

日本機械学会論文集

Transactions of the Japan Society of
Mechanical Engineers

別 刷

62巻 597号 C編

(平成8年5月)

社団法人 日本機械学会

人工ポテンシャル場の変形を用いた移動ロボットの軌道生成法*

辻 敏夫^{*1}, 千種 和幸^{*2}, 金子 真^{*1}Trajectory Generation of Moving Robots
Using Active Deformation of Artificial Potential Fields

Toshio TSUJI, Kazuyuki CHIGUSA and Makoto KANEKO

A trajectory generation method based on an artificial potential field approach may be useful for real-time motion planning of a moving robot, since it is effective and computationally much less expensive than other methods using global information on a task space. In the present paper, we argue that dynamic behavior of a generated trajectory and control of the direction of motion of the moving robot should be taken into account within the framework of the artificial potential field approach for practical use, and propose a new method using active deformation of the artificial potential field. The method can regulate movement time from an initial position to a goal, and velocity profile of the trajectory as well as the position and the direction of motion of the robot by changing the orientation and shape of the artificial potential ellipse.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Moving Robot, Computer Control, Trajectory Generation, Artificial Potential Field

1 はじめに

移動ロボットやマニピュレータの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⁾⁻⁵⁾がよく用いられる。この方法では、目標位置で最小値を持つポテンシャル場を作業空間に設定し、勾配ベクトルに基づいた極値探索法を適用することにより軌道の生成を行う。障害物を含む作業空間に対しても、目標位置への吸引力を発生するポテンシャル場と障害物からの反発力を発生するポテンシャル場の加重を用いることにより、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た障害物回避を実現することができる。しかし、その反面、生成される軌道の時間的な挙動やロボットの進行方向の制御問題については十分な考察が行われていないようである。

たとえば、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ても³⁾⁻⁵⁾、到達にどの程度の時間がかかるかは分からない。また、移動ロボットでは、進行方向の制御も重要となるにもかかわらず⁶⁾、従来の人工ポテンシャル法では進行方向を厳密に制御することは難しい。使用されるポテンシャル関数の勾配ベクトルによって進行方向が決定するためである。人工ポテンシャル法の最も重要な特徴がその"real-time"性に置かれているにも関わらず^{1),4)}、生成された軌道を実時間で移動ロボットの制御に用いることはかなり難しい。

これらの問題のうち、生成される軌道の時間特性につ

いては、辻らが初期位置から目標位置までの動作時間を指定でき、かつ軌道の速度パターンを調節可能な人工ポテンシャル法を多関節マニピュレータを対象として提案している⁷⁾。この方法は、Time Base Generator と呼ばれる時間関数発生器⁸⁾(以下、TBGと呼ぶ)を人工ポテンシャル法に組み込み、ポテンシャル関数の時間変化をこの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、多関節マニピュレータの手先の移動時間を陽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、このTBGを組み込んだ人工ポテンシャル法を移動ロボットに適用し、生成される時間挙動の調節を可能にするとともに、ポテンシャル場の変形を用いることにより、移動ロボットの進行方向の制御が可能な新しい軌道生成法を提案する。以下、第2章で従来の人工ポテンシャル法について説明し、第3章で本論文で提案する軌道生成法のアルゴリズムを示す。そして、第4章でシミュレーション実験により本手法の有効性を明らかにするとともに、移動ロボットの進行方向を制御することにより障害物回避軌道などのさまざまな空間軌道を生成できることを示す。

2 人工ポテンシャル法

まず、2次元の作業空間上に存在する移動ロボットを人工ポテンシャル法を用いて、初期位置 X_0 から目標位置 X_f まで移動する問題を考えよう。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 $V(X)$ を設定する¹⁾⁻⁵⁾。ここでは、目標位置 X_f で $V(X_f) = 0$ となり、任意の位置 X ($X \neq X_f$) で $V(X) > 0$ を満た

