学術論文

形状空間における平面超冗長マニピュレータの障害物回避手法

馬 書 根*¹ 紺 野 元 嗣*²

An Obstacle Avoidance Scheme for Planar Hyper-Redundant Manipulators

Shugen Ma*¹ and Mototsugu Konno*²

Hyper-redundant manipulator has a very large or infinite degrees of kinematic redundancy, thus possesses some unconventional features such as the ability to enter a narrow space while avoiding obstacles. In this paper, we propose a new technique for a planar hyper-redundant manipulator to avoid the existing static obstacles in environment while performing a payload-location task from point to point. It is based on analysis in the defined posture space, where three parameters were used to determine the hyper-redundant manipulator configuration. The scheme is verified by computer simulation in case of using the model of the developed Hyper-R Arm. It shows that our method works perfect and the obstacles are well avoided globally.

Key Words: Hyper-redundant Manipulator, Real-time Posture Control, Posture Space, Obstacle Avoidance Control, Cell Decomposition

1. ま え が き

本論文では、多数の自由度を有する平面超冗長ロボット・マニピュレータのための障害物回避手法を提案し、計算機シミュレーションを用いてその有効性を検討する。

象の鼻のような多数の自由度を有する超冗長ロボット・マニピュレータは、その冗長な自由度を利用してアーム全体の姿勢も制御できるため、障害物を回避しやすく、アーム全体の運動性能を改善しやすいなどの特異な機能を持っている。このようなロボット・マニピュレータは、原子炉内や化学プラント内など機器が錯綜する複雑な環境での検査・点検作業や、高速道路点検メンテナンス作業などにおいて有効である。

しかし、超冗長ロボット・マニピュレータを実現しようとする場合、いくつかの大きな技術的問題点が残されている。その一つは、通常の設計においてマニピュレータ本体の重量が過大になってしまい可搬荷重が極端に小さくなってしまいうことである（以後、重量問題と呼ぶ）。もう一つの問題点は超冗長自由度に対する実時間制御の困難さである。重量問題を解決するため、ワイヤ干渉駆動型平面マニピュレータ機構が提案されている[1]。この機構では、アクチュエータを基台部に設置することでマニピュレータ本体を軽量化しており、さらにワイヤ間の干渉駆動効果により大きな可搬荷重を出している。また超冗長

自由度の制御問題を解決するため、運動学的冗長性を分解する超冗長マニピュレータの姿勢制御手法が提案されている[3][6]。この制御手法では、超冗長マニピュレータ・アームを連続曲線とみなしその先端位置を制御することで、超冗長マニピュレータの姿勢を実時間的に決定でき実時間制御を可能にしている。筆者らはこのようなワイヤ干渉駆動機構と姿勢制御法を用いて、“Hyper-R Arm”と呼ぶ平面超冗長ロボット・マニピュレータの開発を行っている[3]。

本論文では、平面超冗長マニピュレータが静的環境で作業する場合、作業空間にある障害物を実時間で回避できる手法を提案する。本手法は、筆者らによって提案されている超冗長マニピュレータの姿勢制御法[3][6]をベースとし、後に定義される「形状空間」において障害物回避軌道を生成して、障害物の回避制御を行う。従来の手法と比較すると、本手法は静的な環境において、平面超冗長マニピュレータの実時間制御が可能であるという利点を有する。そして本障害物回避手法の有効性を、現在開発中のHyper-R Armをモデルとした計算機シミュレーションで検証する。

2. 超冗長マニピュレータの機構と制御法

本章では、“Hyper-R Arm”と呼ばれる小型平面超冗長ロボット・マニピュレータの機構およびそのための実時間姿勢制御法を紹介する。

2.1 超冗長マニピュレータの機構

Fig. 1 に示す Hyper-R Arm は 10 自由度を有する小型平面超冗長多関節マニピュレータであり、基台部に設置される 20 個

原稿受付 1996 年 8 月 5 日

*¹茨城大学工学部

*²茨城大学大学院

*¹Faculty of Engineering, Ibaraki University

*²Graduate School, Ibaraki University

Fig. 1 Model of a hyper-redundant manipulator: Hyper-R Arm

のアクチュエータがワイヤを通じて各関節を干涉駆動している。この機構では、あるリンク i を回転させるための一対のワイヤは、リンク i に固着されたプーリにその一端を固定され、関節 $i-1 \sim 1$ に回転自在に軸付けされたプーリに互いを逆向きに巻架して、土台部に至る。この機構は、ワイヤ $2i-1$ を引張して関節 i にトルク τ_i を発生させると、干涉駆動の効果で関節 $i-1 \sim 1$ においても同一トルク τ_i が発生する（同じプーリ半径の場合）。このことから、各関節において発生したトルクを積極的に干渉させ合って、必要とするワイヤ張力を小さくすることができる。

