

特集「無人観測ロボット」

ロッカーボギー機構を用いた無人探査ロボット

磯田 颯¹, 市川 瑞¹, 植松 千春¹, 及川 雄也¹, 山口 正勝²

(要旨) 本報告は、高等学校授業科目「課題研究」において約7ヶ月間で行った研究成果である。本研究では、人の立ち入ることのできない環境(火山地帯、宇宙等)での活動を想定した無人探査ロボット(以下、ローバー)を、高校生自らの手で設計から製作を行い、伊豆大島において動作検証を行った報告である。本ローバーは、不整地の走破能力を備えるため、駆動部には「ロッカーボギー機構」を採用している。独自の運用システムを開発し、オペレーター側とローバー側の双方向から、リアルタイムでデータの送受信を行い、ローバーの動作状況の監視も可能としている。校内での模擬不整地の走破実験、および、伊豆大島三原山溶岩砂漠地帯における実証実験では、一定の条件下において安定した走行を行えることを確認した。

1. はじめに

本校、東京工業大学附属科学技術高等学校(工業系の専門高校)で実施している高等学校授業科目「課題研究」について紹介させていただきたい。授業科目「課題研究」は、所属分野(本校には、材料科学・環境科学・バイオ技術分野(応用化学系)、情報・コンピュータサイエンス分野(情報システム系)、システムデザイン・ロボット分野(機械システム系)、エレクトロニクス・エネルギー・通信分野(電気電子系)、立体造形・デジタルデザイン分野(建築デザイン系)の専門5分野が設置されている)で学習している専門分野に関連した研究テーマ及び研究目標を生徒自ら設定し、高校3年生の4月から約7ヶ月間研究活動を行うものである。目標を達成するまでには、様々な問題点が生じ、それに伴う新たな課題も生まれてくる。指導教員は、問題点や課題を抱えている生徒を指導するが、すぐに解決策を与えることはしない。本校において「課題研究」は、別名『問題解決学習』とも呼んでいる。生徒が抱えている問題点や新たな課題に対して指導教員は、当然生徒を指導する。しかし、その指導内容は、あえて方向

性を示す程度に抑えている。これにより、問題解決に至るまでの過程は、生徒自らが調査し検討し工夫をすることによって解決を図っていくとする生徒主体の活動となる。すなわち、目標を達成するまでの活動において、様々な問題解決を行いながら進めていくことになる。生徒は、そのような活動の中で、新たな知識、技術を習得し、さらに高度な理工学的な専門の学習を行うことができるのである。

本報告は、このような授業科目「課題研究」において約7ヶ月間で行った研究成果[1]であり、2011年4月から、標記の研究テーマで無人探査ロボットを設計・製作し、無人探査ロボットの実証試験を行うために、2011年10月26日～28日に伊豆大島にて開催された「第3回伊豆大島無人観測ロボットシンポジウム」に参加し、本研究の口頭発表、および、製作した無人探査ロボットの三原山溶岩砂漠での実証実験に関する活動報告とする。

2. 研究について

2.1 研究背景

近年のめざましい科学技術の発達により、人類は地上のみならず宇宙空間、他の惑星等これまで踏み込め

1. 東京工業大学附属科学技術高等学校2011年度第3学年
2. 東京工業大学附属科学技術高等学校
myamaguc@hst.titech.ac.jp,
2011kaken_rover@googlegroups.com

なかった場所への進出が可能になった。そのため相対的に人が立ち入れない場所も増え、これまで以上に無人探査ロボットの需要は高まっている。実際に惑星等の探査をするためには、無人探査ロボットは、ロケットへの搭載をしなければならない。そのため、小型・軽量化が必要不可欠となり、ロケットへの搭載などの運搬にも有利なロッカーボギー機構[2]に注目した。

そこで、本研究で製作する無人探査ロボットは、小型・軽量化において力を発揮するロッカーボギー機構を採用し、この機構を最大限に利用する方法について考察を行った。

2.2 研究目的

火山や火星など人の立ち入れない環境での活動を想定した無人探査ロボット(以下、ローバーと略記)を製作し、以下に示す3段階の達成目標を掲げて研究を行った。

(1) ミニマムサクセス：不整地の走破

整備されていない不整地を安定して走破できるように「ロッカーボギー機構」を備えた機体を設計・製作する。模擬不整地での実験と伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムでの実証実験を通して、自作したローバーの動作を検証する。

