

車輪径可変機構を有する小型2輪ローバーの開発

Development of small-sized dual wheel rover with mechanism of variable wheel diameter

吉田 和哉, 永谷 圭司, 久瀬 満広 (東北大)

Kazuya YOSHIDA (Tohoku University), Keiji NAGATANI, Mitsuhiro KUZE
{yoshida, keiji, kuze}@astro.mech.tohoku.ac.jp

A demand of search and rescue operation using robotic technology increases to mitigate a natural disaster. In such search and rescue tasks, target environment is usually narrow and bumpy world. Therefore there exists a trade-off between robot's size and capability of overcoming obstacles. To solve such a problem, the authors developed "small-sized dual-wheels rover" that equips with a mechanism of variable wheel diameter and stabilizer length. The rover can be deployed through a narrow space and it can overcome relatively large obstacles by expanding its wheel diameter. In this paper, details of the rover system are explained, and geometrical analysis of capability of overcoming steps is discussed.

Key Words : Mobile robot, Search and rescue, Rough terrain, Variable wheel diameter

1 緒言

地震等の自然災害やテロ等の人為的災害の発生直後に開始される救助活動の現場は、余震や瓦礫倒壊の恐れが存在する大変危険な不整地環境であり、救助作業者に二次被害をもたらす危険性がある。このような環境において、人間の代替として危険区域での救助活動を行う無人のシステムが必要と考えられており、多くの研究機関においてこのようなシステムの研究開発が進められているが[1]、中でも移動ロボット(ローバー)による要救助者の捜索や被災状況等の情報収集は、救助活動の現場において大きく期待されている。特に、二次災害の恐れがあり、半壊家屋等の比較的瓦礫内に隙間が点在する場合や局所的な瓦礫上では、ローバーによるレスキュー活動は有効である。しかし、これを行うためには、瓦礫環境に特有な高い段差や狭所を走行可能な踏破性の高い移動機構が必要となる。

このような不整地移動機構の研究として、車輪型やクローラ型、ヘビ型、そして脚型といった様々な移動機構の研究・開発が行われてきた。特に、できるだけ小型化を目指した瓦礫内移動ロボットとしては、ジャンプ型ロボット[2]や、複数台分散型の移動ロボット群[3]の研究開発が行われてきた。しかしながら、十分な障害物踏破能力があり、かつ瓦礫狭所への進入を考慮した小型のローバーは、提案されていない。

そこで、本研究では、高い段差や狭所等の活動環境に応じて、車輪径及びスタビライザー長を変更可能な、小型かつ高い走行性能を有する2輪ローバーを提案し、ローバーテストベッドの開発を進めてきた。本稿では、試作したローバーの概要、システム構成及び搭載機構について紹介し、本ローバーを用いた段差乗り越え実験及び段差踏破性能の幾何学的解析について述べる。

2 車輪径可変2輪ローバー

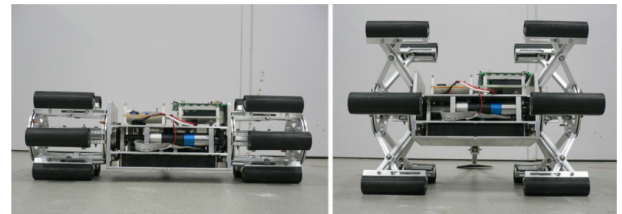
2.1 ローバー概要

ローバーが活動を行う災害現場は、瓦礫環境下であるため、次の二点の要求事項に基づき設計開発を行った。

- 倒壊木造家屋の特徴である150 [mm] 前後の瓦礫狭所の隙間から家屋内へ進入が可能
- 瓦礫路面環境における150 [mm] 以上の段差踏破能力

この相反する要求、すなわち小型且つ高い障害物踏破能力を有する2輪ローバーを実現するためには、車輪径及びスタビライザー長をその活動環境に応じて展開する機構が有効である。

そこで本研究では、車輪径及びスタビライザー長を可変にする「車輪径展開機構」、「可変スタビライザー長機構」を有する小型ローバーを開発した。この機構により、周囲に十分な空間が存在する瓦礫内をローバーが走行する際は、車輪径及びスタビライ



