学術・技術論文

回避能力評価指標 AMSIP に基づく冗長マニピュレータの 実時間形状最適化制御

桂 志*² 見 浪 護*1 池 H Tongxiao Zhang^{*3}

On-line Configuration-optimizing Control of Redundant Manipulator Based on AMSIP

Mamoru Minami^{*1}, Keiji Ikeda^{*2} and Tongxiao Zhang^{*3}

This paper is concerned with trajectory tracking and obstacle avoidance control using avoidance manipulability of redundant manipulators. We have proposed a new manufacturing system using robot to deal with object with unknown shape by combining an avoidance control system and preview control system. However, through analyses and simulation studies it develops that the shape of redundant manipulator was not always kept to the best configuration on the view point of shape-changing ability. In this paper we propose a new criterion to evaluate the shape-changing ability in the configuration space while tracking the hand-desired trajectory. Using this criterion we constructed real-time configuration control system with preview evaluation by introducing imaginary manipulator in future time. Finally the proposed system was evaluated by several simulations on the point of real-time configuration optimization, and the feasibility of total system was analyzed.

Key Words: Redundant Manipulators, Avoidance Manipulability, Avoidance Manipulability Shape Index, Potential

1. 緒 言

冗長マニピュレータの軌道追従・障害物回避問題を考える場 合. 大別して障害物に衝突しない腕形状や軌道をコンフィグレー ション空間で大域的に見つける"Global Method"と呼ばれる 軌道計画問題と周辺環境の変化に対して形状を適応的に変化さ せる"Local Method"に分けられる.

前者の問題を解決する方法には、運動学的なアプローチによ る研究が多く、障害物の回避条件とハンドの目標軌道を追従させ るための関節空間内の制約条件を同時に扱い得るペナルティー 法を用いた軌道計画法 [1] やポテンシャル関数を用いる方法 [2] などがある. 位相平面解析および線形計画法を用いて関節駆動 トルクを制限したときの最短時間軌道追従解を求める最短時間 軌道追従制御法 [3] や、最近では関節角の可動範囲制限を考慮 した軌道計画 [4] などがある. Global Method は冗長マニピュ レータのコンフィグレーション空間の中で初期形状からゴール 形状への形状変化の軌道の存在を大域的に保証することを求め

られる [1]. このため構造化された環境でしかも時間不変の静的 な周囲環境が必要である.また、可能な軌道の存在を確かめる ための計算量の多さからオフラインで計画を作成せざるを得な い. 文献 [5] は "Reachability" という概念を提案しこれに基づ いてゴール形状に至るパスの存在を保証する Global Method を提案している.

一方後者の Local Method は動的に変化する環境に対する適 応能力や空間的に限られた周辺環境情報に基づく形状制御が可 能であり、リアルタイム障害物回避手法 [6]~[8] や運動学的制御 法 [9] などがある、また、運動学的評価を最適化する制御法 [10] や冗長マニピュレータの駆動トルクの最適化をする方法[11],計 算量を少なくするためファジィ推論を用いる制御法 [12] がある. さらにリアルタイム特異形状回避手法[13],移動マニピュレー タのハンドの可操作性を考慮した運動計画手法[14] などがある.

可操作性の概念 [15] [16] は正規化された関節角速度によって 生成されるハンドの速度生起能力によってマニピュレータの形 状を評価するものであった. また可操作性は複数アームロボッ ト [18] [19] や多指ハンドの解析 [20] にも用いられた. 可操作性 の概念は運動学に基づくものであり、動力学を考慮したもので はなかった.この点について可操作性の応用範囲を広げた研究 として,可操作力楕円体[21],動的可操作性楕円体[22]が挙げ られる. さらに可操作力楕円体と動的可操作性楕円体を組み合 わせてイナーシャマッチング楕円体 [23] が提案された.

本研究は、未知である作業対象物の位置決めや形状の定義に 関する段取り作業が不要な Fig.1 のような作業システムを構築

原稿受付 2008年1月26日

^{*1}福井大学大学院工学研究科応用理工部門知能システム工学専攻

^{*&}lt;sup>2</sup>トヨタテクニカルディベロップメント (株)

^{*3}福井大学大学院工学研究科

^{*1}Faculty of Applied Science and Technology Department of Human and Artificial Intelligence Systems, University of Fukui ^{*2}Toyota Technical Development Co.

^{*3}Graduate School of Engineering, University of Fukui

[■]本論文は学術性で評価されました.

し、グラインディングやシーリング作業などのロボットのハンドによる対象物表面上の目標軌道追従作業の作業全体の効率を向上させることを目的としている。図を見るとカメラ視野は限定されており、作業の進行とともに移動する。したがって時間的に変化する限られた周辺環境情報に基づいて形状制御を行う必要があり、このとき「準備的形状変更能力の実時間最適化」が必要である。すなわち突然カメラ視野に入ってくる対象物(Fig.1の中でA印で表される対象物側面)に対して、できるだけすばやく回避行動をとる必要がある。

可操作性の概念に端を発する一連の研究は基本的に作業空間 内を自由に動くことができるハンドの速度生成能力をマニピュ レータの形状の関数として規定したことを用いている。これに 対して筆者らはハンド先端がある目標軌道を追従することを前 提に、中間リンクの形状変更能力を評価する回避可操作性の概 念[24]を提案した.ハンドの目標軌道を実現しつつ形状を変更 する能力は、冗長マニピュレータの形状に依存して決定される ため"準備的形状変更能力"を高く維持する工夫がない場合に は、形状変更能力が低下する変動を避けることはできない、形 状変更能力が低下したときに低下したリンクが低下した方向に 回避行動を要求される場合には、要求回避速度を実現できず衝 突に至る可能性がある、このため、マニピュレータの形状変更 能力(AMSI, 文献[27])を常に高く保つ準備的形状制御が必須 となる.この準備的行動は、動的環境下での適応的形状制御の 重要な課題であるにもかかわらず筆者の知る限り現在まで議論 されることはなかった.

