

収束時間を調節可能な人工ポテンシャル法による マニピュレータの動作計画

辻 敏 夫*¹ Pietro G. Morasso*² 重 橋 薫*¹ 金 子 真*¹

Motion Planning for Manipulators Using Artificial Potential Field Approach that can Adjust Convergence Time of Generated Arm Trajectory

Toshio Tsuji*¹, Pietro G. Morasso*², Kaoru Shigehashi*¹ and Makoto Kaneko*¹

This paper presents a new control strategy of the artificial potential field approach to a real-time motion planning problem in a known environment. In the artificial potential approach, the goal is represented by an attractive artificial potential and the obstacles are represented by a repulsive one, so that a robot reaches the goal without colliding with obstacles by using a gradient technique such as the steepest descent method. Although this approach is quite simple and computationally much less expensive than other methods based on the global information on the task space, so far few attentions have been paid to dynamic behavior of the generated trajectories such as movement time from the initial position to the goal and the velocity profile of the end-effector motion. In the present paper, we argue that the dynamic behavior of the arm trajectory to be generated should be taken into account within the framework of the artificial potential field approach, and introduce a time base generator that acts as a time varying gain and determines a dynamic behavior of the arm motion. By synchronizing a potential function used in the artificial potential field with the time base generator, convergence time of the generated arm trajectory can be adjusted through the time base generator without any change of the potential function itself.

Key Words: Artificial Potential Field, Motion Planning, Obstacle Avoidance, Time Base Generator, Terminal Attractor, Redundant Manipulator.

1. はじめに

マニピュレータの障害物回避問題によく用いられる人工ポテンシャル法 [1]~[7] では、ゴールへの吸引力を発生するポテンシャル関数と障害物からの反発力を発生するポテンシャル関数の加重和を考え、最急降下法などの極値探索法を適用することにより軌道の生成を行う。この方法は障害物回避問題に対するグラフ探索的なアプローチに比べてアルゴリズムが簡単で実時間性に優れているが、その半面、反発力と吸引力が釣り合う点（すなわちローカルミニマ）が存在すると、ゴールへ到達することができずにデッドロックに陥ってしまう。

従来から、人工ポテンシャル法が持つこの問題を解決することに研究の主眼が置かれ、多くの方法が提案されてきた。例えば、Okutomi and Mori [3] は楕円状のポテンシャル関数を提案し、ポテンシャル関数の形状を工夫することによりローカルミニマに陥る可能性をかなり軽減できることを示した。比留川・

北村 [4] は作業空間に関する大域的な情報を導入することにより、極値探索という局所的な情報しか利用しない人工ポテンシャル法の欠点のある程度解決できることを示した。Connolly, Burns and Weiss [5] は、作業空間全域においてローカルミニマを持たないポテンシャル関数を定義すればデッドロックの問題は完全に解決されるという考えに基づき、ラプラスの微分方程式の解を利用した方法を提案した。最近、同様の考えに基づくポテンシャル関数がいくつか提案され、人工ポテンシャル法のローカルミニマの問題は解決されつつある [6][7]。

人工ポテンシャル法ではデッドロックに陥ることなくゴールへ到達することが最も重要な課題であったため、生成される軌道の時間的な挙動については十分な考察が行われていないようである。例えば、調和関数などのローカルミニマを持たないポテンシャル関数を用いてゴールへの到達を保証したとしても [6]、到達にどの程度の時間がかかるかは分からない。生成される軌道の速度波形は使用されるポテンシャル関数の形状によって決定するため、これを自由に調節することは難しい。人工ポテンシャル法の最も重要な特徴がその“real-time”性 [2][6] に置かれているにもかかわらず、生成された軌道を実時間でロボットの制御に用いることは困難である。

