

平成 27 年度

6 脚クローラ型不整地移動ロボットの開発
報告書

東北工業大学

工学部

知能エレクトロニクス学科

藤田研究室

2016 年 3 月



目次

1	はじめに	
1.1	背景	2
1.2	目的	2
1.3	意義	3
2	6脚クローラ型不整地移動ロボットの開発	
2.1	基本概念	4
2.2	設計	4
2.3	製作	6
2.4	制御システム	6
2.5	本ロボットの特長	8
3	基本動作実験	
3.1	クローラ不整地移動実験	10
3.2	6脚静歩行実験	10
4	脚の補助による溝乗り越え運搬	
4.1	動作の概要	11
4.2	動作実験	12
5	脚による対象物操作	
5.1	大型対象物の把持持ち上げ	14
5.2	ビジョンによる自律運搬	15
6	おわりに	18
	謝辞	18
	参考文献	19
	発表論文等	19

1. はじめに

1.1 背景

災害や事故等の危険な現場において、ロボットがレスキュー活動や関連作業を遂行することに期待が高まっている。ロボットは不整地現場を移動して情報収集するのみならず、そこで自ら作業を遂行する必要があるが、従来のロボットは移動機構が中心に考慮されており、作業への考慮が不十分である。具体的には、以下の問題がある。

- 脚部にクローラ機構が備わっている不整地移動ロボットが考案されているが、移動しながらの作業が困難である。

- 作業腕を有するクローラ型ロボットが開発されているが、その多くが腕が1個しかなく、物体の運搬などの作業ができない。

上記の問題を解決するためには、クローラなどの移動機構と脚機構を組み合わせ、移動能力の向上を図るとともに、脚を作業腕として用いることで作業を可能にする方式が有効である。そこで本研究室で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、脚機構とクローラ移動機構を用いたハイブリッド移動と作業動作について研究を検討してきた[1]。しかし、それでも溝乗り越え補助をしながら対象物運搬など、4脚だけでは実現不可能な動作があることや、安定した静歩行が困難であるという問題がある。移動性能や作業能力の向上のためには6脚を有することが望ましい。

1.2 目的

この問題点を解決するために、本研究では6脚クローラ型不整地移動型ロボットを開発することを目的とする。具体的には、胴体にクローラが装着された6脚を有する不整地移動ロボットの構成とする。そして、路面状況に応じて移動形態を切り替えることで移動性能を向上し、現場での作業に有益となるよう移動しながらの運搬、把持、除去などの物体操作が可能となることを目指す。

1.3 意義

本研究で開発する6脚クローラ型不整地移動ロボットには以下の特徴がある。

- 路面状況に応じてクローラ走行と歩行移動を切り替えることができるので移動性能が向上する。

- クローラ走行時に脚を腕として使用することで、移動しながらの運搬や物体操作が可能となる。

- 前の2脚を腕として使用して4脚で歩行することもできる。

そして、以上で述べたロボットを開発することができれば、災害や事故現場でのレスキュー活動において以下のことが可能となる。

- 従来のロボットにはできなかった現場での物体操作等の作業ができる。

- 人間が入ることが困難な危険な状況でも真っ先に現場に向かいある程度の作業ができる。

- そのため、一刻を争う状況における復旧活動に役立つことができる。

これらが実現できれば、ロボットが実際の災害現場等で有効に使用することができ、今後の災害や事故の対応において極めて有益となることが期待できる。

近年、大規模災害や事故により甚大な被害が発生するケースが多くみられる。その現場のほとんどは人間が入り込むことも危険である状況であり、ロボットが現場で各種作業を遂行できれば、一刻を争う状況での対応も可能となる。しかしながら、従来のレスキュータイプのロボットは移動機構を中心に考慮されており、作業可能な機能を有しているものはみられないため、現在は現場での情報収集程度の活動しかすることができない。ロボットには現場で自ら関連作業を遂行することが望まれる。本研究により災害や事故現場で実際に作業をすることができるロボットが開発されれば、人間が入ることが困難な危険な状況でも真っ先に現場に向かいレスキュー活動を開始することができる。ロボットが直接人命救助活動をするには数多くの技術的課題を解決する必要があるが、少なくとも、物体操作等の作業機能を有すれば、瓦礫の除去や被災者探索時の不要物除去、現場の状況把握のための資料の収集などができ、一刻を争う状況においての迅速な救助活動への対応が可能となるであろう。これらの点から本研究は非常に意義深い。

2. 6脚クローラ型不整地移動ロボットの開発

2.1 基本概念

4脚クローラ型不整地移動ロボットを6脚クローラ型不整地移動ロボットと比較すると、重量、コスト、制御の容易さの点では4脚クローラ型が比較的優れている。しかし、6脚クローラ型不整地移動ロボットでは、脚による静歩行がより安定することと、脚とアームとクローラを用いたハイブリッド動作が可能となる。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することとした。従来型の脚機構は4自由度のシリアルリンク機構であり、3自由度とすることで脚として用いることができる。さらに胴体部のクローラ移動機構は機体両側で駆動することにより通常のクローラ移動機構に比べ軽量かつ高い旋回性を得ることができる。そのため、開発するロボットの設計は従来型を引き継いで行うことにした。

2.2 設計

設計した6脚クローラ型不整地移動ロボットの概念図を図1に示す。従来の4脚クローラ型と同様に機体両側にクローラ移動機構を搭載し、機体両側に各3個の脚機構を搭載している。従来の4脚ロボットの機体を改造して製作するという方法もあったが、脚の増加に伴いボディ内スペースの確保が難しい、再製作が必要なフレームが多い、等の問題があったため、本ロボットは従来のロボットの構成を引き継ぎつつ、新規に機体を製作することにした。次に脚部の機構と概要をそれぞれ図2と図3に示す。脚機構は従来型と同様に4自由度のシリアルリンク機構とし、脚による直立時の機体の高さとその時の各関節角度を求め、最も適切な脚リンクの長さを決定した。各リンクの長さは、 $l_0=27[\text{mm}]$ 、 $l_1=85[\text{mm}]$ 、 $l_2=97.5[\text{mm}]$ 、 $l_3=85[\text{mm}]$ 、 $l_4=100[\text{mm}]$ である。次に胴体部概要を図4に示す。胴体部の設計も同様に従来型と同じものとし、クローラ移動の安定化を行うために機体重心をなるべく低くし、クローラベルトの接地距離を広くした。また、脚機構の増加による機体重量の増加を抑えるために、フレームの肉抜きやクローラベルトの幅を狭くするように設計を行った。