本報は、回避可操作性を考慮した未知対象物加工システムに 関する技術的課題である準備的形状変更能力の実時間最適化制 御システムを提案する.最適化の指標である準備的形状変更能 力として二つの指標を提案し、比較することで AMSIP と名づ けた形状指標が優れていることを示す.本報では、時変多峰性 分布関数の実時間最適化の手法として"1-step GA"[29]を用



Fig. 1 Processing system for unknown object

いる.ここでは 1-step GA の実時間最適化性能に関して,時 変最適解への収束性能をリアプノフ法を用いて検討する.さら に AMSIP を 1-step GA を用いて実時間最適化を行い,プレ ビュー制御法 [25] と組み合わせる準備的形状変更能力を最適化 するオンライン形状制御システムを提案する.シミュレーショ ンにより,提案するシステムは冗長マニピュレータの準備的形 状変更能力を常に准最適化された状態に保ちつつ,ハンドの軌 道追従が可能であることを確認する.

2. プレビュー制御システム

プレビュー制御システム [25] [26] とは作業対象物のオンライ ン形状計測に基づいて,ハンドの目標軌道上の将来時刻で非衝 突である仮想的な腕形状に,現時刻における実際の腕形状を近 づける制御方法である.非衝突である将来の腕形状は遺伝的ア ルゴリズム (GA) によって見つけることができる.

プレビュー制御は現時刻の腕形状に将来の非衝突条件を満足 する腕形状を反映させ、将来衝突が起こらないようあらかじめ準 備しておくものであり、全体の制御系を **Fig.2** に示す.現在の 時刻を t, 現時刻 t より \tilde{t} 秒先の時刻を t^* とすると、 $t^* = t + \tilde{t}$ となる.以下 \tilde{t} を「プレビュー時間」と呼ぶ.

プレビュー制御システムの計測部では時刻 t^* での目標経路 上の目標位置 $\mathbf{r}_d(t^*)$ を検出できるものとする. 軌道計画部で 出力する時刻 t^* における目標軌道上で作業対象物に非衝突で ある関節角度 $\tilde{\mathbf{q}}_d(t^*)$ を決定するために仮想的なマニピュレー タとポテンシャル空間を用いる. 以下仮想的なマニピュレータ を「仮想マニピュレータ」と呼ぶ.

ここでポテンシャルについて説明すると, **Fig. 3** に示すよう に作業対象物形状に基づいてポテンシャル空間を Δh 間隔で生 成する. 各ポテンシャル空間 $u_k(j = 0, 1, 2, \dots, n_k)$ における 衝突の危険性をスカラーで表すために, 対象物から離れるごと にポテンシャル値が高くなるよう $v_0 < v_1 < v_2 < \dots < v_k < 0$ と設定する. ここでは, 対象物近くのポテンシャルを負の大き な値に設定することで, 衝突の危険性を表現することにした. さらに仮想マニピュレータのリンク *i* 上に n_{ij} 個の特徴点を 配置し, 特徴点の作業空間内における座標を $s_{ij}(x_{ij}, y_{ij})[i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_i]$ とする. 特徴点 s_{ij} の評価値 $a(s_{ij})$ を,

$$a(s_{ij}) = v_k \quad (\text{if } s_{ij} \in u_k) a(s_{ij}) = 0 \quad (\text{otherwise})$$
(1)



Fig. 2 Preview control system



Fig. 3 Potential space and specified point

テンシャル値 U は,

$$U = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} a(s_{ij})$$
(2)

で得られ、Uが小さいほど仮想マニピュレータは対象物に接近 し、大きいほど離れていることを示す。また、仮想マニピュレー タが衝突状態の場合をUの数値により判断できるようにするた め、対象物内のポテンシャル値 v_0 を他のポテンシャル値よりも 非常に小さい数値(負の値であることに注意)に設定する。ここ で、式(2)のUが $U \leq v_0$ を満たす場合、仮想マニピュレー タが対象物と衝突していることを意味する。したがって v_0 は 衝突を判定する場合のUの最小ポテンシャル値を表している。

軌道計画部では,時刻 t^* において対象物と非衝突である目 標関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ を GA を用いて求める.これにより,総ポ テンシャル値 U の最大化を規範とした衝突回避形状制御を行う ことができる.制御部ではプレビュー制御を行い時刻 t^* で軌 道計画された非衝突条件を満足する関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ に現時刻 tの関節角度 q(t) を近づけるような目標関節角速度 $\dot{q}_d(t)$ を出 力する.

マニピュレータの第*i*リンク先端の位置と姿勢を $r_i \in R^n (i = 1, 2, \dots, n)$, 関節角度を表すベクトルを $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^n$ とすると, r_i はqの関数として,

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{f}_i(\boldsymbol{q}) \tag{3}$$

と与えられる.式(3)を時間 t で微分すると,

$$\dot{\boldsymbol{r}}_i = \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{4}$$

を得る. ただし $J_i(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は, $r_i \circ q$ に関するヤコビ行 列である.

