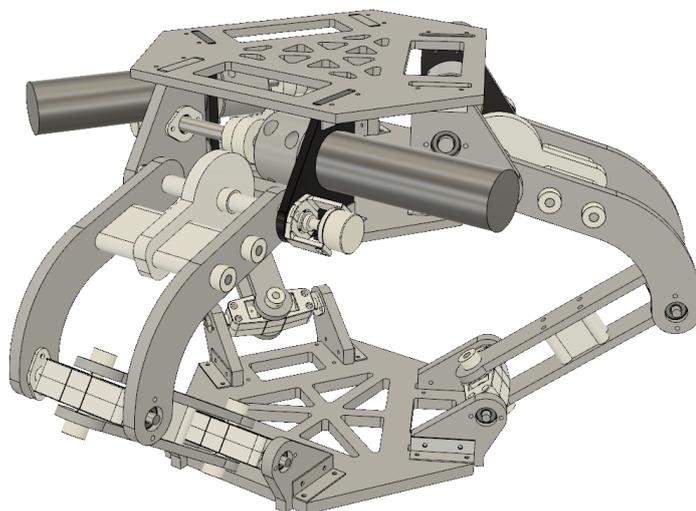


Fig. 2.2 Designed parallel link mechanism

式 (3) で示したとおり胴体部の重量の割合が大きいほど胴体部の質量 M_B が大きいほど V_0 と V_B の乖離が少なく V_B の大きさを小さくできることから、胴体部に重量が集中するように設計した。また機体の構成材として軽量化により跳躍に必要な力を小さくする目的で木材繊維を圧縮した板材である MDF や、ABS や POM 等といった樹脂材を中心に設計を行った。

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_1)：胴体部と直接接続しているリンク

下部リンク(L_2)：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_1)：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_3)：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_2)：下部リンクと足先部を接続する 2 軸の回転軸

上部リンク及び下部リンクの長さは、上部-中間関節間と中部-下部関節間の距離が150 mmになるように設計した。計算を簡易化するために胴体部の真下に足先部が置かれた場合、下部関節の位置が上部関節の真下に位置するように設計した。

機体の動作を観測するセンサとして上部関節に装着したポテンショメータと、モータ後部に装着されるロータリーエンコーダを使用することとした。ポテンショメータは機体の上部リンクの姿勢を観測するために使用し、モータの回転速度をロータリーエンコーダを使用して観測することで上部リンクの回転速度を読み取る想定で設計を行った。

中間軸関節について、動作範囲を拡大する目的で設計を行った。上部リンク側が支持する縦回転の軸（図 2.3 赤線部）の間に下部リンクと接続する横回転の軸（図 2.3 緑線部）を配置した。これに加えて上部リンクを湾曲させることで縦横双方の回転軸の動作範囲を確保した。下部関節にも同じものを採用した。

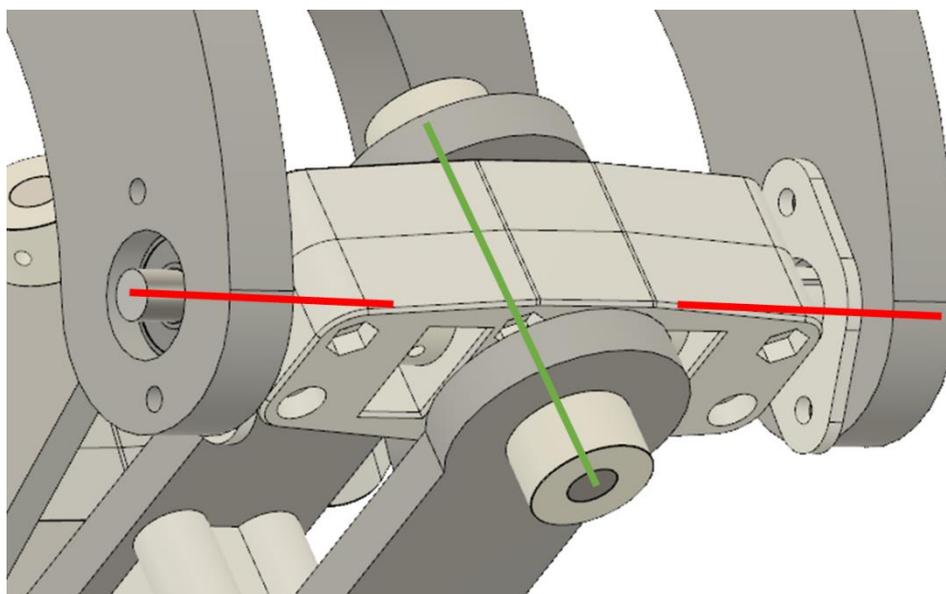


Fig. 2.3 Joint J_3

機体の CAD データから各 부품の体積が求められるため、各 부품の素材の密度から機体の重量を求めた。重量に関して情報のある部品に関してはその情報を利用した。結果、機体重量は5.29 kgとなった。各素材の計算時に使用した密度と、全体における各素材の重量は付録 A に記載する。

