人間の手指の摩擦特性の解析[†]

嶋田 明 広*・韓 鉉 庸**・川 村 貞 夫**

Analysis of Friction Characteristics on Human Fingers

Akihiro SHIMADA*, Hyunyong HAN** and Sadao KAWAMURA**

In many cases of human hand tasks, grasping and manipulation of objects are most basic motions. However, the physical characteristics of human finger on grasping motions have not yet been sufficiently clarified. For example, the friction effect which is an important characteristic on grasping motions have been hardly investigated. In this study, we pay attention to friction between a finger and an object. At first, we develop a system to measure the friction of fingers. Next, basing on the experimental results obtained from the developed measurement system, we propose a new model of the maximum static friction force of human fingers. Also, we have found out that the friction forces are changed depending on the directions of tangential forces. Finally, we realize a finger tip which is made of silicone rubber and whose characteristics are similar to human fingers.

Key Words: human hand, friction of finger, normal force, tangential force

1. 序 論

人間の高度な手作業の能力をロボットに代替させるために、多指ハンドの研究は必要不可欠な分野である^{1) 2) 3)}。ロボットハンドにより対象物を操る際には、指先の静止摩擦が非常に重要である。これらの研究では対象物体の操りに関して、力学的に詳細な解析が行われているものの、指先の摩擦現象は簡単な数学モデルが作り難いため、摩擦円錐にモデル化するものが多い。しかし、実際には摩擦円錐は未知であり、これを知らなければ考えている制御則も実現できない場合も多い。一方、摩擦効果の指標である摩擦係数は接線力と法線力との比で表されるが、人間の指先においてはその柔軟性により静止摩擦係数は1.5以上、場合によっては2.5を超える。多くの金属間における摩擦係数がほぼ0.6~1.2の間にあるこ

とと比較すると人間の指の摩擦係数はかなり大きいことがわかる。このことから人間は様々な角度の力を指先から発生でき、多くの冗長な解の中から最適解を選ぶことができると考えられる。その結果、多指全体として巧妙な運動が実現される。したがって、多指ロボットハンドを設計する際にも人間と同程度の摩擦係数をもつことは、多様な力パターンを対象物に作用させるために重要である。人間の指と類似した摩擦特性をもつロボットハンドを開発することはロボット工学の様々な分野で要求されている。例えば、宇宙、深海、原子力などの極限作業を遠隔操作により遂行するマスタースレーブシステムにおいて、スレーブ側に人間の手と同様な摩擦特性、柔軟性を持つロボットハンドを用いれば、オペレータが自分の物理的直感で対象物を把握し、操ることが可能であり、結果的にマスター側の操作性を向上させることにつながる。そのようなロボットハンドを設計・開発するためには、まず人間の指の摩擦特性を調べることが必要となる。

人間の手指の摩擦特性を精密に測定する研究は少ない^{4) 5) 6)}。指先の静止摩擦現象を考える際に難しい点は指先が柔軟であり変形を伴うことである。そのために普通のクーロン摩擦以外にせん断摩擦と呼ばれるものが加わる。それ故に、接表面に垂直な力が小さくなるにした

[†] 第5回ロボットシンポジウムで発表(1995・5)

* 三菱電機(株)名古屋市中区矢田南5-1-14

** 立命館大学理工学部 草津市野路町1916

Mitsubishi Electric Corporation, Higashi-ku, Nagoya

** Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu

(Received September 14, 1995)

(Revised August 19, 1996)

がって、一定の摩擦係数では説明できない現象が生じる。山羽⁶⁾によって示されるモデルでは指が接触している面積のうち、 α 部分 ($0 \leq \alpha \leq 1$) ではせん断摩擦のみが作用し、残りの $(1 - \alpha)$ 部分ではクーロン摩擦のみが作用すると仮定して導出された。このため、測定条件によっては必ずしも成り立たないことがあった。