ハンドの目標経路追従速度 $\dot{r}_d(t)$ が与えられた場合の式(4) の \dot{q} に関する一般解 $\dot{q}_d(t)$ は,

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{d}(t) = \boldsymbol{J}_{n}^{+}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{r}}_{d}(t) + (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}_{n}^{+}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}_{n}(\boldsymbol{q}))\boldsymbol{v}(t)$$
(5)

で与えられる. ただし $J_n^+(q)$ はヤコビ行列 $J_n(q)$ の疑似逆行 列, I は $n \times n$ 単位行列である. また v(t) は任意のベクトル であり, この値を適当に選ぶことよって冗長性を利用し, ハン ドの軌道追従と回避制御を同時に行うことができる. 本報告に おいて v(t) は、現時刻における関節角度 q(t) の冗長性を利用 し、時刻 t^* において対象物と非衝突である仮想マニピュレー タの関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ にできるだけ近づける制御量として以下 のように与える.

$$\boldsymbol{v}(t) = \boldsymbol{K}_{pr}(\tilde{\boldsymbol{q}}_d(t^*) - \boldsymbol{q}(t)) \tag{6}$$

ここで K_{pr} はゲインを表す対角行列であり, K_{pr} = diag[$k_{v1}, k_{v2}, \dots, k_{vn}$] である. 時刻 t^* における軌道計画で 得られた非衝突である関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ を現時刻での関節角度 q(t) の制御に利用する. この意味で制御系をプレビュー制御と 呼ぶ. ここで述べた $\tilde{q}_d(t^*)$ は, ポテンシャル U で評価した将 来時刻 t^* の最適なマニピュレータ形状を与えるが, 冗長マニ ピュレータの形状変更能力を考慮した制御系ではない. この欠 点を改良する方法について次章以降で議論する.

3. 回避可操作形状值:ASMI

プレビュー制御は、現時刻において将来時刻での目標マニピュ レータ形状を決定しておき、マニピュレータ形状をその目標形 状となるように制御することによって、将来時刻での回避行動 に対してあらかじめ準備しておくことができる.プレビュー制 御 [25] [26] の概念にはマニピュレータの回避可操作性のみなら ず準備的形状変更能力の実時間最適化の考え方も含まれていな かった.そのため Fig.1 のように未知対象物を取り扱う場合, 軌道追従中にマニピュレータの回避可操作性が低くなり、新た にカメラ視野に入ってきた対象物つまり障害物に対して回避動 作が間に合わない場合が考えられる.

そこで、ここでは準備的形状変更能力の実時間最適化を行う ためにマニピュレータ全体の回避可操作性を評価する指標の提 案を行う.ハンドの軌道追従タスクを実行しつつ各中間リンク の形状を変更する能力を評価したものは、回避可操作性楕円体 で示される.この回避能力の良し悪しは回避可操作性楕円体の 体積で求められる.第iリンクの回避可操作性楕円体 $^{1}P_{i}$ の体 積 $^{1}V_{i}$ は

$${}^{1}V_{i} = c_{m} \cdot {}^{1}w_{i}, \tag{7}$$

と表され, m は作業空間の次元を示す. また c_m , 1w_i は,

$$c_m = \begin{cases} 2(2\pi)^{(m-1)/2} / [1 \cdot 3 \cdots (m-2)m] & (m \colon \widehat{\mathrm{G}} \mathfrak{B}) \\ (2\pi)^{m/2} / [2 \cdot 4 \cdots (m-2)m] & (m \colon \mathbb{G} \mathfrak{B}) \end{cases}$$
$${}^1w_i = {}^1\sigma_{i1} {}^1\sigma_{i2} \cdots {}^1\sigma_{im} \tag{8}$$

と定義され,式 (8) における, ${}^{1}\sigma_{i1} {}^{1}\sigma_{i2} \cdots {}^{1}\sigma_{im}$ は $J_{i}(I_{n} - J_{n}^{+}J_{n}) \stackrel{\triangle}{=} {}^{1}M_{i}$ で定義される回避行列 ${}^{1}M_{i}$ の特異値である.

ここで、回避可操作性楕円体の概念は三次元の作業空間にも 対応できるが、本報告では提案する指標と全体の制御系の評価 を容易にするため、水平多関節型の冗長マニピュレータを想定 し考察する.したがって作業空間は二次元となり、 1V_i は面積 となる.この場合、第1リンク目と第(n-1)リンク目の回避 可操作性楕円体は直線となり、面積は0となるが、障害物回避 という点でこの二つの楕円体も用いることができると考えられ るため、直線の長さを回避能力の一部として評価する.ここで



Fig. 4 Avoidance manipulability ellipsoids

Fig.4に4リンク水平多関節マニピュレータの例を示す.完全 回避可操作性楕円体 ${}^{1C}P_2$ は楕円体となり,部分回避可操作性 楕円体 ${}^{1P}P_1$, ${}^{1P}P_3$ は直線となる [24]. この ${}^{1}V_i$ の値が最大と なるマニピュレータ形状を求めれば,回避可操作性の良好なマ ニピュレータ形状が決定できる.しかしこれは各リンクごとの 回避可操作性の良し悪しを評価するものであり,第*i*関節の回 避可操作性が良好なマニピュレータ形状であっても,第*j*関節 の回避可操作性が良好なマニピュレータ形状が与えられるとは 限らない.

以上のことから、マニピュレータ全体の回避可操作性の優劣 を決めるため、回避可操作形状値 ¹E を次のように定義し、こ れを AMSI (Avoidance Manipulability Shape Index) と呼ぶ ことにする.

$${}^{1}E = \sum_{i=1}^{n} {}^{1}V_{i}a_{i} \tag{9}$$

ただし,

$$a_1 = a_{n-1} = 1[m^{-1}], a_{2,3,\dots,(n-2)} = 1[m^{-2}]$$
 (10)

 ${}^{1}V_{1}, {}^{1}V_{n-1}[m]$ は長さ、 ${}^{1}V_{2,3,\dots,(n-2)}[m^{2}]$ は面積であるため、 式(10) により無次元化する. 第*i*リンクの回避可操作性楕円 体の面積 ${}^{1}V_{i}$ は、面積で評価することで長軸方向と短軸方向 の回避可操作性を同時に評価している. 楕円体が細長くなる場 合は、面積が減少するので特定の方向に回避しやすく、他の方 向に回避しにくい場合は、 ${}^{1}V_{i}$ が小さくなり、その総和である AMSI も低下する. また、マニピュレータのハンドが目標位置 に届かない場合は

$${}^{1}E = 0$$
 (11)

とする. この¹E により,ハンドの軌道追従タスクを満たすマ ニピュレータの回避能力をスカラーとして数値で判断できる.