試作した Hyper-R Arm の長さは 0.8[m]、その全質量は 4.047[kg] である。各関節に取り付けられるポテンショメータで関節角を、モータに取り付けられているタゴジェネレータで関節回転角速度を計測して、フィードバック制御系が構成されている。

試作した Hyper-R Arm について、基本機能実験を行った。その結果、以下に述べるような特徴が明らかになった。

- 可搬荷重：Hyper-R Arm の特徴の一つは干涉駆動効果によって生じる大きな可搬荷重性能である。
- 作業範囲：試作した 10 自由度 Hyper-R Arm は、その超冗長性を生かすことで、広範囲な作業点に到達でき、また障害物回避もしやすい。
- 可変コンプライアンスアーム機構：一つの関節を 2 個のモータで駆動する Hyper-R Arm は、アームのコンプライアンスをワイヤのバイアス力によって自由に調整でき、作業に応じて適切なコンプライアンスを設定することが可能である。

2.2 超冗長マニピュレータの姿勢制御法

冗長マニピュレータのための運動解析と動作計画方法としては、従来擬逆ヤコビ行列およびそのゼロ空間行列、または拡張ヤコビ行列法を基にしている [7]~[10]。しかし、これらの方法では、行列演算において多くの処理時間を要し、超冗長マニピュレータの実時間制御に利用することはできない。このような問題を解決するため、マニピュレータ・アームを連続曲線と見なして運動解析を行う超冗長マニピュレータの姿勢決定法が提案されている [2]~[6]。この制御法を現在開発中の Hyper-R Arm に適用した結果、平面超冗長マニピュレータの実時間制御が可能であることを確認した [3]。

連続曲線を用いた姿勢制御法は、超冗長マニピュレータのアーム形状を連続曲線とみなしたときの曲率関数 $\kappa(s)$ および振率 $\tau(s)$ (s : Hyper-R Arm に沿う曲線長) に基づいている。アーム形状として用いられている曲線は多数ある。しかし、議論を限定した二次元平面上の運動においては、アームの曲線長が一定でその先端座標を与えたときアームの姿勢を容易に求めることができることから、サーペノイド曲線 [4] がよく用いられる。サーペノイド曲線は、「曲率が曲線に沿って正弦波状に変化する曲線」と定義され、その曲率 $\kappa(s)$ を次のように

$$\kappa(s)^{\dagger} = \frac{2\pi}{\ell} a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{\ell} s\right) + \frac{2\pi}{\ell} a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\ell} s\right) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 a_1 , a_2 は係数であり、 ℓ はマニピュレータ・アームの全長である。この場合、曲線長 s における x 軸方向との傾斜角 $\alpha(s)$ 、およびアーム先端座標 $(x(\ell), y(\ell))$ は、

$$\begin{aligned} \alpha(s) &= \alpha_0 + \int_0^s \kappa(s) ds \\ &= \alpha_0 + a_1 \sin \frac{2\pi}{\ell} s - a_2 \cos \frac{2\pi}{\ell} s + a_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x(\ell) &= \int_0^{\ell} \cos(\alpha(s)) ds \\ &= \cos(\alpha_0 + a_2) J_0\left(\sqrt{a_1^2 + a_2^2}\right) \ell, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y(\ell) &= \int_0^{\ell} \sin(\alpha(s)) ds \\ &= \sin(\alpha_0 + a_2) J_0\left(\sqrt{a_1^2 + a_2^2}\right) \ell \end{aligned} \quad (4)$$

