

情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究(第2報)

田畑 克彦 稲葉 昭夫 張 勤 天野 久徳*

Development of Mobile Robot to gather Information for Relief Activities -2nd report-

Katsuhiko TABATA Akio INABA Qin ZHANG Hisanori AMANO*

あらまし 大震災等の大規模災害後の災害危険区域における要救助者捜索などの救助作業は、常に二次災害の危険にさらされる状況下であるため、二次災害による人的被害を軽減し、要救助者を安全に発見する一手法として、災害救助ロボットの開発とその利用が期待されている。これらの開発には、建築物の倒壊により生成されたガレキ内外において高い不整地移動能力を有する移動機構の開発が不可欠である。そのため、本研究では不整地に対する走行能力が高い災害救助ロボットの移動プラットフォームを開発している。移動プラットフォームは、各面を移動ユニットで構成した擬似立方体形状であり、各面はアクティブなジョイントにより接続されているので、展開図の形状をとることも可能である。したがって、移動ユニットである各面を展開することにより、不整地の路面状況に応じた形状変化を伴う移動手法をとることができるので、高い踏破性能を持たせることができる。本年度は、昨年度製作した部分試作機の移動戦略の実験的検証と、部分試作機に改良を加えた完全形態の試作機の製作およびその移動戦略の実験的検証をおこなったので報告する。

キーワード 災害救助ロボット, 移動機構, 形状変化機能, 大規模災害, 救助作業

1. はじめに

阪神淡路大震災やアメリカ同時多発テロ事件を契機に、危機管理のあり方が積極的に議論され、防災システム、救助システム等の整備が緊急課題として挙げられている。大震災等の大規模災害後の災害危険区域における要救助者捜索などの救助作業は、常に二次災害の危険にさらされる状況下であるため、二次災害による人的被害を軽減し、要救助者を安全に発見する一手法として、災害救助ロボット(レスキューロボット)の開発とその利用が期待されている^[1]。

レスキューロボットの開発には、建築物の倒壊により生成されたガレキ内外において高い不整地移動能力を有する移動システムの開発が不可欠である。

現在、複数の移動ユニットを直線的に連結した擬似ヘビ型の災害救助ロボットが数多く開発されている^[2~5]。この形態の移動機構は、進行方向に対する断面積が小さいため、狭部への進入に適しており、また長手方向に対する段差等の不整地に対しても高い踏破性を有している。しかし、ガイド(溝)地形のようなガレキ構造にはまった場合には、長手方向のみに高踏破性を有しているだけでは、ロボットのローリング運動によりガイド地形

から脱出することができず、結果としてロボットの活動範囲が制限されてしまう恐れがある。

これらの課題を解決するために、本研究では不整地に対する適応能力が全方向に対して高く、不整地走行中におけるロボットの安定性も高い災害救助ロボットの移動プラットフォームを考案し、開発している。

考案したロボットの独特な形状から、本研究の開発段階では”CUBIC-R (CUBIC Robot for Rescue)”と呼んでいるので、以降は簡便のため”CUBIC-R”と記述する。

本年度は、昨年度製作した部分試作機を用いて想定した不整地における走行実験を行い^[6~9]、機構的に不整地において走破可能なことを実験的に確認する^[8~9]とともに、機構的な問題点を抽出し、改良を加えた完全形態の試作機を製作した。また製作した完全試作機を用いて、想定した不整地走行実験を行ったので報告する。

2. CUBIC-Rの基本構造

図1にCUBIC-Rの概要を示す。本研究で提案したCUBIC-Rの形状は、擬似立方体であり、各面プラットフォーム(以下、面)に一对のクローラを搭載したクローラユニットを有する。また、このクローラユニットは、各面に対してヨー方向に1自由度を持つ結合機構により接続されている。この結合機構にはブレーキ機能を持たせているので、これをON/OFFすることで、各クローラユ

* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部

ニットは、信地旋回等により各面と独立にその方向を変化させることや、方向を保持することができる。また、正六面体を構成する各面には、面開閉機構が搭載されており、図1(b)のようにプラットフォーム全体の形状を展開図の状態に変化させることができる。

