

修士論文

上肢の運動における
手先速度の知覚精密度と動作精密度の比較

指導教員 加藤 典彦 准教授

令和元年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

418M107 伊藤 優汰

目次

第1章 緒言	3
1.1 研究背景	3
1.2 従来研究	4
1.3 本研究の方針	6
第2章 手先速度に関する精密度実験	7
2.1 実験装置	7
2.1.1 2自由度 SCARA 型ハプティックデバイス	7
2.1.2 ハプティックデバイスの作用力による目標運動の提示方法	8
2.1.3 手先速度提示用, 速度メーター	9
2.2 実験条件	10
2.3 実験方法	12
2.3.1 「知覚」精密度測定実験	13
2.3.2 「動作」精密度測定実験	14
2.3.3 「知覚・動作」精密度測定実験	15
2.4 指標とする評価値	16
2.5 実験結果および考察	20
2.5.1 「知覚」と「動作」の精密度の比較	20
2.5.2 「知覚・動作」の精密度	22
2.5.3 主観評価	25
第3章 結言	28
謝辞	29
参考文献	30

第1章 緒言

1.1 研究背景

スポーツや運筆などの運動を学習する手段として、画像や映像を用いた視覚刺激による手法がある。この手法は、手軽に行えることや全体の動きの認識のしやすさ等のメリットがあるが、学習者は実際の運動を体感することができず、筋力の発揮量などを伝える事も難しい。一方で、指導者に手や足などを手取り足取り動かしてもらうことで動作を学習する方法もある。この場合、学習者は実際の動きそのものを自身の自己受容器(身体各部位の位置や速度、加速度等を知覚する感覚受容器)を通じて体感することができる。しかしながら、この手法では学習時に指導者が必要であることから、視覚刺激による学習に比べて手軽さに欠けている。そこで、近年、スポーツや運筆などの動作教示にハプティックデバイスを適用する研究が行われるようになってきている。Williamsらは、振れ幅や波長がランダムに設定された複数の連続した目標波形(軌道)をなぞるように上肢を動かすタスクにおいて、ハプティックデバイスにより目標波形からの誤差を減少させる運動支援、また敢えて目標波形からの誤差を増加させる方向に運動を妨げるように学習させた[1]。その結果、支援直後の確認実験では軌道の誤差を減少させる運動支援を受けた群の学習効果が高かったが、1日後の再確認実験では、軌道の誤差を増加させる運動支援を受けた群の学習効果が高い傾向が得られ、学習時に敢えて負荷を増大させることの利点を報告した。Lauraらは、全身運動を対象としたテニスのストロークタスクにおいて、パラレルワイヤー駆動型ハプティックデバイスを用いた動作支援を行うことにより、実際のスポーツに用いる動作の教示を行った[2]。その結果、触覚による動作支援は熟練者より未熟練者に適していること、それも特に難易度が高く非連続的な動作に適しているという傾向が得られた。これらの研究が示すように、ハプティックデバイスを用いた主な運動教示において、どのような技能レベルの学習者にどのような技能を教えるかによって、有効な学習支援の方法は異なってくるのがわかる。

運動学習はこれらのように外形的に考察できるが、その一方で学習者に関して知覚や運動などの内的な機能にも関わってくる。ハプティックデバイスを用いた主な運動教示において、学習者がどのような心理的、身体的プロセスをたどって学習をするものなのかを考えてみよう。Fig.1に示すように、運動学習には、大きく分けて、知覚と動作という2つのプロセスが存在する。まず、デバイスによって目標動作に対する触覚(ここでの「触覚」は皮膚感覚ではなく、骨格筋の筋長や筋収縮速度、そして筋張

力に対する自己受容感覚を指す) の刺激をヒトに与える。ヒトは脳内でその刺激を受容, 知覚し, 目標運動を認知し, 記憶する。さらに, 記憶した運動を想起し, 想起した運動に基づいて運動を計画し, 実行することで, 教示プロセスが終了する。

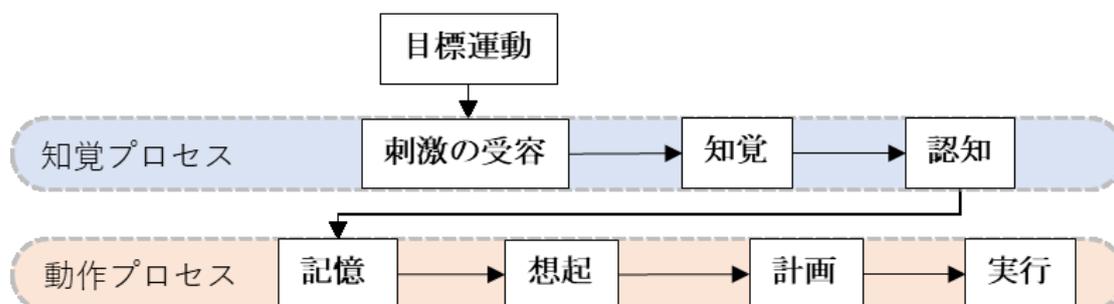


Fig.1 Motion teaching process using haptic devices

ここで, ハプティックデバイスによって教示された目標運動は, 必ずしも計画・実行した運動と同じになるとは限らないという問題が存在する。その原因は, これらの多岐に渡るプロセス中で生じる。例えば, 自己受容器による刺激受容時に生じる知覚の誤差や, さらには脳から神経を介して筋に伝えられる指令の誤差も含め, 伝えられた指令に基づいて筋を駆動したときの動作の誤差などが考えられる。このような, ヒトはどの程度の精密度で触覚刺激を認知することができるのかという「知覚の精密度」, およびどの程度の精密度で計画した動作を実行することができるのかという「動作の精密度」の2つの精密度それぞれを個別に評価することで, 運動教示によって生じる誤差について理解を深めることが重要であると考えられる。ここで, ヒトの「運動」を構成する物理量として身体各部の「位置」「速度」「加速度」が重要となる。本研究では, その手始めとして, 運動学習の評価に役立てるべく, 心理物理実験により, 上肢の「速度」に関する「知覚精密度」, および「動作精密度」を測定, 比較し, ヒトの知覚と動作の性能を検討する。

1.2 従来研究

まずヒトの速度知覚における速度差弁別特性を測る代表的な指標として, 「速度の丁度可知差異 (JND: Just Noticeable Differences, 以下, JND)」がある。速度 JND とは, ある基準となる速度に対し, ヒトがその違いに気付くことのできる最小の速度変化量である。最小といっても試行間, 個人間でのばらつきは避けがたいことから, JND は, 「判断回数の 50%の信頼率で弁別される 2 刺激間の最小差異」というように確率的に定義される。この定義から, 知覚した速度がどの程度ばらつくのかという精密度

の指標としても扱うことができる。以下では、この速度 JND を測定した研究について説明する。

ヒトの速度知覚に関する研究として、Kerr らは、肘関節の強制伸展運動における速度 JND を測定した[3]。被験者の肘関節は連続して 2 回、異なる運動速度でデバイスにより強制的に動かされた。その直後、被験者は、2 回目の運動速度が 1 回目の運動速度に比べて「速く感じた/遅く感じた」を回答した（「/」は「または」を表す。以下、同様）。2 回の運動は、一般に、1 回目の運動速度は「基準速度」、2 回目の運動速度は「比較速度」と呼ばれている。その結果、基準速度が大きいほど速度 JND が大きくなる傾向を示した。これは、いわゆる、Weber の法則に近い結果が得られたといえる。安井らは、肩関節と肘関節のそれぞれ、また 2 関節が統合された強制運動において、1 回の動作中に速度が変化する条件下で手先の速度変化の知覚性能を測定した[4]。被験者はデバイスによって肩関節と肘関節のそれぞれ、または 2 関節が統合された 1 回の強制運動（リハビリなど、医療系の学術分野では、これは「他動運動」と呼ばれ、能動的な運動は「自動運動」呼ばれている）を受け、運動中に「速度が速くなったと感じた/速度変化を感じなかった」を回答した。その結果、[1]と同様に基準速度が大きい方が速度 JND は大きい傾向を示した。その他、新たな知見として、動作に用いられる関節数の違いによる速度 JND の変化は見られないことを見出した。閉眼しているので手先そのものは観測できず、各関節の受容器を統合することしかできないが、前述の結果は、用いる関節のモード、すなわち部位（肩または肘）や個数（肩または肘の 1 個、あるいは肩と肘の 2 個）とは無関係に、身体の複数の関節を動作した結果として生じる手先の位置や速度に基づいて運動を知覚しているということ、各関節の自己受容感覚からの運動の情報（いわゆる関節座標系に基づく関節座標）を統合して、自身の身体を基準する 3 次元座標系上で手先の運動を知覚していることを意味している。手先に注意を向けているのであるから当然のことと思われるかもしれないが、それでも、脳内で関節座標から手先の運動に変換していることから、用いる関節のモードによって手先運動の知覚性能が異ならざるを得ないと考えの方がむしろ自然であり、そうならなかったという意味では、身体の運動の知覚、ひいては動作を理解する上で重要な知見である。

