

修士論文

肘関節の能動運動における
速度変化の知覚特性

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

418M104 池田 樹之介

目次

第 1 章	緒言	3
1.1	研究背景.....	3
1.2	既存研究.....	5
1.3	本研究の方針	5
第 2 章	肘関節の能動運動実験	6
2.1	実験装置.....	6
2.1.1	実験装置	6
2.1.2	速度メータ.....	8
2.2	実験因子.....	9
2.2.1	能動運動の運動モード因子	9
2.2.2	速度因子	11
2.3	実験手順.....	13
第 3 章	実験結果	15
3.1	運動モード因子による JND の違い	15
第 4 章	考察	20
第 5 章	結言	22
謝辞	23	
参考文献	24	

第1章 緒言

1.1 研究背景

運動やスポーツといった動作の学習をする際、学習者は指導者や熟練者の動きを観察することが多い。その一方で、学習者は指導者に手や足を実際に動かしてもらい、その動作を知覚することで指導者の動作に対する意図を理解していく。前者の「学習者が視覚を通して他者の動きを観察する学習方法」では、大まかな動きを把握することができる。しかし、学習者は実際の身体運動を体験するわけではないことから、自身の運動の間違いに気づき難い。一方で「学習者が指導者によって手や足を実際に動かされる学習方法」においては、指導者が運動の間違いを指摘することによって、学習者はより正確な運動を体験できることが期待される。

近年では動作支援や動作学習において、指導者の代わりに装着型インターフェースを用いることが研究されるようになってきた。装着型インターフェースとは、指導者が学習者の手や足を実際に動かして教えるように、機械装置が学習者の身体に力を加えることで正確な運動を伝えるものである。例として、医療現場で患者が正常な動作を行うためのリハビリテーションロボットなどがあげられる[1]。そのようなインターフェースを設計するためには、あらかじめヒトの運動の知覚特性を調べておかなければならない。そして、インターフェースはヒトが知覚できる範囲や限界を踏まえて運動を提示する必要がある。

ヒトは運動を知覚する際、身体各部の「位置（複数の関節角度の非線形和）」、「速度（複数の関節角速度の非線形和）」、「力（複数の筋の張力の非線形和）」を知覚している。そのため、それらの「位置」、「速度」、「力」に関するヒトの知覚特性を調べる研究が数多く行われている。Daniel J. Goble らは前腕の位置覚に関して調べている。この実験では、装置が被験者の前腕を強制的に動かす（リハビリ分野では他動運動と呼んでいる）ことで、前腕の位置を提示する。その後、被験者は先に装置によって提示された前腕の位置を自分で再現した。この研究では、利き手と非利き手で再現実験を行っており、絶対誤差を調べている。その結果、非利き手の方が約2倍正確に再現できると結論づけている[2]。Kerr and Worringham (2002) は肘関節の強制伸展運動における速度知覚を調査した。この実験でも装置が被験者の肘関節を強制的に動かしていた。まず、基準となる速度（基準速度と呼ぶ）で被験者の腕を強制的に動かす。その後、比較対象となる速度（比較速度と呼ぶ）でも同じように強制的に被験者の腕を動かし、被験者は比較速度が基準速度に比して速いか遅いかを回答した。その

結果、基準速度が大きいほど知覚できる比較速度も大きくなる Weber の法則に近い傾向がみられた[3]。また、Xing-Dong Yang らは腕に受ける力の知覚特性について調べている。被験者はマニピュレータを様々な速度で能動的に動かし（リハビリ分野では自動運動と呼んでいる）、その際にマニピュレータから受ける抵抗力を知覚する。これを3回行い、何番目の力が異なっていたかを回答した。これによりマニピュレータから受ける抵抗力を知覚する精度、すなわち力覚の精度は腕の動く速さには影響しないと結論付けている [4]。

また、Fechner は感覚の大きさそのものを測定することは不可能であり、与えられた二つの刺激が大きいか、小さいか、または等しいかといったように比較するに過ぎないと示唆した[5]。そのような特性に基づいて知覚特性を調べる際に用いられる代表的な指標として「丁度可知差異 (JND: Just Noticeable Differences, 以下 JND)」がある。JND とはある基準となる位置や速度、あるいは力を提示する一方、一定量だけ変化させた位置、速度、力を提示し、ヒトが両者の違いに気づくことのできる最小の変化量である。「最小」といっても、知覚は確率的過程であることから、被験者は一つの基準運動に対して多数の比較運動を知覚し、回答する。そして、50%の確率で「違う」と感じるような刺激の差異（具体的には、比較刺激－基準刺激）をもって JND と定義される。

ここで、従来の JND 測定の枠組みは、受動的な運動を前提としたものであった。その場合には、従来の JND 測定法では、基準運動（速度 JND では、基準速度）を一定にした上でさまざまな比較運動（速度 JND では、比較速度）を提示することができた。つまり、装置が運動を支配して基準運動を一定にすることができたのである。これに対して、能動運動では一定に保たれた基準運動を何度も繰り返し被験者に提示すること、あるいは被験者が演じることは困難である。なぜなら、被験者が自らの四肢を能動的に動かす場合、同じ運動を繰り返すことは不可能であり、結果として一定の基準運動を何度も演ずることができないからである。このような困難もあり、これまでは能動運動における JND が測定されていなかったと推測される。

1.2 既存研究

JND 測定に関する既存研究として、Seyedshams (2013)らは力の JND について調べた [6]。被験者は手首の屈曲運動，上腕の屈曲運動，肩の内旋運動をそれぞれ連続して 2 回行った。その際，1 回目と 2 回目はマニピュレータによって異なる力が手首，上腕，肩に加えられた。被験者は 2 回の運動で加えられた力が 1 回目のものより大きい小さいかを回答した。この場合，被験者はマニピュレータが発揮する力に釣り合うように力を発揮していることから，力の大きさはマニピュレータが支配していることとなり，その意味で受動的な動作といえる。