CUBIC-Rは、平地や軽度の凹凸路等の比較的平坦な路面では、図1(a)のように面を格納した状態で走行し、段差やギャップ上等の激しい凹凸の不整地では、走路の状況に応じて面を開閉し、移動機構の形状を変化させ、必要ならばクローラユニットを協調動作させることにより、ガレキ内もしくはガレキ上において高踏破性を実現する。

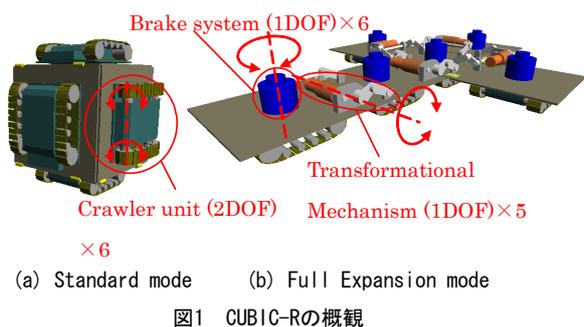


図1 CUBIC-Rの概観

3. CUBIC-Rの不整地踏破戦略

一般的に移動機構を開発するためには、その活動環境を明確にする必要がある。CUBIC-Rは1章で述べたように大小様々なガレキ環境に対応できることを目的としているため、そのような走行環境として、二次災害が発生する可能性のある半壊家屋内の移動を想定している。

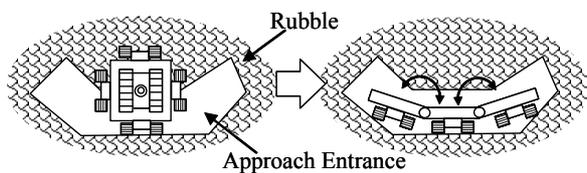


図2 狭い進入路への対応

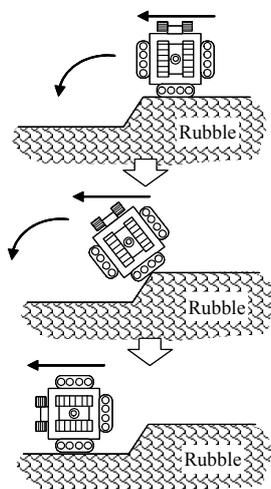


図3 スタック回避および起上り動作の解消

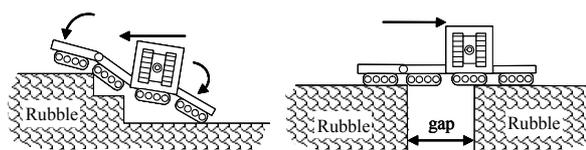


図4 段差(階段)の踏破

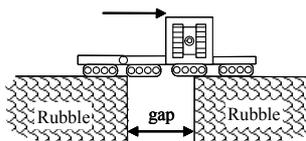


図5 ギャップの踏破

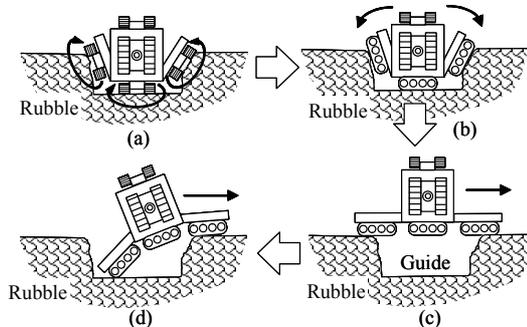


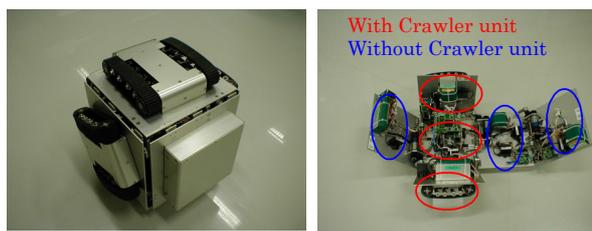
図6 ガイド(窪地)地形からの脱出

図2から図6に半壊家屋内のガレキ環境を想定し、それに対する移動戦略のイメージを図示する。詳細については、昨年度の研究報告および発表^{16,7)}において述べているので省略する。