最近、この問題に対して橋本ら [8] は、ラプラスポテンシャル

原稿受付 1994年4月8日

*¹広島大学工学部

*²ジェノバ大学工学部

*¹Faculty of Engineering, Hiroshima University

*²Faculty of Engineering, University of Genova

場である電界を利用し、Sliding Mode制御を用いることによってマニピュレータの関節速度ベクトルを電界の方向に拘束できることを示した。この方法はローカルミニマを持たない連続な軌道を生成できるだけでなく、有限時間内にゴールに到達できるという優れた性質を有している。一方、Morasso, Sanguineti and Tsuji [9][10] は人間の reaching movements を対象として二次元の手先軌道生成モデルを提案している。この方法はベル型の速度波形を有する時間関数発生器 (Time Base Generator: 以下、TBG と呼ぶ) を用意し、手先の並進速度と回転角速度をこの TBG に同期させることによって軌道を生成しようというもので、TBG の特性を調節することにより手先の移動時間や速度波形を間接的に指定できるという特徴を備えている。

そこで本論文では人工ポテンシャル法によるマニピュレータの軌道計画問題に対して、ポテンシャル関数の時間的な挙動を決定する TBG を人工ポテンシャル法に組み込むことを提案する。そして、初期位置からゴールまで到達するのに必要な時間を指定でき、かつポテンシャル関数の速度パターンも調節可能であることを示す。本論文で提案する方法は、ポテンシャル関数そのものを修正する必要はなく、従来から提案されている様々なポテンシャル関数に適用することが可能である。

2. Time Base Generator を用いた人工ポテンシャル法

2.1 最急降下法に基づく人工ポテンシャル法

Fig. 1 のような m 関節マニピュレータの手先を、初期位置 \mathbf{x}_0 から目標位置 \mathbf{x}^* まで移動するような軌道計画問題を考えよう。ただし、本稿では簡単のためマニピュレータの動力学は考慮せず、計画した目標関節軌道を完全に実現できる制御則が存在すると仮定し、マニピュレータの運動学のみを対象とする。このとき、関節角度ベクトル $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^m$ と手先位置ベクトル $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^l$ との関係は、

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\mathbf{f}(\cdot)$ は非線形関数である。

人工ポテンシャル法では作業空間に微分可能なポテンシャル関数 $V(\mathbf{x})$ を設定する。ここでは、任意の手先位置 \mathbf{x} に対して $V(\mathbf{x}) \geq 0$ で、目標位置 \mathbf{x}^* で $V(\mathbf{x}^*) = 0$ となるようなポテンシャル関数を用いる。このとき、マニピュレータの関節速

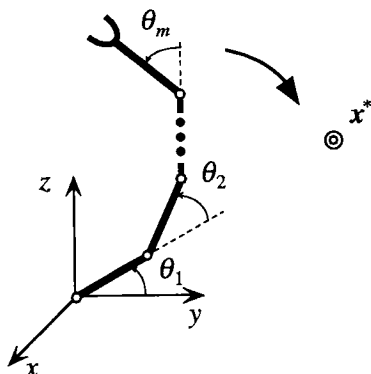


Fig. 1 Model of m -joint manipulator

度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ を $V(\mathbf{x})$ の最急降下方向への勾配ベクトルを用いて、

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = -\eta \left(\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T = -\eta \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right)^T \quad (2)$$

と定義する。ただし、 η は正の定数で、 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{l \times m}$ はヤコビ行列である。また、マニピュレータは特異姿勢にはないと仮定する。

このとき、ポテンシャル関数 V の時間変化 \dot{V} を計算すると、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ &= -\eta \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right)^T \\ &= -\eta \left\| \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right\|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

となり、このシステムは漸近安定となる。

障害物を含む作業空間に対しては、目標位置への吸引力を発生するポテンシャル関数と障害物からの反発力を発生するポテンシャル関数の和を用いることにより、障害物を回避しながら目標位置へ手先を移動させるという方法が用いられる。このとき、式 (2) のパラメータ η を用いて関節速度を調節することは可能であるが、初期位置から目標位置に到達するのに要する時間を調節したり、移動速度の時間変化を望ましい形状にすることは難しい。また、パラメータ η をどのような基準で調節すればよいかも分からない。

