

タイピングスキルを支える上肢運動制御機構  
に関する身体運動学的研究

埼玉県立大学大学院  
保健医療福祉学研究科  
博士論文

2024年3月

2391002

伊藤貴紀

## 目次

1. 要旨.....	6
2. 研究背景 .....	8
2.1. 本研究の社会的背景.....	8
2.2. 博士前期課程の研究.....	9
2.3. 博士前期課程の研究で生じた課題 .....	14
3. 博士研究の目的.....	15
4. 研究Ⅰ：高スキル群は、手指の協調作用によりプレス/リリース時の手指 の筋腱にかかる機械的ストレスを減らす .....	16
4.1. 目的.....	16
4.2. 方法.....	16
4.2.1. 対象 .....	16
4.2.2. 使用機器.....	16
4.2.3. 実験手順 .....	17
4.2.4. データ分析・統計解析 .....	17
4.3. 結果.....	20
4.4. 考察 .....	22
4.5. 研究Ⅰにおいて生じた課題と解決方法.....	23
5. 研究Ⅱ：キーボード環境の制約条件に対する手指運動の特徴.....	24
5.1. 概説：タイピング動作における運動制御研究の必要性.....	24
5.2. 目的.....	25
5.3. 方法.....	26
5.3.1. 対象 .....	26
5.3.2. 使用機器.....	26
5.3.3. 実験手順 .....	27

5.3.4. データ分析・統計解析 .....	28
5.4. 結果 .....	29
5.4.1. キー入力時間 .....	29
5.4.2. 矢状面と水平面における手関節と MP 関節の運動 .....	29
5.4.3. 手関節と MP 関節の位置変化 .....	31
5.5. 考察 .....	34
5.5.1. キー入力時間と関節運動の優位性 .....	35
5.5.2. 矢状面と水平面における運動と変動性 .....	37
5.6. 研究Ⅱにおいて生じた課題と解決方法 .....	37
6. 研究Ⅲ：手指の構造・運動学的拘束性がタッピング制御に及ぼす影響 ..	39
6.1. 概説：収縮要素である筋の作用に着目した運動制御則の限界 .....	39
6.2. 目的 .....	41
6.3. 方法 .....	42
6.3.1. 対象 .....	42
6.3.2. 使用機器 .....	43
6.3.3. 実験手順 .....	43
6.3.4. 実験 A：指先の最大運動課題 .....	44
6.3.5. 実験 B：手関節の受動運動課題 .....	45
6.3.6. 実験 C：タッピング課題 .....	46
6.3.7. データ分析・統計解析 .....	47
6.4. 結果 .....	49
6.4.1. 実験 A：指先の最大運動課題 .....	49
6.4.2. 実験 B：手関節の受動運動課題 .....	50
6.4.3. 実験 C：タッピング課題 .....	51
6.5. 考察 .....	55

6.5.1. 側副靭帯による MP 関節の制動作用 .....	56
6.5.2. 指屈筋腱による手関節と MP 関節の拘束性.....	57
6.5.3. 運動パターンと筋の制御コスト .....	58
6.6. 研究Ⅲにおいて生じた課題と解決方法 .....	59
7. 研究Ⅳ：手指運動の構成要素がタイピングの運動選択に及ぼす影響.....	60
7.1. 目的.....	60
7.2. 方法.....	60
7.2.1. 対象.....	60
7.2.2. 使用機器.....	61
7.2.3. 実験手順.....	62
7.2.4. データ分析・統計解析 .....	63
7.3. 結果.....	63
7.3.1. タッピングとタイピングにおける手関節と MP 関節角度 .....	63
7.3.2. タイピングにおける示指のキー入力時の指先軌道と筋活動.....	65
7.4. 考察.....	67
7.4.1. タイピングにおける運動選択特性の適応的变化.....	68
7.4.2. タイピング中の指先運動の安定性と筋制御コスト .....	68
9. 研究限界と今後の課題.....	72
10. 結語.....	73
11. 補足資料.....	74
11.1. 研究Ⅰ：低スキル群におけるキーリリース時間と手関節伸筋 .....	74
11.2. 研究Ⅰ：入力に使用した運指と示指 PIP 関節マーカの位置 .....	75
11.3. 研究Ⅱ：入力に使用した運指と示指 PIP 関節マーカの位置 .....	76
11.4. 研究Ⅲ・Ⅳ：タッピング及びタイピング中の中指 MP 関節の姿勢.....	77
11.5. 研究Ⅲ：手部の姿勢と手根管内圧の増大による腱滑走の関係 .....	78



11.6. 研究Ⅲ：指屈筋腱の受動特性と性差.....	78
11.7. 研究Ⅲ：各対象者のクラスターの所属とクラスター説明率.....	78
12. 発表論文・学会発表・獲得助成金一覧.....	80
13. 謝辞.....	83
14. 引用文献 .....	84

## 1. 要旨

コンピュータは今や老若男女問わず、日常生活において用いられる必須のツールとなった。学習や仕事に限らず、趣味や余暇の一部として、日常生活において触れない日の方が少ないといっても過言ではあるまい。一方で、近年ではタイピング動作の繰り返しによる上肢の筋骨格障害の発生が公衆衛生上の問題となっている。タイピング動作は手関節と指の関節の運動による高度に組織化された複雑な課題である。しかし、タイピング動作の主たる運動を担う関節と筋負担を同時に評価し、障害発生に影響し得る運動学的要因を述べた報告は限定的であった。

博士研究では、この複雑で高度な手指運動タスクであるタイピングを実行するためにヒトが行っている運動制御様式をリハビリテーションの視点から解明することを目標とした。具体的には、従来の研究において解析されてきた収縮要素である筋の収縮作用に加え、ヒトの関節運動制御において筋活動以前に重要な働きを有する非収縮要素である靭帯や腱の構造-関節運動特性を包含した手指運動制御則を明らかにすることを最大の目的とし、以下の 4 つの研究を実施した。

研究 I では、高スキル者は、キー入力の際に手指の協調性を高め、手関節と指の MP 関節の角速度を効率的に調整することが明らかとなった。対照的に、低スキル者は、手関節伸筋の活動が高く、指の動きに非効率的な影響を及ぼすことが示唆された。これまで、主に矢状面の運動に着目したが、矢状面と水平面の 2 つの運動面において、ヒトがどのような運動の拘束条件を設定し、制御しているかは明らかではなかった。

研究 II では、タイピングにおける矢状面と水平面での関節運動の優位性を検証した。結果として、矢状面の運動は筋活動だけでなく、関節の受動的な運動メカニズムにも影響を受けやすいことが示された。一方、水平面の運動

は筋の動的作用と構造的特性に影響を受ける可能性が高いことが示唆された。しかし、これらの運動の拘束条件を設定する上で、靭帯や腱といった非収縮性組織が如何にして貢献し得るかは未解明であった。

そこで、研究Ⅲでは、手部に特徴的な 2 つの構造特性に着目して、これらの構造特性と単純な指運動（タッピング）における運動選択との関連性を評価した。結果として、MP 関節の側副靭帯の制動作用には共通性が示された。一方、指屈筋腱の作用には個人差が見られた。また、手関節と MP 関節の運動自由度を拘束するために、これらの靭帯や腱の構造特性を利用した運動選択を行う対象者が確認された。この運動選択は、課題遂行における時間的・空間的な安定性に寄与し、筋の制御コストを軽減する可能性が示唆された。

さらに研究Ⅳでは、靭帯や腱の構造特性を選択した制御則が複雑な指運動（タイピング）においても選択され得るか検証した。結果として、タイピング中においては、多くの対象者が構造特性を選択した制御である MP 関節屈曲位を選択した。複雑な指運動課題においては MP 関節の自由度拘束による制御の簡略化は、より顕著に行われることが明らかとなった。

以上より、ヒトの中枢神経系は、関節運動制御における時間的・空間的な制約を克服するため、非収縮要素である靭帯や腱の構造依存的な関節運動を利用した制御則を有している可能性が示唆された。本研究の結果は、上肢の筋骨格障害から回避するための身体的・環境的アプローチの提案や、筋の制御コストを減らした効率的な手指運動の学習を促進する知見になり得る。

## 2. 研究背景

### 2.1. 本研究の社会的背景

2000年以降、人工知能（Artificial Intelligence：AI）に関する技術水準が世界各地で向上しており、現在、第三次AIブームを迎えている。日常生活においても、インターネットの検索エンジンや、スマートフォンの音声認識アプリなど、AIの技術を用いた商品やサービスが組み込まれ、利活用されてきている。最も身近なものとしては、Apple社の「Siri」、Google社の音声検索、ソフトバンクロボティクス社の「Pepper」などがその代表例である。ヒトとコンピュータとの間で情報の入力と出力を行う新たなインターフェースとしてこれらが注目されてきている。しかし、依然としてキーボードやマウスなどの入力装置と、モニターやスピーカーなどの出力装置で構成される作業環境が技術活用の中核を担っている。

コンピュータは今や老若男女問わず、日常生活において用いられる必須のツールである。職場や家庭用にもデスクトップやラップトップ型のパソコンが広く普及され、生活の利便性が向上した。一方、劇的な環境の変化によって、主な入力装置であるキーボードの長時間の使用（＝タイピング動作の繰り返し）に繋がり、上肢の筋骨格障害が発生することが公衆衛生上の問題となっている（Gerr et al., 2002; Roquelaure et al., 2009）。上肢の筋骨格障害には肘の内側上顆炎や外側上顆炎、手関節や手指の屈筋腱炎や伸筋腱炎、手根管症候群などが含まれる。中でも手関節や手指の腱鞘に炎症が生じる腱鞘炎が最も多く発生する（Gerr et al., 2002）。これらの障害発生に影響し得る要因として、不適切な高さの机の使用や不十分な明るさの照明などといった環境要因、心理的ストレスや職場でのノルマなどといった行動学的要因、肘関節の過度な運搬角や靭帯の弛緩性などといった身体的要因及び生体力学的要因が指摘されている（Keller et al., 1998）。特に、生体力学的要因には運動単

位の持続的な動員と低強度の筋活動によるホメオスタシスの異常 (Visser & van Dieen, 2006) や、持続的な筋活動に関連する手関節の非中立的姿勢 (Dennerlein & Johnson, 2006; Klussmann et al., 2008) が関連する。このような生体への負担を惹起し得る姿勢や筋の負担を軽減することを目指して、リストレストやハンドサポートを用いた実験的介入が数多く検証されてきた (Callegari et al., 2018; Gonçalves et al., 2017)。しかし、当該研究においてタイピング動作中の肩関節や肘関節といった上肢の近位関節の姿勢と筋活動に着目されることが多く、タイピング動作の主たる運動を担う手関節と指の運動及びこれらの関節運動に寄与する筋の作業負担を同時に評価した報告は見られなかった。また、タイピング動作は手関節及び手部が協調的に作用することで構成される複雑性の高い課題動作である。このような動作の複雑さを考慮すると、各個人における動作の習熟さ (=タイピングスキル) に依存して、手指運動や筋活動は変化することが予測される。以上を踏まえ、タイピングスキルによる動作特性の違いを分析することで、タイピングの繰り返しによる生体への負担の程度や部位を明確化できる可能性があると考えた。

## 2.2. 博士前期課程の研究

三次元動作解析を用いた手の運動学的分析と表面筋電計を用いた前腕の筋活動の分析を主として、スキルレベルに依存した手部の機械的ストレス (=関節運動に伴う腱の伸張やせん断による負荷) を検討した。この結果を基に、タイピングの繰り返しによる運動学的要因の一端を明らかにし、上肢の筋骨格障害の発生予防の一助とすることを目標とした。

本研究では、整形外科的・神経学的疾患の既往のない健常成人を対象とし、実験には、QWERTY 配列キーボード (Microsoft, Wired Keyboard 600 ANB-00040)、三次元動作解析装置 (VICON, Vicon Motion System; サンプリング

周波数:100Hz), 無線表面筋電計 (DELSYS, Delsys Trigno Wireless System; サンプル周波数: 2,222 Hz) を用いた. 三次元動作解析装置では, 20 台の赤外線カメラを使用し, 対象者の身体に貼付した赤外線反射マーカ (以下, マーカ) の三次元空間上の位置座標変化を計測した. 表面筋電計は前腕の主要な 4 つの筋に貼付し, 活動電位を計測した (図 1). 椅子の高さと位置, 画面角度を各対象者の快適な位置に調節し, 机の高さは一般的な事業所で使用される高さである 70 cm に設定した.

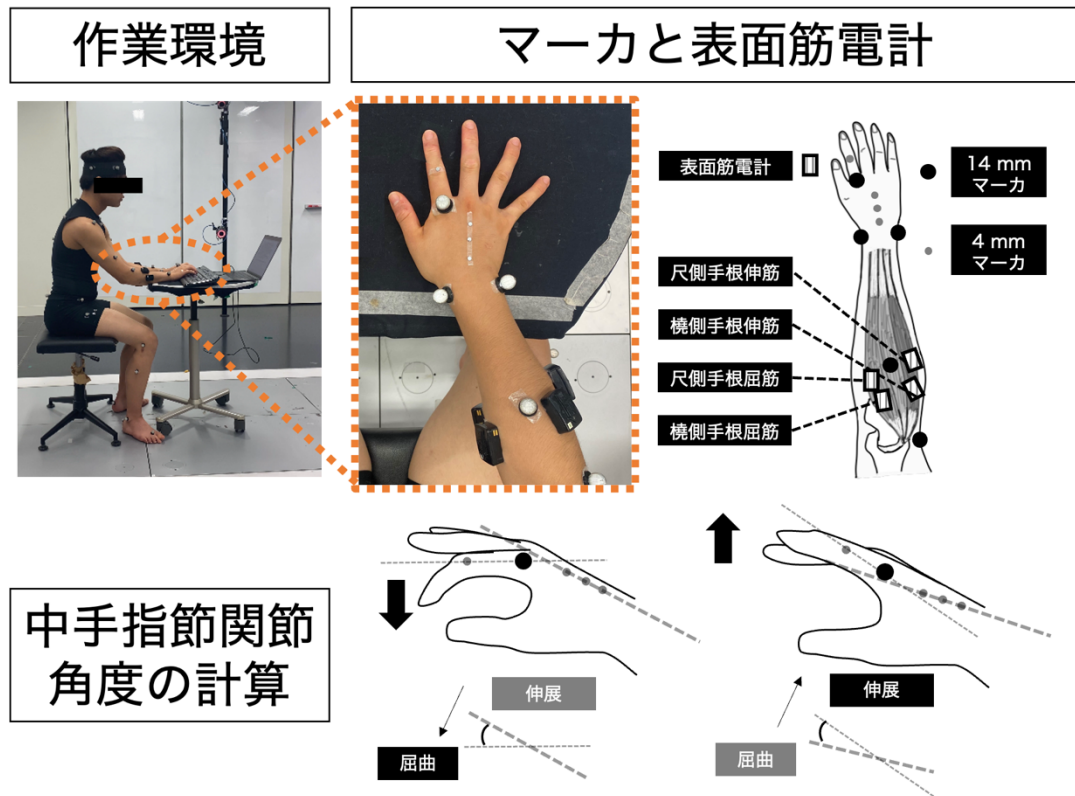


図 1. 作業環境と使用機器のセットアップ・中手指節関節角度の算出

左: 本課題中の様子を示した. 右: 右手の前腕, 手根部, 手背, 示指のランドマークに赤外線反射マーカを貼付し, 4 つの表面筋電計を橈側手根屈筋, 尺側手根屈筋, 橈側手根伸筋, 尺側手根伸筋に貼付した. 下: 手背のセグメントと基節骨のセグメントのなす角度を中手指節関節の屈曲・伸展角度として算出した.

初めに、実験環境に慣れるため 5 分程度タイピング練習を実施した。この時、前腕や手根部を浮かせたまま課題を行っていないことを観察し、測定環境による手関節の関節運動への影響がないことを確認した。練習終了後、事前課題として電子タイピングプログラムを使用して、タイピングテストを行い、正答率とキー入力の速さ（words per minute : WPM）を測定した。全ての対象者の WPM の平均値を基準として、平均値より高い対象者を高スキル群、低い対象者を低スキル群に分類した。

本課題では、日本語の 5,000 字程度の文章入力課題を行った。この時、入力速度やリズム、時間制限に関する指示は行わず、全ての対象者は普段行っている自然なタイピング動作を行った。

本課題で計測されたマーカの位置データは、カットオフ周波数 6 Hz の 4 次バターワース・ローパスフィルターを使用してフィルター処理した。その後、VICON Plug-in gait upper body model に基づき、右手の手関節の掌屈・背屈角度を算出した。また、先行研究 (Baker et al., 2007; Cook et al., 2007) を参考にし、手背のセグメントと基節骨のセグメントのなす角度から示指の中手指節関節 (metacarpophalangeal joint : MP 関節) の屈曲・伸展角度を算出した。課題中の平均関節角度、二乗平均平方根 (root mean square : RMS) に基づく関節角度変化量、角速度を算出した。角速度は、関節角度の時系列データを絶対値に変換し、単位時間あたりの関節角度変化として算出した。課題中に計測された各筋の筋活動データは、カットオフ周波数 20-480Hz の 4 次バターワース・バンドパスフィルターを使用した。フィルター後、全波整流を行い、10 Hz の間隔で移動平均を計算し、平滑化した。その後、最大等尺性収縮課題 (maximum voluntary isometric contraction : MVC) から得られた最大振幅を使用し、課題中の筋活動データを標準化し、%MVC を計算した。これらの値を基に、振幅確率密度関数 (ある出力 (振幅) 以下であった時間の

総和の割合を，その出力における出現確率として表す指標) (Jonsson, 1982) を用いて，筋負担を算出した．高スキル群と低スキル群の各算出パラメータは，対応のない t 検定を用いて比較した (有意水準  $p < 0.05$ ) ．

結果として，高スキル群と低スキル群における課題動作中の手関節の姿勢や運動には違いは認めなかった (図 2) ．一方，高スキル群の示指 MP 関節屈曲・伸展角速度は，低スキル群に対して有意に高い値を示した．また，高スキル群では手関節屈筋の筋負担が大きく，低スキル群では手関節伸筋の筋負担が大きい傾向が示された (図 3) ．従って，高スキル群は低スキル群に対して，手関節屈筋の作用によって示指のキーストロークを促進させ，手指の高速な運動を主としてタイピングを反復する運動様式を有することが明らかとなった．また，この運動様式は手指屈筋の筋・腱への生体力学的ストレスを減少させる戦略であることが示唆された．



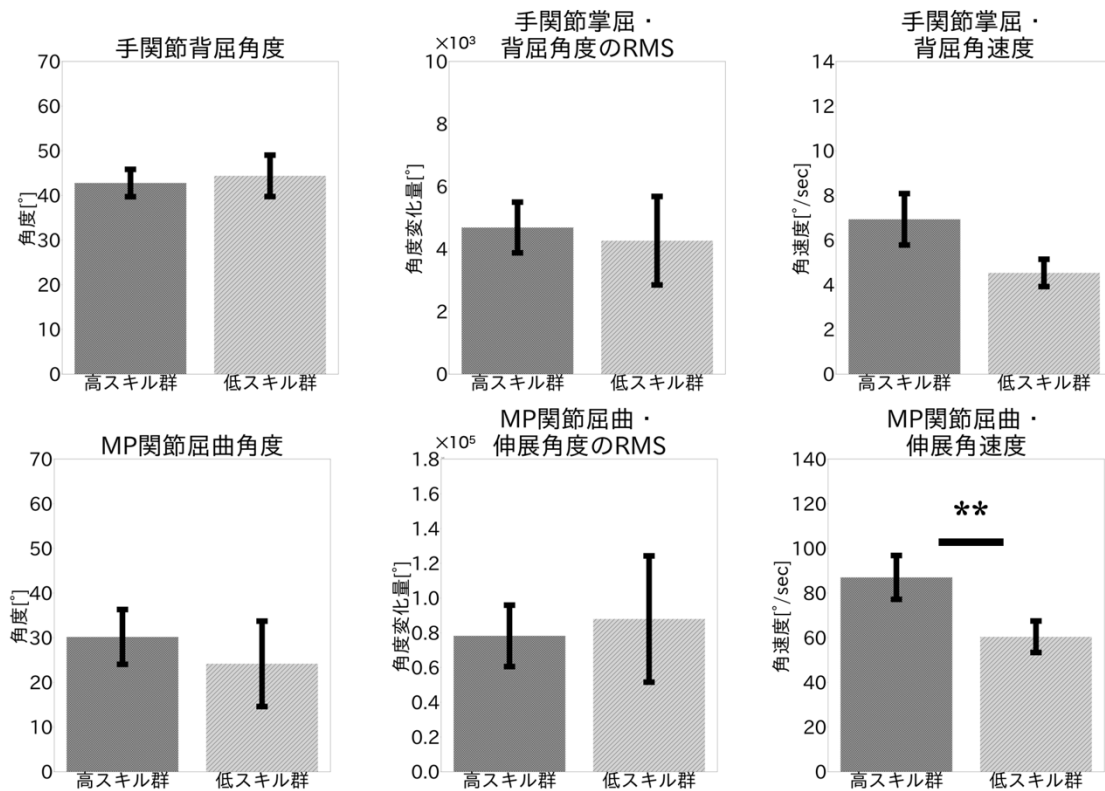


図 2. タイピング中の手関節と MP 関節の運動学

上：課題中の手関節背屈角度，手関節掌屈・背屈角度の二乗平均平方根（root mean square：RMS），手関節掌屈・背屈角速度の平均値を示した．下：課題中の示指の MP 関節屈曲角度，MP 関節屈曲・伸展角度の RMS，MP 関節屈曲・伸展角速度の平均値を示した．エラーバーは標準偏差を示す．MP 関節屈曲・伸展角速度は低スキル群に対して高スキル群で有意に高い値であった ( $p = 0.002$ ).

