

# 時間関数発生器に基づくロボットの オンライン軌道生成

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 10 月号 抜 刷

Trans. IEE of Japan, Vol. 119-C, No. 10, Oct., 1999

## 時間関数発生器に基づくロボットのオンライン軌道生成

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)

## On-line Trajectory Generation of Robots using Time Base Generator

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

The artificial potential field approach is often used for the on-line path planning of robots because of its simplicity and low computation. However, a little attention has been paid to control of the dynamic behavior of the generated trajectories such as movement time from the initial position to the goal and the velocity profile of the robots. In this paper, a new trajectory generation method based on the artificial potential field approach for dynamic control of robots is proposed by combining a time scale transformation and a time base generator which works as a time scale compressor. The proposed method can control the dynamic behavior of robots actively without any change of the form of the designed potential function itself. Effectiveness of the method is verified through computer simulations with an omnidirectional vehicle.

キーワード：軌道生成, 人工ポテンシャル法, 動力学モデル, 時間軸変換

## 1. ま え が き

移動ロボットやマニピュレータなどのロボットの空間軌道生成問題に対しては、従来から人工ポテンシャル法<sup>(1)-(3)</sup>がよく用いられる。この方法は、作業空間に目標位置で最小値となる人工的なポテンシャル場を設定し、その勾配ベクトルを用いてロボットを目標位置に到達させるものである。この手法は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。しかしながら、ロボット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時間的な挙動がどのようになるかを事前に予測・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<sup>(4)</sup>は静電ポテンシャル場においてSliding Mode制御を用いることにより、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。一方、辻ら<sup>(5)(6)</sup>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：以下TBGと略記）に同期させることで、ロボットの空間軌道と速度波形を含めた時間軌道の同時制御に成功している。しかしながら、実機制御で有効となるロボットの動力学を考慮した場合には適用できない。

我々はすでに辻らの方法を拡張し、運動学モデルおよび動力学モデルにも適用可能な空間軌道と時間軌道のオンラ

イン同時制御を可能とする新しい人工ポテンシャル法を開発している<sup>(7)</sup>。この手法の基本概念は、TBGを用いて設計した仮想時間軸上において制御システムを漸近安定化する制御則を設計し、実時間においてロボットの時間挙動をTBGに同期させることにある。また、この手法を用いて動力学を考慮した冗長マニピュレータの手先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、ロボットダイナミクスに含まれる非線形項がすでに線形化されていると仮定し、ドリフト項を有する線形システムを制御対象として議論を進める。そして、提案法により設計した制御則によるシステムの時間的挙動および収束性の解析を行ない、制御システムの挙動がTBGに同期することを示す。また、全方向移動ロボットの軌道生成問題に提案法を適用し、その有効性を示す。

以下、2では通常の人工ポテンシャル法の問題点を明確にし、3で人工ポテンシャル法にTBGに基づく時間軸変換を組み込んだ新しい軌道生成法について説明する。そして、4で制御対象とする全方向移動ロボットの動力学モデルの定式化ならびに提案法を用いた制御則の設計を行ない、5でその有効性を示すために行ったシミュレーションの結果について述べる。

## 2. 人工ポテンシャル法

議論を簡単にするため、非線形補償やフィードバック線形

化等の手法<sup>(8)</sup>により、システムの変形項がすでに線形化されていると仮定し、以下に示すドリフト項を有するシステムについて考える。

$$\dot{Z} = PZ + QF_Z \dots\dots\dots (1)$$

$$P = \begin{pmatrix} 0_{n+n} & I_{n+n} \\ 0_{n+n} & 0_{n+n} \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} 0_{n+n} \\ I_{n+n} \end{pmatrix}$$

ただし、 $Z = (X^T, \dot{X}^T)^T = (x_1, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n)^T \in \mathbb{R}^{2n}$  であり、 $0_{n+n} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は零行列、 $I_{n+n} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は単位行列である。本研究の目的を明確にするため、ここでは通常的人工ポテンシャル法を用いて式(1)のシステムを安定化するフィードバック制御則  $F_Z \in \mathbb{R}^n$  を設計する。ただし、システムの状態は  $Z = 0$  とする。

