

2018（平成 30）年度 修士学位論文

惑星探査ローバーのマニピレータ形重心移動機構の開発

Development of the manipulator from center of gravity movement mechanism of planetary probe Rover

2019 年 3 月 8 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

1215037 米田政耶

指導教員 岡宏一 教授
原田明德 講師

目次

第0章 文字の定義.....	1
第1章 諸言.....	3
1-1 惑星探査におけるローバーの有用.....	3
1-2 ローバーのサスペンション.....	3
1-3 不整地走行におけるローバーの走破性能の評価指標.....	5
1-4 過去の重心移動機構の研究.....	5
1-5 サスペンションとしての併用.....	7
第2章 マニピュレータの形重心移動機構の製作.....	8
2-1 マニピュレータの形状と仕様.....	8
2-2 設計に用いた式.....	10
2-3 手先質量の選定と接続部余白.....	11
2-4 マニピュレータの全長選定.....	13
2-5 リンク長さと選定と重心移動範囲の計算.....	14
2-6 マニピュレータ形重心移動機構の設計.....	16
第3章 製作機器の概要.....	18
3-1 走行部の仕様.....	18
3-2 マニピュレータ形重心移動機構の試作機.....	20
3-3 マニピュレータおよび走行部の制御系仕様.....	23
3-4 作製機と従来機との比較.....	25
3-5 重心制御方法の構想.....	26
3-6 目標重心移動軌道に追従するリンク回転角の計算結果.....	28
第4章 実験方法.....	31
4-1 走破性能評価指標と実験条件.....	31
4-2 車輪の形状と測定装置.....	32
第5章 整地した砂の路面での走行実験結果.....	34
5-1 重心位置を中心部に固定した状態(G0)での走行.....	34
5-2 前輪片側に重心を固定した状態での走行.....	35
5-3 後輪片側に重心を固定した状態での走行.....	37
5-4 前輪及び後輪に重心を固定した状態での走行.....	39
5-5 Z方向最大重心変化での走行.....	41
5-6 整地した砂の路面における実験考察.....	43
第6章 片輪障害物乗り越えの走行実験.....	45
6-1 重心位置中心部での砂の隆起走破時.....	45
6-2 重心位置前輪片側での砂の隆起走破時.....	45
6-3 重心位置後輪片側での砂の隆起走破時.....	47
6-4 重心位置前輪および後輪中央での砂の隆起走破時.....	49
6-5 Z方向最大重心変化での砂の隆起走破.....	51
6-6 砂の隆起走破における考察.....	53

第 7 章 結言.....	54
参考文献.....	55
謝辞.....	56

0 文字の定義

本文に入る前に、今回の計算に使用した文字の定義を行う。

なお、下記に記載する定義の内容を補足する Fig. 0. 1, Fig. 0. 2, Fig. 0. 3 に示す。

L_1 : 第 1 リンク長さ(計算時の使用数値)
 L_2 : 第 2 リンク長さ(計算時の使用数値)
 m_0 : 走行部質量とマニピュレータ固定部の質量との合算値
 m_1 : 第 1 リンク質量
 m_2 : 関節部質量
 m_3 : 第 2 リンク質量
 m_4 : 手先部材質量
 m_D : 駆動モータに使用するモータドライバーの質量
 m_E : 鉛蓄電池の質量
 M_{all} : 全質量の和
 θ_1 : 第 1 リンク回転角
 θ_2 : 第 2 リンク回転角
 G_0 : マニピュレータ固定位置(xy 平面の原点)
 G_1 : 第 1 リンク部材重心位置(xy 平面)
 G_2 : 関節部重心座標(xy 平面)
 G_3 : 第 2 リンク部材重心位置(xy 平面)
 G_4 : 手先部材重心位置(xy 平面)
 x_1 : 第 1 リンク部材質量集中点とマニピュレータ固定軸との距離(x 座標)
 x_2 : 第 2 リンク固定軸とマニピュレータ固定軸との距離(x 座標)
 x_3 : 第 2 リンク部材質量集中点とマニピュレータ固定軸との距離(x 座標)
 x_4 : マニピュレータ手先とマニピュレータ固定軸との距離(x 座標)

y_1 : 第 1 リンク部材質量集中点とマニピュレータ固定軸との距離(y 座標)
 y_2 : 第 2 リンク固定軸とマニピュレータ固定軸との距離(y 座標)
 y_3 : 第 2 リンク部材質量集中点とマニピュレータ固定軸との距離(y 座標)
 y_4 : マニピュレータ手先とマニピュレータ固定軸との距離(y 座標)
 $G_{x,y}$: 全体の重心位置(xy 平面)
 G_x : 全体の重心位置(x 座標)
 G_y : 全体の重心位置(y 座標)
 De_1 : マニピュレータ固定位置から第 1 リンク部材の長さとの差
 De_2 : 第 2 リンクを固定する軸と第 1 リンクとの差
 De_3 : 第 2 リンク固定軸と第 2 リンク部材長さの差
 De_4 : 第 2 リンク部材末端と手先の質量集中位置との差
 x_{En} : 使用バッテリーの x 座標(なお添え字 n は図 3 の名称番号と対応する)
 y_{En} : 使用バッテリーの y 座標(なお添え字 n は図 3 の名称番号と対応する)
 x_{Dn} : 使用モータドライバーの x 座標(なお添え字 n は図 3 の名称番号と対応する)
 y_{Dn} : 使用モータドライバーの y 座標(なお添え字 n は図 3 の名称番号と対応する)
 $constX$: バッテリーの x 座標と質量の積とモータドライバーの x 座標と質量の積との和
 $constY$: バッテリーの y 座標と質量の積とモータドライバーの y 座標と質量の積との和

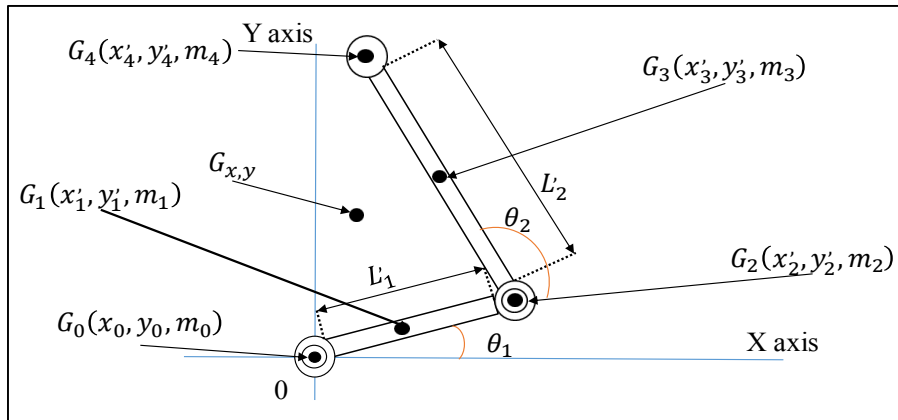


Fig.0.1 Simplified diagram of manipulator before design

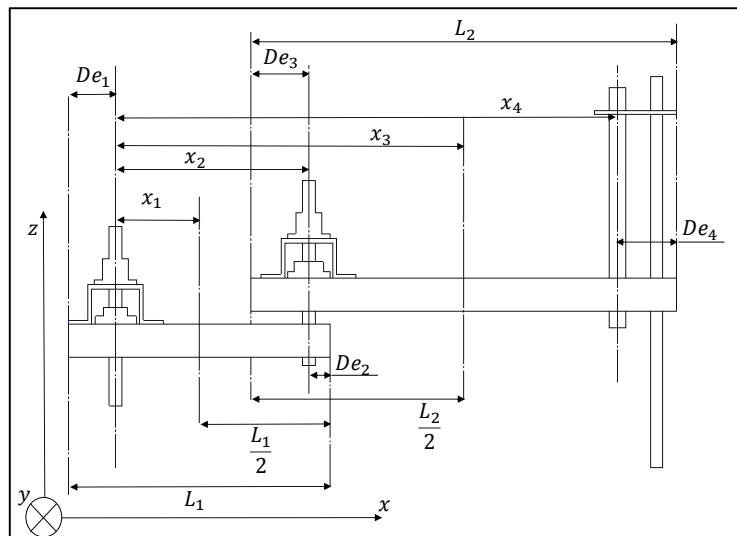


Fig.0.2 Outline of manipulator after design

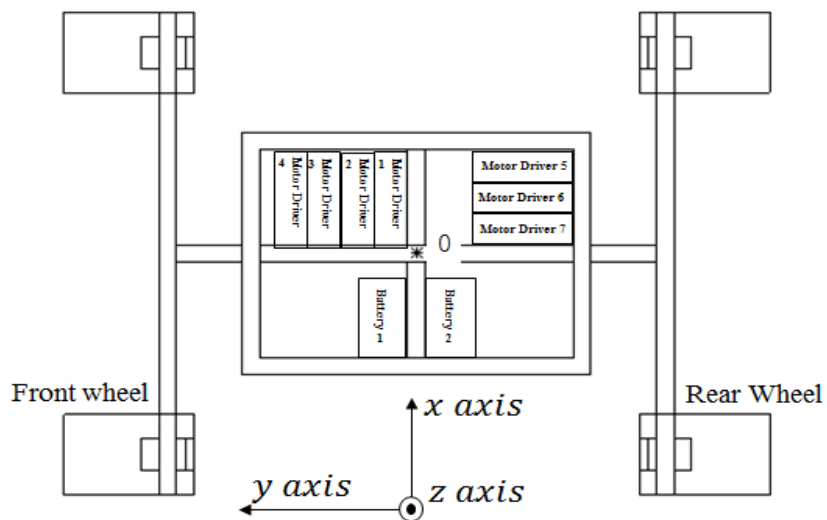


Fig.0.3 Sketch of the part name mounted with Rover

第1章 諸元

1-1 惑星探査におけるローバーの有用性

月や惑星探査には宇宙や太陽系の起源を解明し、人類の科学技術の発展につながる科学的意義と、将来月面基地の建設や宇宙資源の活用に貢献する工学的意義がある。よって月や惑星探査は人類の進歩するために必要不可欠なものであると考える。惑星探査の方法には、大きく分けて人口衛星を使用するフライバイとオービタ、着陸機を使用するランダとローバーがある。この内フライバイとオービタは惑星全体の地形や性質または惑星周辺の宇宙環境を観測するのに適している。しかしより詳細に惑星の地質や大気の組成等を知るためには、ランダやローバー等の着陸機を使用した探査が最も有効的であり、人間が直接行く場合と比べてコストと安全性の観点からも実用的である。ランダによる探査が着陸位置周辺に探査範囲が限定されるのに比べ、ローバーを使用した探査では惑星表面を移動することでより広範囲を探査することが可能である。また、ローバーは将来的に月や火星での物資や人の輸送手段、建設用のロボットとしても活躍が期待されている。これ等のことよりローバーは天文学や宇宙産業の発展における重要な役割を持っており、今後も惑星探査の主流になると考えられる。

1-2 ローバーのサスペンション

ローバーは惑星表面を移動するが、月や火星等の惑星は低重力に加えて、その地表はで細かな砂で覆われた軟弱地盤に、岩等が点在する不整地である。そのためローバーには惑星環境を考慮した走行機構(サスペンション)が要求される。サスペンションの性能を示す指標は明確には定義されていないが、本稿では以下のⅠ～Ⅲのように定義する。

Ⅰ 消費電力性

Ⅱ 故障信頼性

Ⅲ 走破性能 不本意ではありますが傷つけてしまいました

まず消費電力性とは電力の消費量を示し、使用するエネルギーに限られる惑星探査において電力消費が少ないことは非常に重要な要素である。故障信頼性とは、故障のしにくさの示す指標であり悪環境の中、長期にわたり稼動する惑星探査においてこちらも重要な要素である。走破性能とは、目標探査軌道に追従できる能力を現したものである。この要素についてだが各研究者によって解釈や評価が異なるため、別項にて再度記載する。

次に具体的なローバーの走行機構について示す。大きく分けて、車輪型 Fig. 1.1, クローラ型 Fig. 1.2, 脚型 Fig. 1.3 に大きく分類される。この中で現在までに実際の惑星探査ミッションに使用されてきたのは主に車輪型である。その理由として、省電力であることに加えて、機構が簡素であることから故障のリスクが低く、総合的な信頼性が高いことが挙げられる。しかし他の機構に比べ、車輪機構単体での不整地走破は困難であるため、更なるサスペンション機構を用いて走破性をカバーする必要がある。

これまでサスペンションには消費電力性を考慮し、電力を使用しないパッシブな機構の物が採用されてきた。代表的なものとしてローカーボギー機構 Fig.1.4 が存在する。これは左右 3 輪ずつがリンクで連結され、計 6 つの車輪を用いた機構である。リンクと回転軸の働きによるモーメントによって 3 輪にかかる接地圧が等しくなる。しかしパッシブな機構であるため、特定の環境においては車輪が砂地に沈みこんでしまう状態(スタック)に陥り行動不能になる場合や、そういった地形を避けるために目的地まで時間のかかるルートを選択を余儀なくされる場合が少なく無いため、走破性能が高いとは言えない。よってパッシブな機構のみでの運用には限界があると考える。実際に 2009 年に火星で活動していたローバーのスピリットは、岩の上に車体が乗り上げた状態で砂地に嵌ってしまい、それがミッションの中止に繋がった。また近年では原子力電池を積んだローバー(マーズ・サイエンス・ラボラトリー)Fig.1.1 が運用可能になったことや、材料やアクチュエータの技術革新により、消費電力性が高いアクティブサスペンション機構を有するローバーの研究も積極的に行われるようになってきている。



Fig.1.1 Wheel type⁽⁶⁾



Fig.1.2 Crawler type⁽⁷⁾



Fig.1.3 Leg type⁽⁸⁾

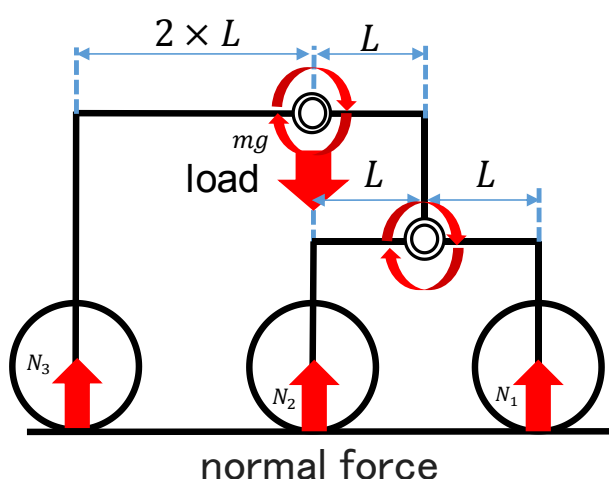


Fig.1.4 Roker Bogie mechanism

1-3 不整地走行におけるローバーの走破性能の評価指標

車輪型ローバーの不整地走破性能の評価指標は現在も明確な定義は存在しないが、以下のような項目が一般的に考えられている^{(1), (2), (3)}。

1. 車輪の路面粘着性
2. ローバーの転倒安定性
3. 段差乗り越え能力
4. スタック脱出能力
5. スリップ率
6. 最大駆動力

路面粘着性とは式(1.1)で示されるような各車輪に働く力のばらつきを示した指標であり、 N_i が各車輪にかかる接地荷重、 N^- が各車輪の接地荷重の平均を表す。小さい方が車輪の沈下量及び駆動力の均一化の観点から有利である。転倒安定性は転倒のしにくさを示す指標である。その一つとして正規化エネルギー安定余裕法が存在し、式(1.2)で表される。これは現在の重心位置高さ h_g と重心位置が描く最大高さ h_{max} との差で与えられ、値が小さいほど転倒安定余裕があることを示す。段差乗り越え能力はローバーがどれだけの高さの段差を乗り越えられるか、またその時の安定性等を示す。スリップ率は車輪回転速度と車体進行方向速度の差を車輪回転数で割った無次元数であり、軟弱地盤走行においては重要な評価指標であると考えた。最大駆動力は不整地でローバーが発揮できる駆動力の限界を表す。これらの指標を改善するためにはどのようなことが必要かを考えた場合、いずれの指標も重心位置に大きく依存していると考えた。よって重心位置の能動的な制御を行うことで、ローバーの走破性能を改善できると考えられる。

$$\varphi = \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - N^-)^2} \quad \dots(1.1)$$

$$S_{NE} = h_{max} - h_0 \quad \dots(1.2)$$

1-4 過去の重心移動機構の研究

過去の重心移動機構を持つローバーの研究としては、重心移動がローバーの Mobility 性能の向上に有効であることを示した物⁽²⁾や、前輪と後輪の接地面角度が違う場合における路面粘着性と転倒安定性の重みづけによる重心位置制御アルゴリズムの有効性を示した物⁽¹⁾等がある。これらの研究により重心移動機構の有効性は示されてきたが、いずれの場合もアクティブサスペンションのみを用いた評価であり、また 1 次元方向にしか重心位置を制御していないため、段差乗り越え+登坂といった複合的でより実環境に近い状態での評価はなされていない。

本研究室には Fig1.5 のような惑星探査ローバーの試作機が存在する． 本試作機には2つのサスペンションが搭載されている．

1. 平行リンク機構(前輪)

2. 二次元重心位置能動制御機構

1の平行リンク機構について Fig.1.6 に示す． この機構は両輪をそれぞれ二本の平行リンクで接続することにより，片輪が上がった際にもう片方の車輪が下がる仕組みになっている． これにより両車輪が異なる高さで接地できるため，片輪段差乗り越え時や，より複合的な地形で安定した姿勢を保つことができ， より広義での重心位置制御を可能にしている．

2の仕組みを Fig.1.7 に示す． 機構としては y 方向レール上に x 方向レールを乗せ，その上に乗せた重心部の錘をそれぞれモータとベルトを使い移動させている． これにより車輪にかかる接地圧及び，車体の姿勢状態に合わせて，重心位置を変化させることができる． 重心部の現在の位置はモータの反対側に取り付けられたポテンシオメータの出力電圧から知ることができる． 以上2つを兼ね備えることにより，走破性能，故障信頼性，消費電力性の3つが両立した機体を目指し研究が進められてきた．

実際の惑星探査を想定した場合重心移動のため，機体に錘を搭載することは質量の大幅な増加に繋がるため，実現的な機構とは言えない． 現在重心部には車体全体の重心を移動させるために 15kg の錘が搭載されている． 重心部として新たに重量のあるものを搭載するのであれば，バッテリーや回路部などローバーに本来備わっている機構を錘として移動させることが望ましいと考えた． 今回は現在の重心部の代わりに探査に必要な機構を用いて重心移動することでより，実現性のある機体設計を目指す．

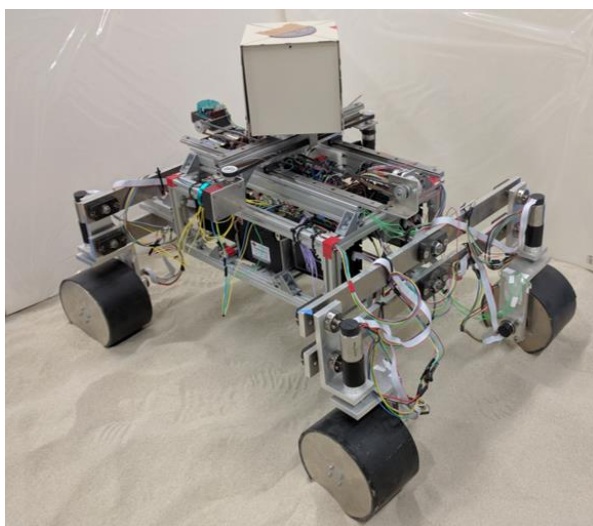


Fig.1.5 Prototype used in previous research⁽⁵⁾

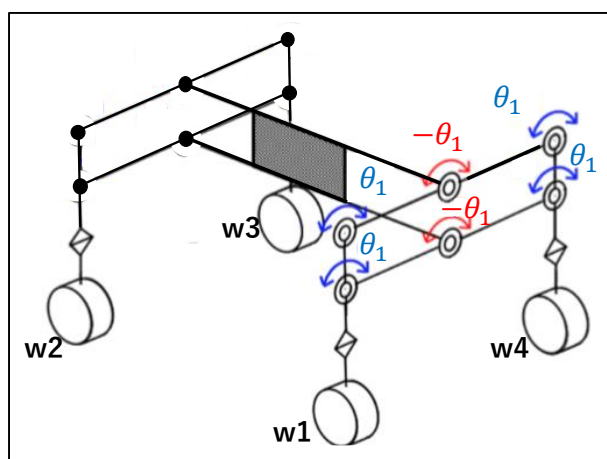


Fig.1.6 Suspension of front wheel part⁽⁵⁾

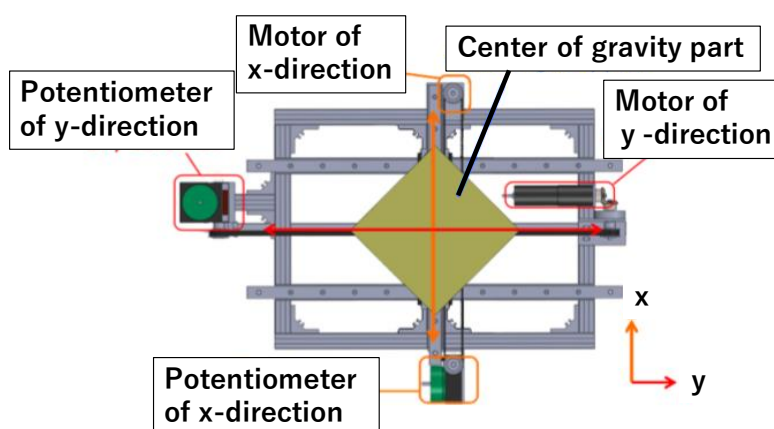


Fig.1.7 The system which was made in a precedent study⁽⁵⁾

1-5 サスペンションとしての併用

実際の惑星探査ローバーのミッションは、惑星の地質調査が大部分を占める。そのためには地表物質のサンプルを回収し、機体で解析する必要がある。火星探査ローバーにはマニピュレータが搭載されており、それを用いて地表物質のサンプルを採取し機体で解析が行われている。また、JAXA が Fig1.8 のような月面に長期滞在することができる拠点を建設する構想を持つ。人間による月面での作業は、安全面やコスト面などから考えると実現的でないため、建設のオートメーション化が求められている。地球からの遠隔操作であるとタイムラグなどの影響により操作が困難であると予測されるため機器自立化が必要である。建設用のマニピュレータとなると、ある程度の重量を持ち上げなければいけないためこのプロジェクトには剛性のあるマニピュレータが必要だと考える。そこで、今回試作機には探査や建設用として剛性のあるマニピュレータを搭載する。剛性のあるマニピュレータを搭載することでより探査機として実現的になり、実際のミッションの実行も視野に入れることが可能である。またリンクや手先に重量があるため機体の重心移動が可能であると考えた。

よって本研究では, マニピュレータを重心制御機構(サスペンション)としての運用を提案し
その能力を実験により検討した.

