

修士論文

触運動覚による指先移動量の知覚

指導教員 野村由司彦 教授



平成 25 年度

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

412M106 岩部和樹

目次

内容

第1章. 前書き	3
1.1. 本研究の背景	3
第2章. 従来の研究のまとめと本研究の方向	4
2.1. 従来研究のまとめ	4
2.2. 本研究の方針	8
第3章. 予備実験:因子抽出実験(知覚特性をモデル化するためのパラメータを抽出する実験)	9
3.1. 実験概要	9
3.2. 実験装置	12
3.3. 実験条件	16
3.4. 実験方法	19
3.5. 実験結果	21
3.6. 考察	30
第4章. 因子効果評価実験(知覚特性をモデル化するための実験)	32
4.1. 実験条件	32
4.2. 実験方法	34
4.3. 実験結果	36
4.4. 考察	42
4.5. モデル化	44
4.5.1. 知覚長さのモデル化	44
4.5.2. 知覚角度のモデル化	45
第5章. 確認実験:知覚モデル有効性確認実験	47
5.1. 概要	47
5.2. 実験条件	47
5.3. 実験装置	49
5.4. 実験の流れ	50
5.5. 実験結果, および考察	52
第6章. まとめ	55
参考文献	56
謝辞	58
付録	59

第1章. 前書き

1.1.本研究の背景

人は主に視覚を通じて外界からの取得している．そのため，視覚に障害を持つと，外界の情報取得が制限され，日常生活で活動する際，不自由を余儀なくされてしまう．このような日常生活における不自由の解消，低減を目的として，駅や公共機関，施設などでは音声信号機や誘導ブロック，スロープの設置など，整備が進んでいる．研究面では，本来，視覚を通じて得られる文字や図形などを聴覚または触覚など，視覚以外の感覚系を通じて伝達できるような感覚代行装置の開発も進められてきた．触覚は，皮膚感覚（cutaneous sensation）を指す狭義の触覚から，身体動作感覚（固有感覚，proprioceptive sensation とよぶ）も含めた広義の触覚まで，その定義の範囲は広い．すなわち，指で物に触れたとき，接触している指腹部などの皮膚表面では，接触覚，滑り覚，圧覚，振動覚，さらには温冷覚や痛覚など，さまざまな感覚を知覚することができる．このような知覚は，皮膚感覚による触覚（tactile perception）といわれている．この皮膚感覚以外にも，固有感覚，すなわち関節の感覚や，指・手・腕などの運動器官を動作させる筋肉の感覚も重要な役割を果たしている．この固有感覚のみを用いた知覚は運動知覚（kinesthetic perception）といわれている．また，各種の皮膚感覚と固有感覚の両者を統合した知覚は，触運動知覚（haptic perception）といわれている．

わが研究室では，これまで，触覚による呈示で，目的地までの道のりを視覚障害者に案内して，視覚障害者が介助者による手助けなしで目的地まで行くことを支援するための装置の研究を進めてきた．その一環として，平面に指先を押し当てた状態で指先を滑らせたとき，滑り長さが指先の皮膚感覚でどのように知覚されるかについて，様々な条件の下で心理物理実験を行ってきた．また，得られた人の知覚特性をもとに，滑り量の知覚誤差に補正を与えるような線形モデル式を考察した．これは，例えば，タッチスクリーン等を利用し目的地までの道のりなどを把握する際に，その人達の指先の滑り量の知覚特性ごとに，装置が示す道のりの長さを補正し，目的地までの距離の感覚を掴める装置である．今後，視覚障害者のスマートフォンやタブレットなどのタッチスクリーンの利用者数がますます増大する中で，タッチスクリーンの操作性や触覚の感覚など様々な問題が考えられる．そこで，この様な個人の知覚特性を踏まえれば，眼が見えなくても晴眼者と同等な操作性を得られるのではないかと考えている．本論文はその結果をまとめたものである．

第2章. 従来の研究のまとめと本研究の方向

2.1. 従来研究のまとめ

触覚(haptic perception)による線分の長さの知覚のモードは、大まかには、二つの視点から分類できる。第一の分類の視点は、用いる感覚器の種類である。すなわち、用いる感覚器は、

- (1) 指先の指腹部を用いる皮膚感覚 (cutaneous sensation) (実験では主に人差し指(示指)が用いられることが多い)
- (2) 関節と筋肉の状態(joint totation and mustle expansion and contraction)の受容器による身体動作感覚 (固有感覚, proprioceptive sensation),
- (3) 各種の皮膚感覚と固有感覚の両者を統融合した触運動知覚 (Combined perception). の三つに分類できる。

さらに、線分の知覚という観点では、皮膚感覚 (cutaneous sensation) においては、隆点、隆縁、溝などの表面の凹凸に対する圧覚と、指腹部表面と対象物体表面との相対的な滑りに関する滑り覚(slip sense)が重要である。前者からは輪郭の方向の情報を得ることができる。後者からは滑り速度、ひいてはその積分値として長さの情報を得ることができる。

これは、線分の知覚は、時々刻々、指先で知覚した微小な滑り量を累積するような形で、すなわち滑り速さを時間について積分するような形で、知覚しているものと考えられる。ここで、この微小な滑り量、すなわち滑り速さであるが、平面の場合には、滑りに伴って発生する自励振動の周波数や振幅、さらにはせん断ひずみなど、指腹部にある多様な皮膚感覚からの情報を統合して知覚しているものと思われる。しかし、これらの情報は指の押付力、指と平面との動摩擦係数などの要因にも影響されることから、滑り長さの知覚は滑り速さの一価関数にはなりえない。もし、純粋な平面ではなく、釣鐘形状に浮彫り加工した凹凸面を滑らせた場合には、滑りはどのように知覚されるのか?凹凸面の場合、知覚した振動の周波数と経過時間(duration time)とを加味することにより滑り覚(slip sense)をより正確に知覚でき、滑り長さもある程度の精度で知覚できるものと期待される。加えて、滑りに際して、「凹凸により局所的に変形している領域が移動している」と感じるような形の“接触点運動知覚”も生じ、これも滑り長さの知覚に大きく寄与すると考えられる。

また、身体動作感覚 (proprioceptive sensation) においては、手先や指先などの効果器(end effector)とそれらが触れている対象物体との間の相互作用としての指・手首・前腕・上腕・肩などの上半身の関節を駆動する筋肉の力覚、およびそれらの関節の回転角度の感

覚が重要である。前者を通して、力覚フィードバックシステムから輪郭の方向の情報を得ることができる。また、後者からは輪郭追跡時の時々刻々の関節角度の情報の積分値として、輪郭の軌跡（長さも含む）の情報を得ることができる。

第二の分類の視点は、被験者と外界（輪郭呈示物体や力覚フィードバックシステムなど）との間の主導権(initiative)の方向性である。すなわち、主導権(initiative)の方向性は、

(1)受動 (passive touch)

(2)能動 (active touch)

の二つに分類できる。

受動 (passive touch)においては、被験者は自らの意思とは無関係に外界から一方的に情報を送られ、送られた情報に基づいて輪郭の形状を推定する。

一方、能動 (active touch)においては、被験者は自らの意思に基づいて探索を行い、その結果として獲得した情報に基づいて輪郭の形状を推定するものである。

触覚による線分の長さの知覚のモードは、したがって、これらの二つの視点の積事象としてとらえることができる。すなわち、皮膚感覚 (cutaneous sensation) については受動 (passive touch)しか考えられないことに注意すると、

CuPa (cutaneous passive)

PrPa (proprioceptive passive)

CoPa (combined passive)

PrAc (proprioceptive active)

CoAc (combined active)

の5つのモードに分類できる。

次に、これら5つのモードについて従来の研究を概観する。

まず、触覚(haptic perception)による線分の知覚の研究は、歴史的に見て研究の初期段階では、Raised dots/ Raised edge/ Raised figure/ Slot/ Ditch/ Rod などの物理的な長さを有する物体を用い、これをなぞる(touch and slide)ことから始まっている。そのため、CoAc (combined active)のモードをベースとして、線分知覚特性の研究は数多くなされてきた。すなわち、長さについては、多くの条件で縮減効果が認められているが、特に、運動速度増大に伴う縮減増大効果 (1986, B. L. Whitsel, 1988, M. Hollins) は重要である[1]。

また、身体との相対位置による位置の知覚の歪みについても、前額平行面(frontal parallel plane)に対する方向の違いによる縮減効果の異方性として、多く研究されている (1968, Cheng, 1970, Day) [2][3]。さらに、同異方性の要因についても研究されており、

多くは腕の動作の半径方向（回内/回外）と接線方向（屈曲/伸展）とで腕の慣性の違いにあると言われているが、負荷実験によりその影響がほとんど見られないとの指摘（1983, Marchetti & Lederman）もある[4].

また、同じく要因として、経過時間(duration time)の影響の重要性についても指摘(1999, Laura Armstrong) されている[5]. 運動速度が等しいという条件下では、線分が長いほど経過時間(duration time)も大きくなるのは当然のことであり、経過時間(duration time)が重要な情報源となっていることは言うまでもない. これらの他にも経過時間(duration time)の増大が影響していると思われるが、迂回路経由時の両端点間距離の過大評価(1985, Lederman)(Exp Brain Res (2003) 152:1661663) 152:16Faineteau aiEdouard Gentaz entaz GViviani, The kinaesthetic perception of Euclidean distance: a study of the detour effect) についても研究されている[6][7].

方向に関しては、(1936, Blumenfeld) は身体に近いほど平行判断誤差が増大する傾向、方向知覚には、斜め条件での誤差増大傾向(oblique effect) (1980, Lechelt & Verenka) が報告されている[8][9].

文字認識についてもよく調べられてきた. 例えば、(1974 J.M.Loomis) は CuPa (cutaneous passive)モードにおいて、2次元パターンとしてではなく、1次元パターンを走査する形で呈示することが効果的であるとの知見を示した[10]. また、(1991, F. Vega-Bermudez et al.)は実験条件によりいずれのモードでも文字の識別性能には有意差は認められないと報告している[11].

受動 (passive touch) と能動 (active touch)による知覚特性の違いについては、前額平行面に対する方向の誤差が調べられており、能動 (active touch)は 3.4c であり、受動 (passive touch)の 4.9a に比して、65%まで低減するとの報告がある.

近年においては、電動直動駆動ステージや力覚フィードバックシステムなどの機械システムを活用して、触覚(haptic perception)により線分の長さ知覚特性について研究されるようになってきた. 2006 年には、Pierre Wydood が、力覚フィードバックシステム Phantom を用いて、PrPa (proprioceptive passive)と PrAc (proprioceptive active)について調査した[12]. その結果、前者では長さを過大評価し、後者では過小評価するとの、興味深い結果を報告している. ただし、後者では fully tracted の条件が考慮されているにもかかわらず、前者では抵抗力を付与する条件のみが調べられ、むしろ一般的と思われる、free active の条件が調べられていない点で、研究の余地が残っていた. また、測定条件は断片的である点も引き続き研究の余地が残っている.

同年には、寺田らも、電動直動駆動ステージを用いて、受動 (passive touch)に関わる 3 モード、すなわち CuPa (cutaneous passive), PrPa (proprioceptive passive), CoPa (combined passive)について、長さ・速度をパラメータとした長さ知覚特性について、調査している[13].寺田らによる CoPa, PrPa, CuPa では、(1986 Whitsel),と(1988 Hollins)と同様に速度による縮減効果が見られたが、その程度は小さな結果が得られた. さらには、CoAc

(combined active)モードの知覚メカニズムについても研究を進め,Co と Pr, 複数の情報の融合が Maximum Operator (最大演算子) によってなされているとの興味深い知見を与えた。

直近では, (2011 Wouter)が, 左右方向で長さ 10 c m だけという限られた条件下ではあるが, 電動直動駆動ステージを用いて, 感覚器利用モードの 3 種すべての受動 (passive touch)について, すなわち CuPa (cutaneous passive), PrPa (proprioceptive passive), CoPa (combined passive)について, 知覚特性を比較検討した. その結果, 知覚誤差は CuPa<PrPa ≒CoPa, すなわち CuPa みが顕著に悪いこと, CoPa において, Pr が支配的であろうことを示唆する結果を報告している。

以上を概観すると, 触覚(haptic perception)による線分知覚の研究は, 2000 年以前までは CoAc (combined active)モードをベースとしてヒトの長さ知覚特性が詳細に調べられてきた. その後, 2000 年以降では機械式アクチュエータが導入されて, 受動 (passive touch)モードが扱われるようになり, 従来の PrAc, CoAc とは異なる切り口, すなわち CuPa, PrPa, CoPa モードでのヒトの長さ知覚特性が調べられるようになってきた. しかし, それらの研究の多くは, 左右方向で長さ 10 c m だけという条件に限られていた. 視覚障害者の図形認識を支援するシステムを開発するためには, 多様な方向, 多様な長さをカバーした, より一般的な条件下で特性を確認する必要がある。

表 1 従来研究の分類

Classification of haptic perception modes for lines in 2D space					letter recognition	Reformed by Terada																letter recognition																								
Physical quantity to be perceived	Employed information (Temporal response)	Sense		Physical condition	Subject's initiative in exploration	Mode	1936	1970	1971	1974	1980	1983	1983	1986	1988	1991	1999	2000	2003	2006	2011	2013																								
Tracing direction	Static response at the tracing point	Major division	Minor division	Surface	External force	Mode	Blumenthal	Day and Avery	Day, Wong and Brooks	Loxton	Lechelt & Verenik	Marchetti & Lederman	Lederman, Klatzky, Barber	Whitell	Hollnagel and Goble	Vega-Bermudez et al.	Armstrong & Marks	Haggard et al.	Fainstien et al.	Wybicki et al.	Terada et al.	Bergmann et al.	Nomura and Nishio et al.																							
		Cutaneous	Touch (together with)	Raised dots	irrelevance	passive	CoPa																																							
		Proprioceptive (joint and muscle)	2D force	Raised edge	irrelevance	passive	PrPa																	O																						
		Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	active	PrAc																O																						
							passive	CoPa																		O																				
Traced line length from starting to end points	Integration of dynamic tracing response	Cutaneous	Sig.(2D velocity)	Plane	irrelevance	passive	CoPa	brush was swept	Fully	passive	(proprioceptive passive), PrPa	(proprioceptive passive), PrAc	(proprioceptive active), CoPa	Embossed	raised lines or solid blocks	Dish	O	O/x	O/x	O/x	O/x	O	O	O																						
																									Proprioceptive (joint rotation and muscle expansion and acceleration)	2D position and force	Reactions	force in the traveling	active	CoAc																
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															
Euclidean distance between the starting and end points	Static placement responses at both end points	Proprioceptive (joint rotation and muscle expansion)	2D kinesthetic position	Plane	irrelevance	passive	PrPa	Skt	Raised edge	Vibrotactile dots	Rod	Raised dot	Rod	Embossed	raised lines or solid blocks	Dish	O	O	O	O	O	O	O	O																						
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															
																									Combined	Combined	Plane	Reactions	force in the traveling	passive	CoPa															

2.2. 本研究の方針

わが研究室ではこれまで、このような動機の下、従来のような隆線などの物体ベースでなく、Phantom を用いて力覚フィードバック FBS(feedback system)をベースとした心理物理実験により PrPa, CoPa, PrAc, CoAc を加えた 4 つのモードにおける長さの知覚特性を調査した結果をまとめている[14]. また, Phantom では特性を確認出来なかった CuPa に関しては, 新たに電動直動駆動アクチュエータを用い同様に知覚特性を調査している.

本論文においては, 電動直動駆動アクチュエータを 2 次元で用い, Phantom では制限されていた長さの呈示範囲をより拡大した条件で実験を行った. また, 試験面の凹凸の圧覚による知覚特性の影響, 身体との相対位置による位置の知覚の歪みについても, 同様に調査した. すなわち, PrPa, CoPa の 2 モードにおける長さ知覚特性, 角度知覚特性をより広範囲に, 対長さ, 対方向, 対速度など, 多様な条件で包括的に心理物理実験により調査した知覚特性実験の結果をまとめた.

また, これら知覚特性を得られた人の知覚特性をもとに, 滑り量の知覚誤差に補正を与える線形モデル式を考察した. その後, 電動直動駆動アクチュエータを用い, 折れ線線画を複数呈示する条件で, 線形モデル式と実際の知覚特性の整合性の確認実験を心理物理実験によりまとめた.

第3章. 予備実験:因子抽出実験(知覚特性をモデル化するためのパラメータを抽出する実験)

3.1. 実験概要

本実験の目的は、線形モデル式作成のため、ヒトの知覚特性を調査することである。そのために、知覚特性に影響を与えると予測される因子の網羅的な調査が必要となる。また、それによる実験時間の増加、といった課題がある。

1つ目の課題である、知覚特性に影響を与えると予測される因子の網羅的な調査、については、2章で述べている様々な要因を幅広く取り入れ、最適条件となる制御因子、特性条件となる信号因子、実験結果のばらつき原因の条件となる誤差因子の、3つの因子に分けて選定しこれら因子の水準を決定した。その中で、影響を及ぼす因子、そうでないものを予備実験において評価を行い、取捨選択した因子を因子効果評価実験で用いることにした。以上の考えから、選定した因子を表2にまとめる。

表2 因子の分類

制御因子	信号因子	誤差因子
感覚	提示長さ	被験者
試験面	提示角度	
	伸展	
	旋回	
	速度	

制御因子に関しては、実験に用いる感覚器で因子を試験面、感覚の2つを因子として設定した。

皮膚感覚に関しては、

触運動知覚 (Combined perception)

身体動作感覚 (固有感覚, proprioceptive sensation) ,

の2つを水準として設定した。また、今後の研究が期待されるスタイラスを用いた線画提示装置などの開発に有効であると考え、スタイラスの知覚特性も調査した。まとめると、皮膚感覚においては、

示指+身体動作感覚、

スタイラス+身体動作感覚、

を設定したことになる。

また、試験面に関しては、圧覚と、滑り覚の重要性を考え、

平面(flat)、

凸格子面(grating space)、

の2つを水準として設定した。

手の可動範囲を考慮して、試験面は、横 350mm、縦 550mm とした。また、実際に使用されている点字のサイズに合わせて、凸格子面の高さは 0.4mm、直径は 1.5mm とした。格子間隔は点字の点間距離内に収まる 3mm 基準で設計した。実際の実験では、格子間隔は、6mm、12mm、24mm の三種類を使用した。すなわち、試験面に関しては、平面と格子面 3 種類の計 4 水準を設定した。

信号因子に関しては、実験で提示する長さ、角度、速度の 3 つ、また、身体との相対位置による位置の知覚の歪みとして、腕の動作の半径方向（旋回）、接線方向（伸展）の 2 つ、計 5 つを設定した。

これらの水準は、

長さに関しては、25mm、50mm、75mm、100mm、125mm、150mm の 6 水準、

角度に関しては、直交座標系の水平方向に右の方向を正の向きにして反時計回りに、0、30、60、90、120、150、180、210、240、270、300、330 度の 12 水準、

速度に関しては、13mm/s、50mm/s、200mm/s の 3 水準を設定した。

腕の旋回に関しては、前額平行面の矢状面を 0 度として、反時計回りに、-45、0、45 の 3 水準設定した。

腕の伸展に関しては、実験時の初期位置を 150mm、225mm、400mm の 3 水準を設定した。

誤差因子に関しては、被験者のみを設定した。

以上の因子、水準をまとめたものを図 1 に示す。

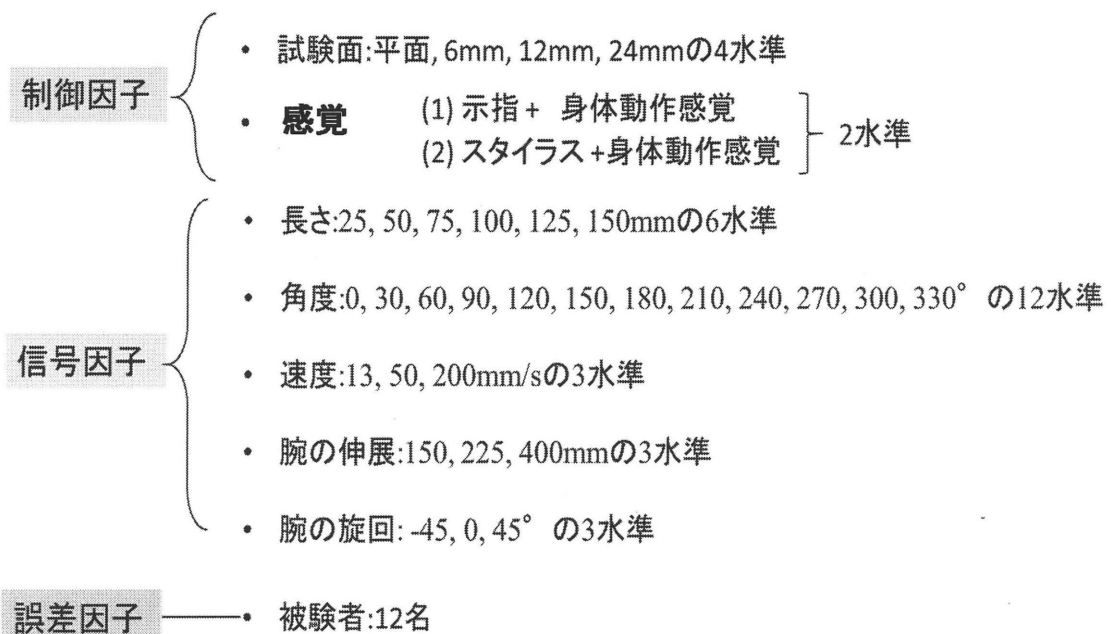


図 1 因子-水準まとめ (予備実験)