2.2 TBG を組み込んだ人工ポテンシャル法

まず、スカラーの時間関数 $\xi(t)$ を導入する。 $\xi(t)$ は一階微分可能で、 $\xi(0) = 1$ 、 $\xi(t_f) = 0$ を満たす単調減少関数である。ただし、 t_f はマニピュレータの手先を初期位置 \mathbf{x}_0 から目標位置 \mathbf{x}^* に移動させるのに要する時間を表す。本論文では、この $\xi(t)$ の時間変化にポテンシャル関数 V の変化を同期させることによって生成される軌道の時間挙動を調節することを考え、この時間関数 $\xi(t)$ を生成するメカニズムを Time Base Generator (TBG) と呼ぶ [9]。

この $\xi(t)$ を用いて式 (2) を以下のように修正する。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{V \dot{\xi} \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right)^T}{\xi \left\| \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right\|^2} \quad (4)$$

これは式 (2) においてパラメータ η を $\eta = -\frac{V \dot{\xi}}{\xi \left\| \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right\|^2}$ と

置き換えたことに相当する。そこで前節と同様に、ポテンシャル関数 V の時間変化を計算すると、

$$\dot{V} = V \frac{\dot{\xi}}{\xi} \quad (5)$$

を得る。定義から $V \geq 0$ 、 $\xi \geq 0$ 、 $\dot{\xi} \leq 0$ であるから、 $\dot{V} \leq 0$ となりシステムは漸近安定となる。

ここで式 (5) を変形すると、

$$\frac{dV}{d\xi} = \frac{V}{\xi} \quad (6)$$

と書くことができる。この微分方程式を解くと、

$$V = V_0 \xi \quad (7)$$

となり、ポテンシャル関数 V と ξ の間に比例関係が成立していることが分かる。ただし、 V_0 は V の初期値 $V(\mathbf{x}_0)$ である。定義から $\xi(t)$ は時刻 t_f で 0 となるから、このとき、ポテンシャル関数 V も 0 となり、マニピュレータの手先が目標位置 \mathbf{x}^* に到達することが示された。

2.3 ターミナルアトラクタを用いた TBG の構成法

前節で導入した時間関数 $\xi(t)$ を生成するメカニズムとして、ここでは次のような非線形システムを考える。

$$\dot{\xi} = -\alpha\xi^\beta \quad (8)$$

ここで α, β は定数で $\alpha > 0, 0 < \beta < 1$ を満たす。また、定義より $\xi(0) = 1.0$ である。このとき、

$$\left| \frac{d\dot{\xi}}{d\xi} \right| = \alpha\beta\xi^{\beta-1} \quad (9)$$

であるから、 $\xi \rightarrow 0$ で $\left| \frac{d\dot{\xi}}{d\xi} \right| \rightarrow \infty$ となりリプシッツ条件が破られていることが分かる [11]。Zac は相互結合型の非線形ニューラルネットにおいて、平衡点でのリプシッツ条件を破ることにより、ニューラルネットの状態が有限時間で平衡点まで収束することを示し、このようなアトラクタをターミナルアトラクタと呼んだ [11]。ここで式 (8) の $\xi(t)$ の収束時間 t_f を計算すると、

$$\begin{aligned} t_f &= \int_0^{t_f} dt = \int_1^0 \frac{d\xi}{\dot{\xi}} = - \int_1^0 \frac{d\xi}{\alpha\xi^\beta} \\ &= \frac{1}{\alpha(1-\beta)} \end{aligned} \quad (10)$$

