4 自由度長さ呈示装置の製作と指先の長さ知覚実験*

呉 景龍^{*1}, 王 海波^{*1}, 北山 直嗣^{*2}, 高橋 智^{*1}Development of 4-Degree-of-Freedom Length Display
and Length Perception Experiment of 5 FingersJinglong WU^{*1}, Haibo WANG, Naotsugu KITAYAMA and Satoshi TAKAHASHI^{*1} Okayama University, Graduate School of Natural Science and Technology
3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, Okayama, 700-8530 Japan

In order to investigate the human characteristic on length perception between the thumb and four fingers, we developed a four-degree-of-freedom (4DOF) length display device which can adjust each four distances respectively. The 4DOF device was proofed by length perception experiment. The placement of 4 units of the 4DOF device arranges from fingertip trajectory experimental data. The position of 4 fingers basing on the thumb is changed by stepping motor. The experiment is that each length between the thumb and other four fingers is same length. The results suggested that the same trend of perceptual length by thumb and any other finger is underestimation. In addition, perceptual error around 70mm was the biggest.

Key Words : Length Perception, Finger Span, Haptic Display, 4DOF

1. 緒 言

現在の仮想現実技術では、モニタによる視覚情報の呈示に加えて、アクチュエータによる物体形状を呈示することにより、より現実に近い状態を再現しようという試みがなされており、既に一部は実用化されている(ダ・ヴィンチ・サージカル・システム等)⁽¹⁾。さらに触覚によって物体の形状を認識するためには、人間の知覚特性を考慮する必要がある、特に物体の大きさを認識するために必要な長さ知覚を理解することが重要となってくる。

D.Burk らによると、指の把持動作による長さ知覚は、皮膚、筋肉、関節の感覚から情報を得ているといわれており⁽²⁾、物体の大きさによって指先間を変化させることから、これら全てを用いた触知覚行動になると考えられる⁽³⁾。また呂らは、親指とその他の一本の指による二本指の間の長さ知覚特性実験を行っている⁽⁴⁾。

王らは親指 - 人差し指間と親指 - 中指間それぞれの把持動作について調べており、指ごとの長さ知覚にはほとんど差がないことや、人差し指と中指で同時に把持すると、60~100mm の長さ範囲において、三本指のほうが二本指より知覚精度が高いことを明らかにしている⁽⁵⁾。

しかし薬指や小指も含めた研究では、物体をつかんだときの握力を対象とした研究が多く⁽⁶⁾、著者らが調べた範囲では物体形状認識を対象とした五本指による把持動作の長さ特性については調べられていない。五本指による把持動作の長さ知覚特性の未解明の原因の一つとしては親指と人差し指、中指というほぼ直線運動とみなせる把持動作に対して、五本指全てを用いた把持動作では、各指の軌跡が被験者によって異なり、全ての指に対して別々の長さを呈示することが困難であったからだと考えられる。

そこで本研究では、五本指を用いた人間の把持動作における長さ知覚特性を明らかにすることを目的に、親指

* 原稿受付 2010 年 10 月 28 日

^{*1} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)^{*2} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科 (現 (株)NTN)

E-mail: wu@mech.okayama-u.ac.jp

とその他の四本指の間に任意の長さを呈示できる 4 自由度長さ呈示装置を研究開発し、その有用性を実証する。この装置を用いて五本指に四つの長さを呈示したときの長さ知覚特性について調べ、五本指による把持動作の長さ知覚特性を明らかにする。

2. 把持動作時の指の軌跡測定

人間のモノをつかむ動作は、親指と対向する四本の指の相対運動であり、指が複雑に動くことができるため、指の動きは、把持する物体の大きさや、被験者の手の大きさによっても大きく異なる。被験者の各指の長さ及び平均長さを表 1 に示す。表 1 を見ると、被験者 C が最も短く、被験者 E が最も長い傾向があり、その差の最大で中指の 14mm となっている。また平均値は、それらのほぼ中間の値となっている。親指に対する各指の長さ知覚について調べるためには、各指の相対位置が重要であることから、被験者ごとに指の軌跡を予め調べておく必要がある。

