マニピュレータの占有空間を考慮した 障害物回避動作の決定法

尾崎 弘明*・毛利 彰*・高田 勝*

Planning of Collision Free Movement of a Manipulator Considering its Body Space

Hiroaki OZAKI*, Akira MOHRI* and Masaru TAKATA*

This paper formalizes the problem of moving the hand of a manipulator to the goal position and orientation avoiding the collision with obstacles in the work space and gives an algorithm to solve the formalized problem. The algorithm is given as follows: First, an efficient method of detecting the interference among links of a manipulator and obstacles is presented. Second, movable conditions of joints are shown and the problem of planning of collision free movement is formalized using these conditions. Third, an algorithm to solve the problem by the use of linear programming is given.

The obtained algorithm is applied to the planar movement of a manipulator with four links and four degrees of freedom and its effectiveness is shown.

Keyword: manipulator, interference checking, collision free movement

1. ま え が き

多関節マニピュレータの重要な機能の一つは、それのもつ冗長な自由度を生かして、作業域内にある障害物を回避し、目的の動作を行えることである。本論文では、マニピュレータをどの部分も障害物に衝突させることなく、目標点（目標の位置・姿勢）まで動かす問題を定式化し、これを解くアルゴリズムを提案する。

障害物回避動作の決定問題は、つぎの二つの段階、すなわち、

(1) 障害物に関する情報（形、位置、大きさ、向

き）をどのように収集し、また、これを用いて障害物をどのように記述するか。

(2) 障害物は記述されているとして、各関節をどのように動かせば障害物を回避して目標点に到達できるか。

に分けられる。

(1)に関しては、未知環境のマップの自動作成に関する研究¹⁾や、人間と計算機との対話によって環境を記述する研究²⁾などが行われ、効果的なマニピュレータ作業域の記述の問題が取り扱われている。この記述が完了すると、障害物回避動作の決定問題は、(2)の問題になる。

(2)の問題の解決法として、マニピュレータを直線および幾つかの代表点として取り扱う方法が提案されている³⁾⁻⁵⁾。これらの方法を用いたとき、複雑な（障害物が入り組んでいる）作業域では、考慮に入れた直線および代表点以外の部分が、障害物に衝突してしまう可能性がある。一方、マニピュレータの占有空間を考慮に入れた解決法も提案されている⁶⁾⁻⁹⁾。Kulakovは、マニピュレータの各リンクを、これを内包する直方体で表わし、これらが障害物に侵入しない条件を考えた⁶⁾。しかし、この方法では、障害物形状の限定や、腕全体を被う触覚センサの利用を前提とするなどの制約がある。工藤ら⁷⁾および Udupa⁸⁾は、使用するマニピュレータ構造の特長を利用した解決法をそれぞれ提案した。ところが、これらの方法は一般化が困難であり、また複雑な作業域での問題には適用しにくい。Lozano-Pérezは、多面体で表わされる物体が、多面体の障害物が置かれている領域を、姿勢を変えずに目標位置まで移動するとき、最短経路が容易に見い出せることを示した¹⁰⁾。そこで、彼はこの特長を利用して、マニピュレータの障害物回避問題の解決を試みた⁹⁾。しかし、回転自由度をもつマニピュレータでは、この

* 九州大学工学部 福岡市東区箱崎 6-10-1

* Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka

(Received March 30, 1982)

(Revised May 28, 1982)

方法によって最短経路を見出すことは現実的に不可能であり、また、回転自由度が多くなると、目標点に到達可能な経路の選定も複雑で困難なものになる。このため、多自由度のマニピュータを用いる場合には、大幅な近似が必要となり、その結果、目標点まで到達しうる経路が見落されてしまう。以上に述べたように、現在までに提案されている方法は、一般の多自由度多リンクマニピュレータの障害物回避動作の決定に適しているとは言いがたい。以下では、この動作決定問題のより有効な解法を検討する。

