

操作性を保つ移動マニピュレータの作業場所計画

岡山大学 永谷圭司 平山智信 五福明夫 田中豊

Motion Planning for Mobile Manipulator with Keeping Manipulability

Okayama Univ. K.Nagatani, T.Hirayama, A.Gofuku, Y.Tanaka

Abstract—

Our research goal is to realize a motion planning for intelligent mobile manipulator. To consider the motion planning, it is popular that the base robot motion is regarded as manipulator's extra joints, and whole system is considered as redundant manipulator. In this case, locomotion controller is a part of manipulator controller. However, it is difficult to implement both controllers as one controller, in our implementation experience, because of different of actuators' character. In this research, we plan a path of mobile base by manipulability of manipulator's pose. In this case, locomotion controller can be independent from manipulator controller, and coordinative motion is realized by communication between both controllers. In this paper, we introduce above motion planning algorithm for mobile manipulator, and show you simulation results.

Key Words: Mobile Manipulator, Manipulability, Redundancy

1. はじめに

近年、ロボットに期待される作業環境は、従来の工場内から、オフィスビルや病院、家庭内といった人が生活する環境へと移行してきている。これに伴い、多くの研究機関や企業が、人が生活する屋内で作業を行うための移動ロボットの研究を行っている。しかしながら、ハードウェアの進歩と比較し、これをコントロールするためのソフトウェアについては、あまり進んでいないのが現状である。特に、実環境で動作を行う移動マニピュレータのソフトウェアについては、限定された環境において、ヒューリスティックな実装が行われていることが多い [1]。このような背景をふまえ、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動作計画に関する研究を進めている。そこで、本研究では、動作計画段階において、ベースの走行経路計画とマニピュレータの位置・姿勢計画を独立に考えるアプローチをとることにした。具体的には、「マニピュレータの操作性を大きく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文字を書く」というタスクを設定し、この動作の計画手法の考案と、その手法を用いた動作の実現を目指す。

さて、この種のタスクでは、マニピュレータが動作しながらベースロボットが移動する必要がある。この際、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可能性がある。このため、壁面の接触を保つためには、外界センサを用いて、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。そのために一定の操作性を確保

する必要がある。したがって、本研究で提案するアプローチは、実環境で生ずる問題を解決し得る動作計画であるといえる。

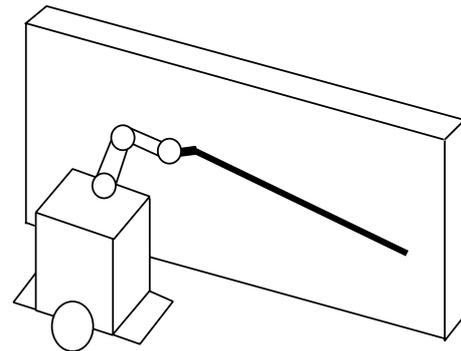


Fig.1 Research Task

本稿では、上述したベースロボットの走行経路計画とマニピュレータの動作計画について解説する。また、この動作計画手法を、線分の描画タスクに適用し、この有用性を検討する。

2. 関連研究

マニピュレータの可操作に関する研究および、移動マニピュレータに関する研究は、幅広く行われている。ここでは、本研究に深く関連するものを中心に取り上げる。

まず、可操作度とは、マニピュレータの操作性を表す指標として、吉川らによって提案されたものである [2]。この指標は、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。例えば、山本らは、複数台のマニピュレータの協調動作計画に、評価関数として、各マニピュレータの可操作度を利用して [5]。また、新井らは、マニピュレータの可操作度

と、移動ロボットの移動ベクトルと手先目標速度ベクトルがなす角度を評価関数として、移動マニピュレータの軌道計画法を提案した [6]。このように、可操作度は、マニピュレータの動作を評価する指標として、一般的に利用されている。本研究では、ある作業を行う際に、マニピュレータの一定の可操作を保てるようなベースロボットの軌道計画を行うという方針で、可操作を利用している。

さて、移動マニピュレータの動作計画を考えると、マニピュレータを搭載する移動台車（以下ベースロボットと呼ぶ）をマニピュレータの自由度の1つと考え、冗長マニピュレータの問題として考えることが多い [3]。この場合、ベースロボットの走行制御は、マニピュレータ制御の一部として扱われる。しかしながら、筆者らが移動マニピュレータを実装したこれまでの経験によれば、「マニピュレータの手先の位置・姿勢制御」と「ベースの走行制御」は、制御方法が異なるため、同列に扱うのは困難である。そこで、本研究では、動作計画段階において、ベースの走行経路計画とマニピュレータの位置・姿勢計画を独立に考えるアプローチをとることにした。

