

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

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

○ 中村 優作, 見浪 譲, Zhang Tongxiao(福井大学)

Yusaku Nakamura, Mamoru Minami, Tongxiao Zhang
Fukui, University of Fukui, { yuusaku,minami,zhangtongxiao } @rc.his.fukui-u.ac.jp

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. 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, Real-time Optimization, Avoidance Manipulability, Avoidance Manipulability Shape Index, Potential

1. 緒言

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し、研磨作業や溶接作業などのロボット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。未知形状対象物に対してハンドの軌道追従と障害物回避を同時にオンラインで行う生産システムである。このシステムの実現には、冗長マニピュレータを用いた軌道計画と、それに基づく制御手法を同時に議論しなければならない。

Fig.1 のオンライン形状計測 / 加工システム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。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るため、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（回避すべき障害物を意味する）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。このため、マニピュレータの形状変更能力を常に高く保つつつ軌道追従制御を行う必要がある。

著者らは、現在の形状に将来の非衝突形状を満足する腕形状を反映させてマニピュレータの形状を準備させておくレビュー制御法 [1]、将来の目標軌道における対象物と過去に通過した軌道における対象物を考慮しマニピュレータの形状を変化させる予見 / 後見制御法 [2] を提案してきた。これらの手法は将来の目標軌道を予観的に考慮する方法だが、マニピュレータの形状変更能力を考慮した制御ではなかった。

これまで形状変更能力を評価指標とした可操作性橙円体 [3]、可操作性橙円体にハンドのタスクを考慮した回避可操作性橙円体 [4] が提案されてきた。しかし、回避可操作性橙円体は各中間リンクごとの回避可操作性しか評価

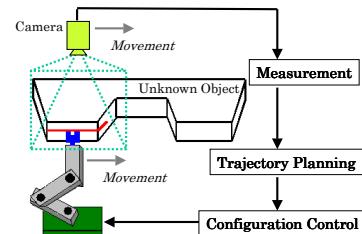


Fig. 1: Processing System for Unknown Object

していないため、これらの指標はマニピュレータ全体の回避能力を評価するものとしては不十分なものであった。

そこで本報告ではマニピュレータ全体の形状変更能力を評価する指標として、回避可操作性橙円体の総和をとり、スカラーで評価する回避可操作形状値 (AMSI, Avoidance Manipulability Shape Index) [5] を用いる。さらに、作業対象物との衝突を避けるために、ポテンシャル空間を用いた対象物との接近度と形状変更能力の両方を評価する回避能力指標、AMSIP (Avoidance Manipulability Shape Index with Potential) を提案する。この AMSIP によりマニピュレータ形状を評価、検討する。最後に AMSIP を用いて、対象物表面で作業を行うマニピュレータが形状変更能力を高く維持しながら実時間で作業を行うことができる軌道追従 / 障害物回避制御手法を提案し、その有用性をシミュレーション及び実機により確認する。

2. プレビュー制御系と AMSI , AMSIP

2.1 プレビュー制御系

プレビュー制御システム [1][2] 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。非衝突である将来時刻で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。現在の時刻を t , \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」と呼び、時刻 t^* での目標経路上の目標位置 $r_d(t^*)$ を検出できるものとする。また、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 $\tilde{q}_d(t^*)$ 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。

ここでハンドの目標位置、速度を $r_d(t)$, $\dot{r}_d(t)$ 、現在のハンドの位置と各関節の角度を $r(t)$, $q(t)$ 、単位行列を I 、ヤコビ行列とその擬似逆行列を $J(q)$, $J^+(q)$ とするとプレビュー制御の式は次の様に表される [2]。

$$\begin{aligned}\dot{q}_d(t) &= J^+(q)(\dot{r}_d(t) + K_p(r_d(t) - r(t))) \\ &+ (I - J^+(q)J(q))K_{pr}(\tilde{q}_d(t^*) - q(t))\end{aligned}\quad (1)$$

2.2 ポテンシャル

Fig.2 に示すように作業対象物形状に基づいて各ポテンシャル空間 $u_k(k = 0, 1, \dots, n)$ を Δh 間隔で生成する。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 $v_0 < v_1 < \dots < v_n < 0$ と設定する。ここでは、対象物近くのポテンシャル値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 $s_{ij}(q(t))[i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_i]$ とする。特徴点 $s_{ij}(q(t))$ の評価値 $a(s_{ij}(q(t)))$ を、

$$\begin{cases} a(s_{ij}(q(t))) = v_k & (\text{if } s_{ij} \in u_k) \\ a(s_{ij}(q(t))) = 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

と与える。よって、仮想マニピュレータの時刻 t^* における総ポテンシャル値 U は、

$$U(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} a(s_{ij}(q(t))) \quad (3)$$

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、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）に設定することで、 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表すことにした。

2.3 回避可操作形状値

しかし、プレビュー制御ではマニピュレータの回避可操作性が考慮されていないので、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作