(2) フルサクセス：無線化/センサデータ収集

ローバーとオペレーター間の双方向データ通信を行うため、センサを搭載し、操作の無線化を行う。無線通信にはシリアル通信モジュールXBeeを使用してリアルタイムでのセンサデータの取得ができるようにする。

(3) エクストラサクセス：サンプルリターン

ローバー本体に資料の採取ができる機能を搭載し、サンプルリターンを行う。小型化のために本体に格納できるものが望ましい。

2.3 機体データ

本ローバー、通称「ROVACO」は全長365 mm×全幅190 mm×高さ200 mmであり、ロッカーボギー機構を用いた独立6輪駆動、及び、4輪操舵を備えている。そのため、駆動用モータを6個、操舵用サーボモータ4個、センサ4種類を搭載しており、マイコン Arduino™Megaを使用して制御している。

ローバー概要

名称	ROVACO
全長 [mm]	365
全幅 [mm]	190
全高 [mm]	200
重量 [kg]	3.00
動力	RE-260A ×6 GWS MICRO ×4
電源電圧[V]	制御部 7.2 (AA1.2×6本) 駆動部 7.2 (AA1.2×6本) ステアリング部 4.8 (AA1.2×4本)
使用マイコン	Arduino MEGA 2560
搭載センサ	加速度センサ×2 距離センサ 温度センサ GPS 方位センサ

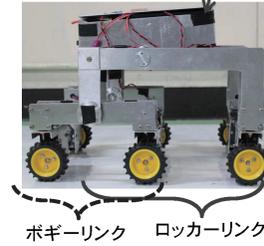


図1：製作したローバーの概要。

3. 機体構造

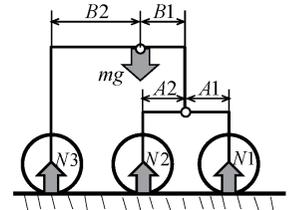
3.1 ロッカーボギー機構

(1) 設計

ロッカーボギー機構の基本的な構造を調べた後、独自にフレームの長さ及び形状等を設計した。ロッカーボギー機構の特性上、6輪全ての車輪に等しく荷重が加わらなければ不整地の走行は行えない。そのため、予めローバー全体の完成時の質量を仮定して、その数値を元にフレームに働く力やモーメントの計算を行い、全ての車輪に等しく荷重が加わるように各リンクの長さを決定した。ローバー中央部にある箱型の部分は、マイコンや無線モジュール、電池等を収納する事を考慮して寸法を決定した。

ロッカーボギー機構の設計

$$\begin{aligned}
 &N1 = N2 = N3 \\
 &\text{(各車輪の垂直抗力は等しい)} \\
 &mg = N1 + N2 + N3 \\
 &\text{モーメントのつり合いより} \\
 &A2 \times N2 = A1 \times N1 \\
 &B2 \times N3 = B1 \times (N1 + N2) \\
 &\text{以上から} \\
 &\begin{cases} A1 = A2 \\ B2 = 2 \times B1 \end{cases}
 \end{aligned}$$



全ての車輪に等しく荷重をかけることが可能

図2：ロッカーボギー機構の設計。

3.2 駆動機構

(1) 設計

駆動モータには、マブチモータ製のRE-260RAを、ギヤボックスにはタミヤ模型のハイパワーギヤボックスHEを用いた。ギヤボックスの速度減速比は当初は41.7を選択した。しかし、その後実際に走行させてみるとトルク不足が感じられ、詳しく調べたところ使用していたのはRE-260RA-18130だったため、駆動電圧を4.5V、速度減速比64.8に変更した。

(2) 製作

ギヤボックス箱の設計にあたっては、部品点数の省略、メンテナンス性、防塵性の向上のしやすさに重点を置いた。1.5 mm厚のアルミ板をコの字型に曲げることによってギヤボックス箱は1パーツで構成した。ハイパワーギヤボックスHEの最大の開口部である側面を板で完全に覆うことで防塵性を高め、メンテナンス性を向上させるために、すべてのネジにドライバーが入るように配慮した。これらの工夫により、ギヤボックスを交換しなくてはならないような事態になっても、4本のネジを外すだけでギヤボックスを交換できるように工夫した。

