

手先軌道追従時における回避可操作性に基づく 冗長空間内大域的形状変更能力の評価

○小林洋祐 見浪護 矢納陽 (岡山大学)

Global Reconfiguration Capability Evaluation in Redundant Space Based on Avoidance Manipulability while Tracking Target Trajectory

*Y. Kobayashi, M. Minami and A. Yanou (Okayama University)

Abstract— This paper shows global reconfiguration capability evaluation for redundant manipulator while its hand tracking target trajectory and the intermediate links avoiding obstacle. In this research, we propose one approach for an automation system composed of redundant manipulator and movable camera being able to observe on-line unknown objects without any preparations. In a such system, the configuration of the robot should always be prepared to keep the highest avoidance manipulability to evade the object quickly that may appears suddenly in the moving camera view. We evaluate configuration varieties of manipulator by using the index representing Avoidance Manipulability Shape Index with Potential (AMSIP).

Key Words: Redundant manipulator, Reconfiguration, Avoidance Manipulability, Preview Control.

1 緒 言

冗長マニピュレータは溶接作業や研磨作業などの用途に用いられている。そのような作業ではマニピュレータの手先軌道追従と障害物回避が必要となる。特に後者は、入り組んだ場所での作業や作業対象物自体が障害物となるような複雑な形状に対して作業を行う場合に重要となる。そこで冗長性をどのように利用するかが多くの論文で議論されているが、現在提案されている手法は2種類 (Global Method と Local Method) に大別できる。Global Method は障害物に衝突しない腕形状や軌道を形状空間で大域的に見つけたのち作業を行わせるため、構造化された静的な環境に適しているが、計算量が多いためオフライン環境で計画を生成しなければならない。一方、Local Method は動的に変化する環境に適応でき、空間的に限られた情報に基づいて形状制御を行うため、オンライン環境で作業することも可能である。

本研究で考えるシステムを Fig.1 に示す。このシステムは Local Method に属しており、未知の作業対象物をカメラにより認識し、逐次明らかになる作業対象物の形状からハンドの目標軌道を決定し作業を行う。したがって、作業対象物自身が障害物となるような複雑な形状に対して作業する場合においても、迅速な回避行動が行えるようにマニピュレータの回避能力を常に高く維持する必要がある。先行研究では、マニピュレータの回避能力を評価する指標として、ポテンシャルを考慮した回避可操作性形状値 (AMSIP) を提案しその有効性が示されたため、本論文では AMSIP を用いて冗長マニピュレータの形状変更能力を評価した。

2 マニピュレータ形状評価指標

2.1 リンク可操作性楕円体

リンク可操作性楕円体は、マニピュレータのハンドにタスクが与えられていない場合、あるリンクの先端がどの方向にどれだけ速度を出せるのかを表すものである。各リンクの動きやすさを関節角速度を用いて考える。

n リンクマニピュレータを考え、第 i リンク先端の

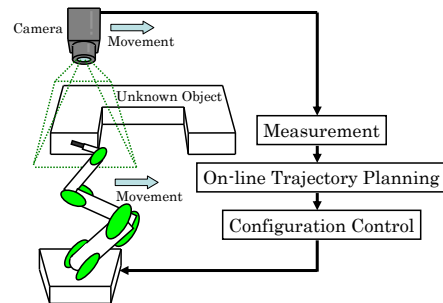


Fig. 1: Processing System for unknown object

位置・姿勢を表すベクトルを $\mathbf{r}_i \in R^m (i = 1, 2, \dots, n; m$ は作業空間の次元; $m < n$) とする。 $\mathbf{r}_i$ は $i > m$ の時、 m 次元空間内の任意なベクトルとなり得る。関節角度を表すベクトルを $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^n$ とする。 $\dot{\mathbf{r}}_i$ は $\dot{\mathbf{q}}$ の関数として次式で表される。

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (1)$$

ただし $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}) \in R^{m \times n}$ は、 $\mathbf{r}_i$ の $\mathbf{q}$ に関するヤコビ行列である。式 (1) の一般解は以下の様に求まる。

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_i^+ \dot{\mathbf{r}}_i + (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_i^+ \mathbf{J}_i)\mathbf{k} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{J}_i^+$ は $\mathbf{J}_i$ の疑似逆行列であり、 $\mathbf{I}_n$ は $n \times n$ の単位行列、そして $\mathbf{k}$ は $\mathbf{k} \in R^n$ を満たす任意ベクトルである。

