

障害物回避を行う冗長マニピュレータの逆運動学マップ

Obstacle Avoidance for Redundant DOF Manipulators based on Inverse Kinematics Map Method

伊藤 拓央[†] 安藤 英由樹^{††} 平松 誠治^{†††} 加藤 厚生^{†††}

Takuo ITO[†] Hideyuki ANDO^{††} Seiji HIRAMATSU^{†††} Atsuo KATO^{†††}

Abstract: It is a important to solve the inverse kinematics on control of the redundant DOF (degree of freedom) manipulator. Because of the inverse kinematics, there are many set of solutions of the joint angles which realize an arbitrary end-effector position, and its needs long time for selecting a best joint angle set. To solve this selection problem, we propose diffusion-based learning theory with error correction on the inverse kinematics mapping. In the previous work we have considered no obstacle in the working space of the manipulator. In this work we set an obstacle in the working space and made an obstacle avoidance map based on the inverse kinematics mapping. Our goal of this work is an obstacle avoidance control of the redundant DOF manipulators. To realize this goal we used an inverse kinematics mapping method in order to change posture of the manipulator to a given end point position. To evaluate usefulness of our system, we made some experimental simulations that the manipulator avoids obstacle while its end point traced given trajectory. Direct inverse kinematics calculation method and our inverse kinematics mapping method are compared. A manipulatability on our method was higher than that of the direct method.

1. はじめに

人間型ロボットの研究が盛んに行なわれている。特に二足歩行ロボットは最近飛躍的な進歩をとげた。人間型ロボットを実現する上で重要な課題として制御がある。当然人型ロボ

ットは人間に似せているため、関節の自由度なども人間と同じ数になっている¹⁾。人間の腕は肩3自由度、肘2自由度、手首2自由度の合計7自由度を持つ。これに対し三次元の作業空間は位置3自由度、姿勢3自由度の6自由度をもつため人間の腕の自由度は作業空間の自由度よりも多い。一般に作業空間の次元を n 、関節の数を m としたとき人間の腕のように $m > n$ となる場合を冗長と呼び、特にマニピュレータでは冗長マニピュレータと呼ぶ。

冗長とすることの利点は汎用性、融通性に富むことである。

† 愛知工業大学 電気電子工学専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 電気・材料工学専攻 (豊田市)

††† 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

具体的には障害物回避²⁾、特異点回避、機構上の制限を回避して合理的な動作³⁾⁴⁾を行えることである。一例として障害物を回避しつつ、その裏側に腕を回り込ませることができる。このことは日常において人は手先と肩を固定しても、なお肘を動かすことが可能なことから理解できる。我々が日常作業をする上では7自由度すべてを使っている意識は無い。しかし人間の場合、特に肘関節可動範囲の限界が小さいため冗長自由度は必要であり、冗長自由度を使うことでなめらかな姿勢変化による作業を実現している。

実際に市販されているマニピュレータの多くは汎用機械として使われることを想定しており、自由度は冗長である。またその冗長性を有効に利用する制御法策についても報告されている²⁾⁵⁾。

一方、冗長マニピュレータがもつ問題点として、任意の手先位置を実現する関節角度の組が無数に存在することがあげられる。関節角度に無数の解が存在することは姿勢を自由に選択できることを意味し本来利点であるが、制御上は任意の点での姿勢を決定する問題が残る。これを不良設定問題 (ill-posed problem) と呼ぶ。

一般に、ある問題の ①解が存在し、②解が一意で、③解がデータ(例えば初期値)に連続に依存するという三つの条件すべてが満足される時、その問題を良設定問題 (well-posed problem) と呼び、このうち一つでも満足されない場合を不良設定問題と呼ぶ。冗長マニピュレータの場合は②の意味で不良設定である。これは制御上の計算が複雑になることを意味する。

冗長マニピュレータは、その機構上アクチュエータの数が多くなりマニピュレータの重量が増加する。そのためその重量を駆動する強力なアクチュエータを設けることで重量が増加する、という悪循環に陥る。また手先重量を減少するために手元にすべてのアクチュエータを配置した構造では、リンクやギヤを介して駆動することになり、リンクによる非線形性やギヤによる非線形摩擦が生じ、マニピュレータを動力的な面から捉えた場合制御が困難になる。逆に関節にギヤなしで直接接続された DD(ダイレクトドライブ)ロボットなども研究されているが⁶⁾ギヤによる増力がなくなるのでアクチュエータを大きなものにしなくてはならず、慣性の増大により制御が困難となる。