4. CUBIC-Rの部分試作機

本研究で想定した移動戦略の機構面での実現可能性を探るために試作したCUBIC-Rの部分試作機の写真とその諸元を図7と表1に示す。

部分試作機は、図7に示すように、面開閉機構と3基のクローラユニットと結合機構を有している。表1より、試作機の総重量が27kgとなりやや重くなっているが、強度的に十分な安全を考慮した設計を行ったことも一因となっている。将来的には、細部にわたり軽量化を検討する予定である。



(a) Standard mode (b) Expansion mode

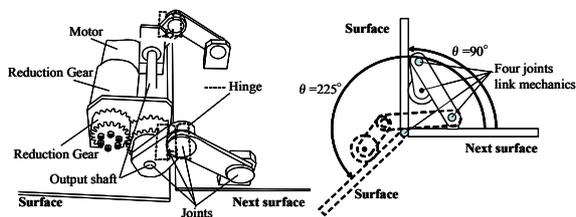
図7 CUBIC-Rの部分試作機

表1 CUBIC-Rの部分試作機の諸元

Total Weight	27.0kg
Cubic Size (Without Crawler unit)	260 × 260 × 260mm
Robot Size (Standard mode)	360 × 360 × 360mm
Robot Size (Full expansion mode)	1040 × 780 × 210mm

本試作機の面開閉機構には、図8(a)に示す四節閉リンク機構を採用している^[7]。この理由は、4節閉リンク機構は、回転軸にギヤ・プーリを使用した機構に比べて、面上に設置可能であり、面格納時にはCUBIC-Rの中に格納できるので、路面の塵等の噛みこみによるスタックの可能性を少なくできるためである。

また本機構の可動範囲を図8(b)に示す。当初、可動範囲を $\theta=90^\circ$ から 190° 程度に設定していたが、段差踏破の場面において、接地しているクローラユニットの登坂勾配が大きいため、その駆動モータにかかる負荷が大きくなり、50~60mm程度の段差しか踏破できない問題が生じた。このため、実装スペースの制限から、モータ出力を大きくせず、リンク機構に必要な出力^[7,8]を維持したままで可動範囲を広くとれるよう、リンク機構を再設計/製作した。これにより、200mm以上のより高い段差を踏破できるようになった。



(a) 概略図 (b) 可動範囲
図8 四節閉リンク機構

制御システムは、ロボット全体の運動を制御するコントローラの下に、各アクチュエータを制御するコントローラを配置する分散制御方式を採用した^[7]。これにより、コンパクトに配線することが可能になった。ロボット内の通信ネットワークとしては、単純で高速通信が可能なRS-485を採用した。

5. 部分試作機による不整地走行試験

図7の部分試作機を用いて、クローラの基本運動能力と、3章で想定している不整地の走行が機構的に可能であることを確認した。

基本運動能力については、クローラの駆動力を確認するために、登坂実験を行う。

また、想定した図2に示す狭い進入口への対応戦略は、理論的には、CUBIC-Rが長手方向へ展開した状態で進入する方法が最も断面積が小さくなり、狭部への進入が容易であるが、一概に断面積の大小だけでなく、その三次元的な形状にも影響されるため、定量的な判断は難しいので本報告では扱わない。ただし、本移動機構は、展開時には平たい形状になる特徴があるため、パンケーキ状に座屈した倒壊家屋内への進入に適していると期待できるが、将来的にNPO国際レスキューシステム研究機構が所有するテストフィールド^[10]で走行試験を行い、評価する必要がありと考える。

