

回避可操作性を考慮した冗長マニピュレータのマルチプレビュー制御

福井大学 ○中村 優作, Tongxiao Zhang, 見浪 護

Multi-preview Control of Redundant Manipulators Based on Avoidance Manipulability

○ Yusaku NAKAMURA, Tongxiao ZHANG and Mamoru MINAMI, University of Fukui

Abstract: This paper proposes a new approach named Multi-Preview Control to achieve an on-line control of trajectory tracking and obstacle avoidance for redundant manipulators. Multi-Preview Control uses several future optimal configurations to control current configuration to complete task of trajectory tracking and obstacle avoidance on-line with higher avoidance manipulability and reachability.

1 緒言

冗長マニピュレータの運動に関する論文が多くあり、論文の中でどのように冗長性を用いるかが議論されている。現在提案されている手法は大きく2種類 (Global Methods [1],[2] と Local Methods [3],[4]) に分別できる。Global Methods は軌道計画法に代表されるように構造化された静的な環境に適しており、Local Methods は構造化されていない動的な環境に適している。Local Method のシステムは、限られた環境情報を基にマニピュレータの形状を制御できるように設計される。

本研究の目標は、マルチプレビュー制御法という新しい制御法を導入することで Global Method と Local Method とのギャップを埋めることである。もし、軌道計画法に必要な将来の情報を Local Method で使うことが出来れば、Local Method における実時間形状制御がよりロバストな制御になると考える。

我々が提案するシステムを Fig.1 に示す。研磨作業などを想定したこのシステムでは、カメラとマニピュレータは同時に動き、作業対象物を写したカメラ画像を基にハンドの目標軌道と将来時刻のマニピュレータのハンド位置を求め、マニピュレータの形状を決定し制御する。作業対象物はカメラ画像の範囲に納まりきれない大きさであると仮定する。故に Fig.1 ではカメラ画像の範囲が作業対象物より小さく表現されている。その為、カメラ画像内に障害物が現れた時は、マニピュレータは衝突を回避するために形状を変更しなければならない。

これまでの研究で、マニピュレータの形状を評価する指標として、可操作性楕円体からヒントを得た回避可操作性楕円体を提案し、更に作業対象物の周りにポテンシャル空間を設定しマニピュレータと作業対象物との距離を考慮した AMSIP という評価指標を提案した。AMSIP を用いることで、回避可操作性が高く作業対象物から離れている形状を見つけることができる。

また以前の研究では、Local Method に属するシングルプレビュー制御法を提案した。シングルプレビュー制御法とは、ある将来時刻で非衝突である最適な形状 (仮想マニピュレータと呼ぶ) を参照し、実際のマニピュレータ (実マニピュレータと呼ぶ) を制御する制御法である。一方、本研究で提案するマルチプレビュー制御法は Global Method と Local Method の中間に位置する新しい制御法である。マルチプレビュー制御法では複数の仮想マニピュレータを参照することで実際のマニピュレータを制御する。その意味でマルチプレビュー制御法は Global Method と Local Method の中間に位置している。