機体設計には株式会社 RS Components 社で配布しているフリー3-D CAD ソフトウェア「Design Spark Mechanical」を使用した[2]。これは実際の機体の完成形を視覚的に確認ことができ、さらに設計した3-D CAD のデータを

2-D CAD のデータに容易に変換できる． よって， 設計時に得られた 2-D CAD のデータを用いてすぐに切削することができる．

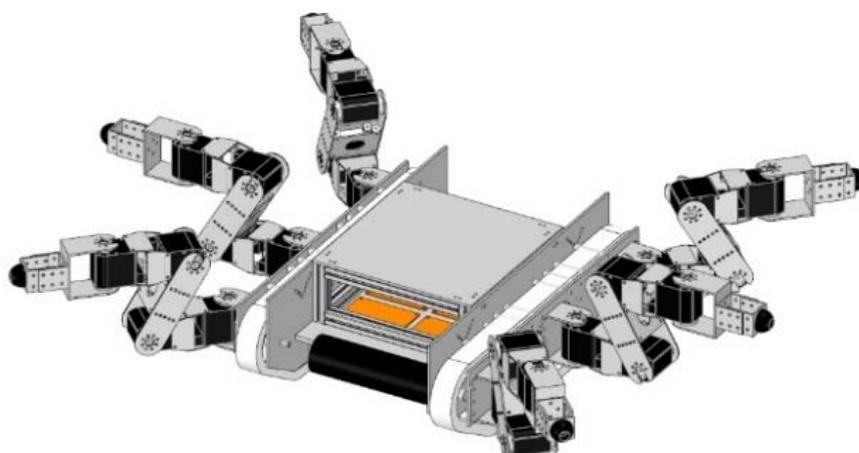


図1 6脚クローラ型不整地移動ロボットの概念図

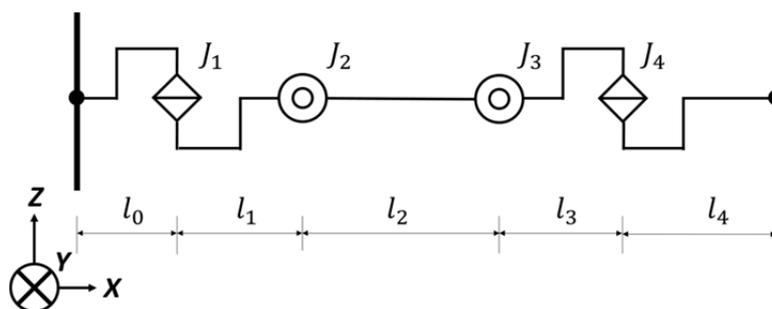


図2 脚機構

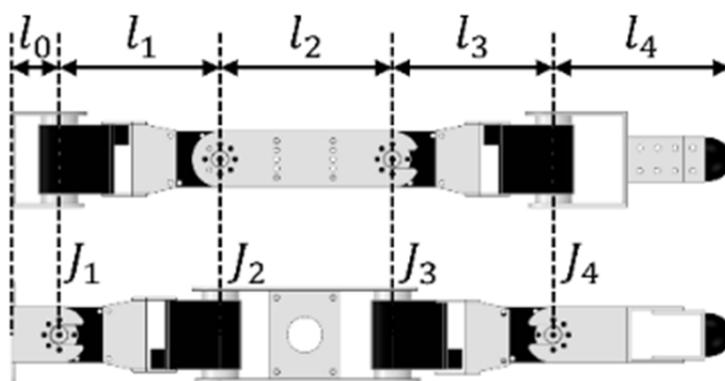


図3 脚部の概要

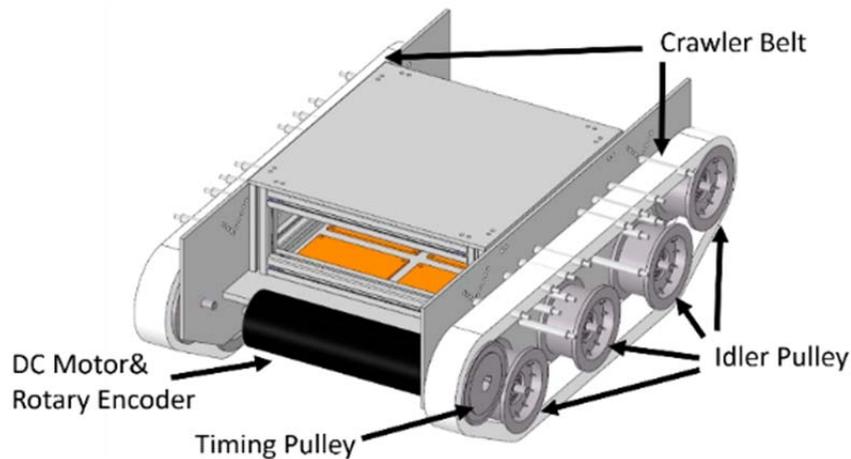


図4 胴体部の概要

2.3 製作

設計した脚機構リンクと胴体部側面のアルミフレームを CNC フライスにより切削を行った。CNC フライスには株式会社オリジナルマインド製の「Kit mill RD420」を使用した[3]。

開発したロボットを図5に示す。機体のサイズは、幅 350[mm]、奥行 370[mm]、高さ 150[mm] となった。重量は 10.5[kg] となり、従来の4脚クローラ型と比べて 0.5[kg] のみの増加に抑えることができた。開発したロボットの胴体部を図6に示す。サイズは設計通りに完成し重量は 6.3[kg] となった。開発したロボットの脚機構を図7に示す。設計通りに完成し、重量は 0.7[kg] となった。