図3に示す転がりによるスタック回避と移動については、物理的に自明であるので省略する。

5. 1 実験形態

図9に示すように、本移動機構は3面方向と4面方向が存在するが、クローラユニットが装備されている3面を用いた走行実験を行った。その他の実験形態は以下の通り。

- ・4面方向の形状については、ロール方向のバランスを考慮し、格納した状態
- ・3面方向の面開閉機構については、独立に駆動可能
- ・進行方向を制御するための面とクローラユニットとの相対角は、それぞれについて、独立に変更可能
- ・前後進は、3面すべてのクローラユニットが前後進する
- ・操縦の便宜上、進行方向の面およびクローラユニットを常にSurface2とする

5. 2 登坂実験

○方法

木材の板の斜度を増大させ、登坂可能な斜度を計測する。この実験における評価条件は次のとおりである。

- ・CUBIC-Rを斜面に置いた状態でクローラユニットを駆動し、垂直に登坂させる
- ・斜度の変化は、試験機材の関係から12, 15, 24, 27, 及び32°, 38°とする
- ・二面登坂では、後方面を展開し、前方面を格納した状態で登坂させる

○結果

評価実験の結果を表2に示す。本実験で、少なくとも斜度27°の登坂が可能であることを確認した。また、この表より、ロボットを質点として扱って計算すると、駆動したクローラユニットの数量1, 2および3基に対する、登坂に必要な駆動力は、それぞれ68N,

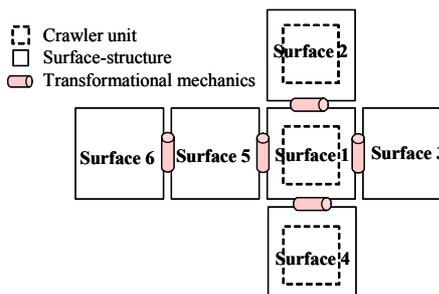


図9 面の名称

表2 部分試作機の走行試験結果

Item	Number of driving crawler unit	Result
Going up a slope	1 (Surface 1)	Inclination 15 degrees
	2 (Surface 1 and 4)	23 degrees
	3 (Surface 2, 1 and 4)	27 degrees
Climbing a step	3 (Surface 2, 1 and 4)	Height above 200mm
Climbing the stairs	3 (same as above)	Angle of flight 27 degrees (rise 160mm, tread 320mm)
Traveling across a gap	3 (same as above)	Width 325mm
Crawling out of a guide	2 (Surface 2 and 4)	Width 500mm Depth above 200mm

103Nおよび120Nであり、クローラユニット数と登坂に必要な駆動力とは比例関係にない。この理由として、斜面の勾配により重心が後方に移動し、前方面の垂直抗力が低下したために前方面の推力の伝達効率が低下している可能性が考えられる。

5. 3 段差の踏破実験

○方法

コンクリートブロックを用いて路面との垂直の段差を構築し、踏破実験を行う。

○結果

評価実験の結果を表2に示す。本実験で、少なくとも200mmの段差を踏破可能であることを確認した。

5. 4 階段の踏破実験

○方法

実験に用いた階段の形状を図10に示す。本実験では公共の建造物であるJRの駅の階段を模擬している。若干サイズがターゲットよりも小さいが、構築物として用いたブロックの規格のためであり、階段斜度 $\theta=27^\circ$ は同じ値としている。

なお、段数を3段としたのは、これ以下の少ない段数では、階段構造による地形的拘束が十分に再現できないためである。3段では、少なくとも1段目は、階段構造を再現できていると考える。

○結果

評価実験の結果、図10に示す階段を踏破できることを確認した。

図11(a)~(h)は、階段の地形拘束を最も忠実に再現している1段目から2段目への踏破を時系列的に示している。本実験により、CUBIC-Rの階段踏破動作は以下の①~⑥のシーケンスの繰り返しによって階段を踏破できることがわかった。これは、1段目の初期の動作(図11(a), (b))と2段目の初期の動作(図11(g), (h))が同じになっていることから確認できる。