* 原稿受付 1995年8月14日。

^{*1} 正員、広島大学工学部 (〒739 広島市鏡山1-4-1)。^{*2} 広島大学工学部学生。

ようなポテンシャル関数を用いる。このとき、移動ロボットの並進速度 $\dot{\mathbf{X}} = (\dot{x}, \dot{y})^T$ を $V(\mathbf{X})$ の勾配ベクトルを用いて、

$$\dot{\mathbf{X}} = -\eta \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{X}} \right)^T \quad (1)$$

と定義する。ただし η は正の定数である。このとき、ポテンシャル関数の時間変化 \dot{V} を計算すると、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} \\ &= -\eta \left\| \frac{\partial V}{\partial \mathbf{X}} \right\|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

となり、このシステムは漸近安定となる。

この人工ポテンシャル法では、(1) 式のパラメータ η を用いて移動ロボットの並進速度を調節することが可能である。しかしながら、初期位置 \mathbf{X}_0 から目標位置 \mathbf{X}_f に到達するのに要する時間を制御したり、移動速度の時間変化を望ましい形状に調節するために、どのような基準でパラメータ η を変化させればよいか分からない。

さらに、(1) 式に従って動作する移動ロボットの進行方向を θ とすると、

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan 2(\dot{y}, \dot{x}) \\ &= \arctan 2\left(-\frac{\partial V}{\partial y}, -\frac{\partial V}{\partial x}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

となる (Fig.1 参照)。ただし $\arctan 2(\cdot, \cdot)$ は $\arctan 2(a, b) = \arg(b + aj)$ で定義されるスカラー関数で、 j は虚数単位、 \arg は複素数の偏角を表す。したがって、(1) 式の人工ポテンシャル法では、移動ロボットの進行方向はポテンシャル関数 $V(\mathbf{X})$ によって一意に決定されることになり、時不変のポテンシャル関数を用いる限り、厳密な進行方向の制御は不可能である。

以上の観点から、本論文では生成される軌道の目標点への収束時間や速度波形などの時間挙動を調節可能にするパラメータ η の設定法を明らかにするとともに、ポテンシャル関数 $V(\mathbf{X})$ を積極的に変形することにより、移動ロボットの進行方向が制御できることを示す。

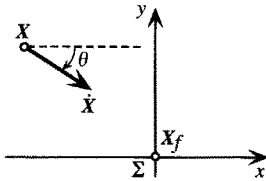


Fig.1 Task coordinate system

3 ポテンシャル場の変形を用いた軌道生成法

3.1 問題の設定

本論文では、Fig.1 に示すように目標位置に原点を持ち、目標進行方向を x 軸とするような作業座標系 Σ を

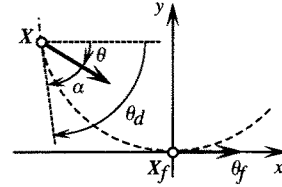


Fig.2 Nominal trajectory and desired moving direction

定義する。そして、移動ロボットの初期速度 $\dot{\mathbf{X}}_0$ と x 軸とのなす角度を初期進行方向 θ_0 とし、移動ロボットを初期位置 $\mathbf{X}_0 = (x_0, y_0)^T$ 、初期進行方向 θ_0 から、 Σ の原点 $\mathbf{X}_f = (0, 0)^T$ まで移動する問題を考える。ただし、目標位置 \mathbf{X}_f での移動ロボットの最終的な目標進行方向 θ_f は $x_0 \geq 0$ のとき

$$\theta_f = \begin{cases} 0 & (\mathbf{X}_0 \cdot \dot{\mathbf{X}}_0 > 0) \\ \pi & (\mathbf{X}_0 \cdot \dot{\mathbf{X}}_0 < 0) \end{cases} \quad (4)$$

で、 $x_0 < 0$ のとき

$$\theta_f = \begin{cases} 0 & (\mathbf{X}_0 \cdot \dot{\mathbf{X}}_0 < 0) \\ \pi & (\mathbf{X}_0 \cdot \dot{\mathbf{X}}_0 > 0) \end{cases} \quad (5)$$

