二本と三本指の把持動作による長さ知覚の差異*

王 海波^{*1}, 呉 景 龍^{*2}, 北 澤 雅 之^{*3}Difference of Human Tactile Length Perception
Between Two and Three Fingers GraspingHaibo WANG, Jinglong WU^{*4} and Masayuki KITAZAWA^{*4} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

In order to improve the operation precision of the remote manipulation systems, it is necessary to clarify the human characteristic of length perception by using fingers. In previous studies, the length perception has not been investigated using multi-fingers grasping. Therefore, we developed a tactile length measuring system in this study. By using this system, some experiments were made to clarify the human length perception for fingers (thumb, index finger, middle finger). These results suggest that human tactile length perception in case of three fingers using is better than that of two fingers (thumb and index finger) condition.

Key Words: Biomechanics, Human Engineering, Man-Machine-Communication Tactile Length Perception, Multi-Fingers Grasping

1. 緒 言

遠隔操縦を行う場合、操作者は入力に対する遠隔地の出力をセンサーや視覚で観察し、修正量をフィードバックする。操作者の操作技術を遠隔地で活かすためには、人の知覚特性を考慮したマンマシン・インタフェースが必要となってくる。これの基礎となる人の知覚に関する研究、なかでも、長さ知覚に関する研究は盛んに行われてきた。D.Burke らの研究によると、指の把持動作による長さ知覚は関節、筋肉、皮膚の感覚から情報を得ているといわれている⁽¹⁾。そのため、大きな対象物を把持するときは指先間を大きく開き、小さな対象物を把持するときは小さくする。このとき、手の虫様筋、屈筋と伸縮筋等も活動しており⁽²⁾、触覚と運動感覚が同時に活動している。

呈示した長さと知覚した長さの比較についても、多くの研究がなされてきた。H.F.Gaydos は、長さ 25~100mm のアルミニウム円柱体を手で触れさせ、その長さを親指と人差し指で再現させる実験を行った⁽³⁾。A.G.Dietze は、厚さ 10, 30, 50mm の円柱体を標準刺激とし、長さ知覚閾値実験を行った⁽⁴⁾。呂らは、対象物の形状知覚機能を解明するため、親指と他の一本の指をランダムに選択し、その二本指を用いて長さ知覚特性実験を行った⁽⁵⁾。しかし、試験片を被験者の

手に持たせて測定を行ったため、得られた長さ知覚特性には試験片の重量感覚の要素も含まれている可能性がある。

また、K.O.Johnson and S.S.Hsiao は、人が物のサイズ、形状、材質などの表面性質を知覚する際、知覚情報は皮膚受容器から神経システムに伝達されることを報告している⁽⁶⁾。皮膚感覚は、人間の皮膚下に存在する四種類の皮膚受容器が皮膚の変形と皮膚に与えられた圧力を検出することによって生じる感覚である⁽⁷⁾。長さを知覚するとき、接触した表面の材質、硬さ、接触面積などの要素も長さ知覚に影響することは知られている⁽⁸⁾。これら諸要素の中で、S.Gepshtein&M.S.Banks の研究より、対象物の呈示方向が長さ知覚に影響しないことが明らかになっている⁽⁹⁾。さらに、L.J.Berryman らは親指と人差し指を用いた 50~62mm の範囲の実験において、指と接触した大きさと把持力が人間の長さ知覚に影響しないことを明らかにしている⁽¹⁰⁾。

以上のように、指の長さ知覚についての研究は二本指(ほとんどが親指と人差し指)に関するものであり、それら以外を用いた実験結果には、長さ以外の知覚特性が含まれている可能性がある。また人の動きを入力とするヒューマノイド型ロボット等では、計測された動きをそのまま伝えるため、指の種類や本数による感覚の差を伝達することができない。指の種類や本数による知覚特性が明らかになれば、人の感覚と一致したマンマシン・インタフェースの開発が可能となる。そこで、本研究では、指に長さ刺激のみを呈示する実験装置を製作し、二本指と三本指の把持動作による長さ知覚の差異について被験者実験を行う。その結果より、二本指と三本指の長さ知覚の差異を検討する。このと

* 原稿受付 2009 年 7 月 31 日。

^{*1} 岡山大学大学院自然科学研究科(☎ 700-8530 岡山市津島中 3-1-1)。^{*2} 正員、岡山大学大学院自然科学研究科。^{*3} 正員、和歌山工業高等専門学校(☎ 644-0023 御坊市名田町 野島 77)。