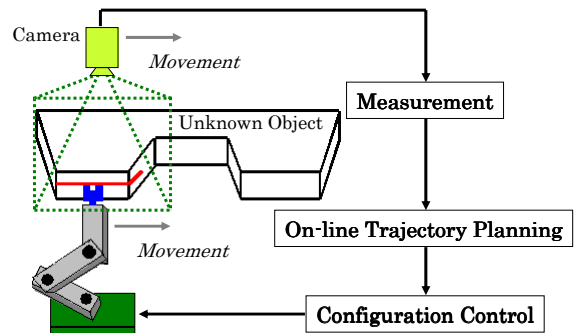


Fig. 1: Processing system for unknown object

2 マルチプレビュー制御法

2.1 プレビュー制御の概念

プレビュー制御システム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マニピュレータの形状に、実マニピュレータの形状を近づける制御方法である。非衝突である仮想マニピュレータの形状は 1-step GA により決定する。プレビュー制御は実マニピュレータの腕形状に将来時刻の非衝突条件を満たす仮想マニピュレータの腕形状を反映させ、将来衝突が起こらないように予め準備しておくものであり、全体の制御系を Fig.2 に示す。但し、Fig.2 はマルチプレビュー制御の制御系である。現在の時刻を t 、現時刻より $i\tilde{t}$ 秒後の時刻を t_i^* とすると、 $t_i^* = t + i\tilde{t}$ となる。この \tilde{t} をプレビュー時間と呼ぶ。また i は参照する将来時刻の数であり、 $i = 1$ の時はシングルプレビュー制御、 $i \geq 2$ のときはマルチプレビュー制御となる。

2.2 シングルプレビューとマルチプレビューの比較

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為に、Fig.3 にマニピュレータの形状空間を示した。Fig.3 において現時刻を t_0 とし、将来時刻を t_1, t_2, t_3, t_4 とする。そして各将来時刻におけるマニピュレータの形状が3つずつあると仮定する ($S_{ia} \sim S_{ic}, i = 1, \dots, 4$)。それぞれの形状は評価指標である AMSIP の値を保持しており、それを \bullet と \circ で示す。 \bullet は AMSIP 値が正である事を表している。つまり、作業対象物と衝突していない安

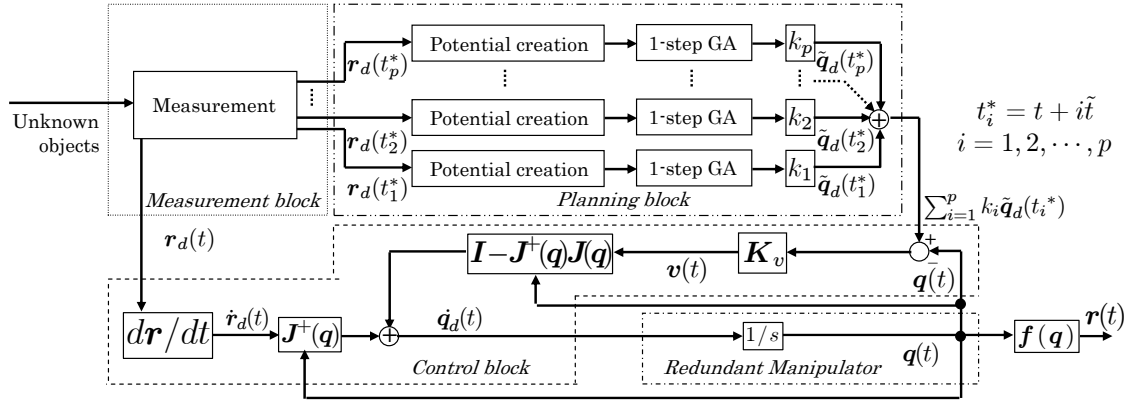


Fig. 2: Multi preview control system

全な形状を表している。一方、 \circ は大きな負の AMSIP 値を表しており、作業対象物と衝突している形状を表している。また、それぞれの将来時刻における形状の AMSIP 値が $S_{1a} < S_{1b} < S_{1c}$ ($i = 1, \dots, 4$) であると仮定する。更に、実線で結ばれた形状同士は変更可能であるが、実線で結ばれていない場合は形状の変更が出来ないことを表している。例えば、 S_{1b} から S_{2b} への形状変更は実現可能であるが、 S_{1b} から S_{2a} への形状変更は実現できない。破線は、実現可能であるが、衝突形状へ変更されてしまうことを表している。この場合、システムは衝突を回避するために停止しなければならない。

