

個人間協応における力の制御と学習

2014 年

兵庫教育大学大学院
連合学校教育学研究科
教科教育実践学専攻
(鳴門教育大学)

升本 絢也

目次

第1章 序論	4
1.1 はじめに	4
1.2 協応運動	4
1.2.1 自由度の問題	5
1.2.2 協応運動の科学的検討	5
1.3 協応運動における結合	6
1.3.1 両手運動の結合	6
1.3.2 ダイナミカル・システム・アプローチ	8
1.3.3 両手協応運動のメカニズム	11
1.4 協応運動における誤差補正	12
1.4.1 Uncontrolled manifold hypothesis	12
1.4.2 Optimal feedback control 理論	14
1.4.3 両手の運動の誤差補正	16
1.5 力とタイミングの相互作用	18
1.5.1 力とタイミングの階層性	19
1.6 個人間協応運動（社会的協応）	21
1.6.1 個人間協応運動の同期性	22
1.6.2 個人間協応運動の相補性	23
1.6.3 ミラー・ニューロン・システム	25
1.7 概要と目的	26
第2章 片手の周期的力発揮における力とタイミングの相互作用	28
2.1 目的	28
2.2 方法	30
2.3 結果	34
2.4 考察	37

第3章 両手協応運動における左右の力制御に与える力レベルの影響	41
3.1 目的	41
3.2 方法	44
3.3 結果	47
3.4 考察	52
第4章 両手協応運動における左右の力制御に与える運動速度の影響	55
4.1 目的	55
4.2 方法	56
4.3 結果	58
4.4 考察	63
第5章 個人間協応運動における力とタイミングの制御	67
5.1 目的	67
5.2 方法	68
5.3 結果	71
5.4 考察	77
第6章 総括	81
6.1 概要	81
6.1.1 力を入れることと力を抜くこと	81
6.1.2 力とタイミングの階層性	81
6.1.3 両手協応運動における結合と誤差補正	82
6.1.4 個人間協応運動における相補的力発揮とその同期	83
6.2 運動学習への示唆	83
6.2.1 Fitts と Posner の運動学習段階	83
6.2.2 自由度から見た運動学習段階	84
6.3 展望	86

6.3.1	個人間協応の力とタイミングの制御に与える声かけの影響	86
6.3.2	個人間協応における leader-follower の関係	87
6.3.3	4人の協応運動における力とタイミングの制御	89
6.3.4	個人間と両手の協応運動における階層構造	90
6.3.5	自閉症患者における個人間協応運動	90
6.3.6	個人間協応運動に与える発達と老化の影響	91
引用文献		92
付記		103
謝辞		105

第1章

序論

1.1. はじめに

我々はサッカーやバスケットなどの集団競技において、個人間で共通の目標を達成するために、自分の運動と他者の運動を巧みに協応させる。たとえば、熟練したサッカー選手は他者のパスにタイミングに合わせ、ボールをシュートすることができる。近年、個人間協応運動に関する研究は盛んに行われており、認知心理学者や生態学者は多くの実験室実験を行い、個人間でどのように情報交換し、動作を協応させているのかを検討し、そのメカニズムに関する仮説を立てているが、未だに不明確な点が多い。そこで本研究は片手運動、両手運動、個人間運動という協応運動の階層性を設定した。最初に、片手運動では運動のパラメータである力とタイミングの協応を調べた。次に、両手運動では力とタイミングの協応を含んだ左右の手の協応を分析した。最後に、力とタイミングの協応を含んだ個人間協応を検討した。

1.2. 協応運動

動作の協応 (motor coordination) とは、「効果的・効率的な方法でスキルの目的を達成できるように骨格筋を組織化すること」である。さらに、Turvey (1990) はこの協応を「外部環境の対象物や他者の動きのパターンに対応して、自分の胴体や四肢のパターンを組み立てること」と定義した。この協応はコーディネーション (coordination) の訳語であり、体育学では調整 (力)、心理学では協応、神経生理学では協調、政治学や社会学では協調、言語学では等位というようにさまざまな訳語があてられている (石河, 1976)。本研究では主として心理学の立場から研究を行うので協応という訳語を用いた。

人間における協応は大きく個人内の協応と個人間の協応に大別される。個人内の協応は目標に対して四肢、目と手、左右の手などのパターンを組み立てることであり、主として、クローズド・スキルを伴う多くの動作にみられ、歩行、書字運動、ピアノ演奏などが例示される。一方、個人間の協応は他者の運動に対して自分の四肢の運動を相互作用