となり、 $\xi = 0$ がターミナルアトラクタとなっていることが分かる。このとき、

$$\alpha = \frac{1}{t_f(1-\beta)} \quad (11)$$

とおくと、あらかじめ収束時間 t_f を指定することができる。

Fig. 2, Fig. 3 にパラメータ t_f, β を変化させた場合の TBG の時間挙動を示す。Fig. 2 は $\beta = 0.5$ として収束時間 t_f を 1.0, 1.5, 2.0 [s] と変化させた場合、一方、Fig. 3 は $t_f = 1.0$ [s] として β を 0.25, 0.5, 0.75 としたときの $\xi, \dot{\xi}$ の時間変化である。いずれも指定した時間 t_f で平衡状態に収束し、また β によって速度波形が変化していることが分かる。式 (7) で示したようにポテンシャル関数 V は ξ に比例するので、この TBG を用いることにより、マニピュレータの手先軌道の収束時間と速度波形を調節することが可能となる。

以上、本稿で提案する速度パターンを調節可能な人工ポテンシャル法について説明し、その動作原理と TBG の構成例を示した。次章では本手法を冗長マニピュレータおよび障害物回避問題に適用した例を示し、本手法の有効性を確認する。

3. シミュレーション実験

3.1 冗長マニピュレータへの適用

ここでは、本論文で提案した人工ポテンシャル法を冗長マニピュレータに適用した。まず冗長自由度を利用した軌道生成を

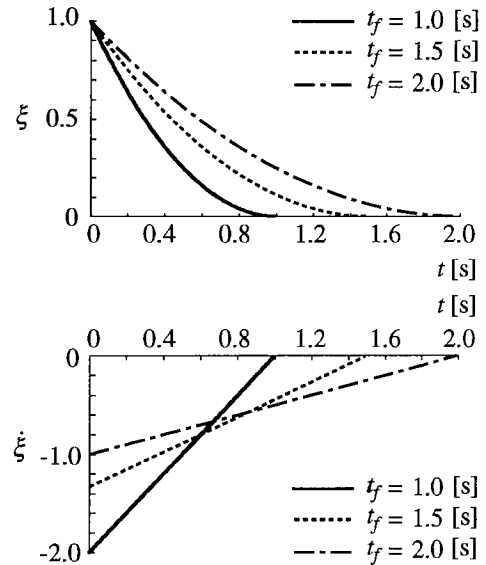


Fig. 2 Change of the ξ behavior depending on the convergence time t_f with the constant power parameter $\beta = 0.5$

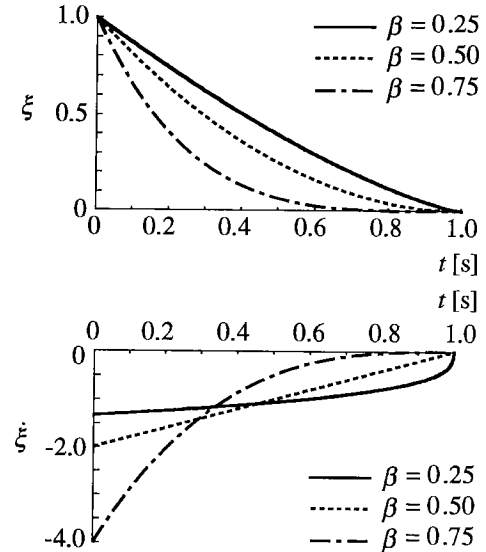


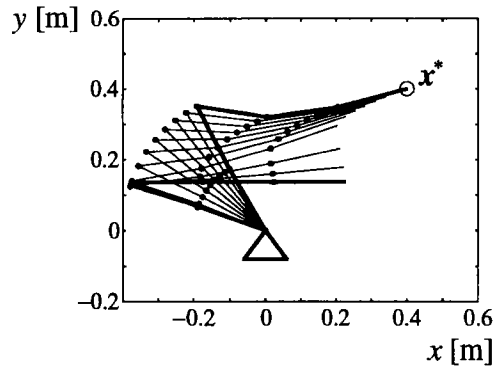
Fig. 3 Change of the ξ behavior depending on the power parameter β with the constant convergence time $t_f = 1.0$ [s]

