

障害物回避を考慮した冗長ロボットの 経路追従における規範速度生成*

瀬戸山 貴嗣^{*1}, 公文 誠^{*2}
水本 郁朗^{*2}, 岩井 善太^{*3}

Reference Velocity Generation of Path Following with Obstacle Avoidance for Redundant Robots

Takashi SETOYAMA^{*4}, Makoto KUMON,
Ikuro MIZUMOTO and Zenta IWAI

^{*4} Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

A contour following control method based on dynamic parametrization for redundant robots is proposed in this paper. The proposed method makes a redundant robot follow the desired contour in work space with executing a subtask whose objective is to maximize a cost function, such as distance between the robot and an obstacle. The method also guarantees the lower limit of the cost function which implies that the performance of the subtask is able to be evaluated. Results of numerical simulations show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Motion Control, Planning, Moving Robot, Redundant Robot, Dynamic Parameterization, Reference Velocity

1. はじめに

ロボットの有する自由度がロボットに与えられた作業を遂行するのに最小限必要な自由度よりも大きいとき、このロボットを冗長ロボットという⁽¹⁾。冗長ロボットには、冗長な自由度を活用することで主たるタスク以外に特異姿勢回避⁽²⁾や障害物回避⁽³⁾といった複数のタスクを同時に達成することができる利点があり、多くの研究がなされてきた。昨今、ヒューマノイドのように大自由度のロボットが開発されているが、これらのロボットは種々のタスク遂行の際に十分な冗長自由度を有すると考えられ、冗長ロボットの有効な活用技術は今後ますます重要になると想定される。このための基本的なアプローチとして Nakamura⁽⁴⁾はマニピュレータのタスクを優先順位を考慮したサブタスクへと分解し、作業空間を配位空間に埋め込んだ時の補空間を利用する方法を提案している。またロボット全体にタスクを陽に配分する方法として、トルク最小化や可操作度などの規範を導入する考え方も提案されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本報告では、特に複数のタスクを陽に与えることを考えるため、Nakamuraらのアプローチに従うことにする。

一方、移動ロボットやマニピュレータにとって必要

な基本機能の一つである位置あるいは配位を所望の経路に追従させる制御(経路追従制御)は

1. 目標経路をもとに実現可能な軌道を生成する

2. 生成された目標軌道にロボットを追従させる
という二段階に分けられる。ここで経路とは時間に依存しない空間的な曲線、軌道は時間の関数で表される曲線とする。1はオフラインでの軌道計画であり、2はフィードバック制御などによるオンラインで実行される軌道制御である。このようにロボットを軌道に追従させる場合、配位のみならず速度も制御することになる。しかし例えば文字を書くといった作業において重要なのは目標経路を正確に追従することであり、動作のタイミングや速度を正確に制御することがあまり重要ではない場合や、駆動モータの出力トルクの制限のようなロボットの性能的限界や安全性の面からの要請などによって、動作速度を全く任意の目標速度に追従させることは現実的でない場合がある。そこで適切な動作速度を考慮したロボットの経路追従制御手法が重要となる。これに関して Aguiar⁽⁷⁾は線形非最小位相システムでの規範追従の性能限界について再考しており、Galicki⁽⁸⁾や桜間⁽⁹⁾は障害物回避を考慮した経路追従制御について述べている。また Hollerbach⁽¹⁰⁾の Time Scaling や Kumon⁽¹¹⁾の目標軌道の動的パラメータ表現などでは、ロボットが所望の経路を逸脱することなくアクチュエータの制限などによる入力

* 原稿受付 2007年4月6日。

^{*1} 熊本大学大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。

^{*2} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科。

^{*3} 正員, フェロー, 熊本大学大学院自然科学研究科。

E-mail: kumon@gpo.kumamoto-u.ac.jp

飽和といった現実的制約を考慮に入れることが可能である。

本論文では、冗長ロボットに対し動的パラメータ表現を用いた経路追従制御法の適用を考える。具体的なタスクとして、冗長ロボットに障害物を回避しながら所望の経路を追従させる手法について検討する。通常、所望の経路は障害物を回避するように設計されるものであると期待されるが、ロボット自身がこれに正確に追従していない場合、適切な目標経路が与えられていても障害物を回避できない可能性がある。このような場合、ロボットは障害物近辺でゆっくりと動作することで、所望の経路へと早く収束し、結果として障害物回避についても良好な結果が得られると考えられる。そこで、本論文では特に障害物回避の規範となる目標速度をオンラインで生成する手法を提案する。また提案手法の有効性を、アーム付き台車を例にしたシミュレーションにより示す。