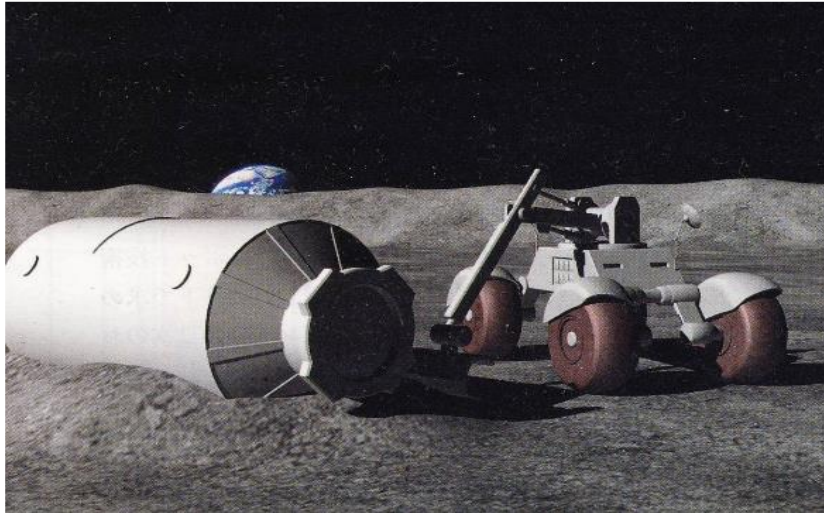


Fig.1.8 Image of the moon base construction⁽¹¹⁾

第2章 マニピュレータ形重心移動機構の製作

2-1 マニピュレータの形状と仕様

Fig. 1.5 に示した先行研究で使用された試作機の仕様を Table. 2.1 に示す. この仕様を元にマニピュレータの形状と仕様を決定した. まず形状を定めるためにマニピュレータに求められるものを考えた.

1. 構造が簡素である機構
2. 先端に質量が掛かっても耐えられる機構
3. 二次元重心移動が可能

1 についてだが今本試作機は火星での長期間の走行を想定して製作された物である. よって搭載するマニピュレータは, 信頼性を重視する必要がある. 試作機では構造を簡素なものにすることにより機体の信頼性を示した. よって今回のマニピュレータも同様に構造を簡素にすることにより故障などのリスクを回避する. また構造が簡単な物であると制御事態も容易になるため制御機器の不調などの心配もなくなる.

2 マニピュレータによって機体の重心を移動させるには手先や各リンクにある程度の重量が必要である. 中でも機体との距離が一番大きくなる手先部分にはより重量が必要である. そこで, マニピュレータ固定部や関節部にはある程度の強度が必要と考えた. 以上のことから先端に質量が集中しても耐えられる必要があると考えた.

以上2点を考慮した結果マニピュレータの形状を Fig2.1 のようなスカラロボット型とした. スカラロボットの特徴は並進機構のため構造が簡素であり, 手先に部品が集中しているため先端に質量が集中しても耐えられる構造である. 設計仕様については以下に決定した.

- 1 リンクの数 は 2 リンク
- 2 重心可動域は $x, y = \pm 0.0714\text{m}$ 以上
- 3 アーム重量は 15kg 以下

1 についてだが, 今回の重心制御は高さ成分のない平面のみで制御を行う. また, 多関節であると手先の位置とリンクの回転角の関係が複雑化するため制御機器多く搭載する必要がある. そこで今回のマニピュレータは平面移動で必要最小限である 2 リンクものとした.

2 についてだが, 今回のマニピュレータは前文の試作機に搭載することを想定して設計している. よって重心移動範囲も試作機に合わせる必要がある. Table. 2.1 の試作機の重心可動域は x 方向 0.041m , y 方向 $\pm 0.0714\text{m}$ である. マニピュレータによる重心稼働域は円

形であるため重心可動域の x 方向の移動範囲と y 方向移動範囲は同値となる．また，重心移動域が現在の値以下であるとサスペンションとしての性能が低下してしまうため，重心移動範囲は現在の範囲と同値またはそれ以上の物が良いと考えた．

3 についてだが，Table. 2.1 より試作機走行部の重量が 25kg，上部重りの重量が 15kg である．上部重りの重量が機体半分に相当するため，走行時機体に影響を及ぼすと考えた．よって搭載するマニピュレータの重量は現在の重りより軽くする．

Table.2.1 Specification of the center of gravity movement mechanism used in previous research

上部重量[kg]	15
走行部重量[kg]	25
総重量[kg]	39
最大の重心変化[m]	
x方向	±0.0564
y方向	±0.0718



Fig.2.1 Yamaha made SCARA robot ⁽¹³⁾

2-2 設計に用いた式

まず初めに取り掛かった内容は，リンク回転角と重心位置の関係式の導出である．Fig. 0.1 に示すマニピュレータ簡略図を作成のもと，各部の質量集中位置を座標変換によって以下の(2.1)～(2.8) ように求めた．その後質点の位置におけるモーメントの釣り合い式を考え，機体全体の重心位置を式(2.9)，(2.10) で示した．なおこの式における基準点はマニピュレータ固定部とし，今後の計算においても固定部を原点とする．

$$x_1 = \left(\frac{L_1}{2}\right) \cos(\theta_1) \quad \cdots (2.1)$$

$$y_1 = \left(\frac{L_1}{2}\right) \sin(\theta_1) \quad \cdots (2.2)$$

$$x_2 = L_1 \cos(\theta_1) \quad \cdots (2.3)$$

$$y_2 = L_1 \sin(\theta_1) \quad \cdots (2.4)$$

$$x'_3 = L_1 \cos(\theta_1) + \left(\frac{L_2}{2}\right) \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdots (2.5)$$

$$y'_3 = L_1 \sin(\theta_1) + \left(\frac{L_2}{2}\right) \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdots (2.6)$$

$$x'_4 = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdots (2.7)$$

$$y'_4 = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdots (2.8)$$

$$G'_x = \frac{m_1 x'_1 + m_2 x'_2 + m_3 x'_3 + m_4 x'_4}{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \cdots (2.9)$$

$$G'_y = \frac{m_1 y'_1 + m_2 y'_2 + m_3 y'_3 + m_4 y'_4}{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \cdots (2.10)$$

2-3 手先質量の選定と接続部余白

実際の重心位置を計算するためには、リンクの長さ各部の質量が必要であった。よって今回は、実際に入手可能な部材から長さと重さを決定した。まず、手先の直動機構は、Fig2.1のスカラロボットに採用されている直動機構を参考にした。今回、手先の直動機構にはミスミ製転造ボールねじ軸径20 BSSC2005-600 (Fig. 2.2) ⁽³⁾を使用した。このボールねじの全長は600mmであった。この部材を取り付けることにより機体重心が高くなるリスクが発生するが、実際の惑星探査ローバーにはマストと呼ばれる高い支柱が搭載されており、その先端から惑星環境の撮影を行っている。ボールねじ先端にカメラを取り付けることで、マストとしての役割を担うと考えた。そしてアーム先端であるため、カメラの位置も水平面内に移動することが可能である。以上の探査におけるメリットも発生するため、今回はこの部品の使用した。次に先端質量であるが、材質の密度と部材の体積から質量の計算を行った。ただし形状が複雑だったため、直径20mm、長さ600mmの円柱として計算を行った。そして手先に使用する他の部品についても同様に計算した結果、手先の重量が2.026kgとなった。この質量を手先の重さと仮定した。また、関節部の質量は使用する回転部品、動力部品の質量からマニピュレータ固定部質量を0.5kg、 $m_3 = 1\text{kg}$ と仮定した。

今回リンクには固定や接続のし易さからミスミ製アルミフレームHFS5-2040 (Fig. 2.3)を使用した。アルミフレームの仕様をTable2.2に示す。なお許容荷重の計算条件はフレームを両端支持で中央集中荷重をかけた場合として計算されている。リンクの質量についてだが、長さによって質量を求めているため、最低限必要な重さと長さから検討した。また、今回リンクにはフレームの他に厚さ5mmのアルミプレートを使用したため、この質量と合算したものをリンク質量とした。

実際に使用するリンク部材の長さFig. 0.1に示す簡略図上でのリンク長さでは、関節固定部と接続部の余白を差し引いていない。よって、あらかじめ差し引いた長さを計算する必要があった。なお差し引く数値を考慮したリンク長さの式を(2.11)～(2.12)に示す、また、各記号については、Fig. 0.2及び定義に示す文字に従う。

$$L_1 = L_1 - D_{e1} - D_{e2} \quad \cdots (2.11)$$

$$L_2 = L_2 - D_{e3} - D_{e4} \quad \cdots (2.12)$$



Fig.2.2 Parts using linear motion mechanism⁽¹²⁾

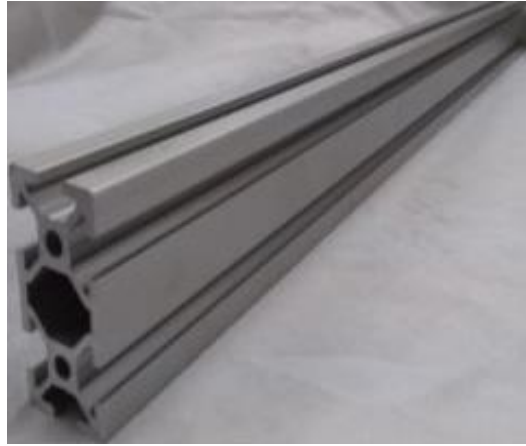


Fig.2.3 Link use parts

Table.2.2 Specification of aluminum frame made by MISUMI ⁽²⁾

Item	value
Height×width[mm]	40×20
Modulus section×10 ³ [mm ³]	2.55
Moment of inertia of area×10 ⁴ [mm ⁴]	5.11
allowable load[N]	684
Mass[kg/m]	0.88
Cross-sectional area[m m ²]	324

2-4 マニピュレータの全長選定

計算条件は以下の3点である.

- 1 マニピュレータの姿勢はx軸上でアームが伸びきった時(Fig 2.5)
- 2 重心座標の x 成分の値が0.0714m 以上
- 3 各リンクの長さは同じ ($L_1 = L_2$)

1 について, この姿勢のときマニピュレータの各質点の位置が一直線上に並びかつ同じ象限に存在するため重心変化の値が最大となる. またこの時の回転角度を 0° とし, 基本姿勢とした. この姿勢で質点の位置を x 軸上とすることで, 重心座標の y 成分が 0 となり, 計算が容易になった. 2 についてだが, これは前文で決定した設計仕様を満たすためである. 3 についてだが, 今回の計算はアームの全長を決定するためのものであるため各リンクの長さについては求めない. 以上の条件のもと計算を行う. まず Fig. 2.5 のような基本姿勢での各質点の位置を示した. 条件3より各リンクの長さは同じである. 以上から, (2.13) 式を導出し, 計算を行った. なおリンクの質量は Table. 2.2 に記載した 1m あたりの質量から式(2.14), (2.15)の様求めた.

$$0.0714(m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4)$$

$$\leq \left(\frac{L_1}{2} - D_{e1}\right)m_1 + L_1 + m_3 \left(\left(\frac{L_2}{2} - D_{e3}\right) + L_1\right) + m_4(L_1 + L_2) \quad \cdots (2.13)$$

$$m_1 = 2.365L_1 \quad \cdots (2.14)$$

$$m_3 = 2.365L_2 \quad \cdots (2.15)$$

計算の結果, $L_1 = L_2 = 0.4132\text{m}$, マニピュレータ全長が 0.611m 以上となると条件 1 を満たせた. よって各リンクの必要長さを決定した.

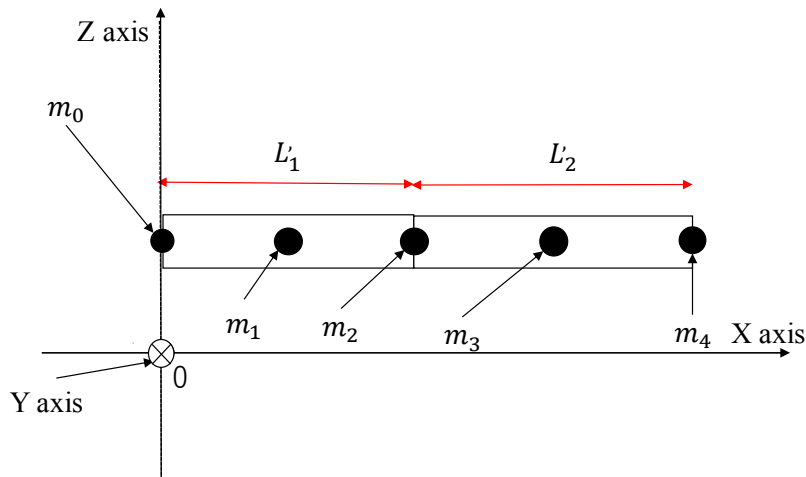


Fig.2.4 Position of mass point during basic attitude

2-5 リンク長さ選定と重心移動範囲の計算

次に暫定的であったが、求めた質量と長さからリンクの全回転角についての重心移動範囲を式 (2.1) ～ (2.12) より求めた。なお使用ソフトは「MatlabR2017a」である。その結果を Fig. 2.5 に示す。計算条件についてだが、まず初期条件は Fig. 2.4 で示したアームが最大に伸びきった姿勢かつ全ての質点が x 軸上にあるときを 0° とし、初期姿勢とした。その後各関節 10° 刻みに 360° まで回転させる。まず第 2 リンクから回転し、 360° までの回転を終えた後、第 1 リンクが 10° 回転する。その後第 2 リンクが 1 回転する。以上のように全回転パターンを計算した。その結果、中心部に空洞がある結果となった。中心部に重心が取れない場合、平面走行の安定性が損なわれると考えられる。また、先行研究の結果から重心位置が $\pm 2\text{mm}$ 程度の誤差の範囲内であれば、走行に影響を与えないことが示されている。しかし軟弱地盤上においての重心位置による走行の変化は示されていないため、重心移動範囲に空洞のある設計は避けなければならない。よってアーム全長は変えず、リンク長さの比率を検討することでこの問題を解決しようと考えた。

まず、マニピレータの最小の重心位置となる姿勢は第 2 リンクの回転角が $\pm 180^\circ$ のときであると考えた。その理由はこの回転角とき、手先の座標がマニピレータ固定位置付近にくるためである。また、第 1 リンクと第 2 リンクの比率を変えることで、手先位置を負の方向に持っていくことができるため、より中心部に重心を取ることができると考えた。これに加えてリンク比率は以下の様に選定した。

つぎに y 成分を無視するため、第 1 リンクの回転角を 0° 、第 2 リンクの回転角を 180° とした。マニピレータの全長は前文で定めた仕様と同値となる長さ 0.74m とする。(条件式 (2.16) (2.17) 式は重心位置の x 成分が 0 になるときの式である。また計算に使用したモデルを Fig. 2.6 に示す。その結果、 $L_1=0.3098\text{m}$ $L_2=0.5162\text{m}$ となった。この時の重心移動範囲を Fig. 2.7 に示す。前述とは打って代わり、中心部に重心を取ることができたが、この寸法での最大の重心移動の値が 0.0673m と使用を満たさなかった。しかし今回の計算による質量などの数値は暫定的に決めた要素も多いため、各寸法と各部材の質量は今回の計算値を参考にし、設計をおこなった。

$$L_1 + L_2 = 0.826 \cdots (2.16)$$

$$m_1 \left(\frac{L_1}{2} - D_{e1} \right) + m_2 L_1 + m_3 \left(L_1 - \left(\frac{L_2}{2} - D_{e3} \right) \right) + m_4 (L_1 - L_2) = 0 \cdots (2.17)$$

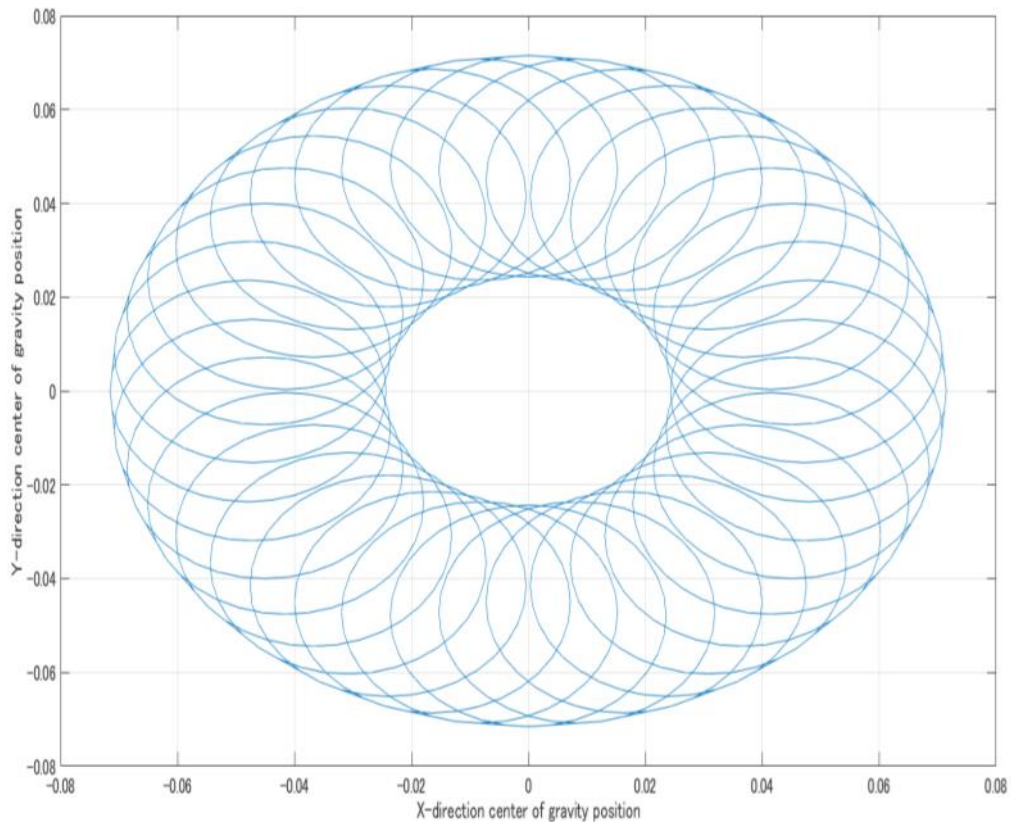


Fig.2.5 Center of gravity movement range when the link length is the same

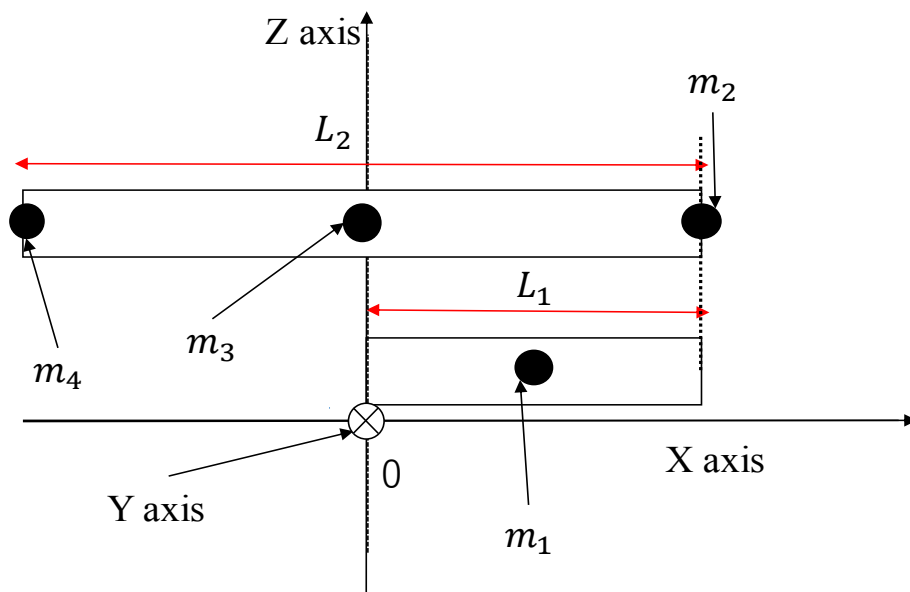


Fig.2.6 When the second joint is rotated 180 degrees

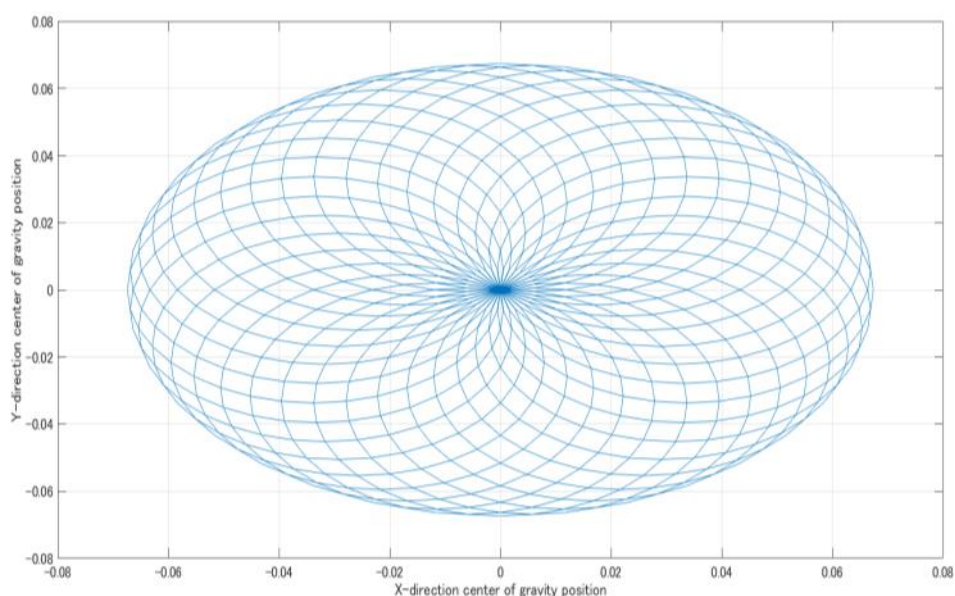


Fig.2.7 Movement range of center of gravity when link ratio is different

2-6 マニピュレータ形重心移動機構の設計

前述の計算値を元に設計した2次元CADのデータをFig. 2.8に示す. また, 設計した寸法での重心移動範囲を Fig. 2.9 に示す. このときの最大の重心変化の値が使用を満たせたが, 最小の重心位置変化の値は x, y 方向 $= \pm 0.0011$ となった. 先行研究の結果より 2mm 程度の重心位置の変化では走行に大きな影響は出ないことが示されているため, この設計でも大きな問題はないと考えた. なお最大の重心移動の値は x, y 方向共に ± 0.072 であった. 今回の研究目的は障害物走破のため最小の重心位置変化よりも, 最大の重心変化の値が従来機と同等以上であることの方が重要であると考えたため今回はこの設計で作製を行った. 設計段階に計算に使用した各数値を Table. 2.3 に示す.