また，ヒトの速度差弁別能力に関する研究として，Djupsjöbacka and Domkin (2005) は，肩関節を強制的に水平伸展運動させたときの速度 JND を測定した [7]。被験者の肩関節は連続して 2 回，デバイスによって強制的に動かされた。デバイスによって提示された運動の速度は 1 回目と 2 回目で同じ場合も，異なっている場合もあった。その直後，被験者は 2 回の運動速度が速いか遅いかを回答した。いずれの実験においても基準となる刺激が大きくなるにつれて JND も大きくなる Weber の法則に類似した傾向がみられた。

1.3 本研究の方針

本研究は従来の受動運動における速度 JND に対し，能動運動における筋活性の大/小や方向性（短縮性収縮/伸張性収縮）によって速度 JND が変化するか否かを調査するものである。本実験では特に上腕三頭筋（上腕の裏側の筋肉であり，基本的には肘関節の伸展運動を担っている）に注目した運動を取り扱う。また 2 つの速度を 1 つの運動内で変化させた場合の JND 測定の研究もなされている [8]が，今回は 2 つの速度提示を別々の運動として行った際の JND 測定を行った。

第2章 肘関節の能動運動実験

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置

本研究で用いた 1 回転自由度型の外骨格型前腕動作負荷装置を図 2-1 に示す。本装置はサーボモータ(Maxon DCX35L GB KL 48V, Gear ratio:4.3: 1) の回転軸に腕を乗せるリンクを取り付けた構造になっている。使用中の装置の写真を図 2-2 に示す。手や腕の自重を支えるために被験者が注意したり力を出したりしなくてもよいように、被験者の前腕は水平に保持できる機構となっている。被験者はサーボモータの回転軸に肘関節の位置を合わせるように腕を置き,リンクの先にある取っ手を把持する(被験者が肘関節を伸展させて前腕を伸ばした状態を 0 deg とすると, 100 deg まで屈曲させることができる)。また, サーボモータにより腕には最大 2 N・m のトルクを加えることができる。肘関節における時々刻々の角度, モータに流れる電流はサーボモータに取り付けられているエンコーダ (Maxon ENC 30 HEDL 5540 500IMP) によって計測される。なお, トルクは計測された電流に, モータ固有値であるトルク定数 (68.3mN・m/A) とギア比 (4.3: 1) を乗じて算出した。



図 2-1. 実験装置

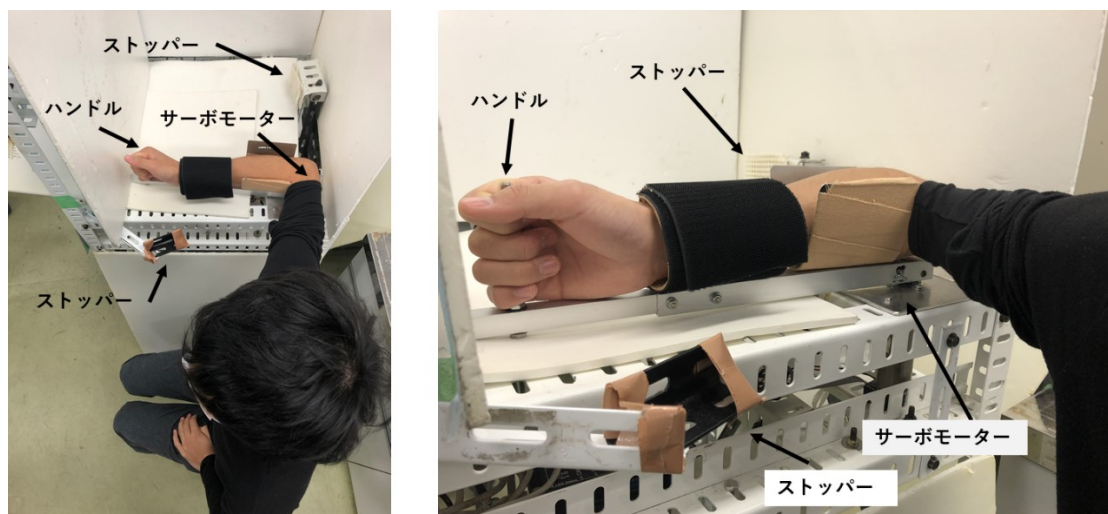


図 2-2. 装着時の実験装置

2.1.2 速度メータ

本実験では目標速度 deg/s を図 2-3 の速度メータ目盛り上にある赤い線分で表示した。また，被験者の腕の現在角速度はメータの赤色の指針によって示される。被験者の腕の角速度 deg/s はエンコーダから取得した時々刻々の角度 deg から算出した。被験者にはメータの指針が目標速度を達成するよう，手先の速度を能動的に調節し，その状態（等速運動）を保つように教示した。また，目標速度に応じて目標速度の表示位置が変わると，被験者は視覚により手先の運動速度の違いを知ってしまうことから，どのような速度であってもメータの赤色の指針は同じ位置に示すことができるよう，目盛りスケール（倍率）を調整した。したがって，被験者は単に目標の速度に合わせようと努めるが，視覚を通して目標速度を絶対値的に（数値として）把握できない。このような条件の下で自己受容感覚を通して速度を知覚することになる。

速度メータ（直径 30 cm）はディスプレイ上に表示した。ディスプレイは 24.1 インチ，解像度は 1920×1200 画素の物を使用した。またディスプレイは被験者から前方に 1m 離れた場所に設置した。



