

人間の上半肢運動を模擬したロボットの軌道生成法

田中良幸* 辻敏夫* 金子真*

Bio-mimetic Trajectory Generation of Robots based on Human Arm Movements

Yoshiyuki Tanaka*, Toshio Tsuji* and Makoto Kaneko*

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.

Key Words: Human Arm Movements, Trajectory Generation, Nonholonomic Constraint, Time Base Generator

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2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行われ、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。

一方、従来から人間の巧みな上半肢運動のメカニズムの解明を目的とした研究[3]~[7]が数多く行われている。例えば、Morasso[3]は人間のreaching movementsを対象として二次元の手先軌道を解析し、被験者に手先を始点からある目標点まで動かすように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一つだけ持つベル型になることを実験により明らかにした。このシンプルな人間の腕の軌道生成メカニズムを説明するため、人間の軌道計画はフィードフォワード的に行われるとする「躍度最小モデル」[4]や「関節トルク変化最小モデル」[5]、逆にフィードバック的に行われるとする「VITEモデル」[6]などが提案され、各モデルが人間の生成する軌道をほぼ再現できることがコンピュータ・シミュレーションなどによって確認されている。

また、Morassoら[7]はベル型の速度波形を持った時間関数発生器(Time Base Generator: TBG)を提案し、手先の並進・回転速度を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した。これをもとに、辻ら[8][9]はTBGに人工ポテンシャル法で用いるポテンシャル関数の時間変化を同期させることにより、マニピュレータや移動ロボットの空間軌道と収束時間などの同時制御が可能な軌道生成法を開発した。さらに、田中ら[10]はTBGを用いた時間軸変換法を人工ポテンシャル法に組み込み、より適用性の高い軌道生成法を開発している。しかしながら、日常生活では手先が何らかの拘束を受けることが多いにもかかわらず、従来の研究ではそのような拘束を考慮した軌道生成については考えられていない。

ここで、人間の手先が運動時に受ける拘束は、幾何学的にはホロノミックな拘束と非ホロノミックな拘束に分けることができる。ホロノミックな拘束を伴う人間の上半肢運動に関しては、クランク回し動作における手先力パターンの解析[11][12]や、1自由度リニアテーブルを用いたランダム波形追従作業に対する動特性解析[13]などいくつかの研究が報告されている。しかしながら、非ホロノミックな拘束を伴う人間の運動に関しては、筆者らの知る限り調べられていないようである。

そこで本論文では、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[14]。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

原稿受付 1999年5月24日

*広島大学工学部

*Hiroshima University

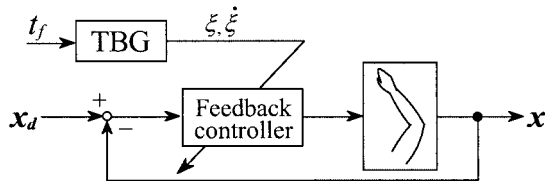


Fig. 1 Block diagram of the TBG model

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。

以下、2章で新しいTBGモデルを提案するとともに、TBGを組み込んだ軌道生成法について説明する。3章では、被験者が非ホロノミックな作業において生成した手先軌道と速度波形の分析を行い、人間が生成する基本軌道を抽出する。そして、4章ではTBGを用いた軌道生成法により制御則を設計し、5章で人間が生成する軌道の特徴を有した軌道の生成を試みる。

2. 時間関数発生器を用いた軌道生成

2.1 TBGモデル

Fig. 1 に時間関数発生器 (Time Base Generator: TBG) [8] [9] 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ー関数であり、 $\xi(0) = 1, \xi(t_f) = 0$ 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、環境の影響など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、スカラー関数 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、 $\beta_1 = \beta_2$ のときに従来の 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

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

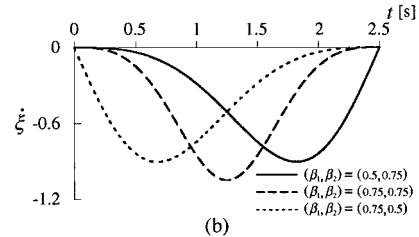
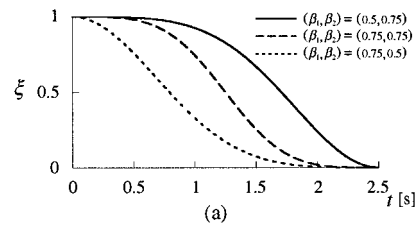