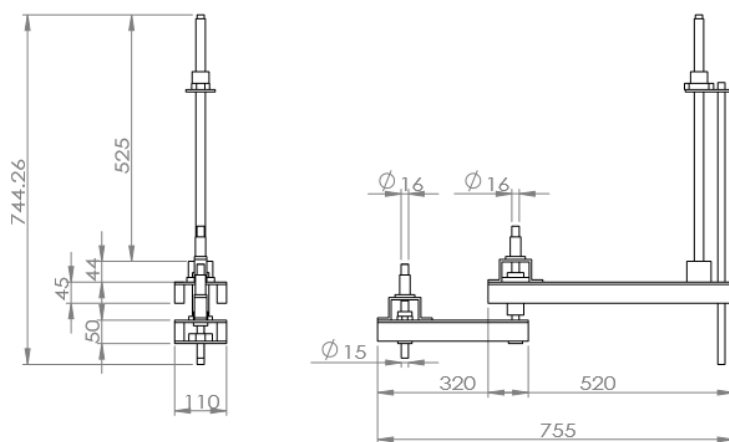


Fig.2.7 Designed manipulator

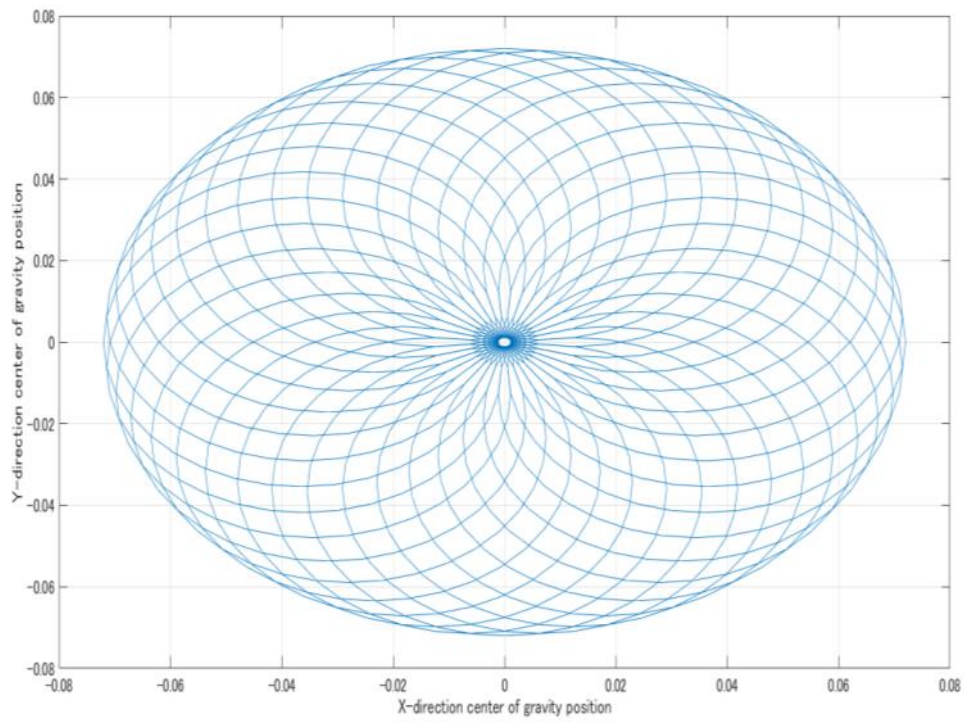


Fig.2.7 Movement range of the center of gravity at the designed

Table.2.3 Estimated mass of each part at the design stage

Estimated mass of each part	
m0	25. 51 [kg]
m1	1 [kg]
m2	1 [kg]
m3	1. 6 [kg]
m4	2. 033 [kg]
L1	0. 3098 [m]
L2	0. 5162 [m]

第3章 製作機器の概要

3-1 走行部の仕様

本研究で使用する惑星探査ローバー試作機の走行部の仕様を表 3.1 に示し外観を Fig. 3.1 ～Fig. 3.4 に示す. なお本研究で使用するローバーの設計手順計算式については先行研究にて作製された物であるため, 今回説明は割愛する.

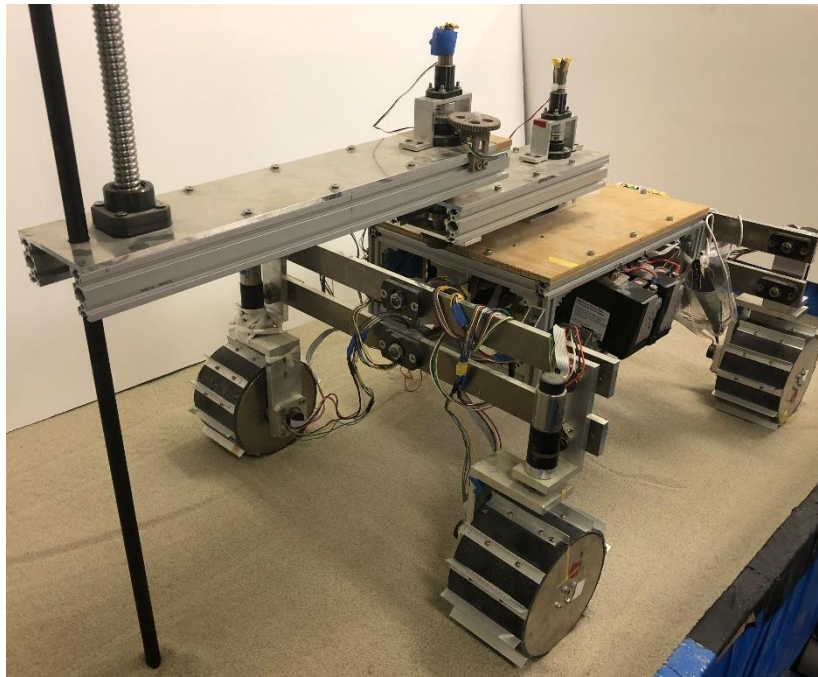


Fig.3.1 Rover appearance

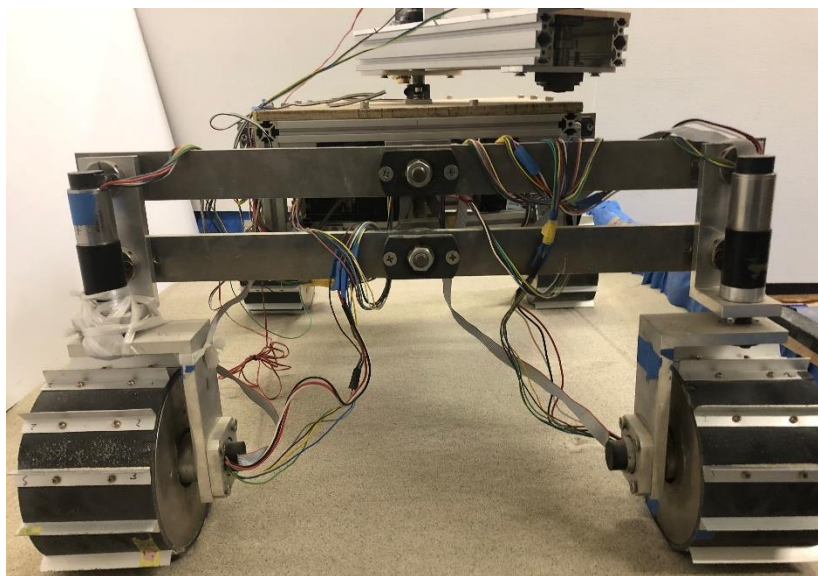


Fig.3.2 Rover Front View

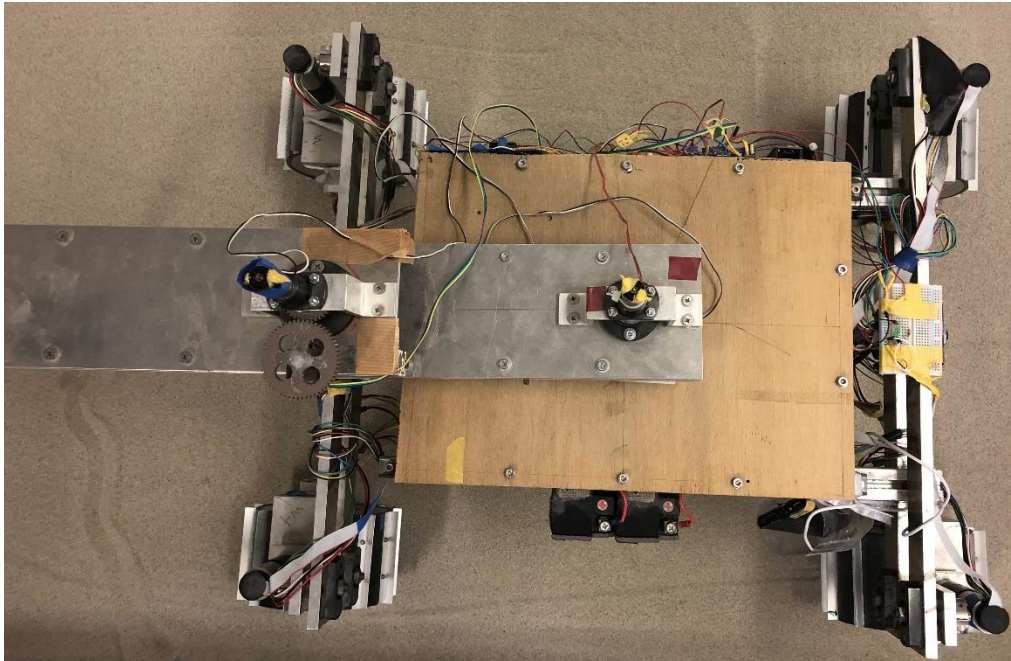


Fig.3.2 Rover seen from the top

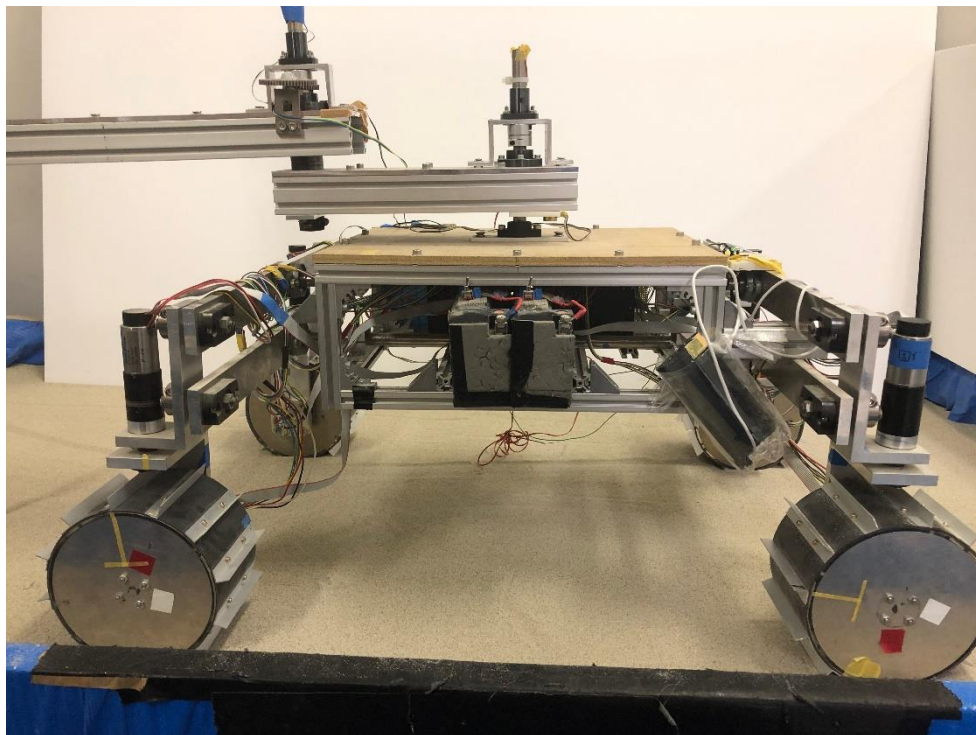


Fig.3.4 Rover side view

Table.3.1 Rover traveling section specification

走行部仕様	
駆動及びステア用モータ	maxon製 ブラシレス40W ホールセンサー内蔵ECモータ
駆動及びステア用プラネタリギアヘッド	maxon製 GP32HP 8.0Nm 高トルクバージョン
モータの公称電圧[V]	24
モータの無負荷回転数[rpm]	9250
モータの無負荷電流[mA]	151
モータ最大連続トルク[mNm]	33.8
モータの停動トルク[mNm]	160
モータの最大効率[%]	75
モータの端子間抵抗[Ω]	3.65
モータの端子間インダクタンス[mH]	0.31
モータのトルク定数[mNm/A]	24.3
モータの回転数定数[rpm/V]	393
モータの回転数/トルク勾配[rpm/mNm]	59.1
ギアヘッドの減速比[-]	158.7
ギアヘッドの連続最大トルク[Nm]	8
ギアヘッドの断続最大トルク[Nm]	12
ギアヘッドの最大効率[%]	70

3-2 マニピレータ形重心移動機構の試作機

次に今回作製したマニピレータの外観を Fig. 3. 5～Fig. 3. 8 に示す．なおマニピレータ駆動系の仕様を Table. 3. 2，リンクの長さ各部の質量を Table. 3. 3 に示す．

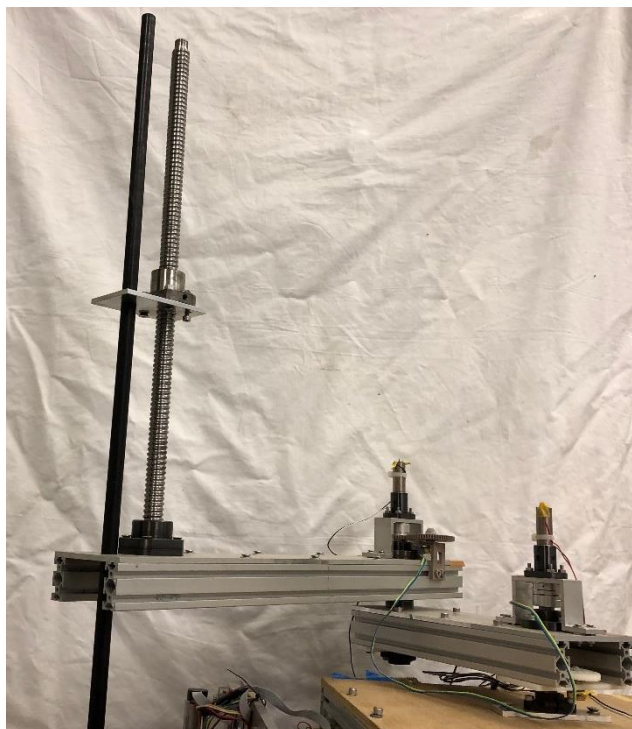


Fig.3.5 Manipulator appearance

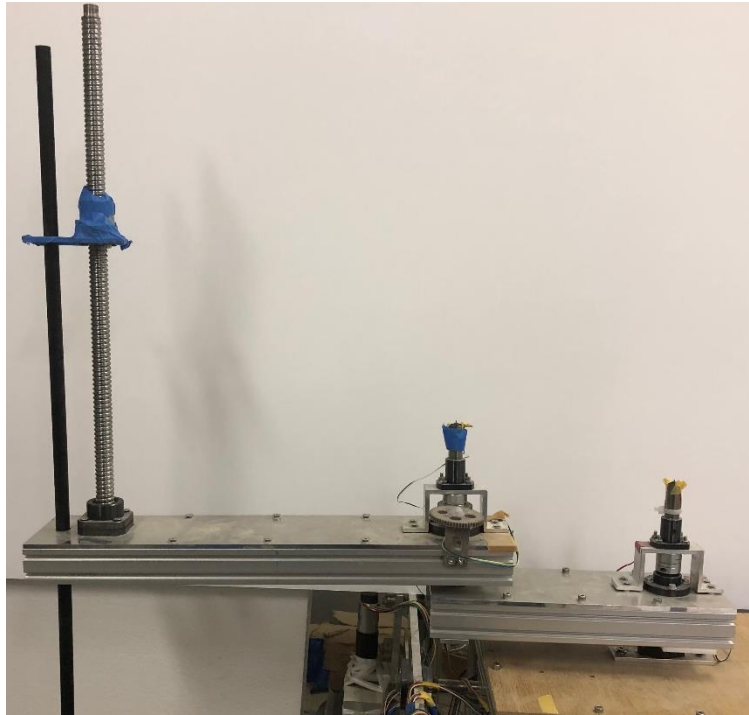


Fig.3.6 Manipulator side view

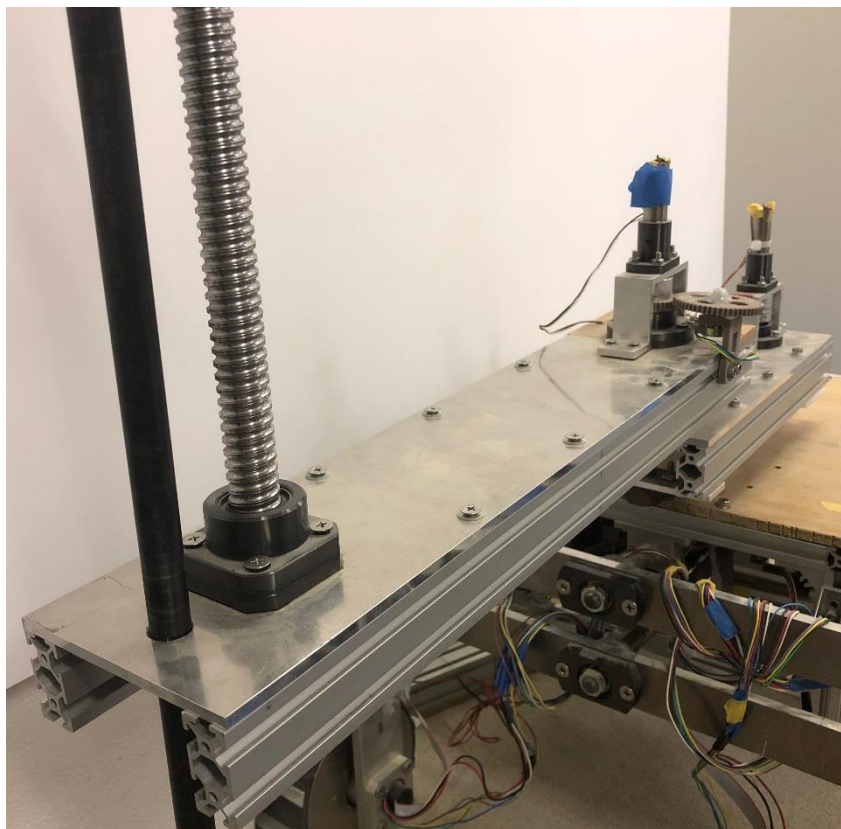


Fig.3.7 Manipulator seen from the front

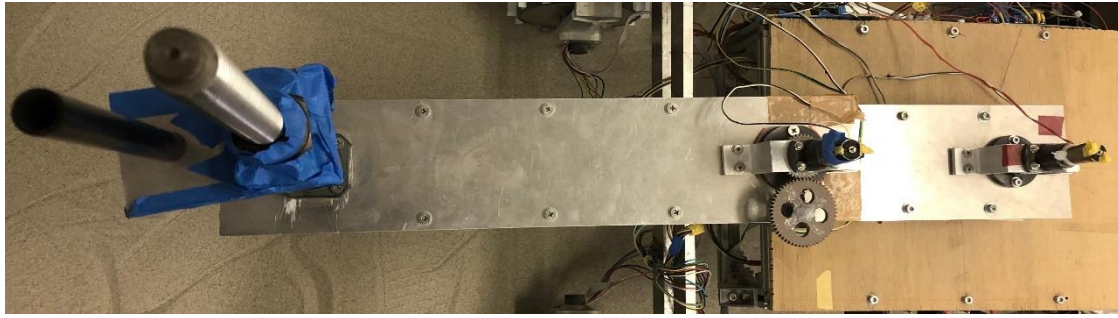


Fig.3.8 Manipulator seen from the top

Table.3.2 Manipulator drive system specification

ローバー上部マニピュレーター駆動系仕様	
第一関節及び第二関節用モータ	maxon製ボールベアリング4.5WDCX16Lモータ
第一関節及び第二関節用プラネタリギアヘッド	maxon製 GPX16HP 3段
モータの公称電圧[V]	12
モータの無負荷回転数[rpm]	6400
モータの無負荷電流[mA]	16.7
モータ最大連続トルク[mNm]	10.8
モータの停動トルク[mNm]	36.6
モータの最大効率[%]	83
モータの端子間抵抗[Ω]	5.82
モータの端子間インダクタンス[mH]	0.411
モータのトルク定数[mNm/A]	17.8
モータの回転数定数[rpm/V]	537
モータの回転数/トルク勾配[rpm/mNm]	176
ギアヘッドの減速比[-]	231
ギアヘッドの連続最大トルク[Nm]	0.8
ギアヘッドの断続最大トルク[Nm]	1
ギアヘッドの最大効率[%]	65

Table.3.3 Mass and link dimensions of actual manipulator parts

Mass of each part of the manipulator	
m0	25.51[kg]
m1	0.991[kg]
m2	0.984[kg]
m3	1.617[kg]
m4	2.033[kg]
L1	0.32[m]
L2	0.52[m]

3-3 マニピュレータおよび走行部の制御系仕様

作製したローバーおよびマニピュレータの制御系仕様について述べる。マザーボードには Fig. 3.9 に示す ARM 社の mbed 1768 を使用した。開発環境のインストールが不要で Web アプリケーション上ですぐに開発を行えることが特徴であり、コンパイルしたプログラムファイルをメモリに保存するだけですぐに動作させることができる。またデジタル I/O, アナログ入力, PWM 出力のピン数が多く、インターフェイスの種類も豊富なため他のセンサデバイス等との通信が容易である。512KB のフラッシュメモリを持ち、測定結果出力のファイル保存が可能であることから選択した。開発言語には C++ を使用する。ピン配置を Fig. 3.10 に、主な仕様を Table. 3.4 に示す。

