

# 小型移動ロボットのための走破性能向上を目指した展開車輪機構の開発

木下 宏晃, 砂長 麻美, 伊藤 毅, 桐林 星河, 永谷圭司, 吉田 和哉 (東北大学)

## Development of Mechanical Expandable Wheels for a Small-sized Mobile Robot

H.Kinoshita, A.Sunaga, T.Ito, S.Kiribayashi, K.Nagatani, K.Yoshida (Tohoku Univ.)

**Abstract:** Every year, the authors' research group participates in "ARLISS Come back Competition" at Black Rock desert in Nevada, U.S.A.. The mission of the competition is to return a payload (that is launched to 4,000 m above by a small rocket) to the designated goal autonomously. To enable the mission, basically, there are two major approaches, flyback and runback. Our approach is runback that uses a wheeled type small mobile robot as a payload. In the approach, the wheeled robot lands with the use of a parachute after ejection from the rocket, and it navigates to the goal on a surface after separation of the parachute. However, small bumpy surface prevents its smooth navigation, typically. If the robot has larger size wheels, the problem can be disappeared, but the limitation of its size and weight is strictly defined by the size of the carrier of the rocket. To overcome this situation, we developed a new expandable mechanism of wheels. It expands the wheel diameter from 150mm to 240mm and the tread from 240mm to 300mm. In this paper, we explain the mechanism of our expandable wheel in detail, and report our competition and experimental result at the desert in 2009.

## 1 緒言

東北大学 吉田・永谷研究室では、毎年「A Rocket Launch for International Student Satellites (ARLISS) Come Back Competition」(以下、ARLISS-CBC) に車輪型移動ロボットで参加している。ARLISS-CBCは、学生が宇宙開発技術の基礎技術を培うために、小型ロケットで上空4,000 mまで打ち上げられたペイロードを目標地点までいかに正確に誘導できるかを競うコンペティションであり、1999年からアメリカ合衆国ネバダ州ブラックロック砂漠において毎年開催されている。このコンペティションの目標を達成するためのアプローチには、大きくFlyback方式とRunback方式の二つがある。前者は、ロケットからペイロードが放出された後、降下中にパラフォイルなどを制御してゴールを目指すものであり、後者は、パラシュートを利用して軟着陸した後、車輪などの移動機構で地表面を走行し、ゴールを目指すものである。我々の研究室では、惑星探査ロボットの実現を目指したフィールド移動ロボットの研究を進めてきた関係から、Runback方式で参加している。

車輪型移動ロボットによるフィールドの地表移動を行う際に問題となるのが、路面の凹凸である。ARLISS-CBCの舞台となるブラックロック砂漠は、比較的固い地面であると共に、多くの車の轍が存在する不整地である(Fig.1)。車輪径が大きい移動ロボットにとっては、車の轍はあまり問題とならないが、ロケットのペイロードに制限のある小型ロボット(サイズは $\phi 146\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 以内、重量は1,050g以内)にとって、これらの凹凸は、非常に大きな障害となる。このような制限がある中で、移動ロボットの踏破能力を向上させることを考えた場合、障害物を乗り越えるための機構を新たに搭載するよりも、車輪径を拡大させる方がより効率的であると考えられる。

車輪径拡大の手段には、NASAが提案したバルーンタイヤに代表されるInflatable方式[1]や、アクチュエータを用いて車輪径を変化させる方式[2]が挙げられるが、これらの方式を上述のサイズや重量制限の中で採用するのは、非常に困難である。そこで、2008年のARLISS-CBCに参加するために、筆者らの研究グループが製作した小型ロボットの車輪の素材には、スポンジを採用した。これにより、キャリア収納時に直径150 mmの車輪を走行時には直径



Fig. 1: Rotted surface of the Black Rock desert

180 mmまで拡大させることに成功したが、それ以上の拡大を実現することはできなかった。

そこで本年度、我々は、メカニカルに車輪径を大きく増大する機構を提案し、これを搭載した小型移動ロボットを開発した。本稿では、開発した展開車輪型ロボットの車輪径展開機構、パラシュート分離機構及びシステム構成について紹介し、本ロボットを用いたフィールド実験ならびにコンペティション結果について報告する。