上記の回避可操作形状値 1E とは別に,

$${}^{1}A = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} {}^{1}\sigma_{ij}$$
(12)

と表される回避行列 ${}^{1}M_{i}$ の特異値の総和も形状評価指標とし て考えられる.特異値は、回避可操作性楕円体の主軸の長さを 表すが、 ${}^{1}A$ は、 ${}^{1}\sigma_{ij}$ の総和に基づく指標であるため、ある iリンクの特異値 ${}^{1}\sigma_{ij}$ が小さくてもそれ以外の ${}^{1}\sigma_{ik}(k \neq j)$ が 非常に大きいとき ${}^{1}A$ が大きくなる.**Fig.5** にハンドの位置を (100,100) に固定した場合の ${}^{1}A$ の分布 (a) と ${}^{1}A$ で評価した



Fig. 5 Distribution of ${}^{1}S$ and the manipulator's shape of the highest Peak3'



 $Fig. \ 6 \quad {\rm Manipulator\ shape\ of\ Peak1}$

最適形状 (b) を示す. (b) より ${}^{1}\sigma_{31}$ が大きくなる形状を選択 していることが分かる.同じ条件での ${}^{1}E$ の分布と最適形状を **Fig.6** に示す. Fig.5 に比べて中間リンクの回避能力がバラン スよく分布していることが分かる. つまり, ${}^{1}A$ を最大化する形 状に制御するとき,回避速度を出しやすい方向とそうではない 方向の差が大きくなりやすく,作業空間全体にバランス良く回 避できない場合が生じてしまう [27].したがって,式 (12) の ${}^{1}A$ より式 (9) の ${}^{1}E$ のほうがマニピュレータ全体の回避能力 を評価するのに優れていることが分かる.

4. ポテンシャル付回避可操作形状値:ASMIP

冗長マニピュレータが対象物と衝突せずに軌道追従と障害物 回避を行うためには、マニピュレータの回避可操作性を高く保 ちつつ、さらに作業対象物から離れて作業をする必要がある. そこで、前章で述べた回避能力の評価指標である回避可操作形 状値を用いてマニピュレータの回避可操作性について評価を行 う.しかし、優れた回避可操作性を有するマニピュレータ形状 でも作業対象物との距離が近ければ衝突する危険性が高くなる. そこで2章で述べたポテンシャル空間を用いてマニピュレータ と作業対象物との接近度についても評価することにより、回避 可操作性に優れ、作業対象物との非衝突条件を満たすマニピュ レータ形状を決定することがことが可能であると考えられる. しかし、回避可操作性とポテンシャルは相反するトレードオフ の関係にある.したがって、マニピュレータの形状を評価する 指標には、回避可操作性とポテンシャルの多目的最適化[28] が 必要となる. 550

そこで、ポテンシャルを考慮した回避能力の評価指標を AM-SIP (Avoidance Manipulability Shape Index with Potential) と呼び、

$${}^{1}S = k_{e}{}^{1}E + k_{u}U \tag{13}$$

と定義する. ここで k_e , k_u は重み付けを行う係数であるとと もに, 無次元の AMSI と次元が存在するポテンシャルという次 元の違う値の和をとるため,次元を一致させる役割も担う. ま た, ¹E の左肩に添え字 1 が付いている理由は,第 1 サブタス クとして冗長自由度を評価していることによる. ¹S も同様で ある. さらに別の回避サブタスクを実行できる自由度が残され ている場合には,²E,²S を同様に定義し高次の回避動作を実 行できる [24]. 式(13)の重み付け係数 k_e , k_u に依存して¹S の分布が変化し,その最適解も変化する. したがって,本報で 提案している実時間最適化制御の性能にも影響を与える. この 係数をどのように決定するかという問題は,多目的最適化問題 の重要なテーマの一つであるが,本報は冗長マニピュレータの 実時間最適化の手法自体を議論するものであり,重み係数と制 御性能との関係については注目せず議論しない. ここでは,式 (13)の重み付け係数を $k_e = k_u = 1$ と設定した.

AMSIP の有用性を確認するために、ハンドを (x, y) = (125,175) に固定し、4 リンクマニピュレータのリンク 1、リン ク 2 の関節角度 q_1, q_2 を変化させたときに得られる AMSI 分布 を **Fig. 7** (a) に、これに対応する AMSIP の分布を **Fig. 8** (a) に示す. このとき q_3, q_4 は従属的に決定される. Fig. 3 に示 すポテンシャル空間の数は三つに設定し、各ポテンシャル値を







Fig. 8 Distribution of ${}^{1}S$ and the manipulator's shape of the highest Peak3'

 $v_0 = -40,000, v_1 = -3,000, v_2 = -25, v_3 = -5$ と設定し た.以降,本報告でのポテンシャルパラメータはこの値に設定 する.ポテンシャル空間を考慮していない Fig.7 (a) で最も高 いピークをもつ Peak1 がポテンシャル空間を考慮することに より Fig.8 (a) ではその山のほとんどの部分が削られて Peak1 と変化している.これは、Fig.7 (b) に示すように Peak1 での マニピュレータ形状が障害物と衝突,あるいは非常に接近した 形状であるということを示している.このように、ポテンシャ ル空間を考慮することによって、マニピュレータが障害物に接 触または接近した形状にはペナルティーが与えられ、回避能力 が下げられる.したがって、AMSI にポテンシャルを考慮した AMSIP のピークをトラッキングすることで、Fig.8 (b) に示す ように対象物から離れ、回避能力が高い良好な形状を得ること ができる.