図 2-3. 速度メータ

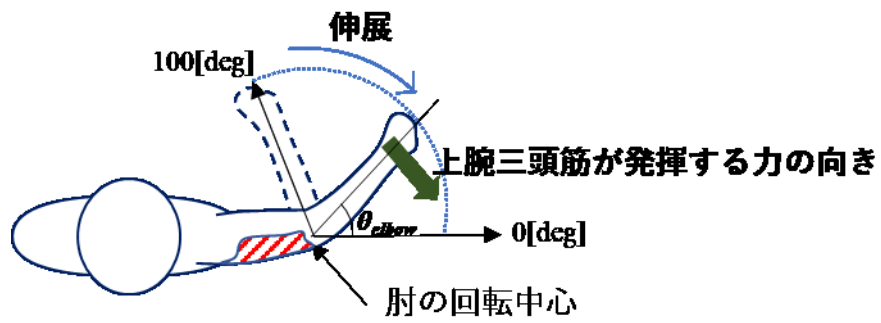
2.2 実験因子

21 歳から 24 歳の 12 人の男性（11 人が右利き）が本実験に参加した。

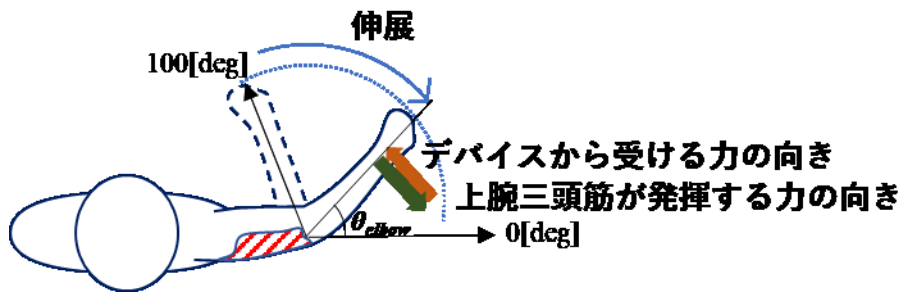
2.2.1 能動運動の運動モード因子

本実験では被験者に次の 3 種類の水平運動（総称して運動モード因子と呼ぶ）を行うよう指示した: (a) 肘関節の伸展運動(装置による負荷のない状態. このとき, 筋活性の状態は短縮性収縮), (b) 肘関節の伸展運動 (装置によって伸展方向とは逆方向に $2\text{N}\cdot\text{m}$ の負荷を受ける. このとき, 筋活性の状態は短縮性収縮), (c)肘関節の屈曲運動 (装置によって屈曲方向と同じ方向に $2\text{N}\cdot\text{m}$ の負荷を受ける. このとき, 筋活性の状態は伸張性収縮). それぞれは, 以下, 「 $0\text{N}\cdot\text{m}$ 短縮性収縮」水準, 「 $2\text{N}\cdot\text{m}$ 短縮性収縮」水準, 「 $2\text{N}\cdot\text{m}$ 伸張性収縮」水準と呼ぶ. これらの運動はいずれも上腕三頭筋（上腕の裏側で主要な筋肉）が主動筋として働く運動である.

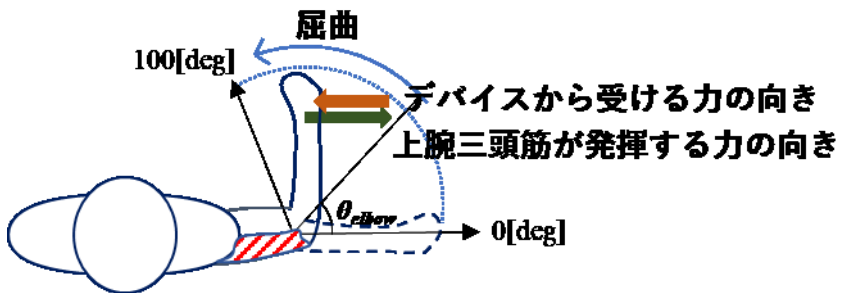
肘関節の角度は, 肘を完全に伸ばした状態を 0 deg とし, 屈曲方向を正にとった. 被験者は短縮性収縮水準では 100 deg から 0 deg まで, 伸張性収縮水準では 0 deg から 100 deg まで運動した. また腕の運動中の速度はメータの赤い指針で示され, 赤い範囲で表示された目標速度を保つ(等速運動)よう指示した.



(a) 0N·m 短縮性収縮



(b) 2N·m 短縮性収縮



(c) 2N·m 伸張性収縮

図 2-4.運動モード因子

2.2.2 速度因子

測度については、基準速度と比較速度を設定する必要があるが、能動運動において正確にそれらの速度を再現することは不可能であるので、提示する速度因子は目安としての意味を持たせた（表 2-1 に示す）。

基準速度因子は 5.0, 6.6, 8.7, 11.4, 15.0 deg/s の 5 水準を用意した。この速度水準は、被験者が実際に行う運動の可動範囲内(100 deg)で、前腕の速度が等速となる区間が十分確保できることを意図している。また、速度の大小の判定が 0~100%の範囲でバランスよくなされるように比較速度を設定するため、本実験と同じ手順で予備実験を行った。すなわち、予備実験では基準速度に対して十分に幅広くとり、1/2~2 倍の比較速度を用いて実験を行った。図 2-5 は予備実験によって得られた基準速度 5deg/s における回答である。また、図 2-6 は予備実験によって得られた基準速度 5deg/s におけるロジスティック関数である。横軸は比較速度 deg/s で縦軸は速いと答える確率を示している。このロジスティック関数において図 2-6 の黒い四角印で示した、速いと答える確率が 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.7, 0.8, 0.9 となった比較速度 2.3, 3.3, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.7, 7.8, 9.0 deg/s を本実験で用いる比較速度とした。

このような手法により、5.0, 6.6, 8.7, 11.4, 15.0deg/s の 5 水準それぞれの基準速度に対して得られたロジスティック関数において、速いと答える確率が 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9, 1.0 となった比較速度を本実験で用いる比較速度因子の水準と定め、表 2-1. に示す。

