Configuration 空間における障害物記述 に関する考察

原 功* 長 田 正*

Describing Moving Obstacles in a Configuration Space

Isao HARA Tadashi NAGATA

For motion planning of a manipulator, the use of a configuration space is highly efficient. Algorithms of the collision-free planning in static environments have been proposed in many papers. The efficiency of the algorithms depends on the description of obstacles in a configuration space. In general, the complexity of a configuration space map exponentially increases with the number of joints. Therefore, building the configuration space map is a time-consuming process, and the collision-free path can not be searched in real time. In this paper, we illustrate mathematical properties of a new kind of configuration space and propose an approach to parameterizing an obstacle in the configuration space. A spherical obstacle in a work space is transformed into a characteristic subspace in the configuration space. Therefore, we can approximate parameters of a sphere as a set of geometric entities. The transformation of a complex work space into the configuration space is described in terms of integrating the transformation of each element of a set of spheres. A collision-free path in a dynamic environment is found by using a Penalty-Function-Method. The Penalty-Function is modified according to the factors of the velocity along axes in a polar coordinates system.

Key Words : Configuration space map, Collision avoidance, Penalty-Function, Moving obstacles, Geometric objects

1. ま え が き

さまざまな環境下でロボットに作業を行なわせる場合、そのロボットには多くの能力が要求される。特に、複数のロボットが協調して作業を行なうような環境、すなわち移動体が存在するような場合には、作業の障害となる物体を回避する能力もより高度なものとなる。現在まで、障害物回避動作計画に関し Configuration 空間（マニピュレータでは関節角空間）を利用した研究が数多くなされてきたが^{5)~11)}、その多くは静止障害物を対象としたものであり、移動障害物に関する研究は少ない。一般に、障害物回避動作計画の効率は Configuration 空間地図に

依存し、その地図の大きさはロボットの関節の数に対して指数関数的に増大するために、その生成には非常に多くの計算と記憶領域を必要とする。静止障害物を対象とした衝突回避動作計画を移動障害物に対して用いるためには、実時間による Configuration 空間地図の算出と衝突回避経路を効率良く探索するための地図が必要である。これに対し、Lozano-Pérez ら¹²⁾は素立体の Configuration 空間を用いた並列アルゴリズムを提案し、高速化を行なっている。また、Branicky ら¹³⁾は直線に対する Configuration 空間をデータベースに予め記述することにより、Configuration 空間地図の算出の高速化を行なっている。しかしながらこれらの方法は、Configuration 空間地図の表記法としてビットマップ形式を用いているため、依然として多くの記憶領域を必要としており実時

原稿受付 1992 年 4 月 16 日

* 九州大学工学部

間による衝突回避経路の探索は難しい。そのため、移動障害物に関する動作計画にそのまま利用することはできない。

ロボットの障害物回避計画において、静止物体に対する衝突回避動作計画は、実時間性よりも作業の効率を優先させなければならない。そのため、その自由度を全て考慮し動作計画を行なう必要がある。しかしながら、3次元空間内の移動体に対する衝突回避動作を考えるとき、回避動作の効率よりむしろ実時間性と安全性を優先させるべきである。そのためには、ロボットの自由度全て考慮する必要はないと思われる。そこで我々は移動体に対する衝突回避動作計画に対しロボットの3つの自由度のみを考慮し、Configuration空間内の障害領域を幾何モデルを用いてパラメータ化することで、Configuration空間地図の簡素化とその導出の高速化を図り、衝突回避経路の解析的な探索を試みた。

本報告では、まず3リンク3関節の Skeleton ロボットに対する球形障害物の Configuration 空間内のパラメータ化に関する方法について述べる。つぎに、実空間における障害物の移動に対する Configuration 空間の振舞いを明らかにする。さらに、Configuration 空間内に障害物の移動による補正を行なったポテンシャル場を構築し、それを用いた移動障害物に対する回避動作経路探索について考察する。最後に、2腕のマニピュレータの衝突回避動作計画について本手法を適用し、その有効性を確認する。

2. Configuration 空間の解析

3次元 Configuration 空間を解析するために、まず最初に2リンク平面ロボットについて解析し、次に3次元 Configuration 空間への拡張を試みる。

