

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

辻 敏 夫*¹ Pietro G. Morasso*² 山 中 徹*¹ 金 子 真*¹

Feedback Control of Mobile Robots with Nonholonomic Constraints Using Time Base Generator

Toshio Tsuji*¹, Pietro G. Morasso*², Tohru Yamanaka*¹ and Makoto Kaneko*¹

The present paper proposes a new feedback control strategy of mobile robots with nonholonomic constraints. This method includes a function generator called a *Time Base Generator* (TBG) as a time varying feedback gain, and synchronizing linear and angular velocities of the mobile robot with a scalar variable generated by the TBG, the mobile robot can be positioned to the origin in the state space for any initial condition. The time behavior of the generated trajectory such as the velocity profile and the movement time from the initial position to the goal can be controlled through adjusting the parameters of the TBG without any change of the control law itself. In this paper, mechanism and stability of the proposed method are described using a particular type of the TBG with a bell shaped velocity profile and it is shown that the method can naturally generate straight and circular trajectories for certain initial conditions and provide a robust position control of the mobile robot for external disturbances.

Key Words: Mobile Robots, Nonholonomic Constraints, Motion Planning, Time Base Generator, Terminal Attractor

1. はじめに

最近、非ホロノミックな拘束を受けるロボットシステムの制御が注目されており[1][2]、移動ロボットや水中ロボット、宇宙ロボット、自由関節を有するマニピュレータなどさまざまな分野で活発に研究が行われている。本論文ではこのうちフィードバック制御問題を取り上げ、移動ロボットを作業空間の静止した目標点に制御する方法を提案する。

非ホロノミックな拘束を受けたシステムのフィードバック制御に関しては、現在まで時変状態フィードバック制御を用いた方法、区分解析的フィードバック制御を用いた方法などが提案されている[2]。Samson[3]やPomet[4]は時間の周期関数を用いたフィードバック則を提案し、2輪の独立駆動による移動ロボットを状態空間内の一点に位置制御できることを示した。この方法は平衡点への収束性は保証できるが、収束速度が非常に遅いという欠点を持つ。そこで、Canudas de Wit and Sordalen[5]はフィードバック則の滑らかさを放棄した区分解析的フィードバック制御則を提案し、このフィードバック則が大域的に指数関数的安定性を持つこと、2輪移動ロボットの

平衡点への収束が時変状態フィードバック制御と比較して極めて速いことを明らかにした。さらに、Sordalen, Dalsmo and Egeland[6]はこの方法を3次元に拡張し、水中ロボットの位置制御が可能であることを示している。これらの方法はいずれも安定性は保証されているが、非常に多くの切り返しを含む不自然な軌道を生成したり、軌道の時間挙動(収束時間や速度波形など)を陽に規定できないため、必ずしも実用であるとは言いがたい。

一方、Morasso, Sanguineti and Tsuji[7][8]は人間のreaching movementsを対象として2次元の手先軌道生成モデルを提案している。一般に被験者に手先を始点からある目標点まで動かすよう指示すると、手先の軌道はほぼ直線となり、運動方向に沿った速度はピークをひとつだけ持つベル型となることがよく知られている[9]。Morassoらはベル型の速度波形を持った時間関数発生器(Time Base Generator:以下、TBGと呼ぶ)を導入し、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、直線軌道だけでなく曲線軌道の生成も可能となることを示した[7][8]。このTBGを用いた手先軌道生成モデルは非ホロノミックな拘束を受けた平面移動ロボットのひとつのフィードバック制御則を与えるが、その安定性は証明されていない。

そこで本論文では、このTBGを用いた手先軌道生成モデルに区分解析的フィードバック制御則を導入し、平衡点の安定性

原稿受付 1994年3月14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

を保証でき、かつ、生成される軌道の時間挙動（収束時間や速度波形など）を指定可能な新しいフィードバック制御法を提案する。以下、2章で本論文で取り扱う問題を定式化し、この問題が非ホロノミックな拘束を受けることを示す。3章では本手法で用いる TBG について説明し、2次元のフィードバック制御則を示すとともにその収束性を解析する。最後に4章でシミュレーション実験により本手法の有効性を示し、直線軌道、円軌道の場合の移動ロボットの振る舞いを解析する。

2. 2輪移動ロボットの運動と拘束 [2][5]