本研究では任意の姿勢から目標手先位置までの関節角度の変化を滑らかとする条件下で、教示情報により拘束する拡

散誤差修正方式⁷⁾を逆運動学の計算に用い、障害物回避を実現する障害物回避マップを作成した。本稿では障害物を回避するため冗長自由度を従来の3から4に変更した結果を述べる。また通常の拡散誤差修正方式によるマップ作成はオフライン時に行うことを前提としているが、だからと言って十分に密なマップを作成するには必要とする時間とメモリが膨大になる。そこで、マップの密度を必要最小限に抑え、それ以上の細分化は誤差修正式を用いた再計算によって行なうこととし、メモリを節約する方法で障害物を回避するマップを作成した。またその応用として、あらかじめ軌道を与えた状態で、その軌道を実現する関節角度を再計算した後、回避計算を行い障害物を回避した。

2. 本研究で用いる手法

ここでは、前章で説明した方法により求めた逆運動学マップ⁷⁾を用い、目標手先軌道を実現する目的で格子間に隙間の存在するマップを補完する手法と、障害物を回避するための関節角度の生成手法について解説する。

2.1 再計算アルゴリズム

まずシミュレーション環境を図2.1に示すものとし、マニピュレータのマップを展開する。

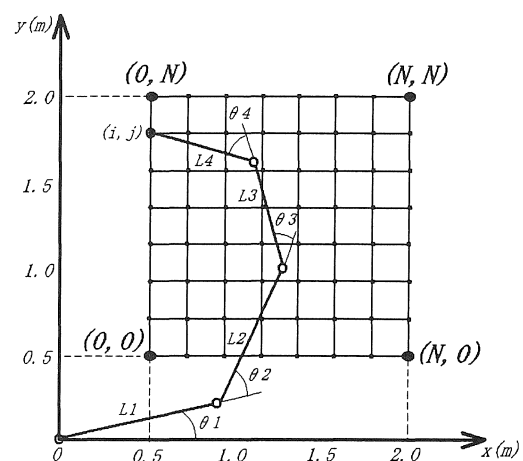


図2.1 シミュレーション環境

障害物を回避するためマニピュレータに冗長自由度を必要とするので、リンク数をこれまでの3リンクから4リンクへ変更した。このときリンクの長さは $L1 = 1.0[m]$ 、 $L2 = 1.0[m]$ 、 $L3 = 1.0[m]$ 、 $L4 = 1.0[m]$ でマップの格子数は

$N \times N$ ($N = 20$)、マップの配置は $0.5 \leq x \leq 2.0[m]$ 、 $0.5 \leq y \leq 2.0[m]$ とした。

ここで逆運動学マップでは格子点 (i, j) にのみ関節角度情報が存在し、格子点以外の空間には手先位置を実現する関節角度情報は存在しない。格子を十分密に作成できれば良いが、メモリを膨大に必要とするので現実的でない。そこで拡散誤差修正方式の誤差修正式を用いることで、格子点間の空間の関節角度情報を生成する。

誤差修正式を式2.1.1に示す。

$$\theta^t = \theta^{t-1} + \beta A_{i,j}^t \{x^d - f(\theta^t)\} \quad 2.1.1$$

ここに、 x^d は目標位置で $f(\theta_{i,j}^t)$ は関節角度から求めた手先の位置を表わす。また β は変化のゲインを調節する係数である。 θ の右上の添え字 t はステップ数を表わす。右下添え字の i, j は格子の座標。 A は目標手先位置に最も近い格子位置の姿勢における疑似逆ヤコビ行列である。この関係を図2.2に示す。