2.1 2次元 Configuration 空間

いま、Fig. 1 に示されるような2リンク2回転関節を

Fig. 1 A two-link plane robot and a circular obstacle

持つ平面ロボットを考える。このロボットの状態は2つの関節角 θ_2, θ_3 で決定される。いま、中心 (R, ϕ) 、半径 r の円 C を考える。ここで、 R, ϕ は、極座標系におけるパラメータである。平面ロボットと円 C の衝突に対する状態は、① l_2 が C と衝突する状態と② l_3 が C と衝突する状態がある。①の衝突に対する状態値は、任意のパラメータ $t \in [-1, 1]$ を用いて

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \phi + t \cdot \text{Angle}(R, l_2, r) \quad (1)$$

と表される。ここで、関数 Angle は

$$\text{Angle}(a, l, r) = \begin{cases} \sin^{-1}\left(\frac{r}{a}\right) & r \leq a \leq \sqrt{l^2 + r^2} \\ \cos^{-1}\left(\frac{l^2 + a^2 - r^2}{2la}\right) & \sqrt{l^2 + r^2} \leq a \leq l + r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である。また、②の衝突に対する状態方程式は、任意のパラメータ $s \in [r, l_3 + r]$ 、 $t \in [-1, 1]$ を用いて

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \frac{\pi}{2} - \phi - \text{elbow} \cos^{-1}\left(\frac{l_2^2 + R^2 - s^2}{2l_2 R}\right) \\ &= \frac{\pi}{2} - \phi + f(s, R) \\ \theta_3 &= \text{elbow} \cos^{-1}\left(\frac{R^2 - l_2^2 - s^2}{2l_2 s}\right) \\ &\quad + t \cdot \text{Angle}(s, l_3, r) \\ &= g(s, R) + t \cdot \text{Angle}(s, l_3, r) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ただし、 elbow は r と l_2 の相対位置により決定され、 $+1$ または -1 の値をとる。これらの式に現れる ϕ は、 θ_2 に対するオフセットであり、円障害物に対する Configuration 空間領域の形状は、 R と r により決定される。すなわち、Configuration 空間の障害領域 CO_{2dim} は、

$$CO_{2dim} = CO_{2dim1} \cup CO_{2dim2} \quad (3)$$

となる。ここで、 CO_{2dim1} 、 CO_{2dim2} はそれぞれ $\theta_2 = (\pi/2) - \phi$ を中心軸に持つ矩形領域（①の衝突による領域）と

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \phi + f(s, R) \quad (4)$$

$$\theta_3 = g(s, R)$$

を中心軸とする領域（②の衝突による領域）である。

Fig. 2 に②の衝突に対する中心軸を示す。

2.2 球障害物に対する3次元 Configuration 空間

次に Fig. 3 のような3リンク3関節の Skeleton ロボットと球形の障害物を考える。また、

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3 \in [-\pi, \pi] \quad (5)$$

とする。障害物の位置は Fig. 3 に示されているように第2関節 (Shoulder Joint) を原点とする座標 $O'-X'Y'Z'$ の極座標系のパラメータ (R, θ, ϕ) により与えられるも

Fig. 2 The central axes of circular obstacles, located at \$(R,0)\$, in a configuration space

Fig. 3 A three-link 3-R skeleton-robot and a spherical obstacle

のとする。ここで、デカルト座標空間から極座標空間への各パラメータの変換は次式により行なわれる。

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z - l_1)^2} \\ \theta &= \text{atan2}(y, x) \\ \phi &= \text{atan2}(z - l_1, \sqrt{x^2 + y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3次元実空間においてロボットと球形障害物との衝突は、各リンクを含む平面 \$F_{\theta_i}\$ (リンク平面と呼ぶ) 内で起こる。平面 \$F_{\theta_i}\$ は、\$xz\$ 平面を \$z\$ 軸のまわりに \$\theta_i\$ だけ回転させた平面である。この平面 \$F_{\theta_i}\$ と中心 \$(R, \theta, \phi)\$、半径 \$r_0\$ の球形障害物が交差する領域は、中心 \$(R, \phi)\$、半径 \$r\$ なる円となる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 \sqrt{1 + \cos^2 \phi_0 \sin^2 (\theta_1 - \theta_0)} \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_0}{\cos (\theta_1 - \theta_0)} \right) \\ r &= \sqrt{r_0^2 - R_0^2 \cos^2 \phi_0 \sin^2 (\theta_1 - \theta_0)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Fig. 4 Examples of a configuration space map for a spherical obstacle (the radius of a sphere \$r=8\$, and the center of the sphere located at \$(R,0,0)\$, where (a) \$R=10\$, (b) \$R=25\$, (c) \$R=35\$, (d) \$R=50\$)