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

き、指先は必ず対象物と接触することから、皮膚感覚も長さ知覚に影響を与えると考えられる。そのため、実験装置の指先と接触する部分は、表面粗さや形状を考慮して、アクリル円板とした。また、文献⁽⁹⁾とは使用する指の本数などが異なるため、把持力についても計測した。

2. 実験方法

2.1 被験者 被験者は健康な21歳～30歳の男性10名(利き手は右手)。実験内容について十分な説明を行った後、被験者実験(右手を使用)を行った。10名被験者の中指の長さは73～82mmまで、平均79.3mmであり、人差し指の長さは67～76mmまで平均72.7mmである。

2.2 長さ呈示装置と実験環境 二本指把持動作による長さ呈示装置を図1に示す。二本指把持動作とは親指と人差し指または親指と中指を用いてものを把持することをいい、二本指で把持する部分の拡大図を図1(a)に示す。

Fig.1 Length perception device for two and three fingers experiments

各指が把持する部分には、接触したときの感覚を統一するために、アクリル円板を取り付けた。これらの

アクリル円板は、力センサー (Force Sensor 東京計器研究所CLS-NA 定格出力1mV/V $\pm$ 20%) が装着されたアルミ支持材にそれぞれ取り付けられており、各指が把持する力はこれらのセンサーによって計測し、コンピュータ (以下、PCと呼ぶ) に記録できるようになっている。親指が把持する側のアルミ支持材は固定されており、動くことはない。一方、人差し指または中指が把持する側のアルミ支持材は、移動台 (Moving Platform) に取り付けられており、図中の矢印方向に任意の距離だけ移動することができる。図中の点線は、移動後のアルミ支持材を表したものである。この移動台の移動量はPCからの指令により制御することができる。これにより、任意の長さを被験者の二本の指に呈示することが可能となっている。

一方、三本指把持動作とは、親指、人差し指および中指の三本指を用いてものを把持する動作をいう。三本指の把持動作による長さ知覚実験を行う場合は、図1(c)に示す把持部分を三本の指で把持する。二本指の把持部分と同じように、アクリル円板が装着されており、把持力はアルミ支持材に取り付けられている力センサーによって計測される。人差し指と中指が把持する側のアルミ支持材はそれぞれ異なる移動台に取り付けられているため、これらを独立して動かすことで三本の指先間に任意の二種類の長さ刺激を呈示することができるようになっている。

実験は十分静かな実験室で行い、被験者はアイマスクを着用した。そして、図1に示すように被験者と実験装置の間にカーテンを設置し、被験者が呈示装置を見ることができないように工夫した。また、図1に示すように、被験者には椅子に腰掛けた状態で背筋を伸ばすように指示し、肘関節角度が約90度になるように椅子の高さを調整した。被験者の手首をマジックバンドで固定し、腕が動かない状態で親指と人差し指が刺激呈示部と同じ高さになるように調整した。

2.3 実験の種類 長さ認知時に使用する指の本数の影響を調べるため、まず、二本指の間に長さを呈示する実験1と三本指を用いる実験2を用意した。これらの実験では一種類の長さ刺激を呈示する。その呈示方法を図2に示す。実験1は親指-人差し指間 (L_{TI} と定義する) と親指-中指間 (L_{TM} と定義する) に長さ刺激を呈示する。実験2は図2(a) ($T-IM$)に示すように、親指-人差し指間と親指-中指間に同じ長さ刺激 (L_{TM} と定義する) を呈示する。実験刺激は10～100mmまで5mm刻みの長さをランダムに呈示し、各長さに対して5回測定する。

次に、三本指で物を把持する際の知覚特性をさらに精査するため、図 2(b)に示すように二種類の長さ刺激を同時に呈示する実験も用意した(実験3)。親指-人差し指間に呈示した長さを L_{T-IM} 、親指-中指間に呈示した長さを L_{T-MM} と定義する。そして、二つの長さの差を ΔL と定義する。実験3では一つの刺激として10~100mmまで10mm刻みの長さを呈示し、それに対して2,4,6,8,10,12mmの差を持つ長さをもう一つの刺激としてランダムに呈示する。

(b) Two lengths perception experiment

Fig.2 One and two lengths perception experiment

2・4 実験手順 実験1については以下の手順で実験を行った。まず、実験刺激を呈示する前、被験者は自然状態で親指と人差し指(または中指)を開き、他の指も自然状態とする。次に、実験者が実験刺激の長さを設定し、被験者に実験開始を告げる。そして、被験者は親指と人差し指(または中指)で実験刺激を把持して、その長さを知覚する。知覚後、親指と人差し指(または中指)を実験刺激から離し、知覚された長さをmm単位で口頭で答える。このとき、実験者は被験者が回答した長さを記録する。実験内容を理解するとともに装置に慣れるため、被験者は実験開始前に数回の練習試行を行った。