ここで、ユークリッドノルム $\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq 1$ と制約をすると、次式の様に表せる。

$$\dot{\mathbf{r}}_i^T (\mathbf{J}_i^+)^T \mathbf{J}_i^+ \dot{\mathbf{r}}_i \leq 1, \quad \text{and} \quad \dot{\mathbf{r}}_i \in R(\mathbf{J}_i) \quad (3)$$

ユークリッドノルム $\|\dot{\mathbf{q}}\|$ が $\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq 1$ を満足するような関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}$ を用いて実現し得る各リンクの先端速度 $\dot{\mathbf{r}}_i$ の全てからなる集合を考えると、それは式 (3) で表され、 $\mathbf{J}_i(\mathbf{q})$ の値域空間の次元を持つユークリッド空間内の楕円体となる。ここでは可操作性楕円体¹⁾を Fig.2 に示す通り全リンクに定義し、それをリンク可操作性楕円体と呼び式 (3) によって定義する。

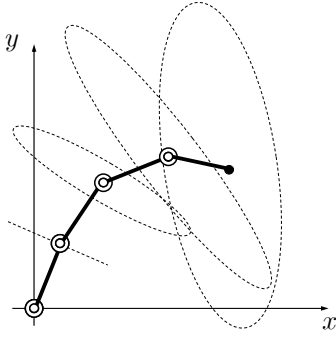


Fig. 2: Manipulability ellipsoids

2.2 回避可操作性能楕円体

マニピュレータのハンドにタスクが与えられた場合を考える。その場合のリンク可操作性能楕円体のことを回避可操作性能楕円体と呼ぶ。回避可操作性能楕円体は、完全回避可操作性能楕円体と部分回避可操作性能楕円体とに分けることができる。

ハンドの目標軌道 $\mathbf{r}_{nd}$ とハンド目標速度 $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$ がハンドタスクとして与えられる場合、 $\dot{\mathbf{q}}$ を実現するための $\dot{\mathbf{q}}$ は式 (1) より次式の様になる。

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} + (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \mathbf{l} \quad (4)$$

ここで $\mathbf{I}_n$ は $n \times n$ の単位行列であり、 $\mathbf{l}$ は $\mathbf{l} \in R^n$ の任意ベクトルである。

式 (4) の右辺第一項は $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$ を実現する $\dot{\mathbf{q}}$ の中で $\|\dot{\mathbf{q}}\|$ を最小にする解を与える。また第二項は、第一項による $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$ の実現には無関係にマニピュレータの形状を変更する関節角速度成分を与える。 $\mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd}$ による形状変化が原因となって障害物との干渉が発生する場合、障害物回避を行いつつ $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$ を実現できるかどうかは、任意ベクトル $\mathbf{l}$ の $\mathbf{J}_n$ の零空間への直交射影 $(\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \mathbf{l}$ に依存して決まる。

以下では障害物回避のための第 i リンク ($1 \leq i \leq n-1$)、すなわち中間リンクの回避可操作性能について考える。目標軌道追従の次に優先する回避タスクを、第一回避サブタスクと呼び、左肩添え字の“1”で表す。冗長自由度が多い場合には、複数のサブタスクを実行できる可能性がある。第一回避サブタスクが第 i リンクに与えられる場合、その回避要求速度を ${}^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ で表す。 ${}^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ は、対象物とマニピュレータの幾何学的関係より決定すべき変数であり、ここでは上位の回避制御システムによって与えられるものとする。式 (1) と式 (4) より次式を得る。

$${}^1\dot{\mathbf{r}}_{id} = \mathbf{J}_i \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} + \mathbf{J}_i (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \mathbf{l} \quad (5)$$

ここで、

$${}^1\dot{\mathbf{r}}_{id} - \mathbf{J}_i \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} \triangleq \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_i (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \triangleq {}^1\mathbf{M}_i \quad (7)$$

と定義すると、式 (5) は次式のように表せる。

$$\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} = {}^1\mathbf{M}_i \mathbf{l} \quad (8)$$

${}^1\mathbf{M}_i$ は ${}^1\mathbf{M}_i \in R^{m \times n}$ を満たす。式 (6) の関係を Fig.3 に示す。 $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$ により第 i リンクに発生する速度 $\mathbf{J}_i \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd}$

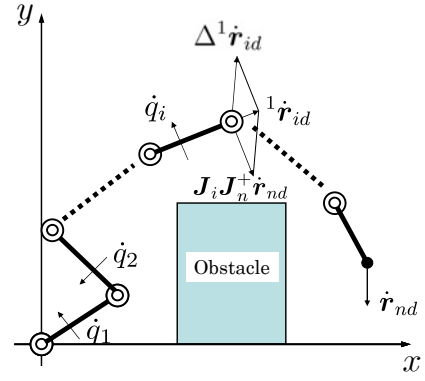


Fig. 3: Obstacle avoidance of intermediate links

に対して第一回避要求速度 ${}^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ を実現するには、 $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ を $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_i$ により発生させる必要がある。