本論文の構成は次の通りである。第2節ではロボットの動力学と冗長ロボットの逆運動学問題について示す。第3節では経路追従および障害物回避を達成するための目標速度生成と制御法について示す。第4節では3自由度ロボットによる経路追従、障害物回避のシミュレーションを示す。

2. 対象システム

2.1 動力学 時刻 t での n 自由度のロボットの配位を $\mathbf{q}(t) \in \mathbf{R}^n$ で表し、運動方程式が

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}(t))\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{G}(\mathbf{q}(t)) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (1)$$

で与えられるものとする。ここで $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ は慣性行列、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^n$ はコリオリ力や遠心力の項、 $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ は重力項、 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^n$ はロボットに加えられる力やトルクなどの項である。また \cdot は時間 t についての微分を表す。 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{G}$ には以下の性質があるとする⁽¹²⁾。

- $k_M \|\mathbf{p}\|^2 \geq \mathbf{p}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{p} \geq k_m \|\mathbf{p}\|^2 > 0 \quad \forall \mathbf{p}, \mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$ を満足する正の k_M, k_m が存在する。
- $\mathbf{r}^T [\mathbf{M}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{p})] \mathbf{r} = 0 \quad \forall \mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r} \in \mathbf{R}^n$
- $\|\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{p}) \mathbf{r}\| \leq k_c \|\mathbf{p}\| \|\mathbf{r}\| \quad \forall \mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r} \in \mathbf{R}^n$ を満足する正の k_c が存在する。
- $\|\mathbf{G}(\mathbf{q})\| \leq k_g \quad \forall \mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$ を満足する正の k_g が存在する。

なお、上述の仮定中の $\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}$ はいずれも任意の n 次元実ベクトルを表す。また、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを表す。

2.2 冗長ロボットの逆運動学 ロボット上の適当な参照点を $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^m (m < n)$ とすると $\mathbf{y}(t)$ はロボッ

トの配位、 $\mathbf{q}(t)$ の関数であり、 $\dot{\mathbf{y}}(t)$ の時間微分は

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q}(t))\dot{\mathbf{q}}(t) \quad (2)$$

と表される。ただし $\mathbf{J}(\mathbf{q}(t)) \in \mathbf{R}^{m \times n}$ は $\mathbf{J}(\mathbf{q}(t)) = \partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{q} |_{\mathbf{q}=\mathbf{q}(t)}$ で与えられる \mathbf{y} の \mathbf{q} に関するヤコビ行列である（以下簡単に \mathbf{J} と表記）。 \mathbf{J} の作用素ノルムは有界であり、これを $|\mathbf{J}|$ と記すことにする。冗長ロボットの場合 \mathbf{J} は正方行列ではないが、適当な擬似逆行列 \mathbf{J}^+ を用いて上式は

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}^+(t)\dot{\mathbf{y}}(t) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+(t)\mathbf{J}(t))\mathbf{k} \quad (3)$$

と変形できる。ここで \mathbf{k} は任意の n 次元ベクトルを表し、第2項はマニピュレータの冗長性を表す。

3. 経路追従制御

3.1 目標経路の動的パラメータ表現 本論文では、メインタスクとしてロボットの参照点 $\mathbf{y}(t)$ を所望の経路 \mathbf{y}_d へ追従させる。ここで目標経路への追従とは $\mathbf{y}(t)$ を \mathbf{y}_d 上の任意の点へと近づけるものであり、目標経路上での速さは問わないものであることに注意されたい。

さて、目標経路 \mathbf{y}_d 上の点を動的パラメータ $\phi(t)$ を用いて $\mathbf{y}_d(\phi(t))$ とし、 $\phi(t)$ のダイナミクスを次式で与える。

$$\dot{\phi}(t) = \omega(t) + K_\phi [\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_d(\phi(t))]^T \mathbf{y}'_d(\phi(t)) \quad (4)$$

ここで K_ϕ は正定数、 $\omega(t)$ は以下で定義する有界で t について区分的に微分可能な関数とし、 $'$ は ϕ での微分を表す。第2項はロボットの状態 $\mathbf{y}(t)$ に目標 $\mathbf{y}_d(\phi(t))$ を近づけることを目的としている（図1）。以上より参照点の経路追従は、動的パラメータによって表される目標点へのトラッキング問題として考えられる。つまり $t \rightarrow \infty$ において $\mathbf{y}(t) \rightarrow \mathbf{y}_d(\phi(t))$ を実現すれば良い。サブタスクを \mathbf{q} について滑らかな評価関数 $V(\mathbf{q})$

