

手先の操作性を保つ移動マニピュレータの動作計画と 実環境における動作の実現

三柳 秀人 (岡山大学) 平山 智信 (大日本印刷株式会社)
永谷 圭司 (岡山大学) 五福明夫 (岡山大学)

Motion Planning and Actual Performing for Mobile Manipulator

*Hideto Miyanagi(Okayama Univ.), Tomonobu Hirayama(Dai Nippon Printing Co.) ,
Keiji Nagatani(Okayama Univ.) , Akio Gofuku (Okayama Univ.)

Abstract— Our research goal is to develop a motion planner for intelligent mobile manipulator to perform smooth coordination between locomotion system and manipulator. In this research, we plan a path of a mobile base using values of manipulability as an evaluation function. We assume “drawing a long line on a wall” as our application task, and had implemented the task on our small-sized mobile manipulator. In this paper, we refer the motion planning algorithm, introduce details of the motion and show experimental results.

Key Words: Mobile Manipulator, Manipulability, Redundancy

1. はじめに

筆者らは、実環境で動作を行う知能移動マニピュレータの知的動作、特に走行系とマニピュレータ動作の協調を行うための動作計画に関する研究を進めている。この動作計画を考える上で重要となるのは、マニピュレータで作業を行う際のベースロボットが取るべき位置である。そこで、本研究では「マニピュレータの操作性を保つベースロボットの走行経路計画」を行う方針で、移動マニピュレータの動作計画を行うこととした。この方針の下「移動マニピュレータによって壁面へ線または文字を書く」というタスクを設定し (Fig.1)、このタスクの実現のための動作計画手法の適用と、その手法を用いた動作の実現を目指すこととした。

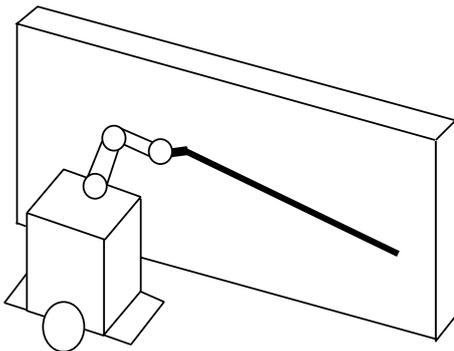


Fig.1 Research task

ここで設定した動作を実現する際に問題となるのが、「ベースロボットの推定位置の誤差が影響し、マニピュレータの手先の位置・姿勢に誤差が生ずる」という点である。このため、壁面の接触を保つために、外界センサを用いて手先の位置を確認し、マニピュレータの手先の位置・姿勢を修正する必要がある。そこで、本研究における動作計画において、マニピュレータの操作性を考慮することとした。

前報では、この操作性を評価する指標である、可操作度¹⁾を利用した移動マニピュレータの動作計画手法を提案した²⁾。この可操作度とは、マニピュレータのヤコビ行列で定義でき、操作性の評価に広く利用されている³⁾。さらに、「壁面への直線の描画」というタスクを対象とし、シミュレーション上で、その動作確認について報告した。

本研究では、この動作を実ロボットに搭載し、実環境における動作を実現した。特に、壁面に描画するためのペンに、パネとスライドポテンショメータを取り付けることで、動作の修正を実現した。本稿では、提案した動作計画手法の概要について説明し、さらに実ロボットへの実装について詳しく述べる。また、実機を用いて「壁面への直線の描画」の動作を行ったので、この実験結果と問題点を報告する。