2.4 制御システム

ロボットの制御システムの概要を図8に示す。クローラ制御部(Track Control Unit)と脚機構制御部(Leg Control Unit)、そしてマイクロコンピュータ「mbed LPC 1768」から成る。マイクロコンピュータより各制御部へ信号を伝送する。脚機構制御部では各脚関節角度の指示が行われる。マイクロコンピュータとの通信において Serial Transceiver を使用し、シリアル通信でマイコンが用いる RS-232C 規格とサーボモータで用いる RS-485 規格との変換を行う。クローラ制御部では DC Motor の回転方向と速度制御が行われる。マイクロコンピュータから PWM 信号と回転方向制御信号が Motor Driver に送られ、Driver が PWM 信号の Duty 比に応じて DC Motor の回転速度を変える。また、Rotary

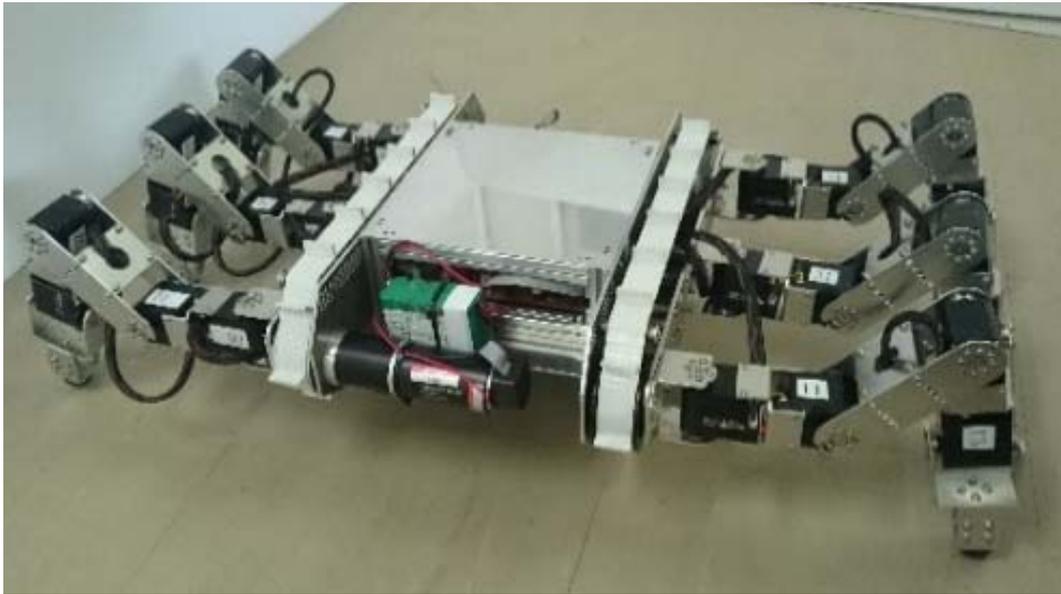


図5 開発した6脚クローラ型不整地移動ロボット

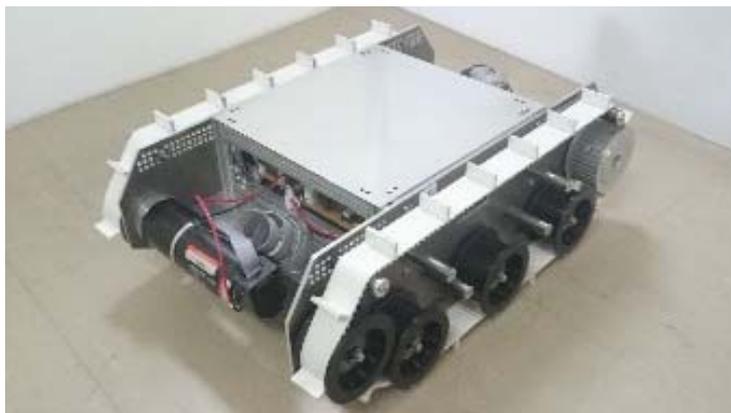


図6 開発したロボットの胴体部

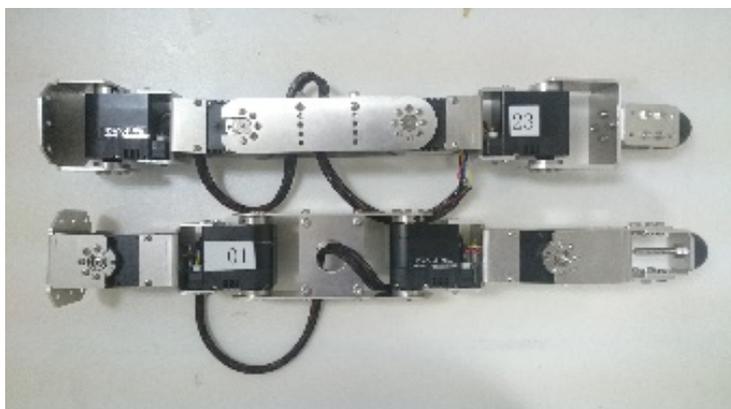


図7 開発したロボットの脚機構

Encoder から得られた回転角速度がマイコンへ送られる。各制御部とマイコンの回路設計にはフリーPCB CAD ソフトウェア「mbe」を使用した。これを用いることによって回路のパターンを設計することができ、回路パターンデータを2-D CAD データに変換できる。これより機体製作と同様に CNC フライスで切削を行うことができた。