3.3 ステアリング機構

(1) 設計

ステアリングは、左右を独立して駆動するロッカーボギー機構の特徴上、自動車のようなリンクを用いたステアリング機構が利用できないため、6輪のうち前後の4輪にRC用サーボモータGWS MicroMG/2BB(以下、MicroMG)を搭載し4輪操舵とした。各車輪の操舵角については、すべての車輪と路面との間に滑りが無いものと仮定すると、各車輪は旋回を中心点Oを中心とする円を描くと考えられる。各車輪の回転数の比は、描いた円弧の長さの比に比例し、円弧の長さは、円の半径に比例することから、各車輪の回転比は旋回を中心点までの距離の比に比例すると考えられる。ArduinoのPWM制御によりモータに与える電力を下げ、車輪の回転数を下げるため、最も円弧の長さが長くなると思われる回転の中心から見て外側の前後輪の回転数を1とおき、各車輪の回転数の比を求めた。この比を指示されたモータ出力に掛けることで旋回時にモータに加える電力を算出することができ、PWM制

御のオン、オフ時間の比を求めることができる。これらの舵角度と回転数の比は搭載マイコンであるArduinoでリアルタイムに計算して求めるのが処理能力の関係上困難であったので、あらかじめPCで計算した結果を記憶させておく方式をとった。

(2) 製作

MicroMGを固定するためのサーボ箱は、ギヤボックス箱とサーボモータを接続するためのサーボホーン、サーボホーンへの負荷を軽減するためのスペーサーから成っている。ステアリングの構造上、車輪に軸を貫通させるわけにいかず片持ちとせざるを得ないので、片持ちにしてもサーボモータの軸やサーボホーンへ過大な力が加わって破損しないようギヤボックス箱とサーボ箱の間に1.5 mm厚のアルミ板を入れ、スペーサーとした。しかし、アルミ板同士のこすれ合いにより部品が摩耗することが懸念されるため、スペーサーの表面にビニールテープやセロテープを張り、直接アルミ板同士が触れないようにすることでアルミ部品の摩耗を防ぐようにした。

3.4 差動機構

(1) 目的

本ローバーは、岩石や小石が堆積しているような不整地の走行を想定している。そのため地面の状況によっては、左右のロッカーボギーで異なる高さの段差を登る事が考えられる。このような場面では、左右のロッカーボギー機構それぞれが段差に応じて傾きを調節出来なくてはならないが、それらの2本の軸をただ本体に固定するだけでは意味がなく、逆に固定しなければ

差動歯車による本体の安定化

主な役割

2つの部分の動きの差を検出
動力を差をつけ振り分ける

本体の中心に差動歯車を搭載

左右のリンクの角度の差を吸収

リンクが傾いても本体は安定



図3: 搭載した差動歯車機構。

ばローバーが走行した時の振動で本体が安定しなくなる。そのため、本体が安定し、かつ段差を登る時には柔軟に傾きを変える事が出来る機構が必要になり、差動歯車装置を搭載した。

(2) 差動歯車

差動歯車装置とは、1つの動力を2本の異なる軸に差をつけて分配する事や、それら2本の軸の動きを検知して差動歯車本体はそれぞれが傾いた角度の中央を向くようにする装置である。前者の役割は自動車に広く用いられ左右に旋回する時に力を発揮していて、後者の働きは本ローバーでの主な役割となっている。この機構を搭載したことにより、左右のロッカーボギーが異なる角度に傾いても、ローバー本体は常に安定した状態を保つ事が出来る。

4. 電装

4.1 メインボード

Arduinoの中でもアナログ入力ポートが多数あり、UART通信が4系統搭載したArduino Mega2560を採用した。センサ用基盤には、ガラスエポキシ製ユニバーサル基板にて設計・製作を行った。メインボードは三層に分かれており、Arduino、XBee、センサボード層、駆動系層から成る。それぞれの基板は連結フレームで接続されているため、分離することが可能である。配線にはポリウレタンエナメルワイヤー0.08 mmを使用した。

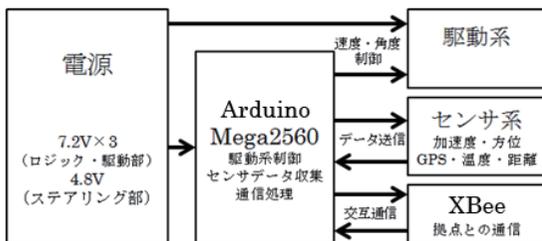


図4：電装系ハードウェアの構成。

5. 校内での試験

5.1 走破能力

走破性能の確認として、製作したロッカーボギー機構がきちんと動作するかを検証するために段差を用いて、これを乗り越える試験を行った。図5は試験を行っている様子である。このように木材等を何本か束ねて人工的に段差を作ることで、校内での段差走破試験を行った。この時の段差の傾斜角は約75度であり、ボギーリンク部分の車輪と車輪の間に段差が挟まってしまうと動けなくなってしまうので、乗り越えた先がスロープになるようになっている。この結果、最大144 mmの段差を乗り越えることができたため、ロッカーボギー機構が動作していることを確認した。