そこで長さ知覚実験を始めるにあたり、まず被験者の指の軌跡を予め調べた。このときの実験風景を図 1 に示す。五本の指先に全て触れるように透明なアクリル板が手とカメラの間に設置してある。実験中親指は、図 1 に示すように、アクリル表面に取り付けた半径 15mm、厚さ 10mm の半円柱の平面部に触れたままの状態を維持する。手は、開いた状態から、半円柱の物体の曲面部をつかむように残り四本の指を移動させる。指先には目印となるマークをつけておき、実験後マークの位置を画像解析することによって軌跡を求めた。

実験結果の一例を図 2 に示す。図は親指の位置を原点とし、各指の相対位置の変化を描いたものである。指の親指に向かう運動の軌跡は、原点近傍で指同士がぶつかり合うまで、どの指についてもほぼ直線であることがわかる。また被験者ごとの直線からのばらつきを示す。測定値と近似直線の距離から求めた決定係数 R^2 の値は表 2 のようであった。表 2 を見ると、どれも直線で近似することができる。また親指固定部の半径を 25mm、40mm に代えて行っても、指の軌跡はほぼ同じであった。この結果から、被験者に呈示する親指からの相対長さは、この実験によって得られた軌跡を直線近似した直線上に呈示すればよいことがわかる。しかし各指の軌跡のなす角は、被験者ごとに異なっていたことから、呈示位置は被験者ごとに調整する必要があることもわかった。これらの点を踏まえて、各指に長さを呈示する 4 自由度長さ呈示装置を製作し、実験を行う。

Table 1 The length of each finger of 10 subjects

Unit (mm)

Finger Sub.	Thumb	Index finger	Middle finger	Ring finger	Little finger
A	55	67	78	70	55
B	58	68	74	67	55
C	50	65	74	71	58
D	54	72	81	75	59
E	60	77	88	79	63
F	58	74	86	82	63
G	57	78	86	80	63
H	55	67	78	74	58
I	56	67	76	71	57
J	53	70	75	70	55
Average	55.6	70.5	79.6	73.9	58.6

Table 2 Coefficients of determination with regression analysis (R^2) for approximated lines of each trajectories

Finger Sub.	TI	TM	TR	TL
A	0.99	0.98	0.86	0.91
B	0.95	0.99	0.91	0.95
C	0.91	0.98	0.82	0.93
D	0.97	0.99	0.91	0.95
E	0.85	0.97	0.92	0.97
F	0.84	0.99	0.96	0.96
G	0.94	0.97	0.91	0.81
H	0.91	0.98	0.91	0.84
I	0.88	0.98	0.85	0.96
J	0.80	0.98	0.96	0.97
Average	0.90	0.98	0.90	0.93

Fig.1 View of trajectories measurement

Fig.2 Result of trajectories analysis for one typical trial

3. 五本指を用いた把持動作実験装置と実験方法

3・1 実験装置

五本指を用いた把持動作における長さ知覚について調べるためには、親指に対して各指に別々の長さを呈示する必要がある。この実験のために、図3に示す装置を作成し、その性能評価を行った。装置は親指を固定部とし、親指に対して4個の一軸ステージを放射状に平面上に取り付けており、親指に対する任意の長さを各指に対して呈示することができるようになっている。

装置の構成を図4に示す。モータコントローラはコスモテック社製4軸コントローラ(USPG-48USB インタフェース)を、モータドライバは同社2軸ドライバ(CTDR-5514P(F))を使用する。ステッピングモータはMicrosoft社製Visual Basic 6 で作成したプログラムによってコンピュータから全て制御する。

Fig.3 Four-degree-of-freedom length display device

Fig.4 Construction of device system

ステージはアクリル製であり、図5に示すように、モータによるスライド機構によって、最大80mmの範囲で移動することができる。モータは5相ステッピングモータで、ホールディングトルクは0.24N・mである。すべりネジはモータとベアリングで両端支持している。このステージを、図3のように放射状に多数の穴を開けた板にネジで固定する。被験者ごとに把持動作時の指の軌跡が異なるため、前節の方法を用いて予め被験者の指先の軌跡を測定し、これに最もよく合うようにステージの位置を調整し、放射状に開けた穴を用いて、ステージをネジで固定する。