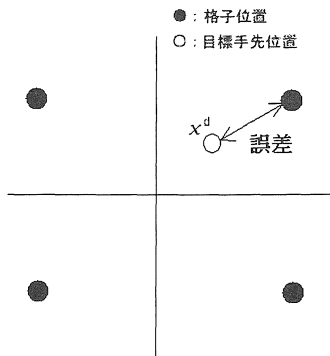
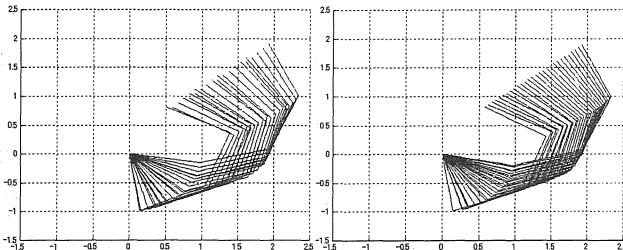


図2.2 目標手先位置と格子の関係

中心に引かれた実線は目標手先位置とそれに最も近い格子点との関係を解りやすくするための補助線である。誤差修正式による再計算を行なった場合と行なわなかった場合に

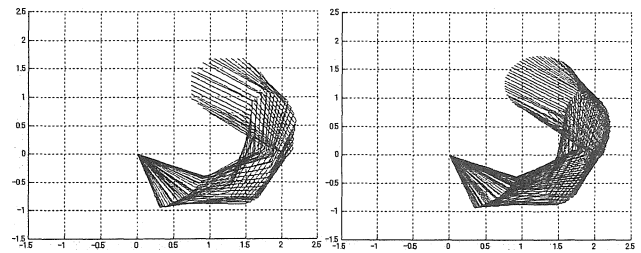


a. 誤差修正を行なわなかった場合 b. 誤差修正を行なった場合

図2.3 軌道の実現性 直線軌道の場合

ついて軌道の実現性に関して目標軌道を直線とした場合を図2.3に示す。

図2.3 a. は目標軌道から最も近い格子点、つまり誤差修正式を用いずに軌道を近似できる格子点で、軌道を再現した場合。同図 b. は最も近い格子位置から誤差修正式による再計算を行なった場合を示す。目標軌道は $y = ax + b$ とし $a = 0.8$ 、 $b = 0.365$ 、 $0.57 \leq x \leq 2.0$ で x の間隔は 0.05 とした。また目標軌道が円の場合を図2.4に示す。



a. 誤差修正を行なわなかった場合 b. 誤差修正を行なった場合

図2.4 軌道の実現性 円軌道の場合

円軌道の場合目標軌道は中心点 $(x = 1.25, y = 1.25)$ 半径 $r = 0.5[m]$ とした。図から明らかなように、再計算を行なった場合目標軌道をよく実現している。

表2.1にこのときの誤差の最大、最小、平均表に示す。単位は $[m]$ とし、マップの格子数は $N = 20$ とした。このとき格子の間隔は 0.07895 である。再計算時においては逐次計算の誤差が 0.0001 以下となるとき、誤差修正を終了した。

表2.1 再計算の行なった場合と行なわなかった場合の誤差

		円軌道の場合	直線軌道の場合
再計算をしない場合	最大誤差	0.10006832	0.09765335
	最小誤差	0.01526911	0.01362954
	平均誤差	0.06035193	0.05530582
再計算を行なった場合	最大誤差	0.00009991	0.00009993
	最小誤差	0.00009222	0.00009240
	平均誤差	0.00095826	0.00009640

表より明らかなように誤差修正式を用いた再計算を行なった場合誤差は小さくなる。

2.2 障害物回避アルゴリズム

本研究において回避方向を決定することは重要な課題である。冗長マニピュレータでは逆ヤコビ行列 J^{-1} を算出できない。そこで誤差のノルム

$$\|\mathbf{J}\dot{\theta} - \dot{\mathbf{X}}\| \quad 2.2.1$$

を最小にする解を考えると、その一般解は

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{\mathbf{X}} + (\mathbf{I}_n - J^+ J) \mathbf{l} \quad 2.2.2$$

ここに J^+ は

$$J^+ = J^T (J J^T)^{-1} \quad 2.2.3$$

で疑似逆行列 (pseudo-inverse matrix) と呼ばれ $J J^+ = \mathbf{I}$.

