

# 不整地移動ロボットによる 広域マニピュレーション試験とその評価

佐藤 毅一（東北大学） 大木 健（東北大学）  
永谷 圭司（東北大学） 吉田 和哉（東北大学）

## Field Experiment of an autonomous mobile manipulator and evaluation of its performance

K.SATO (Tohoku Univ.), T.OHKI (Tohoku Univ.), K.NAGATANI (Tohoku Univ.),  
K.YOSHIDA (Tohoku Univ.)

**Abstract :** Order to estimate the underground structure, the work being done to set up multiple sensing instruments at regular intervals on the field. But at present, this work being done by hand. This research aims to developing an autonomous mobile manipulator to automate this task. Also, we put wide manipulation to the verification test and evaluated its performs, using an autonomous mobile manipulator. This presentation describe the results of this study and evaluated wide manipulation for accuracy.

### 1 緒言

近年、石油等の地下資源の発見を目的とした、地中構造の探査技術が飛躍的に進歩している。この技術は、地表面で人工的に地震を発生させ、地表面の広域に設置した多数のセンシング機器で、得た地震の反射波を解析することで、地中構造を推定するものである。ただし、ここで利用するセンシング機器は、対象とする広大なフィールドに人手で設置しているのが現状であり大きな労力を伴う。そのため、このセンシング機器の設置作業を自動化する技術の実現に期待が高まっている。

これを実現する手段として、自律移動マニピュレータの利用が考えられる[1]。移動マニピュレータは、フィールド上の目的地までの移動ならびに、移動ロボット上に搭載したマニピュレータによるセンシング機器の設置が可能である。正確な目標位置への到達が困難な屋外不整地では特に有効である。しかしながら、自律屋内移動マニピュレータの制御や応用に関する研究[2]は多数存在するが、自律屋外移動マニピュレータに関する研究となるとその報告例はあまり見受けられない。

そこで著者らは、不整地移動マニピュレータのテストヘッドを開発し、屋外環境でセンシング機器を自律的に設置する動作の実現を研究目標に設定した。その具体的なシナリオを以下に示す。

- (1)人間による複数のセンシング機器設置場所の指定。
- (2)移動ロボットによる目標設置場所への移動。
- (3)搭載マニピュレータによるセンシング機器の設置。
- (4)次の設置場所に目標を変更し、(2)へ戻る。

上述したシナリオを実現するために、移動マニピュレ



Fig. 1: Autonomous mobile manipulator "El-Verde"

ータに必要な要素技術は3つである。1つ目は屋外環境で移動するための不整地走破能力、2つ目は設置場所へ移動するための自己位置推定機能、3つ目はマニピュレータである。また、センシング機器の設置場所は人間が決定するため、人間が移動マニピュレータに設置場所を指示するマンマシンインターフェースを開発する。

本稿では、移動マニピュレータによるセンシング機器の自律設置を目的に構築した、不整地移動マニピュレータのインテグレーションについて紹介し、屋外不整地環境での実証試験の結果を報告する。

### 2 実装

#### 2.1 不整地走行機構

屋外のような凹凸のある環境で有効なサスペンションとして、JPLの火星探査ローバーにも採用されたロッカーボギーシステムがある[3]。

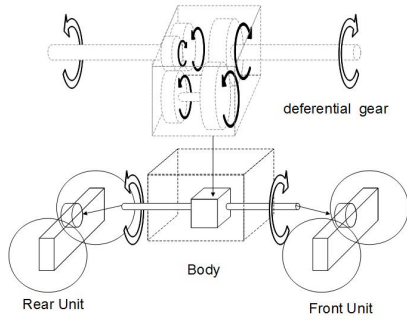


Fig. 2: Rocker Link Suspension

著者がロボットに実装したサスペンションは、構造が簡単なボギーリンクを排したロッカーリンクサスペンションである．その構成をFig.2に示す．ロッカーリンクサスペンションは、ボディから突き出たロッカーリンクの軸に接続したフロントユニットとリアユニットがパッシブに動き、コントロールボックスの傾きを抑えながら、障害物を乗り越える．ロッカーリンクは、ディファレンシャルギヤボックスを用いて製作した．