いま、式(1)のシステムに対するポテンシャル関数  $V_Z$  を次の二次形式で定義する。

$$V_Z = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (k_i x_i^2 + k_{n+i} \dot{x}_i^2) = \frac{1}{2} Z^T K_a Z \dots (2)$$

ただし、 $K_a \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  はポテンシャル関数の特性を決定する対角行列、 $K_a = \text{diag.} (k_1, k_2, \dots, k_{2n})$ 、 $k_i > 0$  ( $i = 1, \dots, 2n$ ) である。このポテンシャル関数  $V_Z$  に対するリヤプノフの安定条件を満たすフィードバック制御則  $F_Z$  は、

$$F_Z = -K_b Z \dots\dots\dots (3)$$

$$K_b = \begin{pmatrix} \frac{k_1}{k_{n+1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{k_{n+2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{k_n}{k_{2n}} \end{pmatrix} \Bigg| I_{n+n} \in \mathbb{R}^{n \times 2n}$$

と設計できる。このとき、式(3)のフィードバック制御則  $F_Z$  により、ポテンシャル関数の時間変化  $\dot{V}_Z$  は

$$\dot{V}_Z = -\sum_{i=1}^n k_{n+i} \dot{x}_i^2 = -Z^T K_c Z \leq 0 \dots\dots (4)$$

$$K_c = \text{diag.}(0, 0, \dots, 0, k_n, k_{n+1}, \dots, k_{2n}) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$$

となる。式(2)で定義したポテンシャル関数  $V_Z$  は目標状態  $Z = 0$  以外では  $F_Z = 0$  となるような極値を持たず、かつ目標状態  $Z = 0$  において最小値 0 をとる。つまり、フィードバック制御則  $F_Z$  は、目標状態  $Z = 0$  を除いて常にポテンシャル関数  $V_Z$  を減少させることがわかる。

また、式(3)を式(1)に代入すると、

$$\ddot{X} + \dot{X} + K_d X = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$K_d = \text{diag.} \left( \frac{k_1}{k_{n+1}}, \frac{k_2}{k_{n+2}}, \dots, \frac{k_n}{k_{2n}} \right) \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

を得る。この線形微分方程式は減衰系 ( $\lim_{t \rightarrow \infty} X = 0 \in \mathbb{R}^n$ ) であるので、フィードバック制御則  $F_Z$  (式(3)) は式(1)

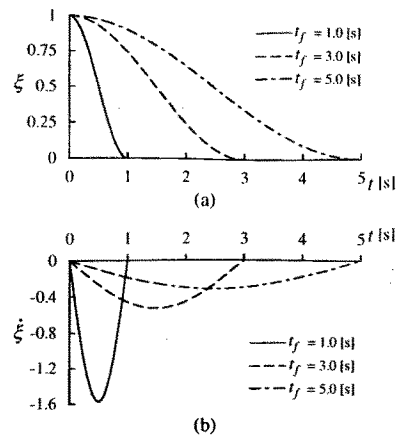


図1 収束時間  $t_f$  に対する  $\xi$  と  $\dot{\xi}$  の時間挙動  
Fig. 1. Time history of  $\xi$  and  $\dot{\xi}$  for the different convergence time  $t_f$

のシステムを漸近安定させることがわかる。また、式(5)の速度項  $\dot{X}$  にフィードバックゲインが付くように制御則を設計し、そのゲインを変化させることによりシステムの時間挙動をある程度調節することも可能である。しかしながら、通常的人工ポテンシャル法により設計した制御則ではシステムが漸近安定となるため、システムの収束時間を自由に調節することは不可能である<sup>(7)</sup>。本論文では、人工ポテンシャル法の枠組みにおいて、これらのシステムの時間的な振る舞いを制御可能とする手法を提案する。

### 3. 時間軸変換を組み込んだ軌道生成法

本論文で提案する手法は、Time Base Generator (TBG)<sup>(5)(6)</sup>を用いた時間軸変換を人工ポテンシャル法に組み込むものであり、本章ではその概要を説明する。