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。リンクにかかるトルクと力及、びリンクが微小変位した際の変位について図 2.4 に示す。

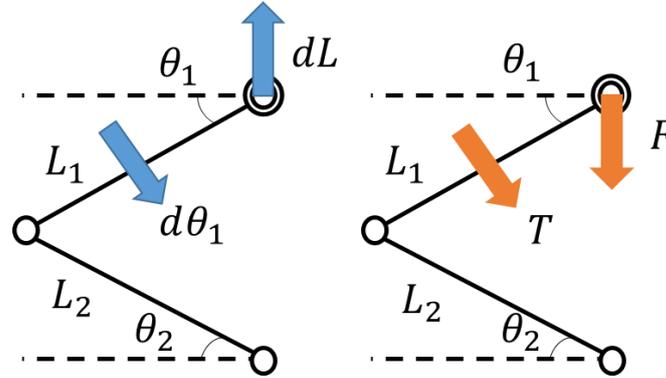


Fig. 2.4 Structure of link

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_L とした。上部のリンクの角度 θ_1 が仮想変位 $d\theta_1$ 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。

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

$d\theta_1$ は微小なので $\sin d\theta_1 = d\theta_1$ ， $\cos d\theta_1 = 1$ として計算すると。

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

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。

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

この式に式(4)を代入すると、

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

となる。リンクは3セットあるため胴体部を加速する力 F_B は

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

となりここから胴体部の加速度 a と T_L の関係を求めると

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

またここでモータギアヘッド部の発揮するトルク T_G 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_L との関係は以下のようなになる。

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

ここからモータギアヘッド部の発揮するトルク T_G と加速度 a の関係は以下のようなになる。

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

ここでモータの発揮するトルク T_M は減速比 G_M でギアヘッドから出力される。同じように考えて

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

となりモータのトルクと胴体部の加速度の関係となる。

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_1 の関係を求めた。
このとき以下のように定義し、 L_1 についてまとめた図 2.5 を示す。

V_1 : L_1 上端に対する L_1 下端の垂直方向の速度

ω_1 : L_1 の角速度

V_1' : ω_1 による L_1 下端の円周方向の速度

V_2 : L_2 上端に対する L_2 下端の垂直方向の速度

ω_2 : L_2 の角速度

V_2' : ω_2 による L_2 下端の円周方向の速度

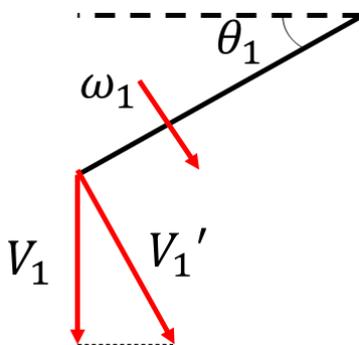


Fig. 2.5 Speed around L_1 link

このとき V_1' を求める。

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

V_1' より ω_1 と V_1 の関係は以下のようになる。

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

L_2 についても同様に考えて

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

L_1 上端に対する L_2 下端の速度 V は

$$\begin{aligned}
 V &= V_1 + V_2 \\
 &= L_1 \omega_1 \cos \theta_1 + L_2 \omega_2 \cos \theta_2
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$L_1 = L_2$, $\theta_1 = \theta_2$ なので $\omega_1 = \omega_2$ となり

$$\omega_1 = \frac{V}{2L_1 \cos \theta_1}
 \tag{16}$$

リンク上端の速度 V に対する上部リンクの角速度 ω_1 の関係が求まった.