のように求められる。ただし、 α_0 はアームの根元における曲線の初期傾斜角、 $J_0(x)$ は次数 0 の Bessel 関数である [11]。

曲線（アーム）の先端座標が与えられるとき、それと初期傾斜角 α_0 から係数 a_1 , a_2 が求められ、アーム姿勢関数の曲率 $\kappa(s)$ が誘導される。つまり、その係数 a_1 , a_2 は、式 (3)(4) の逆解を求めることにより、

$$\begin{aligned} a_2 &= \tan^{-1}\left(\frac{y(\ell)}{x(\ell)}\right) - \alpha_0, \\ a_1 &= \left(\left[J_0^{-1}\left((x(\ell)^2 + y(\ell)^2)^{\frac{1}{2}}/\ell\right)\right]^2 - a_2^2\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

と得られる。ここでは、 $J_0^{-1}(x)$ は次数 0 の逆 Bessel 関数である [11]。得られたこれらの係数を式 (2) に代入することにより、傾斜角関数を求めることができる。このとき、平面超冗長マニピュレータの関節角度は、式 (2) から得られた傾斜角を用いて

$$\begin{aligned} q_1 &= \alpha\left(\frac{L}{2}\right) = a_1 \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) + a_2 \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)\right) + \alpha_0, \\ q_i &= \alpha\left(\left(i-1 + \frac{1}{2}\right)L\right) - \alpha\left(\left(i-1 - \frac{1}{2}\right)L\right) \\ &= a_1 \left[\sin\left(\frac{\pi}{N}(2i-1)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{N}(2i-3)\right)\right] \\ &\quad - a_2 \left[\cos\left(\frac{\pi}{N}(2i-1)\right) - \cos\left(\frac{\pi}{N}(2i-3)\right)\right], \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $i = 2, 3, \dots, N$

$^{\dagger} \kappa(s) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\ell} s + \phi\right); A = \frac{2\pi}{\ell} \sqrt{a_1^2 + a_2^2}, \phi = \tan^{-1} \frac{a_1}{a_2}$

のように求められる。ここで、 N は関節数、 $L(= \ell/N)$ はリンク長である。

式 (6) から分かるように、平面超冗長マニピュレータの姿勢は 3 変数 a_1, a_2, α_0 により決定される。つまり、サーベノイド曲線を用いて平面超冗長マニピュレータの姿勢を表す場合、その姿勢形状は 3 変数 a_1, a_2, α_0 により決定される。

本章で述べた姿勢制御法は簡単な式で構成されており、擬似逆ヤコビ行列を使用した従来の手法と比較すると、必要とする演算時間が著しく減少している [3]。結果として本手法は平面超冗長マニピュレータの実時間姿勢制御を可能にしている。

以下では、本姿勢制御法を基本とする形状空間 (Posture Space) を定義し、それを用いて障害物回避手法の提案を行う。

3. 形状空間における障害物回避

第 1 章で述べたように、超冗長ロボット・マニピュレータは、その冗長な自由度を利用してアーム全体の姿勢も制御でき、作業空間内に存在する障害物を回避しながら作業を行うことができる。

従来、非冗長マニピュレータの障害物回避計画については、障害物回避軌道 (OAT: Obstacle Avoidance Trajectory) を直接に作業空間 (Work space) で生成するもの [12]~[14] や関節空間 (Configuration space) で生成するもの [15] [16] など多く提案されている。作業空間 (Work space) における障害物回避軌道の生成問題では、人工ポテンシャル法 [13] が用いられている。この手法では、ゴールへの吸引力を発生するポテンシャル関数と障害物からの反発力を発生するポテンシャル関数の加重和を考え、最急勾配降下法などの極値探索法を適用することにより OAT の生成を行う。人工ポテンシャル法の欠点としては、反発力と吸引力が釣り合う点が存在すると、ゴールへ到達することができずにデッドロックに落ちてしまうことである。この問題を解決するため、時間挙動を調節可能な人工ポテンシャル法 [14] が提案されている。しかし人工ポテンシャル法を冗長マニピュレータに適用した場合、ゼロ空間ベクトルを用いて極値の探索を行うため擬似逆行列およびゼロ空間行列の計算に多く時間が費やされ、超冗長ロボット・マニピュレータの実時間制御には適用できない。また作業環境中の障害物とロボットが干渉しない動作 (運動) を計画するために、関節空間 (Configuration space) というモデルも提案されている [15] [16]。しかし、ロボットが多自由度 (特に超冗長ロボット・マニピュレータの場合) であり、障害物およびロボットの幾何学的な複雑さのため、関節空間は複雑となり、その正確な計算は現在の計算機では実現困難である。