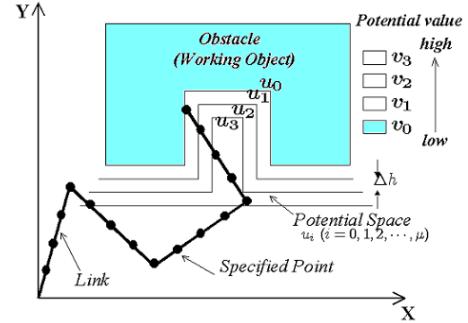


Fig. 2: Potential Space and Specified Point

業対象物に対して回避動作が間に合わない場合を考えられる。よって、軌道追従 / 障害物回避の同時制御を行うためには、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。

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の提案を行う。ハンドの軌道追従タスクを実行しつつ中間の第 i リンクの形状を変更する能力を評価したものは、回避可操作性機能円体で示される。マニピュレータの回避能力の良し悪しは回避可操作性機能円体の体積 1V_i で求められる。この 1V_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が、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くても、第 j 関節の回避可操作性が良いとは限らない。

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。

$${}^1E(t) = \sum_{i=1}^n a_i {}^1V_i(q(t)) \quad (4)$$

ただし、 a_i は無次元化するための係数である。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。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。

2.4 AMSIP

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可能性が高くなる。そこで先程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可能であると考えられる。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、

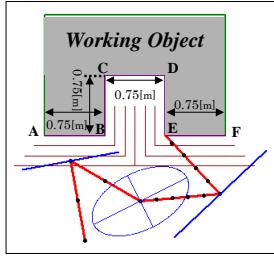


Fig. 3: Desired-hand Trajectory with Concave Shape

$${}^1S(t) = k_e {}^1E(t) + k_u U(t) \quad (5)$$

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、AMSI とポテンシャルの次元を一致させる役割も担う。本論文では、式(5)の重み付け係数を $k_e = k_u = 1$ と設定した。しかし、多目的最適化問題を考える上で、この係数設定が最適だとは限らず、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。

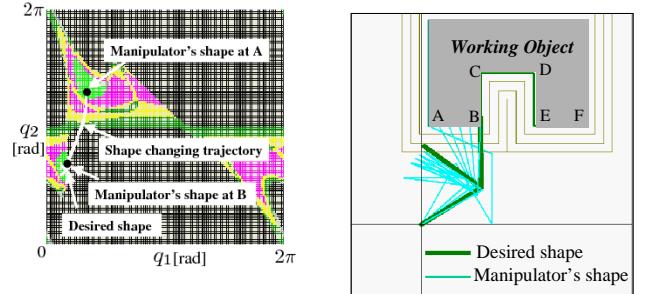
3. AMSIP に基づく軌道追従制御

3.1 実時間最適化

ここでは、提案した回避能力評価指標 AMSIP を用いた軌道追従 / 障害物回避制御手法を提案する。実時間最適化には、AMSI が最大となる形状をマニピュレータに実現させることが必要となるが、Fig.4 及び Fig.5 に示す様に、その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わかった。最適解探索手法として勾配法などの手法があるが、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[6] を用いる。

3.2 形状最適化制御の解析

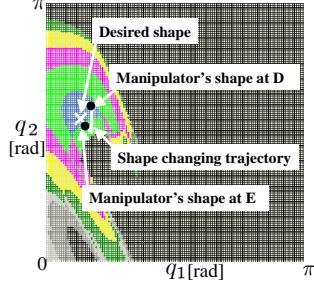
ここでは、プレビュー制御と 1-step GA を用いた実時間形状最適化制御の有用性を示す。Fig.3 に示した A 点から F 点までのハンド軌道を追従する形状制御について考える。目標ハンド速度は 0.075m/s である。まず B 点での最適形状を AMSIP の全探索により求め Desired Shape として Fig.4(a) に示す。A 点からスタートした形状が B 点では、ほぼ最適形状の近傍に達していることが分かる。A 点から B 点までの AMSIP 軌道をマニピュレータ形状で表現し Fig.(b) に示す。B 点での最適形状に近づきつつハンドの軌道追従を行っていることが分かる。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った。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最適化しながら軌道追従をすることが可能である。



(a) Shape Changing Trajectory on Distribution of ${}^1S(t)$ at $t=10[s]$

(b) Manipulator's Shape

Fig. 4: Manipulator's Shape Trajectory from A to B



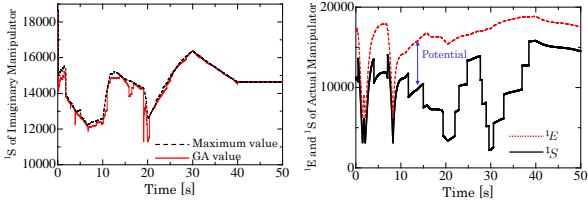
(a) Shape Changing Trajectory on Distribution of ${}^1S(t)$ at $t=40[s]$