可能にするため、式 (4) を

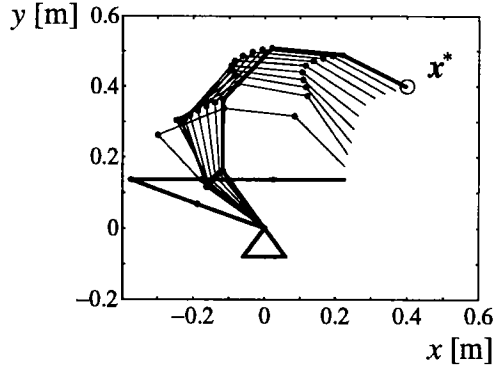
$$\dot{\theta} = \frac{V\dot{\xi} \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right)^T}{\xi \left\| \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right\|^2} - \gamma(I - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \frac{\partial V_s}{\partial \theta} \quad (12)$$

のように修正する。ただし γ は $t = [0, t_f]$ の範囲で $\gamma(t) \geq 0$, $\gamma(t_f) = 0$ を満たすスカラー関数である。また V_s は θ に関して一階微分可能なポテンシャル関数で冗長自由度を利用してこのポテンシャル関数を小さくすることを考える。式 (12) の右辺第 1 項は手先の軌道を生成するための関節速度で、第 2 項は手先の軌道には影響しない範囲内でポテンシャル関数 V_s を小さくする働きを持つ。

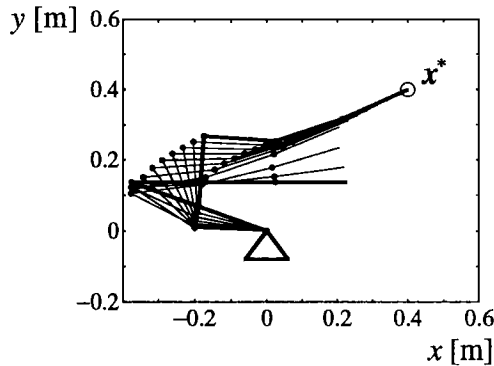
リンク長 0.2 [m] の 5 関節平面マニピュレータを用いて軌道生成を行った結果を Fig. 4 に示す。ただし、アームの



(a) Without consideration of a subtask



(b) Increasing of the manipulability measure



(c) Positioning of the virtual end-effector which is set at the second joint

Fig. 4 Generated trajectories for the five-joint planar manipulator

初期姿勢は $\theta = [\frac{8\pi}{9}, 0, -\frac{8\pi}{9}, 0, 0]^T$ [rad], 手先の目標位置は $\mathbf{x}^* = [0.4, 0.4]$ [m], 収束時間は $t_f = 1.0$ [s] で, ポテンシャル関数 $V(\mathbf{x})$ は

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} d\mathbf{x}^T d\mathbf{x} \quad (13)$$

とした。ただし $d\mathbf{x} = \mathbf{x}^* - \mathbf{x}$ である。またパラメータ β は $\beta = 0.5$ とした。

Fig. 4(a) は式 (4) を用いて生成された軌道である。このときの手先位置の時間変化を Fig. 5 に示す。図から, $t_f = 1.0$ [s] で手先が目標位置に到達していることが分かる。

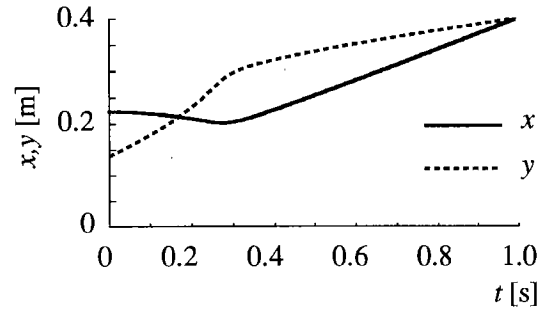


Fig. 5 Time history of the end-effector motion

一方, Fig. 4(b), (c) は式 (12) を用い, サブタスクとして可操作度の極大化 [12] (Fig. 4(b)), 仮想手先の位置制御 [13] (Fig. 4(c)) を取り上げた場合の結果である。可操作度は, アームの関節速度によって発生する手先の速度を任意の方向に調節する能力を定量化した指標であるが, 同時に特異姿勢からの距離を表す指標でもあるので, これを極大化することにより冗長性を利用した特異姿勢回避が可能になる [12]。このとき, 式 (12) のサブタスクのためのポテンシャル関数 V_s は, それぞれ