また、ヒトが目標の運動を知覚し、動作を行った場合の再現性能に関する研究として、Liu らは、上肢を用いて空間に円を描くタスクにおいて、視覚による動作支援を受ける場合と 3 自由度ハプティックデバイスを右手で保持し支援を受ける場合について、比較した[5]。結果は、視覚による支援とデバイスによる支援の両者で同等の学習効果を示した。また、赤塚らは、2 リンク型(肩-肘)ハプティクスデバイスを用いて目標とする平面運動を学習するタスクにおいてデバイスからの支援強度(デバイスによる誘導力、いわゆる他動運動を強制する力)による再現性の違いを測定した[6]。その結果、

支援強度が低すぎる場合には学習効果は小さいが、ある程度の支援強度を境として、それ以上の強い誘導では、学習効果は変わらないという結果を示した。

このように、速度の知覚、あるいは知覚した運動に基づく動作について個別に調べているが、知覚と動作の関係については調べられていない。しかし、前述のように、運動の学習に関わる一連のプロセスを評価するためには、知覚と動作の関係をすることは重要であると考えられる。そこで、本研究では、運動における速度の知覚精密度と動作精密度をそれぞれ測定するとともに、それらがハプティックデバイスによる動作支援にどのように関わってくるのかについて調査した。

1.3 本研究の方針

本研究は、肩関節と肘関節の動きを複合した2自由度運動における手先の運動速度を対象に、「知覚」のみ、「動作」のみ、そして知覚してから動作する「知覚・動作」の精密度について調査を行う。それぞれの精密度について以下に説明する。

(1) 「知覚」の精密度

デバイスにより強制された他動運動により提示された目標速度に対して、知覚・認知した速度のばらつき。

(2) 「動作」の精密度

自分で計画した目標の運動速度に基づいて、自ら計画・再現した速度のばらつき。

(3) 「知覚・動作」の精密度。

デバイスにより強制された他動運動により提示された目標速度を知覚・認知した後に、その速度に基づいて計画再現した速度のばらつき。

第2章 手先速度に関する精密度実験

2.1 実験装置

2.1.1 2自由度 SCARA 型ハプティックデバイス

学習者が行う運動の計測およびハプティックデバイスを用いた目標運動提示のために、肩関節の水平屈伸運動（以下、屈曲または伸展を総称して「屈伸運動」とよぶ）および肘関節の屈伸運動を制御するサーボモータが取り付けられた二自由度の SCARA 型ハプティックデバイスを製作し実験に用いた。そのハプティックデバイスを学習者に装着した状況を Fig. 2 に示す。肩関節部および肘関節部に取り付けられたモータは、それぞれ DCX35L, EC-4pole 30（ともに Maxon Motor (株) 社製）である。肩関節部モータの出力軸にはギア比 100 : 15, 肘関節部モータにはギア比 4.3 : 1 の減速機が取り付けられている。肩関節および肘関節の角度はエンコーダ（肩関節：HEDL 5540, 肘関節：ENC 30 HEDL, ともに Maxon Motor(株)社製）を用いて計測した。なお、この減速機を取り付けたモータはバックドライバビリティを備えており、被験者は装置による抵抗を感じることなく、腕を動作することができる。また、本装置は、学習者が脱力をして、学習者の腕の重力を支えることのできるだけの強度を持つ。また、被験者の安全を保障するために、デバイスの各関節の可動範囲は人間の肘・肩の可動範囲を超えないように機構的に制限されており、万が一、顔に危険が及ばないように仕切りを設けた。実験に参加する被験者には、参加するにあたり、実験の目的、方法、予期される影響、神々の保護に関することなどについての十分な説明を受けた上で参加させ、倫理委員会による承認を得た。

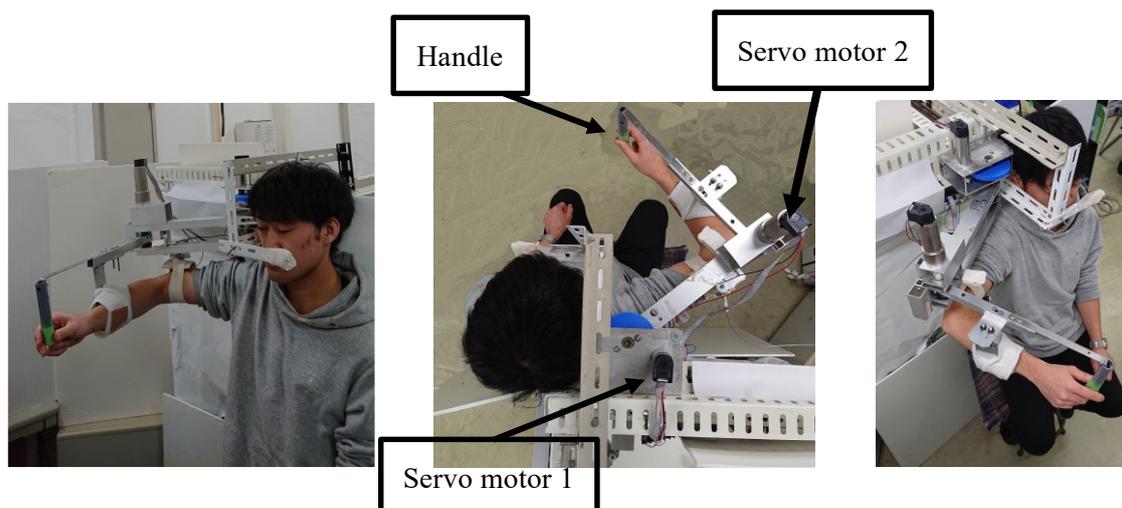


Fig.2 Subject wears the haptic device developed.

2.1.2 ハプティックデバイスの作用力による目標運動の提示方法

ハプティックデバイスを用いて実験を行う際、被験者には、手先の「目標位置」に対する「被験者の現在位置」の誤差を減らす方向に、誤差の大きさに比例した力を与えた。すなわち両位置の間の誤差と、それらをつなぐ仮想的なバネ剛性によって定められ、以下の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K & 0 \\ 0 & -K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{human}(t) - X_{target}(t) \\ Y_{human}(t) - Y_{target}(t) \end{bmatrix} \dots (1)$$

式中、 t は動作開始後の時刻、 $F_x(t)$ 、 $F_y(t)$ は x 軸、 y 軸方向の装置の作用力、 K はバネ剛性、 $X_{human}(t)$ 、 $Y_{human}(t)$ は x 軸、 y 軸方向のの学習者の手先位置、 $X_{target}(t)$ 、 $Y_{target}(t)$ は x 軸、 y 軸方向の、 t 秒後の目標運動の手先位置を表す。今回は、強制運動を想定した実験であるため、脱力状態で腕を強制して動かすために十分なトルクを発揮できる値としてバネ剛性 $K=45.0\text{N/cm}$ とした。

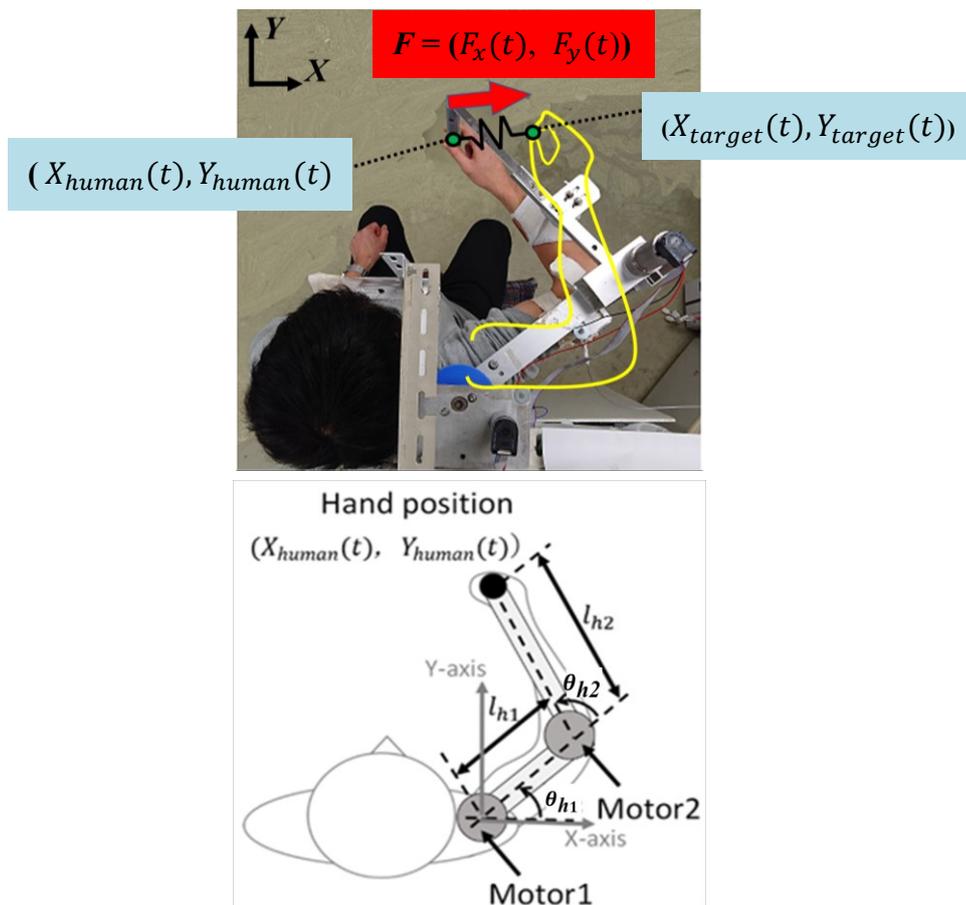


Fig.3 The parameters of human arm

本研究のデバイスは、2 自由度の SCARA 型デバイスであることから、各関節に取り付けられたモータの回転トルクと手先に作用する力との関係は、次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} \quad (J \text{ はヤコビ行列}) \cdots (2)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(t)}{\partial \theta_{h_1}(t)} & \frac{\partial x(t)}{\partial \theta_{h_2}(t)} \\ \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_{h_1}(t)} & \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_{h_2}(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_{h_1}(t) - l_2 \sin(\theta_{h_1}(t) + \theta_{h_2}(t)) & -l_2 \sin(\theta_{h_1}(t) + \theta_{h_2}(t)) \\ l_1 \cos \theta_{h_1}(t) + l_2 \cos(\theta_{h_1}(t) + \theta_{h_2}(t)) & l_2 \cos(\theta_{h_1}(t) + \theta_{h_2}(t)) \end{bmatrix} \quad (3)$$