${}^1\mathbf{M}_i$ は ${}^1\mathbf{l}$ の射影行列である。 $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$ が与えられるとき、 $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ を通して $\forall {}^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \in R^m$ を実現できるかどうかは、 ${}^1\mathbf{M}_i$ に依存しており、 ${}^1\mathbf{M}_i$ により $\forall \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ の実現の可能性が判定できる。この意味で ${}^1\mathbf{M}_i$ を第 i リンクの第一回避行列と呼ぶ。

$(\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n)$ の単位は無次元であり、 ${}^1\mathbf{M}_i$ の各要素の単位は $\mathbf{J}_i$ のそれらと一致するので式 (8) より ${}^1\mathbf{l}$ は $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ を実現する新たな関節角速度入力と考えることができる。式 (8) より $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ を実現する ${}^1\mathbf{l}$ を求めると次式となる。

$${}^1\mathbf{l} = {}^1\mathbf{M}_i^+ \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} + (\mathbf{I}_n - {}^1\mathbf{M}_i^+ {}^1\mathbf{M}_i) {}^2\mathbf{l} \quad (9)$$

${}^2\mathbf{l}$ は ${}^1\mathbf{l}$ と同様に ${}^2\mathbf{l} \in R^n$ を満たす任意ベクトルである。ここで新たな入力 ${}^1\mathbf{l}$ が $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ なる制約のもとに、 $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ が動ける範囲は次式で表される。

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

$\forall \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \in R^m$ が第一回避行列 ${}^1\mathbf{M}_i$ の張る空間内のベクトル

$$\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \in R({}^1\mathbf{M}_i) \quad (11)$$

であることは、式 (8) が常に解 ${}^1\mathbf{l}$ をもつことである。またその必要十分条件は

$$\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} = {}^1\mathbf{M}_i {}^1\mathbf{M}_i^+ \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \quad (12)$$

が成り立つことである。このとき式 (10) によって表される m 次元の楕円体を第一完全回避可操作性能楕円体と呼ぶ。

一方、 $\forall \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \in R^m$ に対し式 (11) が満たされない場合、つまり $\text{rank}({}^1\mathbf{M}_i) < m$ となる場合に対して以下に考察する。このとき $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}$ の $R({}^1\mathbf{M}_i)$ への直交射影 $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^*$ は、

$$\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^* = {}^1\mathbf{M}_i {}^1\mathbf{M}_i^+ \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id} \quad (13)$$

と与えられ、 $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^*$ は $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^* \in R({}^1\mathbf{M}_i)$ を満たすので

$$\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^* = {}^1\mathbf{M}_i {}^1\mathbf{l} \quad (14)$$

を満足する解 ${}^1\mathbf{l}$ は存在する。ここで、 $\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^*$ が動ける範囲は次式で表される。

$$(\Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^*)^T ({}^1\mathbf{M}_i^+)^T {}^1\mathbf{M}_i^+ \Delta^1\dot{\mathbf{r}}_{id}^* \leq 1 \quad (15)$$

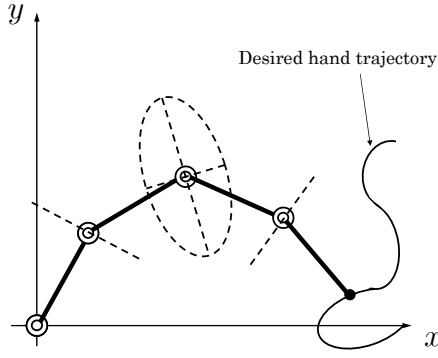


Fig. 4: Avoidance manipulability ellipsoids

このとき、式 (15) で定義される m 次元未満の 1M_i の値域空間内に存在する楕円体を第一部分回避可操作楕円体と呼ぶ。

回避可操作楕円体を調べることでによりマニピュレータの各リンクの回避能力を知ることができるようになる。

2.3 回避可操作形状値 (AMSI)