シングルプレビュー制御を用いた場合、現時刻 t_0 において参照する将来時刻は t_1 のみである。ここで、更に先の将来時刻である t_2, t_3, t_4 は参照できないことに注意して頂きたい。現時刻 t_0 の形状から変更できる将来時刻 t_1 の形状は3つあり、システムはそれぞれの評価値を計算して比較する。その結果 S_{1c} が最も高い値を持っているので、その形状が仮想マニピュレータの形状として選択され、システムは S_{1c} へ形状を変更するように制御する。同様に時刻 t_1 の時、将来時刻は t_2 であり、 S_{1c} から変更可能な形状は2つあるので、それぞれの形状を評価することで将来時刻 t_2 の形状として S_{2c} が選択され、その形状に変更するように制御する。時刻 t_2 の時、将来時刻は t_3 であるが、形状変更可能な形状は1つ (S_{3c}) しかないので、 S_{3c} へ形状を変更するように制御する。時刻 t_3 の時も同様に、将来時刻 t_4 における形状変更可能な形状は1つ (S_{4a}) なのでその形状へ変更するように制御するが、 S_{4a} は作業対象物と衝突する形状を表しているため、システムは停止しなければならない。この様に、シングルプレビュー制御法では参照する仮想マニピュレータの数が少ない、つまり、参照する将来時刻の情報が少ないので、作業を完遂することができない可能性がある。

次に、マルチプレビュー制御を用いた場合について考える。ここでは参照する仮想マニピュレータの数を3つとする。現時刻 t_0 において参照する将来時刻は t_1, t_2, t_3 である。実現可能な経路は複数あるが、システムはそれぞれの評価値を計算して比較することで、最も高い値を持つ経路 $S_0 \rightarrow S_{1c} \rightarrow S_{2c} \rightarrow S_{3c}$ を選択し、将来時刻 t_1 の形状として S_{1c} が選ばれ、制御される。時刻 t_1 の時、参照する将来時刻は t_2, t_3, t_4 である。実現可能な経路が2つあるが、経路 $S_{1c} \rightarrow S_{2c} \rightarrow S_{3c} \rightarrow S_{4a}$ は衝突形状を含んだ経路であるため、経路 $S_{1c} \rightarrow S_{2b} \rightarrow S_{3b} \rightarrow S_{4c}$ より評価値

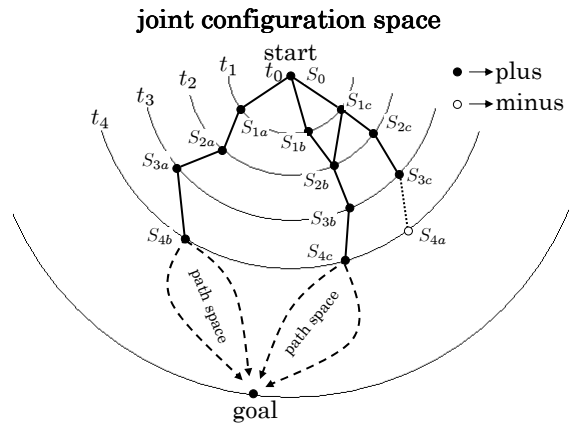


Fig. 3: Concept of single-preview and multi-preview

が低くなる。従って、システムは後者の経路を選び、将来時刻の形状として S_{2b} が選ばれ制御される。この様にマルチプレビュー制御は複数の将来時刻の情報を得ることが出来るので、衝突する形状を排除することができる。従ってマルチプレビュー制御法を用いれば、マニピュレータが作業を完遂する可能性が増える。

2.3 マルチプレビュー制御

Fig.2 に示したマルチ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。計測部では将来時刻 t_i^* における作業対象物表面上の目標ハンド位置 $r_d(t_i^*)$ を計測する。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_i^* における目標関節角度 $\tilde{q}_d(t_i^*)$ 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の形状である。制御部では現在の関節角度 $q(t)$ を、仮想マニピュレータの形状を足し合わせた $\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*)$ に近づける目標関節角速度 $\dot{q}_d(t)$ を出力する。但し、 $\sum_{i=1}^p k_i = 1$ とする。冗長マニピュレータでは目標関節角速度 $\dot{q}_d(t)$ によって各関節を動かす。

