

2.1 東北大学

ARLISS Project 2003

2.1.1 ミッション概要

我々は ARLISS Project において、惑星探査ローバーに関する研究で培ったバックグラウンドを活かせるミッションとして、“Run-Back” と呼ばれるミッションを 2002 年度より試みている。これは、パラシュートで降下・軟着陸したペイロード（小型ローバー）が、GPS を用いた自律ナビゲーションにより目的地へ向かって走行するというミッションである。Run-Back の最も大きな利点は、風などの外乱を受けずに半永久的に目的地へのナビゲーションが可能である、という点である。

現在、各国の宇宙開発機関において、超小型・軽量のローバーによる惑星探査の可能性が検討されている。地上の環境ではあるが、ロケット打上げおよび着陸の衝撃に耐え、かつ完全自律走行によって目的地到達を可能とする小型ローバーを開発することは非常に意義のあるチャレンジであると考えられる。

Run-back ミッションのシーケンスは主に以下の 5 段階に分けられ、その概略を図 2.1-1 に示す。

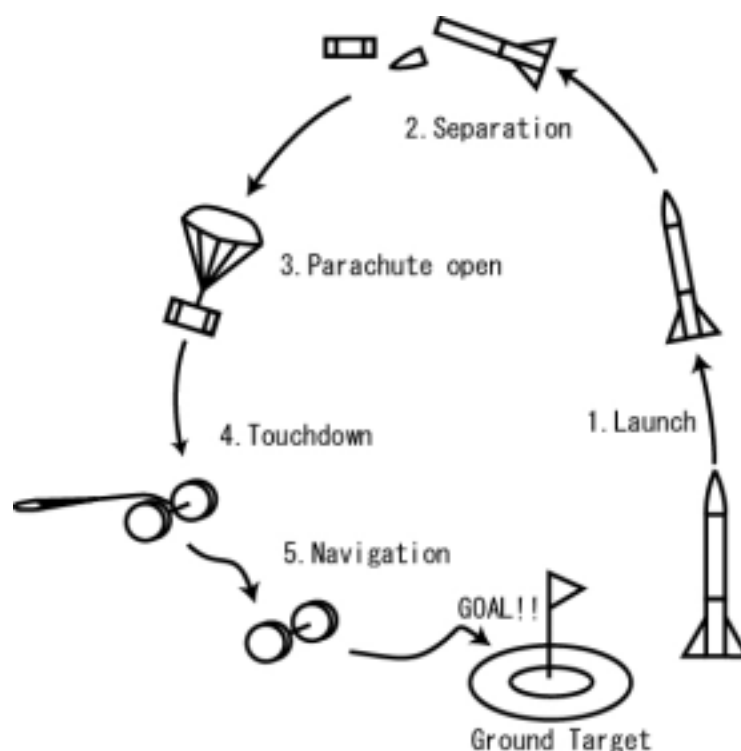


図 2.1-1 : Run-back Mission sequence

1. 打上げ

ペイロードをアマチュア小型固体燃料ロケット内に格納し、高度約 4000m まで打上げる。

2. ペイロードの放出・分離

ロケットのノーズコーンから、慣性によって受動的にペイロード(ローバー)が放出・分離される。この瞬間にローバーに取り付けられたリミットスイッチが ON になり、GPS データの取得を開始する。

3. パラシュート展開

数秒後、風の抵抗によりパラシュートが展開し、一定速度で降下をはじめめる。

4. 軟着陸・タッチダウン

パラシュート展開から約 15 分後に軟着陸をおこなう。このとき着地を検出することにより、ローバーはパラシュートを本体から分離する。

5. ナビゲーション

パラシュート分離後、ローバーは GPS の位置情報をもとに自律ナビゲーション走行を開始する。

2.1.2 ローバーのシステム概要

一般にローバーは車輪径が大きいほど地面の凹凸に対する踏破性能が高くなる。また限られたキャリアサイズ (Open-Class : 148mm × 260mm) 内で、車輪径をより大きくするためには車輪数が少なくなければならない。そこでこれらの設計要求を満たすために、走行およびステアリングに必要な車輪の最小個数として、2 輪とすることを考える。図 2.1-2 にローバーの概観を示す。