- ① 面を格納した状態で段差に進行(図 11(a))
- ② クローラユニットの駆動力と2段目の段差衝突による反力のモーメントにより、ロボットをピッチ方向に回転させ、中央面を2段目近くに接近させる(図 11(b))
- ③ 前方の面開閉機構の駆動により前方クローラユニットを3段目に接地させる。この駆動力は、ロボットをわずかに前方に移動させる。②と前方の面開閉機構の駆動動作により、後方面の1段目の足場を確保できる(図 11(c))
- ④ 後方面の展開により、2段目付近まで中央面を上げる(図 11(d))。これによって、中央のクローラユニットの実際の登坂勾配を減少する。
- ⑤ 前方面が3段目と干渉しないように、格納動作させる(図 11(e))

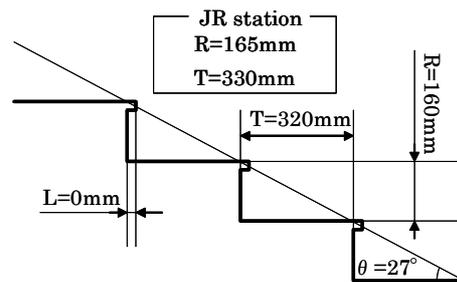


図10 階段の寸法

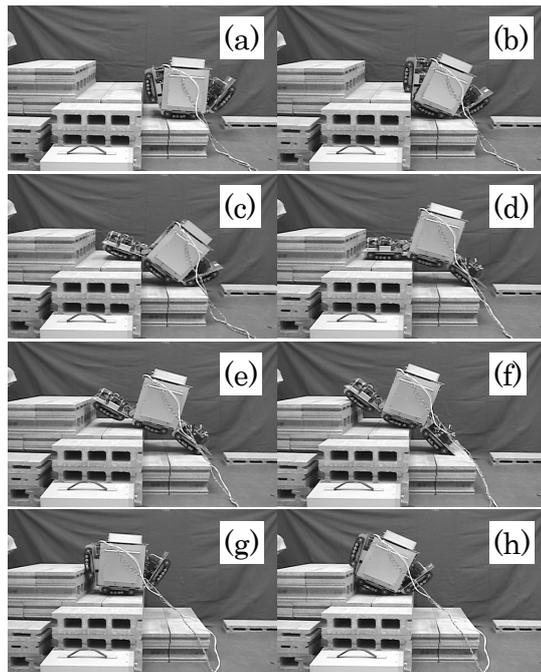


図11 階段踏破実験

- ⑥ クローラ駆動により、2段目に移動機構を移動させ(図 12(f)), 図 12(g)の面格納状態に戻す

5. 5 ギャップの踏破試験

○方法

コンクリートブロックを用いて水平にギャップを構築し、踏破実験を行う。

○結果

評価実験の結果を表2に示す。この結果は、質量が各面に均一に分布していると仮定した理想的な構成での理論値350mmに対して若干小さくなっている。この理由としては、移動機構の重心がやや前方に偏っていることが考えられる。

5. 6 ガイド地形脱出(はい上がり)動作の確認

○方法

コンクリートブロックを用いて、幅が500mmで深さが異なる窪地を構築し、窪地這い上がりが可能かどうかを判定する。

○結果

評価実験の結果、すくなくとも幅500mm、深さ

200mmの窪地から這い上がれることを確認した。この実験結果は、機構シミュレーションを用いて設定した値130mmを大きく上回っている。この理由として、面開閉機構の駆動トルクの安全率を大きく設定したことや面の展開動作と同時に、ロボットを持上げる方向にクローラを駆動させたので、クローラの駆動力が這上がり寄与していることなどが考えられる。

6. 完全試作機の製作と不整地走行試験

5章の部分試作機を用いた不整地走行実験により、機構部の改良が必要であることが判明した。本章では、重要な改良内容について述べた後、改良を加えて製作した完全試作機について、部分試作機と同様の不整地走行試験をおこなった結果について述べる。

6. 1 問題点抽出と完全試作機の改良内容

部分試作機における走行実験によって判明した機構面における問題点は4章に示した面開閉機構の改良等、多岐にわたったが、本章ではロボットの移動能力に特に影響を及ぼすサスペンション機構の改良についてのみ述べることにする。

サスペンション機構は、クローラベルトのガイドに装備され、主に地面との衝突にともなう衝撃力からクローラ駆動軸を保護するため、複数のクローラユニットによる多くの接地点を確保し、より大きな推進力を路面に伝達させるための機構である。したがって、この機構の良否がロボットの移動能力（推進力）に大きく影響する。