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_G は以下のようなになる.

$$\omega_G = \frac{GV}{2L_1 \cos \theta_1}
 \tag{17}$$

モータの回転は減速比 G_M 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_M は以下のようなになる.

$$\omega_M = \frac{GG_M V}{2L_1 \cos \theta_1}
 \tag{18}$$

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_1 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。

ま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。

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

また、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。

$$a = \frac{3GG_M T_M \times 0.85 \times 0.9}{2M_B \cos \theta_1} \quad (20)$$

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。計算時の M_B は胴体部と上部リンクの重量を足したものをを使用した。

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

また実際に今回使用するモータは「DCX35LGB 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 2.6 に、モータの発揮するトルクと回転数の関係を図 2.7 にそれぞれ示す。また図 2.6, 2.7 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。

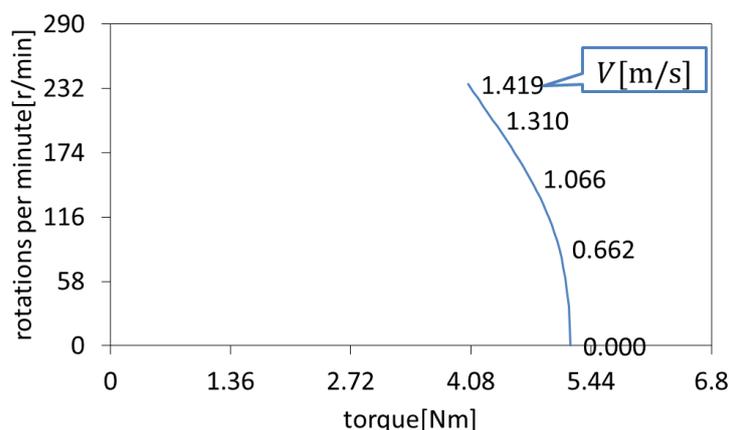


Fig. 2.6 Gear head torque and speed

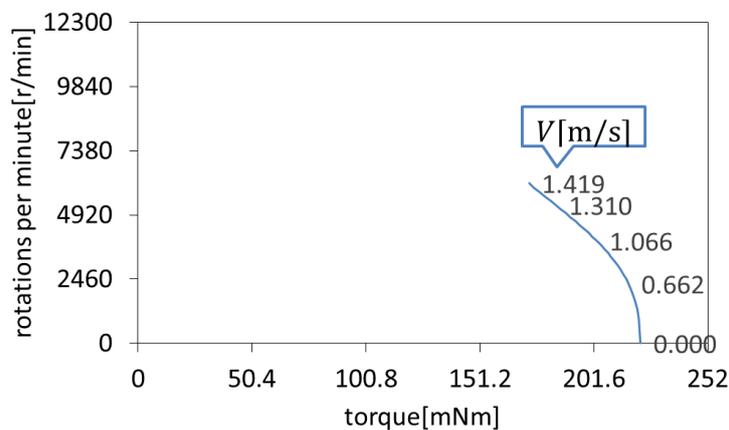


Fig. 2.7 Motor torque and speed

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. 実験機の構成

3.1. 製作した機体

製作した機体を図 3.1 に示す.

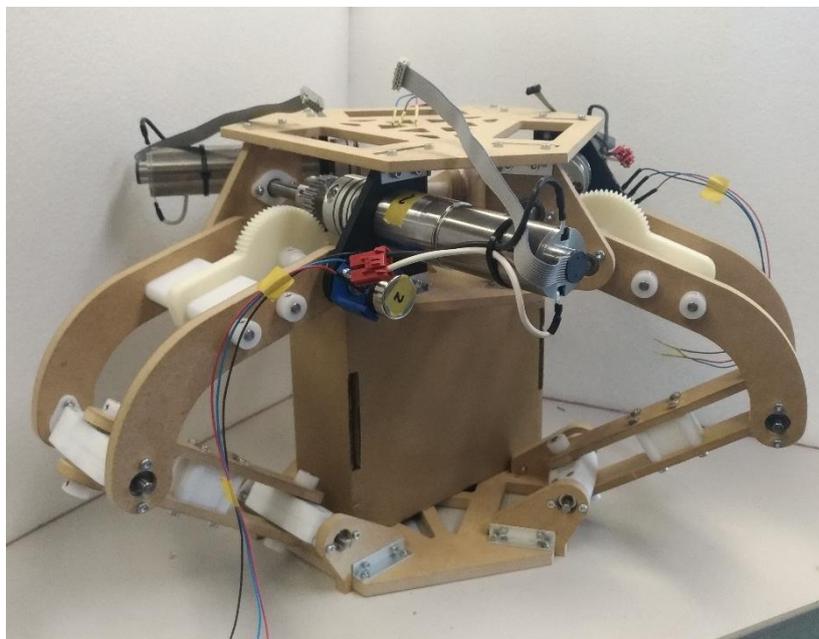


Fig. 3.1 Produced parallel link mechanism

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，胴体部及び上腕部を合わせた重量は4.13 kgとなった.

