
博士学位論文

6脚クローラ型不整地移動ロボットによる
脚とクローラのハイブリッド移動と作業に関する研究

東北工業大学大学院 工学研究科 電子工学専攻

佐々木 大雅

目次

1 章.	序論	3
1.1	研究背景と目的.....	3
1.2	従来研究.....	7
1.3	論文構成.....	9
2 章.	6脚クローラ型不整地移動ロボットの開発	11
2.1	研究背景と目的.....	11
2.2	従来研究.....	12
2.3	機体構成.....	14
2.4	基本動作試験	20
3 章.	前中脚間の対象物持ち替え	22
3.1	研究背景と目的.....	22
3.2	脚先の可操作度を用いた脚先軌道の生成	23
3.3	対象物持ち上げ持ち替えシミュレーション	34
3.4	対象物持ち上げ持ち替え実験.....	38
4 章.	段差溝乗り越え運搬動作.....	40
4.1	研究背景と目的.....	40
4.2	従来研究.....	41
4.3	段差溝乗り越え運搬動作	43
4.4	自律段差溝乗り越え	57
4.5	考察.....	71
5 章.	板下対象物回収動作.....	72
5.1	研究背景と目的.....	72
5.2	従来研究.....	73

5.3	板下対象物の回収動作.....	74
5.4	考察.....	79
6章.	総論	80
6.1	はじめに.....	80
6.2	各動作に必要な技術	81
6.3	今後の展望.....	85
7章.	結言	90

1章.

序論

1.1 研究背景と目的

近年、人が作業するには危険な作業現場や災害現場で活動可能な災害対応ロボティクスの研究が多く行われている[1-1]。従来開発された災害対応ロボットは、クローラ移動機構を持つ車体に作業マニピレータを搭載して不整地適応性をもつ移動マニピレータを構成している[1-2]~[1-7]。この構成の優位点は作業能力と移動能力を両立することで、移動と作業を複合した複雑な作業を遂行できることである。このようなロボットは遠隔操縦が必要となる。しかし、クローラ移動を指示しながらロボットアームによる作業を同時に操作するにはオペレータ(操作者)に相当の習熟が必要である。加えて、ロボットアームの数に比例してロボットの操作が困難になるため、基本的には単腕をクローラ車体に装着したロボットが多い。しかしながら、単腕による作業能力は人間が片腕で作業を行うのと同様に、十分な作業を行うことができない。そのため、アームの本数は2腕以上が望ましい。ロボット構成において例えば以下のような問題がある。

- ① 不整地適応性の向上のためクローラ移動機構に小型クローラのフリッパ機構を追加した機体はクローラが路面に対して十分に接地できない場合でもフリッパ機構を路面に接地させることで常に一定の接地面積を得ることが

可能になる構成である。そのため屋外の砂利道のような凹凸の激しい路面でも走破可能である。また、フリッパを路面に合わせて回転させることで階段のような連続的な段差を走破することも可能になる。しかし、フリッパで得られるのは移動能力の向上のみで、作業能力の向上はできない。つまりこのフリッパを搭載した場合は、作業能力の向上は見込めない。そのため、フリッパを持つクローラロボットに作業腕を搭載して、作業能力を持たせた移動マニピレータは移動能力と作業能力を高い水準で獲得している。たとえばSERVOSILA社が開発した「Engineer」[1-8]はメインクローラにフリッパを2基搭載し、機体上部に6自由度のロボットマニピレータを搭載している。またエンドエフェクタにはLRFとステレオカメラを搭載しており、カメラフィールドバックによる対象物の把持動作やSLAMによるロボットナビゲーションが可能になる。しかし、このようなロボット研究においてフリッパとクローラの移動をマニピレータで補助する移動は考慮しておらず、本研究で示す脚とアームのハイブリッド動作により、移動能力が向上することが望めるだろう。

- ② 脚を複数搭載した歩行ロボットでは、不整地適応性が高い歩行動作が可能であるため、屋外を歩行するロボットや4足歩行動物の歩容を模倣して動作するロボットなどがある。この機体に作業腕を追加した場合、機体の重量が増加し、十分に歩行できない場合が考えられる。そのため歩行ロボットに作業能力を持たせるために、脚機構を作業腕として使用することが考えられ、これにより移動と作業の両立を行うことができる。例えば、脚を6本搭載したロボットが6脚步行をしながら対象物を操作し、さらに運搬などを行う場合は、脚を2本作業腕として対象物を把持し、残りの4脚で歩行すればよいのだが、もともと6本で歩行制御していたロボットの動作が4脚步行になるの

で制御方法を切り替えなければならず、制御が煩雑になる恐れがある。そのため、脚ロボットでは脚とアームによるハイブリッド移動が難しいと言える。

これらの点を考慮し、本研究ではクローラ機構に 4 自由度の作業腕として使用可能な 6 脚を搭載した 6 脚クローラ型不整地移動ロボットを開発する。このロボットでは例えばクローラ移動を行いながらロボットアームで前方の障害物の除去が可能である。また、6 本ある脚機構で歩行も可能であり、さらにクローラ移動の補助も可能であるため、必要最低限の構成でありながら作業能力と移動能力の双方を十分に確保していると言える。また、脚とクローラの双方を協調させることで、各機構が単独で行うには難しい動作が達成可能になる。例えば、階段の途中で荷物があり、それを回収する動作をしたい場合、通常では階段を登攀する能力、荷物を回収するアームが必要になる。また移動中の機体姿勢が安定しないため、荷物が激しく揺さぶられ最悪の場合破損する恐れがあるだろう。しかし、開発したロボットでは階段までクローラ機構で移動し、6 脚で階段を上り 2 脚をアームとして対象物を回収できる。そして戻る際には 2 腕はふさがってしまうがクローラ移動を残った 4 脚で支えながら機体姿勢をキープするように移動させることで安定した運搬を行うことができる。このようにクローラ移動と脚歩行をその場で切り替え可能であるため、効率の良いクローラ移動と歩行がいつでも利用できる。また、脚機構でクローラ移動の補助を行うことにより移動能力の拡張もできるのである。本論文ではこのような複数の機構が互いの動作を補助して動作することをハイブリッド動作と呼称し、その有効性と独自性について検証することを目的としている。

開発した 6 脚クローラ型不整地移動ロボットは、不整地移動では作業腕として使用可能な脚機構とクローラ移動機構により、ハイブリッド作業と移動を行

うことが可能である。これは脚機構のみを持つロボットや脚車輪型をはじめとする通常のクローラロボットでは困難な地形を走破可能であることや、それと同時に作業を行うことも可能になるという点でも有効であると言える。

本章では不整地移動ロボットや極地で活動するロボットの研究から本ロボットの優位点を示す。そして、本論文にて明らかにする動作のポイントや独自性を述べる。

1.2 従来研究

作業腕とクローラをともに持つロボットが多く存在することは先にも述べてきたが、特に災害現場で活動するための機構を持つロボットとして、単腕とクローラを装備する「HERIOS IX」[1-9]や複数腕と複数のクローラから構成される「E-OCTOPUS」が存在する[1-10]。筆者の所属する研究室でも「双腕を持つクローラロボット」の開発を行ってきた[1-11]。このような研究の共通の課題は不整地におけるロボット移動性能の拡張である。また、移動した後の作業能力の拡張もある。そのためのシステム開発やSLAMによる自律移動の研究開発などが行われている。特に、不整地の走破性能の目標として階段のような段差の走破を行って地形適応性の検証を行っているものが多い。例えばサブクローラを持つようなクローラロボットであればサブクローラを段差に合わせて接地面積を確保して登るような段差移動が可能になる。また、アームを持つロボットの場合では段差を登るためにアームで機体を支えて持ち上げながら移動を行うような手法をとるものがある。ほかの不整地環境(例:坂道、飛び石、障害物など)でも検証を行っているものもある。これらを走破する場合はそのロボットの構成に合わせて動作モデルを求め、そのモデルに合わせた動作計画や動作の可能性についても求める必要があるため、一つの動作を解析するのに多くの時間が要求されることが問題となる。そこで、類似した構成のロボットで使用しても一定の評価を行うことができるような、不整地ハイブリッド移動の動作モデルでロボットの評価を行えるようになれば、一般的なモデルとして多くのロボット動作の検証を行うようにできるため、十分に有効なものといえるだろう。

また、先にも上げた不整地移動中に作業を同時に行うような動作の例として、運搬動作が挙げられる。この動作を行うことで人が危険地帯で行うような動作の代行が可能になるため非常に有効な動作であることは明らかである。一般的

には作業腕にて対象物を把持しながら移動を行うことができれば運搬が可能になる。この動作とハイブリッド作業と移動を組み合わせた動作を検証した。

2章以降の章では複数脚を持つクローラロボットのハイブリッド作業と移動のモデルとして溝乗り越え運搬と板下対象物回収動作をあげ、モデルの評価と実機実験をおこなう。

1.3 論文構成

本論文は 6 脚クローラ型不整地移動ロボットの開発と各動作を章ごとに説明する。

2 章ではロボットの要点と開発に至った経緯、加えて基本走行試験の結果を示す。これによりロボットにて達成可能な動作や利用可能な動作などを示し、機体の有効性と独自性を示す。

3 章では脚を作業腕として使用し、運搬対象物を作業腕の間で持ち替える対象物持ち替え動作について、逆運動学による手法とその結果に基づくシミュレーションと実機実験の結果を示す。

4 章ではクローラ移動を脚により拡張させるハイブリッド移動の一つとして、クローラのみでは超えられない大きな溝と段差を脚補助により走破する動作である段差溝乗り越え動作を検証する。またこれに 3 章にて検証した対象物持ち替えを含めた段差溝乗り越え運搬について、静力学モデルを作成し、それに基づくクローラ駆動力と脚先に発生する力の関係を求める。また、動作の自律化のために溝と段差の幅と高さを検出するシステムを開発し、そのシステムと動作モデルから一連の動作の実機実験を行う。その手法と結果について述べる。

5 章では作業腕とクローラのハイブリッド作業の一つとして板下にある対象物の回収運搬を行う板下対象物回収動作について動作モデルを作成し、脚先に発生する力と作業腕の把持位置の関係を示す。またこちらも自律化のために脚先反力に基づく板の持ち上げ時の脚関節トルクに基づく持ち上げの制御手法の作成を行う。最後に実機により検証を行う。

6 章からは 2,3,4 章にて検証した各動作についての考察について述べる。特に、実環境の場合に考えられる問題とその解決方法がどのようなものになるのか、

その解決のために必要な技術についても述べる。また、今後の研究計画と展望について述べる。

最後に 7 章で本論文の結言を述べる。

2章.

6 脚クローラ型不整地移動ロボットの開発

2.1 研究背景と目的

近年、被災地でレスキュー活動等の作業を遂行するロボットに期待が高まっている。このロボットには、不整地現場での高い移動能力や作業能力が必要とされる。そのため、クローラなどの移動機構と脚機構を組み合わせた構成のロボットが有効である。そこで筆者らは作業腕として使用可能な脚機構をクローラ移動機構に搭載した 4 脚クローラ型不整地移動ロボットを開発し、脚とクローラによるハイブリッド移動と作業動作について検討してきた[2-1]。しかし、それでも脚を用いて対象物を運搬しているときに脚による移動補助をしながら不整地を走破することができない。そのため、今回筆者らはさらに 2 脚を追加した 6 脚クローラ型不整地移動ロボットが有効であると考えた。6 脚型の構成により従来の 4 脚型と同様の動作に加え、脚とクローラのハイブリッド動作による作業しながらの移動が可能になる。例えばクローラのみでは移動が困難な急な段差を脚で補助して支持しながら移動するとともに対象物を運搬することができる[2-2]。また、クローラ移動だけでは越えることができない大きな溝を、脚の補助により移動するとともに対象物を運搬することができる。6 脚型は重量、コスト、制御の容易さの面で比較的劣るが、このようなハイブリッド移動作業が可能となり、また、脚による静歩行もより安定する。本研究ではこれらの点を重視し、6 脚クローラ型不整地移動ロボットを開発した。本章では、開発したロボットとその基本動作について述べる。

2.2 従来研究

他のタイプの不整地移動・作業ロボットを挙げ、多脚クローラ型の利点を挙げる。不整地の移動を行うロボットは様々なものがあるが、代表的なものは生体模倣型の脚歩行ロボットである「多脚歩行型」と不整地移動において有効な「クローラ走行型」の 2 系統がみられる。それぞれの利点として、多脚歩行型は人間や 4 足歩行動物のように路面の凹凸の影響をあまり受けずに歩行するような動作が可能である。クローラ走行型はエネルギー効率の面で歩行型よりも勝っている。特に長距離の移動や物体の運搬などにおいて非常に優れている特性であると言える。

これらの有効な点をとともに得るように多脚クローラ型ロボットが開発されている[2-3]。先ほどの脚とクローラ型の利点をとともに持ち、さらに状況に合わせて移動方法を切り替えることができるので移動可能性とエネルギー効率の面で非常に有効であると考えられる。

また、脚と車輪機構を複合したものもある。例えば通常的車輪移動のみでは超えられない段差を脚補助にて乗り越える動作を可能にした「CHARIOT」[2-4]がある。同様に多脚とクローラを複合したロボットも移動能力の面で非常に有効な車体であると判断することができる。

さらに、筆者の研究室にて従来開発していた「4 脚クローラ型不整地移動ロボット」がある。このロボットの特徴として、その名の通り作業腕として使用可能な 4 脚を持つクローラ型移動ロボットであり、それらを組み合わせたハイブリッド動作が可能である。このロボットと 6 脚クローラ型不整地移動ロボットを比較すると、重量、コスト、制御の容易さの面では前者の方が比較的優れている。しかし後者は脚による静歩行がより安定し、脚とクローラを用いたハイブリッド移動作業が可能となる。筆者らはこれらの点を重視し、6 脚クローラ

型不整地移動ロボットを開発することとした。4脚クローラ型ロボットの脚は4自由度のシリアルリンク機構であり、作業用アームとして用いることができる。また、歩行時には先端の関節を固定して3自由度として使用することができる。さらにクローラ移動機構が胴体左右に搭載されており、軽量かつ高い旋回性を有することができる。これらの利点を継承するため、今回開発するロボットの機構は従来と同様とし、2脚を追加するようにした。

2.3 機体構成

開発した 6 脚クローラ型不整地移動ロボットを Fig. 1 に示す。各脚最大展開時の機体サイズは幅 1200[mm]、長さ 370[mm]、高さ 150[mm]である。従来の 4 脚クローラ型と同様に胴体左右にクローラ移動機構を搭載し、機体両側に各 3 本の脚を装着する。従来の 4 脚型の機体を改造して 2 脚を追加するという方法もあったが、脚の増加に伴うボディ内スペースの確保が難しいことや、フレームを再製作する必要があったため、新規に機体を製作した。



Fig. 1 6 脚クローラ型不整地移動ロボット

脚機構を Fig. 2 に示す。従来型と同様に 4 自由度のシリアルリンク機構とした。脚により機体を 25[mm]持ち上げて直立したときの脚の第 3、第 4 リンクが鉛直になるように脚の各リンク長さを決定し、図中 $l_0=27$ [mm]、 $l_1=85$ [mm]、 $l_2=97.5$ [mm]、 $l_3=85$ [mm]、 $l_4=100$ [mm]とした。

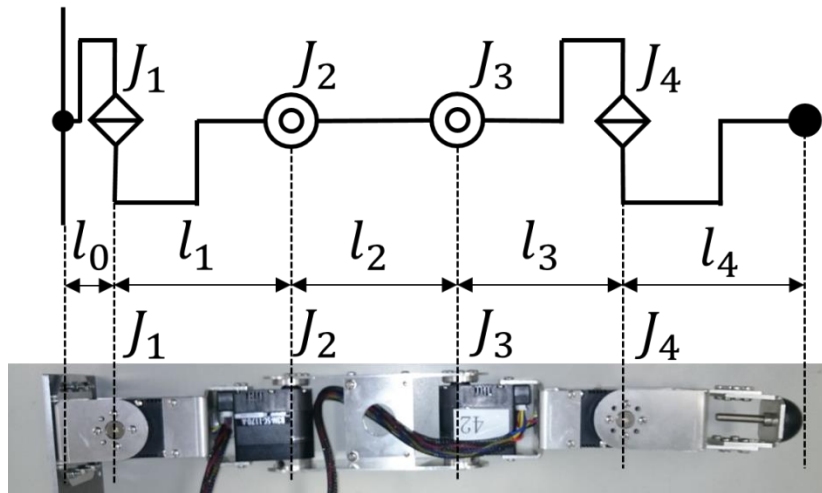


Fig. 2 脚機構

胴体部の概要を Fig. 3 に示す。胴体部の機構も従来型と同じとしたが、クローラ移動の安定化のために機体重心をなるべく低く、路面から約 70[mm]の高さにするよう設計した。そのため、クローラベルトの突起部高さを短くし、10[mm]にした。さらに、直進安定性と旋回性を向上させるためにクローラベルトの接地長さを増やして 200[mm]とし、幅を短くして 25[mm]にした。また、脚の追加に伴う機体重量の増加を抑えるために、フレームの肉抜きを行った。

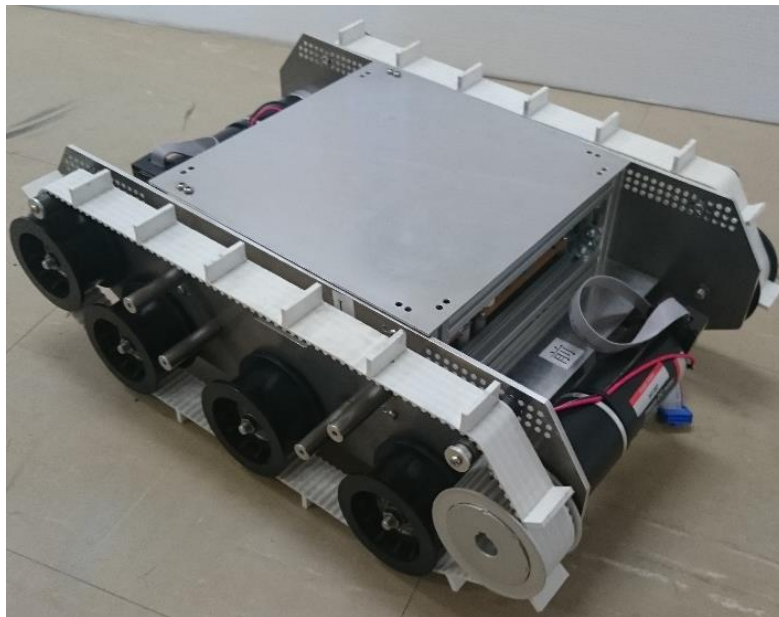


Fig. 3 胴体部

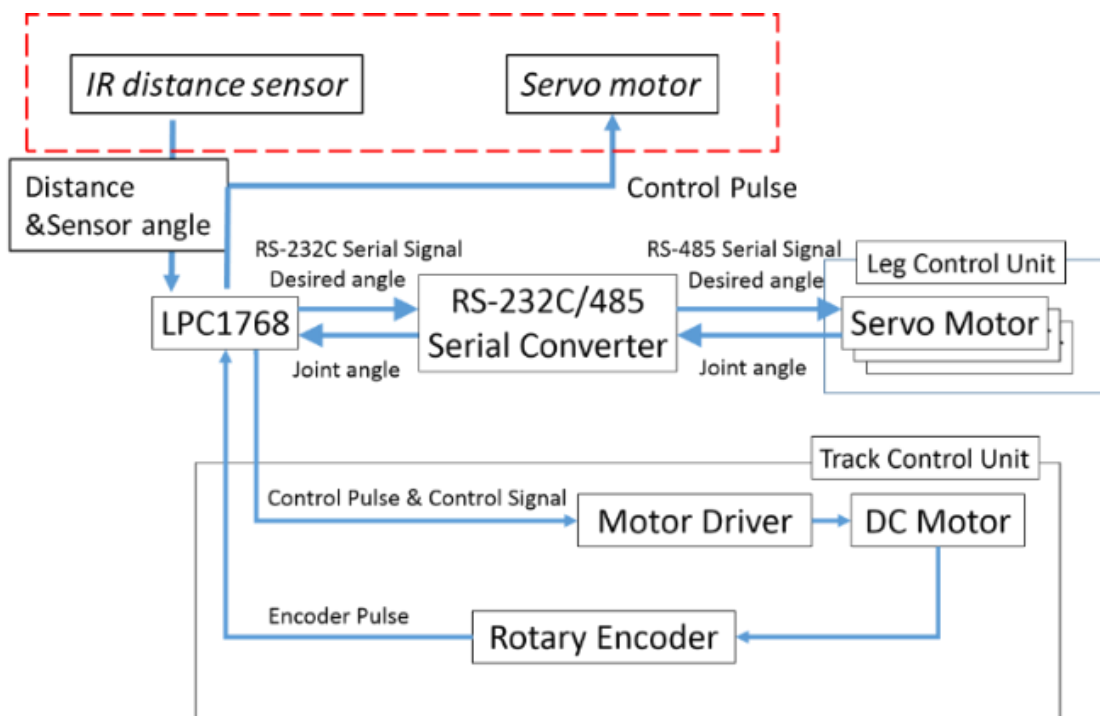


Fig. 4 システム構成

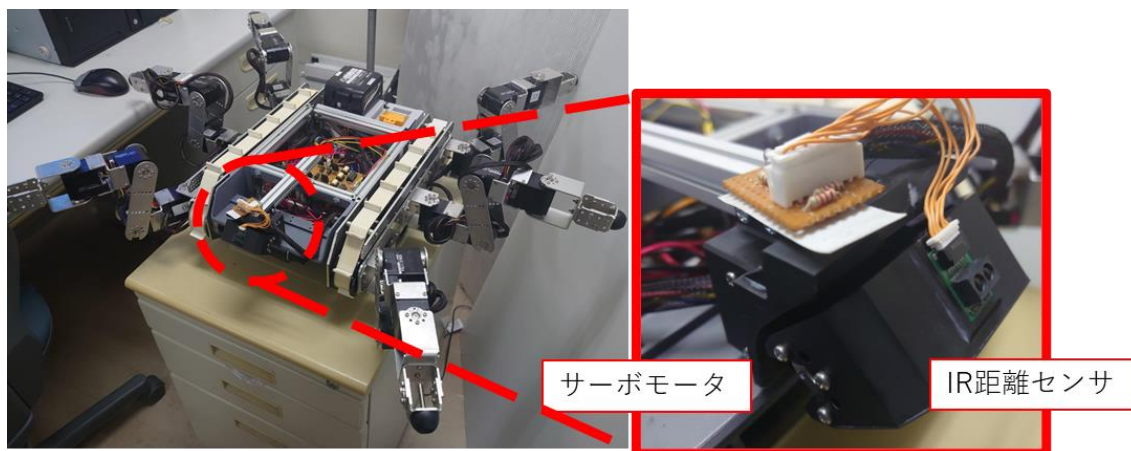


Fig. 5 測距システム

また、Fig. 4 に搭載したシステム構成を示す。メイン制御部に「mbed LPC1768」を搭載し、そこから脚部、クローラに対し速度命令や関節角を各種モータ制御部へ送る。Track Control Unit へは回転方向と速度指令を送信してモータ出力を行い、モータの回転速度をロータリエンコーダにより取得する。Leg Control