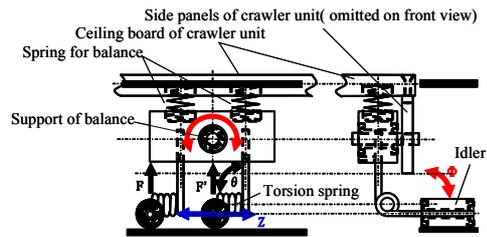
○駆動効率の低下

昨年度試作したクローラユニットのサスペンション機構の概略図を図12(a)に示す。天秤バネとねじりバネによるサスペンション構造をとっているため、そのストロークの方向は、図中における z 、 θ および Φ 方向である。クローラベルトを駆動させた場合、アイドラーは、駆動力と同方向の z 方向に変位する。正 z 方向の変位は、正確にはねじりバネの鉛直軸を中心に回転する変位であるから、アイドラーの回転方向とベルトの移動方向に角度が生じる。結果として、ねじりバネの z 方向の復元力がクローラの伝達方向と逆向きに働き、駆動力を低下させている。サスペンションは、各クローラユニットに8基装備されているため、駆動効率が大きく低下している懸念があった。

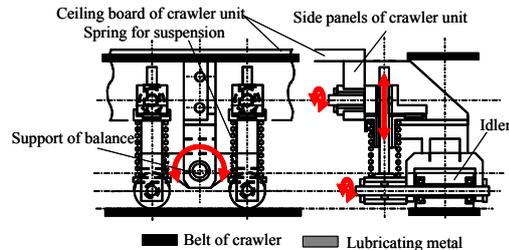
○天秤機能の問題

図12(a)に示すように、ベルト張力を保つために2つのアイドラーを1組とした天秤機能を備えている。しかしながら、図中において右側のガイドに上方向の力が加わった場合、この力が天秤支点上を通るために、モーメントが発生せず、天秤が機能しない問題があった。

以上の問題を解決するために、図12(b)に示すような構



(a) 昨年度の試作サスペンション



(b) 改良後のサスペンション

図12 クローラユニットのサスペンション機構

造とした。ガイドに直結したねじりバネを廃止し、かつガイドを両持ち構造とすることにより、 z 方向への変位をなくした。さらに、ガイドとサスペンションバネを正面図のように直線上とすることにより、天秤を機能させる構造とした。

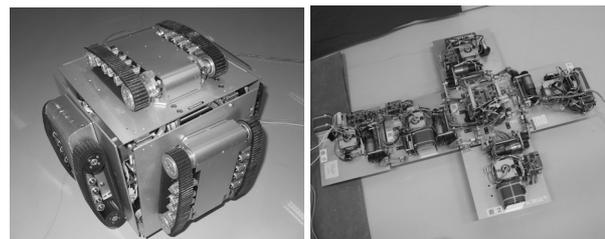
6. 2 完全試作機の製作

図13に本年度製作したCUBIC-Rの完全試作機を示す。本年度製作した完全試作機は、図9の4面側、すなわちSurface1, 3, 5および6に、新規製作したクローラユニットを取り付け、Surface 3, 5および6に結合機構を増設した。

完全試作機はクローラユニットと結合機構を増設したために、31kgと重量が増したが、全体寸法は変化せずに製作できた。重量については、ロボットの移動能力に深刻な影響をもたらさず、来年度以降に製作する予定の二次試作機で、大幅な軽量化が必要である。

6. 3 完全試作機による不整地走行実験

完全試作機を用いて、5章で述べた部分試作機と同様の実験を行った。実験結果を表3に示す。表3より、不整地踏破に4面を用いることで、全般にわたって踏破性能が向上していることがわかる。これは、4面構造による幾何



(a) Standard mode

(b) Expansion mode

図13 CUBIC-Rの完全試作機

学的なアドバンテージのほかに、表3の登坂実験結果で明らかのように、4面を用いた実験では38°までのスロープを登坂可能であることから、クローラユニット増加に伴う推力の増加も見られる。5章と同様の方法で駆動力を計算すると、3面で120Nであったものが、4面では187Nの駆動力を有していることになる。