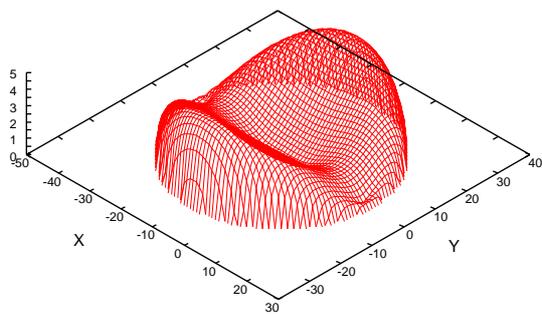
2. 移動マニピュレータの動作計画の概要

2.1 可操作度エリアの設定

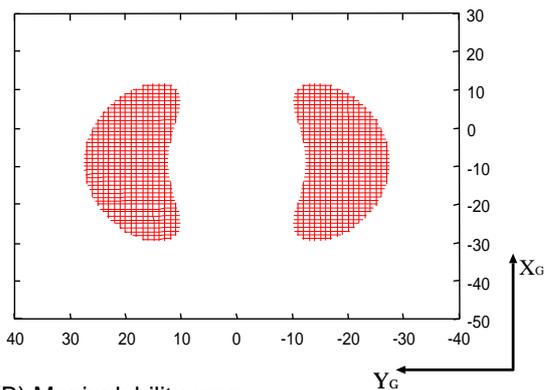
本研究では、走行系で生ずる手先の位置・姿勢誤差を吸収するため、操作性の高い姿勢で作業を行うことが重要であると考えられる。そこで、動作計画にマニピュレータの手先の動かしやすさを表す可操作度¹⁾を用いることとした。一般に、可操作度 w は、マニピュレータの各関節の角度より求められるヤコビ行列 $J(q)$ で定義され、以下の式で表される。この値が大きいほど、操作性が高いと言える。

$$w = \sqrt{\det(J(q)J^T(q))} \quad (1)$$

さて、移動マニピュレータでは、手先の位置・姿勢が一意でも、ベースロボットがとり得る位置・姿勢は一意に決まらない。言い換えれば、同じ手先の位置・姿勢においても、ベースロボットの位置によって操作性は変化する。そこで、本研究では、マニピュレータの操作性を保証できるベースロボットの位置の分布を求



(A) Distribution of manipulability



(B) Manipulability area

Fig.2 Distribution and area of manipulability

めることとした．Fig.2-(A) に、マニピュレータの手先がある姿勢をとったときの、可操作度の分布例を示す．

可操作度が一定値以上の領域にベースロボットが位置していれば、マニピュレータの操作性を保つことができる．そこで、本研究では、前節で求めた可操作度の分布から、可操作度がある閾値以上となる 2 次元領域を切り出し、これを可操作エリア (Manipulability Area: MA) と定義する．

例えば、Fig.2-(A) の例に対してこの操作を行うと、可操作エリアは、Fig.2-(B) のようになる．なお、閾値については、可操作エリアが確保できる範囲を考慮し、ヒューリスティックに設定することとした．

2.2 可操作柱体の形成

マニピュレータが作業を行う場合、手先の位置・姿勢が変化するため、それに伴って可操作エリアも変化する．よって、マニピュレータの操作性は、ある特定の姿勢のみで議論することができない．そこで、本研究では、マニピュレータの手先の位置・姿勢の変化を可操作エリアに垂直な軸に取り、この各位置・姿勢に対応した可操作エリアを順に積み上げることで、可操作エリアを 3 次元領域で表現することとした．本研究では、これを可操作柱体と呼ぶ．ベースロボットが可操作柱体内に存在すれば、手先がある経路をトレースする場合に、マニピュレータの操作性を保證することができる．

手先をある直線に沿って動かした場合の、可操作柱体の例を Fig.3 に示す．上図は、可操作柱体を yz 平面

に投影したもので、下図は斜め上方から見た図である． z 方向が、手先の位置・姿勢の変化の方向であり、ここでは、 $x-y$ 平面上にある馬蹄形のエリアが作業開始点における可操作エリア、2 つに分れているかまぼこ型のエリアが作業終了点における可操作エリアである．

