

人間の四肢運動を模擬したロボットの軌道生成法*

人間太郎**, 港区二郎***, 赤坂三郎**,***

In this paper, the bio-mimetic trajectory of robots for manipulating a holding nonholonomic car is generated with a Time Base Generator (TBG). In order to reveal what kind of trajectories the robots should generate on the task, the experiments with subjects are performed, and it is shown that a human generates the trajectory with single or double-peaked velocity profile according to geometrical conditions of the car position. Then, by modeling these primitive profiles with the TBG, a new method that generates the bio-mimetic trajectory for the task of the robots is proposed. Finally, the trajectories are generated and compared with the human trajectories.

本論文では、時間関数発生器 (Time Base Generator: TBG) を用いて非ホロノミックな車を操るロボットに対する人間の四肢運動を模擬した軌道生成を行う。まずはじめに、ロボットがどのような動きをするべきかを明らかにするため、被験者を用いた実験を行う。そして、設定した車の位置条件により、人間は単峰型もしくは双峰型の速度波形を有する軌道を生成することを示す。次に、基本速度波形を TBG でモデル化することにより、ロボットが人間の特徴を備えた動きで作業を遂行するための新しい軌道生成法を提案する。最後に、提案法により生成された軌道と観測された人間の軌道を比較検討する。

(キーワード: 人間の四肢運動, 軌道生成, 非ホロノミック拘束, 時間関数発生器)

1. はじめに

ロボットのハード/ソフト技術の向上に伴い、工場など人間の存在を特に考慮しない環境で活躍してきた従来のロボットだけでなく、家庭やオフィスなど人間が生活を営む一般環境において人間と協調・共存することのできる新たなロボットの開発が強く期待されている。最近では、自律二足歩行が可能な人間型ロボット、いわゆるヒューマノイドの開発が盛んにおこなわれ、ハード面では人間が親和感を持ちやすいロボットの実現が達成されつつある^{1,2)}。しかしながら、日常的な生活場面においてロボットと人間の共存を実現するためには、外見だけでなくその動きにも人間らしさを有することが重要であろう。

本論文では、人間の手先が非ホロノミックな拘束を受ける作業において生成する軌道に着目し、自由運動

との違いを明らかにすると共にその特徴を備えた軌道の再現を試みる⁶⁾。ここで、非ホロノミックな拘束を伴う作業として、手に持った非ホロノミックな車を指定した始点から終点へ移動するというタスクを選択した。まずはじめに、人間が非ホロノミックな拘束を伴う作業に対してどのような軌道を生成するかを調べるため、実際に被験者を用いた実験を行い、人間が生成する空間軌道と時間軌道の関係を調べた。その結果、人間が生成する軌道は、直線軌道、S字軌道および四分円弧軌道の三つが基本軌道となり、それらの速度波形は大きく分けて一つのピークを持つベル型と二つのピークを持つ波形の二種類に分類できることが明らかとなった。また、与えられた車の初期・目標状態によっては、切り返し点を含む軌道が生成されることが確認された。そして、これらの実験結果をもとに、TBGを用いて基本速度波形をモデル化し、ロボットが非ホロノミックな拘束を伴う作業を遂行するための新しい軌道生成法を提案する。

*受付: 2000年5月10日 受理: 2000年6月10日

** 日本人間工学会

Japan Ergonomics Society

*** 東西大学

Touzai University



図 1 TBG モデルのブロック線図
Fig. 1 Block diagram of the TBG model

表 1 表のサンプル
Tab. 1 Sample of table.

2. 時間関数発生器を用いた軌道生成

2-1. TBG モデル

図 1 に時間関数発生器 (Time Base Generator: TBG)^{3,4)} を用いた人間の四肢運動メカニズムのブロック線図を示す。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関数であり、 $\xi(0) = 1, \xi(t_f) = 0$ を満たす単調減少関数である。TBG モデルにおけるフィードバック制御則は、現在位置 x と目標位置 x_d との誤差を TBG に同期させるような指令値を出力し、手先をベル型の速度波形により目標位置に指定時間で到達させる軌道を生成することが可能である。しかしながら、実際に人間が生成する速度波形は常にベル型とはならず、環境の影響等により波形に多少の歪みが生じる場合がある。そこで本論文では、非対称な速度波形の生成も考慮した新しい TBG を提案する。