表 2-1. 目標となる基準速度水準と比較速度水準

基準速度水準[deg/s]	比較速度水準[deg/s]
5.0	2.3, 3.3, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.7, 7.8, 9.0
6.6	3.1, 4.4, 5.3, 6.0, 6.6, 7.3, 8.0, 8.9, 10.2, 11.5
8.7	4.0, 5.8, 6.9, 7.8, 8.7, 9.6, 10.5, 11.7, 13.4, 16.0
11.4	5.2, 7.5, 9.0, 10.3, 11.4, 12.5, 13.8, 15.3, 17.6, 20.0
15.0	7.0, 9.9, 11.9, 13.5, 15.0, 16.5, 18.1, 20.1, 23.1, 27.0

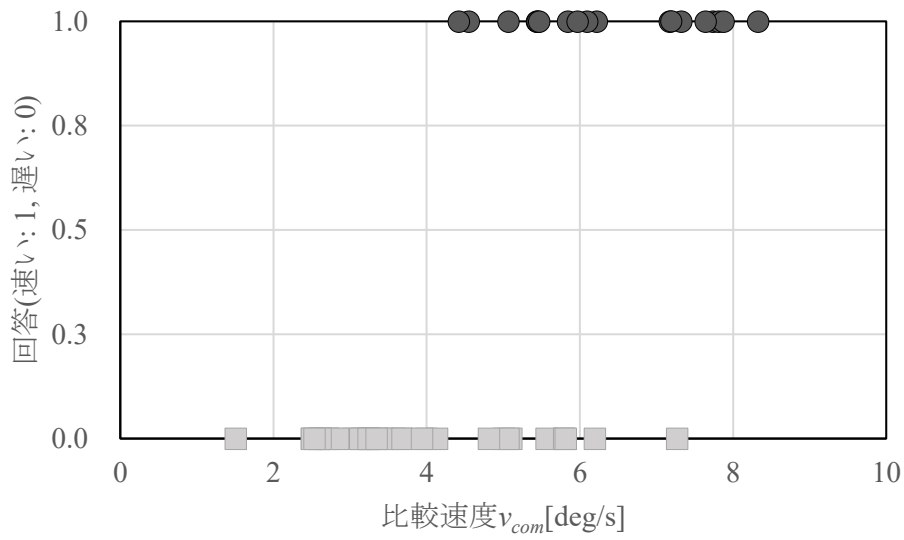


図 2-5. 基準速度 5[deg/s]付近における回答

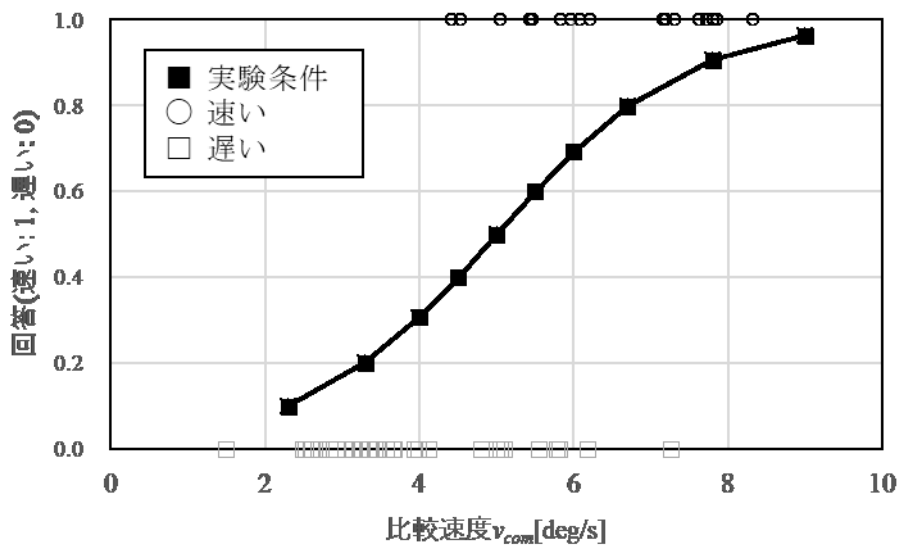


図 2-6. 基準速度 5[deg/s]付近におけるロジスティック関数

2.3 実験手順

被験者は肘関節の水平屈曲/伸展の回転中心がモータの回転軸上に位置するように椅子に座った。その際、被験者の上肢（上腕と前腕。結果的に肩関節と肘関節）が水平な状態で実験を行えるように椅子の高さを調整した。そして、右腕の前腕をデバイスの腕置き部分に置いた。被験者は初期位置に前腕を置いた後、オペレーターの合図で運動を始めた。被験者はメータを見ながら、指針が赤い範囲で示された基準角速度を指すように前腕の速度を調整しながら運動を行う。前腕が終了位置に達したら再び初期位置に前腕を戻した。その後、再びオペレーターの合図で運動を始める。被験者はメータを見ながら、指針が赤い範囲で示された比較角速度を指すように前腕の屈曲/伸展速度を調節しながら運動を行った。このとき、二回目の運動では、一回目の運動を再現しようとするのではなく、単に赤い範囲で示された指針を目指すように指示した。前腕が終了位置に達したら再び前腕を初期位置に戻した。二回の運動を終えた後、被験者は二回目の速度（比較速度）が一回目の速度（基準速度）より「速い/遅い」を回答した。