5. 準備的形状変更能力の実時間最適化

5.1 実時間最適化の必要性

本研究の目的は緒言で述べたとおり、未知対象物を相手に作 業するための軌道追従/障害物回避制御システムの構築である. 未知対象物を前提としているため、軌道計画後に作業を開始す る従来手法を適用できない. そこで, Fig.1 に示したとおり, オ ンライン情報を基に作業を行うのだが、未知対象物を扱うには、 逐次更新される作業環境に対応できるよう実時間でのマニピュ レータ準備的形状制御手法が必要となる. さらに、未知対象物 の形状計測範囲がカメラ画像範囲に限られることから、突然視 野に現れる対象物をすばやく回避するための形状変更能力の実 時間最適化制御が必要となる. ここでは, 提案した回避能力評 価の指標 AMSIP を用いた軌道追従/障害物回避制御手法を提 案する. 軌道追従を行うときのハンドの目標軌道は, Fig.9 に 示す作業対象物表面のAからFを結ぶ外型とする.式(5)の 右辺 v(t) 内にある目標関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ に回避能力が高い形状, すなわち AMSIP が最大となる形状を与え、その目標形状にマ ニピュレータ形状を近づける制御をすることにより、マニピュ レータが対象物と非衝突かつ回避能力を高く保った形状で軌道 追従を行えると考えられる.ここで、Fig.9の軌道上のAから Fの各点における AMSIP の分布図と各分布図で最も高い回避 能力をもつ形状を調べ, Fig. 10~Fig. 15 に示す. これらそれ ぞれの図の(b)に示すように、AMSIP が最大となる形状を実 現することが必要となるが、Fig. 10~Fig. 15 より AMSIP が最



Fig. 9 Desired-hand trajectory with concave shape



Fig. 10 Distribution of AMSIP ¹S and corresponding shape of maximum peak when the hand at A





(b) Shape of maximum peak

Fig. 11 Distribution of AMSIP ¹S and corresponding shape of maximum peak when the hand at B





(b) Shape of maximum peak





Fig. 13 Distribution of AMSIP 1S and corresponding shape of maximum peak when the hand at D

大となる形状は時間的に変化するハンド位置とともに変化する ことが分かる. 最適解探索手法として勾配法などの手法がある が, 勾配法では Fig. 10 のように AMSIP のピークが複数個存



Fig. 14 Distribution of AMSIP ${}^{1}S$ and corresponding shape of maximum peak when the hand at E



Fig. 15 Distribution of AMSIP 1S and corresponding shape of maximum peak when the hand at F

在する場合,最大のピークを常に探索することはできない.また,最大のピークではあるが次第に低くなっていくピークから別の高くなっていくピークに乗り移ることも必要である.そこで,時々刻々と変化する目標形状を広域的に探索,決定するための手法として,本研究では1-step GA [29] を用いる.

5.2 "1-step GA"の実時間最適化条件

本研究ではカメラ画像によって対象物形状を認識し,軌道追 従を行う.そのためには、Fig.10(b)~Fig.15(b)に示すよう な目標形状を実時間で決定し、目標形状に実際のマニピュレー タを近づける制御をしなければならない.以下に1-step GA に よる時変分布関数の実時間最適解探索について考察する.ここ では時変分布関数は連続時間 t の関数であることを前提に議論 する.

時刻 t における AMSIP 値 ${}^{1}S(\boldsymbol{q}(t))$ の分布の中で最も高い ピークを与える $\boldsymbol{q}^{max}(t)$ は,

$$\boldsymbol{q}^{max}(t) = \left\{ \boldsymbol{q}(t) \mid \max_{\boldsymbol{q}(t) \in L} {}^{1}S(\boldsymbol{q}(t)) \right\}$$
(14)

と表される. Lは q(t)が取り得る冗長空間である. 次に時刻 tに GA によって求められた遺伝子 $q_i(t), (i = 1, 2, \cdots, p)$ のな かで最大の 1S を与える $q_{GA}^{max}(t)$ を

$$\boldsymbol{q}_{GA}^{max}(t) = \left\{ \boldsymbol{q}_i(t) \mid \max_{\boldsymbol{q}_i(t) \in L} {}^1 S(\boldsymbol{q}_i(t)) \right\}$$
(15)

と表す. GA の進化計算では ${}^{1}S(\boldsymbol{q}_{i}(t))$ を適合度関数として用 いている. 時刻 t の ${}^{1}S$ の最大値を与える $\boldsymbol{q}^{max}(t)$ と GA の 最大値を与える $\boldsymbol{q}^{max}_{GA}(t)$ との差を $\delta \boldsymbol{q}(t) = \boldsymbol{q}^{max}(t) - \boldsymbol{q}^{max}_{GA}(t)$ と表し、 $\Delta^{1}S(\delta \boldsymbol{q}(t))$ を次式で定義する.

$$\Delta^{1}S(\delta q(t)) = {}^{1}S(q^{max}(t)) - {}^{1}S(q^{max}_{GA}(t))$$
(16)

このとき,式 (14)(15) より $\Delta^1 S(\delta q(t)) \ge 0$ であることは自 明であるが,さらに [仮定 (1)]: ${}^1S(q(t))$ は $\delta q(t) = 0$ のと きのみ $\Delta^1 S(\delta q(t)) = 0$ が成立する分布であることを仮定する.

