学術論文

動作時間を考慮した消費エネルギー最少規範による
マニピュレータの軌道計画

加 島 正* 石 動 善 久*

Trajectory Planning of Manipulators Based on a Minimum-Energy Criterion
and Operating Time

Tadashi Kashima* and Yoshihisa Isurugi*

Manipulators are equipped with several joints and it is possible to operate along any given trajectories. This flexibility is essential advantages and valuable studies are conducted for trajectory planning to effectively control manipulators. However, manipulators belong to a class of complex nonlinear dynamic systems and the application of trajectory planning leads to substantial difficulties. Therefore, various methods are proposed to solve optimal problems by adding or neglecting adequate constraints. However, they do not seem to offer generalized trajectory formation methods.

This paper discusses trajectory planning of point-to-point operations under condition that only an initial and a final states are given. Performance criterion is defined by consumed energy dissipated in operations and motor torque limit is considered. Mathematical formulation to calculate optimal trajectories is proposed and simulation is conducted for a 2 degrees of freedom manipulator. Amount of energy dissipation is discussed in relation with optimal and various operating time for typical manipulator movements. Besides, merit of trajectory planning based on a minimum-energy criterion and operating time is stated. Finally, characteristics of energy consumption in human arm movements is discussed and formulated trajectories are verified that they show similar features with human arm trajectories in relatively fast movements.

Key Words: Robot Manipulator, Optimal Control, Minimum-Energy Criterion, Trajectory Planning

1. は じ め に

マニピュレータは複数の関節を有しており、構造的にはハンドを初期点から目標点まで移動させるといった基本的な動作では無数の経路および速度パターンで運動を制御することが可能である。このようなマニピュレータがもつ利点を有効に活用して高度な制御能力を付加するために、消費エネルギーや動作時間などの最少化を目指した軌道計画に関する研究が広く展開されている。

マニピュレータは非線形性をもつ多自由度系の機構であり、最適軌道を解析的に得ることは極めて困難である。このような軌道計画問題に対して関節軌道を適当な関数で近似して最適軌道を求める手法 [1][2]、あるいはマニピュレータの空間経路が拘束される条件のもとで最適関節速度を求める手法 [3]~[5] が提案されている。しかし、これらの手法は 2 点間の移動動作に対する一般的な最適解を与える手法とは言い難く検討の余地が残されていた。このように適切な拘束を付加する手法とは別に、マニピュレータの初期姿勢、目標姿勢および動作時間のみが条

件として与えられたときの軌道計画の手法が報告されている。評価関数は関節トルクの 2 乗の時間積分 [6] および消費エネルギー [7] であり、最適制御問題の定式化の結果として帰着する 2 点境界値問題を数値解法によって解いている。しかし、これらは指定された動作時間での最適軌道の生成手法を示すものであり、動作時間を自由とした条件のもとでの軌道計画の手法は示されていない。また、モータのトルク制限が考慮されておらず、大きなトルクを必要とする短い動作時間でマニピュレータを作動させる場合の最適軌道の生成など考慮すべき問題を残していた。このほか、動作時間-燃料 [8] や動作時間 [9] を評価関数として最適軌道を求めた報告があるが、いずれも一般的な軌道計画問題の解法を与えるには至っていない。

一方、このようなマニピュレータの工学的に明快な利点を追求する軌道計画とは異なり、ヒトの上肢運動における軌道を生成しようとする研究成果 [10][11] が報告されている。このような観点から筆者らは運動中に生体内で消費するエネルギー要素で構成する評価関数を用いて軌道を生成し、これがヒトの上肢運動における軌道とよく一致することを示した [12]。しかし、このようなヒトの軌道の生成手法をマニピュレータの軌道計画に適用するにはマニピュレータが必然的に持つモータトルクの制約、あるいはここで用いた制御規範を最少にすることによる