マニピュレータ全体の回避可操作性を評価する指標を提案する。手先軌道追従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、回避可操作楕円体で示され、その回避能力の良し悪しは回避可操作楕円体の体積で求められる。第 i リンク ($i = 1, 2, \dots, n$) の回避可操作楕円体の体積 1V_i は以下の様に表わされる。

$${}^1V_i = c_m \cdot {}^1w_i \quad (16)$$

ただし、 m は作業空間の次元を表している。 c_m と 1w_i は以下の様に定義する。

$$c_m = \begin{cases} 2(2\pi)^{(m-1)/2} / [1 \cdot 3 \cdots (m-2)m] & (m: \text{奇数}) \\ (2\pi)^{m/2} / [2 \cdot 4 \cdots (m-2)m] & (m: \text{偶数}) \end{cases} \quad (17)$$

$${}^1w_i = {}^1\sigma_{i1} {}^1\sigma_{i2} \cdots {}^1\sigma_{im} \quad (18)$$

式 (18) における ${}^1\sigma_{i1}, {}^1\sigma_{i2}, \dots, {}^1\sigma_{im}$ は式 (7) で定義される回避行列 1M_i の特異値である。

ここで、Fig.4 に 4 リンク水平多関節マニピュレータの例を示す。この場合、第 2 リンクの先端に出来る完全回避可操作楕円体は楕円となり、第 1 リンク及び第 3 リンク先端に出来る部分回避可操作楕円体は直線となる¹⁾。第 1 リンクと第 $(n-1)$ リンクの回避可操作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れらの直線の長さも回避能力の一部とする。この 1V_i の値の総和が最大となるマニピュレータの形状を求めれば、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。

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 を次の様に定義し、これを AMSI (Avoidance Manipulability Shape Index) と呼ぶことにする。

$${}^1E = \sum_{i=1}^{n-1} a_i {}^1V_i \quad (19)$$

ただし、係数 a_i は次元の異なる 1V_i の次元を一致させる役割を担う。

第 i リンクの回避可操作楕円体の面積 1V_i は、長軸と短軸の長さが等しい時に最大となり、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 1V_i 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ことを示し、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

$${}^1E = 0 \quad (20)$$

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判断できる。

2.4 ポテンシャルを考慮した回避可操作形状値 (AM-SIP)

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、作業対象物の周りにポテンシャル空間を設定し、作業対象物とマニピュレータの接近度を考慮する。凹型の作業対象物の周りに形成されたポテンシャル空間を Fig.5 に示す。ポテンシャル空間は Δh 間隔で形成され、各ポテンシャル空間 $u_k (k = 0, 1, 2, \dots, l)$ における衝突の危険性をスカラーで表すために、作業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に $v_0 < v_1 < v_2 < \dots < v_l < 0$ と設定する。更にマニピュレータの i リンク上に m 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 $s_{ij}(x_{ij}, y_{ij}) [i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m]$ とする。本節で用いる m は作業空間の次元数ではないことに注意して頂きたい。特徴点 s_{ij} の評価値 $a(s_{ij})$ を以下の様に与える。

$$\begin{cases} a(s_{ij}) = v_k & (\text{if } s_{ij} \in u_k) \\ a(s_{ij}) = 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (21)$$

よって、総ポテンシャル値 U は、

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a(s_{ij}) \quad (22)$$

で得られ、 U が小さいほど接近度は高く、大きいほど離れていることを示す。また、作業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 (負の大きな値) に設定することで、 U が $U \leq v_0$ を満たす場合、マニピュレータが作業対象物と衝突することを判断できる。

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ので、マニピュレータ形状評価指標には回避可操作性とポテンシャルの多目的最適化が必要となる。

そこで、ポテンシャルを考慮した回避能力の評価指標を AMSIP (Avoidance Manipulability Shape Index with Potential) と呼び以下の様に定義する。

$${}^1S = k_e {}^1E + k_u U \quad (23)$$

ここで k_e, k_u は重み付けを行う係数であるとともに、次元を一致させる役割も担う。また、 ${}^1E, {}^1S$ 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

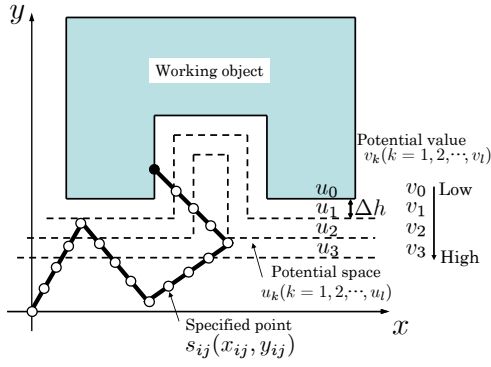


Fig. 5: Potential space

冗長自由度を評価していることによる。更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。本論文では、式(23)を用いて仮想マニピュレータの形状を評価する。重み係数の最適化は本研究では議論しないが、多目的最適化問題を考える上で、重み付け係数を作業状況に対して臨機応変に決定するための手法を今後議論する必要がある。