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

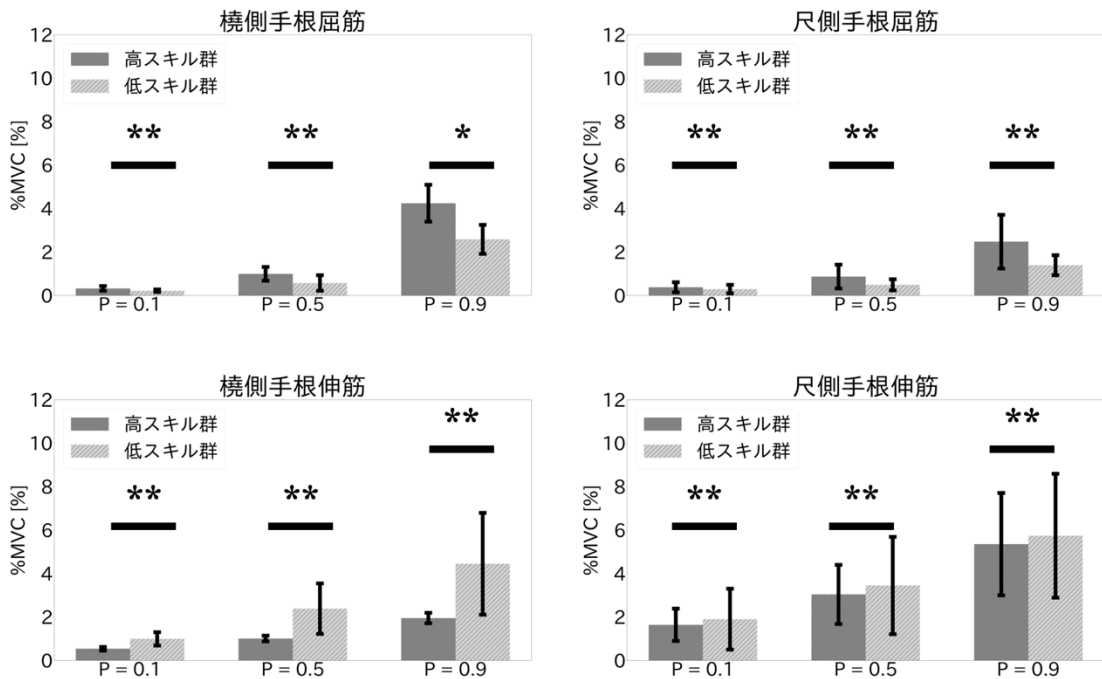


図 3. タイピング中の前腕筋負担

4 筋の筋活動データに対し、振幅確率密度関数を用いて静的活動レベル (Probability :  $P = 0.1$ ), 平均活動レベル ( $P = 0.5$ ), 最大活動レベル ( $P = 0.9$ ) における筋活動の値 (maximum voluntary isometric contraction : %MVC) を算出した。エラーバーは標準偏差を示す。低スキル群に対して高スキル群では手関節屈筋の全ての活動レベルにおける筋負担が高く、手関節伸筋の全ての活動レベルにおける筋負担が低い傾向であった。有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

### 2.3. 博士前期課程の研究で生じた課題

これまでの研究では、タイピング課題全体の平均的な運動学、筋負担の傾向がスキルの違いによって異なることが明らかになった。一方で、得られた課題全体の結果は、タイピング中にキーを押す時やキーから指を離す時、次のキー入力まで待機している時の全ての相における結果を反映した。そのため、最も強い機械的ストレスが生じるとされる、キー入力時に焦点を当てた結果には言及できなかった。

### 3. 博士研究の目的

博士研究では、複雑で高度な手指運動タスクであるタイピングを実行するために、ヒトの身体が実行している運動制御機構をリハビリテーションの視点から解明することを目標とした。本研究では、これまで解析されてきた収縮要素である筋の収縮作用に加え、ヒトの関節運動制御において筋活動以前に重要な働きを有する非収縮要素である靭帯や腱の構造-関節運動特性を包含した手指運動制御則を明らかにすることを最大の目的とし、以下の4つの研究を実施した。

初めに、研究Ⅰでは、タイピング動作の繰り返しによる機械的なストレスを回避するために、タイピングスキルの高い者が如何にしてキー入力時の手指運動を制御しているかについて明らかにする。これによって、タイピング動作の繰り返しによって生じる機械的ストレスの運動学的要因に迫る。

研究Ⅱでは、キーボード環境の制約に対し、矢状面と水平面の2つの運動面において、ヒトがどのような運動の拘束条件を設定し、制御しているかについて言及する。これによって、タイピング動作の繰り返しによる生体への負担の程度や部位を、運動制御則に基づいて予測するための知見を得る。

研究Ⅲでは、ヒトの手部に特徴的な靭帯と腱の構造特性による作用を定量化し、単純な指運動課題（タッピング課題）において、筋による制御を如何にして簡易化しているかを検証する。これによって、ヒトの手指運動における収縮要素と非収縮要素を包含した真の運動制御則について言及する。

研究Ⅳでは、単純な指運動課題で実行されていた運動様式が、複雑な指運動課題（タイピング課題）においても、同様の運動様式を選択し得るのかを検証する。これを明らかにすることで、靭帯や腱といった非収縮要素による自由度拘束を包含した制御則が、手指運動における筋活動制御の簡易化に貢献し得るかに迫る。

4. 研究 I : 高スキル群は, 手指の協調作用によりプレス/リリース時の手指の筋腱にかかる機械的ストレスを減らす

#### 4.1. 目的

本研究では, 示指でキー入力を行う前後の時間を分析対象とし, タイピング中の細かい時間間隔で, 如何にして手指が協調した動作を行っているかを明らかにすることを目的とした. これによって, タイピング動作の繰り返しによって生じる機械的ストレスの運動学的要因について言及した.

#### 4.2. 方法

##### 4.2.1. 対象

整形外科的・神経学的疾患の既往のない健常成人 12 名とした. 本研究は倫理審査委員会の承認 (承認番号: 20,508) を得ており, 対象者全員にヘルシンキ宣言に従った文書によるインフォームド・コンセントを行った.

表 1. 対象者の基本情報

	高スキル群 (n = 5)	低スキル群 (n = 7)	<i>p</i>
年齢	21.6 (0.8)	20.7 (0.5)	0.050
性別 (男:女)	3:2	6:1	—
利き手 (右:左)	5:0	7:0	—
正答率 (%)	94.0 (2.3)	95.1 (2.6)	0.513
WPM	219.5 (21.3)	170.6 (36.2)	*0.033

高スキル群及び低スキル群の基本情報を示した. 有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

##### 4.2.2. 使用機器

QWERTY 配列キーボード (Microsoft, Wired Keyboard 600 ANB-00040), 三次元動作解析装置 (VICON, Vicon Motion System; サンプリング周波数:

100Hz), 無線表面筋電計 (DELSYS, Delsys Trigno Wireless System; サンプリング周波数: 2,222 Hz) を用いた. 三次元動作解析装置では, 20 台の赤外線カメラを使用し, 対象者の身体に貼付したマーカとキーボードの Enter キーに貼付したマーカの位置を計測した. 表面筋電計は前腕の主要な 4 つの筋 (橈側手根屈筋, 尺側手根屈筋, 橈側手根伸筋, 尺側手根伸筋) に貼付し, 活動電位を計測した. 椅子の高さと位置, 画面角度を各対象者の快適な位置に調節し, 机の高さは一般的な事業所で使用される高さである 70 cm に設定した.

#### 4.2.3. 実験手順

初めに, 実験環境に慣れるため 5 分程度タイピング練習を実施した. この時, 前腕や手根部を浮かせたまま, 課題を行っていないことを観察し, 測定環境による手関節の関節運動への影響がないことを確認した. 練習終了後, 事前課題として電子タイピングプログラムを使用して, タイピングテストを行い, 正答率とキー入力の変速 (words per minute : WPM) を測定した. 全ての対象者の WPM の平均値を基準として, 平均値より高い対象者を高スキル群, 低い対象者を低スキル群に分類した.

本課題では, 日本語の 5,000 字程度の文章入力課題を 3 回行った. この時, 入力速度やリズム, 時間制限に関する指示は行わず, 全ての対象者は普段行っている自然なタイピング動作を行った.

#### 4.2.4. データ分析・統計解析

本課題で計測されたマーカの位置データは, カットオフ周波数 6 Hz の 4 次バターワース・ローパスフィルターを使用してフィルター処理した. その後, その後, VICON Plug-in gait upper body model に基づき, 右手の手関節の

掌屈・背屈角度を算出した。また、手背のセグメントと基節骨のセグメントのなす角度から示指の中手指節関節 (metacarpophalangeal joint:MP 関節) の屈曲・伸展角度を算出した (Baker et al., 2007; Cook et al., 2007) (前節 2.2. 図 1 参照)。課題中の平均関節角度, 二乗平均平方根 (root mean square: RMS) に基づく関節角度変化量, 角速度を算出した。角速度は, 関節角度の時系列データを絶対値に変換し, 単位時間あたりの関節角度変化として算出した。

課題中に計測された各筋の筋活動データは, カットオフ周波数 20-480Hz の 4 次バターワース・バンドパスフィルターを使用した。フィルター後, 全波整流を行い, 10 Hz の間隔で移動平均を計算し, 平滑化した。その後, 最大等尺性収縮課題 (maximum voluntary isometric contraction: MVC) から得られた最大振幅を使用し, 課題中の筋活動データを標準化し, %MVC を計算した。

解析区間については, Python 3.7 で作成したタイピングプログラムを使用し, キー入力信号を基に決定した。まず, キープレス/リリースのタイミングを記録し, キー入力時間を抽出した。これと同時に, キーボードの Enter キーに貼付したマーカの位置を三次元動作解析装置で計測し, 課題の開始と終了時に Enter キーを入力させることで, キー入力信号とマーカの位置データの記録時間を同期させた。さらに, 解析ソフトウェア Nexus 2.9 (VICON, Vicon Motion Systems) を用いて, 三次元動作解析装置によるマーカの位置のデータと表面筋電計による筋活動のデータの計測時間を同期させた。これらの方法によって, 対象とした“U”のキーの入力時間の開始と終了のタイミングを解析区間とし, 同時期のマーカの位置データ及び筋活動データを分析した (図 4)。このデータを基に, 課題文章中に最も頻回に入力される“U”のキーのプレス/リリースのタイミングを抽出した。また, 測定後に右示指の近位指

節間関節（proximal interphalangeal joint : PIP 関節）上のマーカから，どの指で“U”のキーを押していたかを分析した．結果として，一定範囲に収束していたことから（補足資料 11.2.），水平面の運動及び，運指の違いによる矢状面の運動への影響はないことを確認した．また，前節 2.2.での実験におけるタイピングスキル別の分類を実施し，高スキル群と低スキル群の“U”のキーのプレス/リリース時における運動学・筋活動データを対応のない t 検定を用いて比較した（有意水準  $p < 0.05$ ）．

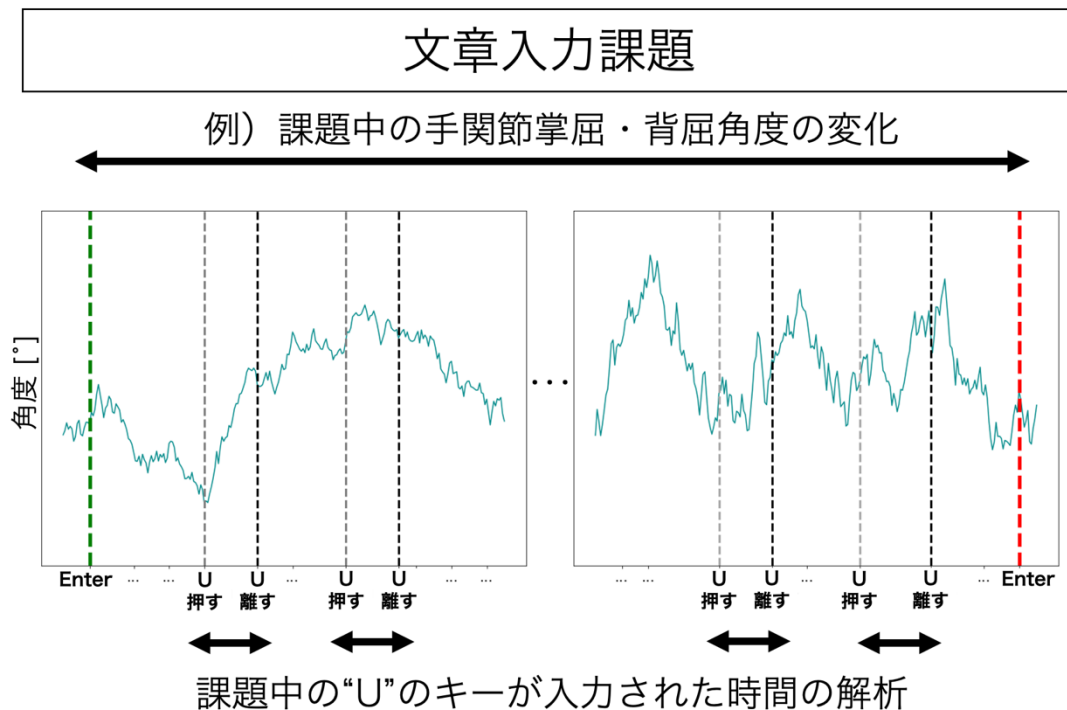


図 4. キープレス/リリースタイミングの分析例

課題中の手関節掌屈・背屈角度の変化を示した．キー入力信号のタイミングと運動学・筋活動データのタイミングを確認し，“U”が入力される前後のキー入力時間の分析を行った．

### 4.3. 結果

“U”を押したタイミングにおいては、低スキル群と比較して、高スキル群では MP 関節角速度が高く、橈側手根伸筋の平均値が低い値であった（図 5）。“U”を離れたタイミングにおいては、低スキル群と比較して、高スキル群では手関節と MP 関節角速度が高い値であった（図 6）。一方、筋活動については著明な違いはなかったが、高スキル群では手関節屈筋の筋活動が高く、手関節伸筋の筋活動が低い傾向であった。

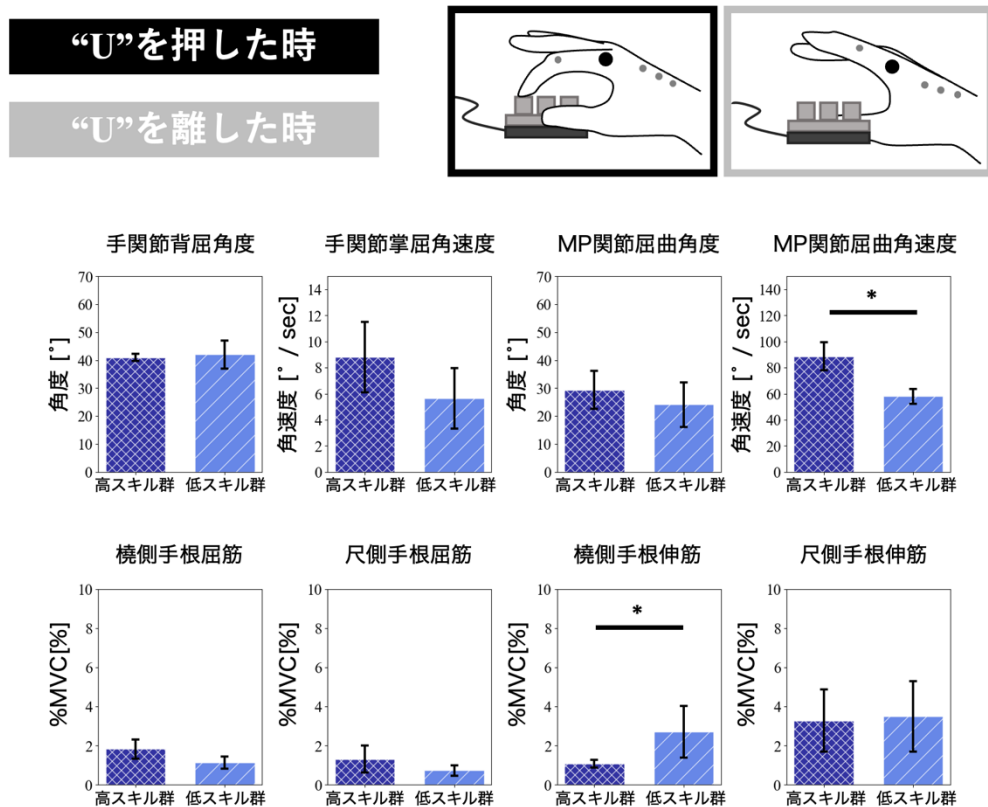


図 5. ”U”を押した時の運動学・筋活動データ

上：左から順に、平均手関節背屈角度、手関節掌屈角速度、MP 関節屈曲角度、MP 関節屈曲角速度。下：左から順に、橈側手根屈筋、尺側手根屈筋、橈側手根伸筋、尺側手根伸筋の%MVC の値。エラーバーは標準偏差を示す。低スキル群と比較して、高スキル群では MP 関節の屈曲角速度が高く、橈側手根伸筋の平均値が低い値であった。筋活



動については著明な違いはなかったが、高スキル群では手関節屈筋の筋活動が高く、手関節伸筋の筋活動が低い傾向であった。

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

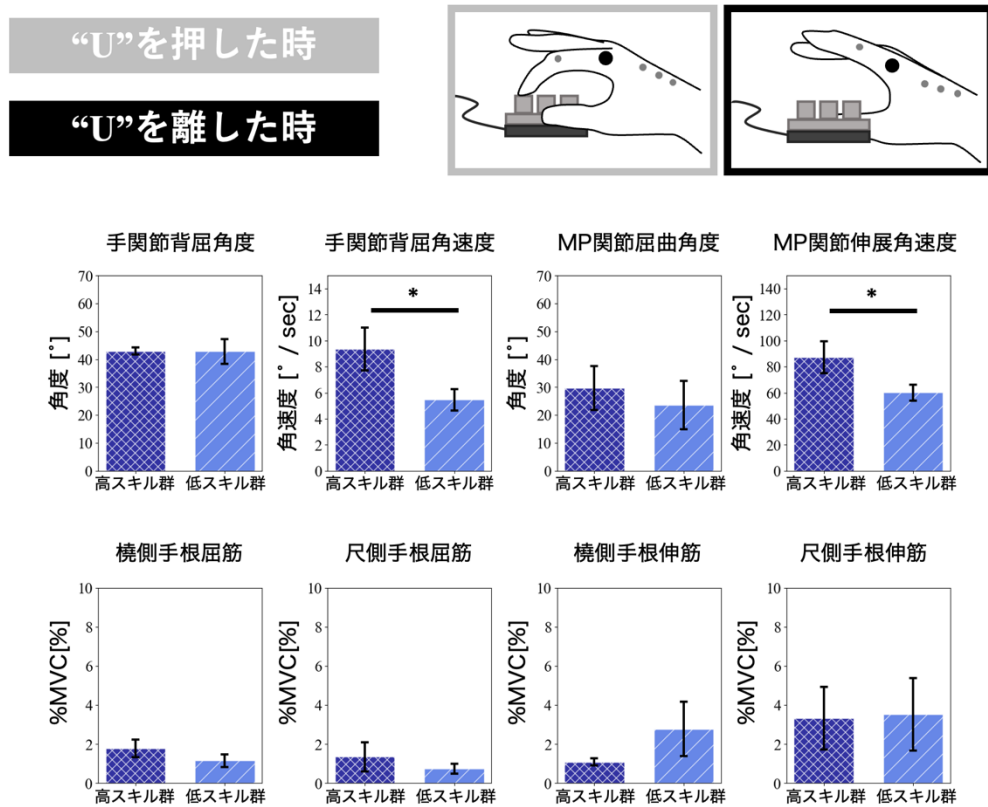


図 6. ”U”を離した時の運動学・筋活動データ

上：左から順に、平均手関節背屈角度、手関節背屈角速度、MP 関節屈曲角度、MP 関節伸展角速度。下：左から順に、橈側手根屈筋、尺側手根屈筋、橈側手根伸筋、尺側手根伸筋の%MVC の値。エラーバーは標準偏差を示す。低スキル群と比較して、高スキル群では手関節と MP 関節角速度が高い値であった。一方、筋活動については著明な違いはなかったが、高スキル群では手関節屈筋の筋活動が高く、手関節伸筋の筋活動が低い傾向であった。

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

#### 4.4. 考察

本研究では、タイピング中の細かい時間間隔で、如何にして手指が協調した動作を行っているかを検証するために、示指で頻回に入力を行う“U”のキーを対象として分析した。結果として、“U”のキーを押す時、低スキル群と比較して、高スキル群ではMP関節の屈曲角速度が高い傾向であった。また、キーを押す時については、有意な違いではないが、高スキル群では手関節屈筋の活動が高い傾向が見られ、博士前期課程の研究におけるタイピング中の最大活動レベルの筋活動の特徴を支持する結果であった。先行研究において、タイピング動作中のMP関節の屈曲運動は手関節の掌屈運動と相乗的に生じることが言われている (Dennerlein et al., 2007)。また、指の屈筋の筋活動は、指先の下向きの運動開始後に活性化される (Kuo et al., 2006)。低スキル群と比較して、高スキル群では指先に作用する下向きの僅かな慣性力や重力に、手関節屈筋の筋活動を加えることで、手関節と指の関節のどちらの運動も加速させる運動戦略を実行していた可能性が示された。一方、低スキル群においては同相において、橈側手根伸筋の高い活動を呈した。持続的で低強度の筋活動パターンはタイピング動作に影響し (Dennerlein & Johnson, 2006; Visser & van Dieen, 2006)、筋の長さともメントアームを変化させ、手関節の姿勢を保持する (Simoneau et al., 2003) と言われている。本研究においては、“U”のキープレス/リリース時の関節角度の差は見られなかった。従って、筋の長さが十分に伸張されているにもかかわらず、低スキル群では最小限の筋活動制御が欠如しているため、橈側手根伸筋の筋活動が過剰に活性化していた可能性がある。また、この作用はタイピングにおける指の屈曲運動と拮抗するブレーキ作用を有していることを意味し、キーを押す時に指の屈筋腱への機械的ストレスを増加させるリスクを有する可能性が示唆された。

今回の研究結果から、高スキル群では慣性力や重力による指先の下向きの

力を効率的に利用するために筋活動を制御していることが明らかとなった。

また、タイピング後の指のポジション回復においては、高スキル群で手関節伸筋の筋活動が低いままであったため、キーの反力や指の屈筋のバネ特性等を使うことで指のポジションを回復させている可能性が示唆された。

#### 4.5. 研究 I において生じた課題と解決方法

これまでの研究では、タイピング動作を構成する指先の上下運動を繰り返す動作としてキーストロークを分析してきた。また、タイピング動作中に手部への機械的ストレスが最も増加する相としてキーストロークに着目し、手関節と MP 関節の矢状面の運動を分析してきた。しかし、実際にはタイピング動作は主に矢状面と水平面の動きをキーボード空間上で繰り返す動作である。タイピング動作の特徴として、矢状面では高さが拘束されていない自由な空間で、手と指の運動自由度を拘束して制御する（ヒトの身体運動制御については、5.1.節にて説明）。一方、水平面ではキーボードのキーの配列に指先の到達位置が拘束されるが、その中で、手関節と指の関節は自由に動かすことができる。このようなキーボード環境の制約に対し、矢状面と水平面の2つの運動面において、ヒトがどのような運動の拘束条件を設定して、制御しているかは明らかでない。これを明らかにすることで、タイピング動作の繰り返しによる生体への負担の程度や部位を予測することが可能となり、ヒトの運動制御則に適した身体的・環境的介入の基盤となり得ると考えた。