本論文では、つぎのような二つの前提のもとに、障害物回避問題を取り扱う。つまり、

(1) マニピュレータの各リンク（把握された物体、すなわち、ワークまたは工具なども一つのリンクと見なす）および障害物は、直方体またはその組合せで表現できる。

(2) マニピュレータの手先（およびワークなど、以下ではワークとのみいう）の経路（厳密に満足させる必要はない推定経路）の候補（注1）が与えられる。

(1)は、リンクや障害物の記述を容易にするためと、これらの互いの干渉（接触または侵入）を見い出すのに要する演算を少なくするための前提である。記述の精度を高める必要があれば、おのおののリンクおよび障害物を幾つかの直方体の組合せで表現すればよい。障害物が記述されると、ワークのみが通過できる経路は比較的容易に得られるので、前提(2)は妥当と思われる。

以上の前提のもとに、障害物回避動作の決定問題ができるだけ一般的に定式化する。この定式化には、マニピュレータと障害物との接触点の検出が不可欠であるから、この効果的な検出法を提案する。さらに、これを用いて、定式化した問題を解くアルゴリズムを与える。また、平面運動の例にこのアルゴリズムを適用し、シミュレーションを行い、提案する動作決定法の有効性を示す。

2. 接触検出と関節の可動条件

マニピュレータの障害物回避動作を決定するには、関節の動きが与えられたとき、マニピュレータが障害物と干渉する部分を見い出さねばならない。

この干渉部分を見い出す方法として、(1)マニピュレータの作業域をあらかじめ定めた大きさのブロックに分割し、障害物が占める空間ブロックとマニピュレ

(注1) 以下では、経路の候補とは、目標点に至るワークの推定された中間指定点（中間目標の位置・姿勢）の軌道を意味する。

Fig. 1 Manipulator movement in the presence of obstacles

ータが占める空間ブロックとの共通ブロックを見い出して干渉を求める方法、(2)障害物およびマニピュレータの占有空間を定める面や稜を数式表現し、これらの交点を求めることによって干渉部分を見い出す方法¹¹⁾がある。前者は、干渉部分を精度よく求めるには多くの記憶容量が必要になる。また、後者では、面や稜を表わす式を一つ一つ組合せて交点の有無を調べねばならず、干渉部分を見い出すには多くの演算が必要である。

ここでは、接触点を効率よく見い出すために、マニピュレータの各リンクを表わす直方体と、障害物を表わす直方体とが接触するための必要条件を求める。また、この条件を繰返して適用すれば、接触点が必要な精度で得られることを示す。さらに、得られた接触点を用いて関節の可動条件を求める。

2.1 リンクと障害物の表現

いま、Fig. 1に示すように、 m 個のリンク $L_1 \sim L_m$ （ただし、 L_m は手先）からなるマニピュレータが、ワーク L_w をもち、 n 個の障害物 $B_1 \sim B_n$ が存在する作業域内を動くとする。リンクおよび障害物は、実際には種々の形状をとるが、1章の前提(1)に従い直方体またはその組合せで表わされる。しかし、以下では議

Fig. 2 Coordinate axes definitions for two adjacent links and relationships between the two coordinate axes

論を簡単にするために、各リンクおよび障害物をそれぞれこれを内包する 1 つの直方体で表わし、これらを改めてリンク $L_l (l=1, \dots, m, w)$ および障害ブロック $B_j (j=1, \dots, n)$ と呼ぶ。

マニピュレータの運動を記述するために、Denavit ら¹²⁾の表現を用いて、リンクに固定された座標系を導入する。関節 l はリンク L_{l-1} とリンク L_l とを繋ぐ関節としよう。このとき、リンク L_l に固定された l 座標系 $o_l-x_l y_l z_l$ をつぎのように定める (Fig. 2 参照)。

z_l : 関節 $l+1$ の軸にそう方向。

x_l : z_{l-1} から z_l に向かい、これらの共通垂線をなす方向。

y_l : $o_l-x_l y_l z_l$ が右手系をなす方向。

この表現を用いると、 l 座標系においてその原点からみたリンク L_l 内の点 i ${}^l r_i = ({}^l x_i {}^l y_i {}^l z_i)^T$ は、 $l-1$ 座標系で表わすと、

$$\begin{bmatrix} {}^{l-1} r_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{l-1} A_l \begin{bmatrix} {}^l r_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。このとき、座標変換マトリクス ${}^{l-1} A_l$ は、

$${}^{l-1} A_l = \begin{bmatrix} c_l & -s_l c_{\alpha_l} & s_l s_{\alpha_l} & a_l c_l \\ s_l & c_l c_{\alpha_l} & -c_l s_{\alpha_l} & a_l s_l \\ 0 & s_{\alpha_l} & c_{\alpha_l} & t_l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