## 2 展開車輪型ロボット「WindMill-II」の構築

ロケットのキャリアのサイズや着地の衝撃、地上4,000メートルからの軟着陸といった条件を考慮すると、ロボットに求められる技術的課題は、下記の4点が挙げられる。

1. 重量1,050 g以内、内径 $\phi 146\text{ mm} \times$ 長さ240 mmのキャリアに収納可能
2. ロケットの打ち上げ振動に耐えうる「耐振動性」や着地時の「耐衝撃性」
3. 着地後の安定したパラシュート分離
4. 不整地における高い走破性能及び長距離走行能力



Fig. 2: An overview of WindMill-II

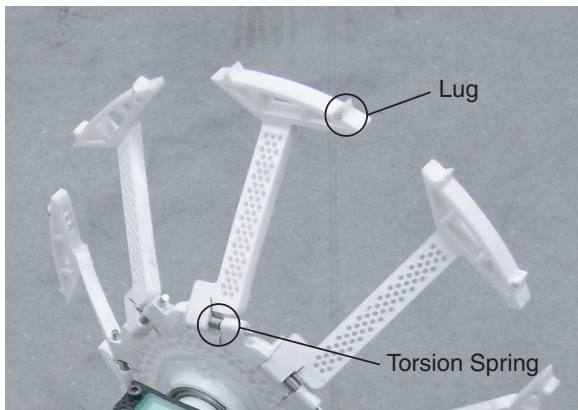


Fig. 3: A magnified view of the expandable wheel

特に4番目の「不整地における高い走破性能」は、例年Runback方式で参加する全てのチームに共通の技術課題となっており、轍に乗り上げて走行不能になるというケースが数多く報告されている。そこで、本研究では、不整地での走破性能を向上させるため、車輪径をメカニカルに拡大可能な機構を考案した。以下に、考案した機構と、これを搭載した展開車輪型ロボット「WindMill II」(Fig.2)のシステム構成について説明する。

### 2.1 展開車輪の基本構成

展開車輪は、左右それぞれ8つの脚で構成されている。材質はABS樹脂であり、Stratasys社製三次元プリンタを用いて作製した。脚の関節部分には、ねじりばねが搭載されており(Fig.3)、このばねの力で展開動作を行う(Fig.4)。

展開時には、Fig.5に示すように脚が本体に対して45度の状態で固定される。このとき、地面に接する部分が円弧

Table 1: Comparison between the sponge wheel (2008) and the expandable wheel (2009)

Wheel type	Wheel Diameter	Tread
Sponge	145→180 [mm]	210→220 [mm]
Expandable	140→240 [mm]	220 → 310 [mm]