させることであり、主として、オープン・スキルを伴うスポーツ場面にみられ、ボールゲームにおけるコンビネーションプレーが例としてあげられる。

1.2.1 自由度の問題

情報処理論からみた運動制御理論では、中枢神経系の中に記憶、貯蔵されている無数のプログラムを呼び出し、そのプログラムに基づいて運動が実現すると考えられてきた。しかし、情報処理論的な運動制御理論では説明できない協応運動の問題がある。あるシステムを制御するために決定しなければならない変数を自由度と呼ぶが、人体には 800 以上の関節があるように、膨大な自由度がある。このような多くの自由度は複雑な運動を可能にするが、同時に身体の制御を複雑にさせる要因である。たとえば、右腕を物体に伸ばす時、手先の位置を決定させるためには、肩関節、肘関節、手首の関節、各指の関節を制御する変数を決定しなければならない。さらに、1つの関節は2つの以上の筋肉を用いて動かすので、自由度が増大する。このように、手先の位置を決めるのに関節や筋肉の自由度は無数に存在する。さらに、ダンスやテニスなどの全身運動であれば、運動の自由度は膨大なものになる。この問題を考慮すると、情報処理論的な運動制御理論に基づいて関節や筋の活動をプログラムするのなら、そのプログラムは膨大な容量となる。このようなことは自由度の問題と呼ばれる (Bernstein, 1967)。また、課題を解決するために過剰な自由度が存在することは冗長性 (redundancy) と呼ばれ、自由度の問題は冗長性の問題とも呼ばれる。

この問題に対して、ある行為を達成する時に身体各部が連携し、運動の自由度を減らす機能的な構造がある。その構造はシナジー (synergy) と呼ばれ、身体各部が協応して働く様子から協応構造 (coordinative structure) とも呼ばれる (Turvey, 1990)。たとえば、自動車に車輪が4つあり、自由度は4である。しかし、全ての車輪を個別に制御することは困難である。したがって、自動車はハンドル1つで前輪2つを制御できるようにし、システムの自由度を1つに減少させ、1つの変数を決定することで制御できる。

1.2.2 協応運動の科学的検討

日常生活やスポーツ活動中における協応運動を検討することは容易ではない。人間は

多くの関節だけでなく、全ての関節において空間（スペーシング）、時間（タイミング）、力（グレーディング）の3つのパラメータを制御しなければならない。そのため、全ての関節運動とパラメータを計測するためには膨大な測定機器が必要とされる。実際、多くの研究は効果器や空間、時間、力の制御を個別に検討する傾向にある。また、外部環境で実験を行う場合、天候、風向きなどの要因によって人間の身体運動は影響を受けるので、外部環境で行われるスポーツ活動などで、条件を統一して身体運動を測定することは困難をきわめる。さらに、集団競技で多くの人間の位置や動作を正確に測定することは現在の測定器では容易ではない。

それに対して、室内実験では、効果器、パラメータ、環境などの要素を限定することで、ヒトの運動制御の計測を可能にする。たとえば、力やタイミングの制御を検討するために、多くの研究は人差指のタッピング運動や等尺性力発揮課題を用いてきた。人差指は錐体路からの支配が強い（図 1, Porter and Lemon, 1995）ので、ヒトの運動制御を観察することに適している。タイミングの研究には好んでタッピング課題が用いられる。タッピング課題はタップ間隔を数量化し、その変動や目標運動間隔からの誤差を検討し、タイミングを検討する。一方、力の制御に関する研究では、多くの研究は等尺性力発揮課題を用いている。等尺性力発揮課題は力検出器に対して、指を伸展させた状態で力発揮する。つまり、指の屈曲伸展は行わない。このような協応を検討するためには各要素の運動を測定し、相関係数などの指標を用いて、要素間の関係性を調べることで可能になる。さらに、これらのタッピングや等尺性力発揮のような運動を両手や個人間で行うことで、両手（たとえば, Helmuth and Ivry, 1996; Ranganathan and Newell, 2008; 2009）や個人間（たとえば, Bosga and Meulenbroek, 2007; Konvalinka et al., 2010）の協応が検討できる。

1.3. 協応運動における結合

1.3.1 両手運動の結合

人は野球のバットスイングやバスケットのチェストパスなどで、両手で1つの対象を正確に操作するために、両手の運動を協応させる。このように、多くの研究は両手協応の振る舞いを検討することによって、人がどのように運動の自由度を減少させているの

かを示した。たとえば, Kelso et al. (1979) は両手の相互作用を検討するために, 両手を異なる目標距離に動かす課題を行った。目標距離が長くなると運動時間は長くなるが, Kelso et al. (1979) は両手で異なる目標距離でも, 両手の運動時間が同じになることを示した。つまり, 一方の手の運動時間が他方の手の運動時間に影響され, 両手の運動時間が同じになった。このように意図せずに複数の要素の運動のパラメータが同じになる現象は両手の結合 (coupling) や引き込み (entrainment) と呼ばれ, 2つ以上の自由度を1つの単位として制御していると理解されている。