である。ここに、 $s_l = \sin \theta_l$, $c_l = \cos \theta_l$, $s_{\alpha_l} = \sin \alpha_l$ および $c_{\alpha_l} = \cos \alpha_l$, a_l , α_l , θ_l , t_l は Fig. 2 で与えられている。 l が回転の自由度をもつ関節であれば、 θ_l が変数、直進移動をする関節ならば t_l が変数となる。この関係を用いてリンク L_l 内の点 i をベース座標系 (0 座標系) で表わせば、つぎようになる。

$$\begin{bmatrix} {}^0 r_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 A_1 {}^1 A_2 \dots {}^{l-1} A_l \begin{bmatrix} {}^l r_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 A_l \begin{bmatrix} {}^l r_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

一方、障害ブロック B_j についても、これに固定された座標系 $o_j-\bar{x}_j \bar{y}_j \bar{z}_j$ (以下 B_j 座標系と呼ぶ) を導

Fig. 3 Description of obstacle B_j with respect to base coordinates

Fig. 4 Relationship between obstacle B_j and link L_l with respect to B_j coordinates

入する。すなわち、Fig. 3 に示すように、 B_j の重心を原点とし、直方体の各稜と平行に $\bar{x}_j$, $\bar{y}_j$ および $\bar{z}_j$ 軸をとる。ベース座標系原点からみた o_j の位置を $\bar{r}_j = (\bar{x}_j \bar{y}_j \bar{z}_j)^T$ とし、 $\bar{x}_j$ 軸および $\bar{y}_j$ 軸のベース座標系に対する方向余弦をそれぞれ n_{xj} , n_{yj} とすれば、 B_j 座標系からベース座標系への変換マトリクス ${}^0 \bar{A}_j$ は、

$${}^0 \bar{A}_j = \begin{bmatrix} n_{xj} & n_{yj} & (n_{xj} \times n_{yj}) & \bar{r}_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

で表わせる。

2.2 接触検出

本節ではリンクと障害ブロックとの干渉の必要条件を導き、これを用いた接触点検出法を述べる。以下において、リンク L_l と障害ブロック B_j との接触を例として説明する。

L_l 内の点 i は、(4)式を用いると B_j 座標系の原点を基準にして表わすことができ、

$$\begin{bmatrix} {}^j r_i \\ 1 \end{bmatrix} = ({}^0 \bar{A}_j)^{-1} {}^0 A_l \begin{bmatrix} {}^l r_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。この関係は、 B_j 座標系を基準にして L_l を見たことを示し、Fig. 4 のように表現できる。この関係を用いれば、 L_l が B_j と干渉するための必要条件は以下のように得られる。

l 座標系からみた L_l の重心 ${}^l r_G$ は、 B_j 座標系からみると、

$$\begin{bmatrix} {}^j r_{lG} \\ 1 \end{bmatrix} = ({}^j x_{lG} \ {}^j y_{lG} \ {}^j z_{lG} \ 1)^T = ({}^0 \bar{A}_j)^{-1} {}^0 A_l \begin{bmatrix} {}^l r_G \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。 L_l と B_j の大きさを、Fig. 4 に示すように、それぞれ (d_l, w_l, h_l) , $(\bar{d}_j, \bar{w}_j, \bar{h}_j)$ を用いて表わす。このとき、 L_l の重心とその頂点間の距離は、

$$s_l = \frac{1}{2} \sqrt{d_l^2 + w_l^2 + h_l^2} \quad (7)$$

となる。これらの値を用いると、つぎの 3 条件

$$|{}^j x_{iG}| \leq \frac{\bar{d}_j}{2} + s_i, |{}^j y_{iG}| \leq \frac{\bar{w}_j}{2} + s_i, |{}^j z_{iG}| \leq \frac{\bar{h}_j}{2} + s_i \quad (8)$$