原稿受付 1996 年 7 月 26 日

*北海道大学工学部

*Faculty of Engineering, Hokkaido University

工学的な利点を明らかにするなど検討すべき問題が残されていた。

本研究ではマニピュレータの初期姿勢と目標姿勢が与えられたときの移動動作における軌道計画問題を論ずる。評価関数は実用機において常にその抑制が期待されている動作中に消費するエネルギーで定義し、さらに駆動系の制約としてモータのトルク制限を考慮する。この制約のもとで最適軌道を求めるための定式化とアルゴリズムを動作時間が条件で与えられる場合と自由な場合のそれぞれについて示す。次に、垂直面内で運動する2自由度のシミュレーションモデルを用いて動作時間とそのときの消費エネルギーの関係を求め、動作時間を変数とする軌道計画の利点を示す。また、目標姿勢を変化させることでハンドの移動距離と最適動作時間の関係および動作時間を考慮した最適軌道の特性を明らかにする。最後に、ヒトとマニピュレータのエネルギー消費特性を検討するとともに時間を考慮した消費エネルギー最少の軌道計画手法を用いることで比較的速い動作のヒトの上肢運動の軌道が生成できることを示す。

2. 軌道計画問題の定式化と解法

2.1 運動方程式

マニピュレータの運動方程式は、 n 次元関節角ベクトルを θ とすれば次式で与えられる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) + C\dot{\theta} = u \quad (1)$$

ここで、 $M(\theta)$ は $n \times n$ 慣性行列、そして $h(\theta, \dot{\theta})$ と $g(\theta)$ は n 次のベクトルでありそれぞれコリオリ・遠心力および重力を表す。また、 C は各関節の粘性摩擦係数を要素にもつ対角行列であり、 u は n 次の関節駆動トルクベクトルである。式 (1) で状態変数ベクトルを $x = (x_p^T, x_v^T)^T = (\theta^T, \dot{\theta}^T)^T$ と定義すると、

$$\dot{x} = a(x) + B(x)u \quad (2)$$

ここで、

$$a(x) = \begin{bmatrix} x_v \\ -M^{-1}(x_p)(h(x) + g(x_p) + Cx_v) \end{bmatrix}$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(x_p) \end{bmatrix}$$

となり、 $2 \times n$ 次の非線形状態方程式で表現することができる。

2.2 評価関数

マニピュレータを動作する過程に必要なエネルギーのうち主要なものは初期姿勢と目標姿勢の位置エネルギーの差分に相当するエネルギー、関節駆動モータのジュール熱およびマニピュレータ摺動部における粘性摩擦により散逸するエネルギーである。このうち、軌道計画においては初期姿勢と目標姿勢をあらかじめ規定するのでマニピュレータの位置エネルギーを変化させるためのエネルギーは軌道に依存せず一定となる。したがって、本研究では消費エネルギーを規範とする評価関数を運動中に散逸するジュール熱と粘性摩擦によるエネルギーを用いて、

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (i^T R i + x_v^T C x_v) dt \quad (3)$$

と定義する。ここで t_0 と t_f はそれぞれ動作の開始と終了時間、 i は n 次のモータ電流ベクトルである。また、 $R = \text{diag}(r_1, \dots, r_n)$ と $C = \text{diag}(c_1, \dots, c_n)$ はそれぞれモータ電機子抵抗およびマニピュレータ摺動部の粘性摩擦係数の行列である。モータのトルク定数を $k_i (i = 1, \dots, n)$ 、また減速比を $p_i (i = 1, \dots, n)$ とすると、

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (u^T T u + x_v^T C x_v) dt \quad (4)$$

を得る。ここで、 $T = \text{diag}(r_1 p_1^2 k_1^{-2}, \dots, r_n p_n^2 k_n^{-2})$ である。

2.3 最適軌道

マニピュレータを指定された初期姿勢から目標姿勢に移動するとき、式 (2) の運動方程式の拘束のもとで式 (4) の評価関数を最少にするのが最適軌道である。この軌道を求めるために、随伴変数ベクトル $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)^T$ を導入し、ハミルトン関数を、

$$H(x, u, \lambda) = u^T T u + x_v^T C x_v + \lambda^T f(x, u) \quad (5)$$

ここで、 $f(x, u) = a(x) + B(x)u$ と定義する。次に、式 (6) に示すモータのトルク $\tau_i (i = 1, \dots, n)$ の制限を考慮する。

$$\tau_{i\min} \leq \tau_i \leq \tau_{i\max} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

ここで、モータの減速比を考慮するとマニピュレータの駆動トルク $u_i (i = 1, \dots, n)$ の範囲は、

$$\frac{\tau_{i\min}}{p_i} \leq u_i \leq \frac{\tau_{i\max}}{p_i} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

