

冗長マニピュレータのプレビュー実時間形状最適化制御と 実験による検証

On-line Configuration-optimizing Preview Control of Redundant Manipulator
and Experimental Evaluations

○ 中村 優作 (福井大) Zhang Tongxiao(福井大) 見浪 護 (福井大)

Mamoru MINAMI, University of Fukui, Bunkyo3-9-1, Fukui
Yusaku NAKAMURA, Zhang TONGXIAO Graduate school of engineering,
University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910-8507, Japan

This paper proposes a new approach to achieve an on-line control of trajectory tracking and obstacle avoidance for redundant manipulators without pre-checking path-planning in whole trajectory tracking. In the trajectory tracking process, manipulator is required to keep a configuration with maximal avoidance manipulability in real-time. In this paper, we present a new idea: Multi-Preview Control, which uses several future optimal configurations to control current configuration to complete task of trajectory tracking and obstacle avoidance on-line with high avoidance manipulability and reachability. We verify the validity of multi-preview control through simulations of comparing single-preview control with multi-preview control.

Keywords : Multi-Preview Control, Avoidance Manipulability Shape Index with Potential, 1-step GA

1 緒言

冗長マニピュレータは、与えられたタスクを完遂するために必要な自由度より多くの自由度を持つ。今日では、冗長マニピュレータは様々な用途に用いられている。例えば、溶接作業やシーリング作業、研磨作業といった接触作業である。これらの仕事を行うマニピュレータには、ハンドが目標軌道を追従しつつ目標対象物の周りに存在する障害物や対象物自身と中間リンクとの衝突を避けることが要求される。この目的に基づき、本報告では Fig.1 に示す実時間制御システムを構築する。このシステムは段取りを行わずに様々な形状の作業対象物に対しても作業を行えるシステムである。Fig.1 において、カメラとマニピュレータのハンドは、カメラから得られた（目標対象物の形状や位置の変化といった）限られた環境の実時間情報に依存して、同調して動くと仮定する。カメラ視野外の未知の環境は工程が進むにつれ変化する。カメラ視野は限られており目標対象物の大きさは制限されていないので、カメラ視野は対象物の大きさより小さいと仮定する。そして、カメラ視野に障害物が突然現れたとき、マニピュレータはこの障害物を回避出来るように可能な限り早く形状を変更しなければならない。

冗長マニピュレータの運動や障害物回避において冗長性をどの様に使うか議論されているが、その解決策は基本的に Global Method[1],[2] と Local Method[3],[4] に分類される。Global Method は、軌道計画を用いて衝突回避問題を解決する方法であり、常に最良の形状を維持することが出来る。しかし、軌道計画を行う際には、マニピュレータのリンク数が増える毎に計算コストが増しオンラインで実現することが難しい。一方、Local Method はオンラインで実現できるが、常に最良の形状を維持することが出来るとは限らない。

現在までに、マニピュレータの各関節の角速度とハンドの直線速度の関係を指標とした、マニピュレータの静

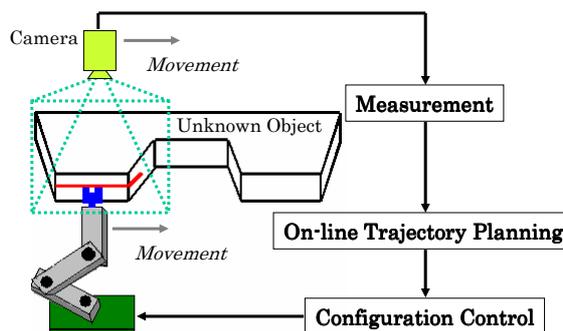


Fig. 1: Processing System for Unknown Object

的性能を評価するための可操作性楕円体 [5],[6] が紹介された。つまり可操作性楕円体は、マニピュレータのハンドが位置や姿勢を任意に変化させる容易さを評価する。しかし、マニピュレータの近くに障害物が突然現れるという状況では、マニピュレータが衝突する可能性がある。この状況において、マニピュレータは形状を素早く変更することにより突然現れた障害物を回避しなければならない。故に、マニピュレータのハンドがタスクを遂行する際、冗長マニピュレータの最適な形状変更能力を常に保つことが必要であると考える。マニピュレータの形状変更を考慮した指標である回避可操作性概念 [7] が我々の以前の研究で紹介された。これは可操作性楕円体から発想を得たものである。しかし、[7] において、回避可操作性楕円体はハンドを除いたそれぞれの中間リンクの回避可操作性しか評価しておらず、マニピュレータ全体の回避可操作性は評価していない。

また、我々の以前の研究では、マニピュレータの将来時刻における衝突のない最適な形状を参照することにより、現在の形状をその形状に近づけるプレビュー制御法

を紹介した [8] . この制御法では、ある一つの将来時刻における仮想的なマニピュレータ (以下、仮想マニピュレータ) を参照しているので、シングルプレビュー制御と呼ぶ . しかし、シングルプレビュー制御が実時間必要条件を満たす可能性があるにも拘らず、簡単に到達可能性問題が発生する .