さらに [仮定 (2)]: ${}^{1}S(\boldsymbol{q}^{max}(t)), {}^{1}S(\boldsymbol{q}^{max}_{GA}(t))$ が時間 t に 関して微分可能であり,

$$\frac{{}^{1}S(\boldsymbol{q}_{GA}^{max}(t))}{dt} > \frac{{}^{1}S(\boldsymbol{q}^{max}(t))}{dt}, \quad (17)$$

が成り立つことを仮定する. これは時変分布関数のピークの移動速度より GA のピークへの収束速度が速いという条件である. この条件の成立に関して、マニピュレータの形状、対象物形状、 ポテンシャルの設定に依存した ${}^{1}S(q(t))$ の分布形状、またハ ンドの目標速度に依存した $q^{max}(t)/dt$, GA のパラメータの 設定と ${}^{1}S(q(t))$ の分布形状に依存した $q^{max}_{GA}(t)/dt$ など多く の要因が関係している.

仮定(1),仮定(2)が成立するとき $\Delta^1 S(\delta q(t))$ はリアプノ フ関数であり、 $\delta q(t) = 0$ は冗長空間 *L*において漸近安定であ る.このとき

$$\boldsymbol{q}_{GA}^{max}(t) \longrightarrow \boldsymbol{q}^{max}(t) \quad (t \longrightarrow 0)$$
 (18)

であるため、実時間最適化が可能なことが分かる. このときあ る時刻 t においては $q_{GA}^{max}(t)$ は最適解 $q^{max}(t)$ のある近傍

$$\delta \boldsymbol{q}(t) = \boldsymbol{q}^{max}(t) - \boldsymbol{q}^{max}_{GA}(t) \le \epsilon, \quad (\epsilon > 0)$$
 (19)

に存在する. GA の収束を待つことなく時刻 t の准最適解 $q_{GA}^{max}(t)$ を時刻 t の実時間最適化問題の解として取り扱う手 法を「1-step GA」と呼んでいる.

次に、[仮定 (2)] について考察する. ${}^{1}S(q^{max}(t))/dt = 0$ のとき、つまり時不変最適化問題である場合である.式 (16) と [仮定 (2)] より、

$$\frac{\Delta^1 S(\delta \boldsymbol{q}(t))}{dt} = -\frac{{}^1 S(\boldsymbol{q}_{GA}^{max}(t))}{dt} < 0, \qquad (20)$$

を得る.ゆえに [仮定(1)], [仮定(2)] は、時不変関数 ${}^{1}S(q)$ の GA による最適化が可能であることも意味している.

以上の考察は連続時間を前提にしていたが、以下に GA の一 世代の進化計算時間 Δt を考慮した考察をする。第 j 世代の第 i 遺伝子を $q_{i,j}(t)$ と表し、第 j 世代から Δt 秒後の第 j+1 世 代への進化を、

$$\boldsymbol{q}_{i,j}(t) \stackrel{\text{evolve}}{\Longrightarrow} \boldsymbol{q}_{i,j+1}(t + \Delta t) \tag{21}$$

と表す. GA の進化計算時間 Δt による時間遅れによる悪影響 が考えられるが,この影響が連続時間系での議論の結果である 式 (19) との関係において

$$\delta \boldsymbol{q}(t) \le \epsilon', \quad (\epsilon' > \epsilon > 0) \tag{22}$$

を満たす範囲であることを仮定することができる場合,進化計 算時間を考慮した「1-step GA」が実時間で准最適解を出力で きることになる.上記の仮定が冗長マニピュレータの回避可操 作性の最適化問題への応用において現実的に可能な仮定かどう かについては、次章以降のシミュレーションで議論する.

6. 実時間最適化シミュレーション

6.1 形状最適化制御の解析

ここでは、プレビュー制御と 1-step GA を用いた実時間形状 最適化制御の有用性を示す. Fig.9 に示した A 点から F 点まで のハンド軌道を追従する形状制御について考える. 目標ハンド 速度は 0.075 [m/s] である. まず B 点での最適形状を AMSIP の全探索により求め Desired Shape として Fig. 16(a) に示す. これは Fig. 11 (a) と同じ分布であるがこの図に A 点での初期 形状を記入し、さらに A 点から B 点への形状変更の軌道を追 加している. A 点からスタートした形状が B 点では、ほぼ最適 形状の近傍に達している.完全に最適形状に一致しない理由は, GA の最適解探索は発見的方法である点とプレビュー時間とハ ンド目標速度および対象物の寸法と形状との関係で決定される 実マニピュレータの形状変更速度に起因していると考えられる. A 点から B 点までの AMSIP 軌道をマニピュレータ形状で表現 し図 (b) に示す. B 点での最適形状に近づきつつハンドの軌道 追従を行っていることが分かる. 軌道 BC, CD, DE, EF を追 従しているときも同様に Fig. 17~Fig. 20 より目標形状に近 づける制御ができているということが分かる.したがって、プ レビュー制御と 1-step GA を用いることによりマニピュレータ 形状を准最適化しながら軌道追従をすることが可能である.