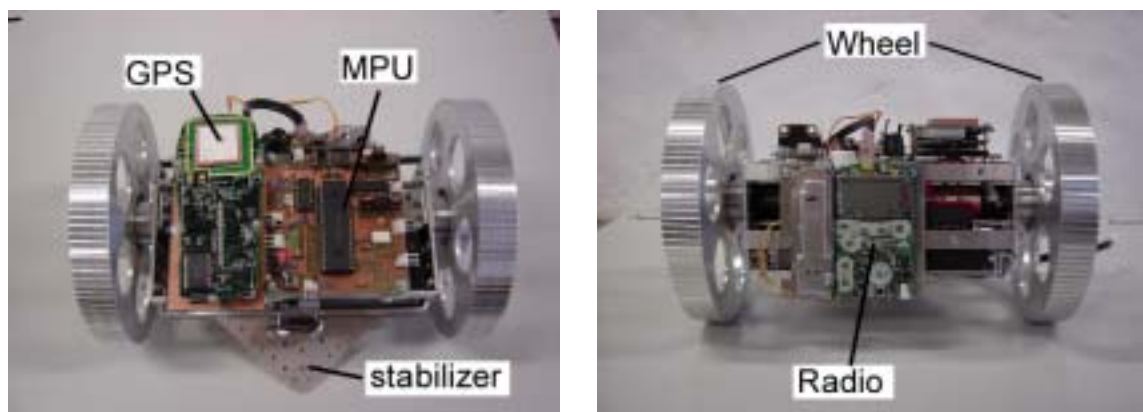


図 2.1-2 : General view of the rover

ローバー本体はアルミ製で、本体を両側から挟むように 2 つの車輪を取り付ける。この本体部分に MPU や GPS、通信系などを搭載する。また車輪のトルクによってロボット本

体が空転することを防ぐため、中央下部にスタビライザーとして三角形のアルミ板を配置し、ローバーはスタビライザーを常に地面に押しつけながら走行する。

ローバーの寸法はキャリア収納時に 146mm×220mm の大きさになり、Open-Class のキャリア規定サイズ 148mm×260mm 内に収めることができる。

図 2.1-3 にローバーのシステムブロック図を示す。本ローバーは主に、電子・制御系、電源系、通信系、構造系の4つのサブシステムからなる。またローバーのテレメトリデータ受信側として地上局の開発もおこなった。

