

時間軸変換を組み込んだ人工ポテンシャル法による
冗長マニピュレータのフィードバック制御

学生員 田 中 良 幸

正 員 辻 敏 夫

非会員 金 子 真

電 気 学 会 論 文 誌 C

(電子・情報・システム部門誌)

平成 11 年 4 月 号 抜 刷

Trans. IEE of Japan, Vol. 119-C, No. 4, April, 1999

時間軸変換を組み込んだ人工ポテンシャル法による 冗長マニピュレータのフィードバック制御

学生員 田 中 良 幸 (広島大学)
 正 員 辻 敏 夫 (広島大学)
 非会員 金 子 真 (広島大学)

Feedback Control of Redundant Manipulators via Artificial Potential Field Approach with Time Scaling

Yoshiyuki Tanaka, Student Member, Toshio Tsuji, Member, Makoto Kaneko, Non-member (Hiroshima University)

This paper proposes a new method for dynamic control of redundant manipulators via artificial potential field approach (APFA). The proposed method is based on the APFA with a combination of a time scale transformation and a time base generator which works as a time scale compressor. The dynamic behavior of the manipulator can be controlled by using the proposed method without any change of the form of the designed controller itself. The effectiveness of the proposed method is verified by computer simulations for redundant manipulators.

キーワード：人工ポテンシャル法, 冗長マニピュレータ, 時間軸変換, 時間関数発生器

1. はじめに

マニピュレータの手先軌道生成問題に対しては、従来から人工ポテンシャル法^{(1)~(4)}がよく用いられる。この方法は、目標位置で最小値となるポテンシャル場を作業空間に設定し、その勾配ベクトルを用いて手先を目標位置に到達させるものであり、その簡素なアルゴリズムゆえリアルタイム性に富んでいる。また、障害物を含む作業空間においては、障害物からの反発力を発生するポテンシャル場を考慮することにより、障害物回避を実現することもできる。しかし、この手法においては手先が目標位置へ到達するまでの時間(収束時間)および移動過程における挙動がどのようになるか事前に予測・制御できないという問題がある。

この問題に対して、橋本ら⁽⁴⁾はマニピュレータを対象として静電ポテンシャル場を用いた Sliding Mode 制御により収束時間の制御と障害物回避軌道の生成を可能としているが、速度波形などの時間挙動の制御までは考えていない。辻ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾は人工ポテンシャル法に用いるポテンシャル関数の時間変化を時間関数発生器 (Time Base Generator:TBG) に同期させることで、マニピュレータや移動ロボットの空間軌道と収束時間等の同時制御に成功しているが、ロボットの動力学までは考慮されていない。

一方、J.M.Hollerbach⁽⁷⁾は各関節で発生できる駆動力

に制限がある場合のマニピュレータの手先軌道追従問題において、制御系の時間軸を与えられた軌道を考慮して設計した時間軸に変換し、軌道上を移動する手先の速度波形を調節することにより、手先を目標位置へ最短時間で到達させる手法を開発した。また、三平、古田⁽⁸⁾は制御系の時間軸を実時間に対して逆行しない任意の時間軸に変換してもシステムの安定性は変化しないという性質を利用した時間軸変換法を提案している。さらに、Tanaka ら⁽⁹⁾は時間軸変換法と TBG 法を組み合わせた新しい軌道生成法を開発し、従来法では適用できなかった動力学を考慮したホロミックな移動ロボットの空間軌道と時間軌道の同時生成に成功している。

本論文では、Tanaka ら⁽⁹⁾が開発した軌道生成法を用いて、冗長マニピュレータの手先軌道生成法の開発を試みる。対象とする冗長マニピュレータは、作業に必要な自由度以上の関節自由度を有効に利用することにより、特異姿勢回避や障害物回避などマニピュレーションの器用さ、柔軟性を実現できるという特徴を備えている^{(10)~(12)}。本手法ではこのような冗長自由度を積極的に利用しながら、マニピュレータの手先の空間軌道と時間軌道の同時制御が可能であることを示す。

以下、2では冗長マニピュレータの手先・関節空間における動力学の定式化と冗長性について説明し、3で従来の

ポテンシャル法を利用したフィードバック制御則を設計する。4では人工ポテンシャル法に時間軸変換の概念を組み込んだ新しい軌道生成法について説明し、5でその有効性を示すために行ったシミュレーションについて述べる。