そこで本研究では、マニピュレータ全体の回避可操作性を評価した新しい指標を提案し、その有効性を確かめる . 更に、Global Method と Local Method の長所を生かしたマルチプレビュー制御を紹介する . マルチプレビュー制御は、複数の将来時刻における仮想マニピュレータの非衝突である最適な形状を参照し、実際のマニピュレータ (以下、実マニピュレータ) の形状を制御する方法であり、Global Method にも Local Method にも属する手法である .

2 回避可操作性

マニピュレータの第 i リンク先端の位置と姿勢を $r_i \in R^m (i = 1, 2, \dots, n)$ (m は作業空間の次元数, n はマニピュレータのリンク数), 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,

$$r_i = f_i(q), (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

と与えられる . 式 (1) を時間 t で微分すると,

$$\dot{r}_i = J_i(q)\dot{q} \quad (2)$$

を得る . ただし $J_i(q) \in R^{m \times n}$ は, r_i の q に関するヤコビ行列である . ここでハンドの目標軌道 $r_{nd}(t)$ と目標速度 $\dot{r}_{nd}(t)$ が第一タスクとして与えられたと仮定すると式 (2) より, $\dot{r}_{nd}(t)$ を実現する \dot{q} は,

$$\dot{q} = J_n^+ \dot{r}_{nd} + (I_n - J_n^+ J_n) l \quad (3)$$

と求まる .

式 (3) において, J_n は r_n の q に関するヤコビ行列で, J_n^+ は J_n の擬似逆行列である . また, I_n は $n \times n$ の単位行列であり, $l \in R^n$ を満たす任意ベクトルである . l の左上付き文字 “1” は冗長自由度を用いることにより実行される第一サブタスクを意味する . もし残りの自由度が第一サブタスク以外のサブタスクを実行できる場合, それを 2l と定義する . これはより高い次元における回避行動を意味する [7] . 以降の左上付き文字の定義も同じである . 式 (3) の右辺第 1 項は \dot{r}_{nd} を実現する \dot{q} の全空間において $\|\dot{q}\|$ を最小化するための項であり, 第 2 項は \dot{r}_{nd} の影響に関係なくマニピュレータの形状を変更できる項である . 第一回避サブタスクが第 i リンクに与えられるとき, 即ち, 第一要求回避速度 ${}^1\dot{r}_{id}$ がマニピュレータと障害物の幾何学的関係により決定させられるとき, ${}^1\dot{r}_{id}$ と \dot{r}_{nd} との関係は, 式 (3) を式 (2) に代入することにより,

$${}^1\dot{r}_{id} = J_i J_n^+ \dot{r}_{nd} + J_i (I_n - J_n^+ J_n) l \quad (4)$$

と求まる . そして以下の二つの変数を定義する .

$$\Delta^1\dot{r}_{id} \triangleq {}^1\dot{r}_{id} - J_i J_n^+ \dot{r}_{nd} \quad (5)$$

$${}^1M_i \triangleq J_i (I_n - J_n^+ J_n) \quad (6)$$

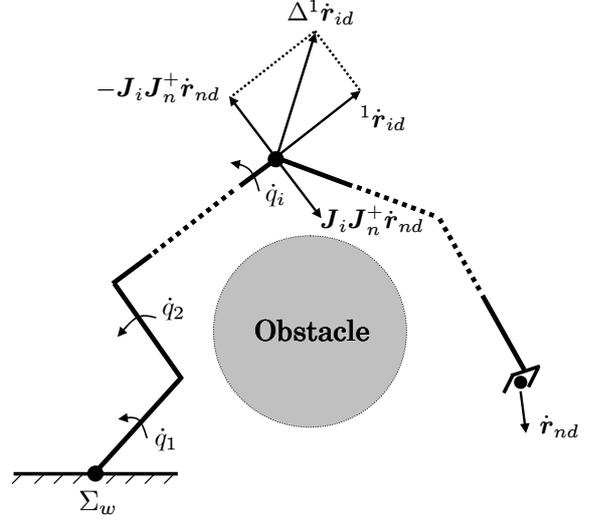


Fig. 2: Obstacle avoidance of intermediate links

式 (5) において, $\Delta^1\dot{r}_{id}$ を “第一回避速度” と呼び, 式 (6) において, 1M_i は $R^{m \times n}$ の行列で “第一回避行列” と呼ぶ . よって $\Delta^1\dot{r}_{id}$ は,

$$\Delta^1\dot{r}_{id} = {}^1M_i l \quad (7)$$

と書き換えることが出来る . ${}^1\dot{r}_{id}$ と $\Delta^1\dot{r}_{id}$ の関係を Fig.2 に示す .