## 2.2 自己位置推定手法

### 2.2.1 ジャイロベースオドメトリ

車輪オドメトリは、左右の車輪の平均回転速度からロボットの並進速度を推定し、左右の車輪の回転速度の差分から旋回角速度を推定し、これらを積分することでロボットの自己位置・姿勢を求めるのが基本であるが、累積誤差のために、屋外長距離走行における自己位置推定には向いていない．さらに、屋外不整地は平面ではないため三次元的な移動推定が必要となる．そこで、本研究では、文献[4]に示す、ジャイロスコープを用いたジャイロベースオドメトリを利用することとした．サンプリング時間を $\Delta t$ とし、並進量を $v_n$ 、ジャイロスコープより得たロボットのyaw角を $\theta_n$ 、pitch角を $\phi_n$ としたとき、ロボットの位置を求める式は以下ようになる．

$$x_n = v_n \cos(\theta_n) \cos(\phi_n) \Delta t + x_{n-1} \quad (1)$$

$$y_n = v_n \sin(\theta_n) \cos(\phi_n) \Delta t + y_{n-1} \quad (2)$$

$$z_n = v_n \sin(\phi_n) \Delta t + z_{n-1} \quad (3)$$

### 2.2.2 パーティクルフィルタ

パーティクルフィルタとは、モンテカルロ法を用いた時系列フィルタの一種であり、近年、移動ロボットの状態推定手法に多く用いられている[5]．車輪移動ロボットにとって、車輪のスリップやジャイロスコープのドリフトによる、オドメトリの不正確さは避けられない．本研究では、パーティクルフィルタを実装し、オドメトリ情報とGPS情報を融合することで、オドメトリによる位置推定の不正確さを補う．

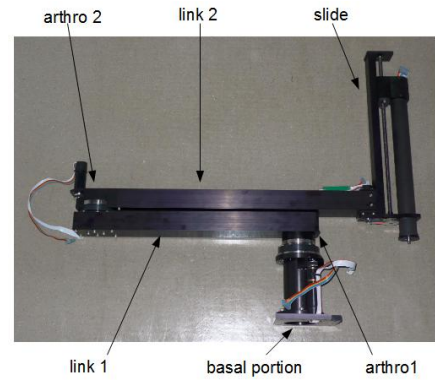


Fig. 3: Three degree of freedom Manipulator

ロボットに実装したパーティクルフィルタのアルゴリズムを以下に記す．

- (1)1024個のパーティクルを生成．
- (2)ジャイロベースオドメトリの自己位置推定値((1)~(3)式)に基づいて、各パーティクルを逐次更新．
- (3)GPSによる絶対自己位置を観測値とし、逐次各パーティクルの尤度(重み)を計算．なお尤度 $\omega_t$ を計算する尤度関数は以下に示すように設定した．

$$\omega_t^{[i]} = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{GPS}} \exp\left(\frac{-(d_t^{[i]})^2}{2\sigma_{GPS}^2}\right) \quad (4)$$

ここで $d_t^{[i]}$ は時刻tにおけるi番目のパーティクルとGPS観測値間距離、 $\sigma_{GPS}$ は正規分布に則った尤度関数の広がりを決める値である．

- (4)尤度に基づいて各パーティクルをリサンプリングし(2)に戻る．

以上の手順を繰り返すことで、尤度の高いパーティクルが生き残り、より正確な自己位置推定を行うことができる．

## 2.3 マニピュレータ

ロボットには、Fig. 3に示すスカルア型の3自由度マニピュレータを搭載した．このマニピュレータは、2自由度を用いることで、平面内の任意の位置へ手先を移動させることを可能とし、また、上下方向のスライドの1自由度でセンシング機器の設置を可能とする．

マニピュレータの動作をFig.4に示す．マニピュレータの可動、特異姿勢である $\theta_1=0$ 度、 $\theta_2=180$ 度を避けることを考慮し、マニピュレータの初期姿勢を $\theta_1=150$ 度、 $\theta_2=-15$ 度とした．

マニピュレータは手先に速度ベクトルを与えることで制御する．まず①の動作で前輪と後輪の間からロボット側面に手先を配置するように手先に速度ベクトルを与える．次に②の動作で目標設置位置への速度ベクトルを手