2. マニピュレータの動力学

マニピュレータの手先空間の自由度を m 、関節自由度を n とすると、関節空間における運動方程式は一般に

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = \tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ただし、 $q \in \mathcal{R}^n$ は関節角度ベクトル、 $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は慣性行列（以下 M と略記）、 $h(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^n$ は遠心力・コリオリ力等を表す非線形項、 $g(q) \in \mathcal{R}^n$ は重力項、 $\tau \in \mathcal{R}^n$ は関節トルクである。また、手先空間におけるマニピュレータの運動方程式は

$$M_x(q)\ddot{x} + h_x(q, \dot{q}) + g_x(q) = F \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし、 $x \in \mathcal{R}^m$ は手先座標ベクトル、 $F \in \mathcal{R}^m$ はマニピュレータの手先の駆動力、 $M_x(q) = (JM^{-1}J^T)^{-1} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ は手先の等価慣性行列（以下 M_x と略記）、 $J \in \mathcal{R}^{m \times n}$ はヤコビ行列で、 $h_x(q, \dot{q}) = \bar{J}^T h(q, \dot{q}) - M_x \dot{J} \dot{q}$ 、 $g_x(q) = \bar{J}^T g(q)$ 、 $\bar{J} = (M_x J M^{-1})^T$ である。ここで、マニピュレータが冗長な関節自由度を有する時 ($n > m$)、関節トルク $\tau \in \mathcal{R}^n$ は手先の運動を制御する関節トルク $\tau_{effector} \in \mathcal{R}^n$ と冗長な自由度を利用して手先の運動に影響を与えることなく関節の動きを制御するための関節トルク $\tau_{joint} \in \mathcal{R}^n$ に分離することができる。このとき、 $\tau_{effector}$ と F の間には

$$\tau_{effector} = J^T F \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が成立する。一方、 τ_{joint} に関しては、

$$\bar{J}^T \tau_{joint} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

が常に成立している⁽¹²⁾。式(4)は τ_{joint} が手先の加速度を発生しないことを意味しており、式(4)の条件を満足する一般解 τ_{joint} は

$$\tau_{joint} = G\tau^* \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。ただし、 τ^* は任意の n 次元ベクトル、 $G = I - J^T \bar{J}^T \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 、 I は n 次元の単位行列である。したがって、式(3)、(5)より冗長マニピュレータに対する関節トルク τ は

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{effector} + \tau_{joint} \\ &= J^T F + G\tau^* \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

で構成できることがわかる。

本論文では、マニピュレータの手先に働く力 F と冗長な関節の運動を制御する関節トルク τ^* をそれぞれ独立に設計し、それらを用いて全体のフィードバック制御則を設計する。このフィードバック制御則を用いることにより、マニピュレータは関節自由度の冗長性を積極的に利用して与えられた作業を遂行することが可能となる。

3. 人工ポテンシャル法によるフィードバック制御則の設計

本章では、通常的人工ポテンシャル法を用いて、手先を目標位置へ到達させるための手先フィードバック制御則と、冗長な関節を制御するための関節フィードバック制御則を設計する。

手先フィードバック制御則を設計するためのポテンシャル関数 $V_{effector}$ を次の2次形式で定義する。

$$V_{effector} = \frac{1}{2}(x^* - x)^T K_1(x^* - x) + \frac{1}{2}\dot{x}^T K_2 \dot{x} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 x^* は手先の目標位置、 $K_i = \text{diag.}(k_1^i, k_2^i, \dots, k_m^i)$ 、 $k_m^i > 0$ ($i = 1, 2$) とする。このポテンシャル関数 $V_{effector}$ に対し、手先フィードバック制御則 F を

$$F = -M_x K_2^{-1} \{ K_1(x - x^*) + \dot{x} \} + h_x(q, \dot{q}) + g_x(q) \quad \dots\dots (8)$$

とすると、ポテンシャル関数 $V_{effector}$ の時間微分は式(2)より手先が目標位置に到達するまで

$$\dot{V}_{effector} = -\|\dot{x}\|^2 < 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、リアプノフの安定条件を満たす。式(8)のフィードバック制御則 F に等価な関節トルク $\tau_{effector}$ (式(3)) 関節に与えることにより、手先は目標位置に到達する。しかし、関節の運動を直接制御できないため、マニピュレータが冗長な関節自由度を有する場合には、手先が目標位置に到達しても関節を静止させることはできない。

本論文ではこの問題に対し、式(4)の零空間を用いてマニピュレータの冗長性を利用する。そのため、マニピュレータの冗長性に関するポテンシャル関数 V_{joint} を

$$V_{joint} = \frac{1}{2}\dot{q}^T M \dot{q} + \kappa(t)Q(q) \quad \dots\dots\dots (10)$$

と定義する。ただし、 $\kappa(t)$ は指定した有限時刻 t_f でゼロとなる非負の単調減少関数、 $Q(q)$ は1階微分可能な正のスカラ関数とする（以下 Q と略記）。ポテンシャル関数 V_{joint} の右辺第1項は手先が目標位置へ到達した時に冗長な関節の運動を減衰するための項、第2項はスカラ関数 Q を極小とする姿勢 q^* に近づけるための項である。このポテンシャル関数 V_{joint} を時間微分し、関節空間の運動方程式(式(1))と $\dot{q}^T M(q)\dot{q} = 2\dot{q}^T h(q, \dot{q})$ の関係式を考慮して整理すると、

$$\dot{V}_{joint} = \dot{q}^T \left(-g + \tau + \kappa(t) \frac{\partial Q}{\partial q} \right) + \dot{\kappa}(t)Q(q) \quad \dots (11)$$

となる。したがって、フィードバック制御則 τ を

$$\tau = -\dot{q} + g(q) - \kappa(t) \frac{\partial Q}{\partial q} \quad \dots\dots\dots (12)$$