また、 \mathbf{l} は n 次元任意ベクトルである。また $(\mathbf{I}_n - J^+ J) \mathbf{l}$ は

J の零空間への写像すなわち

$$(\mathbf{I}_n - J^+ J) \mathbf{l} \in \mathbf{N}(J) \quad 2.2.4$$

が成り立つ。この関係を図2.5に示す。

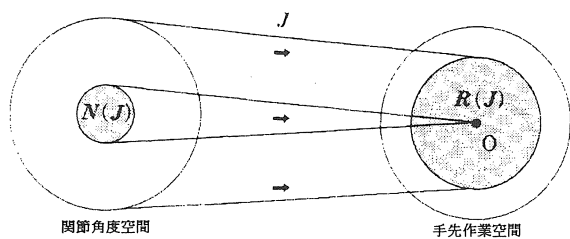


図2.5 関節角度空間の零空間への写像

ここでヤコビ行列を用いた関係

$$\dot{\mathbf{X}}_i = J_i \dot{\theta} \quad 2.2.5$$

へ2.2.2式を代入すると

$$\dot{\mathbf{X}}_i = J_i J_n^+ \dot{\mathbf{X}}_{nd} + J_i (\mathbf{I} - J_n^+ J_n) \mathbf{l} \quad 2.2.6$$

となる。

このとき目標手先位置を固定したままで障害物を回避する場合を考えると2.2.5式は

$$\dot{\mathbf{X}}_i = J_i (\mathbf{I}_n - J_n^+ J_n) \mathbf{l} \quad 2.2.7$$

となる。この \mathbf{l} を障害物を回避するように設定するため、次のように式を変形する。

$$\mathbf{l} = J_i (\mathbf{I}_n - J_n^+ J_n) \dot{\mathbf{X}}_i \quad 2.2.8$$

具体的には障害物中心から障害物に当たっている関節に向けた方向を回避方向 $\dot{\mathbf{X}}_i$ とすることで、冗長自由度を使った関節角度変化を実現する \mathbf{l} が生成され、2.2.7式を計算することで、手先位置を保ったまま障害物の回避が可能となる。

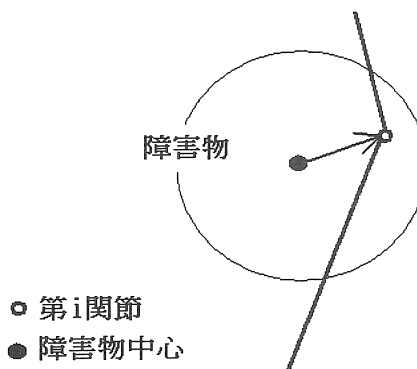


図2.9 障害物回避

障害物を回避する例を図2.10に示す。

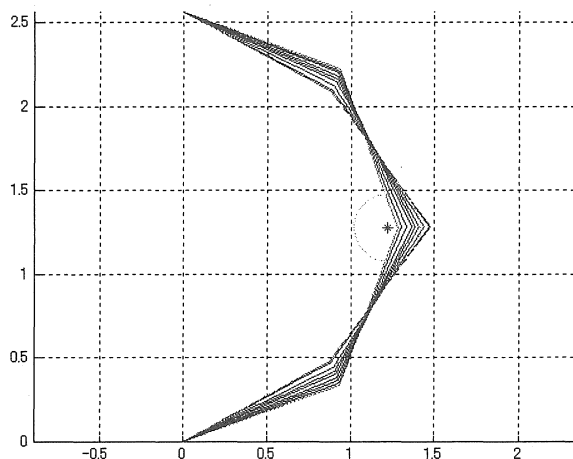


図2.10 障害物回避例

ここにリンク長は

$l_1 = 1.0, l_2 = 1.0, l_3 = 1.0, l_4 = 1.0[m]$ 、初期関節角度は $\theta_1 = 20.0, \theta_2 = 50.0, \theta_3 = 40.0, \theta_4 = 50.0[\text{deg}]$ とした。また障害物に対し回避する方向を図2.9の方向とは逆にしたい場合も存在するので、その例を図2.11に示す。初期関節角度は同じ値とした。