(3-1) TBGを用いた仮想時間  $\nu$  の設計 実時間  $t$  と仮想時間  $\nu$  の関係を、

$$\frac{d\nu}{dt} = a(t) \dots\dots\dots (6)$$

と定義する。ここで、関数  $a(t)$  は実時間  $t$  において連続な関数であり、時間軸関数と呼ばれる<sup>(9)</sup>。いま、この時間軸関数  $a(t)$  を

$$a(t) = -p \frac{\dot{\xi}}{\xi} \dots\dots\dots (7)$$

と定義する。ただし、 $p$  は正の実定数である。ここで、 $\xi(t)$  はTBGと呼ばれるベル型の速度波形をもつスカラ関数であり、 $\xi(0) = 1, \xi(t_f) = 0$  の境界条件を満たす単調減少関数である<sup>(5)(6)</sup>。本論文では、このスカラ関数  $\xi$  の挙動を

$$\dot{\xi} = -\gamma(\xi(1-\xi))^\beta \dots\dots\dots (8)$$

と定義する。ただし、 $\gamma$  は収束時間  $t_f$  の関数、 $\beta$  は  $\xi$  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、TBGの収束時間  $t_f$  は、ガンマ関数  $\Gamma(\cdot)$  を用いて

$$t_f = \int_0^{t_f} dt = \int_1^0 \frac{d\xi}{\dot{\xi}} = \frac{\Gamma^2(1-\beta)}{\gamma\Gamma(2-2\beta)} \dots\dots\dots (9)$$

と計算することができる。したがって、式(9)の $\gamma$ を

$$\gamma = \frac{\Gamma^2(1-\beta)}{t_f \Gamma(2-2\beta)} \dots\dots\dots (10)$$

と定義すれば、収束時間 $t_f$ を自由に設定できる。図1は、収束時間を $t_f = 1, 3, 5$  [s]と指定したときの $\xi$ と $\dot{\xi}$ の挙動を示している。ただし、 $\beta = 0.5$ とした。

また、式(6), (7)より仮想時間 $\nu$ は

$$\nu = \int_0^t a(t) dt = -p \ln \xi(t) \dots\dots\dots (11)$$

となる。式(11)より、仮想時間 $\nu$ は実時間 $t$ に逆行せず単調増加であり、指定した実時間 $t_f$ で時刻無限大となることが分かる。ここで、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<sup>(9)</sup>。したがって、式(11)で定義した仮想時間軸上でシステムを漸近安定化させることができれば、そのシステムを実時間軸上の指定時刻 $t_f$ で安定化させることが可能となる。以上より、本論文では式(11)で定義した仮想時間 $\nu$ をシステムの時間軸変換に用いる。

(3・2) フィードバック制御則の導出 式(1)で与えられたシステムの時間軸を、実時間 $t$ から式(11)で定義した仮想時間 $\nu$ に変換する。この時間軸変換により、

$$\frac{d}{d\nu} Z = \frac{dZ}{dt} \frac{dt}{d\nu} = \frac{1}{a(t)} \dot{Z} \dots\dots\dots (12)$$

となる。ここで、新しい状態変数 $\Psi \in \mathbb{R}^{2n}$ と新しいシステムの入力 $F_\Psi \in \mathbb{R}^n$ を次のように選ぶ。

$$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{2n})^T = (X^T, \frac{\dot{X}^T}{a(t)})^T \dots\dots (13)$$

$$F_\Psi = \frac{d}{d\nu} \left( \frac{1}{a(t)} \right) \dot{X} + \frac{1}{a^2(t)} F_Z \dots\dots\dots (14)$$

これにより式(12)の非線形システムは線形化され、次の仮想時間 $\nu$ における線形システムを得る。

$$\frac{d}{d\nu} \Psi = P\Psi + QF_\Psi \dots\dots\dots (15)$$

時間軸変換に用いられた仮想時間 $\nu$ 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、新しいシステム(式(15))の安定性はもとのシステム(式(1))と同じである。したがって、このシステムを安定化させるフィードバック制御則が存在する。