である。したがって、球形障害物に対する3次元 Configuration 空間への変換は2次元 Configuration 空間の変換へ帰着でき、その領域 \$CO_{3dim}\$ は

$$CO_{3dim} = \bigcup_{-1 \leq t \leq 1} CO_{2dim} |_{\theta_1 = \theta_0 + t \cdot \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{R_0 \cos \phi_0} \right)} \quad (8)$$

となる。ここで、\$\theta_0\$ はこの障害領域に対するオフセットとなり、\$CO_{3dim}\$ の形状 \$\theta_0\$ に依存しない。また、その形状は \$\theta_0\$ に関して対称となる。Fig. 4 に球障害物に対する3次元 Configuration 空間の障害領域の例を示す。

3. Configuration 空間のパラメータ化

3.1 素立体

前章で示された球形障害物に対する Configuration 空間内の障害領域 \$CO_{3dim}\$ は、一般に複雑な領域となる。そのため、障害領域の記述量は膨大となり、動作経路と障害領域の干渉を導出するのは困難である。そこで、記述を簡素化するために、幾何モデルを用いて Configuration 空間内の障害領域を近似し、球障害物に対するパラメータの記述を行なう。

ここでは近似のための素立体として Fig. 5 に示されたような \$\theta_1\$-\$\theta_2\$ 平面に垂直な柱体 \$CO_{pole}\$ と底面が \$\theta_1\$-\$\theta_3\$ 平面と平行な \$n\$ 個の楕円筒 \$CO_{cyl_i}\$ を選ぶ。このような近似を行なうと、1つの球障害物に対する Configuration 空間内の障害領域は、\$4 + 10 \times n\$ (\$2 \leq n\$) 個のパラメータで記述されることになる。すなわち、\$CO_{pole}\$ に対して、導線の方程式の係数、およびその中心位置 \$(\theta_{1_0}, \theta_{2_0})\$、\$CO_{cyl_i}\$ に対して、各底面の中心位置 \$(O_{top}, O_{bottom})\$、上底面、下底面の半径 \$(a_{top}, b_{top}, a_{bottom}, b_{bottom})\$、である。

Fig. 5 An approximation of a sphere located at (25, 0, 0) in a 3-D configuration space

これらのパラメータは実空間における球形障害物の位置 (R_o, θ_o, ϕ_o) 、及びその半径 r により決定される。次に、①、②の衝突 (2.1 節参照) に対するパラメータの記述について述べる。

3.2 ①の衝突に対するパラメータ

①の衝突に対する障害領域 CO_{3dim_1} は、式 (8) より

$$CO_{3dim_1} = \bigcup_{-1 \leq t \leq 1} CO_{2dim_1} | \theta_1 = \theta_o + t \cdot \sin^{-1} \left(\frac{r_o}{R_o \cos \phi_o} \right) \quad (9)$$

となる。この領域は、底面 C_{bottom} 、高さ $h = \infty$ の柱体となる。ここで、 C_{bottom} は、式 (1)、式 (7) より

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\cos \theta_1} \right) \pm \sin^{-1} \left(\sqrt{1 - \frac{1-x^2}{1 - \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \theta_1}} \right) \quad (10)$$

である。ここでは、この障害領域を導線 C_{lead} 、母線 $\vec{l} = (0, 0, 1)$ の柱面で近似する。式 (10) より障害領域 CO_{3dim_1} の導線 C_{bottom} は次のような性質を持つ。