図5：段差走破試験。

5.2 動作時間の確認

本ローバーは、連続走行時間1時間を目標とした。搭載モータが30度の傾斜を走行するときの計算上の電流消費量から、1時間走行するために必要な容量を計算し、車輪駆動用モータと操舵用モータを駆動するために、単三充電電池をそれぞれ6×2本と4本搭載した。これで目標としていた連続走行時間1時間を達成できるか確認するため、校内で耐久走行実験を行った。校内には各校舎の入り口に段差やスロープがあるため、これらを積極的に乗り越えることで、擬似的に不整地での電力消費の多い状況を再現した。1時間走行した後の電池の消費は予想していたよりも少なく、目標としていた1時間程度ならば走らせることができることを確認した。

6. 伊豆大島における実証試験

6.1 運用試験

(1) 概要

製作したローバーを伊豆大島の三原山にある裏砂漠と呼ばれる溶岩砂漠地帯で動作させた。裏砂漠は、火山の噴火時に形成された軽石やスコリアがあるため、ローバーの不整地における走破能力を調べるのに非常に適した場所である。

(2) 伊豆大島裏砂漠について

日本国内で唯一砂漠という地名がついている場所で、辺り一面が度重なる三原山(標高758 m)の噴火による火山噴出物のスコリアや火山灰、溶岩流によって黒く覆われている。また、ところどころに雨水が流れてきたと思われる溝やブッシュが点在している。

(3) 試験内容

裏砂漠の中で、地面の特徴が少し異なる3地点にて試験を行った。それぞれの地点において、ローバーに前進、後進、右旋回、左旋回、その場での回転運動などをさせて、ローバーの走破能力を検証した。以下説明のために3箇所を、それぞれ地点A、地点B、地点Cとする。



図6：伊豆大島三原山裏砂漠での実験の様子。

(4) 試験地点及び試験結果

(a) 地点Aは、裏砂漠に入って初めにデモンストラーションを行った場所であり、直径10 mmほどの軽石がある所で約3度の傾斜になっている。ここでの試験では、走行中に何度か地面を掘ってしまい身動きがとれなくなってしまうことや、ギヤボックスとタイヤの間に軽石が挟まりタイヤが動かなくなってしまう

ことなどの状況が確認された。しかし、ゆっくりと走行すれば前進、後進など全ての動作を問題なく行うことができた。また、多少の溝であればロッカーボギー機構が機能して乗り越えることができ、地面に引っ掛かった場合はその場で回転することで解消できる場面があった。

(b) 地点Bは、軽石の大きさなどは地点Aとほぼ変わらず、傾斜が俯角約6度であった。この地点では、後述6.2に示す通信試験を行った。ここでは地点Aとほとんど同じ動作を行えたが、前輪が軽石に引っ掛かり中輪が浮いてしまう場面があった。この状態からそのまま前進させると、引っ掛かいていない方のロッカーボギーリンクが先行してしまいバランスを崩して転倒した。

(c) 地点Cは、裏砂漠の入り口付近から少し奥に入った所で、入り口横にはさらさらとした細かい砂があり少し中に入ると地点A、Bと同じくらいの大きさの軽石があり、更に奥に入ると斜面と直径20 mmほどの軽石があった。入口横の細かい砂の地帯では、斜面がなくゆっくりと移動していれば問題なく走行できたが、少しでも傾斜がある所ではすぐにタイヤが地面を掘ってしまい動けなくなった。また、軽石の直径が大きくなるにつれてギヤボックスとタイヤに軽石が引っ掛かる場面が多くなり、軽石の直径が約20 mmになると前進することができなくなった。

(5) 考察

今回の大島での運用試験の結果によって、まず第1に、タイヤの直径が走破性に大きな影響を及ぼすということが分かった。今回の試験では直径65 mmのスパイクタイヤ(予算の関係で、他の授業で使用しているものを流用)を用い、軽石で覆われた地帯を走行する時に地面を掘ってしまうことが多発した。そのため車輪径を大きくしてタイヤと地面の設置面積を減らすことでこの問題を改善することができると考えた。また、今回はスパイクタイヤのみを用いたが、学校での試験の時に用いた平らなタイヤに交換すれば、更に地面を掘りにくくなると思われる。第2にギヤボックスの配置が重要だと分かった。走行中にギヤボックスに軽石が引っ掛かることがよく起こったため、例えばタイヤ径を大きくして中を空洞にしてギヤボックスごとその空洞部に収める方法が改善策として考えることができる。