続いて, 回避可操作性楕円体の二つの概念を紹介する . 一つは完全回避可操作性楕円体, もう一つは部分回避可操作性楕円体である . \dot{r}_{nd} が与えられたとき, J_i と J_n^+ は既知なので $J_i J_n^+ \dot{r}_{nd}$ を求めることが出来る . そして, ${}^1\dot{r}_{id}$ は中間の第 i リンクが障害物を回避するための目標速度として与えられる . 式 (5) により $\Delta^1\dot{r}_{id}$ を得る . しかし, 問題は $\Delta^1\dot{r}_{id}$ を実現できるかどうかである . つまり, 1M_i が既知なので $\Delta^1\dot{r}_{id}$ を実現する l をどの様に見つけるかである . 式 (7) より,

$$l = {}^1M_i^+ \Delta^1\dot{r}_{id} + (I_n - {}^1M_i^+ {}^1M_i) {}^2l \quad (8)$$

を得る . この式において, ${}^1M_i^+$ は 1M_i の擬似逆行列であり, 2l は ${}^2l \in R^n$ を満たす任意ベクトルである . また式 (8) より,

$$\|l\|^2 \geq \Delta^1\dot{r}_{id}^T ({}^1M_i^+)^T {}^1M_i^+ \Delta^1\dot{r}_{id} \quad (9)$$

を得る . ここで, l を $\|l\| \leq 1$ と制限すると, $\Delta^1\dot{r}_{id}$ の動ける範囲が

$$\Delta^1\dot{r}_{id}^T ({}^1M_i^+)^T {}^1M_i^+ \Delta^1\dot{r}_{id} \leq 1 \quad (10)$$

と制限される . $rank({}^1M_i) = m$ である場合, 式 (10) は $\Delta^1\dot{r}_{id}$ が m 次元に広がる楕円体によって描かれ, m 次元空間内で自由に実現できることを表している . この楕円体を第一完全回避可操作性楕円体といい ${}^1C P_i$ と表す .

しかし, $rank({}^1M_i) = p \leq m$ である場合はもう一つの第一回避速度 $\Delta^1\dot{r}_{id}^*$ が次式を満足する .

$$\Delta^1\dot{r}_{id}^{*T} ({}^1M_i^+)^T {}^1M_i^+ \Delta^1\dot{r}_{id}^* \leq 1 \quad (11)$$

$\Delta^1\dot{r}_{id}^*$ は p 次元に広がる楕円体によって描かれ, 第一部分回避可操作性楕円体と呼び ${}^1P P_i$ と表す .

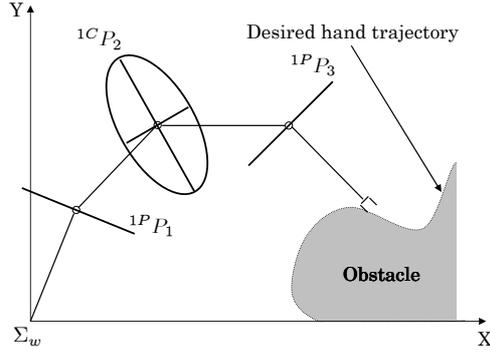


Fig. 3: Avoidance Manipulability Ellipsoids

3 回避可操作形状値 (AMSI)

ここで、全中間リンクの形状変更能力の合計によって表される回避可操作形状値 (AMSI) を紹介する。それぞれの中間リンクの形状変更能力は回避可操作性楕円体で評価される。回避可操作性楕円体の体積は形状変更能力の範囲を決定する。第 i リンクの回避可操作性楕円体の体積が最も大きいとき、第 i リンクの回避可操作性が最も良い。第 i リンクの回避可操作性楕円体の体積は、

$${}^1V_i = c_m \cdot {}^1w_i \quad (12)$$

と表される。ここで、 m は作業空間の次元数を表しており、 c_m と 1w_i はそれぞれ次の式で定義される。

$$c_m = \begin{cases} \frac{2(2\pi)^{(m-1)/2}}{1 \cdot 3 \cdots (m-2)m} & (m : \text{odd}) \\ \frac{(2\pi)^{m/2}}{2 \cdot 4 \cdots (m-2)m} & (m : \text{even}) \end{cases} \quad (13)$$

$${}^1w_i = {}^1\sigma_{i1} {}^1\sigma_{i2} \cdots {}^1\sigma_{im} \quad (14)$$

式 (14) において、 ${}^1\sigma_{i1}, {}^1\sigma_{i2}, \dots, {}^1\sigma_{im}$ は 1M_i の特異値である。

本報告では、理解しやすいように、2次元作業空間 ($m = 2$) における n リンクマニピュレータを例にとる。2次元作業空間の場合、 1V_i は体積ではなく面積である。更に、第1リンク及び第 $(n-1)$ リンクの回避可操作性楕円体は線分になる (面積は零)。しかし、マニピュレータ全体の回避可操作性を評価するにはこれら2つのリンクの回避可操作性を除外することは出来ない。そこで、これら2つの線分の長さを回避可操作性として用いる。ここで、Fig.3 に示す2次元作業空間 ($m = 2$) における4リンクマニピュレータ ($n = 4$) を例にとる。第2リンクの回避可操作性楕円体を第一完全回避可操作性楕円体と呼び ${}^1C P_2$ と表し、第1リンクと第3リンクの回避可操作性楕円体を第一部分回避可操作性楕円体と呼びそれぞれ ${}^1P P_1$ 、 ${}^1P P_3$ と表す [7]。前述の様に 1V_i は回避可操作性を表しているので 1V_i が大きいほど回避可操作性が優れている。しかし個々の 1V_i を評価しただけでは、与えられた形状によっては、第 i リンクの回避可操作性が良くて第 j リンクの回避可操作性が悪い場合があり、マニピュレータ全体の回避可操作性を評価していない。