制御部を実現するマルチプレビュー制御式は次の様に書ける。

$$\begin{aligned} \dot{q}_d(t) &= J_n^+ \dot{r}_{nd} \\ &+ (I_n - J_n^+ J_n) K_v \left(\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*) - q(t) \right) \quad (1) \end{aligned}$$

但し、式(1)で $n \times 1$ 行列である $\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*) - q(t)$ は次の様に定義する。

$$\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*) - q(t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_{1d}(t_i^*) - q_1(t) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_{jd}(t_i^*) - q_j(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)において、 j は冗長自由度を表し、その冗長性はマニピュレータの関節角度である q_1 から q_j で使われる。

3 シミュレーション

マルチプレビュー制御とシングルプレビュー制御の効果を比較するためにシミュレーションを行った。シミュレーションは、三菱重工業製の7関節汎用ロボット PA10 をモデル化して行った。シミュレーションの概観を Fig.4 に示す。我々が提案するシステムでは、カメラで作業対象物を映しシステム自身が目標軌道を決定するが、このシミュレーションでは予め目標軌道を与えることとする。つまり、Fig.2 の実時間計測部はこのシミュレーションでは考慮せず、将来時刻の仮想マニピュレータのハンド位置を与えることとする。マニピュレータのハンドが追従する目標軌道 r_d は次式で定義される。

$$r_d = \begin{cases} r_{dx} = -0.8[m] \\ r_{dy} = -0.5 + 0.05t[m] \\ r_{dz} = 0.6[m] \end{cases} \quad (3)$$

シミュレーションは 18[s] で終了するように設定した。

シミュレーションではマニピュレータのハンドの作業空間を 5 次元 $(x, y, z, \omega_y, \omega_z)$ に設定した。つまりマニピュレータにはハンドタスクとして位置 (x, y, z) と姿勢(角速度ベクトル ω_y, ω_z) を与える。ハンド位置は式(3)で与えられ、姿勢は $\omega_y = 0, \omega_z = 0$ と設定した。PA10 は 7 自由度を有する 7 リンクマニピュレータであるので、この場合 PA10 は 2 冗長自由度を持つこととなる。その 2 冗長自由度を第一関節 q_1 と第二関節 q_2 に与え、PA10 の逆運動学を解くことで残りの関節角度 q_3 から q_7 を求める。

シミュレーションの流れは次の通りである。まず、マニピュレータのハンド位置姿勢を与え任意で初期形状 $q(t)$ を決定する。次に、将来時刻 t_i^* のハンド位置 $r_d(t_i^*)$ を式(3)で求め、将来時刻における最適な形状 $\tilde{q}_d(t_i^*)$ を決定する。本研究では 2 冗長自由度を q_1 と q_2 に与えるが、評価指標 AMSIP と 1-step GA を用いることで q_1 と q_2 を決定することができる。AMSIP 分布は q_1 と q_2 と AMSIP 値を軸とする 3 次元の分布となりピークが幾つか存在する。AMSIP 値が大きいほど形状変更能力が高く作業対

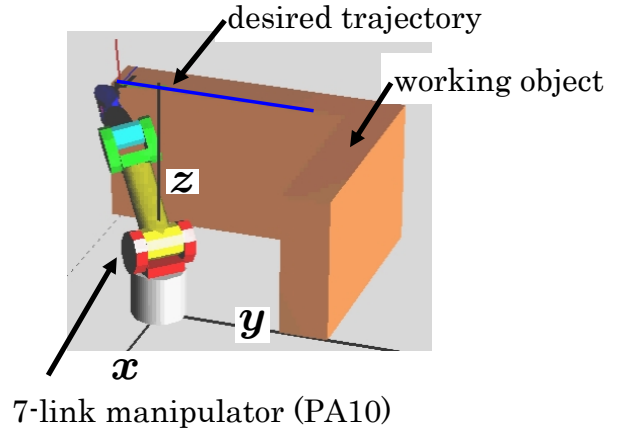


Fig. 4: Appearance of simulation environment

象物と接近していない形状であると言えるので、分布のピークを探索するために 1-step GA を用いる。 q_1 と q_2 が決定したら、逆運動学を解くことで $q_3 \sim q_7$ が求まるので、最適な形状 $\tilde{q}_d(t_i^*)$ を決定することができる。そして、将来時刻の最適な形状を基に式(1)の制御式により目標関節角速度 $\dot{q}_d(t)$ が求まる。更に積分することによって目標角度 $q_d(t)$ が求まり、マニピュレータの形状 $q(t)$ が $q_d(t)$ に近づく。この操作を繰り返すことでマニピュレータを制御する。