となる。このように入力が制限される場合、ポントリヤギンの原理によれば最適な入力 u はハミルトン関数 H を最少にする。つまり、式 (5) を最少にする最適入力 u のもとで、

$$\dot{\lambda}^T = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (8)$$

および

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (9)$$

を満足するのが最適軌道である。

式 (8) と式 (9) はそれぞれ $2 \times n$ 個の1階非線形微分方程式である。軌道計画においては動作前後でのマニピュレータの状態量が規定されるので、これは2点境界値問題に帰着される。本研究では動作時間を条件で与える場合と自由とする場合のそれぞれについて解法アルゴリズムを示す。

(1) 動作時間が条件で与えられる場合

$2 \times n$ 個の微分方程式を数値解法により解くには条件で与えられる状態量 $x(t_0)$ のほかに λ の初期値が必要である。したがって、任意の初期値 λ_{t_0} を与えて計算するが、動作終了時点での状態量は条件で与えられた x_{t_f} とは異なる。したがって、 λ_{t_0} を適宜変化させて x_{t_f} が $x(t_f)$ と一致する初期値を探索しなければならない。この探索には次式の Transition-Matrix-Algorithm [13] を用いる。

$$\lambda_{t_0}^{\text{new}} = \lambda_{t_0}^{\text{old}} - \varepsilon \left[\frac{\partial x_{t_f}}{\partial \lambda_{t_0}} \right]^{-1} (x_{t_f} - x(t_f)) \quad (10)$$

ここで、 ε は任意の係数であり、解の収束性に応じ $0 < \varepsilon \leq 1$

の範囲で適宜設定する. また, 式 (10) 中の遷移行列 $\frac{\partial \mathbf{x}_{t_f}}{\partial \boldsymbol{\lambda}_{t_0}}$ を解析的に得るのは極めて困難なので初期値 $\boldsymbol{\lambda}_{t_0}$ の各要素を微小変位させたときの状態量 $\mathbf{x}_{t_f}$ の変化を数値的に求めて行列の要素を近似する.

(2) 動作時間が自由の場合

基本的な解法手順は (1) の場合と同一であるが, 動作時間 t_f におけるハミルトン関数 H_{t_f} の値に次の条件が付加される.

$$H_{t_f} = 0 \quad (11)$$

したがって, 動作終了時点での状態量 $\mathbf{x}_{t_f}$ と式 (11) が制約条件となるので式 (10) は次のように変更される.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{t_0}^{\text{new}} \\ t_f^{\text{new}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{t_0}^{\text{old}} \\ t_f^{\text{old}} \end{bmatrix} - \varepsilon \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}_{t_f}}{\partial \boldsymbol{\lambda}_{t_0}} & \frac{\partial \mathbf{x}_{t_f}}{\partial t_f} \\ \frac{\partial H_{t_f}}{\partial \boldsymbol{\lambda}_{t_0}} & \frac{\partial H_{t_f}}{\partial t_f} \end{bmatrix}^{-1} \\ &\quad \times \left(\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{t_f} \\ H_{t_f} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t_f) \\ 0 \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

結局, 式 (12) を用いて, 初期値 $\boldsymbol{\lambda}_{t_0}$ と動作時間 t_f を適宜変化させて (1) と同様な手法で $\mathbf{x}_{t_f}$ が $\mathbf{x}(t_f)$ と一致し, かつ式 (11) を満足する最適軌道を求める.

3. シミュレーション結果と考察

3.1 シミュレーションモデル

Fig. 1 に示す 2 自由度の垂直型マニピュレータに本研究で提案する軌道計画手法を適用する. 図で, θ は回転角, m は質量, I は重心回りの慣性モーメント, l はリンク長さ, l_c は関節からリンク重心までの距離, そして添字の 1, 2 および 3 はそれぞれリンクの 1 と 2 およびハンドを表す. 解析に用いたマニピュレータと減速機を含む関節駆動モータの諸元を Table 1 に示す. このモデルの運動方程式は, $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2)^T$, $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ とすると次式で与えられる.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{u} \quad (13)$$