そこで、マニピュレータ全体の回避可操作性を評価する指標を回避可操作形状値 (AMSI) 1E と呼び、

$${}^1E = \sum_{i=1}^{n-1} {}^1V_i a_i \quad (15)$$

と定義する。但し、 a_i は、2次元作業空間 ($m = 2$) における n リンクマニピュレータを例にとると

$$a_1 = a_{n-1} = 1[m^{-1}], \quad a_{2,3,\dots,(n-2)} = 1[m^{-2}] \quad (16)$$

である。但し、マニピュレータのハンドが目標位置に届かない場合は、 ${}^1E = 0$ とする。 1V_1 と ${}^1V_{n-1}$ は長さであり、 ${}^1V_{2,3,\dots,(n-2)}$ は面積であるので、 1E は単位の無い指標となる。第 i リンクの回避可操作性楕円体の形状が細長い楕円の場合、第 i リンクの先端の短軸方向への回避可操作性は悪く、長軸方向へは良いということを示している。この場合、明らかに 1V_i の面積は小さく、 1E も小さくなる。この様に、 1E はマニピュレータが目標軌道を追従する際のマニピュレータ全体の回避可操作性を評価する指標であると言える。

4 ポテンシャルを用いた回避可操作形状値 (AMSIP)

オンライン軌道追従 / 障害物回避を行うには、マニピュレータ全体の回避可操作性を保つだけでは不十分で、マニピュレータと目標対象物との距離をより遠くに保つことも重要である。その距離を計測するために、ポテンシャル空間を導入する。ポテンシャル空間はカメラにより見つけることができ、軌道計画部において作業対象物の形状の周りに自動的に作られる。Fig.4 に示したように、ポテンシャル空間 $u_k (k = 0, 1, 2, \dots, n_k)$ は作業対象物の形状に沿って Δh 間隔毎に設定される。但し、 n_k はポテンシャル空間の数を示している。そしてポテンシャル値 $v_k (k = 0, 1, 2, 3, \dots, n_k)$ は危険範囲を表しており、 $v_0 < v_1 < v_2 < \dots < v_{n_k} < 0$ と定義する。但し、 v_0 はマニピュレータが衝突したかどうかを判断する為に、とても大きな負の値とした。更に、特徴点をマニピュレータの各リンク上に設置し、その座標を $s_{ij}(x_{ij}, y_{ij}) [i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_i]$ と表す。但し、 n はマニピュレータのリンクの数を、 n_i は第 i リンク上の特徴点の数の総和を表している。特徴点 s_{ij} の評価値 $a(s_{ij})$ は、

$$\begin{cases} a(s_{ij}) = v_k & s_{ij} \in u_k \\ a(s_{ij}) = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

と定義する。将来時刻 t^* における仮想マニピュレータ形状の総ポテンシャル値 U は、

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} a(s_{ij}) \quad (18)$$

と定義する。

U の定義によって、マニピュレータが作業対象物に衝突するかどうかを判断出来る。この様に、マニピュレータの最適な形状は AMSI (1E) と総ポテンシャル値 (U) によって決めることができ、その形状はより良い回避可操作性を持ち、作業対象物からより離れている。

よって、回避可操作形状値とポテンシャル値を考慮した最適評価指標 “AMSIP” (Avoidance Manipulability Shape Index with Potential) を次の式で定義する。