走行部の制御には maxon 製であるモータに合わせ、駆動用には回転数制御用ドライバー ESCON 50/5 を使用した。このドライバーの主な仕様を Table. 3.5 に示す。このドライバーは専用ソフトウェア (ESCON Studio) を用いて設定値を入力することで、容易にモータの回転数制御、電流値制御、電圧制御できることが特徴である。今回は閉ループ回転数制御機能で駆動用モータの制御を行っている。またモータ駆動中 PC と接続することで、アナログ出力としてモータに流れる電流を取得できるため、駆動力を知ることができるようになっている。なお今回制御に用いた設定値を Table. 3.6 に示す。ステアに関して同じく maxon 製の回転角制御用ドライバーを使用しているが本稿中ではステアを用いなかったため、諸元は割愛する。



Fig.3.9 Mbed 1768 manufactured by ARM⁽⁹⁾

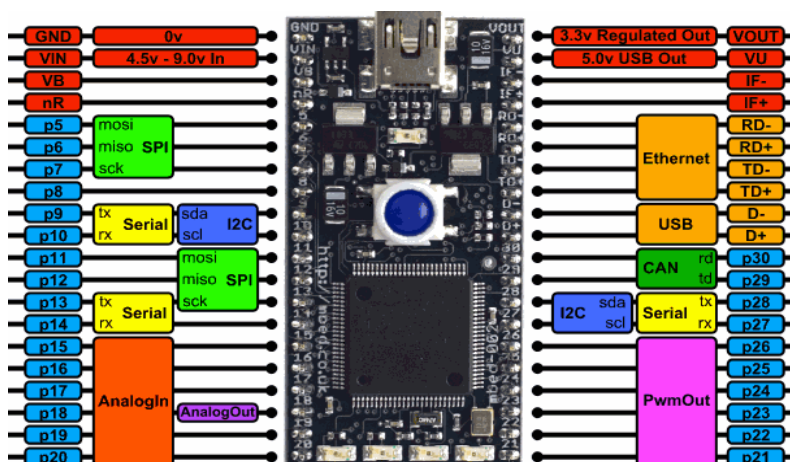


Fig.3.10 Pin arrangement ⁽⁹⁾

Table.3.4 Specification of microcontroller used

コア	ARM Cortex-M3
電源電圧[V]	4.5-14.0DC
RAM[KB]	64
フラッシュメモリ[KB]	512
動作周波数[Mhz]	96
デジタル定格 I/O[V]	3.3(合計400mAまで)
インターフェイス	イーサネット,USBデバイス, CAN,SPI,12C
A/D変換	8ch,12bit
D/A変換	1ch,10bit

Table.3.5 Rotation speed control driver specification ⁽¹⁰⁾

公称電圧+Vcc[V]	10-50DC
最大出力電圧[V]	$0.98 \times +V_{cc}$
最大出力電流[A]	15
制御モード	電流制御(トルク制御) 回 転数制御(閉ループ, 開ループ)
アナログ出力	2ch 12bit D/A -4~+4V
アナログ入力	2ch 12bit A/D -10~+10V(作動)
アナログ出力種類	実際のモータ電流,実際のモータ回転数, 設定モータ電流,設定モータ回転数, 出力段温度,固定値
デジタル入力	2ch +2.4~+36V DC ($R_i=38.5k\Omega$)
デジタル出力	2ch +2.4~+36V DC ($R_i=38.6k\Omega$)

Table.3.5 Rotation speed control driver specification

ローター位置検出	デジタルホールセンサ
ホールセンサの極性	正転
回転数センサ	デジタルインクリメンタルエンコーダ 分解能 500パルス数/一回転
運転モード	回転数制御
デジタル入力 2	高(High)有効
アナログ設定値	0V 0.0rpm 10V -1060.9rpm
固定電流制限	2.50A
固定勾配	加速 10000.0rpm/s 減速 10000.0rpm/s
固定オフセット	0.0rpm
アナログ出力 2	実際のモータ電流(平均)
最大許容回転数	15000.0rpm
最大連続電流	2.50A
最大出力電流	10.0A

3.4 作製機と従来機との比較

今回作製したマニピレータ形重心移動機構を搭載した場合と先行研究にて作製された錘を用いた重心移動機構の比較を Table. 3. 6 に示す. なお今回の比較をするにあたり, 走行部質量を再度計測したところ, 26. 65kg(ドライバーとバッテリーの質量は含めず)だった. このため, 今回から走行部質量を 26. 65kg とする. また, 今回測定した質量は従来機に使用されていた重心移動機構をはずした状態で測定を行った. このため計算により従来機の全体質量を再度求めたところ 44. 72kg であった. よってこの質量を用いて比較を行う.

まず全体質量を比較すると本試作を搭載することで 11. 93kg 削減することができた. 安定地盤を走行する場合と同様に機体の重量が減少することで機体に掛かる負荷を削減することができ消費電力等のエネルギー効率が向上したと考える. また, 軟弱地盤上では低速での走行の際, 機体が砂に埋没するリスクが発生する. 明確な検証行っていないが, 考察として機体重量が削減されることでこの埋没するリスクも減少したと考える. さらに最大の重心変化を見ると, x 方向, y 方向共に増加することができた. 特に本試作機では, 重心移動範囲を円形に取ることができたため(従来機では長方形), x 方向の重心移動範囲を大きくすることができた. 重心移動範囲を広範囲に取ることができたため, 本試作機を搭載することで, 機体の走破性能は向上したと考える.

Table.3.6 Comparison with conventional machine

従来機		マニピュレータ搭載時	
上部重量[kg]	14.16	上重量[kg]	6.14
走行部重量[kg]	30.56	走行部重量[kg]	26.65
総重量[kg]	41.65	総重量[kg]	32.79
最大の重心変化[m]		最大の重心変化[m]	
x方向	±0.047	x方向	±0.0708
y方向	±0.063	y方向	±0.0708

3-5 重心制御方法の構想

Fig. 1.1 に示したローバー試作機の重心制御方法は、まず目標重心位置からそれを実現する各車輪の接地荷重を目標値として入力する。その後各車輪の固定リンクに取り付けられた圧力センサ(ひずみゲージ)から接地圧を読み取り目標値との偏差を求める。この偏差の値から機体上部の錘の位置を移動させる方向を求め、フィードバック制御にて機体の重心制御を行う予定であった。しかし先行研究にてリアルタイムにおける接地荷重から重心位置を導出することは現試作機で困難だったことが明らかになった。よって今回走行実験にて測定したローバーの接地圧より、目標となる重心位置をあらかじめ求め、目標値を算出する。さらに重心の移動する軌道もあらかじめ定めておくことで接地圧の値をリアルタイムに測定することなく機体の重心制御を行うことが可能であると考えた。よって本項では、目標軌道を実現するマニピュレータ回転角を求める方法について記述する。

まず、ローバーに搭載されているバッテリーおよびFig. 3.11 に示したドライバーの位置を考慮した重心移動範囲を再度算出する必要があったため、先に固定位置を計測した。なお各数値と名称の定義は第0章に従う。この数値は定数であるため、式(3.1), (3.2)のように文字に置き換える。それに加えて各リンクと質量の値もすでに確定しているため式(3.3), (3.4)のように文字に置き換える。なお各数値をTable. 3.7に示す。

$$\text{constX} = \sum_{n=1}^7(m_{Dn}x_{Dn}) + \sum_{m=1}^2(m_{Em}x_{Em}) \cdots (3.1)$$

$$\text{constY} = \sum_{n=1}^7(m_{Dn}y_{Dn}) + \sum_{m=1}^2(m_{Em}y_{Em}) \cdots (3.2)$$

$$A = m_1 \left(\frac{L_1}{2} - De_1 \right) + (L_1 - De_1 - De_2)(m_2 + m_3 + m_4) \cdots (3.3)$$

$$B = m_3 \left(\frac{L_2}{2} - De_3 \right) + m_4(L_2 - De_3 - De_4) \cdots (3.4)$$

$$M_{all} = \sum_{i=0}^5 m_i + (7 \times m_D) + (2 \times m_E) \cdots (3.5)$$

目標重心位置から移動軌道を求めそれに追従した制御を行うためには、それが実現する各リンクの回転角を求める必要がある。現在はリンク角度から手先位置ならびに重心位置

を求める順運動学を行っている。しかし位置制御のためには、逆運動学によって、位置の手先位置の微小変化からリンクの回転角の微小変化を求める操作が必要である。よって式(2.11), (2.12), (3.1)～(3.5)を式(2.9), (2.10)に適用し行列化を行う。行列化したものを式3.6に示す。

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{all}} \begin{bmatrix} constX + A \cos(\theta_1) + B \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ constY + A \sin(\theta_1) + B \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad \dots (3.6)$$

式(3.6)を時間微分したものを式(3.7), 今後の計算のため文字定義したものを式(3.8), 定義した文字を適用したものを式(3.9)に示す。

$$M_{all} \begin{bmatrix} \frac{dG_x}{dt} \\ \frac{dG_y}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A \sin(\theta_1) - B \sin(\theta_1 + \theta_2) & -B \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ A \cos(\theta_1) - B \cos(\theta_1 + \theta_2) & B \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix} \quad \dots (3.7)$$

$$J = \begin{bmatrix} -A \sin(\theta_1) - B \sin(\theta_1 + \theta_2) & -B \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ A \cos(\theta_1) - B \cos(\theta_1 + \theta_2) & B \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad \dots (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix} = J^{-1} M_{all} \begin{bmatrix} \frac{dG_x}{dt} \\ \frac{dG_y}{dt} \end{bmatrix} \quad \dots (3.9)$$

以上の式を用いて目標重心移動軌道に追従する。リンクの回転角を求める。

Table.3.6 Mass and position of battery and motor driver

名称	x方向(mm)	y方向(mm)	重さ (kg)
電源 1 (E1)	-13.5	2.95	0.64
電源2(E2)	-13.5	-2.95	0.64
ドライバー 1 (D1)	9.25	2.25	0.196
ドライバー2(D2)	9.25	4.75	0.196
ドライバー3(D3)	9.25	7.25	0.196
ドライバー4(D4)	9.25	9.75	0.196
ドライバー5(D5)	13.75	-14.25	0.196
ドライバー6(D6)	11.25	-14.25	0.196
ドライバー7(D7)	8.75	-14.25	0.196

3-6 目標重心移動軌道に追従するリンク回転角の計算結果

Fig. 3. 12 にバッテリーとドライバーの位置を考慮した重心移動範囲を示す．なお今回の計算するにあたり第2リンクのみ，回転角の範囲を $\pm 165^\circ$ とした．この理由はFig. 3. 13に示すマニピュレータ固定部材と干渉してしまったため，回転角に制限が発生した．

バッテリーとドライバーの影響により重心移動域の中心が $x, y = (0.0957, 0.1039)$ となった．重心移動域にズレが生じたため重心位置が最小となる姿勢が前述と変わった．計算の結果，最も中心に近くなる姿勢は $\theta_1, \theta_2 = 338^\circ, 165^\circ$ のときであり重心位置は $x, y = (0.004979, 0.005376)$ であった．このときの姿勢および重心位置を初期条件とし，走行における重心の中心位置とする．

つぎに式 (3. 9) を用いて計算を行った．なお使用ソフトウェアは matlab2017a である．軌道の始点はマニピュレータの初期姿勢のときの重心位置とし，終点はローバー前輪片側に重心が移動した状態とした．なお目標軌道は直線であり，シミュレーション方法はニュートン法である．なお分割回数は100回とした．

この方法で計算した各リンクの回転角が整合性のあるものか確認するため，求めた角度を順次配列に格納し，再度順運動学に入力した場合の軌道と目標軌道を比較する．Fig. 3. 14に計算結果を示す．なお赤の直線が今回の目標軌道であり，青が計算軌道である．計算結果を見ると，始点は一致しているが，終点が僅かに合わなかった．しかしその誤差は1mm以下であったため，式としては正常に作用したと考える．次に後輪片側を軌道終点にした場合の計算結果をFig. 3. 15に示す．こちらの場合の結果では，前述同様に誤差はあったが目標値に近似することができた．しかし誤差が前述では1mm以下だったことに対し，x方向に約2.1mm誤差があった．条件によって誤差の度合いが変わってしまったため，定数による式の補正はできないと考える．

今回マニピュレータの回転角の位置制御にはポテンションメータから得た数値を用いて位置制御を行っている．試運転の結果マニピュレータの回転角にも指令値との誤差(1° 未満)があった．このことから，目標軌道との誤差は無視できるほどの微小であると考えた．前述にあるように2mm程度の重心位置の変化では走行には影響を与えないので，今回の問題は無視できると考えた．以上の方法により目標重心位置から軌道を生成し，それを実現する回転角の導出を行った．なお走行実験における能動的重心位置制御にはこの式を用いる．

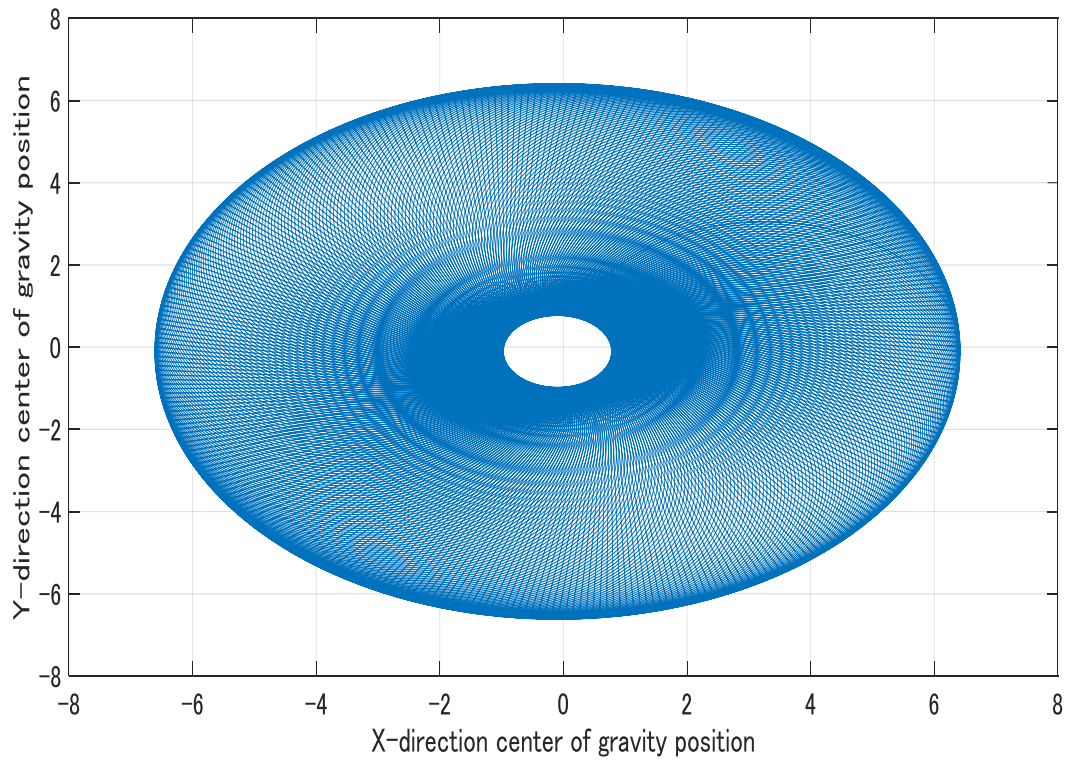


Fig.3.12 Movement range of center of gravity considering battery and driver

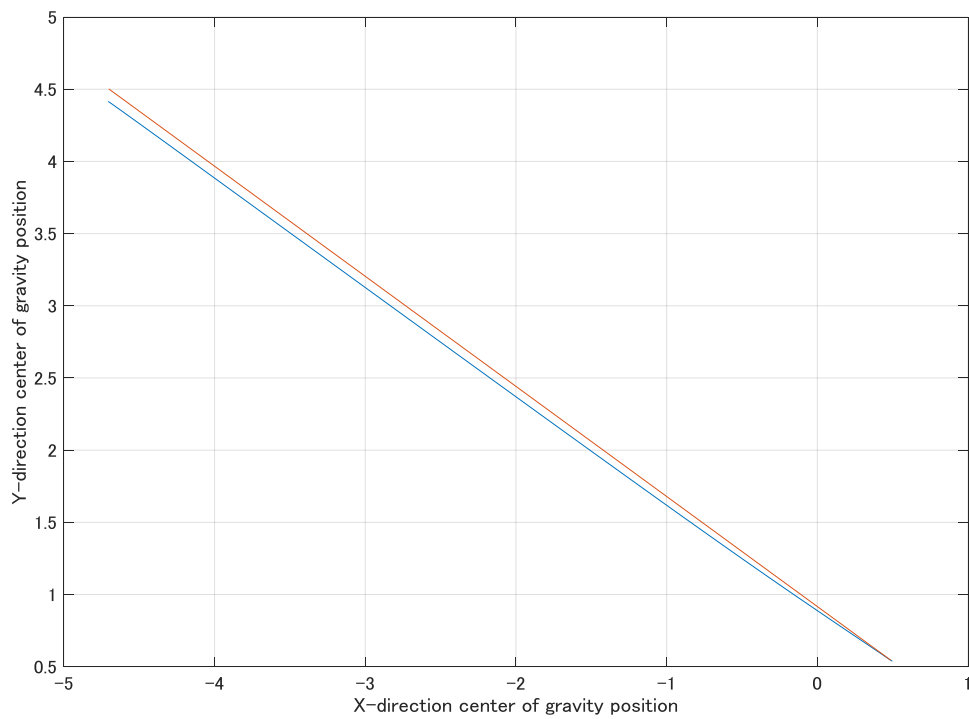


Fig.3.13 Comparison of target value and calculated value(One side of the front wheel)

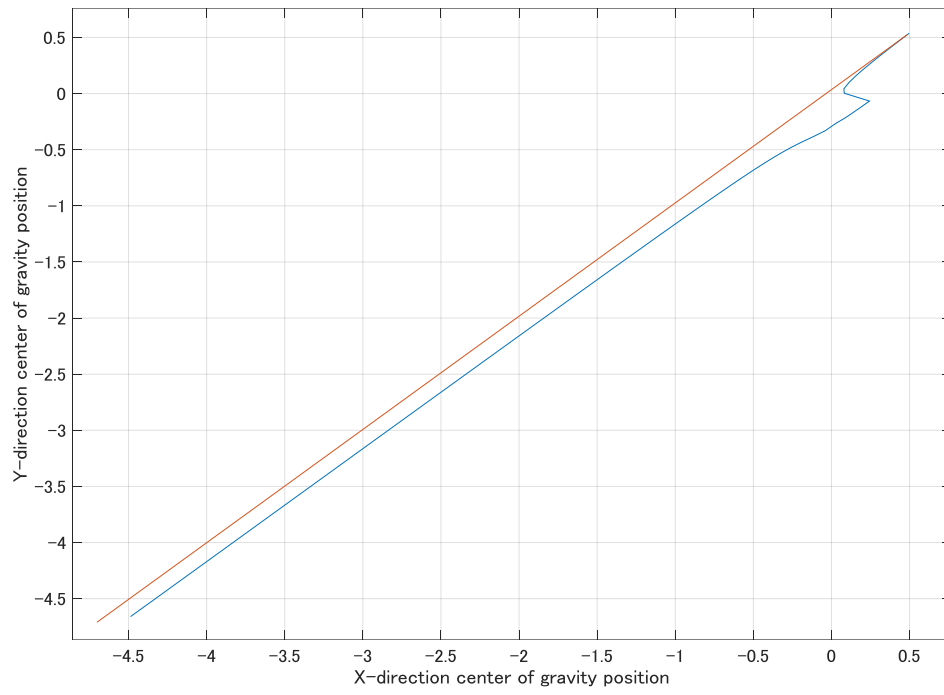


Fig.3.14 Comparison of target value and calculated value(One side of the rear wheel)

第4章 実験方法

4-1 走破性能評価指標と実験条件

今回作製した試作機の有効性を検証するため、走行実験にて得た数値から走破性能の評価を行う。なお今回、1-3 節で述べた評価指標の中から本試作機で最も容易に求めることができるスリップ率の観点から走破性能の評価をした。なおスリップ率の定義⁽¹⁴⁾を Fig4.1 および式 4.1～4.3 に示す。

$$\beta = \frac{V_{\omega} - V}{V_{\omega}} \cdots (4.1)$$

$$\text{車輪駆動時 } V_{\omega} > V \cdots (4.2)$$

$$\text{車輪制動時 } V_{\omega} < V \cdots (4.3)$$

今回、実際のモータの回転数はエンコーダで測定を行う。この車輪回転速度と、車体進行方向速度の差が少ないほど走破性能は高いと言えるため、スリップ率が 0 に近いほど走破性能は高いとした。今回の実験において車輪の制動操作は行わない。

Fig. 4.2 に今回実験を行った環境を示す。実験場のスケールは縦 1m 横 2m の空間に惑星環境を模した砂(珪砂 6 号)を高さ約 24.5cm 敷き詰めた。つぎに走行実験の条件について述べる。今回走行実験では、重心位置による走行の変化を求める数式的なモデルを使用していない。よって、まずはじめ整地した砂の路面における重心位置と走破性能関係を検証する。なお、より重心位置による走行の変化を検証するため、重心位置が中心部の他、車輪片側、後輪中央等の重心移動範囲における最大移動域に固定した状態で走行した。また、今回実験条件の均一化を図るため、1 回の測定ごとに砂地の整地を行った。

次に片輪障害物乗り越え時の走行実験について述べる。今回この条件を設定した理由は、従来のパッシブサスペンションを持つローバーは、スタック等のリスク回避のために、踏破可能とされる障害物を避けて通る場合が多い。それにより探査にかけられる時間が削られ、ミッションの中止に繋がる可能性がある。そのため乗り越えられる障害物の基準を引き上げることができれば、大きなアドバンテージとなると考えた。その中でも今回は、最も一般的に起こり得て、基礎的な問題だと考えられる、前輪の片輪のみが障害物に接触し、乗り越える場合にて行う。今回障害物としたものを Fig. 4.3, Fig. 4.4 に示す。Fig. 4.3 に示す障害物は惑星環境上で風によって巻き上げられた砂が堆積したものを想定し、高さは 10cm の砂の隆起を作製した。なお障害物の位置は前輪片側の前方約 50cm(車輪の直径と同値)に接地した。Fig. 4.4 に示す障害物は、砂地に点在する岩とし、高さ 50cm とした。なお今回車輪の形状保護のため、障害物を緩衝材で覆った。

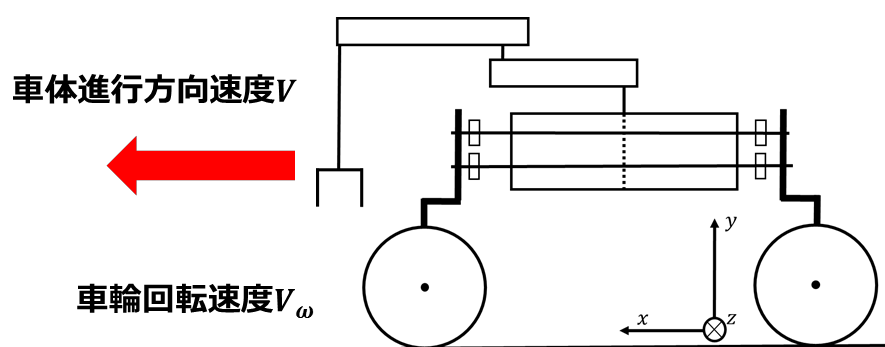


Fig.4.1 Slip ratio definition



Fig.4.2 Driving test site



Fig.4.3 Sand rise



Fig.4.4 Produced hard obstacles

4-2 車輪の形状と測定装置

前述の図にて、XYZ 軸や車輪の名称を W1…W4 と呼称したが、Fig. 4.5 に改めて各車輪の名称と XYZ 軸について定義する．進行方向から見て左側の車輪を W1 とし、時計周りに数え順次車輪に番号をつけている．先行研究の結果、Fig. 1.1 の車輪(ラグなし)では車輪駆動時、砂地に車輪が取られ進行が困難であった．よって、今回の走行実験においては砂地の路面を

考慮し, Fig. 4.6 に示すラグを装着した車輪を用いる. このラグは全車輪円周に 12 枚の L 字のラグ(歯丈 12mm)を取り付けたものである.