Fig. 2 Dynamic behavior of the TBG

となる。したがって、式(2)の γ を

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

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。

Fig. 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分かる。

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 [10] 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 $a(t)$ [16] を、TBG を用いて

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

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 [8] [9]。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 [10] 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. 非ホロノミックな拘束に対する人間の四肢運動

本論文では、手先に持った非ホロノミックな車のある始点から目標点まで移動する作業を取り上げ、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ようなロボットの軌道生成を実現することを目的とする。そこで、まず人間がこの非ホロノミックな拘束を受ける作業に対し、どのような空間/時間軌道を生成するかを明らかにするため、実際に被験者を用いて実験を行った。

3.1 実験環境

Fig. 3 に実験風景を示す。実験は、被験者を床に座らせ、手に持った車を設定した実験条件に従って指定された始点から目標点へ移動させるように指示する形式で行った (Fig. 3 (a) 参照)。ただし、実験に使用した車は Fig. 3 (b) に示すように一つの球状タイヤと二つの車輪を有する非ホロノミックなシステムである。そして、実験中に生成された車の空間軌道と並進速度 v を計測するため、リアルタイム動作解析システム Quick MAG ((株) 応用計測研究所製) を用いた。

Quick MAG は、2 台の CCD カメラより得られる二次元画像情報を用い、最大 8ヶ所の測定点につけられたカラー・マーカーの三次元位置座標をリアルタイムで計測することが可能である。また、車の並進速度 v は、Quick MAG により計測された測定点 (Fig. 3 (b) 中の印) の位置情報を二次のバタワースフィルタで平滑化した後 (カットオフ周波数は Winter の手法 [15] により自動決定)、数値微分により算出した。

上述の実験装置を用いて、被験者 (男子大学生 9 名) に車の位置と姿勢に関する初期・目標状態の実験条件を提示して実験を行った。ただし、提示する実験条件および試行回数は被験者ごとに变化させた。

3.2 基本軌道の抽出

非ホロノミックな車の移動作業に対して、被験者は最初の数試行では複雑な軌道を生成したり目標位置に到達できない場合

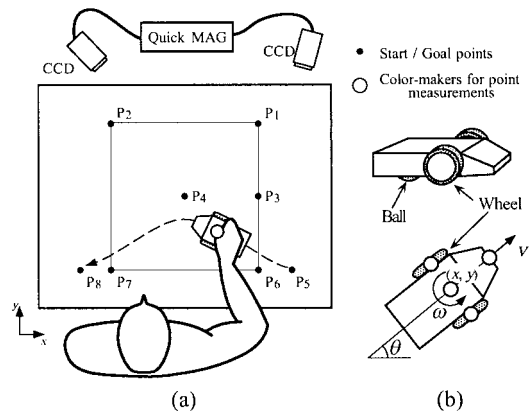


Fig. 3 Experimental apparatus

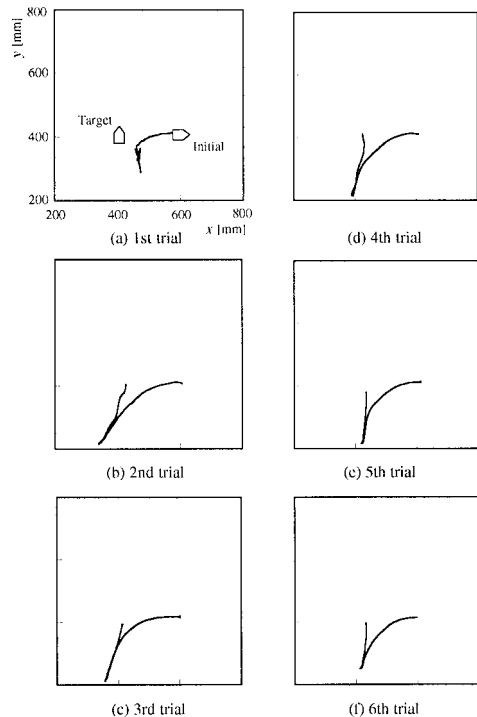


Fig. 4 Learning process of the trajectory generation with a non-holonomic constraint

