

# テレセントリックカメラを用いた車輪型砂上移動ロボットの オンラインスリップ推定

池田 礼子 (東北大学) 永井 伊作 (岡山大学) 石上 玄也 (東北大学)  
永谷 圭司 (東北大学) 吉田 和哉 (東北大学)

On-line Slip Estimation on Loose Soil for Wheeled Robot using Telecentric Camera System

A. Ikeda (Tohoku Univ.), I. Nagai (Okayama Univ.), G. Ishigami (Tohoku Univ.),  
K. Nagatani (Tohoku Univ.), K. Yoshida (Tohoku Univ.)

**Abstract :** Planetary rovers that explore surface of the moon or the Mars face a wheel slippage problem due to sandy and loose ground. To follow a given trajectory, it is very important to measure a slip-ratio needs velocity of rover. Therefore, we developed "motion measurement system" using by vision sensor (visual dead-reckoning) to measure velocity of rover on-line. In this paper, we report structure and spec of motion measurement system and the result of velocity measurement of rover.

## 1 緒言

月や惑星の表面探査を目的とした車輪型移動ロボット(以下ローバー)は、対象とする環境が主に砂上であるため、走行中、その車輪はスリップする。したがって、ローバーの目標経路への走行を行うためには、スリップの計測が非常に重要となる。しかしながら、GPSの利用が不可能な対象環境において、車体速度の測定を必要とするスリップ推定は大きな課題として残されている。そこで、本研究では、砂面に向けたカメラで獲得した画像フローを利用して車体速度を測定する「ビジュアルデッドレコニング手法」を用いることとした。ただし、砂上では車輪の沈下具合により、カメラと砂面までの距離が変化するため、通常のレンズでは、正しい予測を行うことが困難である。そこで、本研究では、テレセントリックレンズを用いて、カメラ-砂面間距離の変化に伴う画像変化が起こらないテレセントリックカメラと画像追跡装置からなる運動計測システムを開発した。

本稿では、開発した運動計測システムの構成と性能、ならびにローバーテストベッドを用いた車体速度計測の基礎実験について報告する。

## 2 テレセントリックカメラを用いた運動計測システムの提案

本章では、カメラから砂面までの距離に依存しない光学システムを持つ運動計測システムとその性能について述べる。

### 2.1 テレセントリックカメラの構成

開発したテレセントリックカメラおよびレンズの構成と配置をFig.1に示す。本研究で用いたテレセントリックレンズ光学系は、カメラから対象物までの距離にかかわらず視野幅が一定である物体側テレセントリックで、どの距離においても対象物の寸法が変化しないという特徴を持つ。本研究ではそれほど精密な計測は必要としないため、通常のカメラレンズに平凸レンズ1枚を追加していわば簡易テレセントリックレンズを実現することとした。カメラにはWAT-902B、カメラ用レンズにはM1214-MPを用いた。この光学系における撮影範囲は $37.0[\text{mm}] \times 34.7[\text{mm}]$ である。画像の解像度は $512 \times 480[\text{pixel}]$ であるため、 $1[\text{pixel}]$ あたりの移動量すなわち分解能は $0.0723[\text{mm}]$ となる。