そのため、研究 II では矢状面と水平面における手関節と MP 関節の運動の優位性を明らかにすることを目的とし、タイピング動作中の特定のフレーズ入力を分析した。各運動面に合わせて、各関節を優位に変化させることで、2つの次元の複雑な運動の制御を簡易化しているのではないかと仮説を立てて、検証を行った。

## 5. 研究Ⅱ：キーボード環境の制約条件に対する手指運動の特徴

### 5.1. 概説：タイピング動作における運動制御研究の必要性

我々ヒトは身体を自由に操る唯一の生体であり、歩くことや手を伸ばして物を掴むなど、習熟されたあらゆる身体運動を柔軟かつ正確に実行することができる。なぜヒトがいつも簡単に運動を実行できるかについて問うのが運動制御の研究であり、リハビリテーション領域や身体運動教育など、多くの身体運動科学分野の基盤となる。

運動制御研究において、最も有名な研究の一つに神経・運動生理学者のBernsteinが行った研究がある。鍛冶職人がハンマーを振り下ろして金属を繰り返し叩く動作を分析した時、試行間で上肢の関節位置が変動するのに対し、ハンマーの先と金属が当たる位置はあまり変動しないという報告である(Bernstein, 1967)。このような現象は日常生活の中でも多く見られ、一見すると単純そうに見える動作であっても、その運動制御は実に複雑である。その一番の理由は、課題を達成するために制御する運動自由度が多すぎるという冗長性の問題である。例えば、ヒトが机の上のものを取ろうとして手を伸ばす課題を考えた時、目標位置に至るまでの手先の軌道は無数に考えられる。例え、その軌道が一つに定まったとしても、その軌道をなす関節角度の組み合わせ、さらにはその関節角度をなす筋張力の組み合わせは無数に存在するため、解が一つに定まらない。ヒトの中樞神経系はこのような冗長性の問題に対して、拘束条件や運動規範を設定することで正確な運動を実行している(Bizzi et al., 1984; Hogan, 1984)。このような拘束条件や最適な運動規範を探索することが運動制御研究のキークエスチョンである。

これまでの運動制御研究の多くは歩行やリーチ動作が対象とされてきた。それぞれの動作の特徴として、歩行は、1歩行周期中の始点と終点が一意に定まらない動作であり、制御する下肢の空間上の自由度は高い。リーチ動作は

肩関節から手先の関節までが動作に貢献するため、運動自由度と制御空間の自由度の高い動作である。しかし、リーチ動作中の手先軌道の計画に関わる制御仮説 (Flash & Hogan, 1985; Harris & Wolpert, 1998; Uno et al., 1989) を唱えた代表的な研究をはじめ、リーチ動作研究の多くが始点と終点が常に決定され、かつ水平面上の運動に拘束されている。

タイピング動作の特徴として、矢状面上においては、上下方向の空間の制約はないため空間的自由度は高く、手と指の運動自由度を拘束して制御しなければならないという特殊な環境条件を有する。一方、水平面上においては、キーの配列によって指先の到達位置が制約されるが、その中で、手と指を自由に動かすことができる。この制約条件の中で、手関節から末梢にある多自由度を有する手部を制御するのがタイピング動作である。さらに、MP 関節の関節拘束条件は角度によって変化する。各運動面での連動を見た時に、矢状面上では手関節と MP 関節は常に連動している。一方、水平面上では、MP 関節がある一定の屈曲角度になると、手関節と MP 関節と連動できずに、手関節の内外側方向の運動に頼らざるを得なくなる。そのため、矢状面上の連動条件の違いによって水平面の連動条件が変化し得る。以上より、これまで運動制御研究において対象とされてきた動作の拘束条件とは大きく異なるため、タイピング動作に特異的な運動様式が存在する可能性がある。

## 5.2. 目的

研究Ⅱでは、矢状面と水平面における手関節と指の運動の優位性を明らかにすることを目的とした。仮説として、(1)手関節と MP 関節のそれぞれが各平面の運動を支配的に制御し、(2)これらの優位性に従った運動パターンが運動のばらつきを抑え、安定した運動を実行している可能性があると考えた。本研究の成果は、各次元の運動の規則性に基づく効率的なタイピング学習法

への応用が期待される他，各次元の関節運動の役割を分析することで，ヒトがどのように身体を制御しているのかを探ることができると考える。

### 5.3. 方法

#### 5.3.1. 対象

上肢の筋骨格障害の既往歴のない健常成人 10 名（男性 8 名，女性 2 名，右利き）を対象とした。本研究は倫理審査委員会の承認（承認番号：20,508）を得ており，対象者全員がヘルシンキ宣言に従った文書によるインフォームド・コンセントを行った。

表 2. 対象者の基本情報

対象者 (n = 10)	
年齢	21.0 (0.8)
性別 (男:女)	8:2
利き手 (右:左)	10:0
正答率 (%)	90.0 (2.9)
WPM	194.0 (41.6)

対象者の基本情報を示した。WPM (= Words Per Minute)。

#### 5.3.2. 使用機器

三次元動作解析装置 (VICON, Vicon Motion System; サンプリング周波数：100Hz)，QWERTY 配列キーボード (Microsoft, Wired Keyboard 600 ANB-00040) を使用した。キーボードは高さ 70cm の作業台の上に置いた。Nexus 2.9 (VICON, Vicon Motion Systems) ソフトウェアを使用し，身体とキーボード上に貼付したマーカの位置の測定と三次元構成，測定したマーカへの名前付け，データのフォーマット，他の拡張子へのデータ変換を行った。



図 7. 計測環境と分析方法

モニターに表示された課題文章を確認し、タイピングを行った。キーボードのキー配列を横から見た面を矢状面、キーボードのキー配列を真上から見た面を水平面とした。特定のフレーズを入力している間のマーカの位置を記録し、手関節及びMP関節の位置変化を算出した。

### 5.3.3. 実験手順

先行研究の方法を参考に、PIP関節、MP関節、手背、橈骨茎状突起、尺骨茎状突起、前腕遠位中央部にマーカを貼付した (Baker et al., 2007; Cook et al., 2007)。また、タイピング時間の記録と、キー入力時間の算出を目的として、Enterキーにマーカを貼り付けた。全ての対象者は、本課題を行う前に実験用キーボードでタイピングの練習を十分に行い、その後、本課題として日本語で5,000字程度の課題文章をタイピングした。本課題では、タイピング

速度やリズム、制限時間については指示せず、普段のスタイルとペースに従って入力を行うように指示した。

#### 5.3.4. データ分析・統計解析

測定データは Nexus 2.9 で取得し、Python 3.7 で詳細に分析した。マーカの位置データは、カットオフ周波数 6Hz の 4 次バターワース・ローパスフィルターを用いてフィルタリングした。解析区間は、最初に入力された Enter キーと最後に入力された Enter キーをトリガーとして、この間をサンプリングした。解析区間のうち、タイピング課題において頻出する単語「ryouhou」の 8 試行を抽出し、タイプミス試行を除去した。この単語は課題文章の中で最も出現頻度が高く、キーボードの右側にキーが集まっているために採用した。各フレーズに対する対象者のキー入力時間の平均と標準偏差 (standard deviation : SD) を算出し、SD はタイピング中の時間的安定性の指標として用いた。また、散布図を用いて矢状面と水平面のマーカ軌跡を分析し、右手の手背マーカに対する MP 関節及び PIP 関節マーカの位置の変化を算出した。ここでは、手関節マーカに対する MP 関節マーカを手関節の動きとし、MP 関節マーカに対する PIP 関節マーカを MP 関節の動きとした (図 7)。これらをタイピング中の空間的安定性と運動パターンの優位性の指標とした。また、測定後に右示指の PIP 関節上のマーカから、どの指を使用していたかを検討した。結果として、対象者 3 を除いて、「ryouhou」入力中のマーカの位置は類似していたことから、このフレーズを入力する際の運指の違いが、関節運動の組み合わせに及ぼす影響は低いことを確認した。

統計解析として、Shapiro-Wilk 検定により手関節と MP 関節の位置の変化量の正規性を確認し、F 検定によりこれらのデータの等分散性を検証した。矢状面及び水平面における手関節・MP 関節の位置の変化量の差は、t 検定ま



たは Wilcoxon 符号順位検定で確認した (有意水準  $p < 0.05$ ).

## 5.4. 結果

### 5.4.1. キー入力時間

解析対象としたフレーズ「ryouhou」の試行が一貫して行われたかどうかを明らかにするために、キー入力情報からキー入力時間を分析した (図 8). 結果として、キー入力時間の平均は 0.95 秒, 平均 SD は 0.08 であった. 対象者 3 を除き, 多くの対象者のキー入力時間は安定していた.

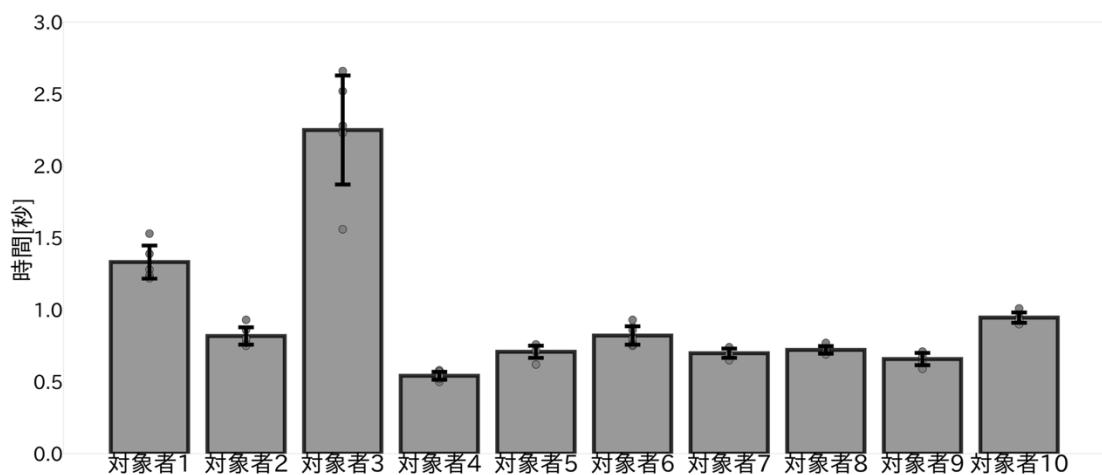


図 8. フレーズ入力におけるキー入力時間

各対象者のキー入力時間の平均を示した. エラーバーは標準偏差を示している. 課題文章には「ryouhou」というフレーズは 8 回含まれていた. その中からミスのない 5~7 試行を抽出した. キー入力時間の平均は 0.95 秒, 標準偏差は 0.08 であった. 対象者 4 のキー入力時間が最も短く, 1 試行あたりの入力時間は安定していた.

### 5.4.2. 矢状面と水平面における手関節と MP 関節の運動

全てのフレーズ入力中のマーカの位置を散布図で表記した. 矢状面におい

ては、前腕・手背のマーカに対して、基節骨のマーカが変化する対象者が多い傾向が見られた (図 9)。一方、水平面においては、前腕のマーカに対して、手背と基節骨のマーカが変化する対象者や、全てのマーカが変化する対象者が確認された (図 10)。

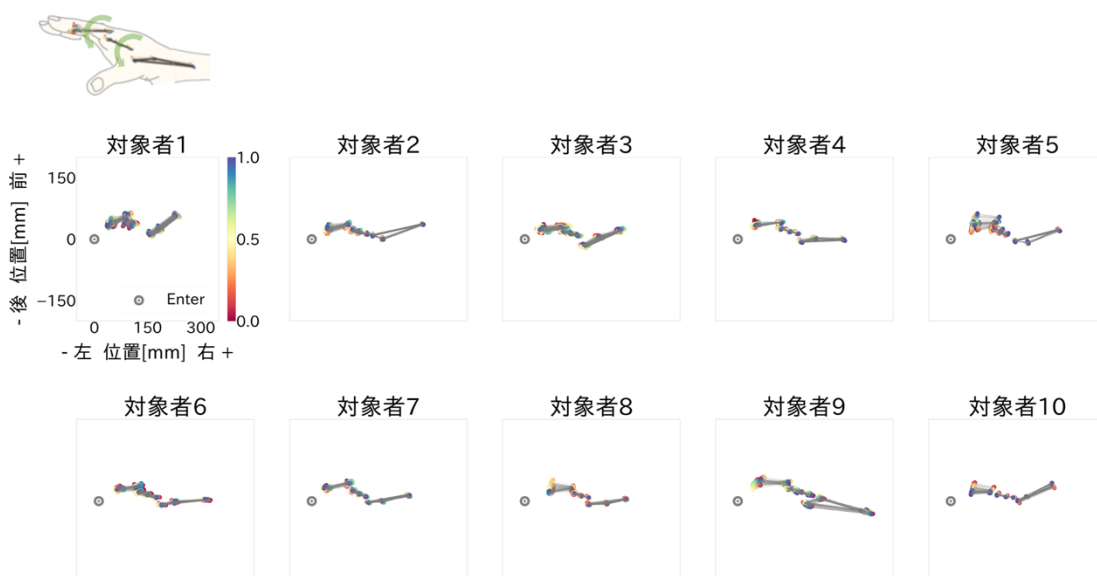


図 9. フレーズ入力中の矢状面におけるマーカの位置変化

各対象者の矢状面におけるマーカの位置変化をプロットした。キーボードの **Enter** の位置を二重丸で示した。赤～青のカラーバーは入力時間の始まりと終わりを示した。矢状面においては、前腕・手背のマーカに対して、基節骨のマーカが変化する対象者が多い傾向が見られた。

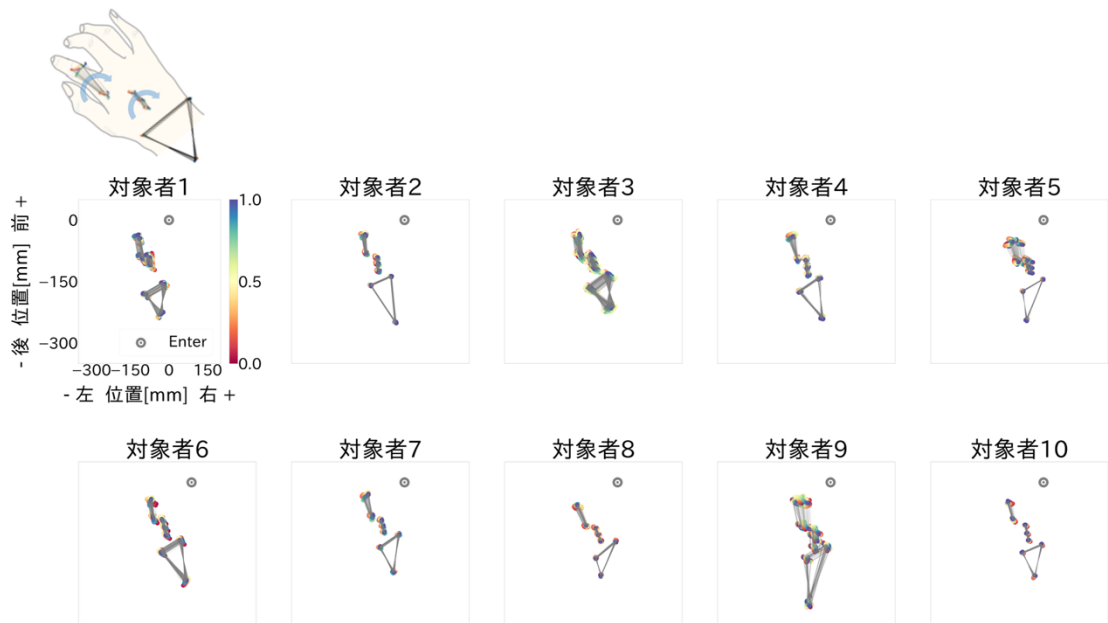


図 10. フレーズ入力中の水平面におけるマーカの位置変化

各対象者の水平面におけるマーカの位置変化をプロットした。キーボードの **Enter** の位置を二重丸で示した。赤～青のカラーバーは入力時間の始まりと終わりを示した。前腕のマーカに対して、手背と基節骨のマーカが変化する対象者や、全てのマーカが変化する対象者が確認された。

#### 5.4.3. 手関節と MP 関節の位置変化

全ての対象者は、キーボード上の手の位置（手背のマーカ）を左右方向  $7.38 \pm 7.50$  mm，前後方向  $4.97 \pm 4.21$  mm，上下方向  $3.05 \pm 1.70$  mm の範囲内に保った。各対象者，各試行における手関節と MP 関節の位置の変化量の平均については，矢状面での MP 関節の変化量は 7 名の対象者で有意に大きく，手関節の変化量は 1 名の対象者で有意に大きかった（図 11）。一方，水平面での MP 関節の変化量は，4 名の対象者で有意に大きく，手関節の変化量は，1 名の対象者で有意に大きかった（図 12）。また，手関節と MP 関節の変化量の平均値（SD）は，矢状面では  $7.35$  ( $7.46$ ) であり，水平面では  $6.27$  ( $6.58$ )

であった。これらの結果から、どちらの関節運動とも矢状面に対して水平面の方が安定していることが明らかとなった。また、水平面での変化は、手関節と MP 関節の間に傾向性は見られないが、矢状面での変化は、MP 関節の方が手関節よりも大きく変化する傾向が見られた。さらに、キー入力時間が短く安定していた対象者 4 は、いずれの面においても手関節よりも MP 関節の変化が有意に大きかった (図 13)。

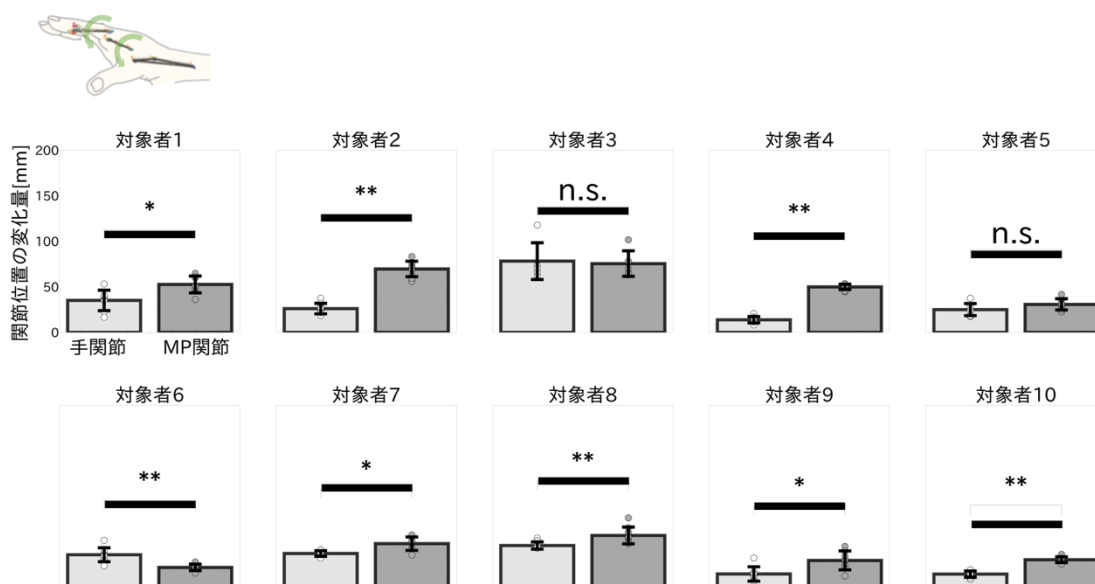


図 11. 矢状面における手関節と MP 関節の位置の変化

フレーズ入力中の矢状面における各関節の位置変化の平均値を算出した。白い棒グラフが手関節、灰色の棒グラフが MP 関節である。各対象者の関節の位置変化の違いを比較したところ、MP 関節の変化量は 7 名の対象者で有意に大きく、手関節の変化量は 1 名の対象者で有意に大きかった。

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , n.s. 有意差なし。

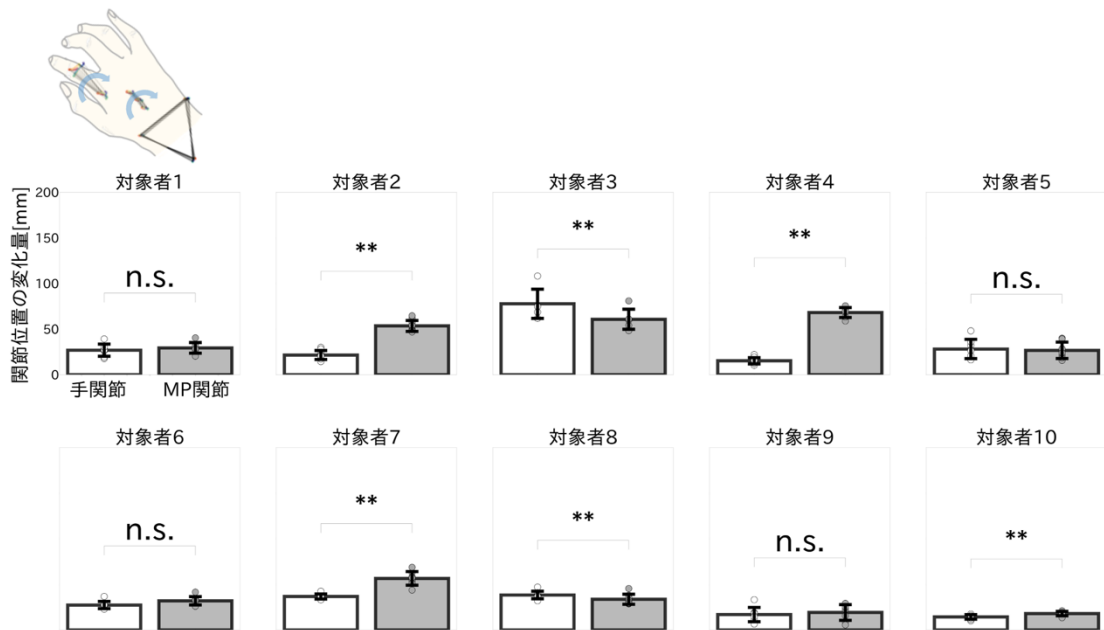


図 12. 水平面における手関節と MP 関節の位置の変化

フレーズ入力中の水平面における各関節の位置変化の平均値を算出した。白い棒グラフが手関節，灰色の棒グラフが MP 関節である。各対象者の関節の位置変化の違いを比較したところ，MP 関節の変化量は，4 名の対象者で有意に大きく，手関節の変化量は，2 名の対象者で有意に大きかった。