と定義すると、 $\kappa(t)$ が実時間に関して単調減少関数であることより、ポテンシャル関数 V_{joint} の時間変化は $V_{joint} = 0$ となるまで

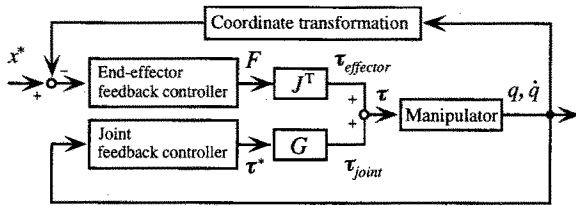


図1 冗長マニピュレータに対するフィードバック制御系

Fig. 1. Block diagram of the feedback control system for a redundant manipulator

$$\dot{V}_{joint} = -\|\dot{q}\|^2 + \dot{\kappa}(t) Q < 0 \dots\dots\dots (13)$$

となりリヤプノフ安定となる。ここで設計した式(12)の関節トルク τ を τ^* に選ぶことにより、手先の運動に影響を与えず冗長な関節の運動を制御する関節フィードバック制御則 τ_{joint} が得られる。

以上より、手先、関節レベルでそれぞれ設計した制御則(式(8), (12))から構成したフィードバック制御則 τ (式(6))を用いることにより、手先軌道に影響を与えない範囲でスカラー関数 Q をできるだけ小さくしながら、手先を目標位置へ移動することが可能となる。このフィードバック制御系の構成を図1に示す。

ここで、式(2)の手先空間における運動方程式に手先力フィードバック制御則 F (式(8))を代入すると、手先の挙動を支配する減衰系微分方程式

$$\ddot{x} + K_2^{-1}\dot{x} + K_2^{-1}K_1(x - x^*) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

を得る。したがって、手先はシステムの平衡点に漸近的に収束することがわかる。結局、マニピュレータの手先が初期位置から目標位置 x^* に到達するまでの時間を調節したり、手先の運動の時間的な挙動を自由に調節することは不可能である。

4. 仮想時間における制御則の設計

一般にシステムを解析する際、設定した仮想時間が実時間に対して逆行しない限り、時間軸をその仮想時間に変換してもシステムの安定性や根軌跡の特徴は損なわれない⁽⁸⁾。したがって、システムの時軸を実時間 t_f で無限大となるような仮想時間 s を考え、その新しいシステムを仮想時間 s の時間軸上で安定化するフィードバック制御則が導出できればそのシステムを時刻 t_f で安定化することが可能である⁽⁹⁾。

本論文で用いる手法は、この時間軸変換を人工ポテンシャル法に組み込んだものであり、本章ではその概要を説明する。

〈4・1〉 時間軸関数の設計 実時間 t と仮想時間 s の関係を関数 $a(t)$ を用いて式(15)のように定義する。

$$\frac{ds}{dt} = a(t) \dots\dots\dots (15)$$

関数 $a(t)$ は実時間 t において連続で、時間軸関数と呼ばれる⁽⁸⁾。いまこの時間軸関数 $a(t)$ を

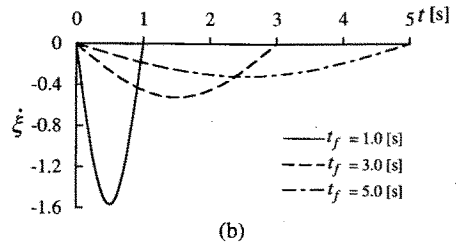
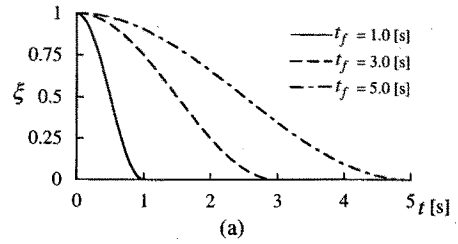


図2 収束時間 t_f に対する ξ と $\dot{\xi}$ の時間挙動
Fig. 2. Time history of ξ and $\dot{\xi}$ for the different convergence time t_f

$$a(t) = -p \frac{\dot{\xi}}{\xi} \dots\dots\dots (16)$$

と定義する。 p は正の実定数である。ここで、時間軸関数 $a(t)$ を構成する関数 $\xi(t)$ は TBG と呼ばれるベル型の速度波形をもつスカラー関数であり、 $\xi(0) = 1, \xi(t_f) = 0$ となる単調減少関数である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ここでは、このスカラー関数 ξ の挙動を

$$\dot{\xi} = -\gamma(\xi(1 - \xi))^\beta \dots\dots\dots (17)$$

と定義する。ただし、 γ は収束時間 t_f の関数、 β は ξ の挙動を決定する $0 < \beta < 1$ を満たす実定数である。このとき、収束時間 t_f はガンマ関数 $\Gamma(\cdot)$ を用いて

$$t_f = \int_0^{t_f} dt = \int_1^0 \frac{d\xi}{\dot{\xi}} = \frac{\Gamma^2(1 - \beta)}{\gamma\Gamma(2 - 2\beta)} \dots\dots\dots (18)$$

