

展開車輪を搭載した小型移動ロボットの開発とフィールド実験

○ 猪爪 宏彰, 生田 哲也, 永谷 圭司, 吉田 和哉 (東北大学)

Development of a Small-sized Mobile Robot with Expandable Wheels and Field Experiments

○ H. Inotsume, T. Ikuta, K. Nagatani, and K. Yoshida (Tohoku Univ.)

Abstract : Generally, on uneven terrain, the larger wheels for a mobile robot are, the higher its mobility is. On the other hand, a lunar/planetary exploration robot has to be small and lightweight because of constraints of size and payload of the rocket. One of the solution of this trade-off problem is to expand and to enlarge the wheels after landing. To study expandable wheels, our research group has developed wheel expansion mechanisms for 1kg-sized mobile robots. In this research, we improved and simplified mechanical expandable wheels, which we have been developing, and conducted field experiments in Black Rock Desert in Nevada, U.S.A. to verify its validity of the expandable wheels.

1 緒言

近い将来, 日本の宇宙開発ミッションにおいて, 月や火星に小型移動探査ロボットを送り, 地表面の科学探査を行うことが期待されている. このような目的の探査ロボットとして, 比較的機構が単純で壊れにくいという理由から, 車輪型の移動ロボットが想定されるのだが, 車輪型移動ロボットが地表移動を行う際に問題となるのが, 路面の凹凸である. 一般に, 車輪径が大きいほど, このような不整地に対する踏破性が高いことが知られている. しかし一方で, 月や火星などの惑星を探査するロボットは, ロケット打ち上げ時の制限から, 小型軽量であることが望まれる. このトレードオフの一つの解決方法として, 着陸後に展開し, 車輪径を拡大することが挙げられる.

そこで我々の研究グループは, これまで, 小型の移動ロボットに利用可能な展開車輪を開発してきた. また, 開発した車輪の有用性を検証するため, 「A Rocket Launch for International Student Satellites Come Back Competition」(ARLISS-CBC) と呼ばれる競技に参加し, フィールド実験を行ってきた^[1].

ARLISS-CBCとは, 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年から米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2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. 我々の研究グループでは, これまでの10年間, このコンペティションにRunback方式で参加することで, 小型惑星探査ロボットのフィールド実験を行ってきた.

ARLISS-CBCにおいて, 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として, 下記の4点があげられる.

1. 重量1,050 g 以内, 内径 $\phi 146$ 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る「耐振動性」や着地時の「耐衝撃性」

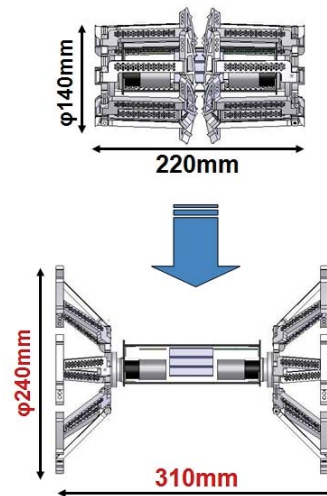


Fig. 1: Last year model of a mobile robot with expandable wheels

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

ARLISS-CBCが開催されるブラックロック砂漠は, 大部分は比較的平らな環境であるが, 部分的に車の轍が存在する不整地である. そのため, 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大きな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. よって, この環境は, 車輪径拡大を行う小型ロボットの不整地走行実験を行うフィールドとして適していると言える.

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^[2]や, アクチュエータを用いて車輪径を変化させる方式^[3]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. そこで我々の研究グループは, 2009年度ARLISS-CBCに参加するため, 図1に示すような, 機械的に展開し, 車輪径と車輪間距離を大幅に拡大する展開型スポーク車輪を有するロボットを開発した^[1]. しかし, 軽量化のために車輪強度が不十分であったり, スポーク先端形状の問題でトラクションが得にくいといった問題が生じ, 現場では, 思うような走行性能を発揮することができなかった.