$$V_{s1} = -\sqrt{\det \mathbf{J}\mathbf{J}^T} \quad (14)$$

$$V_{s2} = \frac{1}{2} d\mathbf{x}_v^T d\mathbf{x}_v \quad (15)$$

となる。ただし, $d\mathbf{x}_v$ は仮想的な手先とその目標位置との誤差で $d\mathbf{x}_v = \mathbf{x}_v^* - \mathbf{x}$ である。Fig. 4(c) では第 2 関節上に仮想手先を定義し, 目標位置として $\mathbf{x}_v^* = [-0.3, -0.1]^T$ [m] を与えた。また, 式 (12) の γ は $\gamma(t) = 200(1.0 - t)$ とした。Fig. 4(b), (c) とも与えたサブタスクを反映したアームの姿勢が実現されていることが分かる。このとき, 手先軌道は指定した収束時間 $t_f = 1.0$ [s] で目標位置に到達し, またポテンシャル関数 $V(\mathbf{x})$ の時間変化は Fig. 4(a) と完全に一致することに注意すべきである。

3.2 障害物回避軌道の生成

次に本手法を障害物回避問題に適用した。障害物回避のためのポテンシャル関数は, 文献 [6] を参考にして,

$$V(\mathbf{x}) = \lambda_g \log(\|d\mathbf{x}\|) - \sum_{i=1}^n \lambda_{oi} \log(\|d\mathbf{x}_{oi}\|) \quad (16)$$

と設定した。ただし障害物は n 個の点 \mathbf{x}_{oi} の集合として表現し, \mathbf{x} と \mathbf{x}_{oi} との偏差を $d\mathbf{x}_{oi} = \mathbf{x}_{oi} - \mathbf{x}$ とした。 λ_g, λ_{oi} は $\lambda_g \geq \sum_{i=1}^n \lambda_{oi}$ を満たす正の定数とする。また, $\log(\cdot)$ は自然対数である。式 (16) の右辺第 1 項は目標位置への吸引力, 第 2 項は障害物からの反発力を表す。式 (16) はラプラスの方程式

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (17)$$

を満たし, 作業空間内にはローカルミニマは存在しない。このとき $\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}}$ は

$$\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{\lambda_g}{\|d\mathbf{x}\|^2} d\mathbf{x}^T + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{oi}}{\|d\mathbf{x}_{oi}\|^2} d\mathbf{x}_{oi}^T \quad (18)$$

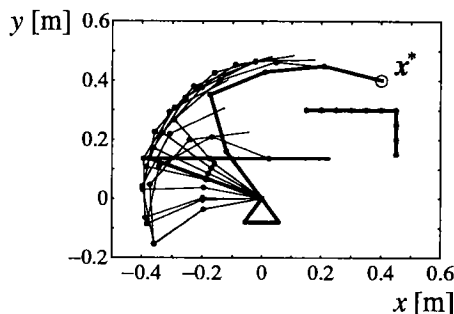


Fig. 6 Real-time obstacle avoidance for the five-joint planar manipulator generated by the proposed method

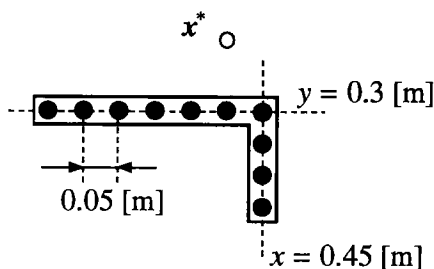


Fig. 7 Goal and obstacle

で与えられる.