シングルプレビュー制御を用いたシミュレーションではプレビュー時間 \tilde{t} を 3[s] と設定したので、将来時刻 t^* は $t^* = t + 3[s]$ と計算できる。一方、マルチプレビュー制御を用いたシミュレーションでは参照する仮想マニピュレータの数を 3 つと設定し、プレビュー時間 \tilde{t} を 3[s] と設定したので、将来時刻 t_i^* は $t_i^* = t + 3i[s], i \in [1, 3]$ と計算できる。

シミュレーションの結果を Fig.5 ~ Fig.10 に示す。Fig.5 ~ Fig.7 はシングルプレビュー制御を用いた場合の結果であり、Fig.8 ~ Fig.10 はマルチプレビュー制御を用いた場合の結果である。それぞれの図には、マニピュレータの形状と AMSIP 分布が示されている。

Fig.5 ~ Fig.10 の AMSIP 分布は 3 秒後の将来時刻における分布である。分布内の \circ は実マニピュレータの形状 $q(t)$ を示しており、 \bullet は仮想マニピュレータの形状 $\tilde{q}_d(t^*)$ または $\sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_d(t_i^*)$ を示している。Fig.5 ~ Fig.7 及び Fig.8 ~ Fig.10 を見ると \circ が \bullet に近づいていることが分かる。これは制御式(1)が正しく働いていることを意味する。Fig.5 ~ Fig.7 より、シングルプレビュー制御を用いた場合はマニピュレータの形状の変化が少ない事が分かる。Fig.8 ~ Fig.10 より、マルチプレビュー制御を用いた場合はマニピュレータの形状が大きく変わっていることが分かる。Fig.8 の形状のまま軌道追従を続けた場合マニピュレータは作業対象物と衝突してしまうが、マルチプレビュー制御法を用いることでより先の将来時刻の情報を得ることができるため、 $t = 3[s]$ 以降、作業対象物から離れて衝突を回避するように形状を変更していることが分かる。Fig.7 と Fig.10 を見比べると、Fig.7 のマニピュレータの方が作業対象物に近づいているので、シングルプレビュー制御とマルチプレビュー制御の違いは明らかであり、マルチプレビュー制御法の有効性を示すことができた。

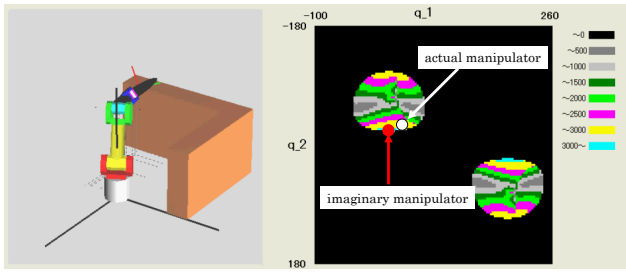


Fig. 5: Configuration and AMSIP distribution by using single-preview at $t = 3[s]$

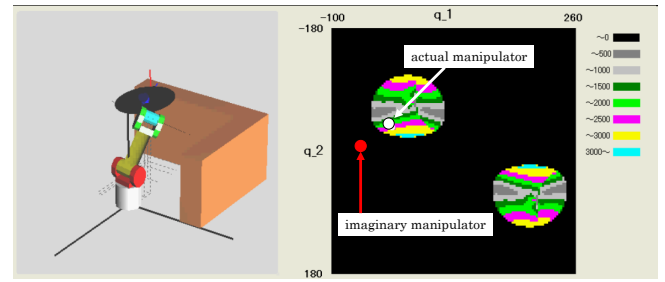


Fig. 8: Configuration and AMSIP distribution by using multi-preview at $t = 3[s]$