Fig. 2: New model of a mobile robot with expandable wheels

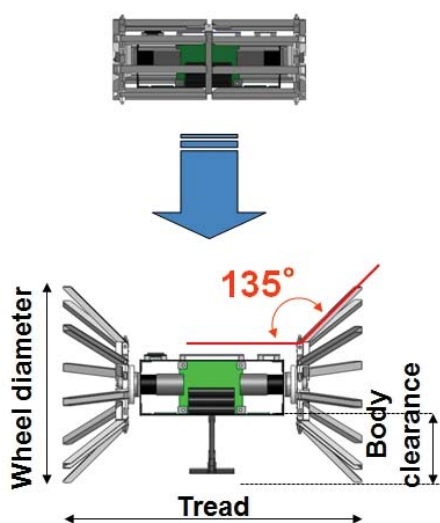


Fig. 3: An overview of the expansion sequence

そこで、本年度は、この展開型スポーク車輪を改良した新しいモデルを開発し(図2参照)、2010年9月に開催されたARLISS-CBCに参加することで、その有用性を検証する実験を行った。本稿では、まず、この展開型スポーク車輪を有するロボットについて説明を行い、本ロボットを用いて参加したコンペティションの報告およびフィールド実験の結果について述べる。

2 展開型スポーク車輪を有するロボットの開発

本研究で開発したロボットは、走行のための展開型スポーク車輪、スタビライザ、DCモータ、モータドライバを搭載しており、図3に示すように、折りたたまれた状態からスポークとスタビライザを展開して拡大する。なお、このスタビライザとは、モータの回転によりロボット本体が回転しないように、ロボット後方を支える働きをするものであり、また、この長さが長いほど不整地踏破性が高いことが知られている^[3]。

また、制御用にマイクロコントローラ、ナビゲーション用にGPSモジュールおよび電子コンパスを搭載している。この他に、ロケット放出検知用に光センサ、データ通信用に無線通信機、制御履歴を保存するメモリとしてEEP-ROMを備えている。電力は、リチウムイオンバッテリーから供給している。以上の、ロボットに搭載した機器のスペックを表1にまとめ、以下に、各サブシステムの説明を行う。

2.1 展開型スポーク車輪

展開車輪は、図3に示すように、モータ軸受けと8本のスポークで構成されている。スポークは、収納時、図3上図のようにボディ側に折りたたまれる。スポークと軸受けの間には、ねじりばねが取り付けられており、これにより、折りたたんだ状態から機械的にスポークが展開する仕組みとなっている。このスポークが図3下図のように135°展開することで、車輪径、車輪間距離、車高を増大させ、不整地において安定した走行を可能とする。

昨年度のモデルでは、軽量化のためにスポーク材料としてABS樹脂を用いていたが、強度不足により、数百 mの走行でスポークが折れるという問題があった。また、スポーク先端を円弧状にすることで連続的な接地による安定走行を実現したが、一方でトラクションを得にくいという問題があった。

そこで、新しいモデルでは、スポーク材料としてコの字型のアルミを用い、軽量化と高強度化を図った。なお、トラクションを得やすいスポーク先端形状としては、様々なものが考えられるが(例えばSchwendnerら^[4]など)、本研究では、重量の制限から、単純な直線形状を採用した。これにより、接地連続性が低下し、走行時の振動が増大するが、スポーク先端が地面に刺さることで、トラクションを得やすい形状となっている。

Table 1: System Specification

| | |
|--|--|
| Weight | |
| Robot | 854 g |
| Parachute | 196 g |
| Total | 1050 g |
| Expandable Wheels | |
| Wheel Diameter | closed: 110 → open: 235 mm |
| Tread | closed: 235 → open: 340 mm |
| Body Clearance | closed: 20 → open: 60 mm |
| Driving System | |
| Geared Motors | RE-max24 + GP-22C (maxon) 9 V, 29:1, max 0.9 Nm |
| Motor Drivers | 1Axis DC Power Module (HIBOT) 5~28 V, ~10 A |
| Controller | |
| | BB80A36049F(Hokuto Electronics) ROM: 96 kB, RAM: 4 kB Input: 5 V |
| Navigation System | |
| GPS Module | SUP500F (Sparkfun) accuracy: 2.5 mCEP |
| Digital Compass | HMC6352 (Sparkfun) accuracy: 1.0° |
| Other Equipments | |
| Light Sensor | S9648-100 (Hamamatsu Photonics) |
| Wireless Module | Xbee-PRO 802.15.4 (Digi International) range: 1.6 km |
| EEP-ROM | 24LC512 (MICROCHIP) 512 kbit |
| Power Supply (Lithium Ion Batteries) | NP-90-C (Casio) 3.7 V, 1950 mAh × 3 (serial) |
| Power Consumption [mW] | |
| Motors | 18648 |
| GPS Module | 165 |
| Digital Compass | 3.3 |
| Wireless Module | 709.5 |
| EEPROM | 3.3 |
| Total | 19529.1 + α |