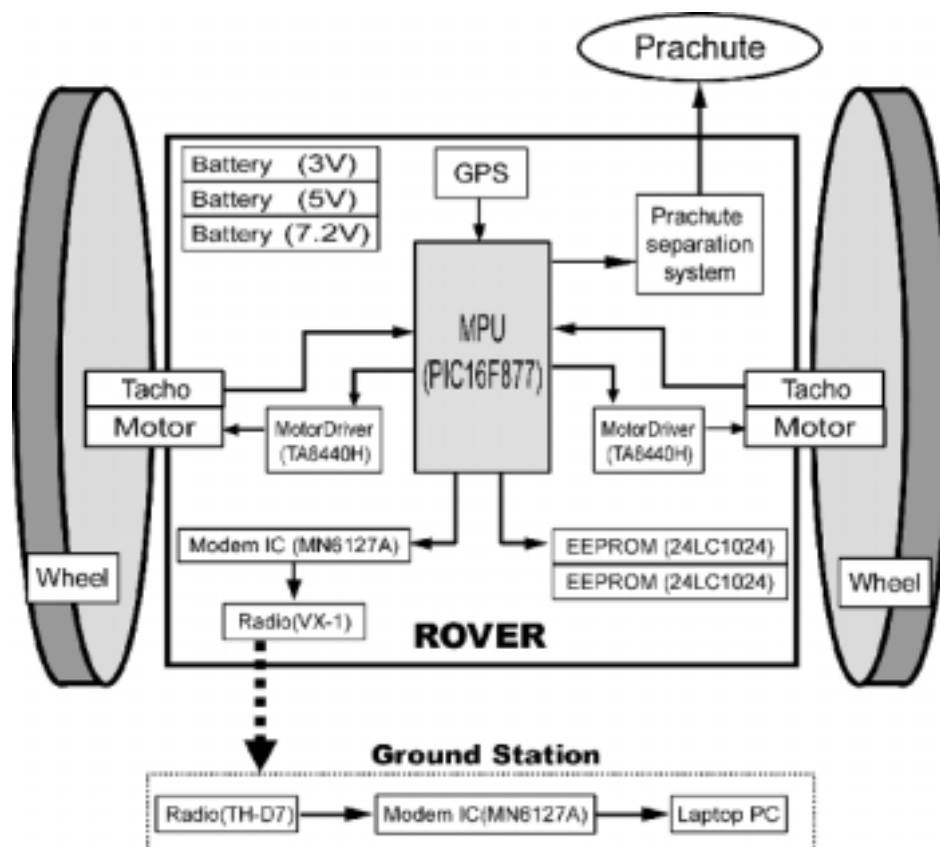


図 2.1-3 : System block diagram

< 電子・制御系 >

本サブシステムは主に、MPU (PIC16F877)、GPS 受信機 (GARMIN-eTrex)、EEPROM (24LC1024×2) から構成される。

MPU がおこなう主なタスクは以下のようにになっている。

- ・ GPS の高度情報をもとにローバーの着地を検出し、パラシュートの分離をおこなう。
- ・ GPS から出力されるデータのうち、ナビゲーションに必要な位置情報のみを取り出し、後述するアルゴリズムに基づいた演算をおこない、ローバーの自律ナビゲーションを実現する。

- ・ タコジェネレータによって計測した車輪回転速度を用い ,PID フィードバック制御により両輪の速度制御をおこなう .
- ・ GPS データをコード変換しテレメトリデータとして通信系へ伝える .
- ・ ローバーの位置・高度情報 (ただしローバー着地後は位置情報のみ) およびナビゲーション制御モードを EEPROM へ書き込む .

本サブシステムの回路基板は , 安定性と集積性を高めるため基板 CAD により設計し , 専用プリント基盤を製作する .

<電源系>

モータ電源として Sony Info Lithium バッテリ (7.2V , 21.6Wh , 190g) を搭載する . この電源を用いることで約 3 時間程度の走行が可能である . また電子系 , 通信系の電源としても同様のバッテリ (7.2V , 10.8Wh , 100g) を用い , 5V レギュレータによる電圧変換を介して搭載機器に必要な電圧を供給する . GPS 受信機に対しては単三電池 2 本を電源として用いる .

<通信系 , 地上局>

通信はローバーから地上局への一方向のダウンリンクのみをおこなう . MPU によって変換されたテレメトリデータは , ローバーに搭載した Modem IC を介して地上局へ送信される . 使用する周波数帯は 145.5MHz , 通信速度は 1200bps である . 通信系の基板も基板 CAD により設計をおこない専用プリント基盤を製作する .

打上げ地点近くのテントに設けた地上局では , 八木アンテナを用いてペイロードからのテレメトリデータを受信し , 取得したデータを Laptop PC に取り込み , ローバーの現在地等の情報を把握する .

<構造系>

構造系は , ローバー本体 , 車輪 , パラシュート , パラシュート分離機構からなる .

ローバー本体はアルミ製のオープンフレームから構成され , 最大外寸 165mm × 65mm × 85mm であり , その中央に走行用モータを対称に配置する .

車輪はアルミ製で直径 146mm の円形状をなしており , 車輪表面に溝を切ることによって走行性能の向上を図っている (図 2.1-4) . 車輪を支えるフランジ部およびモータ・減速器は最も外力を受けて壊れやすく , かつ壊れてしまうとローバーが全く走行できなくなってしまうクリティカルな部分である . そこでこの部分の設計には細心の注意を払い , 車輪に作用する力はすべてベアリングおよび本体側のフランジを通して本体フレームで支えられ , 車軸の駆動トルク以外はモータ・減速器へ伝わらないような構造とする . ローバーのステアリングは , 左右の車輪に速度差を設けることで任意の方向へ旋回をおこなうといった skid-steer により実現する .