一方、移動マニピュレータを特定のタスクに適用する応用研究については、これまでに様々なアプローチが行われてきた。永谷らは、移動マニピュレータによって、ドアノブを認識・把持し、ドアの通り抜け動作を実現した [1]。この研究では、特定のドアに対する移動ロボットの走行経路計画を行い、これと同時にマニピュレータの動作を計画した。また、中野らは、受動関節を用いた移動マニピュレータによるドアの開閉動作を実現した [4]。しかしながら、これらの研究では、ロボットの走行経路は、ヒューリスティックに計画されたものである。比較的単純な動作については、移動マニピュレータの作業はヒューリスティックに行っても実現可能であると考えられるが、これを一般的に記述しようとしたときの動作計画については、これまでにあまり深く議論されていない。

3. ベースロボットの作業領域の決定

3.1 可操作度

マニピュレータの手先の動かしやすさ（操作性）は、マニピュレータで作業を行う際に考慮すべき項目である。特に、移動マニピュレータでは、ベースロボットに生ずる位置誤差に伴い、マニピュレータの手先の位置・姿勢にも誤差が生ずる。これを修正するためにも、操作性の高い姿勢で作業を行うことは、非常に重要である。そこで、本研究では、移動マニピュレータの動作計画を行う際の指標の一つとして、マニピュレータ

の手先の動かしやすさを表す可操作度 [2] 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。

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

本研究では、6関節のマニピュレータを対象とするため、ヤコビ行列は 6×6 となる。これにより、マニピュレータがある姿勢をとった場合の操作性が、スカラ値のパラメータとして定義できる。

3.2 可操作度の分布

移動マニピュレータでは、マニピュレータの手先の位置・姿勢が確定しても、ベースロボットの位置・姿勢とマニピュレータの各関節角度は、冗長性のため、一意に決まらない。そこで、マニピュレータの操作性が高くなるベースロボットの位置を求めるため、以下の手順で、ベースロボットの位置を変数とする可操作度の分布を導出する（ただし、ベースロボットの向きが与える影響を動作計画の段階において考慮する必要の無いように、ここでは、搭載するマニピュレータの第1関節の回転軸を地面に垂直なものと仮定する。）

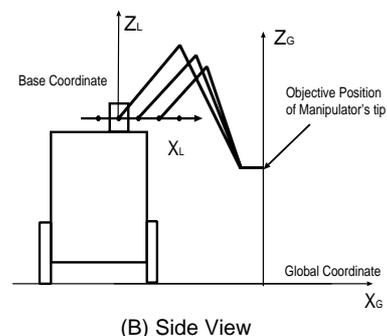
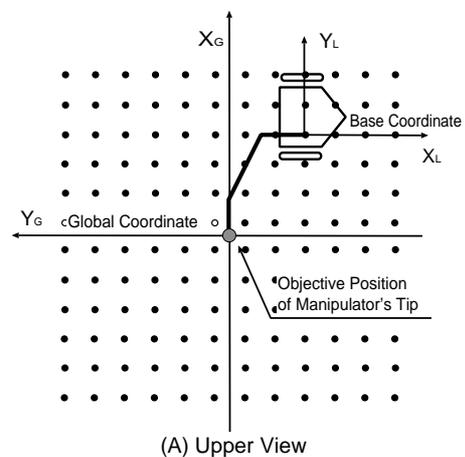