実験2および3も実験を行う順序は実験1とほとんど同じであるため、ここでは、異なる部分のみ説明する。被験者は自然状態で親指、人差し指と中指を開き、他の指も自然状態とする。実験刺激の長さ L_{T-IM} (実験3では $L_{T-IM(I)}$ と $L_{T-MM(I)}$)を設定後、実験を開始する。被験者は親指、人差し指と中指を用いて呈示刺激を把持し、その長さを知覚する。知覚後、各指を実験刺激から離し、知覚された長さ L_{T-IM} (実験3では $L_{T-IM(I)}$ と $L_{T-MM(I)}$ の二つ)をmm単位で答える。

3. 実験結果

3・1 一種類の長さ知覚結果(実験1と2) 親指と

人差し指、親指と中指を用いた実験結果、また、三本指を用いた実験2の結果を図3に示す。いずれも横軸は実際に呈示した長さを示し、縦軸は被験者の知覚した長さを示す。図中の45度の点線は呈示した実際長さが被験者を知覚した長さとは一致する場合を意味している。図中のプロット点は被験者10名の平均値である。

Fig.3 Average of one length perception with two and three fingers

図3において、二本指の結果は全体的に呈示した実際長さが長くなると、被験者が知覚した長さも長くなる傾向が見られる。また、知覚された長さはすべて45度直線より下方に位置することから、知覚された長さは実際長さより短く知覚されている。三本指の場合も二本指の結果と同様に呈示長さが長くなると、被験者が知覚した長さも長くなる傾向が見られる。また、呈示長さ100mmの条件を除き、知覚された長さは二本指の結果と同様に呈示された長さより短く知覚される結果が得られた。

呈示した長さと知覚誤差の関係(被験者10名の平均値)を図4に示す。知覚誤差とは被験者が知覚した長さと呈示長さの差を意味し、式(1)のように定義する。

$$PE = PL - AL \quad (1)$$

式中のPE(Perceptual Error)は知覚誤差、PL(Perceptual Length)は知覚した長さ、AL(Actual Length)は実際に呈示した長さを示す。図中の菱形印(◆)と三角形印(▲)は、それぞれ実験1の親指-人差し指間(T-I)と親指-中指間(T-M)の知覚誤差を示し、正方形印(□)は実験2の親指-人差し指・中指間(T-IM)の三本指を用いたときの知覚誤差を示している。この図より、実験2の100mm刺激の結果を除き、各実験の知覚誤差は0以下であり、呈示長さを過小評価している。

Fig.4 Experimental results of two and three fingers' grasping for one length perception experiment

3・2 把持力の計測結果 図5に親指と人差し指による長さ知覚実験(T-I)と親指,人差し指,中指による長さ知覚実験(T-IM)の親指の平均把持力を示す。横軸は呈示長さであり,縦軸は,長さ刺激が呈示されたときに,被験者がそれを把持している力である。図より,両者の平均把持力がほぼ同じ傾向を示していることが分かる。

Fig.5 Finger force of two and three fingers' grasping for one length perception experiment

3・3 二種類の長さ知覚結果 (実験3) 三本指による二種類の長さ知覚実験の結果を図6, 7に示す。図6は呈示した二種類の長さが $L_{T-IM(I)} < L_{T-IM(M)}$ の場合である。一方,図7は $L_{T-IM(I)} > L_{T-IM(M)}$ の場合である。これらにおいて,横軸は呈示長さ(図中の点線で囲んだ指間に呈示した長さ),縦軸は知覚した長さを表す。このとき,呈示した二種類の長さの差を ΔL とし,式(2)のように定義する。式中の $L_{T-IM(I)}$ は親指-人差し指間に呈示した長さ, $L_{T-IM(M)}$ は親指-中指間に呈示した長さを表す。

$$\Delta L = L_{T-IM(I)} - L_{T-IM(M)} \quad (2)$$

Fig.6 Results of two lengths perception when $L_{T-IM(I)} < L_{T-IM(M)}$

Fig.7 Results of two lengths perception when $L_{T-IM(I)} > L_{T-IM(M)}$

図6, 7より,呈示長さが長くなると,被験者が知覚した長さも長くなる傾向が見られる。しかし,知覚した長さが図中の45度直線より下に位置することから,呈示した実際の長さより短く知覚される傾向が見られた。

$$\Delta L' = L'_{T-IM(I)} - L'_{T-IM(M)} \quad (3)$$

(a) Two lengths perception's difference for condition $L_{T-IM(I)} < L_{T-IM(M)}$