が観察されたが、すぐに一定の空間軌道を生成することが分かった。Fig. 4 に、被験者の作業に対する熟練過程の一例を示す。ただし、初期、目標位置をそれぞれ P_3 , P_4 とし、初期、目標方向はそれぞれ 0 度、90 度とした。Fig. 4 より、被験者は最初の試行では Fig. 4 (a) のように車を目標状態へ移動できない場合も観察されたが、その後はほぼ一定の軌道を生成していることが分かる。

次に、車の初期・目標状態を变化させたときに、作業に十分熟練した被験者が生成した空間軌道の代表例を Fig. 5 に示す。ただし、Fig. 5 (a), (b) は初期位置をそれぞれ P_1 , P_3 、目標位置を共に P_4 と設定し、初期/目標方向を 90 度ずつ变化させた場合の結果である。また、Fig. 5 中の矢印は車の初期/目標方向を表しており、空間軌道は生成した被験者によって線の種

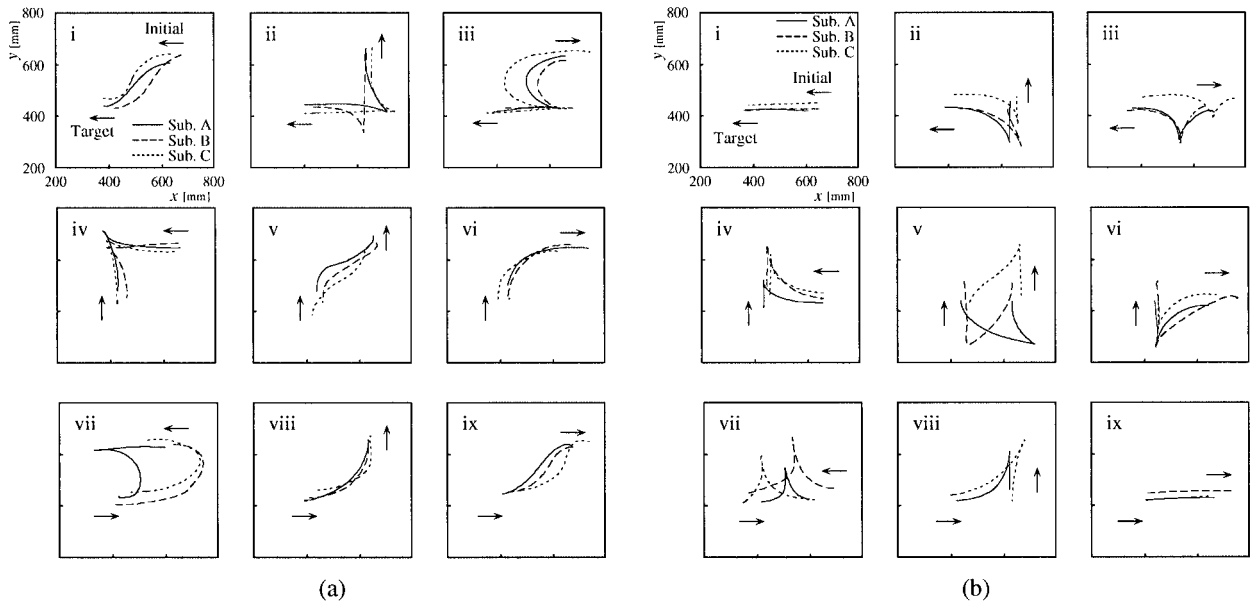


Fig. 5 Maps of generated trajectories with the different experimental conditions:
 (a) The initial point is set at P_1 , (b) The initial point is set at P_3