図 2.1-4 : Rover Wheel

降下用パラシュートはナイロン製で、開傘時の形状はほぼ半球であり、その半径は約 400mm となる。パラシュートによるローバーの降下速度、およびローバーに加わる着地時の衝撃を評価するため、パラシュート降下シミュレーションをおこなった。その結果、終端降下速度は 4.37m/sec、降下時間は約 15 分であった。また着地時の衝撃は、約 80cm の高さからローバーを自由落下させた場合とほぼ同等の衝撃が加わるということがわかった。

着地後、パラシュートを引きずった状態での走行は困難であり、また風にあおられるとローバー自体が飛ばされてしまうことが憂慮されるため、小型モータとネジ付リングから構成されたパラシュート分離機構をローバー内に搭載する。パラシュートの分離は、GPS からの高度情報をもとに MPU がローバーの着地判定をおこない、分離信号を小型モータに与え、ネジ付リングのネジが外される仕組みとなっている。

2.1.3 ナビゲーションアルゴリズム

前述のように、ローバーは GPS を用いた自律ナビゲーションをおこなう。到達すべき目的地は、緯度・経度の座標値で計測し、ミッション開始前にあらかじめ MPU の ROM 内に記憶させる。

GPS からの出力データをもとに、ローバーの位置情報（緯度・経度）に関する時系列データを差分し正規化をおこなうことで、ローバーの単位速度ベクトル ev が得られる。また ROM に記憶させた目的地の座標値とローバーの現在位置との演算をおこなうことで、ローバーが進むべきターゲットベクトル et を求めることができる。

図 2.1-5 に示すように、ベクトル ev と et がなす角の大きさおよび符号は、両者のベクトルの内積・外積によって計算することができる。ゆえに、GPS を用いた自律ナビゲーションアルゴリズムは、の大きさをゼロに近づけるアルゴリズムとなる。しかし実際のナビゲーションでは、しきい値としてある角度（15～20 度）を設定し、単純なルールに従って「直進」「左旋回」「右旋回」の走行モードを選択する。

以上のアルゴリズムを搭載 MPU に組み込み、自律ナビゲーションを可能にする。

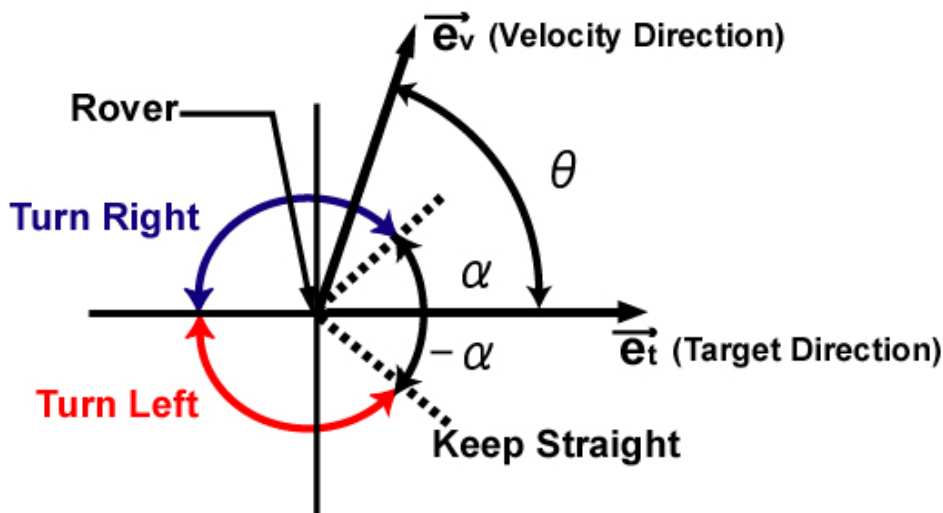


図 2.1-5 : Navigation and control strategy

ナビゲーションにおける問題として、GPS の測位精度とローバーの移動速度との関係から、ローバーの過去位置データと現在位置データが同じデータになってしまう可能性がある。よって時系列データの差分を取るときローバーは十分な距離(GPS の誤差範囲)以上走行している必要があるため、ナビゲーション演算は 4~5 秒ごとにおこなうこととする。

また、このナビゲーションアルゴリズムは、シミュレーションによってその実現性・有効性を確認している。

2.1.4 サクセスレベル

ARLISS2003 での、サクセスレベルを以下のように定義する

Minimum Level	パラシュートを展開・軟着陸し、ローバーが移動を開始する。
Nominal Level	GPS を用いた目的地への自律ナビゲーションをおこなう。
Advanced Level	目的地へ到達し、優勝する！

