

人間の指先軌道特性と把持動作シミュレーション*

中沢 信明^{*1}, 梶川 伸哉^{*2}
猪岡 光^{*3}, 池浦 良淳^{*4}

Simulations of Path Planning Emulating Human's Grasping Motions

Nobuaki NAKAZAWA^{*5}, Shinya KAJIKAWA,
Hikaru INOOKA and Ryojun IKEURA^{*5} Graduate School of Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

This paper describes path planning of grippers emulating human's grasping motions with respect to the thumb and index finger. When the hand approaches to the target object, the velocity patterns of the tips are bell-shaped regardless of the initial hand position. Path planning of two tips is similar to the obstacle avoidance against the target object and avoidance motion trends to be conducted by the index finger. Utilizing the obtained human characteristics, the path planning model is constructed in the complex potential field. As a result of simulation, it can be confirmed that the two tips separately go round the target object so as to approach the grasped part due to the artificial potential, and they move slowly in gripping process just like a human since each tip motion is based on the bell-shaped velocity pattern.

Key Words: Measurement, Human Engineering, Modeling, Path Planning, Grasping Motion, Human Fingertip

1. はじめに

近年、人間との共存を目的とした「ヒューマノイド」に関する研究が盛んに行われている。工場のラインなど、われわれの生活空間と離れた場所で働く産業用ロボットは、高速度、高精度の動きが求められるが、身近な存在となり得るロボットは、人間に対して脅威、違和感を与えない動作生成が必要となってくる。そのためには、ロボットの動きをより人間に近いものにすることが有効であると思われる。

人が手先のある位置から目標位置まで移動させる場合には、無意識ではあるが手先は滑らかな軌跡を描いており、またその速度パターンはベル型となることが知られている。このような滑らかな動きを再現するため、これまでにも加速度の微分値で構成された躍度最小モデル⁽¹⁾、腕のダイナミクスを考慮に入れたト

ルク変化最小モデル⁽²⁾、ガンマ関数を用いたベル型波形の近似モデル⁽³⁾などが提案されてきた。辻ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、ベル型の速度波形を有する時間関数発生器(Time Base Generator)を提案し、空間軌道と収束時間を同時に考慮した軌道生成に成功している。一方、速度パターンに対するヒトの生体反応⁽⁶⁾や感情⁽⁷⁾⁽⁸⁾についても調べられており、動作時間内における速度ピークの位置が人間らしい動きに大きく影響していることが指摘されている。ロボットが人間の生活空間で動く場合には、最適な軌道生成のみならず速度パターンも考慮に入れるべきであろう。

著者らは、グリッパ型ハンドへの応用を前提として、人間が把持動作を行う際の指先軌道特性について調べてきた⁽⁹⁾。対象物体に対して親指、人差し指が接近するときの軌道を調べた結果、手先を右手前方向に移動させる把持動作の場合には親指と手首、左手前方向に移動させる場合には人差し指と手首のそれぞれの軌道が類似しており、また対象物体の大きさに応じて指先の軌道特性が変わることを見出してきた。しかしながら、具体的な動作生成のためのモデル化にまでは至っていない。そこで本論文では、人間の指先軌道特性に基づいた把持動作生成モデルの構築とシミュレーション

^{*} 原稿受付 2001年7月23日。^{*1} 正員、群馬大学大学院工学研究科(☎ 376-8515 桐生市天神町1-5-1)。^{*2} 正員、秋田県立大学システム科学技術学部(☎ 015-0055 本荘市土谷字海老ノ口84-4)。^{*3} 正員、フェロー、東北大大学院情報科学研究科(☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。^{*4} 正員、三重大学工学部(☎ 514-8507 津市上浜町1515)。