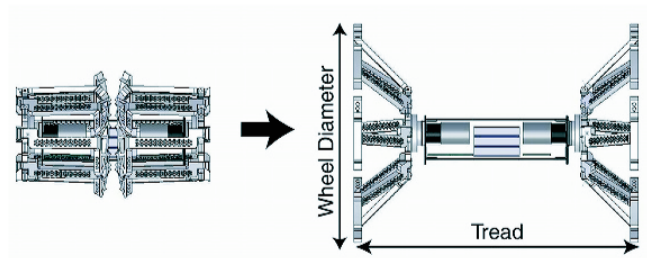


Fig. 4: An overview of the expansion sequence

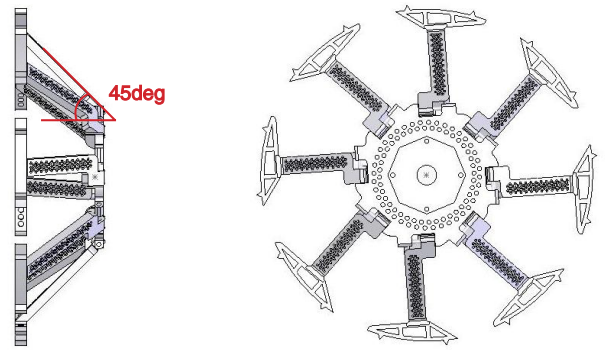


Fig. 5: After expansion of the wheel

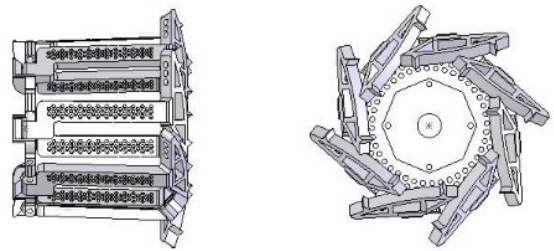


Fig. 6: Before expansion of the wheel

状になるように、脚の先端にカーブを施した。また、地面との摩擦力を増大させるため、地面の接地面にラグを取り付けた(Fig.3)。

円筒に収納する際には、これらの脚は、Fig.6に示すとおり、折りたたまれた状態となる。このとき、脚の先端がボディ側に入り込んだ手裏剣のような構造となっている。こうすることで、脚の先端の円弧の長さをより長くとることができ、結果として展開後の脚と脚の間隔を小さくすることが可能となる(Fig.5)。

この展開機構は、拡大した際の脚を、本体に対して45度の状態にして固定するため、車輪径の拡大だけでなく輪距(左右の車輪間距離)の拡大も可能となる。これにより走破性能の向上と同時に、車体の安定性の向上も期待できる(Fig.4)。展開前後での車輪径及び輪距の変化について、昨年のスポンジ車輪を利用したロボットと比較したものをTable.1に示す。

### 2.2 パラシュート分離及び車輪展開機構

車輪の構造や強度を考慮すると、車輪の展開は軟着陸後に行うのが望ましい。そこで、地面に軟着陸後に、パラ



Fig. 7: WindMill-II wrapped in separation mechanism

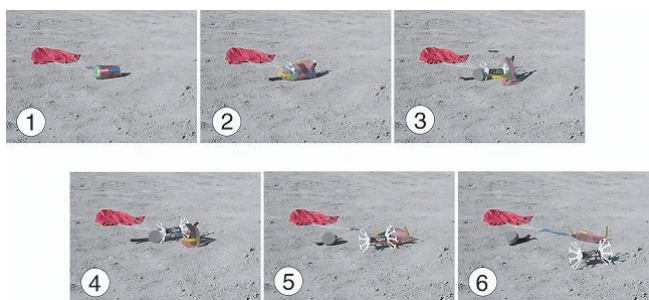


Fig. 8: A sequence of landing, parachute separation, and starting navigation

シュートの分離と車輪の展開を同時に行う機構（以下、分離展開機構）を考案した。

まず、車輪の脚を閉じた状態で、パラシュートが取り付けられた分離展開機構をロボットに巻きつけ、テグスで固定する。このとき、着陸時の衝撃を吸収するため、スポンジも一緒に巻き込むこととした。また、着陸時にパラシュートがロボットに覆いかぶさるのを防ぐため、パラシュートができるだけロボットから遠い位置に着地するように、分離展開機構に設置したブームの先にパラシュートをつないだ。実際にロボットを分離展開機構に包んだ様子をFig.7に示す。着陸後のパラシュートの分離及び車輪の展開は、分離展開機構を固定するために使用しているテグスを電熱線（ニクロム線）により焼き切ることで実現した。この機構を利用した、軟着陸から走行開始までの一連の動作シーケンスをFig.8に示す。

### 2.3 走行制御システム

本機体の走行制御は、軽量化のため、GPS情報のみを用いることとした。まず、GPS受信機により取得されたロボットの位置情報が、8ビットマイクロコントローラ（ATmega168P:Atmel社製）に送信される。本研究で利用したGPSから得られる情報は、1秒おきに更新されるため、現在位置と、1秒前の位置及び、ゴール地点の位置情報から、偏差角（ロボットが進むべき方向と、実際に進んでいる方向の角度差）を算出する(Fig.9)。この偏差角が小さくなるように、左右のモーターの速度を制御することで、ロボットはゴールを目指して走行することが可能となる。なお、モータドライバには、HiBot社製のDC power Module、モーターにはmaxon製RE-max24(ギヤヘッド:GP22C)、電源には、FUJIFILM