従来の冗長マニピュレータの OAT の生成手法のほとんどは、作業空間における行列の解析 (擬似逆行列およびゼロ空間行列) をベースにしている [17]~[20]。実時間制御を考慮すると、これらの手法はそのまま超冗長マニピュレータの障害物回避制御に適用できない。超冗長マニピュレータのための作業空間における運動解析に基づく障害物回避手法が提案されている [5]。しかしこの手法では障害物回避軌道が自動的に生成されるのではなく、操縦者が入力するものになっている。そこで本論文では、後に定義する形状空間で運動解析を行い、新しい障害物回避手

法を提案する。

ここでまず、平面超冗長マニピュレータの実時間制御のための、“形状空間”を定義しておく。前章で述べたように、平面超冗長マニピュレータの姿勢形状は、3 変数 (a_1, a_2, α_0) により決定される (式 (6) を参照)。よって、平面超冗長マニピュレータの形状空間を次のように定義することができる。

定義: 平面超冗長マニピュレータのアーム姿勢をサーベノイド曲線と見なして制御される場合、作業空間におけるその姿勢を、アーム曲線形状パラメータ $\mathbf{a}$ (a_1, a_2, α_0) によって表すことができる。このとき、平面超冗長マニピュレータで実現可能な姿勢形状の集合を形状空間 (Posture Space) $\mathcal{A}$ と定義する。

形状空間での運動解析に基づいて、平面超冗長マニピュレータが作業空間にある静的障害物を回避するアルゴリズムは以下の手順になると考えられる。

- i) 平面超冗長マニピュレータの作業空間および作業空間にある障害物を形状空間 $\mathcal{A}$ にマッピングする；
- ii) 形状空間での運動解析を行い、障害物回避軌道 OAT を生成する；
- iii) 生成されたすべての OAT のなかから最短距離となるものを見つけ出す；
- iv) 静的障害物のある作業空間において障害物回避駆動制御を行う。

本論文で提案する手法のアルゴリズムは、平面超冗長マニピュレータの作業空間および作業空間にある障害物の形状空間へのマッピング処理と障害物回避軌道の生成・追従制御を別々にすることが可能であり、作業空間から形状空間へのマッピングを Off-line で行い、障害物回避軌道の生成・追従制御を On-line で行う。静的な環境において、On-line で作業空間から形状空間へのマッピングを実行する必要性がなく、時間のかかるこの処理を Off-line で行うことが可能である。このため、マッピングされた形状空間で演算時間のかからない障害物回避軌道の生成・追従制御を実時間で行うことができる。次に以上の手順を順に議論していく。

3.1 形状空間への障害物のマッピング

平面超冗長マニピュレータの形状空間 $\mathcal{A}$ は、マニピュレータのアーム姿勢を表す変数 a_1, a_2, α_0 で表されている。そこで、それぞれの変数が取りうる範囲 (これを可動範囲とする) において変数 a_1, a_2, α_0 を任意に変化させ、障害物と衝突するときの値を形状空間に記述することにより形状空間へ障害物のマッピングを行うことができる。

Fig. 2 に示す作業空間 (デカルト座標空間) 上の障害物を形状空間にマッピングしたものを **Fig. 3** に示している。Fig. 3 に示した障害物データは、セル化 (標本化) [21] [22] を行った後のものである。元の連続データをセル化することにより、OAT の生成が容易になる。本論文では、このセル化したデータを用いて形状空間中での OAT の生成を行う。

3.2 形状空間における障害物回避軌道生成アルゴリズム

三次元形状空間で OAT の生成は一般的に極めて難しい。ここではまず二次元形状空間 (平面) における障害物回避について議論し、それを三次元形状空間に拡張していく。

Fig. 2 A hyper-redundant manipulator in the workspace where the static obstacles exist

Fig. 3 Obstacles in the posture space, mapped from the obstacles in workspace shown in figure 2, and the obstacle avoidance trajectory in the posture space