式 (16) のようなラプラスポテンシャル場にはローカルミニマが存在しないため, 人工ポテンシャル法を用いてデッドロックに陥ることなくゴールへ到達することが可能となる [6]~[8]. しかしながらこの種のポテンシャル関数は目標位置 \mathbf{x}^* において $V(\mathbf{x}^*) \rightarrow -\infty$ となるため, 本手法を適用するためには工夫が必要である. そこで式 (12) の第 1 項からポテンシャル関数を除き,

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{\xi} \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right)^T}{\xi \left\| \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{J} \right\|^2} - \gamma (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \frac{\partial V_s}{\partial \theta} \quad (19)$$

のように修正する. このときポテンシャル関数の時間変化を計算すると,

$$\dot{V} = \frac{\dot{\xi}}{\xi} \quad (20)$$

を得る. $\xi \geq 0, \dot{\xi} \leq 0$ であるから, $\dot{V} \leq 0$ である. さらに上式を V について解くと,

$$V = V_0 + \log \xi \quad (21)$$

となる. $\xi \rightarrow 0$ のとき, $V \rightarrow -\infty$ となるからマニピュレータの手先が目標位置 \mathbf{x}^* に到達することが分かる.

Fig. 6 はこのポテンシャル関数を用いて生成した軌道の一例である. 用いたマニピュレータは Fig. 4 と同じ 5 関節平面モデルで, 式 (19) のサブタスクのためのポテンシャル関数 V_s は,

$$V_s = \sum_{j=1}^4 \Phi_j = - \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^n \lambda_{oi} \log(\| dx_{oi}^{vj} \|) \quad (22)$$

とした. ここで dx_{oi}^{vj} は j 番目の仮想手先の手先位置 \mathbf{x}_{vj} と障害物上の点 \mathbf{x}_{oi} との偏差で, $dx_{oi}^{vj} = \mathbf{x}_{oi} - \mathbf{x}_{vj}$ である. 仮想手先は第 1 関節を除く各関節上に計四つ設定した. また, 障害物は Fig. 7 に示すように 10 個の代表点を用いて表現し, 手先の目標位置は $\mathbf{x}^* = [0.4, 0.4]$ [m] とした. なお, パラメータ β は $\beta = 0.1$ で, 式 (16) の定数はそれぞれ, $\lambda_g = 3.75, \lambda_{oi} = 0.2$ ($i = 1, 2, \dots, 10$) とした. その他の実験条件は Fig. 4 と同じである. 図から障害物を回避しながら, 手先がゴールに到達していることが分かる.

4. ま と め

本論文では, 障害物回避を含むロボットの軌道計画問題を対象として, 生成される軌道の時間挙動を調節可能な人工ポテンシャル法を提案した. 得られた主な結果は以下の通りである.

- (1) Time Base Generator と呼ばれる時間関数発生器を人工ポテンシャル法に組み込むことにより, ポテンシャル関数の時間変化を TBG の挙動に同期させる方法を示した.
- (2) このメカニズムにより初期位置からゴールに到達するまでの時間を指定でき, さらに生成される軌道の速度波形も調節できることを明らかにした.
- (3) 本手法ではポテンシャル関数そのものを修正しなくても, その時間挙動が調節可能であることを示した. これにより従来から提案されている様々なポテンシャル関数を本手法に取り込むことができた.
- (4) ターミナルアトラクタを利用した TBG の構成例を示した.
- (5) 本手法を冗長マニピュレータに適用し, 手先の軌道計画だけでなく, 冗長自由度を利用した関節運動を生成できることを明らかにした.
- (6) 調和関数を利用したポテンシャル関数を用いてマニピュレータの障害物回避が実現できることを示した.