E-mail: naka@me.gunma-u.ac.jp

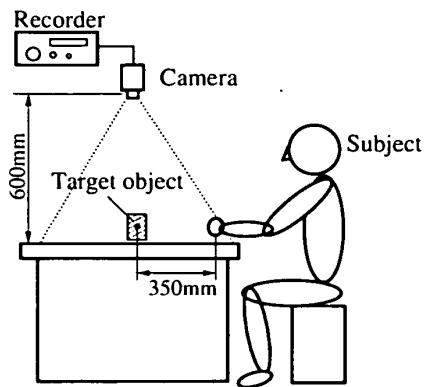


Fig. 1 Experiment apparatus

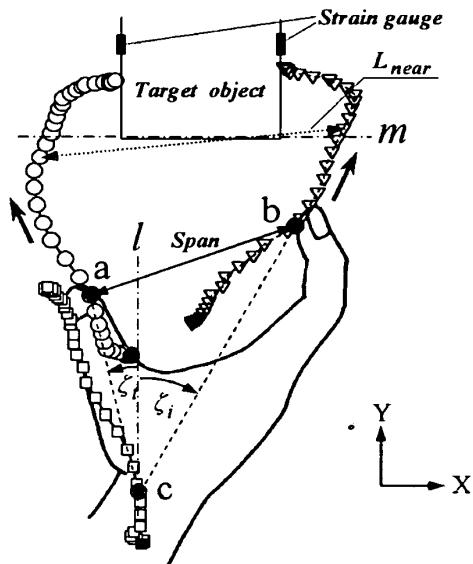
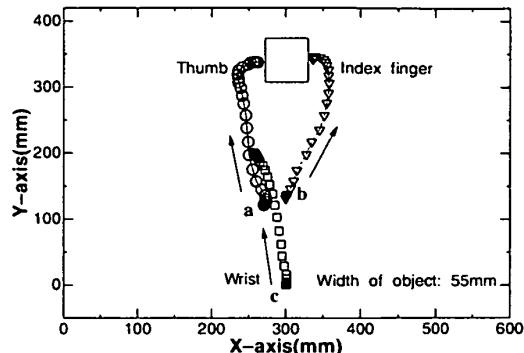


Fig. 2 Typical trajectories of the two tips and wrist in the precision grip

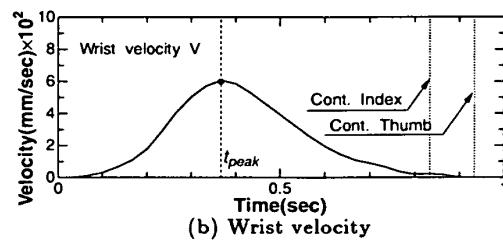
ンを行った。まず、被験者が親指および人差し指で対象物体を把持する際の指先軌道特性について調べ、対象物体の大きさに応じた指先の開き幅、および指先を閉じる時刻と手先速度との関係について明らかにする。次に、得られた特性に基づき、2指による把持動作のための指先軌道生成モデルの構築を行う。ここでは、指先軌道の振る舞いが対象物体の障害物回避運動と類似していることに着目し、人工ポテンシャル場を利用した指先軌道生成法について提案する。

2. 把持動作における人間の指先軌道特性

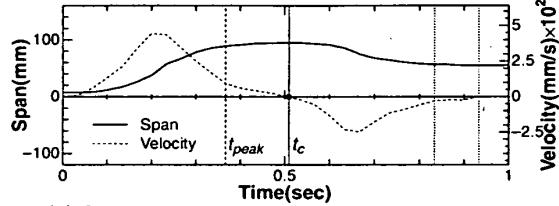
2.1 実験装置および実験方法 図1に実験装置の概略を示す。被験者は、椅子に座った状態で机上の定められた位置に手先を置き、合図とともに正面350 mmの位置に配置された対象物体を親指と人差し指で挟み把持する。なお、被験者の手先は水平面内を運動するものとする。被験者の右手の各関節と指先にはマーカーを取り付け、物体の上方約600 mmに設置された



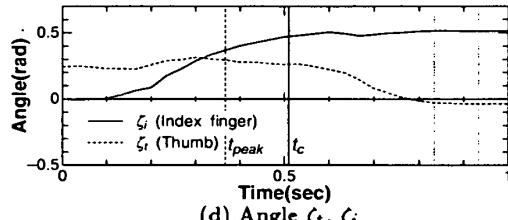
(a) Trajectories of the two tips and wrist



(b) Wrist velocity



(c) Span between the two tips and its velocity



(d) Angle ζ_t, ζ_i

Fig. 3 Typical experimental data in grasping motion (Width of object: 55 [mm])

デジタルビデオカメラで撮影する。取り込んだ画像はオンラインで処理し、図2に示されるように、親指と人差し指および手首の軌道を1/30 sec間隔の時系列データに変換する。机上の対象物体は直方体であり、幅55 mm, 40 mm, および25 mmの3種類について測定を行った。なお、手先と対象物体との接触状態を判別するため、対象物体にはひずみゲージが貼り付けられている。被験者は、20代の男子学生4名であり、全員右利きである。

2.2 実験結果および考察 把持動作の典型的な指先軌道波形を図3(a)に示す。図中のa, b, cは、それぞれ親指、人差し指、手首の初期位置である。図より、手先を対象物体に接近させるのと同時に、指先を広げていることが確認できる。その際、親指と手首は同一方向に進む軌道となり、人差し指を積極的に広げ