2つ目の課題である、網羅的に実験を行うことによる実験時間の増加に関しては、直交表を用い各因子の水準を組み合わせることにより、実験数を少なくすることで解決した。すなわち、実験計画法における、1セット144回の1因子12水準、5因子6水準、1因子4水準、7因子3水準、76因子2水準に対する L_{144} 直交表を利用して、各因子の水準を組合せた実験条件を設定した。さらに、各被験者に対して、上記の144条件を2セット、計3456 (=144回/セット×2セット/人×12人) で、予備実験を実施した。

3.2. 実験装置

実験装置の全体図を図2に示す．大きく分けて4つのデバイスで構成されている．

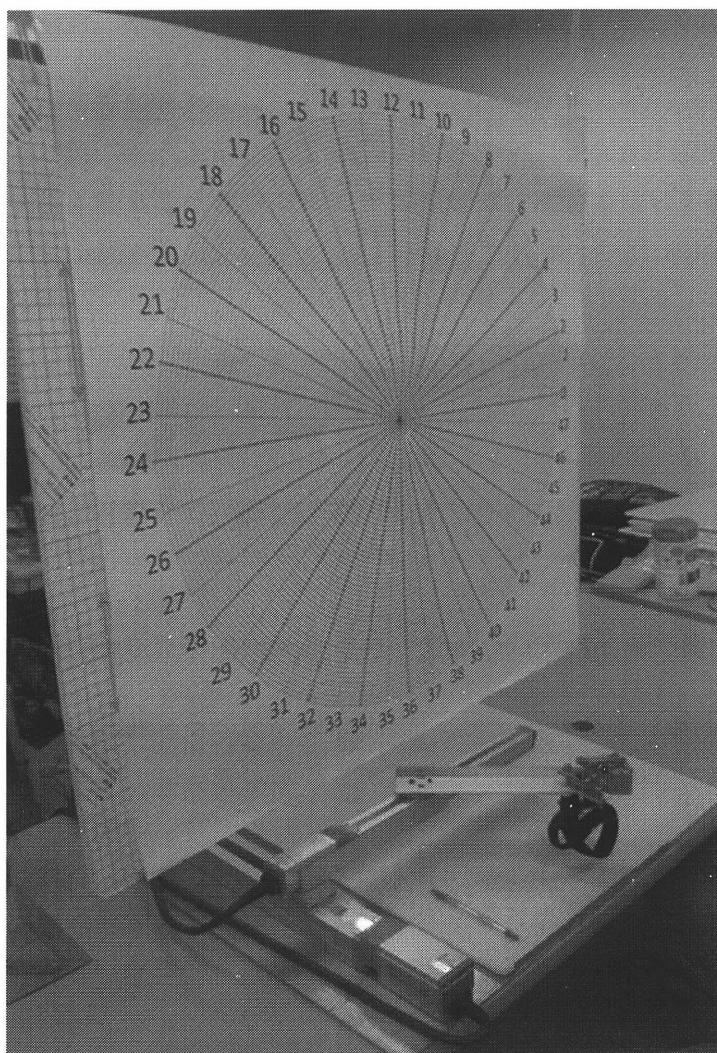


図2 実験装置全体図

3.2.1 直動型駆動アクチュエータ

実験では、直動型アクチュエータ(IAI-ICSA シリーズ)を直交して連結し、被験者の指先を2次元的に動かせるようにした。

短軸側の滑り子には、治具を介して、指先を誘導するための手拘束バンドが取り付けられている。

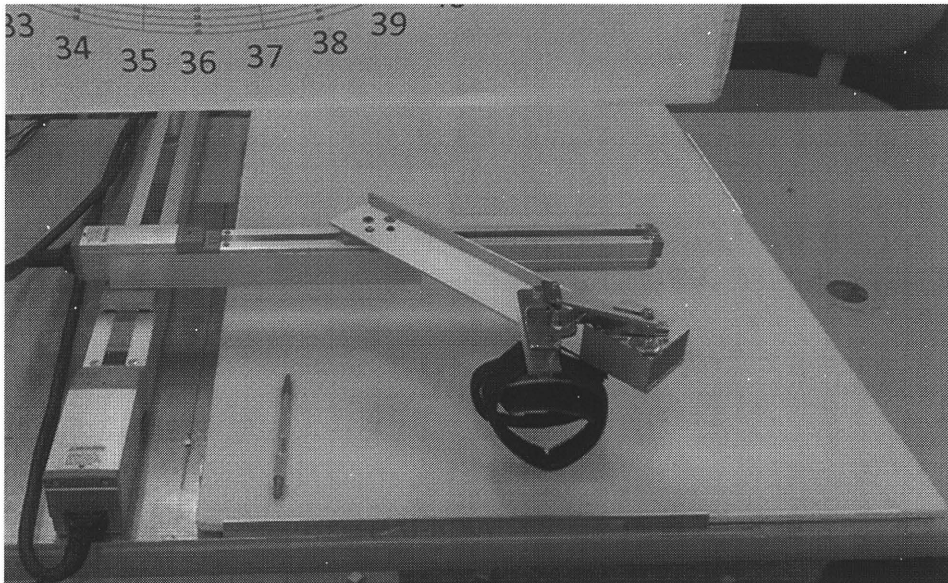


図 3 直動型アクチュエータ

3.2.2 試験面

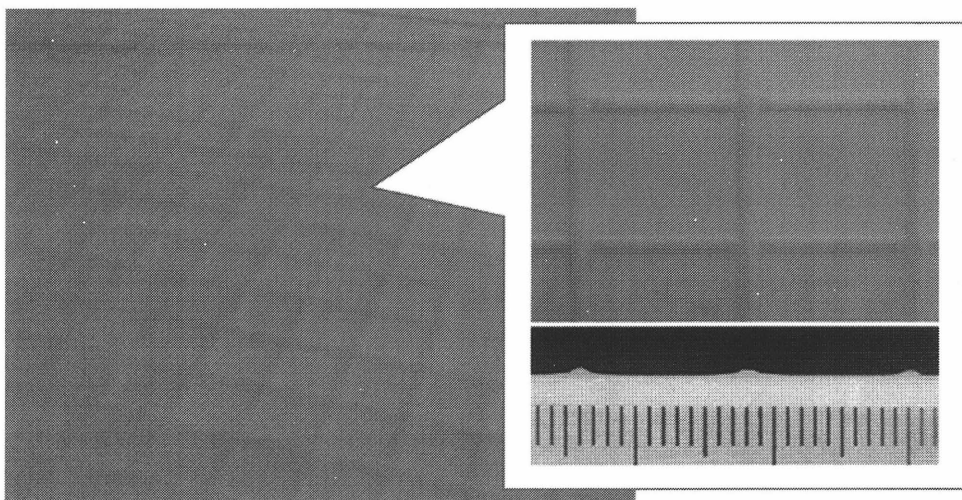


図 4 試験面の例（凸格子間隔：12mm）

3.2.5 回答ボード

提示線分の最大値が 150mm であることから，回答ボードの半径はその 2 倍の 300mm とした．角度は 7.5°単位，長さは 5mm 単位で回答できるようにした．

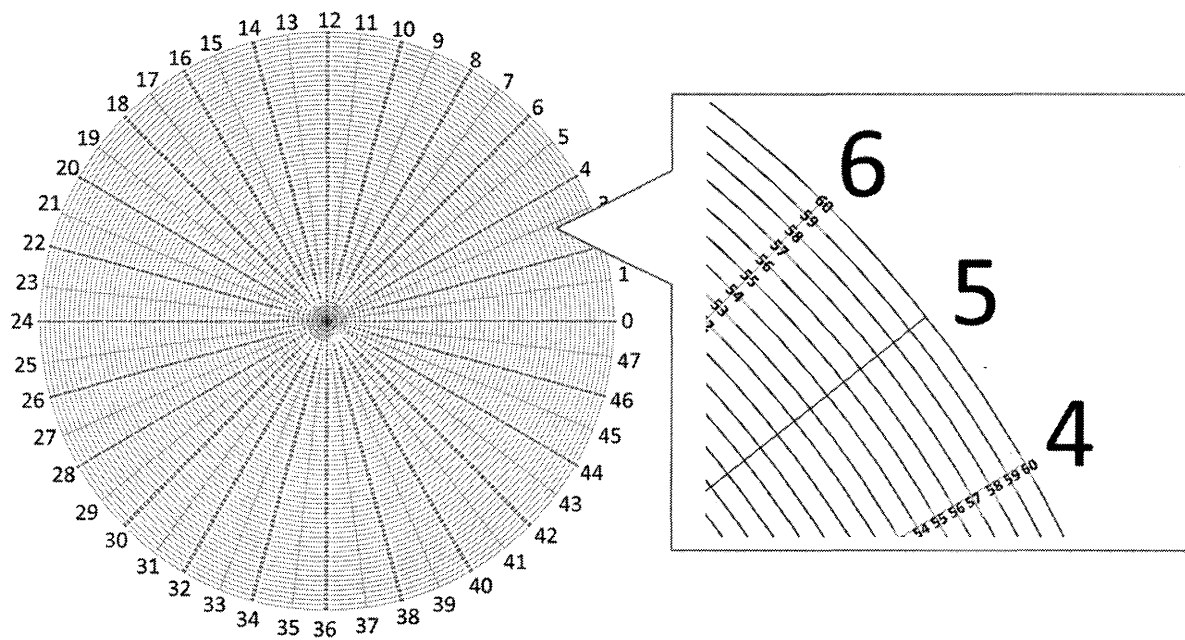


図 7 回答ボード

3.3. 実験条件

3.3.1 被験者

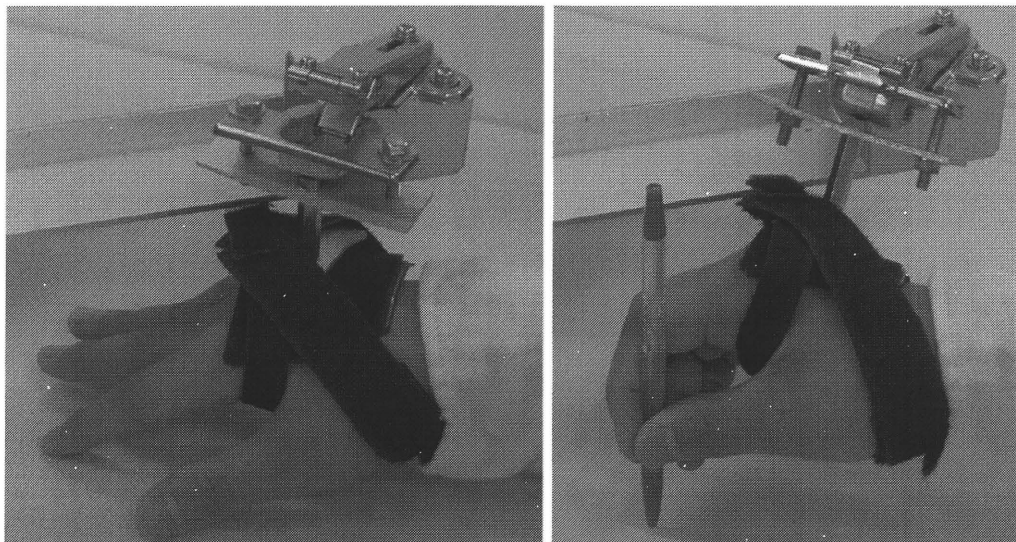
被験者は、腕の旋回が 0° のとき、肩を通り、矢状面（左右真二つに身体を切断する面）に平行な面内に位置するように、腕の伸展の初期位置 225mm において、上腕が鉛直かつ肘関節の屈曲が 90° となるような位置で手を拘束バンドで固定する。実験中は、ヘッドフォンを着用し、ホワイトノイズを流して行った。



図 8 被験者の姿勢

3.3.2 感覚

3.1 で述べたように、運動感覚（手・肘・肩関節，スタイラスを利用），皮膚感覚（示指の指腹部）+運動感覚（手・肘・肩関節）の2つの感覚で比か特性を比較した。



9 皮膚感覚:示指-スタイラス

3.3.3 腕の初期位置（伸展）

腕の伸展に関しては、実験時の初期位置として腹部から概ね 150mm, 225mm, 400mm となるようにして、3 水準を設定した。

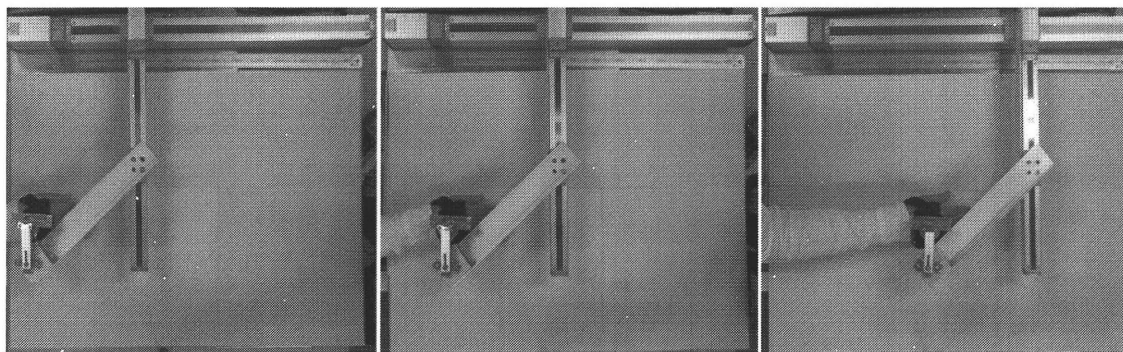


図 10 腕の伸展位置

3.3.4 腕の旋回角度（旋回）

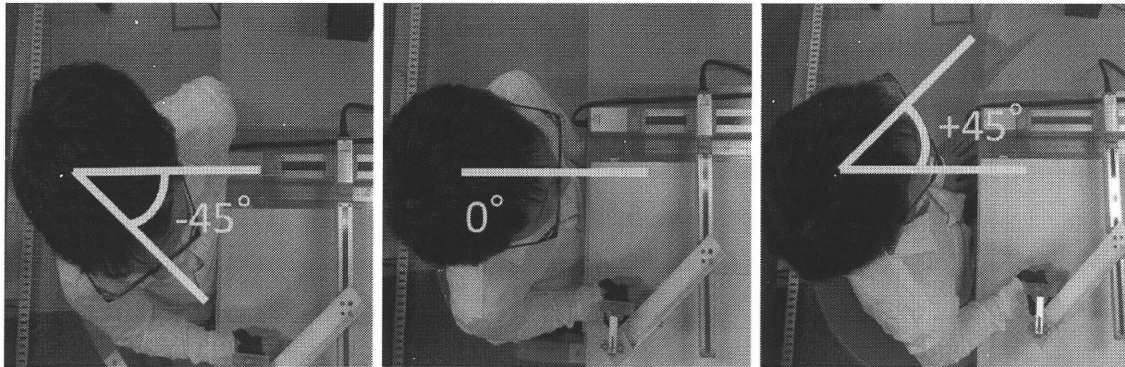


図 11 腕の旋回角度

3.4. 実験方法

実験の流れを図 12 に示す。

被験者は、リラックスして椅子に座り、右腕の前腕部を水平かつ前額平行面に平行な方向に構え、右手を実験装置に装着する。

その後、

- ① 試験面の設定：実験者が実施、
 - ② 腕（手、指を含む）始点の設定：実験者のキーインによりリニアアクチュエータが被験者の腕（手、指を含む）を誘導
 - ③ 腕の旋回角度の設定：実験者の音声による指示にしたがって、被験者が行う
 - ④ 感覚の設定：実験者の音声による指示にしたがって、被験者が行う
- の順に各因子の水準を決定する。

以下、提示した線分ごとに繰り返す。

- ⑤ 実験者による「開始」の合図とともに、アクチュエータが始点から終点に向けて被験者の手（指）を誘導する。被験者は、自らの運動に関する刺激を運動感覚で受容・知覚するとともに、示指またはスタイラスを介して得られる試験面からの刺激を皮膚感覚で受容・知覚し、提示された場所に知覚した線分のメンタルイメージを脳内で思い描く。
- ⑥ 被験者がアクチュエータの動作の停止を知覚したとき、知覚した線分を回答ボードが存在していると想定される位置に座標変換する。その後、被験者は目を開き、知覚した線分に相当する、回答ボード上の参照目盛を見て、角度、長さの順に回答する。

なお、実験中は、被験者は目を閉じている状態で実験を行った。また、アクチュエータの音量により速さを推定し、長さ知覚に影響を与えることのないように、ヘッドフォンを装着し、白色雑音を聞かせた。

実験の流れ

- ①:試験面の決定
- ②:腕の始点の決定
- ③:腕の旋回角度の決定
- ④:感覚の決定
- ⑤:実験装置を動かす
- ⑥:角度, 長さの順で答えてもらう
- ⑦:①に戻る

各被験者に対し, 上記の流れで, 知覚実験を
2セット(144回×2)実施した。

実験時の声音

①「試験面を変えます」
③「体を～° に向いてください」

②「Your finger goes to start point.」
④「Take the pen in your hand.」
「Put your finger on the specimen.」
⑤「Now, Ready Go!!」

⑥「角度は～番,
長さは～番です。」



実験者



被験者

図 12 実験の流れ (予備実験)

3.5. 実験結果

系統誤差と偶然誤差の観点から、因子間、水準で、知覚特性の比較を行う。系統誤差については、分散分析 (ANOVA, ANalysis Of VAriance) を用いて、因子による主効果の有意差を検定する。偶然誤差については、各水準の分散を対象として、Bartlett による等分散性の検定を用いて、有意差を検定する。なお、各分散から求めた標準偏差 (SD, Standard Deviation) の 0.67 倍が丁度可知差異 (JND, Just Noticeable Difference) と呼ばれる知覚特性量に相当すると考えられるので、以下では、 $JND = 0.67 \times SD$ により、偶然誤差を評価する。

3.5.1 制御因子:長さ効果

試験面、感覚の制御因子、それぞれにおいて、各水準における因子効果、すなわち「知覚長の歪」の平均とその標準誤差を図 13 に示す。ここで、

L : 提示した長さ (以下、提示長という)

l_{perc} : 知覚した長さ (以下、知覚長という)

ε : 提示した長さに対する知覚した長さの歪 (以下、知覚長の歪という)

$$\varepsilon = (l_{perc} - L) / L$$

とする。

図から、知覚長の歪は、「Grating (凸格子面, 3 種)」が「Flat (平面)」より小さく優れているように見える。同様に、「Haptic (触運動覚)」が「Kin (運動感覚)」より小さく優れているように見える。ここで、試験面、感覚の両因子の因子効果の有意差の有無を分散分析により検定を行った。その結果を表 3 に示す。試験面、感覚、両因子とも 0.1% 水準で大きく有意差があると判定された。