(a) Minimum diameter (b) Maximum diameter

Fig. 1 An overview of the rover

ザー長を拡大して、障害物踏破能力を向上させることが可能となる。また、瓦礫内の比較的狭い空間においては、その空間に応じて車輪径及びスタビライザー長を短くすることで、狭所での探査を実現することが可能となる。

開発した車輪径可変2輪ローバーの外観図を図1に示す。図1の(a)が最小車輪径時(b)が最大車輪径時となる。また、ローバーの諸元を表1に示す。

2.2 コントロールシステム構成

本ローバーのシステムブロック図を図2に示す。本ローバーのシステムは、ローバーの制御を行うコントローラ、走行用モータと展開用モータ及びモータドライバからなる走行系、センサ系及び電源系の4つのサブシステムによって構成した。

コントローラはイエローソフト製の32ビットシングルRISCマイコンを搭載したSH7046ボードコンピュータとALTERA社製のFPGAであるEPM7160Sによって主に構成される。2つの走行用モータには、FAULHABER製DCモータ2342S012CRを使用した。また、車輪径展開機構及び可変スタビライザー長機構に使用する展開用モータは、maxon製 A-max16, 110071を用いた。一方、モータドライバにはiXs Research製 iMCs03を使用した。電源には、12 [V], 2 [Ah]のYUASA製鉛蓄電池 NP2-12を使用した。DC/DCコンバータを用いて、12 [V] 及び 5 [V] をモータ及びコントローラに供給することとした。

Table 1 Specification of the rover

全長	350 ~ 500 [mm]
全幅	360 ~ 585 [mm]
車輪径	150 ~ 300 [mm]
重量	5.6 [kg]