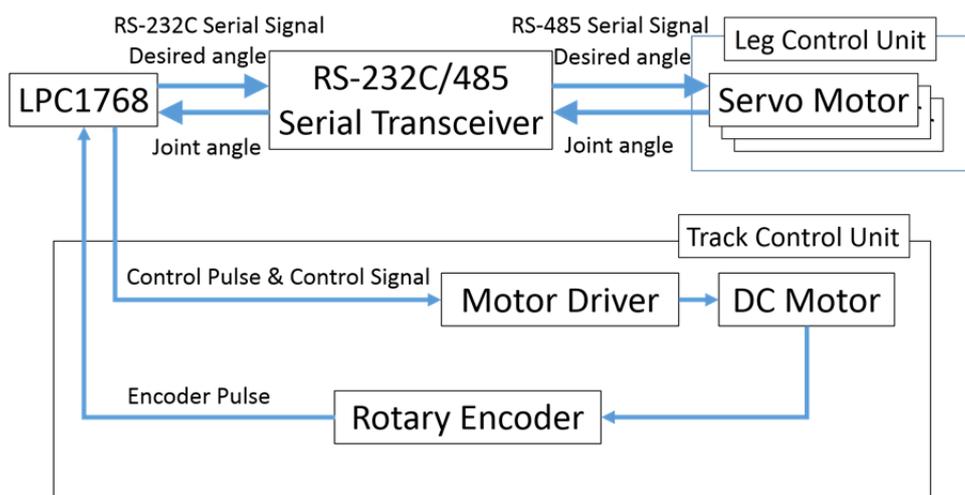


図8 制御システム

2.5 本ロボットの特長

開発したロボットは、従来の4脚型と同様に、クローラ移動時に各脚を作業腕として使用することにより、移動しながらの対象物の操作や運搬を可能とする。さらに、従来型より脚が2本多いため、作業しながらの脚とクローラの同時使用によるハイブリッド作業と移動が可能である。例えば、図9のようにクローラのみでは安定して移動できない急な段差を、脚による補助により支持しながら、安定して移動するとともに対象物を運搬することが可能になる。また、図10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安定して運搬することができる。

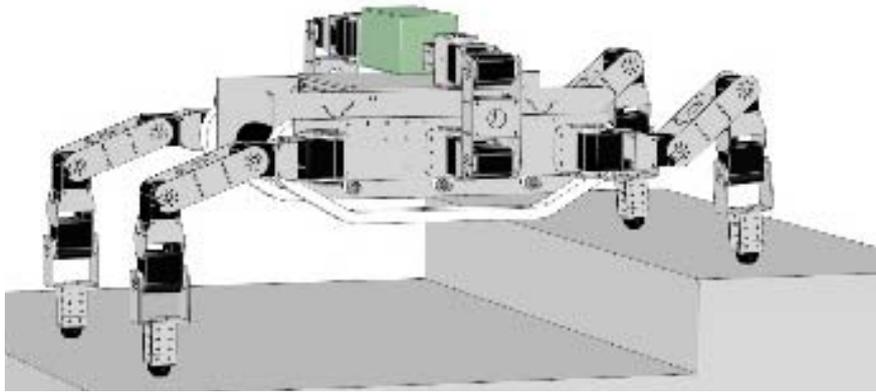


図9 段差移動しながらの対象物運搬

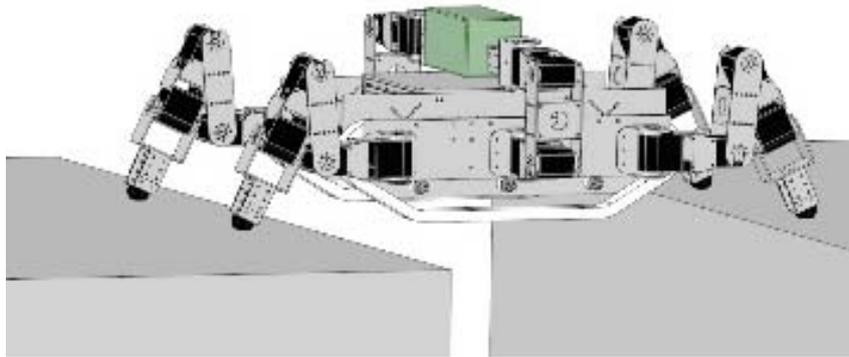


図10 脚の補助により溝乗り越えしながらの対象物運搬

3. 基本動作実験

3.1 クローラ不整地移動実験

開発したロボットの基本動作実験として、クローラによる不整地走行を行った。不整地での走破性を確認するため木材で出来た不整地の坂を用い、そこを登坂させた。その結果を図 1 1 に示す。1~3 の順で動作の連続画像を示している。傾斜 10° の不整地登坂を確認することができた。

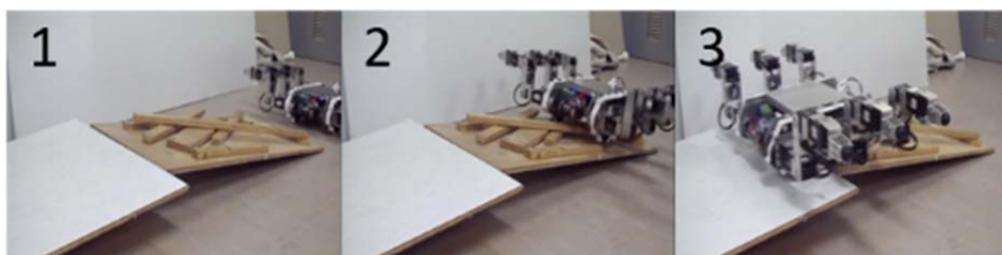


図 1 1 クローラによる不整地登坂走行実験

3.2 6脚静歩行実験

開発したロボットの基本動作実験として、6脚による静歩行を行った。今回は基本動作を検証するため平坦な床の室内でトライポッド歩容[4]を用いた静歩行実験を行った。その結果を図 1 2 に示す。1~5 の順で動作の連続画像を示している。歩幅を 200mm とし、毎分 2m の移動速度での安定した歩行を確認した。