Fig. 1 のような2輪移動ロボットを考える。 Σ_0 は2次元平面上に固定された座標系、 Σ_c は移動ロボットに固定された座標系である。ここで Σ_c の原点を両輪を結ぶ軸の中心、 x 軸を移動ロボットの進行方向にとる。このとき移動ロボットの一般化座標は Σ_0 から見た Σ_c の原点 (x, y) と Σ_0 から見た Σ_c の傾き θ の3変数で表される。左右車輪の回転速度をそれぞれ v_L, v_R とし、 Σ_c における x 軸方向への速度を v 、ロボットの回転速度を ω とおく

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} \mathbf{s} \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = -D \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{2}{W} & -\frac{2}{W} \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{u} = (v, \omega)^T$ 、 $\mathbf{s} = (v_R, v_L)^T$ で、 D は車輪の直径、 W は車輪間の距離である。また、一般化座標 $\mathbf{x} = (x, y, \theta)^T$ の速度と \mathbf{u} との関係は

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{G}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \quad (3)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。ここで、 $\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})^T$ である。 \mathbf{s} と \mathbf{u} は常に1対1

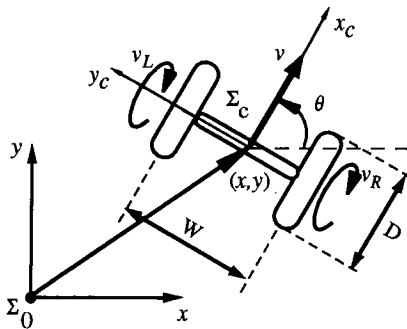


Fig. 1 Moving vehicle with two wheels

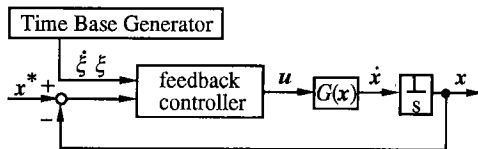


Fig. 2 Feedback control system using TBG

の対応となるため、通常、 \mathbf{u} をシステムの入力として扱う。式(3)は状態の自由度3に対して入力の自由度2となり、1自由度が拘束されている。この拘束条件は式(3)から

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (5)$$

で与えられる。このシステムは対称アフィンかつ可制御となり、非ホロノミックな拘束を受けていることが示されている [2][5]。

3. TBG を利用した移動ロボットのフィードバック制御

3.1 TBG

TBG を用いた2次元移動ロボットのフィードバック制御の構成図を Fig. 2 に示す。一般的に非ホロノミックな拘束を受けるシステムでは平衡点を安定化させる滑らかな状態フィードバック則は存在しない [2]。本手法では TBG によって生成されるベル型の速度を持ったスカラー変数 $\xi(t)$ を時変フィードバック制御則に組み込むことによってこの問題に対処している。

$\xi(t)$ は1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 は収束時間を表す。本論文では、TBG のダイナミクスを

$$\dot{\xi} = -\gamma(\xi(1.0-\xi))^\beta \quad (6)$$

と定義する [7]。ここで、 γ は収束時間 t_f の関数、 β は TBG の挙動を決定する定数で $0 < \beta < 1$ を満たす。

式(6)からわかるように $\xi(t)$ は $\xi=0$ 、 $\xi=1$ の二つの平衡点を持つ。したがって非常に小さな正の定数 ε を用いて ξ の初期値を $\xi(0)=1-\varepsilon$ に選ぶと安定平衡点 $\xi=0$ まで単調に減少する。このとき、収束時間を計算すると

$$t_f = \int_0^{t_f} dt = \int_1^0 \frac{d\xi}{\dot{\xi}} = \frac{\Gamma^2(1-\beta)}{\gamma \Gamma(2-2\beta)} \quad (7)$$

となる。ここで、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数である。そこで γ を

$$\gamma = \frac{\Gamma^2(1-\beta)}{t_f \Gamma(2-2\beta)} \quad (8)$$

とおくと、有限時間 t_f でシステムは安定平衡点に到達し、この平衡点 $\xi=0$ はターミナルアトラクタとなる [7]。ターミナルアトラクタとは Zak によって相互結合型の非線形ニューラルネットに導入されたアトラクタで [10]、Lipschitz 条件を破ることにより有限時間内でシステムを平衡点に収束させることができる。 $\xi(t)$ は $\xi \rightarrow 0$ で

$$\left| \frac{d\xi}{d\xi} \right|_{\xi=0} = \left| -\gamma \beta \frac{1-2\xi}{\{\xi(1-\xi)\}^{1-\beta}} \right|_{\xi=0} \rightarrow \infty \quad (9)$$