実験時の被験者と装置の配置の概略を図6に示す。実験は十分静かな部屋で行い、外乱による長さ知覚による影響を極力小さくした。視覚による長さ知覚への影響をなくすため、実験装置と実験時の被験者の手が直接見えないように壁を取り付けており、さらに被験者は実験中アイマスクをつけるように指示した。また不要な力を加えないように、アームレストを調整して楽な姿勢をとってもらようとする。また指先の皮膚表面の感触による

影響をなくするために、把持部にビニルテープを添付し、接触部の粗さや温度の影響を受けないように工夫している。

Fig.5 An illustration of experimental device

Fig.6 View of length perception experiment

Fig.7 Definition of stimuli lengths

3・2 実験方法

実験は、親指と四本指の間にステージを移動させ、図 7 のように呈示した 4 種類の長さを口頭で答えてもらい、呈示長さと回答した長さの違いについて調べる。五本指を用いた長さ知覚測定装置の性能を確かめるために、本実験では、親指の四本指の間に全て同じ長さを呈示し、30～100mm の範囲を 5mm 刻みで計 15 種類の長さをランダムに呈示する。

以下では、親指-人差し指間長さを TI、親指-中指間長さを TM、親指-薬指間長さを TR、親指-小指間長さを TL として示す。

3・3 実験手順

実験を始めるにあたり、予め定規に指を当て、長さと指の位置を確認してもらう。その後図 6 のように実験の準備をした後、実験を開始する。

被験者には、TI～TL に 15 種類の長さをランダムに呈示し、各指ごとの長さを答えてもらう。このとき被験者には、TI～TL の長さが同じであるということは全く伝えておらず、それぞれの長さについて 1mm の分解能で答えてもらう。15 種類の長さをそれぞれ 2 回ずつ計 30 回呈示する実験を 1 ブロックとし、休憩を入れながら、5 ブロック計 150 試行を被験者 1 名に対して行う。この結果 1 種類の長さについて被験者 1 名あたり 10 回の結果が得られることとなる。

4. 長さ知覚実験結果

被験者は 21～30 歳の健常男性 10 名であり、全員右利きで、実験も右手を対象に行った。被験者全員の呈示した長さに対して回答した長さを、各指間ごとに平均した結果を図 8 に示す。横軸が呈示した長さ、縦軸は被験者が回答した長さの平均値を取っており、図中の破線は、呈示した長さと同じ長さを回答した場合の値を示している。エラーバーは被験者ごとの標準偏差のばらつきである標準誤差の大きさを示している。図より、測定を行った範囲では、被験者は呈示された長さよりも短く感じていることがわかる。またこの傾向と破線からのずれは、TI～TL が同じ傾向を示していることから、指による誤差の違いはほとんどないと言える。

呈示した長さに対して被験者が短く感じる傾向については、王らが行った親指-人差し指-中指の知覚実験と同じである⁽⁶⁾。このことから被験者が呈示長さを短く感じるのは、把持する指の本数ではない別の理由であると考えられる。

さらに、知覚した長さの平均値と呈示した長さの差を知覚誤差(Perceptual error)と定義し、この値を縦軸に、横軸に呈示した長さをとって、図 9 に示す。図(a)は親指-人差し指間、図(b)は親指-中指間の結果である。どちらの

Fig. 8 Average of length perception between thumb and other four fingers

図においても呈示長さが 70mm のときに最も知覚誤差が大きく、約 10mm 生じている。また知覚誤差は、70mm 以下では呈示長さが小さいほど、70mm 以上では呈示長さが大きくなるほど、それぞれ小さくなることがわかる。この傾向は、TI, TM だけでなく TR, TL についても同様に見られた。

さらに、70mm 前後で知覚誤差の傾向に違いが見られることから、図 8 の TI と TM の測定結果を、呈示長さが 30~60mm の区間と 80~100mm の 2 区間に分けて別々に直線近似し、その傾きを被験者ごとに比較した。被験者 10 名(A~J)のそれぞれの傾きの値を表 3 に示す。傾きが 1 より小さいときには呈示長さを大きくしても被験者はその変化を小さく感じ、逆に傾きが 1 より大きいときには呈示長さの増加分以上に被験者は大きくなっていると感じることを意味している。表 3 より 30~60mm の区間では、傾きの値が 1 未満の被験者は 7 名であり、呈示長さの変化に対して被験者は小さく感じていることがわかる。60~100mm の区間では、1 名をのぞいて全ての被験者の傾きの値は 1 より大きく、呈示長さの変化以上に大きくなっていると感じていることがわかる。