また、デバイスの関節が微小変化したときの関節角度と位置姿勢の関係は以下のよう表すことができる。

$$\begin{bmatrix} X_{human}(t) - X_{target}(t) \\ Y_{human}(t) - Y_{target}(t) \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \theta_{h_1}(t) - \theta_{target_1}(t) \\ \theta_{h_2}(t) - \theta_{target_2}(t) \end{bmatrix} \cdots (4)$$

(1)(2)(4)より、モータの発揮するトルクは以下のように計算される。

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix} = J^T J \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{h_1}(t) - \theta_{target_1}(t) \\ \theta_{h_2}(t) - \theta_{target_2}(t) \end{bmatrix} \cdots (5)$$

2.1.3 手先速度提示用、速度メーター

「動作」の精密度測定実験において、目標の手先速度と時々刻々の被験者の手先の速度を教示するために、Fig.4 に示す速度メーターを用いた。速度メーターはディスプレイ (横 50.83cm, 縦 28.63cm) に直径 20.0cm の大きさで表示され、時々刻々の手先の速度を、視覚を介して被験者に教示することができる。円の中心から伸びているオレンジ色の針は、時々刻々の手先の速度を示し、速度目盛上に表示される赤色の線分が示す目標の手先速度に合わせながら腕を運動させることで、被験者は目標速度と現在速度との差を認識することができる。ただし、すべての目標速度において赤色線分は同じ位置に表示していることから、学習者は速度差の大小は知り得るが、現在速度の絶対値を知ることはできない。学習者には、「動作」の精密度測定実験では、同じ目標速度を目指して繰り返し運動した場合にどれだけばらつくのかという精密度を調べることが目的であるため、この目標速度大きさそのものの偏りは気にする必要はないと教示した。よって被験者は、この速度メーターを介して自分なりの感覚で目標速度

を知覚・認識し，できる限り自分が認識した速度と同じ速度になるように，繰り返し運動すればよい．このように，被験者が目標速度そのものの精度（偏り，あるいは系統誤差）を気にしない条件下で，精密度（ばらつき，あるいは偶然誤差）を測定した．

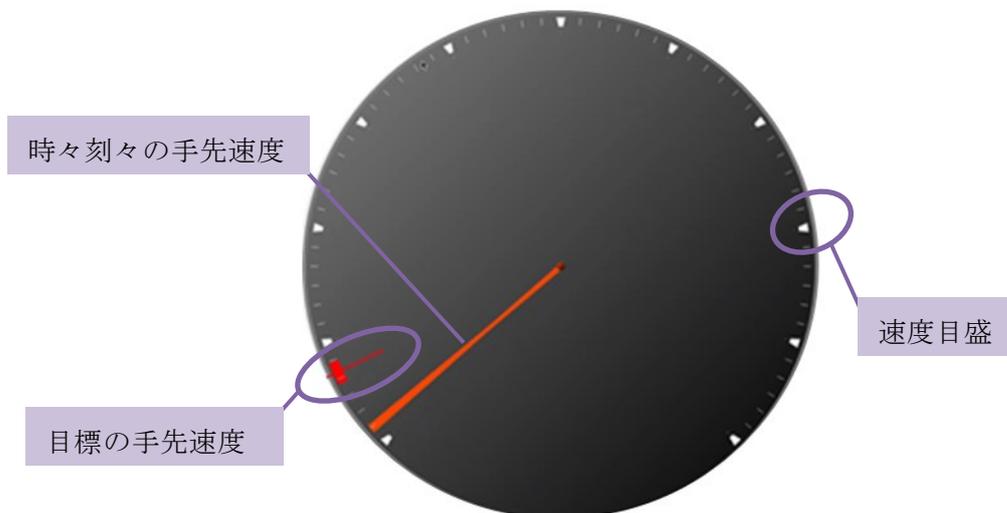


Fig.4 Speed meter used for presenting hand speed.

2.2 実験条件

実験条件を Table 1 に示す．被験者は健常な男性 12 人(22~24 歳，平均 23.5 歳，標準偏差 0.65 歳，右利き 11 人，左利き 1 人)である．提示した運動は，前半に立ち上がるのための加速をもつ等速運動であり，等速運動区間での速度は基準速度因子で 5.0, 7.2, 10.4, 15.0 cm/s の 4 水準，時間因子で 1.1, 1.4, 1.7, 2.2 s の 4 水準とし，距離はこれら 2 因子の 4 水準総当たりの組み合わせによって決定される．基準速度因子の決定には，デバイスに用いたモータが上肢を誘導可能な速度範囲内で決定した．時間因子の決定には，Markus らの文献を参考に範囲を決定した[7]．すなわち，Markus らの文献では，「力」の知覚における応答時間と力知覚 JND の関係について調査を行っており，ある刺激量に対して応答時間毎に整理された力知覚 JND は，応答平均時間が 0.4~0.5 s より大きい場合，ほとんど変わらないという結果が示されている．本研究は，Markus らの「力」とは異なり，「速度」を対象に実験を行っているものであるが，身体の運動にかかわる知覚という意味で参考にできると考え，応答時間を 0.5 s よりも十分に大きい 1.1 s~2.2 s の範囲で水準を決定した．手先の運動方向は正面（矢状面方向）を 0 deg としたとき時計方向（右向き）に 90 deg（前額平行面方向）の方向への直線運動を行った．この方向は全ての運動で共通とした．方向による知覚性能の違いは存在するが，本研究の目的は知覚と動作の精密度の大小関係を探ることにあり，その意味で

は特定の方向のみであっても、十分な知見が得られると考えたからである。また、動作開始の初期位置の指示は行わなかった。これは、終点位置とともに、位置の違い、長さの情報を速度知覚に援用することを防ぐことを意図している。また、各被験者は、3種の精密度測定の実験を行ったが、それらの間での順序効果が均等になるように被験者それぞれは Table 3 に示すように、12人の間で疑似ランダムな順序で3種の精密度測定実験を行った。

Table 1 Experimental conditions.

Factor	Level		
	Perception	Motion	Perception - motion
experiment			
The number of subjects	12 (A ~ L)		
Reference speed [cm/s] ($V_{reference}$)	5.0, 7.2, 10.4, 15.0		
Time duration [s]	1.1, 1.4, 1.7, 2.2		
Distance [cm]	5.5~33.0		

知覚精密度測定において、被験者は、基準速度に対して様々な比較速度の弁別を行うことで知覚精密度を調査した(基準速度に対する比較速度を Table 2 に示す)。比較速度を提示する際の距離は基準速度と同様に、時間因子 1.1, 1.4, 1.7, 2.2 s との組み合わせによって決定した。

Table 2 Comparison speed presented against Reference speed

Reference speed [cm/s] ($V_{reference}$)	Comparison speed [cm/s] ($V_{comparison}$)
5	2.9, 3.4, 3.8, 4.4, 5.7, 6.5, 7.4, 8.5
7.2	4.2, 4.8, 5.5, 6.3, 8.2, 9.4, 10.7, 12.3
10.4	6.1, 7.0, 8.0, 9.1, 11.9, 13.6, 15.5, 17.7
15	8.8, 10.1, 11.5, 13.1, 17.1, 19.6, 22.3, 25.5

強制運動時の目標軌道は、距離(時間因子と速度因子から決定された)の40%に到達するまでの間に、躍度最小軌道モデルを用いて徐々に加速する軌道とした。なお、躍度最小軌道モデルは比較的高速な身体の自動運動をよく説明できるとされている。例え

ば、「速度因子(等速区間について):5.0 cm/s, 時間因子:2.0 s」の場合の手先目標速度を Fig.5 に示す.