となる。したがって、式(18)の γ を

$$\gamma = \frac{\Gamma^2(1 - \beta)}{t_f\Gamma(2 - 2\beta)} \dots\dots\dots (19)$$

と定義すれば、収束時間を自由に設定することができる。図2は、収束時間を $t_f = 1.0, 3.0, 5.0$ [s] と指定したときの ξ と $\dot{\xi}$ の挙動を示している。ただし、 $\beta = 0.5$ とした。

このとき、式(15), (16)より、仮想時間 s は ξ を用いて

$$s = \int_0^t a(t) dt = -p \ln \xi(t) \dots\dots\dots (20)$$

となり、仮想時間 s は実時間 t に逆行せず単調増加することが分かる。以上より、本論文では式(20)で定義した仮想時間 s を用いることにする。

〈4・2〉 システムの時軸変換 状態変数を $Z = (x, q, \dot{x}, \dot{q})^T$ と選ぶことにより、関節空間における運動方程式(式(1))と手先空間における運動方程式(式(2))か

ら次の状態方程式を得る。

$$\frac{d}{dt}Z = \begin{pmatrix} 0_{m+n} & I_{m+n} \\ 0_{m+n} & 0_{m+n} \end{pmatrix} Z + \begin{pmatrix} 0_{m+n} \\ I_{m+n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_t \\ \tau_t \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$F_t = M_x^{-1} \{F - (h_x(q, \dot{q}) + g_x(q))\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\tau_t = M^{-1} \{\tau - (h(q, \dot{q}) + g(q))\} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 I_{m+n} は $(m+n)$ 次元の単位行列、 0_{m+n} は $(m+n)$ 次元の零行列である。

式 (21) の時間軸を実時間 t から仮想時間 s に変換すると次式を得る (付録参照)。

$$\frac{d}{ds}\Psi = \begin{pmatrix} 0_{m+n} & I_{m+n} \\ 0_{m+n} & 0_{m+n} \end{pmatrix} \Psi + \begin{pmatrix} 0_{m+n} \\ I_{m+n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_s \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad (24)$$

ただし、

$$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4) = (x, q, \frac{\dot{x}}{a(t)}, \frac{\dot{q}}{a(t)})^T \quad \dots (25)$$

$$F_s = \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{a(t)} \right) \dot{x} + \frac{1}{a^2(t)} F_t \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\tau_s = \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{a(t)} \right) \dot{q} + \frac{1}{a^2(t)} \tau_t \quad \dots\dots\dots (27)$$

である。ここで、時間軸変換に用いた仮想時間 s は実時間 t に逆行せず 1 対 1 であることがすでに保証されているので、式 (24) の新しいシステムの安定性はもとのシステム (式 (21)) と同じである⁽⁸⁾。したがって、この新しいシステムを安定化するフィードバック制御則が存在する。

〈4・3〉フィードバック制御則の設計 仮想時間 s における新しいシステム (式 (24)) を漸近安定化するフィードバック制御則を、人工ポテンシャル法によって設計する。

仮想時間において手先を目標位置 ψ_1^* へ導くフィードバック制御則 F_s を設計する際に用いるポテンシャル関数 $V_{effector}^\psi$ を

$$V_{effector}^\psi = \frac{1}{2}(\psi_1^* - \psi_1)^T K_1(\psi_1^* - \psi_1) + \frac{1}{2}\psi_3^T K_2\psi_3 \quad \dots\dots\dots (28)$$

と定義する。このポテンシャル関数 $V_{effector}^\psi$ に対し、フィードバック制御則 F_s を

$$F_s = -K_2^{-1} \{K_1(\psi_1 - \psi_1^*) + \psi_3\} \quad \dots\dots\dots (29)$$

と設計したとき、ポテンシャル関数 $V_{effector}^\psi$ の仮想時間 s に関する微分は $V_{effector}^\psi = 0$ となるまで

$$\frac{d}{ds} V_{effector}^\psi = -\|\psi_3\|^2 < 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

となり、リアプノフ安定となることがわかる。

次に、式 (29) のフィードバック制御則 F_s の時間軸を仮想時間から実時間に変換する。式 (26) で定義した制御入力 F_s と式 (29) のフィードバック制御則 F_s の二式から F_t を消去し整理すると、実時間 t におけるフィードバック制御

則 F_t

$$F_t = -a^2(t)K_{12}(x - x^*) - \left\{ a(t)K_2^{-1} - \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right\} \dot{x} \quad \dots\dots\dots (31)$$

を得る。ただし、 $K_{12} = K_2^{-1}K_1$ である。このとき、式 (22)、(31) よりフィードバック制御則 F^ψ

$$F^\psi = M_x F_t + h_x(q, \dot{q}) + g_x(q) \quad \dots\dots\dots (32)$$

を得る。式 (32) の F^ψ と等価な関節トルク $\tau_{effector}$ (式 (3)) により、マニピュレータの手先は目標位置に指定時刻 t_f で到達する。