その例を図2.11に示す。初期関節角度は同じ値とした。

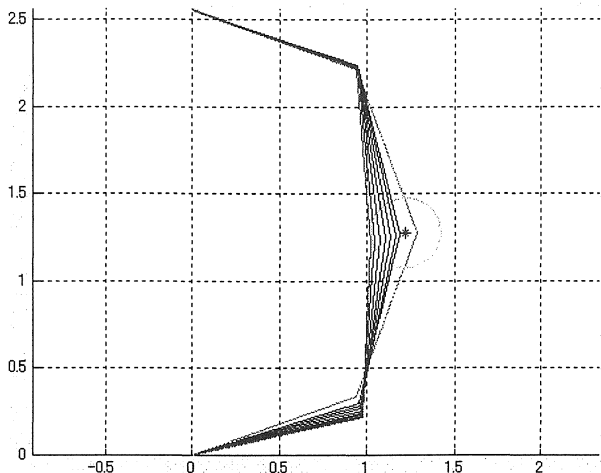


図2.11 反対方向への回避

しかし、障害物の位置関係と初期関節角度により特異姿勢近くになってしまう。

3. 障害物回避における目標軌道実現性

3.1 シミュレーション

ここでは、前章の方法により求めた障害物回避マップを用いて、①目標軌道を円軌道として求めた場合、②二次関数を目標軌道とした場合、③直線軌道として求めた場合に関して実験を行なった。また比較のために障害物回避マップを用いずに、障害物回避を2.2.8式から求めた \mathbf{l} を使い、2.2.2 式で目標手先位置を達成した場合について関節角度の変化量と可操作性に関して考察する。可操作性 ω は次式を基にした。

$$\omega_i = \sqrt{\det(J_i(\theta)J_i(\theta)^T)} \quad 3.1.1$$

また、障害物回避計算を行なう過程で特異姿勢となった場合と、手先位置が障害物内に存在した場合は排除した。

3.2 実験結果

図3.1のような二次元平面作業空間に4リンクマニピュレータを配置し、円形の障害物を置きシミュレーションを行なった。また目標軌道はステップごとに目標手先座標として与えた。

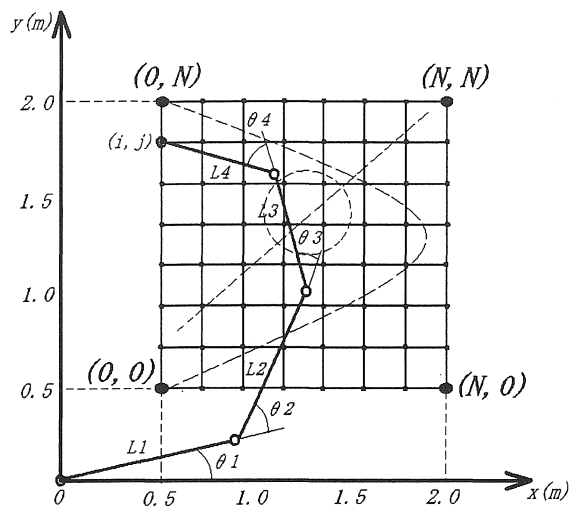
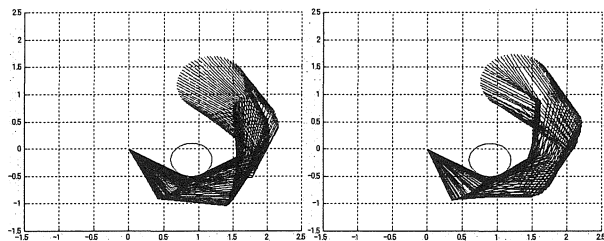