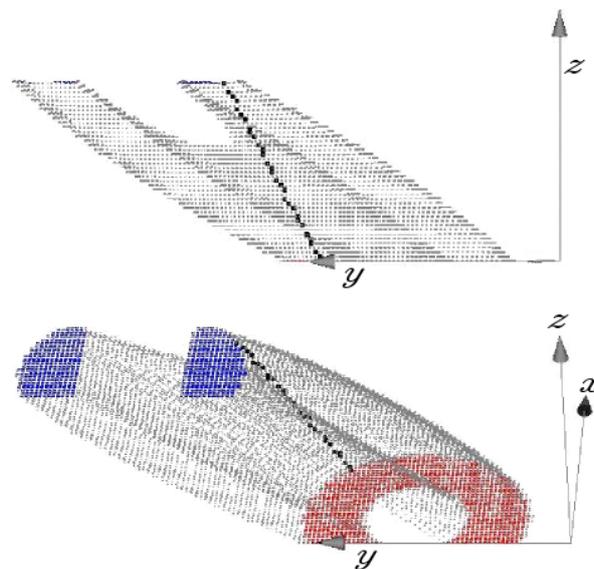


Fig.3 Pillar of manipulability area

2.3 可操作柱体を用いた動作計画

前節で述べた可操作柱体内にベースロボットが存在すれば、動作中マニピュレータの操作性が保たれる．よって、この柱体内において、作業開始点における可操作エリア内から、作業終了点における可操作エリア内までの経路を計画することで、ベースロボットの走行経路と同時に、マニピュレータの姿勢も計画することができる．一方、ベースロボットの推定位置の誤差は、移動に伴って累積する可能性がある．そこで、本研究では、この移動距離をできるだけ短くするという評価を可操作柱体内の経路計画で考慮することとした．

計画された経路が、可操作柱体の領域内において、可操作エリアに垂直な直線経路を取ることができれば、ベースロボットをその地点に停止させたまま、マニピュレータのみで手先の目標軌跡に追従することができる．それ以外の場合には、ベースロボットが走行しながらマニピュレータが動作することとなる．本研究では、作業開始点における可操作エリア内の点と、作業終了点における可操作エリア内の点を結ぶ線分の全ての組み合わせに対して、この線分が可操作柱体の領域内に存在するもののうち、最も短いものを選び出すこととした．この線分を $x-y$ 平面に射影したものが、ベースロボットの走行経路となる．また、各マニピュレータの手先の位置・姿勢においてベースロボットの位置が確定されるため、そのベースロボットの位置におけるマニピュレータの姿勢も計算できる．

Fig.3 に示す可操作柱体を例にとると、この柱体内の経路計画結果は、図中の黒い線分で表される．また、この結果より、計画した移動マニピュレータの動作を Fig.4 に示す．(A) は、上方から表示したロボットの動

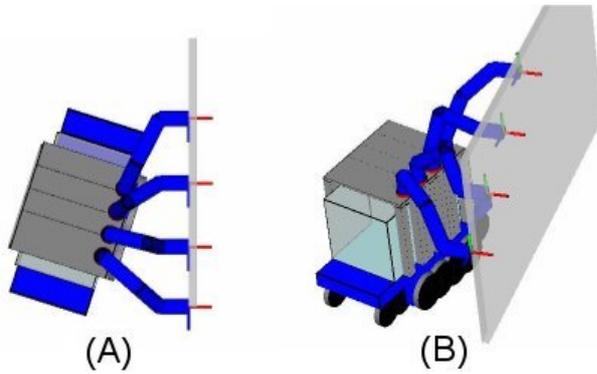


Fig.4 A result of motion planning

作の途中経過を4回重ねあわせたものである。また、(B)は、同じ動作をロボットの斜め後方から表示したものである。これより、ロボットは、壁に対して斜め方向に移動しつつ、マニピュレータが線分を描画する動作を実現していることがわかる。

3. 計画した動作の実装

3.1 目標タスクと前提条件

前節で示した動作計画アルゴリズムの有効性を確かめるため、実機を用いた動作の検証を行うこととした。具体的には、マニピュレータに固定したペンを用いて「移動マニピュレータで垂直な壁に直線を描く」という動作を目標タスクに設定し、動作計画を行った。ここで、対称とする壁は x 軸上にあり、指定した直線は $(0, 0, 600) \quad (0, 1000, 1000)[mm]$ とした。

3.2 対象とするロボット

動作計画の適用対象として、Fig.5 に示す本研究室で所有する移動マニピュレータを使用することとした。このロボットの大きさは、およそ $H470 \times W340 \times D400 [mm]$ である。このロボットの左上部には、本研究室で製作した小型マニピュレータを搭載している。