となり、Lipschitz 条件が破られている。

$\xi(t)$ の速度波形 $\dot{\xi}(t)$ は $\dot{\xi}(0) \approx 0$ 、 $\dot{\xi}(t_f)=0$ で、時刻 $t_f/2$ で最小値 $\dot{\xi}(t_f/2) = -\gamma 4^{-\beta}$ を持つベル型となる。このとき $\xi(t)$ の加速度を求めると

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = \gamma^2 \beta (1-2\xi) \{\xi(1-\xi)\}^{2\beta-1} \quad (10)$$

となり、平衡点で有限の加速度が存在するためには $1/2 \leq \beta < 1$ とすればよいことがわかる。さらに式(10)を t で微分すると、

$$\frac{d^3 \xi}{dt^3} = -\gamma^3 \beta (2\beta-1) (1-\xi) \{\xi(1-\xi)\}^{3\beta-2} \quad (11)$$

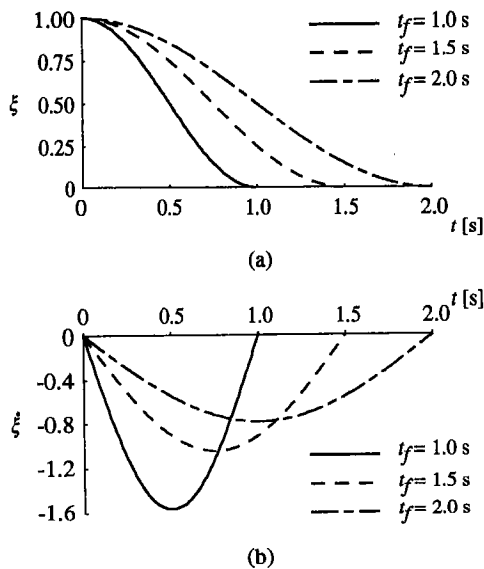


Fig. 3 Change of the ξ behavior depending on the convergence time t_f with the constant power parameter $\beta=0.5$

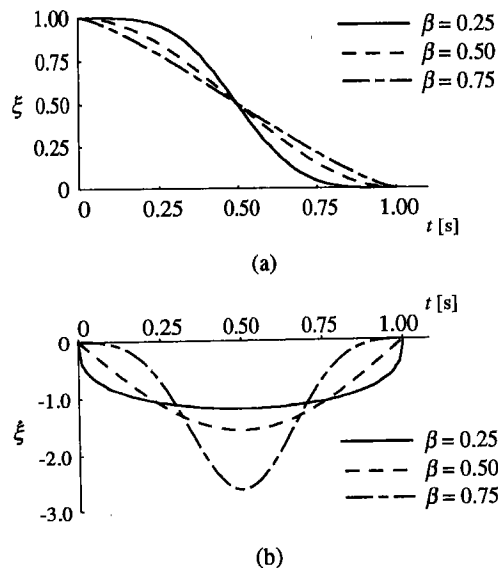


Fig. 4 Change of the ξ behavior depending on the power parameter β with the constant convergence time $t_f=1.0[s]$

を得る。同様に全軌道にわたって有限の躍度が存在するための条件は $2/3 \leq t < 1$ となる。

Fig. 3, Fig. 4 にパラメータ t_f , β による TBG の時間挙動の変化を示す。Fig. 3 は、 $\beta=0.5$, $\varepsilon=1.0 \times 10^{-9}$ とし、収束時間 t_f を 1.0, 1.5, 2.0[s] と変化させた場合の ξ , $\dot{\xi}$ 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. 4 は $t_f=1.0$, $\varepsilon=1.0 \times 10^{-9}$ とし、 β を 0.25, 0.5, 0.75 としたときの結果である。 β の値によって TBG の時間挙動を操作できることがわかる。

以上のように本論文の TBG を用いると β , t_f という二つのパラメータを用いて、ベル型の速度波形を持つさまざまな時間関数を生成できることが明らかになった。次節では、この