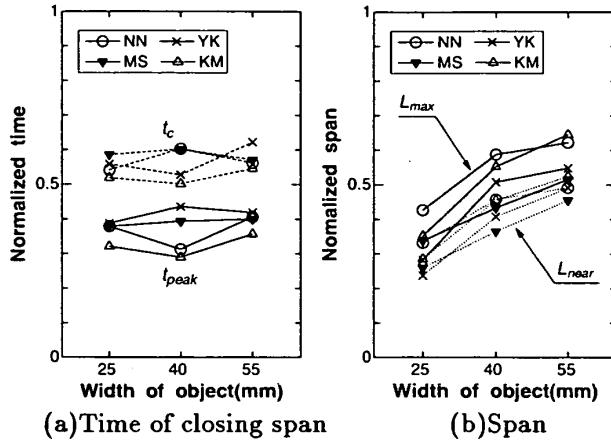


Fig. 4 Characteristics of controlling the span between the tips of thumb and index finger

ていることが分かる。ここで、手首軌道の速度波形および指先の開き幅(図2のSpan)の時間波形を図3(b)および(c)に示す。ただし手首軌道の速度は、次式で示される進行方向の速度である。

$$V = \sqrt{\left(\frac{dx_w(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_w(t)}{dt}\right)^2} \quad (1)$$

$x_w(t)$ および $y_w(t)$ は、図2におけるX方向およびY方向の手首の変位量である。手首部分の速度波形は、人間の上肢二点間運動⁽¹⁾⁽²⁾で見られる典型的なベル型波形となり、動作開始時および指先が物体に触れる直前において速度が小さくなる。また速度がピークに到達する時刻は、動作時間全体の前半に位置している。指先の開き幅は、手首の速度 V が増加するとともに大きくなり、速度がピーク値に到達した後、最大となる。その後、開き幅は保たれることなく連続的に減少しており、時刻 t_c で指先を閉じ始めていると見なすことができる。ここで、手首速度のピーク時刻 t_{peak} と指先を閉じ始める時刻 t_c について調べた。4名の被験者に関する測定結果を図4(a)に示す。図中の各データは、5回の測定の平均値であり、動き始めてから両指が対象物体に接触するまでの動作時間で正規化したものである。 t_{peak} の値は、いずれの被験者も0.5以下であり、速度ピークが動作時間の前半に位置するのに対して、指先を閉じ始める時刻 t_c は0.5~0.6の範囲に位置している。すなわち手先を接近させる過程においては、手先速度がピークに到達するまで指先を一方的に広げ、ピーク値を過ぎて速度が減少する際に指先を閉じていることが分かる。このことは、対象物体の幅に関わらず共通して見られる。次に、指先の開き幅の最大値 L_{max} 、および指先が物体近傍に入る際の開き幅 L_{near} について調べた。 L_{near} に関しては、図2に示されるように、いずれかの指先が対象

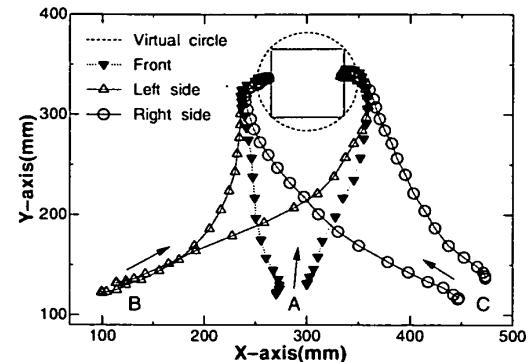


Fig. 5 Trajectories of the two tips in cases where the initial position of a hand was changed

物体の端面(図中の補助線m)に到達した時点の開き幅とした。その結果を図4(b)に示す。なお、各々のデータは被験者間で手の大きさが異なることを考慮に入れ、親指と人差し指を最大限に広げたときの幅で正規化したものである。図より、いずれの被験者も最大値 L_{max} (実線)の値が変化しており、対象物体の幅に応じて開き幅を調節していることが確認できる。また、 L_{near} (点線)は L_{max} に比べ小さな値をとり、物体近傍に入るまで開き幅を減少させている。ここで、指先の開閉運動がいずれの指によりなされているかを示すため、図2における角度 ζ_t , ζ_i について調べた。ただし、各々の値は軸I(Y軸方向)に対する角度であり、矢印方向を正とした。図3(d)に ζ_t , ζ_i の時間波形を示す。親指に関しては、開き幅が最大となる時刻 t_c まで手首との相対角度をほぼ一定に保っていることが確認できる。それに対して人差し指は、対象物体への接近と同時に相対角度が増大し、図3(a)の考察において述べたように、指先の開閉動作を積極的に行っている。逆に時刻 t_c 以降では、物体近傍において親指が積極的に閉じる動作を行っており、指先の開閉運動に関して、各々の指で異った特徴が見られる。