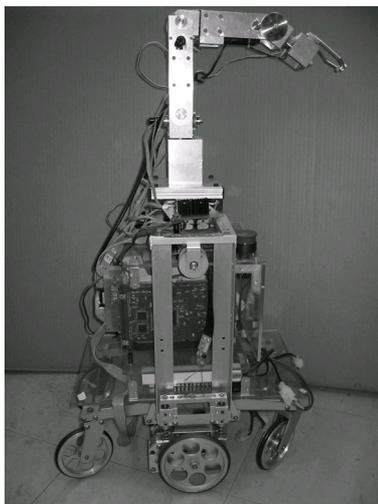


Fig.5 Mobile robot platform

3.3 動作の実装

走行系の制御は、本研究室で整備した走行系コマンドを用いて行う⁴⁾。この走行制御は、ロボットの走行に必要な動作がコマンド化されており、直進・旋回・停止などの動作が容易に行える。また、マニピュレータの制御系もコマンド化されており、マニピュレータの6つの関節角度を指定することで、目標の姿勢をとることができる。これらのコマンドを用いて、ベースロボットを目標走行経路に沿って走行させ、マニピュレータにその地点に対応する姿勢を順に指示することで、ベースロボットとマニピュレータの協調を実現した。

3.4 手先の位置誤差の認識と修正

目標タスクを行うには、マニピュレータの先に固定したペンの先と壁を正確に接触させながら走行させる必要がある。しかし、以下に示す問題から、手先の位置・姿勢に誤差が生じ、正確に動作することはできない。

1. 初期位置に移動マニピュレータを正確に設置することは難しく、ここに誤差が生じる。
2. マニピュレータの初期姿勢は、マニピュレータが垂直に立つ方向とし、そこから動作計画された姿勢をとる。しかしながら、本研究で利用するマニピュレータは自作であるため、現在目視で初期姿勢をとっており、ここに誤差が生じる。
3. ベースロボットを走行させながらマニピュレータの動作を行うと、ベースロボットに位置推定誤差が生じる。これらの誤差が影響し、マニピュレータの位置・姿勢にも誤差が生じ、手先の位置を目標に正確に追従させることができない。

そこで本研究では、これらの問題を解決するため、ペンにパネとスライドポテンシオメータを取り付けることとした。その装置構造を Fig.6 に示す。

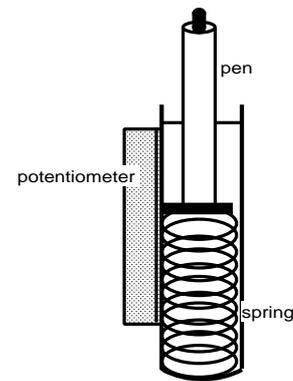


Fig.6 A structure of spring-pen with potentiometer

手先の目標位置は既知であるため、ポテンシオメータの値の変化により、マニピュレータの手先のずれが求まる。その修正量と、そのときの各関節角度から求まるヤコビ行列により、修正に必要な各関節角度の微小変化を求めることができる。この各関節角度の微小変化を現在の関節角に加えることで、ペン先の位置修正を行うこととした。

本実装では、手先のずれが $1cm$ 以上になった場合に、修正を行うこととした。また、それ以下のずれは、ベ

ン内部のバネで誤差を吸収することとした。この閾値は、ポテンショメータの測定精度と、マニピュレータの制御の精度から、ヒューリスティックに求めた値である。なお、この修正動作により、手先の位置は動作計画されたものから変化する。そこで、この修正をマニピュレータの動作計画の各関節角度に加えることで、誤差によって生じた手先の変化に対応することが可能となる。

3.5 動作実験結果

前節で示した「移動マニピュレータで垂直な壁に直線を描く」動作を実環境において行った。修正を行わずに実験を行った場合、ペン先が壁に接触しないことや、壁を強く押しつけることが起こり、目標とする直線を正確に描くことは、ほとんど不可能であった。