そこで、本研究では人間の指の摩擦特性を明らかにし、有効なモデルを構築するために人間の指の静止摩擦係数の特性を調べる。人間の指の摩擦計測においては、一般にその再現性が乏しい。そのため本研究では、まず信頼性の高い摩擦計測システムを設計・開発する。そして、そのシステムを用いて指の摩擦に関する各種実験を行い、指の最大静止摩擦力を表わすモデルを構成する。われわれの提案するモデルにおいては、摩擦の発生原因をせん断摩擦のみによるものとして導出する。その結果、せん断力と圧力が線形近似できることを測定結果より明らかにした。また、指の接触面積を荷重関数にモデル化し、摩擦係数を荷重のみの関数としてモデル化した。

本研究の実験過程において、人間の指の摩擦特性は摩擦方向によって異なり、指が物体を引っかく方向の摩擦係数はその逆方向のそれに比べて大きくなることを見出した。われわれはこの原因が指先の爪の有無にあると考え、シリコンゴムを用いて人間の指構造を模擬した人工指を製作し、実験によりわれわれの考えの正当性を検証する実験結果を示す。

2. 摩擦計測システムの開発

本研究で開発した摩擦計測システムを Fig. 1, Fig. 2 に示す。Fig. 1 はシステムの全体図であり、Fig. 2 は力計測部分の拡大図である。アクリルの接触板は4本のワイヤーによりロードセルと連結しており、指による縦荷重はワイヤーを介してロードセルにより検出される。4本のワイヤーは十分な長さがあり横方向の移動は上下には影響しない程度である。また、接触板の一端は DC モータと、他端はおもりとワイヤーにより連結している。ワイヤーの途中には歪みゲージを貼った検出器を設けており、これとロードセルにより接線力を計算することができる。ワイヤーは伸び縮みしないとすると、縦荷重 W と接線力 F は次式により求められる。

$$W = T_{load_v} \quad (1)$$

$$F = T_1 - T_2 - T_{load_h} \quad (2)$$

ここで、 T_{load_v} , T_{load_h} は、それぞれロードセルに働く力の垂直、水平方向成分であり、 T_1 , T_2 は水平方向のワイヤーの張力である。

Fig. 1 Total measurement system of friction forces

Fig. 2 Mechanism of force measurement

測定中に指の接触状態が変化しないように指をバーに沿わせ、バンドにより固定するようになっている。また、角度調節機構を設けており、指の各姿勢に対する測定が可能である。

固体間の摩擦とは異なり、人間の指は弾性を有しているために、指表面での摩擦は縦荷重以外に接触面積が影響すると考えられる。そのため、実験システム下部に CCD カメラを設置し、アクリルの接触板を通して指の接触状態を画像データとして取り込み、画像処理を行うことにより接触面積を計算する。

3. 人間の指の摩擦測定

3.1 実験方法

本研究で開発したシステムを用いて、人間の指の摩擦計測を行った。指の測定部分は中指の DIP 関節より指先端までの間とし、接触板には透明なアクリル板を用いた。接触板の移動方向は Fig. 2 において右方向、すなわち、指表面に対し指先端から指付け根部に向かう方向

Fig. 3 Sample data of friction force

Fig. 4 Contact angle

で行った。

実験前に、まず各被験者は指表面に汗や汚れなどが付着して、摩擦面の状態が変わらないように十分洗浄し、乾燥させた。次に運動課題についての説明と練習試技を行い、その後測定を実施した。運動課題としては、接触板の上に指を載せ、縦荷重を徐々に加え、ある一定値 W_d [N] で保持するというものである。被験者にはモニターにより縦荷重の大きさのみは情報として与え、縦荷重を一定にするように指示し、その状態で接触板を DC モータにより徐々に移動させ、指が滑り出すまでの縦荷重と接線力をすべてメモリーした。一般に最大静止摩擦力は同じ縦荷重下においては動摩擦力よりも大きいことが知られているので、得られた一連の接線力データのうち、最大値を最大静止摩擦力とした。このような状態を模擬的に Fig. 3 に示す。

縦荷重を一定に保つ必要があるので、ある許容範囲 b [N] を設け、縦荷重が $W_d \pm b$ の範囲にない場合は再度測定を試みた。本実験では、 $b = 0.1$ N とした。測定は縦荷重 W に対して、 $0.5 \text{ N} \leq W \leq 7 \text{ N}$ の範囲で 0.5 N 間隔で、指姿勢 $\theta = 30, 45, 60 \text{ deg}$ (Fig. 4) について各 3 回づつ行った。