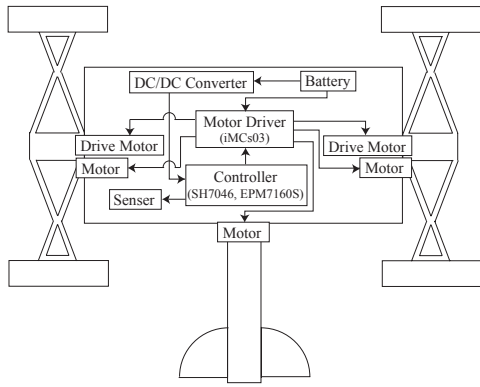


Fig. 2 System diagram

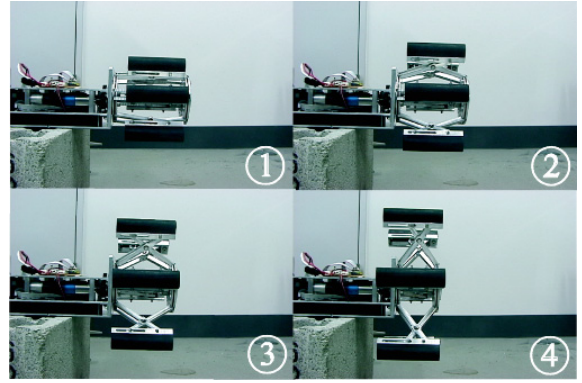


Fig. 4 Sequence of expanding wheel diameter

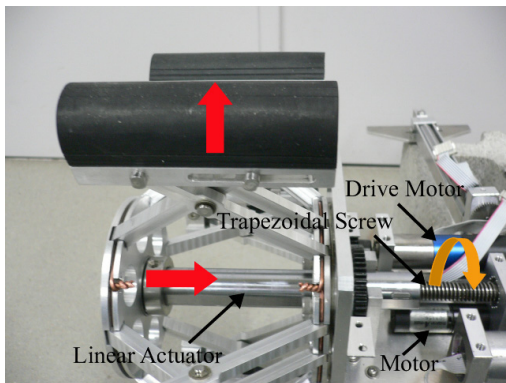


Fig. 3 The mechanism of variable wheel diameter

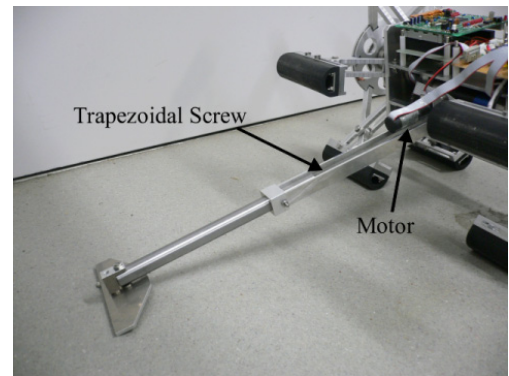


Fig. 5 The mechanism of variable stabilizer length

2.3 車輪径展開機構

本研究において開発した車輪径を可変にする車輪径展開機構を図3に示す。この車輪径展開機構の特徴は、車輪回転中心に並進運動を独立で行うリニアアクチュエータを搭載した点である。これにより、車輪径の変更をリニアアクチュエータで行い、車輪の回転を走行用モータで行うことによって、並進運動と回転運動を独立に生成することが可能となった。リニアアクチュエータは、展開用モータと台形ねじから構成されており、展開用モータの回転を台形ねじで並進運動に変換することで実現した。このリニアアクチュエータによる車軸方向の操作量を、パンタグラフ機構を用いることによって車輪半径方向の操作量に変換し、車輪径の変更を行う。この機構により、ローバーは車輪径を最小 $\phi 150$ から最大 $\phi 300$ [mm]と車輪径を2倍にすることが可能である。車輪展開シーケンスを図4に示す。

2.4 可変スタビライザー長機構

2輪型ローバーでは車輪の回転に対し、ローバー本体の運動を拘束する機構が必要となり、この機構はスタビライザーと呼ばれる。このスタビライザーの長さは、自動車型ロボットのホイールベースに相当するため、障害物踏破においては、可能な限り長い方がよい。しかしながら、現実には、ローバーの小型化や瓦礫への干渉も考慮すると、障害物高さに応じて必要最低限の長さがあればよい。そこで、スタビライザー長を可変にする可変スタビライザー長機構を開発した。開発した可変スタビライザー長機構を図5に示す。

この機構は、展開用モータと台形ねじから構成されており、展開用モータの回転運動を台形ねじで並進運動に変換することで実現した。その可動範囲は150 [mm]であり、全長は最小230 [mm]から最大380 [mm]となる。

3 段差踏破の幾何学的解析

ローバーが段差を踏破する際には、図6に示すように「アプローチ」と「乗越え」という2つのフェイズがある。本研究では、開発したローバーの段差踏破性能と車輪径及びスタビライザー長との関係を、この二つのフェイズ毎に、幾何学的に考察した。

3.1 段差踏破フェイズ

まず、アプローチフェイズにおいて、ローバーは車輪を段差にアプローチし、段差から受ける力と車輪のトルクにより車体を段差の上に移動させる。この動作を行うためには、車輪径と段差高さ間において幾何学的な拘束条件が存在する。

まずある段差高さ H_1 に対して、車輪径 R はある長さ以上である必要がある。

$$H_1 \leq kR \quad (1)$$

ここで、 k は車輪の幾何学的特長に由来する比例定数である。図7に示すように、本ローバーの車輪では $\theta = 30^\circ$ であるから、ある段差高さ H_1 は次式で表される。

$$H_1 \leq \frac{3}{4}R \quad (2)$$

この式は、本ローバーの限界アプローチ高さが車輪径の75%であることを意味している。

一方、乗越えフェイズでは、段差と同様もしくはほぼ同等な高さまで移動した本体が、確実に段差に乗らなければならない。そのため乗越えフェイズにおいては、スタビライザー長を幾何学的に拘束する長さ条件が存在する。図8に示すように、ある段差高さ H_2 に対して、アプローチフェイズを長さ R の車輪径で終了したとき、乗り越えを確実にするためのスタビライザー長 L が満たすべき不等式は次のように表される。