と定義する。ここで $\mathbf{X}_0 \cdot \dot{\mathbf{X}}_0$ は \mathbf{X}_0 と $\dot{\mathbf{X}}_0$ との内積を表す。

Canudas de Wit and Sørđalden⁹⁾は、Fig.2 に示すように作業座標系 Σ の原点と現在の位置 \mathbf{X} を通り、かつ、 x 軸と接するような円を定義し、これを移動ロボットの目標軌道として用いた。図中、 θ_d はこの円の点 \mathbf{X} における接線の傾きを表す。ここで θ_d と現在の進行方向 θ との誤差を α とおくと、

$$\alpha = e + n(e)\pi \quad (6)$$

$$e = \theta - \theta_d \quad (7)$$

$$\theta_d = 2 \arctan 2(y, x) + \theta_f \quad (8)$$

と計算することができる。ただし、 $n(e)$ は $\alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ を満足するように整数値をとる関数である。ここでは、この θ_d を目標進行方向として、軌道生成を行うことにする。

3.2 ポテンシャル場の定義

次にポテンシャル関数 $V(\mathbf{X})$ を次式で定義する。

$$V(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{A} = \mathbf{P}^{-1}(\varphi) \mathbf{A}(\lambda) \mathbf{P}(\varphi) = \begin{bmatrix} a & h \\ h & b \end{bmatrix}$ で、

$$\mathbf{P}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a = \lambda^2 \cos^2 \varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{\lambda^2} \quad (12)$$

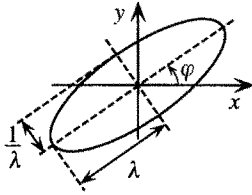


Fig.3 Artificial potential ellipse

$$b = \lambda^2 \sin^2 \varphi + \frac{\cos^2 \varphi}{\lambda^2} \quad (13)$$

$$h = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2}\right) \cos \varphi \sin \varphi \quad (14)$$

である。P(φ) は行列 A の固有ベクトルを要素とする行列で、ポテンシャル楕円の回転角 φ の回転行列に対応する。また、λ ≠ 0 はポテンシャル楕円の形状を表すパラメータである (Fig.3 参照)。本論文では、ポテンシャル関数 V(X) を回転角 φ および形状 λ という 2 つのパラメータを用いて表現し、φ, λ を変化させることによってポテンシャル楕円の傾き、形状を調節することにする。

3.3 フィードバック制御則

以上の定式化のもとで、(1) 式的人工ポテンシャル法を修正した以下のような制御則を提案する。

$$\dot{X} = -\eta' \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)^T \quad (15)$$

$$\eta' = -\frac{V}{\left\|\frac{\partial V}{\partial X}\right\|^2} \dot{\xi} \quad (16)$$

$$\dot{\varphi} = (M - R)K \quad (17)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{(\lambda^4 - 1)L}{\lambda} K \quad (18)$$

ただし、

$$K = \frac{\alpha M - \frac{LV}{M} + \frac{2LV}{R} \dot{\xi}}{(M - R)^2 + 4L^2 \dot{\xi}} \quad (19)$$

$$R = x^2 + y^2 \quad (20)$$

$$M = (ax + hy)^2 + (hx + by)^2 \quad (21)$$

$$L = (x^2 - y^2)h - xy(a - b) \quad (22)$$

で、λ ≠ 0 と仮定する。また、ξ(t) は一階微分可能な、ξ(0) = 1, ξ(t_f) = 0 をみたす単調減少関数で Time base Generator (TBG) と呼ばれる⁸⁾。t_f は初期位置から目標位置までの収束時間を表す。

このとき、ポテンシャル関数の時間変化 \dot{V} を計算すると、(9)-(11) 式より、

$$\frac{\partial V}{\partial X} \dot{X} = X^T A \quad (23)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varphi} \dot{\varphi} = -L \quad (24)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \lambda} \dot{\lambda} = \frac{\lambda(M - R)}{\lambda^4 - 1} \quad (25)$$