2.1.5 地上走行実験

ARLISS 第 1 日目では、ロケットによる打上げは実施せず、地上における走行実験をおこない、目的地より 500m 離れた地点からナビゲーションを開始させた。本実験では、長距離におけるナビゲーションアルゴリズムを実証するとともに、目的地付近でのローバーの挙動の明確にすることを目的とした。

走行プロファイルは実験後 EEPROM より読み出し、Laptop PC に保存・確認する一方、リアルタイムで地上局に送信されたテレメトリデータとの整合性も確認した。

本実験のローバーの走行プロファイル、走行モードを図 2.1-6 に示す。(a)はローバーの走行プロファイルを示し、(b)~(d)はそれぞれ直進、右旋回、左旋回の制御モードを示して

いる。

図 2.1-6 より GPS を用いた自律ナビゲーションが正確におこなわれていることが分かる。また目的地方向に対しローバーは右側からアプローチしているが、これは地面の硬さや凹凸による影響で車輪がスリップしたためと考えられる。特に深い轍の影響によりローバーが正しく旋回できないケースが数回見られたが、的確に方向を修正しながら走行し目的地への到達に成功した。さらに目的地到達後でもローバーの走行を継続させたところ、目的地を通過してしまってもローバーは大きく旋回しながら目的地に向かってアプローチをおこない、再度目的地への到達に成功した。目的地付近におけるローバーの挙動は図 2.1-6 からも明らかである。