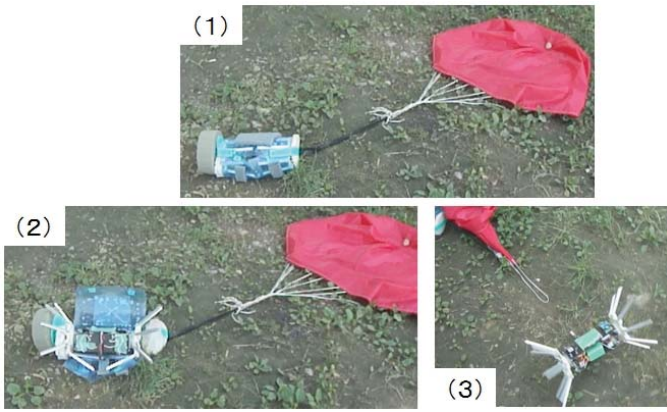


Fig. 4: Parachute separation

2.2 パラシュート分離およびスポーク収納・展開システム

パラシュートの分離およびスポークの収納・展開を担う機構(以下、分離展開機構)は、ロボットを包むためのポリプロピレン製シート、着地衝撃緩和用スポンジ、パラシュート、およびパラシュートとシートを繋ぐブームからなる。

収納時は、スポークおよびスタビライザを折りたたんだ状態で、分離展開機構をロボットに巻きつけテグス(釣り糸)で固定する。軟着陸後、このテグスを電熱線(ニクロム線)により焼ききることで、分離展開機構を開く。これにより、スポークの展開およびパラシュートの分離を同時に行うことが可能となる。図4にパラシュート分離、スポーク展開、および走行開始までの一連の流れの様子を示す。

2.3 放出および着地検知システム

ロケットからの放出検知には、光センサ(フォトトランジスタ)を用いることとした。ロボットがロケットから放出されると、搭載した光センサに光が当たり電位が変化する。これをコントローラへのAD入力とし、AD変換値がしきい値以上ならロケットから放出されたと判定することが可能となる。

また、着地検知には、GPSの高度情報を用いることとした。今回GPSモジュールの更新周期は1秒と設定したため、1秒毎に高度変化を計算し、この高度変化が一定時間しきい値以下であればロボットが軟着陸したと判定して分離展開動作を行う。

2.4 ナビゲーション走行システム

ロボットのナビゲーションは、搭載されたGPSモジュールと電子コンパスにより以下の手順で行う。

電子コンパスから方位情報は、0.1秒毎に取得し、現在の進行方向ベクトル v_r を計算する。一方、現在位置 p_r は、1秒周期でGPSにより取得し、図5に示すように、現在位置 p_r とゴール位置 p_g から目標進行方向ベクトル v_g を計算する。これらのベクトル v_r と v_g の偏差角 θ をゼロにするように左右のモータの速度を制御することで、ロボットは目標位置へ向かう。ゴール判定は、GPSで得た現在位置とゴール位置の距離が、しきい値以下になることで行う。