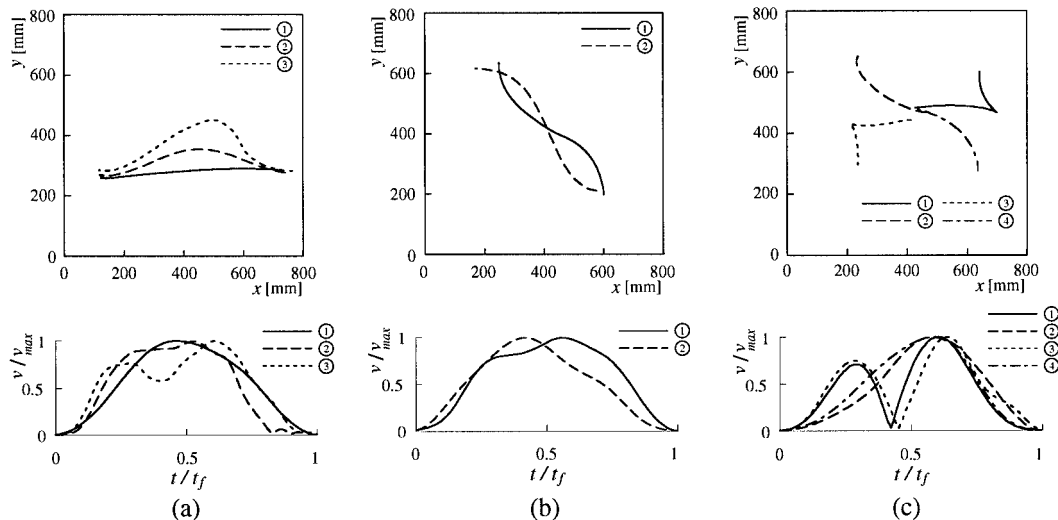


Fig. 6 Generated primitive spatio-temporal trajectories under the different experimental conditions

類で区別している。

Fig. 5 より、被験者が生成した空間軌道は初期・目標状態によって大きく変化し、Fig. 5 (a)–vii のように若干の個人差が見られる場合もあるが、大半は同じ運動パターンを選択することが確認できる。そして、そのパターンは「直線軌道」、「曲線軌道」、直線または曲線軌道を組み合わせた「切り返し軌道」の三つに大きく分類できることが分かる。もちろん、被験者は随意的には様々な形状の曲線軌道を生成することが可能であるが、今回設定した実験条件下では Fig. 5 (a)–i, v, ix に見られる「S字軌道」、Fig. 5 (a)–vi, viii に見られる「四分円弧軌道」の二つの曲線軌道パターンが主に観察された。そこで本論文では、Fig. 5 に見られる「直線軌道」、「S字軌道」、「四分円弧軌道」の

三つの運動パターンを、車の移動作業に対する人間の基本軌道として抽出する。次に、これら基本軌道の速度パターンを調べるため、以下の条件で追加実験を行った。

A: 車の初期姿勢 θ_0 、目標姿勢 θ_d は絶対座標系に対してそれぞれ $\theta_0 = \theta_d = \pi$ [rad] とし、初期位置 P_5 から目標位置 P_8 へ移動させる。ここで、空間軌道の曲率が速度波形に与える影響を調べるため、被験者には試行回数を重ねるに従って Fig. 3 (a) 中の破線のように軌道を徐々に膨らませるよう指示する。

B: 車の初期姿勢 θ_0 、目標姿勢 θ_d は絶対座標系に対してそれぞれ $\theta_0 = \theta_d = \frac{\pi}{2}$, π [rad] とし、初期位置 P_6 から目標位置 P_2 へ移動させる。

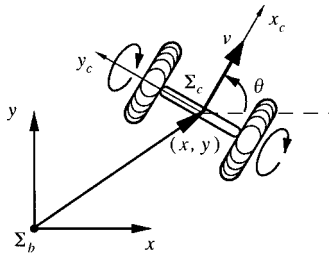


Fig. 7 Model of a vehicle with two wheels

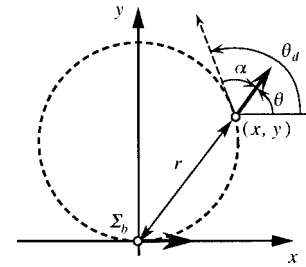


Fig. 8 Coordinate transformation

C: 車の目標位置 P_4 を中心とする一辺 400 [mm] の正方形の 4 頂点 P_1, P_2, P_6, P_7 を車の初期位置とする。ただし、車の初期姿勢は $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ [rad], そして目標姿勢は $\theta_d = \pi$ [rad] とする。