3.2. 機体の制御について

モータを制御は Arduino と MATLAB のシリアル通信を利用して行った. システムの概略を図 3.2 に示す.

モータドライバには”ESCON 70/10”を使用した. また, マイコンには”Arduino UNO”をモータ1つあたり1つ使用し, モータドライバへの指令の送信やポテンショメータの値の読み取りに使用した.

Arduino は MATLAB の”MATLAB Support Package for Arduino Hardware”を使用して動作させた.

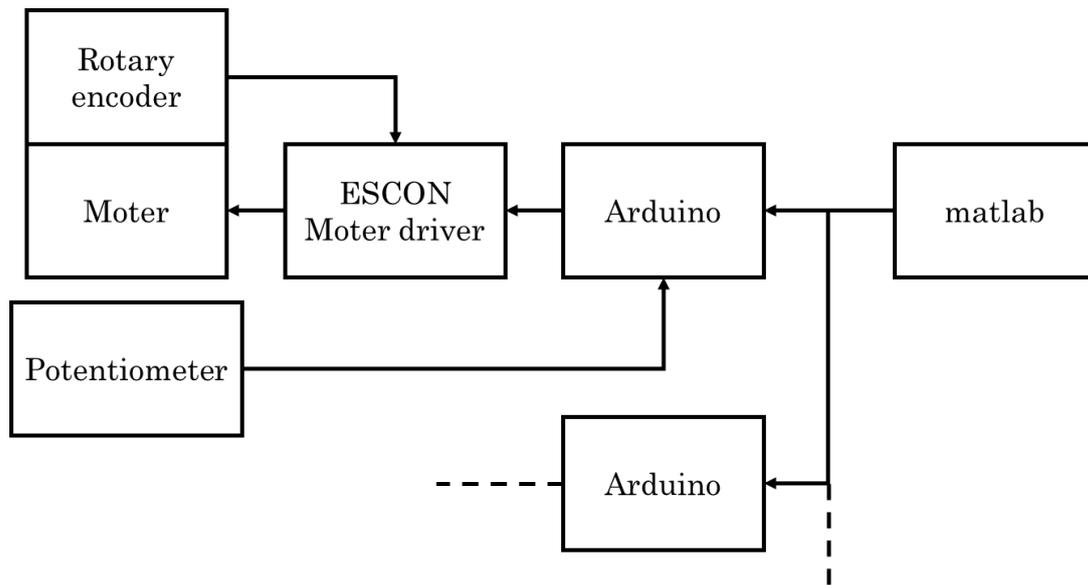


Fig. 3.2 Control system structure

機体の状態を観測するセンサとしてはポテンショ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 はポテンショ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。