であるから、

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial X} \dot{X} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial V}{\partial \lambda} \dot{\lambda} = V \frac{\dot{\xi}}{\xi} \quad (26)$$

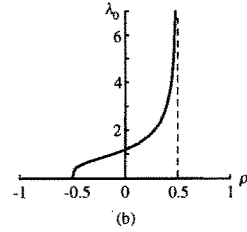
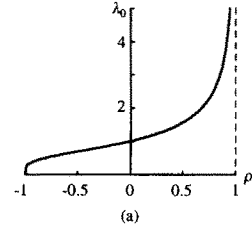


Fig.4 Relationship between ρ and λ₀

となる。V ≥ 0, ξ ≥ 0, $\dot{\xi} \leq 0$ であるから、 $\dot{V} \leq 0$ となり、このシステムは漸近安定である。

ここで、(26) 式を変形すると、

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} = \frac{V}{\xi} \quad (27)$$

と書くことができる。この微分方程式を解くと、

$$V = V_0 \xi \quad (28)$$

となり、V と ξ の間に比例関係が成立していることがわかる。ただし、V₀ は V(X) の初期値 V(X₀) である。定義より ξ(t) は時刻 t とともに単調に減少し、t_f で ξ(t_f) = 0 となるから、このときポテンシャル関数 V(X) も 0 となり、移動ロボットが時刻 t_f で目標位置に到達することが示された。

3.4 進行方向の制御

3.4.1 初期進行方向

まず、移動ロボットの初期進行方向を与えられた目標値 θ₀ に一致させることを考えよう。(9), (15), (16) 式で定義された移動ロボットの進行方向 θ₀ は、(3) 式から、

$$\theta = \arctan 2(-(hx + by), -(ax + hy)) \quad (29)$$

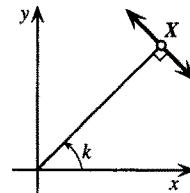


Fig.5 Singular configurations for controlling initial moving direction θ₀

と求まる。上式をポテンシャル関数の2つのパラメータ φ , λ を用いて書き下すと,

$$\tan \theta = \frac{x \sin 2\varphi - y \cos 2\varphi + \frac{\lambda^2+1}{\lambda^2-1}y}{x \cos 2\varphi + y \sin 2\varphi + \frac{\lambda^2+1}{\lambda^2-1}x} \quad (30)$$

を得る。初期位置では $x = x_0$, $y = y_0$ であるから, φ , λ の初期値を φ_0 , λ_0 とおくと, 移動ロボットの初期進行方向 θ_0 と φ_0 , λ_0 の関係式が得られる。しかしながら, (30) 式だけでは φ_0 と λ_0 を一意に決定することはできない。

そこでまず, (30) 式を初期位置 \mathbf{X}_0 において λ_0 について解くと, $\lambda_0 > 0$ として

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{\sin(2\varphi_0 + \rho) + \sigma}{\sin(2\varphi_0 + \rho) - \sigma}} \quad (31)$$

を得る。ただし,

$$\sigma = \frac{(y_0 - x_0 \tan \theta_0) |\cos \theta_0|}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (32)$$

$$\rho = \arctan 2(x_0 \tan \theta_0 + y_0, y_0 \tan \theta_0 - x_0) \quad (33)$$

とおいた。Fig.4 は, (31) 式に含まれる項 $\sin(2\varphi_0 + \rho)$ を $\sin(2\varphi_0 + \rho) = 1$ (Fig.4(a)), $\sin(2\varphi_0 + \rho) = 0.5$ (Fig.4(b)) と固定した場合の, λ_0 と ρ の関係をグラフに表したものである。 λ_0 は $-\sin(2\varphi_0 + \rho) < \sigma < \sin(2\varphi_0 + \rho)$ の範囲で解を持つことがわかる。

一方, (32) 式は,

$$\sigma = \begin{cases} \sin(k - \theta_0) & (\cos \theta_0 \geq 0) \\ \sin(\theta_0 - k) & (\cos \theta_0 < 0) \end{cases} \quad (34)$$