仮想時間 $\nu$ における新しいシステム(式(15))を漸近安定化するフィードバック制御則を、通常の人工ポテンシャル法によって設計する。そこでまず、次の二次形式のポテンシャル関数 $V_\Psi$ を定義する。

$$V_\Psi = \sum_{i=1}^n V_{\psi_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (k_i \psi_i^2 + k_{n+i} \psi_{n+i}^2) \\ = \frac{1}{2} \Psi^T K_a \Psi \dots\dots\dots (16)$$

このポテンシャル関数に対するリヤプノフ安定の条件を満たすフィードバック制御則 $F_\Psi$ は

$$F_\Psi = -K_b \Psi \dots\dots\dots (17)$$

で与えられ、ポテンシャル関数の時間変化 $\dot{V}_\Psi$ は

$$\dot{V}_\Psi = - \sum_{i=1}^n k_{n+i} \dot{\psi}_{n+i}^2 = -\Psi^T K_c \Psi \leq 0 \dots (18)$$

となる。したがって、式(17)のフィードバック制御則 $F_\Psi$ を用いることにより、式(15)のシステムは仮想時間 $\nu$ に関して漸近安定となる。

次に、得られたフィードバック制御則 $F_\Psi$ (式(17))に対し、式(13), (14)を用いて時間軸を仮想時間 $\nu$ から実時間 $t$ に逆変換する。これによりもとのシステム(式(1))に対するフィードバック制御則 $F_Z$

$$F_Z = -a^2(t) K_d X + \left( -a(t) + \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right) \dot{X} \dots (19)$$

が得られる。ここで、仮想時間 $\nu$ における無限時刻は、実時間 $t$ における有限時刻 $t_f$ に対応する。したがって、フィードバック制御則 $F_\Psi$ の時間軸を仮想時間 $\nu$ から実時間 $t$ に逆変換することで、システムの時間軸圧縮操作をしたことになる。

一方、式(19)を式(1)に代入し整理すると、 $X$ と $\dot{X}$ に関する次のオイラーの微分方程式<sup>(10)</sup>を得る。

$$\xi^2 \frac{d^2 X}{d\xi^2} - (p-1) \xi \frac{dX}{d\xi} + p^2 K_d X = 0 \dots\dots (20)$$

実時間におけるシステム(式(1))の状態変数 $Z$ の挙動は、式(19)のフィードバック制御則 $F_Z$ により、式(20)の微分方程式に支配される。そして、式(20)を変数 $x_i$ ( $n = 1, 2, \dots, n$ )について解くと、各変数 $x_i$ に対する特性方程式の判別式 $D_{x_i} = 4 \frac{k_i}{k_{n+i}} - 1$ により次の3通りの解が得られる。ただし、 ${}^0 x_i$ は変数 $x_i$ の初期値、 $j^2 = -1$ である。

(A) if  $D_{x_i} > 0$

$$x_i = {}^0 x_i \left\{ \cos(f(\xi)) - \frac{1}{\sqrt{D_{x_i}}} \sin(f(\xi)) \right\} \xi^{\frac{p}{2}} \quad (21)$$

$$f(\xi) = \frac{\sqrt{D_{x_i}}}{2} p \ln \xi$$

(B) if  $D_{x_i} = 0$

$$x_i = {}^0 x_i \left( 1 - \frac{p}{2} \ln \xi \right) \xi^{\frac{p}{2}} \dots\dots\dots (22)$$

(C) if  $-1 < D_{x_i} < 0$

$$x_i = \frac{{}^0 x_i}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 \xi^{\lambda_1} - \lambda_1 \xi^{\lambda_2}) \dots\dots\dots (23)$$

$$\lambda_1 = \frac{p}{2} + \frac{j\sqrt{D_{x_i}}}{2} p, \quad \lambda_2 = \frac{p}{2} - \frac{j\sqrt{D_{x_i}}}{2} p$$

ここで、 $\lim_{t \rightarrow t_f} \xi = 0$  より、システムの制御変数  $x$  は時刻  $t_f$  で常に 0 となる。しかしながら、システムを時刻  $t_f$  で収束させるには、 $x$  だけでなく  $\dot{x}$  と  $\ddot{x}$  をすべて時刻  $t_f$  で 0 に収束させなければならない。そして、その必要十分条件は、式 (21), (22), (23) の時間微分と式 (8) で定義された  $\xi$  のダイナミクスより、