Unit へは RS-232C 規格の UART 通信により角度指示を脚部のサーボモータへ送る。また、1次元の赤外線測距センサをモータ回転軸に装着して構成され、機体下部前方に搭載されている。センサには SHARP 製「GP2Y0E03」を用い、モータには近藤科学製の「B3M-SC-1170-A」を使用した。この回転角度をメイン CPU 「mbed LPC1768」により制御し、各角度の距離を測距センサから取得することで、前方の路面の 2次元距離情報を検出できる。

以上の構成により、従来型と同様の動作に加え脚とクローラのハイブリッド動作による作業しながらの移動が可能になる。例えば Fig. 6 のようにクローラのみでは移動が困難な急な段差を脚で補助して支持しながら安定して移動するとともに対象物を運搬することができる。また、Fig. 7 のようにクローラ移動だけでは越えることができない大きな溝を、脚の補助により移動するとともに対象物を運搬することができる。

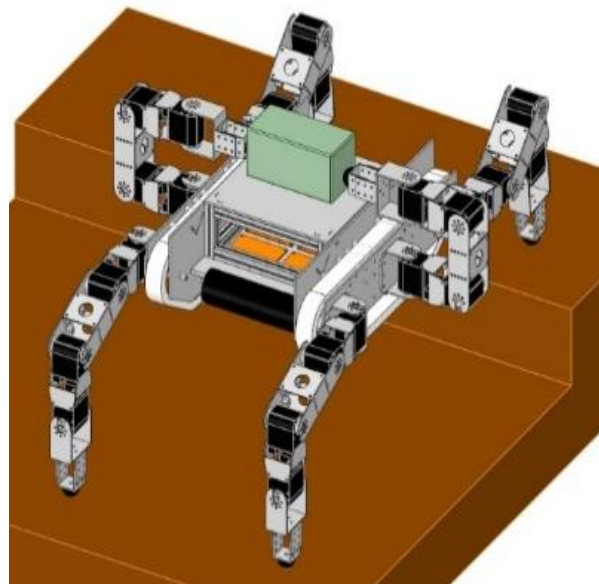


Fig. 6 段差移動運搬

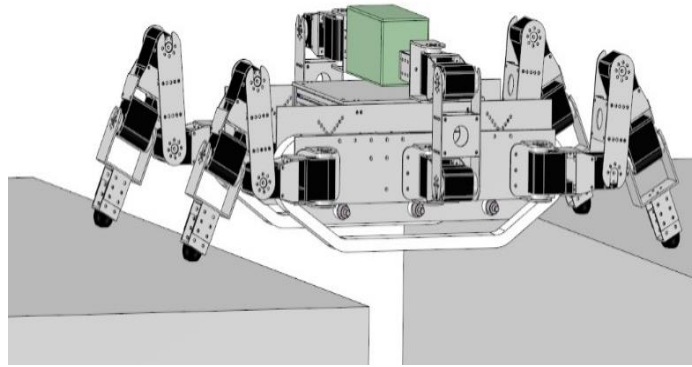


Fig. 7 溝乗り越え運搬

2.4 基本動作試験

完成した機体のクローラ走行と 6 脚静歩行を行った。今回は基本動作を検証するため平坦な床の室内で実験した。

2.4.1 6 脚による静歩行

トライポッド歩容による静歩行での直進実験を行った。その結果を Fig. 8 に示す。図中 1~3 はそれぞれ歩行距離が 0[m]、1[m]、2[m]の時の状態である。2[m]の距離を歩幅 200[mm]で、1.7[cm/sec]の速度で安定して歩行することができた。



Fig. 8 脚歩行実験

2.4.2 クローラによる不整地登坂

不整地での走破性を確認するため、板の上に木材を重ねて不整地を作成し、それを傾けた坂をクローラ駆動により登坂させた。その結果を Fig. 9 に示す。図中 1~3 はそれぞれ、登坂開始時、0.3[m]移動時、登坂完了時を示している。傾斜 10[deg], 距離約 1[m]の不整地登坂を確認した。



Fig. 9 不整地登坂実験

3章.

前中脚間の対象物持ち替え

3.1 研究背景と目的

近年、災害現場で活動を行うロボットへの期待が高まっており、それらのロボットには高い作業能力と移動能力が求められる。筆者らは前章で述べた通り、クローラによる移動機構を機体胴体部に備え、作業腕として使用可能な4自由度の脚を機体側面にそれぞれ3個装着した「6脚クローラ型不整地移動ロボット」を開発した[2-1]。本章以降では脚とクローラ移動機構の両方を使用するハイブリッド作業・移動について検討する。特にこのロボットで典型的な作業となる運搬を行う場合、移動補助にあまり使用しない中脚にて運搬物の保持を行うのだが、ロボットは最初に地上の対象物を前脚で持ち上げ、それを中脚に持ち替える必要がある。先行研究ではその点は考慮していなかった。そこで本章ではこの対象物を前脚から中脚に持ち替える「対象物持ち替え動作」について検討する。また、MATLABを用いてロボット手先の可操作領域を解析し、その分布から得られた手先軌道よりシミュレーションを行い、本動作が可能であることを明らかにする。

3.2 脚先の可操作度を用いた脚先軌道の生成

本研究で検討する対象物持ち替え動作の概要を Fig. 10 に示す。対象物は均質な箱と仮定する。図中の数字は動作順を表し、対象物上の点は重心を表している。ロボットが対象物に接近し(図中①)、対象物を前脚手先で把持する(図中②)。この時前脚で把持する対象物の高さはこの後に中脚で対象物重心位置を把持する際に脚同士が接触しないような位置になるように把持を行う。その後、前脚にて対象物を持ち上げる(図中③)。そして中脚での持ち替えが可能となる位置まで対象物を水平移動させ(図中④)、中脚手先で対象物の重心を把持する(図中⑤)。最後に前脚手先を対象物から離して、中脚のみで対象物を保持し(図中⑥)、持ち替えを完了する。

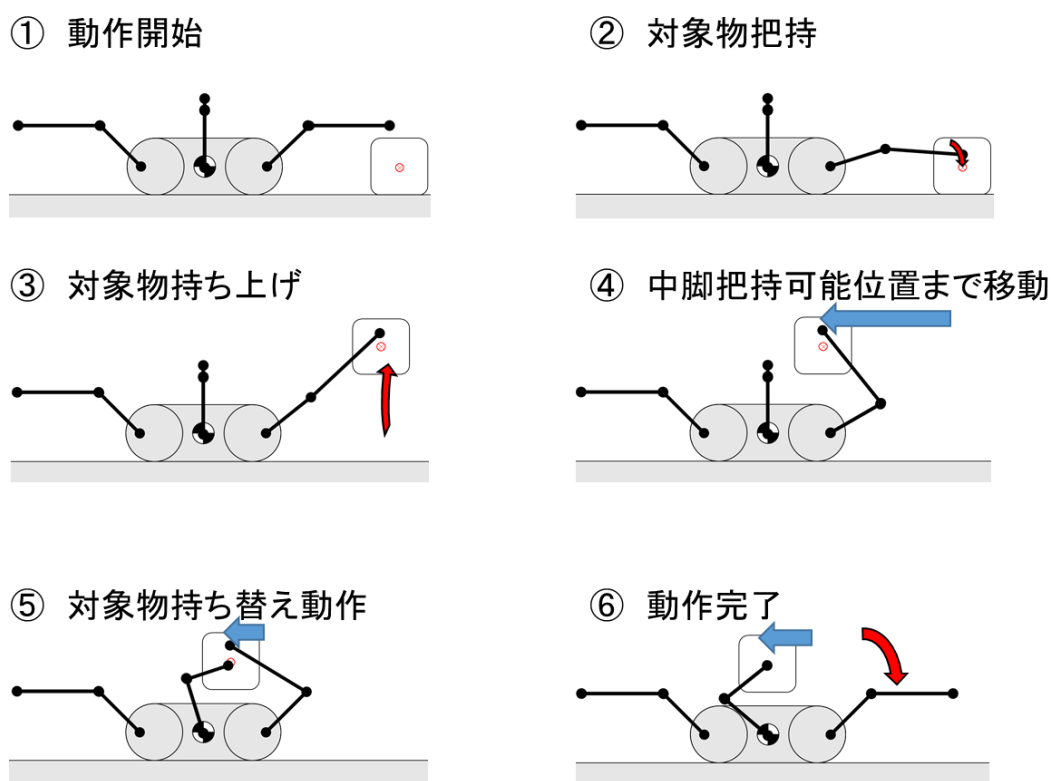


Fig. 10 対象物持ち上げ持ち替え概要

この動作を行わせるため、3次元空間中における手先の可操作度を求め、可操作領域を解析する。Fig. 11 中に示した座標系で考える。本動作中、左右脚は左右対称に動作をし、手先の姿勢は常にY軸に平行となるものとする。手先の目標位置・姿勢の一般化座標ベクトル $\mathbf{q} = [q_x, q_y, q_z, T_x, T_y, T_z]^T$ における各関節角ベクトル $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$ を逆運動学の数値解を計算することで求める。ここで、 q_x, q_y, q_z は手先位置の x, y, z 軸方向成分である。 T_x, T_y, T_z は手先姿勢の z, x, y 軸周りのオイラー角であるが、上述の仮定に従い。 $T_z = \pi[\text{rad}], T_x = 0[\text{rad}], T_y = 0[\text{rad}]$ と固定される。なお、脚先の初期状態では $T_x = L_b + L_1 + L_2 + L_3, T_y = L_4 - L_0, T_z = c_H$ である。 L_b は機体中心から前脚ベース位置までの距離[mm]である。また、 L_0, L_1, L_2, L_3, L_4 は脚リンクのそれぞれの長さであり、それぞれ85[mm]、97.5[mm]、85[mm]、100[mm]である。そして、 c_H は脚ベースの高さである。

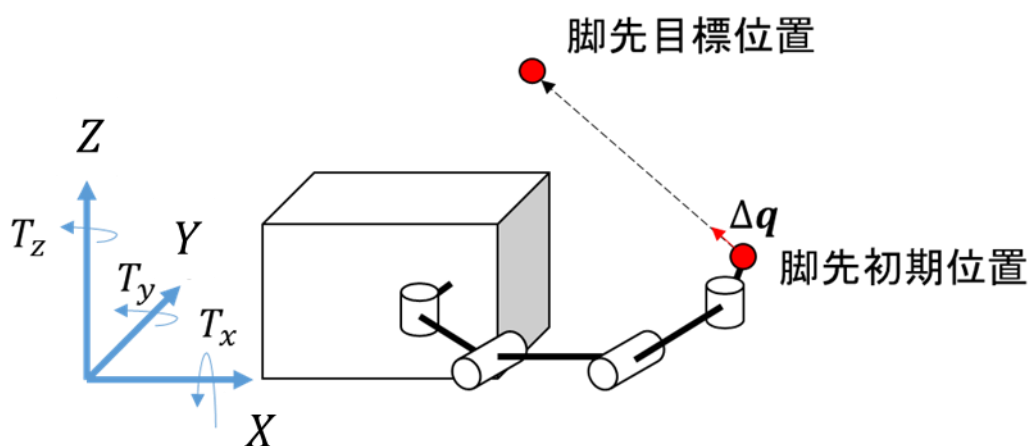


Fig. 11 対象物持ち上げ時の前脚先動作モデル

θ を求める手順は以下の通りである。手先が現在の状態から目標位置に向かうよう微小状態変化量 Δq を与える。ただし、姿勢についてはz軸周りのみ変化するとして ΔT_x 、 Δq_y は0とする。そこで Δq の上2行目と4行目を除いた4行の成分のみ考え、それを Δq_4 とすると、現在の関節角から得られるヤコビ行列 J を用いて

$$\Delta q_4 = J\Delta\theta$$

により各関節角の微小変化 $\Delta\theta$ を求めることができる。そして現在の関節角度を更新する。これを手先位置が q_x 、 q_y 、 q_z に収束するまで繰り返し、目標の θ を得る。収束しない場合はその位置に到達できないことを意味する。

同様に対象物持ち替え時の動作モデルを Fig. 12 に示す。持ち替え軌道は水平に移動するものとして Δq_y 、 Δq_z を0として同様の計算を行い、持ち替え軌道を生成すればよい。

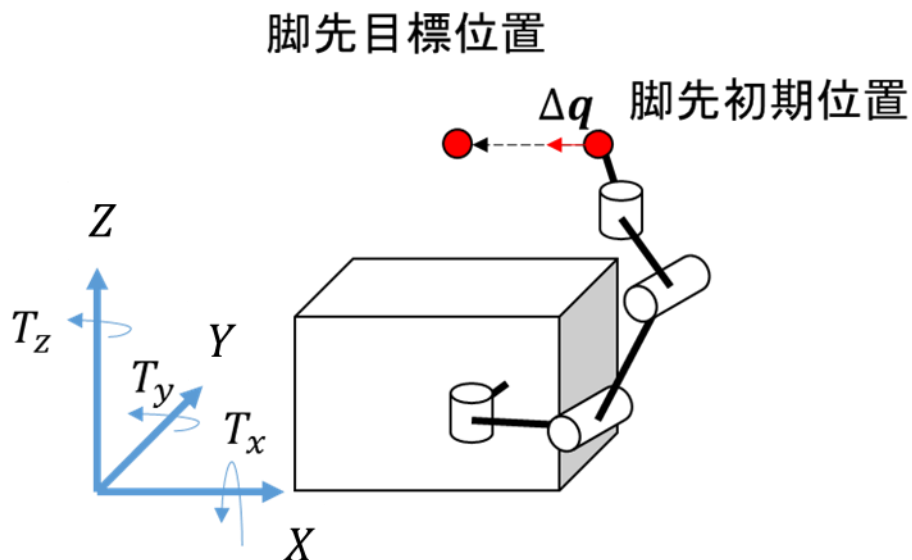


Fig. 12 対象物持ち替え時の前脚先動作モデル

手先が目標位置に到達できるとき、最終的に得られた θ におけるヤコビ行列を用いて手先の可操作度 V が

$$V = \sqrt{\det(JJ^T)}$$

により求められる。この可操作度と共に手先の可操作領域が得られるので、前脚と中脚での持ち替えが可能な手先軌道を抽出できる。

また、対象物水平移動時の前脚の q_z 値を q_{zf} 、中脚の q_z 値を q_{zm} とすると、持ち替えが可能な対象物の高さ h_0 は

$$2(q_{zf} - q_{zm} + l_m) \geq h_0$$

を満たす必要がある。 l_m は対象物の上端から前脚の手先位置までの最小距離である。また、前・中脚間の脚の干渉も考慮する必要があり、本ロボットでは $q_{zf} - q_{zm} \geq 65[\text{mm}]$ を満たすことが必要となる。これらの条件を満足する前脚と中脚の軌道が存在すれば、 q_x 値が重なる領域で対象物の持ち替えが可能となる。

実際に脚先可操作度を求めるフローチャートを Fig. 13 に示す。はじめに手先位置範囲 $[x_{max}, z_{max}]^T$ と $[x_{min}, z_{min}]^T$ を定める。ここでは機体の機構的条件から

$$\begin{bmatrix} x_{min} \\ z_{min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 250 \\ 140 \end{bmatrix} [\text{mm}], \begin{bmatrix} x_{max} \\ z_{max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 450 \\ 320 \end{bmatrix} [\text{mm}]$$

である。次に、対象物サイズの上限高さ H_{objmax} と下限長さ L_{objmin} をそれぞれ400,50[mm]とした。この値を超えないような対象物サイズを把持対象として解析するものとしその初期サイズを $[H_R, L_R]^T = [150, 400]^T$ として与えた。最後に解析時の手先位置を $[x_o + x_{inc}, mgn_{min} + mgn_{inc}, z_o + z_{inc}]^T$ のように与える。この時 mgn_{min} とは左右脚先間の最小距離とし、ロボットアームが機体に干渉せずに対象物を把持可能になる幅である70[mm]とした。また各座標の増加分 $x_{inc}, z_{inc}, mgn_{inc}$ を10[mm]とした。この x_o, z_o は解析を行う時の脚先 x, z 位置の初期値を示している。

はじめに前脚で対象物を持ち上げるための軌道があるかを逆運動学計算で求める。この際に手先位置の逆運動学計算の解が得られない場合、もしくは求めた軌道の到達する高さが

$$H_R + H_{mgn} + z_0 \leq z$$

を満たしていない場合は、その軌道では対象物持ち替えが不可能であると判断できる。満たした場合は、その軌道を *trajDataTable* に保存する。その後、手先初期 x 位置 x_0 を x_{mgn} 増加させて再度軌道計算を行う。もしも x_0 が最大値 x_{max} に到達したら、手先初期 z 位置 z_0 を z_{mgn} 増加させ、再度 x_0 を x_{min} に戻して計算を行う。

そしてすべての前脚持ち上げ、持ち替え軌跡を算出したら、次に中脚にて持ち替えが可能な軌道の計算を行う。前脚にて最後に到達した最後の高さ z_{end} に対して mgn 分下げた位置に到達可能な中脚先位置を逆運動学計算により求める。

この時、前脚にて把持する位置で持ち替えが可能か判断する場合は、持ち上げを行った軌跡の最後の高さ z_{end} が

$$z_{end} = H_R + H_{mgn} + mgn + \frac{1}{2}h$$

が満たすと同時に、この位置で対象物を把持した場合に機体と接触するかで判断することができる。そしてこの計算を対象物サイズを増加させながら繰り返すことにより、持ち替え可能な軌跡とその時の対象物のサイズを得ることができる。

手先位置範囲 $\begin{bmatrix} x_{min} = 250 \\ z_{min} = 140 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_{max} = 450 \\ z_{max} = 320 \end{bmatrix}$ 、機体と対象物間マージン $H_{mgn} = 10, L_{mgn} = 10$ 、カウント変数 i, j
 機体サイズ設定 $H_R = 150, L_R = 400$ 、対象物サイズの下限設定 $L_{objmin} = 50$ 、対象物サイズの上限設定 $H_{objmax} = 400$
 脚間マージン範囲 $mgn_{min}(= 70) \leq mgn \leq mgn_{max}$ 、手先初期位置と脚間マージンの増加分 $x_{inc} = z_{inc} = mgn_{inc} = 10$

手先初期位置設定 & マージン最小値設定
 $x_0 = x_{min}, z_0 = z_{min}, mgn = mgn_{min}$

カウントアップ変数初期化 $j = 1$ 、手先初期位置設定 $q_0 = [x_0, z_0]^T$ 、 $H_{objmin} = z_0, H_{objmax} = 2 * (z_0 - mgn)$
 仮対象物サイズ $H_{obj} = H_{objmin}, L_{obj} = L_{objmin}$ 、手先目標位置設定 $q_{ref} = [x_0, z_{ref} = (H_{objmax} + H_{mgn} + H_R)]^T$

Function前脚対象物持ち上げ軌道の全ステップ計算・軌道算出

FAIL?

最低目標Z位置
 $H_R + H_{mgn} + z_0 \leq z$
 に手先が到達しているか

軌道保存 & カウントアップ
 $trajData$ 作成 $trajDataTable[j] = trajData$
 $j = j + 1$

カウントリセット & 構造体サイズ取得
 $j = 1$ & $Datalength = Length(trajDataTable)$

構造体読み込み
 $trajData = trajDataTable(j)$

対象物サイズ & 初期手先位置読み込み
 $H_{objmin} = trajData.H_{objmin}$
 $H_{objmax} = trajData.H_{objmax}$
 $L_{objmin} = trajData.L_{objmin}$