Fig. 6 に観察された車の空間軌道と並進速度 v の波形の代表例を示す。ここで、Fig. 6 (a), (b), (c) の軌道は、それぞれ異なる熟練者により生成された平均的な軌道である。また、並進速度波形の縦軸と横軸は、それぞれ各試行における最大並進速度 v_{max} 、目標位置に到達するまでの所要時間 t_f で規格化している。

Fig. 6 (a) より、直線軌道に対する並進速度波形は時刻 $t_f/2$ 付近で一つのピークを持つベル型（以下単峰型と呼ぶ）となり、空間軌道の膨らみの度合いが大きくなるに従い二つのピークを持つ波形（以下双峰型と呼ぶ）に変化していく様子が分かる。

また、Fig. 6 (b) に見られる S 字軌道に対する速度波形は、空間軌道に膨らみがある軌道と同様に二つのピークを有している。

一方、実験条件 C に関しては、Fig. 6 (c) のように切り返しを一回含んだ軌道と四分円弧状の軌道の 2 種類が観察され、Fig. 5 の結果と同様に設定した車の初期位置に応じて生成する軌道を選択している様子が分かる。そして、四分円弧状の軌道に対する並進速度波形は単峰型となり、切り返しを含む軌道では切り返しが発生した時刻で二つの単峰型が繋がった波形となっている。ここで、切り返しが発生する時刻付近における速度波形が滑らかに変化していない点に注意されたい。

以上の実験結果より、人間が生成する三つの基本軌道に対する速度波形は、単峰型と双峰型の二種類であることが明らかとなった。

4. TBG を用いた御則の設計

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/時間軌道を生成する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。

被験者が操作する車を Fig. 7 のようにモデル化する。このとき、車の状態は位置座標 x, y および進行方向 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 [17]。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 [17] を用いて設計する。そこでまず、式 (9) のシステムを Fig. 8 のような初期位置から目標位置である原点まで到達させる問題に置き換え、システムの状態変数変換を行う。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 [8]

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

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

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

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

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、 $\text{atan}2(\cdot, \cdot)$ は $\text{atan}2(a, b) = \arg(b + ja)$ 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

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

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

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

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

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

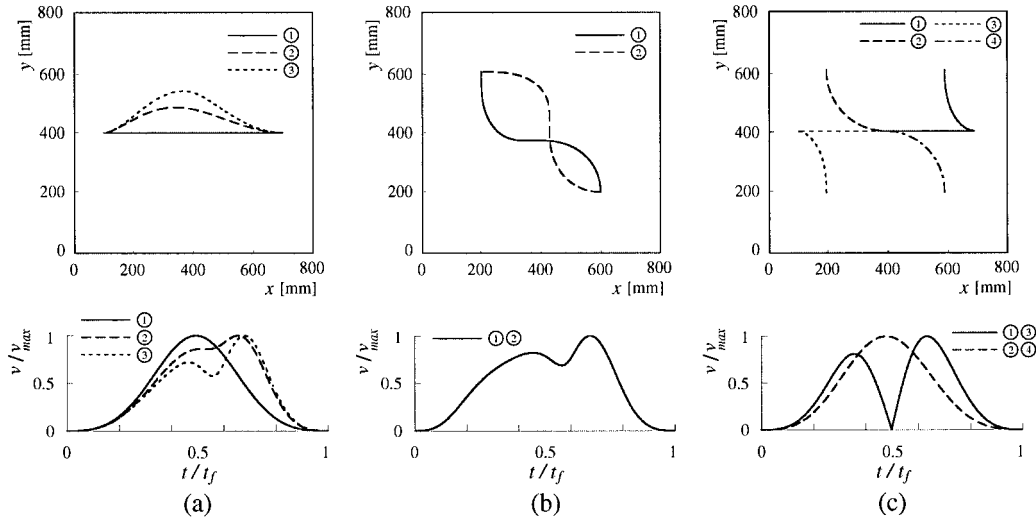


Fig. 9 Generated primitive spatio-temporal trajectories with TBG based method under the different experimental conditions