今回の走行実験では駆動モータの電流値および回転数とローバーの位置を測定する. 駆動モータ電流値は, Fig. 3.5 に示したモータドライバーを PC と有線接続し, 専用ソフト (ESCONSTUDIO)を用いることで容易に測定可能である. ローバーの位置については Fig. 4.7 に示すモーションキャプチャーを用いてローバーの位置を測定した. なお今回位置の計測は 4 回行い, モータ電流値の計測は 3 回行った平均値を求めた. つぎにローバーの XYZ 座標はモーションキャプチャーの出力に合わせたため, 進行方向を x , 高さ方向を y , 横方向を z とした.

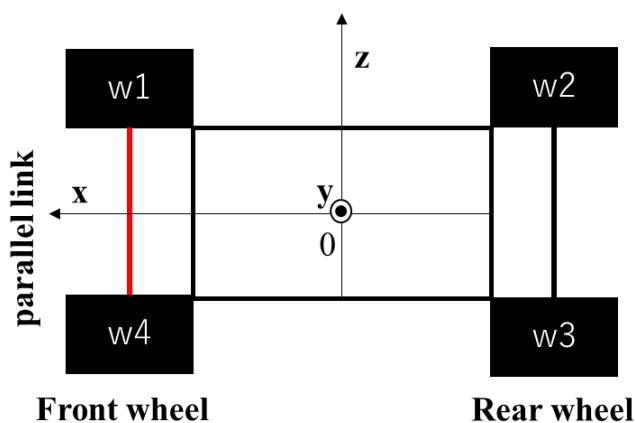


Fig.4.5 Definition of wheels and XYZ

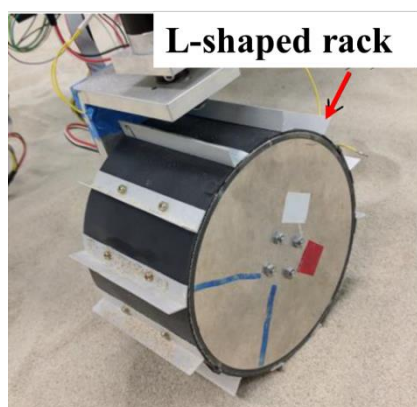


Fig.4.6 Wheel with lug



Fig.4.7 Use Motion Capture⁽¹⁵⁾

第5章 整地した砂の路面での走行実験結果

5-1 重心位置を中心部に固定した状態(G0)での走行

まず、はじめに砂地での走行の変化の検証と基準とする指標を求めるため、重心位置が中心部となるマニピュレータの姿勢に固定した状態(Fig. 5.1)で走行実験を行った。なお重心の座標と計算方法については前述した方法と数値に準ずる。Fig. 5.2 に駆動モータの電流値を示す。電流値を見ると、全車輪の電流値が周期的な変化を見せた。また、値が重なる結果となった。なおこのときの速度を Fig. 5.3 に示す。速度においても変化が周期的となった。スリップ率を正確に求めるため、速度を周期毎に平均した数値も求め、その値からスリップ率を求めた。また、このときのマニピュレータの姿勢を今後「G0」とおく。

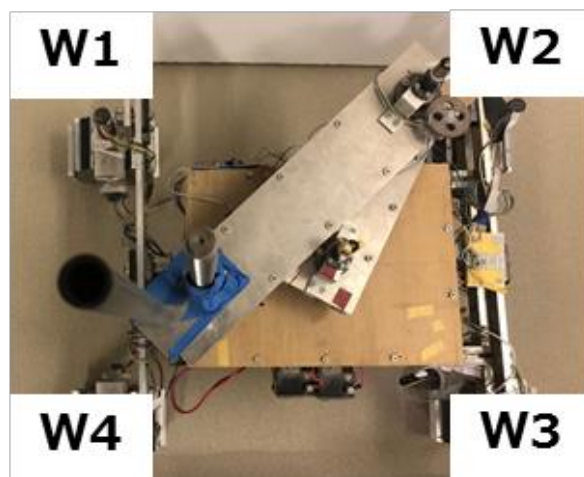


Fig.5.1 Manipulator posture with center of gravity position as center

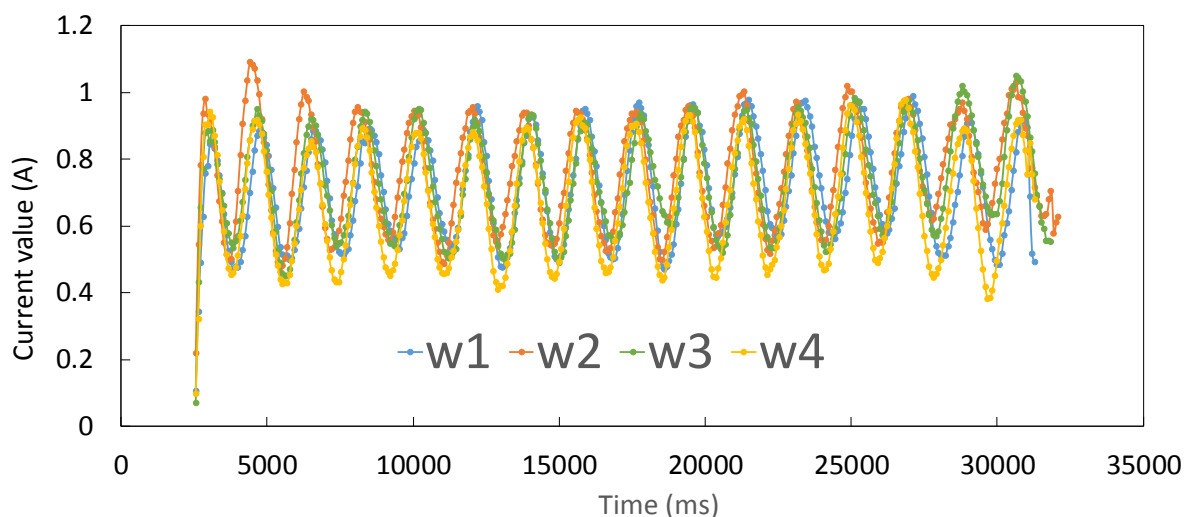


Fig.5.2 Each current value of the drive motor(G0)

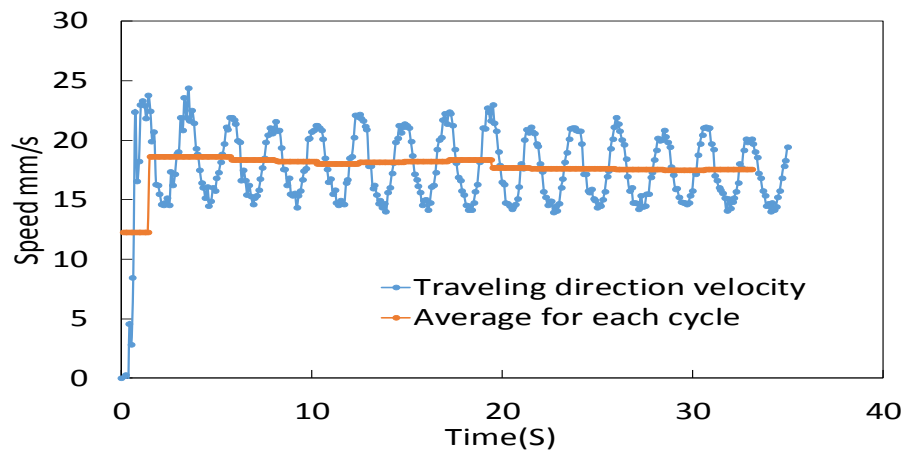


Fig.5.3 Change in walking speed of progress (G0)

5-2 前輪片側に重心を固定した状態での走行

次に前輪片側に重心を固定した場合の走行実験の結果を示す. このときの姿勢を Fig. 5. 4 に示す. 前輪 W1 と W4 それぞれの電流値を Fig. 5.5, Fig. 5.6 に示す. 結果を見ると今回の実験でも同様周期的な変化が発生した. またこのときの速度を Fig. 5. 6 に示す

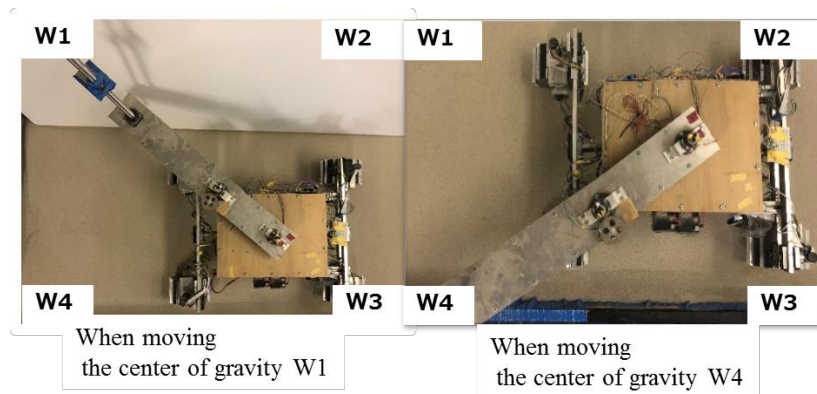


Fig.5.4 Manipulator position to move the center of gravity to one side of the front wheel

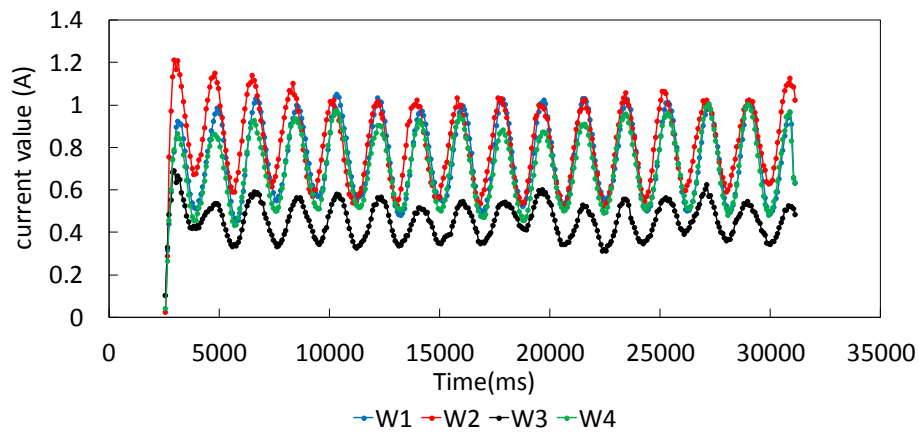


Fig.5.5 Each current value of the drive motor(W1 centroid)

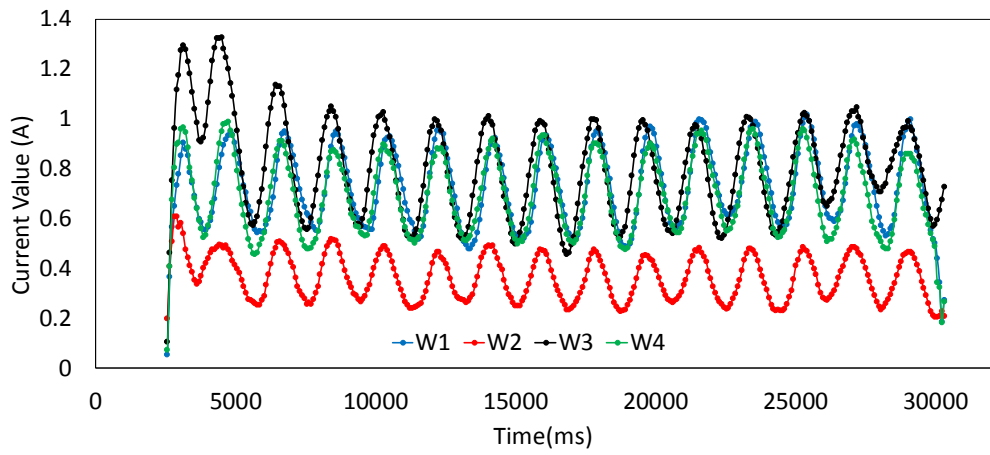


Fig.5.6 Each current value of the drive motor(W4 centroid)

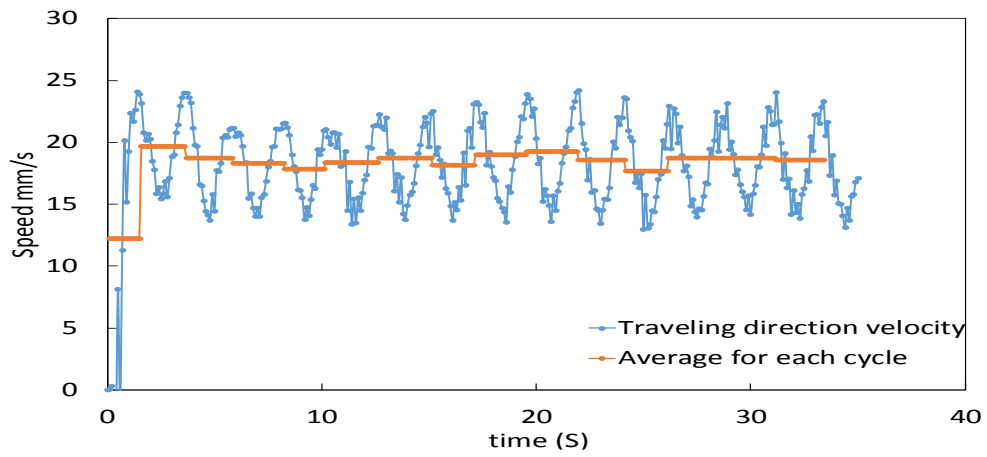


Fig.5.7 Change in walking speed of progress (W1 centroid)

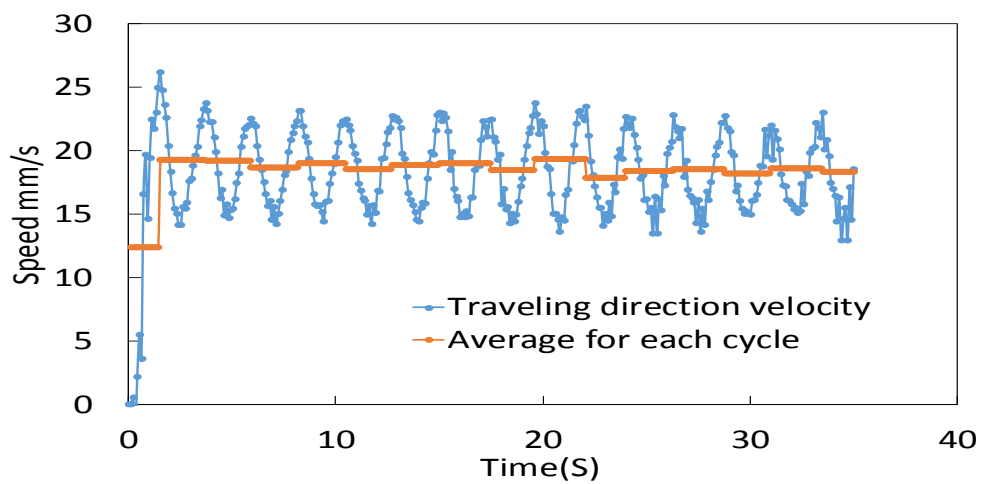


Fig.5.8 Change in walking speed of progress (W4 centroid)

5-3 後輪片側に重心を固定した状態での走行

次に後輪片側に重心を固定した場合の走行実験の結果を示し、このときのマニピュレータの姿勢を Fig. 5.9 に示す. W2 と W3 それぞれの電流値の結果を Fig. 5.10, Fig. 5.11 に示す. また、このときの速度をそれぞれ Fig. 5.12 と Fig. 5.13 に示す. 全片輪片輪に重心を移動した場合の速度について検証を行ったので、ここで一度スリップ率を重心中心部のときと比較する. その結果を Fig. 5.14 に示す.

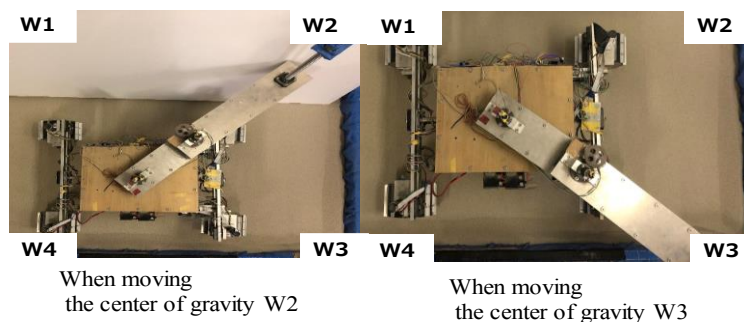


Fig.5.9 Manipulator position to move the center of gravity to one side of the rear wheel

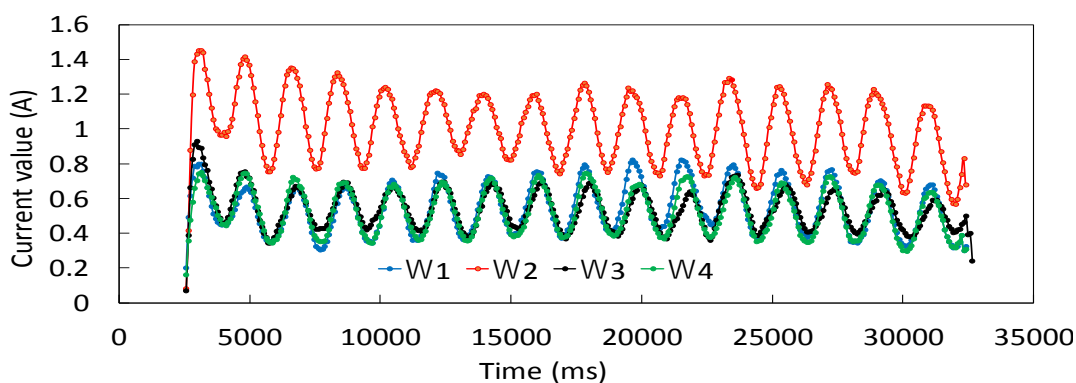


Fig.5.10 Each current value of the drive motor(W2 centroid)

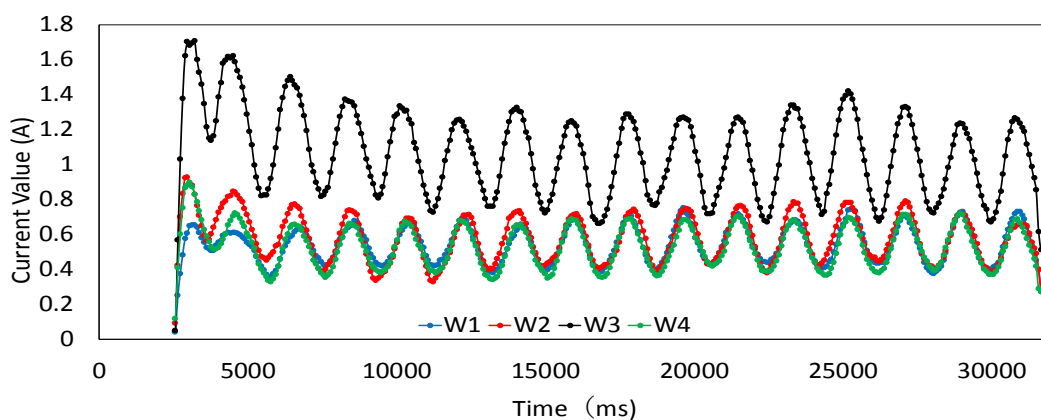


Fig.5.11 Each current value of the drive motor(W3 centroid)

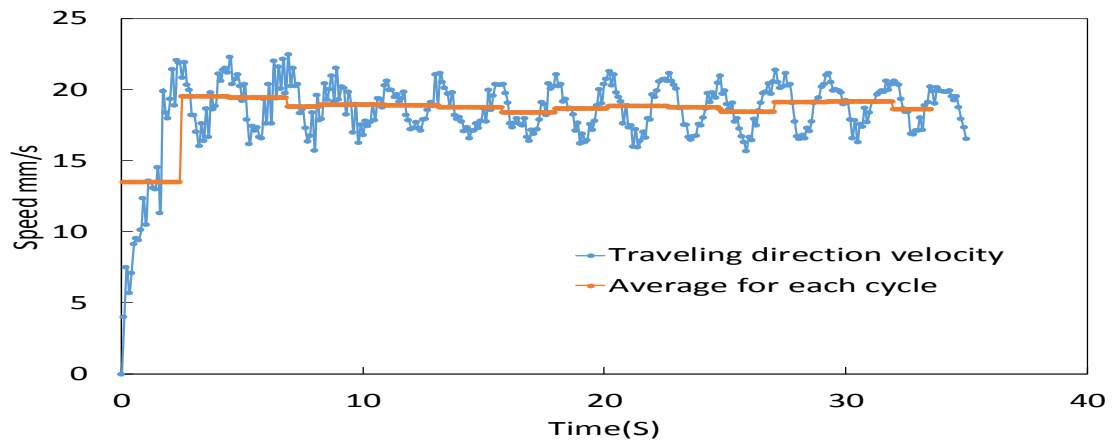


Fig.5.12 Change in walking speed of progress (W2 centroid)