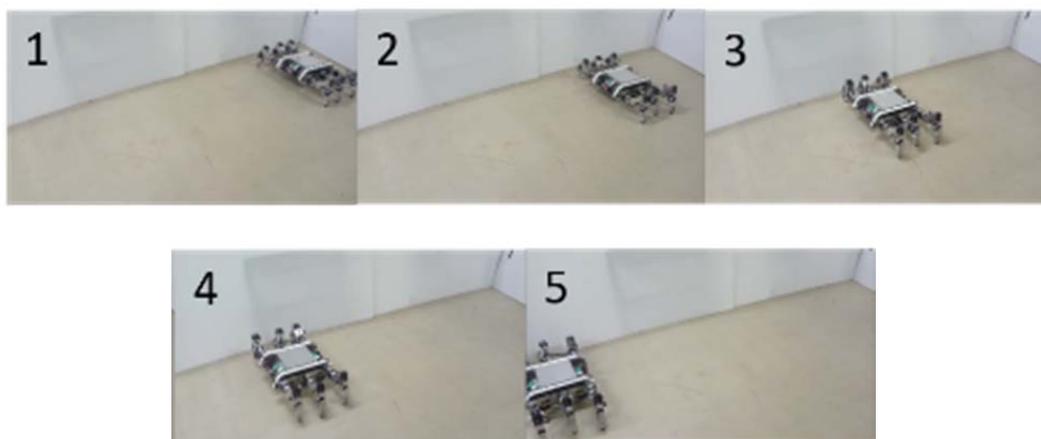


図 1 2 6脚静歩行実験

4. 脚の補助による溝乗り越え運搬

4.1 動作の概要

脚とクローラをともに用いた動作による、対象物を運搬しながらの溝乗り越えを検討した。動作の概要を図13に示す。溝の前後の路面は水平で同一の高さであるものとし、ロボットの動作は十分低速であるとする。前2脚および後2脚は脚が機体前方および後方を向くよう第1関節を回転して固定する。また、前後脚は第4関節を $0[^\circ]$ に固定し、3自由度の脚として使用する。中2脚は作業腕として使用し、対象物を把持する。図13①~⑩はこのときの運搬しながらの溝乗り越えの一連の動作の側面図である。最初は対象物を中脚2本で把持したまま通常のクローラ移動をしており、胴体前方が溝に到達する(図中①)。そしてロボット重心が溝の縁の直上に達する直前で前脚を対岸に接地する(②)。このときから前脚補助支持期となり、前脚で支持しながらクローラ移動を行い(③)、クローラ後端が縁の直上に到達する直前で後脚を接地する(④)。この時から前後脚支持期となり、前後脚のみで本体を支持して移動を行い(⑤)、クローラの前端が対岸に接触した後(⑥)、クローラ駆動を再開し前脚を離す(⑦)。このときから後脚補助支持期となり、後脚による支持で補助しながら移動し(⑧)、ロボット重心が対岸の縁の直上に到達したら(⑨)後脚を離し、動作を完了する(⑩)。

本動作で乗り越えられる最大の溝の幅 W_{max} は次式により求めることができる。

$$W_{max} = L_{max} + L_{cmh} - (L_{min} + L_{ch}) \quad (1)$$

L_{max} と L_{min} は脚先接地可能な脚姿勢での最大と最小の脚ベースと脚先間の水平距離である。 L_{cmh} はロボット重心と脚ベース間の水平距離である。 L_{ch} はクローラ走行面前端に対する前脚ベースの水平位置である。本研究で開発したロボットの場合、機構的な拘束により、 L_{max} が $367.6[\text{mm}]$ 、 L_{min} が $207.4[\text{mm}]$ 、 L_{cmh} が $145[\text{mm}]$ 、 L_{ch} が $45[\text{mm}]$ となる。よって最大溝乗り越え幅は式(1)より $260.2[\text{mm}]$ となる。

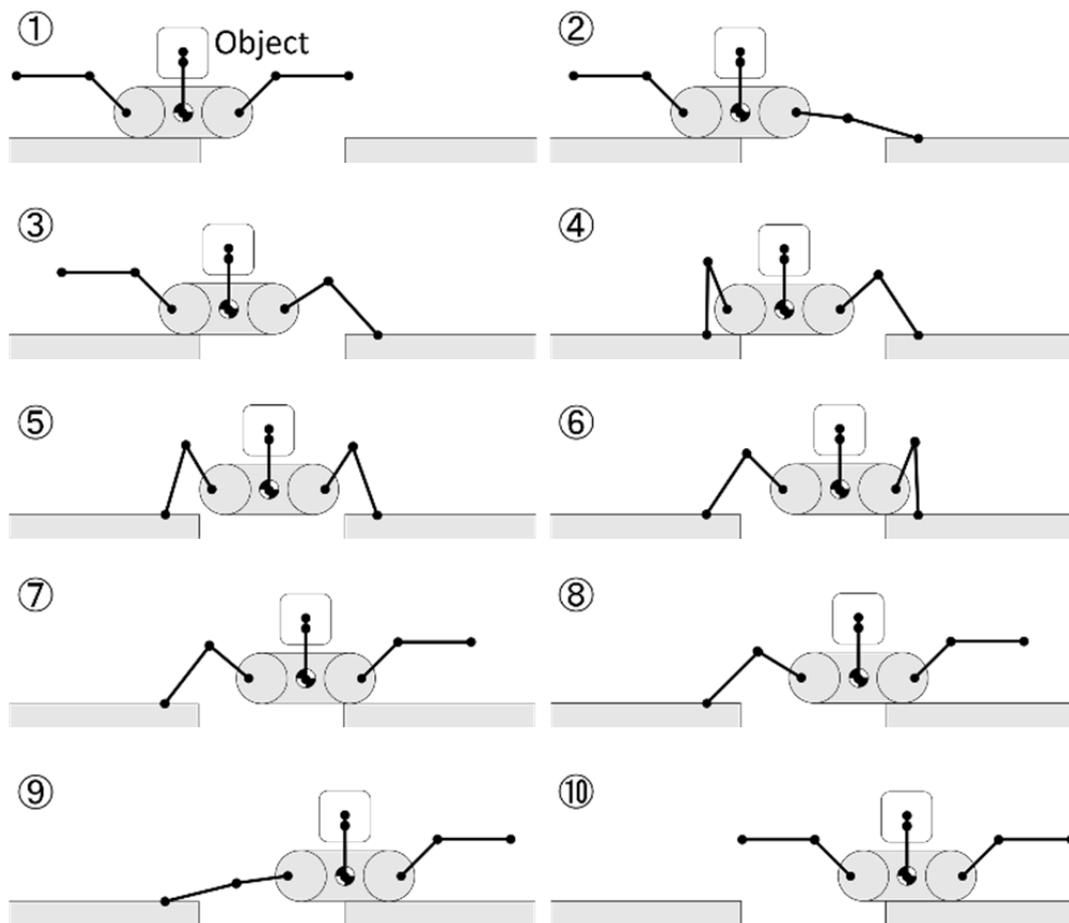


図 1 3 脚の補助による溝乗り越え運搬動作

4.2 動作実験

前節で述べた方法に基づき、平坦な床上に 2 枚の板を使用して設置した溝を、ロボットに箱状対象物を保持させながら走破させた。この実験の概観を図 1 4 に示す。このときの溝の幅は 260[mm]である。図中 1～3 はそれぞれ前脚補助支持期、前後脚支持期、後脚補助支持期の状態を表しており、図 1 3 の③・⑤・⑧に対応している。胴体長さに対してほぼ 70[%]の幅の溝を、脚による補助により対象物を運搬しながら乗り越えを確認した。