次に、仮想時間 s において冗長な関節自由度の制御に関するポテンシャル関数 V_{joint}^ψ を

$$V_{joint}^\psi = \frac{1}{2}\psi_4^T K_3\psi_4 + \zeta(s)Q_s(\psi_2) \quad \dots\dots\dots (33)$$

と定義する。ただし、 $Q_s(\psi_2)$ は仮想時間 s に関して 1 階微分可能な非負のスカラ関数 (以下 Q_s と略記)、 $\zeta(s)$ は仮想時間 s に関して単調減少関数、 $K_3 = \text{diag}(k_1^3, k_2^3, \dots, k_n^3)$ 、 $k_n^3 \geq 0$ である。仮想時間におけるマニピュレータの状態方程式 (式 (24)) より、ポテンシャル関数 V_{joint}^ψ を仮想時間 s で微分すると、

$$\frac{d}{ds} V_{joint}^\psi = \psi_4^T \left\{ K_3\tau_s + \zeta(s) \frac{\partial Q_s}{\partial \psi_2} \right\} + \frac{d\zeta(s)}{ds} Q_s \quad \dots\dots\dots (34)$$

となる。いま、 $\zeta(s)$ は仮想時間 s に関して単調減少関数であることより、フィードバック制御則 τ_s を

$$\tau_s = -K_3^{-1} \left\{ \psi_4 + \zeta(s) \frac{\partial Q_s}{\partial \psi_2} \right\} \quad \dots\dots\dots (35)$$

と設計すれば、 $V_{joint}^\psi = 0$ 以外のとき

$$\frac{d}{ds} V_{joint}^\psi = -\|\psi_4\|^2 + \frac{d\zeta(s)}{ds} Q_s < 0 \quad \dots\dots\dots (36)$$

となりポテンシャル関数 V_{joint}^ψ は常に減少することがわかる。

ここで、仮想時間 s に関する単調減少関数 $\zeta(s)$ を

$$\zeta(s) = \alpha e^{-\frac{2s}{p}} \quad \dots\dots\dots (37)$$

と定義し、フィードバック制御則 τ_s (式 (35)) の時間軸を仮想時間 s から実時間 t に変換すると、実時間 t に関するフィードバック制御則 τ_t

$$\tau_t = - \left\{ a(t)K_3^{-1} - \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right\} \dot{q} - \alpha \xi^2(t) a^2(t) K_3^{-1} \frac{\partial Q}{\partial q} \quad \dots\dots\dots (38)$$

が得られる。ただし、 $\alpha > 0$ である。そして、式 (23)、(38) より関節のトルクフィードバック制御則 τ^ψ

$$\tau^\psi = M\tau_t + h(q, \dot{q}) + g(q) \quad \dots\dots\dots (39)$$

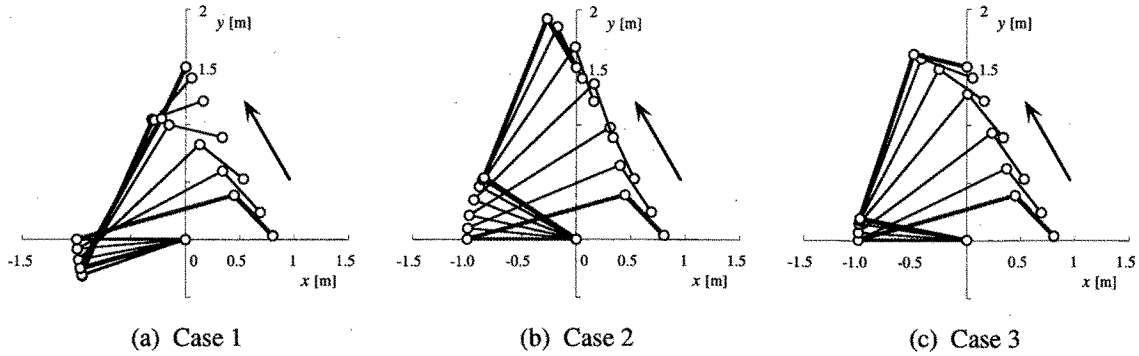


図3 スカラ関数 $Q_i(q)$ による手先軌道の変化 ($i = 1, 2, 3$)

Fig. 3. Changes of the generated end-point trajectories with positive functions $Q_i(q)$ ($i = 1, 2, 3$)

表1 3リンク平面マニピュレータのリンクパラメータ

Table 1. Link parameters of a three-joint planar manipulator

	link 1	link 2	link 3
length [m]	1.0	1.5	0.5
mass [kg]	0.8	1.2	0.4
center of mass [m]	0.4	0.6	0.25
moment of inertia [kgm ²]	0.06666	0.22500	0.00833

を得る。前章と同様に、ここで設計した式(39)の関節トルク τ_ψ を τ^* と選ぶことにより、手先に影響を与えない関節トルクフィードバック制御則 τ_{joint} (式(5))を得る。