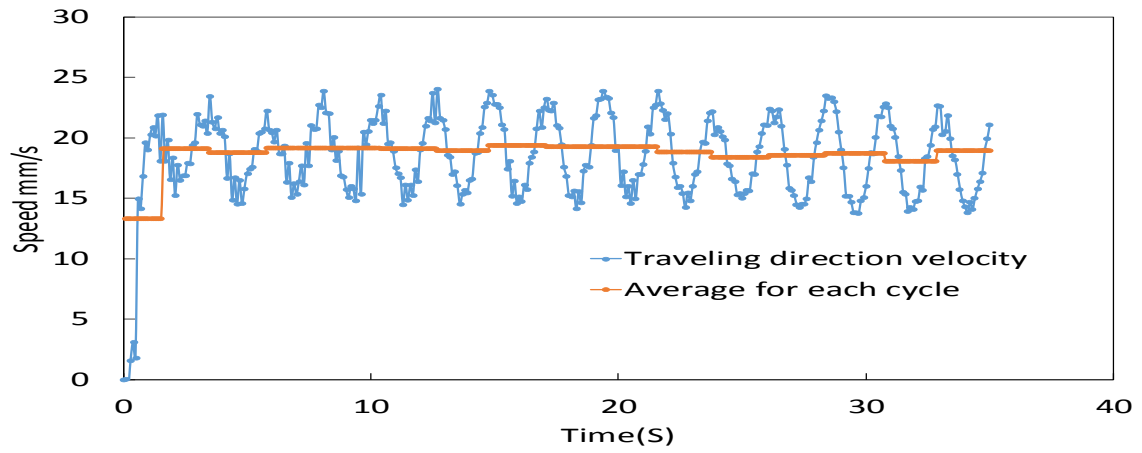


Fig.5.13 Change in walking speed of progress (W3 centroid)

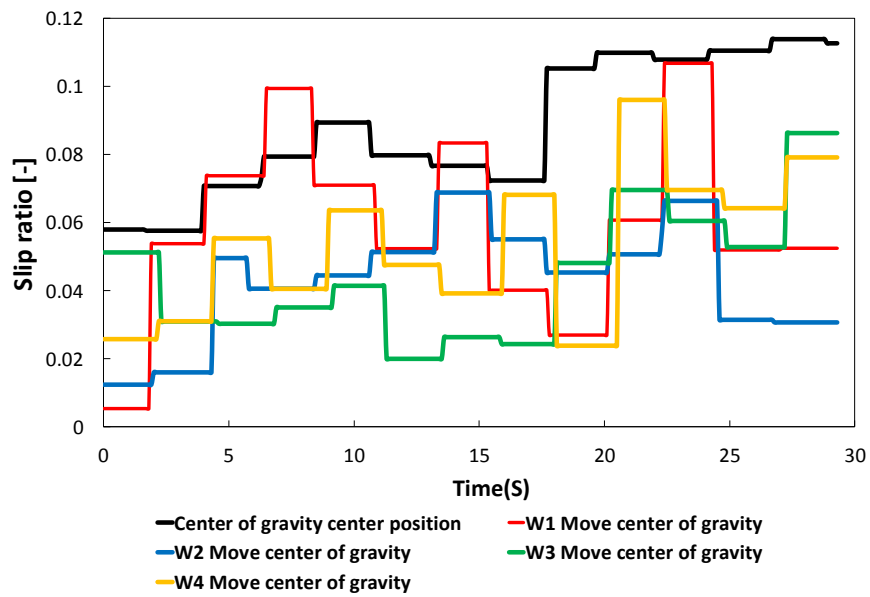
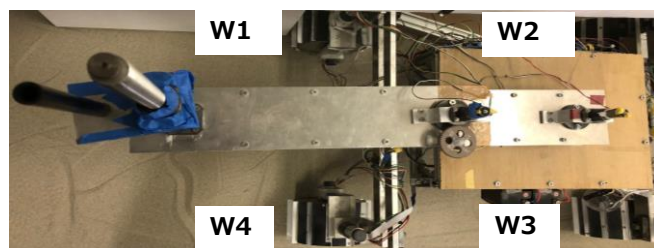


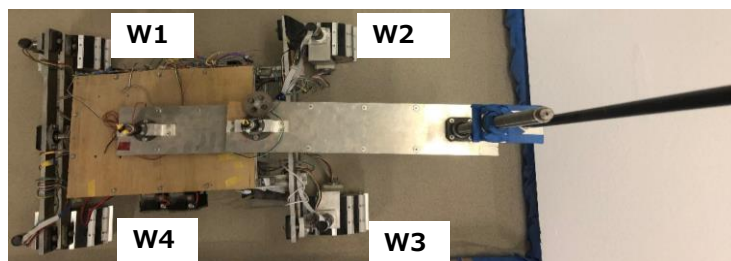
Fig.5.14 Comparison of slip ratio

5-4 前輪及び後輪に重心を固定した状態での走行

次に片側ではなく車輪中央部に重心を移動した場合の走行実験について示す。このときのマニピュレータ姿勢を Fig. 5. 15 に示す。前輪中央，後輪中央重心移動時の各モータ電流値を Fig. 5. 16, Fig5. 17 に示す。なお前輪中央固定を(W14)と後輪中央固定を(W34)とおく。また，速度の結果をそれぞれ Fig. 5. 18, Fig. 5. 19 に示す。



When moving the center of gravity to the center of the front wheel



Center of gravity center when moving rear wheel

Fig.5.15 Manipulator position to move both center gravity center of both wheels

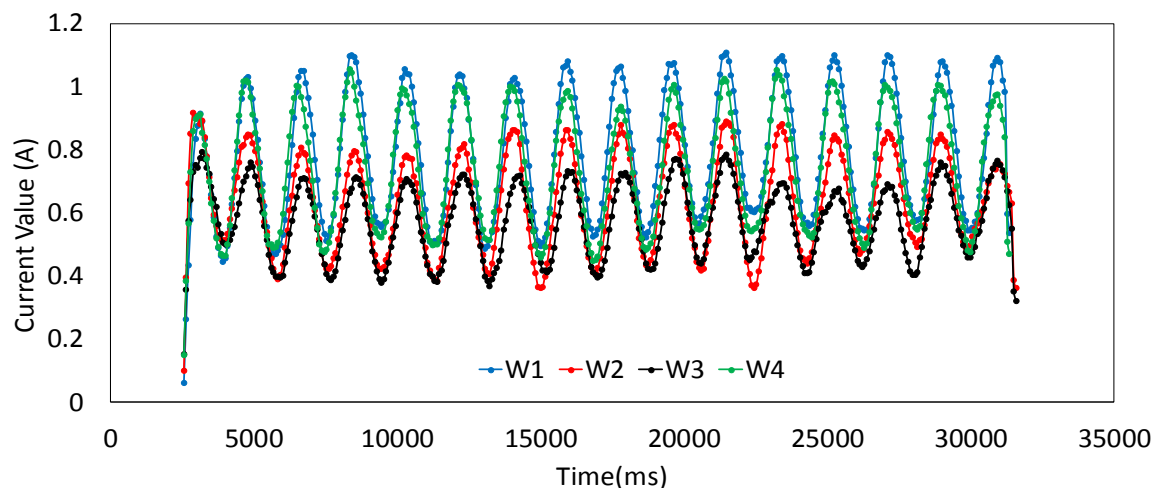


Fig.5.16 Each current value of the drive motor(Front wheel centroid)

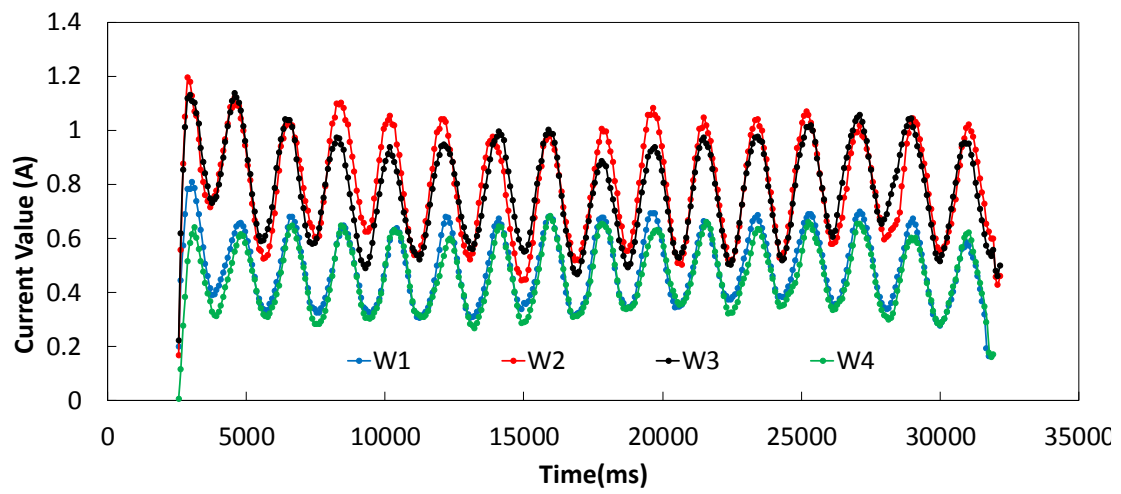


Fig.5.17 Each current value of the drive motor(Rear wheel centroid)

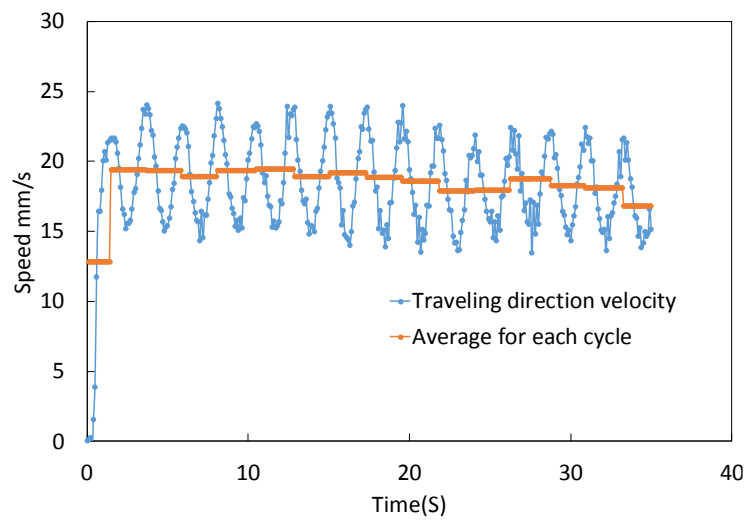


Fig.5.18 Change in walking speed of progress (W14 centroid)

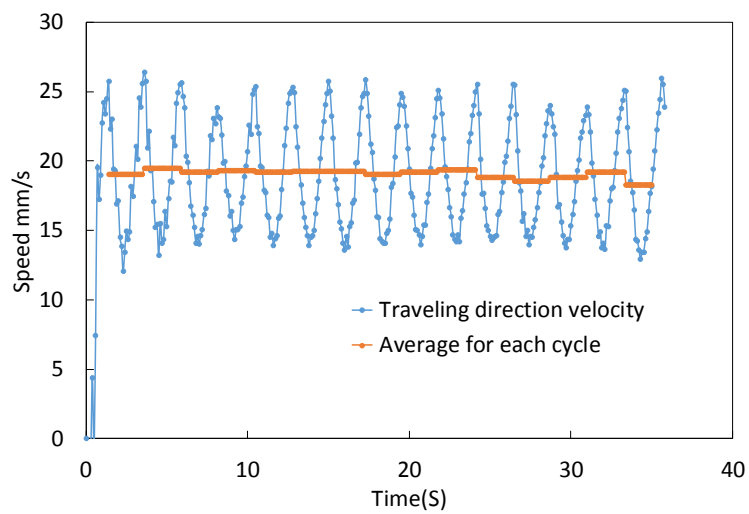


Fig.5.19 Change in walking speed of progress (W23 centroid)

5-5 Z 方向最大重心変化での走行

次に二次元重心移動による走行の変化を検証するため、Z 方向重心変化が最大となるアームの姿勢となる Fig. 5. 20 の状態で走行した場合の結果を示す. このときの各電流値を Fig. 5. 21, 速度の変化を Fig. 5. 22 に示す. マニピュレータが W3 と W4 の中間地点に固定されているのでこの状態を W34 とおく. なお逆側の Z 方向への重心移動については実験スペースの関係で今回は試行対象外とした. ここで5-1, 5-4節のスリップ率との比較をFig. 5. 23 に示す. また, 本節で求めたスリップ率をまとめたものを Fig. 5. 24 に示す.

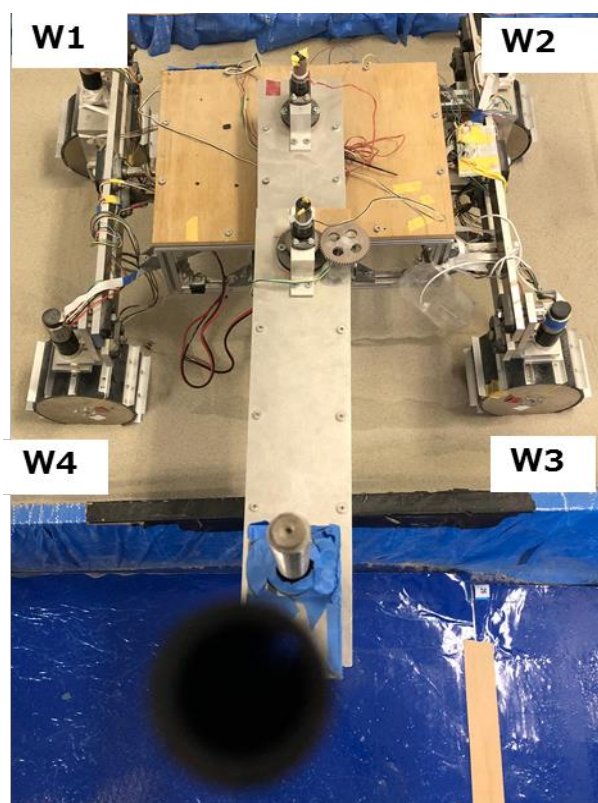


Fig.5.20 Position of manipulator at maximum change of center of gravity position in z direction

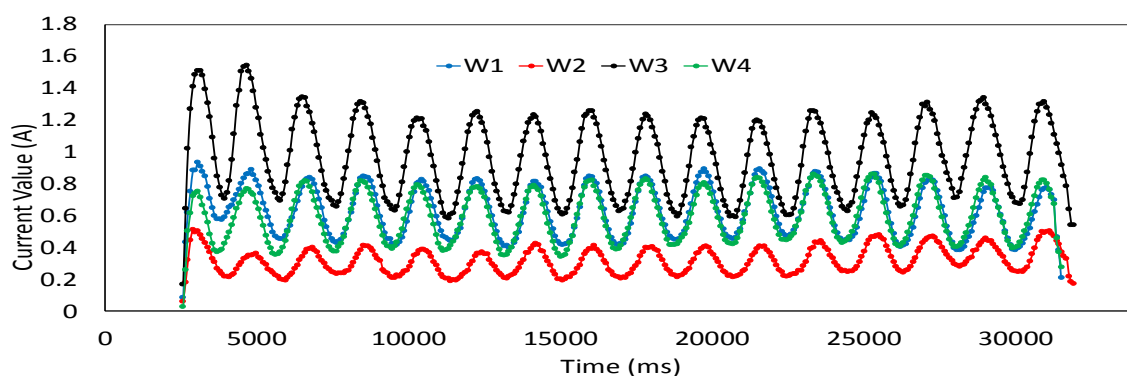


Fig.5.21 Each current value of the drive motor(W34)

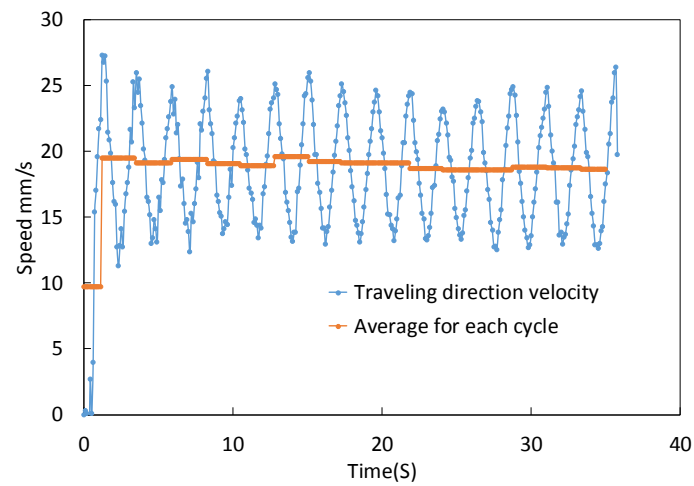


Fig.5.22 Change in walking speed of progress (W34 centroid)

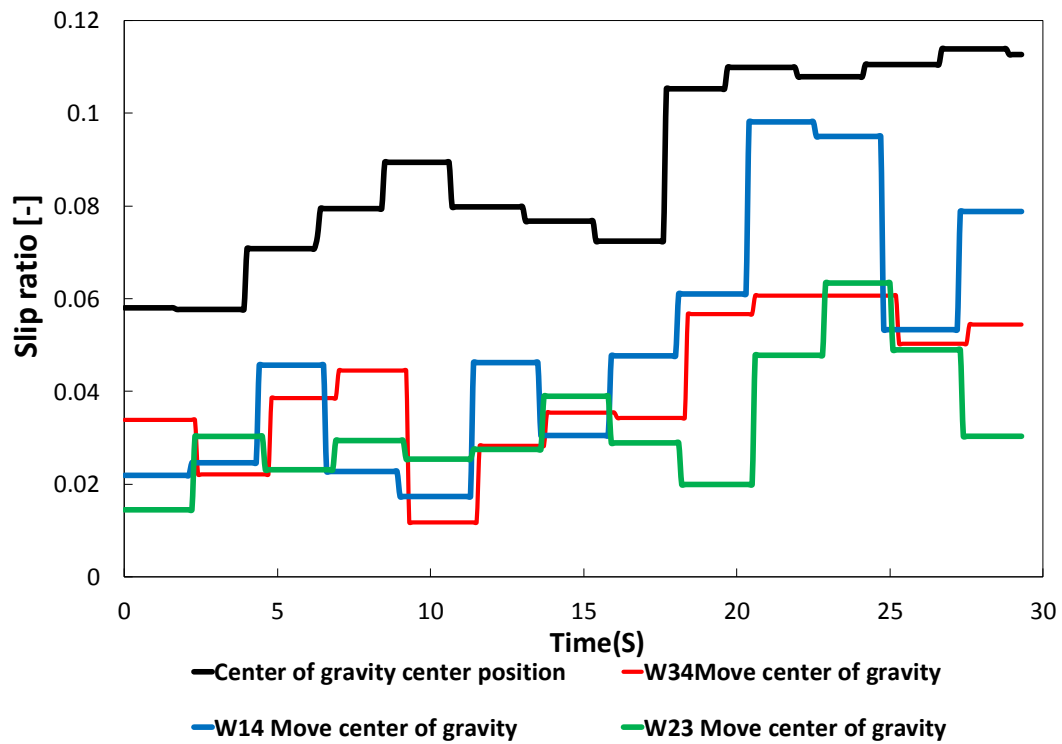


Fig.5.23 Comparison of slip ratio

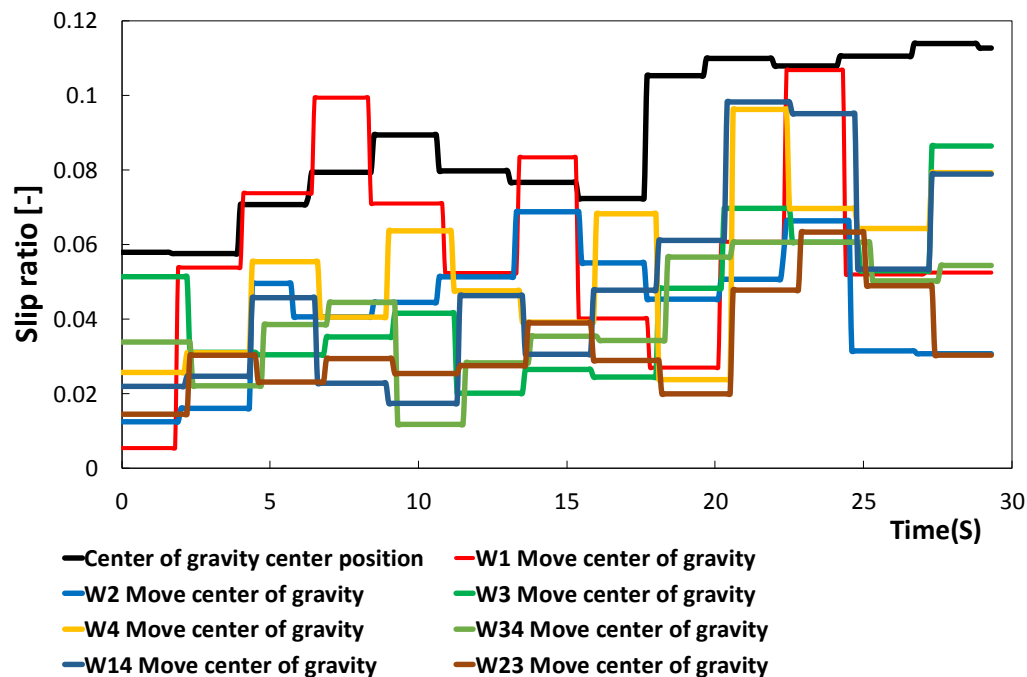


Fig.5.24 Comparison of slip ratio(All experimental results)

5-6 整地した砂の路面における実験考察

まず、駆動モータの電流値や速度が周期的に変化した原因について考察する。この原因は車輪に取り付けたラグが原因であると考えた。今回不整地を考慮し、Fig. 5.3 に示した L 字ラグを全車輪取り付けて走行を行った。このラグが原因であると考えする前段階としてまず駆動モータの実際の回転速度(車輪角速度)を求める必要があった。車輪回転速度はドライバーから直接値を読み取ることができるが、駆動モータにはギア比 300 のギアヘッドが取り付けられている。よって、ギアヘッドによるエネルギー損失を考慮すると、モータの回転速度とギア比から車輪の角速度を算出するのは、困難であると考えた。そこで、今回はビデオカメラで車輪が一回転する時間を計測し、角速度を求めた。なお車輪の回転回数は 4 回転とした。その結果、車輪の角速度は約 13.1degree/s となった。

Fig. 5.3 の 1 周期にかかる時間は、約 2.25 秒であった。この数値から車輪回転角度が 29.5° する度、波形が 1 周期を迎えることが確認できた。ラグの取り付け間隔が 30 度毎であるため、完全ではないが車輪ラグと速度の周期はほぼ一致したと言える。