3 フィールド実験

開発した展開型スポーク車輪を有する移動ロボットの有用性を検証するため、2010年9月13日~16日に米国ネバダ

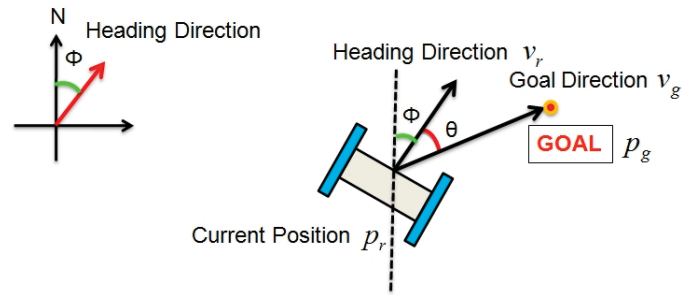


Fig. 5: Navigation algorithm

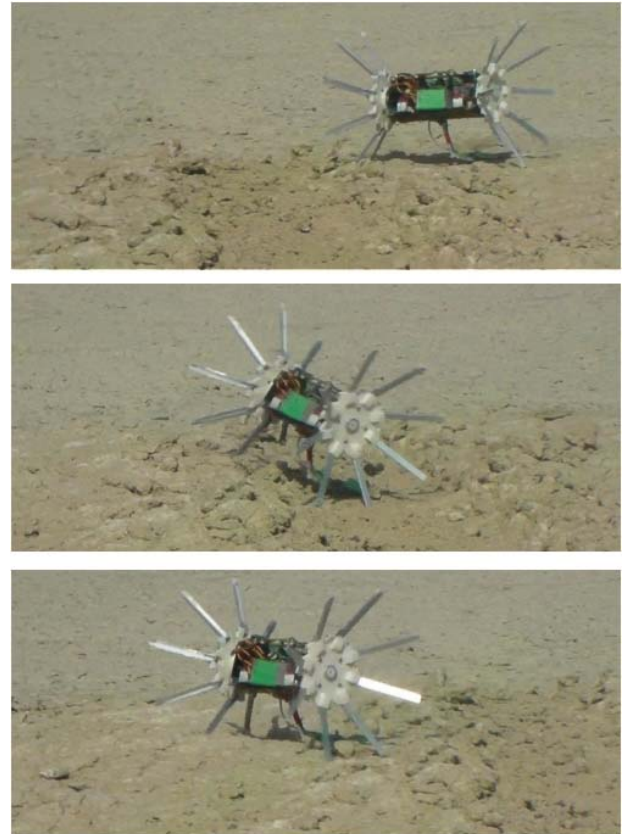


Fig. 6: Running scene on uneven terrain

州ブラックロック砂漠で開催された第12回ARLISS-CBCに参加し、フィールド実験を行った。

3.1 不整地走行実験

まず、比較的轍が多い場所において走行実験を行った。図6に轍上を走行しているロボットの様子を示す。轍の深さは最大5 cm程度であり、この程度の轍ならスタックや転倒することなく安定して走行できることが示された。

3.2 打ち上げからナビまでの一連の実験 (ARLISS-CBC)

次に、打ち上げからナビゲーションまでの一連の動作実験を行った。ARLISS-CBCでは合計2回の打ち上げの機会が与えられたが、1回目の打ち上げでは、プログラムのバグから空中で着地判定を行ってしまい、ロボットがフリーフォールしてしまったため、走行を行うことができなかった。2回目の打ち上げでは、目標地点から約1.63 kmの地

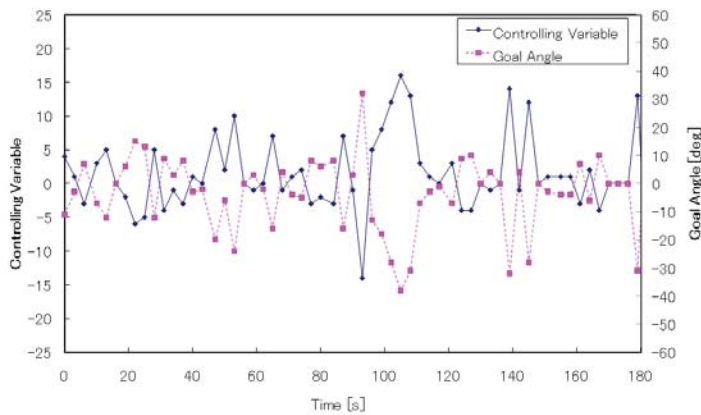


Fig. 7: Example of the control history

点に無事軟着陸した。その後、スポーク展開、パラシュート分離に成功し、ナビゲーションを開始した。

図7に走行開始後3分間の制御履歴を示す。横軸は走行を開始してから時間、縦軸は現在進行方向と目標進行方向のなす角(偏差角) θ およびモータへ与える操作量を表している。なお、搭載メモリの容量の問題で、制御履歴は3秒間隔となっている。図7より、偏差角 θ をゼロにするように制御を行っていることが分かる。