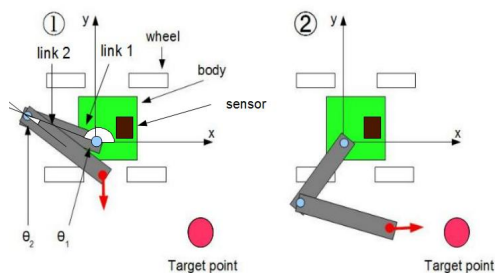


Fig. 4: Control of manipulator

先に与える．設置場所への手先移動後，スライドによってセンシング機器を設置する．

マニピュレータの第一リンク長を $l_1$ ，第二リンク長を $l_2$ とし，第一関節角度を $\theta_1$ ，第二関節角度を $\theta_2$ とし，手先に与える速度ベクトルを $r(x, y)$ とすると，マニピュレータの関節速度 $q(\theta_1, \theta_2)$ は，ヤコビ行列 $J$ を用いて以下の式で求めることができる．

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{r} \quad (5)$$

$$J = \begin{pmatrix} -l_1 \cos(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_2 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

## 2.4 マンマシンインターフェース

自律ロボットへの目標設置場所の指定は，マンマシンインターフェースを介して行う．Fig.5に，著者らがVisula C++ 2010を用いて開発したマンマシンインターフェースを示す．マンマシンインターフェースには，ロボットの自己位置推定開始時の値を原点とした，平面直交座標上の1点として位置指定する目標設置場所指定機能を持たせた．目標設置場所指定プロセスは，目標設置場所の座標をを列挙したテキストファイルを読み込み，UDP通信によってロボットに各設置場所を送信するというものにした．また，目標設置位置は目視では確認できないために，ロボットの自己位置および姿勢と目標設置位置を表示する機能を持たせた．

## 3 実証実験

### 3.1 実験概要

ロボットの移動マニピュレーション精度の評価を目的とした屋外実験を行った．本実験のタスクは，屋外フィールドに設定した直線状に10m間隔で設定した複数の目標座標へ，マニピュレータの手先座標を逐次一致させる移動マニピュレーションである．実験環境をFig.6に示す．

精度評価として，目標設置位置とマニピュレータの手先位置の誤差から標準偏差を求める．

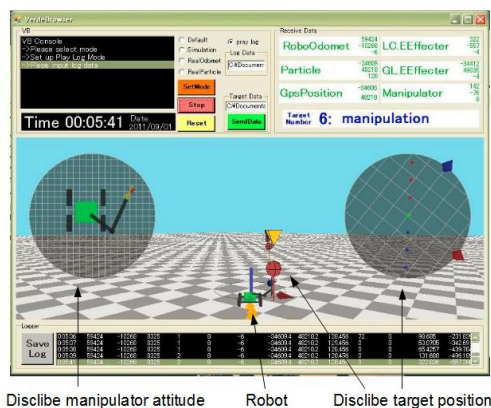


Fig. 5: Man Machine Interface



Fig. 6: Straight target and Chidori target on experiment field

ロボットの手先位置を得るために，測量機器であるトータルステーションを用いて手先位置のGround Truthを測定する．トータルステーションとは，距離を測る光波測距儀と角度を測るセオドライトを組み合わせて同時に測量できる高精度三次元測量機器である．

著者らが使用したトータルステーションはTOPCONのGPT-8200シリーズである．このトータルステーションは，移動する被測量物に取り付けたりフレクタを認識することで，0.3秒ごとに $\pm 1\text{cm}$ の精度で被測量物の移動軌跡を獲得できる．本実験では，Fig. 7のようにマニピュレータ先端にリフレクタを取り付けて手先の移動軌跡を取得する．

### 3.2 実験手順

本実験の手順を以下に示す．

- (1)トータルステーションマニピュレータ先端のプリズムを認識させる ..
- (2)ロボットのオペレータが，マンマシンインターフェースでロボットに目標設置場所を指示する．



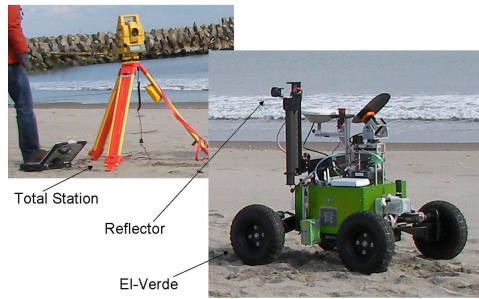


Fig. 7: Surveying tool "Total Station"