(仮)対象物高さ範囲 & 初期値設定
 $k = 0, H_{objmin} \leq h \leq H_{objmax}, h = H_{objmin}$

$x_0 \leq x_{max}$

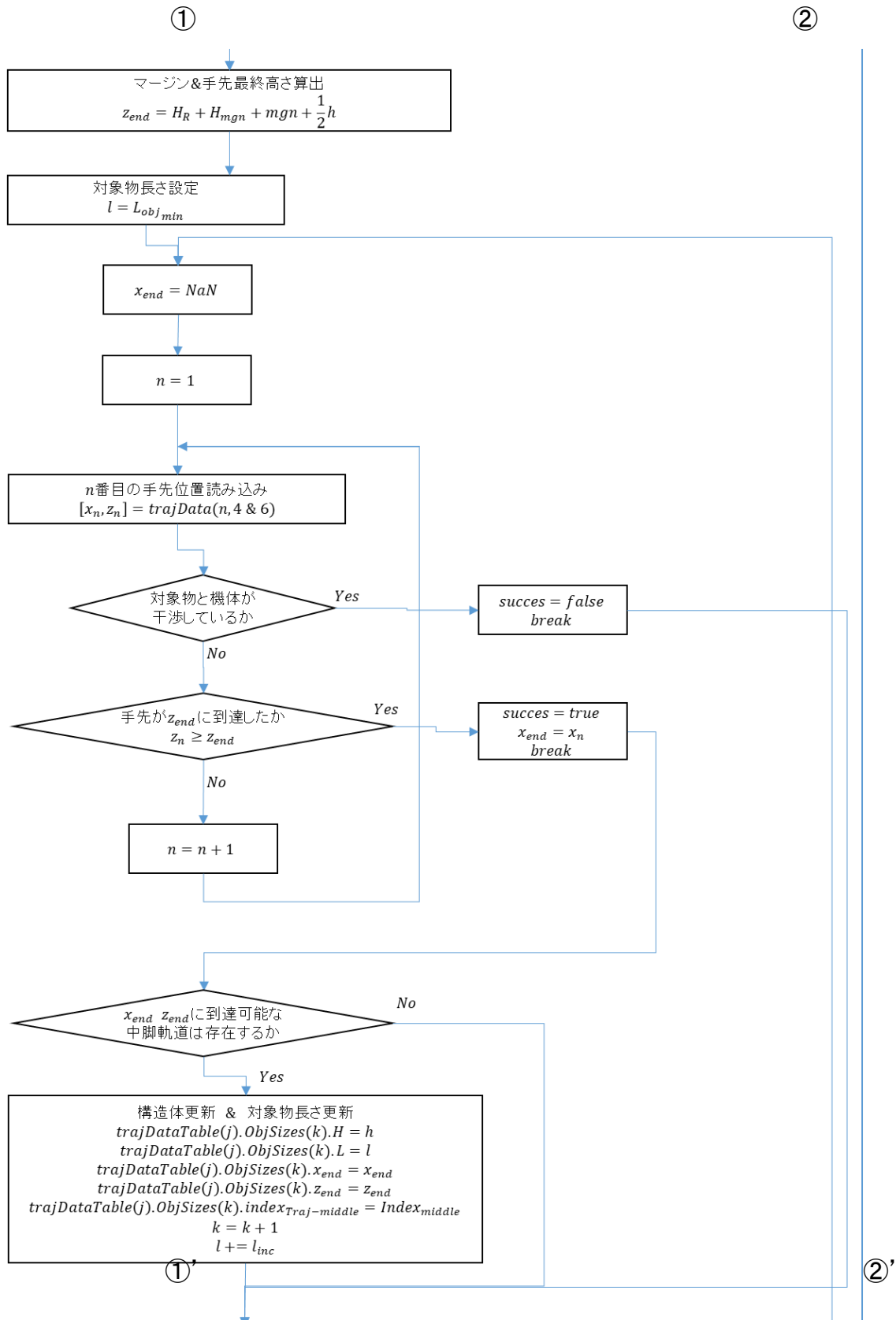
$z_0 \leq z_{max}$

$x_0 = x_{min}, z_0 = z_0 + z_{inc}$

$x_0 = x_0 + x_{inc}$

①

②



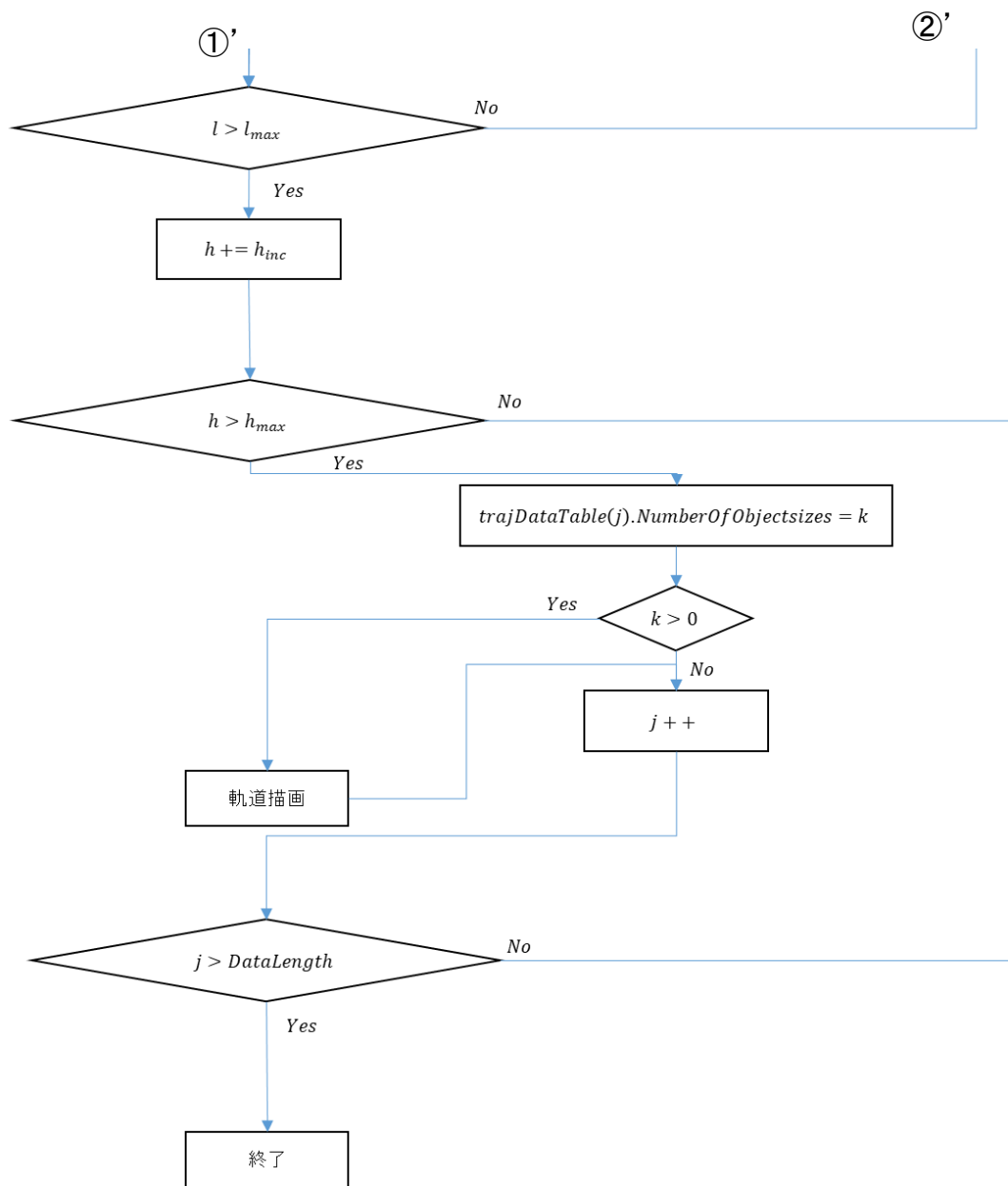


Fig. 13 脚先可操作度の導出フローチャート

この手法で可操作領域を求めた結果を Fig. 14 と Fig. 15 に示す。前・中脚それぞれの手先の可操作位置がプロットされている。各点の色は手先の可操作度 V を表している。

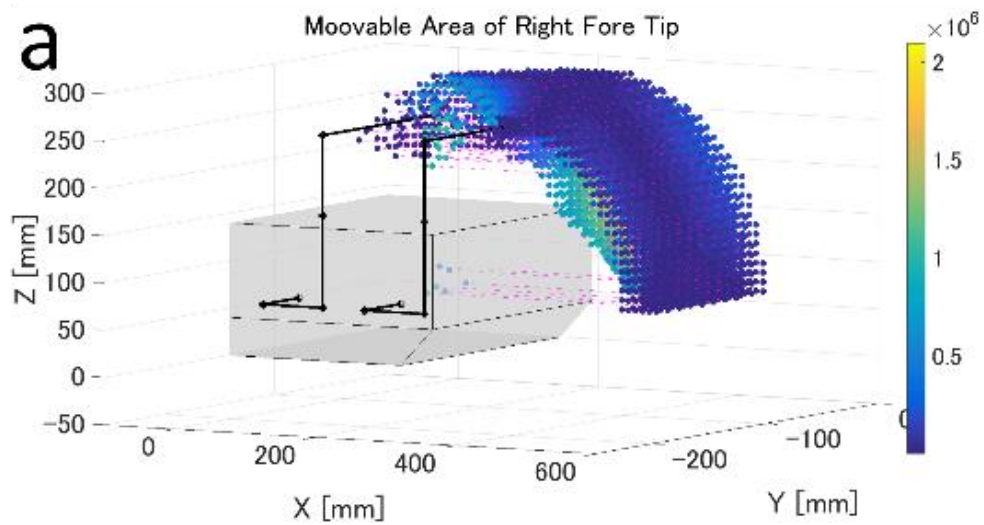


Fig. 14 前脚の可操作領域

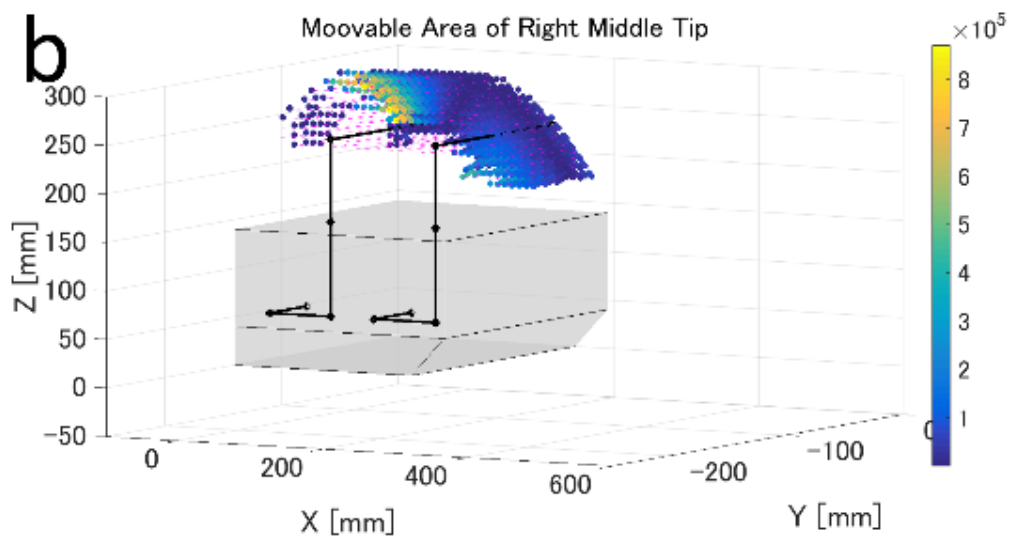


Fig. 15 中脚の可操作領域

Fig. 14 と Fig. 15 の可操作領域から持ち替え可能な前・中脚の手先軌道を以下の方法により求める。まず、手先動作に基づき、同一のY値をとる各脚の直線を抽出する。ただし、持ち替えを行うためには中脚と前脚のX値が重なっていることが必要になる。また中脚の手先軌道の終端が中脚のベースの位置より後方となることも必要となる。これらの条件を満たすものが持ち替えの手先軌道となる。Fig. 16 にその結果を示す。図中の赤線が前脚先軌跡であり、青線が中脚先の軌跡を表している。この結果にて、前脚は持ち上げ持ち替えまでの軌跡を示しており、中脚は持ち替え軌跡である。それぞれで複数の結果を抽出できていることが確認できる。この結果よりさらに前中脚間の持ち替え軌跡の抽出を行う。その結果を Fig. 17 に示す。この結果から得られた軌道のうち、3通りのY値のものを示している。上側が前脚、下側が中脚の軌道である。それぞれX値の重なる領域を面で連結しており、この範囲内で把持手先を切り替えることができる。

また、得られた手先軌道から操作できる対象物のサイズがわかる。対象物の幅は手先軌道のY値から決まり、Fig. 17 の結果では164~204[mm]となることがわかる。対象物の高さは、前脚と中脚の軌道のZ値の差から決まるが、動作中に対象物が機体上部と接触しないようにすることも考慮する必要がある。Fig. 17 の結果では、前脚先のZ値が $q_{zf} = 300[\text{mm}]$ 、中脚先のZ値が $q_{zm} = 250[\text{mm}]$ であり、 $l_m = 0$ として、持ち上げ高さを25[mm]とすると、機体上面のZ値が150[mm]のため、操作可能な高さは100~150[mm]となる。

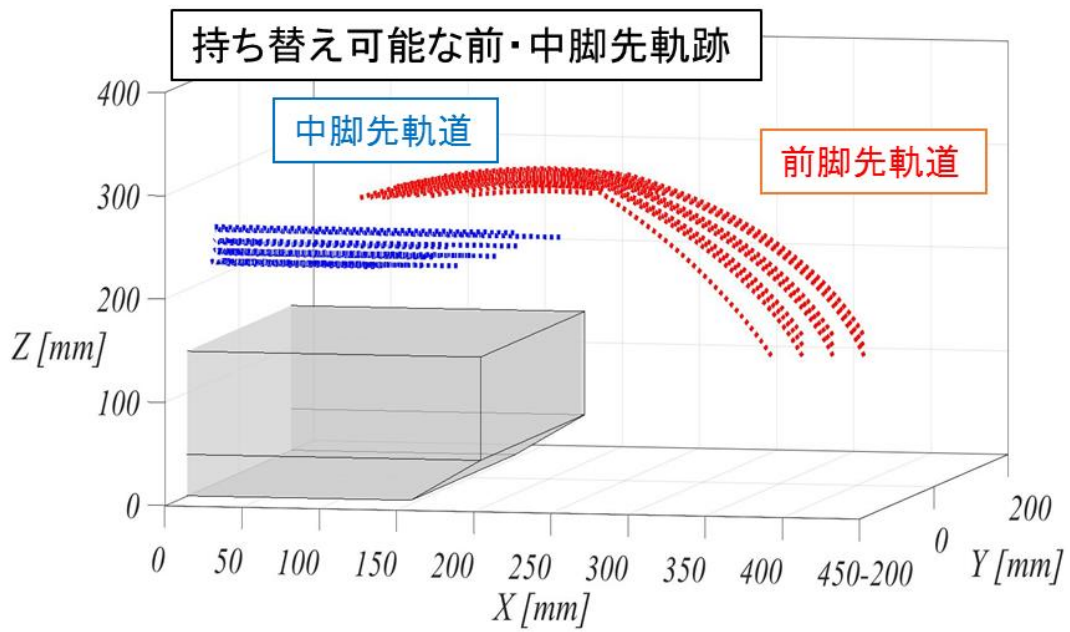


Fig. 16 前脚中脚にて可能な脚先軌道

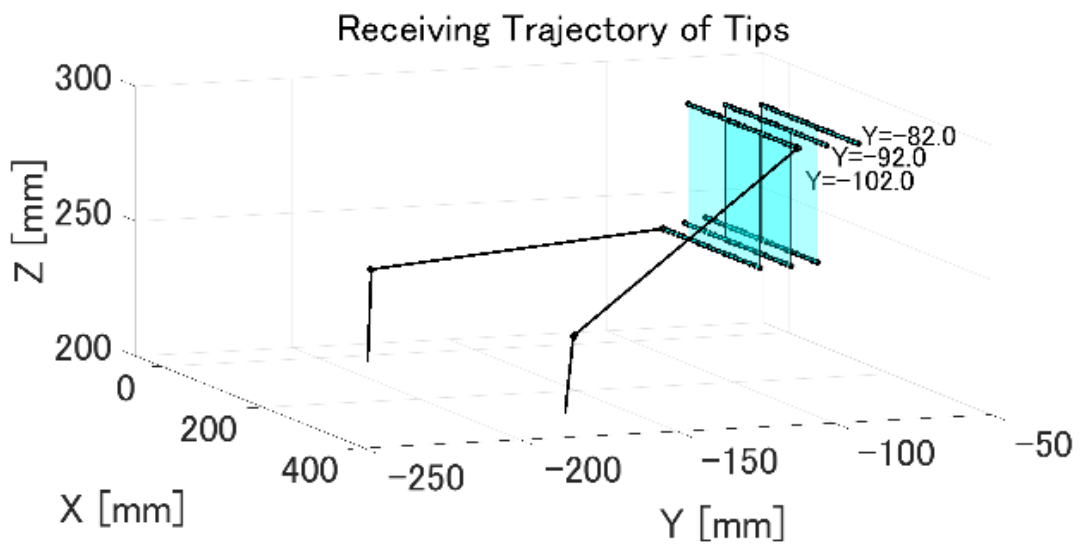


Fig. 17 前脚中脚間の対象物持ち替え時の脚先軌道

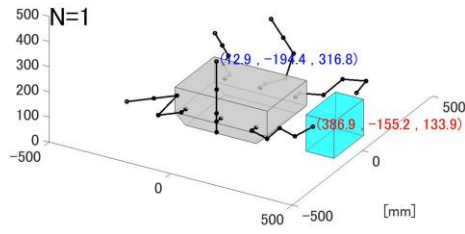
3.3 対象物持ち上げ持ち替えシミュレーション

前節で得られた軌跡により可能な動作を求めた。Fig. 18は高さ145[mm]、幅210[mm]、長さ115[mm]の直方体形状の対象物がロボットに対して(386,0,72.5)[mm]の位置にあるときの動作シミュレーション結果を示す。図中の各番号はFig. 10中の番号と対応している。各図中の赤字と青字の座標値はそれぞれ右前・中脚の手先位置を示す。また、各図中のNは動作のステップ数を表している。N=1より手先を対象物に接近させ、(Fig. 18.①)、N=101で対象物の把持を行う(②)。N=102~301で対象物を持ち上げ(③)、N=302~434で対象物を水平移動させている(④)。そしてN=453で持ち替えを行い、中脚にて把持して前脚手先を対象物から離す(⑤)。N=454~567で中脚のみにより対象物を胴体中心直上まで水平移動させる(⑥)。

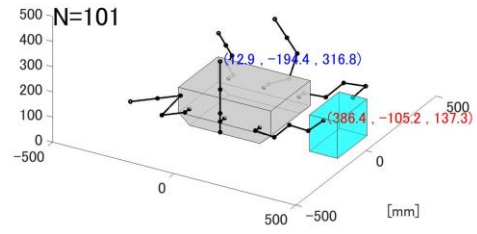
Fig. 19に動作時の右前・中脚の手先位置を示す。この結果から、計画通りの手先軌道を実現できることが確認できる。次にFig. 20とFig. 21にこの動作時の前・中脚の手先姿勢と各関節角を示す。Fig. 20.④の状態では前脚ロール角(q_θ)が大きく変化しているが、これは値を $-\pi \sim \pi$ の範囲で表示しているためであり、これらの結果から手先姿勢と各関節角度が滑らかに変化していることがわかる。なお、 $l_m = 7.5[mm]$ とし、対象物水平移動時の各手先位置は $q_{zf} = 300[mm]$ 、 $q_{zm} = 235[mm]$ となっている。また、Fig. 20.②~③の間は $\Delta q_\theta = 0$ の条件を与えたが、 q_θ が一定となっていない。これは得られた各関節角より順運動学を計算した際に生じた誤差のためである。

本シミュレーション結果から、対象物持ち替え動作が可能であることがわかる。

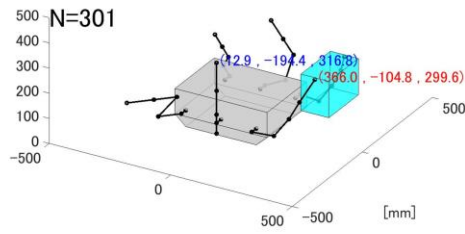
①



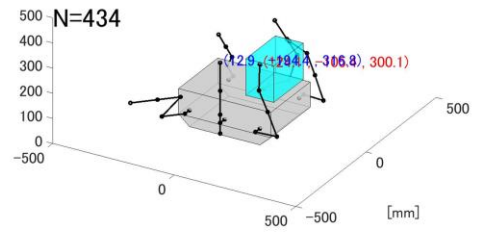
②



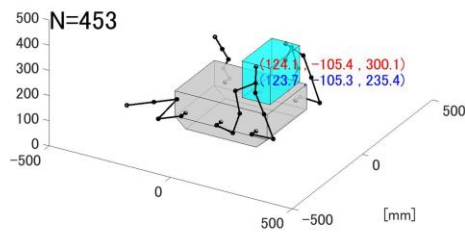
③



④



⑤



⑥

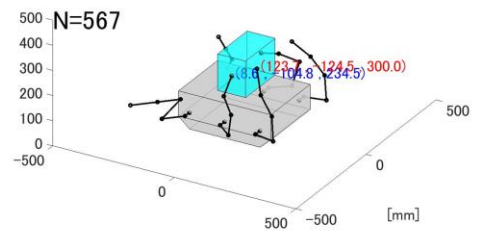


Fig. 18 対象物持ち上げ持ち替えのシミュレーション結果

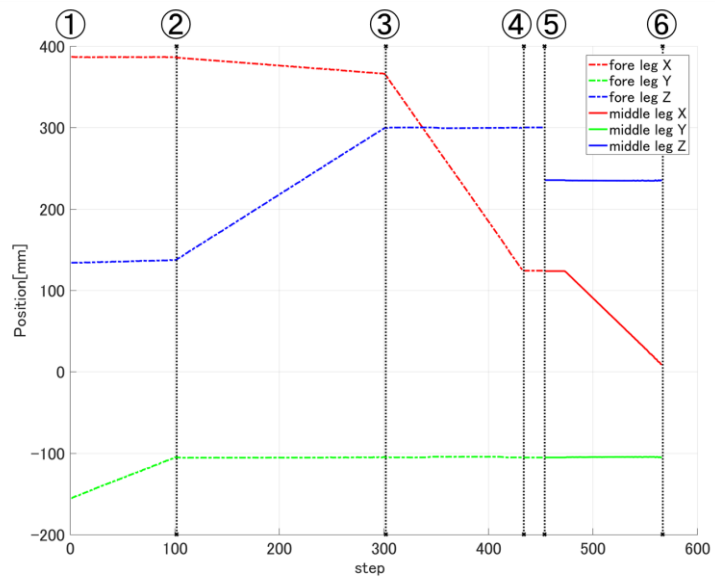


Fig. 19 持ち上げ持ち替え中の手先位置

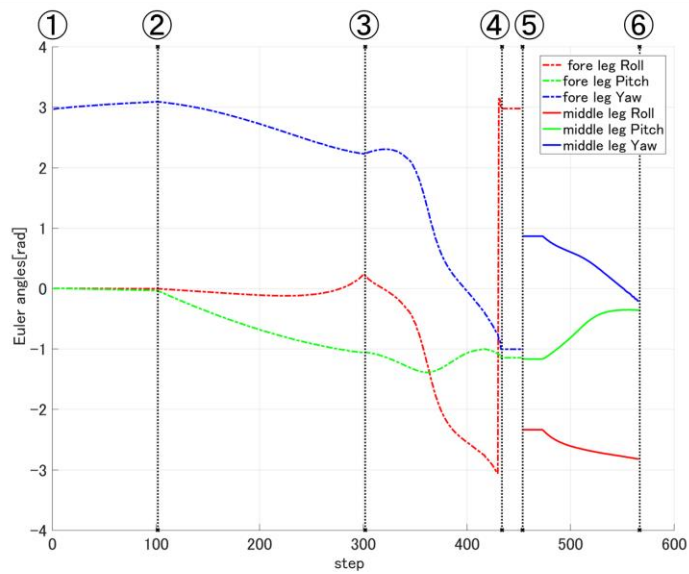


Fig. 20 持ち上げ持ち替え中の手先姿勢

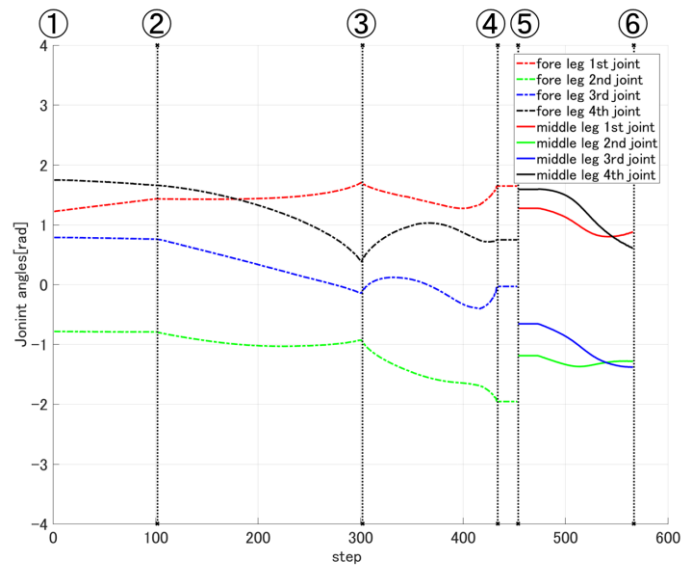


Fig. 21 持ち上げ持ち替え中の関節角度

3.4 対象物持ち上げ持ち替え実験

平坦な床上に置かれた対象物を前脚で把持持ち上げ、中脚に持ち替えて胴体中央上に運ぶ実験を行った。3.3 で示したシミュレーションと同様、対象物は高さ 145[mm]、幅 210[mm]、長さ 115[mm]、質量 0.12[kg]の箱とし、ロボットに対して [386,0,72.5][mm]の位置に置いた。Fig. 22 に実験結果を示す。図中の各番号は Fig. 10 の番号と対応している。Fig. 22.①で手先を対象物に接近させ、前脚で対象物を把持し(②)、持ち上げた(③)。そして中脚で持ち替え可能な位置まで水平移動した後(④)に中脚で対象物を把持し(⑤)、最後に中脚のみで対象物を保持(⑥)した。この実験では1ステップの時間を20[msec]とし、本動作は約11.3[sec]で完了した。この結果、対象物の姿勢を保持しながらの対象物持ち替え動作を確認することができた。