最後に、手先・関節レベルで設計した制御則(式(32), (39))を式(6)に代入して、関節自由度の冗長性を利用するフィードバック制御則 τ を得る。このとき、マニピュレータの手先は指定時刻 t_f で目標位置へ到達し、かつスカラ関数 $Q(q)$ をできるだけ小さくする姿勢を実現することができる。

5. シミュレーション

ここでは本論文で提案した軌道生成法を3関節平面マニピュレータに適用した。アームの初期姿勢を $q(0) = (\pi, -\frac{11\pi}{12}, -\frac{\pi}{3})^T$ [rad], 手先の目標位置を $x^* = (0.0, 1.5)^T$ [m], 目標時刻 $t_f = 5.0$ [s] としたときに生成された手先軌道を図3に示す。ただし、ポテンシャル関数中のゲイン行列 K_i ($i = 1, 2, 3$) を $K_1 = \text{diag.}(0.25, 0.25)$, $K_2 = \text{diag.}(1.0, 1.0)$, $K_3 = \text{diag.}(1.0, 1.0, 1.0)$ とし、他のパラメータは $p = 8.0$, $\alpha = 1.0$ と設定した。また、アームの動力学計算にはアップル法⁽¹³⁾を用い、マニピュレータのリンクパラメータは表1のように定めた。なお、計算は Pentium Pro 200 MHz のMPUを有する計算機上で、サンプリングタイムを $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ [s] と設定して行なった。実際に軌道生成に要した計算時間は、30秒程度であった。

図3(a)はスカラ関数 $Q(q)$ を

$$Q_1(q) = 0 \dots \dots \dots (40)$$

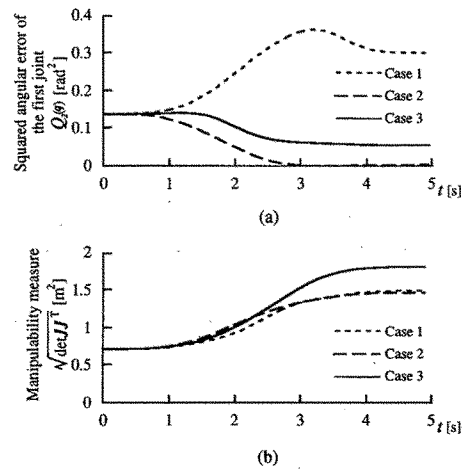


図4 第1関節の自乗誤差と可操作度の時間変化
Fig. 4. Time histories of squared angular error of the first joint and the manipulability measure

とした場合、図3(b)は第1関節に目標角度 q_1^* を設定したときの q_1^* と q_1 との自乗誤差

$$Q_2(q) = \frac{1}{2}(q_1^* - q_1(t))^2 \dots \dots \dots (41)$$

とした場合で、いずれもスカラ関数 $Q(q)$ の極小化を行っている。ただし、 $q_1^* = \frac{5\pi}{6}$ [rad] とした。一方、図3(c)は可操作度⁽¹¹⁾を考慮したスカラ関数

$$Q_3(q) = Q_{max} - \sqrt{\det JJ^T} \dots \dots \dots (42)$$

を用い、可操作度の極大化を行うことで特異姿勢回避を考慮に入れた場合の結果である。ただし、 Q_{max} は $Q_3(q) \geq 0$ を満たすように、式(42)の右辺第2項に対して十分に大きな正定数とする。ここで、 Q_{max} は定数であるから、設計した式(38)のフィードバック制御則 τ_t 中には現れないことに注意されたい。したがって、 Q_{max} に具体的な値を設定する必要はなく、スカラ関数 $Q_3(q)$ の極小化により可操作度の極大化が達成できる。図3(a)の場合、手先が目標位置に到達する時点でアームの第3関節が伸びた姿勢をとっていることがわかる。これに対して図3(b), (c)では、ス

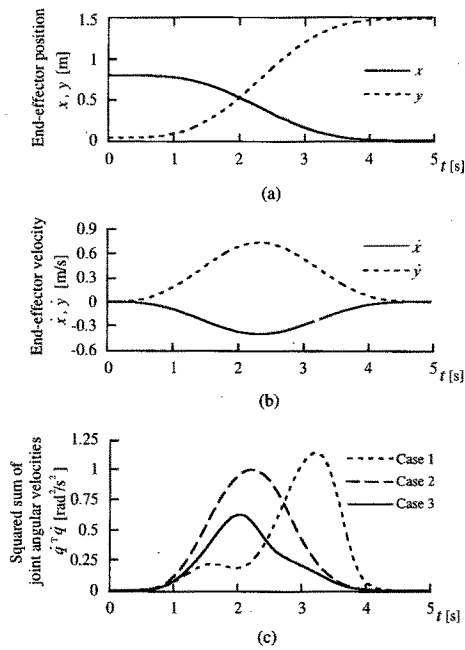


図5 手先の位置、速度および関節角速度自乗和の時間変化
 Fig. 5. Time histories of the end-effector position, velocity and squared sum of joint angular velocities