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , n.s. 有意差なし。

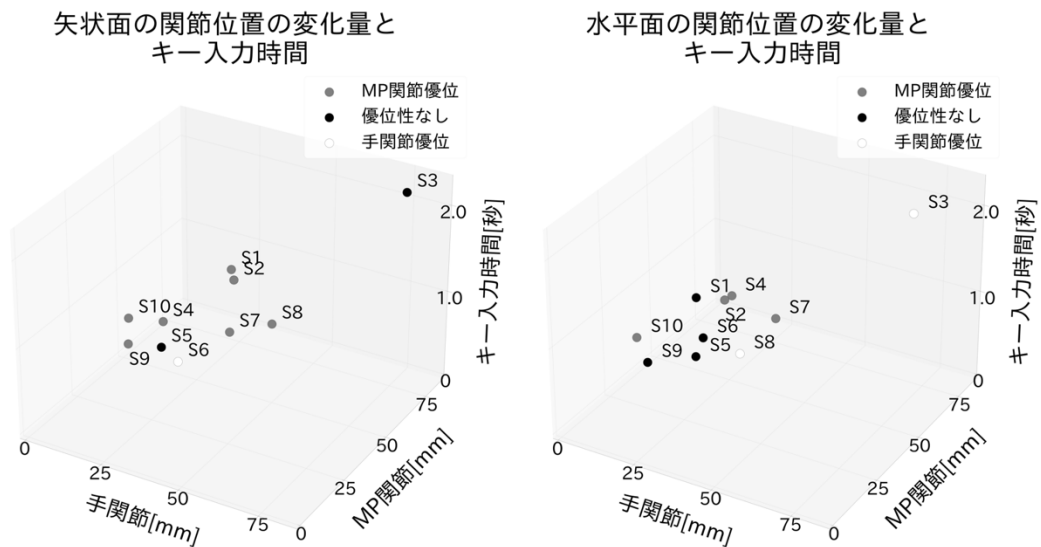


図 13. 関節位置の変化とキー入力時間の関係

左が矢状面，右が水平面の関節位置の変化とキー入力時間の関係を 3D プロットで示した．白丸は手関節の位置変化が有意に大きい対象者，灰色は MP 関節の位置変化が有意に大きい対象者，黒丸は関節の位置変化に優位性のない対象者である．対象者 4 のキー入力時間が最も短く，対象者 3 のキー入力時間が最も長かった．S：対象者．

### 5.5. 考察

本研究では，長文タイピング時の繰り返しフレーズ入力における運動協調に着目し，キー入力時間と 2 つの異なる平面の運動の優位性を分析した．仮説として，(1)手関節と MP 関節がそれぞれ各平面の運動を支配的に制御し，(2)これらの優位性に従った運動パターンが運動のばらつきを抑え，安定した運動を実行すると考えた．その結果，矢状面では MP 関節が手関節よりも優位に変化する傾向が見られ，水平面では手関節と MP 関節の運動の優位性が対象者間で異なる傾向が見られた．これらの結果は各次元に対応した各関節の制御が，運動制御を単純化するための関節拘束に基づく可能性を示唆した．

### 5.5.1. キー入力時間と関節運動の優位性

タスク中の運動の特徴を評価する際、タスクレベル変数と呼ばれるタスクを最もよく表現する運動学的変数の選択方法が議論されている (Latash et al., 2007) が、本研究では、手関節と MP 関節の関節位置の変化がタイピング動作を最もよく表現する変数として選択した。タイピング動作では、キーボード上で指先の位置を変える時、ヒトは手関節を動かしても指の関節を動かしても、連続的にキーを入力することが可能である。従来の研究では、時間的に安定したタイピングを行うための冗長性を制約する関節運動の組み合わせは、注目されてこなかった。そこで本研究では、タイピング中の手関節と MP 関節の位置の変化量と、フレーズ入力におけるキー入力時間を分析し、その解明を試みた。

結果として、多くの対象者が 1 秒程度でフレーズを入力していた。矢状面の運動を分析した結果、手関節に対して MP 関節は優位に関節位置が変化していた。一般的に、動作に関与する運動自由度が増えると、運動学の計画や逆運動学の計算が複雑になる (Yang et al., 2007)。投球動作では、近位関節と遠位関節の運動パターンを時間的に同期させることで、上肢動作の運動コストを削減し、制御を容易にする (Hore et al., 2005)。ピアノ動作では、運動学的な計算の複雑性を軽減させるため、上肢の近位の関節である肩関節の運動を拘束した多関節運動パターンが選択される (Furuya & Kinoshita, 2008)。同様に、手指運動タスクでは、中枢神経系が運動自由度を減らすために相乗的な運動を行い、各運動の構成要素を制御する (Santello et al., 2013; Soechting & Flanders, 1997)。タイピングタスクでは、目標とするキーに到達するまでの指先の動きには空間的自由度があり、手関節と MP 関節の角度の組み合わせは無数に存在する。そのため、MP 関節を優位に動かすために手関節と MP 関節が連動し、関節位置が制御されていることが示唆された。

水平面の運動を分析すると、手関節を優位に変化させる運動パターンを選択した対象者は 2 名、MP 関節を優位に変化させる運動パターンを選択した対象者は 4 名であった。全ての対象者は、タイピング課題中のキーボードの手の位置を、変化の大きい左右方向でも左右方向  $7.38 \pm 7.50$  mm 以内に保ったが、示指、中指、環指の指が担うそれぞれのキー入力場所によって自由に動いた。そのため、手関節と MP 関節の関節位置の変化の優位性にばらつきが生じたと考えられる。先行研究では、右手を動かしながらの過度な指の外転や、同一の指を使った連続的なキー入力など、水平面における特異的な運動パターンが報告されており (Baker et al., 2007)、水平面における関節運動の組み合わせは多様である。本研究における水平面の運動の特徴として、手関節を優位に動かす者、MP 関節を優位に動かす者、優位性のない者といったように複数の運動パターンが見られた。この結果は、水平面において、環境に依存した運動選択の制限が小さいことを意味する。また、運動パターンに一貫性がないことから、水平面の運動パターンは、キー入力時間の安定性の是非に影響を与えない可能性がある。

前述したように、キーボードの環境制約は、投擲やダーツなどの他の上肢動作とは大きく異なる。キーボード環境において、矢状面では運動空間が大きいため、関節運動の制約が要求されるが、水平面ではキーの配置が指先の到達位置を制約している。また、手関節の位置が変化すると、MP 関節や遠位端の位置も同時に変化するため、制御が難しくなる。関節位置の変化とキー入力時間の関係を示した 3D プロットから読み取れるように、矢状面のプロットは左後方に集中しているため、手関節と MP 関節の位置の変化の差は大きい。一方、水平面のプロットは左中央に集中しているため、手関節と MP 関節の位置の変化の差は小さい。従って、矢状面では手関節の位置を変えることなく MP 関節が優位に選択されていた。これは、動的に制御する関節の数



を減らすことで、制御を単純化する戦略である可能性を示した。

### 5.5.2. 矢状面と水平面における運動と変動性

手関節と MP 関節の変化量の平均値 (SD) は、矢状面では 7.35 (7.46)、水平面では 6.27 (6.58) であった。水平面は矢状面よりも手関節、MP 関節運動ともに安定していた。課題内で同じフレーズを分析したところ、各課題の遂行に必要な運動空間の範囲も一定であった。キー入力時のダウンスイングは、内在筋や外在筋によって開始されるのではなく、重力や筋の粘弾性などの受動的なメカニズムによって開始される (Kuo et al., 2006)。タイピング中の矢状面における運動の実行は、水平面の運動の実行に対して、筋活動だけでなく受動的な運動メカニズムの関与が大きい。そのため、矢状面における関節位置の変動は、複数の構成要素が運動実行に関与したことによって生じたと考えられる。また、手先や指先の剛性は、筋の共収縮や靭帯や腱などの解剖学的変数によって変化する (Charles & Hogan, 2011)。このような筋の動的作用や構造的特性が、水平面における運動の一貫性に影響を与えた可能性が考えられる。以上の点から、制御する運動の次元に合わせて、ヒトは手関節と MP 関節の優位性を制御し、安定した運動を実行している可能性が示唆された。

### 5.6. 研究 II において生じた課題と解決方法

研究 II ではタイピング時のフレーズ入力における手関節と MP 関節の運動協調に着目し、キー入力時間と 2 つの異なる次元における運動の組み合わせを分析した。結果として、矢状面では手関節より MP 関節の運動を優位に選択する傾向があるのに対して、水平面では手関節と MP 関節の運動の優位性には個人差が見られた。以上より、環境の制約条件に対して適応的に近位関

節と遠位関節の運動の優位性を決定していることを示唆した。しかし、ここでは、環境の制約条件に対するどのような運動学的・解剖学的な条件によって運動の優位性が決定されているかといった身体運動の拘束性を含めた制御則については言及できなかった。加えて、ヒトが運動の拘束条件を設定する上で、靭帯や腱といった筋以外の非収縮性組織の構造特性は制御変数であるのか、あるいは効率的な手指運動を実行する背景と構造特性の選択有無は関係しているかについては明らかでない。そこで、研究Ⅲではヒトの手部に特徴的な2つの構造特性による作用を定量化し、単純な指運動課題（タッピング課題）の運動パターンを分析した。これによって、筋による制御コストを軽減するために、これらの構造特性を選択して運動実行しているかについて検証を行った。

## 6. 研究Ⅲ：手指の構造・運動学的拘束性がタッピング制御に及ぼす影響

### 6.1. 概説：収縮要素である筋の作用に着目した運動制御則の限界

ヒトは身体をいとも容易く操作し、歩行やリーチなどの習熟した動作を柔軟かつ正確に行うことができる。5.1.節で述べたように、運動制御研究では、柔軟で正確なパフォーマンスを達成するために、ヒトの中樞神経系は関節自由度をどのように制約し、制御を簡易化しているかに焦点が当てられてきた。

ヒトの身体には多数の筋があり、筋は収縮したり弛緩したりすることで、緊張度合いが変化する。この作用を繰り返すことで、ヒトは関節を自由に動かし、非常に豊かな身体運動を実行する。ヒトの運動の多くは一見すると簡単そうだが、運動指令と筋の活動を制御するプロセスは複雑である。仮に、1つの筋線維の張力を on と off の 2 通りに制御するモデルが運動実行に関わる中樞に存在するとしても、タスクを達成するために必要な多数の筋線維や筋の組み合わせを考え、個別に制御し、運動を実行するのは現実的な戦略ではない。これまでの研究では、中樞神経系がいくつかのパターンの柔軟な組み合わせを用いて、筋を活性化させるという筋シナジーを分析する手法により、安定した運動実行に寄与する筋の役割が明らかにされてきた (Madarshahian & Latash, 2022; Ting & Macpherson, 2005)。この筋シナジー仮説は、神経科学領域で最も強く注目されてきた制御仮説であり (Tresch & Jarc, 2009)、神経系が多数の筋による制御を簡易化できる潜在的なメカニズムとして考えられている (d'Avella et al., 2003; Tresch et al., 1999)。一方で、筋シナジー仮説の反例は、手の筋による制御で観察されており、筋による運動制御の依存性が否定されている (Kutch et al., 2008; Valero-Cuevas et al., 2009)。従って、筋の収縮作用のみに着目しても、関節運動の制御を十分に説明することはできない。この背景には、手部の全ての筋を計測できないという点の他に、筋以外の複雑な関節構造が考慮されていないことが課題と

して挙げられる。

関節は筋だけでなく、靭帯、腱、半月板、関節包などといった非収縮性の組織からも構成されている。一般的に、非収縮組織は筋の収縮エネルギーと協調するか、そのエネルギーがなくても関節を安定させる役割を持つ(図 14)。特に、MP 関節の外側にある尺側側副靭帯は、MP 関節が屈曲すると張力が増加し、伸展すると張力が減少する (Minami et al., 1983)。この靭帯の張力が強くなると、MP 関節の外転方向の運動自由度が拘束され、指先の横方向の運動が制限される。さらに、腱も運動自由度の拘束に重要な役割を果たしている。腱の多くは筋と骨を接続しているため、筋の収縮作用が生じると、腱の張力は変化し、姿勢が受動的に変化する。特に、指屈筋腱は手関節と MP 関節に跨って走行しているため、手関節が背屈すると指屈筋腱が伸張し、指の屈筋が収縮しなくても MP 関節が受動的に屈曲する。このように、ヒトの手には、いわゆる「Tenodesis effect」と呼ばれる特徴的な腱の受動作用がある (Su et al., 2005)。中枢神経系がこのような靭帯や腱といった非収縮性の組織の特性を利用して、身体運動を制御していることを考えると、筋収縮の解析だけでは自由度の高いヒトの手の運動制御を説明することはできない。

## 筋・靭帯・腱の複合体

収縮要素：筋（エネルギーを使う）

非収縮要素：靭帯（関節の安定化）

腱（筋収縮による力伝達）

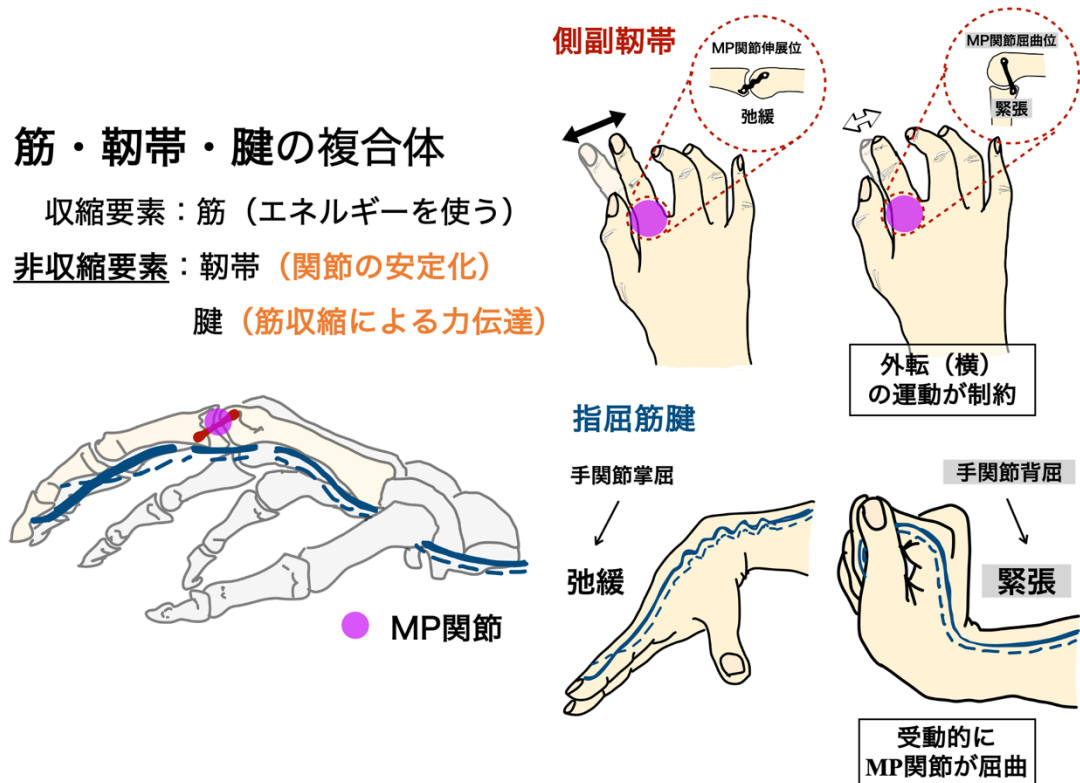


図 14. ヒトの手部構造の特徴

関節を構成する組織は、収縮要素と非収縮要素に大別される。収縮要素は筋を意味し、エネルギーを使って関節運動を制御する。一方、非収縮要素は靭帯や腱などを意味し、関節の安定化や筋収縮による力伝達を担う。手部には、側副靭帯と指屈筋腱といった特徴的な二つの非収縮要素がある。

### 6.2. 目的

手指の運動学的・解剖学的拘束性が単純指運動（タッピング）の制御に及ぼす影響について分析した。仮説として、手部に特徴的な非収縮要素である側副靭帯と指屈筋腱の構造特性が、手指運動の安定化や筋活動コストの低減に寄与していると考え、検証した。これを明らかにすることで、研究Ⅰで示した筋骨格障害に影響し得る運動学的要因を運動制御の側面から再検討することができる。また、研究Ⅱで明らかにした、運動の各次元における手関節

と指の関節の運動の優位性を決定する構造的要因と運動選択の特性との関係性を明確化できると考えた。

### 6.3. 方法

#### 6.3.1. 対象

健常成人 18 名を対象とした。検出力分析のため G\*Power (Faul et al., 2007) を用いて、本研究の主たる結果である実験 C の総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比について事後検定を行った結果、Effect size  $f = 1.20$ ,  $\alpha$  error probability = 0.05, Power (1-  $\beta$  error probability) = 0.989 であった。除外基準は、1) 上肢の整形外科的または神経学的疾患の既往があること、2) Beighton 法 (Beighton et al., 1973) によって上肢の関節弛緩性が認められることとした。対象者にはヘルシンキ宣言に基づき、研究の目的とリスクについて詳細な説明を行った後、インフォームド・コンセントを行った。本研究は、倫理審査委員会の承認を得て実施した (承認番号 : 21,518)。

表 3. 対象者の基本情報

対象者 (n = 18)	
年齢	22.9 (1.9)
性別 (男:女)	7:11
利き手 (右:左)	18:0
手長 (cm)	18.0 (1.2)

対象者の基本情報を示した。手長は中指の指先と手根部のマーカ間距離から算出した。

### 6.3.2. 使用機器

本研究では、3つの実験A~Cを実施した。実験A・Bは10名の対象者が行い、実験Cは全ての対象者が実施した。右手に貼付したマーカの位置を取得するために、7台の赤外線カメラを使用した三次元動作解析システムOptiTrack (Acuity, OptiTrack, Flex3; サンプル周波数: 100Hz) を用いた。また、データの再構成、ラベル付け、フォーマット化、他の拡張子への出力を行うため、Motive 2.3.2 (Acuity, OptiTrack) ソフトウェアを使用した。さらに、無線表面筋電計 (DELSYS, Delsys Trigno Wireless System; サンプル周波数: 2,222 Hz) を用いて総指伸筋と浅指屈筋の筋活動を記録した。

実験Bでは、BIODEX (Biodex Medical Systems, BIODEX System 4 Pro; サンプル周波数: 100Hz) を用いて手関節の受動運動を計測した (実験Bの詳細は6.3.5.に記載)。実験Cでは、QWERTY配列のキーボード (Microsoft, Wired Keyboard 600 ANB-00040) を使用し、高さ72cmの机の上で課題を実施した。

### 6.3.3. 実験手順

全ての実験は同日に実施した。本実験の前に、Beighton法により右上肢の関節弛緩性を評価した。この評価では、1) 90°以上の小指の他動伸展、2) 拇指の前腕への他動接触、3) 10°以上の肘の過伸展を行い、全てのテストが当てはまる場合、対象者は関節弛緩性を有するものとした。本研究では、該当者は見られなかった。

初めに、総指伸筋と浅指屈筋の筋腹に表面筋電計を貼付し、最大等尺性収縮課題を行い、各対象者の%MVCを算出した。次に、右手の示指の指先、示指の基節骨、中指の指先 (示指のマーカの補間用)、中指の基節骨 (示指のマーカの補間用)、手背、橈骨茎状突起、尺骨茎状突起、前腕近位部中央部に貼

付した (Baker et al., 2007; Cook et al., 2007; Lee & Jung, 2015). また, 実験 B では課題実施中にダイナモメータに対するグリップの動きを確認するために, それぞれにマーカを追加で取り付けた. 実験 C では指先と各キーの位置を分析するために **Enter** キーとキーボードの 3 つの隅にマーカを追加した.



図 15. 表面筋電計とマーカの貼付位置

表面筋電計は右手の総指伸筋と浅指屈筋の筋腹に貼付した. また, 右手の示指の指先, 示指の基節骨, 中指の指先, 中指の基節骨, 手背, 橈骨茎状突起, 尺骨茎状突起, 前腕近位部中央部に貼付した.

#### 6.3.4. 実験 A : 指先の最大運動課題

対象者は右手を机の上の傾斜台に置き, 示指の指先をできるだけ大きく動かす課題を行った. この課題は反時計回りで 5 秒間に 1 周する速さで行い, これを 5 周実施した (図 16).