一方、手先の位置誤差の修正動作を加えて動作実験を行うと、ペン先の修正を行いながら、走行をすることができた (Fig.7)。

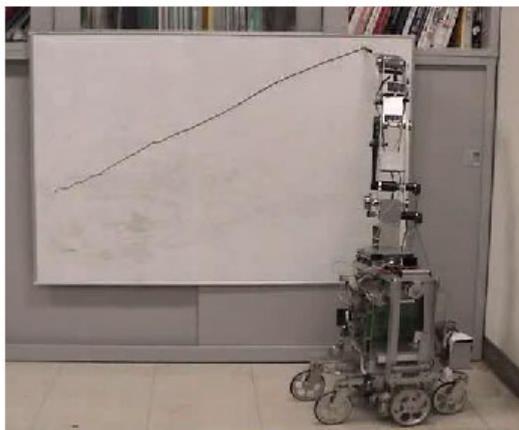


Fig.7 Implementation of motion

3.6 実験に対する考察

動作結果より、操作性を考慮した動作計画は、実環境で生ずる誤差修正まで考慮した動作計画であると言える。しかしながら、毎回正確に線を書くことには成功していない。この原因として、「走行系の角度の誤差が大きく、手先の微小変化だけでずれを修正できない」という点が挙げられる。この走行系の角度の誤差による問題を解決するためには、描画対象との角度検出が可能なセンサ等を取り付け、予めベースロボットを正確に、走行計画通り走行させる必要がある。

一方、ベースロボットの走行速度にも問題がある。本実装では、ベースロボットの位置に対応するマニピュレータの姿勢を順に指示することで、ベースロボットとマニピュレータの協調を実現している。そのため、ベースロボットの走行速度がマニピュレータの追従よりも速いと、正確に動作ができない。しかしながら、現在の動作計画手法では、走行系の最大速度まで考慮することはできていない。

また、現在のアルゴリズムでは、手先の姿勢を固定した動作計画となっている。そのため、動作を行う際に操作性が一定以上となる範囲が狭いため、操作性の

閾値を下げなければならない。しかし、実際の動作を考えると、手先の姿勢を固定しなくても良い動作は存在する (例えば、壁への線分の描画は手先が壁に垂直である必要はない。)ただし、この場合、可操作柱体は、3次元ではなく4次元となり、動作計画は複雑となる。

4. まとめと今後の課題

本稿では、可操作度を評価関数とする移動マニピュレータの動作計画手法を提案し、実機を用いて「壁面への直線の描画」動作の実装方法について述べた。この動作計画手法を利用することで、マニピュレータの可操作度を一定以上に保つ移動マニピュレータの動作計画が可能となる。また、実環境で生ずる誤差の問題を解決するため、外界センサを用いることで、マニピュレータの手先の位置・姿勢を修正しながらの動作が可能となった。

一方、実装を通じて以下に示す問題点が明らかになった。

1. 移動マニピュレータの初期位置の誤差が、動作に大きな影響を与える問題。
2. 現在の動作計画手法では、走行系の最大速度まで考慮することはできないため、マニピュレータが走行系に追従できない可能性があるという問題。
3. 手先の姿勢を固定しているため、操作性の閾値を下げなければならない問題。

なお、現在のところ、可操作柱体内の経路計画については、非常に単純なアルゴリズムを採用しているが、これでは、実際に経路が存在しているにもかかわらず、ロボットが経路を構築できない可能性がある。

これらを解決し、より実環境に即したロボットの動作を実現することが、今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費 若手研究 (B) (課題番号: 13750223) の補助を受けた。ここに深く感謝する。

参考文献

- 1) 吉川恒夫. ロボットアームの可操作度. 日本ロボット学会誌, Vol.2, No1 (1984)
- 2) 永谷圭司, 平山智信, 五福明夫, 田中豊. "操作性を保つ移動マニピュレータの作業場所計画", 第7回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.329-334 (2002)
- 3) 山本元司, 黒田創明, 毛利彰. 複数台ロボットによる協調作業経路計画. 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.2 (1993)
- 4) 入江 雅洋. "PC/AT 互換機を用いた自律移動ロボットシステムの構築と走行制御に関する研究". ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-G5 (2001)