Fig. 4 2-D obstacle avoidance trajectories in the case of two obstacles

3.2.1 二次元形状空間での障害物回避アルゴリズム

平面問題において、Fig. 4 に示すような障害物が形状空間に存在する場合、二次元形状空間における障害物回避軌道 OAT を生成するアルゴリズムを以下に示す。

- 1) 軌道始点 S (初期アーム姿勢) から軌道終点 E (終端アーム姿勢) までの直線を引き、障害物 i との交点 S'_i , E'_i ($i = 1, \dots, K$; K : 障害物の数) のすべてを見つけ出す;
- 2) それぞれの障害物において、 S'_i と E'_i を結ぶ二つの輪郭を求める;
- 3) おおのの部分軌道を連結 ($S - S'_1 - E'_1 - \dots - S'_K - E'_K - E$) し、 2^K 個の OAT を生成する;
- 4) 2^K 個の軌道から最短距離のものを一つ選択する。

3.2.2 三次元形状空間での障害物回避アルゴリズム

単純な形状の障害物である場合、二次元形状空間の場合と同じような OAT 生成アルゴリズムが使用可能である。しかし、

Fig. 5 3-D obstacle avoidance trajectories

障害物形状がいつも単純とは限らず、二次元形状空間における OAT 生成アルゴリズムがそのまま適用できない場合もある。ここでは、三次元形状空間での OAT を生成するアルゴリズムについて述べる。まず、三次元形状空間での始点 S の座標 (初期アーム姿勢を表す形状パラメータ) を $(a_1^s, a_2^s, \alpha_0^s)$ とし、終点 E (終端アーム姿勢を表す形状パラメータ) を $(a_1^e, a_2^e, \alpha_0^e)$ 、なお平面 α_{0p} における始点と終点の投影点 S_p, E_p の座標をそれぞれ $(a_{1p}^s, a_{2p}^s, \alpha_{0p}^s), (a_{1p}^e, a_{2p}^e, \alpha_{0p}^e)$ としておく。

- 1) 始点 S と終点 E を任意の平面 $\alpha_0 = \alpha_{0p}$ において投影し、おのおのの投影点 S_p, E_p を求める;
(投影点が障害物内部にあるならば、そこから一番近い障害物輪郭上の点を見つけ出し、それを投影点とみなす。)
- 2) 二次元形状空間での OAT 生成アルゴリズムを用いて、平面 $\alpha_0 = \alpha_{0p}$ における OAT を生成する;
- 3) 始点 S から S_p , E_p から終点 E へ直線的にスライドし、おのおのの間で OAT を生成する;
(この過程において OAT 点が障害物内部に入ってしまう場合は、一番近い障害物輪郭上の点を見つけ、シフトしていく。)
- 4) 得られた軌道をおのおのの連結し、三次元形状空間での OAT とする。

この三次元形状空間での OAT 生成アルゴリズムは、任意の平面 $\alpha_0 = \alpha_{0p}$ において二次元形状空間での OAT が存在する場合にのみ有効である。

3.3 障害物回避軌道の準最適化

前述のアルゴリズムで生成された形状空間での OAT は、部分的には障害物の輪郭に沿ったものであり、大きな意味で最短距離軌道とはいえない。そこで、以上で得られた OAT を擬似的に最適化[†]する方法を示す。

まず、Fig. 6 (a) のように OAT が得られているものと仮定する。このとき擬似最短 OAT は、障害物と接線で交わる障害物輪郭上の点を見つけ、軌道のおおのの部分 (接線および障害物の輪郭) を連結することにより容易に得ることができる。Fig. 6 (b) はその例を示している。また、この方法は、複雑な二

[†] 形状空間上の最適化軌道は、作業空間上の最短軌道でもなく、消費エネルギーを最小にしたものでもない。本論文で、静的な作業環境に存在する障害物を実時間で回避することを議論の中心においた。消費エネルギーを最小化する障害物回避制御などについては別報で論じる。

Fig. 6 Obstacle avoidance trajectories in the posture space

次元形状空間の場合だけでなく、三次元形状空間の場合においても使用可能である。

形状空間で OAT が得られた後、関節空間における OAT は式 (6) から簡単に生成することができ、作業空間における OAT も式 (3)(4) から容易に求められる。

4. 計算機シミュレーション

Fig. 1 に示した平面超冗長マニピュレータ Hyper-R Arm をモデルとして、提案した OAT 生成アルゴリズムによる計算機シミュレーションを行った。Fig. 2 に示したモデルの各リンク長は 0.08 [m] で、障害物は (0.3 [m], -0.1 [m]) と (0.4 [m], 0.2 [m]) を中心とする半径 0.05 [m] の二つの円盤である。