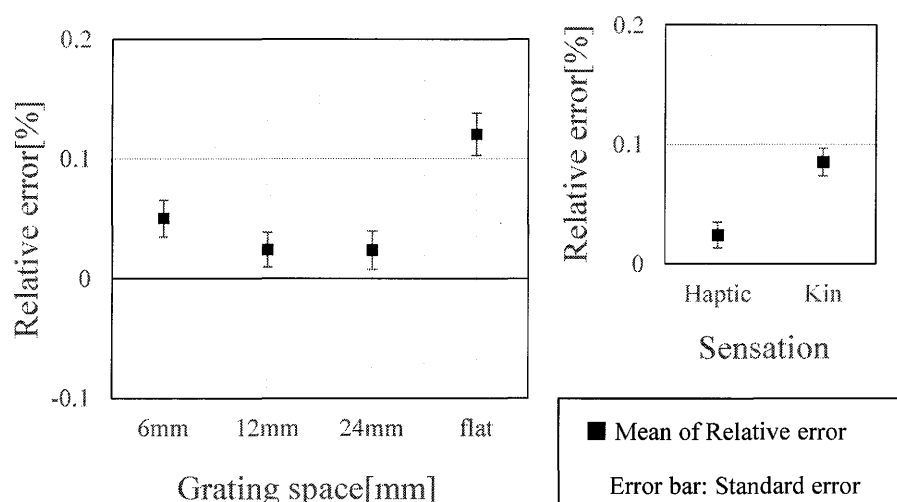


図 13 長さ知覚に関する試験面因子（制御因子）と感覚因子（制御因子）の因子効果

表 3 長さ知覚に関する分散分析表（各制御因子の因子効果の有意性検定）

Factor	Test statistic, F	*** : Critical point for the significant level of 0.1%	Decision of significant difference
Grating space	10.90	5.45	***
Sensation	19.31	10.86	***

また，図 13 のエラーバーは標準誤差を示しているが，各点の標本数は等しいことから，標準誤差，ひいては丁度可知差異(JND)にも比例する．したがって，この図のエラーバーを比較することで，JND も評価できる．図から， JND は，わずかながら，

「Grating（凸格子面，3 種）」 < 「Flat(平面)」

「Haptic(触運動覚)」 < 「Kin（運動感覚）」

の結果となった．この結果を統計提起に検定するために，各制御因子の群間の分布状態を Bartlett の等分散検定で検定した．その結果，試験面，感覚の両因子はいずれも，各水準の分散は有意差があることが確認された．

表 4 長さ知覚の偶然誤差の評価：各制御因子の水準間の等分散性の検定（Bartlett の等分散検定）

Factor	Test statistic, Chi-square (χ^2)	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Grating space	38.54	11.34	16.26	***
Sensation	8.38	6.63	10.82	**

3.5.2 長さ知覚に関する信号因子の因子効果

信号因子である「提示角度因子」、「腕の旋回因子」、「腕の伸展因子」の各因子における因子効果、すなわち「知覚長の歪」の平均とその標準誤差を図 14 に示す。図から、ある程度の系統誤差を示しているように見えるが、これら因子の分散分析の結果(表 5) は、腕の旋回、腕の伸展に関して、有意な差は見られなかった。

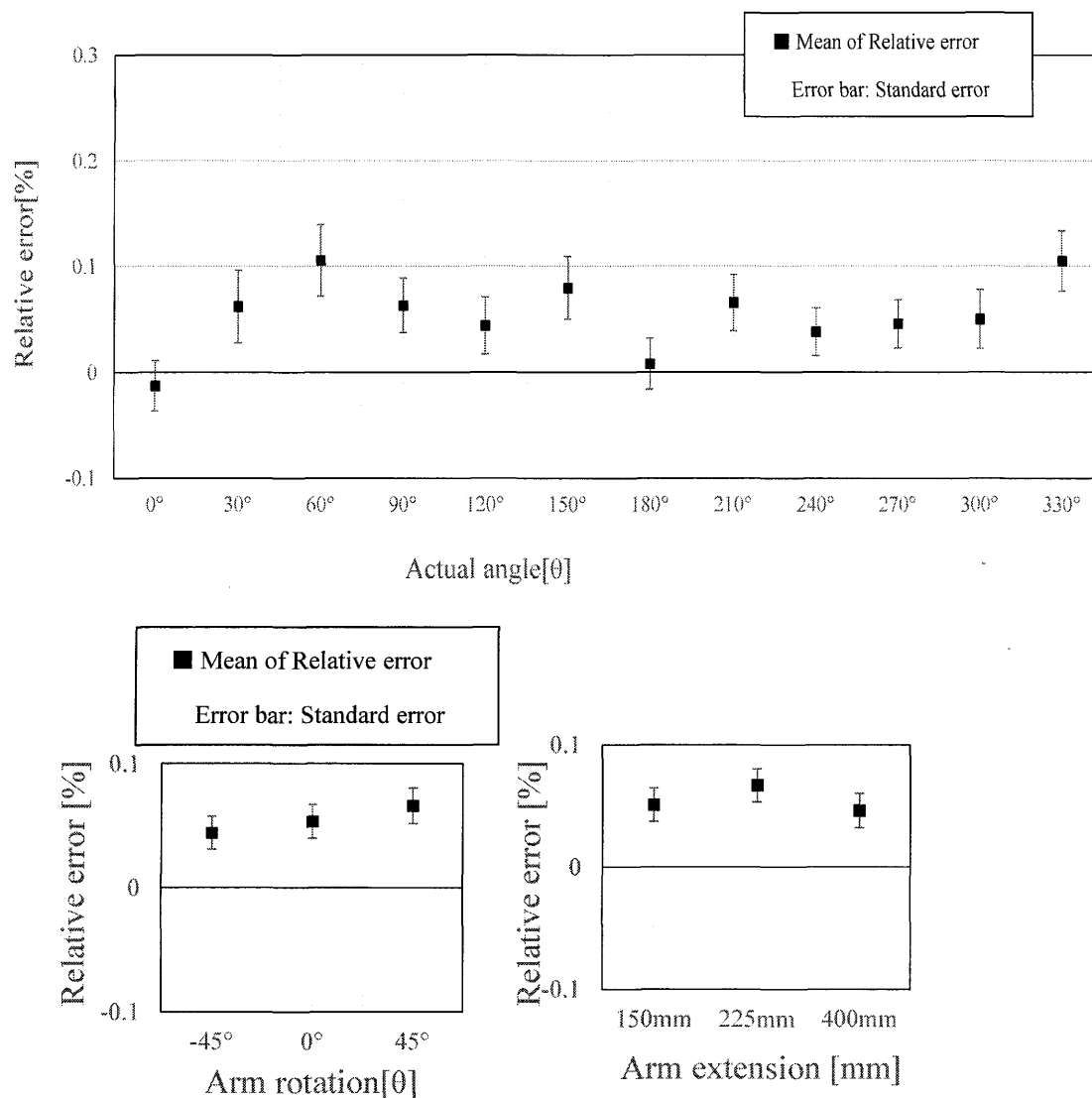


図 14 長さ知覚に関する提示角度因子 (信号因子), 腕の旋回因子 (信号因子), 腕の伸展因子 (信号因子)

表 5 長さ知覚に関する分散分析表（各信号因子の因子効果の有意性検定）

Factor	Test statistic, F	*:0.05	**:0.01	***:0.001	Level of Significance
Angle	2.10	1.79	2.26	2.86	*
Rotation	0.83	3.00	4.62	6.94	No sig.dif.
Point coordinate	0.81	3.00	4.62	6.94	No sig.dif.

次に、信号因子である「提示速度因子」の因子効果、すなわち「知覚長の歪」の平均とその標準誤差を図 15 に示す。

これらの因子は、グラフから系統誤差があることが読み取れる。また分散分析の結果（表 6）も 0.1%水準で大きく有意である結果が出た。

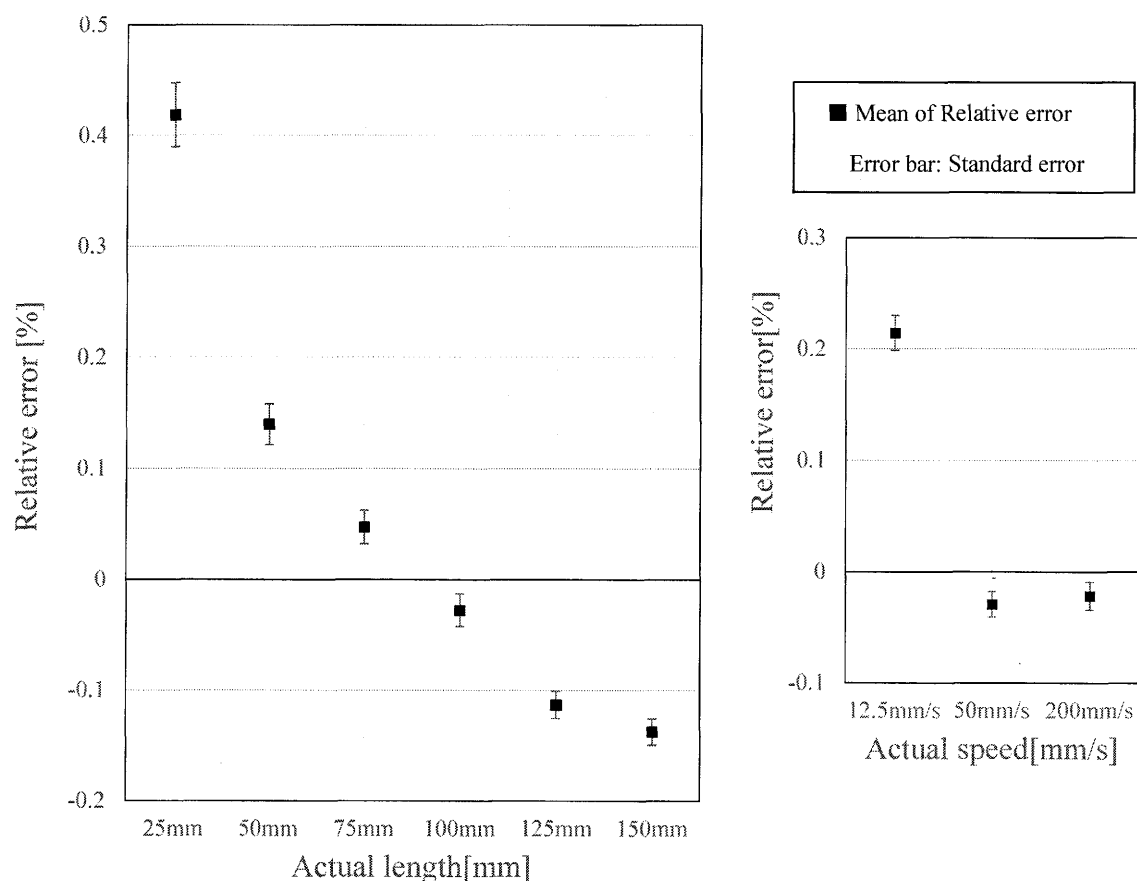


図 15 長さ知覚に関する提示長さ因子（信号因子）、速度因子（信号因子）の因子効果

表 6 長さ知覚に関する分散分析表（各信号因子の因子効果の有意性検定）

Test statistic, F	Test statistic, F	*** : 0.001	Level of Significance
Length	14.7	4.12	***
Speed	10.9	5.45	***

3.5.3 長さ知覚に関する被験者因子の因子効果

次に、誤差因子の一つである「被験者因子」における因子効果，すなわち「知覚長の歪」の平均とその標準誤差を図 16 に示す．このデータに対する分散分析表，表 7 に示すように，被験者因子の因子効果は有意であることが確認された．

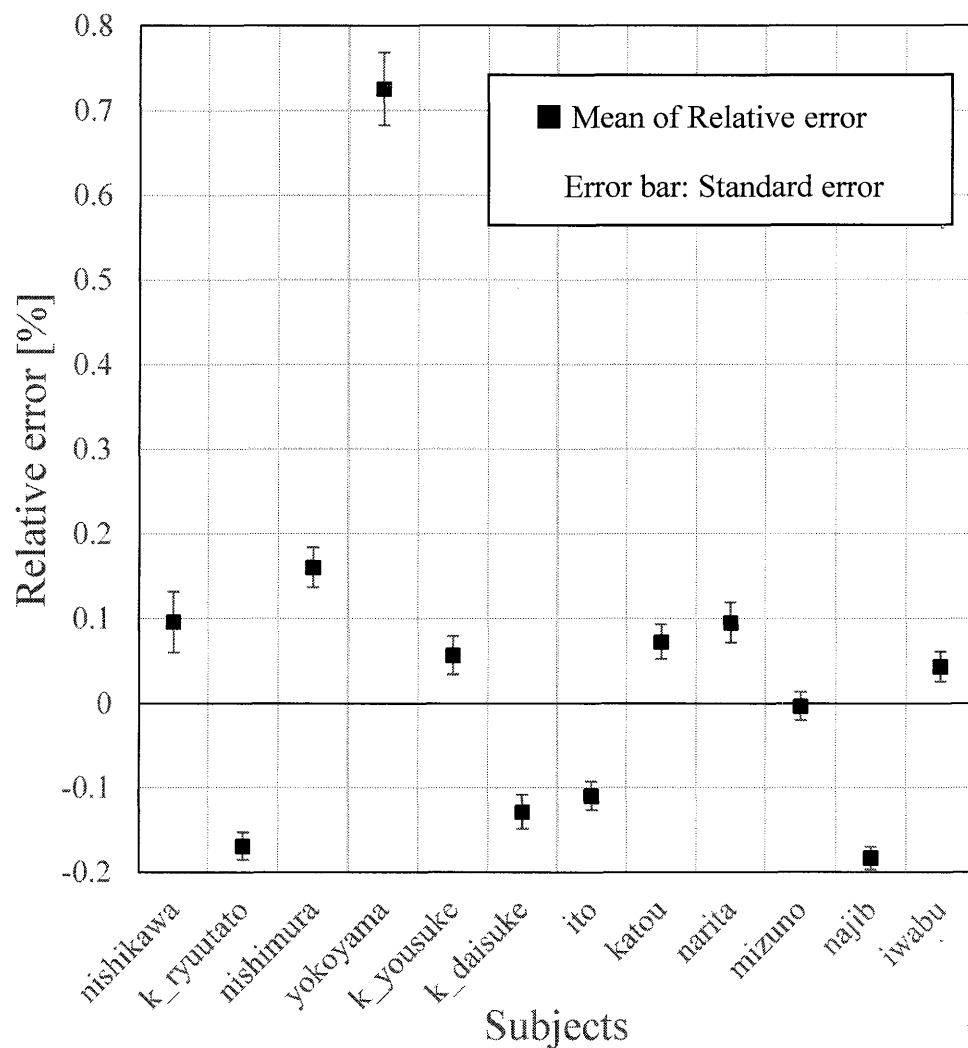


図 16 長さ知覚に関する被験者因子の因子効果

表 7 長さ知覚に関する分散分析表（被験者因子の因子効果の有意性検定）

Factor	Test statistic, F	*:0.05	**:0.01	***: 0.001	Level of Significance
Subjects	100.61	1.79	2.25	2.86	***

3.5.4 角度知覚に関する制御因子の因子効果

次に、制御因子である試験面因子、および感覚因子、における角度知覚の因子効果、すなわち「知覚角度誤差」の平均とその標準誤差を図 17 に示す。

分散分析の結果（表 8），両因子ともに、知覚角度に対する因子効果は有意ではなかった。また、Bartlett の等分散検定（表 9）においては、試験面因子のみ 1%水準で有意であるとの結果が得られた。

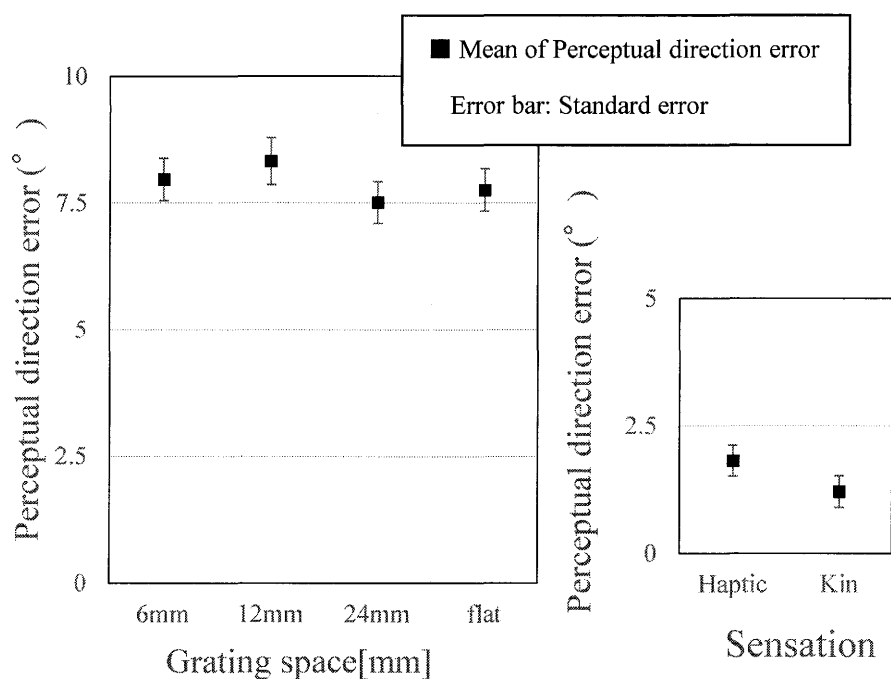


図 17 角度知覚に関する試験面因子（制御因子），および感覚因子（制御因子）の因子効果

表 8 角度知覚に関する分散分析表（各制御因子の因子効果の有意性検定）

Factor	Test statistic, F	Level of significance
Grating space	1.37	No sig.dif.
Sensation	4.18	*

表 9 角度知覚の偶然誤差評価：各制御因子の水準間の等分散性の検定（Bartlett の等分散検定）

Factor	Test statistic, Chi-square (χ^2)	** : 0.01	Level of significance
Grating space	15.73	11.34	**
Sensation	1.73	10.828	No sig.dif.

3.5.5 角度知覚に関する信号因子の因子効果

次に、信号因子である、「提示角度因子」、「提示長さ因子」、「腕の旋回因子」、「腕の伸展因子」、「提示速度因子」の各因子における角度知覚の因子効果、すなわち知覚角度誤差の平均とその標準誤差を図 18-19 に示す。分散分析の結果（表 10）、腕の旋回因子以外の全ての信号因子において、0.1%水準で大きく有意である結果が得られた。