以上の手順を1試行とし、150試行(運動モード因子3水準×基準速度因子5水準×比較速度因子10水準)を行った。また、各試行の提示は被験者による回答の偏りを減らすため、基準速度と比較速度のそれぞれをランダムに提示させる恒常法[9]を用いた。これに対して、安井らの実験においては本実験と同じように二回の運動を提示しているが[10]、その実験では、まず徐々に比較速度を小さくする連続的シーケンスを用い、被験者の回答が「比較速度>基準速度」から「比較速度=基準速度」に変化したら、変化幅を小さくした上で、徐々に比較速度を大きくする連続的シーケンスを提示する。その後、被験者の回答が「比較速度=基準速度」から「比較速度>基準速度」に変化したら再び徐々に比較速度を小さくしていく。これらを繰り返す PEST(parameter estimation by sequential testing)という手続きを用いている。その場合、被験者は比較速度がいずれかのレベルにおいて減少から増加へと、あるいは増加から減少へと反転するようなシーケンスになっていることが分かるため、実際には変化を知覚できるはずのない条件でも変化の回答をすることが可能となり、JNDは大小いずれかに偏ったものとなる（比較速度が速いという先入観が働き、閾値以下の差であり、速いと感じられないはずであるのに「速い」と回答することができ、その場合、JNDは小さめとなる）。

また、安井らの実験と同様に、いずれの条件においても被験者には関節ではなく手先の速度変化を知覚することに集中してもらうように教示した。安井らの実験が示すように、これはヒトの身体運動の認知が関節座標系基準ではなく、体幹に基づく3次

元座標系で位置づけられる身体各部位の3次元位置・姿勢によっているとの考えに基づいたものである。

実験の前に被験者はメータを見て目標速度に合わせる練習を行った。練習は被験者が自己判断で慣れたと感じるまで行われた。被験者によるが、5~20回の範囲で練習は行われ、時間にして約3~10分程かかった。

(実際の手順) 各試行は、以下の手順に従って行われた。

- I) 前腕を初期位置に固定する。
- II) 運動開始の合図と同時に被験者は前腕を動かし始め、メータの針を見て赤い範囲で示された目標速度に腕の速さを調節しつつ、手先の速度を感じ取る。
- III) 100 deg の範囲を動き、終了位置に達したらオペレーターに知らせる。
- IV) (I)~(III)をもう一度繰り返す。
- V) 2回の運動終了後、2回目の腕の速度が一回目より「速い」か「遅い」かを回答する。

第3章 実験結果

3.1 運動モード因子による JND の違い

図 3-1 と図 3-2 は、ある被験者において、 $2N\cdot m$ 伸張性収縮条件で実際に実験を行ったときの測定データを示す。すなわち、図 3-1 において、横軸は時間、縦軸は前腕の角速度を示す。また、図 3-1 は被験者が目標速度 15 deg/s に調節して前腕を動かしている時のデータである。図 3-2 において横軸は時間、縦軸は前腕の角度を示している。図 3-1 と図 3-2 の赤線部は、前腕の位置が $25\text{deg}\sim 75\text{deg}$ の区間にある部分を示している。前腕の角速度はこの区間の平均を算出し、代表値としてこれを用いた。

図 3-3 は $2N\cdot m$ 伸張性収縮条件における、ある被験者一人分のデータである。横軸は比較速度 $v_{com} \text{ deg/s}$ を示しており、縦軸は基準速度 $v_{ref} \text{ deg/s}$ を示している。丸印は速いと回答したプロットであり、四角印は遅いと回答したプロットである。

これらのデータ群で、説明変数として基準速度と比較速度をとり、目的変数は「速いと答える確率」とし、二次元ロジスティック関数への回帰を用いた。そして得られた偏回帰係数に基づいて JND を算出した。表 3-1, 3-2, 3-3 は二次元ロジスティック回帰分析によって算出した被験者毎の偏回帰係数 α_1, α_2 である。

図 3-5 は横軸が運動モード因子、縦軸には被験者毎に算出したウェーバー比 K （基準速度に対する JND の傾き： JND/v_{ref} ）の平均が示されている。

運動モード因子の間に有意差があるかを t 検定で調べた。 t 検定の結果、 $0N\cdot m$ 短縮性収縮と $2N\cdot m$ 伸張性収縮の母平均の間では(検定統計量 $t(11) = 0.478, p > 0.05$)、 $2N\cdot m$ 伸張性収縮と $2N\cdot m$ 短縮性収縮の間では(検定統計量 $t(11) = 0.292, p > 0.05$)、そして $2N\cdot m$ 短縮性収縮と $0N\cdot m$ 短縮性収縮では (検定統計量 $t(11) = 0.211, p > 0.05$)であり、いずれの運動モード因子の組み合わせにおいても有意差は見られない結果となった。

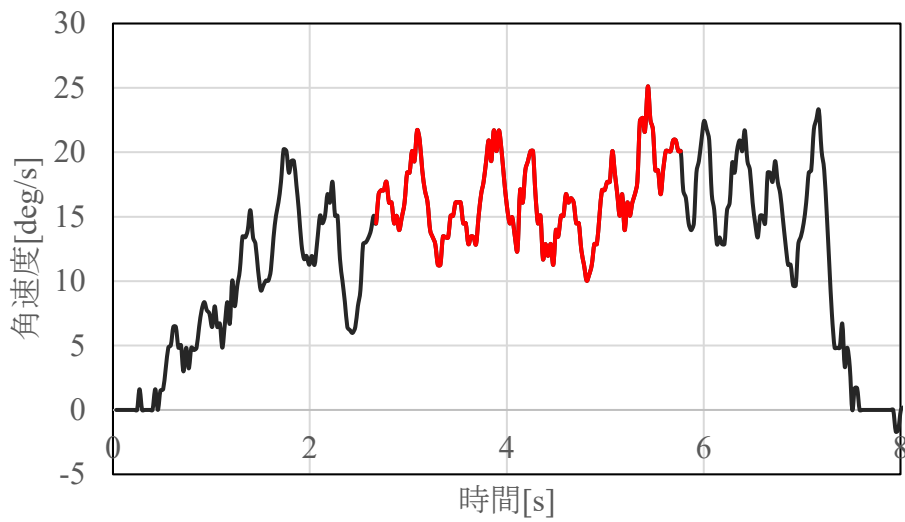


図 3-1.ある被験者における前腕運動時の角速度(目標角速度 15[deg/s])