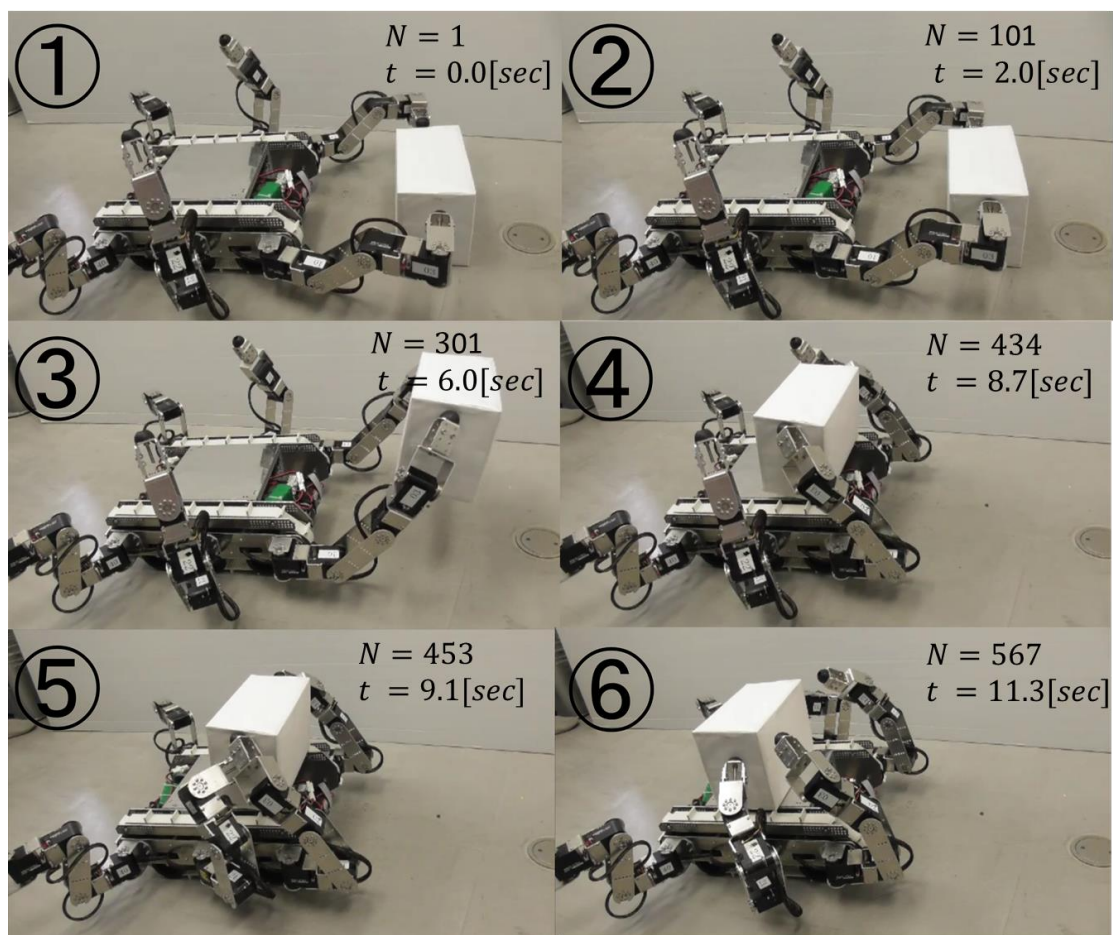


Fig. 22 対象物持ち上げ持ち替え実験

4章.

段差溝乗り越え運搬動作

4.1 研究背景と目的

2章で述べた通り、著者らは6脚を有するクローラ型不整地移動ロボット(Fig. 1)を開発した[4-1]。これは、6脚を用いた歩行とクローラ走行による移動を選択可能である。また脚機構は4自由度の機構を有し作業腕としても使用可能となる。さらに、クローラ走行中に脚機構による補助を行うことで、移動しながらの作業や、移動の補助なども行うことが可能となる。

本章では対象物運搬時の不整地移動として、クローラ機構のみでは走破が不可能な段差のある大きな溝を脚支持による移動補助を同時に行って走破を完了するハイブリッド動作の「段差溝乗り越え運搬」について考える。この一連の動作モデルを作成し、動作時の機体本体と脚先位置の関係から動作可能な溝の幅、段差高さを算出する。また、静力学動作モデルについても検討し、シミュレーションにより動作時の脚先反力から動作時の脚関節トルクを求め、動作が可能であるかを検証する。そして、動作の自律化のためにサーボモータに赤外線距離センサを装着した測距システムを開発した。そのシステムによりロボット前方の距離情報から溝幅および段差高を検出する手法について提案し、その実証を行う。最終的に一連の動作を実機実験により確認し、実動作時の評価を行う。

4.2 従来研究

ロボットの不整地走破性について、クローラ機構と作業腕やサブクローラ機構を有し、それらを連動して移動することで移動性能を向上させるハイブリッド移動に関する研究は複数存在する。例えば、フリッパを使用して通常のクローラ機構のみでは難しい急な坂や段差の不整地を走破することができるロボットが開発されている[4-2][4-3][4-4]。だが、それらにおいて、溝や段差を複合した地形を走破するものについては検証されていない。本稿では脚の補助とクローラ移動によるハイブリッド移動と脚をアームとして使用した作業の複合動作である段差溝運搬について動作モデルを提案する。このモデルにより同様の構成を有するロボットの不整地移動性能の向上が期待できる。また、脚とアームを持つクローラロボットの有効性についても評価できると考えられる。

不整地での運搬作業について、脚歩行ロボットにより 2 脚を作業腕として使用しながら残りの 4 脚歩行により運搬する方法がある[4-5]。また、クローラ型不整地移動ロボットでは作業腕を用いて対象物を把持しながらクローラにて移動を行う方法がある[4-6]。本稿で示す動作はこれらと同様に対象物を 2 腕により把持して運搬を行う。また、作業開始時からの動作を考え、路面上の対象物を前脚で持ち上げ、その後の移動のためにそれを中脚に持ち替えて把持を行う複合動作を検討する。

自律移動ロボットのための環境認識について、主に IMU や光センサを用いた手法が多く挙げられる。例えば、複数カメラの画像の特徴点からステレオ視を用いて 3 次元マップを生成し、ナビゲーションを実行する方法がある[4-7][4-8]。しかし、画像セットの特徴点を抽出する計算コストが高いことと、Depth Sensor や LRF と比較して誤差が大きくなる傾向があることが問題になる。また、Depth Image sensor などによる point cloud を使用した距離データに基づく 3 次元マ

マップ生成とナビゲーションでは[4-9][4-10]、センサから直接 point cloud のデータを出力できるため任意の点の距離データを容易に取得できる。しかし、取得した point cloud のデータを処理する場合に計算コストが大きくなるため、大きな演算能力を持つ CPU を導入する必要がある。また、LRF によりセンサ軸回りの距離データから 2 次元マップを生成する方法がある[4-11][4-12]。この手法の場合、LRF をロボットアームの先に搭載し回転させることにより、より広範囲のマッピングが可能となるという利点がある。そのため、屋外作業用ロボットや地形探索を行うロボットの多くには LRF が使用されている。だが、導入コストの面では Depth sensor とあまり変わりはない。

一方、本研究で提案する手法では、距離が近い路面の情報を得る必要があり、近距離を計測可能で一定の範囲を測定するような測距方法が最適である。そのため近距離測定可能な IR 距離センサをサーボモータに装着した測距システムを開発しロボットに搭載した。本システムは LRF の構造に似ているが、他の環境認識の方法と比較して開発、計算コストともに大幅に小さくすることができる。また、距離や形状、目的に応じてセンサ分解能を適切に調整できるため、効率良く検出することができ、誤差の影響を少なくできる。そのため、本研究では近接覚距離センサを用いて溝と段差の検出を行う。

4.3 段差溝乗り越え運搬動作

4.3.1 動作概要

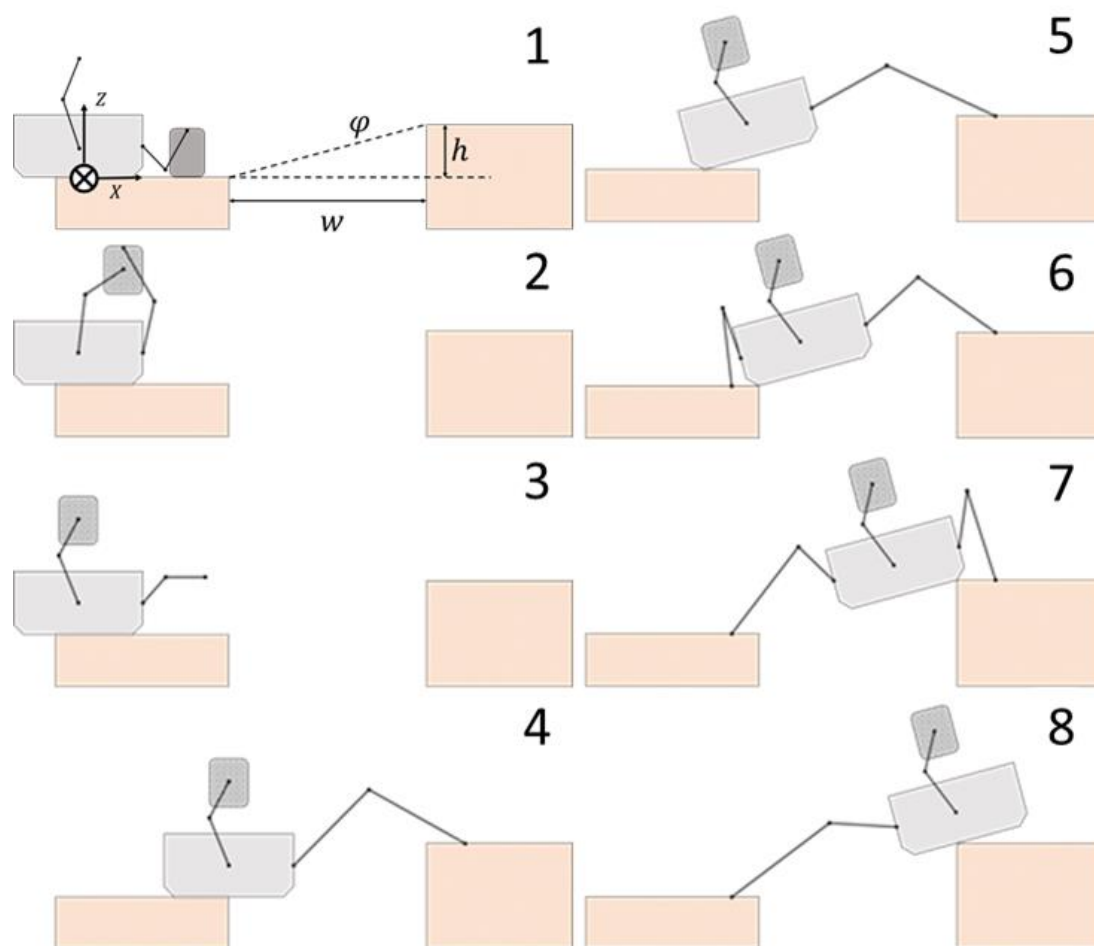


Fig. 23 段差溝乗り越え運搬の動作概要

Fig. 23 に動作概要を示す。簡略化のため XZ 平面のみを考え、路面は水平であるものとする。運搬対象物は軽量の箱状とし、作業腕との間の摩擦は考慮せず十分に把持できるものとする。また、対象物を機体重心のやや直上の位置で把持するとし、移動中のロボット重心位置が機体中心位置から移動しないものとする。図中番号は動作順を示しておりロボットは図中左から右に移動し段差

を上る動作を示している。この動作を逆順に行うことで段差溝を下り、対象物を置く動作になる。動作が始まる前にロボットはオペレータ指示により、移動を行って対象物と段差溝がある地形に到達したものとする。

はじめに対象物を前脚で把持して持ち上げ、中脚に持ち替える Fig. 23 中 1～3)。ロボットは最終的に中脚で対象物の中心を把持するために、中脚と持ち替えを行う際に手先同士が干渉しない位置で把持する(Fig. 23 中 1)。その後、対象物を機体に干渉しない高さまで持ち上げ、中脚で持ち替え可能になる位置まで水平移動する。そして、中脚で対象物中心位置を把持して前脚と中脚で対象物を把持し(Fig. 23 中 2)。そして、前脚を離して中脚のみで対象物を機体中央直上まで水平移動を行う。これにより対象物持ち上げ、持ち替えが完了し、走行を再開する(Fig. 23 中 3)。

その後、ロボットが運搬走行しているとクローラのみでは乗り越えられない溝と段差に到達する(Fig. 23 中 4)。このときから段差溝運搬動作を開始する。最初に機体重心が溝に到達する直前に前 2 脚の脚先を対岸に接地し機体を支持する(Fig. 23 中 5)。この状態を「前脚補助支持期」と呼ぶ。そして段差を乗り越えるために機体姿勢が手前側の溝縁と奥側の溝縁とのなす角度 φ になるように機体を傾けクローラ移動する。その後、クローラ後端が溝に達する直前に後脚を路面に接地し、前後 4 脚で支持する(Fig. 23 中 6)。この時から「4 脚支持期」の状態となり、クローラ駆動を行わず 4 脚で支持して姿勢角 φ を保ちながら機体を前方に移動する(Fig. 23 中 7)。

そしてクローラ前端が奥側の溝縁に達したら、前脚にて機体を支持する必要がなくなるため、前脚先を路面から離し後脚で補助支持しながらクローラ駆動を再開する。この時から「後脚補助支持期」の状態となる。機体重心が溝をオ

オーバーした後は後脚を元に戻し、通常のクローラのみによる移動を再開する。

この動作により段差溝の乗り越え動作が完了する(Fig. 23 中 8)。

4.3.2 段差高と溝幅による走破可能性

走破可能な段差溝のサイズを動作時の前脚と後脚の脚先の接地位置により求める。算出の前提条件として、路面と接触するときの脚先の角度は 15~105[deg]とし、脚先が路面に接触した時、脚リンクが地形に干渉しないことを考慮する。

一般的に、クローラ走行のみで走破が可能になる段差溝はクローラサイズにより決まり、走破可能な溝幅は全長の半分となる。また走破可能な段差高はクローラ車輪の高さと同じとなる[4-13]。これを満たさない場合、脚の補助により乗り越えを行う。

4.3.1 節で示した動作のうち、段差溝乗り越え時の各状態(Fig. 23 中 4~8)を Fig. 24 に示す。Fig. 24 の各フェーズ(phase_1~5)は Fig. 23 中 4~8 それぞれに対応している。

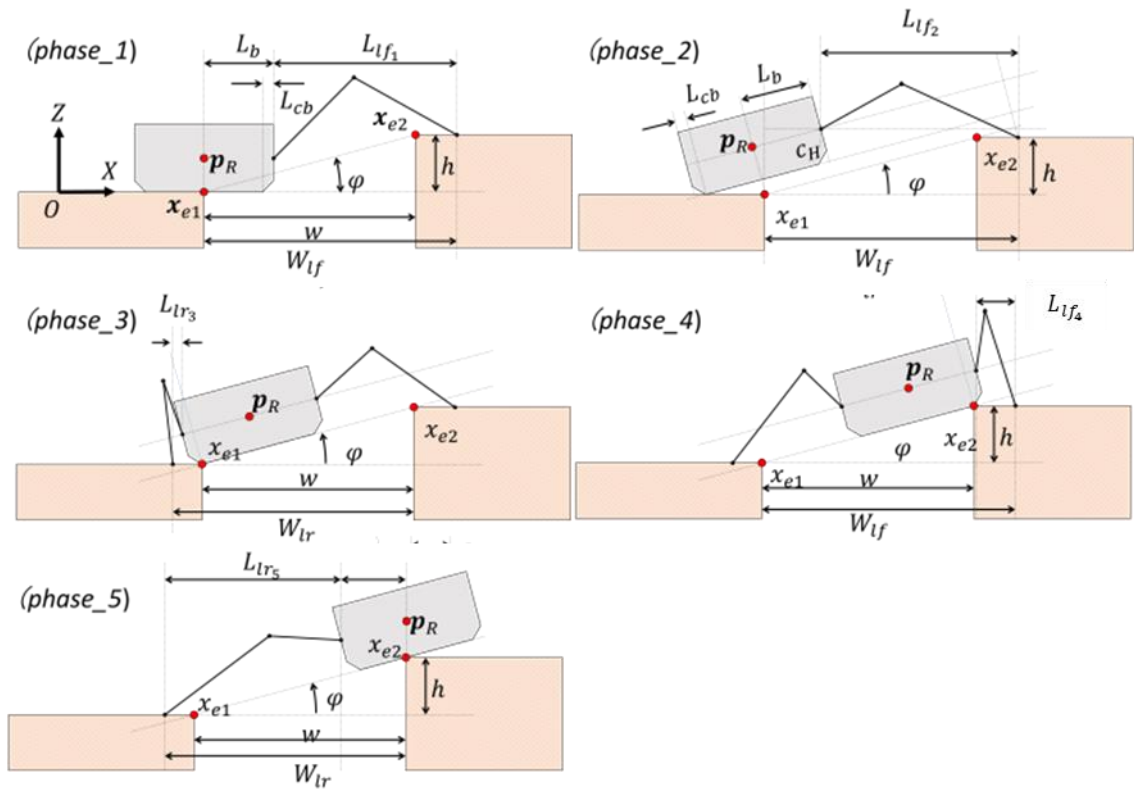


Fig. 24 段差溝乗り越えの動作モデル

各状態について前後脚先接地位置と各対岸の溝縁との間の x 距離を W_{lf} 、 W_{lr} とすると各フェーズで以下の式(4.1)~(4.5)が成り立つ。

$$W_{lf} = L_{lf1} + L_b \quad (4.1)$$

$$W_{lf} = L_{lf2} + (2L_b - L_{cb})\cos\varphi - (L_b - L_{cb}) - c_H \sin\varphi \quad (4.2)$$

$$W_{lr} = w + L_{lr3} + L_{cb} \cos\varphi + c_H \sin\varphi \quad (4.3)$$

$$W_{lf} = w + L_{lf4} + L_{cb} \cos\varphi - c_H \sin\varphi \quad (4.4)$$

$$W_{lr} = L_{lr5} + L_b \cos\varphi \quad (4.5)$$

式中の L_{lfi} 、 L_{lri} ($i = 1, \dots, 5$)は i 番目のフェーズにおける前後脚のベース位置からの脚先接地位置の x 距離である。これらは機構的な制約に基づき運動学的に可能な範囲として得られる。そこで、これらの値の最小と最大から走破可能な幅と高さが求められる。また、 L_b は機体重心からクローラ端までの長さであり、 L_{cb} はクローラ端から最も近い脚ベースまでの長さである。 c_H はクローラ底面から脚ベースまでの高さである。動作を可能とするには式(4.1)~(4.5)を全て満足する必要がある。最初に、前脚の接地により必要となる溝幅を考える。 $phase_1$ と $phase_2$ では、前脚を最も伸ばした状態を考え、 L_{lf1} と L_{lf2} をともに前脚を最も伸ばした状態と考え、それらを最大の値としたときの式(4.1)と式(4.2)の W_{lf} を W_{lf1} 、 W_{lf2} とすると、これらの小さい方の値がこの時の最大幅に対応する。また、 $phase_4$ では L_{lf4} を前脚が最も縮んだ状態とすることで最大の W_{lf} が式(4.4)より得られる。よって、前脚接地による溝幅 w_f の条件が

$$w_f \leq \begin{cases} \max(L_{lf1}) + \min(L_{lf4}) + L_b - (L_{cb} \cos\varphi - c_H \sin\varphi) & \text{if}(W_{lf1} < W_{lf2}) \\ \max(L_{lf2}) - \min(L_{lf4}) + (L_b - L_{cb})(2\cos\varphi - 1) & \text{if}(W_{lf1} \geq W_{lf2}) \end{cases} \quad (4.6)$$

により与えられる。

次に後脚の接地により必要となる最大の溝幅 w_r の条件は式(4.3)に式(4.5)を代入して

$$w_r \leq \max(L_{lr5}) - \min(L_{lr3}) + L_b \cos\varphi - (L_{cb} \cos\varphi + c_H \sin\varphi) \quad (4.7)$$

により求める。ここで L_{lr3} には phase_3 の最も縮んだ状態での後脚ベースから接地点までの距離を与え、 L_{lr5} には phase_5 の状態での最大の距離を与える。

結局、式(4.6)と式(4.7)より、最大の溝乗り越え幅 w_{max} は

$$w_{max} = \min(\max(w_f), \max(w_r)) \quad (4.8)$$

となる。

以上より、段差高さ h および溝幅 w に対して、 L_{lfi} 、 L_{lri} が各脚先接地位置における各状態での逆運動学計算の解が存在する範囲内で得られる。そして、機体姿勢の回転角度 φ は

$$\varphi = \tan^{-1}(h/w) \quad (4.8)$$

として、式(4.6)~(4.8)の条件を満たせば乗り越え可能と判断できる。

以上の方法で、各溝幅 w と段差高 h に対する乗り越え可能性を解析した。その結果を Fig. 25 に示す。

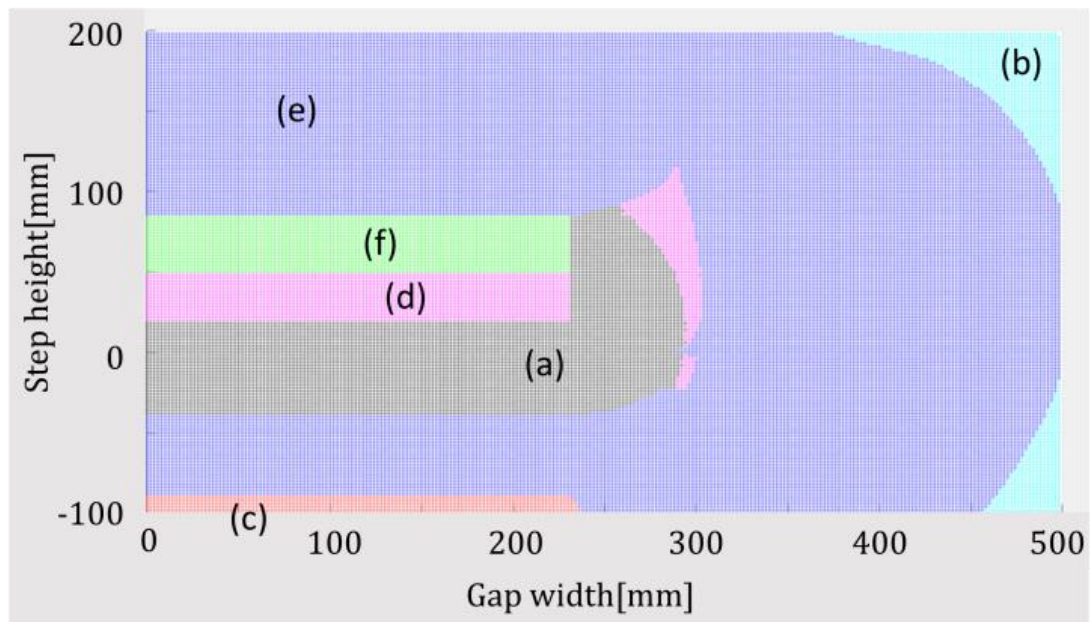


Fig. 25 段差高と溝幅に基づく走破可能性

図中の各領域は各 w 、 h における結果を示している。(a)の領域は走破可能な幅と高さであることを示している。また (b)、(c)、(d)、(e)、(f)の領域はそれぞれ phase_1、2、5、3、4の各状態で L_{lfi} 、 L_{lri} を求めるための逆運動学の解が得られなかった場合を示している。また(a)、(d)、(f)では直線的な領域があるが、これは、溝幅 230[mm]までは Fig. 24 中 phase_1、2 でロボットと溝の壁面が接触するために走破できないことを示している。このような場合ではその幅分後退をした位置から乗り越えを行えばよいので $w < 230[\text{mm}]$ では(f)、(d)の領域でも段差溝乗り越えが可能になる。