Fig.2 Setting for Calculation of Manipulability

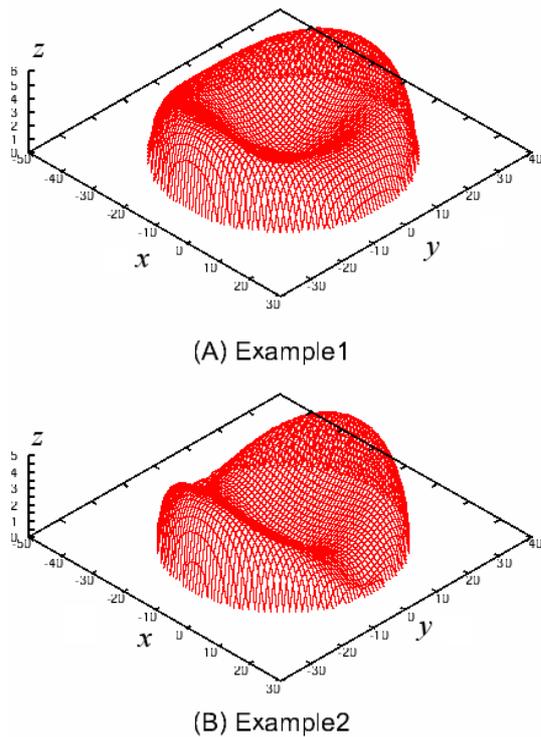


Fig.3 Distribution of Manipulability

1. グローバル座標に対する，ベースロボットがとり得る位置の候補を Fig.2(A) に示す点として設定
2. ベースロボットのとり得る各位置にて逆運動学を解き (Fig.2(B)) ，マニピュレータの各関節角を決定
3. ベースロボットがとり得る各位置におけるマニピュレータの姿勢より，可操作度を導出
4. マニピュレータの手先の位置，姿勢を固定した状態でベースロボットのとり得る位置を順次更新し，2，3を繰り返す．

Fig.3(A) は，あるマニピュレータの目標手先位置・姿勢に対して，可操作度の分布を 3 次元グラフで表現したものである．ただし，目標手先位置を $x = 0, y = 0$ ，手先の方向を x 軸の正方向としたときの，マニピュレータのベース位置が， $x - y$ 平面上に示されている．また， z 軸の値は，ベースロボットの位置における可操作度の大きさを表している．Fig.3(B) は，(A) と比較して，手先の目標位置を高くした場合の例である．(B) は，操作性が低くなるため，可操作度の凹みが大きい．

3.3 可操作エリアの設定

次に，可操作度の分布より，可操作度がある閾値以上となる 2 次元領域を切り出す．この領域は，前節で求めた可操作度の 3 次元分布を，可操作度一定の平面で切ることによって求められる．これを可操作エリア (Manip-

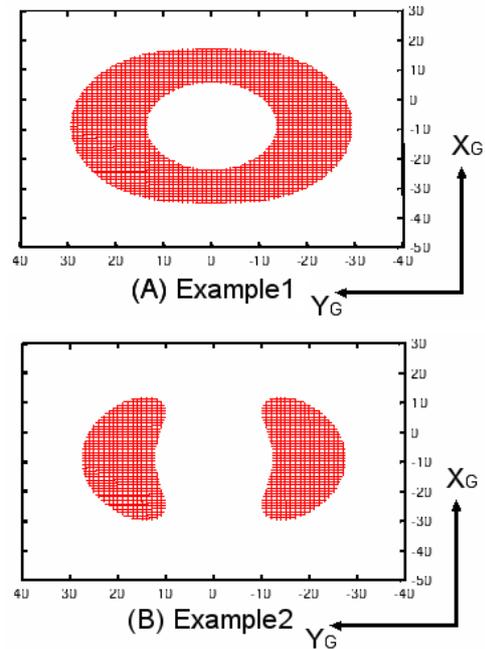


Fig.4 Manipulability Area

ulability Area : MA) と呼ぶことにする．このエリア内にベースロボットが存在すれば，マニピュレータの操作性が一定値以上となることを示す．

Fig.3 の例に対してこの操作 (閾値を 2.5 に設定) を行うと，可操作エリアは，Fig.4 のようになる．マニピュレータの手先目標の位置・姿勢が，比較的操作性の高い位置にある場合，(A) に示すようなドーナツ形をしているが，操作性が低い位置となると，(B) に示すように，真中から分断された形となる．なお，閾値については，どれだけマニピュレータの操作性を確保するかによって依存するものであるため，ここではヒューリスティックに設定した．

3.4 可操作柱体の形成

可操作エリアは，マニピュレータの手先の目標位置・姿勢に伴って変化する．そこで，それぞれのマニピュレータの手先の目標位置・姿勢毎に計算した可操作エリアを順に積み上げることで，姿勢の変化に応じた可操作エリアを 3 次元領域で表現することができる．ここでは，これを可操作柱体と呼ぶ．具体的には，以下の手順で，この可操作柱体を構築する．

1. 手先の目標軌跡を N 点に分割し，各点における手先の目標位置・姿勢を決定
2. 手先の各目標位置・姿勢に対する可操作エリア (MA_k) を計算
3. $x - y$ 平面を可操作エリア， z 軸方向を目標軌跡の各ステップとして，可操作エリアを積み重ねる．