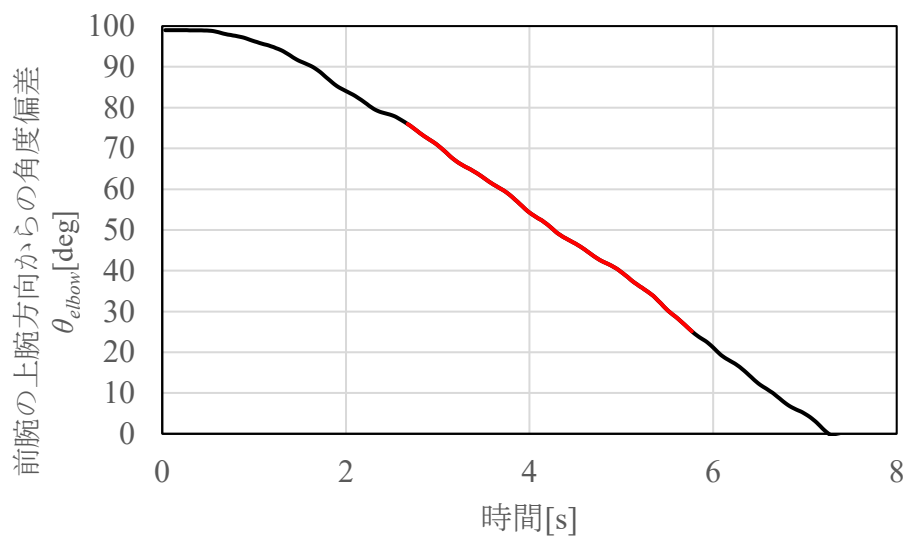


図 3-2.ある被験者一人における前腕運動時の位置

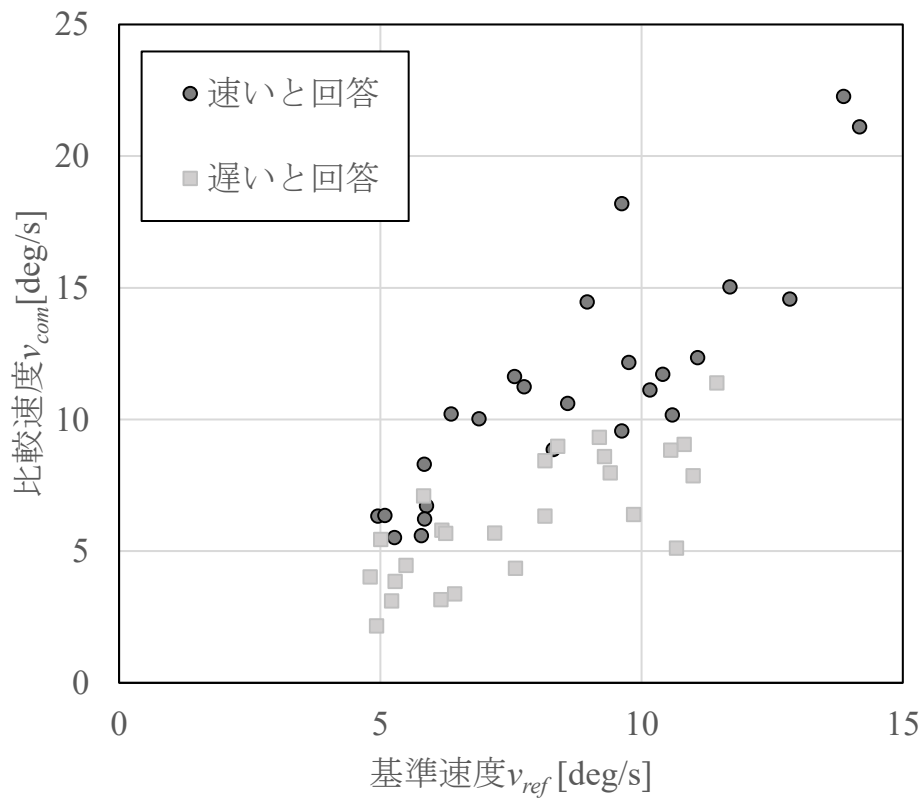


図 3-3. ある被験者一人の回答データ (2N・m 伸張性収縮条件)

表 3-1. 0N・m 短縮性収縮の偏回帰係数

被験者	$\alpha_1 \pm SD$	$\alpha_2 \pm SD$
A	5.84 ± 2.02	7.23 ± 2.47
B	8.83 ± 2.60	9.44 ± 2.69
C	3.08 ± 1.13	4.48 ± 1.49
D	6.77 ± 2.09	8.07 ± 2.41
E	20.65 ± 6.39	22.73 ± 7.04
F	3.07 ± 1.24	3.09 ± 1.30
G	11.44 ± 3.63	12.36 ± 3.90
H	5.39 ± 1.85	4.83 ± 1.71
I	17.10 ± 6.46	16.00 ± 6.00
J	22.17 ± 7.36	23.93 ± 7.96
K	5.21 ± 1.77	5.40 ± 1.85
L	4.52 ± 1.69	4.32 ± 1.67