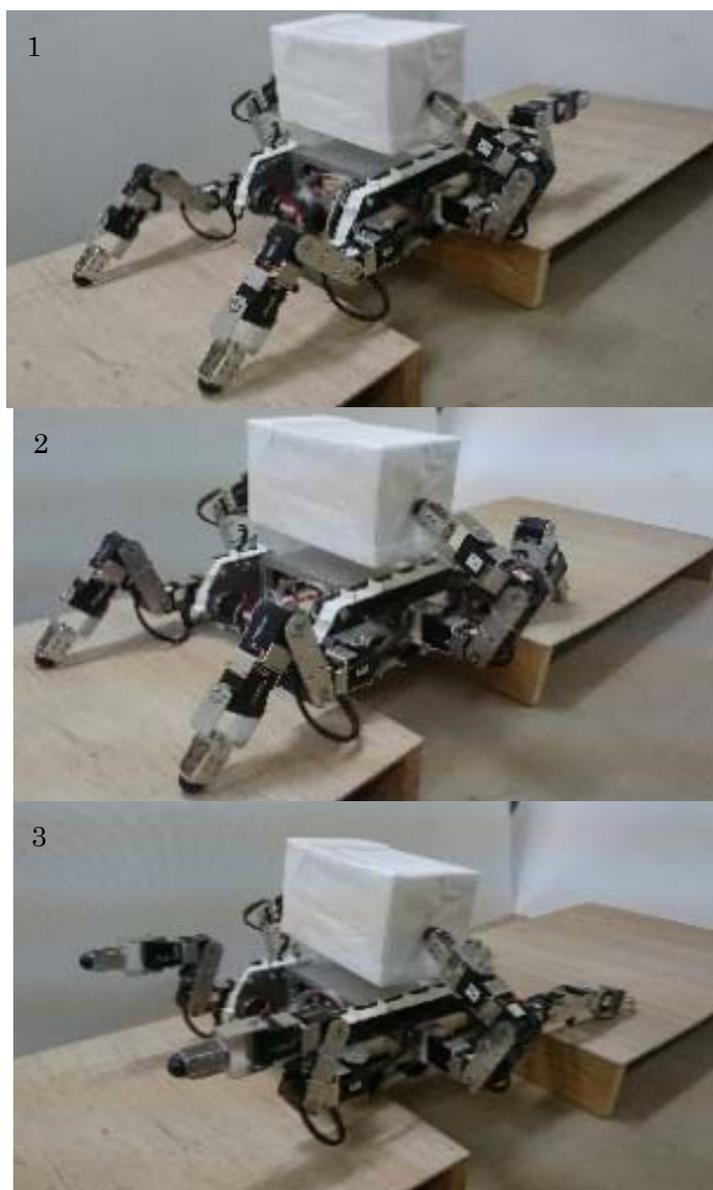


図 1 4 脚の補助による溝乗り越え運搬動作実験

5. 脚による対象物操作

5.1 大型対象物の把持持ち上げ

開発したロボットの脚先は、歩行や移動補助時に路面に確実に接触できるよう半球状に突起している。しかし、作業時はそれで対象物を挟んで把持することになるため、大型の対象物や球状の物体を扱うことが難しい。そこで、通常の歩行動作も可能とする形態可変型ハンド機構を考案し、それを脚先端に搭載して作業能力を向上できるようにした。

考案したハンド機構を図15に示す。通常の歩行とともに様々な形状の対象物の把持を可能にするには歩行時に脚の突起部が路面と接することができる機構である必要がある。そのため、[5],[6]の研究を参考にし、脚機構の先端の左右にハンドを開閉するためのモータを設置し、ハンド部を装着した。これにより、作業時は対象物の形状に応じて角度を変えてハンド部を開くことができ、また歩行時にはハンド部を脚先に添わせるように全開させることで従来通り先端の突起部を使用することができる。

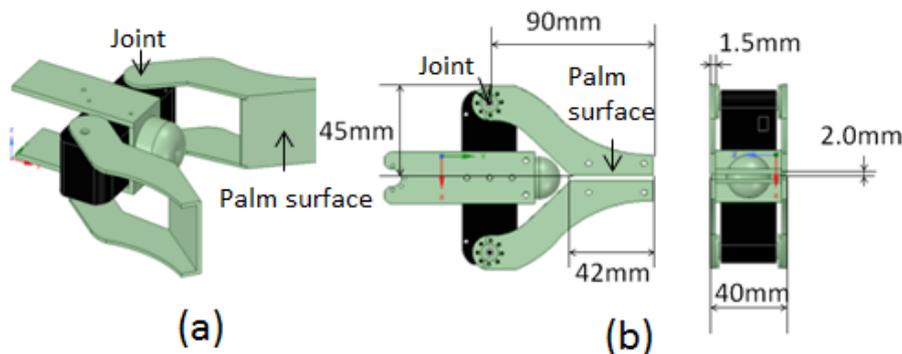


図15 形態可変型ハンド機構 ((a):概要図、(b):側面図)

このハンド機構を設計・製作し、4脚クローラ型ロボットの前2脚に装着して対象物把持実験を行った。

大型箱状対象物の把持実験を図16に示す。長さ210[mm]、幅220[mm]、高さ160[mm]、重さ150[g]の直方体の物体を把持し、機体上部へ積載した。先端が従来の突起部のみで行った場合は対象物が回転して失敗したが、ハンド機構を用いることで対象物を水平に保ったまま安定して持ち上げることができた。

次に球状対象物の把持実験を行った。対象物として直径160[mm]、直径210[mm]のボールを使用し、開発したハンド機構により把持持ち上げを行った。この結果を図17に示す。先端が突起部のみの場合は把持不可能な対象物を、