4.3.3 段差溝走破の静力学解析

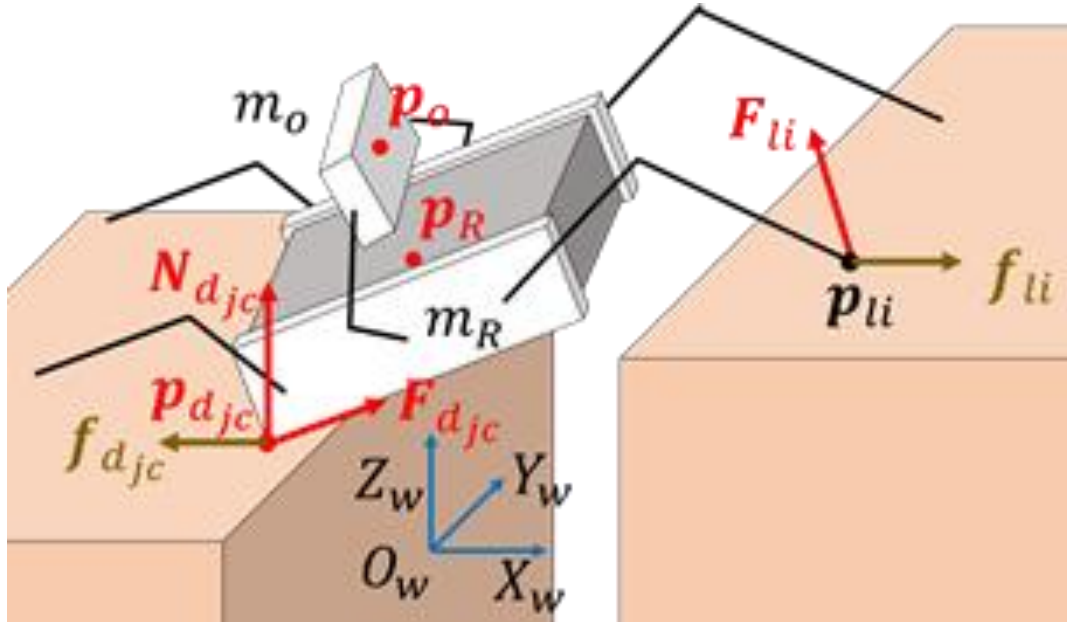


Fig. 26 3次元的な段差溝乗り越えの力学モデル

この段差溝乗り越えにおいて、静的に動作することを仮定し、力とモーメントのつり合いにより脚先に発生する力を算出し、関節トルクを求める。Fig. 26 は Fig. 24 の phase_3 での静力学モデルを示している。

このとき力のつり合いとモーメントのつり合いの式は、それぞれ

$$\sum_{j=1}^{N_t} \sum_{c=1}^{N_{cj}} (N_{djc} + F_{djc} + f_{djc}) + \sum_{i=1}^{N_{li}} (F_{li} + f_{li}) + (m_R + m_o)\mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{c=1}^{N_{cj}} (\mathbf{p}_{djc} \times (N_{djc} + F_{djc} + f_{djc})) \\ & + \sum_{i=1}^{N_{li}} (\mathbf{p}_{li} \times (F_{li} + f_{li})) + \mathbf{p}_R \times m_R \mathbf{g} + \mathbf{p}_o \times m_o \mathbf{g} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.10)$$

によって表される。 N_t はクローラの数、 N_{cj} はクローラ j が路面と接する点もしくは接地領域の作用点の数である。 F_{djc} 、 N_{djc} 、 f_{djc} はそれぞれクローラ j の接

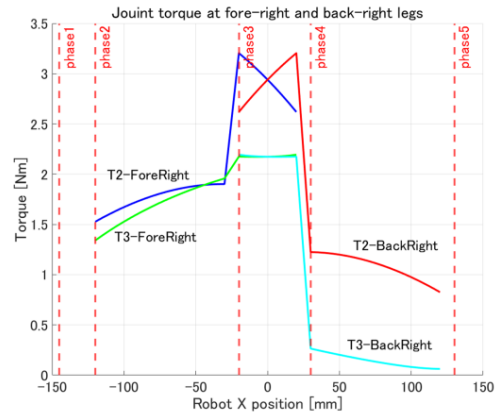
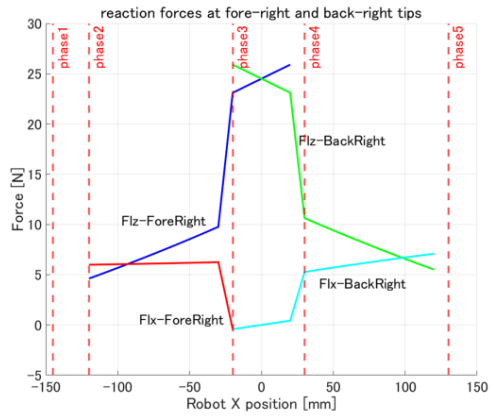
地点 c でのクローラ駆動力、垂直抗力、摩擦力である。また \mathbf{p}_{ajc} をこれらの力の作用点とする。次に脚の本数を N_l とし脚 i の脚先位置 \mathbf{p}_{li} での脚先力を \mathbf{F}_{li} 、脚先摩擦力を \mathbf{f}_{li} とする。また、 m_R は機体重量であり、 \mathbf{p}_R は機体重心位置を示している。これらの式の機体位置 \mathbf{p}_R と脚先接地位置 \mathbf{p}_{li} は計画軌道により与えられる。 \mathbf{p}_o は対象物の重心位置であり、 m_o は対象物の質量を示している。これらより各時刻のクローラ駆動力 \mathbf{F}_{ajc} と脚先力 \mathbf{F}_{li} を式(4.9)、(4.10)を連立させた線形式の最小二乗解として求める。

そして、脚先接地位置 \mathbf{p}_{li} と機体位置 \mathbf{p}_R から逆運動学により得られる脚関節角度よりヤコビアンを求め、モデルに基づき得られた脚先力から各脚の関節トルクを算出する。

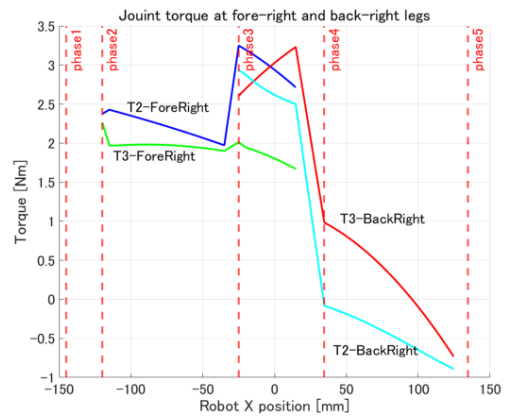
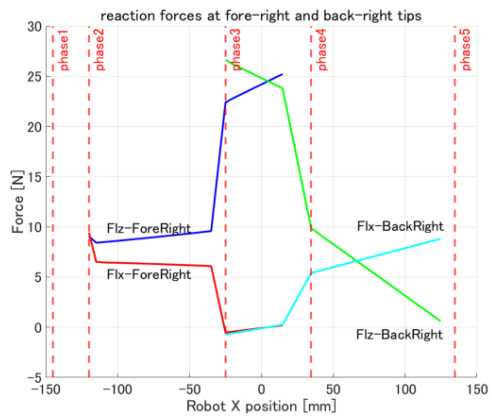
これらの方法によって求めた移動時の右前後脚先力と第 2,3 関節のトルクの計算結果を Fig. 27 に示す。溝幅 250[mm]、段差高 0、30、50[mm]のときの結果を示している。これらのグラフは Fig. 26 の Σ_w 座標系における \mathbf{p}_R の X_w 値に対する各値を示している。 Σ_w は原点が手前側の溝の縁となるように設定した。Fig. 27 左は前後脚先反力の X_w 方向と Z_w 方向の成分を示している。また Fig. 27 右は前後脚の脚関節トルクを表している。ここでは $N_t = 2$ 、 $N_{cj} = 1$ 、 $N_l = 4$ とした。 $m_R = 10[\text{kg}]$ 、 $m_o = 2[\text{kg}]$ とし \mathbf{p}_o は \mathbf{p}_R から鉛直に 15[mm]離れた位置に設定した。脚、クローラと路面との間の各摩擦係数は 0.3 とした。またロボットは x 軸方向に一定の速度で移動するものとした。それぞれの図において X 位置が-115[mm]から-30[mm]まで前脚による補助にてクローラ走行している (Fig. 24 中 phase_1&phase_2)。-30[mm]直前で、30[mm]まで両脚支持移動を行い (phase_3)、134[mm]まで後脚による補助でクローラ走行している (phase_4)。いずれの高さでも phase_3 で前、後脚ともに最大の脚先反力とトルクになっているが、この時は「4 脚支持期」の状態であり、機体を脚のみで支えているため

である。これらの値より動作中に必要な脚先力と脚関節トルクが求められるため、段差乗り越え動作制御の目標値として与えることで最適な制御が可能になると考えられる。

A: $w=250[\text{mm}]$ $h=0[\text{mm}]$



B: $w=250[\text{mm}]$ $h=30[\text{mm}]$



C: $w=250[\text{mm}]$ $h=50[\text{mm}]$

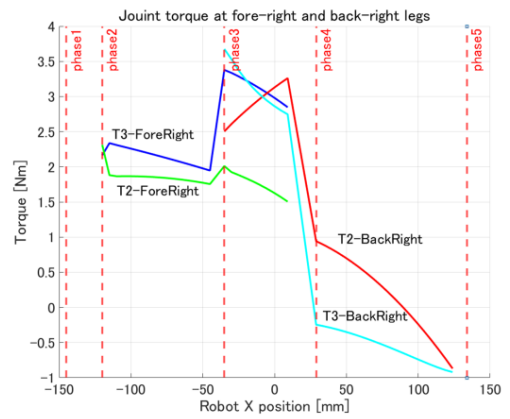
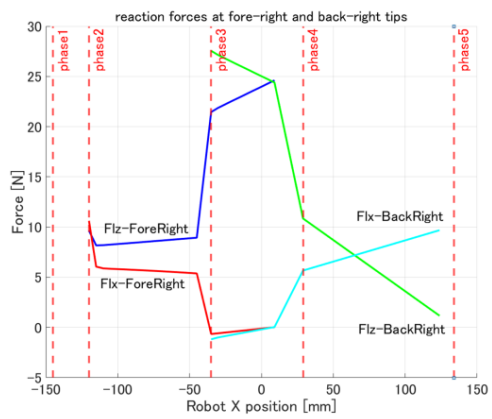


Fig. 27 移動時の脚先力と関節トルクの計算結果

4.3.4 動作シミュレーション

次に段差溝乗り越え動作のシミュレーションを行った。Fig. 28 は各時刻の関節角度を与えて溝幅 250[mm]、段差高 50[mm]の環境を走破させた動作のシミュレーション結果を示す。各図は Fig. 24 の phase_2、3、4 のそれぞれの状態を示している。図中の F_d 、 N_d 、 F_l で表した線は、 F_d はクローラ駆動力、 N_d は垂直抗力、 F_l は脚先反力ベクトルを示している。この結果から一連の動作を確認した。そのため提案した動作手法による段差乗り越えが可能であるとわかる。

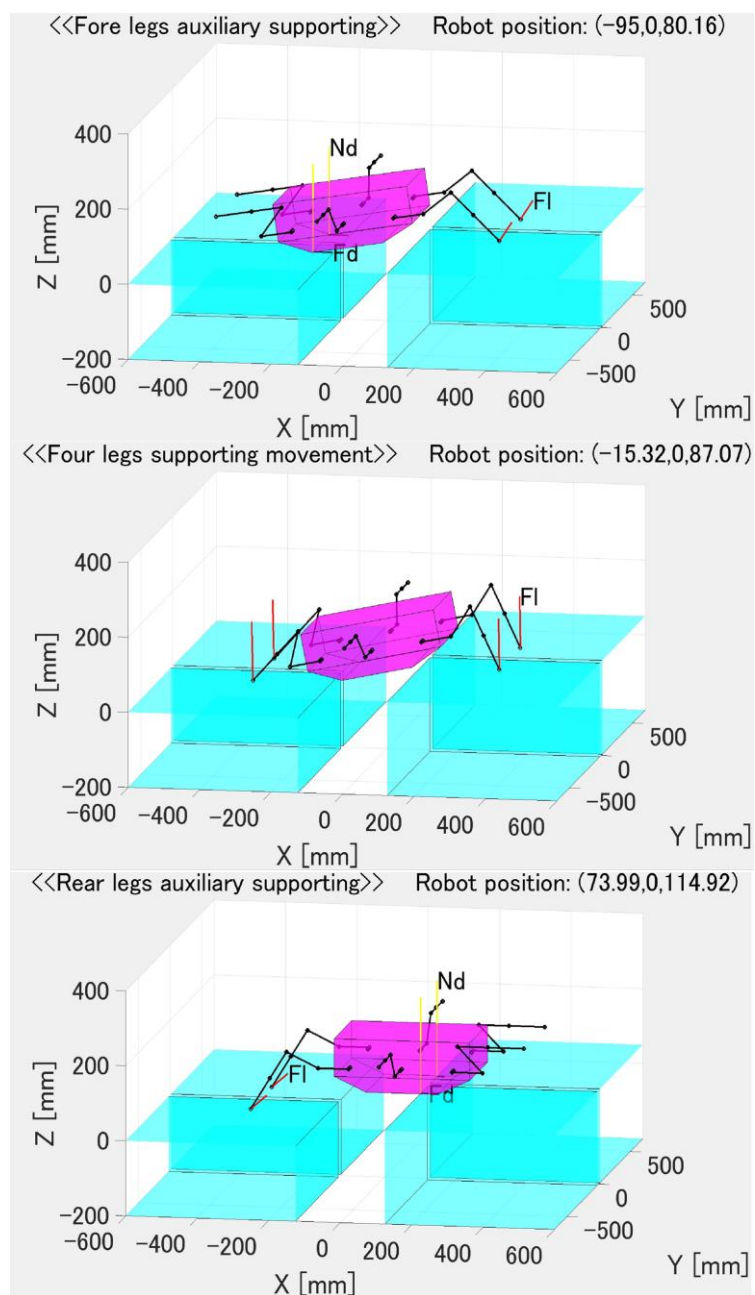


Fig. 28 段差溝乗り越えのシミュレーション結果

4.4 自律段差溝乗り越え

4.4.1 段差高溝幅検出用 2次元測距システムの構築

自律段差乗り越えを行うために 2次元測距システムを開発した。

本章では自律段差溝乗り越えを行うために開発した 2次元測距システム[4-13]を使用した溝幅、段差高の検出について述べる。この測距システムは近距離計測可能な IR 距離センサ「SHARP GP2Y03E」をサーボモータ「近藤科学 B3M-SC-1170-A」に装着したものである。センサの計測範囲は 40[mm]から 450[mm]である。また、測定可能な角度はセンサ回転分解能を 0.001[deg]まで調節可能である。

4.4.2 溝幅段差高の検出

次に、この測距システムによる溝幅、段差高の検出について述べる。Fig. 29 は Fig. 24 の phase_1 にて溝幅、段差高を検出するモデルである。はじめに、機体前方下部に設置した IR 距離センサが X 軸方向を計測しているときのセンサ回転角を 0 とする。計測は負のセンサ回転角の状態から開始し、センサを Y 軸まわりに正方向に回転しながら、機体前方の距離情報を取得する。このとき、溝縁の前後で計測点が路面から壁面に変わり計測距離が大きく変化するため、距離変化情報から溝縁を検出できる。奥側の溝縁 $\mathbf{P}_2 = [x_2, z_2]^T$ については、計測距離の変化量の符号が負から正に変化する点となる。段差が大きい場合や壁の場合は、奥側の路面を検出できず、センサが負の回転角の段階で計測距離が得られるため、センサにて最初に距離を検出した点を溝縁がある位置とみなす。

また手前側の溝縁 $\mathbf{P}_1 = [x_1, z_1]^T$ は距離変化が急激に減少した点になる。これにより検出した各溝縁 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 の位置差

$$[w, h]^T = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1$$

より溝幅 w 、段差高 h を得ることができる。そして、Fig. 25 の解析結果を用いることでロボットはその段差溝が乗り越え可能かを判断できる。

段差溝検出のシミュレーション結果を Fig. 30 に示す。これは $w = 100[\text{mm}]$ 、 $h = 0[\text{mm}]$ のときの結果である。そして、Fig. 25 に示した段差高と溝幅に基づく走破可能性の解析結果を用いることで、ロボットは検出した溝幅と段差高から、その段差溝が乗り越え可能かを判断できる。また、乗り越え可能であれば事前に w と h に対する脚の動作を計画することができるので、実動作時の計算負荷を大幅に削減できると考えられる。

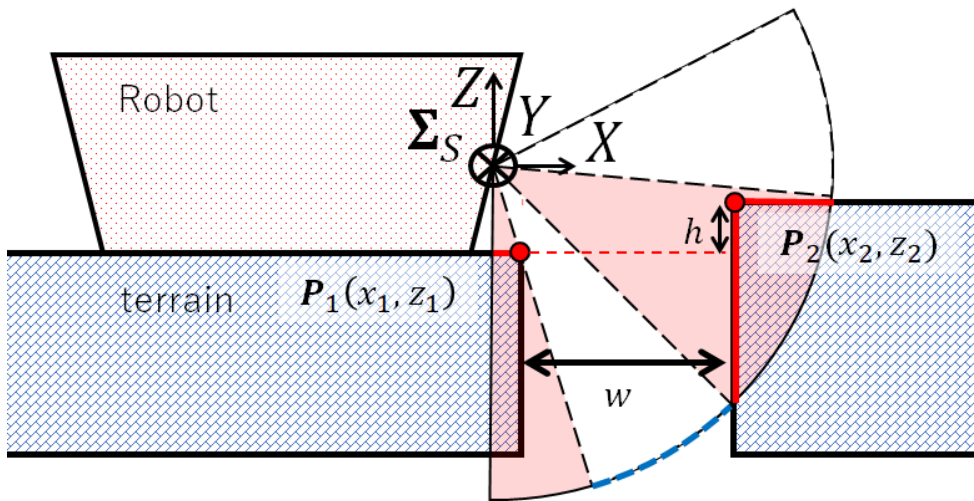


Fig. 29 段差高溝幅検出モデル

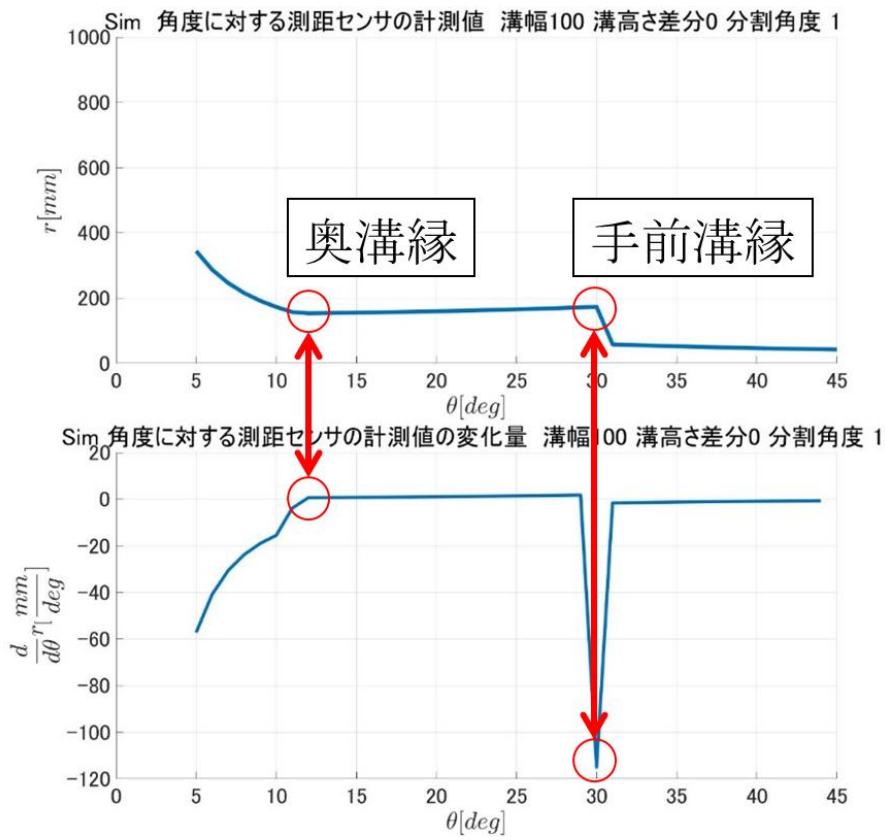


Fig. 30 段差溝検出シミュレーション結果(w:100[mm],h:0[mm])

4.4.3 自律段差溝乗り越えアルゴリズム

段差溝乗り越え時の動作アルゴリズムを Fig. 31 に示す。通常のクローラ走行中はセンサを正の回転角としておき、機体と前方の路面との距離を取得する。その際、もし大きな距離の増加があれば、前方に下方向の段差があることが推測できる。そのため、そこで走行を停止し、上述の方法により前方の 2 次元距離情報から溝幅と段差高の検出を行う。もし奥側の溝縁 P_2 が得られなかった場合は崖などの乗り越え不可能な地形であると判断し、動作を中止する。溝幅と段差高がともに検出されれば、それに応じた適切な動作を選択する。検出した溝幅を W 、段差高さを H としたとき、Fig. 25 の結果を参照し、溝幅 W に対して乗り越え可能な段差高の最大と最小値である H_{h1} と H_{h2} が得られる。最大乗り越え可能幅を L_h としたとき、 $W \leq L_h$ かつ $H_{h2} \leq H \leq H_{h1}$ を満たす場合は乗り越え可能と判断できる。それ以外の場合は乗り越え不可能なので動作を回避する。乗り越える場合、クローラ走行のみで乗り越え可能な最大溝幅を L_l 、段差高の最大と最小値を H_{l1}, H_{l2} としたとき、 $W \leq L_l$ かつ $H_{l2} \leq H \leq H_{l1}$ であれば脚補助なしで乗り越えを行う。それ以外の場合は脚補助により乗り越え動作を行う。このとき、 w が最小乗り越え溝幅 L_m 未満の場合は、その距離になるよう後退する。