次に、初期位置を200mm左右にずらした場合の指先軌道について調べた。その結果を図5に示す。図で示されるように対象物体を取り囲む円(以下、仮想円)を考えると、いずれの初期位置からの把持動作においても指先軌道は仮想円を避けるような経路を通っていることが確認できる。左右方向からの把持動作では、指先が正面方向から回り込むように対象物体に接近している。これらの動きは、対象物体を障害物と見立てた障害物回避運動に類似していると考えられる。

3. 把持動作のための指先軌道生成

3.1 把持動作のモデル

まず対象物体の把持面と指先の接近方向とが平行となる把持動作(図5の初期

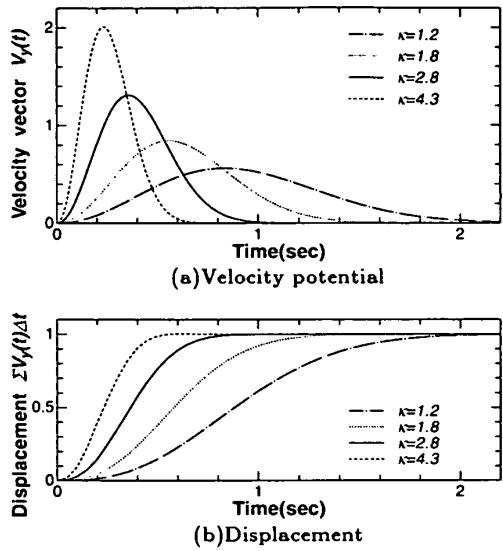


Fig. 6 Velocity pattern and displacement

位置 A) について、指先軌道生成モデルを構築する。前節で得られた指先軌道特性をまとめると、以下のようにになる。

1. 手先の速度パターンは、ベル型である。
2. 指先の開き動作は、人差し指が積極的に行う。
3. 指先の軌道は、対象物体に対する障害物回避運動と振る舞いが類似している。

以上の特性を模倣し、ここでは人工ポテンシャル場を利用した把持動作のための軌道生成法を提案する。

3・1・1 速度ポテンシャル場 指先の座標を複素平面上に移した場合、人工ポテンシャル $F(z)$ は次式のように表される。

$$F(z) = \Phi(x, y) + j\Psi(x, y) \quad (2)$$

ただし $z = x + jy$ であり、 $\Phi(x, y)$ は速度ポテンシャル、 $\Psi(x, y)$ は $\Phi(x, y)$ の共役調和関数で流れを表す関数である。ここで式(2)を x 方向について微分し、コーシー・リーマン方程式⁽¹⁰⁾を用いることで、以下の関係が得られる。

$$\begin{aligned} F'(z) &= \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} + j \frac{\partial \Psi(x, y)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} - j \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

すなわち、速度ベクトル $V(x, y)$ は、

$$V(x, y) = \overline{F'(z)} \quad (4)$$

となる。実部 $\partial \Phi(x, y)/\partial x$ は x 方向における速度ベクトルを表し、また虚部 $\partial \Phi(x, y)/\partial y$ は y 方向における速度ベクトルを表している。