$${}^1S = k_e {}^1E + k_u U \quad (19)$$

但し、 k_e と k_u は重み係数であり、 $k_e = k_u = 1$ と設定した。

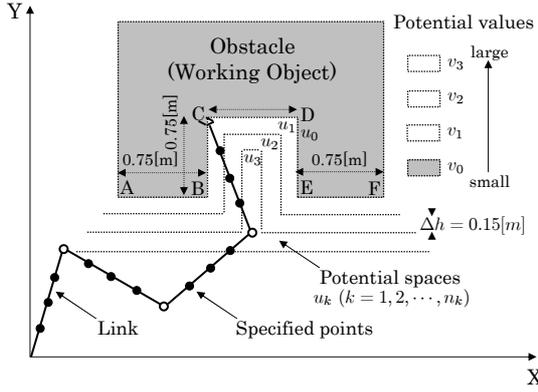


Fig. 4: Potential Spaces and Specified Points

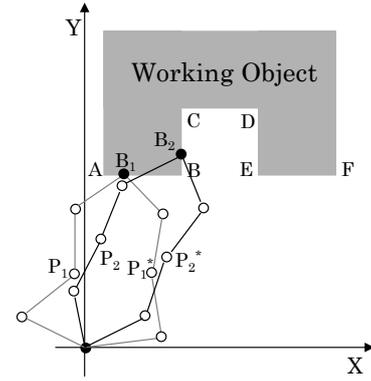
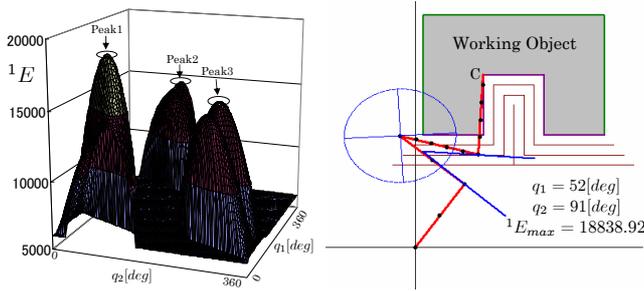
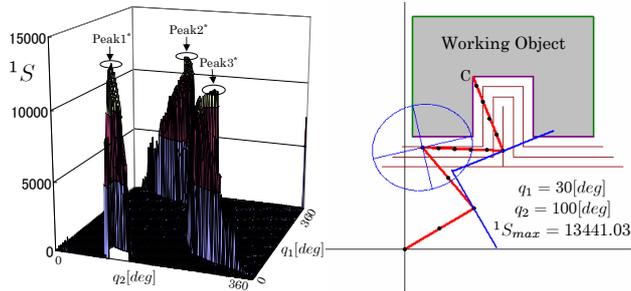


Fig. 7: The concept of single-preview control



(a) Distribution of 1E (b) Shape of $Peak1$

Fig. 5: Distribution of 1E and the Manipulator's Optimal Shape of the Highest $Peak1$



(a) Distribution of 1S (b) Shape of $Peak1^*$

Fig. 6: Distribution of 1S and the Manipulator's Optimal Shape of the Highest $Peak1^*$

続いて AMSI と AMSIP の比較を行う。Fig.4 において マニピュレータのハンドが位置 C に固定されていて、各リンクの長さが $100[cm]$ ($l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 100[cm]$) のとき、 q_1 と q_2 についての AMSI 分布を Fig.5(a) に示す。 q_1 と q_2 は第 1 リンクと第 2 リンクの関節角度である。また AMSIP 分布を Fig.6(a) に示した。Fig.4 に示したように、本報告では 3 つのポテンシャル空間を設定し、それぞれのポテンシャル値を $v_0 = -40000$, $v_1 = -3000$, $v_2 = -25$, $v_3 = -5$ と設定した。Fig.5(a) と Fig.6(a) を比較すると、 1S の頂点の形状が 1E の頂点の形状より低く細くなっており、更に AMSIP 分布では ${}^1S < 0$ となる部分が多く存在する。Fig.5(b) に示したように、 $Peak1$ に対応するマニピュレータの形状は最善の回避可操作性を持っているにも拘らず、マニピュレータが作業対象物と衝突している。しかし Fig.6(b) に示したように、 $Peak1^*$ に対応するマニピュレータの形状は衝突を回避している。Fig.5 と Fig.6 を比較することで、AMSIP が AMSI より

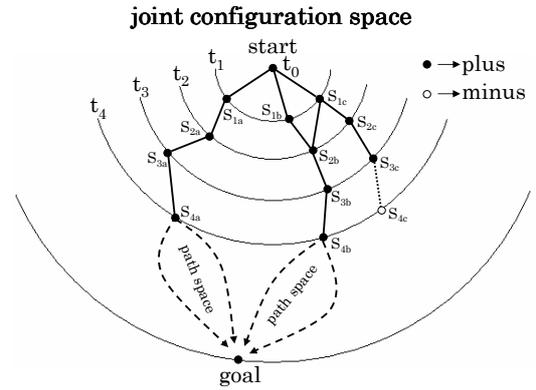


Fig. 8: The concept of multi-preview control

効果的であることを検証した。

5 プレビュー制御の概念

マニピュレータのハンド位置は軌道に沿って動き、その一方で、変化するハンド位置に対応した関節形状も衝突することなく軌道追従を完遂するために変化する。更に、冗長性とは一つのハンド位置が関節形状空間の部分空間に対応していることを表している（冗長性問題解決手法）。故に、我々の研究における軌道追従問題は、到達可能性問題（全ての時間において全ての最適な解決策をどのように目標形状に結びつけるか）とオンライン最適化問題（それぞれの変化する時間においてたくさんの解決策の中からどのように最適な解決策を選ぶか）という下位問題を含む。Fig.7 ではシングルプレビュー制御の概念を説明している。ハンドが B_1 の位置にあるとき、衝突を回避できる二つのマニピュレータ形状が存在する (P_1 と P_1^*)。しかしハンドが B_2 の位置に到達するとき、 P_2 と P_2^* で定義された二つの形状のうち P_2^* の形状のみが衝突を回避できる。ハンド位置が B_1 のときに P_1 の形状が選択されたとき、角 B 付近で P_2^* の様な形状へ変更するために各リンクの角速度は高い値になり、要求された角速度が規定の最大角速度を超えた時、マニピュレータが角 B に衝突してしまう。故に、マニピュレータの形状は将来形状 P_2^* に似た形状 P_1^* に準備されなければならない。