を同時に満たすことが、 L_i が B_j と干渉するための必要条件となる。したがって、いずれか一つでも満足しなければ接触の可能性はない。

いま、(8)式が満たされているとしよう。このとき、 L_i をさらに細分化した小ブロックそれぞれについて、同様な判定を行えば、 L_i のどの部分が B_j と干渉するかを知ることができる。たとえば、 L_i を大きさ $(d_i/2, w_i/2, h_i/2)$ の八つのブロックに等分割する場合を考えよう。この分割ブロックそれぞれについて(8)の条件を調べ、干渉の可能性のあるもののみを再び $1/8$ に等分割する。以下この手順を繰返したとき、 L_i の $1/8^{p-1}$ (p は正の整数) の大きさの小ブロックが B_j と干渉するための必要条件是、このブロック重心を $\underbrace{{}^j \mathbf{r}_{iG} \dots}_{p-1} = (\underbrace{{}^j x_{iG} \dots}_{p-1}, \underbrace{{}^j y_{iG} \dots}_{p-1}, \underbrace{{}^j z_{iG} \dots}_{p-1})^T$ で表わすとき、

$$\left| \underbrace{{}^j x_{iG} \dots}_{p-1} \right| \leq \frac{\bar{d}_j}{2} + s_{ip-1}, \left| \underbrace{{}^j y_{iG} \dots}_{p-1} \right| \leq \frac{\bar{w}_j}{2} + s_{ip-1}, \left| \underbrace{{}^j z_{iG} \dots}_{p-1} \right| \leq \frac{\bar{h}_j}{2} + s_{ip-1} \quad \text{ここに } s_{ip-1} = s_i / 2^{p-1} \quad (9)$$

となる。

ここで、(9)式を満たす $\underbrace{{}^j \mathbf{r}_{iG} \dots}_{p-1}$ に重心をもつ小ブロックについて考える。この小ブロックをさらに $1/8$ に分割したブロック (すなわち、 L_i の $1/8^p$ の大きさのブロック) の重心を $\underbrace{{}^j \mathbf{r}_{iG} \dots}_{p-1} = (\underbrace{{}^j x_{iG} \dots}_{p-1}, \underbrace{{}^j y_{iG} \dots}_{p-1}, \underbrace{{}^j z_{iG} \dots}_{p-1})^T$ ($i=1, \dots, 8$) で表わす。このとき、つぎの3条件

$$\left| \underbrace{{}^j x_{iG} \dots}_{p-1} \right| \leq \frac{\bar{d}_j}{2}, \left| \underbrace{{}^j y_{iG} \dots}_{p-1} \right| \leq \frac{\bar{w}_j}{2}, \left| \underbrace{{}^j z_{iG} \dots}_{p-1} \right| \leq \frac{\bar{h}_j}{2} \quad (10)$$

を同時に満たす分割ブロック i は、 B_j と干渉している。

以上に述べた方法により、 p を適当にとれば、マニピュレータの各リンクが障害ブロックと干渉する部位を必要な精度で求めることができる。ただし、障害物回避動作を求めるには、リンクが障害ブロックに侵入する以前に接触を検出できればならない。このため、各リンクの外側に余分な領域を付加し、この領域内で障害ブロックと干渉する部分を求め、この重心を接触点とみなす。

2.3 関節の可動条件

マニピュレータの関節の動きの現在値が与えられ、接触点が前節の方法によって得られたとき、各リンクを障害ブロックに侵入させない関節の動きを考える。

いま、Fig. 1 に示すように、リンク L_i 上の点 i ($i=1, \dots, q$; q はリンクと障害ブロックとの接触点数) で障害ブロック B_j と接するとする。また、ベース座標系原点からこの接触点までの距離を $\mathbf{r}_i$ とする。 B_j の占有空間が、