図7：裏砂漠入り口付近での実証試験の合間に渡辺先生と。

6.2 通信試験

(1) 通信距離試験

地点Bにおいて、コントローラ側のPCの位置を固定して実験開始地点とし、俯角約6度の下り坂を走行させて通信途絶地点までの距離を計測した。

相互通信運用システム

・ Visual C#で専用ホストアプリケーションを作成

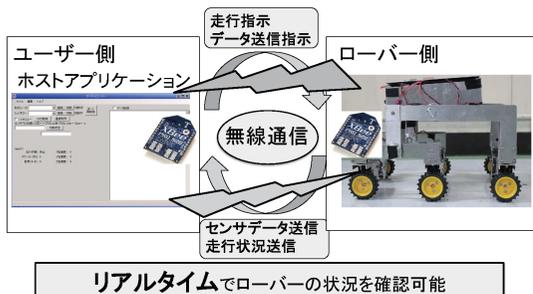


図8：通信システムの概略図。

(2) 通信試験結果

実験開始直後は順調に走行し、約30 m地点で初めて通信が途絶えた。この時、オペレーター側のXBeeの位置は、人が立った際の胸もの程度の高さ、すなわち、おおよそ1 m 40～50 cmであった。そこで、オペレーター側のXBeeの位置を徐々に高くし、およそ地表3 mの高さにしてみたところ通信が再開し、最終的に約55 m地点まで走行したところで通信が完全に途絶えた。実験中の走行に関しては、何度かタイヤが地面を掘ってしまうことはあったものの、全体を通して順調かつ安定して走行が確認された。

(3) 考察

パケット通信を採用しその仕様を定めることにより、ローバーは通信可能距離ならば安定して指示を受け取り動作し、センサのデータを送信することが可能になった。また機能追加する際も仕様に応じて行うことで、ホストアプリケーションの開発や機体プログラムの製作において生じる混乱を減らすことができた。しかし、未だXBeeの仕様やシリアル通信の規格を十分に理解できていないため、さらなる学習と、より最適なパケットの仕様についても考察する必要がある。

7. おわりに

「課題研究」は、高校の一授業での取り組みであることから、予算の面でかなり苦労しながらの活動を強いられます。ですから、必要な部品等は手作りです。作成したローバーは、彼らの手で板金を行い、旋盤やボール盤などの工作機械を活用して、ほぼすべてが手作りで作られています。4月から活動を始め、夏休み期間も大半をこの研究活動に費やし、目標を達成すべく約7ヶ月活動を行いました。授業としては、最終的に成果発表会でのプレゼンテーションと必須項目として課される報告書[1](大学の卒論のような数十ページに及ぶレポート)の作成を行います。一般的に「授業」は、生徒が受け身がちな姿勢で取り組むことが多いですが、「課題研究」は、生徒が能動的に取り組めます。すなわち、自発的に、かつ、主体性を持って活動しています。この点に着目していただき、改めて本報告を読んでいただくと大変ありがたく思います。なお、目標の一つとして掲げたエクストラサクセス: サンプルリターンは、時間がなく達成することが出来ませんでした。

今回、「課題研究」の成果を、このような誌面に掲載できることは、本研究を行った4名の生徒はもとより、指導した小生も大きな喜びとするところでもあります。掲載させていただいた報告は、最終的に小生による若干の修正を施しているものの、ほぼすべてを4名の生徒が協力して執筆したものです。従って、著者名の順番は、単に五十音順で記載しているだけで、研究活動も執筆活動も皆同じ立場で努力・貢献していることをご理解下さい。

最後に、伊豆大島での第3回無人観測ロボットシン

ポジウムへの参加，三原山溶岩砂漠地帯での実証試験，さらに，このたびの投稿をする機会を与えてくださったシンポジウム主催者をはじめとする関係機関の皆さまに，篤く御礼を申し上げます。



図9：著者生徒の課題研究発表会での様子。左から，植松，磯田，及川，市川。

参考文献

- [1] 植松千春，他，2011，平成23年度課題研究報告書，東京工業大学附属科学技術高等学校 科学・技術科 システムデザイン・ロボット分野。
- [2] 佐藤雅紀，石井和男，2003，日本機械学会[No.03-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集，1P1-1F-C7(1)。