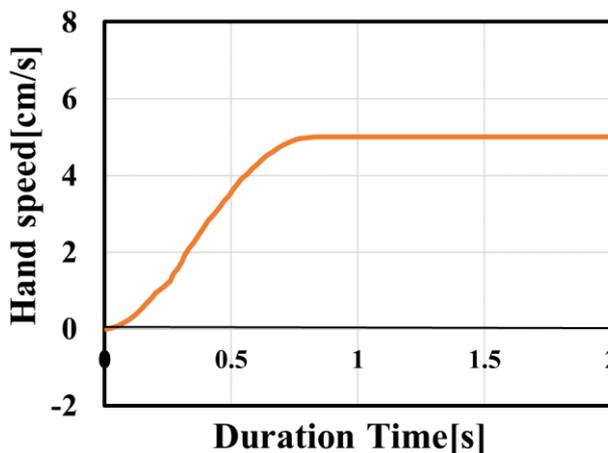


Fig.5 Speed trajectory of hand motion. In this condition, the reference speed is assumed to reach 5.0 cm/s and to hold its value for a while, and the total time-duration is assumed to be 2.0 s. After reaching a predetermined time-duration, the haptic device stops moving. A subject is assumed to perceive the hand motion speed, based on the speed experienced in the period, during which he considers that their hand has moved in the constant speed zone.

Table 3 The order in which each subject performs three experiments

	Experiment order			Subject
	First	Second	Third	
a	perception	→ motion	→ perception&motion	A, B, C, D
b	motion	→ perception&motion	→ perception	E, F, G, H
c	perception&motion	→ perception	→ motion	I, J, K, L

2.3 実験方法

被験者は、肩関節の水平屈曲/伸展の回転中心が肩関節用モータの鉛直線上になるよう、かつ肘関節の屈曲/進展の回転中心が肘関節用モータの鉛直線上になるよう、椅子に座った。その際、彼らの腕が水平な状態となるように、椅子の高さを調整した。そして、右腕の上腕と前腕をデバイスの二つの腕置き部分に置き、それぞれを包帯で、隙間が空くことなく、また締め付けることなく巻き付けて腕を固定した。また、本研究は運動速度の精密度を測定することを目的としているため、他の感覚性能を用いる

ことを防ぐ必要がある。例えば、当然のことながら、Chang らの文献では、被験者が運動の時間や距離を知覚し、それを手がかりに実験を行った場合、時間や距離の知覚の精密度が運動速度の精密度に影響してしまうという[8]。よって、本研究では、運動の時間・距離を知覚することによる影響が生じないようにするために、3つの実験条件それぞれに工夫を施した。それらの工夫も含め、以下、3種それぞれの実験の手順について具体的に説明する。

2.3.1 「知覚」精密度測定実験

被験者は、デバイスから提示される2つの運動において、2番目の運動速度(比較速度)が1番目の運動速度(基準速度)に比べて「速く感じた」または「遅く感じた」の回答を行う。それらの回答のデータにおいて、横軸に比較速度をとり、縦軸には「速く感じた」を1、「遅く感じた」を0として割り当てた。そのように数値化した各データにロジスティック関数を回帰することで「50%の確率で速度の違いを弁別可能な、2つの運動間の速度差」即ち JND を推定した(詳しい推定方法は後の 2.4 に述べる)。実験では心理物理測定法の中で、被験者が次に提示される運動速度の大きさを予想すること難しいという意味で最も信頼性が高いとされている恒常法の手順に従った。

また、「知覚」において、運動時間・運動距離が手がかりにならないための工夫として、基準速度の提示時間と比較速度の提示時間をそれぞれランダムに決定した。そのため、ほとんどの場合、基準速度と比較速度との間で、運動時間も運動距離も異なっており、被験者は時間や距離を速度の遅/速の知覚の回答の手がかりにできないようにした。なお、実験後、被験者に対して主観評価を行ったが、本節の「知覚」、後述の「動作」、および「知覚・動作」のいずれにおいても、全員が、時間や距離の情報は用いず、提示された速度のみを手がかりにして速度を知覚し、および計画した速度のみを手がかりにして再現を行ったとの回答を得た(主観評価の結果は2.5.3節に示す)。

各試行は以下の手順に従って行った。

[手順 I] 基準速度の提示

- i. 運動開始の合図で、デバイスは(急加速を経て)一定の速度 $V_{reference}$ で被験者の上肢を強制的に動かす。このとき被験者は一定速度と知覚した区間における手先の速度に意識を集中する。
- ii. 実験者があらかじめ設定した目標運動時間が経過した瞬間、運動終了の合図(ピープ音)が流れると同時に基準速度の提示を終了し、被験者は自ら運動開始地点に戻る。このときの動作時間は被験者には知らされていないため、被験者は、運動が予期せず終了したと感じる。これにより、動作時間だけでなく、動作距離の情報も速度知覚に用いることが困難となることを意図している。このよう

な工夫は次の比較速度の提示や、次節の「動作」精密度測定実験でも同様に行った。

[手順Ⅱ]比較速度の提示

- iii. 運動開始の合図で、基準速度と同様に、デバイスは（急加速を経て）一定の速度 $V_{comparison}$ で被験者の上肢を強制的に動かす。このとき被験者は手先の速度に意識を集中する。
- iv. 目標の動作時間が経過した瞬間、スピーカーから運動終了の合図(ビーブ音)が流れると同時に比較速度の提示を終了し、被験者は自ら運動開始地点に戻る。このときも動作時間は被験者には知らされていないため、運動は予期せず終了する。

[手順Ⅲ]速度弁別の回答

- v. 被検者は比較速度 $V_{comparison}$ が基準速度 $V_{reference}$ に比べて「速く感じた or 遅く感じた」を回答する。
- i~v までの手順を 1 試行とし、被検者 1 人に対して基準速度と比較速度の組み合わせ 32 通りを 4 回繰り返す、計 128 試行を疑似ランダムに行った(計 128 試行=基準速度 4 水準×比較速度水準 8 水準×4 試行/基準・比較速度水準)。実験時間は 1 名、約 60 分であった。

2.3.2 「動作」精密度測定実験

被験者は、速度メーターによって提示され、知覚・認知した速度を目標速度として、8 回連続して再現した。それら 8 回の再現データそれぞれの平均速度のばらつき(標準偏差)を求め、これを動作精度とした。また、各回の運動において、目標速度に到達するまでの立ち上がり時間を排除するために、初期位置から手先が 3 cm 移動するまでのデータは用いないこととした。また、運動時間・運動距離の大きさが手がかりにならない工夫として、8 回、各回の再現での運動時間は疑似ランダムに決定した。そのため、8 回の再現の間で、ほとんどの場合、運動時間も運動距離も異なることから、時間や距離は目標運動の手がかりにならず、被験者は速度のみに注目して、目標を再現した。

各試行は以下の手順に従って行った。

[手順Ⅰ] 基準速度としての目標速度を認知する

- i. 被検者は、ディスプレイに示される目標の基準速度を見ながら、自分なりにそれに対応した速度を計画し、さらにはその計画した速度で自分の上肢を動かすことで、手先動作の目標速度を認知する。

[手順Ⅱ]基準速度の再現 (8 回繰り返す)

- ii. 運動開始の合図で、被検者は[手順 I]で提示され、認知した動作の基準速度を目標として、手先を能動的に動かす。なお、実験後の評価値に際しては、8回の平均をもって、被験者の動作の目標速度 $V_{reference}$ とした。
- iii. 目標の動作時間が経過した瞬間、スピーカーから運動終了の合図(ビープ音)が流れると同時に動作を終了し、被験者は自ら運動開始地点に戻る。このとき動作時間は被験者には知らされていないため、運動は予期せず終了する。
 - i~iii までの手順を1試行とし、被検者1人に対して4通りの基準速度で計4試行を行った。実験時間は1名約15分であった。

2.3.3 「知覚・動作」精密度測定実験

被験者は、デバイスにより強制的に上肢を動かされることにより目標の手先基準速度を知覚し、知覚した運動速度の再現を行った。それらの再現した運動速度を基に動作の精密度を評価した(評価方法は後の2.4に述べる)。

運動速度・運動時間が手がかりにならない工夫として、基準速度の提示する際の運動時間と再現する際の運動時間が必ずしも一致しないよう、疑似ランダムに決定した。そのため、提示と再現の間で、ほとんどの場合、運動時間も運動距離も異なることから、時間や距離は目標運動の手がかりにならず、被験者は速度のみに注目して、目標を再現した。

各試行は以下の手順に従って行われた。

[手順 I] 基準速度の提示

- i. 運動開始の合図で、デバイスは一定の速度 $V_{reference}$ で被験者の上肢を強制的に動かす。このとき被験者は手先の速度に意識を集中する。
- ii. 目標の運動時間が経過した瞬間、運動終了の合図(ビープ音)が流れると同時に基準速度の提示を終了し、被験者は自ら運動開始地点に戻る。このとき動作時間は被験者には知らされていないため、運動は予期せず終了する。

[手順 II] 知覚した速度を再現

- iii. 運動開始の合図で、被検者は[手順 I]で知覚し認知した速度を目標に、被験者は一定の目標速度で上肢を能動的に動かす。このとき被験者は手先の速度に意識を集中する。
- iv. 目標の動作時間が経過した瞬間、スピーカーから運動終了の合図(ビープ音)が流れると同時に動作を終了し、被験者は自ら運動開始地点に戻る。このとき動作時間は被験者には知らされていないため、運動は予期せず終了する。

i~iv までの手順を 1 試行とし、被験者 1 人に対して基準速度 4 水準を 8 回疑似ランダムに行った(計 32 試行)。実験時間は 1 名約 15 分であった。