この様にシングルプレビュー制御は将来の衝突可能性

を評価した最適な形状 P_2^* を参照することにより現在の形状 P_1^* を制御する方法である。マルチプレビュー制御法は、回避可操作性で評価された到達可能性を満足してオンライン軌道追従と障害物回避を達成するために、複数の将来の最適な形状を用いて現在の形状を制御する。Fig.8はマルチプレビュー制御の概念を説明している。Fig.8では時刻はそれぞれ t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 と定義されている。そして“●”はそれぞれの将来時刻における部分的な最適形状を表しており、その評価値は正で $t = t_1$ のとき S_{1a}, S_{1b}, S_{1c} と定義する。 $t = t_2, t_3, t_4$ のときも同様である。現時刻が $t = t_0$ のとき、つまりマニピュレータが初期形状であるとき、最適な到達可能経路は $S_{ij} (i = 1, 2, 3; j = a, b, c)$ を評価することにより $S_{1c} \rightarrow S_{2c} \rightarrow S_{3c}$ と選ばれる。他の可能な経路 $S_{1a} \rightarrow S_{2a} \rightarrow S_{3a}, S_{1b} \rightarrow S_{2b} \rightarrow S_{3b}$ そして $S_{1c} \rightarrow S_{2b} \rightarrow S_{3b}$ は第二第三の最適な経路である。そして時刻 $t = t_1$ の形状は S_{1c} に制御される。現時刻が $t = t_1$ のとき、 S_{1c} からの将来の可能経路 $S_{2b} \rightarrow S_{3b} \rightarrow S_{4b}$ と $S_{2c} \rightarrow S_{3c} \rightarrow S_{4c}$ が評価される。 S_{4c} の値は負であり“○”で表され、可能経路 $S_{3c} \rightarrow S_{4c}$ は周囲の物や目標対象物との衝突を避けることが出来ないことを意味する。従って、最適な経路を $S_{2b} \rightarrow S_{3b} \rightarrow S_{4b}$ として選ぶ必要がある。その様な将来形状経路の評価と可能な経路変更を用意することで、マルチプレビュー制御システムは将来時刻の衝突に繋がる危険な経路を避け、現在の形状から目標形状までの到達可能性を拡大することが出来る。

6 マルチプレビュー制御

Fig.9に示したプレビュー制御システムは実時間計測部、軌道計画部、制御部、冗長マニピュレータの4つの部分から構成される。現時刻を t 、将来時刻を $t^* = t + \tilde{t}$ と仮定する。但し、 \tilde{t} はプレビュー時間である。計測部では、将来時刻 t^* における目標対象物表面上の目標ハンド位置 $r_d(t^*)$ を見つけることが出来る。軌道計画部ではポテンシャル空間を自動的に形成し、将来時刻 t^* における目標関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ を出力する。これは1-Step GAにより決定された非衝突を満たす仮想マニピュレータである。制御部では、現在の関節角度 $q(t)$ を将来の目標関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ に近づける目標関節角速度 $\dot{q}(t)$ を出力する。目標速度 $\dot{r}_{nd}(t)$ が与えられたとき、 $\dot{q}_d(t)$ は式(3)で表される。軌道追従及び障害物回避は任意ベクトル 1l によって実行される。ここで、 1l は現在の関節角度 $q(t)$ を将来時刻の非衝突必要条件を満たす $\tilde{q}_d(t^*)$ に近づけるために決定され、次の様に表される。

$${}^1l = K_v [\tilde{q}_d(t^*) - q(t)] \quad (20)$$

但し、 K_v はゲインを表す正定値の対角行列 $K_v = \text{diag}[k_{v1}, k_{v2}, \dots, k_{vn}]$ である。

式(20)を式(3)に代入することで、現在の形状 $q(t)$ を制御するために非衝突必要条件を満たす将来時刻の最適な関節角度 $\tilde{q}_d(t^*)$ を用いるプレビュー制御システムを構成する。式(20)は、ある一つの将来時刻 t^* の仮想マニピュレータの形状のみを参照しているのでシングルプレビュー制御である。シングルプレビュー制御を用いた場合、 $t^* = 11[s]$ における1-step GAによって見つかった 1S の最大値 ${}^1S_{GAmax}$ とそれに対応する形状をFig.10に示す。また、 $t^* = 12[s]$ における ${}^1S_{GAmax}$ とそれに対応する形状をFig.11に示す。Fig.10とFig.11を見ると、Fig.10(b)に示した $t^* = 11[s]$ における最適な形状が、

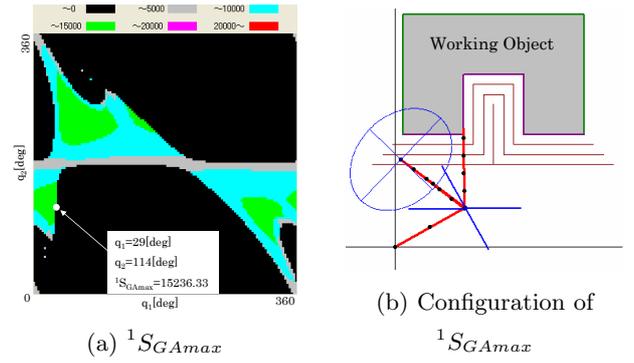


Fig. 10: ${}^1S_{GAmax}$ and configuration corresponding to ${}^1S_{GAmax}$ found by 1-step GA when $t^* = 11[s]$