4. 機体の自立

4.1. 実験方法

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。

4.2. 実験結果

実験結果を以下の図 4.1 に示す。

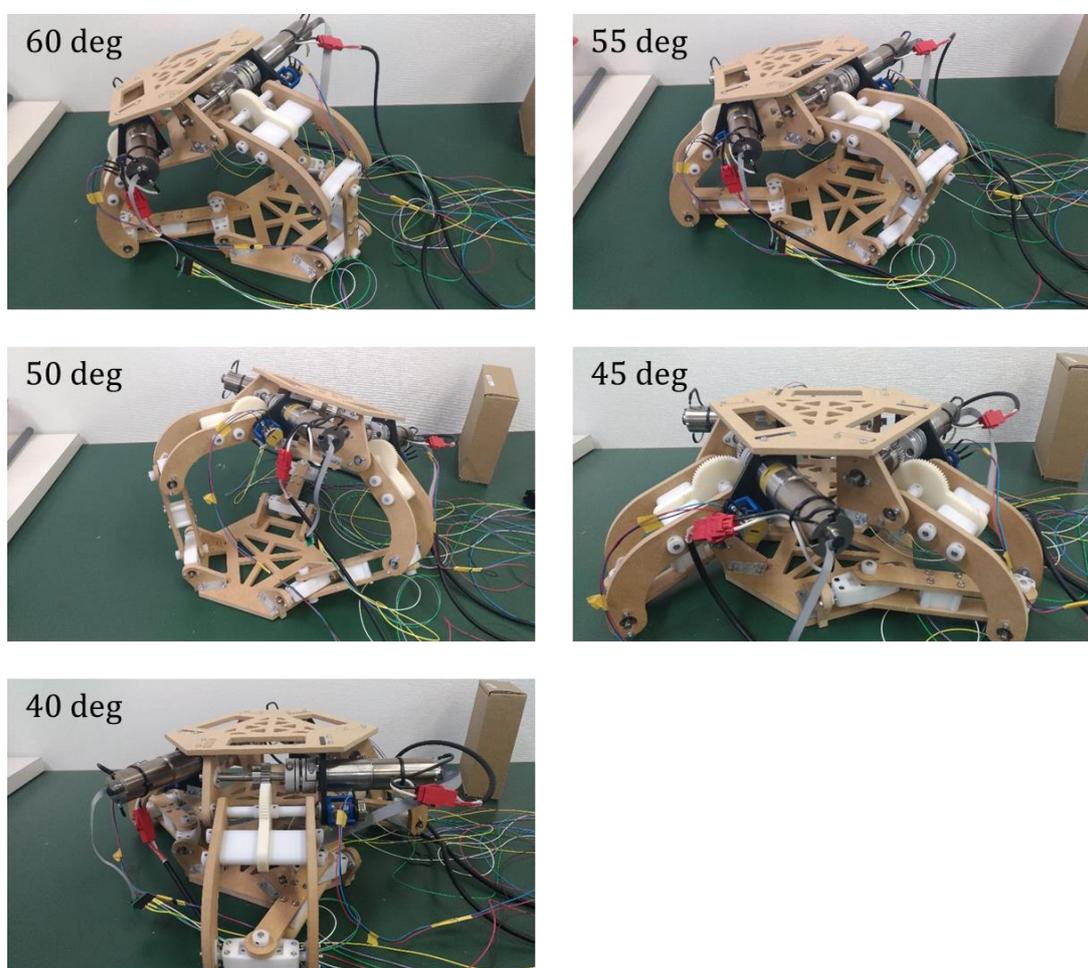


Fig. 4.1 Upright experimental results 1

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。

4.3. 考察

自立できなかった原因としては製造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、中間関節及び下部関節の横回転の関節が独立している構造が原因であると考えられる。

がたつきが起こった具体的な原因としては中間関節と下部関節の横回転の軸を支えるベアリングの距離が短く、ぐらつきが発生しやすくなっていること。また図4.2に示す上部リンクの中間関節の支持部が長い片持はりとなっており、力の影響を受けやすい状態である事が挙げられる。

がたつきが足先の傾きとして現れた原因として、図4.3に示すとおり中間関節と下部関節の横回転の関節が連動しておらず独立しており、足先部のがたつきが起きた際に足先が傾くのを抑えることのできない構造となっていることが挙げられる