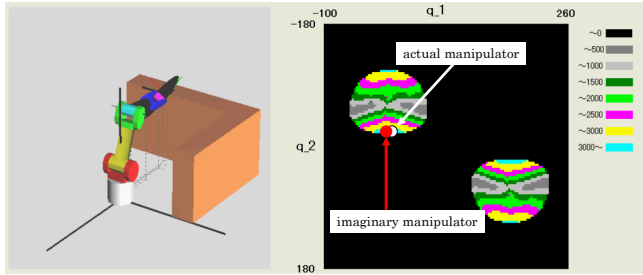


Fig. 6: Configuration and AMSIP distribution by using single-preview at $t = 9[s]$

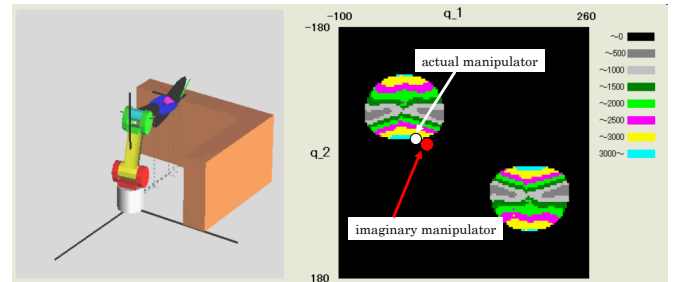


Fig. 9: Configuration and AMSIP distribution by using multi-preview at $t = 9[s]$

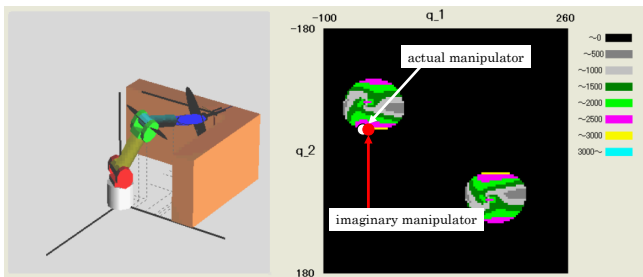


Fig. 7: Configuration and AMSIP distribution by using single-preview at $t = 18[s]$

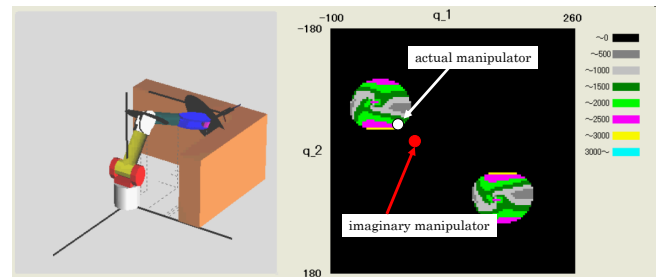


Fig. 10: Configuration and AMSIP distribution by using multi-preview at $t = 18[s]$

4 結言

本論文では、マニピュレータの形状を制御するマルチプレビュー制御法という新しい手法を提案した。シミュレーションからシングルプレビュー制御法よりマルチプレビュー制御法が有効であることが示された。

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, 2006, pp.603-612.
- [2] Juan Manuel Ahuactzin, Kamal K. Gupta “The Kinematic Roadmap: A Motion Planning Based Global Approach for Inverse Kinematics of Redun-

dant Robots”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15, No.4, 1999, pp.653-669.

- [3] Leon Zlajpah, Bojan Nemeč, “Kinematic Control Algorithms for On-line Obstacle Avoidance for Redundant Manipulator”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, pp.1898-1903.
- [4] Homayoun Seraji, Bruce Bon, “Real-Time Collision Avoidance for Position-Controlled Manipulators”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15, No.4, 1999, pp.670-677.