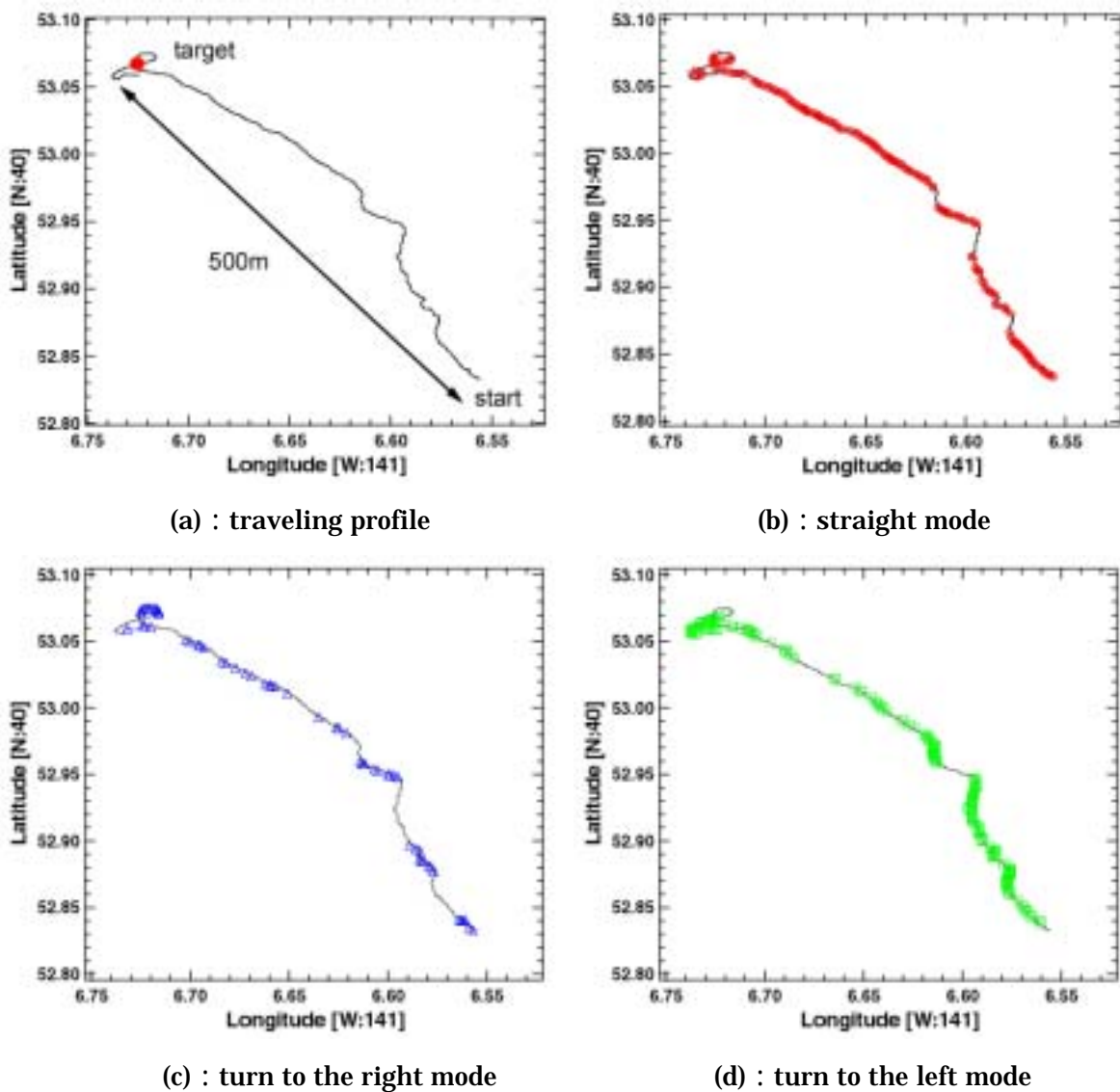


図 2.1-6 : Traveling profile and Navigation result (distance = 500m)

2.1.6 ミッション結果

小型ローバーを用いた Run-back ミッションは、ARLISS 第 2 日目におこなった。

小型固体燃料ロケットにより約 4000m の高度まで打上げ、ロケットから分離後、パラシュートの開傘を目視により確認した。パラシュート開傘からおよそ 10 数分後、ローバーは目的地から約 2km の地点に着地したが、走行用モータが動作しておらずパラシュートも分離していなかった。またローバーのテレメトリデータが地上局へ送信されていないため、搭載コンポーネントを調査した結果、GPS 受信機がサスペンド状態(OFF 状態)にありシーケンスが一時停止状態となっていた。これは打上げ時の最大加速度が約 6.5G であったことから、打上げの衝撃または振動によって GPS が OFF 状態になってしまったと考えられる。そこで GPS 受信機を再起動すると MPU がローバーの着地を検出し、分離モータによってパラシュートが分離された。その直後、走行用モータが始動し目的地への自律ナビゲーションを開始した(図 2.1-7)。



図 2.1-7 Locomotion on the desert

図 2.1-8 に示すようにローバーは目的地に向かってナビゲーションを継続した。図中(a)はローバーの走行プロファイルを示し、(b)~(d)はそれぞれ直進、右旋回、左旋回の制御モードを示している。ナビゲーション制御は合計 1953 回おこなわれ、内訳は直進：597 回、右旋回：1237 回、左旋回：119 回であった。

図 2.1-8 から明らかなように、ローバーは目的地に向かって左側からアプローチしていた。これは前日の走行実験と同様に、地面の硬さや凹凸による影響で車輪がスリップすることがあったためと考えられる。特に深い凹凸や轍のある地面では車輪をとられてしまい、ローバーがナビゲーションとは無関係に 90 度以上旋回してしまう場合もあった。