- $\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_o}{\cos \theta_1} \right)$ 、 $\theta_1 = \theta_{1o}$ をそれぞれ対称軸として持つ。
- 障害領域の対称軸から導線までの距離 D は、 $D = \sin^{-1} \left(\sqrt{1 - \frac{1-x^2}{1 - \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \theta_1}} \right)$ である。
- θ_1 のとりうる範囲は、 $|\theta_1 - \theta_{1o}| \leq \sin^{-1} \left(\frac{x}{\cos \phi_o} \right)$ である。
- 障害領域は $x (=r/R)$ の値の増加にともない矩形に領域に近づいていく。

したがって、近似障害領域の導線 C_{lead} の対称軸を多項式で近似し、障害領域の幅を真の障害領域を包含するように次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= A(x) \cdot D(x, \phi) \cdot \cos \theta \\ \theta_2 &= \frac{\pi}{2} - \phi - C'(\phi, \theta_1) + A(x) \cdot \sin^{-1} x \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ただし、 θ は任意のパラメータであり、 $x = r_o/R_o$ 、関数 $A(x)$ 、 $C'(\phi, \theta_1)$ 、 $D(x, \phi)$ は、

$$\begin{aligned} A(x) &= 1.02 + 0.4x^4 \\ C'(\phi, \theta_1) &= \frac{1}{4} \sin(2\phi) \cdot \theta_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{48} (6 \cos^2 \phi - 1) \sin(2\phi) \cdot \theta_1^4 \\ D(x, \phi) &= \begin{cases} \sin^{-1} \left(\frac{x}{\cos \phi} \right) & \left| \frac{x}{\cos \phi} \right| \leq 1 \\ \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{x^2 - \cos^2 \phi}}{\sin \phi} \right)}{\sin^{-1} x} \right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

である。この近似式において、 $A(x)$ は障害領域の変化にともなう補正項である。

3.3 ②の衝突に対するパラメータ

②の衝突に対する障害領域 CO_{3dim_2} は、式 (7) より

$$CO_{3dim_2} = \bigcup_{-1 \leq t \leq 1} CO_{2dim_2} (\theta_o + t \cdot \sin^{-1} \left(\frac{r_o}{R_o \cos \phi_o} \right)) \quad (12)$$

となる。

この衝突に対する障害領域は、式 (5) で表される曲線に関して対称となる。そこでこの領域を n 個の楕円筒 CO_{cyl_i} により近似する。すなわち

$$CO_{3dim_2} \subseteq \bigcup_{i=1}^n CO_{cyl_i} \quad (13)$$

とする。ここで、 CO_{cyl_i} の中心軸 $\vec{O}_{top} \vec{O}_{bottom}$ は式 (5) の曲線の中心から曲線と中心軸の距離が閾値 Δ を越えないように分割点を逐次決定する。また、この中心軸は平面 F_{θ_o} 内に存在し、各底面は $\theta_1 - \theta_3$ 平面に平行である。近似するための楕円筒の数 n は、閾値 Δ によって決定され、ロボットの動作精度と姿勢点の位置に応じて決定される。Fig. 6 に近似された Configuration 空間地図を示す。

3.4 他のロボットの Configuration 空間

前節まで述べた近似障害領域は、第 2、第 3 リンクが同一平面上にあるようなマニピュレータについて考察してきた。しかし、Puma 型のように各リンクが同一平面上に存在しないマニピュレータもある。このようなマニピュレータでは、第 2、第 3 関節をそれぞれ含むような 2 つのリンク平面を考えることで、2 次元に関する Configuration 空間の変換を用いて 3 次元空間に関する Configuration 空間を導出することができる。これは、①と②の衝突に対する Configuration の中心軸がずれることを意味し、その方向ベクトルが、 θ_1 方向に傾くこと

Fig. 6 A configuration space map approximated for a spherical obstacle (the radius of a sphere $r=8$, and the position of a sphere is $(30,0,0)$, (a) view 90, 90 (b) view 60, 30

になる。そのため、①の母線ベクトル $\vec{l}$ に対するパラメータを増やす必要がある。

4. 障害物回避計画

4.1 静止障害物に対する経路

まず、前章で定義した近似障害領域を用いて静止障害物に対する衝突回避経路計画を行なう。

Step 1 環境中の障害物をそれを包含するような複数の球で近似し、前述のパラメータ記述を用いて Configuration 空間地図 $M(= \cup_i CO_{approx_i})$ を作成する。