本手法はアームの空間軌道だけでなく時間軌道も調節可能であり, 移動ロボットの軌道生成問題や複数ロボットの同期制御にも有効であると考えられる.

なお, 本稿では単純化のためマニピュレータの動力学は省略し, 運動学のみに基づいて軌道計画を行った. しかしながら, 動作時間や, 関節速度・加速度など時間が関連する量の実現性は, 動力学を考慮したうえで検討せねばならない. 今後は, マニピュレータの動力学の取り扱いや TBG を利用したマニピュレータの手先速度調節法などについて考察するとともに, 本手法を障害物回避問題に適用する場合に重要となる障害物との最短距離計測やそれに伴うポテンシャル計算法についても十分に検討する必要があると考えている.

参 考 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.97-3, pp.836-842, 1975.
- [2] O. Khatib: "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int. J. Robotics Res., vol.5, no.1, pp.90-98, 1986.
- [3] M. Okutomi and M. Mori: "Decision of Robot Movement by Means of a Potential Field," Advanced Robotics, vol.1, no.2, pp.131-141, 1986.
- [4] 比留川, 北村: "安全第一アルゴリズムとポテンシャル関数に基づく

マニピュレータの障害物回避法”, 日本ロボット学会誌, vol.5, no.3, pp.171-179, 1987.

- [5] C.I. Connolly, J.B. Burns and R. Weiss: “Path Planning Using Laplace’s Equation,” Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2102-2106, 1990.
- [6] Jin-Oh Kim and K. Khosla: “Real-Time Obstacle Avoidance Using Harmonic Potential Functions,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.8, no.3, pp.338-349, 1992.
- [7] 佐藤: “極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.5, pp702-709, 1993.
- [8] 橋本他: “静電ポテンシャル法および Sliding Mode を用いた多自由度マニピュレータの障害物回避制御”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.8, pp.1220-1228, 1993.
- [9] P. Morasso, V. Sanguineti and T. Tsuji: “A Model for the Genera-

tor of Target Signals in Trajectory Formation,” Proceedings of the International Conference on Handwriting and Drawing, pp.74-76, 1993.

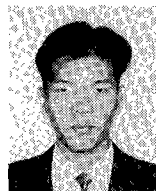
- [10] P. Morasso, V. Sanguineti and T. Tsuji: “A Dynamical Model for the Generator of Curved Trajectories,” Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks, pp.115-118, 1993.
- [11] M. Zak: “Terminal Attractors for Addressable Memory in Neural Networks,” Physics Letters A, vol.133, pp.218-222, 1988.
- [12] T. Yoshikawa: “Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy,” Robotics Research International Symposium, Brady and Paul eds., MIT Press, pp.735-747, 1984.
- [13] 辻, 中山, 伊藤: “仮想アームを用いた冗長マニピュレータの分散的軌道生成”, 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.1, pp.1412-1419, 1991.



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年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。計測自動制御学会, 日本機械学会, 電気学会, 電子情報通信学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)

どの会員。



重橋 薫 (Kaoru Shigehashi)

1971年8月11日生。1994年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。同年NTT中国移動通信網(株)入社, 現在に至る。在学中, 人工ポテンシャル法によるマニピュレータの軌道計画に関する研究に従事。



Pietro G. Morasso

He earned in 1968 a Master Degree in Electronic Engineering at the University of Genova, Italy, with a thesis on Biomedical Signal Processing. He was post-doctoral fellow at the Psychology Department of M.I.T. in Cambridge, Mass. USA, during 1970-72 where he worked with Prof. Bizzi on problems of motor control with humans and primates. Since 1986 he is full Professor of Anthropomorphic Robotics at the Department of Informatics, Systems, and Telecommunication of the University of Genova. His interests include motor planning and control in biological and robotic systems with emphasis on neural network models.



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1976年3月九州工業大学卒業。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, 広島大学教授, 現在に至る。ロボットハンド, 力覚センサ, 触覚ベースト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, 日本機械学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)