しかしローバーは的確に方向修正をおこない、大きく旋回しながらも目的地に向かって走

行した 最終的に約3時間・約3kmという長距離においても自律ナビゲーションを継続し、目的地に到達することに成功した。

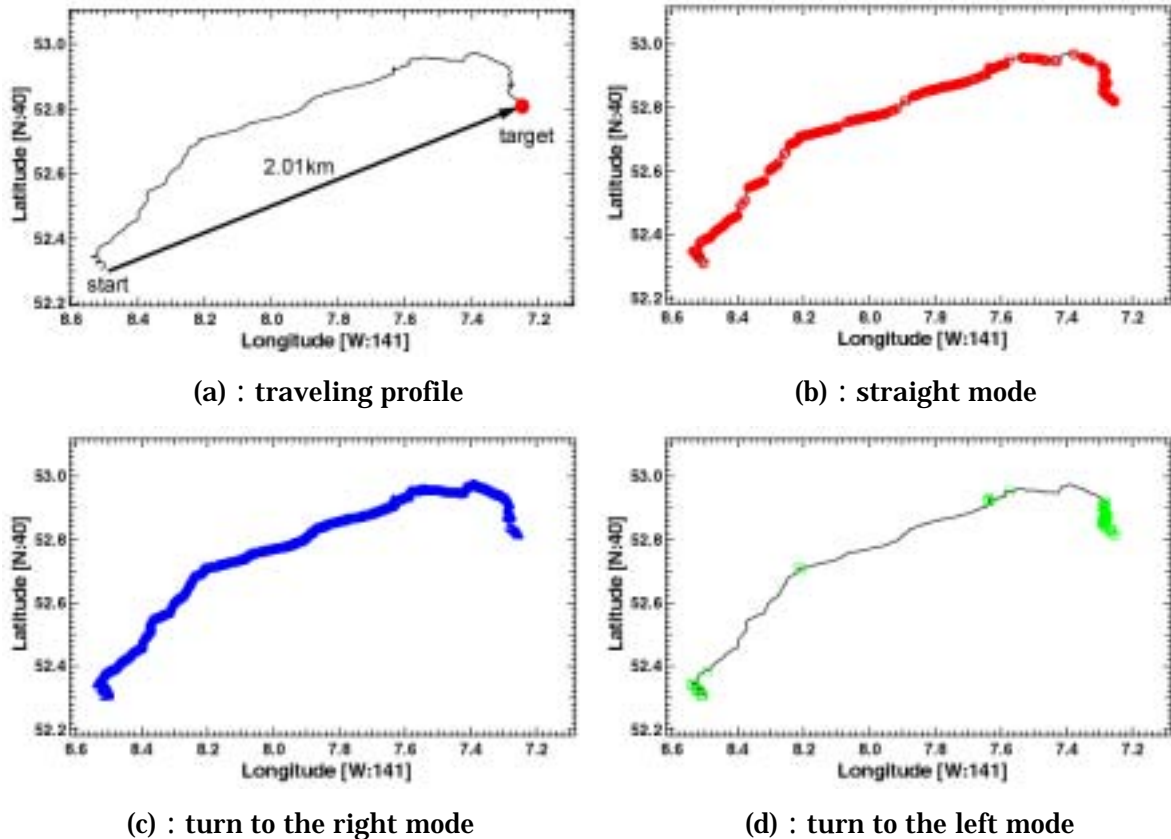


図 2.1-8 : Traveling profile and Navigation result (distance = 2010m)

2.1.7 まとめ

ARLISS2003において、GPSを用いた自律ナビゲーションにより目的地に向かって走行する“Run-back”ミッションを実現する小型ローバーを開発した。

打上げ時の衝撃によってGPS受信機が停止してしまったことは残念であるが、振動試験に代表される地上試験の重要性を再認識するとともに今後反映できる教訓となった。

約3時間・3kmという長時間・長距離走行に成功したことは、小型ローバーとしては非常に優れた結果であると考えられる。またGPSを用いたナビゲーションアルゴリズムを確立し、長時間安定したナビゲーションが可能であることを実証した。

本ローバーの開発段階においては、計画的にミーティングをおこない各インターフェース間でのトレードオフを繰り返すことにより直前変更を回避することができ、また様々な問題に対しても柔軟な対策を講じることができた。このような点においては昨年度に比べ、飛躍的な改善がおこなえた。

今後の課題としては、地面の凹凸に対応した踏破性能の高い車輪を設計することが挙げられる。また、打上げ時の衝撃でシステムに不具合が生じてしまった経験を活かし、システム全体での振動試験を実施すべきだと考える。さらにナビゲーションアルゴリズムの改善点としては、「目的地付近に到達した場合に自律的に目的地到達を検出して移動を停止する」といったアルゴリズムを今回のものに組み込むことが挙げられる。

ARLISS2003 において我々は技術的な習得のみならず、実際のプロジェクトマネジメントを通して、ミーティングやチームワークの重要性を体験することができた。また昨年度の ARLISS2002 における改善点・反省点などを、今年度のローバー開発およびプロジェクト運営に積極的に取り入れ実践できたことは、本プロジェクトのように継続的なプロジェクトにおいて非常に意義のある成果であったといえる。