### 2.2 画像追跡装置

運動計測システムは、地面に向けたCCDカメラから得られる路面画像の動きを追跡することでカメラ自身の自己位置を推定

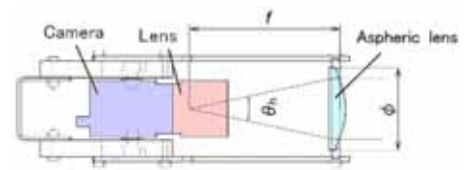


Fig. 1: Structure of telecentric camera system

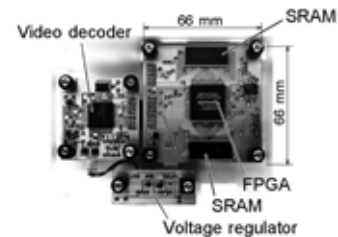


Fig. 2: An overview of visual tracker

する。この運動計測を行うために開発した画像追跡装置の外観をFig.2に示す。この装置はカメラの映像信号をデジタルデータに変換するためのビデオデコーダ(MSM7664B)、画像を記憶するためのSRAM(4Mbit, 12ns)および画像追跡処理を行うためのFPGA(EP1C3)から主に構成される。この装置によって、運動計測システムは速度 $\pm 64[\text{pixel}/\text{frame}]$ ( $1[\text{pixel}]$ 単位)、角速度 $\pm 2.24[\text{deg}/\text{frame}]$ ( $0.448[\text{deg}]$ 単位)までの任意の平面運動をビデオレートで計測できる。画像追跡装置からはシリアル通信(サンプリングタイム $33[\text{msec}]$ )で、移動量データが取得できる。

### 2.3 運動計測システムの性能

開発した運動計測システムの計測精度の評価実験を行った結果、計測された移動量の誤差は最大 $2.36\%$ 、ばらつき(標準偏差)の最大は $0.47\%$ であった。移動方向に関しては、水平方向、垂直方向とも計測結果に大きな違いは見られず、このことから本装置は地面からカメラまでの高さ変化の影響をほとんど受けずにカメラの移動量をローバーにとって必要十分な精度で計測できることがわかる。また、大きな回転半径をもつ運動においては、大きな誤差が生じたが、これは本装置が元々大きな回転半径の回転運動を精度良く計測できないことが理由である。

実験結果より、本装置は、ローバーの並進運動計測に対応可能な精度であることが確認できた。ただし、旋回のようなローバーの姿勢変化時の角度計測には対応できない。

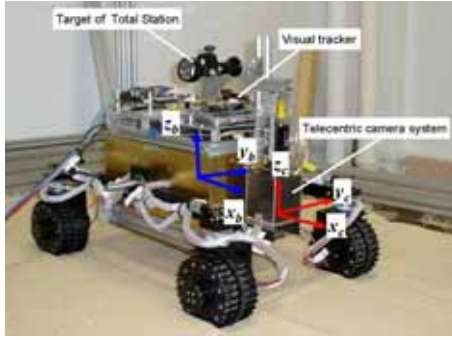


Fig. 3: An overview of the rover testbed

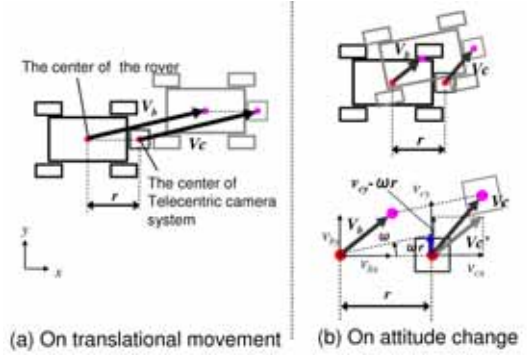


Fig. 4: Velocity model

### 3 ローバーへの適応

#### 3.1 ローバーテストベッドへの搭載

運動計測システムのカメラと画像追跡装置をFig.3に示すようにローバーテストベッドに搭載した。このローバーテストベッドは、不整地走行に関する研究用テストベッドとして本研究室において開発されたものである。本来ならば、カメラはローバーの本体中心に搭載すべきであるが、本研究で用いるテストベッドには車体中心に取り付けることは不可能であるため、本体前方にカメラを搭載した。なお、カメラは本体中心より200[mm]前方、地面より130[mm]の位置に設置した。

ここで、座標系の定義を行う。ローバーの座標系は、Fig.3に示すようにローバー本体部にベース座標系をとり、進行方向を $x$ 、車体垂直方向上向きを $z$ とする右手座標系とする。また、テレセントリックカメラは座標系は、カメラのレンズを中心部にとる右手座標系とする。

#### 3.2 車体速度の計測方法

車体速度とは、ローバーのベース重心位置(本体中心)の移動速度である。しかし、カメラの設置位置はベース重心位置からオフセットしているため、Fig.4に示すようにローバーが並進走行する場合、カメラの移動速度と車体速度は同じとみなせるが、旋回のような姿勢変化を伴う走行の場合、カメラの移動速度が車体速度とはならない。そこで、本研究では姿勢変化時の走行の場合、次式を用いて車体速度を求める。ローバーの姿勢角速度を $\omega$ 、オフセット距離を $r$ とすると車体速度 $v_{bx}, v_{by}$ は、

$$\begin{aligned} v_x &= v_{cx} \\ v_y &= v_{cy} - \omega r \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