$$H_2 + \frac{R}{2} \leq L + s \quad (3)$$

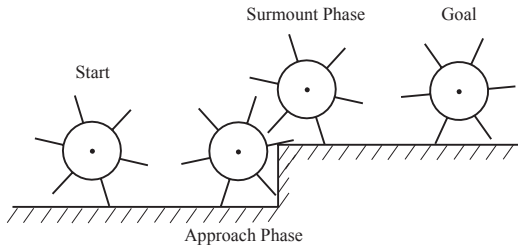


Fig. 6 Surmount sequence

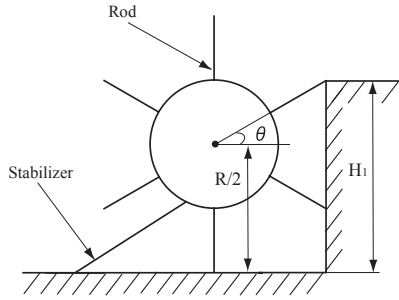


Fig. 7 Limitation of the wheel diameter

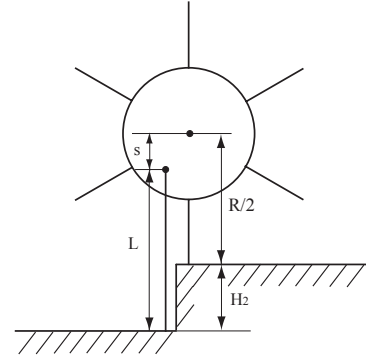


Fig. 8 Limitation of the stabilizer length

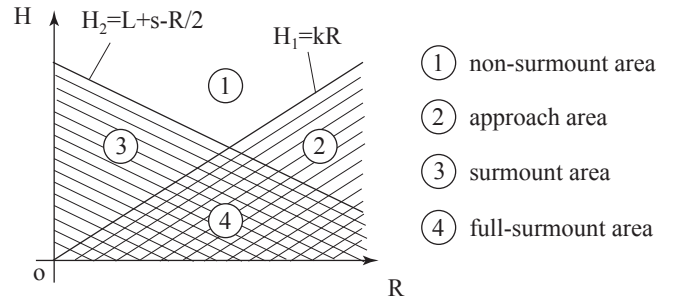


Fig. 9 Surmount Diagram

ここで、 s は車軸中心からスタビライザー取り付け部までの距離である。またこの式は、本ローバーの限界乗越え高さがスタビライザー長から車輪径を引いた差より小さいことを意味している。

3.2 踏破線図

前節で述べたように、段差踏破には「アプローチ」と「乗越え」という異なる二つのフェイズが存在し、それぞれに段差高さ、車輪径、スタビライザー長の関係を拘束する条件式が存在する(式(1)、(3))。これらを、式中の段差高さ H_1 、 H_2 について書き直すと、

$$H_1 \leq kR \quad (4)$$

$$H_2 \leq L + s - \frac{R}{2} \quad (5)$$

となり、これらの式を満たす (R, H) をグラフに表すと、図9のようになる。

この図において、唯一、段差踏破可能な領域が4で示す領域である。ある段差高さ H に対して、この領域内に車輪径と段差高さの組 (R, H) が存在するような車輪径 R を選べば、段差踏破が可能であることを図9は示している。本研究では、この図9を特に「踏破線図」と呼ぶこととした。

4 走行性能実験

本研究で製作したローバーの段差踏破性能を検証するため、段差乗越え実験を行い、車輪径とスタビライザー長がローバーの段差踏破性に与える影響について、提案した幾何学モデルを用いて考察を行った。

4.1 実験条件

本実験は、高さ調節が可能な段差を利用し、各車輪径(直径165 [mm]から300 [mm]の15mm刻み)に対して乗り越えられる段差の限界を測定した。さらに、この一連の実験をスタビライザー長(230 [mm], 260 [mm], 290 [mm], 320 [mm], 350 [mm], 380 [mm]の6パターン)において行った。

4.2 実験結果

図10には、スタビライザー長 $L = 380$ [mm]として $H = 200$ [mm]の段差に向かって進む実験風景を示す。車輪径が $R = 240$ [mm]の(a)では、全く車輪が段差にアプローチできないため、踏