表2 4リンク平面マニピュレータのリンクパラメータ

Table 2. Link parameters of a four-joint planar manipulator

	link i ($i=1, \dots, 4$)
length [m]	0.2
mass [kg]	1.57
center of mass [m]	0.1
moment of inertia [kgm ²]	0.8

カラ関数 $Q(q)$ を最適化する関節制御の働きにより、アームが特異姿勢になることを避けながら手先が目標位置に移動している。図4にこのときの第1関節の自乗誤差と可操作度の時間変化を示す。図3(b), (c)の場合には、設定したスカラ関数 $Q(q)$ が他の場合に比べて改善されている様子がわかる。

一方、手先の位置、速度および関節角速度の自乗和の時間変化を図5に示す。図5(a), (b)より手先は滑らかな軌道を生成して目標時刻 $t_f = 5.0$ [s] に目標位置に到達している。ここで、手先位置と速度の時間変化(図5(a), (b))はいずれのシミュレーション結果も完全に一致していることに注意されたい。また、すべての場合においてマニピュレータの関節は、手先が目標位置に到達する時刻 $t_f = 5.0$ [s] で静止していることが図5(c)よりわかる。

次に、4リンク冗長マニピュレータに対し点 $P = (0.0, 0.4)^T$ [m] を原点とする極座標を手先の作業空間にとり、可操作度の極大化を考慮した手先軌道の生成を行った(図6(a)参照)。このとき手先座標は、点 P から手先に向か

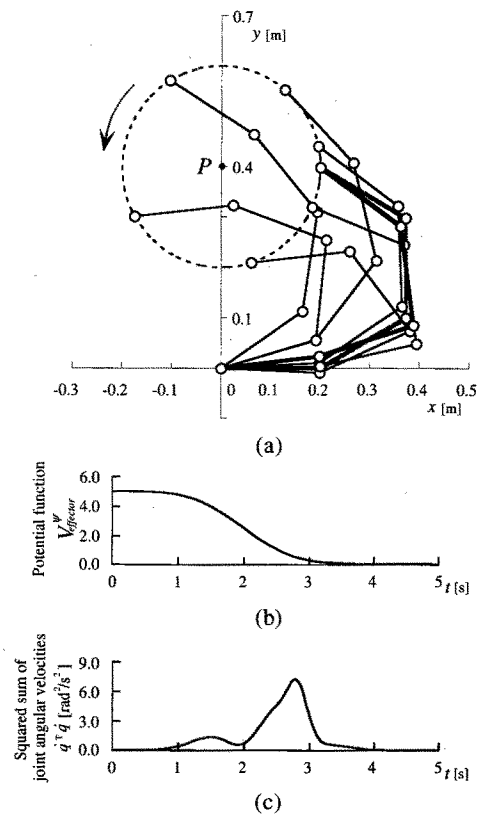


図6 極座標において生成された空間・時間軌道
 Fig. 6. The generated spatio-temporal trajectories of the manipulator in the polar coordinates

うベクトルと絶対座標 x 軸がなす角 ϕ と点 P と手先間の距離 r となる。マニピュレータの手先の初期位置が $x(0) = (0$ [rad], 0.2 [m])^T となるように初期姿勢を $q(0) = (0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3})^T$ [rad] とし、手先の目標位置を $x^* = (2\pi$ [rad], 0.2 [m])^T、目標時刻 $t_f = 5.0$ [s] としたときに生成された手先軌道を図6に示す。ただし、 $K_1 = \text{diag.}(0.25, 0.25)$, $K_2 = \text{diag.}(1.0, 1.0)$, $K_3 = \text{diag.}(1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$ とし、他のパラメータは $p = 8.0$, $\alpha = 5.0$ と設定した。また、マニピュレータのリンクパラメータは表2のように定めた。

図6(a)より、手先は点 P を中心に円軌道を描いていることがわかる。図6(b)はポテンシャル関数 $V_{effector}^{\psi}$ の時間変化である。また、図6(c)からマニピュレータの関節は指定時刻 $t_f = 5.0$ [s] で静止していることが確認できる。

6. まとめ

本論文では、動力学を考慮した冗長マニピュレータの手先軌道生成問題に対して、実時間に逆行せず指定した時刻で無限大となる仮想時間を用いて時間軸変換をおこない、それにより得られた新しいシステムのフィードバック制御則を人工ポテンシャル法を用いて設計した。そして、得られたフィードバック制御則を実時間に逆変換することにより、マニピュレータの手先が目標位置に到達するまでの収束時間と時間挙動の制御を可能とした。さらにマニピュレータ

の冗長性を積極的に利用する方法を提案し、手先だけでなく関節の運動も有限時刻で収束することを示した。本手法ではロボットが目標位置に到達するまでの所要時間を指定できることから、正確な移動スケジュールが要求されるような作業や複数ロボットの同期制御等に有効であると考えている。