3・1・2 y 方向における速度パターン 人間の上肢 2 点間運動においては、速度パターンがベル型になることが知られている。この動きを再現するため、Flash

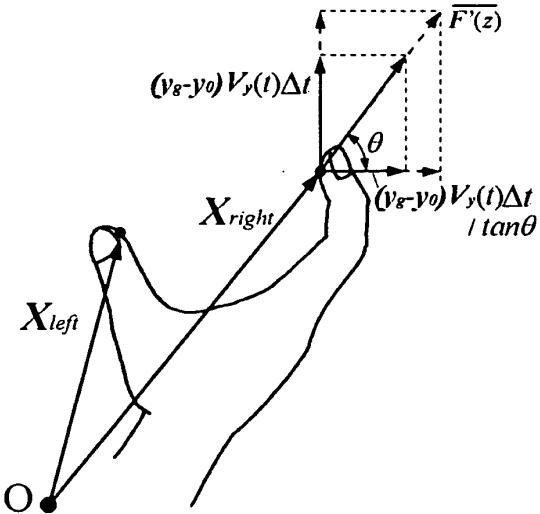


Fig. 7 Vectors of the two tips

と Hogan⁽¹⁾は「躍度最小モデル」を提案しており、その波形は運動時間の 2 分の 1 の時点でピーク値を持ち、左右対称のベル型となる。しかしながら、把持動作を伴った場合の手先速度の波形は、図 3(a)で示されるようにピークを過ぎてからなだらかに減少するため左右非対称となり、躍度最小モデルでは表現できない。そこで本論文では、以下の関数で速度ベクトルの時間波形を近似する。

$$V_y(t) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \kappa^3 t^2 \exp(-\kappa^2 t^2) \quad (5)$$

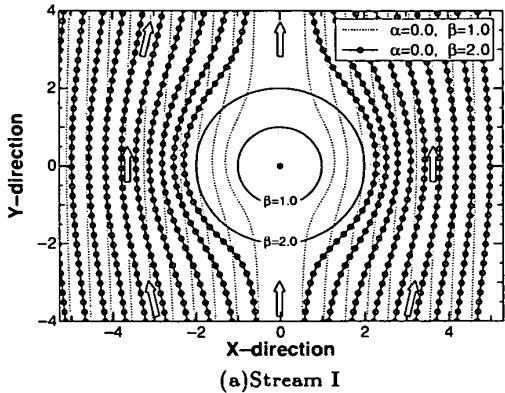
ただし、 κ は動作の完了時刻を決定するパラメータであり、また時刻 $t = 1/\kappa$ において最大値 $4\kappa/\sqrt{\pi e}$ を持つ。上式は、物理学分野において理想気体分子の速度分布を表すために用いられ、マクスウェル分布と呼ばれている⁽¹¹⁾。波形は図 6(a)に示されるように左右非対称のベル型となり、ピーク値が動作時間全体の前半に位置していることが確認できる。またパラメータ κ に関係なく次式を満たす。

$$\int_0^\infty V_y(t) \Delta t = 1 \quad (6)$$

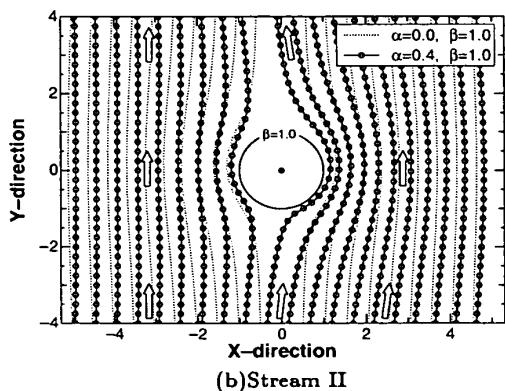
ただし、 Δt はサンプリング時間である。すなわち、式(5)の速度ベクトルの総和は 1 であり、図 6(b)に示されるように、 y 方向において任意の 2 点間運動の軌跡を描くこととなる。ここで、 y 方向の初期位置を y_0 、移動が完了する目標位置を y_g とすれば、変位量 $y_d(k\Delta t)(k = 0, 1, \dots, n)$ は次式で表すことができる。

$$y_d(k\Delta t) = y_0 + \sum_{i=0}^k (y_g - y_0) V_y(i\Delta t) \Delta t \quad (7)$$

3・1・3 x 方向の軌道計画 指先の位置座標 (x, y) における人工ポテンシャル場、および y 方向の速度ベク



(a) Stream I



(b) Stream II

Fig. 8 Streamlines of potential function

トルより、 x 方向の速度ベクトル $V_x(t)$ は次式で与えられる。

$$V_x(t) = V_y(t)/\tan\theta \quad (8)$$

ただし、パラメータ θ は図 7 で示されるように人工ポテンシャル場により指先が導かれる方向であり、次式で表される。

$$\tan\theta = \left(\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial y} \right) / \left(\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x} \right) \quad (9)$$