この手順により、構築できる可操作柱体の概念図を Fig.5 に示す。ただし、この例では、 y 軸上に壁が存在すると想定し、 x 軸の負の領域にベースロボットが取り得る位置が存在しないものとした。

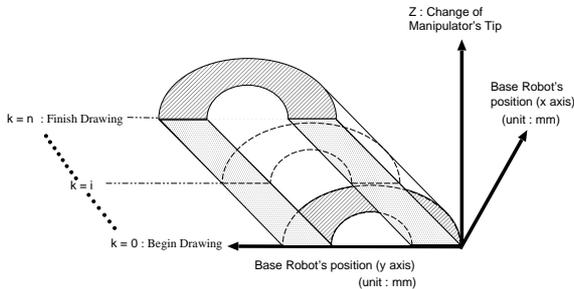


Fig.5 Pillar of Manipulability Area

4. 動作計画

前節で述べた手順に沿って、可操作柱体を構築し、その領域内の経路を計画することで、マニピュレータの操作性を保つベースロボットの位置とマニピュレータの姿勢を計画することができる。ただし、手先の初期位置・姿勢の z 成分は 0、最終目標の手先の位置・姿勢の z 成分は N である。よって、可操作エリア MA_0 上の任意の点から、 MA_N 上の任意の点までを結ぶ 3 次元の経路を、可操作柱体内の中で計画することで、移動マニピュレータの動作計画が実現可能となる。

4.1 可操作柱体の探索

可操作柱体の領域内において、可操作エリアに垂直な経路を取る場合、移動マニピュレータは、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軌跡追従を行うことができる。それ以外の場合には、ベースロボットが走行しつつ、マニピュレータが動作を行うという協調作業を行う必要がある。そこでこのベースロボットの移動に伴って、推定位置の誤差が累積する可能性があるため、可操作柱体内の経路計画における評価には、ベースロボットの移動量を考慮することにした。

さらに、可操作柱体内の経路探索の特徴として、以下のものが挙げられる。

1. 柱体が比較的単純な形状をしている
2. スタート位置とゴール位置を領域内から選べる
3. ベースロボットの走行経路は複雑にできない

これらを踏まえて、以下に示す単純な可操作柱体内の探索アルゴリズムを構築した（なお、この手法で経路が見つからない場合には、手先の初期位置・姿勢と、目標位置・姿勢との間に中間目標を設定する必要がある。）

1. MA_0 内の任意の点と、 MA_N 内の任意の点を直線で結ぶ。
2. この直線と可操作柱体の側面が交差していない場合、2 点間の $x-y$ 平面上における距離（つまりベースロボットの走行距離）を算出する。
3. 上記の操作を全ての組み合わせで行い、2 点間の距離が最小となる組み合わせを見つける。

これにより、可操作柱体内の線分経路が求まる。これは、マニピュレータの各手先の位置・姿勢に対応した、ベースロボットの位置すべき場所を表すものである。

4.2 マニピュレータの動作計画

前節のアルゴリズムにより、マニピュレータの各手先の目標位置・姿勢に対応したベースロボットの位置・姿勢が求まる。そこで、各ベースロボットの位置・姿勢において、マニピュレータの逆運動学を解くことで、その地点におけるマニピュレータの各関節角が求まる。以上の手順で、ベースロボットの位置に対応する、マニピュレータの各関節角が求まり、移動マニピュレータの動作計画が完了する。

5. 動作シミュレータと動作計画の適用例

本研究では、前章に示した動作計画アルゴリズムを、筆者らの所属する研究室が有する小型移動マニピュレータに実装し、動作の検証を行う予定である。しかしながら、現在この移動マニピュレータは、システムの構築を進めているところであり、実験できる段階にまで至っていない。そこで、本稿では、この移動マニピュレータの動作を表示する「動作シミュレータ」を利用し、動作計画アルゴリズムの検証を行う。

5.1 移動マニピュレータ

対象とする移動マニピュレータには、Fig.6 に示すものを利用する。このロボットは、車輪型移動ロボットの上部に、試作した小型マニピュレータを搭載したものである。この小型マニピュレータは、ハンド部の自由度を除いて 6 自由度を有している。ベースロボットは、左右の動輪を独立に制御することで操舵を行うディファレンシャルホイールを有しており、目標軌跡の追従走行が可能である。これらの仕様を、Fig.7 に示す。