- I if  $D_{x_i} \geq 0$  then  $p > 4(1 - \beta)$
- II if  $-1 < D_{x_i} < 0$  then  $p > \frac{4(1 - \beta)}{1 - j\sqrt{D_{x_i}}}$

となる。このとき、仮想時間軸におけるシステムに対して定義したポテンシャル関数  $V_\psi$  は TBG に同期し、実時間軸において指定時刻  $t_f$  で 0 に収束する (付録参照)。したがって、状態変数  $\Psi$  は式 (19) のフィードバック制御則  $F_Z$  により指定時刻  $t_f$  で 0 に収束することになる。

#### 4. 全方向移動ロボットの軌道生成

前節で提案した手法を全方向移動ロボットの軌道生成に適用する。全方向移動ロボットの一例として、図 2 に示す三つの Swedish Wheel をその回転軸が互いに 120 度となるように配置した移動ロボット<sup>(14)</sup>を考える。この移動ロボットはその場で任意の姿勢をとることができ、現在の姿勢によらず任意の方向へ移動することが可能である。ここで、 $\Sigma_o$  は移動ロボットの目標位置を原点、移動ロボットの目標方向を  $x$  軸正方向とする 2次元の基準座標系、 $\Sigma_c$  は移動ロボットの中心に固定した座標系とする。このとき、移動ロボットの一般化座標は、 $\Sigma_o$  からみた  $\Sigma_c$  の原点座標  $(x, y)$  と  $\Sigma_c$  の傾き  $\theta$  の 3変数で表される。

移動ロボットの  $\Sigma_c$  における  $x$  軸方向への速度を  $\tilde{v}_x$ 、 $y$  軸方向への速度を  $\tilde{v}_y$ 、移動ロボットの中心軸まわりの回転速度を  $\tilde{\omega}$  とし、各 Wheel の回転角速度をそれぞれ  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  とすると、

$$v_c = D \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{pmatrix} \dot{\phi} \dots \dots \dots (24)$$

となる。ただし、 $v_c = (\tilde{v}_x, \tilde{v}_y, \tilde{\omega})^T \in \mathbb{R}^3$ 、 $\dot{\phi} = (\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3)^T \in \mathbb{R}^3$ 、 $D$  は Wheel の半径、 $L$  は移動ロボットの中心から各 Wheel までの距離である。また、一般化座標  $X = (x, y, \theta)^T \in \mathbb{R}^3$  と  $v_c$  の関係は

$$\dot{X} = R^T v_c \dots \dots \dots (25)$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となる。

一方、移動ロボットの運動方程式は、座標  $\Sigma_o$  の  $x$  軸方向の推進力  $F_x$ 、 $y$  軸方向の推進力  $F_y$ 、および  $z$  軸まわりの回転トルク  $\tau$  を用いて

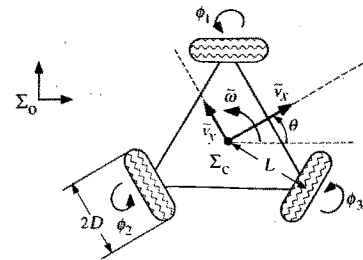


図2 全方向移動ロボット  
Fig. 2. Omnidirectional vehicle

$$M_o (\ddot{X} - \dot{R}^T R \dot{X}) = F_o \dots \dots \dots (26)$$

と書くことができる。ただし、

$$F_o = (F_x, F_y, \tau)^T \in \mathbb{R}^3$$

$$M_o = \text{diag} \left( m + \frac{3I_w}{2D^2}, m + \frac{3I_w}{2D^2}, I + \frac{3I_w L^2}{D^2} \right) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

であり、 $m$  は移動ロボットの全質量、 $I$  は移動ロボットの中心まわりの慣性モーメント、 $I_w$  は車輪の回転軸まわりの慣性モーメントを表わす。また、車輪のスリップや車軸の摩擦はないと仮定した。