と変形できるので, $-1 \leq \sigma \leq 1$ である。ここで,

$$k = \arctan 2(y_0, x_0) \quad (35)$$

とおいた。したがって, Fig.4(a) のように

$$\sin(2\varphi_0 + \rho) = 1 \quad (36)$$

が成立するように φ_0 を選べば, (31) 式から λ_0 を求めることができる。ただし, $\sigma = \pm 1$ の場合は, (31) 式より $\lambda_0 = +\infty$ または 0 となってしまう, (9) 式の行列 \mathbf{A} が正定値行列でなくなる。(34) 式から分かるように, $\sigma = \pm 1$ が成立するのは, 目標位置から初期位置への位置ベクトルと, 初期進行方向ベクトルとが直交する場合に対応する (Fig.5)。このような場合には, 目標初期進行方向 θ_0 を満足するポテンシャル楕円は存在せず, 特異点となる。

以上より, 本論文では, ポテンシャル関数のパラメータの初期値 φ_0 , λ_0 を,

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1+\sigma}{1-\sigma}} \quad (37)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{4}(\pi - 2\rho) \quad (38)$$

のように決定する。これにより, 初期進行方向 θ_0 と初期位置 \mathbf{X}_0 が特異点でない限り, 移動ロボットの初期進行方向を調節することが可能となる。

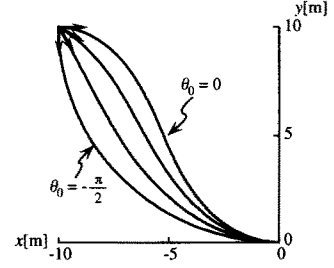


Fig.6 Generated trajectories for the initial position $\mathbf{X}_0 = (-10, 10)^T$ [m]

3.4.2 最終進行方向

次に, 進行方向の誤差 α の時間変化を計算してみよう。(6)-(16), (29) 式より,

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{-y}{M} + \frac{2y}{R} \quad (39)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial y} = \frac{x}{M} - \frac{2x}{R} \quad (40)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \varphi} = \frac{M-R}{M} \quad (41)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \lambda} = \frac{4\lambda L}{(\lambda^4 - 1)M} \quad (42)$$

となるから, (17), (18) 式を用いて,

$$\dot{\alpha} = \frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial \alpha}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial \alpha}{\partial \lambda} \dot{\lambda} = \alpha \frac{\xi}{\xi} \quad (43)$$

となる。(26) 式と同様にして, (43) 式を解くと,

$$\alpha = \alpha_0 \xi \quad (44)$$

を得る。 $\xi(t)$ は時刻 t_f で 0 となるから, $\alpha \rightarrow 0$ となり, 時刻 t_f で移動ロボットの軌道は x 軸に漸近しながら目標位置 \mathbf{X}_f に到達することが示された。

以上, 本論文で提案するポテンシャル場の変形を利用した人工ポテンシャル法について説明した。この方法では, 生成される軌道の時間挙動を調節できるだけでなく, 進行方向の制御も可能となる。次章では, 提案した軌道生成法の有効性を示すために行ったシミュレーション実験について説明する。

4 シミュレーション実験

4.1 自由空間における軌道の生成

Fig.6 は, 初期位置を $\mathbf{X}_0 = (-10, 10)^T$ [m] とし, 初期進行方向 θ_0 を 0 [rad] から $-\frac{\pi}{2}$ [rad] まで $\frac{\pi}{8}$ [rad] づつ変化させたときの結果である。いずれも, $\xi(t)$ を

$$\dot{\xi} = -\gamma(\xi(1-\xi))^\beta \quad (45)$$

$$\gamma = \frac{\Gamma(1-\beta)}{t_f \Gamma(2-2\beta)} \quad (46)$$

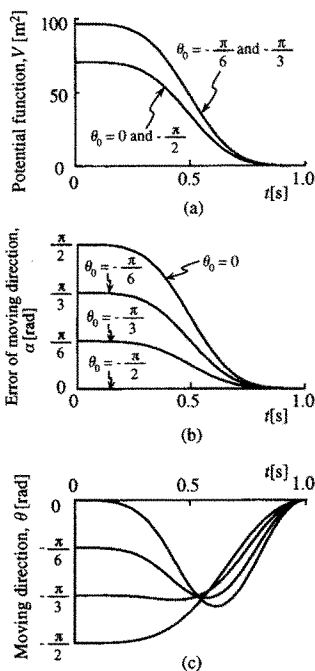


Fig.7 Time history of V , α and θ for the initial position $X_0 = (-10, 10)^T$ [m]