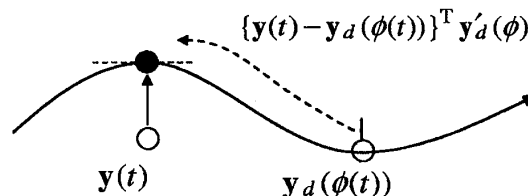


Fig. 1 Dynamic Parametrization

を最大化する最適化問題として設定する⁽¹⁾。そこで式(3)をもとに、ロボットの目標速度 $\dot{\mathbf{q}}_d$ を次のように定義する。

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{J}^+ \{ \dot{\mathbf{y}}_d - \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_d) \} + \gamma (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \boldsymbol{\xi} \quad (5)$$

ただし γ は適当な正定数, \mathbf{K} は正定対称行列, ξ は $V(\mathbf{q})$ の勾配ベクトルとし次のように定義する.

$$\xi \equiv \frac{\partial V(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}$$

3.2 冗長ロボットの規範速度生成 $\dot{\mathbf{y}}_d = \mathbf{y}'_d \phi$ という関係と式(4)を用いて式(5)は

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_d = & \mathbf{J}^\dagger \mathbf{y}'_d \omega + \gamma (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \xi \\ & + \mathbf{J}^\dagger \{ \mathbf{K}_\phi \mathbf{y}'_d (\mathbf{y} - \mathbf{y}_d)^T \mathbf{y}'_d + \mathbf{K} (\mathbf{y}_d - \mathbf{y}) \} \end{aligned} \quad (6)$$

となる. さて理想とする動作速度を設計するためにロボットが所望の状態に十分近い時の振舞を考える. この時 $\dot{\mathbf{q}} \approx \dot{\mathbf{q}}_d$, $\mathbf{y} \approx \mathbf{y}_d$ とみなせるので

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \xi^T \dot{\mathbf{q}} \\ \approx & \xi^T \dot{\mathbf{q}}_d \\ \approx & \xi^T \mathbf{J}^\dagger \mathbf{y}'_d \omega + \gamma \xi^T (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \xi \end{aligned} \quad (7)$$

となる. ここで $\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}$ は非負定行列であるので, ω と γ を適当に選ぶことにより V の増加が期待できる. ただし $\xi^T (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \xi$ が 0 に近く第 1 項が小さい場合は γ の選定が難しく, V を増加させることを保障するのは簡単ではない. そこでこのような条件において V が増加することを目的として 3.3 で後述する解析結果より ω を次のように定義することとした.

$$\omega = \begin{cases} \omega_0(t) = \beta \tanh(\xi^T \mathbf{J}^\dagger \mathbf{y}'_d(\phi)) & \text{if } Q = Q_0 \\ \omega_1 (\text{constant}) & \text{if } Q = Q_1 \end{cases} \quad (8)$$

ここで β は適当な正定数, Q は V の値に応じてシステムの状態を表す変数であり, 図 2 に示す状態遷移機械に従って変化する状態 Q_0 あるいは Q_1 とする. ま

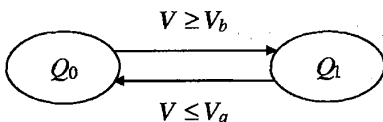


Fig. 2 State machine which gives dynamics of Q

た V_a, V_b は $V_a < V_b$ となる適当な定数であり, サブタスクの達成度を与える閾値である. このような ω の設定により少なくとも Q_0 のとき (サブタスクが十分に達成されている時) は式(7)の第 1 項も非負となる.

以上のように, ω を変化させることで障害物回避のための目標点の規範速度を生成する. 次に示す制御器とあわせることで, サブタスクが少なくともある程度は達成されることを保証できる. またメインタスク, サブタスクとも十分に達成されていれば式(4)より $\phi \rightarrow \omega_1$ となり, 目標速度を所望の速度 $\mathbf{y}'_d \omega_1$ に制御することができる.

3.3 制御器設計 式(6)で与えられる目標速度について, 制御入力を次のように構成する.

$$\tau = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{K}_d (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) \quad (9)$$

このとき次の定理が成り立つ.

[定理 1] システム(1)に対し, 目標速度(6)を与える入力を(9)で構成すれば, 十分に大きなゲイン \mathbf{K}_d, \mathbf{K} のもとで $t \rightarrow \infty$ において $\dot{\mathbf{q}} \rightarrow \dot{\mathbf{q}}_d$ および $\mathbf{y} \rightarrow \mathbf{y}_d$ となる. また $V(t) \geq V^\dagger$ となる V^\dagger が存在する.