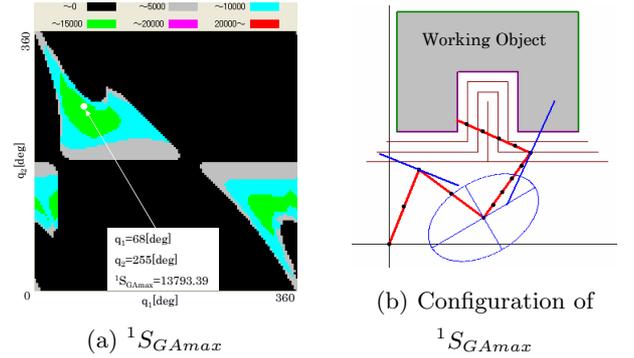


Fig. 11: ${}^1S_{GAmax}$ and configuration corresponding to ${}^1S_{GAmax}$ found by 1-step GA when $t^* = 12[s]$

Fig.11(b)に示した $t^* = 12[s]$ における最適な形状に到達することが出来ないことが分かる。何故なら、Fig.10(a)とFig.11(a)を見比べると両者の間には黒色で描かれた危険地域が存在するからである。この状況では、一つの将来時刻における最適な形状だけでは変化する環境の情報が限られているので、実マニピュレータの到達可能性を解決できない。

マルチプレビュー制御は、現時刻 t における形状を制御するのに、将来時刻 $t_i^* = t + i\tilde{t} (i = 1, 2, \dots, p)$ における複数の最適な形状を用いており、現在の形状を衝突することなく制御するだけでなく高い到達可能性を保ちつつ制御する手法である。但し、 p は仮想マニピュレータの数である。例えば $p = 3$ のとき、現在の形状を制御するために3つの異なる将来時刻 $t + \tilde{t}, t + 2\tilde{t}, t + 3\tilde{t}$ における最適な形状を用いることを意味する。マルチプレビュー制御では、式(3)の制御変数 1l は次の様に定義できる。

$${}^1l = K_v \left[\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*) - q(t) \right] \quad (21)$$

但し、 K_v は正定値の対角行列であり $K_v = \text{diag}[k_{v1}, k_{v2}, \dots, k_{vn}]$ と表される。また、 $\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*)$ はマルチプレビュー制御で得られた将来時刻の最適形状で、 k_i は $0 < k_i < 1$ と $\sum_{i=1}^p k_i = 1$ を満たす重み付け係数である。マルチプレビュー制御を用いることでより多くの環境情報を得ることが出来る。

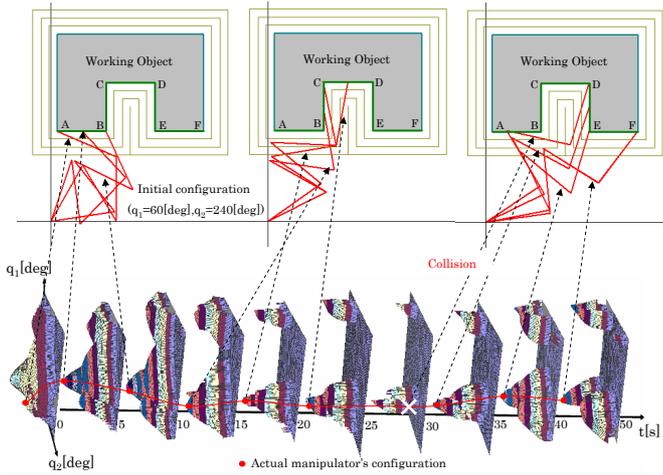


Fig. 12: Actual manipulator's configurations in whole tracking process when we use single-preview control

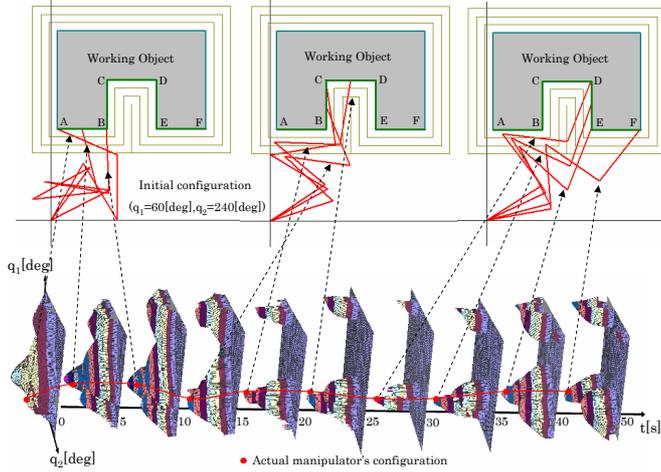


Fig. 13: Actual manipulator's configurations in whole tracking process when we use three-preview control