$$h_j(\mathbf{r}) \leq 0 \quad (11)$$

で表わされるとする。 $\mathbf{r}_i$ は B_j の境界上にあるから、

$$h_j(\mathbf{r}_i) = 0 \quad (12)$$

そこで、マニピュレータの関節が微小量 $\delta\theta = (\delta\theta_1 \dots \delta\theta_m)^T$ (注2) だけ動いた結果、 L_i 上の点 i は $\delta\mathbf{r}_i$ だけ動くとしよう。このとき、 $\mathbf{r}_i + \delta\mathbf{r}_i$ は B_j (境界を除く) 内に入ってはならないから、

$$h_j(\mathbf{r}_i + \delta\mathbf{r}_i) \geq 0 \quad (13)$$

を満たさなければならない。この条件は、 $\delta\mathbf{r}_i$ の2次以上の項を無視すると、

$$\partial h_j / \partial \mathbf{r} |_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_i} \cdot \delta\mathbf{r}_i \geq 0 \quad (14)$$

となる。 $\partial h_j / \partial \mathbf{r} |_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_i}$ は、点 i においてブロック B_j の内側に向かう法線方向の単位ベクトル $\mathbf{n}_i$ と逆符号をもち、これに比例するから、(14)式は結局、

$$\mathbf{n}_i \cdot \delta\mathbf{r}_i \leq 0 \quad (15)$$

となる。

一方、 l 座標系原点からみた点 i の位置 ${}^l \mathbf{r}_i$ を用いて $\mathbf{r}_i$ を表現すると、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 A_l \begin{bmatrix} {}^l \mathbf{r}_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

である。この関係より、各関節が $\delta\theta_j$ ($j=1, \dots, l$) だけ動いたときの点 i の動きはつぎのようになる。

$$\begin{bmatrix} \delta\mathbf{r}_i \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^l U_{lj} \delta\theta_j \begin{bmatrix} {}^l \mathbf{r}_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

ここに、 $U_{lj} = {}^0 A_1 {}^1 A_2 \dots {}^{j-2} A_{j-1} Q_j {}^{j-1} A_j \dots {}^{l-2} A_{l-1} {}^{l-1} A_l$ 、 Q_j は $\partial {}^{j-1} A_j / \partial \theta_j = Q_j {}^{j-1} A_j$ を満たす定数マトリクス。

以上により、関節の可動条件は、(15)式および(17)式を用いて表わせる。

3. 障害物回避動作決定問題の定式化

本章では、前節で導びかれた関節の可動条件をもとに、障害物回避動作の決定問題を定式化する。ここで扱う問題では、1章で述べたように、マニピュレータのワークの中間目標位置・姿勢の軌道が与えられてい

(注2) ここでは、回転運動、直進移動ともに θ_i ($i=1, m$) で表わす。

とする。姿勢の軌道は、作業内容に応じて姿勢が指定されていれば、その指定値をとるように与えられ、指定がなければ、中間目標位置の軌道を通る際、ワークが障害物に衝突しないように与えられるものとする。

3.1 目的関数

ここでは、ワークの動きが、与えられた径路の候補のできるだけ近傍を通るようにする。そこで、目標点に至るまでの動きを K ステップに分け、 $k(k=1, \dots, K)$ ステップでの目的関数をつぎのように定める。すなわち、

$$f_k = \|(\mathbf{r}_w^k - \mathbf{r}_w)/s_i\|^2 + C\|(\mathbf{a}_w^k - \mathbf{a}_w)/a_i\|^2 \quad (18)$$

ここに、 $\mathbf{r}_w^k$, $\mathbf{a}_w^k$: k ステップのワークの目標位置および姿勢、 s_i : マニピュレータの長さ、 a_i : 最大姿勢角 ($a_i = \max_{\substack{1 \leq k \leq K \\ 1 \leq e \leq E}} |(\mathbf{a}_w^k)_e|$, ただし $(\mathbf{a}_w^k)_e$, E はそれぞれ $\mathbf{a}_w^k$ の第 e 成分およびその成分数を示す)。 C : 位置に対する姿勢の重み、 $\mathbf{r}_w$, $\mathbf{a}_w$: 現在のワークの位置および姿勢。