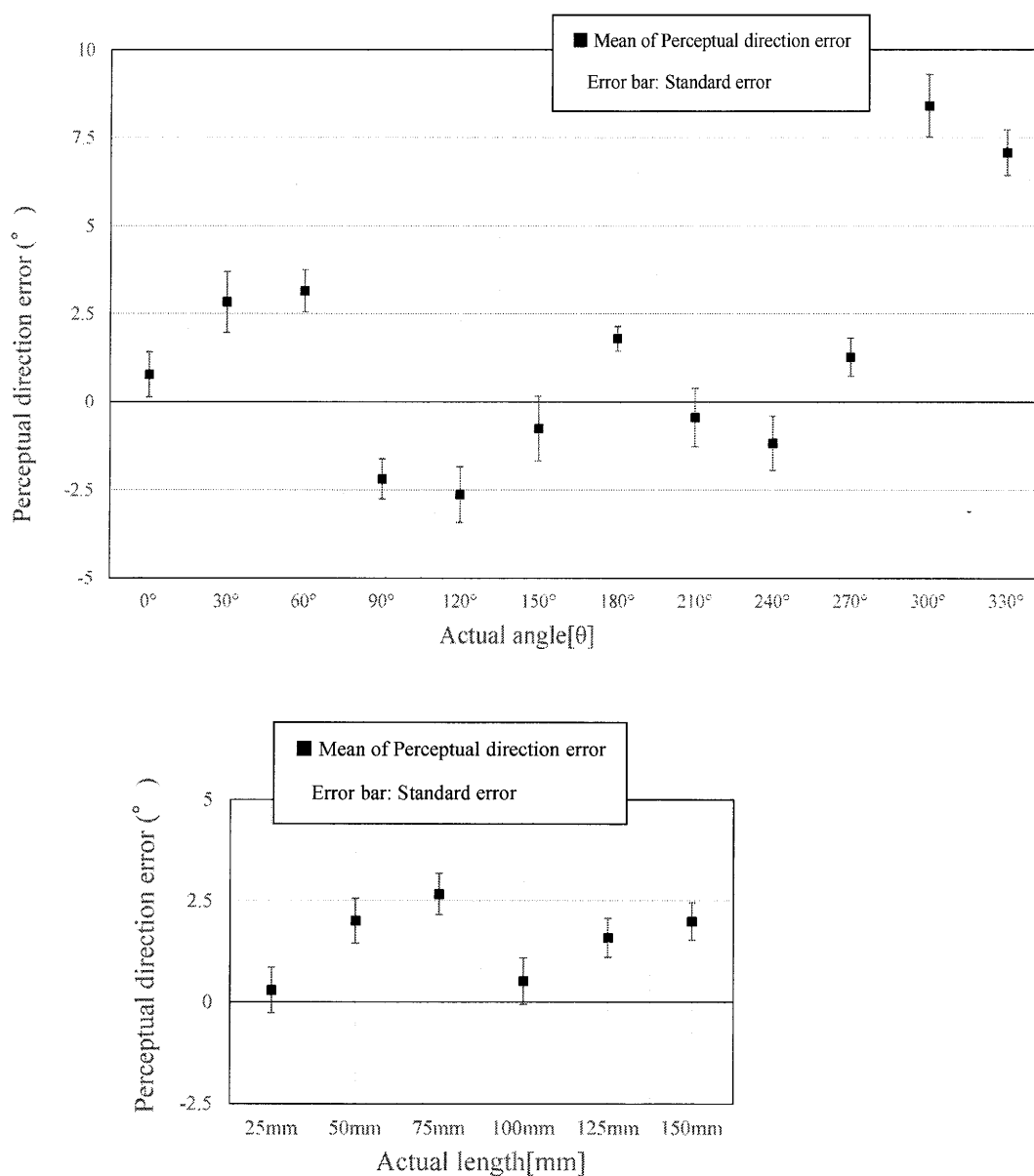


図 18 角度知覚に関する提示角度因子（信号因子）および提示長さ因子（信号因子）の因子効果

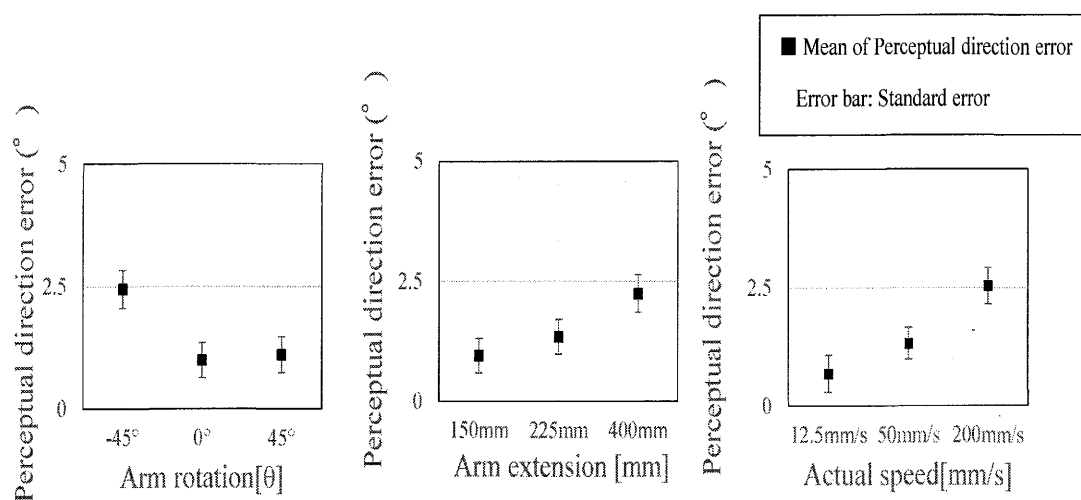


図 19 角度知覚に関する提示角度因子（信号因子）および提示長さ因子（信号因子）の因子効果信号因子：腕の旋回，腕の伸展，速度（角度効果）

表 10 角度知覚に関する分散分析表（各信号因子の因子効果の有意性検定）

Factor	Test statistic, F	*** : 0.001	Level of Significance
speed	13.51	6.94	***
angle	45.53	2.86	***
length	6.54	4.12	***
rotation	9.96	6.94	***
Point coordinate	6.81	6.94	**

3.5.6 角度知覚に関する被験者因子の因子効果

次に、誤差因子である「被験者因子」における角度知覚の因子効果、すなわち「知覚角度誤差」の平均とその標準誤差を図 20、分散分析表を表 11 に示す。

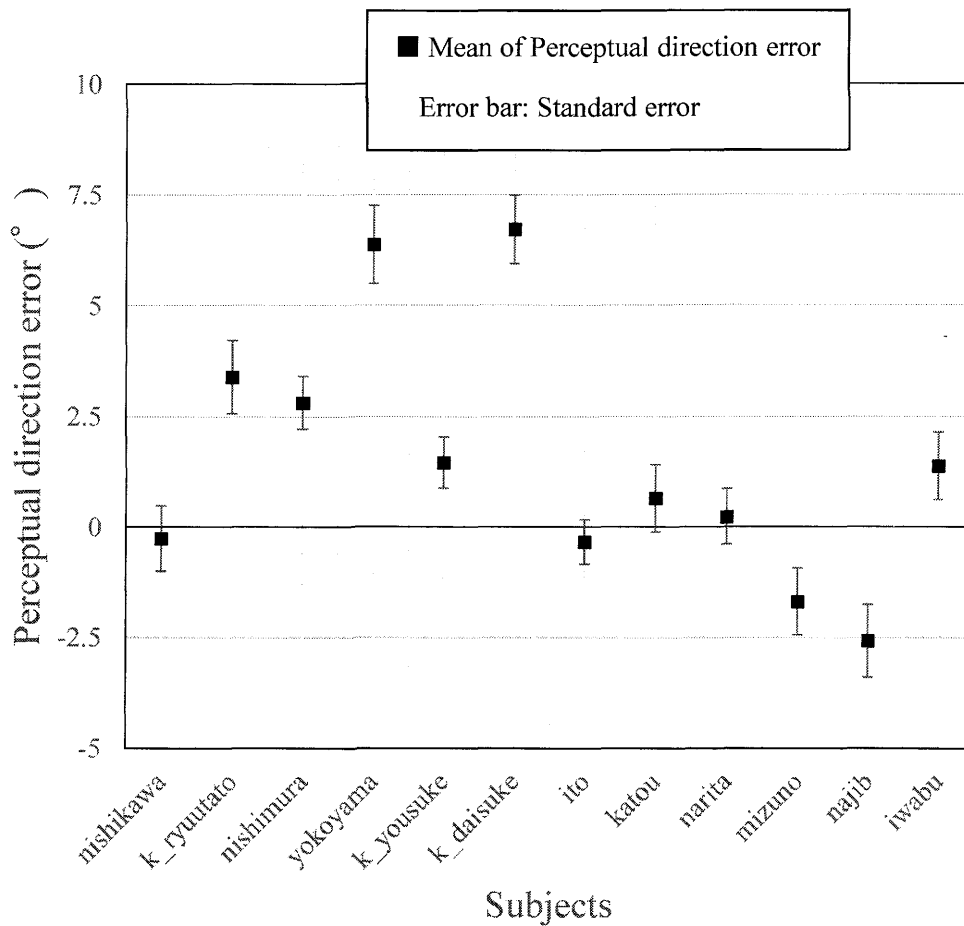


図 20 誤差因子：被験者（角度効果）

表 11 角度知覚に関する分散分析表（被験者因子の因子効果の有意性検定）

Factor	Test statistic, F	***:0.001	Level of Significance
Subjects	32.01	2.860444	***

3.6. 考察

制御因子において、各因子の長さ効果、角度効果の系統誤差と偶然誤差に関する分散分析、等分散検定をまとめたものを表 12 に示す。長さ知覚に対する因子効果（系統誤差）に関しては、制御因子である「試験面因子」、「感覚因子」のいずれにおいても、水準間に差があることが、分散分析により確認された。さらに、JND（偶然誤差）においても、水準間に差があることが等分散検定により確認された。ここで、試験面因子において、格子間距離 12mm と 24mm の 2 水準の系統誤差が類似の傾向を示していることから、因子効果評価実験において 12mm の試験面を除外して、24mm の試験面のみを用いることにした。

また、角度効果に関しては、試験面因子、感覚因子ともに、分散分析、等分散検定においてわずかな差しか見られず、Wouter[15]と同様の傾向を示していた。

まとめると、制御因子は、角度知覚に関しては、身体動作感覚(proprioceptive sensation)が支配的であり、皮膚感覚を併用しても特に知覚特性は改善されることはなかった。その一方で、長さ知覚においては皮膚感覚(cutaneous sensation)の併用により、知覚特性が有意に改善される可能性のあることがわかった。

信号因子において、各因子の長さ効果、角度効果の系統誤差に関する分散分析をまとめたものを表 13 に示す。提示長さに関しては、長さ効果、角度効果のいずれにおいても、分散分析の結果から系統誤差が有意に存在していることと予想される。

また、提示速度に関しても同様の結果となっているが、今回の予備実験において提示速度の水準は 3 つのみであり、特に知覚長の歪がプラスの領域からマイナスへ転じるまでのデータが不足している。よって、因子効果評価実験においてはより多くの水準を設定し、速度による知覚特性を調査することとした。

腕の旋回、腕の伸展の因子に関しては、角度効果は見られたが、長さ効果については水準間に大きな有意差は見られなかった。この結果より、因子効果評価実験においては、これらの因子を削除することにした。

提示角度については、角度効果は大きく、長さ効果もある程度、見られた。よって、引き続き因子効果評価実験においても知覚特性を調査していくことにした。

誤差因子の被験者に関しては、長さ効果、角度効果ともに分散分析（表 7）（表 11）の結果、他の因子と比較して大きな有意差を示した。この結果から、被験者毎に長さ知覚のモデル式を作成する必要があることが示唆された。

表 12 各制御因子の因子効果まとめ：知覚長さに関する因子効果，水準間の等分散性の有意性，知覚角度に関する因子効果，水準間の等分散性の有意性

Controllable factor	Length Effect	JND(Length)	Angle Effect	JND(Angle)
Grating space	◎	◎	×	○
Sensation	◎	○	△	×

表 13 各信号因子の因子効果のまとめ：知覚長さに関する因子効果の有意性，知覚角度に関する因子効果の有意性

Signal factor	Length Effect	Angle Effect
Angle	△	◎
Rotation	×	◎
Point coordinate	×	○
Length	◎	◎
Speed	◎	◎

第4章. 因子効果評価実験(知覚特性をモデル化するための実験)

第3章において、さまざまな因子の因子効果を調べ、知覚特性に影響を与えると予測される因子を抽出した。本章では、知覚長さのモデル式を作成するため、抽出した因子のそれぞれについて、いくつかの水準を設定し、ヒトの知覚特性を調査する。

4.1. 実験条件

4.1.1 設定因子

第3章で抽出した因子のそれぞれについて設定した水準を図21に示す。

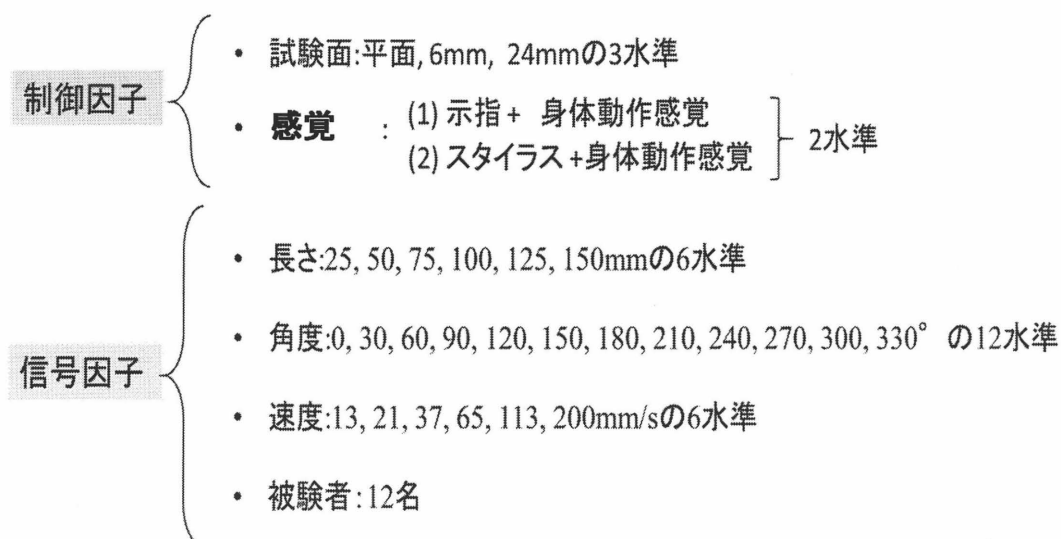


図 21 因子効果評価実験において、各因子に設定した水準

因子効果評価実験においても、直交表を用い、各因子の水準を組み合わせることにより、実験数を少なく節減した。すなわち、実験計画法における、1セット72回の1因子12水準、6因子6水準、3因子3水準、6因子2水準に対するL72直交表を利用して、各因子の水準を組合せた実験条件を設定した。さらに、各被験者に対して、上記の72条件を2セット、計1728(=72回/セット×2セット/人×12人)で、因子効果評価実験を実施した。

4.1.2 実験装置

本実験でも、予備実験で使用した装置（図 2-7）を使用した。なお、被験者の目線と回答ボード間の距離を 50cm に統一するために図 22 の顎当て（chin rest）を使用した。

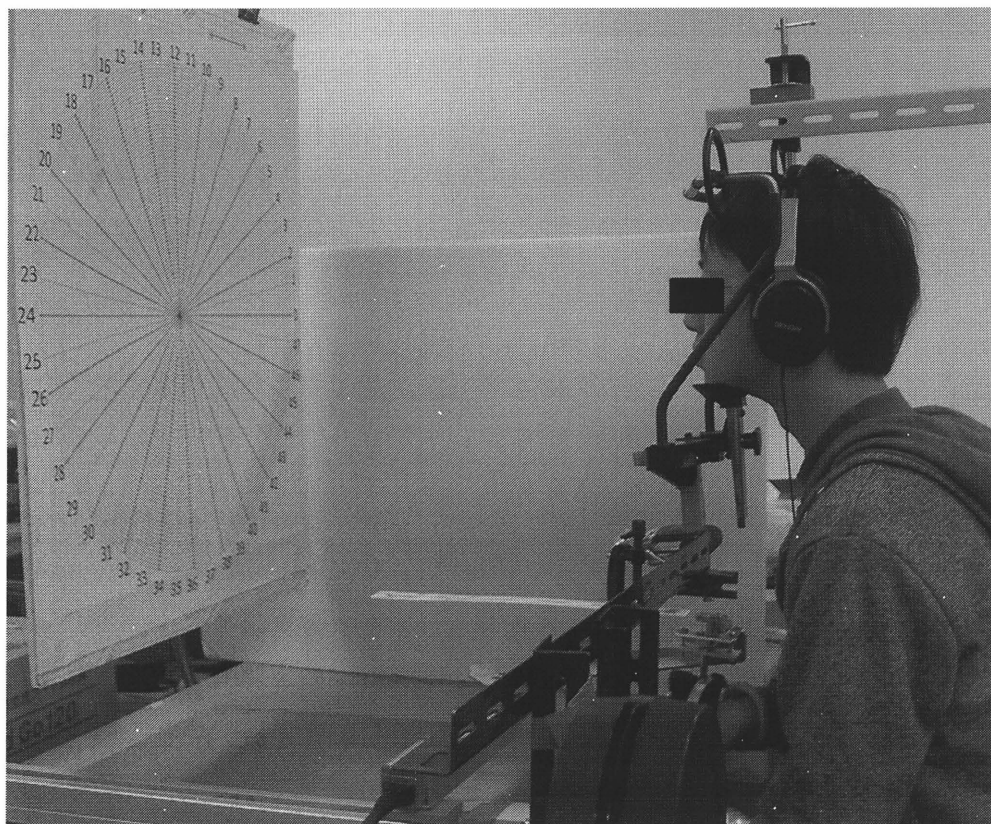


図 22 実験装置

4.2. 実験方法

実験の流れを図 23 に示す。

被験者は、リラックスして椅子に座り、右腕の前腕部を水平かつ前額平行面に平行な方向に構え、右手を実験装置に装着する。

その後、

- ① 試験面の設定：実験者が実施、
- ② 感覚の設定：実験者の音声による指示にしたがって、被験者が行う順に各因子の水準を決定する。

次に、

- ③ 実験者のキーインによりリニアアクチュエータが被験者の腕（手、指を含む）を誘導し、ランダムに設定された始点の設定へ誘導する。

以下、提示した線分ごとに繰り返す。

- ④ 実験者による「開始」の合図とともに、アクチュエータが始点から終点に向けて被験者の手（指）を誘導する。被験者は、自らの運動に関する刺激を運動感覚で受容・知覚するとともに、示指またはスタイラスを介して得られる試験面からの刺激を皮膚感覚で受容・知覚し、提示された場所に知覚した線分のメンタルイメージを脳内で思い描く。
- ⑤ 被験者がアクチュエータの動作の停止を知覚したとき、知覚した線分を回答ボードが存在していると想定される位置に座標変換する。その後、被験者は目を開き、知覚した線分に相当する、回答ボード上の参照目盛を見て、角度、長さの順に回答する。

なお、実験中は、被験者は目を閉じている状態で実験を行った。また、アクチュエータの音量により速さを推定し、長さ知覚に影響を与えることのないように、ヘッドフォンを装着し、白色雑音を聞かせた。

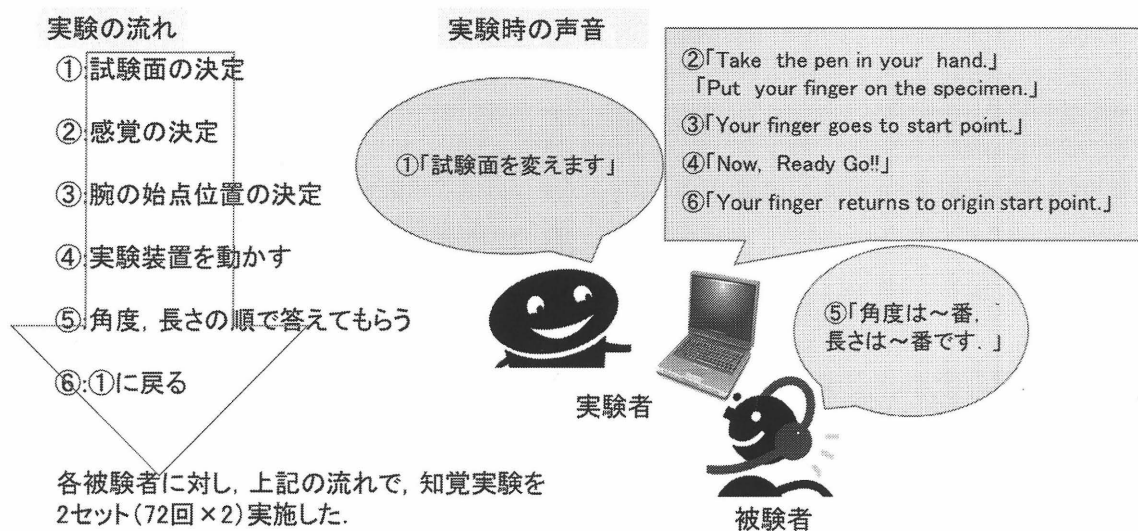


図 23 実験の流れ (本実験)

4.3. 実験結果

4.2.1 長さ知覚に関する制御因子の因子効果

制御因子である試験面因子, 感覚因子の各因子の長さ知覚に関する因子効果を確認するため, 知覚長の相対誤差, すなわち知覚長の歪の平均とその標準誤差を図 24 に示す. また, 分散分析の結果を表 14 に, Bartlett の等分散検定の結果を表 15 に示す.