略証) $\eta = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d$, $\zeta = \mathbf{y} - \mathbf{y}_d$ とおき, 関数 F を次のように定義する.

$$F = \frac{1}{2} \eta^T \mathbf{M} \eta + \frac{1}{2} \zeta^T \zeta \quad (10)$$

\mathbf{M} の性質から F は準正定であり, 式(2), (5)より

$$\dot{\mathbf{y}} - \dot{\mathbf{y}}_d = \mathbf{J} \eta - \mathbf{K} \zeta$$

を用いて, F を t について微分すれば

$$\begin{aligned} \dot{F} = & \eta^T \dot{\mathbf{M}} \eta + \frac{1}{2} \eta^T \dot{\mathbf{M}} \eta + \zeta^T \dot{\zeta} \\ = & -\eta^T \mathbf{K}_d \eta + \zeta^T \mathbf{J} \eta - \zeta^T \mathbf{K} \zeta \end{aligned} \quad (11)$$

となる. \mathbf{J} の有界性を考慮すれば

$$\begin{aligned} \zeta^T \mathbf{J} \eta & \leq \|\mathbf{J}\| \|\zeta\| \|\eta\| \\ & \leq \frac{\|\mathbf{J}\|}{2} (\|\zeta\|^2 + \|\eta\|^2) \end{aligned}$$

より十分に大きなゲイン \mathbf{K}_d, \mathbf{K} によって Q の値に依らず適当な正定数 c_w が存在して

$$\dot{F} \leq -c_w F \quad (12)$$

となる. この式より $\|\eta\| = \|\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d\| \leq c_1 \exp(-\alpha t)$ および $\|\zeta\| = \|\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_d(\phi(t))\| \leq c_2 \exp(-\alpha t)$ となる c_1, c_2, α が存在し, $t \rightarrow \infty$ において $\dot{\mathbf{q}} \rightarrow \dot{\mathbf{q}}_d$ および $\mathbf{y} \rightarrow \mathbf{y}_d$ となる. また, ζ が有界であるので式(6)より $\dot{\mathbf{q}}_d$ も有界となり, $\dot{\mathbf{q}}$ および τ も有界となる. $\dot{\mathbf{q}}$ が有界なので $V(\mathbf{q}(t))$ は t について微分可能で

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V(\mathbf{q}(t)) = & \xi^T \eta + \xi^T (\dot{\mathbf{q}}_d(\phi)) \\ = & \xi^T \eta - \xi^T \mathbf{J}^\dagger \mathbf{K} \zeta + \xi^T \mathbf{J}^\dagger \mathbf{y}'_d \mathbf{K}_\phi \zeta^T \mathbf{y}'_d \\ & + \xi^T \mathbf{J}^\dagger \mathbf{y}'_d \omega + \gamma \xi^T (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \xi \end{aligned} \quad (13)$$

となる. η, ζ が指数減衰することと $\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}$ が非負定行列であることより

$$\dot{V}(\mathbf{q}) \geq -c_3 \exp(-\alpha t) + \xi^T \mathbf{J}^\dagger \mathbf{y}'_d(\phi) \omega \quad (14)$$

となる $c_3 \geq 0$ が存在する。 Q が Q_0 のとき $\omega = \tanh(\xi^T J^+ y'_d)$ より

$$\dot{V}(\mathbf{q}) \geq -c_3 \exp(-\alpha t) \quad (15)$$

となり

$$V(t) \geq \min(V(0), V_a) - \frac{c_3}{\alpha} \quad (16)$$

となることが示される。 α が K, K_d によって適当に選べることから、 $V^+ < \min(V(0), V_a) - c_3/\alpha$ となる V^+ が存在することが分かる。(略証おわり)

さらに次の仮定のもとで以下の系が成り立つ。

仮定1: Q が Q_0 のとき常に $|\xi^T J^+ y'_d| > c_4 > 0$ となる定数 c_4 が存在する。

[系1] 仮定1のもとで時刻 t_0 において Q が Q_0 ならば、 $V(t_1) \geq V_b$ となる $t_1 (> t_0)$ が存在する。

仮定2: Q が Q_1 で、 $y \approx y_d, \dot{\mathbf{q}} \approx \dot{\mathbf{q}}_d$ のとき、次を満たす $V_c (> V_a)$ および $c_5 (> 0)$ が存在する。