2.4 指標とする評価値

手先速度の「知覚」「動作」「知覚・動作」性能の精密度を評価するために、共通の指標となる評価値を決定する必要がある。知覚性能の精密度を直接的に測定するとすれば、特定の(速度)刺激を被験者に与え、結果として感じた知覚量そのものを定量化できれば、定量化された知覚量の分布を調査することが考えられる。しかし、この場合、被験者は知覚量を絶対尺度として意味のある値に変換する必要があるが、これは困難な作業であり、一般には行われていない。このような知覚の精密度の評価に伴う困難を克服する手段としては、一般に、被験者に基準刺激と比較刺激の一对の刺激を与え、Fig.6 に示すように、被験者から 2 つの刺激間の大/小の回答を集め、その回答の分布を解析する「一対比較法」が用いられる。

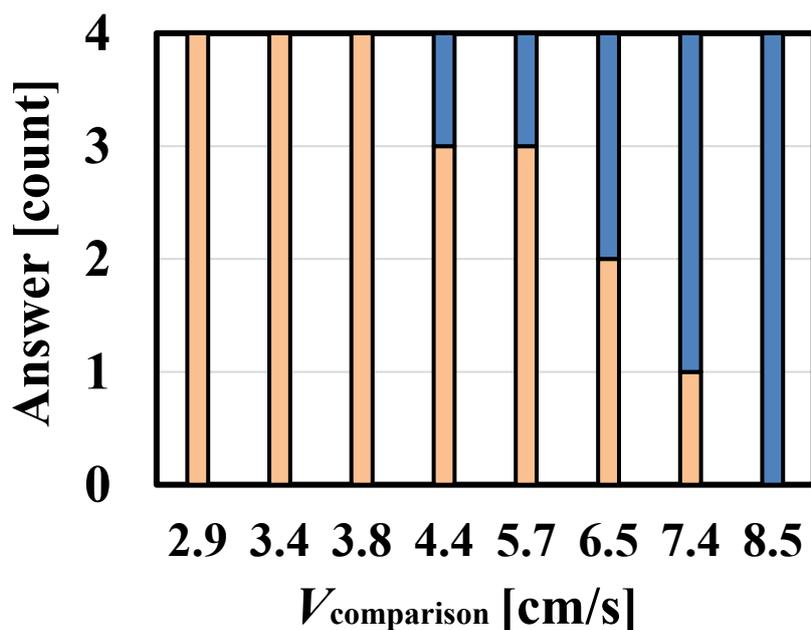


Fig. 6 Frequency spectra of “faster (top)” or “slower (bottom)” answers with respect to various comparison speeds in a condition of a reference speed, 5.0 cm/s: a subject answered whether a presented comparison speed was faster or slower than the reference speed.

そして、Fig.7 に示すように、横軸に比較刺激、縦軸に「大」と回答した確率をとる確率分布関数を得る。

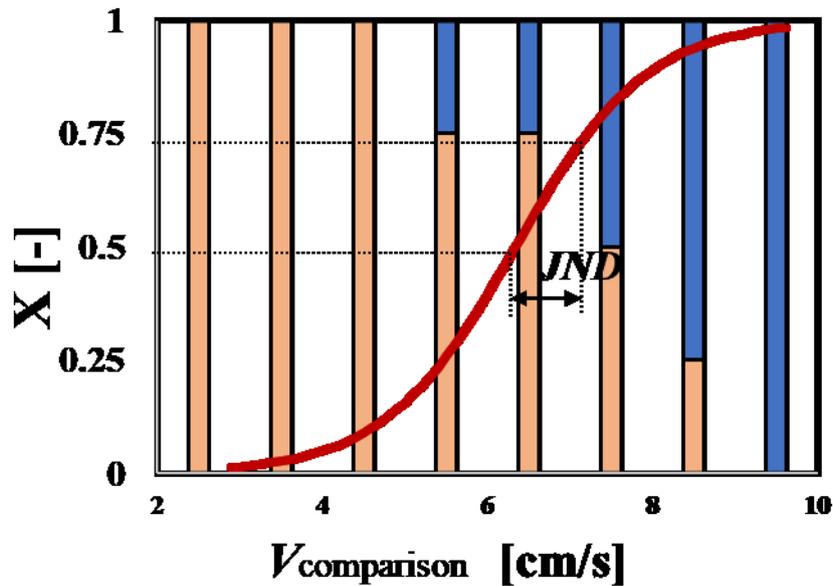


Fig.7 The sigmoid function obtained when the subject-A is presented with a reference speed of 5 cm / s

この確率分布関数はシグモイド関数の様相を呈し、心理物理曲線と呼ばれている。そのモデルとしては後述のロジスティック関数が多く用いられている。ここで、知覚性能の精密度を表す、代表的な量として、「弁別可能な2刺激間の差異の最小値」を表すJNDが用いられている。分かり易さのため、以下の一部では1.2節で説明した内容も含まれる。このJNDは、定量的には、「判断回数の50%の信頼率で弁別される2刺激間の差異」と定義され、上側JNDで説明すれば、心理物理曲線（確率分布関数）においては75%の「大」回答確率を与える比較刺激と、50%の「大」回答確率を与える比較刺激の差として求められる。なお、50%の「大」回答確率を与える比較刺激は、主観的等価値（PSE, point of subjective equality）と言われている。ここで、先の心理物理曲線を表す確率分布関数を与える確率密度関数を考える。これはPSEの比較刺激においてピークを持つ、正規分布様（ロジスティック関数の場合、厳密には正規分布と一致しない）の形を呈するものであり、2つの刺激の知覚量の差異のばらつきを表すものとなる。この確率密度関数を正規分布(標準偏差, σ)に近似すれば、「 $PSE + 0.6745\sigma$ 」の比較刺激において(上側JNDに対応する)75%の累積確率を与えることになる。このような考えに基づいてJNDから標準偏差 σ への変換式として次式を得る[9].

$$\sigma = \frac{JND}{0.67} \dots (6)$$

これは、Suliann らの文献にて聴覚・視覚の閾値推定の際など、一般的に他の文献でも使われる変換である[10].

他方の「動作」，「知覚・動作」の精密度に関しては，単に，「自分で計画した特定で速度で，能動的に動作させることを繰り返し，得られた速度の分布を調査」し，ばらつきの標準偏差 σ を評価値とすればよい.

(1) 「知覚」の精密度

知覚実験では，複数回の速度の知覚判別値(「遅い」=0/「速い」=1)からロジスティック回帰分析を用いて速度 JND を推定する. まず，基準速度毎に，得られた知覚判別データ(基準速度 v_1 ，比較速度 v_2 のペアに対応して得られた知覚判別値から成る)を，「比較速度が基準速度に比べて速いと知覚する確率 X (ここで， X は確率なので $0 \leq X \leq 1$)」を与えるロジスティック関数モデル

$$X = \frac{1}{1 + \exp(-(a_1 v_1 + a_2 v_2))} \dots (7)$$

に，最尤法を用いて回帰し，同モデルにおける偏回帰係数 a_1 ， a_2 を推定する. 速度 JND は，推定された偏回帰係数 a_1 ， a_2 を求め， $X=0.75(=0.25)$ のときの比較速度 v_2 の値と， $X=0.50$ のときの比較速度 v_2 の差として求められる. すなわち式 (7) は，式 (8) のように変換される.

$$JND = \frac{1}{-a_2} \ln\left(\frac{1}{3}\right) \dots (8)$$

ここで，式 (6) を用いて，標準偏差 σ の値を求める.

ところで，ここで σ の値は，得られた標準偏差が2回の手先運動速度を比較して，2回目の運動が「速い/遅い」の回答を行う実験で求めた値であり，2回分の知覚性能が加算された精密度であることを意味する. この2回分の知覚精密度を1回分の知覚精密度 σ_{percep} に変換するためには，分散の和の関係をいれればよく，以下のように変換を行う.

$$\sigma_{percep}^2 = 2\sigma^2 \dots (9)$$

よって式 (6)(8)(9)より，1回分の運動において知覚した平均速度の標準誤差は以下のようにまとめることができ，この標準偏差 σ_{percep} の大/小を「知覚」の精密度の小/大を評価する評価値とした(標準偏差と精密度はの大/小が反転していることに注意).

$$\sigma_{percep} = \frac{JND}{0.67\sqrt{2}} \cdot \cdot \cdot \quad (10)$$

(2) 「動作」の精密度

2.3.2 で述べたように、動作実験では、1つの目標となる手先運動速度に対して、手先運動速度を8回連続で再現させた。ここで、各回の運動で測定した手先運動速度の評価値としては、時々刻々の手先運動速度の連続データの平均速度 V_n (n : 試行回数) を用いた。ただし、立ち上がり時間を取り除くために、初期位置から手先が 3 cm 移動するまでのデータは用いないこととした。また、それら 8 回の V_n ($n=1, 2, \dots, 8$) の平均を \bar{V} とする。