ロボットは、図8に示すような走行軌跡を描き、ゴール地点から約4 mの位置でゴール判定を行い停止した。実走行距離は、約1.73 km、走行時間は約26分であった。この間、あまり大きな轍は存在しなかったが、比較的小さな轍については、問題なく乗り越えることができた。

図8のように走行軌跡が弧を描いた理由として、次の2つが考えられる。1つ目は、方位誤差の影響である。方位を取得するための電子コンパスは、モータが出す磁力の影響を最小とするために、ロボット本体から最も離れたスタビライザ先端付近に設置した。このため、走行時の振動による、コンパス自体の向きや傾きの変化で方位誤差が生じ、図8のような軌跡を描くナビゲーションとなってしまったと考えられる。2つ目は、左右輪の大きさのわずかな違いの影響である。左右輪の各スポークの長さや展開角度は完全に等しいわけではないので、左右車輪径の差異の影響で、偏差角 θ に定常偏差が残り、回り込むようにゴール地点へ向かったのではないかと考えられる。実際に、走行開始から終了までの平均偏差角を計算すると -2.9° であった。

4 結言

本稿では、ARLISS-CBCへの参加を目的として開発した、展開スポーク車輪を有する小型ロボットの新モデルについて説明を行い、その有用性を検証するための実験についての報告を行った。実験の結果、本研究で提案する展開車輪は、5 cm程度の轍であれば、安定して走行可能であることが示された。

今後の課題としては、スポーク形状やその先端形状、スタビライザ形状等を改良することで、傾斜のある不整地や軟弱地盤上でよりトラクションを得ることができるモデルを構築することが挙げられる。

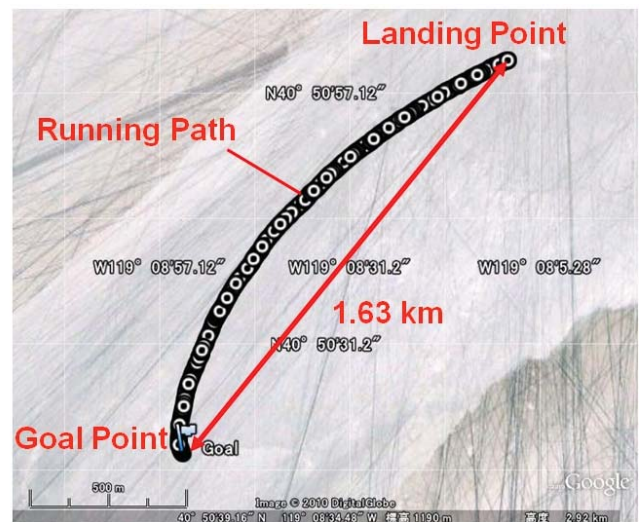


Fig. 8: The running path of the second launch (on Google Earth)

参考文献

- [1] 木下宏晃, 砂長麻美, 伊藤毅, 桐林星河, 永谷圭司, 吉田和哉, "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", 第10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, pp. 903-906, 2009
- [2] Jack A. Jones, "Inflatable Robotics for Planetary Applications," In Proceeding of 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, i-SAIRAS, Montreal, Canada, June 19-21, 2001
- [3] K. Nagatani, M. Kuze, and K. Yoshida, "Development of a Transformable Mobile Robot with a Variable Wheel Diameter", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 19, No. 3, pp. 252-257, 2007
- [4] J. Schwendner, et al, "CESAR: A Lunar Crater Exploration and Sample Return Robot", The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, St. Louis, USA, pp. 3355-3360, 2009