なお、本論文では Point-to-Point の軌道制御のみを対象とし、より複雑な軌道については触れなかった。実際のマニピュレータの動作軌道生成では、作業空間内に設置した経路点の通過問題を解決する必要があるが、本論文で提案した方法では経路点上で一度静止してしまうことになる。もちろん、経路点を仮想的な目標点として利用することにより、連続的な速度変化を有する軌道を生成することは可能であるが、その経路点を正確に通過するための拘束条件や通過速度の指定などの問題が残る。今後は、これらの経路点に関する問題を解決した上で、各関節が発生できる駆動力に制限がある場合や、手先だけでなく関節の速度波形も調節可能な制御法を開発していきたいと考えている。

(平成9年12月22日受付, 同10年6月22日再受付)

文 献

- (1) L. A. Loeff and A. H. Soni: "An Algorithm for Computer Guidance of a Manipulator in Between Obstacles," Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 97, No. 3, pp. 836-842 (1975)
- (2) O. Khatib: "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90-96, Spring (1986)
- (3) C. I. Connolly, J. B. Burns and R. Weiss: "Path Planning using Laplace's Equation," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2102-2106 (1990)
- (4) 橋本, 國井, 原島, V. I. Utkin, S. V. Drakurov: 静電ポテンシャル法及び Sliding Mode を用いた多自由度マニピュレータの障害物回避, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 8, pp. 1220-1228 (1993)
- (5) 辻, P.G. Morasso, 山中, 金子: Time Base Generator を利用した非ホロノミック移動ロボットのフィードバック制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1072-1078 (1994)
- (6) T. Tsuji, P. G. Morasso and M. Kaneko: "Trajectory Generation for Manipulators Based on Artificial Potential Field Approach with Adjustable Temporal Behavior," in Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 438-443 (1996)
- (7) J. M. Hollerbach: "Dynamic Scaling of Manipulator Trajectories," Trans. of ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 106, No.1, pp. 102-106 (1984)
- (8) 三平, 古田: 時間軸を考慮に入れた非線形システムの解析, 計測自動学会論文集, Vol. 22, No. 6, pp. 604-609 (1986)
- (9) Y. Tanaka, T. Tsuji, M. Kaneko and Pietro G. Morasso: "Trajectory Generation using Time Scaled Artificial Potential Field," in Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, pp. 223-228 (1998).
- (10) A. Liegeois: "Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-7, No. 12, pp. 868-871 (1977)
- (11) T. Yoshikawa: "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," in Robotics Research, The First International Symposium, M. Brady and R. Paul, Eds. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 735-747 (1984)
- (12) O. Khatib: "Motion/Force Redundancy of Manipulators," in proceedings of Japan-U. S. A Symposium on Flexible Automation, Vol. 1, pp. 337-342 (1990)
- (13) V. Potkonjak and M. Vukobratovic: "Two New Methods for

Computer Forming of Dynamic Equation of Active Mechanisms," Mechanism and Machine Theory, Vol. MMT-14, No. 3, pp. 189-200 (1979)

付 録

1. 仮想時間 s におけるシステムの状態方程式

まず、状態変数 Z を仮想時間 s で微分すると、

$$\frac{d}{ds} Z = \frac{dt}{ds} \frac{d}{dt} Z = \frac{1}{a(t)} \frac{d}{dt} Z \dots\dots\dots (付1)$$

を得る。この関係式を用いて、式(25)で定義した新しい状態変数ベクトル Ψ の各要素を仮想時間 s で微分して整理すると、

$$\frac{d\psi_1}{ds} = \frac{dt}{ds} \frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\dot{x}}{a(t)} = \psi_3 \dots\dots\dots (付2)$$

$$\frac{d\psi_2}{ds} = \frac{dt}{ds} \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{\dot{q}}{a(t)} = \psi_4 \dots\dots\dots (付3)$$

$$\frac{d\psi_3}{ds} = \frac{dt}{ds} \frac{d\psi_3}{dt} = \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{a(t)} \right) \dot{x} + \frac{1}{a^2(t)} F_t \dots (付4)$$

$$\frac{d\psi_4}{ds} = \frac{dt}{ds} \frac{d\psi_4}{dt} = \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{a(t)} \right) \dot{q} + \frac{1}{a^2(t)} \tau_t \dots (付5)$$

となる。ここで、式(26)、(27)で定義した F_s と τ_s を新しい制御入力として選ぶことにより、仮想時間 s における線形化されたシステムの状態方程式(式(24))が導出される。

田中良幸 (学生員) 1971年生。1995年3月山口大学工学部知能情報システム工学科卒業。1997年広島大学大学院工学研究科博士前期情報工学専攻修了。同年同研究科博士課程後期進学、現在に至る。主としてロボットの軌道生成に関する研究に従事。電気学会、計測自動制御学会の学生会員。



辻敏夫 (正員) 1959年生。1985年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手。1994年同助教授、現在に至る。工学博士。人間とロボットの運動制御、ニューラルネット、マン・マシンシステムなどの研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会、電子情報通信学会、日本ロボット学会などの会員。



金子真 (非会員) 1954年生。1981年3月東京大学工学系研究科博士課程卒業。工学博士。同年4月通産省工業技術院機械技術研究所入所。1990年4月九州工業大学情報工学部助教授。1993年10月広島大学工学部教授、現在に至る。ロボットハンド、触覚ベースアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。