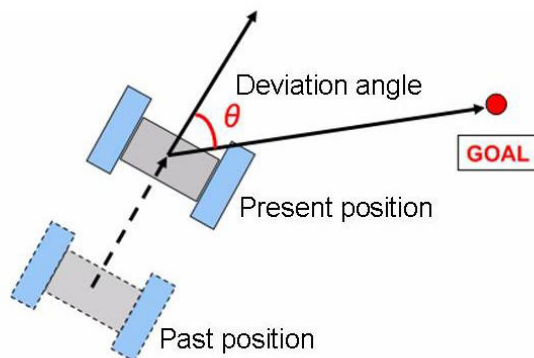


Fig. 9: GPS based Navigation

社製 NP-95（公称電圧: 3.7V、公称容量:1800mA/h）を3台直列で使用した。

## 3 動作実験

### 3.1 要素動作試験

作製したロボットの性能を検証するため、パラシュート落下試験、車輪展開試験、GPSによる走行制御実験を行った。

パラシュート落下試験においては、約20mの高さからパラシュート及び分離展開機構を取り付けたロボットを落下させ、耐衝撃性及びパラシュートの悪影響についての検証を行った。この際、着陸後に本体や車輪部分の破損は見られなかった。また、分離展開機構に取り付けたブームの先にパラシュートをつないだことにより、着陸後に紐が絡まる、パラシュートが覆いかぶさるといった問題を回避することが確認された。

車輪展開試験においては、ニクロム線によるテグスの切断が正常に機能し、高い確率でパラシュートの分離及び車輪の展開ができることが確認された。

GPSによる走行制御実験では、電源投入後、ロボットが正常にGPSを捕捉して走行を開始し、GPSデータをもとに走行制御を行い、設定したゴール地点周辺で停止することが確認された。

### 3.2 打ち上げ実験（ARLISS-CBC）

ARLISS-CBCは、2009年9月14日から17日の合計4日間実施され、我々のロボットは、16日に2回、打ち上げを実施した。

最初の打ち上げでは、ロケットから放出・軟着陸後、パラシュート分離及び車輪展開機構はうまく動作し、ロボットはナビゲーションを開始した。ところが、ロボットは、自律走行の過程で、偶然にも着陸地点に戻ってきてしまい、切り離して放置されたパラシュートに絡まって動けなくなるという結果に終わった(Fig.10)。これは、着地点から十分に離れていない状態でナビゲーションモードに入ってしまった、偶然、その方向にパラシュートが放置されていたということが原因である。この問題を回避するため、パラシュート分離及び車輪展開後は、着陸地点から十分離れるまで走行し、その後ナビゲーションモードに入るようにプログラミングを行うこととした。これにより、



Fig. 10: WindMill-II was stacked into the parachute

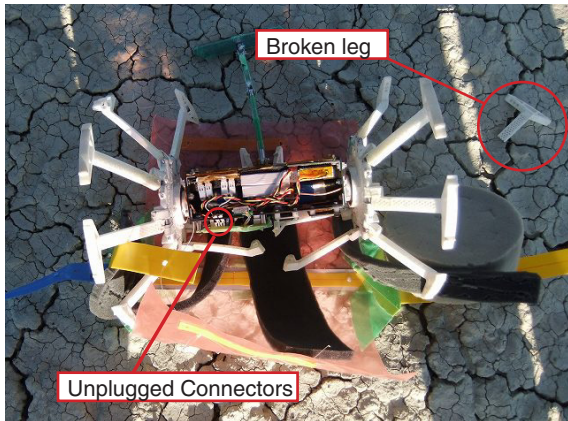


Fig. 11: Unplugged Connectors and Broken Leg

着地の際に切り離れたパラシュートに絡まる確率を小さくすることができるかと期待できる。

一方、2回目の打ち上げは、上述の問題を修正して臨んだが、2回目の着地の際、着地の衝撃でモータドライバと電源をつなぐコネクタが外れ、さらに左車輪の脚が一本折れたことが原因で、走行を開始することができなかった。そのときの様子をFig.11に示す。