考案したハンド機構を用いることで把持が可能となることを確認した。

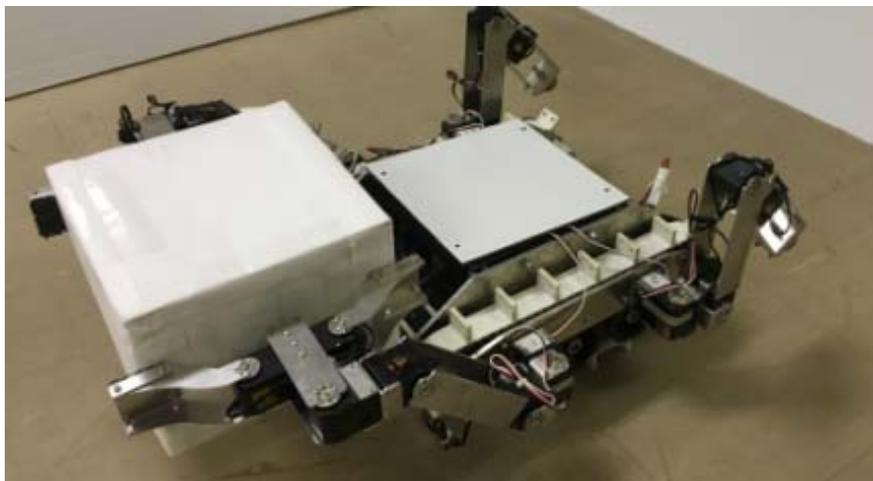


図 1 6 大型箱状対象物把持実験

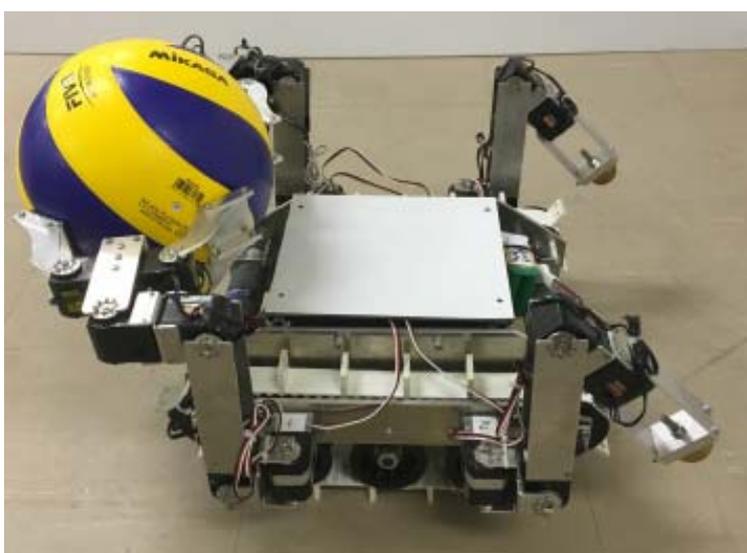


図 1 7 球状対象物把持実験

5.2 ビジョンによる自律運搬

開発したロボットの自律作業実現に向けて、RGB-D センサによるセンシングシステムを構築し、対象物運搬時にセンサ情報から対象物把持位置を自動的に取得して把持持ち上げできる機能を検討した。RGB-D センサは、ビジョンによ

るカラー画像とともに距離情報も同時に取得できるセンサであり、非常に有用である。本研究では、このセンサをロボット胴体上の前部に搭載し、前方の対象物の把持位置を検出して自律的に運搬作業ができるようになることを目指す。

今回はその最初の段階として、ロボットを遠隔操作するオペレータが、ロボットから送信されるカメラ画像から対象物の位置を判断し、ロボットを対象物直前まで移動させた後、ロボットが自律的に対象物の把持位置を検出するようにする。把持位置検出のため、最初にテンプレートマッチングを行い、対象領域を絞り込む。次に深度画像の対象領域に対して FAST[7]を適用し特徴点を検出する。FAST は決定木を用いてコーナーを検出する手法であり、高速な処理が可能となる。そして、取得した特徴点から上面の 4 頂点および物体と床との境界点を検出し、それらの平均位置から把持位置を算出する。

深度画像に対して FAST を用いて得られた特徴点を図 1 8 に示す。図中赤枠が絞りこまれた領域、青点が特徴点である。また、検出された対象物の頂点を図 1 9 に示す。 P_{lh} 、 P_{rh} は左右の物体と床との境界点である。右側の把持位置は P_2 、 P_4 、 P_{rh} の座標値から求められ、左側の把持位置は P_1 、 P_3 、 P_{lh} の座標値から求められる。

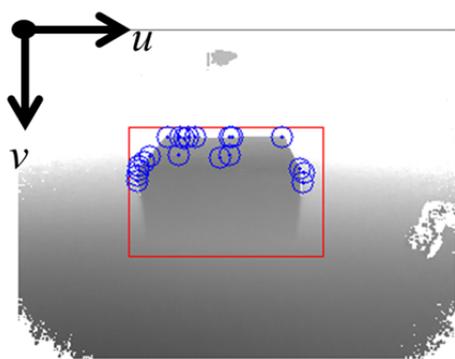


図 1 8 検出された特徴点

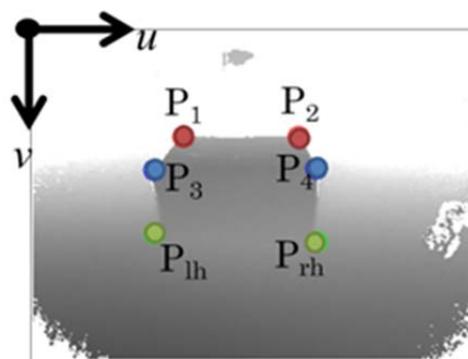


図 1 9 検出された頂点

以上で述べた方法に基づき、把持運搬動作実験を行った。ここでは前 2 脚を有するロボットを使用し、その機体前上に RGB-D センサシステムを搭載した。実験は平坦な床上の室内で行い、対象物には、長さ 205[mm]、幅 270[mm]、高さ 100 [mm]、質量 175g の箱を使用した。初期状態でロボットは対象物からおおよそ 4~5m ほど離れた地点に位置し、オペレータは自身から対象物が見えない位置からリモート PC の画面を見ながらロボットを操作し、対象物の手前で停止させる。そして、ロボットがセンサ情報に基づき把持位置を検出し、その位置

に応じて適切な手先位置となるよう前後移動して脚を制御して把持動作を行う。

この実験結果を図20に示す。(a)で対象物へ移動し、(b)で対象物正面に接近している。(c)からロボットは自律動作し、把持位置を算出して適切な位置に前後移動している。そして、(d)で把持位置へ両腕手先を移動し、(e)で対象物を把持し、(f)で対象物を持ち上げている。この結果より、本手法での対象物の自律的な把持運搬が可能であることが確認できた。