から、 $33[m.s]$ 以内に可能な限り速くより良い遺伝子個体を見つける必要がある。従って、本報告では、1-step GA を採用した。1-step GA を用いることで、マニピュレータのハンドが与えられた6つの位置に固定されているとき、最適な形状を探索する実験の結果を、表1に示す。但し、 ${}^1S_{GAmax}$ は1-step GA により見つかった最適な 1S であり、 q_{GA1} と q_{GA2} は ${}^1S_{GAmax}$ に対応した第1リンクと第2リンクの関節角度である。更に、同じ実験を全探索法を用いて行い、その結果を表2に示す。但し、 ${}^1S_{Max}$ は広域区間の実際の最適な 1S であり、 q_{Max1} と q_{Max2} は ${}^1S_{Max}$ に対応した第1リンクと第2リンクの関節角度である。表1と表2を比較すると、 ${}^1S_{GAmax}$ が ${}^1S_{Max}$ の近くに存在していることが分かる。これは1-step GA が有効だということを示している。

表 2: The results found by global exploration

Position	$q_{Max1}[deg]$	$q_{Max2}[deg]$	${}^1S_{Max}$
A	82	105	20140.69
B	51	102	18684.81
C	30	100	13441.03
D	30	100	13614.74
E	25	97	16399.25
F	8	84	14656.65

8 シミュレーション

シミュレーションで用いる目標軌道を Fig.4 に示す。目標軌道は区間 A-B, 区間 B-C, 区間 C-D, 区間 D-E, 区間 E-F の5つの区間からなる。A 点の座標は $(10cm, 140cm)$ に固定されており、それぞれ区間の軌道の長さは $l_{A-B} = l_{B-C} = l_{C-D} = l_{D-E} = l_{E-F} = 75[cm]$ である。マニピュレータの各リンクの長さは $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 100[cm]$ とした。シミュレーションの実行時間は $50[s]$ である。

8.1 シングルプレビュー制御を用いたシミュレーション

シングルプレビュー制御を用いて幾つかのシミュレーションを行い、その結果を Fig.12 に示す。シングルプレビュー時間 \tilde{t} を $10[s]$ とした。Fig.12 において、赤い点は、10個の異なる時刻における実際のマニピュレータの 1S を表しており、それぞれの 1S に対応する形状を上図に示した。赤い点を結んだ赤線は実際のマニピュレータの 1S の変化を示している。Fig.12 より、実際のマニピュレータが $t = 30[s]$ のときに作業対象物と衝突していることを除けば、オンライン軌道追従をほぼ達成しているといえる。

8.2 マルチプレビュー制御を用いたシミュレーション

3つの将来時刻を使ったマルチプレビュー制御を用いてシミュレーションを行い、その結果を Fig.13 に示した。3つの将来時刻はそれぞれ $t_1^* = t + \tilde{t}$, $t_2^* = t + 2\tilde{t}$, $t_3^* = t + 3\tilde{t}$ であり、 $\tilde{t} = 5[s]$ とした。また、式 (21) 導入した重み付け係数をそれぞれ $k_1 = 0.3$, $k_2 = 0.65$, $k_3 = 0.05$ とした。この様に、3つの将来時刻 $t_1^*(t+5[s])$, $t_2^*(t+10[s])$, $t_3^*(t+15[s])$ における仮想マニピュレータの最適な形状を用いて実際のマニピュレータの形状を制御した。Fig.13 より、シングルプレビューを用いたシミュレーションで $t = 30[s]$ のときに発生した衝突が、マルチプレビュー制御を用いたことにより衝突が回避されていることが分かる。そして、実際のマニピュレータが衝突することなくオンラインで軌道追従を達成し、尚且つ回避可操作性を高く保っていることが分かる。

9 結言

本論文では、冗長マニピュレータのオンライン軌道追従と障害物回避を達成するために、到達可能性を考慮したマルチプレビュー制御を用いた新しい手法を提案した。シミュレーションによって、シングルプレビュー制御とマルチプレビュー制御を比較することで、マルチプレビュー制御の有効性を検証した。

参考文献

- [1] Rodrigo S. Jamisola, Jr. Anthony A. Maciejewski, Rodney 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.
- [2] Juan Manuel Ahuactzin and Kamal 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.
- [3] Homayoun Seraji and Bruce Bon, “Real-Time Collision Avoidance for Position-Controlled Manipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.4, pp.670-677, 1999.
- [4] Leon Zlajpah and Bojan Nemec, “Kinematic Control Algorithms for On-line Obstacle Avoidance for Redundant Manipulator”, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, pp.1898-1903, 2002.
- [5] Tsuneo Yoshikawa, “Measure of Manipulability for Robot Manipulators”, (in Japanese) *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.2, No.1, pp.63-71, 1984.
- [6] Tsuneo Yoshikawa, “Manipulability of Robot Mechanisms”, (in Japanese) *The International Journal of Robotics Research*, Vol.4, No.2, pp.3-9, 1985.
- [7] Mamoru Minami, Yoshihiro Nomura and Toshiyuki Asakura, “Avoidance Manipulability of Redundant Manipulators”, (in Japanese) *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.17, No.6, pp.887-895, 1999.
- [8] Mamoru Minami, Yoshihiro Nomura, Toshiyuki Asakura, “Trajectory Tracking and Obstacle Avoidance Control to Unknown Objects for Redundant Manipulators Utilizing Preview Control”, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, no.95-1813, pp.3543-3550, 1996.