Fig. 3 は形状空間における障害物と障害物回避軌道 (OAT) を示している。ここでは、 $-2.0 < a_1, a_2 < 2.0$, $-1.571 [\text{rad}] < \alpha_0 < 1.571 [\text{rad}]$ の間において、 $\delta a_1 = \delta a_2 = 0.04$ と $\delta \alpha_0 = 0.087 [\text{rad}]$ の離散値でセル化した。また、障害物の形状を明確にするため、 $\alpha_0 = 0.0 [\text{rad}]$, $\alpha_0 = 0.698 [\text{rad}]$, $\alpha_0 = 0.785 [\text{rad}]$ の場合における (a_1, a_2) 平面データを Fig. 7 に示す。

Fig. 3 に示す軌道を実作業空間において実行すると、Fig. 8 (b) のようになる。比較のために、障害物回避アルゴリズムを使用しない場合のマニピュレータ姿勢の変化を Fig. 8 (a) に示す。結果として、本論文で提案した障害物回避アルゴリズムは静的な環境での障害物を確実に回避することができるということが分かる。

最後に、本論文の手法で障害物回避を行う過程において費やした計算時間を述べておく。NEC PC-9821Bp (486DX2-66 [MHz]) を用いた場合、障害物の作業空間から形状空間へのマッピングに約 15 分、その障害物データのセル化に約 5 分かかった。そして擬似最短化 OAT の生成は 0.36 秒であった。OAT を得た後、その軌道を追跡するマニピュレータの制御は約 0.21 秒で行うことができた。静的な環境において、障害物の形状空間へのマッピング、データのセル化は前もって Off-line で行い、平面超冗長マニピュレータの擬似最短化 OAT の生成と軌道追跡制御は On-line 制御で行うことから、実時間制御が可能である。このことは、筆者らが開発中の平面超冗長マニピュレータ実機モデル (Hyper-R Arm) に Fig. 8 (b) に示す障害物回避軌道を追跡させる実機実験からも確認されている。

Fig. 7 Examples of the obstacles on the some (a_1, a_2) planes

(a) Without obstacle avoidance scheme

(b) With obstacle avoidance scheme

Fig. 8 Resulted manipulator postures in workspace

5. 結論および今後の課題

本論文では、多数の自由度を有する平面超冗長ロボット・マニピュレータのための障害物回避手法を提案した。本手法は、筆者らによって提案されている超冗長マニピュレータの姿勢制御法に基づいて、新たに定義した「形状空間 (Posture Space)」での解析を行い、この空間内での障害物回避軌道を生成する。計算機シミュレーションを用いて、その有効性も確認した。本手法は、コストが安く計算能力も高くない計算機で構築された超冗長マニピュレータの制御システムのみにも有効である。しかし、本手法により実時間制御が可能であるが、超冗長マニピュレータのアームを連続曲線上に拘束した姿勢制御に基づいたためマニピュレータの可動範囲が減少している。さらに最適化に使用できる自由度も少なくなっている。更なる最適化と可動範囲を必要とする作業を実現する制御システムには、高価・高性能な計算機を利用し、行列などの計算を用いた最適化制御が有効であると思われる。

本論文において、平面超冗長ロボット・マニピュレータのみを限定し、障害物回避問題を論じた。しかし、本論文で検討した障害物回避手法は、Fig. 9 に示す平面超冗長ロボット・マニピュレータの実例的な応用例に対してそのまま応用でき、実用上重要である。なお、本論文では、平面超冗長マニピュレータが障害物を実時間で回避することを議論の中心においた。しか

(a) Maintenance robot for nuclear reactor

(b) Maintenance robot for highway and/or freeway

Fig. 9 Application examples of the 2D hyper-redundant manipulator

し第3章で述べた最短距離軌道はエネルギー消費などの観点から見ると必ずしも最適ではない場合がある。今後の課題としては、

- 三次元空間における超冗長ロボット・マニピュレータの障害物回避問題についての検討；
- 消費エネルギーなどを考慮する障害物回避手法の検討などがあげられる。

謝 辞

本論文に対して、日本語の校正をしていただいた茨城大学工学部システム工学科近藤久助手に感謝します。なお、本論文の一部は文部省科学研究費補助金 No.07750281 の援助を受けた。