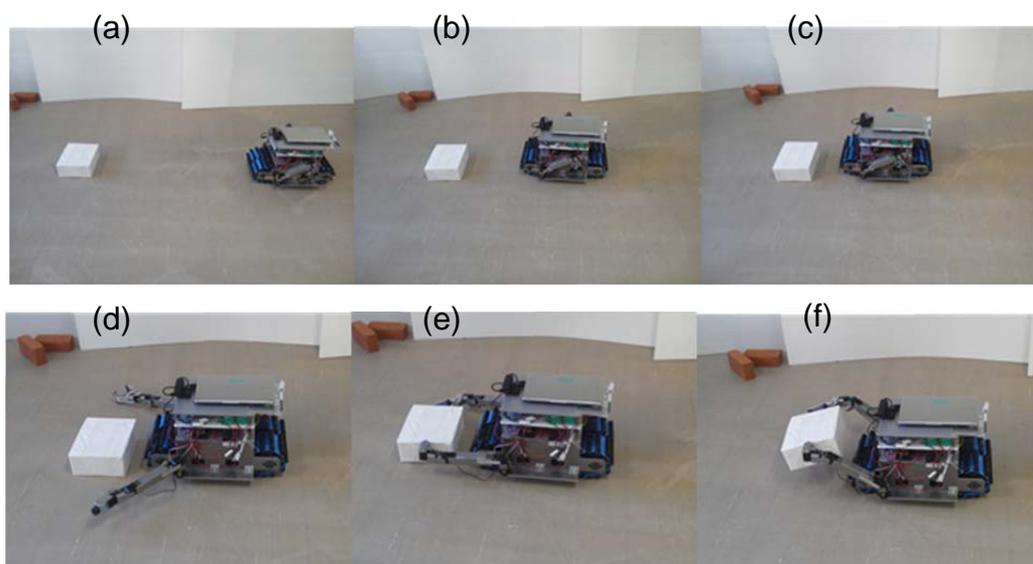


図20 把持運搬実験

6. おわりに

本研究では、6脚クローラ型不整地移動ロボットを開発しその基本動作を確認した。また、作業性能の向上のため、形態可変型ハンド機構を考案し、大型対象物操作を可能にした。さらに、ビジョンに基づくセンサシステムにより自律的な対象物把持運搬が可能になることも示した。

本研究で開発したロボットにより、災害や事故において従来のロボットにはできなかった現場での物体操作等の作業が可能となる。人間が入ることが困難な危険な現場でも作業が可能となるので、一刻を争う状況において迅速な救助活動に対応できる。また、レスキュー隊員の負担も軽減することが期待できる。近年の自然災害は規模が大きくなる傾向があり、レスキュー隊員でさえも危険となる状況も少なくない。本ロボットはそのような場合で特に有効となり、本研究成果の重要性は非常に高いと言える。

そして、本研究の成果により、不整地移動において、ロボットによるクローラと脚を用いた新たな様々な形態での移動方法を新規に示すことができた。今後、より効率的な移動を実現することができ、不整地現場でのロボットの移動性能の向上や、作業しながらの移動が可能になる。また、本構成のロボットにより実際の救助活動に向けた様々な要素技術についての課題が明らかになり、この分野の研究がさらに加速され、その結果、レスキュー現場でのロボットによる活動の実現可能性がより高くなることが期待できる。

謝辞

本研究は、公共財団法人 JKA の平成 27 年度自転車等機械工業振興事業に関する補助(27-106)を受けて実施されたものである。心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 土屋雄一, 佐々木大雅, 藤田豊己, "4脚クローラ型不整地移動ロボットにおける脚を用いた移動と作業動作", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1P2-F05, 2015
- [2] 株式会社 RS Components, "Design Spark Mechanical",
<http://www.rs-online.com/designspark/electronics/jpn>
- [3] 株式会社オリジナルマインド, <http://www.originalmind.co.jp>
- [4] 米田 完, 坪内孝司, 大隅 久, "はじめてのロボット創造設計", 講談社, 2001
- [5] 中本秀一, 小川秀樹, 松日楽信人, 広瀬茂男, "食器類ハンドリングのための下面支持ハンドの開発 (コンセプト提案とアームシステムへの適用設計)", 日本機械学論文集 (C編) 79 巻 807 号, pp.4275~4285, 2013
- [6] 鈴木知之, 堀口博之, 西川晶宏, 江上正, "形態可変型ロボットハンドの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演論文集, 1P1-52-080, 2000
- [7] 後藤雄飛, Machine leaning for high-speed corner detection, FLAB Work Document Oct 11, 2011.

発表論文等

- 1. Toyomi Fujita and TIGA 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. Toyomi Fujita, Taiga Sasaki, and Yuichi Tsuchiya, "Hybrid Motions by a Quadruped Tracked Mobile Robot," In Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR2015), 2015
- 3. Toyomi Fujita and Yuichi Tsuchiya, "DEVELOPMENT OF A QUADRUPED TRACKED MOBILE ROBOT," In Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2015,
- 4. 瀬川渉, 藤田豊己, "双腕クローラ型不整地移動ロボットによる RGB-D セ

- ンサを用いた箱状対象物の把持位置検出の精度評価, " 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 YS-14-E3, pp.133-134, 2016.
5. 佐藤郁弥, 藤田豊己, "不整地作業用ロボットの形態可変型ハンド機構の開発, " 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 YS-14-E4, pp.135-136, 2015.
 6. 佐々木大雅, 藤田豊己, "6脚クローラ型不整地移動ロボットの開発, " 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 YS-14-E5, pp.137-138, 2015.
 7. 瀬川渉, 藤田豊己, "双腕クローラ型不整地移動ロボットにおける RGB-D センサを用いた箱状対象物の把持位置検出, " 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2015), 2G1_4, pp.1464--1467, 2015.
 8. 土屋雄一, 佐々木大雅, 藤田豊己, "4脚クローラ型不整地移動ロボットによる板下の対象物回収動作, " ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 (ROBOMECH2015) 講演論文集, No.15-2, 1P2-F05, 2015.