今、スカラ関数 ξ の挙動を

$$\dot{\xi} = -\gamma \xi^{\beta_1} (1 - \xi)^{\beta_2} \quad (1)$$

と定義する。ただし、 γ は収束時間 t_f の関数であり、 β_1, β_2 は ξ の挙動を決定する $0 < \beta_i < 1$ ($i = 1, 2$) を満たす実定数である。ここで、 $\beta_1 = \beta_2$ のときに従来 TBG のダイナミクスと一致する。このとき、収束時間 t_f はガンマ関数 $\Gamma(\cdot)$ を用いて、

$$t_f = \int_0^1 dt = \frac{\Gamma(1 - \beta_1)\Gamma(1 - \beta_2)}{\gamma\Gamma(2 - (\beta_1 + \beta_2))} \quad (2)$$

となる。したがって、式 (2) の γ を

$$\gamma = \frac{\Gamma(1 - \beta_1)\Gamma(1 - \beta_2)}{t_f\Gamma(2 - (\beta_1 + \beta_2))} \quad (3)$$

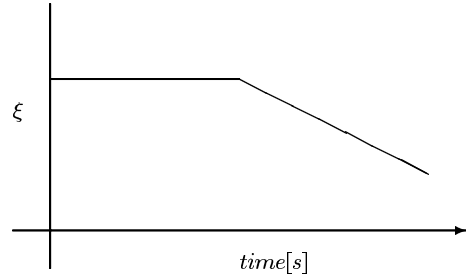


図 2 TBG の時間挙動
Fig. 2 Dynamic behavior of the TBG

と定義すれば、 ξ の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 $t_f = 2.5$ [s] と指定し、 $(\beta_1, \beta_2) = (0.75, 0.5), (0.75, 0.75), (0.5, 0.75)$ と変化させたときの ξ と $\dot{\xi}$ の挙動を示している。 β_i を変化させることにより TBG が生成する時間波形の調節が可能であり、これにより非対称な速度波形も表現可能であることがわかる。

2-2. 時間軸変換を組み込んだ人工ポテンシャル法

田中ら⁵⁾ 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、人間の運動の特徴を備えた空間・時間軌道を生成可能な軌道生成法を開発し、ロボットの軌道生成に適用している。ここでは、ヒトの四肢運動メカニズムをモデル化した TBG を用いた軌道生成法について説明する。

一般に、運動学モデルに基づくロボットの運動特性は

$$\dot{x} = G(x)U \quad (4)$$

と記述できる。ただし、 $x \in \mathbb{R}^n$ はロボットの一般化座標、 $U \in \mathbb{R}^m$ は制御入力で、 $\det G(x) \neq 0$ である。ここで、システムの時間軸変換で用いる仮想時間 s を導入し、 s と実時間 t の関係を決定する時間軸関数 $a(t)$ ⁷⁾ を、TBG を用いて、

$$a(t) = \frac{ds}{dt} = -p \frac{\dot{\xi}}{\xi} \quad (5)$$

と定義する。ただし、関数 $a(t)$ は実時間 t において連続で、 p は正の実定数である。

式 (4) のシステムの時間軸を実時間 t から仮想時間 s に時間軸変換することにより、仮想時間軸上のシステム、

$$\frac{dx}{ds} = \frac{dx}{dt} \frac{dt}{ds} = G(x)U_s \quad (6)$$

が得られる。ただし，

$$U_s = \frac{1}{a(t)}U \quad (7)$$

である。

人工ポテンシャル法は，目標位置 x_d で最小値 $V(x_d) = 0$ となるようなポテンシャル関数 $V(x)$ を作業空間に設定し，仮想的に目標位置への吸引力を働かせることにより，制御対象となるロボットを目標位置に到達させる手法である^{3,4)}。この手法を用いて式(6)の仮想時間軸上のシステムに対する制御則 U_s を設計した後，制御則 U_s の時間軸を実時間 t に逆変換することにより，実時間 t におけるシステム(式(4))を指定時刻 t_f で平衡点に収束させるフィードバック制御則 U ，

$$U = -a(t)G^{-1}(x) \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T \quad (8)$$

が得られる。

これまでに，このTBGを組み込んだ軌道生成法を用いて人間の運動の特徴を備えた軌道生成が行われている⁵⁾が，拘束を伴う作業に対して生成される軌道については考慮されていなかった。以下では，非ホロノミックな拘束を伴う作業に着目し，人間が生成する軌道をTBGモデルの枠組みで再現することを試みる。

3. まとめ

本論文では，手に持った非ホロノミックな車の移動作業を取り上げ，人間の運動パターンを模倣することにより，人間に違和感を与えないロボットの軌道生成を試みた。そのためにまず被験者を用いた実験を行い，人間が生成する基本速度波形が単峰型と双峰型の2種類となることを明らかにした。そして，TBGを用いた軌道生成法を適用し，仮想経由点および仮想目標点の概念を導入することにより人間が生成する基本軌道の特徴を備えた空間/時間軌道の生成に成功した。

参考文献

- 1) S. Hashimoto et al.: Humanoid robot-development of an information assistant robot handaly-, in Proceedings of IEEE 8th Int. Workshop on Robot and Human Communication, 106-111, 1997.
- 2) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: The development of honda humanoid robot, in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1321-1326, 1998.