ロボットのコントローラには、制御用 PC を搭載し、オペレーティングシステムには、ART-Linux を採用した。このコントローラによって、走行制御、マニピュレータの関節角制御、外界センサからの情報獲得および、動作プログラムの実行を行っている。また、各モータ制御のための制御信号の生成とエンコーダ情報の収集には、岡崎産業製のモータコントローラボードを利用している。



Fig.6 Mobile Manipulator

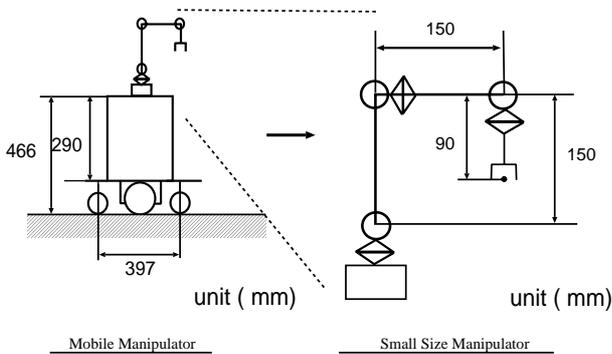


Fig.7 Parameters of Experimental Robot

5.2 動作シミュレータ

コンピュータ画面上で動作計画アルゴリズムの検証を行うため、上述の移動マニピュレータの動作プログラムをコンピュータ内で実行する「動作シミュレータ」を構築した。

この動作シミュレータの特徴は、実ロボットの動作を担当するユーザプログラムと同一のプログラムを、コンピュータ内で実行し、そのロボットの動きを3次元表示できることである。ここで「ユーザプログラム」とは、ロボットの動きを指定する関数やセンサ情報を受け取る関数によって構成され、ロボットの動作を記述するものである。一方、「システムプログラム」は、ユーザプログラムによって指定されたパラメータにより、モータ制御を行ったり、センサよりセンサ情報を獲得するものである。

実機動作においては、上述のユーザプログラムをロボット上で実行すると、共有メモリを介してシステムプログラムと通信し、ロボットの動作が実現する。動作

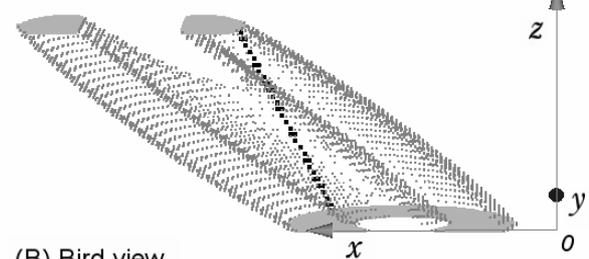
シミュレータは、実ロボットの代わりにユーザプログラムと通信を行い、仮想ロボットの状態をコンピュータスクリーン上に表示するものである。これにより、実ロボットを動かすことなく、ユーザプログラムの動作を確認することができる。ただし、ロボットの位置・姿勢やセンサ情報は、理想的なものとしているため、シミュレータ内で動作が確認できても、同じ動作が実環境で可能であるとは限らないという問題がある。

5.3 線分の描画への適用例

上述の動作シミュレータを利用して、本稿で提案した動作計画アルゴリズムの検証を行った。目標動作例は、壁に対する線分の描画である。

この動作を実現するため、ロボットの手先の角度を壁と垂直方向と仮定し、動作計画を行った。ここで、対象とする壁は x 軸上にあり、指定した描画線分は、 $(0, 0, 32) \rightarrow (0, 60, 62)[cm]$ であるものとする（壁に向かって右下から左上に線分を描く）。この動作を行う際の、可操作柱体および、柱体内の経路計画結果を、Fig.8 に示す。

(A) Side view (x - z plane)



(B) Bird view

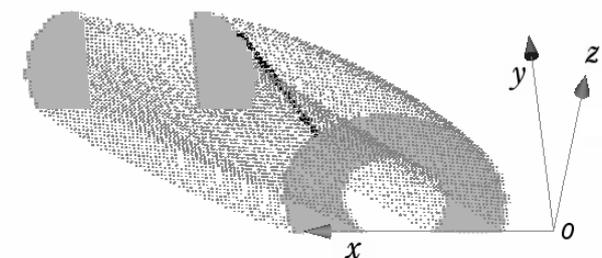


Fig.8 Planning Result

上図は、可操作柱体を y 軸の負の方向から見た x - z 平面の図であり、下図は、 z 軸の正の方向（斜め上方）から x - y 平面を見た図である。ただし、 x 軸は壁に平行な軸であり、 y 軸は壁の面に垂直な方向である。また、 z 軸は、手先の目標位置の遷移を表している。したがって、下部の灰色の馬蹄形エリアは、線分描画開始位置の可操作エリア、上部の2つの灰色のエリアは、線分描画終了時の可操作エリアを表す。可操作柱体内の経路探索は、上部の灰色の可操作エリア内の一点から、下部の灰色の可操作エリア内の一点を結ぶ線分の