ここで、制御変数を  $Z = (X^T, \dot{X}^T)^T \in \mathbb{R}^6$ 、入力を  $F_Z = M_o^{-1} F_o + \dot{R}^T R \dot{X} \in \mathbb{R}^3$  とすると、式 (26) の運動方程式は次式の状態方程式で記述できる。

$$\frac{d}{dt} Z = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix} Z + \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \end{pmatrix} F_Z \dots (27)$$

したがって、提案法により導出される移動ロボットのフィードバック制御則  $F_Z$  は、

$$F_Z = -a^2(t) K_Z X + \left( -a(t) + \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right) \dot{X} \dots (28)$$

となる。ただし、 $K_Z = \text{diag} \left( \frac{k_1}{k_4}, \frac{k_2}{k_5}, \frac{k_3}{k_6} \right) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $k_i > 0$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) である。また、導出された式 (28) のフィードバック制御則  $F_Z$  を式 (27) のシステム方程式に代入すると、式 (20) と同様な次式の線形微分方程式を得る。

$$\xi^2 \frac{d^2 X}{d\xi^2} - (p - 1) \xi \frac{dX}{d\xi} + p^2 K_Z X = 0 \dots (29)$$

したがって、提案法で設計したフィードバック制御則  $F_Z$  (式 (28)) を用いることにより、移動ロボットが目標位置に到達するまでの所要時間と時間挙動の同時制御が可能となる。

#### 5. シミュレーション

本論文で提案した手法の有効性を示すため、前章で設計したフィードバック制御則  $F_Z$  (式 (28)) を用い、直線軌道および曲線軌道を生成するシミュレーション実験を行なった。

まず、図 3 のように初期位置が  $x$  軸上にあり、初期進行方向が 0 [rad] の場合 ( $X_0 = (x_0, 0, 0)^T$ ) を考え、導出したフィードバック制御則  $F_Z$  を用いて移動ロボットの挙動を調べた。



図3 直線軌道の生成

Fig. 3. Generation of a straight trajectory

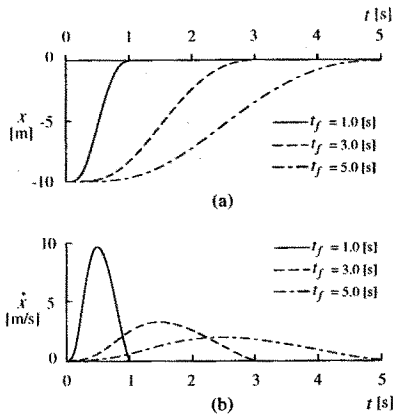


図4 異なる収束時刻に対する位置と速度の時間変化 ( $D_x < 0$ )

Fig. 4. Time histories of position and velocity for the different prespecified time generated ( $D_x < 0$ )

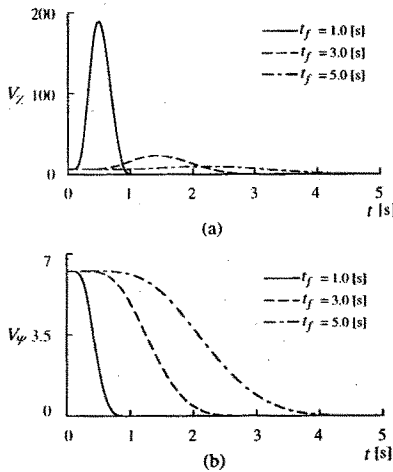


図5 異なる収束時刻に対するポテンシャル関数  $V_Z, V_\Psi$  の時間変化

Fig. 5. Time histories of potential function  $V_Z$  and  $V_\Psi$  for the different prespecified time

図4は初期状態を  $X_0 = (-10 \text{ [m]}, 0 \text{ [m]}, 0 \text{ [rad]})^T$  とし、目標時刻を  $t_f = 1, 3, 5 \text{ [s]}$  と変化させた場合の軌道と速度および加速度の時間変化である。ただし、 $k_1/k_4 = 0.125 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $p = 8$  とした。ここで、ゲインが  $k_1/k_4 = 0.125 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  のときの判別式は  $D_x < 0$  となり、このとき移動ロボットの挙動は式(23)により支配され滑らかな軌道を生成する。図4よりいずれも指定した時刻  $t_f$  で移動ロボットが滑らかな軌道を生成して目標位置に到達していることがわかる。