ワークの位置 $\mathbf{r}_w$ はつぎの関係より得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_w \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^0A_m {}^m A_w \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^0R_m & \mathbf{r}_m \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^mR_w & \mathbf{r}_w \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{r}_m + {}^0R_m \mathbf{r}_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19) \end{aligned}$$

ここに、 0R_m , mR_w : それぞれ手先座標系からベース座標系、ワーク座標系から手先座標系への回転マトリクス、 $\mathbf{r}_m$, $\mathbf{r}_w$: それぞれベース座標系原点から手先座標系原点、手先座標系原点からワーク座標系原点までの距離を表すベクトル。

姿勢 $\mathbf{a}_w$ は、たとえば、Fig. 1 のような姿勢角 α , β , γ を用いると、回転マトリクスとつぎの関係にある。

$$\begin{aligned} {}^0R_w &\triangleq {}^0R_m {}^mR_w \\ &= \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & -s_\alpha c_\beta + c_\alpha s_\beta s_\gamma & s_\alpha s_\beta + c_\alpha s_\beta c_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & c_\alpha c_\beta + s_\alpha s_\beta s_\gamma & -c_\alpha s_\beta + s_\alpha s_\beta c_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix} \quad (20) \end{aligned}$$

ここに、 $c_\alpha = \cos \alpha$, $s_\alpha = \sin \alpha$ など。

したがって、 0R_w の i 行 j 列の要素を R_{ij} と表わせば、姿勢 $\mathbf{a}_w$ はつぎようになる。

$$\mathbf{a}_w = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}(R_{21}/R_{11}) \\ \sin^{-1}(-R_{31}) \\ \tan^{-1}(R_{32}/R_{33}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.2 制約条件

目的関数(18)式を最小にするように各関節の動きを決めるとき、以下の二つの型の制約条件を考慮に入れなければならない。一つは、マニピュレータの構造上

の制約による関節の可動範囲の制限であり、つぎの形で与えられる。

$$\theta_{j\min} \leq \theta_j \leq \theta_{j\max} \quad (j=1, \dots, m) \quad (22)$$

ここに、 $\theta_{j\min}$, $\theta_{j\max}$ はそれぞれ関節の最小および最大関節角。もう一つは、リンクが障害ブロックに接したときに課せられる関節の可動条件であり、2章3節で導かれたように、

$$\mathbf{n}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i \leq 0 \quad (i=1, \dots, q) \quad (23)$$

で与えられる。

4. 動作決定のアルゴリズム

前章で定式化された問題を解くアルゴリズムについて述べる。アルゴリズムの流れは、リンクが障害ブロックに接触するか否かによって分かれる。

(1) 接触条件がある場合 目的関数 f_k を k ステップの $i-1$ サブステップで得られた関節角 θ_{i-1}^k の周りで線形化する。そして、 $\delta \theta$ に対する f_k の変化分をあらたに k ステップの i サブステップでの目的関数と考える。すなわち、

$$\delta f_k = \partial f_k / \partial \theta |_{\theta_{i-1}^k} \cdot \delta \theta \quad (24)$$

(22), (23)式は線形の制約条件であるから、 i サブ

Fig. 5 Flow chart of planning of collision free movement

テップの関節角増分 $\delta\theta_i^k$ は、線形計画法を用いて求められる。この結果、 k ステップの i サブステップでの関節の動きはつぎようになる。

$$\theta_i^k = \theta_{i-1}^k + \delta\theta_i^k \quad (25)$$

ただし、 δf_i^k が線形化した目的関数として意味をもつためには、つぎの条件

$$\delta\theta_{j\min} \leq \delta\theta_j \leq \delta\theta_{j\max} \quad (j=1, \dots, m) \quad (26)$$

を追加しておく必要がある。

(2) 接触条件がない場合 制約条件(23)を除いて(1)と同様な解法が使える。しかし、この場合には、関節 m から関節 1 に向かって順に制約条件を満たす範囲で各関節を動かし、目的関数 f_k が小さくなるように θ_i^k を求めることもできる。5章の例では後者の方法を用いる。