Step 2 Configuration 空間における始点 S と終点 T を結ぶ線分 $\overline{ST}$ を初期経路 l とする。

Step 3 初期経路 l とそれぞれの近似障害領域 CO_{approx_i} と交差する点 P_i をそれぞれ算出し、それらの点 P_i の中で他の障害領域の内部に存在しない点列 P_{pass} を求める。

Step 4 $P_{pass} \ni P_j, P_{j+1}$ ($j=1, 2, 3, \dots$) を通る平面 F_j を考え、 F_j と M との交差する領域が最小になるように F_j を決定する。

Step 5 平面 F_j を内で P_j, P_{j+1} を通り障害領域 CO_{approx_i} を回避する直線経路を回避経路とする。回避する経路が存在せず、かつ近似精度が閾値

Δ 以下の場合、近似の精度を上げ Step 3 から Step 5 までを繰り返す。その他の場合、回避不可能となり終端させる。

4.2 実空間の移動に対する Configuration 空間

障害物がある速度 $\vec{v}=(v_R, v_\theta, v_\phi)$ で移動しているとき、その障害物に対する関節角空間内の領域は、各々の速度の成分に対し次のような変化をする。ここで、実空間における速度 $\vec{v}$ は極座標系で表現されている。

・ $\vec{\theta}$ 方向の移動による変化

障害物が $\vec{\theta}$ 方向に $\Delta\theta$ だけ移動したとき、関節角 θ_1 を $\Delta\theta$ だけ回転させると移動前と同様な衝突が得られる。すなわち、関節角空間内の障害領域が、 θ_1 軸の方向に $\Delta\theta$ だけ移動したことを表す。したがって

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = v_\theta \quad (14)$$

となる。

・ $\vec{\phi}$ 方向の移動による変化

障害物が $\vec{\phi}$ 方向に $\Delta\phi$ だけ移動したとき、同一リンク平面内では関節角 θ_2 を $\Delta\phi$ だけ回転させると移動前と同様な衝突が得られる。すなわち、関節角空間内の障害領域が、 θ_2 軸の方向に $\Delta\phi$ だけ移動したことを表している。しかしながら、 ϕ 方向の移動により、リンク 1 の方向ベクトルと球の中心との距離 $d=R\cos\phi$ は小さくなるため、Configuration 空間内の障害領域は θ_1 方向へ広がる。したがって

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{d\phi}{dt} = v_\phi \\ \frac{da_i}{dt} &= F_0(d\phi/dt) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

となる。

・ $\vec{R}$ 方向の移動による変化

障害物が $\vec{R}$ 方向に ΔR だけ移動したとき、その衝突の中心は変化せず、その範囲のみが変化することになる。すなわち、障害領域がその中心位置を変えずその位置で領域の大きさのみが変化することになる。近似障害領域では、その径が ΔR に応じて変化する。したがって、 $\vec{R}$ の方向に対して

$$\left. \begin{aligned} \frac{da_i}{dt} &= F_1(dR/dt) \\ \frac{db_i}{dt} &= F_2(dR/dt) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

となる。

すなわち、Configuration 空間内の障害領域 CO_{3dim} は、実空間の速度 $\vec{v}$ に対して

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= v_\theta \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= v_\phi \\ \frac{da_i}{dt} &= F(v_\phi, v_R) \\ \frac{db_i}{dt} &= G(v_R) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