また、このときのポテンシャル関数  $V_Z, V_\Psi$  の時間変化を図5に示す。図5(a)よりポテンシャル関数  $V_Z$  は指定した時刻  $t_f$  で  $V_Z \rightarrow 0$  となるが、単調減少はしていない。一方、(b)に示されたポテンシャル関数  $V_\Psi$  の時間変化は

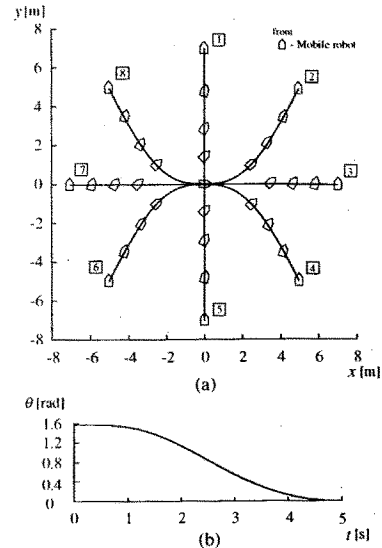


図6 異なる8点の初期位置に対して生成された空間軌道と時間軌道 ( $D_i \leq 0 : i = x, y, \theta$ )

Fig. 6. Generated spatio-temporal trajectories for 8 initial states ( $D_i \leq 0 : i = x, y, \theta$ )

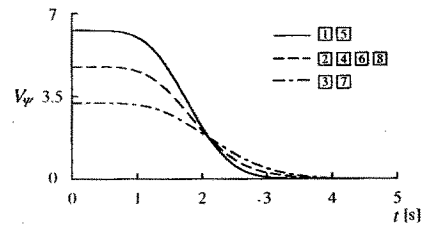


図7 異なる8点の初期位置に対するポテンシャル関数  $V_\Psi$  の時間変化

Fig. 7. Time histories of the potential function  $V_\Psi$  for 8 initial states

単調減少となっている。これはフィードバック制御則を仮想時間  $\nu$  における状態変数  $\Psi$  をもとに設計したためである。なお、図5においてポテンシャル関数が設定した目標時刻  $t_f = 1, 3, 5 \text{ [s]}$  より前に収束しているように見えるが、実際にはすべて指定した時刻  $t_f$  で収束している。このことは、ポテンシャル関数を構成する状態変数  $X, \dot{X}$  が各目標時刻  $t_f$  で収束することからもわかる。

次に、移動ロボットの目標位置を原点とし、その初期位置を原点を中心とする半径  $7 \text{ [m]}$  の円周上、初期姿勢を  $\frac{\pi}{2} \text{ [rad]}$  と設定して移動ロボットの軌道生成を行った結果を図6に示す。ただし、 $D_i \leq 0 (i = x, y, \theta)$  となるように各ゲイン比をそれぞれ  $k_1/k_4 = 0.125 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ 、 $k_2/k_5 = 0.25 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ 、 $k_3/k_6 = 0.125 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  とし、 $\beta = 0.5$ 、 $p = 8$ 、 $t_f = 5 \text{ [s]}$  とした。図6(a)より、移動ロボットはすべての初期位置から振動しない滑らかな曲線軌道を生成して目標位置である原点に到達している。また、移動ロボットの姿勢についても滑らかな変化を経て目標姿勢  $0 \text{ [rad]}$  に収束していることがわかる(図6(b))。また、このときのポテンシャル関数の時間変化を図7に示す。図6および図7より、移動ロボットはすべての初期位置から原点に目標時

刻  $t_f = 5$  [s] で収束していることがわかる。

6. ま と め

本論文では、TBGを用いた時間軸変換を人工ポテンシャル法に組み込むことにより、ロボットが目標位置に到達するまでの収束時間と時間挙動の同時制御を可能とする新しい軌道生成法を提案した。そして、全方向移動ロボットを制御対象とし、線形化したシステムに対して本手法を適用して得られたフィードバック制御則を用いて軌道生成シミュレーション実験をおこない、その有効性を確かめた。