表 3-2. 2N・m 伸張性収縮の偏回帰係数

被験者	$\alpha_1 \pm SD$	$\alpha_2 \pm SD$
A	5.23 ± 1.92	6.37 ± 2.21
B	7.96 ± 2.73	8.87 ± 2.96
C	3.72 ± 1.31	5.37 ± 1.80
D	5.40 ± 1.73	6.79 ± 2.09
E	14.22 ± 6.35	15.28 ± 6.68
F	4.86 ± 1.61	4.79 ± 1.62
G	7.08 ± 2.21	8.24 ± 2.52
H	11.91 ± 3.97	13.31 ± 4.38
I	12.84 ± 4.48	13.07 ± 4.59
J	7.87 ± 2.85	9.02 ± 3.23
K	9.58 ± 3.11	9.95 ± 3.25
L	12.16 ± 3.55	12.17 ± 3.51

表 3-3. 2N・m 短縮性収縮の偏回帰係数

被験者	$\alpha_1 \pm SD$	$\alpha_2 \pm SD$
A	6.18 ± 2.26	7.18 ± 2.59
B	22.70 ± 5.38	28.84 ± 6.69
C	4.18 ± 1.41	5.01 ± 1.67
D	3.96 ± 1.52	4.86 ± 1.80
E	4.18 ± 1.41	5.01 ± 1.67
F	6.05 ± 1.97	5.60 ± 1.90
G	5.22 ± 1.79	5.41 ± 1.83
H	6.40 ± 2.29	6.44 ± 2.27
I	12.80 ± 3.83	12.84 ± 3.81
J	7.86 ± 2.79	8.70 ± 3.01
K	35.61 ± 10.72	37.02 ± 11.18
L	8.24 ± 2.97	8.61 ± 3.06

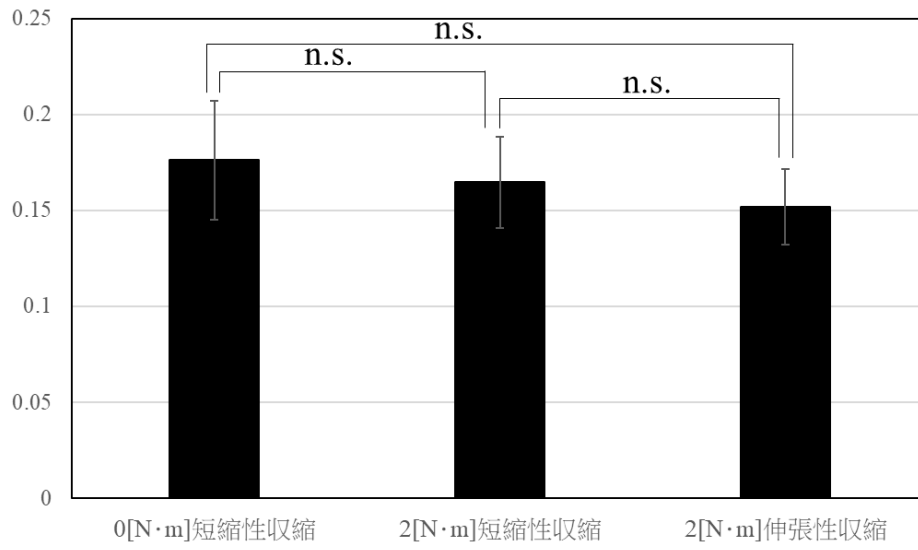
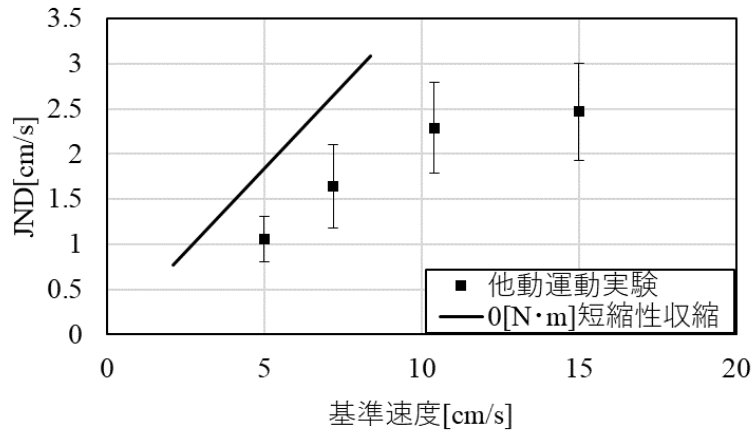


図 3-5. ウェーバー比 K (error bar: 標準誤差, $n = 11$)