Fig. 1 Simulation model

ここで,

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2) + I_1 + I_2 \\ &\quad + 2(m_2 l_1 l_{c2} + m_3 l_1 l_2) \cos \theta_2 \\ m_{12} &= m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + I_2 + (m_2 l_1 l_{c2} + m_3 l_1 l_2) \cos \theta_2 \\ m_{21} &= m_{12} \\ m_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + I_2 \end{aligned}$$

また,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -2(m_2 l_1 l_{c2} + m_3 l_1 l_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - (m_2 l_1 l_{c2} + m_3 l_1 l_2) \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \\ (m_2 l_1 l_{c2} + m_3 l_1 l_2) \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (m_1 l_{c1} + m_2 l_1 + m_3 l_1) g \cos \theta_1 + (m_2 l_{c2} + m_3 l_2) g \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ (m_2 l_{c2} + m_3 l_2) g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \text{diag}(c_1, c_2) \end{aligned}$$

である. また, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (\mathbf{x}_p^T, \mathbf{x}_v^T)^T = (\boldsymbol{\theta}^T, \dot{\boldsymbol{\theta}}^T)^T$ とすると評価関数は,

$$\begin{aligned} J &= \int_{t_0}^{t_f} \left(\mathbf{u}^T \begin{bmatrix} \frac{r_1 p_1^2}{k_1^2} & 0 \\ 0 & \frac{r_2 p_2^2}{k_2^2} \end{bmatrix} \mathbf{u} \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{x}_v^T \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_v \right) dt \end{aligned} \quad (14)$$

となる. 次に, 随伴変数 $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)^T$ を用いてハミルトン関数を定義し最適入力を求める. このモデルの最適入力は,

$$u_i = \begin{cases} \frac{\tau_i \min}{p_i}, & u_{ci} < \frac{\tau_i \min}{p_i} \\ u_{ci}, & \frac{\tau_i \min}{p_i} \leq u_{ci} \leq \frac{\tau_i \max}{p_i} \\ \frac{\tau_i \max}{p_i}, & \frac{\tau_i \max}{p_i} < u_{ci} \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (15)$$

Table 1 Parameters of a manipulator

		Link1	Link2
Length of Link	l[m]	0.3	0.4
Distance From joint to center of gravity	lc[m]	0.15	0.2
Mass of link	m[kg]	25	20
Mass of hand	m[kg]		2
Moment of inertia	I[kgm ²]	0.8	0.5
		Joint1	Joint2
Viscous damping coefficient	c[Nms/rad]	0.2	0.1
Torque limit of motor	[Nm]	±2.5	±1.0
Torque constant of motor	k[Nm/A]	0.6	0.3
Resistance of motor	r[Ω]	2	2
Gear ratio	p	1/120	1/120

Fig. 2 Dissipated energy (Movement 1)

Fig. 3 Dissipated energy (Movement 2)

となる。このとき、

$$u_{c1} = \frac{-\lambda_3 a_3 + \lambda_4 (a_3 + a_2 \cos x_2)}{2w_1((a_1 + 2a_2 \cos x_2)a_3 - (a_3 + a_2 \cos x_2)^2)}$$

$$u_{c2} = \frac{\lambda_3 (a_3 + a_2 \cos x_2) - \lambda_4 (a_1 + 2a_2 \cos x_2)}{2w_2((a_1 + 2a_2 \cos x_2)a_3 - (a_3 + a_2 \cos x_2)^2)}$$

ここで、

$$a_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2) + I_1 + I_2$$

$$a_2 = m_2 l_1 l_{c2} + m_3 l_1 l_2$$

$$a_3 = m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + I_2$$

$$w_i = \frac{r_i p_i^2}{k_i^2} \quad (i = 1, 2)$$

である。この入力のもとで式(8)と式(9)に相当するそれぞれ4個の微分方程式を動作前後での条件を満足するように解くことで最適軌道が得られる。

3.2 動作時間と消費エネルギー

動作条件を、

動作1 初期姿勢 ($\theta_1 = -90^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$) および

目標姿勢 ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$)

動作2 初期姿勢 ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$) および

目標姿勢 ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$)