本手法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られる。また、本手法は通常的人工ポテンシャル法の枠組みで議論できることより、これまでに開発された種々のポテンシャル法にそのまま適用可能である。今後は、モータが発生できる最大駆動力を考慮した制御法を開発していきたいと考えている。

(平成10年12月25日受付, 同11年4月30日再受付)

文 献

- (1) O. Khatib : Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile robots, int.J.Robotics Res., Vol. 5, No. 1, pp. 396-404, Spring (1986)
- (2) 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)
- (3) 杉井, 秋下 : 流体力学的ポテンシャルを用いた自律移動ロボットの経路計画~十字路における障害物回避~, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 839-844, (1998)
- (4) 橋本, 國井, 原島 : 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) 辻, P.G.Morasso, 重橋, 金子 : 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, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 285-290, (1995)
- (7) Y. Tanaka, T. Tsuji and M. Kaneko : Dynamic Control of Redundant Manipulators Using Artificial Potential Field Approach with Time Scaling, in Proceedings of 3rd International Symposium on Artificial and Robotics, pp. 67-72, (1998)
- (8) Z. Qu, D. M. Dawson : Robust Tracking Control of Robot Manipulators, IEEE Press, pp. 45-57, (1996)
- (9) 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)
- (10) 田代: 微分方程式要論, 森北出版, pp. 59-60, (1982)
- (11) C. Canudas de Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds) : Theory of Robot Control, Springer, pp. 277-278, (1996)

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, 日本ロボット学会, 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。



付 録

実時間におけるポテンシャル関数  $V_\psi$  の収束性  
 仮想時間におけるシステム (式(15)) に対するポテンシャル関数  $V_\psi$  を実時間  $t$  に関して微分すると,

$$\frac{d}{dt} V_\psi = -\frac{1}{a(t)} X^T K_c X = -\sum_{i=1}^n \frac{k_{n+i}}{a(t)} x_i^2 \leq 0 \quad (付1)$$

となる。

一方, 式(21), (22), (23)を上式に代入して変数  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) に関して解くと, 式(16)を構成するポテンシャル関数  $V_{\psi_i}$  は判別式  $D_{x_i} = 4\frac{k_i}{k_{n+i}} - 1$  により,

(A) if  $D_{x_i} > 0$

$$V_{\psi_i} = 2C_i \left( \frac{1 + D_{x_i}}{D_{x_i}} \right) \times \{1 + D_{x_i} - \cos(2f(\xi)) - \sqrt{D_{x_i}} \sin(2f(\xi))\} \xi^p \dots \quad (付2)$$

$$f(\xi) = \frac{\sqrt{D_{x_i}}}{2} p \ln \xi$$

(B) if  $D_{x_i} = 0$

$$V_{\psi_i} = C_i \{2 - 2p \ln \xi + (p \ln \xi)^2\} \xi^p \dots \quad (付3)$$

(C) if  $-1 < D_{x_i} < 0$

$$V_{\psi_i} = C_i \left( \frac{1 + D_{x_i}}{j\sqrt{D_{x_i}}} \right)^2 \left( \frac{2\lambda_1}{p} \xi^{2\lambda_1} + \frac{2\lambda_2}{p} \xi^{2\lambda_2} - 2 \right) \quad (付4)$$

$$\lambda_1 = \frac{p}{2} + \frac{j\sqrt{D_{x_i}}}{2} p, \quad \lambda_2 = \frac{p}{2} - \frac{j\sqrt{D_{x_i}}}{2} p$$

となる。ただし,  ${}^0x_i$  は変数  $x_i$  の初期値,  $C_i = \frac{k_{n+i}}{16} ({}^0x_i)^2$  である。ここで,  $\lim_{t \rightarrow t_f} \xi = 0$  および  $\lim_{t \rightarrow t_f} \xi \ln \xi = 0$  であるから, 3で導出した判別式  $D_{x_i}$  と実定数  $p, \beta$  に関する必要十分条件 (I, II) を満たす時, ポテンシャル関数  $V_{\psi_i}$  は指定した時刻  $t_f$  で0に収束する。したがって, 状態変数  $\psi$  はフィードバック制御則  $F_Z$  (式(19)) により実時間軸上において指定時刻  $t_f$  で0に収束することになる。