以上により、動作決定の手順は Fig. 5 に示す流れ図のようになる。およその手順は以下のとおり。

- (1) 障害物に関するデータの読み込み。
- (2) 計算過程に必要なデータの読み込み。
- (3) 目標点および指定点の読み込み。
- (4) k ステップの目標点の算出(注3)。
- (5) $k=1, i=1$ と置く。
- (6) k ステップのサブステップ i で θ_i^k を以下の手順で求める。
 - (i) $i=I$ (I は(2)で指定される整数) なら、 k ステップの目標点に到達できないとみなし、 θ_i^k の決定を打切る。 $i < I$ なら(ii)へ。
 - (ii) θ_{i-1}^k でリンクと障害物とが干渉しているか否かを調べる。侵入していれば $\theta_{i-1}^k = \theta_{i-1}^k - \delta\theta_{i-1}^k/D$ (D は(2)で指定される定数) とし、再び干渉のチェック。侵入していなければ(iii)へ。
 - (iii) θ_{i-1}^k で k ステップの目標点に到達しているか否かを調べる。すなわち、 f_k を計算し $f_k \leq \varepsilon$ (ε は(2)で指定される定数) なら(iv)へ。 $f_k > \varepsilon$ ならば(v)へ。
 - (iv) $k=K$ なら動作決定終了。 $k < K$ なら $k=k+1, i=1$ と置き(i)へ。
 - (v) 接触、非接触それぞれの場合に応じて $\delta\theta_i^k$ を求め θ_i^k を得る。 $i=i+1$ と置き(i)へ。
- (6)(i)で動作決定が打切られた場合には、別の候補経路に従って動作決定を行う。この場合には、(3)に戻る。

(注3) (1), (3)が行われたとき、(4)が行えることが前提である。

(a) Successive manipulator movement

(b) Assumed and planned paths of position and orientation

(c) Planned joint movements

Fig. 6 Planned collision free movement Example 1

Fig. 7 Planned collision free movement Example 2
Successive manipulator movement

5. シミュレーション例

平面運動をする 4 自由度 4 リンクのマニピュレータの動作決定に提案したアルゴリズムを適用し、このアルゴリズムの有効性を確認する。

Fig. 6(a) および Fig. 7 に示すように、作業域には 4 個の障害ブロックが置かれている。マニピュレータは、これらを避けながら、 L_4 先端の位置と L_4 の姿勢とが目標の位置 ⊗ と姿勢 ① になるように動かされる。目標点到達のステップは $K=100$ とし、Fig. 6 では $k=20, 40, 60, 80$ で 4 個の指定点を与え、Fig. 7 では $k=33, 67$ において 2 個の指定点を与えている。経路の候補には、これらの指定点を通るスプライン曲線 (Fig. 6(a), (b), Fig. 7 の実線) を用いた。シミュレーションに用いた主なデータは以下のとおり。

$$(d_l, w_l) = (20.0, 10.0) \quad (l=1, \dots, 4):$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & -20.0\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 20.0\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^{l-1}A_l = \begin{bmatrix} \cos\theta_l & -\sin\theta_l & 20.0\cos\theta_l \\ \sin\theta_l & \cos\theta_l & 20.0\sin\theta_l \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$(l=2, 3, 4)$$

$$\begin{aligned} \theta_{j\max} = -\theta_{j\min} = 90(\text{deg}) \quad (j=1, \dots, 4); \quad \delta\theta_{1\max} = -\delta\theta_{1\min} \\ = 0.5(\text{deg}), \quad \delta\theta_{2\max} = -\delta\theta_{2\min} = 1.0(\text{deg}), \quad \delta\theta_{3\max} = - \\ \delta\theta_{3\min} = 1.5(\text{deg}), \quad \delta\theta_{4\max} = -\delta\theta_{4\min} = 2.0(\text{deg}); \quad C = \\ 1.0; \quad \varepsilon = 5/80^2. \end{aligned}$$