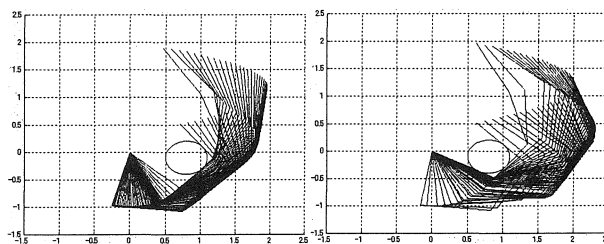
図3.1 シミュレーション実験

はじめに障害物を右側から避ける場合についての結果を示す。



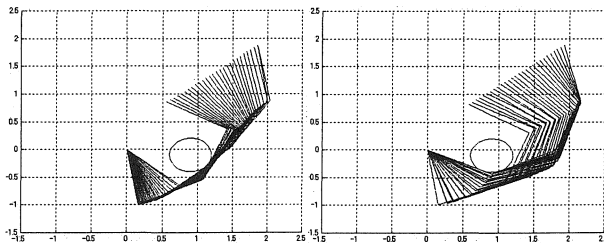
逆運動学計算による方法 逆運動学マップによる方法

図3.2 ①円軌道の実現性



逆運動学計算による方法 逆運動学マップによる方法

図3.3 ②二次関数型の軌道の実現性



逆運動学計算による方法 逆運動学マップによる方法

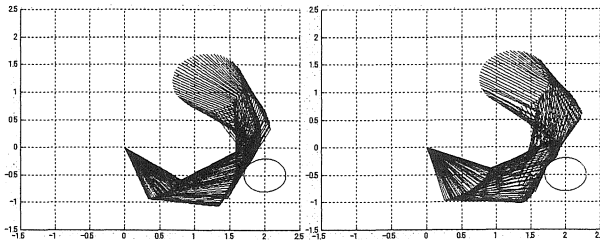
図3.4 ③直線軌道の実現性

障害物の中心座標は軌道ごとに変更した。中心座標を表3.1に示す。また障害物の半径は $r = 0.3[m]$ で固定とした。

表3.1 障害物の中心座標

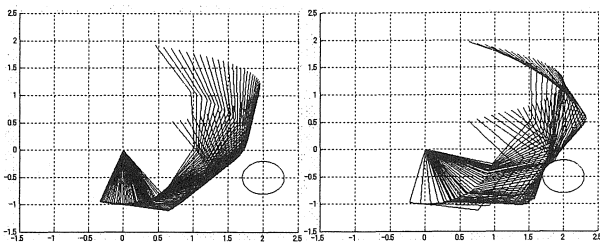
	x座標	y座標
円軌道	1.8	-0.5
関数型軌道	2	-0.5
直線軌道	-0.3	-1