また、サスペンション機構改良に伴う駆動力の向上は、表2と表3における同じ2面を用いた登坂実験により確認できる。完全試作機ではロボット重量が増加しているにも関わらず、登坂斜度は、23°から32°に向上しており、この場合に必要な駆動力は、それぞれ103Nと161Nである。本結果より、駆動効率の大幅な改善を確認できた。

表3 完全試作機の走行試験結果

Item	Number of driving crawler unit	Result
Going up a slope	2 (Surface 1 and 3) 4 (Surface 1, 3, 5 and 6)	Inclination 32 degrees 38 degrees
Climbing a step	4 (Surface 1, 3, 5 and 6)	Height above 320mm
Climbing the stairs	4 (same as above)	Angle of flight 32 degrees (rise 160mm, tread 260mm)
Traveling across a gap	4 (same as above)	Width 400mm
Crawling out of a guide	3 (Surface 3, 5 and 6)	Width 500mm Depth above 200mm

6. 4 完全試作機における課題

完全試作機の不整地走行実験により、走行中に保持しているはずの面とクローラユニット間の相対角が変化してしまう問題が発生した。現在の結合機構のブレーキ機能は電磁ブレーキにより制動/保持しており、定格以上のヨー方向の力がクローラユニットに加わると、すべりにより変位してしまう構造であるため、制動力が不足していることを意味する。

部分試作機による走行実験ではあまり問題にならなかったことを考えると重量増加によりクローラユニットに対してヨー方向にかかる力が増加したことが原因と考える。今後、ロボット自重の軽量化と平行して、結合機構を改良する必要がある。

7. おわりに

本報告では、昨年度に製作した部分試作機を用いて、想定した不整地走行実験を行い、機構面において可能であることを示した。また、部分試作機における機構的な問題点を抽出し、完全試作機の製作に反映させた。最後に完全試作機を用いた同様の走行実験により、完全試作機においても想定した移動戦略が可能であることを確認した。今後は、ロボットの軽量化ならびに結合機構の改良を行い、移動能力を向上させる予定である。

謝辞

本研究は文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環としてなされたものである。

参考文献

- [1] 高森ら, “レスキューロボット機器研究会報告書”, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス部門研究会, 1997年1月17日.
- [2] 明石, 加藤, 西山, “移動形態変化型ロボット～形態変形機構の試作～”, 日本機械学会 ROBOMECH'99 講演論文集, 1P2-40-054, 1999.
- [3] 北島, 大須賀, “四面クローラ機構を有する多関節ガレキ内探索ロボットの開発”, 計測自動制御学会 SI2002講演論文集(I), pp.245-246, 2002.
- [4] 高山, 広瀬, 新井, “ガレキ内推進連結クローラ走行車「蒼龍III号機」の開発”, 日本機械学会 ROBOMECH'03 講演論文集CD-ROM, 2P1-2F-B5, 2003
- [5] 亀川, 山崎, 五十嵐, 松野, “車両連結ヘビ型レスキューロボットKOHGAの開発”, 日本機械学会 RSJ2003 講演論文集CD-ROM, 1L14, 2003.
- [6] 稲葉, 田畑, 張, 天野, “形状変化機構を有する多面体移動機構の提案”, 計測自動制御学会 SI2002講演論文集(I), pp.243-244, 2002.
- [7] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者探索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.4, pp.31-36, 2003.
- [8] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “形状変化機構を有する多面体移動機構の開発”, 日本機械学会 ROBOMECH'03講演論文集CD-ROM, 1P1-2F-B2, 2003.
- [9] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “形状変化機構を有する多面体移動機構の開発-第2報:移動戦略の実験的検討-”, 計測自動制御学会 SI2003 講演論文集 CD-ROM, 1P1-2F-B2, 2003.
- [10]<http://www.rescuesystem.org/tmp/NEW/en/framepage06.htm>