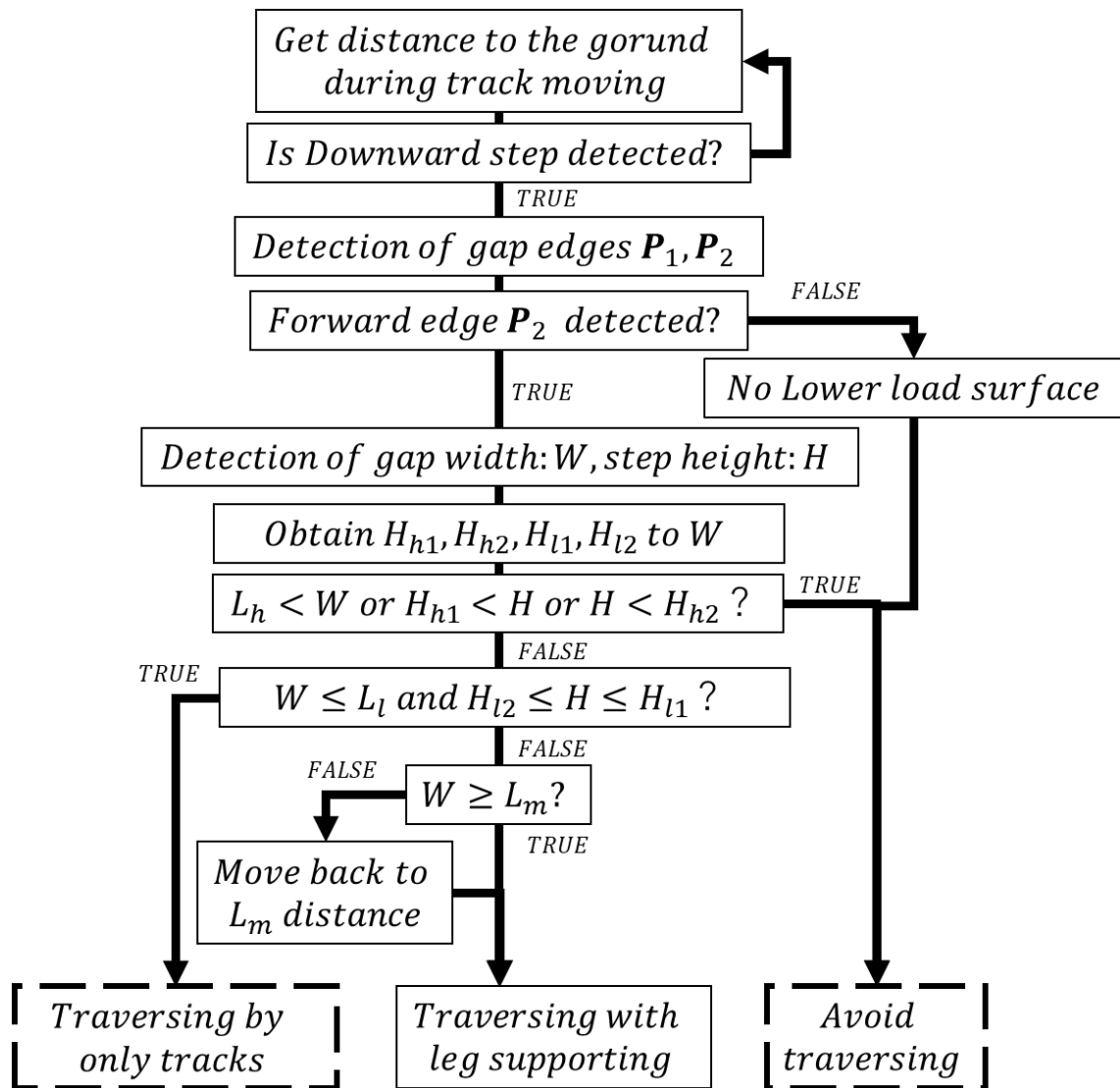


Fig. 31 自律段差溝乗り越えの動作アルゴリズム

4.4.4 溝幅と段差高検出実験

段差溝検出実験を行った。実験環境として Fig. 32 のように木製の台座を一定の幅を置いて固定し、2つの台座の間を溝、台座の高低差を段差として実験環境を構築した。ロボット位置はクローラ前端と溝縁位置が一致するように設置し、4.4.2 節で示した手法で溝幅と段差高の検出実験を行った。

センサ角度に対する計測距離の結果例を Fig. 33 に示す。Fig. 33(a)は溝幅 250[mm]、段差高 85[mm]で計測した結果で、Fig. 33(b)の結果は溝幅 250[mm]、段差高 -85[mm]での結果をそれぞれ示している。4 章で示した方法により検出した溝縁点 P_2 、 P_1 を明記している。

これらの検出位置は、溝縁検出アルゴリズムに基づき、(a)では最初の負のセンサ角では何も計測されず、センサ角度 2[deg]から計測距離を得た。その後、計測距離は減少しており、対岸の路面を捉えている。そして、センサ角 6[deg]において計測距離が増加したため、この点を P_2 として検出した。その後、センサ角 32[deg]から測定距離が減少していることから溝の底面を捉えている。その後、センサ角 62[deg]で最も大きく計測距離が減少したため、この点を P_1 として検出した。その後は 90[deg]まで手前側の路面を検出している。その結果、得られた奥側溝縁 $P_2 = [289.6, -30.4]^T$ 、手前側溝縁 $P_1 = [78.7, -148.0]^T$ となり、検出した溝幅 $W = 210.9$ 、段差高 $H = 117.5$ となった。 P_2 、 P_1 は実際の位置 $P_2 = [270, -30]^T$ 、 $P_1 = [20, -115]^T$ に対してそれぞれ $[19.6, -0.4]^T$ 、 $[58.7, 33]^T$ の誤差があった。 P_1 の誤差が P_2 誤差よりも大きい。Fig. 33(a)の結果を見ると溝底面と手前側路面の境界 P_1 の角度は 63[deg]のように見える。その場合は、手前側溝縁 $P_1 = [60.4, -118.6]^T$ となるため、溝幅 $W = 229.9$ 、段差高 $H = 88.2$ となり、実際の位置に対して誤差は $[40.4, 3.6]^T$ となる。これは使用した IR 距離センサの測定角度範囲 5[deg]の中に溝縁があるため本来はセンサ角度 62[deg]

で溝縁を含む溝底面を検出し、大きな距離変化があると認識したためであると
考えられる。

(b)では(a)と同様に、最初の負のセンサ角で何も計測されず、センサ角度
24[deg]から計測距離を得た。その後、計測距離は減少しており、対岸の路面を
捉えている。そして、センサ角 37[deg]において計測距離が増加したため、この
点を P_2 として検出した。その後、センサ角 46[deg]から測定距離が減少している
ことから溝の底面を捉えている。その後、センサ角 71[deg]で最も大きく計測距
離が減少したため、この点を P_1 として検出した。その後は 90[deg]まで手前側の
路面を検出している。その結果、奥側溝縁 $P_2 = [265.9, -200.4]^T$ 、手前側側溝縁
 $P_1 = [51.1, -148.4]^T$ となり、検出した溝幅 $W = 214.8$ 、段差高 $H = -52.0$ となっ
た。 P_2 、 P_1 は実際の位置 $P_2=[270, -200]^T$ 、 $P_1=[20, -115]^T$ に対してそれぞれ
[-4.1, , -0.4]^T、[31.1, -33.4]^Tの誤差があった。これも(a)の結果と同様に、
Fig. 33 (b)の結果を見ると溝底面と手前側路面の境界 P_2 の角度は 72[deg]のよう
に見える。その場合は、手前側溝縁 $P_1 = [38.0, -117.0]^T$ となるため、溝幅
 $W = 227.9$ 、段差高 $H = 83.4$ となり、実際の位置に対して誤差は[23.1, 1.6]^Tと
なる、

これらの結果から手前側の溝縁位置 P_1 を誤る場合がわかった。これに対して、
センサの測定角度範囲 5[deg]の中に溝縁と底面がどうしても入ってしまうため、
モータ回転分解能をさらに細かく設定することにより、角度誤差による位置誤
差の影響が少なくなると考えられる。また、測定した距離から得られる各点の
座標から路面や壁面の検出を行い、その境界となる位置を溝縁とする手法を導
入することでセンサの測定範囲による誤差の影響を無視して検出を行うことが
可能になると考えられる。今後の研究にて検証する。

Table 1 は、各溝幅、段差高について 10 回検出した結果の誤差平均と分散を示す。実験結果より溝幅、段差高誤差ともに溝幅、段差高の増加とともに大きくなる傾向がみられた。これらの結果から、高さ方向に大きな誤差が出ていることがわかるが、この原因について、使用したセンサの方位分解能による誤差が影響している可能性が考えられる。今回の実験では 1 回の検出でのサーボモータ回転の分解能を 1[deg]としたが、そのとき最長 300[mm]を検出した場合での分解能誤差は 5.2[mm]である。この誤差に加えて外乱光や路面に乱反射した赤外光の影響も考えられる。高さの誤差が動作に与える影響について考えると、例えば下り段差の場合では、下方向に誤差が出た場合は phase_1 にて前脚が対岸の路面よりさらに下に接地しようとするが機体を支えて移動する分には問題ないと考えることができる。上方向の誤差である場合も、phase_1 で脚先の接地時に姿勢が乱れる可能性があるが、phase_4 で機体が対岸に接地するのが早くなるので問題ないと言える。次に、上り段差の場合、下方向に誤差が出た場合は脚先を接地させようとしたときに脚が地形に接触する恐れがある。phase_1 にて脚先が接地できない可能性が高く、接地できたとしても phase_4 にてクローラ前端が対岸溝縁に到達できずにそのまま落下してしまう危険性がある。しかし、上方向の誤差の場合は phase_1 での接地は可能であり、phase_4 でも機体姿勢の乱れがあっても対岸へ到達可能であると考えられる。以上より、実際に検出した段差に対して+20[mm]程度のマージンを与えて動作可能かどうかを判断することで安全に動作を行うことができると考えられる。

また、センサ角の検出誤差により遠い溝縁であるほど分散の値が大きくなる傾向がある。特に溝幅 250[mm]段差高-85[mm]では下方向の溝が十分に得られず検出する溝幅に大きなブレが出ていることが確認できた。これに対応するにはさらに細かくセンサ分解能を設定することが挙げられる。

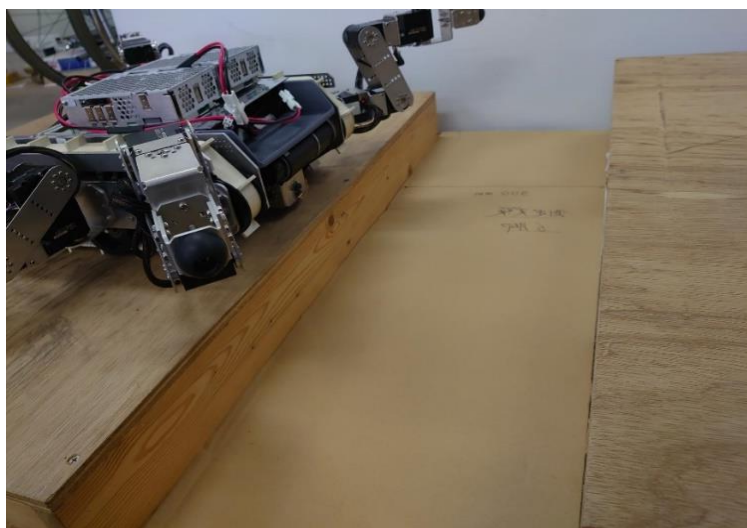


Fig. 32 溝幅と段差高検出実験環境

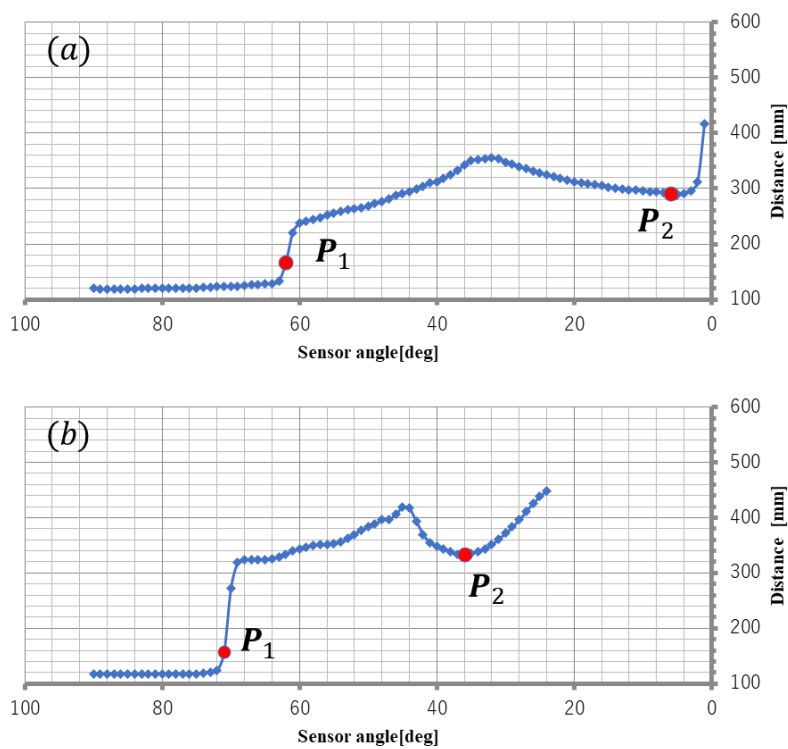


Fig. 33 段差溝検出実験結果

(a) 上り段差($W: 250[\text{mm}], H: 85[\text{mm}]$)

(a) 下り段差($W: 250[\text{mm}], H: -85[\text{mm}]$)

Table 1 段差溝検出実験結果

[gap width, step height] [mm]	mean error of detection[mm] [W, H]	variance [W, H]
[200 , 40]	[0.3 , 20.9]	[15.5 , 14.2]
[200 , -40]	[17.6 , 15.9]	[65.9 , 19.4]
[250 , 85]	[39.0 , -32.5]	[2.3 , 2.5]
[250 , -85]	[-36.5 , 45.6]	[253 , 835]
[300 , -40]	[34.1 , 30.2]	[21.6 , 5.5]

4.4.5 自律溝乗り越え実験

実機により、段差がない場合の溝幅検出に基づく乗り越え動作実験を行った。Fig. 34~Fig. 36 にそれぞれ溝幅 100, 200, 300[mm]でのロボット動作の外観を示す。各図中の番号は動作順を表している。なお、このロボットでは $L_h=260.2$ [mm]、 $L_l=100$ [mm]となるが、前節での計測誤差結果を考慮して10[%]のマーヅンを与え、 $L_l=90$ [mm]、 $L_h=234.2$ [mm]に設定した。

Fig. 34 では溝幅 100[mm]に対して検出溝幅 $W=97.4$ [mm]となったため、Fig. 31 の $W < L_l$ での動作選択に従いクローラのみで走行可能と判断しそのまま走行を行った。

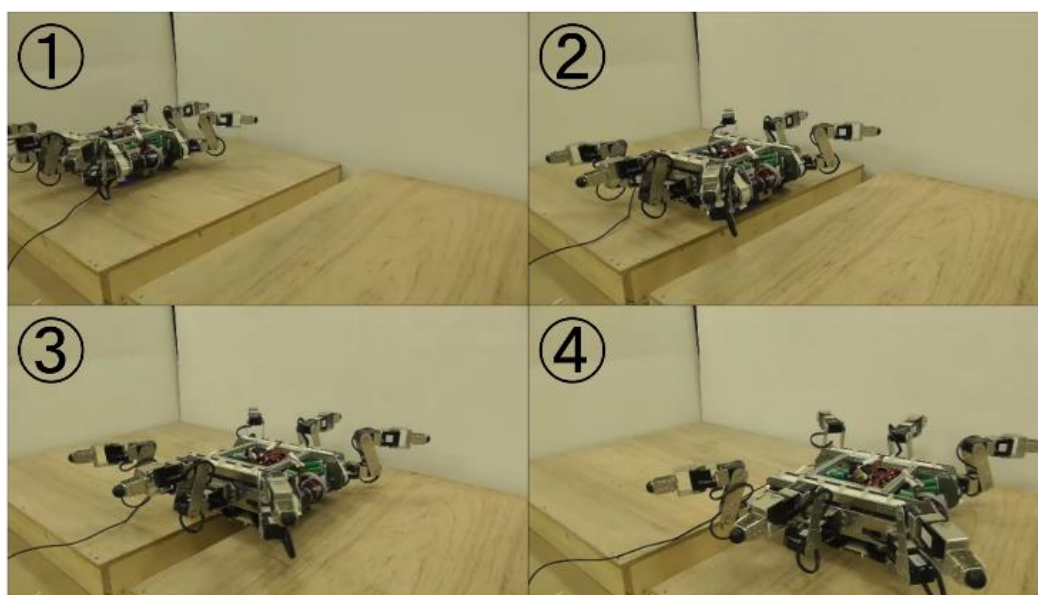


Fig. 34 溝幅 100[mm]時クローラのみによる溝乗り越え

Fig. 35 では溝幅 200[mm]に対して検出溝幅 $W=213.2$ [mm]となったため、 $L_l \leq W \leq L_h$ での動作の脚補助による乗り越えを行った。図中②で4脚支持によ

る脚移動を行い、③にて後脚で支持してクローラ駆動補助しながら移動を行った。

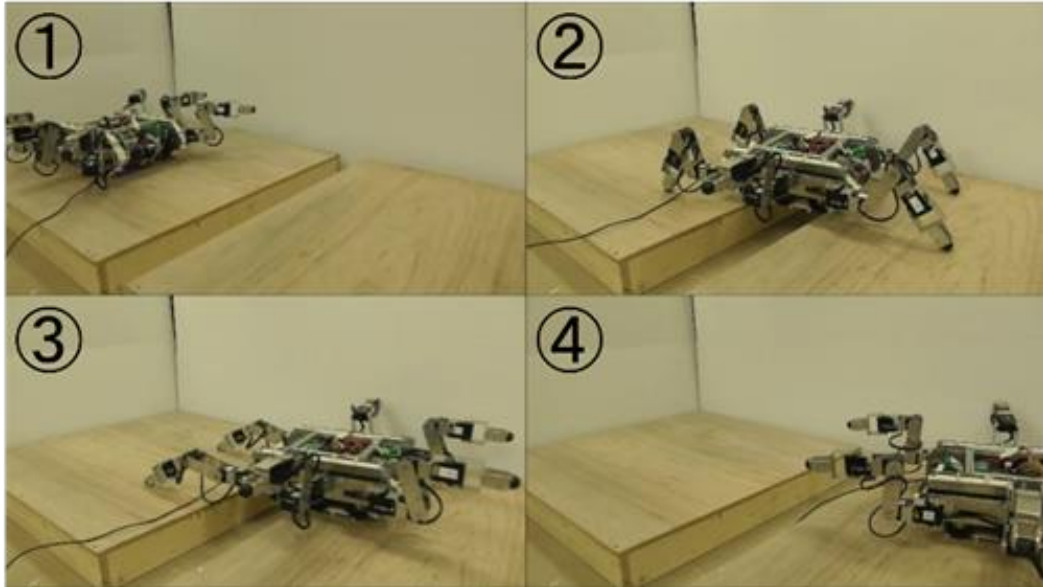


Fig. 35 溝幅 200[mm]時 脚補助による溝乗り越え

Fig. 36 では溝幅 300[mm]に対して検出溝幅 $W=318.9$ [mm]となり、 $L_h < W$ となったので、乗り越え不能な溝と判断し、走行を中断し、後退した。

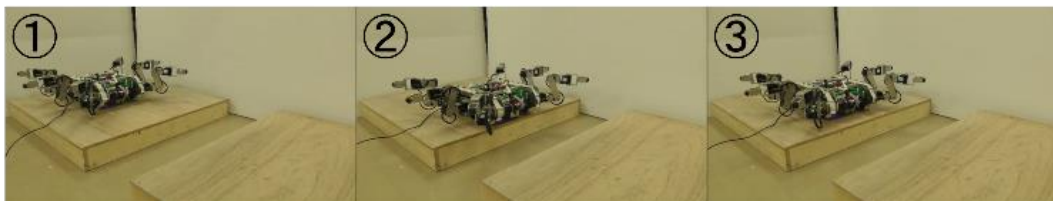


Fig. 36 溝幅 300[mm]時 走行不可による動作中断

これらの結果より、検出した溝幅に応じてロボットにより適切に動作選択したことが確認できた。

4.4.6 自律段差溝乗り越え運搬実験

Fig. 25 の結果より、乗り越え可能である溝幅 270[mm]、段差 20[mm]と溝幅 250[mm]、段差-40[mm]での動作実験を行った。木材にて段差溝を形成した。4.4.4 節の実験と同様に溝縁とクローラ端が一致させたところから動作を行った。また、対象物把持持ち上げを省略し、対象物を把持した状態から行い、自律段差溝乗り越えのみを検証した。

実験結果を Fig. 37 に示す。左右はそれぞれ、(i)上り段差($W:270$ [mm], $H:20$ [mm])、(ii)下り段差($W:250$ [mm], $H:-40$ [mm])のときの結果を示す。それぞれ Fig. 24 の phase と対応している。(ii)では、下り段差を右から左に動作した結果である。

このときの検出結果は(i)では溝幅 288[mm]、段差高 18[mm]であり、(ii)では 236[mm]、段差高-17[mm]であり、その結果に基づいてロボットは動作を行った。図で示すようにそれぞれで Fig. 24 にて示した各フェーズの状態について確認することができた。(i)では溝幅に 18[mm]の誤差があり、phase_4 にてクローラが対岸溝縁に到達する前に前脚を離してしまっただが、クローラ車輪の半径 30[mm]以内の誤差であったため、対岸路面にクローラが接地することができ、そのまま動作を完了した。この結果からクローラ車輪半径以下の溝幅と段差高の誤差であればそのまま動作可能であるということが確認することができた。(ii)では溝幅誤差-14[mm]、段差高誤差 23[mm]により phase_1 にて脚先が対岸路面に接地できていない状態であったが、phase_3 にて機体傾斜とともに接地し、そのまま動作した。また溝幅誤差に関しては(i)の結果と同様にクローラ車輪が対岸に接地できたためそのまま走破した。