70mm 前後で知覚誤差に大きな変化があることは、人間が手に力をできるだけ入れずに自然な状態にしたときの指の位置と大きな関係があると思われる。小さなものを把持する場合は、手の平側にある深指屈筋、浅指屈筋などが働き、逆に指を広げる場合には、総指伸筋などが使われる。このことから、指の位置によって使う筋肉が異なり、そのため長さ知覚の傾向が変化したと考えられる。図 8 の結果からみると、使われる筋肉が代わる境目が 70mm 程度だからだと考えられる。

Fig.9 Perceptual length error with thumb-index finger and thumb-middle finger

Table 3 Slope of all subject's actual and perceptual length with thumb and index finger at length range 30~60 and 80~100mm

Range Sub.	TI		TM	
	30-60mm	80-100mm	30-60mm	80-100mm
A	0.656	0.656	0.676	0.572
B	0.761	1.12	0.746	1.13
C	1.06	1.48	1.04	1.57
D	0.811	1.12	0.811	1.12
E	0.966	1.25	0.941	1.31
F	0.771	2.04	0.771	2.09
G	0.625	1.16	0.636	1.12
H	0.782	1.20	0.775	1.20
I	1.17	1.99	1.14	1.95
J	1.24	1.24	1.17	1.21
Average	0.884	1.326	0.871	1.33

5. 結 言

手の五本指を用いた長さ知覚特性を調べるために、初めて4軸制御コントローラを使用した4自由度長さ呈示装置を製作し、その性能評価を行った。五本指による把持動作の長さ知覚特性を検討するために、指の運動は親指を基準とした相対運動を対象とし、被験者ごとに異なる指の軌跡を考慮して軸の位置を変えることができる構造とした。予め五本同時に把持するときの指の軌跡を調べた結果、被験者ごとに軌跡が異なるものの、各指がほぼ直線上を移動することを確認し、1軸ステージによる長さ呈示の有効性を確かめた。

この装置を用いて、親指に対して同じ長さを各指に呈示したときの被験者の長さ知覚を調べたところ、どの指も実際の長さよりも小さめに感じ、その傾向はどの指も同じであることがわかった。さらに呈示長さが70mmのときに最も知覚誤差が大きく、把持動作時に使われる筋肉の違いが長さ知覚に大きく影響するという知見が得られた。

謝 辞

本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会「アジア・アフリカ学術基盤形成事業」及び文部科学省科研費（基盤研究（B）21404002）の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Intuitive Surgical, “Da Vinci Surgical System”, http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgicalsystm/index.aspx (accessed 2010-10-19)
- (2) Burke D, Gandevia SC, and Macefield G, “Responses to passive movement of receptors in joint, skin and muscle of the human hand”, *The Journal of Physiology* 402: (1988), pp.347–361.
- (3) Gaydos, H. F., “Sensitivity in the judgement of size by finger-span”, *American Journal of Psychology*. 71, 8(1958), pp.557–562.
- (4) Shengfu LU, Yoshiro SAKAI, and Jing-long WU, Masayuki YAMAMOTO, “Measurement and Analysis of the Object Length Perceptive Characteristics with Visual and Tactile Information for Proposal of Three-Dimension Tactile Shape Display”, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series C*, Vol.70, No.697 (2004), pp. 2699-2706.
- (5) Haibo WANG, Jinglong WU, and Masayuki KITAZAWA, “Difference of Human Tactile Length Perception between Two and Three Fingers Grasping”, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, Vol.76, No.764 (2010), pp. 936-941.
- (6) M.K. Burstedt, J.R. Flanagan, and R.S. Johansson, “Control of grasp stability in humans under different frictional conditions during multidigit manipulation”, *Journal of Neurophysiology*. 82 (1999), pp. 2393–2405.