のような運動または変化をする。

4.3 移動体に対する経路計画

パラメータ記述された障害領域と障害物の移動による影響を考慮し、障害物回避計画を行う。移動体が存在するような可変環境では、その障害物回避経路を一意に決定することはできない。そこで、回避経路を求めるために、比較決定法を用いる¹⁸⁾。これは、現在の姿勢点 $P_{current}$ の周囲の複数の点におけるポテンシャル値を求め、その中でポテンシャル値が最も低い点を次の姿勢点として逐次決定し、移動経路を生成する方法である。各姿勢点におけるポテンシャル値 Φ は、吸引ポテンシャル(attractive potential) と反発ポテンシャル(repulsive potential) の和

$$\Phi = \Phi_{attraction} + \Phi_{repulsion}$$

として算出される。 $\Phi_{attraction}$ と $\Phi_{repulsion}$ は、それぞれ吸引、反発ポテンシャルである。

ポテンシャル法を用いる場合、その経路探索には停留点問題が生じる。この問題を回避するために、まず静止障害物に対する経路 l を求め、経路の中継点(前述の点列 P_{pass}) をサブゴールとして逐次経路を決定する。

4.3.1 吸引ポテンシャル

Configuration 空間内で各姿勢点 P_i における目標点 P_{goal} からの吸引力を等しくするために、吸引ポテンシャル $\Phi_{attraction}$ を、姿勢点の移動方向と目標方向の関係によって決定する。すなわち、

$$\Phi_{attraction} = -k_{attraction} \cos \theta_a$$

とする。ただし、 θ_a は、移動候補の方向と目標点への方向のなす角である。

4.3.2 反発ポテンシャル

4.2 節で示されたように Configuration 空間内では障害物の移動は θ_1, θ_2 方向のみで起こり、 θ_3 方向には拡大(または縮小)のみの変化が起こる。そこで、反発ポテンシャル $\Phi_{repulsion}$ を次のように定義する。

$$\Phi_{repulsion} = \left(1 - k_{move} \|\vec{v}\| - k_R \frac{dR}{dt}\right) \cdot \left(-\frac{k_{repulsion}}{D^2}\right)$$

ここで、 $\vec{v}' = (v_\theta, v_\phi)$ は近似障害物 CO_{approx_i} の現在の姿勢点 $P_{current}$ に対する相対速度であり、 D は、 $P_{current}$ と CO_{approx_i} との最短距離である。また、 k_{move}, k_R は、移動速度に対する補正パラメータである。

5. シミュレーション及び考察

5.1 シミュレーション

上述したポテンシャルを利用して、2つのマニピュレータ間の衝突回避計画を行なう。一方のマニピュレータのみ回避運動を行うものとし(Avoidance と呼ぶ)、障害となるマニピュレータ(Obstacle と呼ぶ)は、各リンクを5つの球で置き換える。それぞれのマニピュレータのリンクの長さを30、幅を5とし、それぞれの動作開始点、終了点を Table 1 のようにする。

回避側のマニピュレータは、障害物の移動速度を実時間で知ることができるものとする。パラメータ $k_{attraction}, k_{repulsion}, k_{move}, k_R$ を Table 2 のように設定した時のシミュレーション結果を Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 に示す。

5.2 考 察

Configuration 空間の生成及び経路探索のプログラムは、Sun 4 (Sparc Station 1) 上にインプリメントされ

Table 1 Start and goal positions of each of end-effectors

	Start position	Goal position
Avoidance	(50,-30,30)	(50,30,30)
Obstacle	(40,20,30)	(40,-20,30)

Table 2 Parameters fo Penalty-Functions

	$k_{attraction}$	$k_{repulsion}$	k_{move}	k_R
Case 1	500	10	1	0.05
Case 2	500	50	1	0.05
Case 3	500	10	10	0.05

Fig. 7 The result of a simulation experiment (Case 1)

Fig. 8 The result of a simulation experiment (Case 2)

Fig. 9 The result of a simulation experiment (Case 3)

ている。Case 1, Case 2, Case 3 のそれぞれの経路探索に要した時間は、約 1 [min] であった。またシミュレーション結果より、 k_{move} を変化させることにより、回避動作の開始を変化させることができる。また、 $k_{repulsion}$ を変化させることにより、回避動作の大きさを規定できることがわかる。すなわち、パラメータ k_{move} , k_R は、障害物の移動速度に対する回避動作の感度を表し、パラメータ $k_{repulsion}$ は安全度を表している。

6. おわりに

我々は、実空間における球形障害物に対する Configuration 空間内の障害領域を、幾何モデルを用いることでパラメータ化することを試みた。その結果、Configuration 空間地図の容量を大幅に減少させることができ、衝突回避動作計画を解析的に導出することができた。また、実空間における障害物の移動に対する Configuration 空間の変化を明らかにし、Configuration 空間内に