・ $V(t) \leq V_c$ において

$$\xi^T J^+ y'_d \omega_1 + \gamma \xi^T (\mathbf{I} - J^+ J) \xi \geq c_5$$

[系2] 十分に時間が経過した時刻 $t = t_2$ で Q が Q_1 ならば、仮定2のもとで $t \geq t_2$ において $V(t) \geq V_c$ となる。

系1,2の略証) [定理1] より、 η, ζ は原点に指数収束し $V(\mathbf{q})$ の時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{q}(t)) &= \xi^T \eta + \xi^T \dot{\mathbf{q}}_d(\phi) \\ &= \xi^T \eta - \xi^T J^+ K \zeta + \xi^T J^+ y'_d \omega \\ &\quad + \xi^T J^+ y'_d K_\phi \zeta^T y'_d + \gamma \xi^T (\mathbf{I} - J^+ J) \xi \\ &= -c_6 \exp(-\alpha t) + \xi^T J^+ y'_d \omega \\ &\quad + \gamma \xi^T (\mathbf{I} - J^+ J) \xi \end{aligned} \quad (17)$$

となる (ただし c_6 は正定数)。 Q が Q_0 のとき ξ, J, y'_d が滑らか、 $\mathbf{I} - J^+ J$ が非負定行列、および仮定1より

$$\dot{V}(\mathbf{q}) \geq -c_6 \exp(-\alpha t) + c_4 \quad (18)$$

となる。ゆえに $V(t_1) \geq V_b$ となる $t_1 (> t_0)$ が存在する。また [定理1] より十分に時間が経てば、 $y \approx y_d, \dot{\mathbf{q}} \approx \dot{\mathbf{q}}_d$ であり、 t_2 において Q が Q_1 なので $V(t_2) > V_a$ である。さらに仮定2より $V \leq V_c$ において

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -c_6 \exp(-\alpha t) + \xi^T J^+ y'_d \omega + \gamma \xi^T (\mathbf{I} - J^+ J) \xi \\ &\geq -c_6 \exp(-\alpha t) + c_5 > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

である。十分に時間が経過していれば $\dot{V} > 0$ となり $V(t) \geq V_c \geq V_a$ となる。(略証終了)

[系1] は十分な冗長性を有していれば有限時刻 t_1 において状態 Q_0 から Q_1 へ移行することを意味し、[系2] は適切に設計された目標経路については十分に時間が経過した後サブタスクが満足されることを意味する。

4. 数値例

提案手法の妥当性を検証するために図3に示すような2自由度アームと1自由度の台車で構成された3自由度ロボットを考え、経路追従および障害物回避の数値シミュレーションを行った。ロボットの一般化座標は $\mathbf{q} = [x, \theta_1, \theta_2]^T$ とする。

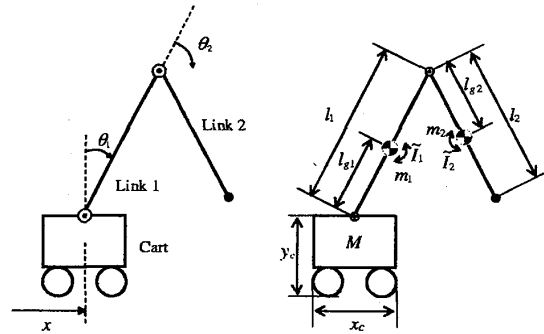


Fig. 3 3-DOF Robot

4.1 タスク設定 2次元平面上の適当な位置に原点を取り、

$$y_d(\phi) = \begin{bmatrix} -6 \cos \frac{\phi}{2} + 15 \\ -\cos \phi + 2 - 0.1 \sin \phi \end{bmatrix} \quad (20)$$

をロボットアームの手先の目標経路とする。また障害物の存在領域は

$$\begin{cases} W_1: \{(x, y) | x \leq 10, y \leq 1\} \\ W_2: \{(x, y) | x \geq 20, y \leq 1\} \end{cases} \quad (21)$$

とし、障害物回避のための評価関数 V を

$$V(\mathbf{q}) = \tanh[\alpha(x - W_1)] + \tanh[-\alpha(x - W_2)] - \frac{\mu}{2} (\theta_2 - \theta_2^*)^2 \quad (22)$$

$$\theta_2^* = -u \cos \frac{\phi + \pi/2}{2} \quad (u = 3\pi/5) \quad (23)$$

と定義する。このとき

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\partial V(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \\ &= \begin{bmatrix} -\alpha \operatorname{sech}^2[\alpha(x - W_1)] + \alpha \operatorname{sech}^2[-\alpha(x - W_2)] \\ 0 \\ \mu(\theta_2^* - \theta_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