参 考 文 献

- [1] S. Hirose and S. Ma: "Coupled tendon-driven multijoint manipulator," Proc. 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1268-1275, Sacramento, CA, 1991.
- [2] 馬, 広瀬, 横島: "多関節マニピュレータのための2自由度慣性モレイ駆動", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.3, pp.436-443, 1996.
- [3] 馬, 紺野, 吉瀬, 堤: "超冗長ロボット・マニピュレータの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集, vol.B, pp.760-763, 1995.
- [4] S. Hirose: "Biologically Inspired Robots," Oxford, Oxford University Press, 1993.
- [5] G.S. Chirikjian and J.W. Burdick: "An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators," Proc. 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, pp.625-631,

- Cincinnati, OH, 1990.
- [6] S. Ma, S. Hirose and H. Yoshinada: "Development of a hyper-redundant manipulator for maintenance of nuclear reactors," Int. J. of Advanced Robotics, vol.9, no.3, pp.281-300, 1995.
- [7] C.A. Klein and C.H. Huang: "Review of the pseudoinverse for control of kinematically redundant manipulators," IEEE Trans. on Syst., Man, Cyber., vol.13, no.2, pp.245-250, 1983.
- [8] T. Shamir and Y. Yomdin: "Repeatability of redundant manipulators: Mathematical solution of the problem," IEEE Trans. on Automatic Control, vol.33, no.11, pp.1004-1009, 1988.
- [9] A. Liegeois: "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multi-body mechanisms," IEEE Trans. on Syst., Man, Cyber., vol.7, no.12, pp.868-871, 1977.
- [10] J. Baillieul: "Kinematic programming alternatives for redundant manipulators," Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, St. Louis, MO, 1985.
- [11] I.N. Sneddon: "Special Functions of Mathematical — Physics and Chemistry," London: Oliver & Boyd, 1961.
- [12] 尾崎, 毛利, 高田: "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", 計測自動制御学会論文集, vol.18, no.9, pp.72-79, 1982.
- [13] O. Khatib: "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," Int. J. of Robotics Research, vol.5, no.1, pp.90-98, 1986.
- [14] 辻, Morasso, 重橋, 金子: "収束時間を調整可能な人工ポテンシャル法によるマニピュレータの動作計画", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.2, pp.285-290, 1995.
- [15] T. Lozano-Perez: "Spatial planning: A configuration space approach," IEEE Trans. on Computers, vol.32, no.2, pp.108-120, 1983.
- [16] T. Lozano-Perez: "A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.3, no.3, pp.224-238, 1987.
- [17] M. Kircanski and M. Vukobratovic: "Contribution to control of redundant robotic manipulators in an environment with obstacles," Int. J. of Robotics Research, vol.5, no.4, pp.112-123, 1986.
- [18] Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa: "Task-priority based on redundancy control of robot manipulators," Int. J. of Robotics Research, vol.6, no.2, pp.3-15, 1987.
- [19] H. Zghal, R.V. Dubey and J.A. Euler: "Collision avoidance of a multiple degree of redundancy manipulator operating through a window," ASME Trans. on Dyn. Syst., Meas. Control, vol.114, pp.717-720, 1992.
- [20] R.V. Mayorga, F. Janabi-Sharifi and A.K.C. Wong: "A fast approach for the robust trajectory planning of redundant manipulators," J. of Robotic Systems, vol.12, no.2, pp.147-161, 1995.
- [21] 劉, 音田: "干渉チェックを行なわない配置空間近似表現の作成手法", 計測自動制御学会論文集, vol.31, no.1, pp.89-97, 1995.
- [22] C. Marolo and E. Pagello: "A cell decomposition approach to motion planning based on collision detection," Proc. 1995 Int. Conf. on Advanced Robotics, vol.1, pp.481-488, Sant Feliu, Spain, 1995.

馬 書根 (Shugen Ma)

1963年8月10日生。1991年東京工業大学大学院機械物理専攻博士課程修了。工学博士。同年(株)小松製作所研究本部勤務。1993年茨城大学工学部講師, 1996年助教授, 現在に至る。この間, 1992年4月から1年間米国カリフォルニア大学客員研究員。ロボットの機構と制御の研究に従事。1992年計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE各会員。(日本ロボット学会正会員)

紺野元嗣 (Mototsugu Konno)

1973年3月20日生。1995年茨城大学工学部システム工学科卒業。同年, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程に進学, 現在に至る。超冗長ロボット・マニピュレータの機構と制御の研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)