と設定し、ハンドの保持質量を0, 1.0 および 2.0 [kg] としたときの動作時間とその動作時間における最適軌道での消費エネルギーを Fig. 2 と Fig. 3 に示す。なお、図の点線は軌道の生成過程においてトルクの制約を受けていることを示す。動作1ではこの領域は短い動作時間に限られているが、動作2では広い領域でトルクが拘束されている。この領域は保持質量の増加に伴い大きく増加しており、最適軌道の生成においてトルクの制約を考慮するのは重要な要素であることが分かる。動作時間と消費エネルギーの関係は保持質量に依存せず同一であり、消費エネルギーは短い動作時間では時間の増加に伴い急激に減少するが、次第に変化がゆるやかになりほぼ一定の値となる。このことは消費エネルギーを制御規範とする軌道計画では消費エネルギーが大きく変化する領域を避けて動作時間を設定する必要がある

Table 2 Optimal operation time and dissipated energy

Holding mass[kg]	Movement 1		Movement 2	
	Optimal operating time[sec]	Dissipated energy [Joule]	Optimal operating time[sec]	Dissipated energy [Joule]
0	1.03	4.55	0.58	6.71
1	1.03	4.99	0.61	7.38
2	1.03	5.47	0.63	8.05

あることを示している。次に、動作時間を自由とした条件のもとで式(12)を用い最適軌道を求め、最適動作時間とそのときの消費エネルギーを Table 2 に、ハンドの保持質量が 0 [kg] のときの最適軌道を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。動作1と2の最適動作時間は消費エネルギーが急激に変化した後、長い時間を経ずして現れている。これは動作時間を自由とした条件での軌道計画手法を用いることで消費エネルギーが大きく変化しない領域のなかで比較的短い動作時間での軌道の生成が可能であることを示している。また、最適軌道に関しては動作1と2のいずれも単関節で移動が可能であるにもかかわらず二つの関節が互いに協調して動作し (Fig. 4 と Fig. 5 の (c)), ハンドは重力に抗するトルクが少ない経路を移動しているのが分かる (Fig. 4 と Fig. 5 の (a))。

3.3 動作時間を考慮した最適軌道の特性

動作条件を、

動作1 初期姿勢 ($\theta_1 = -90^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$) および目標姿勢 (θ_1 は $-90^\circ < \theta_1 < 0^\circ$ の範囲で設定, $\theta_2 = 90^\circ$)

動作2 初期姿勢 ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$) および目標姿勢 ($\theta_1 = 0^\circ$, θ_2 は $0^\circ < \theta_2 < 90^\circ$ の範囲で設定)

とし、各目標姿勢に対する軌道と解析結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。これらの図より動作条件の変化に伴う軌道の特性を次のようにまとめることができる。

(1) 動作1のハンドの経路は関節1の方向にふくらんだ弧を描いているが移動距離の短縮に伴い始点と終点を結ぶ直線に近い。動作2ではすべての動作において直線に近い経路となっている。また、ハンドの速度のパターンは動作1の長い動作距離の軌跡を除きほぼ同一でありベル型となっている。

Fig. 4 Trajectory at optimal operation time (Movement 1)

Fig. 5 Trajectory at optimal operation time (Movement 2)

(2) 最適動作時間はいずれの動作でも移動距離の増加に伴いはほぼ直線的に増加している。また、消費エネルギーの増加率は移動距離が長くなるに従い減少している。これは特定の移動距離以上でジュール熱による散逸エネルギーがほぼ一定となる軌道が生成されていることによる効果であり消費エネルギーを最少とする最適軌道の特徴であるとともに利点である。

4. 最適軌道とヒトの生成する軌道

最適軌道の基本的な特性の一つは二つの関節が互いに協調して動作することである。これは同時にヒトが上肢運動において随意的に生成する軌道の持つ特性と同様である。ヒトの運動軌

Fig. 6 Trajectory and dissipated energy to distances of initial and target points (Movement 1)

Fig. 7 Trajectory and dissipated energy to distances of initial and target points (Movement 2)

道の具体的な特徴として、身体正面で手が任意の方向に自由に動かせる姿勢からの動作では手は始点と終点を結ぶ直線に近い経路を移動し手の速度はベル状に変化する [14][15]。また、腕を伸ばした姿勢からの動作では手の速度はベル状に変化するが経路はやや身体の外側に膨らむ曲線となる [11][12]。このよう

Fig. 8 Hand paths and tip velocities (Movement 1)

Fig. 9 Hand paths and tip velocities (Movement 2)