このように、被験者は同じ目標に対して 8 回繰り返し再現を行うことから、計画した速度に対して動作速度がどれ程ばらつくのかを調べることができる。この 8 回の手先運動速度の平均 \bar{V} からの残差の標準偏差 σ_{motion} の大/小を「動作」の精密度の小/大を評価する評価値とした。

$$\sigma_{motion} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=8} (\bar{V} - V_n)^2}{n-1}} \cdot \cdot \cdot \quad (11)$$

(3) 「知覚・動作」の精密度

2.3.3 で述べたように、「知覚・動作」実験では、デバイスによって強制運動された手先の速度を知覚・認知し、認知した速度に対して 1 回の再現試行を行った。この再現試行は、基準速度 4 水準それぞれについてランダムに 8 回行った。上述の(2)「動作」の精密度と同様に、各回(試行順位数, $n=1, 2, \dots, 8$)の運動で測定した手先速度の評価は、時々刻々の手先運動速度の連続データの平均速度 V_n を用いた。ここでも、立ち上がり時間を取り除くために、初期位置から手先が 3cm 移動するまでのデータは用いなかった。また、それら 8 回の V_n ($n=1, 2, \dots, 8$) の平均を \bar{V} とする。

このように、被験者は強制運動により動かされた手先の速度に対して、疑似ランダムに 8 回再現を行うことにより、知覚した速度に対して動作速度がどれ程ばらつくのかを調べることができる。この基準速度に対する 8 回の手先運動速度の標準偏差 $\sigma_{percep\&motion}$ の大/小を「知覚・動作」の精密度の小/大を評価する評価値とした。

$$\sigma_{percep\&motion} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=8} (\bar{V} - V_n)^2}{n-1}} \cdot \cdot \cdot \quad (12)$$

さらに、式 (10)(11)(12)で算出された値は、文献[3][4]など、多くの既存研究において基準速度に従って増加する傾向がみられるため、 σ_{percep} , σ_{motion} , $\sigma_{percep\&motion}$ それぞれの値を基準速度で除することで標準化し、それを評価した。

2.5 実験結果および考察

2.5.1 「知覚」と「動作」の精密度の比較

Fig.8 に「知覚」精密度実験(■)で得られた精密度 $\sigma_{percep}/V_{reference}$ 、「動作」精密度実験(■)で得られた精密度 $\sigma_{motion}/V_{reference}$ を示す。それぞれの棒グラフは48個の測定値より求めた平均値を表す。エラーバーは標準偏差を表す。

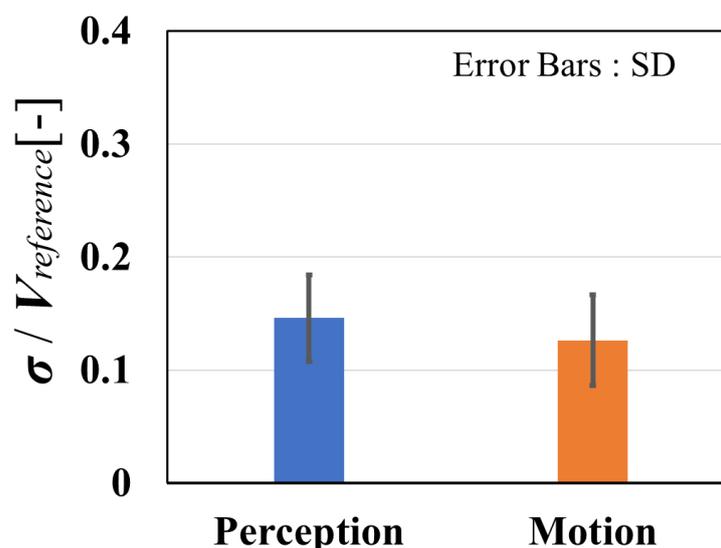


Fig.8 " $\sigma/V_{reference}$ " for the perception and for the motion

また、Fig.9-(1)に「知覚」精密度実験にて得られた「知覚」の精密度 $\sigma_{percep}/V_{reference}$ 、Fig.9-(2)に「動作」精密度実験にて得られた「動作」の精密度 $\sigma_{motion}/V_{reference}$ を基準速度 $V_{reference}$ 毎に示す。それぞれのプロット点は、知覚精密度実験にて得られた12個の測定値より求めた平均値(◆)、動作精密度実験にて得られた12個の測定値より求めた平均値(●)を表す。エラーバーは標準偏差を表す。

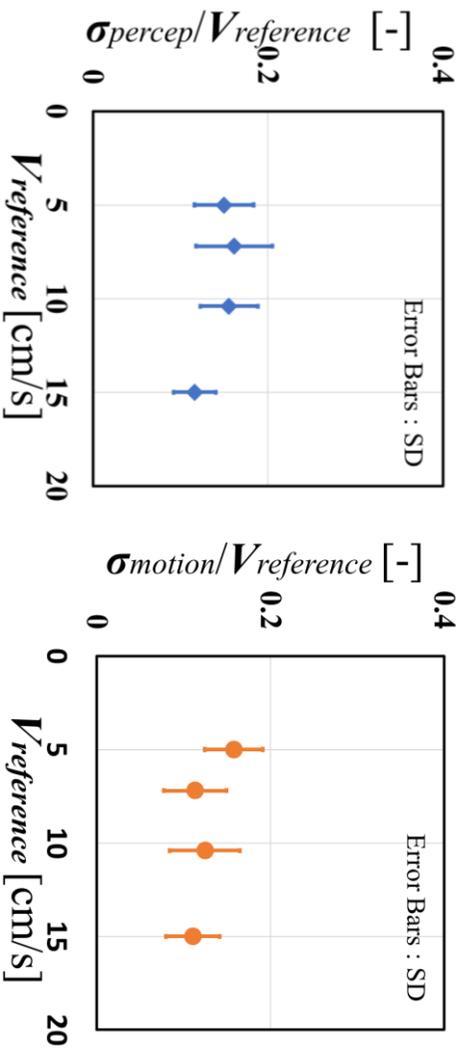


Fig.9 Relationships between " $\sigma/V_{reference}$ " and $V_{reference}$.

さらに, Fig.10 に「知覚」精密度実験にて得られた「知覚」の精密度の評価値 $\sigma_{percept}/V_{reference}$, 「動作」精密度実験にて得られた「動作」の精密度それぞれにて得られた精密度の評価値 $\sigma_{motion}/V_{reference}$ を被験者毎に示す. それぞれのグラフは4個の測定値より求めた平均値を表す. エラーバーは標準偏差を表す.

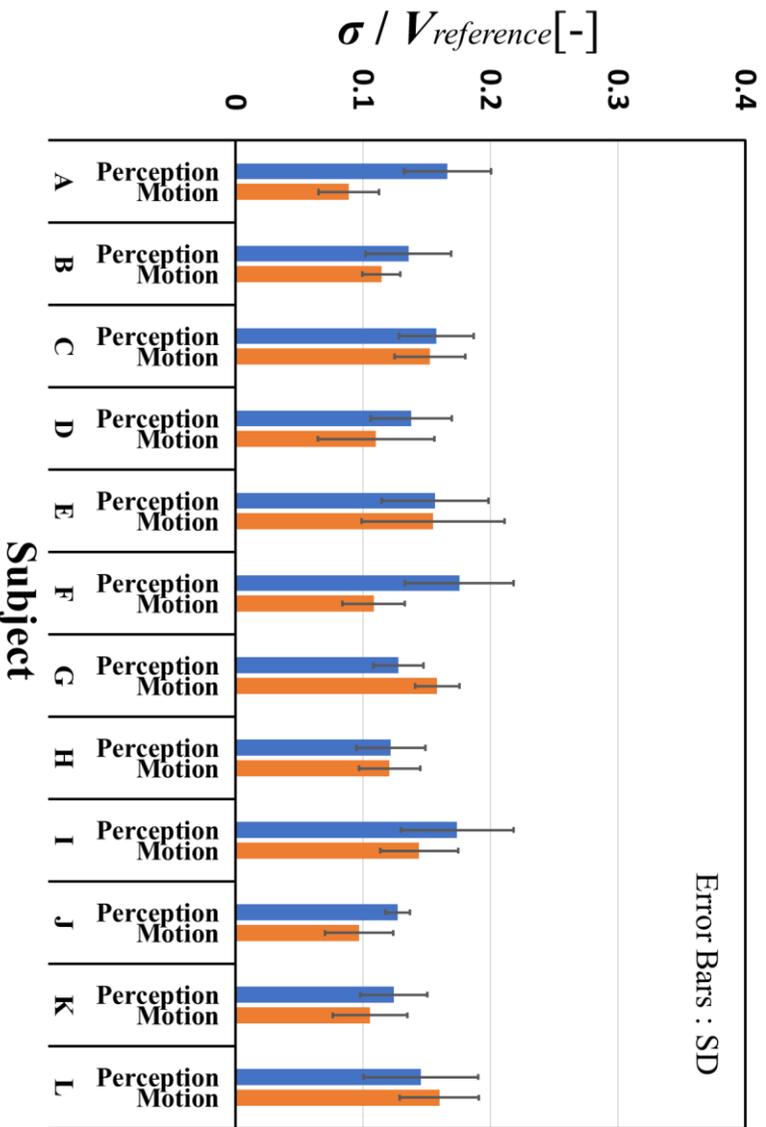


Fig.10 " $\sigma/V_{reference}$ " for each of the subjects.