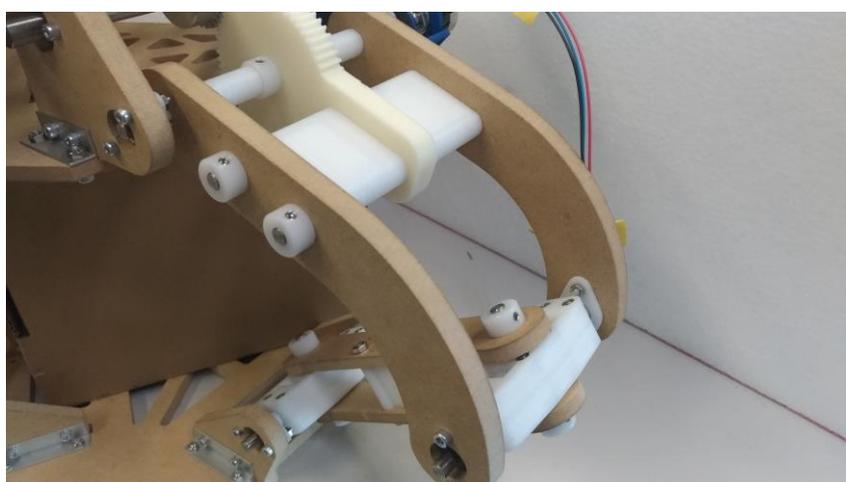


Fig. 4.2 Produced L_1 link

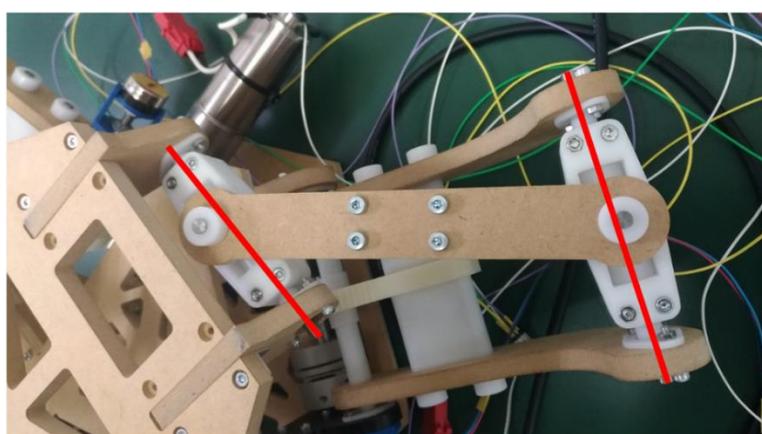


Fig. 4.3 Non-parallel joints

屈曲型パラレルメカニズムでは図 4.4 に示すように、ある上部リンクの角度に対して計算上 2 通りの姿勢を取りうる機構である。本来ならこの 2 つの姿勢は関節をひっくり返さなければ変形することなく、どちらかの姿勢で固定される。しかし今回の設計では中間関節及び下部関節の横回転の関節が独立しているため、図 4.5 のような足先がねじれた状態の姿勢で更に 2 通りの姿勢を取りうる機構となっている。本来取るべき姿勢と足先部がねじれているときの姿勢が近い場合、リンクに掛かる力に耐えきれずねじれた姿勢に変化してしまうことが確認された。