6.2 シミュレーション

これまでに提案した, AMSIP に基づく軌道追従制御手法を用 いてシミュレーションを行う. シミュレーションではプレビュー 制御の式 (6) にあるプレビュー時間 *t* を 10 [s] と設定した. ハ



 ${\bf Fig.\,16} \quad {\rm Manipulator's\ shape\ trajectory\ from\ A\ to\ B}$



on of ¹S

Working Object

Desired shape
 Manipulator's shape

(b) Manipulator's shape



(a) Shape changing trajectory on distribution of ${}^{1}S$

Fig. 17 Manipulator's shape trajectory from B to C





(a) Shape changing trajectory (b) on distribution of ${}^{1}S$

(b) Manipulator's shape

Fig. 18 Manipulator's shape trajectory from C to D



(a) Shape changing trajectory (b) Manipula on distribution of 1S

Fig. 19 Manipulator's shape trajectory from D to E



(a) Shape changing trajectory (b) Manipulator's shape on distribution of 1S

Fig. 20 Manipulator's shape trajectory from E to F

Table 1Parameters of GA

Population size	30
Selection rate	0.5
Mutation rate	0.1
Gene's Representation	Decimal
Evolution Scheme	Elite Preservation
Calculation Time [one generation]	0.92 [ms]

ンド目標速度は 0.075 [m/s] であり,作業対象物の形状と寸法 を Fig. 9 に示す.また予備実験によって定めた GA のパラメー タを **Table 1** に示す.CPU は Celeron(R) 2.93 [GHs], RAM 448 [MB], OS は Windows XP である.また GA の一世代の 計算時間は,0.92 [ms] と短い.これは GA の進化計算時には Fig. 16 (a)~20 (a) に示す AMSIP 分布を求めなくても GA の 進化計算を進めることができるからである.つまり GA の遺伝



Fig. 21 Results of real-time configuration optimization

子で指定された位置の AMSIP の値のみを計算すれば進化させ ることができるからである.

¹S を実時間最適化するプレビュー制御の軌道追従/回避制 御の結果を Fig. 21 に示す. ここで時間軸は仮想マニピュレー タの最適形状を評価する時刻 $t^* = t + \tilde{t}$ で表されているため 10-50 [s] である. Fig. 21 (a) は各時刻において軌道追従を行 う仮想マニピュレータにおける AMSIP の最適解を全探索で求 め、"maximum value"と表している. また 1-step GA で見 つけた各時間の解を"1-step GA value"で示す. Fig. 21 (b) は 軌道追従を行っている実際のマニピュレータの各時刻における AMSIと AMSIP を示している.まず, Fig. 21 (a) で全探索し た結果得られる回避能力と GA による探索によって得られる回 避能力を比較すると、GA によって得られる形状は回避能力が 最大となる形状とほぼ一致するものが得られていることが分か る. よって 1-step GA でほぼ実時間最適化ができていること が分かる.そして、プレビュー制御によりこの回避能力が高い 仮想マニピュレータ形状に実際のマニピュレータを近づけるこ とによって、Fig. 21 (b) よりマニピュレータの回避能力指標で ある AMSIP が高く保たれていることが分かる. この図で時刻 10 [s] までに回避能力が下がっている部分が数箇所あるが、こ れは Fig. 16 (a) のように、初期形状が最大値となるピークとは 違うピーク上に設定されたため、最適化するためにはいったん ピークを下って隣の最大のピークを登るという形状変更をして いるためである.

さらに Fig. 21 (a) の破線と実線との差は式 (16) の $\Delta^1 S(\delta q(t))$ を意味し,図より $\Delta^1 S(\delta q(t))$ が有界であることが分かる.こ れより $\delta q(t)$ も有界であり 1-step GA が時変多峰性関数の実 時間最適化の解を時間に遅れることなく得ていることが分かる. また,Fig. 21 (b) の ¹E と ¹S の差は,式 (13) よりポテン シャルを表している.本報告では,衝突状態のポテンシャル値 を -40,000 と設定しているので,(b) の ¹S の値よりマニピュ レータは対象物と衝突せずに軌道追従を行えていることが分か る.以上より,マニピュレータの回避可操作性を表す AMSI が 554

高く保たれるように制御され,軌道追従中のポテンシャルを表 す AMSI と AMSIP の差は非衝突である値を示していることか ら,提案した軌道追従制御手法によって良好な軌道追従/障害 物回避が実現できる.

7. 結 言

本報では、まず回避可操作性を考慮した未知対象物加工シス テムに関して冗長マニピュレータの準備的形状変更能力の実時 間最適化が重要な技術的課題であることを指摘した.この課題 を解決するために、まず最適化の基準として冗長マニピュレータ がハンドの目標軌道を追従しつつ形状変更する能力をスカラー 値で表現する AMSIP を提案した.さらに"1-step GA"とプ レビュー制御を組み合わせた実時間最適化制御システムを提案 し、実時間最適化を保証する条件をリアプノフ法により示した 後、提案した準備的形状変更能力の実時間最適化制御システム の有効性をシミュレーションにより確認した.