(b) Manipulator's Shape

Fig. 5: Manipulator's Shape Trajectory from D to E

3.3 シミュレーション

これまでに提案した、AMSIIP 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時間 \tilde{t} を 10[s]、ハンド目標速度は 0.075m/s と設定し、作業対象物の寸法を Fig.3 に示した。結果を Fig.8 に示す。Fig.8(a)において、軌道追従を行う仮想マニピュレータの AMSIP の最適解を全探索で求め、Maximum value で示し、1-step GA で見つけた解を GA value で示す。Fig.8(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。Fig.8(a) で全探索して得られる最適解と GA 探索によって得られる最適解を比較すると、ほぼ一致し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。Fig.8(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わかる。 1E と 1S の差は、式(5)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 -40000 と設定しているので、 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っていることがわかる。以上より、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。



(a) Evaluation of Imaginary Manipulator (b) Evaluation of Actual Manipulator

Fig. 6: Results of Real-Time Configuration Optimization

4. 実機を用いた実験

本研究では実機として三菱重工製の PA10 を使用し、本研究で提案した新しい評価指標 AMSIP の有効性を検証する。実験で使用する作業対象物の形状を $x-y$ 平面に投影した図を Fig.8 に示し、ハンドの目標軌道 r を \sim と設定した。ハンドの速度は 0.05m/s である。またポテンシャル値は、 $v_0 = -40000$, $v_1 = -1000$, $v_2 = -500$, $v_3 = -200$ と設定した。実験結果を Fig.9 と Fig.10 に示す。Fig.9 と Fig.10 はそれぞれ仮想マニピュレータと実マニピュレータの AMSI と AMSIP の推移である。実験ではプレビュー時間 \tilde{t} を 2 秒とした。AMSI はポテンシャル値を考慮しているので、AMSI より低い値になっていることが分かる。しかし Fig.9 の AMSIP は常に正であるため仮想マニピュレータは作業対象物と衝突することなく作業を終えているといえる。Fig.10 の AMSIP は負になっているが、ポテンシャル値を厳しく設定しているため負となっていることが考えられる。

5. 結言

本研究では新しい評価指標 AMSIP を提案し、マニピュレタ全体の回避能力が最大となるような腕形状を与えることができるようになった。さらに、この AMSIP を用いてマニピュレータの腕形状を実時間で最適化する手法を提案し、その有用性をシミュレーション及び実機によって確認した。

参考文献

- [1] 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及び回避制御”, 日本機械学会論文集, no.95-1813, pp.3543-3550, 1996.
- [2] 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及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.
- [3] 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.63-71, 1984

[4] 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.

[5] Hiroshi Tanaka, Mamoru Minam, Yasushi 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.

[6] 見浪護, 鈴木秀和, ジュリアンアグバーン, “注視 GA ピジュアルサーボを用いたロボットによる魚の捕獲”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.68, No.668, 1198-1206 (2002)

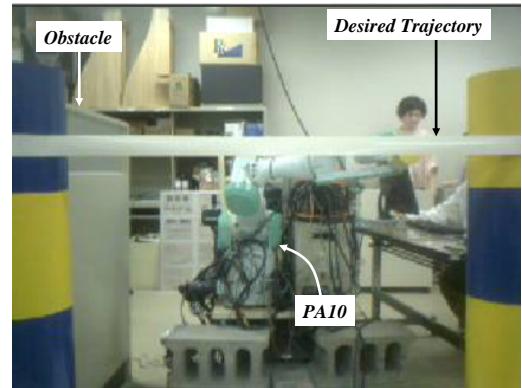


Fig. 7: PA10

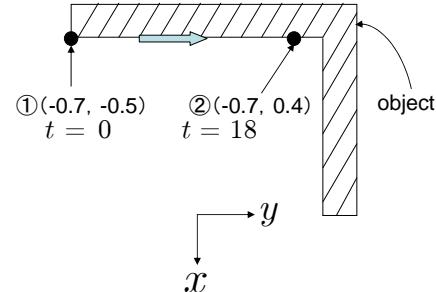


Fig. 8: Desired-hand Trajectory

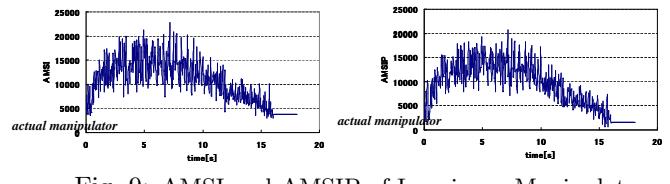


Fig. 9: AMSI and AMSIP of Imaginary Manipulator

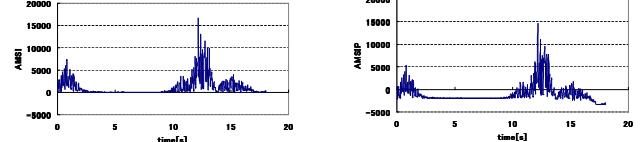


Fig. 10: AMSI and AMSIP of Actual Manipulator