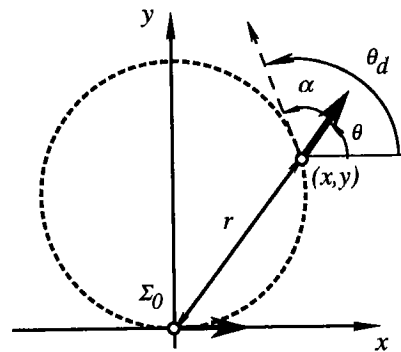


Fig. 5 Coordinate transformation

TBG を用いてベル型の速度を持った滑らかな軌道を生成する方法について説明する。

3.2 システム方程式とフィードバック制御則

ここでは移動ロボットを任意の初期状態 $x_0=(x_0, y_0, \theta_0)^T$ から原点 $x_f=(0, 0, 0)^T$ へ到達させる問題を考えよう。Canudas de Wit and Sordalen[5]は、Fig. 5 に示すように原点と現在の移動ロボットの位置 (x, y) を通り、かつ、 Σ_0 の x 軸と接するような円を用いて区分解析的フィードバック制御則を導入した。図中、 θ_d はこの円の点 (x, y) における接線の傾きを表す。彼らの制御則は、原点から現在位置までの弧の長さを減少させ、かつロボットの現在の進行方向を円の接線方向 θ_d に一致させるという考えに基づいている。本論文では弧の長さの代わりに現在位置から原点への距離 r に着目する。

ここで接線方向 θ_d と現在の進行方向 θ との誤差を α とおくと、 r , α は (x, y, θ) を用いて

$$r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (12)$$

$$\alpha(x, y, \theta) = e + 2n(e)\pi \quad (13)$$

$$e = \theta - \theta_d \quad (14)$$

$$\theta_d = 2 \operatorname{atan} 2(y, x) \quad (15)$$

と計算することができる。ただし、 $n(e)$ は $\alpha \in [-\pi, \pi)$ を満足するように整数値をとる関数であり、 $\operatorname{atan} 2(\cdot, \cdot)$ は $\operatorname{atan} 2(a, b) = \arg(b + ja)$ 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。ここで現在の移動ロボットの状態を $z=(r, \alpha)^T$ で表すと

$$z = F(x) \quad (16)$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} r(x, y) \\ \alpha(x, y, \theta) \end{bmatrix} \quad (17)$$

である。このとき移動ロボットの目標位置 $x_f=(0, 0, 0)^T$ は $z_f=(0, 0)^T$ に変換される。よって、 $z_f=(0, 0)^T$ に収束するような制御則を設計すればよい。

まず、式(16)より \dot{z} と \dot{x} の関係は

$$\dot{z} = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \dot{x} = J(x) \dot{x} \quad (18)$$

となる。ここで、

$$J(x) = \begin{bmatrix} (x^2 + y^2)^{-1/2} x & (x^2 + y^2)^{-1/2} y & 0 \\ \frac{2y}{x^2 + y^2} & -\frac{2x}{x^2 + y^2} & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 3} \quad (19)$$

である。上式に式(3)を代入すると \dot{z} とシステム入力 u との関係は

$$\dot{z} = J(x)G(x)u = B(x)u \quad (20)$$

となる。ただし、

$$B(x) = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ b_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$b_1 = (x^2 + y^2)^{-1/2} (x \cos \theta + y \sin \theta) \quad (22)$$

$$b_2 = \frac{2}{x^2 + y^2} (y \cos \theta - x \sin \theta) \quad (23)$$

である。以上のように、非ホロノミックな拘束を受けるシステムの状態変数の数を減らすことにより、状態変数の数と入力の数と同じにすることができた[11]。

式(20)のシステムに対して、本論文では以下のフィードバック制御則を提案する。

$$u = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\xi}}{b_1\xi} \\ -b_2v + \frac{\alpha\dot{\xi}}{\xi} \end{bmatrix} \quad (24)$$

ただし、 $x = x_f$ 以外で $b_1 \neq 0$ と仮定する。

3.3 収束性の解析

システム方程式(20)に制御則(24)を代入すると

$$\dot{r} = b_1v = r \frac{\dot{\xi}}{\xi} \quad (25)$$

$$\dot{\alpha} = b_2v + \omega = \alpha \frac{\dot{\xi}}{\xi} \quad (26)$$

を得る。ここでまず、目標位置までの距離 r の挙動について考えてみよう。式(25)より、

$$\frac{dr}{d\xi} = \frac{r}{\xi} \quad (27)$$

となる。この微分方程式を解くと

$$r = r_0\xi \quad (28)$$

となり、 r 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、 r_0 は r の初期値である。 ξ は時刻 t_f で $\xi \rightarrow 0$ となるから r も同様に時刻 t_f で $r \rightarrow 0$ となる。このとき、 α も同様に

$$\alpha = \alpha_0\xi \quad (29)$$

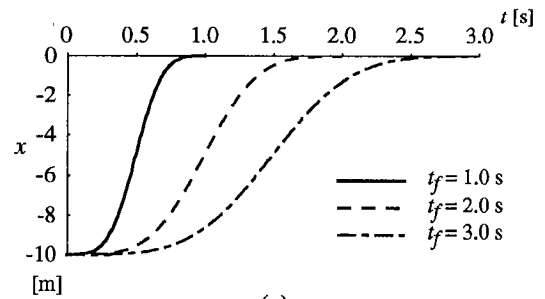
となり、時刻 t_f で $\alpha \rightarrow 0$ となる。ここで α_0 は α の初期値である。