としている⁸⁾。ただし、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数で、 $\beta = 0.75$ 、収束時間は $t_f = 1.0$ [s] とした。(45) 式は、 $\xi = 0$ 、 $\xi = 1$ の2つの平衡点をもち、非常に小さい正の定数 ϵ を用いて ξ の初期値を $\xi(0) = 1 - \epsilon$ とすれば、時間とともに単調減少し、時刻 t_f で安定平衡点 $\xi(t_f) = 0$ に到達する。

また、Fig.7に、ポテンシャル関数 $V(\mathbf{X})$ 、目標進行方向 θ_d と現在の進行方向 θ との誤差 α および進行方向 θ の時間変化を示す。時刻 t_f で $V(\mathbf{X}) \rightarrow 0$ 、 $\alpha \rightarrow 0$ となり、いずれも滑らかな軌道で目標位置に到達していることが分かる。

Fig.8は、半径10[m]の円周上の8点で初期進行方向 θ_0 を $\frac{\pi}{2}$ としたときの結果である。ただし、特異点に対応する $\mathbf{X}_0 = (\pm 10, 0)^T$ [m] の2カ所では、初期進行方向 θ_0 に $\frac{\pi}{180}$ [rad] を加えた。特異点の近傍を初期位置に選んだものを含めて、いずれも滑らかな軌道を描いて、 x 軸に漸近しながら目標点まで到達していることが分かる。特に、初期位置を $\mathbf{X}_0 = (0, 10)^T$ [m] としたときの、ポテンシャル関数 $V(\mathbf{X})$ 、進行方向 θ 、ポテンシャル楕円の傾き φ 、形状 λ の時間変化を Fig.9 に示す。ポテンシャル関数 $V(\mathbf{X})$ は ξ に比例して減少し、 $V(\mathbf{X})$ 、 θ も時刻 t_f で0となっている。

4.2 時間軌道の調節

Fig.10のように初期位置を $\mathbf{X}_0 = (5\sqrt{2}, 5\sqrt{2})^T$ [m]、初期進行方向 $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ としたとき、TBGに含まれるパラメータ t_f 、 β ((45),(46) 式) により生成される軌道がど

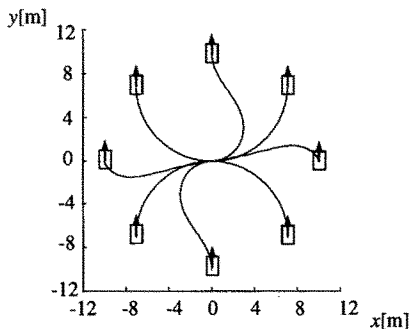


Fig.8 Generated trajectories when the moving robot is initially on the circle in the x - y plane with $\theta_0 = \pi/2$

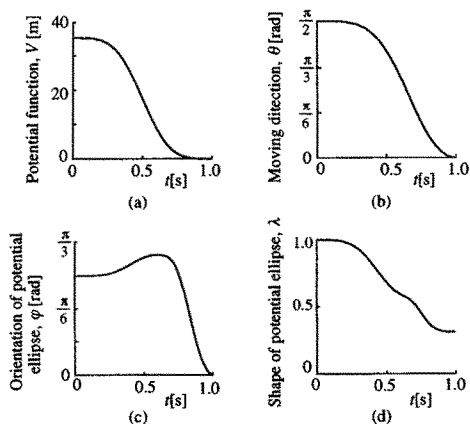


Fig.9 Time history of V , θ , φ and λ for the initial position $X_0 = (0, 10)^T$ [m] in Fig.8