長さが最短となるものを、総当りで検索した。その結果が、図中の濃い線分で表した経路となる。なお、今回のタスクは、壁への描画なので、ベースロボットが位置できない側の可操作エリアは描画していない。

この経路探索結果より、手先の各目標位置に対するベースロボットの位置・姿勢が決定する。そこから、再度逆運動学を解き、マニピュレータの姿勢を計算することで、マニピュレータとベースロボットの協調動作を計画した。計画した動作例を動作シミュレータにかけたものを、Fig.9 に示す。

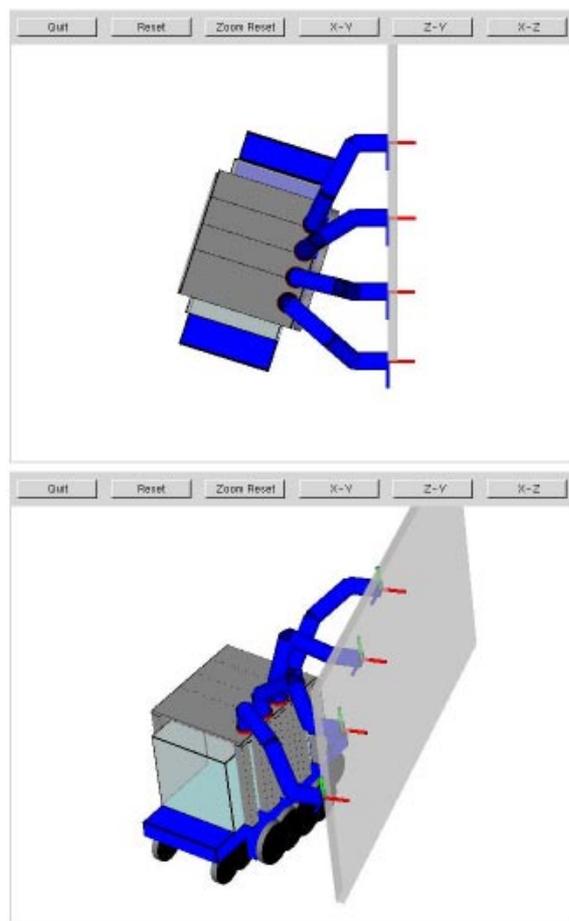


Fig.9 Simulation Result

Fig.9の上図は、上方から表示したロボットの動作を4回重ねあわせたものであり、Fig.9の下図は、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。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。

6. 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た。この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、ベースロボットの走行経路計画が可能となる。また、壁への線分描画の例を設定し、動作シミュレータ上で、この手法の有効性を検証した。

現在、筆者らは、実機の移動マニピュレータシステムを構築中であり、本稿のアルゴリズムで計画した動作を実環境で行う予定である。また、現段階では、計画段階においてマニピュレータの各関節の可動範囲を考慮していない。そのため、可操作エリアを構築する際に、これを考慮する必要がある。

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が、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（壁への線分の描画についても、手先が壁に垂直である必要はない）。その場合、可操作柱体は、3次元ではなく4次元となる。

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、今後の課題であるといえる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費 奨励研究 (A) の補助を受けた。ここに深く感謝する。

参考文献

- [1] 永谷圭司, 油田信一. タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動マニピュレータの研究—ドアの通り抜けを含む屋内の自律走行の実現—. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 6, pp. 111–121, 1999.
- [2] 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, No. 1, pp. 63–67, 1984.
- [3] 江口純司, 油田信一. 移動系の自由度も用いて物体を操作する小型移動マニピュレータ. ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, pp. 2A1–45–055, 2000.
- [4] 佐々木裕之, 高橋隆行, 中野栄二. 受動関節を有する移動マニピュレータによるドア開け法. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 277–284, 2001.
- [5] 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, pp. 217–226, 1993.
- [6] 森素子, 大隅久, 新井民夫. 移動マニピュレータの大域的軌道計画. 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 831–832, 1994.