以上より、本論文で提案する制御則を用いれば $b_1 \neq 0$ である限り、時刻 t_f で移動ロボットが目標位置に収束することが示された。本手法を用いると、TBGの働きにより移動ロボットの並進運動と回転運動を同期させることができ、非ホロノミックな拘束を受けるロボットの時間挙動を調節することが可能となる。

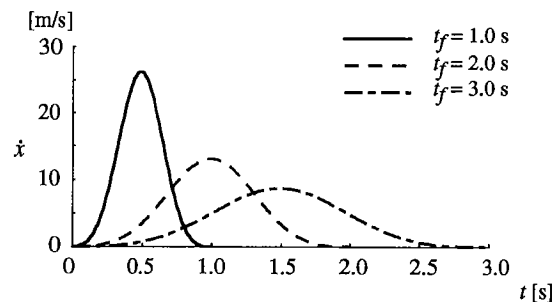
なお、時間軸 t を別の時間軸に変換する方法[12]を利用した移動ロボットの経路追従制御法が、三平、伊藤[11]によって提案されている。本論文で提案した方法も、ある意味で時間軸の変換を行うことにより移動ロボットの時間挙動を調節しているが、新しい時間軸を陽に指定する必要はなく、また有限時間で移動ロボットを作業空間の静止した目標点に収束させることができる。



Fig. 6 Generation of a straight trajectory



(a)



(b)

Fig. 7 Straight trajectories with a bell-shaped velocity profile generated by the proposed method with the constant power parameter $\beta = 0.75$

4. シミュレーション実験

4.1 直線軌道の生成

Fig. 6 に示すように初期位置が x 軸上にあり、初期方向が 0 [rad] の場合 ($x_0 = (x_0, 0, 0)$) を考えよう。このとき、式(13)、(24)から

$$\alpha_0 = 2\alpha \tan 2(0, x_0) = 0 \quad (30)$$

となる。また、 $\theta_0 = 0$ であるから、式(23)、(24)より、 $\omega = 0$ となる。このため移動ロボットは常に x 軸上に存在することがわかる。このとき $y = 0$ であるから式(12)より、

$$r = \sqrt{x^2} = |x| \quad (31)$$

となり、式(28)より、

$$|x| = |x_0|\xi \quad (32)$$

を得る。すなわち、移動ロボットの挙動は完全に ξ に比例することがわかる。

Fig. 7 は初期位置を $x_0 = (-10$ [m], 0 [m], 0 [rad]) とし、TBG のパラメータを $\beta = 0.75$ 、収束時間を $t_f = 1.0, 2.0, 3.0$ [sec] と変化させたときの x と \dot{x} の時間波形である。ただし、 y 座標、及び進行方向 θ は常に 0 であることに注意されたい。Canudas de Wit and Sordalen[5]の提案した方法では初期位置が x 軸上に存在する場合には軌道を生成することができない。これは Fig. 5 で示した初期位置 x_0 を通り、かつ原点 x_f

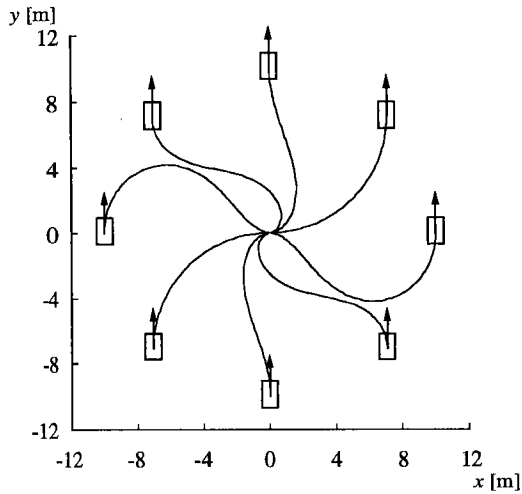


Fig. 8 Generated trajectories when the moving vehicle is initially on the unit circle in the xy plane with $\theta_0 = \pi/2$ [rad]