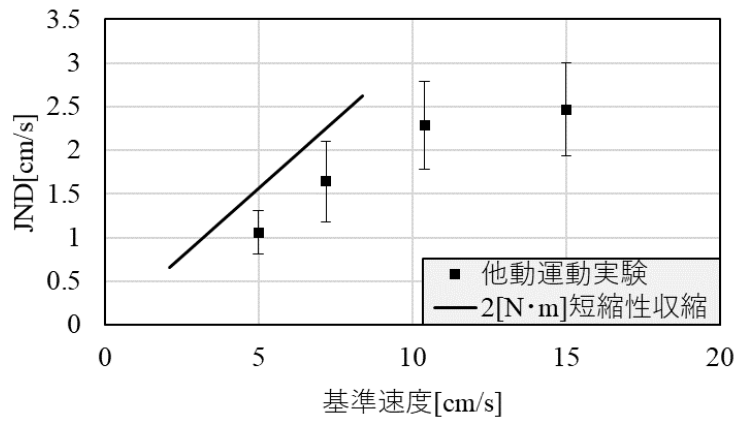
第4章 考察

手先の運動速度とは、関節が回転する速度、さらには関節の回転を引き起こす筋肉長の変化する速度と言い換えられる。筋肉長の変化速度は筋紡錘内の Ia 線維を通して脳に伝えられる。この求心性の信号を手掛かりとして、手先の運動速度は知覚される..ここで、筋肉長の変化速度に関する求心性の信号が、運動に関連する筋収縮の態様により影響を受けるか否かという疑問が生じる。この疑問に対して、本研究は速度の違いに対する感度、具体的には基準速度に対する JND の傾き： JND/v_{ref} の大小の観点から評価したものである。前章に述べた実験結果から、結局のところ、筋紡錘の感度は、 $0\text{ N}\cdot\text{m}$ や $2\text{ N}\cdot\text{m}$,での短縮性収縮、 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,での伸張性収縮などのさまざまな筋活性条件とは無関係に保持され、結果として速度 JND に差が生じなかったと考えられる。これは、筋紡錘が骨格筋の筋繊維とは独立かつ並列に配置されているため、側面から骨格筋の筋繊維の圧力は受けるにしても、その伸長には直接的な影響を受けにくいものと考えられる。このように筋長変化知覚の筋力に対する弾力性が十分に大きい（筋長変化知覚が筋力の影響を受けにくいということ）ことは、私たちが日常生活やスポーツのシーンにおいて、身体の動作を正確に保つ上で必要なことであり、それが実現されていることは実利面でも妥当であると考えられる。

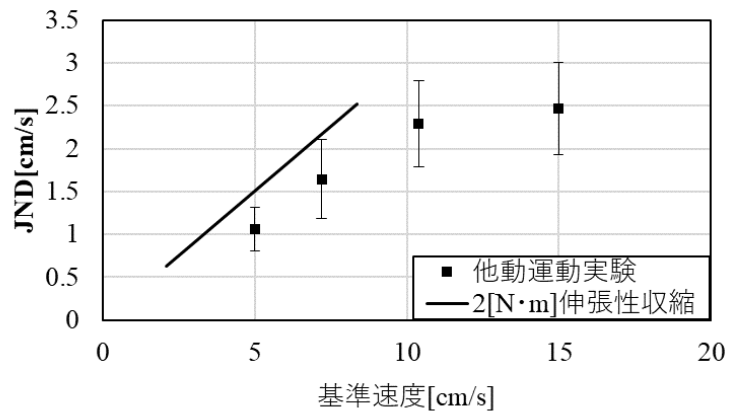
また、デバイスによって腕を動かされる他動運動での速度 JND 測定結果の例として伊藤の研究と比較する[11]。図 4-1 は伊藤の実験結果と本実験の 3 つの運動モード因子における結果を示している。測定した速度が一部異なるが、受動運動における速度 JND の方が明らかに小さく精度が良い結果となっている。受動運動では知覚することだけに集中できるのに対し、本実験による自動運動では知覚のみでなく運動にも注意を傾ける必要があり、結果的に知覚に配分できる注意の程度が低下し、速度 JND の精度が落ちたのではないかと考えられる。



(a)0[N·m]短縮性収縮との比較



(b)2[N·m]短縮性収縮との比較



(c)2[N·m]伸張性収縮と多動運動実験

図 4-1.他動実験と本実験との比較

第5章 結言

本論文では、人の肘関節の能動運動を対象に、速度 JND を測定した。従来では JND を推定する方法は、一つの基準層度に対する多数の比較層度における回答を、一次元ロジスティック回帰分析を行っていた。その場合、受動的な運動が必要条件となる。なぜなら、能動運動では基準速度を一定にすることができないからである。これに対し本研究では、能動運動での JND 推定を行うべく、新たに回帰するロジスティック関数モデルの二次元化と、これを JND 推定に適用する具体的な方法を提案した。またこの JND 推定法を用いて、上腕三頭筋が主動筋として働く肘関節の運動を対象とし、筋活性の大小や方向性(短縮性収縮/伸張性収縮)、多様な筋活動条件下で JND を推定した。また、推定した JND の間に有意差が認められなかったことを確認した。

謝辞

本研究を進めるにあたり，丁寧かつ熱心なご指導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。また三重大学工学部 加藤典彦准教授にも多大な助言を頂いたことに感謝いたします。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，三重大学の皆様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特任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] Hayashi et al. "Control method of robot suit HAL working as operator's muscle using biological and dynamical information." IEEE/RSJ international Conference on IEEE (2005).
- [2] Daniel J. Goble et al. "Upper Limb Asymmetries in the Matching of Proprioceptive Versus Visual Targets." J Neurophysiol 99 (2008).
- [3] Kerr, Graham K et al. "Velocity perception and proprioception." Sensorimotor control of movement and posture (2002).
- [4] Xing-Dong Yong et al. "Perception of Haptic Force Magnitude during Hnad Movements" IEEE International Conference on Robotics and Automation (2008).
- [5] G. T. Fechner, Elemente der Psychophysik, Breitkopf und Hurltel (1860) .
- [6] Seyedshams Feyzabadi et al. "Human Force Discrimination during Active Arm Motion for Force Feedback Design" IEEE Transactions on haptics (2013).
- [7] Djupsjöbacka et al. "Correlation analysis of proprioceptive acuity in ipsilateral position matching and velocity-discrimination." Somatosensory & motor research (2005).
- [8] Takaaki Yasui et al. "An effect of acceleration on passively-changed arm-velocity perception" ISPS-MIPE (2018)
- [9] Bernhard Treutwein et al. "Adaptive Psychophysical Procedures" Vision Res (1995).
- [10]安井 貴昭. "上肢単関節/二関節受動運動における速度変化の知覚特性" 三重大学修士学位論文(2019)
- [11] 伊藤 優汰. "上肢の運動における速度の知覚精密度と動作精密度の比較" 三重大学修士学位論文(2020).
- [12] Bernhard Teutwin et al. "Fitting the psychometric function" Perception & Psychophysics (1999).
- [13] Thomas Augustin "The parameters in the near-miss-to-Weber's law" Mathematical Psychology (2008).
- [14] Buchner, A., Erdfelder, E., Faul, F. and Lang, A.-G., G*Power 3.1 manual (2014), available from

<<http://www.gpower.hhu.de/>>, (accessed on 24 January, 2019) p.41