すなわち、 x 方向の初期位置を x_0 とした場合、その変位量 $x_d(k\Delta t)(k = 0, 1, \dots, n)$ は、

$$x_d(k\Delta t) = x_0 + \sum_{i=0}^k V_x(i\Delta t)\Delta t \quad (10)$$

となる。

3・1・4 物体近傍における 2 指間の吸引ベクトル グリッパが対象物体の近傍に位置した際、物体把持のために吸引ベクトルを 2 指間に与える。この吸引力を考慮に入れた場合、図 7 に示されるフィンガ位置 $\mathbf{X}_{left/right} = (x(k\Delta t), y(k\Delta t))(k = 0, 1, \dots, n)$ は、以下のように表される。

$$\mathbf{X}_{left/right} = \mathbf{X}_d + \sum_{i=k_t}^k \gamma \frac{\mathbf{X}_{right} - \mathbf{X}_{left}}{\|\mathbf{X}_{right} - \mathbf{X}_{left}\|} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{X}_d = (x_d(k\Delta t), y_d(k\Delta t))$ 、 γ は吸引の大きさを決定する正のパラメータである。前節で得られた手

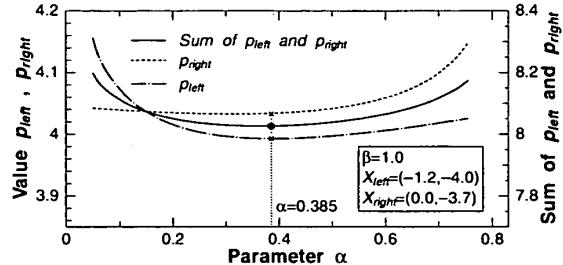
Fig. 9 Selection of optimal parameter α

Table. 1 Initial positions

	Fig.9(a)(b)	Fig.10(a)	Fig.10(b)
\mathbf{X}_{left}	(-1.2, -4.0)	(-4.2, -4.0)	(2.8, -4.0)
\mathbf{X}_{right}	(0.0, -3.7)	(-3.0, -3.7)	(4.0, -3.7)

Table. 2 Parameters of simulation

Parameters	κ	γ	$\Delta t[s]$	$k_t\Delta t[s]$
Value	2.8	0.02	0.025	0.6

先の速度ピークと指先を閉じ始める時刻との関係を考慮に入れ、時刻 $k_t\Delta t(> 1/\kappa)$ に到達した際、この吸引ベクトルを与える。

3・2 シミュレーション ここでは、人間のように左右の指で軌道特性が異なる場合を考え、以下の人工ポテンシャル関数を用いる。

$$F(z) = \alpha j \ln(z) + \left(z + \frac{\beta^2}{z} \right) \quad (12)$$

α および β は任意の値である。式 (4) より、位置座標 (x, y) における速度ベクトル成分は、

$$\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x} = 1 + \frac{\alpha x}{x^2 + y^2} + \frac{\beta^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial y} = -\left\{ \frac{\alpha y}{x^2 + y^2} + \frac{2\beta^2 xy}{(x^2 + y^2)^2} \right\} \quad (14)$$

で表される。ただし便宜上、前節で得られた測定結果と指先の動きを合致させるため、 $z = y + jx$ として y 軸正方向への流れを与えた。式 (12) のベクトルの流線の一例を図 8(a) および (b) に示す。図 8(a) は、 β を 1.0 および 2.0 に設定した場合であり、式 (12) の第 2 項により、半径 β の仮想円を避けるような流れが形成されていることが確認できる。図 8(b) は、 $\alpha = 0.0$ のときに流れが y 軸に関して対称となる。それに対して、 $\alpha = 0.4$ のときには循環 (circulation) を生じさせる効果を持ち、すなわち式 (12) の第 1 項により、 y 軸に関して非対称の流れを表すことが可能である。なお α の値については、与えられた初期位置から流線に沿って $y = 0$ に到達するまでの範囲を線積分し、その積分値が最小となるときのものを用いる。このことにより、初期位置から最短距離の流れが形成される。ここで、