構築されたポテンシャル場に移動体の運動による補正を加え、移動障害物を対象とした衝突回避動作計画を行なった。シミュレーションの結果、移動障害物に対する障害物回避動作では、粗い近似を行なってもポテンシャル導出のパラメータを適当に変化させることにより、十分なパフォーマンスが得られることが明らかとなった。今後の課題としては、衝突回避動作を規定するポテンシャル導出のための各パラメータの学習による最適化が考えられる。

参考文献

- 1) 長田, 原, 吉沢. "マニピュレータの関節角空間を用いた球形障害物との衝突回避". 第 8 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 175-176, 1989.
- 2) 長田, 吉沢, 吉岡. "球形障害物に対するマニピュレータの衝突回避". 第 29 回 計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 277-278, 1990.
- 3) 長田, 吉沢. "状態空間の近似によるマニピュレータの移動障害物回避計画". 第 9 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 235-236, 1990.
- 4) I. Hara and T. Nagata. "Describing Moving Spherical Obstacle in a Configuration Space", Proc. of IROS '91, pp. 589-594, Osaka, 1991.
- 5) T. Lozano-Pérez and M. A. Wesley. "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles". In Communications of the ACM, Vol. 22(10), pp. 560-570, Oct. 1979.
- 6) T. Lozano-Pérez. A Simple Motion-Planning Algorithm for General Robot Manipulators. IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, pp. 224-238, June 1987.
- 7) T. Lozano-Pérez. "Spatial planning: a configuration space approach". In IEEE Transactions on Computers, Vol. C-32(2), pp. 108-120, Feb. 1983.
- 8) T. Lozano-Pérez. "Automatic planning of manipulator transfer movements". IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11(10), pp. 681-698, Oct. 1981.
- 9) W. Mayer and P. Bendict. "Path planning and the geometry of joint space obstacles". In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 215-219, Apr. 1988.
- 10) W. E. Red and H. Truong-Cao. "Configuration maps for robot path planning in two dimensions". Trans. of the ASME, Vol. 107, pp. 292-298, Dec. 1985.
- 11) J. R. Dooley and J. M. McCarthy. "Parameterized description of joint space obstacles for a 5R closed chain robot". In Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1536-1541, 1990.
- 12) T. Lozano-Pérez and P. A. O'Donnell. "Parallel Robot Motion Planning". In Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1000-1007, 1991.
- 13) M. S. Branicky and W. S. Newman. "Rapid Computation of Configuration Space Obstacles". In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 304-310, 1990.

- 14) O. Khatib and J. F. LeMaitre. "Dynamic Control of Manipulators Operating in a Complex Environment". In 3rd CISM IFTOMM Sympo., pp. 267-282, 1978.
- 15) O. Khatib. "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots". In Int. Conf. Robotics and Automat., pp. 500-505, 1984.
- 16) O. Khatib. "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots". Int. J. Robotics Res., Vol. 5, No. 1, pp. 90-98, 1986.
- 17) 和住, 登尾, 有本. "なめらかに 目標点に 到達する経路 計画アルゴリズム". 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 371-374, 1989.
- 18) 奥富, 森. "ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定". 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 66-72, Otc. 1983.

原 功 (Isao HARA)

1965 年 5 月 20 日生. 1988 年九州大学工学部電気工学科卒業. 1990 年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了. 現在同大学院博士後期課程在学中. 組立作業プランニングおよびマニピュレータの動作計画に関する研究に従事. 計測自動制御学会の会員.
(日本ロボット学会学生会員)

長田 正 (Tadashi NAGATA)

1935 年 10 月 15 日生. 1956 年九州大学工学部電気工学科卒業. 1959 年九州大学大学院工学研究科博士課程中退. 同年工業技術院電気試験所(現電子技術総合研究所)入所. 1980 年九州大学工学部教授. 現在情報工学科勤務. 知能ロボットの研究に従事. 情報処理学会, 計測自動制御学会, 人工知能学会等の会員.
(日本ロボット学会正会員)