なヒトの生成する軌道に関して、山崎ら [16] は主たる運動の決定要素は筋・関節の粘性抵抗と筋出力および筋力維持に要する熱損失（消費エネルギー）であると指摘している。筆者らは肩と肘のエネルギー消費特性が同一としたとき、軌道によって変化する消費エネルギーは、

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (w_1 \mathbf{u}^T \mathbf{u} + w_2 \dot{\mathbf{x}}_v^T \dot{\mathbf{x}}_v) dt \quad (16)$$

となることを示した [12]。なお、 $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ は関節トルク、 $\mathbf{x}_v = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)^T$ は関節速度であり、添え字の 1 と 2 はそれぞれ肩と肘を表す。また、 w はヒトの上肢の生理的特性により決定される定数である。式 (16) に示すエネルギーの消費要素は被積分項の定数を除き式 (14) と同一であり、ヒトはマニピュレータと極めて類似したエネルギー消費特性をもっていることが分かる。

式 (14) を用いて生成した軌道 (Fig. 6 と Fig. 7) は移動距離の限られた範囲ではハンドの経路は直線近く速度はベル状に変化している。しかし、動作 1 でハンドの移動距離が大きい動作では必ずしもヒトの軌道の特徴を示しておらず、これは評価関数を構成する二つの消費エネルギー要素の重みがヒトとマニピュレータでは相違していることに起因すると考えられる。ヒトの筋肉と関節の粘性により消費するエネルギーの割合はマニピュレータのものより大きいと考え、運動モデルの動特性はそのまま、式 (14) の評価関数の粘性係数を 2 倍とし、見かけ上粘性で多くのエネルギーを消費しているとして 3.3 節と同一動作条件で最適軌道を生成した (Fig. 8 と Fig. 9)。Fig. 6 と Fig. 8 を比較すると、より広い動作範囲でハンドの経路は直線に近づき、速度パターンはベル型に移行している。また、Fig. 7 と Fig. 9 からは、ハンドの速度パターンはいずれもベル型であり、経路は身体の外側に膨らむ曲線へと変化しており、腕が伸びた姿勢から動作するヒトの軌道の特徴を示しているのが分かる。次に、動作時間に関して軌道を評価すると、評価関数の粘性係数を変えても最適動作時間はほとんど変化せず（最大で 3%）、Fig. 6 と Fig. 7 の (c) に示すように動作時間は増加する。結局、Fig. 8 と Fig. 9 は動作 1 の動作時間が長い軌道を除き、動作 1 と 2 のいずれの場合もヒトと同一の特性を持つ軌道であることが分かる。

Fig. 10 Hand paths and tip velocities by minimum jerk criterion

一方、ヒトの運動軌道の生成に関して Flash と Hogan [10] は評価関数を作業空間の手先位置 (x, y) の躍動を用いて、

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[\left(\frac{d^3 x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3 y}{dt^3} \right)^2 \right] dt \quad (17)$$

と定義した。動作 1 と 2 で関節が最も大きく変位し、動作時間をエネルギー最少規範の軌道と同一とし生成した軌道を Fig. 10 に示す。図に示すように、この規範で生成される軌道は動作の種類にかかわらず手の経路は直線で速度はベル状となるので、動作 1 の軌道はヒトの運動軌道によく類似しているのが分かる。しかし、動作 2 ではヒトは身体の外側に膨らむ曲線経路を選択するが、この軌道は必ずしもヒトの特徴を示していない。結局、エネルギー最少規範と躍動最少規範の軌道を比較すると、躍動最少規範を用いることで動作開始姿勢の制限のなかで動作時間の大小にかかわらずヒトに近い軌道を生成できる。一方、エネルギー最少規範の軌道は動作の種類にかかわらず比較的速い動作のヒトの運動軌道と同一の特性を持つことが分かった。

5. ま と め

本研究では評価関数をマニピュレータが運動の過程で消費するエネルギーで定義し、これを最少とする軌道を得るための定式化と解法アルゴリズムを示した。次に、2 自由度の垂直型マニピュレータをシミュレーションモデルとして最適軌道の生成