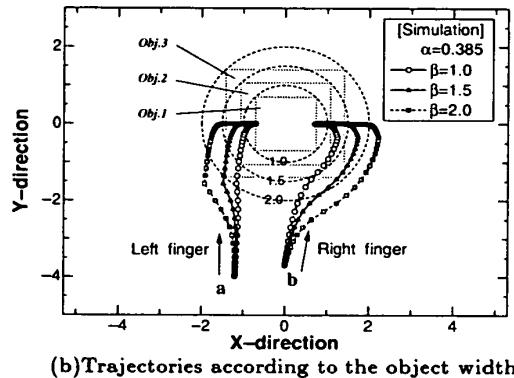
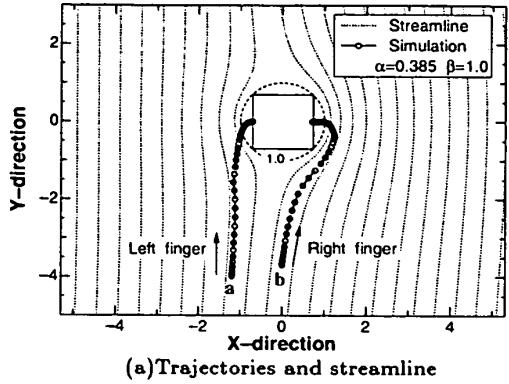
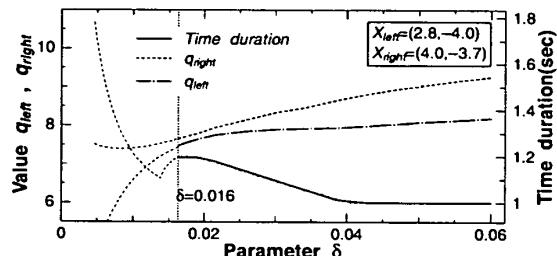


Fig. 10 Simulation(frontal approach)

Fig. 11 Relationship between the amount of displacement and time duration according to the parameter δ

α に対する積分値の変化を図9に示す。図中は、初期位置を $\mathbf{X}_{left}=(-1.2, -4.0)$, $\mathbf{X}_{right}=(0.0, -3.7)$, 仮想円半径を $\beta=1.0$ に設定したものであり, p_{left} , p_{right} は、左右それぞれの初期位置から $y=0$ に到達するまでの積分値を表している。図に示されるように、循環に関するパラメータ α を変えることで流線の積分値が変化しており、それぞれ最小値を持つことが確認できる。ここでは2指の軌道を考慮に入れ、両者の和が最小となるときのパラメータ ($\alpha=0.385$) を選択する。決定されたポテンシャル場を利用して、把持面に対して平行に指先が接近する場合のシミュレーションを行った。その結果を図10(a)(b)に示す。図中は、仮想円に取り囲まれた対象物体の把持を想定しており、式(7)における y 軸方向の目標位置を $y_g=0$ とした。

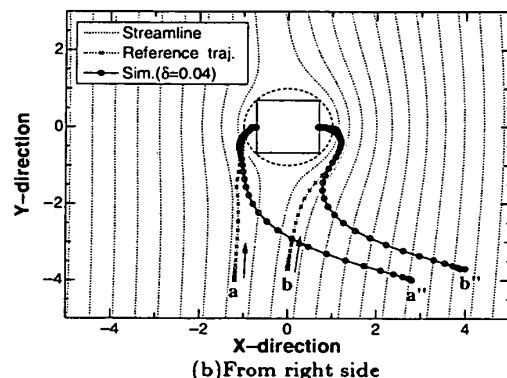
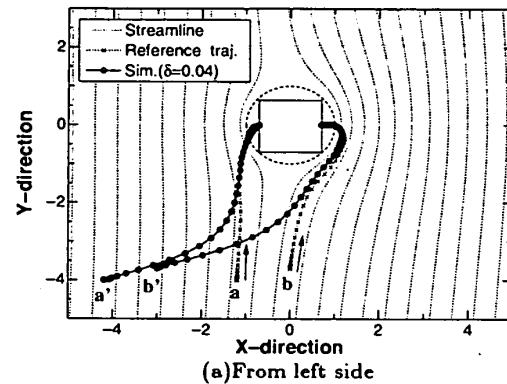


Fig. 12 Simulation(Side approach)

なお、把持動作のために必要な各パラメータは表2に示される値を用いた。図10(a)は、人工ポテンシャル場による流線と指先軌道を表している。図より、2指の軌道が仮想円を回避し、対象物体の把持部分に近づいていることが確認できる。その軌道はベル型の速度波形に基づいているため、人間の指先軌道と同様に動き出しおよび物体近傍においてサンプリング時間毎にプロットされた点どうしの間隔が狭くなっている。図10(b)は、把持物体の大きさを変えたことを想定した場合のシミュレーション結果である。図に示されるように、パラメータ β により指先の回避範囲が変化し、対象物体の大きさに応じて最適な仮想円の設定が可能であることが確認できる。次に、人間の指先軌道特性において測定したように、初期位置を左右方向にずらした場合(図5の初期位置B, C)の把持動作について考える。人間の場合には、図5に示されるように、正面方向からの指先軌道(初期位置Aからの軌道)へ近づくような経路を通っていることが確認できる。そこで本研究では、把持面と平行に接近する正面方向からの軌道を利用した指先軌道の生成を行う。まず x 方向成分について、指先位置 $\mathbf{x}_c(k\Delta t)$ を次式で与える。

$$\mathbf{x}_c(k\Delta t) = \mathbf{x}_{c0} + \sum_{i=0}^k [\delta \cdot V_y(i\Delta t) \cdot \{\mathbf{x}_f(i\Delta t) - \mathbf{x}_c(i\Delta t)\} + V_x(i\Delta t)\Delta t] \quad (15)$$