と与える。式(22)の第1項および第2項は障害物と台車との距離を評価するものであり、これをできるだけ大きくすることがすなわち台車と障害物の接触を回避することである。また θ_2^* はアームのリンク1とリン

ク2のジョイントが上向きになるような θ_2 の目標角を示し、式(22)の第3項によって θ_2 を目標値 θ_2^* に追従させることでアームと障害物の接触を回避することを目的としている。

いまロボットの1つの冗長自由度に対して、2つのサブタスクを含む評価関数 V を設定している。一般に1自由度で2自由度を同時に必要とする作業を行うことはできないが、今回の問題では次のようにパラメータを設定することで2つのサブタスクを矛盾なく1つのサブタスクとして達成できると考えられる。

1. 障害物から十分離れた場所では式(24)第1行は小さい。よってこのときに式(24)第3行が大きくなるように μ を適当に選ぶことで、障害物から離れたところではアームと障害物の接触を回避するための動作をとる。
2. 障害物近くでは第3行に比べ第1行が支配的になるように μ を設計する。

ここでは $\mu = 0.1$ と設定する。

4.2 閾値 V_a, V_b の設定 いま V は複数のサブタスクから成るのでロボットに配位によるその値の変化を予測しにくく、状態 Q を決定する閾値 V_a, V_b を適切に設定することが難しい。そこで次のようにして V_a, V_b を設定することとした。

障害物回避の達成度を示す評価関数 V について、

- ・手先の経路追従が達成されている
 - ・ロボットの配位に急激な変化がない
- という条件のもとで次を求める。

1. 手先が目標経路上のある点にあるとき、ロボットが取り得る V の最大値 V^*
2. 目標経路上での V^* の最小値 V_{min}^*

この V_{min}^* が、ロボットが理想的に作業を行う際に取り得る V の最小値ということになる。つまり実際の動作時に V が V_{min}^* を大幅に下回るようなことがあれば、ロボットがサブタスクを満足に達成していないといえる。

今回の設定の場合、 V^* は図4のようになるので $V_a = 1.975 (< V_{min}^*)$ とした。また V_b は状態 Q の切換が十分なヒステリシスを持つように設定する。 V_b が小さすぎると状態の切換が頻繁に起き、大きすぎると Q_1 に移行しにくくなるので適当な値を設定する。 V の最大値 $V_{max} = 2.0$ よりここでは $V_b = 1.985$ とした。なお V_{min}^* の算出にはMatlabの $fmincon$ (制約付き多変数非線形最小化)を用いた。

4.3 シミュレーション結果 ロボットの初期状態を $\mathbf{q}_0 = [14, 0, 1.5]^T$ 、制御則のパラメータを $K_\phi = 10$, $\mathbf{K} = 10\mathbf{I}$, $\gamma = 50$, $\mathbf{K}_d = 300\mathbf{I}$ とし、サブタスクの達成

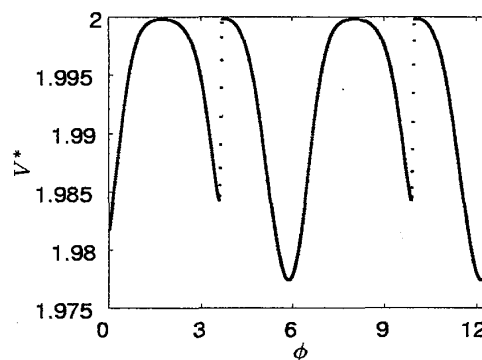


Fig. 4 V^* on the reference path

度によって決まる ω の値は式(8)に従って

$$\omega = \begin{cases} \omega_0(t) = \beta \tanh(\xi^T \mathbf{J}^+ \mathbf{y}'_d(\phi)) & \text{if } Q = Q_0 \\ \omega_1 = 1 & \text{if } Q = Q_1 \end{cases} \quad (25)$$