参考文献

- S. Seereeram and J.T. Wen: "A Global Approach to Path Planning for Redundant Manipulators," IEEE Transacations on Robotics and Automation, vol.11, no.1, pp.152–160, 1995.
- [2] 楊向東、山本元司、毛利彰: "ボテンシャル関数を用いるマニピュレータの衝突回避軌道計画"、日本機械学会論文集(C編), vol.60, no.575, pp.2345-2350, 1994.
- [3] M. Shugen and M. Watanabe: "Minimum time path-tracking control of redundant manipulators," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), vol.1, pp.27–32, 2000.
- [4] R.S. Jamisola, Jr. A.A. Maciejewski and R.G. Roberts: "Failure-Tolerant Path Planning for Kinematically Redundant Manipulators Anticipating Locked-Joint Failures," IEEE Transactions on Robotics, vol.22, no.4, pp.603–612, 2006.
- [5] J.M. Ahuactzin and K.K. Gupta: "The Kinematic Roadmap: A Motion Planning Based Global Approach for Inverse Kinematics of Redundant Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.15, no.4, pp.653–669, 1999.
- [6] K. Glass, R. Colbaugh, D. Lim and H. Seraji: "Real-time collision avoidance for redundant manipulators," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.3, pp.448–457, 1995.
- [7] H. Seraji and B. Bon: "Real-Time Collsion Avoidance for Position-Controlled Manipulators," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.15, no.4, pp.670–677, 1999.
- [8] O. Khatib: "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots.," The International Journal of Robotics Research, vol.5, no.1, pp.90–98, 1986.
- [9] L. Zlajpah and B. Nemec: "Kinematic control algorithms for on-line obstacle avoidance for redundant manipulators," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2002. Proceedings, vol.2, pp.1898-1903, 2002.
- [10] 馬書根, D. ネンチェフ: "冗長マニピュレータのための実時間動的冗長 性制御法", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.704-710, 1995.
- [11] J.M. Hollerbach and K.C. Suh: "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," IEEE J. of Robotics and Automation, vol.RA-3, no.1, pp.308–316, 1987.

- [12] 斉藤春雄,竹前忠,土本和成,神谷貴志:"マニピュレータの障害物自動回避へのファジィ推論の応用",日本機械学会論文集(B編), no.91, vol.914, 1992.
- [13] G. Marani, J. Kim, J. Yuh and W.K. Chung: "A real-time approach for singularity avoidance in resolved motion rate control of robotic manipulator," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation (ICRA), vol.2, pp.1973–1978, 2002.
- [14] K. Nagatani, T. Hirayama, A. Gofuku and Y. Tanaka: "Motion planning for mobile manipulator with keeping manipulability," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), vol.2, pp.1663–1668, 2002.
- [15] 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.
- [16] T. Yoshikawa: "Manipulability of Robot Mechanisms, (in Japanese)," The International Journal of Robotics Research, vol.4, pp.3–9, 1985.
- [17] T. Yoshikawa: "Analysis and Control of Robot Manipulator with Redundancy," First International Symposium of Robotics Research, pp.735-747, 1984.
- [18] S. Lee: "Dual Redundant Arm Configuration Optimization with Task-oriented Dual Arm Manipulability," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.5, pp.78–97, 1989.
- [19] P. Chiaccho, S. Chiaverini, L. Sciavicco and B. Siciliano: "Gloval Task Space Manipulability Ellipsoids for Multiple-Arm System," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.7, pp.678–685, 1991.
- [20] A. Bicchi, C. Melchiorri and D. Balluchi: "On the Mobility and Manipulability of General Multiple Lim Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, pp.215–228, 1995.
- [21] R. Koeppe and T. Yoshikawa: "Dynamic Manipulability Analysis of Compliant Motion," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1472– 1478, 1997.
- [22] T. Yoshikawa: "Dynamic Manipulability of Robot Manipulators, (in Japanese)," Journal of Robotic Systems, vol.2, pp.113-124, 1985.
- [23] R. Kurazume and T. Hasegawa: "A New Index of Serial-Link Manipulator Performance Combining Dynamic Manipulability and Manipulating Force Ellipsoid," IEEE Transactions on Robotics, vol.22, pp.1022–1028, 2006.
- [24] 見浪護,内藤康弘,朝倉俊行:"冗長マニピュレータの回避可操作性", 日本ロボット学会誌,vol.17, no.6, pp.887-895, 1999.
- [25] 見浪護,野村佳弘,朝倉俊行:"プレビューコントロールを用いた冗長 マニピュレータの未知対象物に対する軌道追従および回避制御",日 本機械学会論文集(C編),vol.60, no.601, pp.3543–3550, 1996.
- [26] 見浪護,野村佳弘,朝倉俊行:"冗長マニピュレータの未知対象物に 対する軌道追従および回避制御のための予見/後見制御系",日本ロ ボット学会誌, vol.15, no.4, pp.573-580, 1997.
- [27] H. Tanaka, M. Minam and Y. Mae: "Trajectory Tracking of Redundant Manipulators Based on Avoidance Manipulability Shape Index," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.1892–1897, 2005.
- [28] 坂和正敏:非線形システムの最適化 <一目的から多目的へ>. 森北 出版株式会社, 1994.
- [29] H. Suzuki and M. Minami: "Visual Servoing to catch fish Using Global/local GA Search," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.10, issue 3, pp.352–357, 2005.



見浪 護 (Mamoru Minami)

1979年大阪府立大学航空工学科卒業,1981年大 阪府立大学航空工学専攻修士課程修了,1993年金 沢大学大学院自然科学研究科博士課程修了,博士 (工学),1994年福井大学工学部機械工学科助教授, 2002年同知能システム工学科教授,現在に至る. ロボットの力学,拘束運動,力制御,移動マニピュ

レータの制御,画像認識,ビジュアルサーボイング等の研究に従事. 日本機械学会,計測自動制御学会,IEEE などの会員.

(日本ロボット学会正会員)



Tongxiao Zhang

中国江蘇省徐州市で生まれ,2002年中国江蘇省南 通大学電気工学科卒業.2005年中国江蘇省中国鉱 業大学制御理論工学専攻修士課程修了.現在,福井 大学工学研究科博士後期課程システム設計工学専攻 エネルギーシステム講座在籍,冗長マニピュレータ の研究に従事. (日本ロボット学会学生会員)



池田桂志(Keiji Ikeda)

2005 年 4 月より 2007 年 3 月まで,福井大学工学 研究科知能システム工学専攻所属,2007 年 4 月よ りトヨタテクニカルディベロップメント(株)所属, 在学中冗長マニピュレータの形状評価と実時間最適 化の研究に従事.