この結果から検出した溝幅と段差高に基づき段差溝乗り越え運搬動作が可能になることを確認した。

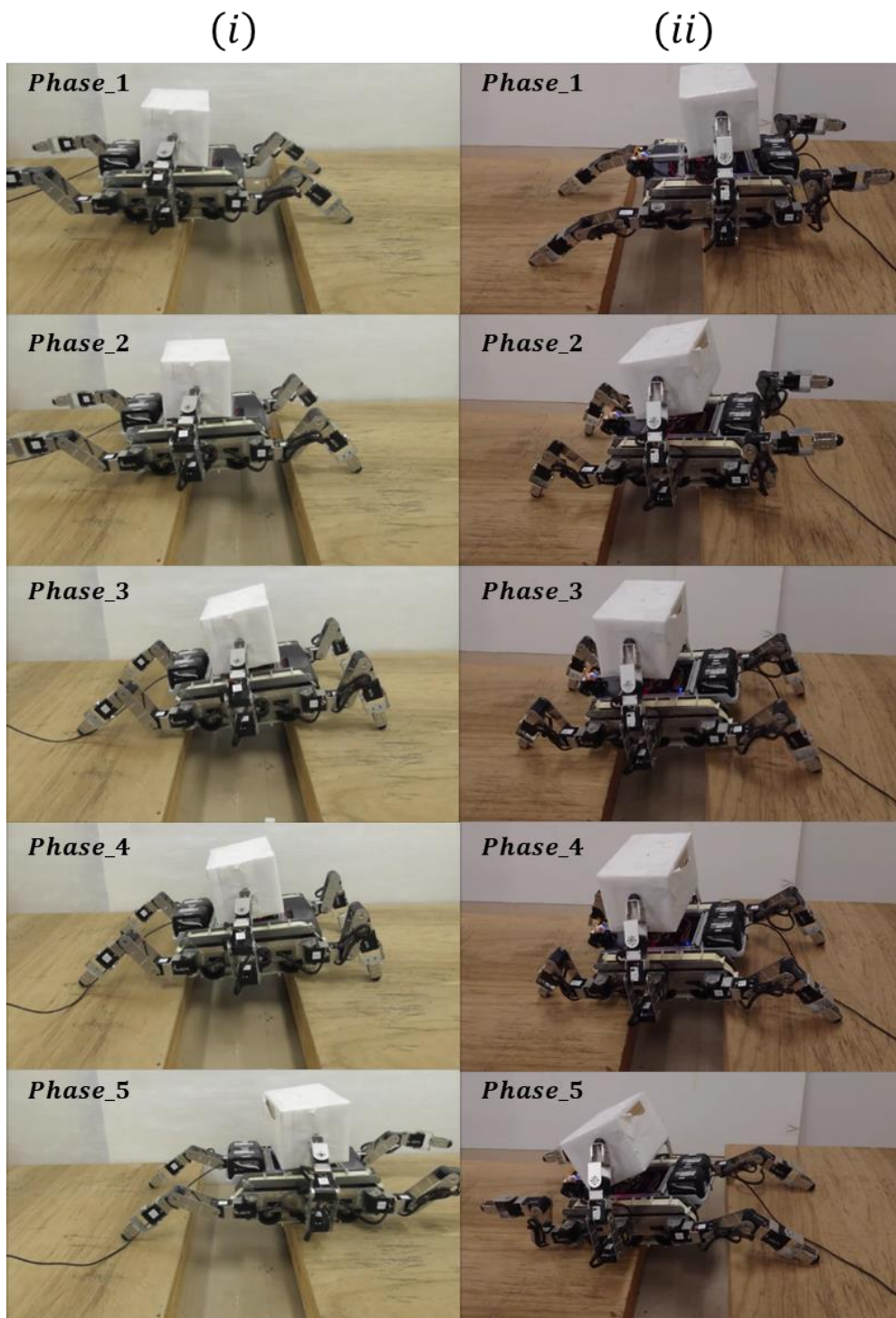


Fig. 37 自律段差溝乗り越え運搬実験

(i) 上り段差($W:270[\text{mm}], H:20[\text{mm}]$)

(ii) 下り段差 ($W:250[\text{mm}], H:-40[\text{mm}]$)

4.5 考察

6 脚クローラ型不整地移動ロボットによる段差溝乗り越え運搬動作のために、機体構成より幾何学的に段差溝乗り越え可能な溝幅、段差高の関係を求めた。また、動作の静力学解析により段差溝乗り越えが可能であることを確認した。さらに、自律的に段差溝乗り越えを行うため、溝幅と段差を検出する手法を検討した。実機により自律段差溝乗り越え実験を行い、検出した溝幅と段差高に基づく動作を確認した。

今後の展開として、段差溝乗り越えと同様、他の脚とクローラのハイブリッド作業移動について検証する。また、様々な形状の対象物に対する自律作業実現のために IR 距離センサ等を使用してロボット前方の回収対象の把持位置を推定し、作業腕により回収する方法について検討する。

5章.

板下対象物回収動作

5.1 研究背景と目的

近年の災害対応ロボットをはじめとする危険な現場での作業を人の代わりに代行するロボットの研究開発は多くのものが自動化・近代化が行われ続けている。特にロボットアームを搭載した車両型ロボットが特に多く、実際の現場でも使用されている。これらのロボットにはどのような地形でも走破できるような移動能力の適応性と高い水準の作業能力の双方が求められる。

そこで筆者らが開発した 6 脚クローラ型不整地移動ロボットでハイブリッド作業である板下対象物の回収動作を検証する。この動作は天井崩落などで大きな板状の障害物が対象物を隠すように覆っている場合を想定した時のものである。板を持ち上げ別な場所に退かしてから回収するのが最も手っ取り早いですが、その場合板を持ち上げるのに十分なパワーがロボットに必要となり、小型のロボットでは出力を満たすことが難しいだろう。そこで板の片側を持ち上げながら対象物を回収し、その後に板を降ろせば板を持ち上げる力を最小に抑えて持ち上げと回収を行うことができる。

本章では板下対象物回収動作の一連の動作とその際の脚関節トルクに基づく脚動作制御の手法について提案し、それらの有効性をシミュレーションと実機実験により検証する。

5.2 従来研究

従来、脚機構を搭載した不整地移動ロボットが幾つか考案されているが、移動と作業の双方に高い能力を有するものは少ない。たとえば、クローラ機構の脚を備える 4 脚型の TITAN-X[5-1]や 4 脚に独立したクローラ機構を備える MELMALEC[5-2]などは高い不整地移動能力を持つが、脚を作業腕として用いることができない。一方、ASTERISK[5-3]は脚機構を作業腕として用いることができるが、脚のみでの移動しかできないため高速な移動ができない。

本研究の 6 脚クローラ型不整地移動ロボットでは現場での様々な作業が可能となることが期待できる。たとえば、各脚を作業腕として使用することにより、板状障害物を持ち上げながら下にある対象物を回収する動作や障害物を除去しながらの運搬動作などが可能となると考えられる。

5.3 板下対象物の回収動作

Fig. 38 に動作の概要を示す。動作の前提として、解析の簡単化のために XZ 平面のみで考える。また、回収する対象物は 6 面の剛体とする。また、路面は平坦とし、溝や段差は考慮しないものとする。

はじめにロボットに対して回収を行う対象物のサイズ、重量の情報を指示し、対象物の運搬を指示する。そして、ロボットが不整地を移動している最中に対象物が隠れている板の前へ到達させる。ここからロボットによる回収動作を開始する。ここでも 4 章で述べた方法と同様、ロボット前方の距離をモータ軸に赤外線センサを配置した簡易測距システムにより取得する。これにより角度ごとの距離変化から板の形状とロボットアームを挿入できる隙間を取得することができる。その時点で挿入可能な隙間がなかったのなら持ち上げが不可能と判断することができる。次に、機体 2 前脚にて板を持ち上げ(Fig. 38①)、その下に対象物があるかどうかを簡易測距システムにより取得する(Fig. 38②)。

次に、クローラで前進しながら前後脚で支持を行い、板下に侵入し(Fig. 38③)、対象物を 2 前脚にて回収(Fig. 38④)、2 中脚に持ち替える(Fig. 38⑤)。その後、2 後脚と 2 前脚で板支持を行いながら後退する(Fig. 38⑥)。前脚にて板を元に戻して、板下から脱出する(Fig. 38⑦)。そして、板状障害物を初期の状態に戻し、ロボット運搬により対象物を持ち帰る。

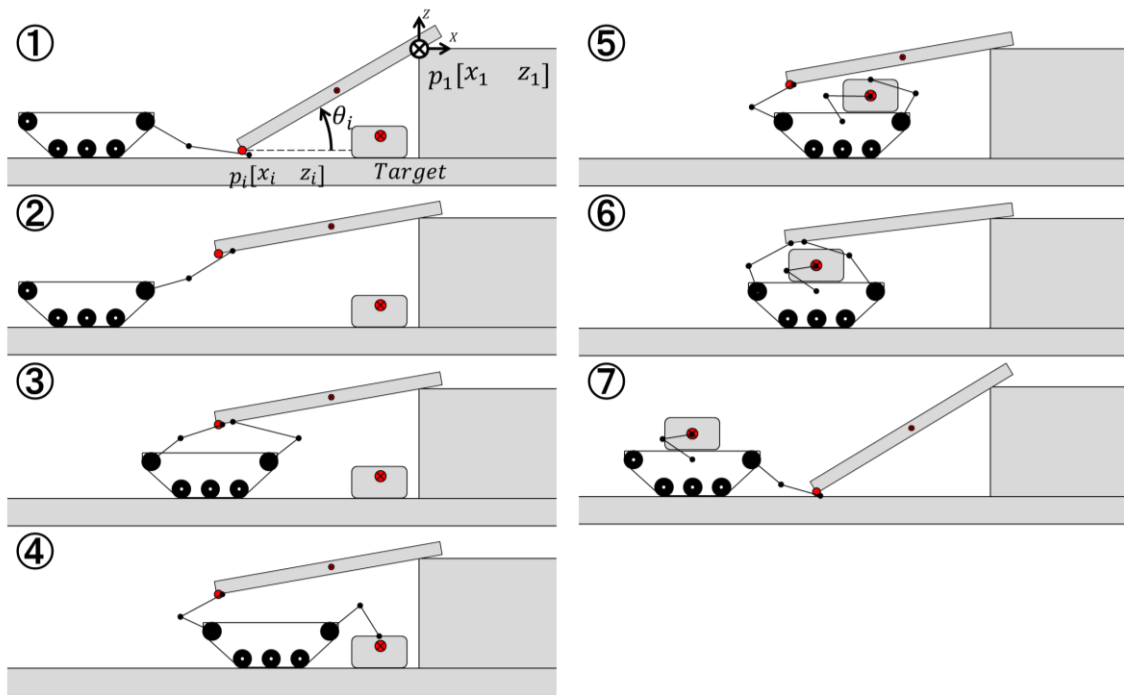


Fig. 38 板下対象物回収動作概要

Fig. 39 に Fig. 38⑥をモデル化したものを示す。動作の前提条件として板の端点 $p_i[x_i \ z_i]$ と板と台座状物体の接点 $p_1[x_1 \ z_1]$ のなす角度 θ_i が $0[\text{deg}]$ を上回らなければよい。また、対象物高さ H_t と動作時のアーム先 Z 位置 p_{2z} と点 p_1, p_2 間の距離 l_0 により

$$\sin \theta_i = \frac{1}{l_0} (p_{1z} - H_t) \quad (5.1)$$

と表すことができる。

次に、対象物サイズ $[L_t \ H_t]$ の制限について対象物奥行 L_t については前脚が対象物を把持持ち上げ可能でかつ機体と接触しなければよい、また対象物高さ H_t のサイズ上限により板の持ち上げ高さを決めることができる。この時の板持ち上げ高さを z_i とし、機体全高を H としたとき、

$$z_i + z_m = H + H_t \quad (5.2)$$

と表すことができる。この時 z_m とは機体と対象物、そして板の端点と対象物とのマージンの値の総計を表している。

次に点 p_1 周りのモーメントのつり合いを求める。はじめに力のつり合いは x, z 軸方向それぞれについて

z 軸方向の力のつり合い

$$\mu_1 N_1 \sin \theta_i + N_1 \cos \theta_i + F_z + \mu_2 N_2 \sin \theta_i = (m_0 + m_1 + m_2)g \quad (5.3)$$

x 軸方向の力のつり合い

$$\mu_1 N_1 \cos \theta_i - N_1 \sin \theta_i + F_x + \mu_2 N_2 \cos \theta_i = 0 \quad (5.4)$$

のように表すことができる。次に点 p_1 周りのモーメントのつり合いの式に変形すると

点 p_1 周りのモーメントのつり合い

$$\frac{1}{2}g(m_1 l_1 - m_0 l_0 - m_2(2l_0 + l_1)) + F_z l_0 - F_x l_0 \tan \theta_i = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{2}g(m_2 l_2 + m_0 l_0 + m_1(2l_0 + l_1)) = N_1 l_0 (\cos \theta_i + \tan \theta_i \sin \theta_i) \quad (5.6)$$

と表すことができる。式(5.3)と(5.6)について解くことにより板持ち上げ時のアーム支持位置と板端点までの距離 l_2 と対象物高さ H_t から脚先に発生する力 $\mathbf{F} = [F_x \ F_z]$ をそれぞれ求めることができる。

N_2 は点 p_2 での抗力で、 $N_2 = F_z \cos \theta_i - F_x \sin \theta_i$ である。 m_0, m_1, m_2 は板の各部の質量であり、板が均質であるとして l_0, l_1, l_2 の比で分割されることにする。 μ_1, μ_2 は点 p_1, p_2 における静止摩擦係数である。 g は重力加速度である。

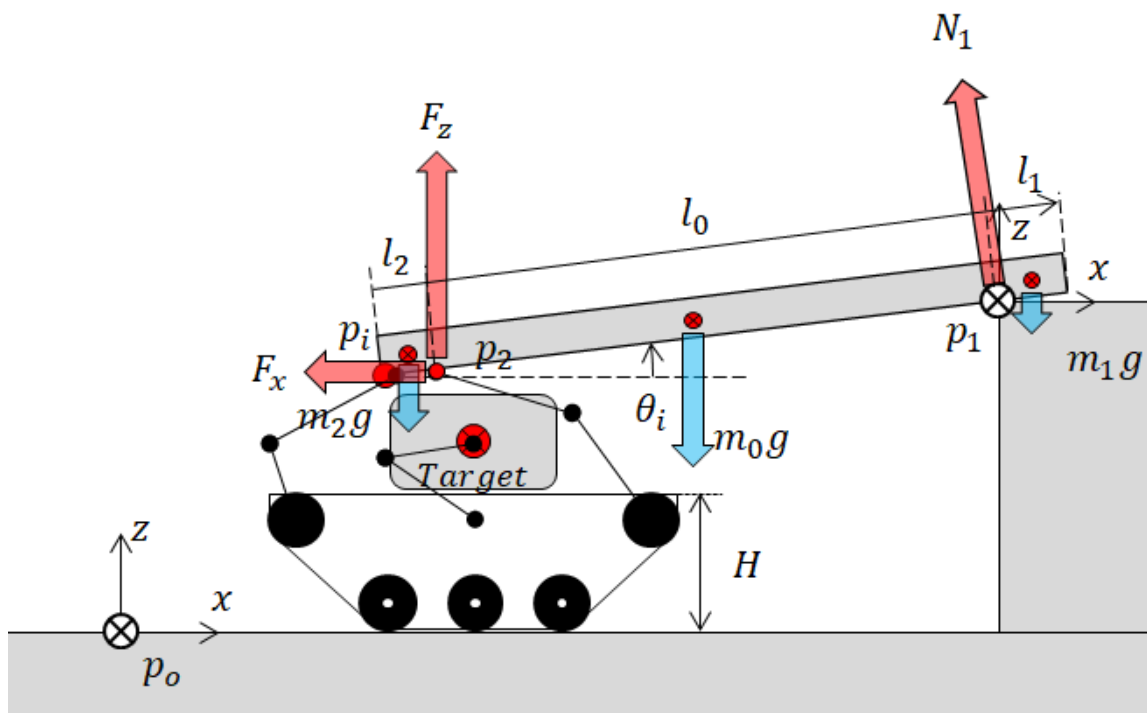


Fig. 39 板下対象物回収動作時の動作モデル

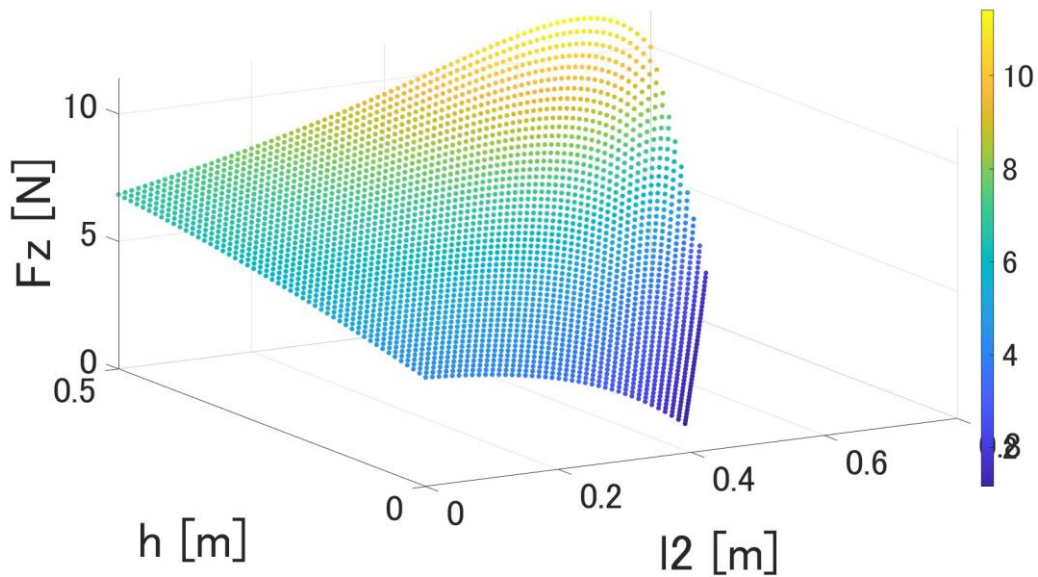


Fig. 40 対象物持ち上げ時の鉛直方向の脚先発生力

点 p_2 を板の端から l_2 移動させ、持ち上げ高さ h を変化させたときの脚先に発生する力 F_z を式(5.5)と(5.6)を連立し、 F_x と F_z について解くことでもとめることができる。シミュレーションにより求めた結果を Fig. 40 に示す。このシミュレーションでは、前脚で対象物の持ち上げを行う Fig. 38 板下対象物回収動作概要①～②の間を解いたものであり、前脚で板を支えるときの手前側板端の長さ l_2 と前脚持ち上げ高さ h を変化させたときの脚先反力 F_z について求めた結果である。このとき、板の全長を 1.2[m]、板の重量を 1.5[kg]とした。その結果、最大の脚先力は、持ち上げ高さ 0.5[m]で 13[N]であるとわかる。脚に使用したサーボモータの最大出力は 7.2[Nm]であり、最大脚先力は 36.4[N]なので、十分に持ち上げ可能であることがわかる。このように任意のパラメータを与えたときの最大の脚先力を実際に搭載したモータと比較することにより動作が可能であるかを判断することができる。本手法により、動作が可能であるかを判断することができる。

5.4 考察

本稿では 6 脚クローラ型ロボットによる板下にある対象物の回収運搬動作について、静力学モデルを作成し、そのモデルを用いた動作のシミュレーション方法について示した。また、そのシミュレーション結果より得られた脚関節トルクに基づく板持ち上げ時の脚関節トルクの制御により脚とクローラによるハイブリッド作業動作の自律化について必要な技術の検証を行った。今後の展開として、一連の板下対象物回収動作について板持ち上げ制御を伴う実機実験を行う。また、対象物の自律把持動作のための画像処理技術について、提案と検証を行う。

6章.