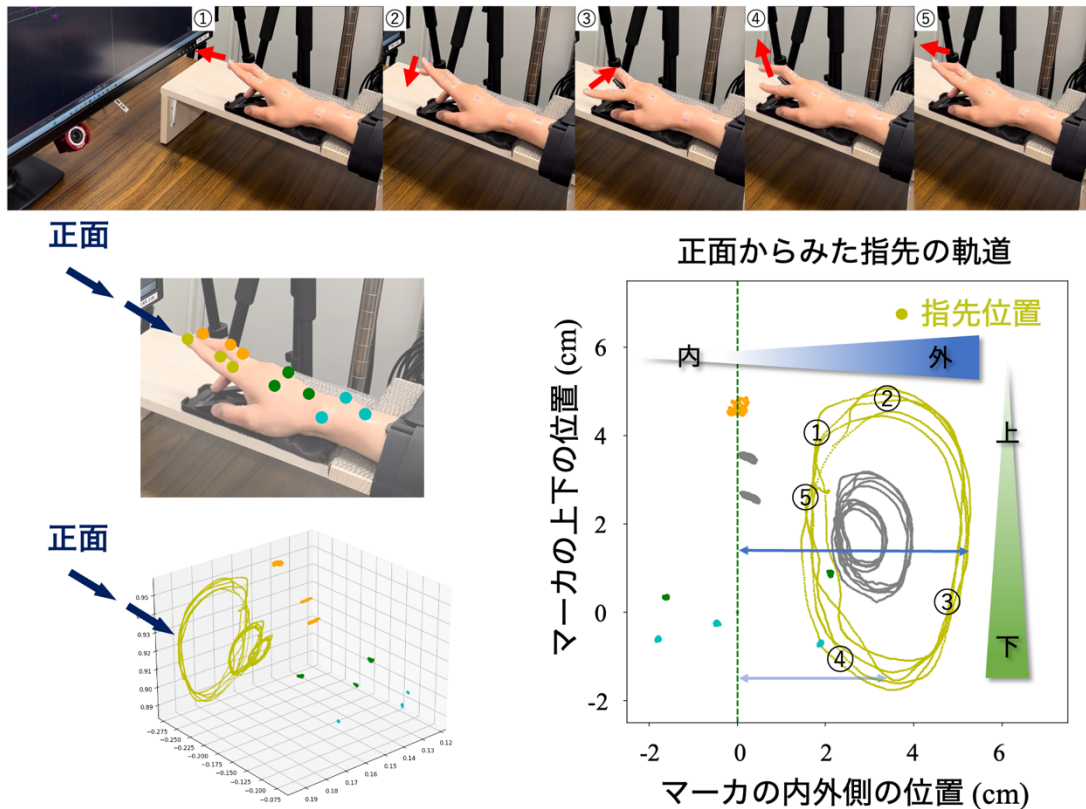


図 16. 指先の最大運動課題の環境

傾斜台に右手の前腕を置き、対象者から見て反時計回り、正面から見て時計回りに示指の指先をできるだけ大きく動かした。

### 6.3.5. 実験 B：手関節の受動運動課題

対象者は BIODEX のシートに座り、右前腕を固定具に通した。右手を開いてダイナモメータのスリングに通し、グリップに手掌面を接触させて脱力した。手関節の掌屈及び背屈の最大の他動可動域を確認し、角度範囲に応じてダイナモメータの回転角度を設定した。対象者には手の力をできるだけ抜くように指示し、ダイナモメータを反時計回りと時計回りに  $120^\circ/\text{sec}$  の速さで繰り返し動かし、手関節の掌屈運動と背屈運動を 1 分間行った。なお、本測定を実施する前に、手にかかる力が十分に抜けているかどうかを筋活動データにて確認し、この課題に対象者が慣れた後に本測定を実施した。



図 17. 手関節の受動運動課題の環境

課題を実施した環境を示した。対象者にはできるだけ手にかかる力を抜くように指示して計測を行った。120°/sec の速さで動くダイナモメータを繰り返し動かし、手関節の受動的な掌屈と背屈運動を 1 分間実施した。

### 6.3.6. 実験 C：タッピング課題

対象者は、180bpm の電子メトロノーム音に合わせて、右手の示指でテンキーの 7 と 9 を、30 秒間繰り返しタッピングを行った。本測定を開始する前に、全ての対象者は示指の長軸がテンキーの 1 と 7 を結ぶ線と平行の位置にあることを確認した。

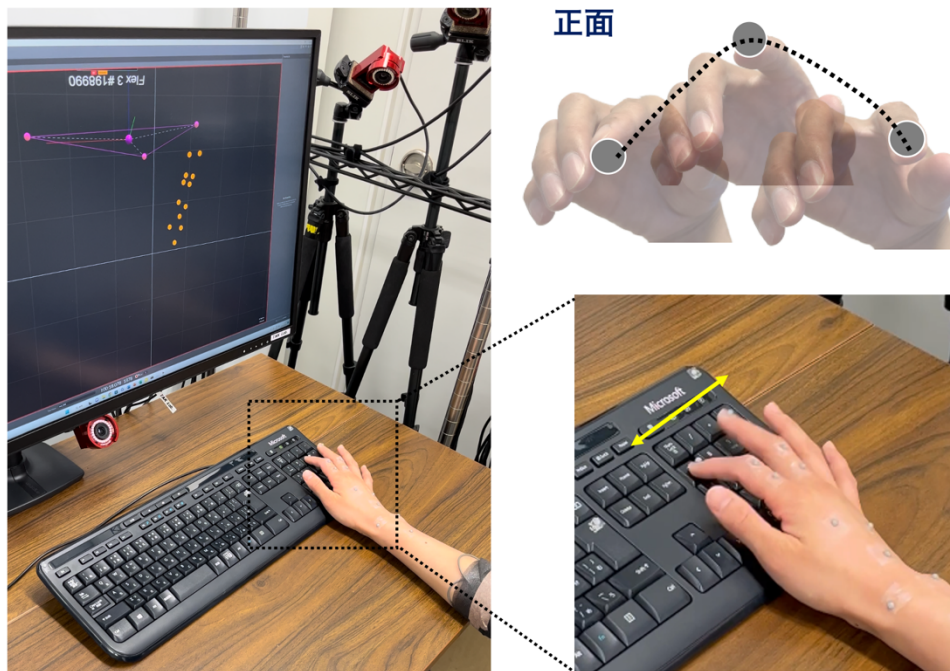


図 18. タッピング課題における作業環境

高さ 72cm の机の上でキーボードのテンキーの 7 と 9 を繰り返し行うタッピング課題を実施した。各キーの入力時に生じる音はフィードバックされるようにし、十分に練習を行ってから本測定を実施した。

### 6.3.7. データ分析・統計解析

Motive 2.3.2 と Python 3.7 を用いて計測データを取得・解析を行った。マーカ位置の欠損データの補間には、三次多項式補間 (Cubic Spline; Max gap : 100 frame) を用いた。全てのマーカ位置のデータは、カットオフ周波数 6Hz の 4 次バターワース・ローパスフィルタを用いてフィルタリングした。手関節角度は、手背と前腕に貼付した 3 つのマーカで構成される平面間の角度として定義し、矢状面では掌屈・背屈角度、水平面では橈屈・尺屈角度として計算した (図 15)。背屈と橈屈を正の値、掌屈と尺屈を負の値として表記した。

また、MP 関節角度は、示指の基節骨に貼付した 2 点のマーカと手背に貼付した 3 点のマーカの平面とのなす角度として定義し、矢状面では屈曲・伸展角度、水平面では外転・内転角度として計算した。屈曲と外転を正の値、伸展と内転を負の値として表記した。

実験 A では、各対象者の正面から見た指先軌道と、MP 関節屈曲・外転角度の相関性を分析した。実験 B では、橈骨茎状突起のマーカと、ダイナモメータに対するグリップのマーカの変位を検証した。この検証は、課題中、背屈角度が増大した時にグリップと手掌面がずれることによって、手関節の代償運動が生じてしまう可能性を棄却することを目的として行った。検証後、手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度データを基に、二次多項式回帰モデル (Su et al., 2005) を作成し、指屈筋腱の伸張による受動作用を評価した。実験 C では、タッピング中の手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度データを基に、k-means 法を用いて 3 つのクラスターに分類し、タッピングの空間的安定性と運動パターンの優位性を評価した。なお、中指の MP 関節運動が解析対象とした示指の MP 関節運動及びこれらのクラスター分類の結果に及ぼす影響は少ないことを確認した (補足資料 11.4.)。また、指先位置の高さによりタッピング周期を決定し、タッピング時間、指先軌道の最高点、総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比を評価した。なお、視覚化したデータにおいては時間正規化して表示した。

統計解析として、Shapiro-Wilk 検定により各データの正規性を確認し、Bartlett 検定または Levene 検定により等分散性を評価した。3 つのクラスターにおけるタッピング時間、指先軌道の最高点、筋活動比の違いは、一元配置分散分析または Kruskal-Wallis 検定を用いて比較した (有意水準  $p < 0.05$ )。有意差を認めた項目については、Bonferroni 法に基づく多重比較検定を行った (有意水準  $p < 0.05$ )。

## 6.4. 結果

### 6.4.1. 実験 A：指先の最大運動課題

指先の最大運動課題において、全ての対象者の指先軌道は上下方向に長い楕円形を示した（図 19）。また、MP 関節屈曲・伸展角度と外転・内転角度に関して、全ての対象者において、MP 関節屈曲位と外転位における関節角度の間に負の相関（ $r = -0.65 \sim -0.98$ ）が見られた（図 20）。

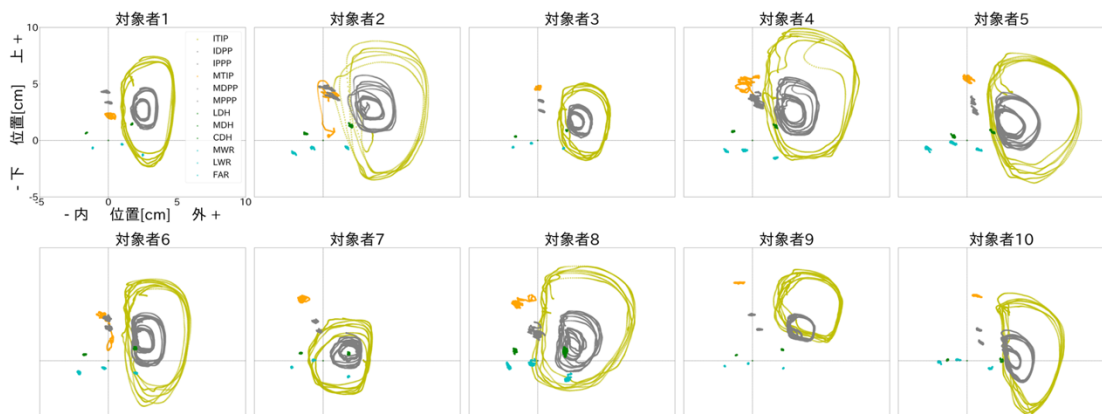


図 19. 指先の最大運動課題におけるマーカ位置

課題中の示指の指先のマーカを黄色で示した。全ての対象者の指先軌道は上下方向に長い楕円形を示した。

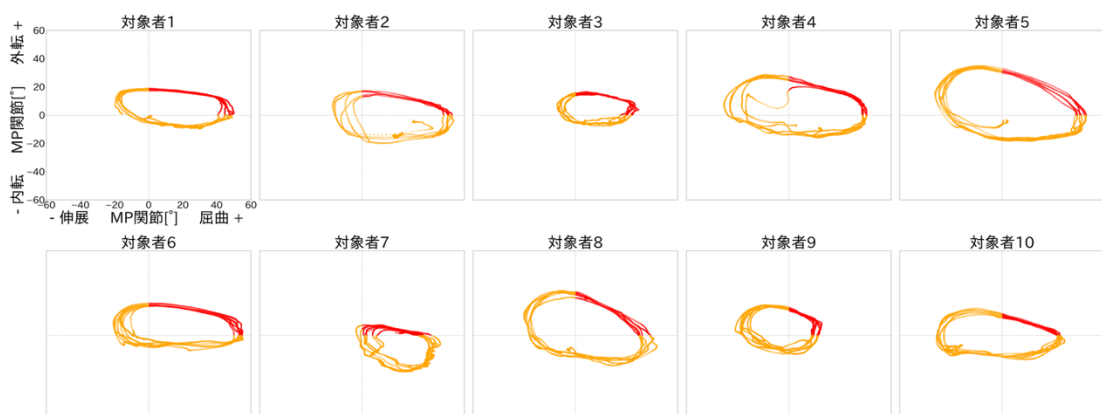


図 20. 指先の最大運動課題における MP 関節屈曲・伸展角度と  
外転・内転角度の関係

課題中の MP 関節の角度をプロットした。赤色で示したエリアは MP 関節が屈曲・外転位の時を示している。全ての対象者において、負の相関関係 ( $r = -0.65 \sim -0.98$ ) が見られた。

#### 6.4.2. 実験 B：手関節の受動運動課題

課題中の橈骨茎状突起のマーカ位置の左右方向と前後方向への最大変位量の平均値 (SD) は 0.80 (0.21), 0.71 (0.20) cm であった。また、対象者 6～10 の計測において、ダイナモメータに対するグリップの動きは弧状を呈した (図 21)。

実測で得られた手関節最大背屈角度の平均値 (SD) は、16.0 (14.9) °であった。手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度の実測値から算出した二次多項式回帰モデルにおける二次の項の係数の平均値 (SD) は、 $3.6 \times 10^{-4}$  ( $3.1 \times 10^{-3}$ ) であり、負の値から正の値にばらついていた (図 22)。

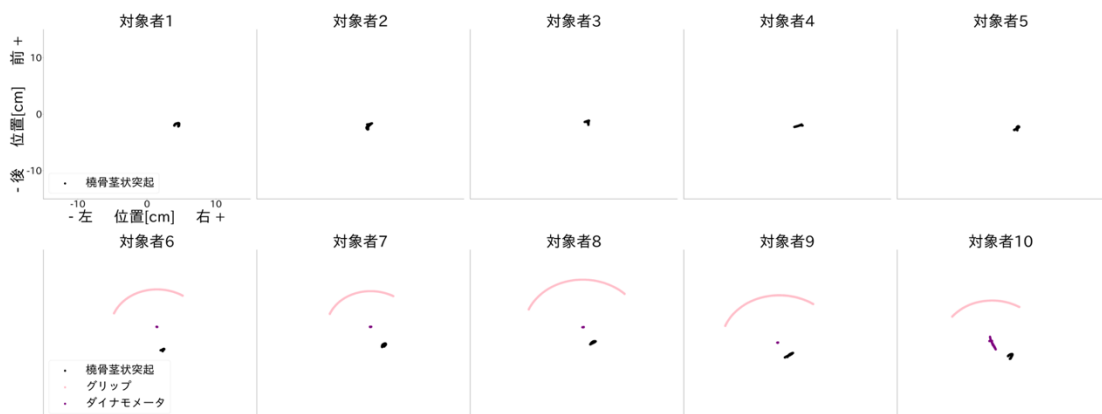


図 21. 手関節の受動運動課題における水平面から見たマーカの軌道  
紫がダイナモメータ，黒が橈骨茎状突起，ピンクがグリップに貼付したマーカである。  
橈骨茎状突起のマーカ位置の最大変位量は左右・前後方向とも 1cm 未満であった。対象者 6～10 の計測では、ダイナモメータに対するグリップの動きは弧状を呈した。



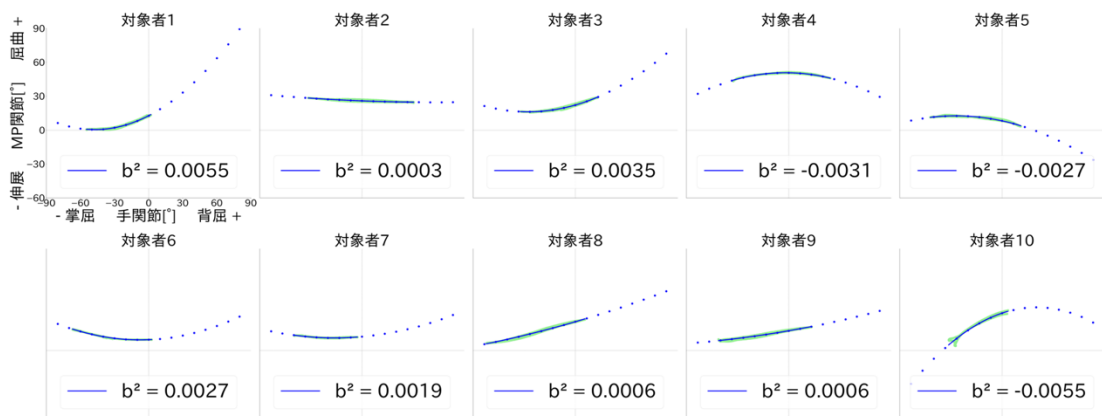


図 22. 手関節の受動運動課題における手関節掌屈・背屈角度と

### MP 関節屈曲・伸展角度の関係

実測で得られた手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度データは緑色のプロットで示した。実測値を基にして得られた二次多項式回帰モデルのデータは青色のプロットで示した。回帰モデルの二次の項の係数は負の値から正の値にばらついていた。

#### 6.4.3. 実験 C：タッピング課題

各対象者のタッピング時間と指先軌道の最高点の標準偏差の平均値 (SD) は 1.67 (0.62), 0.46 (0.10) であった。また、各対象者の総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比の平均値は 1.66 (1.39) であった。

矢状面の運動について、全ての対象者の手関節は背屈位であったが、MP 関節屈曲・伸展角度には対象者間でばらつきがあった。手関節と MP 関節の角度のデータに対して k-means 法を用いたところ、①手関節背屈位+MP 関節屈曲位、②手関節軽度背屈位+MP 関節屈曲位、③手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位の 3 つのクラスターに分類された (図 23)。水平面の運動について、手関節の橈屈・尺屈運動の変化が大きい対象者と MP 関節の外転・内転運動の変化が大きい対象者が見られた。矢状面の運動の特徴によって分類されたクラスター①～③に合わせてプロットすると、手関節を背屈、MP 関節を伸展させていたクラスター③に対して、手関節を背屈、MP 関節を屈曲させて

いたクラスター①②は、プロットの傾きが大きかった（図 24）。

全ての対象者の指先軌道はベル型の形状を示したが、指の伸筋と屈筋の筋活動の優位性にはばらつきが見られた（図 25）。また、MP 関節伸展位のクラスター③に対して、MP 関節屈曲位のクラスター①②では、有意差はないが、タッピング時間の標準偏差と指先軌道の最高点の標準偏差は低値であった（ $p = 0.41, 0.58$ ）。クラスター③に対して、クラスター②では総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比は有意に低値であった（ $p = 0.007$ ）（図 26）。

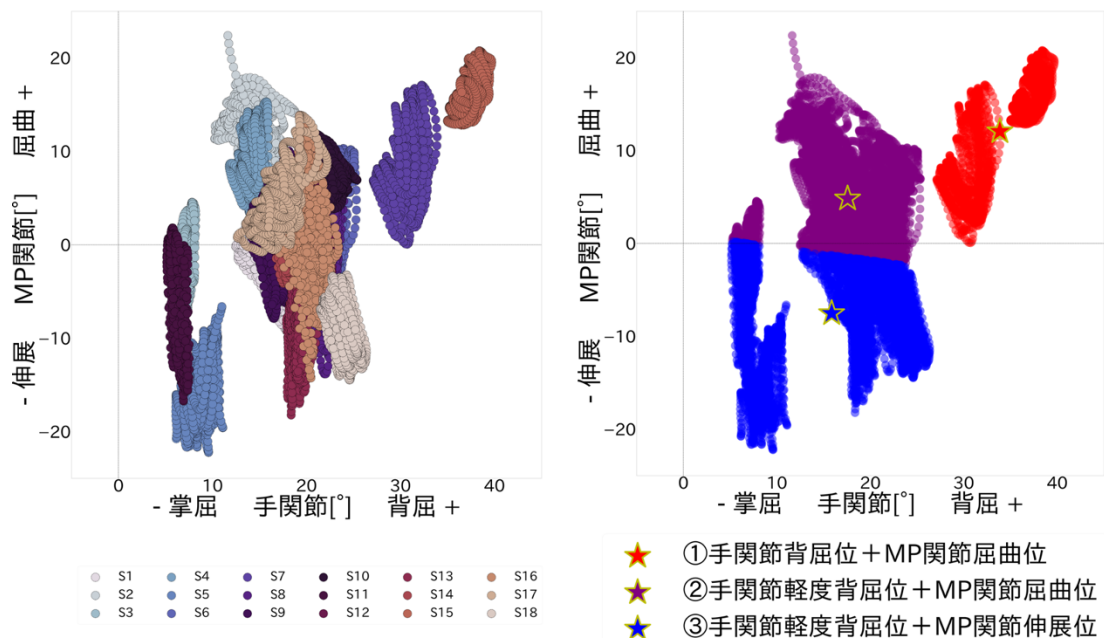


図 23. タッピング課題中の手関節掌屈・背屈角度と

### MP 関節屈曲・伸展角度の関係

左：全ての対象者の手関節と MP 関節の角度をプロットした。全ての対象者の手関節は背屈位であった。一方、MP 関節の屈曲・伸展角度には対象者間でばらつきがあった。

右：手関節と MP 関節の角度のデータに対して k-means 法を用いたところ、①手関節背屈位+MP 関節屈曲位、②手関節軽度背屈位+MP 関節屈曲位、③手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位の 3 つのクラスターに分類された。S：対象者



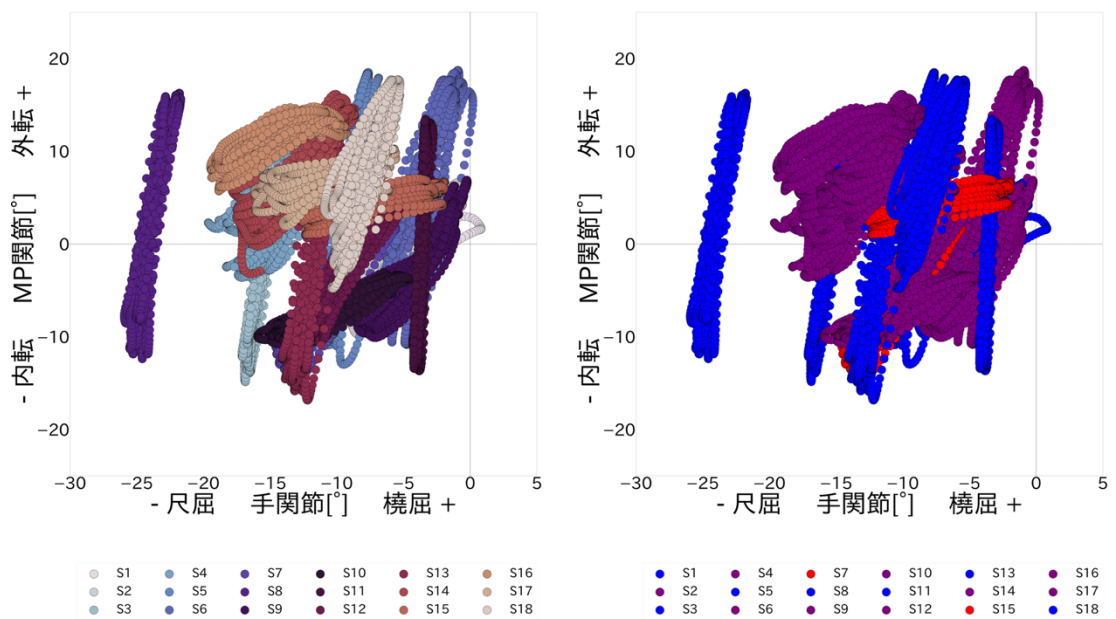


図 24. タッピング課題中の手関節橈屈・尺屈角度と  
MP 関節外転・内転角度の関係

左：全ての対象者の手関節と MP 関節の角度をプロットした。手関節の橈屈・尺屈運動の変化が大きい対象者と MP 関節の外転・内転運動の変化が大きい対象者が見られた。

右：矢状面の運動の特徴によって分類されたクラスター①～③に合わせてプロットした。手関節を背屈，MP 関節を伸展させていたクラスター③に対して，手関節を背屈，MP 関節を屈曲させていたクラスター①②はプロットの傾きが大きかった。S：対象者