Fig. 6(a) および Fig. 7 は、10 ステップごとのマ

ニピュレータの位置を示している。これらの位置は、障害ブロックに衝突せずに与えられた候補経路を実現している。ただし、Fig. 7 では $k=20$ の近傍では f_k を小さくすることが困難であるため、 f_k が ε 以下にならなくても動作決定を続行させている。この例では $k=30$ までの関節の動きの変化が大きい。このように、経路の与え方が動作決定に与える影響は大きい。Fig. 6(b), (c) は、100 ステップを目標点に到達するまでの所要時間とみなし、与えられた位置・姿勢軌道と決定された位置・姿勢軌道との関係、得られた各関節の動きをそれぞれ図示している。上記の 2 例では、位置と姿勢とに等しい重みをつけたので、途中のステップで位置と姿勢とを共に与えられた軌道に合せている。この場合、経路の与え方によっては次ステップに進めないこともあるので、 C を小さくし位置のみを合せて次ステップに進む処理を加えた。この処理の効果が Fig. 6(b) の 80~90 ステップで見られる。Fig. 6(c) によれば、関節の可動範囲の制限が満たされていることもわかる。

6. あとがき

本論文で述べた主な内容を、今後検討すべき問題点とともに、項目別に挙げる。

(1) 接触検出法の提案 得られた検出法では、干渉があるための必要条件を用いる。このため、接触の可能性のあるリンクと障害物との対応が容易に見い出せる。接触点を見い出すためにリンクの外側に付加される領域の大きさ、ブロック分割の方法などは、適用される問題に応じて検討する必要がある。

(2) 問題の定式化 1 章で述べた二つの前提のもとに、できるだけ一般的に定式化した。ただし、一般には、障害物を除いたマニピュレータの作業域は、凸領域ではないから、接触によって課せられる条件 (15) は、実際の可動条件よりも厳しい。

(3) 解法の提案 定式化された問題の一つの解法を提案した。接触がある場合には、(2) で述べたように、実際より厳しい条件で解を求めることになるから、解が見落される可能性がある。この点については現在検討中である。

(4) 平面運動への適用 理解しやすい平面運動に本方法を適用し、その有効性を確認した。

ここで述べられた方法は、多自由度多リンクのマニピュレータが、障害物の入り組んだ複雑な作業環境下で動くときに考えなければならない障害物回避の問題を、一般的に取り扱うことができる。したがって、今後、環境の記述の研究と相まって、複雑な作業域で用

いられる工業用ロボットの動作決定の自動化や、多関節をもつ移動ロボットの自立走行の問題に利用できる考える。

参 考 文 献

- 1) A. M. Thompson: The Navigation System of the JPL Robot, 5th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, 749/757 (1977)
- 2) 長谷川：ロボットの作業環境のモデリングとモニタリング, 計測自動制御学会論文集, **17**-5, 61/67 (1981)
- 3) L. A. Loeff and A. H. Soni: An Algorithm for Computer Guidance of a Manipulator in Between Obstacles, Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, **97**-3, 836/842 (1975)
- 4) O. Khatib and J. F. Le Maitre: Dynamic Control of Manipulators Operating in a Complex Environment, On Theory and Practice of Robots and Manipulators, 3rd CISM-IFTOMM Symposium, 267/282 (1978)
- 5) 花房, 吉川, 中村: 冗長性を有する多関節形ロボットの制御-II, 第22回自動制御連合講演会, 321/322 (1979)
- 6) F. M. Kulakov: Organization of Supervisory Control of Robots-Manipulators. II, Engineering Cybernetics, **14**-6, 59/70 (1976)
- 7) 工藤, 高田, 佐々木: 人工の手の経路決定のためのアルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, **11**-4, 405/410 (1975)
- 8) S. M. Udupa: Collision Detection and Avoidance in Computer Controlled Manipulators, 5th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, 737/748 (1977)
- 9) T. Lozano-Pérez: Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-11**-10, 681/698 (1981)
- 10) T. Lozano-Pérez and M. A. Wesley: An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles, Commun. ACM, **22**-10, 560/570 (1979)
- 11) J. W. Boyse: Interference Detection Among Solids and Surfaces, Commun. ACM, **22**-1, 3/9 (1979)
- 12) J. Denavit and R. S. Hartenberg: A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, **22**-2, 215/221 (1955)