(b) Two lengths perception's difference for condition $L_{T-IM(I)} > L_{T-IM(M)}$

Fig.8 Perception difference of two lengths with three fingers

知覚された二種類の長さの差について検討するため、それらの差を式(3)のように定義する。ここで、 $L'_{T-IM(I)}$ は被験者が知覚した親指一人差し指間の長さである。三本指に二種類の長さを呈示したとき、知覚した両者の差 $\Delta L'$ を図8に示す。横軸は実際に呈示した長さを表し、縦軸は被験者が知覚した二種類の長さの差 $\Delta L'$ を表す。図9に呈示した二種類の長さの差と知覚された長さの差の関係(平均値と分散)を示す。この図より、呈示した二種類の長さの差 ΔL が大きくなると($\Delta L=6\text{mm}$ 場合を除く)、知覚されている長さの差 $\Delta L'$ のばらつきが大きくなることが分かる。

Fig.9 Average difference of two lengths perception with three fingers

4. 考察

4・1 二本指による長さ知覚 実験1の結果(図3)より、10~100mmの呈示長さ範囲において、呈示さ

れた長さより短く知覚される傾向がある。そして、両者の差が最大になるのは用いる指に関係なく呈示長さが50~80mmのときであり、それ以上の長さを呈示した場合は両者の差は小さくなっていく。これらのことから、呈示長さに対する指の知覚精度が一定でないことが考えられる。

また、図5(図中の菱形印($\blacklozenge$))に示すように、呈示長さが増加しても把持力はほぼ一定の値を示している。特に、長さ知覚誤差の大きい50~80mmの範囲においても把持力の顕著な変化は見られない。以上のことから、文献⁽¹⁰⁾で報告されているように、把持力は二本指による長さ知覚に影響を与えないことが確認できた。

4・2 三本指による一種類の長さ知覚 図4に示すように、三本指で一種類の長さを知覚する場合、全体として二本指の場合と同じく、呈示された長さより短く知覚される傾向がある。呈示長さが50mmを超えると、三本指の方が二本指より知覚誤差が小さくなっている。そこで、呈示長さの範囲を分割して、多重比較を行った。その結果、10~55mmの長さ範囲では、二本指と三本指の知覚結果の間に有意な差が見られなかった。しかし、60~70mmの長さ範囲では二本指(親指一人差し指)と三本指の知覚結果の間に有意な差が見られた($p<0.05$)。また、80~100mmの長さ範囲では二本指(親指一中指)と三本指の知覚結果の間にも有意な差が見られた($p<0.05$)。以上のことから、60~100mmの長さ範囲において三本指のほうが二本指より長さに関する知覚精度が高いといえる。三本指と二本指の長さを知覚する際の指の動きを比較すると、中指の付け根の関節(中手指節間関節)の動きが付加され、三本指の場合は二本指の場合より広い面積の運動野で伝達された情報が処理されるため、知覚された結果の精度が高くなると考えられる。

また、図4から、指の本数に関係なく呈示長さが50~80mmのときに長さ知覚精度が最も悪くなっていることが分かる。これらの長さは、把持できる最大長さ(親指一人差し指間であれば120mm程度、親指一中指間であれば150mm程度)の半分となっている。指の付け根にある関節(中手指節間関節)が屈曲・伸展する場合、指の可動範囲は最小値・最大値となり、この関節に関係する筋肉の動きは大きく、脳に伝達される情報量は多くなる。一方、指の稼動範囲が50%程度の場合は、指は自然の状態に近く、脳に伝達される情報量は少なくなる。そのため、指の可動範囲の50%程度の長さに対して最も長さ知覚精度が悪くなると考えられる。

5. 結 言

把持力に関して、文献⁽¹⁰⁾では、50, 53, 56, 59, 62mmの長さ刺激を250g, 500g, 750gといった異なる把持力を用いて知覚する実験を行っている。その結果、異なる把持力を用いて長さを知覚しても、知覚された長さ間に有意な差がないことが分かっている。図5に示すように、二本指と三本指の把持力は呈示長さに関係なくほぼ一定であり、上述したようにこのときの長さ知覚精度は一定でない。また、両者の平均把持力を分散分析した結果、二本指と三本指の把持力には有意な差が見られなかった。これらのことから、文献⁽¹⁰⁾と同様に、三本指の場合でも把持力と長さ知覚精度の間には有意な関係がないと考えられる。