本実験に参加した被験者は健康な男子学生 5 名である。

3.2 実験結果

人間の指表面をアクリル板で摩擦したときの摩擦係数 μ を Fig. 5 に示す。Fig. 5 における摩擦係数は 3 回の測定の平均値をプロットしたものである。A, B, C は

Fig. 5 Normal forces and friction coefficients

各々被験者を表わしている。特に、被験者 A の指姿勢 45deg のときのエラーバーを示した。他の場合も同程度の結果となった。

この摩擦実験においては、接線力の最大値を最大静止摩擦力 F とした。摩擦係数 μ は摩擦力 F と縦荷重 W の比で表され、次式により求めた。

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (3)$$

多くの金属間における摩擦係数は広範囲にわたってあまり変化せず、ほぼ $\mu = 0.6$ と $\mu = 1.2$ の間にある。それと比較すると、人間の指の場合は広範囲にわたって、金属よりもかなり大きく、縦荷重によってかなり変動することがわかる。低荷重域の摩擦係数は高荷重域に比べはるかに大きく、ほぼ 0.5 ~ 2.5 の範囲にあることがわかる。また、摩擦係数は指姿勢 θ が小さいほど大きくなることも確認できる。

3.3 摩擦方向による摩擦特性変化

人間の指の皮膚は一般の皮膚とは構造が異なっており、特に指紋の存在は他の体部には見られない指独特のものである。また、人間の指先には爪が存在し、これにより指先の剛性を高め、指による作業の効率を高めている。これら指独特の諸要素の働きかけは指先の作業によりさまざまであり、一様ではない。したがって、指先の摩擦係数も測定方向によって指自身の物理的特性が変化すると考えられる。そのため、3 章とは逆方向の測定も行い違いを調べることにする。以後、指に対して接触板が指付け根部から指先部に向かって滑る方向を BW 方向

Fig. 6 Comparison of friction coefficients by direction

(Backward), その逆方向をFW方向(Forward)と呼ぶ。

実験結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、低荷重域で摩擦係数は大きく、高荷重になるにつれて減少していくことがわかる。また、指姿勢に関しては姿勢 θ が小さいほど摩擦係数は大きくなることが確認できる。

この実験の興味ある結果として、BW 方向の摩擦係数のほうがFW 方向のそれよりも大きくなっていることが挙げられる。比較的指姿勢が低いときは、摩擦方向による摩擦係数の変化はそれほど顕著には見られないが、指姿勢が大きくなるにつれて、その格差がはっきりと現れることも結果から読みとれる。

4. 人間の指の摩擦解析

4.1 一般の摩擦解析

金属表面間の摩擦は二つの項、すなわち凝着項と掘り起こし項の和として表わすことができる。一般に掘り起こし項は凝着項に比べて非常に小さいのでこれを無視すると摩擦力 F は次式で与えられる。

$$F = A_t s_t \quad (4)$$

ここで、 A_t は真実接触面積であり、 s_t は凝着部のせん断に要する平均接線応力である。したがって、 F は見かけの接触面積には関係しない。これが Amontons の第1法則である⁷⁾。

また、金属表面同士の接触において真実接触面積 A_t は次式で表されることが知られている。

$$A_t = \frac{W}{p_m} \quad (5)$$

ここで、 p_m は接触部分の平均降伏応力である。

したがって、式(4),(5)より、摩擦係数 μ は次式で表わされる。

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{s_t}{p_m} \quad (6)$$

こうして、摩擦力は荷重に比例し、摩擦係数は事実上荷重に関係しない。これが Amontons の第2法則であ

る。

これに対し、硬い平板の上を粘弾性体の球が滑る場合、接触は弾性接触であり、接触面積は荷重に比例して増加せず、Amontons の第2法則は成立しない。したがって人間の指の摩擦モデルには別の形式が必要である。