次に、繰り返しなし三元配置分散分析(Three-way ANOVA without repetition)により、モード因子（水準は「知覚」と「動作」）、被験者因子（水準は被験者 12 名）、基準速度因子（水準は 5.0, 7.2, 10.4, 15.0 cm/s）の 3 つの因子の効果、ならびに 2 因子間の交互作用について検定を行った。分散分析の結果を Table 4 に示す。

Table 4 Three-way ANOVA without repetition for testing the difference between the precisions of the perception and the motion: the three factors are the mode, subject, and reference speed.

Name of factor	Factor	Sum of squares <i>S</i>	Degree of freedom Φ	Unbiased dispersion <i>V</i>	F value	p value	Significant difference	Effect size η	
Subject	a	0.026	11	0.002	2.71	0.013	*	0.16	Large
Mode	b	0.009	1	0.009	10.65	0.003	**	0.06	Medium
Reference speed	c	0.020	3	0.007	7.81	0.000	***	0.13	Medium
Subject \times Mode	a*b	0.021	11	0.002	2.21	0.039	*	0.13	Medium
Mode \times Reference speed	b*c	0.011	3	0.004	4.40	0.010	*	0.07	Medium
Subject \times Reference speed	a*c	0.042	33	0.001	1.47	0.136	NS	0.27	Large
Residual error	e	0.028	33	0.001					
sum		0.157	95						

$p \geq 0.05$: NS, $p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **, $p < 0.001$: ***.

0.01 < η : small, 0.06 < η : medium, 0.14 < η : large.

Table 4 より、「知覚」「動作」の間で有意差が見られた [$F(1,33) = 10.651, p = 0.003 < 0.01$].

また、効果量は [$\eta = 0.06 < 0.14$] であり、効果量は "medium" と判定されたことから、「知覚」の精密度が「動作」精密度より低いと認められる。その一方で、被験者毎に精密度を示した Fig.10 から読み取れるように、「知覚」と「動作」との間で同程度の精密度を示した被験者も存在することや、Table 4 の検定結果(Three-way ANOVA)より、被験者間とモードの間の交互作用は、検定統計量が [$F(11,33) = 2.21, p = 0.039 < 0.05$] であって「*、効果あり」と認められ、かつ効果量が [$\eta = 0.133 < 0.14$] であって「medium」と判定されていることから、人によっては、「知覚」の精密度が「動作」精密度より低いとも、一概にはいえないことが示唆されている。

2.5.2 「知覚・動作」の精密度

本研究において、「知覚・動作」の精密度 $\sigma_{\text{percep\&motion}}/V_{\text{reference}}$ の測定を行ったが、「知覚・動作」精密度測定実験は、目標速度を知覚し、知覚した速度を動作するというタスクであることから、「知覚」の精密度と「動作」の精密度を統合させた値と等しい精密度を示す可能性がある。この統合した値を $\sigma_{\text{percep\&motion integrated}}$ とする。ま

た、 σ は、標準偏差としても扱うことができるため、 σ^2 は分散となり、分散の和の関係より以下の様に「知覚」と「動作」それぞれの精密度を統合することができる。

$$\sigma_{\text{percep\&motion integrated}} = \sqrt{\sigma_{\text{motion}}^2 + \sigma_{\text{percep}}^2 \dots} \quad (13)$$

式中の σ_{percep} 、 σ_{motion} それぞれは、「知覚」精密度測定実験と「動作」精密度測定実験から測定された値を用いた。Fig.11に、「知覚・動作」精密度測定実験(■)にて得られた精密度 $\sigma_{\text{percep\&motion}}/V_{\text{reference}}$ と、式(6)より推定した「知覚・動作」(■)の精密度 $\sigma_{\text{percep\&motion integrated}}/V_{\text{reference}}$ を示す。それぞれの棒グラフは「知覚・動作」精密度実験にて得られた48個の $\sigma_{\text{percep\&motion}}/V_{\text{reference}}$ より求めた平均値(■)、「知覚」と「動作」の精密度から推定された48個の $\sigma_{\text{percep\&motion integrated}}/V_{\text{reference}}$ より求めた平均値(▲)を表す。エラーバーは標準偏差を表す。

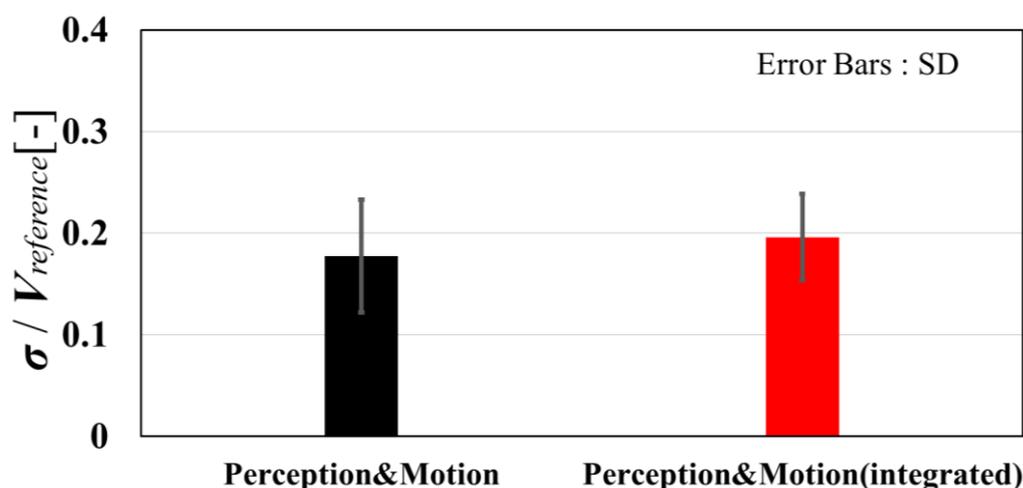


Fig.11 The " $\sigma/V_{\text{reference}}$ " for Perception & Motion and Perception & Motion(integrated)

Fig.12に、「知覚・動作」精密度測定実験(■)にて得られた精密度 $\sigma_{\text{percep\&motion}}/V_{\text{reference}}$ と、式(6)より推定した「知覚・動作」(▲)の精密度 $\sigma_{\text{percep\&motion integrated}}/V_{\text{reference}}$ 「知覚・動作」精密度を基準速度 $V_{\text{reference}}$ 毎に示す。それぞれのプロット点は、「知覚・動作」精密度実験にて得られた12個の測定値より求めた平均値(■)、「知覚」と「動作」の精密度から推定された12個の $\sigma_{\text{percep\&motion integrated}}/V_{\text{reference}}$ より求めた平均値(▲)を表す。エラーバーは、標準偏差を表す。

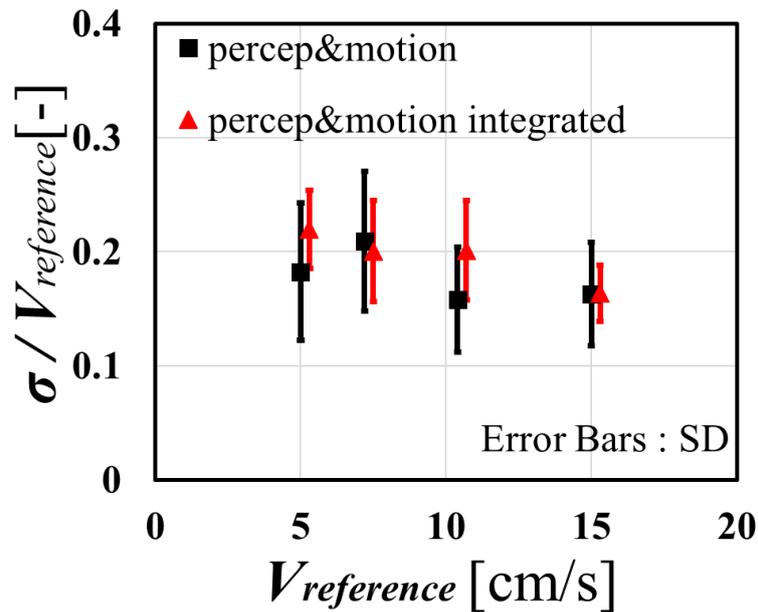


Fig.12 The " $\sigma/V_{reference}$ " for the $V_{reference}$ for Perception & Motion

次に，評価値の正規性および等分散性を仮定する．以下では，繰り返しなし三元配置分散分析(Three-way ANOVA)を行い，その結果を Table 5 に示す．検定の結果，「知覚・動作」「知覚・動作 integrated」の間でギリギリではあるが有意差が認められないこと [$F(1,33) = 3.75, p = 0.061 > 0.05$] から，「知覚・動作」の精密度は，「知覚」精密度と「動作」精密度の2つを統合した値となる可能性を示唆している．しかし効果量においては“small”と検定されていることから [$\eta = 0.03 < 0.06$]，「知覚・動作」の精密度と，「知覚」精密度と「動作」精密度の2つを統合した値とでは小さいながらも違いがある可能性が残っている．