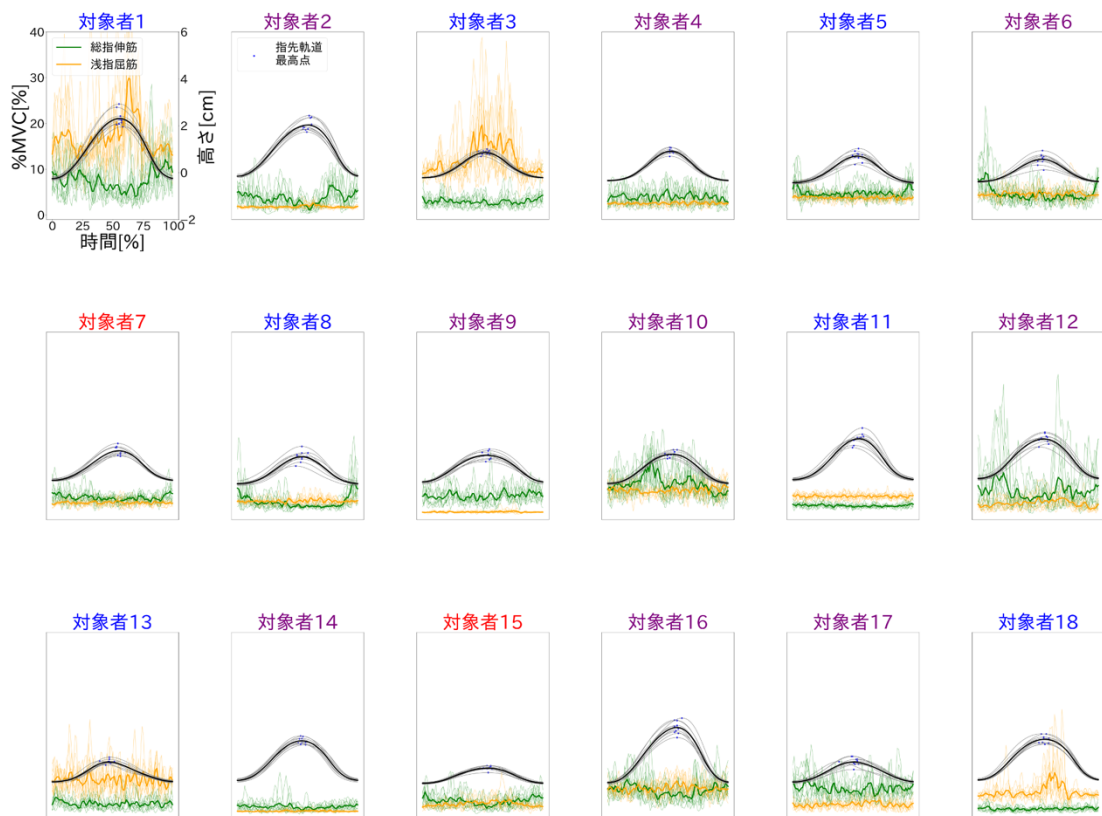


図 25. タッピング課題における指先軌道と筋活動

各対象者の指先軌道と総指伸筋と深指屈筋の%MVCの時系列変化を示した。全ての対象者の指先軌道はベル型の形状を示したが、指の伸筋と屈筋の筋活動の優位性にはばらつきが見られた。赤：手関節背屈位+MP関節屈曲位，紫：手関節軽度背屈位+MP関節屈曲位，青：手関節軽度背屈位+MP関節伸展位のクラスター

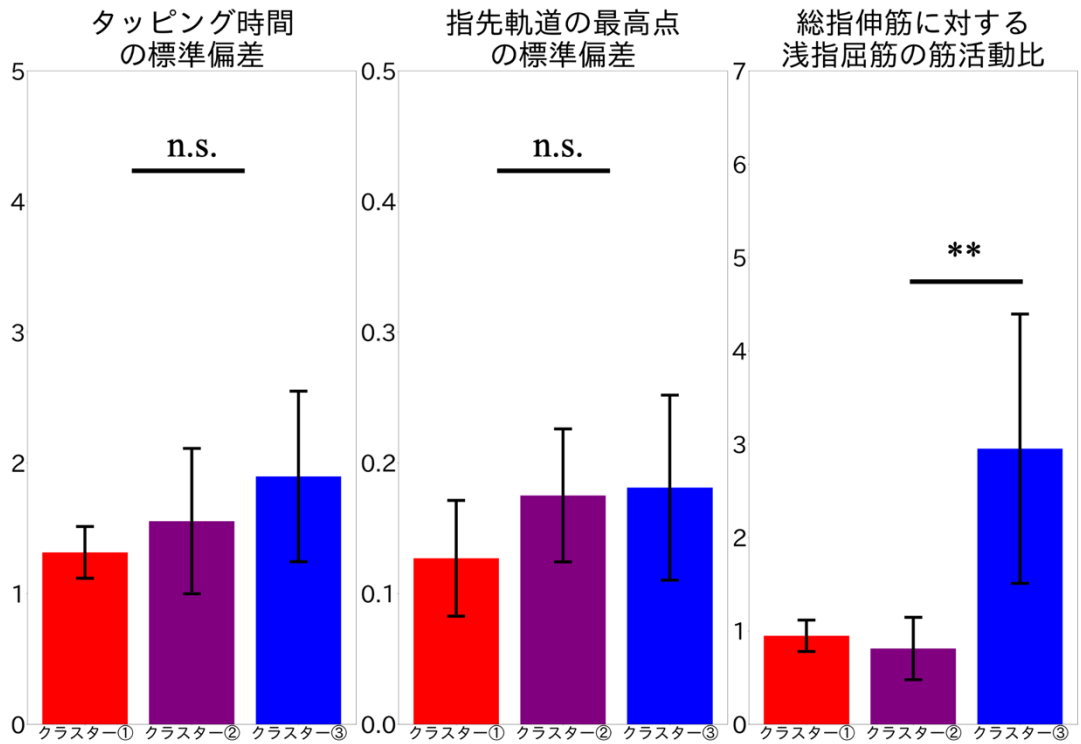


図 26. タッピング時間の標準偏差，指先軌道の最高点の標準偏差，筋活動比のクラスター間比較

MP 関節伸展位を呈したクラスター③に対して，MP 関節屈曲位を呈したクラスター①②では，有意差はないが，タッピング時間の標準偏差と指先軌道の最高点の標準偏差は低い傾向であった．クラスター③に対して，クラスター②では総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比は有意に低値であった．

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , n.s. 有意差なし．

## 6.5. 考察

本研究では，手指の運動学的・解剖学的拘束性が単純指運動（タッピング）の制御に及ぼす影響について分析した．仮説として，手部に特徴的な非収縮要素である側副靭帯と指屈筋腱の構造特性が，手指運動の安定化や筋活動コストの低減に寄与していると考え，検証した．

結果として、実験 A において MP 関節の側副靭帯の制動作用は全ての対象者に共通した特性であり、指先の横方向の運動が制限されることが示された。一方、実験 B において手関節背屈に伴って MP 関節を受動的に屈曲させる指屈筋腱の作用には個人差が見られた。実験 C において、手関節の背屈と MP 関節の屈曲を伴うクラスター①②では、指伸筋に対する指屈筋の筋活動が低値であった。これらのクラスターは、矢状面での MP 関節の屈曲・伸展運動において、指屈筋腱の受動的な張力変化を効率的に利用する運動様式を選択していることが示された。また、水平面での運動においては、MP 関節の内転・外転角度を大きく変化させることなく、手関節と MP 関節の関節角度を変化させて指先の横方向の動きを行っていた。従って、側副靭帯の制動作用によって MP 関節の外転運動の自由度を拘束した運動様式を選択していることが示された。このような靭帯や腱の構造特性を用いた運動選択はタスク実行の時間的かつ空間的な安定性に寄与するだけでなく、筋の制御コストを軽減させる可能性が示された。

#### 6.5.1. 側副靭帯による MP 関節の制動作用

実験 A では、指先の最大運動課題を行い、示指の指先軌道を分析した結果、全ての対象者において上下方向に長い楕円形を示した。また、課題中の MP 関節角度に着目すると、MP 関節の屈曲角度が大きくなるにつれて、MP 関節の外転角度は小さくなることが示された ( $r = -0.65 \sim -0.98$ )。近年の *in vivo* 研究において、MP 関節の屈曲角度が大きくなるにつれて、尺側側副靭帯の中間部と背側部分が延長されることが示されている (Sun et al., 2017)。対象者間で靭帯の長さや走行の違いが想定されるが、本研究において算出された MP 関節の屈曲角度と外転角度の相関性は、対象者間で共通した特性であった。従って、運動に貢献する筋の選択や、個々の筋線維における筋張力の調

整，複数筋の協調作用などといった筋に関する制御パラメータに対して，側副靭帯による制動作用は，関節自由度を拘束するための単純な制御パラメータである可能性が考えられる。

#### 6.5.2. 指屈筋腱による手関節と MP 関節の拘束性

実験 B では，手関節の受動運動課題を行い，手関節の背屈運動と MP 関節の屈曲運動を分析した。まず，手関節の橈屈や前腕回内の代償運動によって，手関節の背屈運動が生じていないことを確認するため，課題中の橈骨茎状突起のマーカ位置を評価した。その結果，マーカ位置の変化は，左右・前後方向ともに 1cm 未満であったため，代償運動による影響のない手関節掌屈・背屈運動であることが示された。

課題中に得られた手関節の最大背屈角度の平均値 (SD) は，16.0 (14.9)°であった。前述した計測上の配慮や対象者間での関節可動域が異なるため，実測値にばらつきが生じた。そのため，手関節と MP 関節の関節運動変化について検討した先行研究 (Su et al., 2005) を参考に，手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度の回帰モデルを算出し，各対象者の可動範囲を分析した。その結果，回帰モデルで示した二次の項の係数は対象者間で負の値から正の値までばらついていた。靭帯は骨と骨を接続するのに対して，腱は筋と骨を接続する。靭帯は骨同士的位置関係の変化によって，長さや張力を変化させるが，腱は骨同士的位置関係の変化だけでなく，接続する筋の物理的特性の変化に影響を受け，長さや張力が変化する。従って，指屈筋腱の受動特性には個人差があり，受動的な関節特性は側副靭帯の制御よりも制御の難しいパラメータであることが示唆された。

### 6.5.3. 運動パターンと筋の制御コスト

タッピング中に取り得る MP 関節屈曲・伸展角度データから、①手関節背屈位+MP 関節屈曲位、②手関節軽度背屈位+MP 関節屈曲位、③手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位の 3 つのクラスターに分類された。前述したように、MP 関節が屈曲すると側副靭帯が緊張し、MP 関節の外転方向の自由度が拘束される。タッピングという単純な指運動タスクにおいては、MP 関節の外転方向の自由度を拘束する側副靭帯の構造特性を選択する者と選択しない者が確認された。また、タッピング中の筋活動についてクラスター間で比較すると、手関節の背屈と MP 関節の伸展を伴うクラスター③に対して、手関節の背屈と MP 関節の屈曲を伴うクラスター①②では、総指伸筋に対する深指屈筋の筋活動比は低値である傾向が見られた。これまでの研究において、受動的な関節運動や筋収縮によって腱は伸張されるため、この作用に伴って指先の剛性は増加することや、指先の剛性を調整することはキーを速く正確に入力する上で重要な制御である可能性が示されている (Charles & Hogan, 2011)。これらのクラスターにおいては、腱の受動特性を用いて手関節を背屈し、MP 関節を受動的に屈曲させた姿勢を選択することで、筋の収縮作用による制御を減少させ、制御を簡易化させていた可能性が示唆された。さらに、タッピング中の時間的・空間的な安定性を示す指標として、タッピング時間と指先軌道の最高点の標準偏差を評価した。結果として、手関節の背屈と MP 関節の伸展を伴うクラスター③に対して、手関節の背屈と MP 関節の屈曲を伴うクラスター①②は、統計学的に有意ではないものの、どちらのパラメータにおいても低値であり、他クラスターと比較して安定した運動戦略を実行していることが推察された。

## 6.6. 研究Ⅲにおいて生じた課題と解決方法

研究Ⅲでは単純な指運動課題であるタッピングを評価タスクとして、構造特性の選択の有無と運動選択特性について検証した。しかし、作業環境の空間的な自由度を制約し、タスクに寄与する制御関節も限定したタスクであった。そのため、複雑な指運動課題であるタイピングにおいても、構造特性の作用を選択し、筋による制御コストを軽減し得る運動特性が見られるか否かについては明らかでない。

そこで、研究Ⅳではタイピング課題を評価タスクとし、非収縮要素による関節自由度の拘束が制御の簡易化に如何にして貢献しているか検証した。これを明らかにすることで、筋骨格障害の予防に寄与する運動選択や、効率的な運動学習を促進するための運動制御機構に関わる基礎的知見となり得る。

## 7. 研究Ⅳ：手指運動の構成要素がタイピングの運動選択に及ぼす影響

### 7.1. 目的

研究Ⅳでは、研究Ⅲで抽出された手指運動の構成要素がより複雑な指運動であるタイピングの運動選択特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。研究Ⅲで抽出された手関節を背屈，MP 関節を屈曲させる運動パターンの対象者が，タイピング中においても同様の運動パターンを選択するか分析した。さらに，それぞれの運動パターンにおける時間的・空間的安定性，手指の筋活動を評価した。これによって，靭帯や腱といった非収縮要素による自由度拘束を包含した制御則が，手指運動における筋活動制御の簡易化に如何なる貢献を果たすかを検証した。

### 7.2. 方法

#### 7.2.1. 対象

研究Ⅲの実験 C で参加した同一の 18 名を対象とした。検出力分析のため G\*Power (Faul et al., 2007) を用いて，本研究の主たる結果である総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比について事後検定を行った結果，Effect size  $f = 0.81$ ， $\alpha$  error probability = 0.05，Power (1-  $\beta$  error probability) = 0.794 であった。対象者にはヘルシンキ宣言に基づき，研究の目的とリスクについて詳細な説明を行った後，インフォームド・コンセントを行った。本研究は，倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号：21,518）。



表 4. 対象者の基本情報

対象者 (n = 18)	
年齢	22.9 (1.9)
性別 (男:女)	7:11
利き手 (右:左)	18:0
手長 (cm)	18.0 (1.2)
正答率 (%)	92.2 (4.3)
タイピング時間 (秒)	84.0 (18.5)
1週間の作業日数 (日)	5.6 (1.6)
1日あたりの作業時間 (時間)	3.5 (1.2)

対象者の基本情報を示した。手長は中指の指先と手根部のマーカ間距離から算出した。

#### 7.2.2. 使用機器

実験には QWERTY 配列キーボード (Microsoft, Wired Keyboard 600 ANB-00040), 三次元動作解析システム (Acuity, OptiTrack, Flex3; サンプリング周波数: 100Hz), 無線表面筋電計 (DELSYS, Delsys Trigno Wireless System; サンプリング周波数: 2,222 Hz) を用いた (図 27)。三次元動作解析システムでは, 7 台の赤外線カメラを使用し, 対象者の身体に貼付したマーカの位置を計測した。表面筋電計は総指伸筋と浅指屈筋の 2 筋に貼付し, 活動電位を計測した。



図 27. タイピング課題を行う計測環境

1,000 字程度の日本語の文章課題を提示し、タイピングを行った。対象者にはミスがないようにできるだけ速く入力を行うよう指示して課題を実施した。

### 7.2.3. 実験手順

初めに、総指伸筋と浅指屈筋の筋腹に表面筋電計を貼付し、最大等尺性収縮課題を行い、各対象者の%MVCを算出した。次に、右手の示指の指先、示指の基節骨、中指の指先（示指のマーカの補間用）、中指の基節骨（示指のマーカの補間用）、手背、橈骨茎状突起、尺骨茎状突起、前腕近位部中央部に貼付した（Baker et al., 2007; Cook et al., 2007; Lee & Jung, 2015）。

次に、普段、入力に使っているキーの組み合わせ（例えば、「じ」の入力を「ji」または「zi」のどちらで行っているか）を聴取し、そのキーに合わせた日本語ローマ字入力によって、5分程度タイピング練習を実施した。この時、椅子の高

さと位置，画面角度を各対象者にとって快適な位置に調節した．なお，机の高さは 72 cm に設定し，キーボードの位置は全ての対象者で同じ位置とした．本課題は，研究 I・II で使用した課題の内の 1,000 字程度の文章を抽出し，全ての対象者に同一の文章を提示した．対象者にはミスがないようにできるだけ速く入力を行うよう指示して課題を実施した．

#### 7.2.4. データ分析・統計解析

本課題中に計測されたマーカの位置から，研究IIIと同様のプロセスにて右手の手関節と示指の MP 関節角度を算出した．なお，研究IIIと同様に，中指の MP 関節運動が解析対象とした示指の MP 関節運動に及ぼす影響は少ないことを確認した（補足資料 11.4.）．また，研究IIIにおけるタッピング中の指先軌道との関係性を評価するため，タイピング中に示指によってキー入力が行われた区間を抽出した．抽出基準は，①中指の指先のマーカの高さに対して示指の指先のマーカの高さが低い時間，②示指の指先軌道の最降下点から次の最降下点までの時間とした．なお，視覚化したデータにおいては時間正規化して表示した．

### 7.3. 結果

#### 7.3.1. タッピングとタイピングにおける手関節と MP 関節角度

研究IIIで計測されたタッピング課題と研究IVにおけるタイピング中の示指によるキー入力における手関節と MP 関節の関節角度の組み合わせをプロットした．

矢状面において，タッピングでは全ての対象者の手関節は背屈位であり，MP 関節の屈曲・伸展角度には対象者間でばらつきがあった．一方で，タイピングでは全ての対象者の手関節角度はタッピングと同様であったが，多く

の対象者の MP 関節角度は屈曲位を呈した (図 28).

水平面において, タッピングでは手関節の橈屈・尺屈運動の変化が大きい対象者と MP 関節の外転・内転運動の変化が大きい対象者が見られ, 各対象者のプロットの形状は直線的であった. 一方で, タイピングでは各対象者のプロットの形状は円形を呈した (図 29).

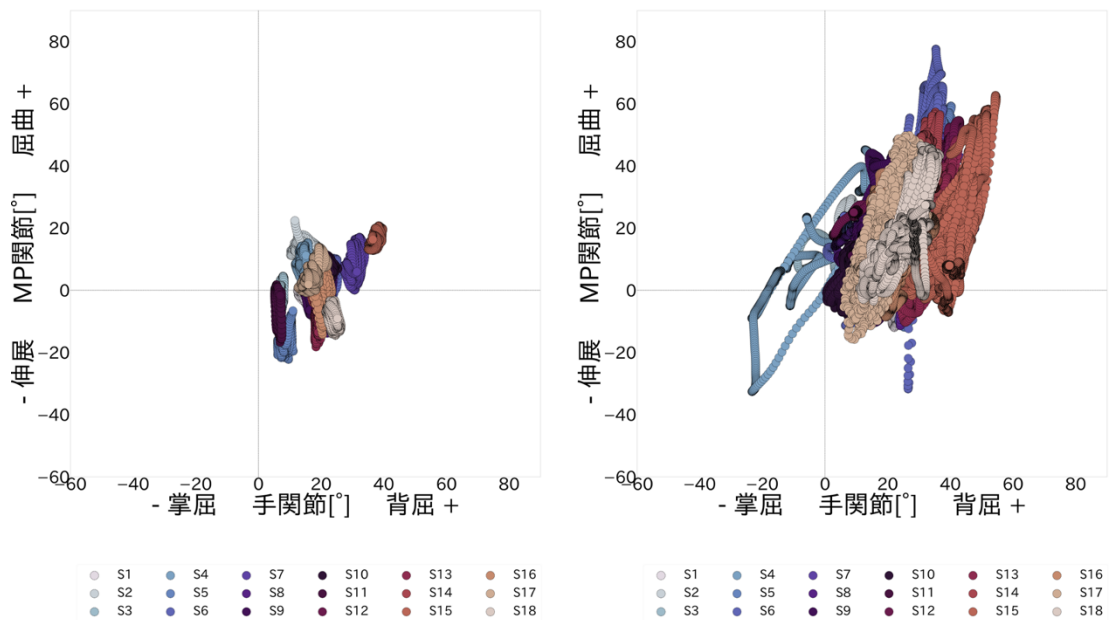


図 28. タッピング課題中及びタイピング課題中の手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度の関係

左: 研究Ⅲのタッピング課題中の全ての対象者の手関節と MP 関節の角度をプロットした. 全ての対象者の手関節は背屈位であった. 一方, MP 関節の屈曲・伸展角度には対象者間でばらつきがあった. 右: 研究Ⅳのタイピング課題中の全ての対象者の手関節と MP 関節の角度をプロットした. 全ての対象者の手関節は背屈位, MP 関節は屈曲位の傾向が見られた. 対象者は研究Ⅲの者と対応関係にある.

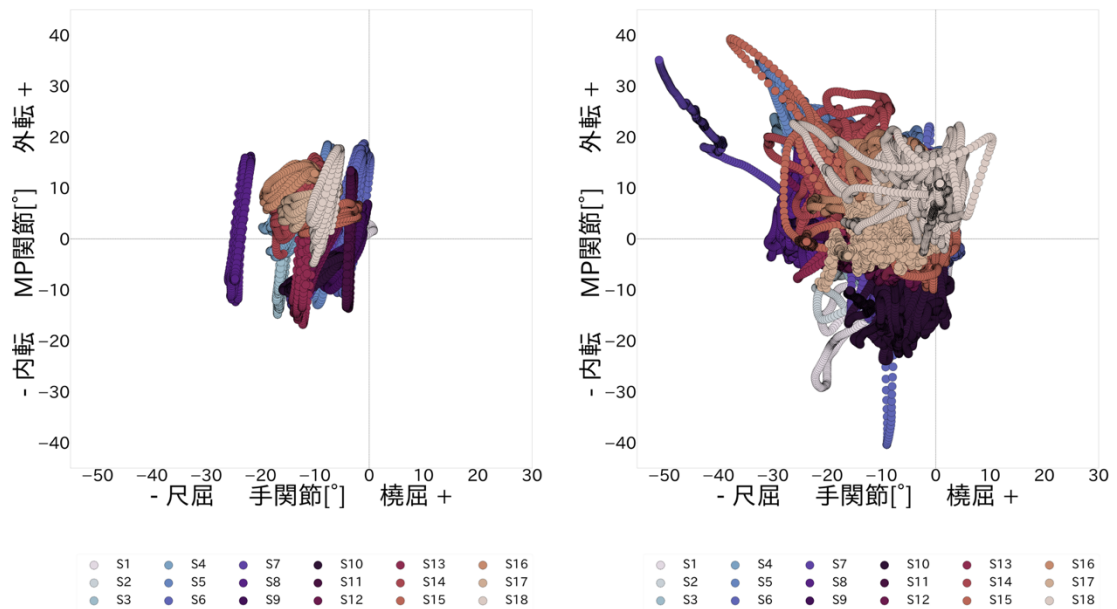


図 29. タッピング課題中及びタイピング課題中の手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度

左：研究Ⅲのタッピング課題中の全ての対象者の手関節と MP 関節の角度をプロットした。手関節の橈屈・尺屈運動の変化が大きい対象者と MP 関節の外転・内転運動の変化が大きい対象者が見られた。右：研究Ⅳのタイピング課題中の全ての対象者の手関節と MP 関節の角度をプロットした。タッピング課題のプロットの形状は直線的であるが、タイピング課題においては円形を呈した。対象者は研究Ⅲの者と対応関係にある。

### 7.3.2. タイピングにおける示指のキー入力時の指先軌道と筋活動

各対象者の示指によるキー入力時間と指先軌道の最高点の標準偏差の平均値 (SD) は 1.67 (0.62), 0.46 (0.10) であった。また、各対象者の総指伸筋に対する深指屈筋の筋活動比の平均値 (SD) は 2.24 (1.94) であった。

全ての対象者の指先軌道はベル型の形状を示したが、指の伸筋と屈筋の筋

活動の優位性にはばらつきが見られた (図 30). また, 研究Ⅲで分類された 3 つのクラスターに基づき, タイピング課題における各パラメータを比較した. 指先軌道の最高点の標準偏差は, クラスター③に対してクラスター①で有意に高い値であった ( $p=0.047$ ). 示指のキー入力時間の標準偏差, 総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比はクラスター間では有意差を認めなかった ( $p=0.90, 0.06$ ) (図 31).