ただし、 $x_f(i\Delta t)$ は正面方向からの把持動作に関する指先位置であり、 δ は正面方向からの把持動作の軌道に対して接近する速さを決定するパラメータである。なお、 y 方向成分に関しては、正面方向からの把持動作と同じく式(7)を用いる。ここで、パラメータ δ に対する指先の移動距離およびそれに費される運動時間との関係を図 11に示す。図中は、初期位置を $\mathbf{X}_{left}=(2.8, -4.0)$ 、 $\mathbf{X}_{right}=(4.0, -3.7)$ として、図 10(a) の正面方向からの把持動作の指先軌道を利用してシミュレーションを行い、パラメータ δ に対する左右それぞれの指先の移動距離 q_{left} および q_{right} を求めたものである。図に示されるように、 δ の値を小さくすれば正面方向からの把持動作の軌道に近付く度合いが小さくなり、回り込む動作が抑制されるため、移動距離は短くなる。その一方で、 δ が小さくなるとともに移動に要する時間は増大していることが確認できる。本条件においては、 $\delta=0.016$ 未満で指先軌道が対象物体と重なり、 δ の値は上限値を持つ。ここで、表 1で示される初期位置からの把持動作のシミュレーション結果を図 12(a) および (b) に示す。なお、パラメータ δ については、図 11において移動に費される時間がほぼ収束するときの値 $\delta = 0.04$ を例に取り、設定している。図より、正面方向からの把持動作の軌道(図中×印)に近づくように経路が更新され、仮想円を回避して把持動作を行っていることが確認できる。式(15)においては、パラメータ δ にベル型の速度ベクトル $V_y(i\Delta t)$ を乗じることにより、 y 方向の動きを同期させていることに注目されたい。その結果、いずれの初期位置からの指先軌道もベル型の速度パターンで対象物体に接近しており、人間の動作と同様に動き出しおよび物体近傍において速度が小さくなっていることが確認できる。

4. まとめ

本論文では、人間の指先軌道特性に基づいた把持動作生成モデルの提案を行った。人間の場合には、手先をベル型の速度パターンで動かしており、指先軌道は

対象物体を障害物と見なした障害物回避運動と類似している。また対象物体の大きさに応じて開き幅を変えており、人差し指側が開き動作を積極的に行っていれる。これらの測定結果をふまえ、指先が仮想円を避けながら軌道を決定づけていることに着目し、人工ポテンシャル場を用いた指先軌道モデルを構築した。その結果、人間の場合と同様に 2 指が対象物体を回避し、把持動作を遂行していることをシミュレーションにより示した。さらに、左右方向からの把持動作についても、本手法により各指の動きがベル型の速度波形に基づいて軌道生成されていることを確認した。

文 献

- (1) T.Flash and N.Hogan: The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model, J. of Neurosciences, 5(7), 1688-1703, 1985.
- (2) Y.Uno, M.Kawato and R.Suzuki: Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multi-Joint Arm Movement-Minimum Torque Change Model, Biol. Cybern., 61, 89-101, 1989.
- (3) 小川・森: 物体を持った上肢の直線運動の実験公式, バイオメカニクス, 5(1980), 121-129.
- (4) 辻・千種・金子: 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, 機論 C 編, 62-597(1996), 257-263.
- (5) 辻・P.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, 13-2(1995), 125-130.
- (6) 池浦・大塚・猪岡: 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察, 人間工学, 31-5(1995), 355-358.
- (7) S.Shibata and H.Inooka: Psychological evaluations of robot motions, International Journal of Industrial Ergonomics, 21(1998), 483-494.
- (8) 小川・森・平井・土屋: ものの動きに関する感情分析, 人間工学, 25(1989), 243-251.
- (9) 中沢・梶川・猪岡・池浦: 把持動作における指先軌道の実験的考察, 人間工学, 36-1(2000), 19-27.
- (10) 例えば, E.Kreyszig, 複素関数論(培風堂).
- (11) 例えば, 佐藤, 理・工・医専門基礎 物理学教科書(三共出版).