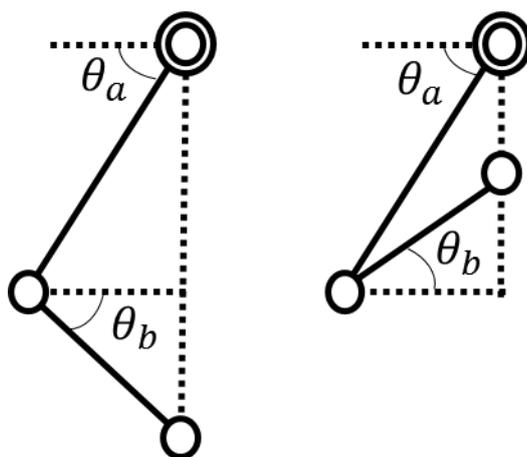


Fig. 4.4 Posture of the parallel mechanism

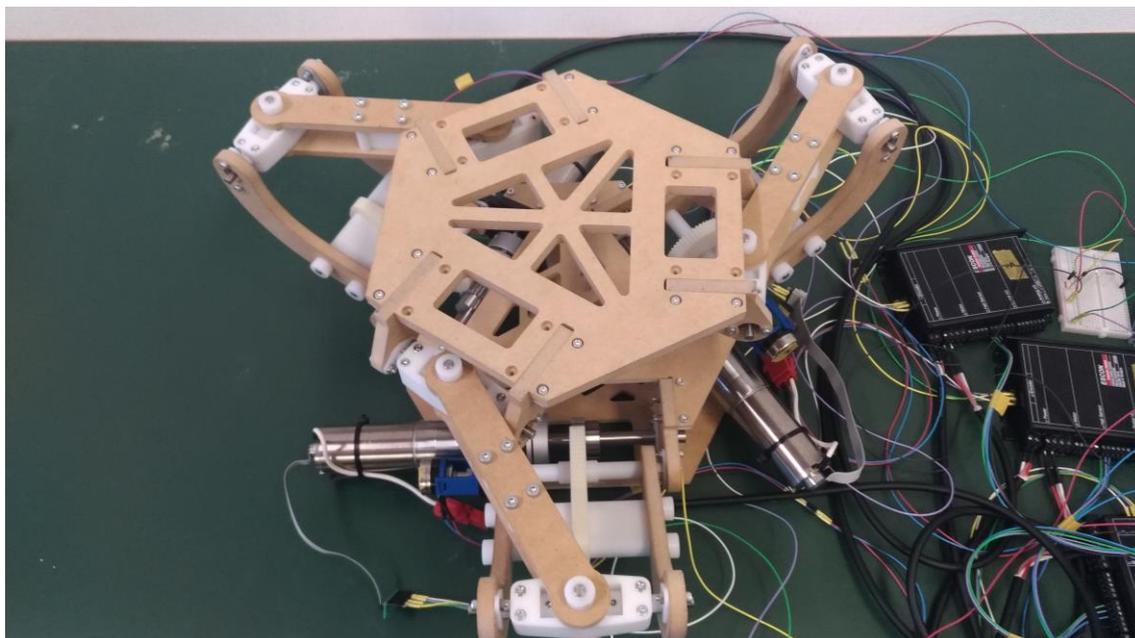


Fig. 4.5 Twisted posture

以上の点から各姿勢において自立できなかった原因は以下のように考えられる。

60~55 degでの姿勢では関節のがたつきが中間関節及び下部関節の横回転の関節が独立している事によって足先部の傾きとして発生しており，それによって下部関節の一つが伸び切った状態になることで足先を支えることができずそのまま大きく傾いてしまっている。

また，50 degの姿勢でも足先部のがたつきと関節の構造を原因として傾いてしまっており自立を困難にしている。

45~40 degでの姿勢ではがたつきと剛性不足を原因として，本体重量による負荷にリンクが負けて本来取るべき姿勢から足先がねじれた姿勢へと変化してしまったものと考えられる。

これを改善する方法として，下部リンク及び中間・下部関節の構造を図 4.6 左側の現在の機構から図 4.6 右側のように変更し中間関節と下部関節の横方向の動作について連動するような設計にすることが考えられる。中間関節に対して下部関節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。

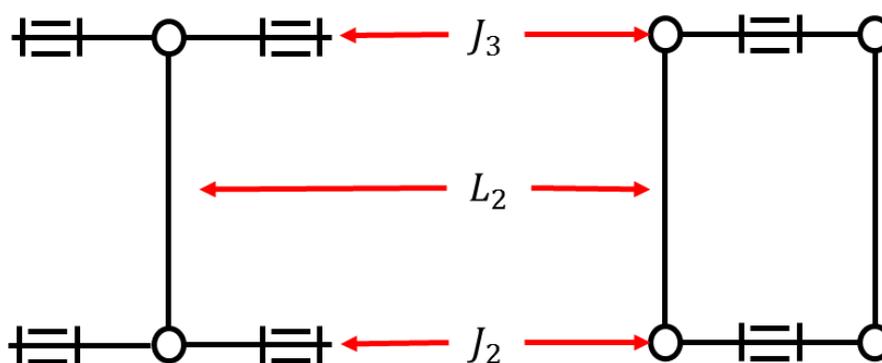


Fig. 4.6 Proposed structural changes

5. 関節を制限した状態での自立

5.1. 実験方法

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 5.1 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4章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の状態を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。