また、本稿には掲載していないが、y 方向(高さ方向の変化)を測定したところ、高さ方向にも周期的な変化が表れていることが確認できた。この周期も調べると約 2.3 秒と、ラグの間隔とほぼ一致した。高さ方向に周期的な変化があることは、つまり車体が上下に振動しているといえる。このことからラグが地面との接地位置を通過する毎に車体に浮き上がる力が加わり車体が浮き上がる。その後車体が車輪回転と共に沈むため、車体高さ方向に変化が現れると考察した。また浮き上がる際、接地圧力が一時的に増加するため、砂の路面でも進行したと考える。今回ラグの形状と歯数については計算を行わず装備されている。今後は今

回の結果を踏まえて歯数やラグの形状を選定する必要があると考える。

次に各重心位置とモータ電流値の関係について考察する。まず重心を中心部に置いた場合の駆動モータの電流値は、4 輪とも近い値を示していることが確認できる。次に後輪片側に重心を固定した場合を見ると、重心を固定した車輪の電流値のみが高い値を示し、他の 3 輪は等しく低い値を示していることが確認できる。電流値が増加しているため、車輪にかかる力も増加していると考えられる。前輪片側に重心を固定した場合の電流値を見ると重心を固定した対称側の電流値のみが減少し、他 3 輪が等しく高い値を示した。ここで、前輪片輪に重心を固定したにも関わらず、前輪両側の電流値が重なる結果となった。これは前輪に搭載した受動機構 (Fig. 2. 1) が有効に作用し、前輪部では力が釣り合っていると考えられる。このことから前輪と後輪では、重量の分配法則が異なることも確認できた。

最後スリップ率について考察する。今回ラグの影響により等速ではなく速度に周期的な変化が生じた。そのままでは正確なスリップ率の比較を行うことができないと考えた。このため、今回スリップ率を算出する際は、周期ごとに速度を区切り平均した値から算出した。平均した値からスリップ率を算出したため、スリップ率もステップ状になった。Fig5. 24 の結果から見ると、重心が中心の場合に比べ、重心を片輪や後輪中央などに移動した状態で走行場合、スリップ率を抑制することができた。さらに、前輪片側固定時よりも後輪片側、後輪中央移動時はよりスリップ率を抑制することができた。重心前輪片側では、移動対称側以外の車輪 3 輪の駆動が増加した。しかし 3 輪に重量を多く分配するため、大きな駆動力増加がなくスリップ率を抑制し切れなかったと考える。後輪片側では 1 輪に質量が集中したため、大きな駆動力増加があったため、前輪片側に比べ大きな駆動力増加があったと考えた。しかし他 3 輪は駆動力が低下しているため、進行方向速度は増加の著しい増加はないと考察した。

後輪中央移動時や Z 方向重心移動時 (W34) は、電流値から 1 輪のみでなく 2 輪駆動力が増加していると考えられる。スリップ率を比較すると微小ではあるが、今回の実験の結果中で最も良いスリップ率となった条件であった。よってこの結果から 2 輪以下の質量が増加する重心位置が良いスリップ率となることがわかった。以上の実験結果から砂地の路面においても重心移動によって走破性能は向上することがわかった。

第 6 章 片輪障害物乗り越えの走行実験

6-1 重心位置中心部での砂の隆起走破

まず、はじめに 5 章実験同様、重心位置による走行の変化を比較する基準を定めるため、重心位置を中心部に固定した走行実験を行った。Fig. 6.1 に駆動モータの電流値、Fig. 6.2 に進行方向速度を示す。

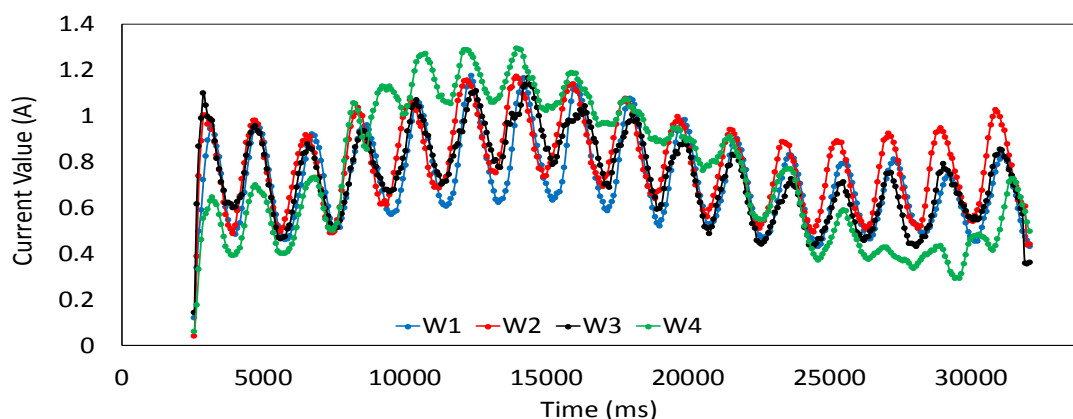


Fig.6.1 Each current value of the drive motor(G0-When sand obstacles run)

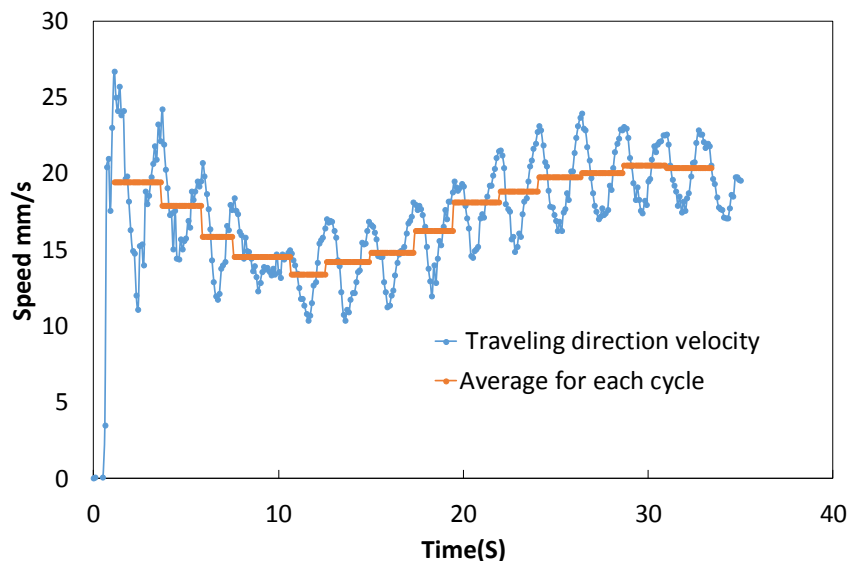


Fig.6.2 Change in walking speed of progress (G0-When sand obstacles run)

6-2 重心位置前輪片側での砂の隆起走破

次に前述実験同様に車輪片側に固定した場合の実験を行った。に重心を固定した場合の走行実験の結果を示す。前輪は W1 と W4 と 2 輪あるため、それぞれの電流値を Fig. 6.3, Fig. 6.4 に示し速度を Fig. 6.5, Fig. 6.6 に示す。

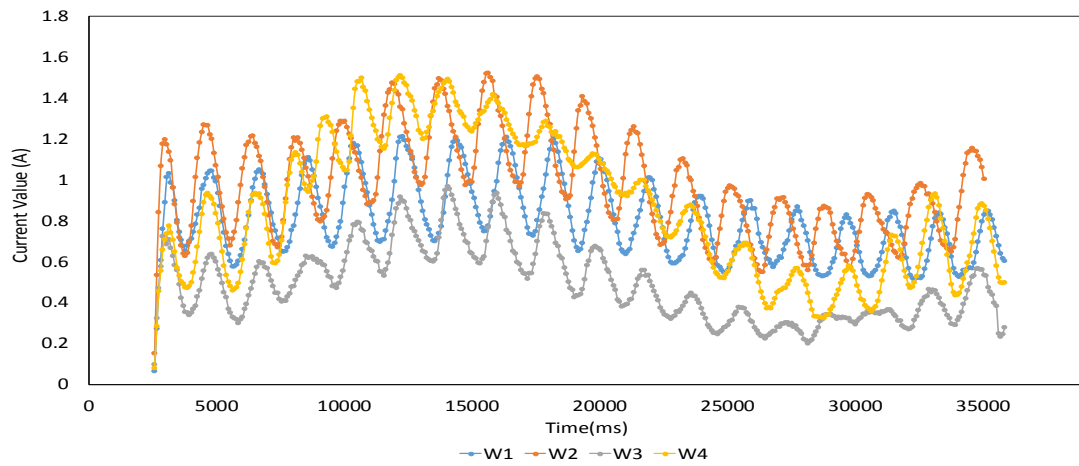


Fig.6.3 Each current value of the drive motor(W1 centroid -When sand obstacles run)

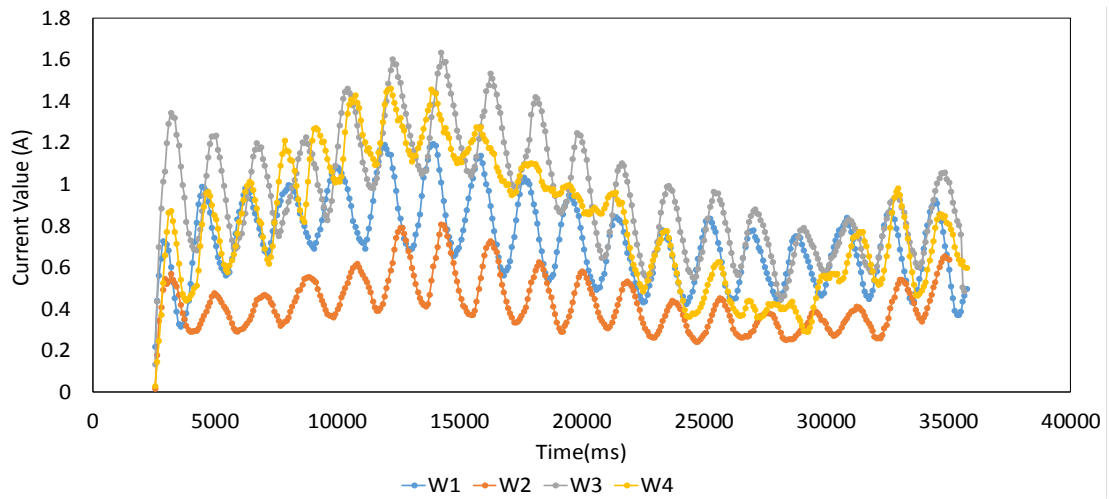


Fig.6.4 Each current value of the drive motor(W4 centroid -When sand obstacles run)

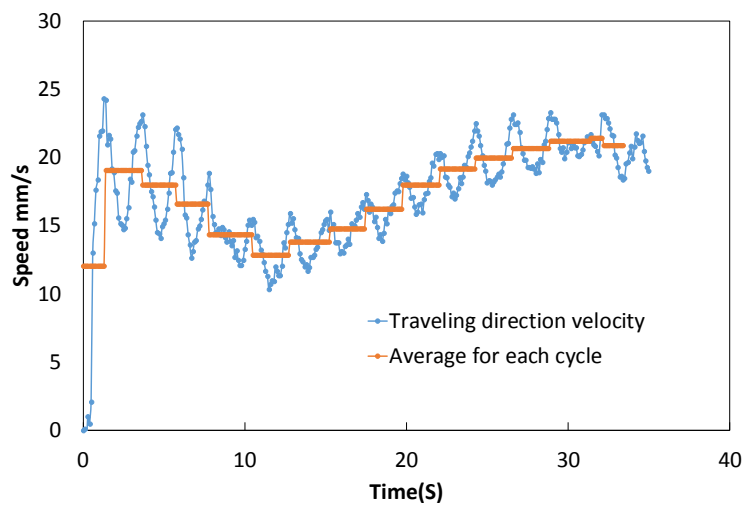


Fig.6.5 Change in walking speed of progress (W1 centroid -When sand obstacles run)

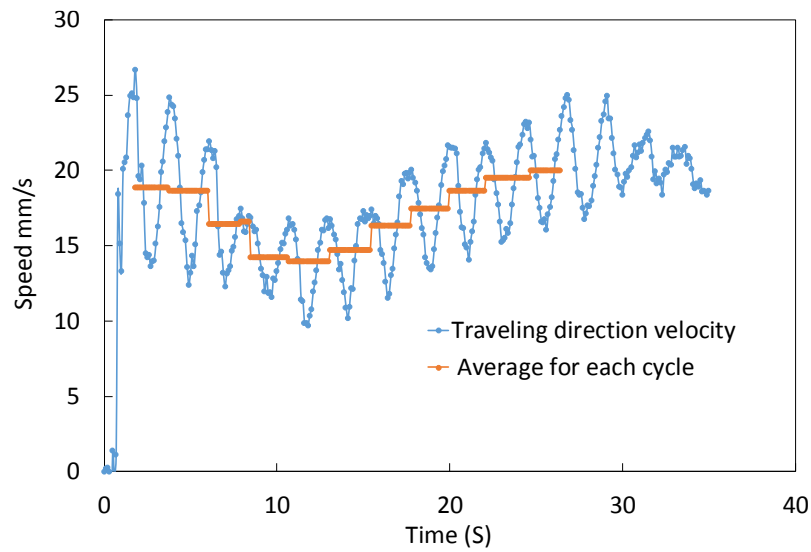


Fig.6.6 Change in walking speed of progress (W4 centroid -When sand obstacles run)

6-3 重心位置後輪片側での砂の隆起走破

次に後輪片側に重心を固定した場合の走行実験の結果を示す。後輪は W2 と W3 の 2 輪あるため、電流値を Fig. 6. 7, Fig. 6. 8 に示し、速度を Fig. 6. 9, Fig. 6. 10 に示す。また、ここで全ての車輪片側に重心を移動した場合の走行実験を行ったので各条件でのスリップ率を比較する。比較したものを Fig. 6. 11 に示す。

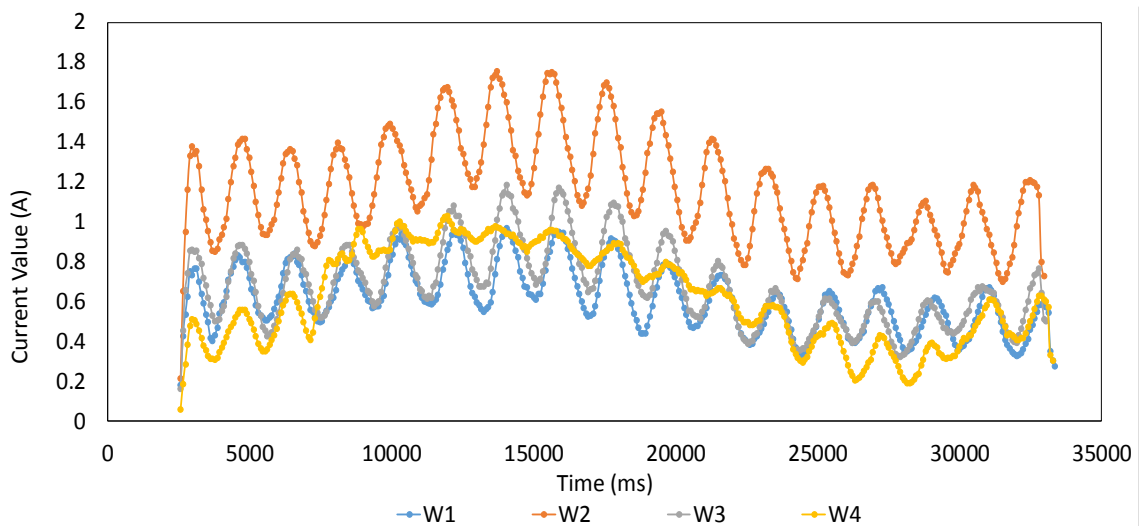


Fig.6.7 Each current value of the drive motor(W2 centroid -When sand obstacles run)

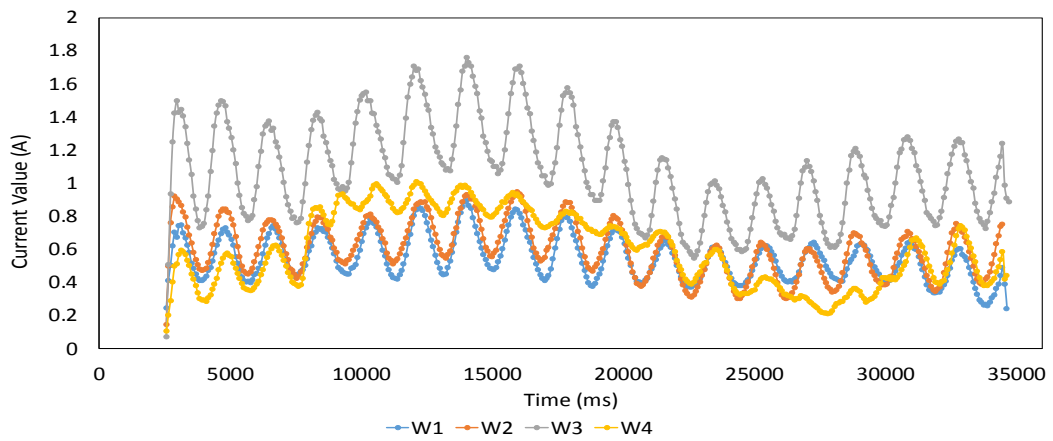


Fig.6.8 Each current value of the drive motor(W3 centroid -When sand obstacles run)

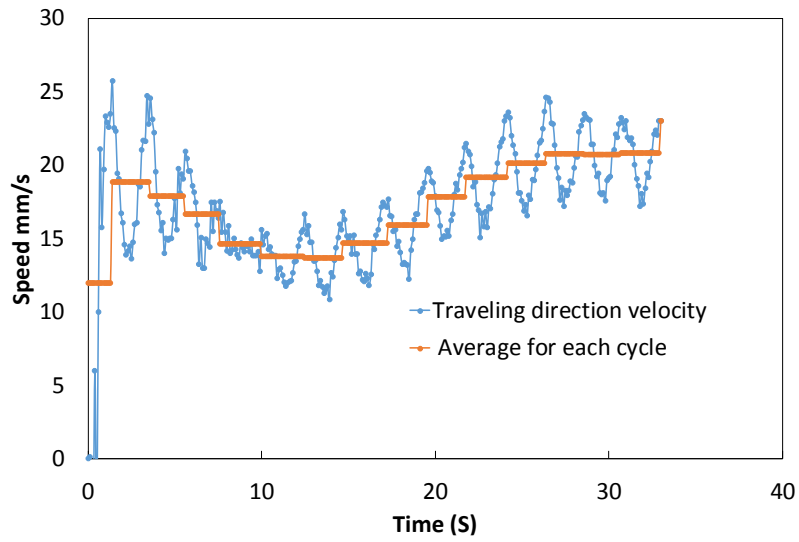


Fig.6.9 Change in walking speed of progress (W2 centroid -When sand obstacles run)

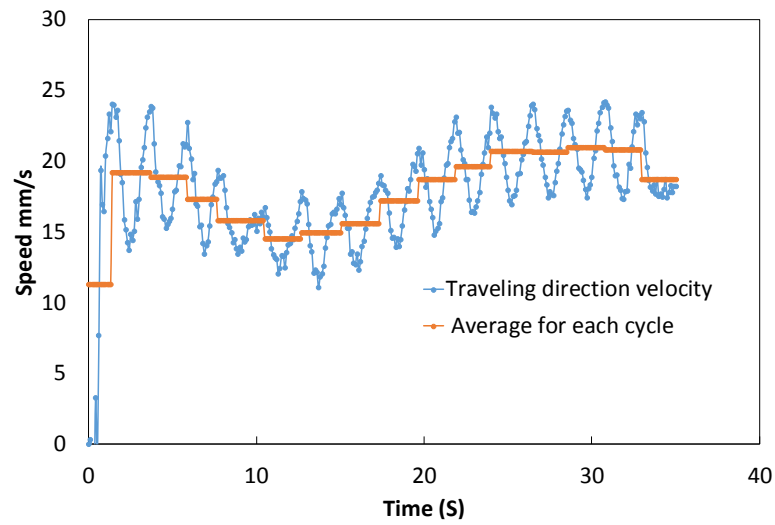


Fig.6.10 Change in walking speed of progress (W3 centroid -When sand obstacles run)

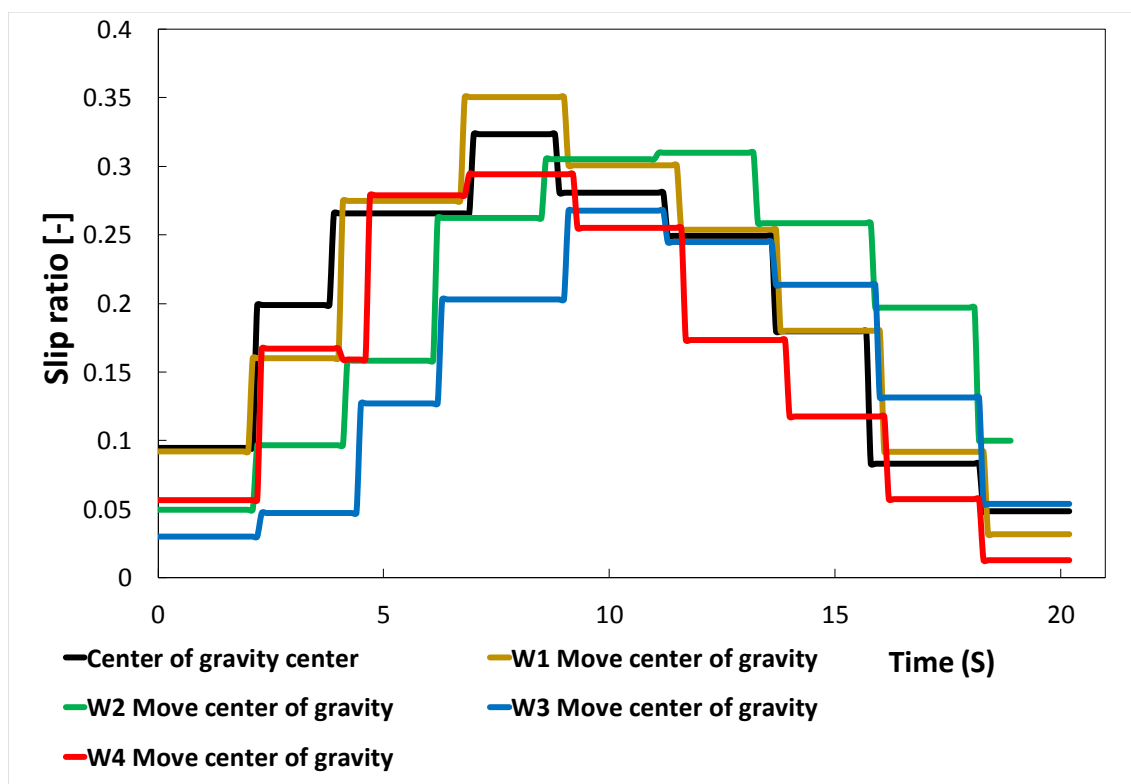


Fig.6.11 Comparison of slip ratio

6-4 重心位置前輪および後輪中央での砂の隆起走破

次に重心位置を車輪片側ではなく前輪および後輪中央に移動した状態で砂の隆起を走破した場合の結果を示す。前輪、後輪中央時の電流値をそれぞれ Fig. 6. 12, Fig. 6. 13 に、速度を Fig. 6. 14, Fig. 6. 15 に示す。