また，この推定値と測定値の整合性を他の手法で検定した．すなわち，「知覚」精密度と「動作」精密度について，対応あり t 検定(paired t-test)を行った．検定の結果は三元配置分散分析と同様に「知覚・動作」と「知覚・動作 integrated」との間で有意差は認められなかった [$t(1) = 2.01, p = 0.120 > 0.05$]．したがって，t 検定では分散分析より大きな確率に基づいて推定値と測定値が整合していることが示された．

Table 5 The three-way ANOVA for Perception & Motion and Perception & Motion(integrated)

Name of factor	Factor	Sum of squares <i>S</i>	Degree of freedom ϕ	Unbiased dispersion <i>V</i>	F value	p value	Significant difference	Effect size η	
Subject	a	0.04	11	0.004	1.60	0.144	NS	0.16	Large
Mode	b	0.01	1	0.008	3.75	0.061	NS	0.03	Small
Reference speed	c	0.03	3	0.009	4.02	0.015	*	0.11	Medium
Subject \times Mode	a*b	0.05	11	0.004	1.91	0.074	NS	0.19	Large
Mode \times Reference speed	b*c	0.01	3	0.004	1.74	0.178	NS	0.05	Small
Subject \times Reference speed	a*c	0.04	33	0.001	0.57	0.946	NS	0.17	Large
Residual error	e	0.07	33	0.002					
sum		0.24	95						

$p < 0.05$: NS, $p < 0.01$: NS, $p < 0.001$: NS,
 $0.01 < \eta$: small, $0.06 < \eta$: Medium, $0.14 < \eta$: Large

2.5.3 主観評価

本実験では、運動速度についての精密度を評価するために、運動時間及び運動距離が手がかりとならないように実験に工夫を施した。結果として、実際に運動時間・運動距離の情報が運動速度に影響をしていないことを確かめるために実験後被験者にアンケートを取った。その質問内容と回答の結果を以下の Table 6 に示す。

Table 6 The questionnaire of experiment

	Question and Choices	Number of responses		
		1	2	3
1	「知覚」精密度測定実験において腕の基準速度と比較速度を比べて、「速く感じた/遅く感じた」を回答する際、何を手がかりにして速度の違いを判断したか。 1.動作速度の変化 2.動作時間の変化 3.位置の変化	12	0	0
2	「動作」精密度測定実験において、腕を動かす速度を計画する際、何を手がかりにして計画をおこなったか。 1.動作速度の変化 2.動作時間の変化 3.位置の変化	12	0	0
3	「知覚・動作」精密度測定実験において、腕を動かす速度を計画する際、何を手がかりにして計画をおこなったか。 1.動作速度の変化 2.動作時間の変化 3.位置の変化	12	0	0
4	実験を通じて疲労を感じたかどうか。感じたのであれば、パフォーマンスに影響したか。 1. 疲労を感じ、回答に影響した 2. 疲労を感じたがパフォーマンスに影響はなかった 3. 疲労を感じなかった	6	3	3

また、質問4については、「実験を通じて疲労を感じ、回答に影響を与えた」と回答する被験者が多数いるため、実験が進むにつれて精密度が大きくなっていった可能性が考えられる。ただ、本実験にて各被験者が行った3つの実験、すなわち「知覚」精密度測定実験、「動作」精密度測定実験、「知覚・動作」精密度測定実験を行う手順は、Table 3に示すように、被験者によって様々に振り分けられた。よって、繰り返しあり三元配置分散分析(Three-way ANOVA with repetition)により、モード因子(水準は「知覚」「動作」「知覚・動作」)、基準速度因子(水準は5.0, 7.2, 10.4, 15.0 cm/s) 実験順序因子(水準はTable 3に示す3種の実験順序)の3つの因子の効果、ならびに2因子間・3因子間の交互作用について検定を行った。分散分析の結果をTable 9に示す。

Table 7 The three-way ANOVA for Experiment order

Name of factor	Factor	Sum of squares <i>S</i>	Degree of freedom <i>df</i>	Unbiased dispersion <i>V</i>	F value	p value	Significant difference	Effect size η	
Reference speed	A	0.03	3	0.008	3.04	0.034	*	0.07	Medium
Mode	B	0.06	2	0.032	11.55	0.000	***	0.18	Large
Experiment order	C	0.01	2	0.003	1.13	0.329	NS	0.02	Small
Reference speed × Mode	A*B	0.02	6	0.004	1.42	0.219	NS	0.07	Medium
Mode × Experiment order	B*C	0.01	4	0.004	1.31	0.273	NS	0.04	Small
Reference speed × Experiment order	A*C	0.00	6	0.001	0.19	0.980	NS	0.01	—
Reference speed × Mode × Experiment order	A*B*C	0.02	12	0.002	0.67	0.779	NS	0.06	Medium
Residual error	E	0.20	72	0.003					
	計	0.36	72						

$p < 0.05$: NS, $p < 0.01$: NS, $p < 0.001$: NS,

$0.01 < \eta$: small, $0.06 < \eta$: Medium, $0.14 < \eta$: Large

Table 9 より，実験順序因子の間で有意差が認められなかった。よって，基準速度因子間・またモード間の比較において，実験順序による影響を受けていないことが示唆された。但し，実験の疲労によって各精密度が小さくなっている可能性は考えられる。また，効果量においては，”small”と検定されていることから [$\eta = 0.02 < 0.06$]，小さいながらも違いある可能性が残っている。

第3章 結言

本論文では、ヒトの肩、肘の二関節を用いた手先の直線運動を対象として、目標の運動速度を「知覚」することと、「動作」することの精密度について比較した。また、それらを組み合わせ、目標の運動速度を「知覚」し、さらにそれを「動作」することによる精密度、即ち「知覚・動作」の精密度も測定した。精密度の指標として、ばらつきの標準偏差を用い、得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 手先運動速度を対象とする場合、モード因子(水準は、「知覚」、「動作」)、基準速度因子(水準は、5.0, 7.2, 10.4, 15.0 cm/s)、被験者因子(水準は12名、それぞれ)による「繰返しなし三元配置分散分析」により「知覚」の精密度は「動作」の精密度に比べて有意に低いことが示された。ただし、両精密度が同等、または逆転している被験者も存在した。
- (2) 目標速度を知覚し、その速度の再現を行う「知覚・動作」の精密度に関して、その分散が、「知覚」誤差の分散と「動作」誤差の分散の和に等しいとの統合モデルは棄却されなかった。このことから、「知覚・動作」の連続過程が、その構成要素である二つの過程(すなわち、「知覚」過程と「動作」過程)に関する加法的過程であると示唆される。

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 野村由司彦特任教授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方々に御礼申し上げます。

最後に，本論文の作成に当たり，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。

本研究は，日本学術振興会科学技術研究費補助金，基盤研究(B) 15H02929 「弱い力による「誘発」に着目した動作教示手法の提案と一般手法に対する多次元比較」の支援による。

参考文献

- [1] Camille K. Williams, Luc Tremblay and Heather Carnahan, "It Pays to Go Off-Track: Practicing with Error-Augmenting Haptic Feedback Facilitates Learning of a Curve-Tracing Task", *Movement Science and Sport Psychology*, Volume 7 (2016).
- [2] Laura Marchal-Crespo, Mark van Raai, Georg Rauter, Peter Wolf & Robert Riener, "The effect of haptic guidance and visual feedback on learning a complex tennis task", *Experimental Brain Research*, Volume 235, Issue 12, pp 3799–3816(2017).
- [3] Graham K. Kerr, Charles J. Worringham, "VELOCITY PERCEPTION AND PROPRIOCEPTION", *Sensorimotor Control of Movement and Posture*, (2002).
- [4] Takaaki YASUI, Fumihiko AKATSUKA, Yoshihiko NOMURA and Tokuhiko SUGIURA "Human velocity change perceptual characteristics in passive movements of shoulder and/or elbow joint", *Mechanical Engineering Letters*, (2019).
- [5] J Liu, S C Cramer, DJ Reinkensmeyer, "Learning to perform a new movement with robotic assistance: comparison of haptic guidance and visual demonstration", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, (2006).
- [6] Fumihiko Akatsuka, Yoshihiko Nomura, Tokuhiko Sugiura, Takaaki Yasui, "An exoskeletal motion instruction with active/passive hybrid movement: effect of stiffness of haptic-device force-feedback system", *Artificial Life and Robotics*, Volume 24, Issue 2, pp 161–171(2019).
- [7] Markus Rank, and, Massimiliano Di Luca, "Speed/Accuracy Tradeoff in Force Perception", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* Volume 41, Issue 3, pp738-746(2015).
- [8] Chia-Jung Chang and, Mehrdad Jazayeri, "Integration of speed and time for estimating time to contact", *National Academy of Sciences. PNAS*, 115.12, E2879-E2887(2018).
- [9] Tsuyoshi Kuroda, Emi Hasuo, "The very first step to start psychophysical experiments", *Acoustical Society of Japan*, Volume 69-12, pp 632-637(2013).
- [10] Suliann Ben Hamed, "Hearing flashes and seeing beeps: Timing audiovisual events", *Vidal M. PLoS ONE* 12(2): e0172028(2017).