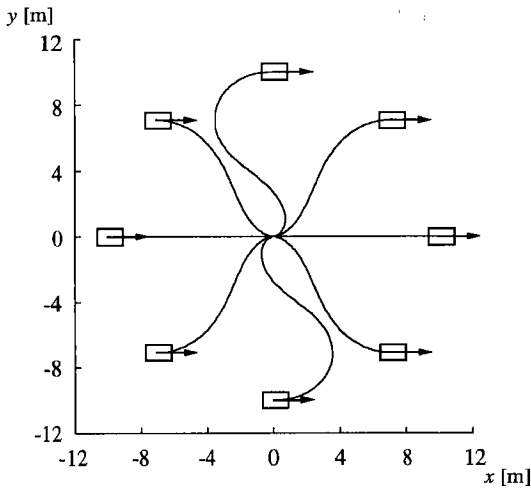


Fig. 9 Generated trajectories when the moving vehicle is initially on the unit circle in the xy plane with $\theta_0 = 0$ [rad]

で x 軸と接するような円が存在しないためである。彼らの方法に対して本手法では原点 x_f と現在位置 x との距離を用いて軌道の制御を行っているためこのような場合でも軌道を生成でき、かつ移動速度を自由に調節することが可能となる。

4.2 曲線軌道の生成

Fig. 8, 9 は初期位置を原点を中心とした半径 10[m] の円上に設定し、初期方向 θ_0 はすべて $\pi/2$ [rad] とした場合 (Fig. 8), すべて 0[rad] とした場合 (Fig. 9) について 2 次元移動ロボットの軌道生成を行った結果である。TBG のパラメータは $\beta = 0.75, t_f = 1.0$ [s] とした。

3.2 節で述べたように本手法では、式 (22) のパラメータ b_1 がゼロになる点 (特異点) で制御則が実行不可能になる。式 (22) を考察すると、座標系の原点から移動ロボットへの位置ベクトルと移動ロボットの進行方向が直交したとき、特異点となることが容易にわかる (Fig. 5 参照)。そこでこの特異点近傍での移動ロボットの挙動を考察するため、Fig. 8, 9 のシミュレーションに特異点の近くから出発する場合を含めた。Fig. 8 の x 軸

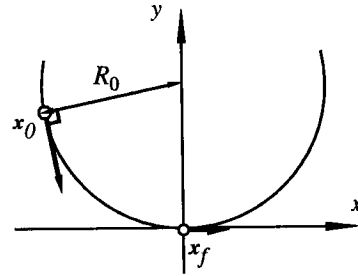
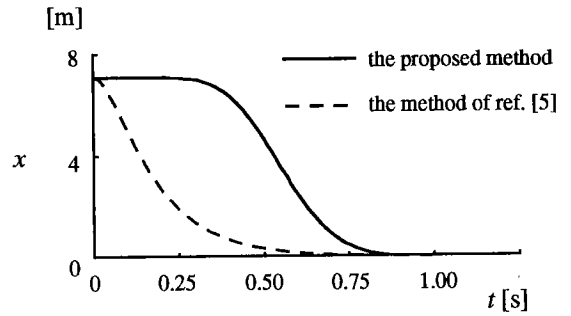
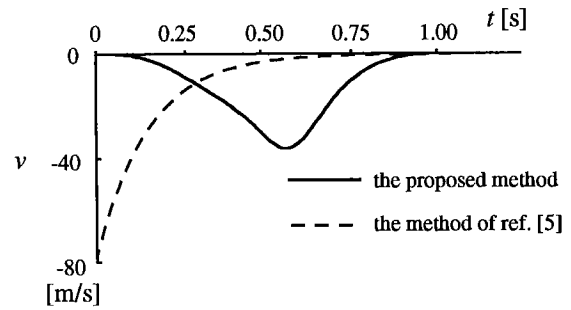


Fig. 10 Generation of a circular trajectory



(a)



(b)

Fig. 11 Time history of x and v generated by the proposed method where the initial position of the vehicle is $x_0 = (\sqrt{50} [m], \sqrt{50} [m], \pi/2 [rad])^T$