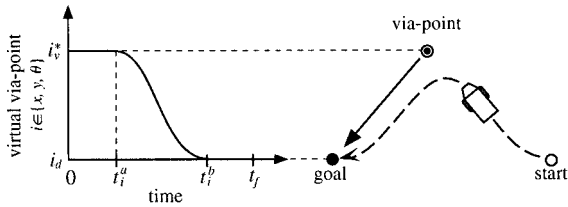


Fig. 10 Virtual via-point used in the simulations

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

と設計することができる。ただし、目標位置以外では $\det B(x) \neq 0$ 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。

5. 人間の四肢運動を模擬した軌道生成実験

前節で設計したフィードバック制御則(式(20))を用い、人間による実験で明らかとなった単峰型と双峰型の速度波形を有する基本軌道の再現をシミュレーション実験により試みた。

Fig. 9 に < 3.2 > で述べた車の初期・目標状態に関する実験条件 A ~ C に対して生成された空間軌道と速度波形を示す。ここで、収束時刻は $t_f = 2.5[s]$ とし、 β_i ($i = 1, 2$) は生成する軌道に応じて設定した。そして、各パラメータは $p = 2.0$, $k_r = k_\alpha = 1.0$ とした。また、並進速度波形の縦軸は最大速度 v_{max} 、横軸は所要時間 t_f でそれぞれ規格化している。

本論文では、双峰型の速度波形を有する基本軌道を生成するため、作業空間上に仮想経由点 $x_v^* = (x_v^*, y_v^*)^T$ と仮想目標姿勢 θ_v^* をポテンシャル場の平衡点として設定した。そして、式(1)で定義した TBG を用いて Fig. 10 のように時刻 t_i^a から時刻 t_i^b ($i = x, y, \theta$) にかけて目標値と一致するように滑らかに移動させた。ここで、 $\beta_1 = \beta_2 = 0.75$ とし、 t_i^a, t_i^b はコンピュータによる軌道生成実験を通じて経験的に $t_x^a = t_y^a = 0.35t_f$,

$t_\theta^a = 0.1t_f$, $|t_i^a - t_i^b| = \frac{t_f}{2}$ と設定した。また、切り返し軌道の生成に対しては、切り返し点として仮想目標点 x_d^* を設定し、切り返し前後で生成された基本軌道を時刻 $\frac{t_f}{2}$ で切り返し点において連結させた。

まず、Fig. 9(a) に $x_0 = (0.7, 0.4)^T [m]$, $\theta_0 = \pi [rad]$, $x_d = (0.1, 0.4)^T [m]$ と設定したときに生成された空間/時間軌道を示す。ただし、 $(\beta_1, \beta_2) = (0.75, 0.75)$ である。ここで、膨らみを持つ空間軌道 ②, ③ に対しては、仮想経由点をそれぞれ $x_v^* = (0.4, 0.6)^T, (0.4, 0.7)^T [m]$ とし、仮想目標姿勢を $\theta_v^* = \text{atan2}(y_v^* - 0.4, x_v^* - 0.1)$ に設定した。Fig. 9(a) より、生成された空間軌道は人間の実験結果と同様に中央付近で膨らみ、その並進速度波形は時刻 $\frac{t_f}{2}$ 付近で谷を持つ双峰型となっていることが確認される。そして、空間軌道の膨らみが大きくなるに従って、より鮮明な双峰型の速度波形が生成されていることが分かる。

Fig. 9(b) は $x_0 = (0.6, 0.2)^T [m]$, $x_d = (0.2, 0.6)^T [m]$ とし、 $\theta_0 = \theta_d = \frac{\pi}{2}, \pi [rad]$ と設定したときに生成された S 字軌道とその速度波形である。ただし、 $x_v^* = (0.2, 0.3)^T, (0.4, 0.6)^T [m]$, $\theta_v^* = \theta_d$ と設定した。また、 $(\beta_1, \beta_2) = (0.75, 0.75)$ である。TBG に基づいた軌道生成法により生成された S 字軌道は、人間の軌道と同様に二つのピークを持つ速度波形を有していることが確認できる。これらの生成された軌道の特徴は人間が生成した基本軌道とよく一致しており、経由点を設定することで膨らみを持つ軌道の特徴を再現できることが分かる。