- 3) 辻, 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, 1072-1078, 1994.
- 4) 辻, 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, 285-290, 1995.
- 5) 田中, 辻, 金子: 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, 電気学会論文誌 C, Vol. 119-C, No. 4, 425-431, 1999.
- 6) Y. Tanaka, T. Tsuji and M. Kaneko: Trajectory formation of human arm with nonholonomic constraints, in Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Mechatronics, Vol.2, 1-6, 1998.
- 7) 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, 604-609, 1986.
- 8) C. Canudas de Witt and O.J. Sordalen: Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, No. 11, 1791-1797, 1992.

付録：TBG を用いた制御則の設計

前節において，ロボットが人間に違和感を与えない動作を実現するために，どのような空間/時間軌道を生成すべきかが明らかとなった。ここでは，実験で観察された基本軌道の特徴を備えた空間/時間軌道を生成するための制御則を設計する。

車の状態は位置座標 x, y 及び進行方向 θ の3変数で表される。ただし， Σ_b は車の目標位置を原点とする基準座標系， Σ_c は車の回転中心に固定された座標系であり， v は車の x_c 軸方向の速度， ω は回転角速度をそれぞれ表わしている。

車の一般化座標と制御入力 v, ω との関係式は

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

となる⁸⁾。また，式(9)よりこのシステムに対する非ホロノミックな拘束条件

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (10)$$

が得られる。したがって，人間の手先は車を操作する

際，式 (10) の非ホロノミックな拘束を受けることになる。

この非ホロノミックなシステムに対するフィードバック制御則を，区分解析的な手法⁸⁾を用いて設計する。一般化座標を現在の位置から目標位置への距離 r ，現在の進行方向 θ と目標進行方向 θ_d との誤差 α に座標変換すると³⁾

$$r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (11)$$

$$\alpha(x, y, \theta) = e + 2n(e)\pi \quad (12)$$

$$e = \theta - \theta_d \quad (13)$$

$$\theta_d = 2\text{atan2}(y, x) \quad (14)$$

となる。ただし， $n(e)$ は $\alpha \in [-\pi, \pi)$ を満たすような整数値をとる関数である。また， $\text{atan2}(\cdot, \cdot)$ は $\text{atan2}(a, b) = \arg(b + ja)$ で定義される関数で j は虚数単位， \arg は複素数の偏角を表わす。これにより，現在の車の状態 $z = (r \text{ [m]}, \alpha \text{ [rad]})^T$ の時間変化 \dot{z} とシステム入力 u との関係は式 (9) から

$$\dot{z} = \mathbf{B}(x)u \quad (15)$$

$$\mathbf{B}(x) = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ b_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$b_1 = -(x \cos \theta + y \sin \theta)(x^2 + y^2)^{-1/2} \quad (17)$$

$$b_2 = 2(y \cos \theta - x \sin \theta)(x^2 + y^2)^{-1} \quad (18)$$

となり，システムの状態変数の数と入力数が等しくなった。

状態変数変換により得られたシステム (式 (15)) に対し，ポテンシャル関数を

$$V = \frac{1}{2} (k_r r^2 + k_\alpha \alpha^2) \quad (19)$$

と定義する。ただし， k_r, k_α は正の定数である。このとき式 (8) より，フィードバック制御則 u は

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{2} a(t) \mathbf{B}^{-1}(x) \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^T \\ &= \begin{bmatrix} \frac{k_r p r \dot{r}}{2b_1 \dot{r}} \\ -b_2 v + \frac{k_\alpha p \alpha \dot{\alpha}}{2\dot{\alpha}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

と設計することができる。ただし，目標位置以外では $\det \mathbf{B}(x) \neq 0$ と仮定する。式 (20) のフィードバック制御則 u を用いることにより，二輪からなる車を指定した初期位置から目標位置に移動させる空間/時間軌道の生成が可能となる。