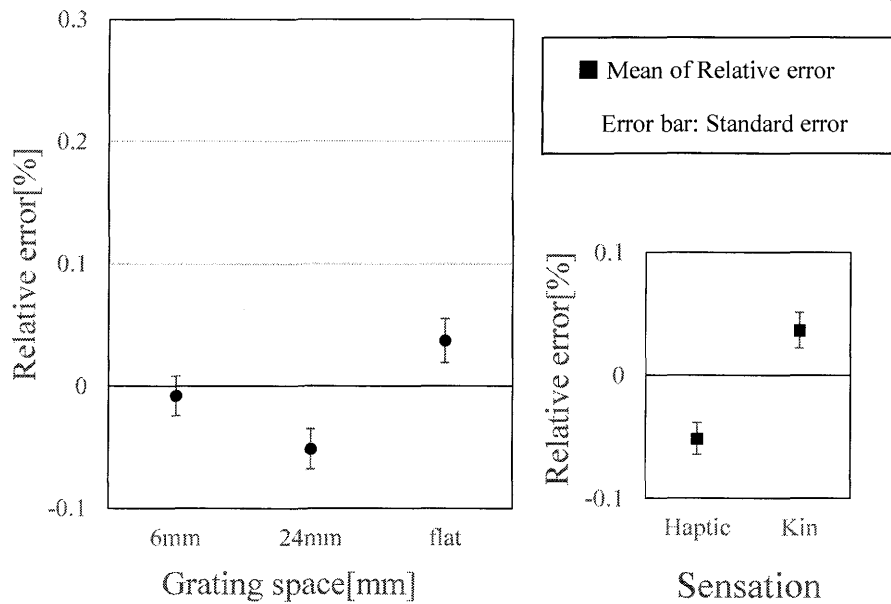


図 24 長さ知覚に関する, 試験面因子 (制御因子), 感覚因子 (制御因子) の因子効果

表 14 長さ知覚に関する分散分析表 (各制御因子の因子効果の有意性検定)

Factor	Test statistic, F	*** : 0.001	Level of Significance
Grating space	12.65	6.94	***
Sensation	37.55	10.86	***

表 15 長さ知覚の偶然誤差評価: 各制御因子の水準間の等分散性の検定 (Bartlett の等分散検定)

Factor	Chi-square (χ^2)	* : 0.05	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Grating space	7.79	5.99	9.21	13.81	*
Sensation	10.88	3.84	6.63	10.82	***

4.2.2 長さ知覚に関する信号因子の因子効果

信号因子である提示速度因子，提示長さ因子，提示角度因子，被験者因子のそれぞれについて，知覚長の歪の平均と標準誤差を求め，図 25-26 に示す．また，分散分析の結果を表 16 に示す．この表から，すべての因子効果において，0.1%水準の有意差が確認され，いずれの因子についてもモデル化に際してパラメータ化することが望ましいことが分かった．さらに，参考のため，Bartlett の等分散検定の結果を表 17 に示す．

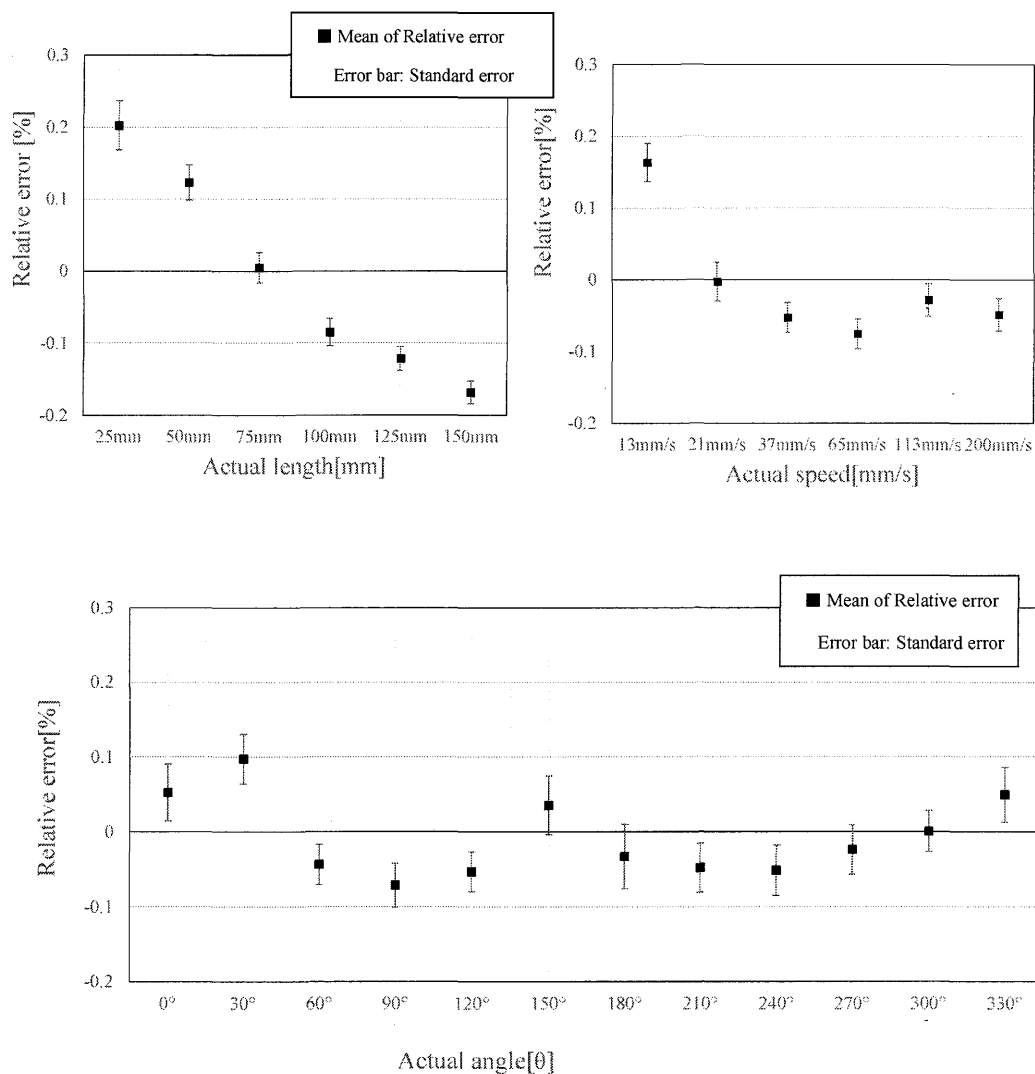


図 25 長さ知覚に関する，速度因子（信号因子），提示長さ因子（制御因子），角度因子（信号因子）の因子効果

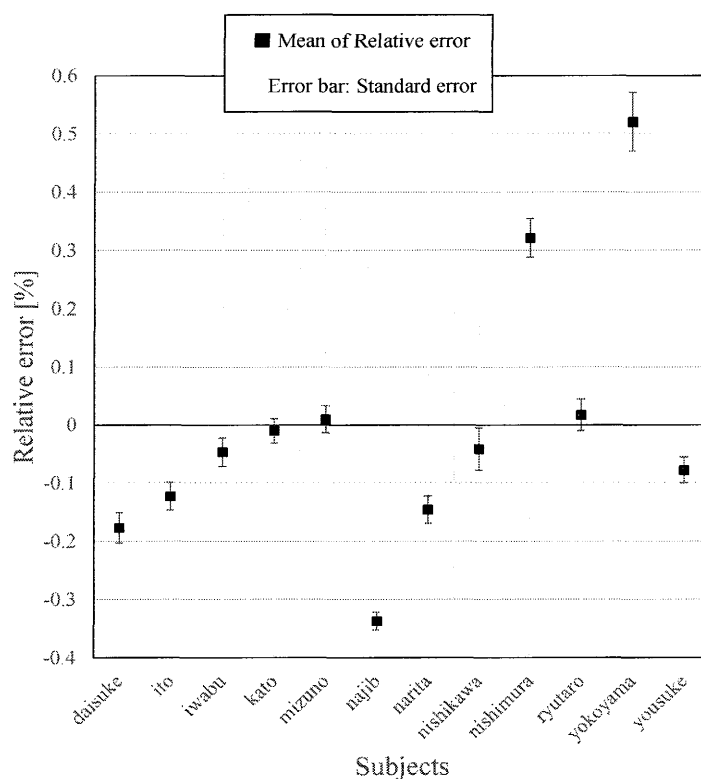


図 26 長さ知覚に関する被験者因子の因子効果

表 16 長さ知覚に関する分散分析表（各信号因子の因子効果の有意性検定）

Factor	F	*:0.05	**:0.01	***:0.001	Level of Significance
Angle	4.65	1.79	2.26	2.86	***
Length	68.35	2.22	3.03	4.12	***
Speed	24.50	2.22	3.03	4.12	***
Subjects	82.99	1.79	2.26	2.86	***

表 17 長さ知覚の偶然誤差評価：各信号因子の水準間の等分散性の検定（Bartlett の等分散検定）

Factor	Chi-square (χ^2)	*** : 0.001	Level of Significance
Angle	77.07	24.72	***
Length	256.18	20.52	***
Speed	40.79	20.51	***
Subjects	317.51	24.72	***

4.2.3 角度知覚に関する制御因子の因子効果

制御因子の提示角度に対する試験面，感覚の角度知覚誤差を図 27 に示す．また，分散分析の結果を表 18 に，Bartlett の等分散検定を表 19 に示す．角度知覚に関しては，試験面因子において，因子効果は有意ではなかった．一方，感覚因子では，因子効果は有意であり，触運動覚が運動覚に比して優れていることが分かった．

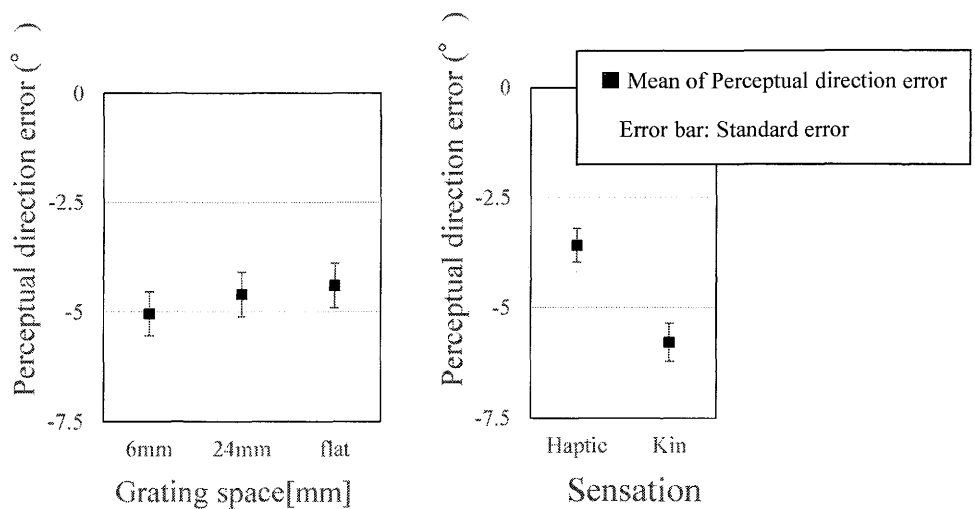


図 27 角度知覚に関する，試験面因子（制御因子），感覚因子（制御因子）の因子効果

表 18 角度知覚に関する分散分析表（各制御因子の因子効果の有意性検定）

Factor	F	*** : 0.001	Level of Significance
Grating space	0.46	6.94	No sig.dif.
Sensation	15.74	10.86	***

表 19 角度知覚の偶然誤差評価：各制御因子の水準間の等分散性の検定（Bartlett の等分散検定）

Factor	Chi-square (χ^2)	* : 0.05	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Grating space	0.050	5.99	9.21	13.81	No sig.dif.
Sensation	12.68	3.84	6.63	10.82	***

4.2.4 角度知覚に関する信号因子の因子効果

信号因子である「提示角度因子」，「提示速度因子」，「提示長さ因子」，および「被験者因子」の各因子において，知覚長の歪に関する因子効果を図 28-29 に示す．また，分散分析の結果を表 20 に示す．この結果から，いずれの因子においても因子効果が有意であることが確認された．

さらに，Bartlett の等分散検定の結果を表 21 に示す．これにより，いずれの因子においても，分散は水準間で有意に異なっていることが確認された．

以上により，水準として，「感覚因子」においては「触運動覚水準」，「試験面因子」においては「凸格子水準」が適していることがわかった．

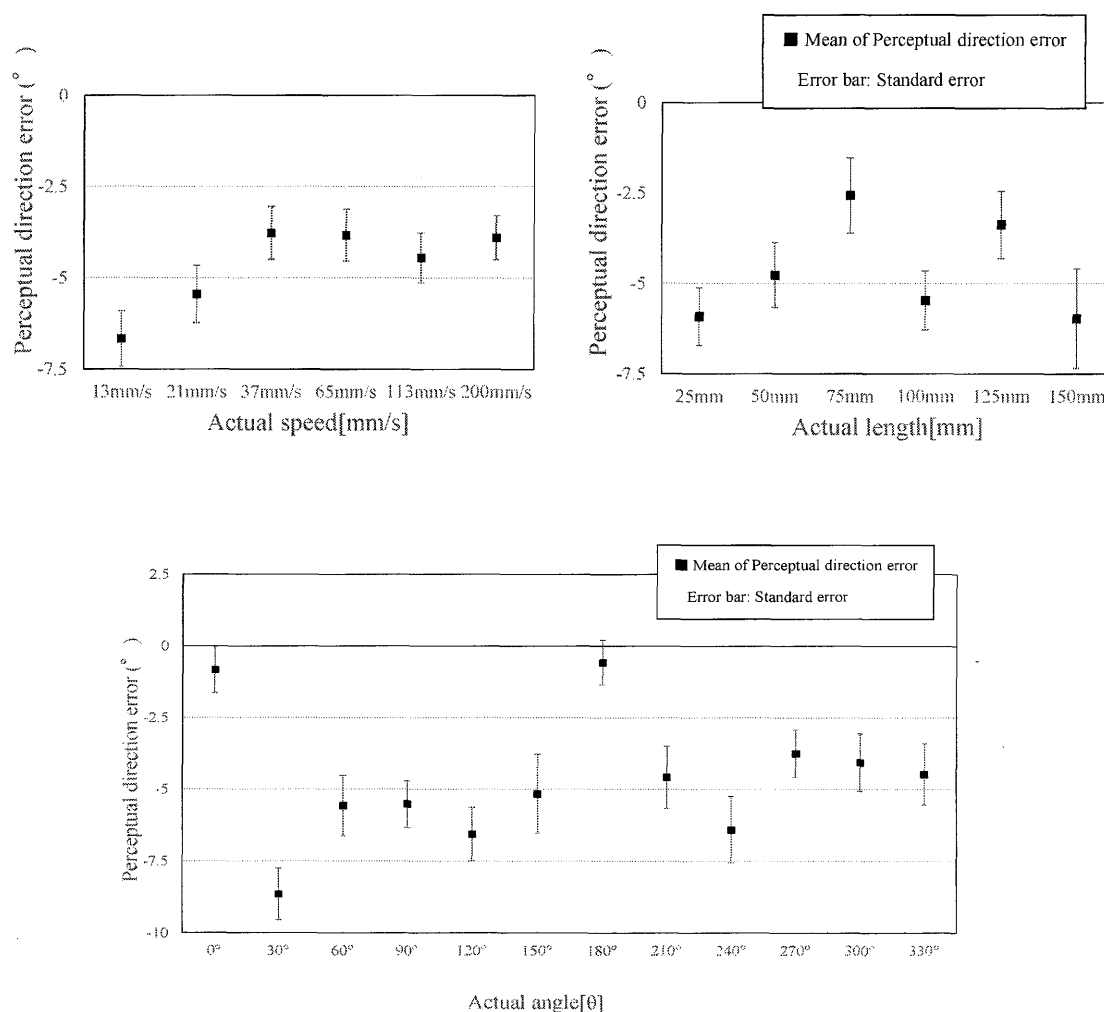


図 28 角度知覚に関する，速度因子（信号因子），提示長さ因子（制御因子），角度因子（信号因子）の因子効果

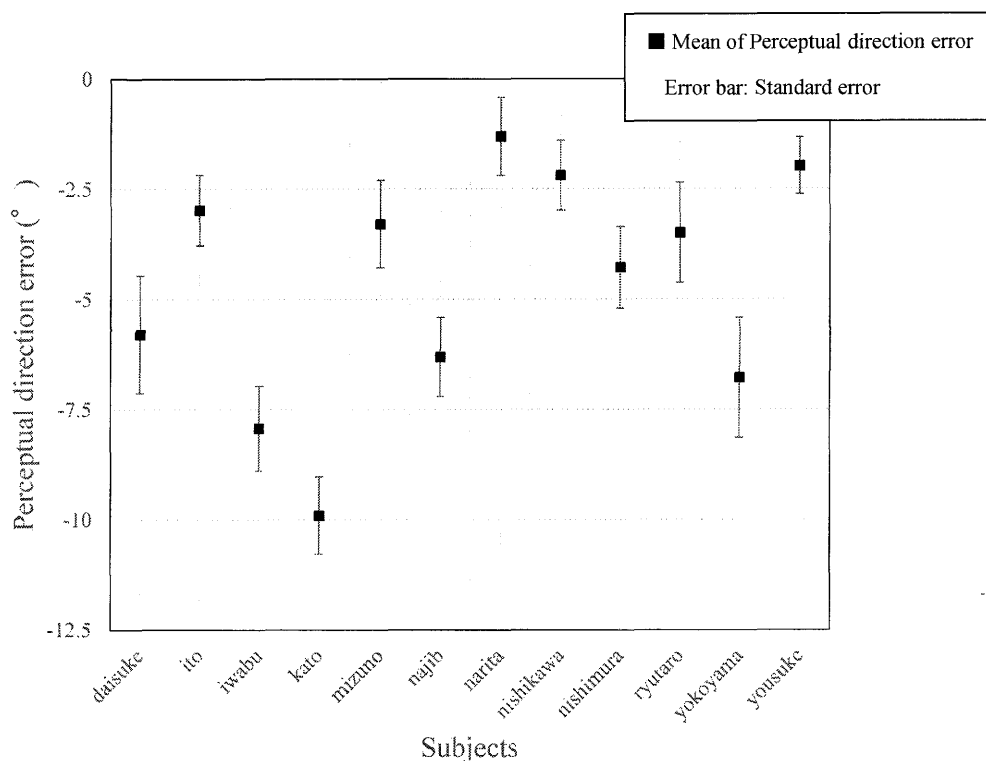


図 29 角度知覚に関する被験者因子の因子効果

表 20 角度知覚に関する分散分析表（各信号因子の因子効果の有意性検定）

Factor	F	*:0.05	**:0.01	***:0.001	Level of Significance
Angle	5.59	1.79	2.26	2.86	***
Length	4.27	2.22	3.03	4.12	***
Speed	2.90	2.22	3.03	4.12	*
Subjects	7.58	1.79	2.26	2.86	***

表 21 角度知覚の偶然誤差評価：各信号因子の水準間の等分散性の検定（Bartlett の等分散検定）

Factor	Chi-square (χ^2)	*** : 0.001	Level of Significance
Angle	98.89	24.72	***
Length	51.15	20.52	***
Speed	25.45	20.51	***
Subjects	147.04	24.72	***

4.4. 考察

制御因子の各因子における，長さ知覚，角度知覚の系統誤差，偶然誤差に関する分散分析，等分散検定をまとめたものを表 22 に示す．分散分析より，試験面因子，感覚因子，いずれの制御因子においても，長さ知覚に関しては水準間に差のあることが，判明した．ただし，角度知覚においては，試験面因子の因子効果には有意差は認められなかった．また，Bartlett の等分散検定から，試験面の不等分散性はわずかにしか見られなかった．ゆえに，試験面においては，図 24 より長さ効果の系統誤差が 0 に近い値を示している「格子面 6mm 水準」が比較的優れた性能を示していると考えられる．また，感覚因子においては，長さ知覚，角度知覚，ともに 1%水準で有意であることが分散分析でも，Bartlett の等分散検定でも明らかになった．これは，Wouter[14]の実験や本研究における予備実験で示された「触覚の追加は特に長さ知覚の特性の改善に効果があるとはいえない」との結果とは異なった．この結果に関して，因子効果評価実験では，予備実験では提示速度条水準をより細かく設定しており，特に，長さ知覚の難易度は上昇している．そのため，従来の粗い実験では現れなかった有意差が顕著になった可能性などが考えられる．なお，本来ならば交互作用の効果を調査する必要性もあるが，今回の実験においては，総当たりではなく，実験計画法による直交表を用いることで，実験の組み合わせを極端に絞り込んでおり，交互作用を調べることは出来なかった．この点においては実験法の改善の余地が残っている

信号因子の各因子における，長さ知覚，角度知覚の系統誤差に関する分散分析をまとめたものを表 23 に示す．長さ知覚，角度知覚ともに，系統誤差が大きく出ていることが分かる．よって，長さ知覚，角度知覚ともに，これら全ての信号因子を考慮して系統誤差特性をモデル化することにした．

表 22 制御因子：長さ，角度系統誤差，偶然誤差まとめ

Controllable factor	Length Effect	JND(Length)	Angle Effect	JND(Angle)
Grating space	◎	△	×	×
Sensation	◎	◎	◎	◎

表 23 信号因子：長さ，角度系統誤差まとめ

Signal factor	Length Effect	Angle Effect
Angle	◎	◎
Length	◎	◎
Speed	◎	△
Subjects	◎	◎

4.5. モデル化

4.5.1. 知覚長さのモデル化

前節の分散分析の結果、有意差が認められた信号因子の因子効果に基づいて、長さ知覚モデルを構築する。

知覚長の歪は

$$\varepsilon = (l_{perc} - L) / L \quad (4.1, \text{再掲})$$

と定義した。ここで、

L : 提示した長さ (以下、提示長という)

l_{perc} : 知覚した長さ (以下、知覚長という)

その全平均を $\langle \varepsilon \rangle$ 、そして各信号因子、すなわち提示長さ因子、速度因子、提示角度因子、そして被験者因子のそれぞれにおいて、各水準の平均を ε_L , ε_V , ε_θ , ε_S と表す。