とする。このときのシミュレーション結果を以下に示す。

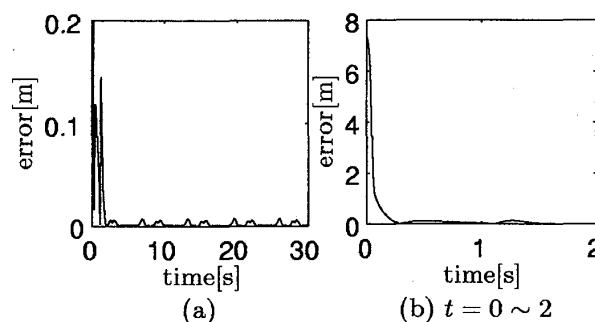
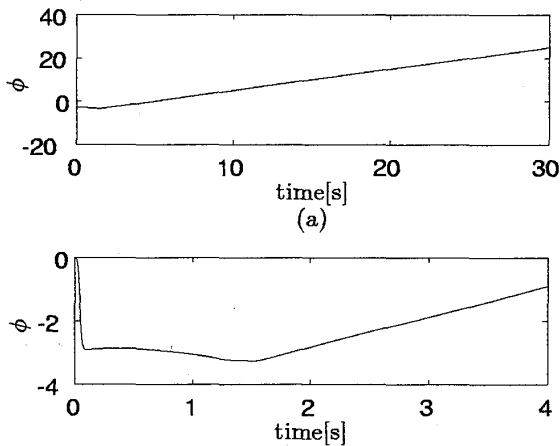


Fig. 5 Path following error

図5は経路追従誤差 $\|\mathbf{y}_d(\phi(t)) - \mathbf{y}(t)\|$ を示したものである。この図からシミュレーション開始後0.2秒程度で誤差の大きさは十分に小さくなり以後もそれが保たれていることがわかる。図5(a)において周期的に誤差が大きくなっているのは、 θ_2 が0に近づき特異姿勢となるためである。

図6は ϕ の時間変化を示したものである。シミュレーション開始後、目標点 \mathbf{y}_d を実際の手先 \mathbf{y} に近づけるために ϕ が変化しているのが分かる(0~0.1秒)。またメインタスク・サブタスクとも十分達成された後は、所望の速度 $\dot{\phi} \approx 1$ となっている。図7・図8はそれぞれ V および ω の変化を示している。シミュレーション開始後(0~1.25秒)は状態 Q_0 であるので、サブタスクを達成するための規範速度を ω により生成している。また一度 Q_1 となった後はその状態が保たれている。図9は目標点 $\mathbf{y}_d(\phi(t))$ の変化を表す。前に示した ϕ の変化により目標点速度が変化している



(b) Magnified figure of (a) from $t = 0$ to 0.4

Fig. 6 Response of $\phi(t)$

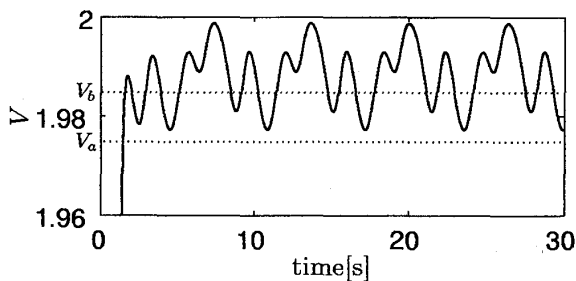


Fig. 7 Value of $V(t)$ with respect to t

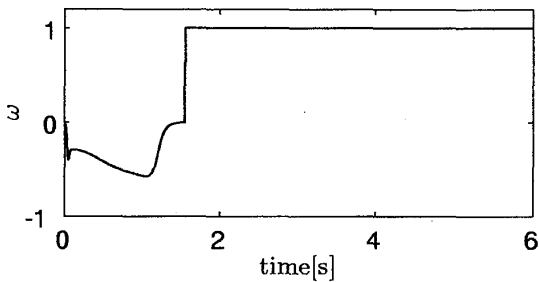


Fig. 8 Value of $\omega(t)$ with respect to t

のが分かる。図 10 は台車の位置 x の変化を示す。図 10 および図 11 よりロボットはサブタスクを達成していることが分かる。

以上をまとめると、 $\phi(t)$ の変化により実際の手先の近くに目標点を移すことでロボットは素早く所望の経路に追従している (図 5・図 6)。またシミュレーション開始後 (0~1.25 秒) は状態 Q_0 であるので、 $\omega_0(t)$ により目標規範速度を生成することでサブタスクを達成している (図 7~図 11)。状態 Q_1 となった後はメ