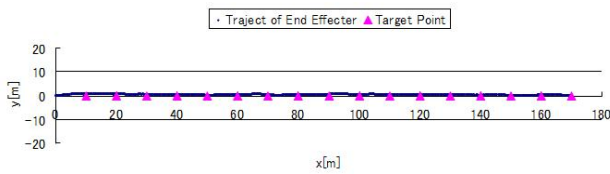


Fig. 8: Trajectory of end effectors for "Straight"

- (3) ロボットは目標設置場所へと移動する。
- (4) 目標設置場所がマニピュレータの可動範囲内に入ったら、ロボットは停止しマニピュレータ手先を設置場所へ差し込む。
- (5) ロボットは(3)～(4)を繰り返す。

### 3.3 実験結果

直線状に目標座標を取った場合の目標座標の位置と手先の軌跡をFig.8に示す。計17箇所に移動マニピュレーションを行った。目標設置場所と、トータルステーションから得られた手先のGround Truthを2次元平面に投影し、実験スタート時の自己位置を(0,0)、ロボットの正面をx軸方向として座標変換したものをFig.8に示す。

Fig.8 より、手先位置と目標設置位置との誤差を求め、誤差の重心を(0,0)としてグラフ化したものをFig.9に示す。誤差の重心からの分散は、x方向に $3404mm^2$ 、y方向に $21894mm^2$ となり、標準偏差はx方向に $58mm$ 、y方向に $148mm$ と求まった。

### 3.4 考察

実験結果において、y軸方向の標準偏差が大きいのは、ロッカーリンクの構成要素であるディファレンシャルギヤのバックラッシュによるものと考えられる。このバックラッシュによってマニピュレーション時にロボットのボディが傾き、x軸方向の $58mm$ に対してy軸方向が $148mm$ と標準偏差が大きくなった。標準偏差で定義される信頼区間では、99.7%は標準偏差の3倍の範囲にあると考えられるため、y軸方向の $148mm$ の3倍である $442mm$ の精

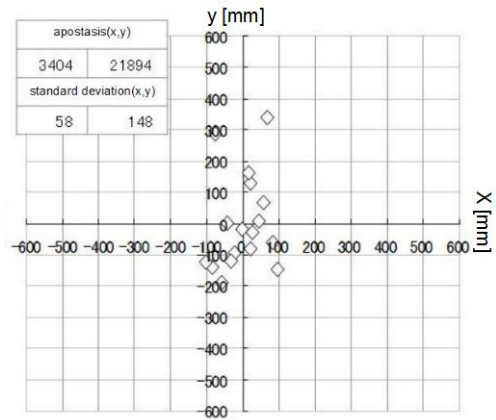


Fig. 9: Error of end effectors and target position for "Straight"

度で逐次移動マニピュレーションが行えることが分かった。さらに、ロッカーリンクの改良によって精度を上げることができる。

## 4 結言

本稿では、屋外環境におけるセンシング機器の自動設置を目指して、現在開発を進めている不整地移動マニピュレータのインテグレーションを紹介し、実証実験の結果を報告した。実験結果より、著者らがインテグレーションした移動マニピュレータは、高精度の移動マニピュレーションを行えることがわかった。今後、ロッカーリンクを改良やより高精度のGPSを搭載し、移動マニピュレーション精度の向上を目指す。

## 参考文献

- [1] K.Nagatani, S.Yuta : "An Experiment on Opening-Door-Behavior by an Autonomous Mobile Robot with a Manipulator", Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95), pp45-50., 1995.
- [2] Dov Katz, Emily Horrell, Yuandong Yang, Brendan Burns, Thomas Buckley Anna Grishkan, Volodymyr Zhylykovskyy, Oliver Brock, Erik Learned-Miller: "The UMass Mobile Manipulator UMan: An Experimental Platform for Autonomous Mobile Manipulation", Robotics: Science and Systems ,2006.
- [3] Kazuya YOSHIDA, Keiji NAGATANI, Ayato YAMASAKI : "Development and Control of Six-Wheel Type Robot with Rocker Structure", ロボティクス・メカトロニクス講演会'07予稿集, 2007 .
- [4] Keiji NAGATANI, Naoki TOKUNAGA, Yoshito OKADA, Kazuya YOSHIDA : "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain", 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.25-30, 2008 .
- [5] Kazuhiko Otani, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida : "GPSおよびオドメトリ機能を搭載した移動ロボットの不整地フィールドにおける位置推定実験", 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, 2009 .