破できないのに対して、(b)では、車輪径をこの段差を踏破するのに十分な車輪径である $R = 300$ [mm]に設定すると、段差を踏破することが可能であった。

一方、図12に、図10の(b)における車輪径($R = 300$ [mm])を用いて、同じ段差($H = 200$ [mm])を登らせた時の、スタビライザー長による比較を示す。(a) $L = 260$ [mm]に示すようにスタビライザー長が十分な長さでなければ、段差に対して車輪径が十分大きくても、段差を踏破することができないことが分かる。これに対し、(b)に示すように、スタビライザー長を $L = 380$ [mm]とすると、段差を踏破することができた。

図11には、本ローバーの限界乗越え高さ H とスタビライザー長 L の関係を示す。スタビライザー長が短い場合には、車輪径の増加に伴いしばらくは踏破能力も向上するが、あるピークを境に低下し始める。このピーク後は車輪径が増加するにつれて、踏破できる段差高さが低下してくる。逆にスタビライザー長が十分に長い場合には、限界乗越え高さにピークは見られず、車輪径の増加に比例して、限界乗越え高さも増加する。

以上より、車輪径増加による踏破性能の向上効果は、車輪径のみならずローバーのスタビライザー長に支配されることが分かる。

4.3 実験に対する考察

図13に実験結果と共に踏破可能領域境界を比較した結果を示す。

実験結果は、全て踏破可能領域に存在し、また、踏破可能領域と同様の傾向を示した。図13を見ると、グラフの傾きは境界直線のそれにほとんど等しい。これはアプローチ条件の導出の際に考察した幾何学条件($k = 3/4$)の妥当性を示していると同時に、乗り越え条件の導出の際に用いた車輪径 R の係数 $1/2$ を与えた考えの正当性を示している。

また、幾何学的な考察から得た境界と、実験から得られた結果の間に若干のずれが確認できる。これは幾何学的考察では、理想的なアプローチ条件及び乗り越え条件を提示したにすぎず、車輪が接地する点の形状や段差の摩擦、スタビライザーと路面との力のやり取りといった力学的根拠に基づいた考察を行っていないことに起因すると考えられる。しかしながら、単純な幾何学的な考察のみで、ある程度十分な段差踏破条件を提示することができた。

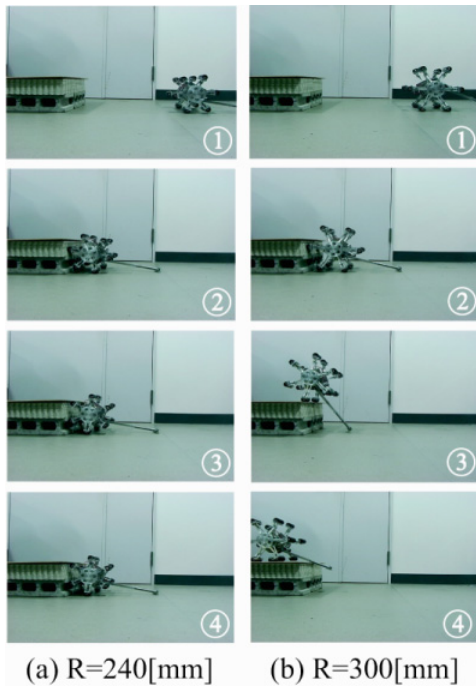


Fig. 10 Comparison between $R=240$ [mm] and $R=300$ [mm] when $L=380$ [mm] and $H=200$ [mm]