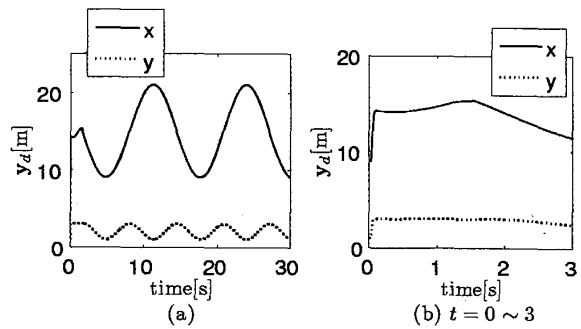


Fig. 9 Desired position $y_d(\phi(t))$

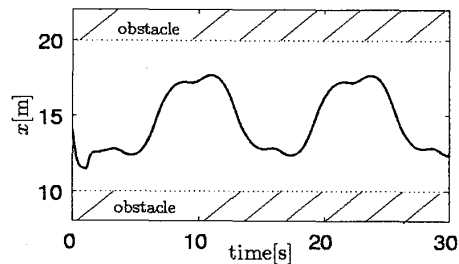


Fig. 10 Position of robot



Fig. 11 Stick diagram

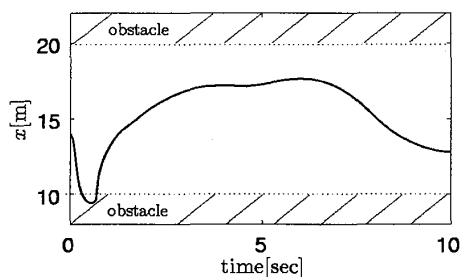
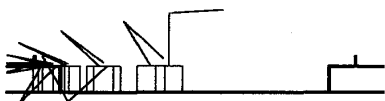
インタスク・サブタスクとも十分に達成されている。 $\theta_2 = 0$ (特異姿勢) の付近では経路追従誤差が大きくなってしまいが、ゲイン K をある程度大きくすることで誤差を小さくすることができる。

比較として $\omega = 1, K_\phi = 0$ とし動的パラメータを用いない場合のシミュレーションを行った。ただしこのシミュレーションはあくまで比較を目的とし障害物との接触に伴う力学は考慮していないため、障害物の存在する領域でも台車が運動することが可能である。過渡応答においてサブタスクが十分に達成されず台車が障害物に接触してしまう (図 12・図 13)。この場合 γ を大きくとれば接触を回避できるが、目標速度 \dot{q}_d の大きさが過大になる場合があり現実的でない。

5. おわりに

本論文では障害物回避を考慮した冗長ロボットの経路追従における動的パラメータを用いた目標の規範速度生成について提案した。また数値シミュレーションによりその有効性を確認した。

本論文では、ロボットの自由度が与えられたタスク

Fig. 12 Position of robot($\omega = 1, K_\phi = 0$)Fig. 13 Stick diagram($\omega = 1, K_\phi = 0$)

を実行するのに十分である場合を扱った。しかしながらこの前提が崩れた場合、達成すべき目標経路の形状そのものを変更するなど、より上位の自律機能が必要となり、さらなる検討が必要である。

文 献

- (1) T.Yoshikawa, Foundations of Robot Control, (1988), CORONA PUBLISHING CO., LTD.
- (2) S.Yigit, C.Burghart, and H.Woern, Avoiding Singularities of Inverse Kinematics for a Redundant Robot Arm for Safe Human Robot Co-operation, *International Conference on Computer, Communication and Control Technologies*
- (3) R.V.Patel, F.Shadpey, F.Ranjbaran, and J.Angeles, A Collision-Avoidance Scheme for Redundant Manipulators: Theory and Experiments, *Journal of Robotic Systems*, 22,12(2005), pp.737-757
- (4) T.Nakamura, H.Hanafusa and T.Yoshikawa, Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.6, No.2 (1987), pp.3-15
- (5) J.M.Hollerbach, K.C.Suh, Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, *IEEE Conf,on Robotics and Automation*, (1985), pp.1016-1021
- (6) Oda,N., Murakami,T., Ohnishi,K., Observer Based Local Torque Optimization in Redundant Manipulator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.62, No.602 (1996), pp.48-54
- (7) A.P.Aguiar, J.P.hespanha, and P.V.Kokotovic, Path-Following for Nonminimum Phase Systems Removes Performance Limitations, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.50, No.2(2005), pp.234-239
- (8) M.Galicki, Path Following by the End-Effector of a Redundant Manipulator Operating in a Dynamic Environment, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.20, No.6(2004), pp.1018-1025
- (9) Sakurama, K., Nakano, K., Trajectory Tracking Control of Mechanical Systems with Obstacle Avoidance, *Transaction of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.19, No.12(2006), pp.477-487
- (10) J.M.Hollerbach, Dynamic Scaling of Manipulator Trajectories, *Trans.ASME, J.Dyn.Syst.Meas.Control*, Vol.106 (1984), pp.102-106
- (11) M.Kumon, and N.Adachi, Dynamic Parameterization for Path Following Control, *Asian Journal of Control*, Vol.3, No.1(2001), pp.27-34
- (12) R.Murray, Z.Li and S.S.Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation,, (1993), CRC Press.