3 プレビュー制御

プレビュー制御とは作業対象物のオンライン形状予測に基づいて、手先の目標軌道上の将来時刻において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法である。本論文では仮想マニピュレータの形状は、1-step GAを用いて将来の冗長角度空間内のAMSIP値を探索することで決定される。プレビュー制御には一つの将来時刻での仮想マニピュレータ ($p=1$)を用いるシングルプレビュー制御⁴⁾と、複数の将来時刻における仮想マニピュレータ ($p \geq 2$)を用いるマルチプレビュー制御⁴⁾がある。制御式を式(24)に示す。式(4)で示したマニピュレータ形状変更のための任意の関節角速度入力 $\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{K}_v(\mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t))$ とすることで、式(25)によって表される仮想マニピュレータの形状に近づけることができる。ただし、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、将来時刻は $t_i^* = t + i\tilde{t}$ となる。ここで、 i は参照する将来時刻の数であり、 $\tilde{t}$ はプレビュー時間である。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_d &= \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} \\ &+ (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \mathbf{K}_v(\mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t)) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\mathbf{q}_d(t) = \begin{bmatrix} q_{1d}(t) \\ \vdots \\ q_{jd}(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_{1d}(t_i^*) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p k_i \tilde{q}_{jd}(t_i^*) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし、 j は冗長自由度を表し、その冗長性は関節角度 q_1 から q_j で使われる。また、 $\mathbf{K}_v$, k_i は重み付けの係数である。

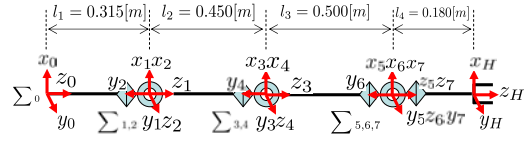


Fig. 6: Coordinate system of PA10

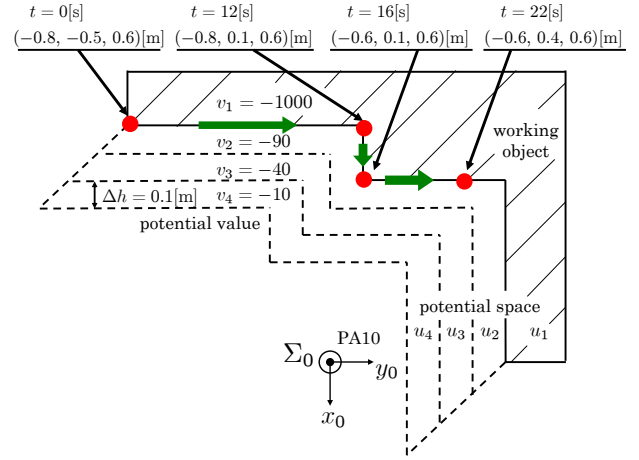


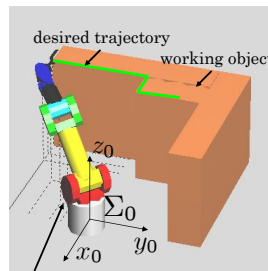
Fig. 7: Simulation's configuration

4 シミュレーション

冗長マニピュレータの手先軌道追従と回避動作の同時制御を行う上での、マニピュレータの形状変更能力を考察する。形状評価指標にはAMSIPを用いる。冗長マニピュレータは三菱重工業株式会社製の汎用ロボットPA10をモデル化したものであり、モデル化したPA10をFig.6に示し、作業対象物とPA10の位置関係と目標軌道をFig.7, Fig.8に示す。目標位置・姿勢の5変数を指定したときの冗長自由度を第1リンクと第2リンクの関節角度 q_1 , q_2 に与え、その q_1 , q_2 を軸とする冗長空間における S の分布 (AMSIP 分布) を示す。そのとき実現可能な関節角度をAMSIP分布の黒色以外の部分で示し、その変化を観察する。与える目標軌道を以下に示す。

$0 \leq t < 10$ のとき、

$$\mathbf{r}_{nd}(t) = \begin{cases} r_{dx}(t) &= -0.8[m] \\ r_{dy}(t) &= -0.5 + 0.05t[m] \\ r_{dz}(t) &= 0.6[m] \\ \phi_d(t) &= 0[rad] \\ \theta_d(t) &= -\frac{\pi}{2}[rad] \end{cases} \quad (26)$$