以上より、ARLISS-CBCにおいて、我々のロボットをゴールまでたどり着かせるというミッションは、失敗に終わった。

### 3.3 長距離走行実験

2回の打ち上げ終了後に、破損した脚を交換し、長距離ナビゲーションの実験を行った。この実験において、ナビゲーションプログラムは正常に動作し、設定したゴール地点に向かって走行することが確認できた。また、走行したフィールドは、比較的轍が多い不整地であったが、本ロボットは途中でスタックすることなく、安定した走行が可能であるということが確認できた。ロボットが不整地を走行している様子をFig.13に示す。

ところが、着陸地点から約260m 程度 走行したところで、右車輪の脚が折れてしまった。そこで、脚を交換して、ナビゲーション実験を続けたが、その後も、着陸地点から約400 m、約1,100 m 地点で脚が折れ、その都度交換しながら実験を続けた。そのときの走行軌跡をGoogle Earthを用いて図示したものをFig.12に示す。このように何度も脚が折れた原因は、脚に軽量化のための穴を空けすぎたことにある。1,050 g 以内という規定を守るために必須の減量化対策ではあったが、強度を考慮した、より破損しにくい車輪を作製することが必要であった。

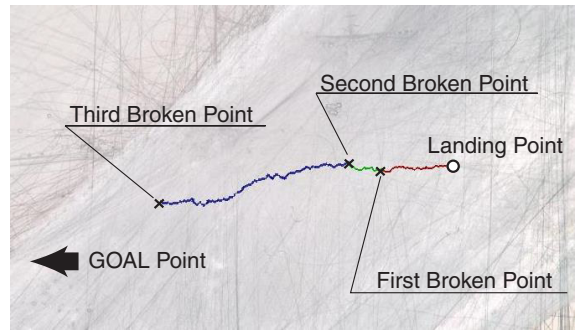


Fig. 12: A trajectory of long distance navigation

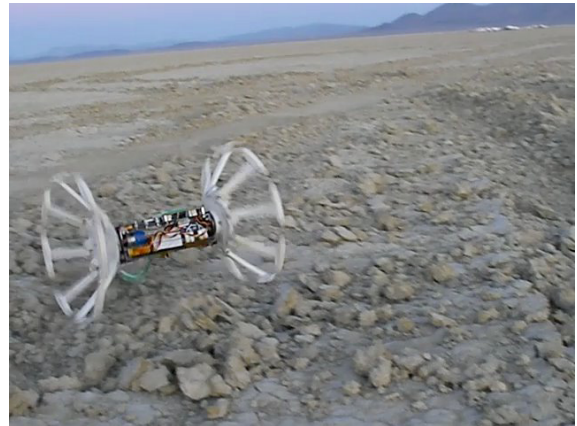


Fig. 13: Traversal scene on irregular terrain

## 4 結言

本稿では、ARLISS-CBCへの参加を目的として開発した、車輪径及び輪距を大幅に拡大できる機構を搭載した車輪展開型ロボットの基本的な構成について説明した。また、コンペティションでの成果を報告した。コンペティションでは、車輪の強度不足や不運もあり、目標としたゴールには及ばなかったが、提案した機構の不整地における高い走破性能を確認することができた。

今後の課題としては、まず、車輪の強度を向上させ、安定した走行を実現し、目標であるARLISS-CBCでゴールすることにある。また、今回製作した車輪と路面との摩擦を増大させるため、今回のさせるための工夫を検討すること、具体的には、車輪と地面との接地面に最適なスパイクを検討することも、今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- [1] Jack A. Jones. Inflatable robotics for planetary applications. In *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space*, 2001.
- [2] Keiji Nagatani, Mitsuhiro Kuze, and Kazuya Yoshida. Development of transformable mobile robot with mechanism of variable wheel diameter. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 252-257, 2007.