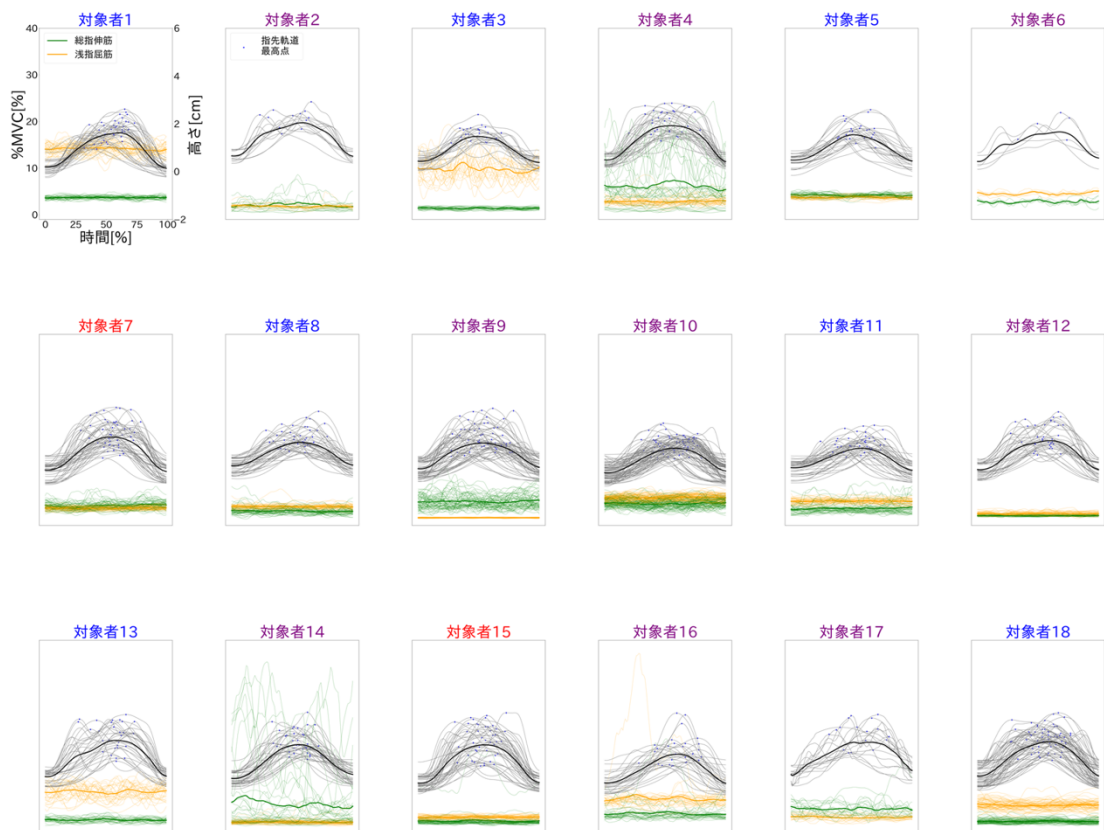


図 30. タイピング課題における示指のキー入力時の指先軌道と筋活動

示指のキー入力時の指先軌道と総指伸筋・深指屈筋の%MVCの時系列変化を示した. 全ての対象者の指先軌道はベル型の形状を示したが, 指の伸筋と屈筋の筋活動の優位性にはばらつきが見られた. 対象者は研究Ⅲの者と対応関係にある. (研究Ⅲでのクラスター)  
 赤: 手関節背屈位+MP 関節屈曲位, 紫: 手関節軽度背屈位+MP 関節屈曲位, 青: 手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位

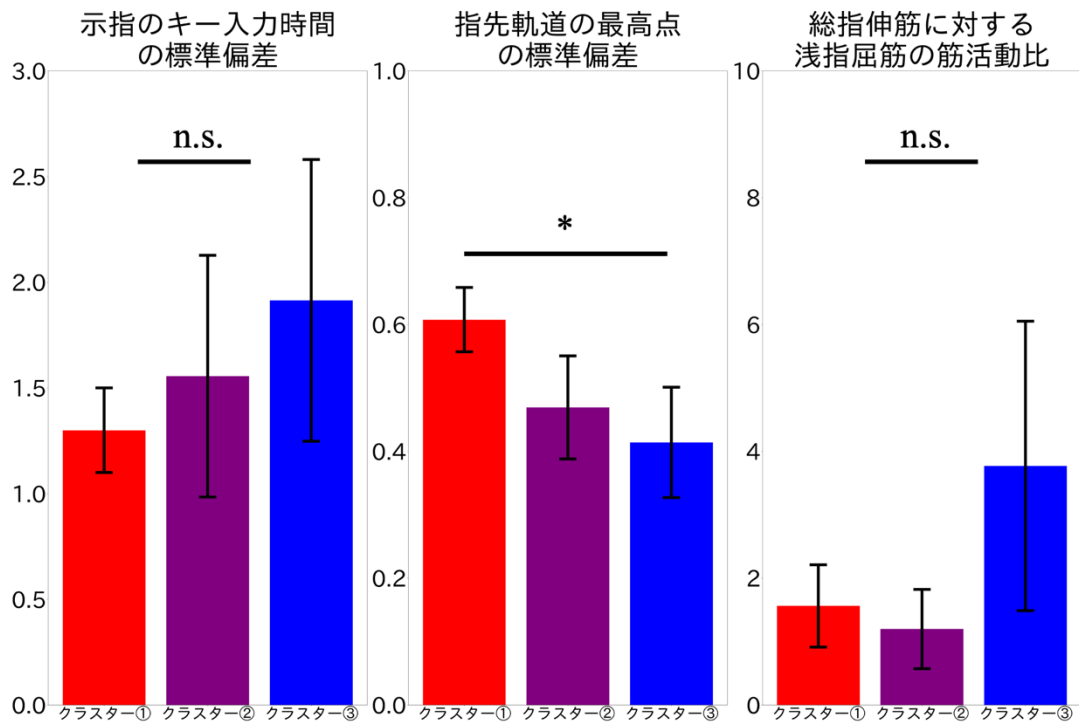


図 31. タイピング課題における示指のキー入力時間の標準偏差、指先軌道の最高点の標準偏差、筋活動比のクラスター間比較

研究Ⅲで分類された 3 つのクラスターに基づき、タイピング課題における各パラメータを比較した。指先軌道の最高点の標準偏差は、クラスター③に対してクラスター①で有意に高い値であった。示指のキー入力時間の標準偏差、総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比はクラスター間では有意差を認めなかった。

有意水準 \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , n.s. 有意差なし。

#### 7.4. 考察

本研究では、研究Ⅲで抽出された手指運動の構成要素がより複雑な指運動であるタイピングの運動選択特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、靭帯や腱といった非収縮要素による自由度拘束を包含した制御則が、手指運動における筋活動制御の簡易化に如何なる貢献を果たすかを検

証した。結果として、タイピング中では多くの対象者が、MP 関節を屈曲させる運動を選択していた。ヒトは構造特性を利用して MP 関節の自由度拘束を促進することで、筋による制御を簡易化していたことが示唆された。

#### 7.4.1. タイピングにおける運動選択特性の適応的变化

矢状面での運動において、研究Ⅲで抽出されたタッピング中のクラスターは、①手関節背屈位+MP 関節屈曲位、②手関節軽度背屈位+MP 関節屈曲位、③手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位の 3 つであった。一方で、タイピング中では多くの対象者が、手関節を背屈し、MP 関節を屈曲させており、複雑な指運動課題において運動選択特性が変化することが示された。タイピングのような複雑な指運動課題には、コンテキストの影響、指先の到達位置の変更、指の運動選択の変化や同時的に指を動かすといった制御の難しさがある (Logan, 2018)。運動選択特性の変化は、このような課題の複雑さを解消するための適応的变化であると考えられる。また、水平面での運動において、タッピング中に、MP 関節を屈曲させていた対象者は、MP 関節の内転・外転角度を大きく変化させず、手関節と MP 関節の関節角度を変化させて指先の横方向の動きを行っていた。一方、タイピング中では、より顕著に手関節と MP 関節の関節角度を変化させてキー入力を行っていた。従って、多くの対象者の運動様式は、側副靭帯の制動作用によって MP 関節の外転運動の自由度を拘束したパターンに収束することが示された。これらの変化によって、タイピングという複雑な課題への適応的变化を促進させていたと考えられる。

#### 7.4.2. タイピング中の指先運動の安定性と筋制御コスト

タイピング中の空間的な安定性を示す指標である指先軌道の最高点の標準偏差は、手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位のクラスターに対して、手関節



背屈位+MP 関節屈曲位のクラスターで有意に高い値であった。タイピングは提示された課題の文字列を視覚的に認識し、課題達成に必要なキーの位置と指の選択、指の姿勢を決定し、短い時間間隔で定型的な運動を繰り返し行う動作である (Flanders & Soechting, 1992; Rosenbaum et al., 2001)。また、反復した到達運動課題における古典的検証によれば、試行間で関節位置が変動するのに対し、到達位置は変動しないことが確認されている (Bernstein, 1967)。従って、手関節を背屈させ、MP 関節を屈曲させた姿勢の選択は、タイピング課題中の到達位置の正確性を補償する運動戦略である可能性が考えられる。

タッピングにおいて MP 関節を伸展させていたクラスターに対して、タッピングとタイピングのどちらの課題においても MP 関節を屈曲させていたクラスターでは、時間的な安定性を示す指標であるキー入力時間の標準偏差と、総指伸筋に対する浅指屈筋の筋活動比は、有意差は認めなかったが低値であった。如何にして筋の制御コストを減少しているかという点は、複雑な運動課題をより速くそしてミスなく実行するために重要な要素である。中枢神経系で運動指令が出されて筋収縮が生じるまでの時間は数ミリ秒～数十ミリ秒かかるため、タイピング中の連続的な文字入力に寄与する指先の力調節を筋の収縮作用に依存して実行しようとする、時間的限界が生じる。そのため、矢状面においては、指屈筋腱の受動的な張力変化を効率的に利用して MP 関節の屈曲・伸展運動を制御することで、この複雑な指運動課題における時間的困難さを解決していると考えられる。一方で、構造特性の作用を優位に選択せず、筋の収縮作用による制御を優位に選択する運動様式では、キー入力時の指屈筋腱への過剰な張力発揮によって、腱への機械的ストレスが増大することが予測される。この運動様式を繰り返すことが、障害発生に影響し得る運動学的要因の一つである可能性が考えられる。

## 8. 総合考察

本学位研究では、複雑で高度な手指運動タスクであるタイピングを実行するために、ヒトの身体が実行している運動制御機構の一端を明らかにすることを目標とし、4つの研究を実施した。

初めに、研究Ⅰでは、特定のキー入力のプレス/リリース時の運動と筋活動を分析した。結果として、高スキル群では慣性力や重力による指先の下向きの力を効率的に利用するために筋活動を制御していることが明らかとなった。また、タイピング後の指のポジション回復においては、高スキル群で手関節伸筋の活動が低いままであったため、キーの反力や指の屈筋のバネ特性等を使うことで指のポジションを回復させている可能性が示唆された。研究Ⅰでは、タイピング動作を構成する指先の上下運動を繰り返す動作としてキーストロークを分析してきた。また、タイピング動作中に手部への機械的ストレスが最も増加する相としてキーストロークに着目し、手関節とMP関節の矢状面の運動を分析してきた。しかし、実際にはタイピング動作は主に矢状面と水平面の動きをキーボード空間上で繰り返す動作である。キーボード環境の制約に対し、矢状面と水平面の2つの運動面において、ヒトがどのような運動の拘束条件を設定して、制御しているかは明らかではなかった。

そこで、研究Ⅱでは、キーボード環境の制約条件に対する手関節と手指運動の特徴について分析した。結果として、矢状面と水平面のそれぞれの運動面において、手関節とMP関節の運動の優位性が適応的に決定されていることが明らかとなった。しかし、この優位性がどのような運動学的・解剖学的拘束性に基づいているのかについては言及できなかった。

研究Ⅲでは示指の側副靭帯と指屈筋腱の構造特性を定量化し、タッピング中の手指運動との関連性を評価した。側副靭帯による運動学的拘束性は全ての対象者において共通した特徴であることが示された。一方、指屈筋腱の作

用による解剖学的拘束性には個人差が見られた。タッピング中の姿勢に着目すると、①手関節背屈位+MP 関節屈曲位、②手関節軽度背屈位+MP 関節屈曲位、③手関節軽度背屈位+MP 関節伸展位の 3 つのクラスターに分類された。特に、MP 関節が屈曲位であったクラスター①②においては、運動学的・解剖学的特性に基づく自由度拘束を選択することによって、指先の運動を時間的・空間的に安定させ、筋の制御コストを低減していることが示された。

さらに、研究Ⅳでは、これらの構成要素が複雑指運動であるタイピングの運動選択特性に及ぼす影響について検討した。研究Ⅲのタッピング中の姿勢では 3 つのクラスターに分類されたが、タイピング中では多くの対象者が、常に MP 関節を屈曲させる運動を選択していた。タイピングのような複雑な指運動課題では、コンテキストの影響、指先の到達位置の変更、指の運動選択の変化や同時的に指を動かすことなどの制御の難しさがある。そのため、ヒトは構造特性を利用して MP 関節の自由度拘束を促進することで、制御を簡易化していたことが示唆された。また、如何にして筋の制御コストを減少するかは、より速くそしてミスなく制御をするために重要な要素である。靭帯や腱といった構造特性を変化させて関節運動を制御することで、中枢神経系はこの時間的・空間的困難を解決していると考えられる。一方で、構造特性の作用を優位に選択せず、筋の収縮作用による制御を優位に選択する運動様式では、キー入力時の指屈筋腱への過剰な張力発揮によって、腱への機械的ストレスが増大することが予測される。この運動様式を繰り返すことが、障害発生に影響し得る運動学的要因の一つである可能性が考えられる。

本学位研究は、収縮要素である筋の収縮作用に加え、非収縮要素である靭帯や腱の構造-関節運動特性を包含した手指運動制御則が、ヒトの中枢神経系における重要な制御戦略である可能性を示した。この知見はタイピング動作の繰り返しによる上肢の筋骨格障害から回避するための身体的・環境的アプ

ローチの提案や、筋への制御負担の少ない効率的な手指運動の学習を促進するなどに応用されるのみならず、多自由度身体運動における運動制御研究のパラダイムシフトに寄与することが期待される。

## 9. 研究限界と今後の課題

研究Ⅰの対象者のスキルレベルは WPM を基準としているため、スキルレベルに関わらず、タッチタイピストと非タッチタイピストが含まれる。そのため、本研究の結果は、タッチタイピングの是非に関わる特徴的な運動パターンであるかどうかについては一般化することはできない。また、研究Ⅰ・Ⅱでは、Space や Enter キーの入力によって、入力の待機時間や、漢字の変換に対する思考時間など、運動様式に影響し得る要因を除くため、課題文章や抽出するキーの条件を統一した。抽出したキーやフレーズは限定的であるため、言語や前後のキーの組み合わせの違い、コンテキストによって結果が異なる可能性がある点については留意する必要がある。

研究Ⅲの実験 B の計測については、実際にグリップと手掌面がどのように接触し、抵抗がかかっていたかは不明である。これに対しては、中手骨の長軸に、常に垂直方向に力が加わるような計測上の工夫をすることで、より正確な指屈筋腱による受動作用を定量化できる可能性がある。

研究Ⅲ・Ⅳに関して、構造特性を利用した運動パターンを選択した者がいることが明らかとなったが、中枢神経系が実際的にこの運動パターンをより効率的な戦略であると判断・処理しているかどうかは明らかでない。これを明らかにするためには、外骨格的に手部に特徴的な構造特性を付与した条件で、手指運動の学習課題を行い、構造特性を選択したパターンへと収束していくかを検証することが求められる。

## 10. 結語

本研究では複雑で高度な手指運動課題であるタイピングを実行するために、ヒトの身体が実行している運動制御機構をリハビリテーションの視点から解明することを目標とした。本研究にて得られた新規の知見を以下に示した。

(1) 高スキル者は、キー入力の際に手指の協調性を高め、手関節と指の MP 関節の角速度を効率的に調整することが明らかとなった。対照的に低スキル者は、手関節伸筋の活動が高く、非効率的な指の動きであることが示された。

(2) タイピング中はキーボードの環境制約に適応して、各次元における各関節運動の優位性を決定することが示された。矢状面では関節の受動的な運動メカニズムにも影響を受けやすい可能性があり、水平面では筋の作用と構造的特性に影響を受ける可能性が高いことが推察された。

(3) MP 関節の側副靭帯の制動作用には共通性があるが、指屈筋腱の作用には個人差が見られた。また、手関節と MP 関節の運動自由度を拘束するために、これらの靭帯や腱の構造特性を利用した運動選択を行う対象者が確認された。この運動選択は、課題遂行における時間的・空間的な安定性に寄与し、筋の制御コストを軽減させる可能性が示唆された。

(4) タイピング中においては、多くの対象者が構造特性を利用した運動パターンを選択した。複雑な指運動課題において、MP 関節の自由度拘束による制御の簡略化は、より顕著に見られることが明らかとなった。

本研究は、収縮要素である筋の収縮作用に加え、非収縮要素である靭帯や腱の構造-関節運動特性を包含した手指運動制御則が、ヒト中枢神経系において重要な制御戦略である可能性を示した。この知見はタイピング動作の繰り返しによる上肢の筋骨格障害から回避するための身体的・環境的アプローチの提案や、筋への制御負担の少ない効率的な手指運動の学習を促進するなど、運動制御研究のパラダイムシフトに寄与することが期待される。

## 11. 補足資料

### 11.1. 研究 I : 低スキル群におけるキーリリース時間と手関節伸筋

キーリリース時間中にキー入力動作の判断に戸惑った場合、平均的なキーリリース時間よりも実行時間が延長することが予測される。そこで、全ての入力時間の分布を可視化したところ、高スキル群と低スキル群の分布は概ね類似していた (図 A)。低スキル群の対象者 3 については、他の対象者と比較して分布の特徴が異なり、キーリリース時間が長かったため、対象者 3 の有無による低スキル群の橈側手根伸筋と尺側手根伸筋の筋活動の違いを検証した。結果として、どちらの筋活動においても対象者 3 の有無による有意差は認めなかった (表 A) ( $p = 0.72, 0.42$ )。従って、キーを押せずに留まっていることによる手関節伸筋の筋活動への影響は少ないと考えられる。

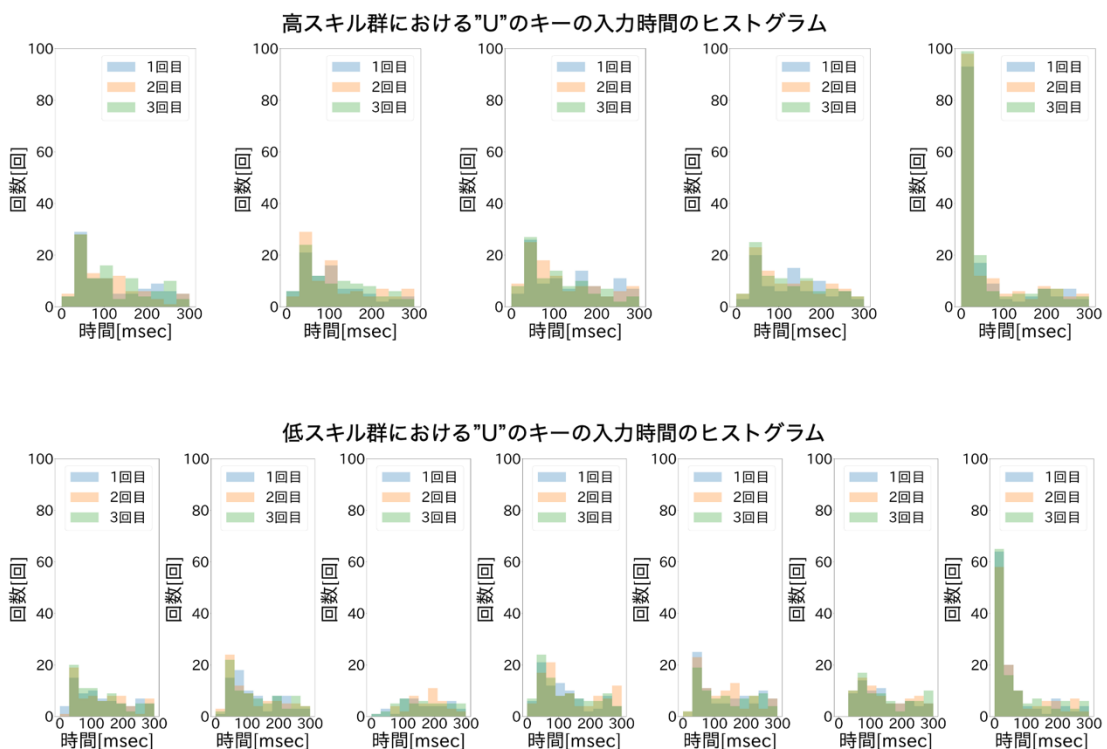


図 A. “U”のキーの入力時間のヒストグラム

低スキル群の対象者 3 を除いて、高スキル群と低スキル群の分布は概ね類似していた。

表 A. 対象者 3 の有無と低スキル群の手関節伸筋の筋活動

	低スキル群 (対象者3あり)	低スキル群 (対象者3なし)	<i>p</i>
橈側手根伸筋(%)	2.41	1.94	0.72
尺側手根伸筋(%)	3.67	4.03	0.43

### 11.2. 研究 I : 入力に使用した運指と示指 PIP 関節マーカの位置

本研究ではキーボードの中央にあり，一般的に右手の示指が運指となるキーである“U”のキーを解析対象として，手関節と MP 関節の運動の分析を行った．右示指の PIP 関節上のマーカから，どの指で“U”のキーを押していたか分析した結果，キーボードの K・J・M のキー上の範囲に収束していたため (図 B)，水平面の運動及び，運指の違いによる矢状面の運動への影響はないと考える．



“U”のキーが入力された時の  
示指PIP関節マーカの位置

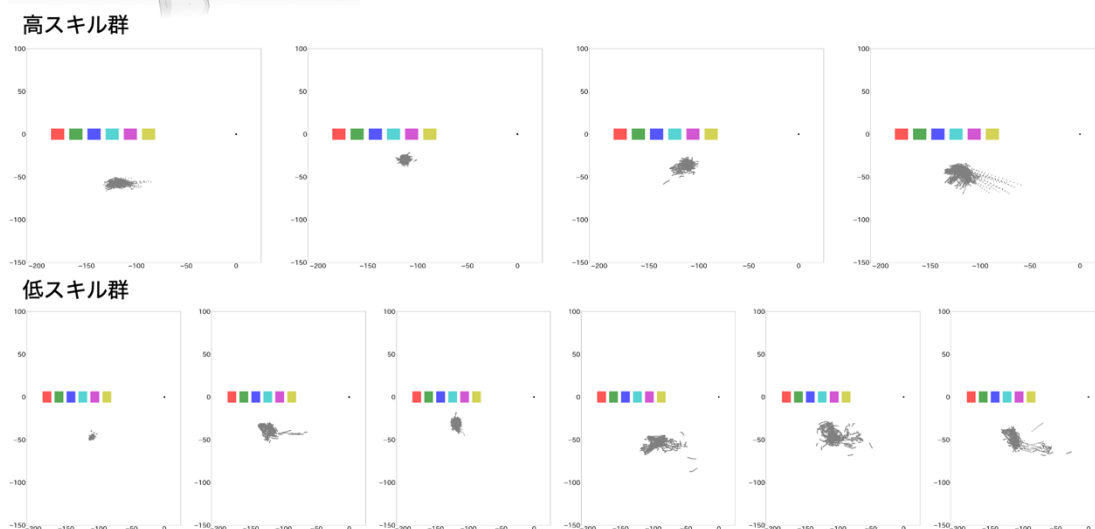


図 B. “U”のキーが入力された時の示指 PIP 関節マーカの位置

縦軸：前後方向の位置[mm]. 横軸：左右方向の位置[mm]. 赤から黄色までの四角は R・T・Y・U・I・O のキーの位置，灰色のプロットは PIP 関節マーカの位置を示す. “U”のキー入力中の示指 PIP 関節マーカの位置を示した. 全体として，キーボードの K・J・M のキー上の範囲に収束していた.