7-link manipulator (PA10)

Fig. 8: PA10 and desired trajectory

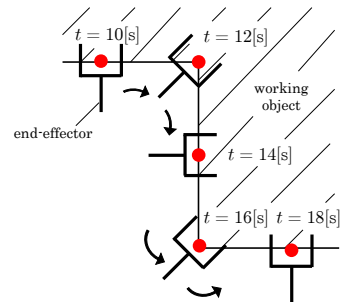


Fig. 9: Transition of orientation around corner

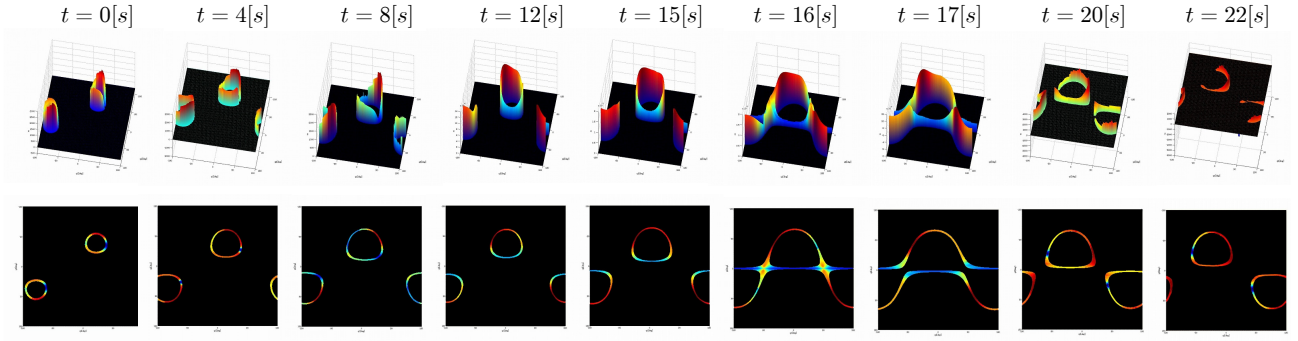


Fig. 10: AMSIP distribution from $t = 0$ [s] to $t = 22$ [s]

$10 \leq t < 12$ のとき,

$$\mathbf{r}_{nd}(t) = \begin{cases} r_{dx}(t) &= -0.8[m] \\ r_{dy}(t) &= -0.5 + 0.05t[m] \\ r_{dz}(t) &= 0.6[m] \\ \phi_d(t) &= -\frac{\pi(t-10)}{8}[rad] \\ \theta_d(t) &= -\frac{\pi}{2}[rad] \end{cases} \quad (27)$$

$12 \leq t < 14$ のとき,

$$\mathbf{r}_{nd}(t) = \begin{cases} r_{dx}(t) &= -0.8 + 0.05(t - 12)[m] \\ r_{dy}(t) &= 0.1[m] \\ r_{dz}(t) &= 0.6[m] \\ \phi_d(t) &= -\frac{\pi(t-12)}{8} - \frac{\pi}{4}[rad] \\ \theta_d(t) &= -\frac{\pi}{2}[rad] \end{cases} \quad (28)$$

$14 \leq t < 16$ のとき,

$$\mathbf{r}_{nd}(t) = \begin{cases} r_{dx}(t) &= -0.8 + 0.05(t - 12)[m] \\ r_{dy}(t) &= 0.1[m] \\ r_{dz}(t) &= 0.6[m] \\ \phi_d(t) &= \frac{\pi(t-14)}{8} - \frac{\pi}{2}[rad] \\ \theta_d(t) &= -\frac{\pi}{2}[rad] \end{cases} \quad (29)$$

$16 \leq t < 18$ のとき,

$$\mathbf{r}_{nd}(t) = \begin{cases} r_{dx}(t) &= -0.6[m] \\ r_{dy}(t) &= 0.1 + 0.05(t - 16)[m] \\ r_{dz}(t) &= 0.6[m] \\ \phi_d(t) &= \frac{\pi(t-16)}{8} - \frac{\pi}{4}[rad] \\ \theta_d(t) &= -\frac{\pi}{2}[rad] \end{cases} \quad (30)$$

$18 \leq t \leq 22$ のとき,

$$\mathbf{r}_{nd}(t) = \begin{cases} r_{dx}(t) &= -0.6[m] \\ r_{dy}(t) &= 0.1 + 0.05(t - 18)[m] \\ r_{dz}(t) &= 0.6[m] \\ \phi_d(t) &= 0[rad] \\ \theta_d(t) &= -\frac{\pi}{2}[rad] \end{cases} \quad (31)$$