のように変化するか調べた。Fig.11は、 $\beta = 0.75$ として、収束時間 t_f を 1.0, 2.0, 3.0 [s] と変化した場合の V 、 \dot{V} の時間軌道である。いずれも指定した時刻 t_f で平衡点に収束している。

一方、Fig.12は、 $t_f = 1.0$ として、 β を 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 としたときの結果である。 β の値によってポテンシャル関数の時間軌道を調節できることが分かる。ここで、Fig.11, Fig.12のすべての場合に対して、移動ロボットの空間軌道は変化せず、いずれも Fig.10 に示す軌道を生成していることに注意されたい。すなわち、本手法では、空間軌道に影響を与えることなく時間軌道を調節できることが分かる。

4.3 障害物回避軌道の生成

人工ポテンシャル法では障害物が存在する場合、目標位置からの吸引力と障害物からの反発力の加重和を用いて、軌道生成を行う。ここでは障害物からの反発力を考慮して、目標進行方向 θ_d を修正することで障害物を回

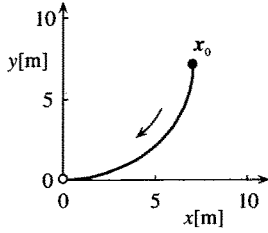


Fig.10 Generated trajectory for the initial position $X_0 = (5\sqrt{2}, 5\sqrt{2})^T$ [m]

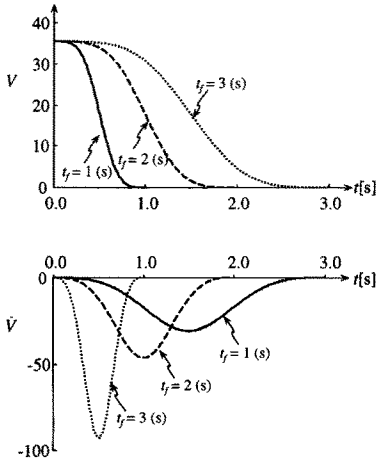


Fig.11 Changes of the time behavior of V depending on the convergence time t_f with the constant power parameter $\beta = 0.75$

避する方法を考えよう。

Fig.13のように、移動ロボットと障害物 $i (i = 1, 2, \dots, N)$ との距離 d_i が $d_i \leq r$ の場合、障害物からの反発力ベクトル F_{obs}^i と移動ロボットの目標進行方向ベクトル F_{goal} とのベクトル和を計算し、新たな目標進行方向 θ_{d-new} を定義する。

$$\theta_{d-new} = \arctan 2(F_{new}^y, F_{new}^x) \quad (47)$$

ただし、

$$F_{new} = \begin{pmatrix} F_{new}^x \\ F_{new}^y \end{pmatrix} = F_{goal} + \sum_{i=1}^N F_{obs}^i \quad (48)$$

$$F_{goal} = \|\dot{X}\| \begin{pmatrix} \cos \theta_d \\ \sin \theta_d \end{pmatrix} \quad (49)$$

$$F_{obs}^i = g \frac{X - X_{obs}^i}{\|X - X_{obs}^i\|^2} \quad (50)$$

とする。ここで、 X_{obs}^i は i 番目の障害物の位置ベクトルで、 g は定数である。(50)式より、移動ロボットが障害物に近づくほど、反発力は強くなることに注意されたい。

Fig.14は、Fig.8の $X_0 = (5\sqrt{2}, 5\sqrt{2})^T$ [m]、 $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ [rad]としたときの軌道上に6つの障害物 ($N = 6$) を