このとき、各因子の因子効果 e_L , e_V , e_θ , e_S は、

$$e_L = \langle \varepsilon_L \rangle - \langle \varepsilon \rangle \quad (4.2)$$

$$e_V = \langle \varepsilon_V \rangle - \langle \varepsilon \rangle \quad (4.3)$$

$$e_\theta = \langle \varepsilon_\theta \rangle - \langle \varepsilon \rangle \quad (4.4)$$

$$e_S = \langle \varepsilon_S \rangle - \langle \varepsilon \rangle \quad (4.5)$$

と書ける。このとき、全平均 $\langle \varepsilon \rangle$ にこれらを加算することで総合的知覚長さ歪 ε_{model} は与えられる。すなわち、

$$\varepsilon_{model} = \langle \varepsilon \rangle + e_L + e_V + e_\theta + e_S \quad (4.6)$$

以下では、 ε_L , ε_V , ε_θ , ε_S をモデル化する。

ε_L に関しては、 l_{perc} 提示長さ L に関するべき関数でモデルする。すなわち、

$$l_{perc} = \alpha L^\beta \quad (4.7)$$

この式の両辺の対数を取って線形化して回帰方程式とした。そして、因子効果評価実験で得られたデータを用い、最小2乗法を適用して、未知パラメータ α , β を推定した。得られた α , β を式(4.5)に代入して l_{perc} を L の関数として表す。具体的には、

$$l_{perc} = 2.47 L^{0.78} \quad (4.8)$$

となった。さらに、その l_{perc} を式(4.1)に代入することにより、 $\langle \varepsilon_L \rangle$ を L の関数として表した。

次に、 ε_V について説明する。速度 V に対する ε_V の変化パターンが双曲線に類似していると見られたので、双曲線を用いてモデルする。すなわち、 α_V を比例定数、 V_0 を速度軸の切片とすると、

$$\varepsilon_V = \alpha_V (1/V - 1/V_0) \quad (4.9)$$

これに因子効果評価実験で得られたデータを用い、最小 2 乗法を適用して、未知パラメータ α_V , V_0 を推定した。

他の ε_θ も同様に、提示角度 θ に対する ε_θ の変化パターンを考慮して、三角関数を用いてモデルする。すなわち、 a をバイアス、 b を振幅、 c を位相、とすると、

$$\varepsilon_\theta = a + b \cos \{2(\theta - c)\} \quad (4.10)$$

これに因子効果評価実験で得られたデータを用い、最小 2 乗法を適用して、未知パラメータ a , b , c を推定した。

最後に、被験者の各水準の平均 ε_S は、因子効果評価実験での各水準（各被験者）のデータの平均とした。

4.5.2. 知覚角度のモデル化

次に、角度効果をモデル化した。知覚角度 θ_{perc} の提示角度 θ_{pres} からの残差 $\Delta\theta$ 、すなわち

$$\Delta\theta = \theta_{perc} - \theta_{pres} \quad (4.11)$$

の全平均を $\langle\Delta\theta\rangle$ 、信号因子のそれぞれにおける各水準の残差 $\Delta\theta$ の平均を $\Delta\theta_L$, $\Delta\theta_V$, $\Delta\theta_\theta$, $\Delta\theta_S$ とすれば、各水準の誤差の因子効果、 t_L , t_V , t_θ , t_S は、

$$t_L = \langle\Delta\theta_L\rangle - \langle\Delta\theta\rangle \quad (4.12)$$

$$t_V = \langle\Delta\theta_V\rangle - \langle\Delta\theta\rangle \quad (4.13)$$

$$t_\theta = \langle\Delta\theta_\theta\rangle - \langle\Delta\theta\rangle \quad (4.14)$$

$$t_S = \langle\Delta\theta_S\rangle - \langle\Delta\theta\rangle \quad (4.15)$$

と書ける。全平均 $\langle\Delta\theta\rangle$ にこれらを加算することで総合的知覚角度の残差 $\Delta\theta_{model}$ は与えられる。すなわち、

$$\Delta\theta_{model} = \langle\Delta\theta\rangle + t_L + t_V + t_\theta + t_S \quad (4.16)$$

以下では、 ε_L , ε_V , ε_θ , ε_S をモデル化する。

$\Delta\theta_L$ に関しては、提示長さによる知覚角度 θ_L の提示角度 θ_{pres} からの残差 $\Delta\theta$ 、すなわち

$$\Delta\theta = \theta_L - \theta_{pres} \quad (4.17)$$

の全平均を $\langle\Delta\theta_L\rangle$ とした。

次に、 $\Delta\theta_V$ について説明する。 $\Delta\theta_V$ も同様に、提示速度による知覚角度 θ_V の提示角度 θ_{pres} からの残差 $\Delta\theta$ 、すなわち

$$\Delta\theta = \theta_V - \theta_{pres} \quad (4.18)$$

の全平均を $\langle\Delta\theta_V\rangle$ とした。

他の $\Delta \theta_\theta$ も同様に，提示角度 θ に対する $\Delta \theta_\theta$ の変化パターンを考慮して，三角関数を用いてモデルする．すなわち， a をバイアス， b を振幅， c を位相，とすると，

$$\Delta \theta_\theta = a + b \cos \{4(\theta - c)\} \quad (4.19)$$

これに因子効果評価実験で得られたデータを用い，最小 2 乗法を適用して，未知パラメータ a ， b ， c を推定した．

最後に，被験者の各水準の平均 $\Delta \theta_s$ は，因子効果評価実験での各水準（各被験者）のデータの平均とした．

第5章. 確認実験:知覚モデル有効性確認実験

5.1. 概要

本研究では、使用者が、線分や線分を複数本接続した折れ線などの線画をできる限り正確に知覚できるようにすることを目的としている。そのための方策として、先の第4章.因子効果評価実験で求めた知覚特性のモデル式、すなわち知覚長の歪や知覚角度の偏差（系統誤差）のモデル式を用いて、知覚の偏り（系統誤差）を相殺できるように提示することが考えられる。

本章では、上記の補正方法の有効性を確認した結果について述べる。具体的には、線分を複数本接続した折れ線を用いて、提示した長さ（提示長 L ）、知覚した長さ（知覚長 l_{model} ）、そしてモデル式より提示長との対応で計算された長さ（モデル長 l_{model} ）の間の関係を調べ、知覚長がモデル長によく整合することを確認する。このことにより、予め、知覚長を前提として、モデル式を用いて、知覚長と等しいモデル長を与える提示長を計算し、これを提示することで知覚の偏りを補正することができる。

なお、角度についてはすべての被験者においてその偏差は小さく、特段の改善は得られなかったことから、その評価結果についての記述は割愛する。

5.2. 実験条件

実験条件を図 30 に示す。第4章.因子効果評価実験において評価した因子と、新たに提示する線分経路の因子を加えた条件で実験を行った。提示する線分経路数は、5 本以上提示すると、極端に知覚精度が下がることが判明したため、2, 3, 4 本の3水準を使用した。実験パターンの設定に関しては直交表を利用し、提示長さ、提示速度因子の全て水準を組合せた 36 パターンの実験条件を設定した。これにより、提示する線分経路ごとに4回、計 12 回（3×4）出現しすることになる。提示角度に関しては被験者ごとにランダムに設定している。これにより、提示する線分経路は計 120 パターン（12×10）存在する。また、提示する線分経路の順番は被験者ごとにランダムに設定した。確認実験においては諸事情により被験者が 10 名となっている。

実験条件

- 試験面:6mm
- 提示線分経路:2,3,4本
- 感覚:示指 + 身体動作感覚
- 長さ:25, 50, 75, 100, 125, 150mm
- 角度:0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330°
- 速度:13,21,37,65,113, 200mm/s
- 被験者:10名

図 30 実験条件（確認実験）

5.3. 実験装置

図 31 に確認実験で使用した実験装置を示す。本実験では、提示する折れ線が複雑であることから、被験者が任意の線分経路が回答できるようにするため、タッチディスプレイを用いて知覚した折れ線を入力できるようにした。また、回答時には、タッチディスプレイ上を示指で滑らし回答すると、身体動作感覚の特性が出る可能性があるため、図 32 に示すように、知覚した折れ線の各始点と終点を、タッチディスプレイに点（プロット）を打つことで回答を行った。実際には、被験者は折れ線の始点場所にプロットした後に、一度腕を自身の体に戻してから終点をプロットした。

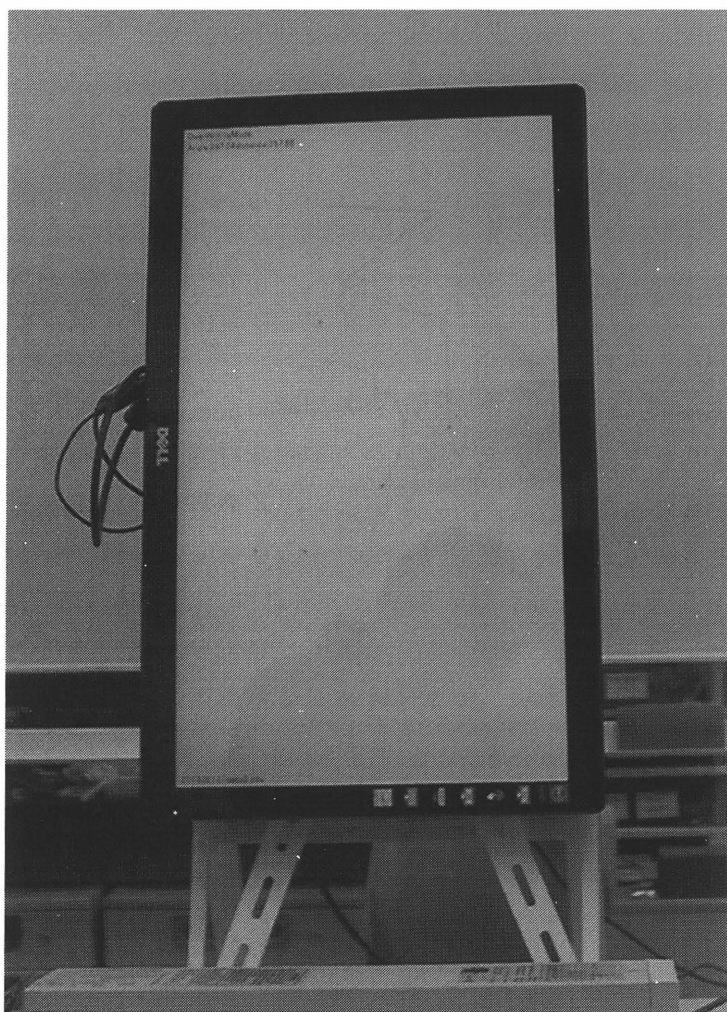


図 31 回答用タッチディスプレイ

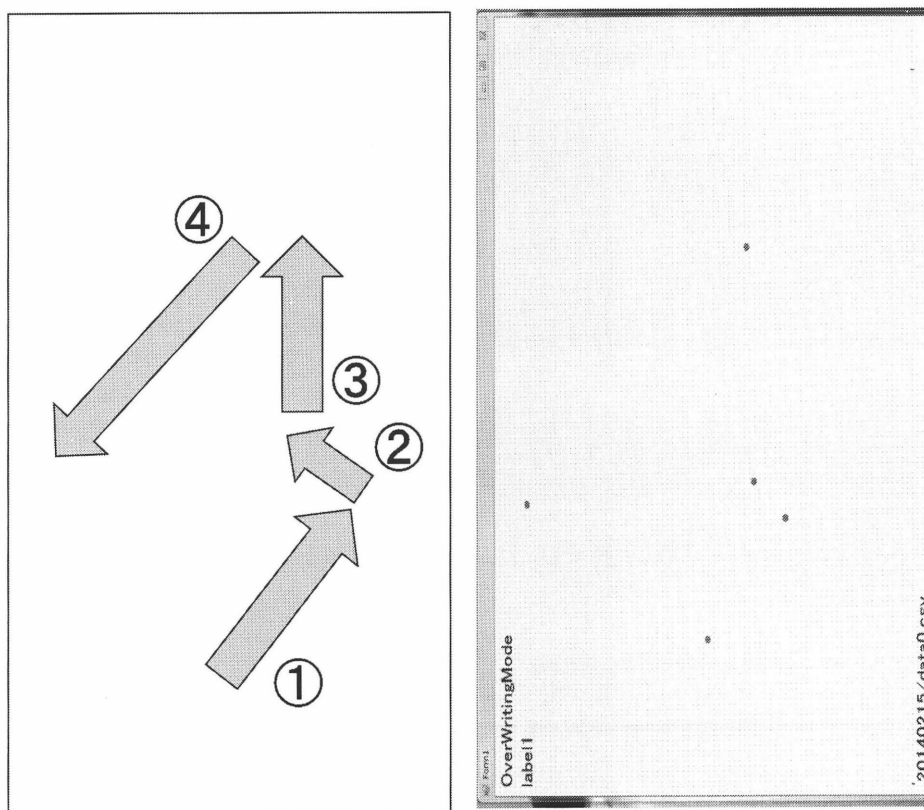


図 32 折れ線の回答法

5.4. 実験の流れ

実験の流れを図 33 に示す。

被験者は、リラックスして椅子に座り、右腕の前腕部を水平かつ前額平行面に平行な方向に構え、右手を実験装置に装着する。

その後、

- ① 実験者のキーインによりリニアアクチュエータが被験者の腕（手、指を含む）を誘導し、原点からランダムに設定された最初の線分の始点（スタートポイント）へ誘導する。

以下、提示した線分ごとに繰り返す。

- ② 実験者による「開始」の合図とともに、アクチュエータが提示する各折れ線の始点から終点に向けて被験者の手（指）を誘導する。
- ③ 始点から線分の終点にアクチュエータが到達すると、その座標で 1 秒間の保持時間を被験者に与えた。その後、現在終点である座標を次の線分の始点として、次の終点に向かいアクチュエータを動かした。

- ④ 被験者は、自らの運動に関する刺激を運動感覚で受容・知覚するとともに、示指を介して得られる試験面からの刺激を皮膚感覚で受容・知覚し、提示された場所に知覚した折れ線のメンタルイメージを脳内で想い描く。
- ⑤ アクチュエータが折れ線を全て提示した後、実験者による「原点に戻る」の合図と共に動作停止を知覚したとき、知覚した折れ線をタッチディスプレイが存在していると想定される位置に座標変換する。その後、被験者は目を開き、章3.4で使用した回答ボードと同じ場所で垂直に設置されたタッチディスプレイ上で、知覚した折れ線の各始点と終点を触れることで回答する。

なお、実験中は、被験者は目を閉じている状態で実験を行った。また、アクチュエータの音量により速さを推定し、長さ知覚に影響を与えることのないように、ヘッドフォンを装着し、白色雑音を聞かせた。

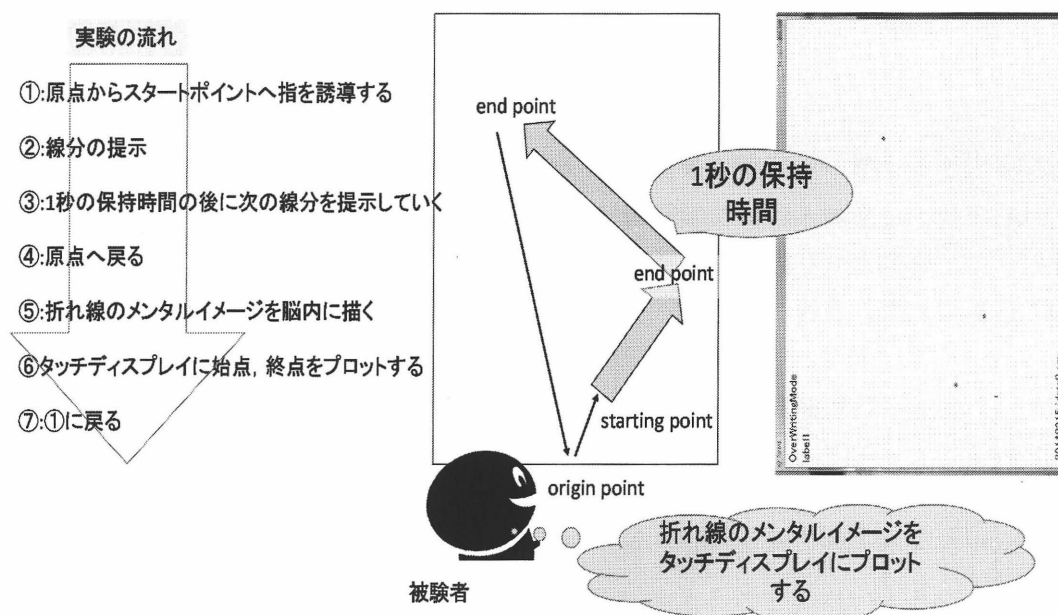


図 33 実験の流れ（確認実験）

5.5. 実験結果, および考察

図 40 は, 実験で提示したすべての線分に対して, モデル長 l_{model} を横軸にとり, それに対応する知覚長 l_{perc} と提示長 L を縦軸にプロットしたものである. この図から, 知覚長 l_{perc} はモデル長 l_{model} とよく整合していることがわかる. 図 41 は, 両者の差を拡大して示すため, 知覚長 l_{perc} のモデル長 l_{model} からの残差 $l_{perc} - l_{model}$ を縦軸にプロットしたものである. これを見ると, 残差 $l_{perc} - l_{model}$ には, わずかながら, 三角関数様の偏りが若干残っていることがわかる. この波の特性が分散分析に影響を与えていると思われる. ここで, 対応のある t 検定を適用し, 知覚長 l_{perc} とモデル長 l_{model} の母平均の差について有意性の検定を行った. その結果を表 32 に示す. この表から知覚長 l_{perc} とモデル長 l_{model} の母平均の差は有意ではないことが確認された. 角度に関してはまだモデル化角度と知覚角度の整合性はあまり見られず, t 検定においても有意差は確認されなかった.