一方、Fig. 9(c) では、 $x_0 = (0.6, 0.6)^T, (0.2, 0.6)^T, (0.2, 0.2)^T, (0.6, 0.2)^T [m]$, $x_d = (0.4, 0.4)^T [m]$ と設定し、単峰型の並進速度波形を有する基本軌道とその組み合わせである切り返し軌道の再現を試みた。ただし、 $\theta_0 = \frac{\pi}{2} [rad]$, $\theta_d = \pi [rad]$ とした。ここで、切り返し軌道 ①, ③ に対しては、仮想目標点をそれぞれ $x_d^* = (0.7, 0.4)^T, (0.1, 0.4)^T [m]$ に設定した。また、軌道 ①, ③ では人間の切り返し軌道が有する速度波形の特徴を再現するため、切り返し発生前後でそれぞれ $(\beta_1, \beta_2) = (0.75, 0.5), (0.5, 0.75)$ と変化させた。他の

軌道 ②, ④ に対しては, $(\beta_1, \beta_2) = (0.75, 0.75)$ と設定した.

Fig. 9(c) より, 切り返しを発生しない空間軌道は四分円弧軌道となり, それらの速度波形は時刻 $\frac{t_f}{2}$ 付近でピークを持つ単峰型となっていることが分かる. そして, 人間が生成した軌道 (Fig. 6(c) 参照) と比較すると, 切り返しが発生する付近の特徴を含め, 生成されたすべての空間/時間軌道がうまく再現できていることが分かる.

6. 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, 仮想経路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.

なお, 本論文では人間の運動の特徴を再現することを目的としたため, 軌道生成において利用した仮想経路点および仮想目標点の最適な設定法に関しては触れていなかった. 今後は, この軌道生成に用いる仮想点の設定法を確立していくとともに, 今回対象としなかったホロノミックな拘束を受ける作業に対しても実験を行い, 拘束の有無が人間の軌道生成に与える影響をさらに調べていきたいと考えている.

本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (11650450) によるもので, ここに改めて謝意を表します.

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, pp.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, pp.1321–1326, 1998.
- [3] Morasso: "Spatial control of arm movements," Experimental Brain Research, 42, pp.223–227, 1981.
- [4] T. Flash and N. Hogan: "The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model," Biological Cybernetics, vol.57, pp.1688–1703, 1985.
- [5] Y. Uno, M. Kawato and R. Suzuki: "Formation and control of optimal trajectory in human multi-joint arm movement," Biological Cybernetics, vol.61, pp.89–101, 1989.
- [6] D. Bullock and S. Grossberg: "VITE and FLETE: Neural modules for trajectory formation and postural control," In W. A. Hershberger (editor) Volitional Action. pp.253–297, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [7] P. Morasso, V. Sanguineti and T. Tsuji: "A dynamical model for the generator of curved trajectories," in Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks, pp.115–118, 1993.
- [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.1072–1078, 1994.
- [9] 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.
- [10] 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, pp.425–431, 1999.
- [11] 辻, 伊藤 (宏): "クランク回転作業における人間の位置/力制御方策", 人間工学, vol.28, no.4, pp.209–218, 1992.
- [12] 太田, 羅, 伊藤 (正): "作業環境との相互作用のもとでの生体運動解析 - クランク回転作業における環境適応", 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J81-D-II, no.6, pp.1392–1401, 1998.
- [13] 辻, 加藤, 金子: "人間-ロボット系の追従制御特性", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.2, pp.285–291, 2000.
- [14] 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, pp.1–6, 1998.
- [15] D.A. Winter: Biomechanics and motor control of human movement (2nd ed.). Jhon Wiley and Son's, Inc., New York, pp.41–43, 1990.
- [16] 三平, 古田: "時間軸を考慮に入れた非線形システムの解析", 計測自動制御学会論文集, vol.22, no.6, pp.604–609, 1986.
- [17] C. Canudas de Witt and O.J.Sørdalen: "Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.37, no.11, pp.1791–1797, 1992.



田中良幸 (Yoshiyuki Tanaka)

1971年9月10日生. 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, 計測自動制御学会の学生会員.

(日本ロボット学会学生会員)



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生. 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, 電子情報通信学会などの会員.

(日本ロボット学会正会員)



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生. 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, 日本機械学会などの会員.

(日本ロボット学会正会員)