次に障害物の位置を変えて反対の左側から回避する場合についてシミュレーション結果を示す。



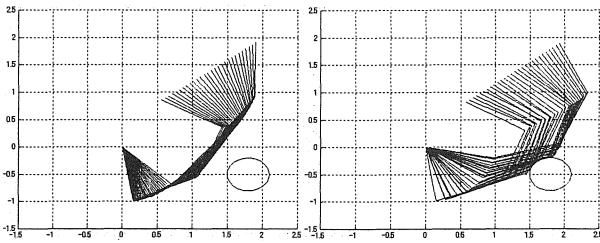
逆運動学計算による方法 逆運動学マップによる方法

図3.5 ①円軌道の実現性



逆運動学計算による方法 逆運動学マップによる方法

図3.6 ②関数形の軌道の実現性



逆運動学計算による方法 逆運動学マップによる方法

図3.7 ③直線軌道の実現性

障害物の情報をマップを用いた場合と障害物を左側から回避した場合の障害物中心座標を表3.2に示す。半径を $r = 0.3$ とした。

表3.2 障害物の中心座標

	x座標	y座標
円軌道	0.8	-0.1
関数型軌道	0.9	-0.2
直線軌道	0.9	-0.1

次に障害物を左側で回避する場合の円軌道を実現したとき(図3.5)の手先の可操作度を図3.8に示す。

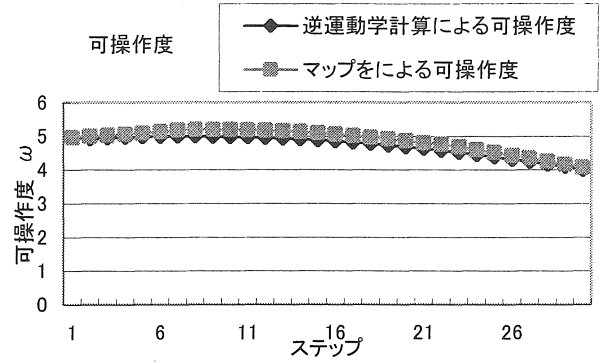


図3.8 可操作度の変化

また、障害物を右側で回避する場合の直線軌道を実現したとき(図3.4)の手先の可操作度を図3.9に示す。

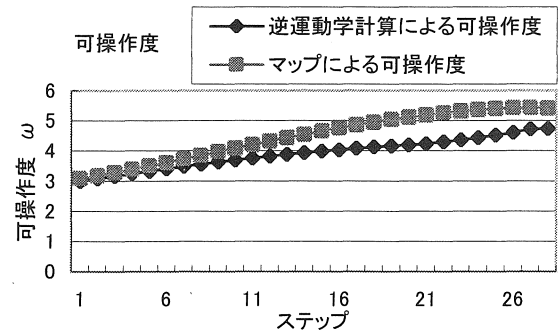


図3.9 可操作度の変化

また、障害物を左側で回避する場合の二次関数型軌道を実現したとき(図3.6)の手先の可操作度を図3.10に示す。

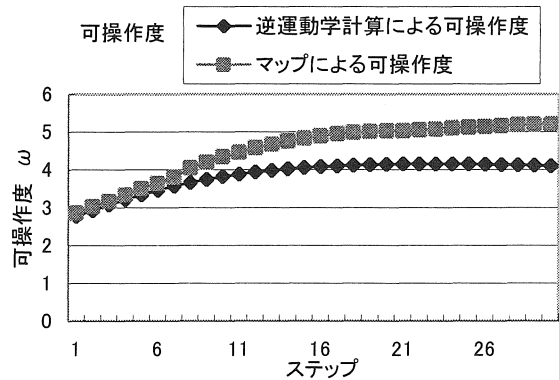


図3.10 可操作度の変化

4. 考察

逆運動学マップを用いて障害物回避を行なった場合と、冗長マニピュレータの逆運動学計算を行い障害物を回避した場合について可操作度を求めた。

関節角度に関して逆運動学を解いた方が滑らかではあった。

それは、逆運動学マップを用いた場合誤差修正式により行なう補間は作業空間に対しては滑らかになるが、関節空間に対しては必ずしも滑らかになるとは限らないからである。

可操作度については、各リンクの可操作度に関しては逆運動学マップを用いた場合が良好であった。初期位置における可操作度が同じとなった理由は、最初の手先位置を実現する関節角度を同一の逆運動学マップと誤差修正式を用いたためである。逆運動学を計算した場合において可操作度が小さいのは逆運動学計算をすすめると特異姿勢に近づいてゆく場合が見られたので、障害物回避を行なう場合も特異姿勢に近づいていったものと思われる。

5. まとめ

5.1 結論

本研究は、冗長マニピュレータの制御に関し運動学問題を解決する一手法について行った。その解決方法については逆運動学マップを用いた。また従来では考慮されてこなかった障害物回避問題に応用して有用性を手先の可操作性で示した。

5.2 今後の課題

逆運動学マップは作業空間の隅に用意される教示情報に依存するが、現在にいたるまで、教示情報自身の評価は行っていない。教示情報を可操作度を最大とするように設定することで、作業空間内全体において良好な可操作度を保ちながら手先位置を実現する関節角度を生成することが可能である

と考えている。また障害物の形状や個数、障害物の移動を考えた場合、障害物回避の計算をよりすばやく行う必要がある。このときマニピュレータが障害物に衝突すると判定される領域の近傍のみを回避計算の範囲とすれば計算時間を短縮することができる。

本研究では、動力学を考慮せずにシミュレーションを行った。実機における逆問題の解決を可能とするためには動力学を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 川人 光男: 脳の計算理論、産業図書
- 2) 三菱重工: PA-10ハードウェアマニュアル
- 3) 平井 和雄、仲山 茂人: ロボットプラットフォームの製作および高性能ハンドの開発、日本ロボット学会誌、Vol19, No1, 8-15, 2001
- 4) 中野 恵理、今水 寛、大須理英子、宇野 洋二、五味 裕章、吉岡 利福、川人 光男: 多関節到達運動における軌道計画規範の定量的検討、電子情報通信学会論文誌 D-2, VolJ81-D-2, No7, 1666-1678, 1998
- 5) 浅田 春比古: DD ロボット入門、工業調査会
- 6) 伊藤 宏司、伊藤 正美: 生体とロボットにおける運動制御、コロナ社
- 7) Zhiewi, Luo, Masami, Ito: Diffusion-based learning theory for organizing visuo-motor coordination, Bio. Cybernetics, 79, 279-289, 1998

(受理 平成14年3月19日)