4.2 人間の指の摩擦モデル

一般に、真実接触面積を正確に推定することは困難である。そこで以後は実験システムの CCD カメラから得られる見かけの接触面積に基づいて解析を進め、摩擦モデルを考える。まず、見かけの接触面積 A と真実接触面積 A_t が

$$A_t = \lambda A \quad (0 \leq \lambda \leq 1) \quad (7)$$

と考えると、式(7)より、

$$F = A_t s_t = A \lambda s_t = A s \quad (8)$$

となる。ここで、 $s = \lambda s_t$ は見かけの接触面積に対するせん断強さであり、実際に測定可能である。そこで、このせん断強さについて議論する。

多くの材料においてせん断力 s は接触圧力 p に依存することが知られている。しかしながら、ここで用いる見かけの接触面積に対するせん断力 s と平均圧力 p との関係は明確でない。本研究では2章に示される計測システムの CCD カメラによって計測された接触面積を用いて、平均圧力 p は

$$p = \frac{W}{A} \quad (9)$$

として求める。また、接触面における圧力が均一に平均圧力であると仮定して以下の解析を行う。人間の指が乾燥アクリル面、水濡れアクリル面で接触したときの p と s の測定した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、近似的にせん断強さは接触圧力に比例しており、次の関係が成立することが明らかになった。

$$s = s_0 + \alpha p \quad (10)$$

ここで、 s_0, α は定数であり、 α は接触圧力 p に対するせん断強さ s の増加率、 s_0 は表面力による接触部分(荷重ゼロにおける有限な大きさの接触部分)の単位面積当たりのせん断力である。両者とも指姿勢、摩擦方向によって変化する。一般に乾燥した清浄な指ほど大きくなっている。

(10) 式のように人間の指についてせん断強さと圧力の関係が線形関係にあるという発見は、種々の解析や設計にとって重要である。例えば、3章で求めた摩擦係数 μ の変化が(10)式を基にして簡単にモデル化される。そのために、(8),(10)式を用いて次式を得る。

Fig. 7 Dependence of shear strength on contact pressure

Fig. 8 Contact pressure and friction coefficients

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{As}{W} = \frac{A(s_0 + \alpha p)}{W} = \frac{s_0}{p} + \alpha \quad (11)$$

Fig. 7 より求めた s_0, α を用いて、式 (11) から摩擦係数を計算し、その計算値と実験から得た摩擦係数の比較を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より接触圧力が増加するにつれて摩擦係数が低下することが (11) 式のモデルによって説明されることがわかる。

4.3 荷重のみを変数とする摩擦係数モデル

前節で、摩擦係数が s_0 と α というパラメータと圧力 p によってモデル化出来ることを示した。

しかしながら、人間の指の場合は接触面積 A は荷重 W の関数として表現できるように思われる。そこで、以下では摩擦係数を荷重の関数として表現することを試みる。人工の指を製作したときにも指先の摩擦係数が指先に加わる荷重のみによって予想されれば運動計画などにも役立つと考えられる。

弾性接触では Hertz の解析が有名である。人間の指も粘弾性要素をもつが指形状は完全な球形ではなく、また、指表面は滑らかではないため、必ずしも Hertz の式が成り立つとはかぎらない。ただし、多くの種類の弾性接触において仮定されているように人間の指の接触面積 A が荷重 W のべき数乗に比例するとモデル化する⁸⁾。すなわち、 A を次式で表わす。

$$A = aW^b \quad (12)$$

Table 1 Fitting by Power Method of Contact area

		subject A		subject B	
		a	b	a	b
30deg	FW	114.6	0.2916	113.4	0.3360
	BW	103.5	0.2808	105.7	0.1930
45deg	FW	106.1	0.2061	93.1	0.3380
	BW	80.8	0.3106	82.5	0.2735
60deg	FW	77.6	0.3186	99.9	0.1670
	BW	63.7	0.2683	63.0	0.3743

		subject C		subject D	
		a	b	a	b
30deg	FW	86.8	0.4895	169.4	0.3590
	BW	109.6	0.2506	142.8	0.2845
45deg	FW	115.4	0.2758	173.4	0.2883
	BW	76.6	0.3214	98.1	0.3829
60deg	FW	98.1	0.2636	143.0	0.2137
	BW	96.2	0.2742	111.3	0.2384

ただし、 a, b は荷重によらない定数である。

式 (12) により、実験値との誤差の最小二乗近似を行った結果を Table 1 に示す。これより、人間の指の接触において、 a は 65 ~ 170、 b は 0.2 ~ 0.4 の範囲にあることがわかる。