総論

6.1 はじめに

本章では段差溝乗り越え運搬と板下対象物回収動作において達成した技術と未達成の技術について、その有効性をそれぞれ示すとともに、その必要性についても述べる。さらに本論文で示した二つの動作がほかのロボットで動作させる場合にどのような問題があるかを比較することによりその有用性を考察する。

また、各動作の拡張性についても考えられる実環境でどのように対応すればよいかを示すことで、その有効性を示す。

最後に本ロボットにて今後研究してゆく展望についても述べる。

6.2 各動作に必要な技術

Table 2 と Table 3 に段差溝乗り越え運搬と板下対象物回収動作に必要な技術を示す。

表はそれぞれ基本動作と自律動作に必要な技術を示しており、静力学的に動作する場合に必要なものを示している。また、作業部分である対象物操作と移動タスクである段差溝乗り越えと板持ち上げ動作にも分けて必要技術を挙げている。

はじめに段差溝乗り越え運搬について達成した技術として、3章にて記述した「対象物把持のための逆運動学計算モデルの作成」と「対象物持ち上げ持ち替え時の脚先軌道の算出」、4章にて記述した「段差溝乗り越え動作モデルの作成、一連の動作に基づく脚関節角の算出」、「静力学モデルに基づく脚先反力と脚関節トルクの算出」、自律動作として「段差高と溝幅の検出」、「溝幅、段差高に基づく乗り越え動作の自動化」を達成した。

未達成の技術について、主に自律的な対象物操作技術のものが達成されていない。特に、段差溝乗り越え運搬中に機体が傾いて移動する場合を考えると、対象物の重量が機体と比べて無視できないような場合は、機体の重心位置に対して、鉛直方向に把持している対象物の重心位置が機体傾斜に合わせて、水平方向に変動してしまうため、運搬中のロボット重心が溝に到達する前に脚補助を解除して十分に乗り越えができない場合が考えられる。そのため、「運搬対象の姿勢・位置の制御」の達成が必要になる。現状の4自由度のロボットアームでは、対象物を把持する際の作業腕手先の位置 (x,y,z) と姿勢 (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z) のうち、自由度が不足しているため、2つの成分の解が一意に存在しない。十分に脚先の位置・姿勢を制御するためには、作業腕として6自由度を確保する必要がある。

そのため、搭載する脚機構の改良と溝乗り越え運搬時の中脚先位置・姿勢を制御するシステムを提案していく予定である。

また、作業腕を 6 自由度に回収することにより、今までの対象物・持ち上げ動作についてヤコビアンにて計算を行わなかった 2 成分についても算出が可能になるため、前脚による持ち上げ軌道と、前脚と中脚による持ち替え軌道の導出方法も変更する必要がある。

加えて「対象物の認識と位置・姿勢の検出」について、現在搭載している 2 次元測距システムでは 3 次元的な対象物位置と姿勢を検出することが難しい。そのため、2 次元測距システムを 2 基搭載して測定を行うことにより 3 次元の対象物姿勢を得ることが可能である。もしくは 3D-lidar や Depth カメラのように 3 次元を測定可能なセンサの導入が必要となる。

最終的には「対象物把持位置の自動算出手法の提案」を達成することで一連の自律溝乗り越え運搬モデルについて実機にて実験を行い、提案した一連の手法とモデルの有効性について証明していく。

板下対象物回収動作については 5 章にて示した。「板持ち上げ時の動作モデルの作成」のみであるため、実機による検証を行う必要がある。先にも述べた、6 自由度への作業腕改修を行うことにより対象物運搬と板の持ち上げ制御を完全に行うことが可能になるため、機体の回収後に改めて動作モデルと実機実験を行い、評価を行う予定である。

Table 2 段差溝乗り越え運搬に必要な技術

対象物操作	段差溝乗り越え
基本動作	
<u>対象物把持のための 逆運動学計算モデルの作成</u>	<u>段差溝乗り越え動作モデルの作成</u> 一連の動作に時の脚関節角の算出
<u>対象物持ち上げ持ち替え時の 脚先軌道の算出</u>	<u>静力学モデルに基づく脚先反力と</u> <u>脚関節トルクの算出</u>
自律動作	
対象物把持時の脚先力の制御	<u>段差高と溝幅の検出</u>
運搬対象の姿勢・位置の制御	<u>溝幅、段差高に基づく</u> <u>乗り越え動作の自動化</u>
対象物の認識と位置・姿勢の検出	乗り越え時の脚先反力に基づく 脚関節トルクの制御
対象物把持位置の自動算出手法の提案	

Table 3 板下対象物回収動作に必要な技術

対象物操作	板持ち上げ
基本動作	
<u>対象物把持のための 逆運動学計算モデルの算出</u>	<u>板持ち上げ時の動作モデルの作成</u>
<u>対象物持ち上げ持ち替え時の 脚先軌道の算出手法の提案</u>	静力学モデルに基づく脚先反力と 脚関節トルクの算出
自律動作	
対象物把持時の脚先力の制御	板の位置・姿勢の検出
運搬対象の姿勢・位置の制御	
対象物の認識と位置・姿勢の検出	板持ち上げ時の脚先反力に基づく 脚関節トルクの制御
対象物把持位置の自動算出手法の提案	

6.3 今後の展望

本章では検証してきた段差溝乗り越えと板下対象物回収動作の今後の展開について、想定される問題とその解決のためのアプローチの方法について述べる。

特に実機による実環境である屋外実験と加速度を考慮した動力学モデルに関する考察もここで述べる。

6.3.1 段差溝乗り越え

段差溝乗り越えは 2 次元測距システムによる動作可能性の判断を達成し、それに基づく自律動作を検証した。想定した環境は前提条件としてクローラからみて溝幅が一定で路面の高低差がないものとして与えている。より一般的な環境ではこれらが満たされていない場合も考慮する必要があるのでロボット前方の路面情報を 3 次元的に取得する必要がある。そのため、搭載している 2 次元測距システムを Lidar や Depth センサなどの 3 次元環境を取得可能なセンサに更新する必要がある。Fig. 41 に開発予定の新システム構成を示す。まずは 2 次元測距システムを 3D センサに変更する。このとき、組み込みマイコンの処理能力では 3 次元点群の情報処理やそれに基づくマップの作成、地形の検出、ロボット経路の生成など、自律移動に必要な処理を行うためには不足となる可能性が高い、そのため、オンボード PC のようなグラフィック処理のためのメモリが多い演算機を増設し、従来のマイコンをアクチュエータ制御用の下層 CPU とするシステムに更新する。これに追加して、クローラ移動における自己位置推定の精度向上のために、従来のロータリエンコーダによるホイールオドメトリに IMU による移動量の推定を追加する。これは屋内実験時のクローラ移動時に路面とのスリップによる自己位置算出のずれが大きく、この値を基にした自律移

動が実用レベルにまで導入できなかったためでもある。次に、段差溝における考えうるシチュエーションに対する解決方法と動作手法について述べる。

はじめに溝幅が一定でない場合、左右のクローラに対しての溝幅が異なる場合、左右の溝幅を検出し計算する必要がある。そして、動作決定における溝幅は、大きな溝幅をする。提案手法では、この距離の平行な辺が存在するかのよに振る舞って乗り越え動作を行うことができる。

そこで、左右の溝幅を検出する測距システムを 2 つ設置することで、この問題を解決することができる。

ロボットが溝に対して直交していない場合、同じ問題として扱えるので、提案手法でも同じ解決策を用いることができる。

次に、溝端が丸みや斜面のようにシャープでない場合、4.4.2 節で示した測定距離の変化量が十分に得られず、溝縁の位置検出で大きな誤差が生じることがある。

この場合、ラウンドやスロープが小さい場合は、Fig. 31 で示した L_l 、 L_h の値に安全マージンを加えることが有効である場合がある。

その他にも、大きな円形や勾配の場合は、延長した道路面と壁面の交点を仮想の溝縁として溝幅を算出することが有効である。路面と壁面は、距離計測システムから得られる 2 次元点群によって 検出することができる。具体的には点群間の水平方向の変化量が一定の値を下回り、鉛直方向の変化量のみある場合に壁面と判断し、逆に鉛直の変化量が低く、水平方向の変化のみが得られた場合は路面とするような簡易的な手法をとればよいものとする。

つぎに、溝の壁面が垂直でない場合について考えてみる。例えば、急な崖のように壁面と奥の路面との角度が極端に小さい場合、壁面上の距離は検出できない。この場合、検出できないときの距離情報としてセンサの最大検出長を与

えるため、ギャップエッジを境に距離が急激に伸びることになる。したがって、提案手法は問題なく適用できる。

一方、壁面の傾斜が緩やかで、壁面と路面のなす角が大きく鈍角である場合、測定距離の微分が溝縁で負から正に変化しないため、提案するセンシング手法による自律的な段差溝走破は困難となる。この場合、3次元点群による形状検出など、別の方法が必要となる。

また、段差検出の際に、奥側の路面が測距装置より高い位置にある場合、段差を検出することができない。その場合、初期検出位置から奥側の縁を検出することが考えられる。しかし、路面が検出できないため、溝乗り越えを行うことが困難な場合がある。そこで、距離計測システムをより高い位置に取り付け、路面が検出できるようにすれば、十分な高さからギャップ幅を検出する提案手法による動作が可能になると考えられる。

最後に、路面形状が平坦でない場合について考える。路面に大きな凹凸が存在する場合、路面の変化量が連続的に変化しないため、溝縁の誤検出により提案手法の適用が困難な場合がある。

このような場合には、提案するセンシング手法に加えて、路面や壁面を検出する手法を追加する必要がある。例えば、急激な距離変化量を除去するための平滑化フィルタを用いることが有効であると考えられる。

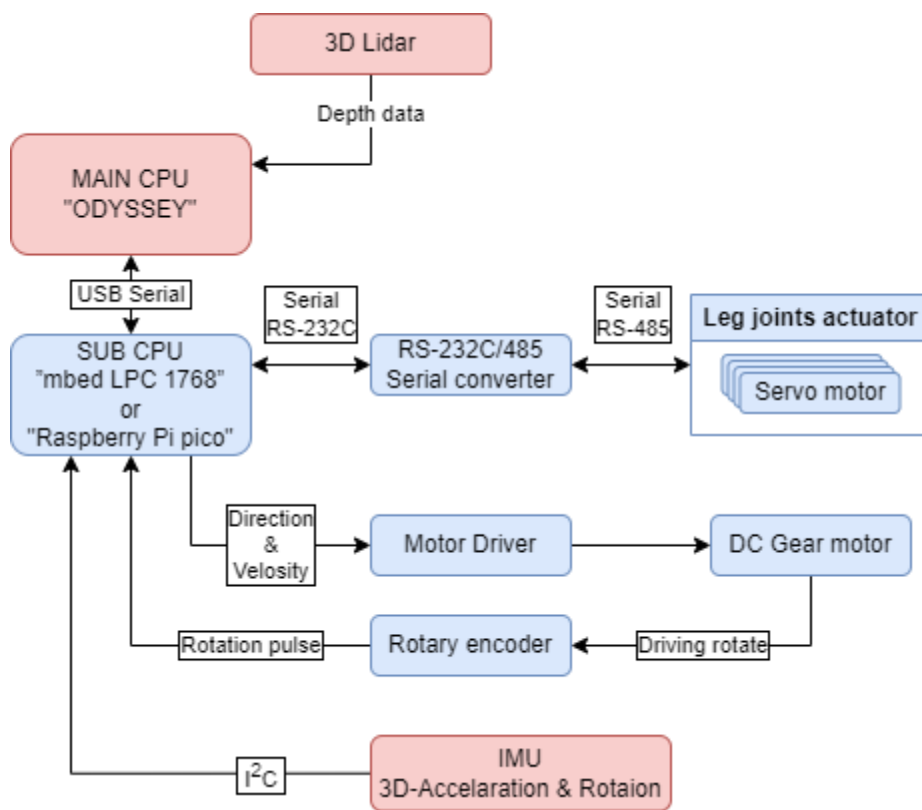


Fig. 41 搭載予定のシステム構成

6.3.2 板下対象物回収動作

基本的な改修については溝乗り越えと同様にクローラの路面との滑りを補正するための IMU を追加し、板を持ち上げる脚先位置と機体位置の制御を精度良く行うことが必要になる。また、板内部の環境を測定し、対象物周りの空間を測定することで対象物の持ち上げ可能を判断することができる。また、対象物操作を十分に行うために 6 自由度に脚機構をすべて改修する必要がある。

現在の前条件の中で板下に対象物があるとロボットは既知としているが、実際の動作では、ロボットに板内部の中に対象物があるかを判断させる必要がある。そのために、板の内部にカメラか距離センサを侵入させその内部に対象物があるかどうかを判断させればよい。これは脚先にセンサを取り付けたものを使用すればよいので、ロボット前脚に小型のセンサを取り付けて脚先を板内部に挿入して検査を行う動作を追加すればよい。この動作を「センサアームによる板内部の検査」とし、板下対象物回収動作の動作実験の後に検討を行う。

7章.

結言

本研究では 6 脚クローラ型不整地移動ロボットの開発とそのロボットで可能になる脚とクローラのハイブリッド作業と移動の解析のため、段差溝乗り越え運搬と板下対象物回収動作について研究を行った。それらの達成に必要な脚を作業腕として使用する対象物の持ち上げ持ち替えについて可操作度に基づく軌道生成の手法を提案し、シミュレーションと実機実験により手法の有効性を証明した。また段差溝乗り越え運搬について、幾何学的な動作の解析を行い、それに基づく動作計画や走破可能性について求める手法を提案し、実機による検証にて有用性を確認した。また、静力学的なモデルに基づく動作計画についても確認し、シミュレーションと実機実験により一連の段差溝乗り越え運搬動作を確認した。さらにこの動作の自律化のため赤外線距離センサとサーボモータを使用した 2 次元測距システムによる溝幅、段差高検出手法について提案し、検出した溝幅に基づく自律段差溝乗り越えを確認した。最後に板下対象物回収動作について、板持ち上げ時の脚先力についてシミュレーションを行った。

これらの 6 脚とクローラによるハイブリッド作業と移動がともに可能である点から 6 脚クローラ型不整地移動ロボットの有用性が証明できる。またそれらの自律動作のための各種手法を提案し検証を行った。これにより 6 脚クローラ型不整地移動ロボットによる自律動作にて自律動作を行わせることが可能であることを証明し、他の類似の機構を持つロボットに対しても有効であると考えられる。

今後の研究計画について、総論でも示したように段差溝乗り越え運搬と板下対象物回収動作ともに自律化に必要な技術について達成していないものについて各種導入し、それらに基づく動作の手法や検証を行っていく。例えば段差溝乗り越え運搬については段差溝乗り越え中の脚関節トルクの最適化制御を行うことで効率の良い動作が実現可能になると思われる。また、対象物運搬の自律化のために対象物の把持位置とそのための運搬対象物の認識が必要になる。これについては現状のシステム構成では実現が難しいためLIDARのような3次元測域センサやカラーカメラなどのイメージセンサによるロボットビジョンに関する技術の導入が必須になる。そのため、まずは静力学に基づく段差溝乗り越え運搬にて対象物認識と対象物把持位置検出を含めて一連の自律動作の検証を行う。その後、動的な段差溝乗り越えのための脚関節トルク制御について検証を行っていく。これにより段差溝乗り越え運搬動作の一般化が達成可能になるだろう。

また、板下対象物回収動作について、自律的に持ち上げを行う板の検出、認識について手法の提案を行う必要がある。これにもロボットビジョンに関する技術の導入が必要になる。最終的にはロボット自身が持ち上げ可能な板の姿勢・位置をそれぞれ認識し、その位置に対する脚先軌道を算出、その軌跡に応じて動作する手法の提案を行う必要がある。

また、これらの技術を達成するため、ロボットシステムと機体構成を更新する必要がある。それらの結果について、今後の研究発表にて公開していく予定である。

謝辞

本論文と研究活動を行うにあたって、学部生時代から博士課程前後期の長年にわたり、指導とご鞭撻をいただいた藤田豊己教授に多大なる感謝をここに示します。また、研究発表会などにて貴重な意見をさせていただいた電気電子工学科のシステム系の伊藤仁教授、水野文雄教授ご両名にも心から感謝いたします。

参考文献

- [1-1] Murphy, Robin R., Satoshi Tadokoro, and Alexander Kleiner. "Disaster robotics." Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016. 1577-1604.
- [1-2] K.Ueda, M.Guarnieri, T.Inoh, P.Debenest, R.Hodoshima, E.Fukushima, S.Hirose, "Development of HELIOS IX: An Arm-Equipped Tracked Vehicle," Japan Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 6, pp. 1031-1040, 2011.
- [1-3] T.Kamegawa, T.Yamasaki, F.Matsuno, "Evaluation of Snake-like Rescue Robot "KOHGA" for Usability of Remote Control, Proc," IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2005), pp. 25-30, 2005.
- [1-4] Sinha, Arnab, Panagiotis Papadakis, "Mind the gap: Detection and traversability analysis of terrain gaps using LIDAR for safe robot navigatio," Robotica 31.7, pp. 1085-1101, 2013.
- [1-5] E. Mihankhah, A. Kalantari, E. Aboosaeedan, H. D. Taghirad, S. Ali and A. Moosavian, "Autonomous staircase detection and stair climbing for a tracked mobile robot using fuzzy controller," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1980-1985, 2009.
- [1-6] GARCIA-CEREZO, A., et al. Development of ALACRANE: A mobile robotic assistance for exploration and rescue missions. In: *2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. IEEE, 2007. p. 1-6.
- [1-7] IAGNEMMA, Karl D., et al. Mobile robot kinematic reconfigurability for rough terrain. In: *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III*. SPIE, 2000. p. 413-420.
- [1-8] MOSKVIN, Ilya; LAVRENOV, Roman. Modeling tracks and controller for servosila engineer robot. In: Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" ER (ZR) 2019, Kursk, Russia, 17-20 April 2019. Springer Singapore, 2020. p. 411-422.

- [1-9] Koji Ueda, Michele Guarnieri, Takao Inoh, Paulo Debenest, Ryuichi Hodoshima, Edwardo F. Fukushima and Shigeo Hirose: "Development of HELIOS IX: An Arm-Equipped Tracked Vehicle" *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.23, No.6, pp.1031-1040, 2011.
- [1-10] 亀崎允啓, 東宏河, 陳奎, 片野貴裕, 金子大靖, 石田健蔵, 中山正之, 関雅俊, 一柳健, 菅野重樹: "電動型4腕式極限作業ロボット E-OCTOPUS の開発", 第35回日本ロボット学会学術講演会, 1K2-01, 2017
- [1-11] 羽澤寛志; 高橋俊太; 藤田豊己. "双腕を有するクローラ型不整地移動ロボットの障害物除去" (車輪型/クローラ型移動ロボット (3)). *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2012*. 一般社団法人 日本機械学会, 2012.
- [2-1] T.Fujita, T.Sasaki, "Consideration on a Crawler Robot with Six Legs," In *Proceedings of The 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2016)*, pp. 88-91, 2016.
- [2-2] T.Fujita, T.Sasaki, "Development of Hexapod Tracked Mobile Robot and Its Hybrid locomotion with Object-Carrying," *2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2017)*, pp. 69-73, 2017
- [2-3] IAGNEMMA, Karl D., et al. Mobile robot kinematic reconfigurability for rough terrain. In: *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III*. SPIE, 2000. p. 413-420.
- [2-4] KIMURA, Hiroshi; NAKANO, Eiji; NONAKA, Youichi. Development of leg-wheel robot and cooperational motion of legs and wheels. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 1992, 10.4: 520-525.
- [4-1] T.Fujita, T.Sasaki, "Consideration on a Crawler Robot with Six Legs," In *Proceedings of The 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2016)*, pp. 88-91, 2016.
- [4-2] T.Kamegawa, T.Yarnasaki, H.Igarashi, F.Matsuno, "Development of the snake-like rescue robot "kohga"," *IEEE International Conference on Robotics*

- and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004, Vol. 5, pp. 5081-5086, 2004.
- [4-3] R.Hodoshima, Y.Fukumura, H.Amano, S.Hirose, “Development of track-changeable quadruped walking robot TITAN X-design of leg driving mechanism and basic experiment,” 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp. 3340-3345, 2010.
- [4-4] S.Kobayashi, Y.Kobayashi, Y.Yamamoto, T.Watasue, Y.Ohtsubo, T.Inoue, T.Takamori, “Development of a door opening system on rescue robot for search “UMRS-2007”,” 2008 SICE Annual Conference. IEEE, pp. 2062-2065, 2008.
- [4-5] Deng, Hua, et al. "Object carrying of hexapod robots with integrated mechanism of leg and arm." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 54: 145-155.,2018.
- [4-6] Takemori, Tatsuya, et al. "Development of the multifunctional rescue robot FUHGA2 and evaluation at the world robot summit 2018." *Advanced Robotics* 34.2: 119-131.2020.
- [4-7] A.Motila, K.Kurt, “Real-time localization in outdoor environments using stereo vision and inexpensive gps,” 18th International conference on pattern recognition (ICPR'06), Vol.3, pp. 1063-1068, 2006.
- [4-8] K. N. Al-Mutib, E. A. Mattar, M. M. Alsulaiman and H. Ramdane, “Stereo vision SLAM based indoor autonomous mobile robot navigation,” 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO2014), pp. 1584-1589, 2014.
- [4-9] B. Joydeep, V.Manuela, “Depth camera based indoor mobile robot localization and navigation,” IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 1697-1702, 2012.
- [4-10] K. Pileun, C.Jingdao, C.Yong K “SLAM-driven robotic mapping and registration of 3D point clouds,” *Automation in Construction*, Vol. 89, pp.38-48, 2018.
- [4-11] N.Andreas, L.Kai, H.Joachim, S.Hartmut., “6D SLAM—3D mapping outdoor environments,” *Journal of Field Robotics*, Vol.24, No. 8-9, pp. 699-722, 2007.

- [4-12] T, Luka, Š.Igor, K.Gregor. "Using a LRF sensor in the Kalman-filtering-based localization of a mobile robot," ISA transactions, Vol. 49, No. 1, pp. 145-153, 2010.
- [4-13] 内田康之; 古市和也; 広瀬茂男. タンクテクノロジータンクテクノロジー 14, 1992.
- [4-14] 佐々木大雅,藤田豊己. "6脚クローラロボットの路面形状検出によるハイブリッド超壕と段差移動." ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019. 一般社団法人 日本機械学会, 2019.
- [5-1] 程島竜一, 福村泰明, 天野久徳, 広瀬茂男, "クローラ可変型4足歩行ロボット TITAN X の開発", 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.7, pp.872-879, 2010.
- [5-2] BHAVANIBHATLA, Kondalarao, et al. Design and Development of a Six-legged Mobile Manipulator for Education and Research (SiMMER). In: *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Control and Robot Technology*. 2019. p. 1-5.
- [5-3] THEERAVITHAYANGKURA, Chayooth, et al. Adaptive gait for dynamic rotational walking motion on unknown non-planar terrain by limb mechanism robot ASTERISK. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2013, 25.1: 172-182.

図表目次

Fig. 1 6 脚クローラ型不整地移動ロボット	14
Fig. 2 脚機構	15
Fig. 3 胴体部	16
Fig. 4 システム構成	17
Fig. 5 測距システム	17
Fig. 6 段差移動運搬	18
Fig. 7 溝乗り越え運搬.....	19
Fig. 8 脚歩行実験	20
Fig. 9 不整地登坂実験.....	21
Fig. 10 対象物持ち上げ持ち替え概要.....	23
Fig. 11 対象物持ち上げ時の前脚先動作モデル	24
Fig. 12 対象物持ち替え時の前脚先動作モデル	25
Fig. 13 脚先可操作度の導出フローチャート	30
Fig. 14 前脚の可操作領域	31
Fig. 15 中脚の可操作領域	31
Fig. 16 前脚中脚にて可能な脚先軌道.....	33
Fig. 17 前脚中脚間の対象物持ち替え時の脚先軌道.....	33
Fig. 18 対象物持ち上げ持ち替えのシミュレーション結果.....	35
Fig. 19 持ち上げ持ち替え中の手先位置	36
Fig. 20 持ち上げ持ち替え中の手先姿勢	36
Fig. 21 持ち上げ持ち替え中の関節角度	37
Fig. 22 対象物持ち上げ持ち替え実験.....	39

Fig. 23 段差溝乗り越え運搬の動作概要	43
Fig. 24 段差溝乗り越えの動作モデル	47
Fig. 25 段差高と溝幅に基づく走破可能性	49
Fig. 26 3次元的な段差溝乗り越えの力学モデル	51
Fig. 27 移動時の脚先力と関節トルクの計算結果	54
Fig. 28 段差溝乗り越えのシミュレーション結果	56
Fig. 29 段差高溝幅検出モデル	59
Fig. 30 段差溝検出シミュレーション結果($w:100[\text{mm}], h:0[\text{mm}]$)	59
Fig. 31 自律溝乗り越えの動作アルゴリズム	61
Fig. 32 溝幅と段差高検出実験環境	65
Fig. 33 段差溝検出実験結果 (a)上り段差($W:250[\text{mm}], H:85[\text{mm}]$) (a)下り段差 ($W:250\text{mm}, H:-85[\text{mm}]$)	65
Fig. 34 溝幅 100[mm]時クローラのみによる溝乗り越え	67
Fig. 35 溝幅 200[mm]時 脚補助による溝乗り越え	68
Fig. 36 溝幅 300[mm]時 走行不可による動作中断	68
Fig. 37 自律段差溝乗り越え運搬実験 (i) 上り段差($W:270[\text{mm}], H:20[\text{mm}]$) (ii) 下り 段差 ($W:250[\text{mm}], H:-40[\text{mm}]$)	70
Fig. 38 板下対象物回収動作概要	75
Fig. 39 板下対象物回収動作時の動作モデル	77
Fig. 40 対象物持ち上げ時の鉛直方向の脚先発生力	78
Fig. 41 搭載予定のシステム図	88
Table 1 段差溝検出実験結果	66

Table 2 段差溝乗り越え運搬に必要な技術.....	83
Table 3 板下対象物回収動作に必要な技術.....	84