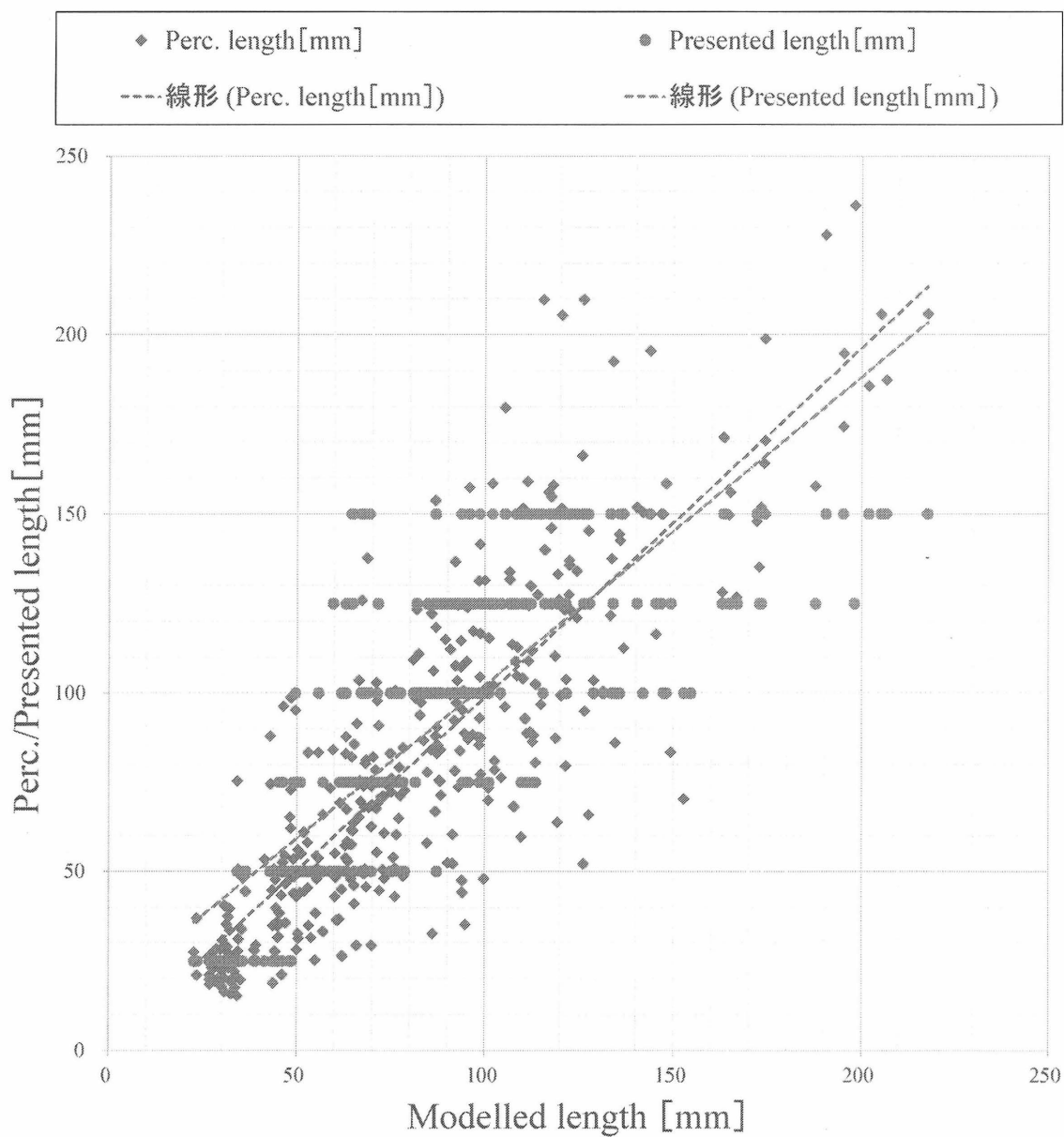


図 34 モデル長 l_{model} に対する知覚長 l_{perc} , 提示長 L の関係

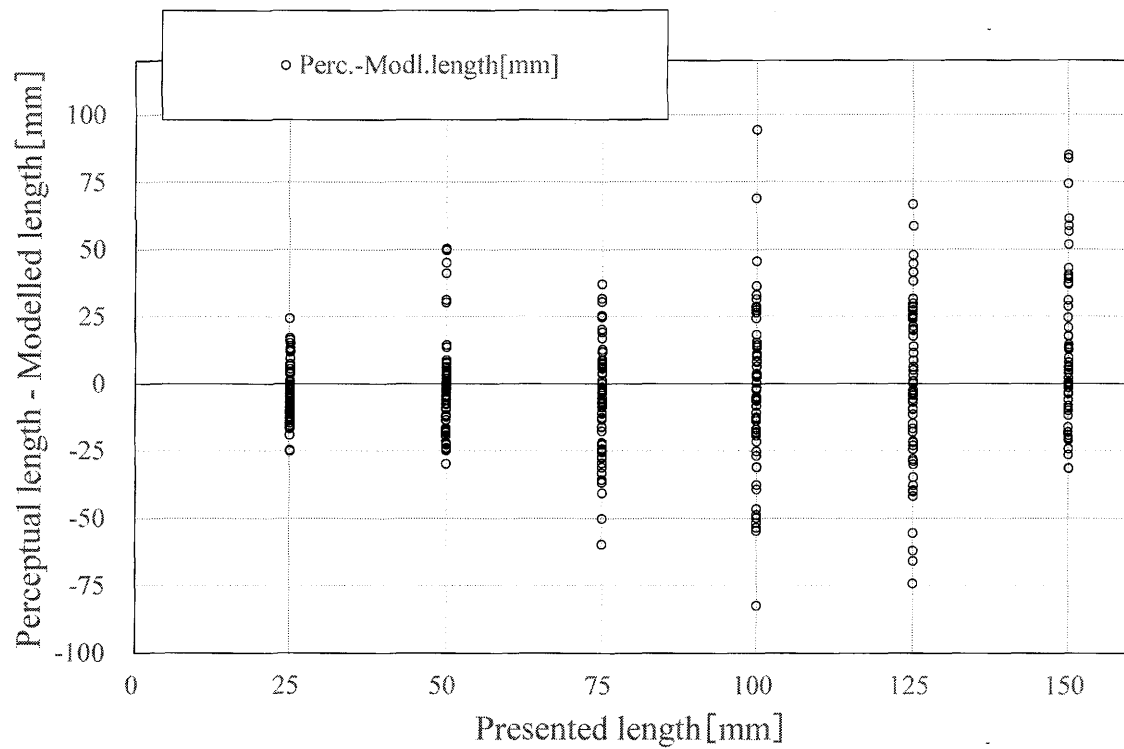


図 35 提示長 L に対する知覚長 l_{perc} —モデル長 l_{mode} の関係

表 24 T 検定：知覚長さ V.S モデル化長さ

	Modelled length [mm]	Perceptual length[mm]
Mean	82.83	82.17
Variance	1598.08	2135.24
t-statistic	0.51	
P(T<=t) Two-tailed	0.61	
Two-tailed distribution,t	1.97	

第6章. まとめ

視覚と触覚により並列的に外界の情報を入手し、これを処理・解析し、外界を認識・理解することは、視覚健常者にとってはあまりにも当然のことであり、そのことの重要性に気付きにくい。しかし、視覚障害者にとって図形の認識はきわめて困難であり、そのための不自由は計り知れない。我々は、この問題を解決すべく、視覚に代わる感覚器として、触覚を活用し、図形認識を支援するシステムの開発を目指して研究を進めてきた。

触覚は2次元で主な体に分布する感覚器を用いることから、その情報に基づいて、パターン認識できる可能性は残っている。とはいえ、パターンを一気に提示することは困難であり、対象を撫でて認識することが、当面の課題であろう。つまり、触運動覚を通して時系列的に入力される手先、指先の位置の情報を接続させて2次元のパターンを認識することが当面の方策として有力であると考えられる。本研究は、このような趣旨で着手したものであり、まずは、触運動覚を通して効率的に、そして効果的に線画が認識できるシステムの構築を目指している。その観点で、触覚(haptic perception)による線分知覚の研究に関しては、現在まで、提示図形と身体との位置関係、提示する線分の属性、動作に関する使用者の主体性の有無、表面性状、提示速度に関して行われてきたが、多くは限定された条件に限られており、知覚特性は包括的に調べられているとは言えない。このような状況を踏まえ、線図形の認識を支援するシステムの開発の一助とすべく、本研究は、触運動覚による線図形の知覚特性を包括的に検討したものである。

具体的には、二つの直動型アクチュエータを直交座標型に組み合わせることにより、2次元的な線分の提示を可能とし、これを用いて、多様な条件で包括的に心理物理実験を実施した。

実施した実験は以下の通りである。はじめに、重要な因子を抽出する予備実験を行った。次に、抽出された因子に関して線分の知覚特性をモデル化する実験を行った、最後に、得られたモデルを用いて知覚の歪を補正する方法を提案するとともに、実用を想定し、折れ線を認識する実験を行い、その有効性を確認した。

参考文献

- [1] B. L. Whitsel, O. Franzen, D. A. Dreyer, M. Hollins, M. Young, G. K. Essick, and C. Wong, Dependence of Subjective Traverse Length on Velocity of Moving Tactile Stimuli. *Somatosensory & Motor Research*, 3(3) (1986), pp. 185-196.
- [2] Mei-Fang Cheng, Tactile-Kinesthetic Perception of Length, *The American Journal of Psychology*, 81(1) (1968), pp. 74-82
- [3] R. H. Day and G. C. Avery, Absence of the horizontal-vertical illusion in haptic space. *Journal of Experimental Psychology*, 83(1-1) (1970), pp. 172-173
- [4] F. M. Marchetti, S. J. Lederman, The haptic radial-tangential effect: Two tests of Wong's "moments-of-inertia" hypothesis, January 1983, Volume 21, Issue 1, pp 43-46
- [5] Laura Armstrong and Lawrence E. Marks, Haptic perception of linear extent. *Perception & Psychophysics*, 61(6) (1999), pp. 1211-1226.
- [6] Susan J. Lederman, Roberta L. Klatzky, and Paul O. Barber, Spatial and movement-based heuristics for encoding pattern information through touch. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114(1) (1985), pp. 33-49.
- [7] Henry Faineteau · Edouard Gentaz · Paolo Viviani, The kinaesthetic perception of Euclidean distance: a study of the detour effect, September 2003, Volume 152, Issue 2, pp 166-172
- [8] W. Blumenfeld, The relationship between the optical and haptic construction of space *Acta Psychologica (Hague)*, 2 (1936), pp. 125-174.
- [9] Lechelt E C, Verenka A, 1980, "Spatial anisotropy in intramodal and cross-modal judgments of stimulus orientation: the stability of the oblique effect" *Perception* 9(5) 581 – 589
- [10] Nakayama N, Loomis J M, 1974, "Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception: a hypothesis" *Perception* 3(1) 63 – 80
- [11] F. Vega-Bermudez, K. O. Johnson, and S. S. Hsiao, Human tactile pattern recognition: active versus passive touch, velocity effects, and patterns of confusion. *Journal of Neurophysiology*, 65(3) (1991), pp. 531-546.
- [12] Pierre Wydoodt, Edouard Gentaz, and Arlette Streri, Role of force cues in the haptic estimations of a virtual length. *Experimental Brain Research*, 171(4) (2006), pp. 481-489.
- [13] Kazunori Terada, Akinori Kumazaki, Daisuke Miyata, and Akira Ito, Haptic Length Display Based on Cutaneous-Proprioceptive Integration. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 18(4) (2006), pp. 489-498.
- [14] Wouter M. Bergmann Tiest, L. Martijn A. van der Hoff, and Astrid M. L. Kappers, Cutaneous and kinaesthetic perception of traversed distance. *Proceedings of the World Haptics Conference (IEEE)* (2011), pp. 593-597.

[15] Yoshihiko Nomura, Syed Muammar Najib SYED YUSOH, Ryota SAKAMOTO “Hand-Motion Perception by Four Haptic Modes: Active/Passive and with/without Fingerpad Cutaneous Sensation” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 7(4), 560-575, 2013

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧な御指導，御助言を賜りました三重大学工学部 野村由司彦教授，ならび坂本良太助教に厚く御礼申し上げます．この場をお借りして謹んで感謝の意を表します．

また、実験に協力頂いたプロセス解析研究室のメンバーにお礼申し上げます．

最後に，本論分の作成に当たり，多大な御協力を頂きました 野村由司彦教授に重ねて御礼申し上げます．

付録

確認実験結果

提示線分，提示本数:長さ効果

知覚長さに対する提示線分，提示本数の知覚長さの知覚長の歪とモデル式の長さ知覚の知覚長の歪のひずみの差を図 32 に示す．また，分散分析の結果を表 24 に，Bartlett の等分散検定を表 25 に示す．

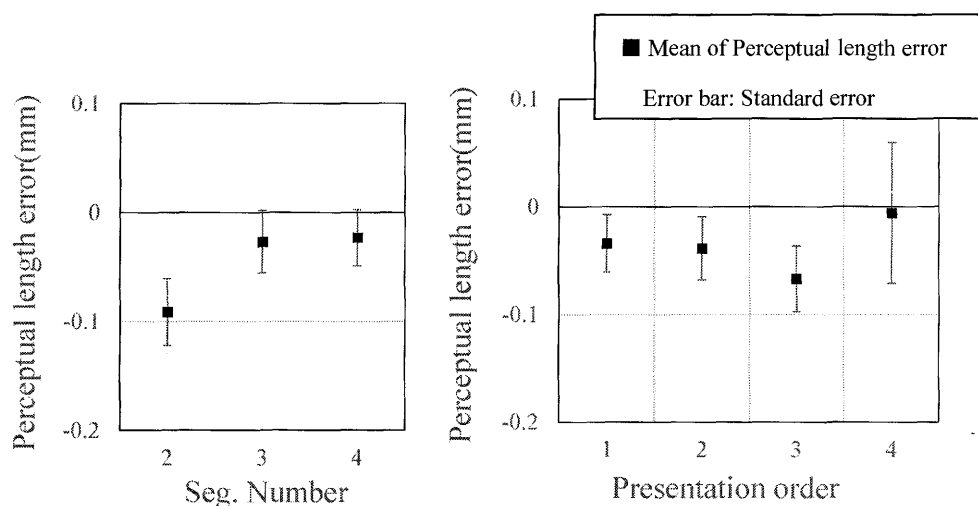


図 36 提示線分，提示本数（長さ効果）

表 25 分散分析表：提示線分，本数（長さ効果）

Factor	F	* : 0.05	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Seg. Number	1.57	3.02	4.67	7.05	No sig.dif.
Presentation order	0.41	2.62	3.84	3.36	No sig.dif.

表 26 Bartlett の等分散検定:提示線分，提示本数（長さ効果）

Factor	Chi-square (χ^2)	* : 0.05	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Seg. Number	3.25	5.99	9.21	13.81	No sig.dif.
Presentation order	11.04	7.81	11.34	16.26	*

提示速度, 提示長さ, 提示角度, 被験者:長さ効果

知覚長さに対する提示速度, 提示長さ, 提示角度, 被験者の知覚長さの知覚長の歪とモデル式の長さ知覚の知覚長の歪のひずみの差を図 33-35 に示す. また, 分散分析の結果を表 26 に, Bartlett の等分散検定を表 27 に示す.

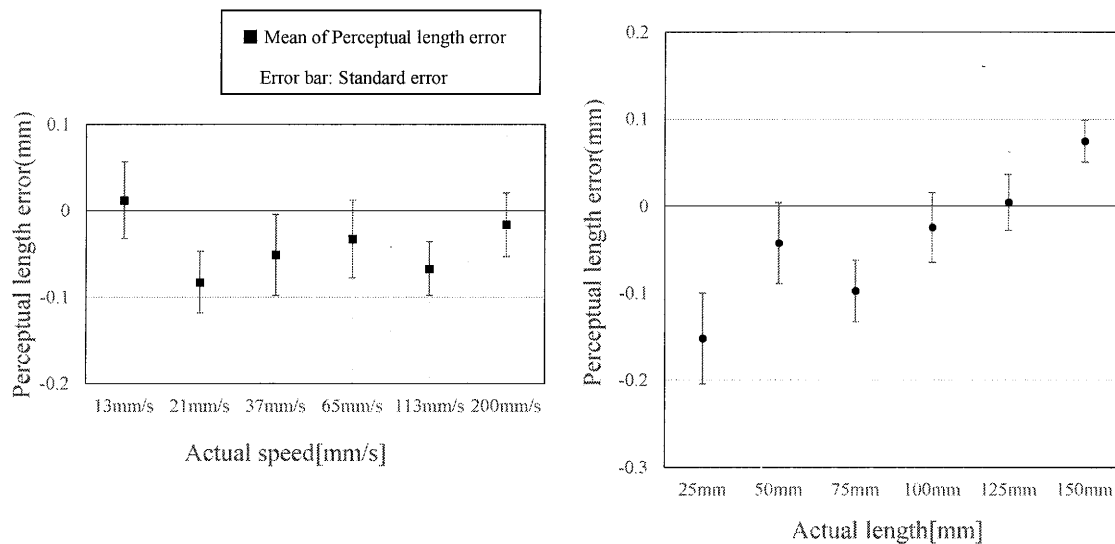


図 37 提示速度, 提示長さ (長さ効果)

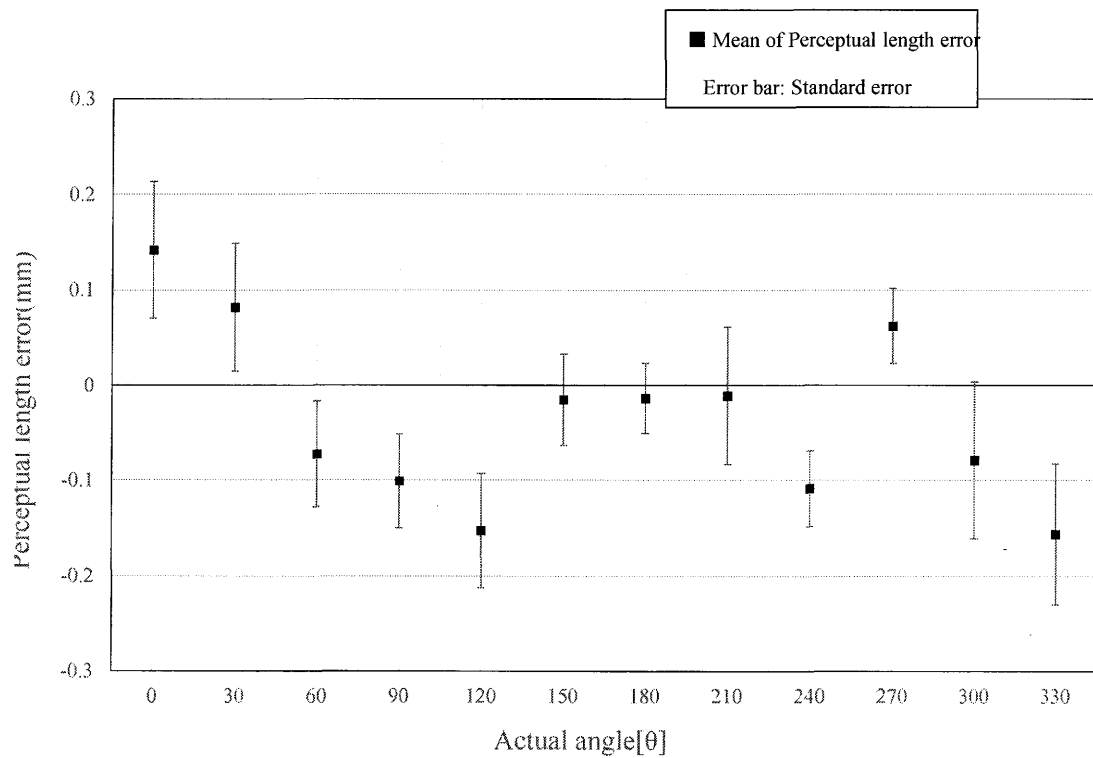


図 38 提示角度（長さ効果）

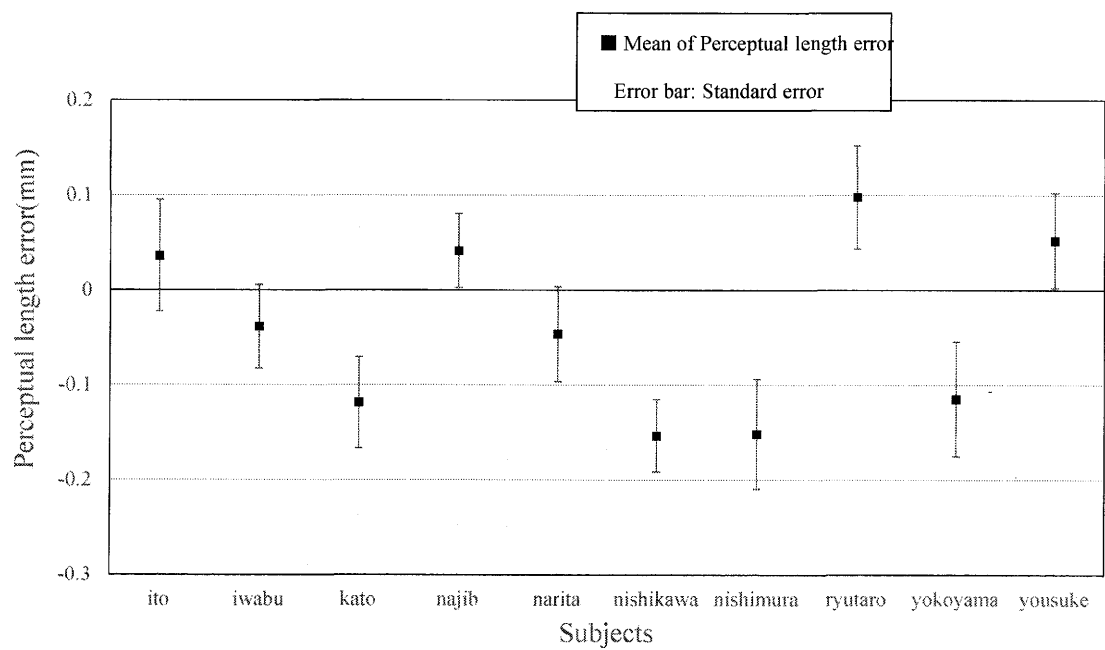


図 39 被験者（長さ効果）

表 27 分散分析表：提示角度，提示長さ，提示速度，被験者（長さ効果）

Factor	F	*:0.05	**:0.01	***:0.001	Level of Significance
Angle	2.48	1.82	2.30	2.94	**
Length	4.23	2.24	3.07	4.22	***
Speed	0.81	2.24	3.07	4.22	No sig.dif.
Subjects	3.489	1.91	2.46	3.20	***

表 28 Bartlett の等分散検定：提示角度，提示長さ，提示速度，被験者（長さ効果）

Factor	Chi-square (χ^2)	*: 0.05	** : 0.001	*** : 0.001	Level of Significance
Angle	21.75	19.67	24.72	31.26	*
Length	41.37	11.07	15.08	20.52	***
Speed	14.90	11.07	15.08	20.51	*
Subjects	15.89	16.91	21.66	27.88	No sig.dif.