ただし、運動計測システムでは、テレセントリックカメラを中心とした回転の角速度の測定は可能であるが、移動しながらの回転角速度の導出は誤差が大きくローバーの姿勢の変化を捕らえることはできない。また、ローバーの急な姿勢変化にも、対応できないと考えられる。そこで、本研究では、ローバーの姿勢変化時は角速度の計測をジャイロスコープで行い、運動計測システムと組み合わせることで車体速度の計測を行う。

#### 3.3 ローバーテストベッドを用いた基礎実験

ローバーの車体速度計測の性能評価実験を行った。実験は、運動計測システムを搭載したローバーを準砂が敷き詰められたフィールド上を走行させたときの速度計測を行い、Ground truthとの比較を行った。Ground truthの計測には、TOPCON社製「Total Station」を用いた。Total Stationは、ターゲット(Fig.4)を自動追尾し位置データを計測することができ、シリアル通信(サンプリングタイム約300[msec])により位置データの取得が可能である。

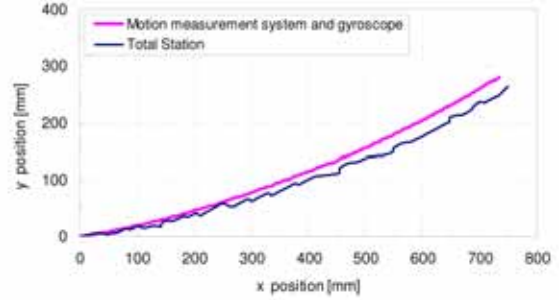


Fig. 5: Comparison of motion trajectories

ローバーが一定車輪回転速度34.7[mm/s]、10.4[mm/s]で直進走行するときの車体速度の測定を行った。結果、それぞれの車輪回転速度の3回の試行における走行距離の最大相対誤差は、34.7[mm/s]で1.22%(誤差14[mm])、10.4 [mm/s]で0.97%(誤差9[mm])となった。Total Stationの持つ誤差は10[mm]程度であるので、運動計測システムでの計測は、Total Stationと同程度またはそれ以上の精度であることがわかる。また、走行軌跡、時間に対する走行距離をTotal Stationと比較したところ、よく一致することが確認できた。次に、ローバーの車体中心にジャイロスコープを搭載し、ローバー旋回走行時の車体速度の計測が可能かどうかの評価実験を行った。砂上にてローバーの前輪のステアリング角を15[deg]、車輪回転速度34.7[mm/s]で走行させ、運動計測システムとジャイロスコープで計測した走行軌跡のTotal Stationとの比較をFig.5に示す。グラフより、走行軌跡はほぼ一致しているが、最終位置での相対誤差は、 $x$ 方向で2.1%(誤差16[mm])、 $y$ 方向で6.0%(誤差16[mm])で、直進走行時より誤差が大きくなっている。これは、 $y$ 方向での誤差が大きいためジャイロスコープの角速度の計測誤差によるものだと考えられる。しかしながら、ローバーの速度計測には必要十分な精度であると言える。

### 4 結言

本稿では、車輪型ローバーの車体速度計測のために開発したテレセントリックカメラを用いた運動計測システムについて述べた。さらに本装置をローバーへ適応し、車体速度計測の性能評価実験を行った。また、本装置では計測が困難なローバーの姿勢角をジャイロスコープで補償し、姿勢変化しながらの走行にも対応可能であることを確認した。また、車体速度計測の基礎実験を通して、オンラインで速度計測・位置計測が測定可能であることが確認でき、オンラインスリップ率推定が期待できる。

今後は、本装置を用いた坂を登板するローバーの車体速度計測を行い、3次元の自己位置推定が可能かの検証実験を行う。さらに、オンラインスリップ率推定を行うために、ローバーへの実装を予定である。