と解析を行った。その結果を用いて最適軌道の動作時間と消費エネルギーの関係を求め、動作時間を変数とする最適軌道を用いることで消費エネルギーの最少化を実現するとともに動作時間をも短縮する利点のあることを示した。また、ハンドの移動距離を変化させることで移動距離と最適動作時間および消費エネルギーの関係さらに動作時間を考慮した最適軌道の特性を明らかにした。最後に、ヒトとマニピュレータは非常に類似したエネルギー消費特性を持ち、同時に消費エネルギーを評価関数とする軌道計画手法を用いることで比較的速い動作のヒトの随意由運動における軌道を生成できることを示した。このことは、本研究で提案する軌道計画手法が自然な制御感覚を持つ動力義手の開発など産業用のみならず広範囲の分野で利用できる可能性を示している。

参 考 文 献

- [1] 山本, 尾崎, 毛利: “逐次改善によるマニピュレータの軌道計画”, 計測自動制御学会論文集, vol.24, no.9, pp.942-947, 1988.
- [2] 寺本, 小野, Ö. Turhan: “平均的発熱が制限となる運動機構の高速駆動に関する研究 (第2報, ロボットアームの軌道生成問題の解法と2自由度系の解析例)”, 日本機械学会論文集, (C編), vol.57, no.544, pp.3869-3876, 1991.
- [3] M. Vukobratović and M. Kirčanski: “A Method for Optimal Synthesis of Manipulation Robot Trajectories,” Trans. ASME, J. of DSC, vol.104, pp.188-193, 1982.
- [4] 尾崎, 山本, 毛利: “空間経路が指定されるマニピュレータ動作軌道計画”, 計測自動制御学会論文集, vol.23, no.3, pp.288-293, 1987.
- [5] 鈴木, 永井, 大熊: “運動エネルギーに着目したマニピュレータの実時間軌道計画法”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.2, pp.199-207, 1992.
- [6] T. Kashima and N. Satoh: “Optimal Trajectory of Manipulators with a Weighted Joint Energy Criterion,” Proc. of the ISMCR'93, pp.Cm.II, 7-12, 1993.
- [7] 泉: “非線形摩擦をもつ水平多関節マニピュレータのPTP制御における消費エネルギー最少化”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.8, pp.1179-1185, 1995.
- [8] B. Kim and K. Shin: “Suboptimal Control of Industrial Manipulators with a Weighted Minimum Time-Fuel Criterion,” Trans. on Automatic Control, vol.AC-30, no.1, pp.1-10, 1985.
- [9] H. Greeting, L. Guzzella, S. Hepner and C. Onder: “Time-Optimal Motions of Robots in Assembly Tasks,” Trans. on Automatic Control, vol.AC-31, no.6, pp.512-518, 1986.
- [10] T. Flash and N. Hogan: “The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model,” J. Neuroscience, vol.5, no.7, pp.1688-1703, 1985.
- [11] Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki: “Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multi-Joint Arm Movement,” Biol. Cybern., no.61, pp.89-101, 1989.
- [12] 加島, 石動: “ヒトの上肢運動における軌道制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.31, no.9, pp.1416-1422, 1995.
- [13] A. Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho: Applied Optimal Control, pp.215-217, Hemisphere Pub. Corp., 1975.
- [14] P. Morasso: “Sapcial Control of Arm Movements,” Experimental Brain Research, 42, pp.223-227, 1981.
- [15] W. Abend, E. Bizzi, and P. Morasso: “Human Arm Trajectory Formation,” Brain, 105, pp.331-348, 1982.
- [16] バイオメカニズム学会編: バイオメカニズム8, 山崎, 六馬: 上肢運動の決定要素, pp.27-36, 東京大学出版会, 1986.

加島 正 (Tadashi Kashima)

1951年11月22日生。1975年北海道大学工学部卒業。同年住友重機械工業(株)入社。1982~1984年ウィスコンシン大学大学院留学。1988年現北海道職業能力開発短大教官を経て、現在北海道大学大学院工学研究科研究生。ロボット、システム制御の研究に従事。ASME, 計測自動制御学会などの

会員。

(日本ロボット学会正会員)

石動善久 (Yoshihisa Isurugi)

1949年2月10日生。1974年北海道大学工学研究科修士課程修了。工学博士。同年富士通(株)勤務。1976年北海道大学工学部精密工学科助手。講師を経て、1987年同助教授、現在にいたる。非線形制御理論およびデジタル制御の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会などの会員。