ここで、得られる AMSIP 分布を時系列に並べたものを Fig.10 に示す。上側は 3 次元表示、下側は 2 次元表示によるものである。AMSIP 分布上に 2 つ独立した円が現れる場合は、マニピュレータ形状を表す円上の点から、もう一方の円に移ることはできない。 $t = 16[s]$ のように現れる形状が 1 つに繋がっている場合は手先目標位置・姿勢を実現しながら分布に現れる形状全域の q_1, q_2 をとるようなマニピュレータ形状に変更できると考えられるためこのような分布を大域的形状変更可能分布⁵⁾と呼ぶ。

そこで、マルチプレビュー制御を用いて手先軌道追従時に冗長空間内の大域的形状変更を行う。 $t = 15[s]$ 以降、1-step GA により決定する仮想マニピュレータの関節角度 $\tilde{q}_{2d}(t_i^*) > 0$ となるように制限し大域的形状変更を行う。ただし、 $p = 3$, $\tilde{t} = 3[s]$, 重み係数は $k_1 = 0.7$, $k_2 = 0.2$, $k_3 = 0.1$, $\mathbf{K}_v = \text{diag}[2.0, 2.0]$, $k_e = 10$, $k_u = 10$ とする。結果を Fig.11 から Fig.17 に示す。図中左側にマニピュレータと作業対象物、右側に同時刻の AMSIP 分布を示す。図中左側の仮想マニピュレータ ($i = 1, 2, 3$) を半透明の青色で表し、重み付けし足し合わせた仮想マニピュレータを半透明の赤色で冗長軸のみ表す。AMSIP 分布中の白丸は実マニピュレータの角度を表し、1~3 の番号が付いた丸は仮想マニピュレータ ($i = 1, 2, 3$) の角度、T が付いた丸は足し合わせた仮想マニピュレータの角度を表す。初期角度 ($q_1 = 50[deg]$, $q_2 = -43[deg]$) から、 $t = 16[s]$ 付近で大域的形状変更し、 $t = 20[s]$ には局所的な円へと移ったことが確認できる。また、Fig.18, Fig.19 より実マニピュレータの角度 q_{1d}, q_{2d} が 1-step GA によって生成された角度 q_{1d}, q_{2d} に追従していることが確認できる。

5 結 言

AMSIP 分布を用いることでマニピュレータが手先軌道追従中に冗長空間内で大域的形状変更ができることが分かった。本論文では左右対称のマニピュレータのモデルを用いたため、現れる AMSIP 分布は $q_2 = 0[deg]$ を境界として q_1 が $180[deg]$ ずれた状態で対称だったが、puma 型の冗長マニピュレータに適用すれば AMSIP 分布は対称ではなくなり、制御を行う上で大域的形状変更することがより有効となる状況が現れると考える。その際、形状変更することで作業続行不能となる状況を回避することができると考えられる。

参考文献

- 1) 吉川恒夫：ロボット制御基礎論，コロナ社（1988）
- 2) 吉川恒夫：冗長性を有するロボットの制御，日本ロボット学会誌，Vol.2, No.2, 587/592（1984）
- 3) 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, 887/895（1999）
- 4) Yusaku Nakamura, Tong-xiao Zhang, Mamoru Minami: Multi-Preview Configuration Control for Predictive Behavior of Redundant Manipulator, ICROS-SICE International Joint Conference, 3117/3123（2009）
- 5) Yosuke Kobayashi, Mamoru Minami, Akira Yanou : Global Reconfiguration Capability Evaluation and On-line Preview Control, SICE Annual Conference, 261/266（2011）

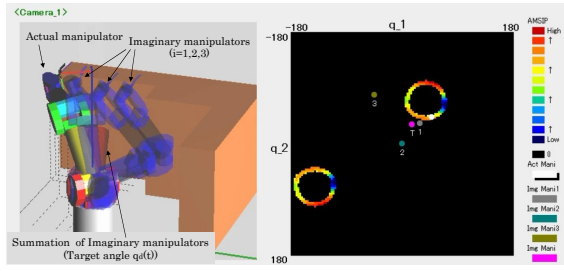


Fig. 11: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=0[s]$)

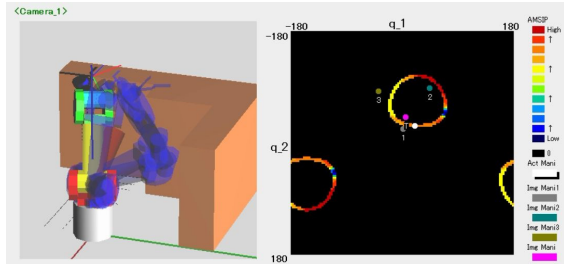


Fig. 12: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=4[s]$)