### 11.3. 研究Ⅱ：入力に使用した運指と示指 PIP 関節マーカの位置

右示指の PIP 関節上のマーカから，どの指を使用していたかを検討した. 結果として，対象者 3 を除いて，「ryouhou」入力中のマーカの位置はキーボードの K・J・M のキー上の範囲にあり，類似していた (図 C). 従って，このフレーズを入力する際の運指の違いが，関節運動の組み合わせに及ぼす影響は低いと考える.



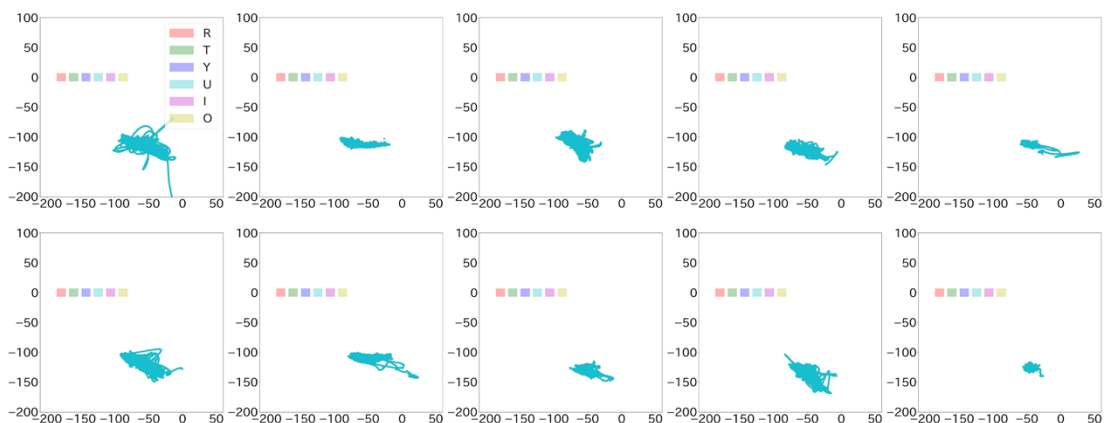


図 C. 「ryouhou」のキーが入力された時の示指 PIP 関節マーカの位置

縦軸：前後方向の位置[mm]. 横軸：左右方向の位置[mm]. 赤から黄色までの四角は R・T・Y・U・I・O のキーの位置, 水色のプロットは PIP 関節マーカの位置を示す. 「ryouhou」のキー入力中の示指 PIP 関節マーカの位置を示した. 全体として, キーボードの K・J・M のキー上の範囲に収束していた.

#### 11.4. 研究Ⅲ・Ⅳ：タッピング及びタイピング中の中指 MP 関節の姿勢

浅指屈筋や深指屈筋の腱は, 2~4 指の共同腱であり, 例えば, 中指の MP 関節が伸展し, 腱が伸張された時, 隣接する示指の MP 関節周りの筋が作用しないとすると, 中指の MP 関節は受動的に伸展する. 今回, タッピング中に抽出された 3 つのクラスターにおいて, タッピング中とタイピング中の中指の MP 関節角度の平均値を, それぞれ比較した結果, 有意差は認めなかった ( $p = 0.08, 0.06$ ). 従って, どちらの課題においても中指の MP 関節運動

が、示指の MP 関節運動に及ぼす影響は少なかったと考える。

#### 11.5. 研究Ⅲ：手部の姿勢と手根管内圧の増大による腱滑走の関係

先行研究において、手根管内圧は前腕回内外・手関節掌屈/背屈だけでなく、指の関節位置によって変化し、前腕回内・手関節背屈・指関節伸展によって増大することが *in vivo* 研究にて示されている (Werner et al., 1997). 以上を踏まえ、タッピング中のそれぞれの角度について 3 つのクラスター間で分析を行った。前腕回内角度では、クラスター間で有意差は認めなかった ( $p = 0.60$ )。手関節背屈角度では、①手関節背屈位+MP 関節屈曲位のクラスターが他の 2 つのクラスターと比べて有意に高い値であった ( $p < 0.01, < 0.01$ )。①のクラスターの示指の MP 関節屈曲角度は、他のクラスターと比較し、有意ではないが、高い値であった ( $p = 0.30, 0.12$ )。従って、手根管内圧の増大による腱滑走の影響は、大きく異なるとは言えないと考える。

#### 11.6. 研究Ⅲ：指屈筋腱の受動特性と性差

手関節の受動運動課題における手関節掌屈・背屈角度と MP 関節屈曲・伸展角度の関係において、正の値を示したのは男性 4 名、女性 3 名、負の値を示したのは男性 1 名、女性 2 名であった。従って、性別による手関節の受動運動への影響は小さいと考える。

#### 11.7. 研究Ⅲ：各対象者のクラスターの所属とクラスター説明率

分類されたクラスターが、各対象者の課題中の手関節と MP 関節角度の実測値をどの程度説明できるかについて、下記の表に記載した (表 B)。

表 B. 各対象者のクラスターと説明率

	クラスター	クラスター説明率%
対象者1	③	52.8
対象者2	②	100.0
対象者3	③	65.1
対象者4	②	100.0
対象者5	③	100.0
対象者6	②	76.0
対象者7	①	100.0
対象者8	③	52.2
対象者9	②	79.7
対象者10	②	100.0
対象者11	③	89.5
対象者12	②	62.0
対象者13	③	97.3
対象者14	②	79.2
対象者15	①	100.0
対象者16	②	69.0
対象者17	②	100.0
対象者18	③	100.0

12. 発表論文・学会発表・獲得助成金一覧

【発表論文】

1. **Takanori Ito**, Yuka Matsumoto, Hayase Funakoshi, Mio Ito, Naohiko Kanemura, Takanori Kokubun. Skill-level based examination of forearm muscle activation associated with efficient wrist and finger movements during typing. International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 96, 2023, 103471, ISSN 0169-8141  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103471>
2. **Takanori Ito** and Takanori Kokubun. The Dominance of Wrist and MP Joint Movement in the Horizontal and Sagittal Planes Simplifies Motor Control During Typing. SSRN, 2023  
DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4452129>

【国際学会における発表】

3. **Takanori Ito**, Takanori Kokubun. Non-contractile tissue is an important component in regulating the degree of freedom of fingers during the tapping task. Neuroscience 2023 2023年11月
4. **Takanori Ito**, Mio Yoshida, Takanori Kokubun. Examining the relationship between kinematic patterns and time of typing characterized by physical and environmental restraint conditions. Neuroscience 2022 2022年11月
5. **Takanori Ito**, Mio Yoshida, Hayase Funakoshi, Takanori Kokubun. Metacarpophalangeal Joint Finger Splint Affected On Joint Movement And Mechanical Interaction. ORS 2022 Annual Meeting 2022年2月
6. **Takanori Ito**, Mio Yoshida, Hayase Funakoshi, Takanori Kokubun.

Mechanical coordination of wrist and MP joint motion during typing.  
Neuroscience 2021 50th ANNUAL MEETING 2021 年 11 月

7. **Takanori Ito**, Hayase Funakoshi, Yuka Sekiguchi, Naohiko Kanemura, Takanori Kokubun. Relationship between the global movement of the hand and the forearm muscles during typing. XXVIII Congress of the International Society of Biomechanics 2021 年 7 月

【国内学会における発表】

8. **伊藤貴紀**, 国分貴徳. 靭帯・腱の構造特性は手指運動制御を簡易化させ筋活動負担を軽減する. 第 28 回日本基礎理学療法学会学術大会 2023 年 12 月
9. **伊藤貴紀**, 国分貴徳. 指屈筋腱の受動特性は手指運動を簡易化させ筋活動制御コストを軽減する. 第 17 回 Motor Control 研究会 2023 年 8 月
10. **伊藤貴紀**, 国分貴徳. 視線追跡によるタイピングスタイルの定量的評価法の検討. 第 31 回 埼玉県理学療法学会 2023 年 1 月
11. **伊藤貴紀**, 吉田実央, 国分貴徳. タイピングにおける時間的一貫性に寄与する手指運動パターンの検討. 第 27 回日本基礎理学療法学会学術大会 2022 年 10 月
12. **伊藤貴紀**, 吉田実央, 国分貴徳. タイピング動作における時空間的一貫性と手指運動パターンの特徴. 第 16 回 Motor Control 研究会 2022 年 8 月
13. **伊藤貴紀**, 吉田実央, 船越逸生, 国分貴徳. 手関節の固定と手指の運動性の高い制御機構はキー入力時間を短縮させる. 第 30 回埼玉県理学療法学会 2022 年 1 月
14. **伊藤貴紀**. 指先の到達運動としてみたタイピング動作の手指運動特性. 第 5 回基礎理学療法学 若手研究者ネットワーク シンポジウム 2021 年 12

月

15. 伊藤貴紀, 吉田実央, 船越逸生, 国分貴徳. キーボードのタイピング動作における手関節と中手指節関節の力学的協調性. 第 42 回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM2021) 2021 年 11 月
16. 伊藤貴紀, 吉田実央, 船越逸生, 国分貴徳. タイピング動作における高スキル者の手の運動戦略. 第 26 回日本基礎理学療法学会学術大会 2021 年 10 月
17. 伊藤貴紀, 吉田実央, 船越逸生, 国分貴徳. タイピング動作中の連続したキー入力における手と手指の腱固定作用と筋活動. 第 40 回関東甲信越ブロック 理学療法士学会 2021 年 9 月

【獲得助成金】

18. 国分貴徳, 伊藤貴紀. タイピングスキルを支える手指運動制御則の解明. 公益財団法人 カシオ科学振興財団. 第 40 回研究助成 2022 年 12 月 - 2023 年 11 月

### 13. 謝辞

本論文の主査，副査としてご指導いただきました本学大学院保健医療福祉学研究科 濱口豊太 教授，東京大学大学院教育学研究科 野崎大地 教授，本学大学院保健医療福祉学研究科 小栢進也 准教授に心より感謝申し上げます。

また，本研究の計画，予備実験，学会発表，学位論文の作成に際し，皆様から多くのご指導ご鞭撻を頂戴しました。

初めに，本学 山崎弘嗣 教授には，指導補助教員として研究デザインや解析手法，同領域に関連した知見についてご意見いただきましたこと，感謝申し上げます。また，本学 延原弘章 教授には，指導補助教員としてこれまでの多岐に渡る量的・質的研究の知見から，データの価値や解釈の仕方についてご指導いただきましたこと，心より感謝申し上げます。

さらに，研究Ⅲ・Ⅳで使用した三次元動作解析システムの構築につきましては，増田正 先生よりご監修頂きました。加えまして，研究Ⅲ・Ⅳの内容は，カシオ科学振興財団の研究助成の元に実施いたしました。環境構築や実験にかかる助成を頂き，関係者の皆様に感謝申し上げます。

本研究にご協力頂きました被験者の皆様，予備実験の補助をしていただいた学部生の皆様，研究経過の報告にあたりご質問やご指摘をいただいた国分研究室の皆様に感謝申し上げます。

また，両親にはこれまで長きに渡って，心身ともにあらゆる側面で多大なご協力をいただき大変感謝しています。そして，公私共にし，研究活動・学生生活を支えていただいた妻には，大いに感謝しております。

最後に，研究デザインから論文作成に至るまで，質の高い研究になるようご指導いただきました本学大学院保健医療福祉学研究科 国分貴徳 准教授には深く感謝申し上げます。この博士論文を皮切りに，運動制御研究のパラダイムシフトに向け，今後もアクティビティ高く，取り組んで参ります。

#### 14. 引用文献

- Baker, N. A., Cham, R., Cidboy, E. H., Cook, J., & Redfern, M. S. (2007). Kinematics of the fingers and hands during computer keyboard use. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, *22*(1), 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2006.08.008>
- Beighton, P., Solomon, L., & Soskolne, C. L. (1973). Articular mobility in an African population. *Ann Rheum Dis*, *32*(5), 413-418. <https://doi.org/10.1136/ard.32.5.413>
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press Oxford.
- Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W., & Hogan, N. (1984). Posture control and trajectory formation during arm movement. *The Journal of Neuroscience*, *4*(11), 2738. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.04-11-02738.1984>
- Callegari, B., de Resende, M. M., & da Silva Filho, M. (2018). Hand rest and wrist support are effective in preventing fatigue during prolonged typing. *J Hand Ther*, *31*(1), 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2016.11.008>
- Charles, S. K., & Hogan, N. (2011). Dynamics of wrist rotations. *Journal of Biomechanics*, *44*(4), 614-621. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.11.016>
- Cook, J. R., Baker, N. A., Cham, R., Hale, E., & Redfern, M. S. (2007). Measurements of wrist and finger postures: a comparison of goniometric and motion capture techniques. *J Appl Biomech*, *23*(1), 70-78. <https://doi.org/10.1123/jab.23.1.70>



- d'Avella, A., Saltiel, P., & Bizzi, E. (2003). Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nature Neuroscience*, *6*(3), 300-308. <https://doi.org/10.1038/nn1010>
- Dennerlein, J. T., & Johnson, P. W. (2006). Different computer tasks affect the exposure of the upper extremity to biomechanical risk factors. *Ergonomics*, *49*(1), 45-61. <https://doi.org/10.1080/00140130500321845>
- Dennerlein, J. T., Kingma, I., Visser, B., & van Dieen, J. H. (2007). The contribution of the wrist, elbow and shoulder joints to single-finger tapping. *J Biomech*, *40*(13), 3013-3022. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.01.025>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G\*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods*, *39*(2), 175-191. <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- Flanders, M., & Soechting, J. F. (1992). Kinematics of typing: parallel control of the two hands. *Journal of Neurophysiology*, *67*(5), 1264-1274. <https://doi.org/10.1152/jn.1992.67.5.1264>
- Flash, T., & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, *5*(7), 1688-1703. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.05-07-01688.1985>
- Gerr, F., Marcus, M., Ensor, C., Kleinbaum, D., Cohen, S., Edwards, A., Gentry, E., Ortiz, D. J., & Monteilh, C. (2002). A prospective study of computer users: I. Study design and incidence of musculoskeletal

- symptoms and disorders. *Am J Ind Med*, 41(4), 221-235.  
<https://doi.org/10.1002/ajim.10066>
- Gonçalves, J. S., Shinohara Moriguchi, C., Takekawa, K. S., Coury, H., & Sato, T. O. (2017). The effects of forearm support and shoulder posture on upper trapezius and anterior deltoid activity. *J Phys Ther Sci*, 29(5), 793-798. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.793>
- Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780-784.  
<https://doi.org/10.1038/29528>
- Hogan, N. (1984). An organizing principle for a class of voluntary movements. *J Neurosci*, 4(11), 2745-2754.  
<https://doi.org/10.1523/jneurosci.04-11-02745.1984>
- Jonsson, B. (1982). Measurement and evaluation of local muscular strain in the shoulder during constrained work. *J Hum Ergol (Tokyo)*, 11(1), 73-88.
- Keller, K., Corbett, J., & Nichols, D. (1998). Repetitive strain injury in computer keyboard users: Pathomechanics and treatment principles in individual and group intervention. *Journal of Hand Therapy*, 11(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/s0894-1130\(98\)80056-2](https://doi.org/10.1016/s0894-1130(98)80056-2)
- Klussmann, A., Gebhardt, H., Liebers, F., & Rieger, M. A. (2008). Musculoskeletal symptoms of the upper extremities and the neck: a cross-sectional study on prevalence and symptom-predicting factors at visual display terminal (VDT) workstations. *BMC Musculoskeletal Disord*, 9, 96. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-9-96>
- Kuo, P. L., Lee, D. L., Jindrich, D. L., & Dennerlein, J. T. (2006). Finger

- joint coordination during tapping. *J Biomech*, *39*(16), 2934-2942.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.028>
- Kutch, J. J., Kuo, A. D., Bloch, A. M., & Rymer, W. Z. (2008). Endpoint force fluctuations reveal flexible rather than synergistic patterns of muscle cooperation. *J Neurophysiol*, *100*(5), 2455-2471.  
<https://doi.org/10.1152/jn.90274.2008>
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schoner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*, *11*(3), 276-308.  
<https://doi.org/10.1123/mcj.11.3.276>
- Lee, K. S., & Jung, M. C. (2015). Ergonomic evaluation of biomechanical hand function. *Saf Health Work*, *6*(1), 9-17.  
<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.09.002>
- Logan, G. D. (2018). Automatic control: How experts act without thinking. *Psychol Rev*, *125*(4), 453-485. <https://doi.org/10.1037/rev0000100>
- Madarshahian, S., & Latash, M. L. (2022). Effects of hand muscle function and dominance on intra-muscle synergies. *Hum Mov Sci*, *82*, 102936.  
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.102936>
- Minami, A., An, K.-N., Cooney III, W. P., Linscheid, R. L., & Chao, E. Y. S. (1983). Ligamentous structures of the metacarpophalangeal joint: A quantitative anatomic study. *Journal of Orthopaedic Research*, *1*(4), 361-368. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jor.1100010404>
- Roquelaure, Y., Ha, C., Rouillon, C., Fouquet, N., Leclerc, A., Descatha, A., Touranchet, A., Goldberg, M., & Imbernon, E. (2009). Risk factors for upper-extremity musculoskeletal disorders in the working population. *Arthritis Rheum*, *61*(10), 1425-1434.

<https://doi.org/10.1002/art.24740>

- Rosenbaum, D. A., Meulenbroek, R. J., Vaughan, J., & Jansen, C. (2001). Posture-based motion planning: Applications to grasping. *Psychological Review*, *108*(4), 709-734. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.4.709>
- Simoneau, G. G., Marklin, R. W., & Berman, J. E. (2003). Effect of Computer Keyboard Slope on Wrist Position and Forearm Electromyography of Typists Without Musculoskeletal Disorders. *Physical Therapy*, *83*(9), 816-830. <https://doi.org/10.1093/ptj/83.9.816>
- Su, F. C., Chou, Y. L., Yang, C. S., Lin, G. T., & An, K. N. (2005). Movement of finger joints induced by synergistic wrist motion. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, *20*(5), 491-497. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.01.002>
- Sun, Y., Sheng, X., Chen, J., & Qian, Z. (2017). In vivo metacarpophalangeal joint collateral ligament length changes during flexion. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, *42*(6), 610-615. <https://doi.org/10.1177/1753193417692708>
- Ting, L. H., & Macpherson, J. M. (2005). A Limited Set of Muscle Synergies for Force Control During a Postural Task. *Journal of Neurophysiology*, *93*(1), 609-613. <https://doi.org/10.1152/jn.00681.2004>
- Tresch, M. C., & Jarc, A. (2009). The case for and against muscle synergies. *Current Opinion in Neurobiology*, *19*(6), 601-607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conb.2009.09.002>

- Tresch, M. C., Saltiel, P., & Bizzi, E. (1999). The construction of movement by the spinal cord. *Nature Neuroscience*, *2*(2), 162-167. <https://doi.org/10.1038/5721>
- Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. *Biological Cybernetics*, *61*(2), 89-101. <https://doi.org/10.1007/BF00204593>
- Valero-Cuevas, F. J., Venkadesan, M., & Todorov, E. (2009). Structured variability of muscle activations supports the minimal intervention principle of motor control. *J Neurophysiol*, *102*(1), 59-68. <https://doi.org/10.1152/jn.90324.2008>
- Visser, B., & van Dieen, J. H. (2006). Pathophysiology of upper extremity muscle disorders. *J Electromyogr Kinesiol*, *16*(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2005.06.005>