($y=0$) の近傍から出発する二つの軌道 (初期状態 x_0 はそれぞれ、 $x_0 = (10 [m], 1.0 \times 10^{-5} [m], \pi/2 [rad])^T$, $x_0 = (-10 [m], -1.0 \times 10^{-5} [m], \pi/2 [rad])^T$)、及び Fig. 9 の y 軸 ($x=0$) の近傍から出発する二つの軌道 (初期状態 x_0 はそれぞれ、 $x_0 = (1.0 \times 10^{-5} [m], 10 [m], 0 [rad])^T$, $x_0 = (-1.0 \times 10^{-5} [m], -10 [m], 0 [rad])^T$) である。これらの特異点の近傍から出発した場合を含めて、いずれの場合も特異点 ($b_1=0$) を通ることなく、切り返しを含まない滑らかな軌道で目標位置に到達していることがわかる。また Fig. 8 のうち、初期状態が $x_0 = (\sqrt{50} [m], \sqrt{50} [m], \pi/2 [rad])^T$ と $x_0 = (-\sqrt{50} [m], -\sqrt{50} [m], \pi/2 [rad])^T$ の場合はきれいな円軌道を描いている。そこで、これらの場合について少し詳しく調べてみる。

まず、初期進行方向 θ_0 が初期位置と原点を通る円の接線と一致している場合を考える (Fig. 10 参照)。このとき、式 (13) より、 $\alpha_0 = 0$ となるから、式 (24) より、

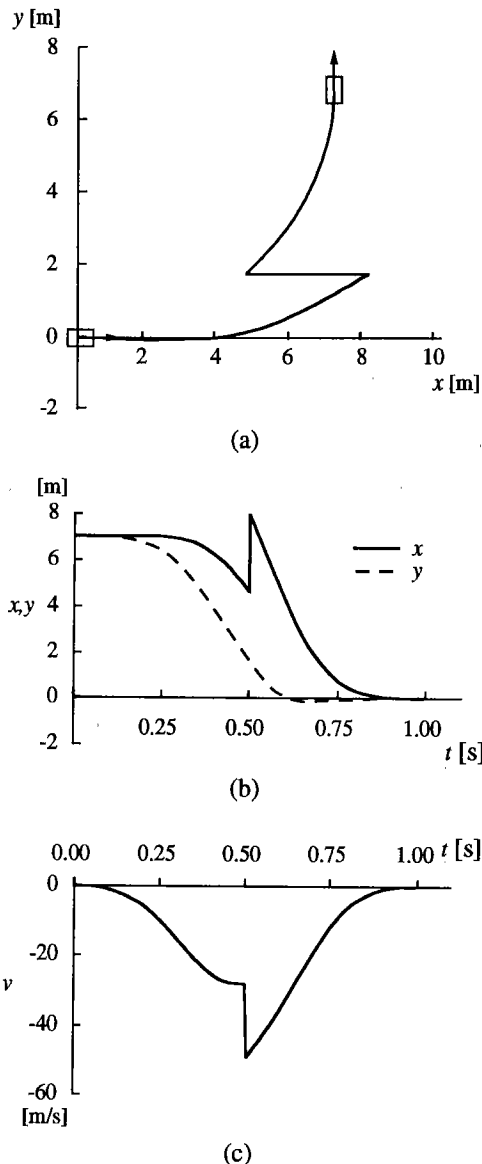


Fig. 12 Generated trajectory when the position of the vehicle is deviated externally at $t=0.5[s]$

$$\omega = -b_2 v \quad (33)$$

となる。また、初期状態の円の半径を R_0 とおくと

$$R_0 = \frac{x^2 + y^2}{2y} \quad (34)$$

である。ここで、 $\sin \theta = x/R_0$ 、 $\cos \theta = (R_0 - y)/R_0$ に注意して、式(23)の b_2 を変形すると

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{2}{x^2 + y^2} \left(\frac{R_0 - y}{R_0} y - \frac{x}{R_0} x \right) \\ &= -\frac{1}{R_0} \end{aligned} \quad (35)$$

となる。式(33)、(35)より、移動ロボットの軌道は初期状態において定義された円の円周上に常に存在することになり、完全な円軌道を生成しながら目標点に収束することがわかる。

Fig. 11 は初期状態が $\mathbf{x}_0 = (\sqrt{50}[m], \sqrt{50}[m], \pi/2[\text{rad}])^T$ のと

きの x 座標の時間波形と速度 v の時間波形である。実線が本手法を用いた場合で、波線が Canudas de Wit and Sordalen [5] の提案した方法を用いた結果を示している。Canudas de Wit and Sordalen の方法は目標位置に近づくにしたがって収束が遅くなっていくのに対して、本手法は指定した時刻 $t_f = 1.0[\text{sec}]$ で収束し、かつ速度波形がほぼベル型となっている。

4.3 外乱に対する応答特性

本手法を用いると、結果的に式(28)、(29)が成立するため一見すると開ループ制御を行っているような印象を受ける。そこで移動中のロボットに外乱を加え、生成される軌道、収束時間などがどのように変化するか調べてみた。