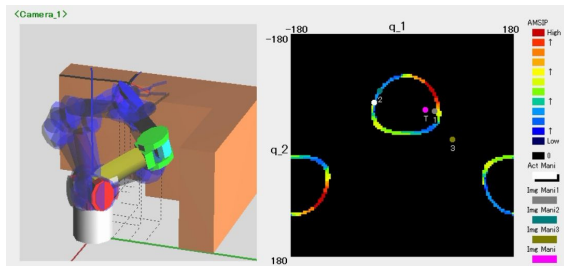


Fig. 13: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=8[s]$)

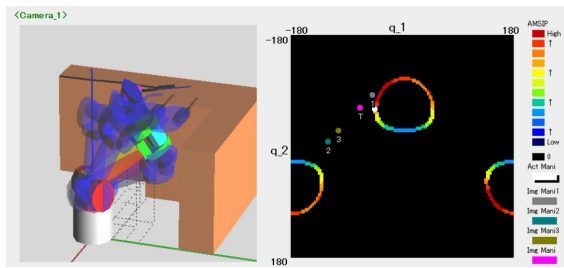


Fig. 14: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=12[s]$)

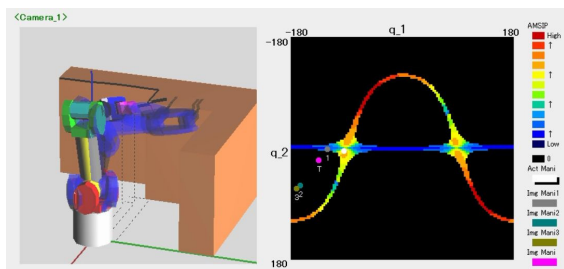


Fig. 15: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=16[s]$)

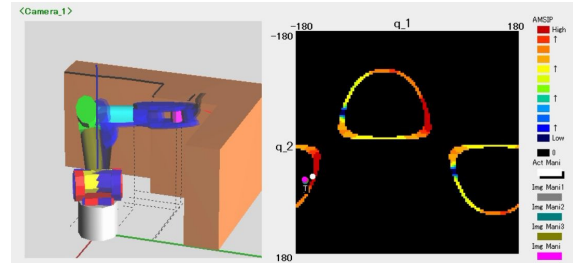


Fig. 16: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=20[s]$)

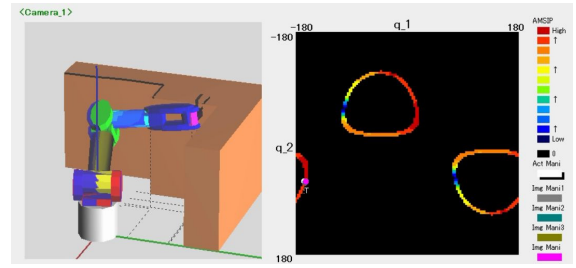


Fig. 17: Manipulator's shape and AMSIP distribution ($t=22[s]$)

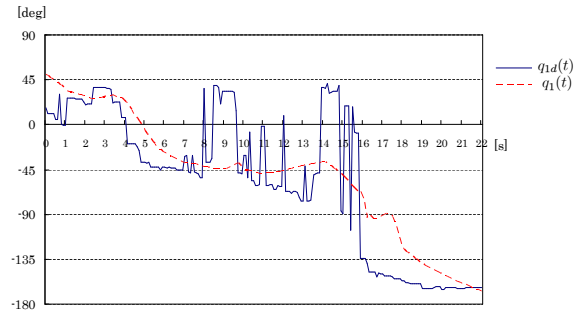


Fig. 18: Tracking Performance (q_1)

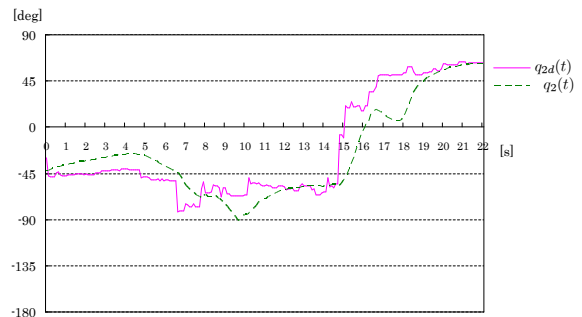


Fig. 19: Tracking Performance (q_2)