提示線分，提示本数:角度効果

知覚角度に対する提示線分，提示本数の角度知覚誤差とモデル式の角度知覚誤差のひずみの差を図 36 に示す．また，分散分析の結果を表 28，Bartlett の等分散検定を表 29 に示す．

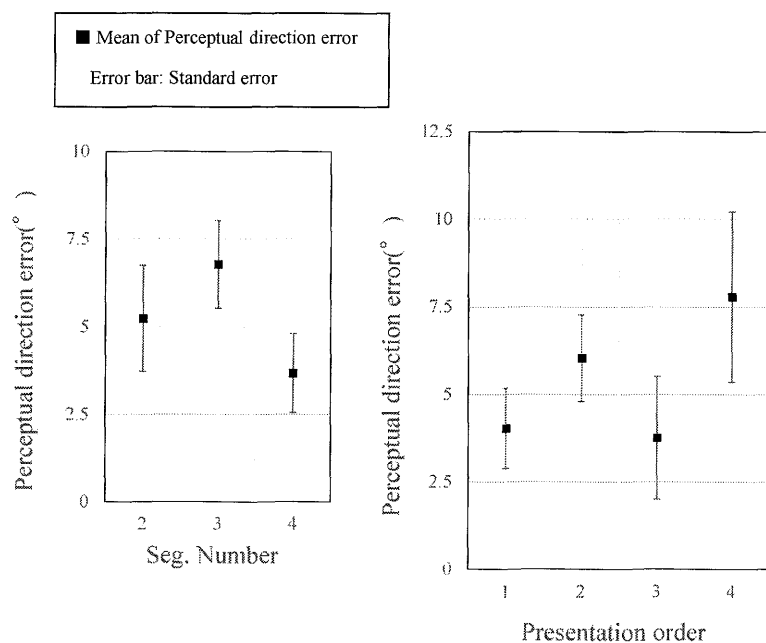


図 40 提示線分，提示本数（角度効果）

表 29 分散分析表：提示線分，提示本数（角度効果）

Factor	F	* : 0.05	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Seg. Number	1.89	3.02	4.67	7.05	No sig.dif.
Presentation order	1.27	2.62	3.84	3.36	No sig.dif.

表 30 Bartlett の等分散検定:提示線分，提示本数（角度効果）

Factor	Chi-square (χ^2)	* : 0.05	** : 0.01	*** : 0.001	Level of Significance
Seg. Number	0.40	5.99	9.21	13.81	No sig.dif.
Presentation order	6.00	7.81	11.34	16.26	No sig.dif.

提示速度，提示長さ，提示角度，被験者:角度効果

知覚角度に対する提示速度，提示長さ，提示角度，被験者の角度知覚誤差とモデル式の角度知覚誤差のひずみの差を図 37-39 に示す. また, 分散分析の結果を表 30 に, Bartlett の等分散検定を表 31 に示す.

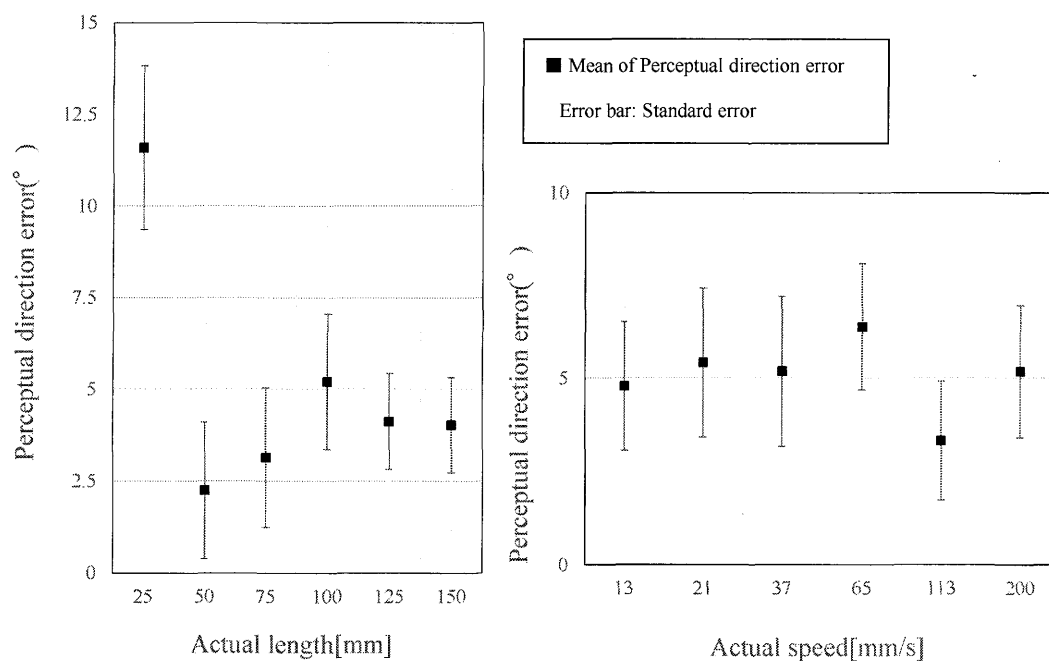


図 41 提示長さ，提示速度（角度効果）

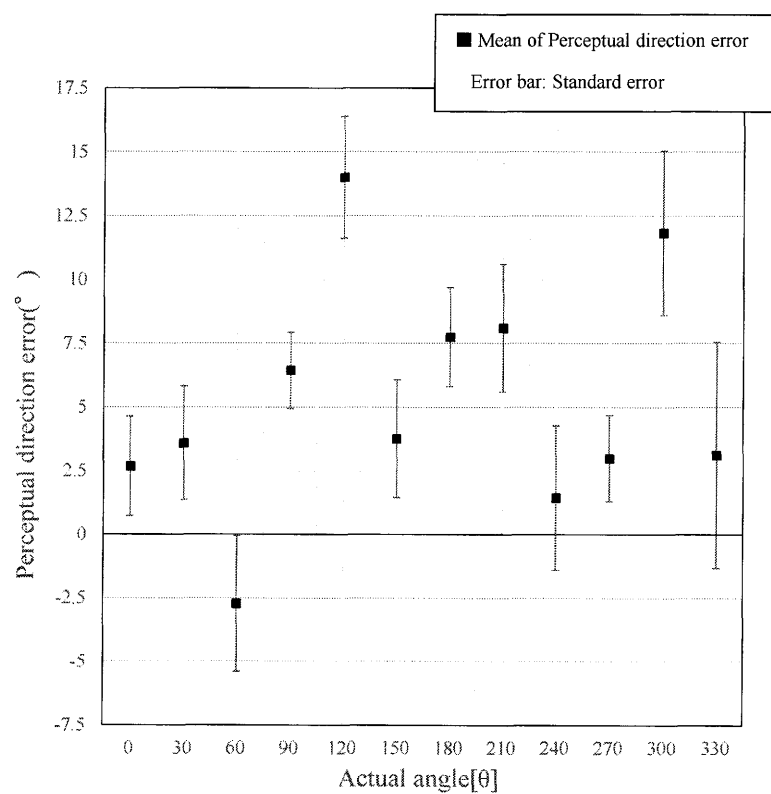


図 42 提示角度 (角度効果)

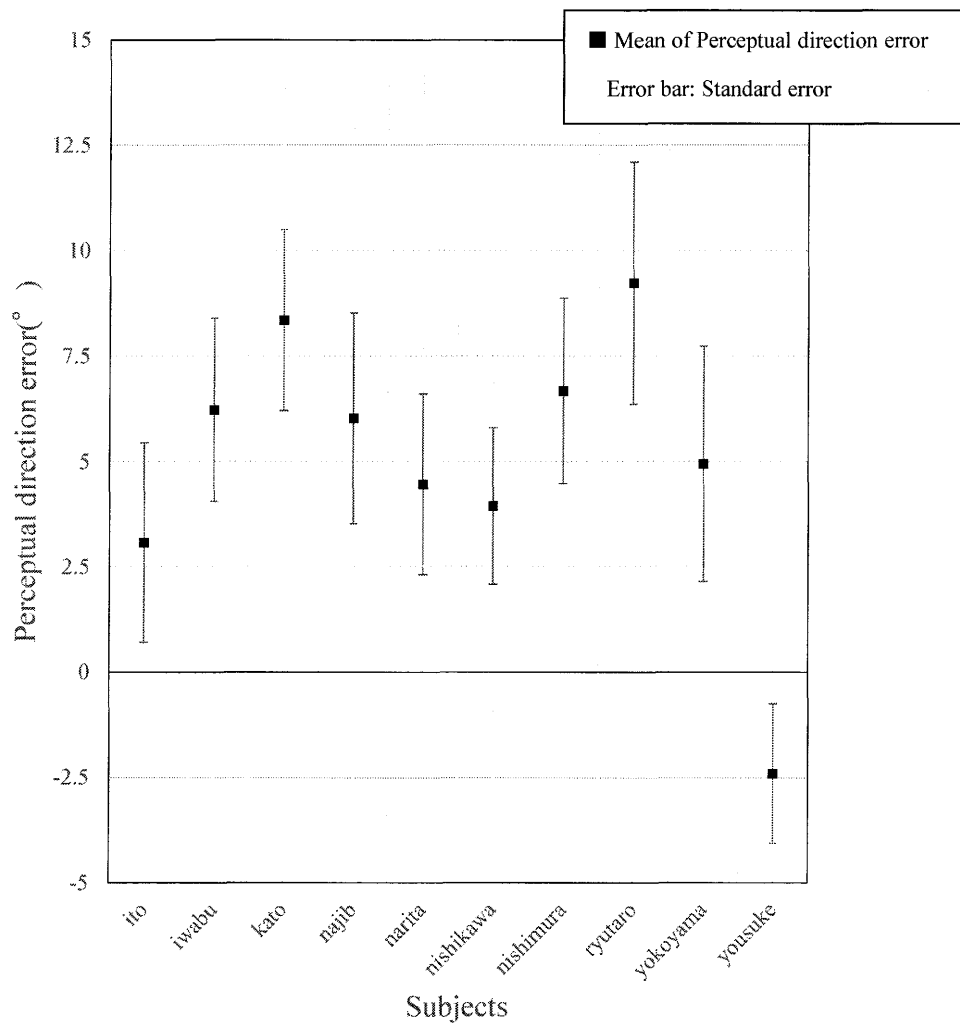


図 43 被験者（角度効果）

表 31 分散分析表：提示角度，提示長さ，提示速度，被験者（角度効果）

Factor	F	*:0.05	**:0.01	***:0.001	Level of Significance
Angle	3.73	1.82	2.30	2.94	***
Length	3.83	2.24	3.07	4.22	**
Speed	0.34	2.24	3.07	4.22	No sig.dif.
Subjects	2.15	1.91	2.46	3.20	*

表 32 Bartlett の等分散検定：提示角度，提示長さ提示速度，提示長さ，被験者（角度効果）

Factor	Chi-square (χ^2)	* : 0.05	** : 0.001	*** : 0.001	Level of Significance
Angle	34.35	19.67	24.72	31.26	***
Length	41.37	36.68	15.08	20.52	***
Speed	5.27	11.07	15.08	20.51	No sig.dif.
Subjects	17.37	16.91	21.66	27.88	*

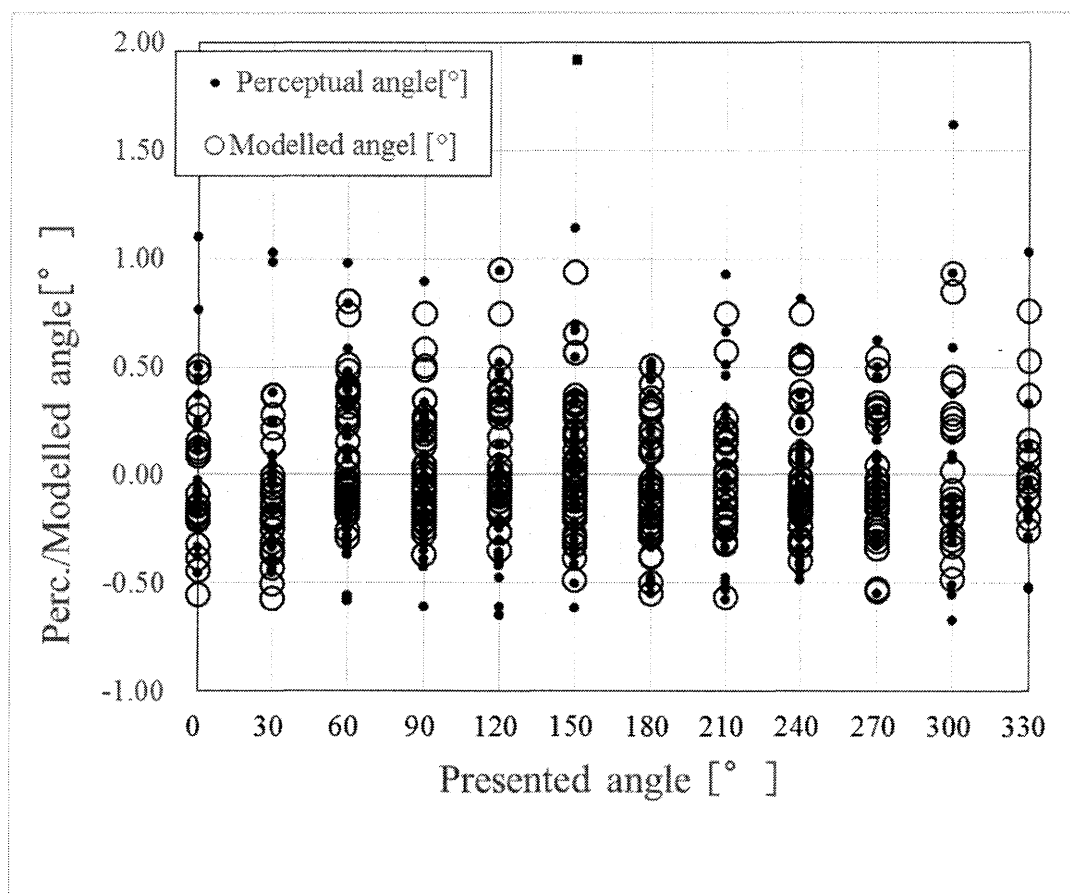


図 44 モデル角度 θ_{model} に対する知覚角度 θ_{perc} ，提示角度 θ の関係

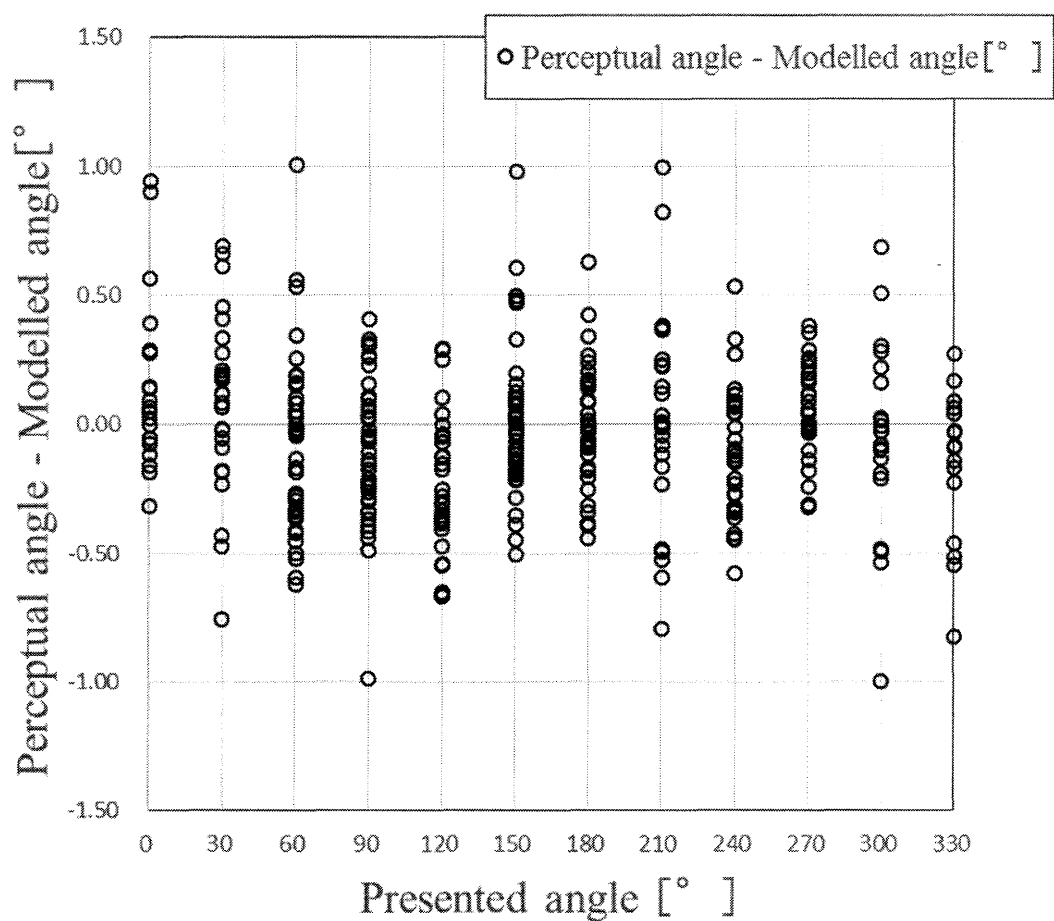


図 45 提示角度 θ に対する知覚角度 θ_{perc} - モデル角度 θ_{mode} の関係

表 33 T 検定：知覚角度 V.S モデル化角度

	Modelled angel [°]	Perceptual angle[°]
Mean	0.021	-0.019
Variance	0.085	0.13
t-statistic	2.40	
Two-tailed distribution,t	1.96	

提示長 L に対する知覚長 l_{perc} の例

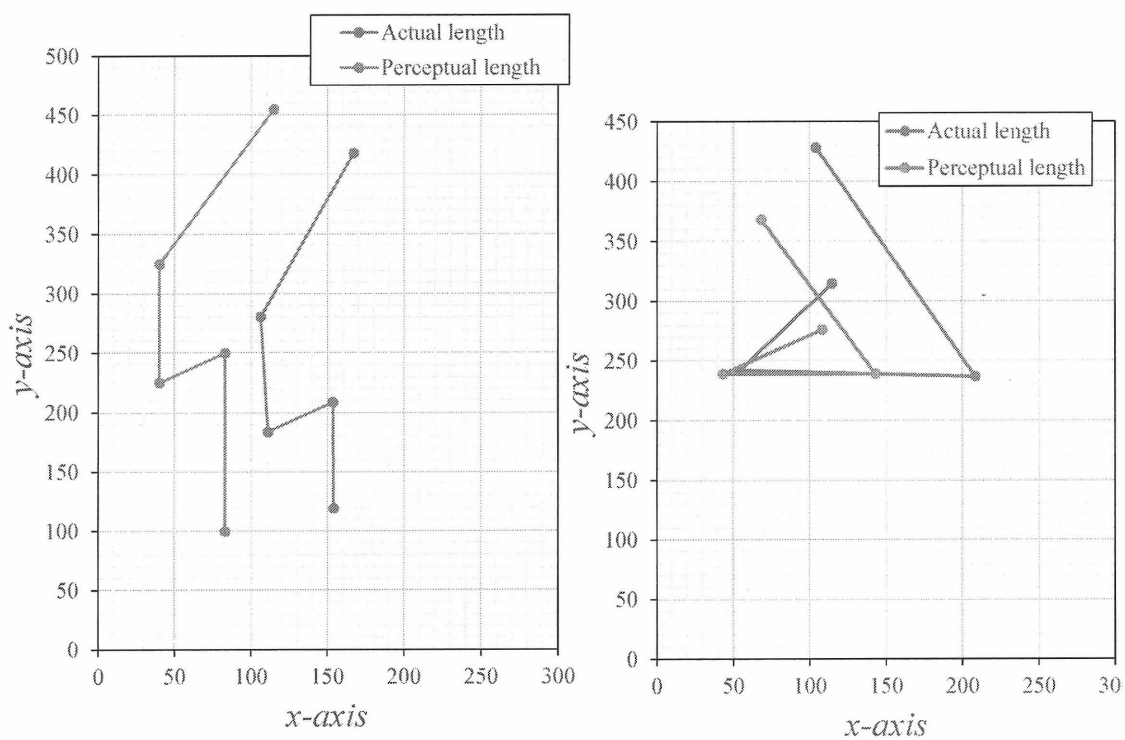


図 46 知覚歪の小さい人, 大きい人の関係