(9) 式に (12) 式を代入すると摩擦力 F は次のようになる。

$$F = aW^b(s_0 + \alpha p) \quad (13)$$

ただし、 p は接触圧力で W/A に等しい。よって、摩擦係数 μ は次のようになる。

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{aW^b(s_0 + \alpha p)}{W} = as_0W^{b-1} + \alpha \quad (14)$$

したがって、摩擦係数 μ は W^{b-1} に比例する。ここで、 s_0 と α は (10) 式から得られる定数であり、 a と b は (12) 式から得られた定数であるので摩擦係数は荷重 W のみによって決定される。

(12) 式の正当性を検証するために、実際の人間の指に関して、横軸に W^{b-1} 、縦軸に摩擦係数 μ をとり、実験値をプロットしたものが Fig. 9 である。ここで、 b は Table 1 における値をそれぞれ用いた。これより、摩擦係数はほぼ W^{b-1} に比例しており、近似的に (12) 式の関係が成立していることがわかる。

5. 摩擦特性の方向依存性についての解析

5.1 シリコンゴムを用いた人工指の制作

人間の指の摩擦特性を調べた結果、以下の傾向があることを見出した。

Fig. 9 Dependence of friction coefficients on normal force

- 指姿勢角 θ が小さいほど摩擦係数は大きい。
- 摩擦方向に関して、BW 方向の摩擦係数は FW 方向のそれよりも大きい。

人間の指は比較的柔らかい組織が骨格を覆っている。また、指の手背面には爪が存在し、これにより指先に圧縮応力が作用したとき、指先部の剛性を高めていると考えられる。この爪の効果は BW 方向のほうが FW 方向よりも大きく、皮膚内部が硬化される範囲も大きい。また、指姿勢に関しては、姿勢が大きいほど指先の内部組織を介して、爪に作用する力は大きくなり、特に BW 方向においては大きな圧縮応力が作用し、結果的に指先部の硬化の範囲は大きくなる。組織が硬化するとせん断強さが大きくなり、結果的に摩擦力は大きくなると予想される。すなわち、上記の傾向の原因として指先の柔らかさ、爪の存在が関与し、これらの作用により指先表面、及び内部組織の状態が変化するためであると考えられる。人間の指の内部組織について直接的に硬さを調べることは困難であるために人間の指構造を模擬した人工指を試作し、人工爪を装着した場合と装着しない場合の摩擦特性を調べた。

Fig. 10 に本実験で試作した人工指の構造図を示す。骨部にはジュラルミンの中空棒を使用し、その周りをシリコンゴム (信越シリコン KE114) で覆った。人工爪の材質はアルミニウムで、寸法は縦 20mm、横 40mm、厚み 2mm である。人工爪は接着剤によってしっかり貼り付けて使用した。また、指の柔らかさの違いによる摩擦特性の変化も調べるために、ゴム硬度 15 と 40 の 2 種類のシリコンを使用した。ゴム硬度 15 のものは人間の指程度に柔らかく、硬度 40 のほうは硬めである。

5.2 実験結果及び考察

ゴム硬度 40 の人工指を乾燥アクリル面で摩擦したときの摩擦係数は爪の有無に関わらずほとんど変化はなく、全体としてほぼ 0.3 ~ 0.9 の範囲にあった。

ゴム硬度 15 の人工指を乾燥アクリル面で摩擦したと

Fig. 10 Structure of silicone rubber finger

きの摩擦係数を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、爪がある場合、ない場合ともに高荷重域に比べ、低荷重域の摩擦係数が 2 ~ 3 倍程度にまで大きくなっており、人間の指の摩擦特性と近い傾向を示していることがわかる。摩擦係数の最大値も約 2.0 と比較的大きな値をとっており、全体としてほぼ 0.2 ~ 2.0 の範囲内にある。また、爪のない場合の BW 方向の摩擦係数がほか比べて、極端に小さいことも大きな特徴である。

摩擦方向に関しては、爪のない場合は FW 方向のほうが BW 方向に比べて広い荷重範囲でかなり大きくなっている。これに対し、爪のある場合はかなりの範囲で BW 方向のほうが FW 方向を上回っており、特に、低荷重域でこの傾向が著しく現れている。