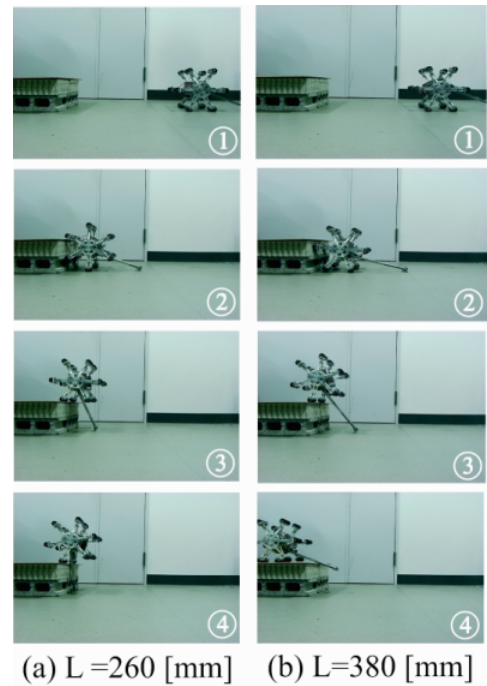


Fig. 12 Comparison between $L=260$ [mm] and $L=380$ [mm] when $R = 300$ [mm] and $H=200$ [mm]

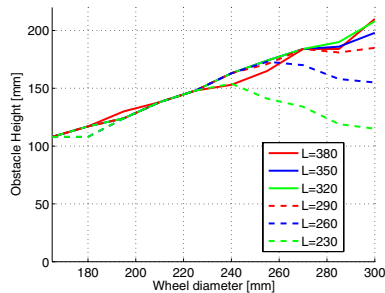


Fig. 11 Results classified by stabilizer length

5 結言

本稿では、災害現場等の探査を目的した小型2輪ローバーの開発を行い、ローバーの概要及び搭載機構について紹介した。実験及び解析結果より、本ローバーが高い走行性能を有することを実証し、スタビライザーがローバーの走行性能を左右する大きな要因になることを示した。また、ある車輪径及びスタビライザー長に対して、踏破可能な段差高さ領域を示した踏破線図を提案し、実験結果との比較により、その有効性を確認した。

文献

- [1] 田所他: "大都市大震災軽減化特別プロジェクト レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発", 日本ロボット学会誌 Vol.22, No.5, pp.1-44, 2004.
- [2] 塚越秀行, 森庸太郎, 佐々木正志, 田中崇裕, 北川能, "瓦礫踏破能力を向上させる跳躍・回転移動体の開発", 日本機械学会論文集, Vol. 70, No. 692, pp. 180-188, 2004
- [3] Andrew Drenner, et.al, "Communication and Mobility Enhancements to the Scout Robot", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, Oct. 2002.

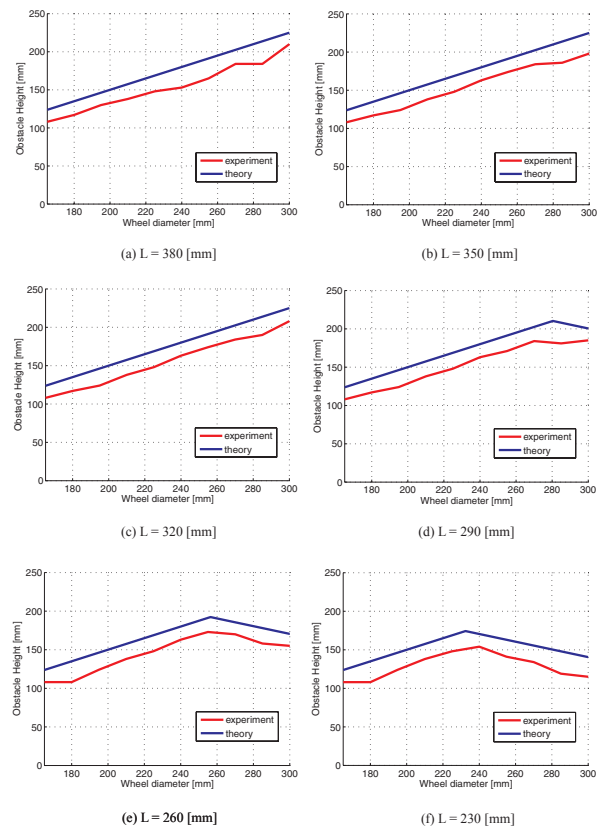


Fig. 13 Comparison between experimental results and the proposed theory