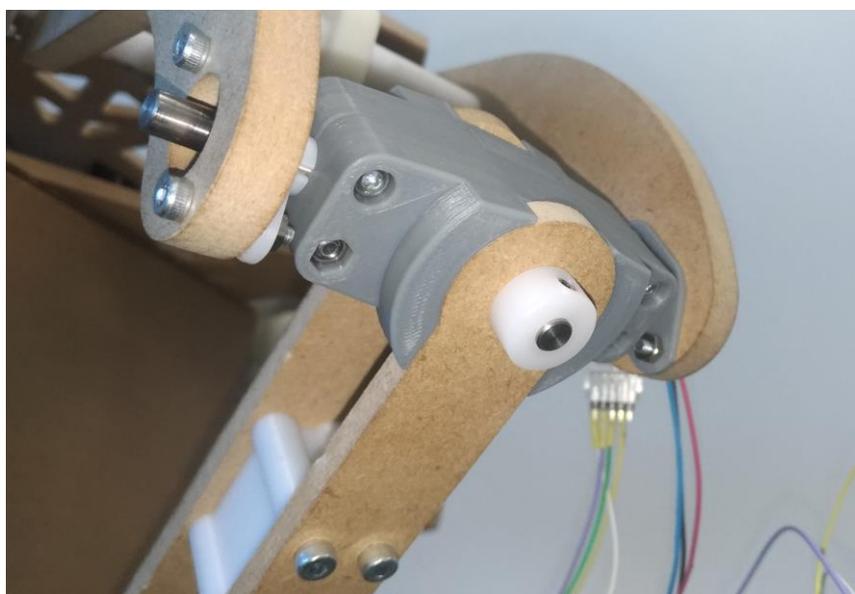


Fig. 5.1 Changed joint

5.2. 実験結果

機体は自立することができ、想定した動作を行うことができた。

また足先部のがたつきについても、モータギアヘッドのバックラッシュを起因とする上下方向のブレ以外はほとんど見られなかった。

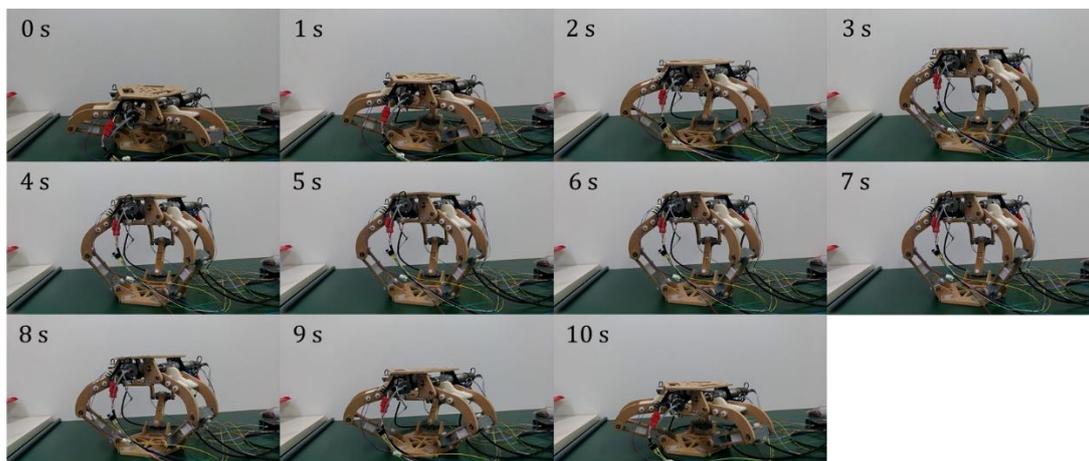


Fig. 5.2 Upright experimental results 2

5.3. 考察

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いだけでなく、がたつきが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。

6. 結言

6.1. 研究まとめ

跳躍可能なパラレルメカニズム機構の検討と、跳躍に関する基礎式の検討を行った。またこれらをもとに実際に機体を製作し、その動作を検討した。

跳躍可能な機構と、それを利用して跳躍可能な力を発生させる事が可能であることが計算によって確認できた。

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。

上記の結果を踏まえ中間・下部関節の横方向の回転を停止した場合は機体の自立及び胴体部の持ち上げ動作が可能であることが確認された。このことから中間・下部関節の構造が機体の自立を妨げている原因であることが確認された。

6.2. 今後の展望

機体の構造の改良を行い、実際の機体による自立および跳躍が可能な機体を設計する必要がある。また、跳躍後の着地時に機体に負荷をかけないようにする着地動作の検討を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究にご指導くださった指導教官の岡宏一教授，原田明德講師に心から感謝いたします。ほか多くの助言や助けを頂いた機械・航空システム制御研究室のメンバーにも感謝します。

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。

参考文献

- (1) 藤江正克, ” 極限作業における 4 足歩行ロボット”,
日本機械学会誌, 第 11 卷 第 3 号(1993), 366-371
- (2) 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 2 月 7 日)
- (3) 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 卷 第 2 号(2012), 118-122
- (4) 菅原雄介, 圓戸辰郎, 細島拓也, 御厨裕, 林憲玉, 高西淳夫,
“脚機構にパラレルメカニズムを用いた汎用 2 足ロコモータの開発”
日本機械学会論文集(C 編), 70 卷 691 号(2004), 790-797
- (5) 曾碩真弘, 中川秀夫, 久保田均,
”パラレルリンク機構を持つ人搭載型 4 足歩行ロボットの開発”
2013 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2013), 617-618
- (6) 柳沼匠, 竹島崇, 清水悦郎, 伊藤雅則, 田原淳一郎
“水中作業用パラレルリンク型四足ロボットの研究開発”
日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 45 卷 第 5 号(2010), 731-736

付録

付録 A : 機体の素材の密度と重量

Table A.1 Material density

Stainless Steel	8 g/cm ³
ABS	1.06 g/cm ³
MDF	0.8 g/cm ³
POM	1.425 g/cm ³
Aluminum	2.7 g/cm ³

Table A.2 Weight per material

MDF	1008.837 g
ABS	431.577 g
Stainless Steel	628.404 g
POM	224.649 g
Aluminum	36.648 g
Bearing	108.600 g
Bolt・Nut	336.486g
Motor	2085.000 g
Others	363.900 g
Overall	5296.101 g