全体として爪の存在の影響を見てみると、FW 方向においては若干摩擦係数が大きくなる程度で、さほど影響は現れていない。しかし、BW 方向に関しては広い荷重範囲で極端に摩擦係数が大きくなっており、特に高荷重域では $\mu = 0.2$ から $\mu = 0.6$ と摩擦係数が跳ね上がっており、硬度 15 の人工指においては爪により、BW 方向の摩擦係数が FW 方向のそれと同程度またはそれ以上まで向上されることが確認できる。

Fig. 11 Friction property of silicone rubber finger(hardness:15)

6. おわりに

本研究では、手指の有する基本特性の解明を目的として、物体把握時の重要な物理的特性である指と物体との摩擦効果に注目し、その測定と解析を行った。また、摩擦の原因を凝着のみによるものとして、摩擦効果の指標である摩擦係数を荷重の関数として定式化した。

人間の指の場合、摩擦係数は縦荷重、接触圧力、接触面積などの因子によって変化する。この摩擦現象は、金属間摩擦などで説明されるクーロン摩擦現象論では解釈できないものである。

実際の人間の指の摩擦測定から見い出された特徴は以下にまとめられる。

- (1) 人間の指の摩擦係数はほぼ 0.5 ~ 3 の範囲にあり、金属間摩擦と比較してかなり大きい。
- (2) 人間の指の摩擦係数は縦荷重が小さくなるにつれて大きくなる。
- (3) 人間の指の摩擦係数は指姿勢によって変化し、姿勢が低いほど大きくなる。
- (4) 人間の指の摩擦係数は摩擦方向によって変化し、BW 方向のほうが FW 方向よりも大きくなる。この傾向は指姿勢が大きくなるほど顕著に現れる。
- (5) 人間の指の摩擦係数はほぼ縦荷重の約 0.7 乗に反比例する。

上記のうち、(3)、(4) の特徴は人間の指の構造によるものであり、特に爪の存在、指先組織の柔らかさによるところが大きい。爪の効果について検証するために人間の指を模擬した人工指を試作して摩擦測定実験を行い、爪についての考察の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) D.J. Montana : The kinematics of contact and grasp, Int. J. Robot. Res. 7, 3, 17/31 (1988)
- 2) Mason and Salisbury : Robot Hands and the Mechanics of Manipulation, The MIT Press (1986)
- 3) J. Kerr and B. Roth : Analysis of multifingered hands, Int. J. Robot. Res., 4, 4, 3/17 (1986)
- 4) Moore, D.F. : The friction and lubrication of elastomer, NY: Pergamon press. (1972)
- 5) McKenzie, C.L., Iberall, T. : The grasping hand, Advances in Psychology 104, North-Holland Elsevier Science B.V., Chapter 6 pp. 203-281 (1994)
- 6) 山羽和夫, 高野英彦, 尾崎省太郎 : 人間の指の物理的特性, バイオメカニズム, 27, 3 (1975)
- 7) バウデン・テイバー著, 曾田範宗訳 : 固体の摩擦と潤滑, 丸善出版 (1961)
- 8) 内山吉隆 : 摩擦と表面, 日本ゴム協会誌, 65, 5 (1992)
- 9) 山田陽滋 : 滑りと静摩擦係数の検出, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 959-965 (1993)
- 10) Waters, N.E. : The indentation of thin rubber sheets by spherical indentors, Br. J. appl. phys., 16, 557-563 (1965)

[著者紹介]

嶋田 明 広

1993年, 立命館理工学部機械工学科卒業。95年同大学大学院修士課程機械工学専攻に入学。三菱電機株式会社に勤務。

韓 鉉 庸 (学生会員)

1992年, 韓国東亜大学機械工学科卒業。94年立命館大学修士課程情報システム専攻に入学。ロボットハンドの分野に興味を持つ。

川 村 貞 夫 (正会員)

1981年, 大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。86年同大学同学部機械工学科博士課程修了。87年立命館大学理工学部機械工学科助教授を経て, 95年同大学機械工学科教授。学習制御, 空気圧制御, 生体ロボティクスなどの研究に従事 (工学博士)。