4・3 三本指による二種類の長さ知覚 三本指を用いた二種類の長さ知覚実験では、親指一人差し指間に呈示した長さが親指一中指間に呈示した長さより短い場合($L_{T(M)} < L_{T(M)}^{(M)}$)と逆に長い場合($L_{T(M)} > L_{T(M)}^{(M)}$)の条件で測定を行った。いずれの条件においても、呈示長さより短く知覚される傾向があった。この傾向は二本指や三本指を用いた一種類の長さ知覚実験においても確認されているため、指の本数や呈示長さの種類には無関係な傾向であると考えられる。

一種類の長さ知覚(実験1, 2図3)と二種類の長さ知覚(図6, 7)について比較する。いずれの場合も10~50mmの呈示長さ範囲における知覚誤差は、呈示長さが長くなるにつれて大きくなっている。一方、60~100mmの呈示長さ範囲では、一種類の長さを呈示した場合の知覚誤差は呈示長さが長くなるにつれて減少している。図3において、呈示した実際長さが100mmのときにはほぼ100mmと知覚されており、知覚誤差はほとんどない。しかし、二種類の長さを呈示した場合の知覚誤差はほとんど変化しなかった。図6, 7において、実際長さが70~100mmのとき知覚誤差はほぼ20mm程度である。このことから、知覚誤差は、知覚すべき長さの種類と情報を収集する指の数に左右されることが推測できる。

呈示された二種類の長さの差に関する知覚(図9参照)では、呈示した二種類の長さの差 ΔL が6mmを境としてほぼ同じ傾向を示している。しかし、それらの分散は異なる。例えば、 $\Delta L=6$ のとき $L_{T(M)} < L_{T(M)}^{(M)}$ の分散は0.93であり、 $L_{T(M)} > L_{T(M)}^{(M)}$ の分散は2.10である。このように、 $L_{T(M)} < L_{T(M)}^{(M)}$ の方が $L_{T(M)} > L_{T(M)}^{(M)}$ より分散は小さい。これは、親指一人差し指間より親指一中指間の長さが手の骨格構造上長いことから、 $L_{T(M)} < L_{T(M)}^{(M)}$ の条件で長さを知覚してきた経験が多いため、分散が小さくなったと考えられる。

本研究では、二本と三本指の把持動作による長さ知覚の差異を検討するため、任意の長さの呈示ができる実験装置を製作した。製作した実験装置を用いて親指と人差し指および親指と中指による一種類の長さ知覚実験(実験1)、三本指による一種類の長さ知覚実験(実験2)、三本指による二種類の長さ知覚実験(実験3)を実施した。

実験1の結果より、親指一人差し指間と親指一中指間の長さ知覚精度には差異がないことが分かった。しかし実験3の結果より、これらの指間に同時に二種類の長さを呈示した場合は、 $L_{T(M)} < L_{T(M)}^{(M)}$ の方が知覚誤差の分散が手の骨格構造上小さくなることが分かった。三本指(親指と人差し指・中指)を用いて一種類の長さ知覚をした場合(実験2)、二本の指(実験1)と比較すると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が分かった。さらに、三本指を用いた場合でも把持力は長さ知覚に影響を与えないことが明らかになった。このことから、長さ知覚の精度は、呈示される長さの種類と情報を収集する指の数に左右されることが推測できる。

文 献

- (1) 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: 347-361, 1988.
- (2) K. T. Johnl, A. W. Goodwin and I. Darian-Smith, Tactile discrimination of thickness. *Experimental Brain Research*, 62-68, 1989
- (3) GAYDOS, H. F, Sensitivity in the judgement of size by fingerspan, *American Journal of Psychology*, 71, 557-562, 1958.
- (4) DIETZE, A. G. Kinaesthetic discrimination: the difference limen for finger span, *Journal of Psychology*, 51, 165-168, 1961.
- (5) LU Shengfu, SAKAI Yoshiro, WU Jing-long, YAMAMOTO Masayuki, 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. C*, Vol.70, No.697 pp. 2699-2706(2004)
- (6) Johnson KO and Hsiao SS, Neural mechanisms of tactual form and texture perception, *Annual Review of Neuroscience* 15: 227-250, 1992.
- (7) Westling G and Johansson RS, Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans. *Experimental Brain Research*, 128-140, 1987
- (8) Loomis, J.M. and Lederman, S.J. CHAPTER 31 Tactual perception. *Handbook of Perception and Human Performance*, vol 2, pp. 1-41. New York: Wiley. 1986
- (9) Gepstein S and Banks MS, Viewing geometry determines how vision and haptics combine in size perception, *Current Biology* 13: 483-488, 2003.
- (10) L. J. Berryman, J. M. Yau and S. S. Hsiao, Representation of Object Size in the Somatosensory System, *Journal of Neurophysiology* 96:27-39, 2006.