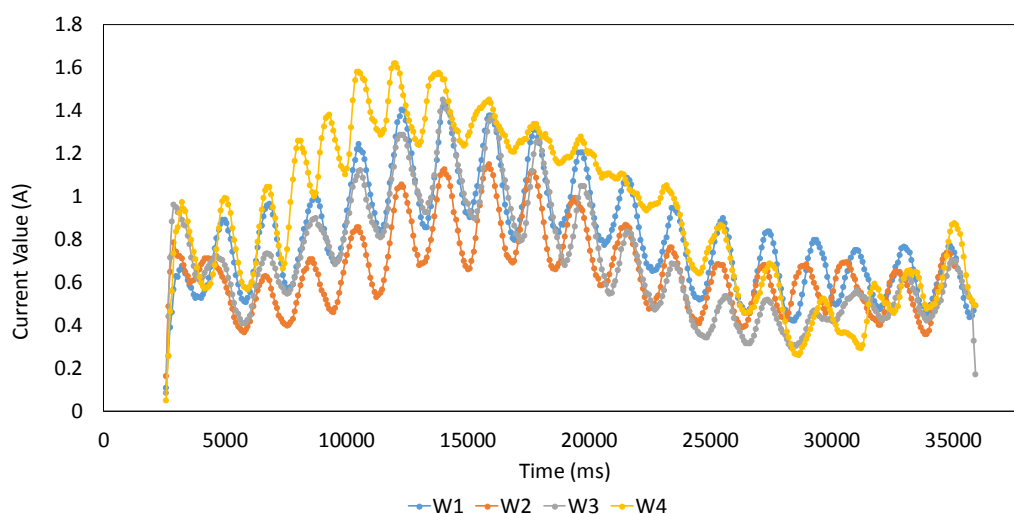


Fig.6.12 Each current value of the drive motor(W14 centroid -When sand obstacles run)

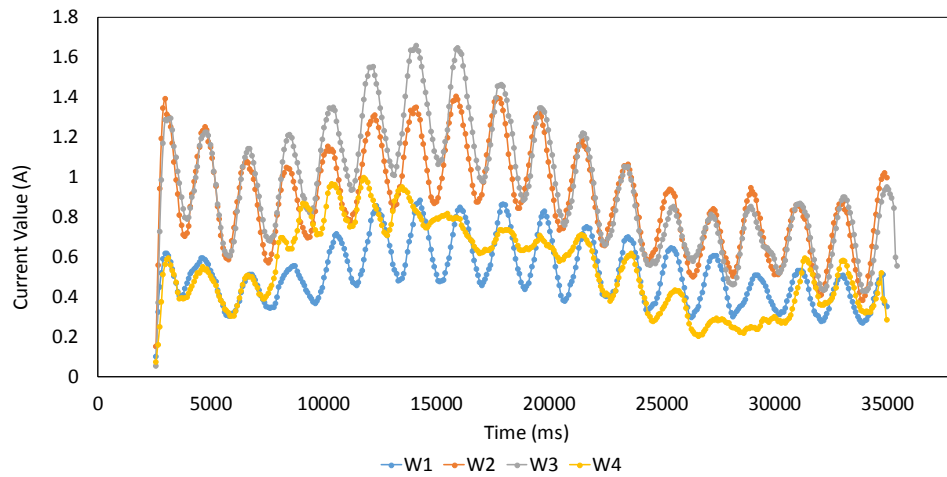


Fig.6.13 Each current value of the drive motor(W23 centroid -When sand obstacles run)

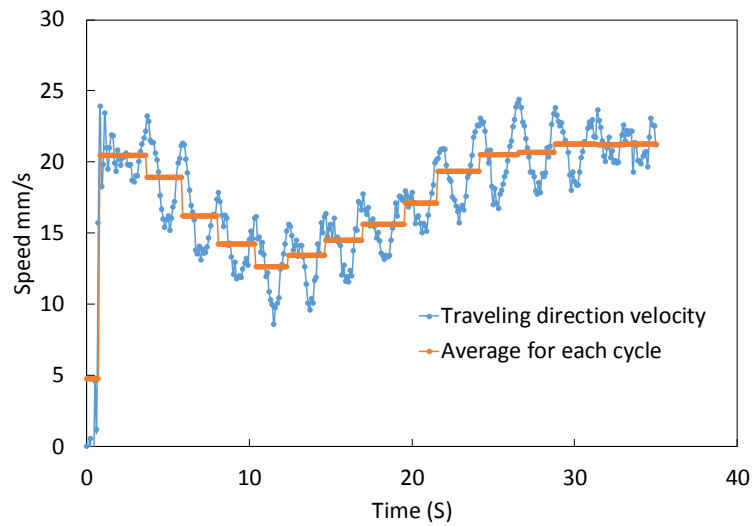


Fig.6.14 Change in walking speed of progress (W14 centroid -When sand obstacles run)

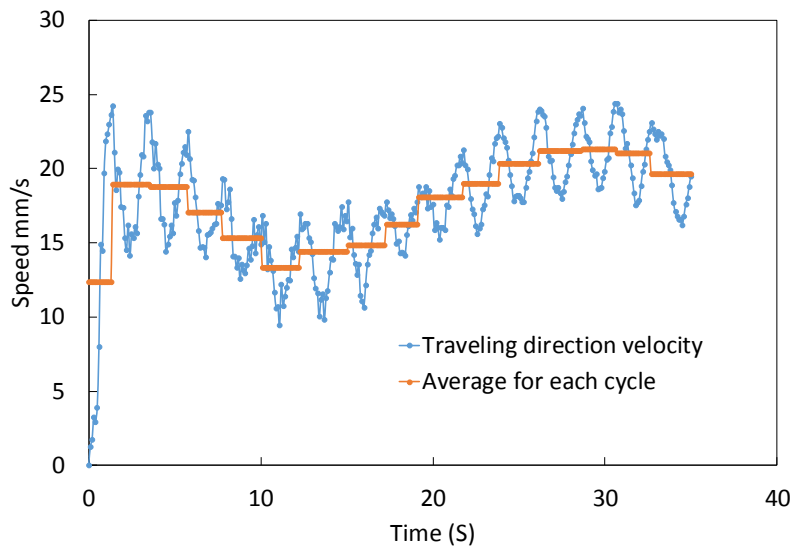


Fig.6.15 Change in walking speed of progress (W23 centroid -When sand obstacles run)

6-5 Z 方向最大重心変化での砂の隆起走破

次に二次元重心移動による走行の変化を検証するため、Z 方向重心変化が最大となるアームの姿勢となる状態で砂の隆起を走行した場合の結果を示す。このときの各電流値を Fig. 6.16, 速度の変化を Fig. 6.17 に示す。ここで 6-1, 6-4 節のスリップ率との比較を Fig. 6.18 に示す。またここで、今回行った隆起走破実験ごとのスリップ率の比較を Fig. 6.19 に示す

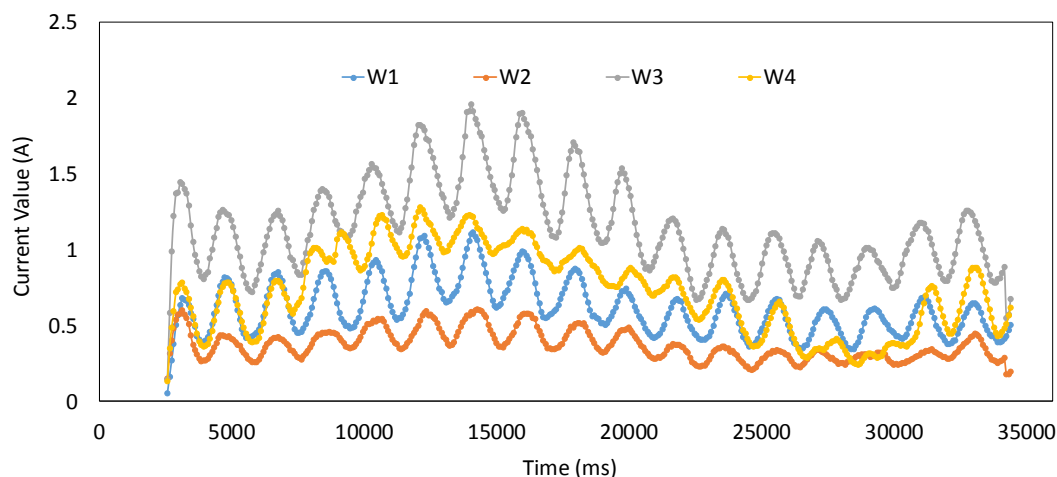


Fig. 6.16 Each current value of the drive motor(W34 centroid -When sand obstacles run)

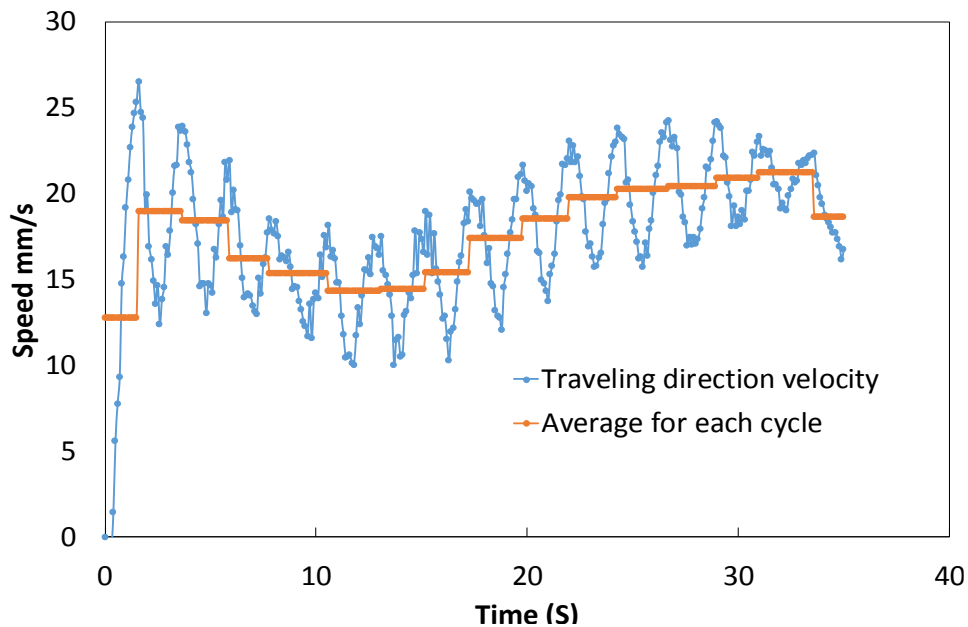


Fig. 6.16 Change in walking speed of progress (W34 centroid -When sand obstacles run)

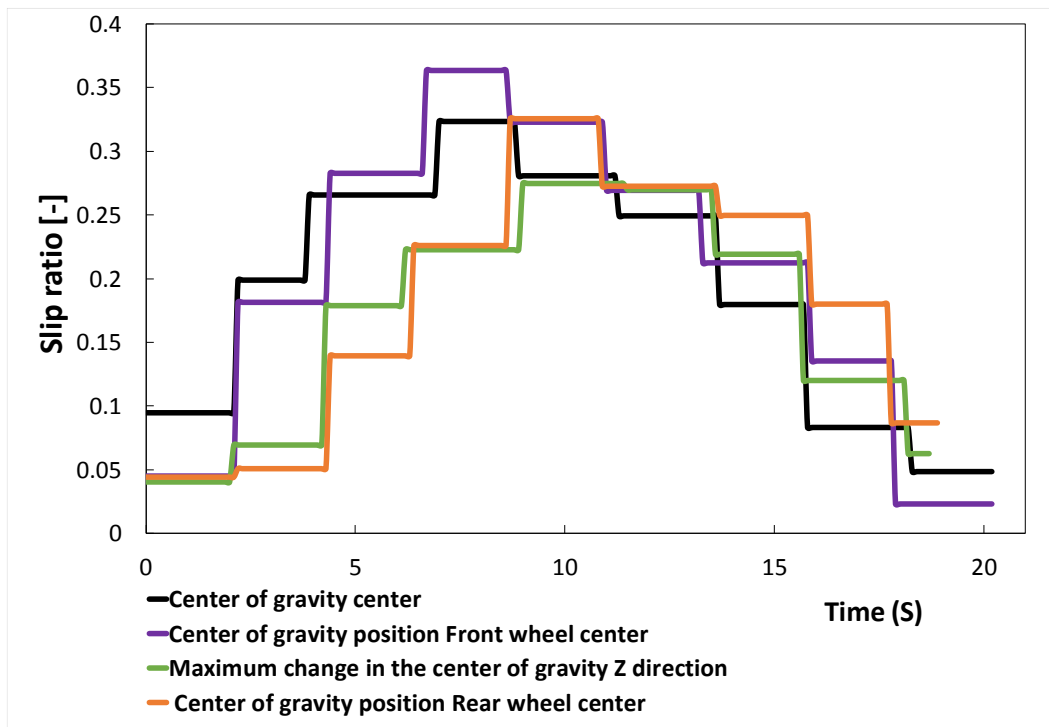


Fig.6.17 Comparison of slip ratio

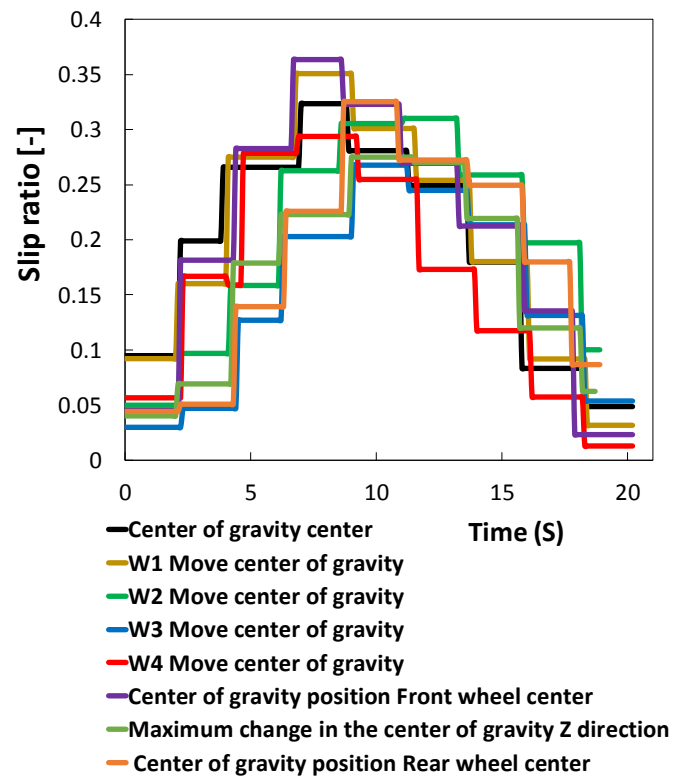


Fig.6.18 Comparison of slip ratio (All experimental results of uplift of sand)

6-6 砂の隆起走破における考察

今回走行実験を行った結果、どの重心位置においても車体がスタックや転倒などの事態に陥ることがなく、隆起を走破すること可能であった。しかし隆起によって進行横行が整地した砂の路面走行時の速度に比べて低下したことから、スリップ率の観点で見ると有効性が示せると考えた。先ず重心位置が中心部の場合を考えると、隆起に応じて谷のように速度が減少し隆起の頂点を越えると、速度が戻るような結果が得られた。そこで隆起を上る際の速度を登坂区間とし、隆起を降る時を降坂区間と名づけ、二つに分けてスリップ率を見た。

Fig. 6.18 の登坂区間から見ると、後輪部中央に重心を移動した場合(W23)、後輪片側に移動した場合(W2, W3)にスリップ率を抑制する傾向が見られた。後輪に重心を移動することで、前輪の接地荷重が低下し、隆起による車輪の速度変化を抑制していると考えた。また、後輪部の中で、特にW3に重心移動時良いスリップ率を示している。W3に重心移動時その対称側、W1の接地圧力が低下することがわかっているが、それを踏まえてFig. 6.8を確認する。障害物と接しているW4の電流値が隆起によって大きく変動していないことが確認できる。これは、後輪片側W2に重心を移動した場合も同様である。しかし微小ではあるがスリップ率に差があった。

電流値には大きな差がないにも関わらず、スリップ率に差が出たことについて考察する。これは駆動力が増加する車輪と隆起の位置によるものだと考える。今回隆起の位置は前輪片側W4のであった。隆起と接している車輪は駆動力が減少するため、隆起を始点にヨー方向のモーメントが発生すると考える。このことから、隆起との距離が小さいW3の駆動力が増加すると進行方向速度の減少が少なくなると考えた。

次に降坂時を見ていくと、前輪片側(W1, W4)や前輪中央(W14)に重心を移動することでスリップ率を抑制する傾向があった。全ての重心位置において降坂時はW4の電流値が減少している。これは下り坂によって車輪回転方向にモーメントが加わり駆動に付与が与えられ、電流値を削減していると考ええる。しかし整地した路面と比べ隆起を降る際は、砂に車輪が埋まるため、車輪のスリップ率が増加するため、隆起降坂時はW4の駆動力を増加させる重心位置に固定することで、スリップ率を抑制したと考えられる。登坂時と降坂時、両方の条件において常に中心部より良いスリップ率の条件はなかった。よって、今回の隆起を走破する際は、登坂時W3、降坂時W4に重心を能動的に移動することで、走破性能の高くなると考えた。以上の結果から、重心移動によって走破性能は向上することがわかった。また、両区間とも前後の1次元的重心移動よりも、二次元的な重心移動(W3~W4)によって走破性能が最も向上することがわかった。このことから2次元重心移動はサスペンションとして有効性は高いものであると言える。

第7章 結言

今回二次元重心移動機構として用いるマニピュレータを作製し、それを用いたローバーの重心位置による走行の変化について実験値より有効性を検討した。今回、隆起や整地路面の走行において力学的なモデルを構築せず実験に望んだ。よって今後は今回の実験値からモデルを作製しより自由度の高い重心制御則を導く予定である。また、走破性能についてだが今回使用機器の都合上、スリップ率の観点のみ有効性を検討した。走破性能については他にも指標があるため、今回の結果に加え他の指標についても検討する必要がある。

次に実験条件についてだが、今回は障害物として砂で作製した隆起を使用した。砂で作製したため、車輪の通過により変形が生じ再現性の低い実験であったと考える。今後の展望として Fig. 4.4 に示した地表に点在する岩を模した硬質な障害物を用いることでより再現性の高い実験が可能であると考え。また、実験では常に同じ位置、同じ形状の障害物を使用した。実際の惑星探査では、カメラなどのセンサを用いて有効な制御則を導くプロセスが必要であるため、今後はその理論の構築も必要であると考え。

最後に測定装置について示す。今回、車輪の電流値、車体の変位を測定した。変位は有効性の検討において有用性のある材料であるといえるが、電流値はそうであるとはいえない。その理由は、今回の電流値のみでは現在の車体重心がどこにあるか求めることができないからである。よって今後は、ローバー走行部に圧力センサ(ロードセル)を取り付け、より自立性高い機体を製作する予定である。

参考文献

- (1) 中村壮亮. “重心移動可能な車輪型ロボットにおける不整地走破性能,” 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士論文. 2007
- (2) 内気考将. “アクティブサスペンションを有する惑星探査ローバーの不整地走破性能に関する研究,” 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修士論文. 2010
- (3) 三輪章子, 石上玄也, 長谷圭司, 吉田和哉. “テラメカニクスに基づく月・惑星探査ローバーの登坂性能解析,” 第 11 回ロボティクス・シンポジウム, 6A2, pp514-519. 2006
- (4) 長塩拓馬. “二次元重心位置制御が可能な車輪型ローバの不整地での走行性能の検討,” 高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻修士論文. 2016.
- (5) 田中耕治. “二次元重心位置制御によるローバの不整地走破性の検討,” 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修士論文. 2017.
- (6) NASA, “Mars Science Laboratory Curiosity Rover,”
[オンライン]. Available: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>.
- (7) JAXA, “月・惑星探査プログラムグループ研究開発紹介,”
[オンライン]. Available: <http://www.jspec.jaxa.jp/research/payload.html>.
- (8) 京都大学, “京都大学航空宇宙力学講座宇宙探査ローバーに関する研究,” [オンライン]. Available: http://space.kuaero.kyoto-u.ac.jp/?page_id=148.
- (9) armMBED, “mbed LPC1768,” [オンライン]
Available: <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>
- (10) maxon motor, “ESCON 50/5 ハードウェアリファレンス,” [オンライン] Available:
http://academy.maxonjapan.co.jp/wpcontent/uploads/manual/escon/409510_ESCON_50_5_Hardware_Reference_Ja.pdf.
- (11) 日経 BP “NIKKEI BUSINESS 1 月 16 日号,” page 38
- (12) ミスミ “転造ボールねじ コンパクト ナット 軸径 $\phi 20$ リード 5・10,” [オンライン]
Available: <https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/110302588450/>
- (13) ヤマハ発動機 “小型スカラロボット YK-XG,” [オンライン] Available:
<https://www.yamaha-motor.co.jp/robot/lineup/ykxg/small>
- (14) 永谷圭治, “軟弱地盤走行ローバーのスリップ率オンライン推定-土壌圧力を測定する圧力センサ内蔵型ホイールの開発-,” [オンライン]
Available: <http://frrl.niche.tohoku.ac.jp/pdf/2006-RSJ-Yamana-online.pdf>
- (15) OptiTrack “V120 Trio_Duo” [オンライン]
Available: <https://www.mocap.jp/optitrack/products/v120-trio-duo/>

謝辞

本研究を進めるに辺り、多くのご指導下さった岡宏一教授、原田明德講師に深く感謝致します。また研究において数多くの指摘や、示唆を頂いた研究室の後輩、同期、先輩方に感謝致します。特に今回の研究関する多くの知識と研究に関するアドバイスをくださった池田君と、回路や設計の指導してくれた後輩の多田君に深く感謝致します。最後に学費や生活面、また精神面においても全面的にサポートして頂き、私に勉強する機会を下さった両親に心から感謝致します