Fig. 12 に結果の一例を示す。図は Fig. 11 と同じ初期状態 $\mathbf{x}_0 = (\sqrt{50}[m], \sqrt{50}[m], \pi/2[\text{rad}])^T$ からスタートした移動ロボットに対して、時刻 $t=0.5[s]$ で移動ロボットの x 座標を強制的に $x=8[m]$ に変化させたとき生成された軌道である。外乱が印加した後も、移動ロボットは滑らかな軌道を生成し、指定した収束時間 $t_f=1.0[s]$ で目標位置に収束していることがわかる。本手法では式(28)、(29)に含まれる初期値 $\mathbf{r}_0, \mathbf{a}_0$ を陽に用いているわけではなく、これらの値はフィードバック制御によって自然に導かれる。したがって、Fig. 12 のように外乱が加わって式(28)、(29)の関係が崩れたとしても、比例関係自体は保存され、移動ロボットは TBG で指定された時刻 t_f で目標位置に収束する。本手法が外乱に対してロバストであることがわかる。

5. まとめ

本論文では、非ホロノミックな拘束を受ける移動ロボットの新しいフィードバック制御法を提案した。本論文で提案したフィードバック制御法は Time Base Generator と呼ばれる時間関数発生器を内蔵し、この TBG のパラメータを調節することにより移動ロボットの時間挙動（収束時間や速度波形）をある程度、調節することができる。また、この方法は直線軌道や円軌道を自然に生成できるだけでなく、外乱に対してもロバストである。

ただし、本手法では区分解析的フィードバック制御則[3]を利用しているため、作業空間内にいくつかの不連続点が存在してしまう。今後は、この特異点近傍での制御系の振る舞いを明らかにするとともに本手法を水中ロボットや4輪駆動ロボットに応用することを考えている。

参考文献

- [1] Z. Li and J. F. Canny (eds.): "Nonholonomic motion planning," Kluwer Academic Pub., 1993.
- [2] 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.
- [3] C. Samson: "Velocity and torque feedback control of a non-holonomic cart," in Advanced Robot Control, Lecture Notes in Control and Information Sciences, no. 162, pp. 125-151, 1991.
- [4] J.-B. Pomet: "Explicit design of time varying stabilizing feedback laws for a class of controllable systems without drift," System and Control Letters, vol. 18, pp. 139-145, (1992).
- [5] C. Canudas de Wit and O. J. Sordalen: "Exponential Stabilization of Mobile Robots with Nonholonomic Constraints," IEEE

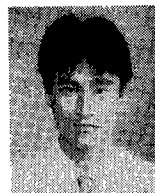
- Trans. on Automatic Control, vol. 37, pp. 1791-1797, 1992.
- [6] O. J. Sørtdalen, M. Dalsmo and O. Egeland: "An Exponentially Convergent Control Law for a Nonholonomic Under Water Vehicle," Proc. IEEE Int. Conf. on RA, vol. 3, pp. 790-795, 1993.
- [7] P. Morasso, V. Sanguineti, and T. Tsuji: "A model for the generation of target signals in trajectory formation," Proc. of the Int. Conf. in Handwriting and Drawing, pp. 74-76, 1993.
- [8] P. Morasso, V. Sanguineti, and T. Tsuji: "Neural architecture for robot planning," ICANN '93 Proc. of Int. Conf. on Artificial Neural Networks, pp. 256-261, 1993.
- [9] P. Morasso: "Spatial Control of Arm Movements," Exp. Brain Res., vol. 42, pp. 223-227, 1981.
- [10] M. Zak: "Terminal Attractors for Addressable Memory in Neural Networks," Physics Letters A, vol. 133, pp. 218-222, 1988.
- [11] 三平, 伊藤: "非線形制御理論を用いた車両の経路追従制御と移動計画一切り返しを用いた車庫入れ制御", システム制御情報学会論文誌, vol. 6, no. 1, pp. 37-47, 1993.
- [12] M. Sampei and K. Furuta: "On Time Scaling for Nonlinear System: Application to Linearization," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-31, no. 5, pp. 459-462, 1985.



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。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(日本ロボット学会正会員)

会員。



山中 徹 (Tohru Yamanaka)

1969年11月27日生。1992年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。1994年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年日本電装(株)入社, 現在に至る。在学中, 複数マニピュレータの軌道計画・制御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。1981年3月東京大学博士課程卒業。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。IEEE, 計測自動制御学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)