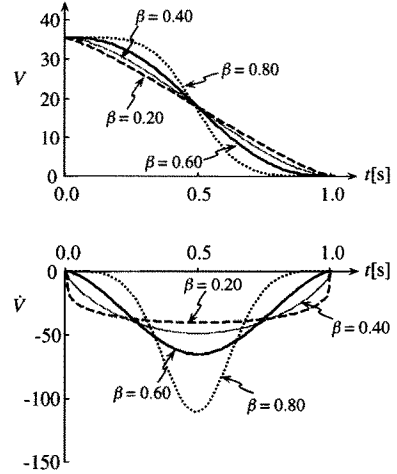


Fig.12 Changes of the time behavior of V depending on the power parameter β with the constant convergence time $t_f = 1.0$ [s]

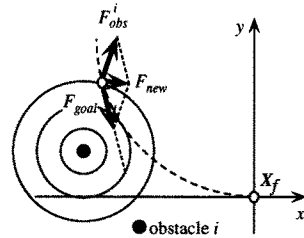


Fig.13 Desired moving direction with consideration of obstacle avoidance

配置したときの軌道生成の結果である。障害物回避に必要なパラメータは $r = 1, 3, 5$ [m]、 $g = 60$ とし、軌道生成に必要なパラメータは Fig.8 と同じに設定した。このように、 r や g を適切に設定することで、障害物を回避する軌道を生成できることが分かる。またこのときのポテンシャル関数の時間変化を Fig.15 に示す。 $r = 1, 3, 5$ [m] に対応する3種類の軌道 (Fig.14) が、全く同じポテンシャル関数の時間変化を示すことに注意されたい、これは、いずれの場合もポテンシャル関数 $V(X)$ と時間関数 t の間に比例関係が成立している ((28) 式) ためである。その結果、障害物を回避する軌道を生成しているにもかかわらず、指定された収束時間 t_f [s] で目標位置に到達していることが分かる。

5 まとめ

本論文では、人工ポテンシャル法に基づく移動ロボットの軌道生成問題に対し、TBGを組み込むことで生成される軌道の時間挙動を調節可能にするとともに、ポテ

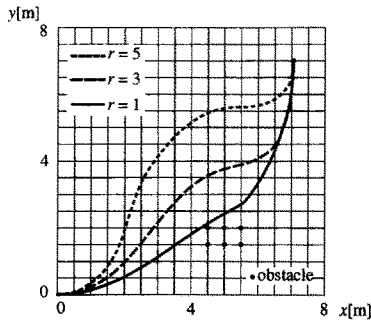


Fig.14 Generated trajectories with consideration of obstacle avoidance

ンシャル場を積極的に変形をさせることにより、進行方向の制御が可能となることを示した。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 移動ロボットの挙動をTBGに同期させることにより、初期位置から目標位置に到達するまでの時間が調節できることを明らかにした。
- (2) ポテンシャル楕円の方向と形状を変化させることにより、移動ロボットの進行方向を制御する方法を示した。
- (3) 与えられた作業空間に応じて目標進行方向を調節することにより、障害物を回避する空間軌道を生成できることを示した。

本手法では、空間軌道と時間軌道を同時に生成できるため、移動ロボットだけでなくマニピュレータの軌道計画問題にも有効であると考えられるが、実際のロボットに適用するためにはいくつかの問題点がある。今後は、特異点を回避する方法について考察するとともに、制御入力に対する拘束条件の考慮や経由点の取り扱いについて検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) O.Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile robots", *Int. J. Robotics Res.*, Vol.5, No.1, pp.396-404, 1986.

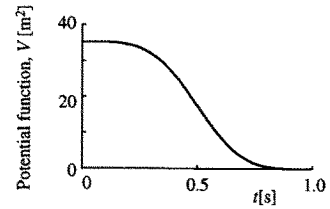


Fig.15 Time history of V with consideration of obstacle avoidance

- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) J.O.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.
- 5) 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, pp720-709, 1993.
- 6) 中村, "非ホロノミックシステム", *日本ロボット学会誌*, Vol.11, No.6, pp.837-844, 1993.
- 7) 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.
- 8) 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.1072-10798, 1994.
- 9) C.Canudas de Witt and O.J.Sørdalen, "Exponential Stabilization of Mobile Robots with Nonholonomic Constraints," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.37, pp.1791-1797, 1992.