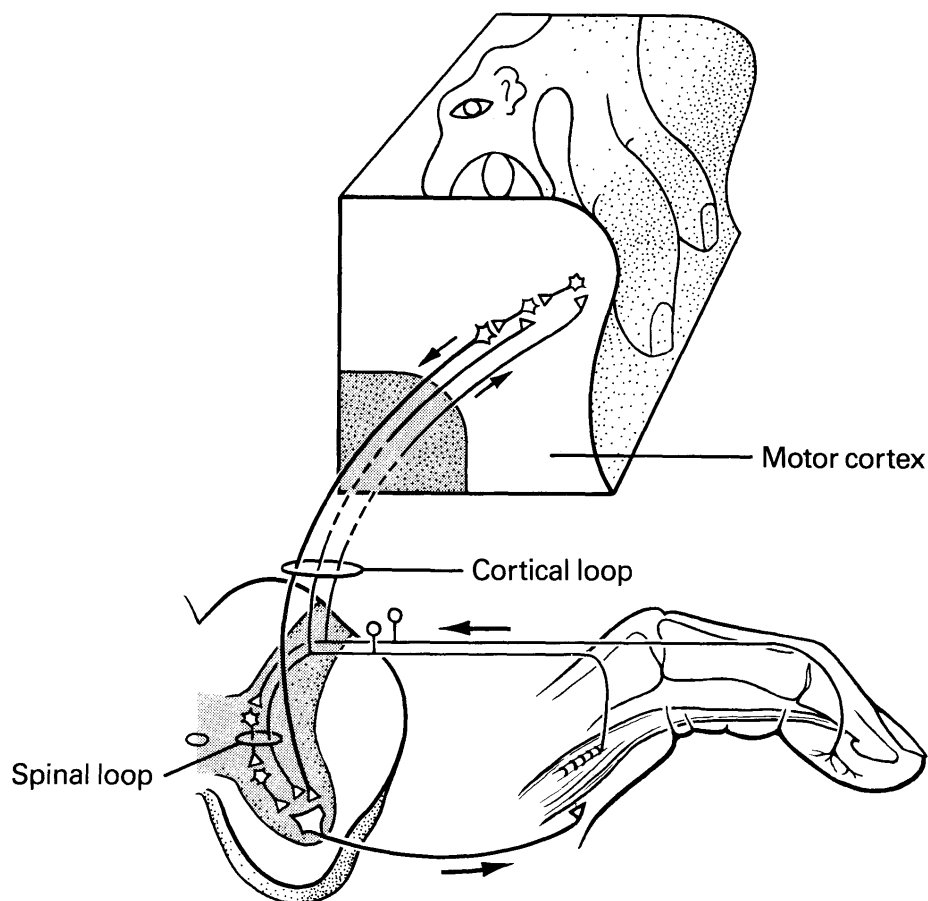


図1. 指の屈筋を制御する大脳皮質のニューロンにおける入出力の関係 (Asanuma, 1973, 図はKandel et al., 1991 から引用). 脊髓の運動ニューロンを介して, ある筋を支配している錐体路ニューロンは, その筋の伸張またはその筋を覆う皮膚の刺激によって賦活される。

さらに, Helmuth and Ivry (1996) は参加者に周期的な片手タッピングと両手同時タッピングを行うように教示した. その結果, 両手タッピングは片手タッピングよりもタップ間隔の変動が小さく, 両手のタイミングは片手のそれよりも安定した. この結果から, Helmuth and Ivry は参加者が両手のタイマーを結合することにより, 両手のタイミングを安定させると推察した. したがって, 彼らは, 両手の時間的な結合に伴って, 両手運動は片手運動よりもパフォーマンスが高くなることを示した.

1.3.2 ダイナミカル・システム・アプローチ

2 つの効果器の結合は振動子仮説を用いて説明できる. この仮説では, 効果器がリズムを発生させる振動子 (oscillator) で制御され, 両手の振動子が機能的に結合すると考えられている (Haken et al., 1985). さらに, このような複数の独立した要素が存在する時, それらの間に自然発生的な秩序が生じるシステムに対するアプローチはダイナミカル・システム・アプローチと呼ばれる. この理論を裏付ける研究として, Haken et al. (1985) は参加者に両手の人差指の周期的な屈曲伸展運動を課した. この実験では, 参加者は左右の示指を同時に屈曲あるいは進展させ, 周期的に繰り返す運動 (図 2A と B) と左右の指を交互に屈曲-伸展 (一方の指が屈曲し, 他方の指が伸展する) させる運動 (図 2C と D) を行った. このような周期運動では指を屈曲伸展させた後, 再度屈曲させるので, 指は一周すると元の位置に戻る. そのため, 周期運動は位相という指標を用いて検討することができる. 位相とは周期運動の過程のどの点にあるかを角度で示したものである. たとえば, 指の位相が 0° の時を伸展した状態, 180° の時を屈曲した状態としたとする. 指の位相 360° の時は指の運動が一周して, 伸展した状態であり, 位相 0° と同じである. さらに左右の指の周期運動の関係は位相差を用いて確かめる. 左右の指の位相差が 0° になると, 左右の指の位相が一致したことを示し, この関係は同位相と呼ばれる (図 2B). 左右の指の位相差が 180° になると, 左右の指の位置が反転しており, この関係は逆位相と呼ばれる (図 2D). したがって, 左右の指を同時に屈曲伸展させた周期運動は同位相運動であり, 交互に屈曲伸展させた運動は逆位相の運動であった. 両示指の同位相運動では, 運動の速度を増加させても同位相から変化しなかった. しかし, 逆位相運動では, 運動の速度を増加させた時, 左右の指の位相差が 180° から 360° に

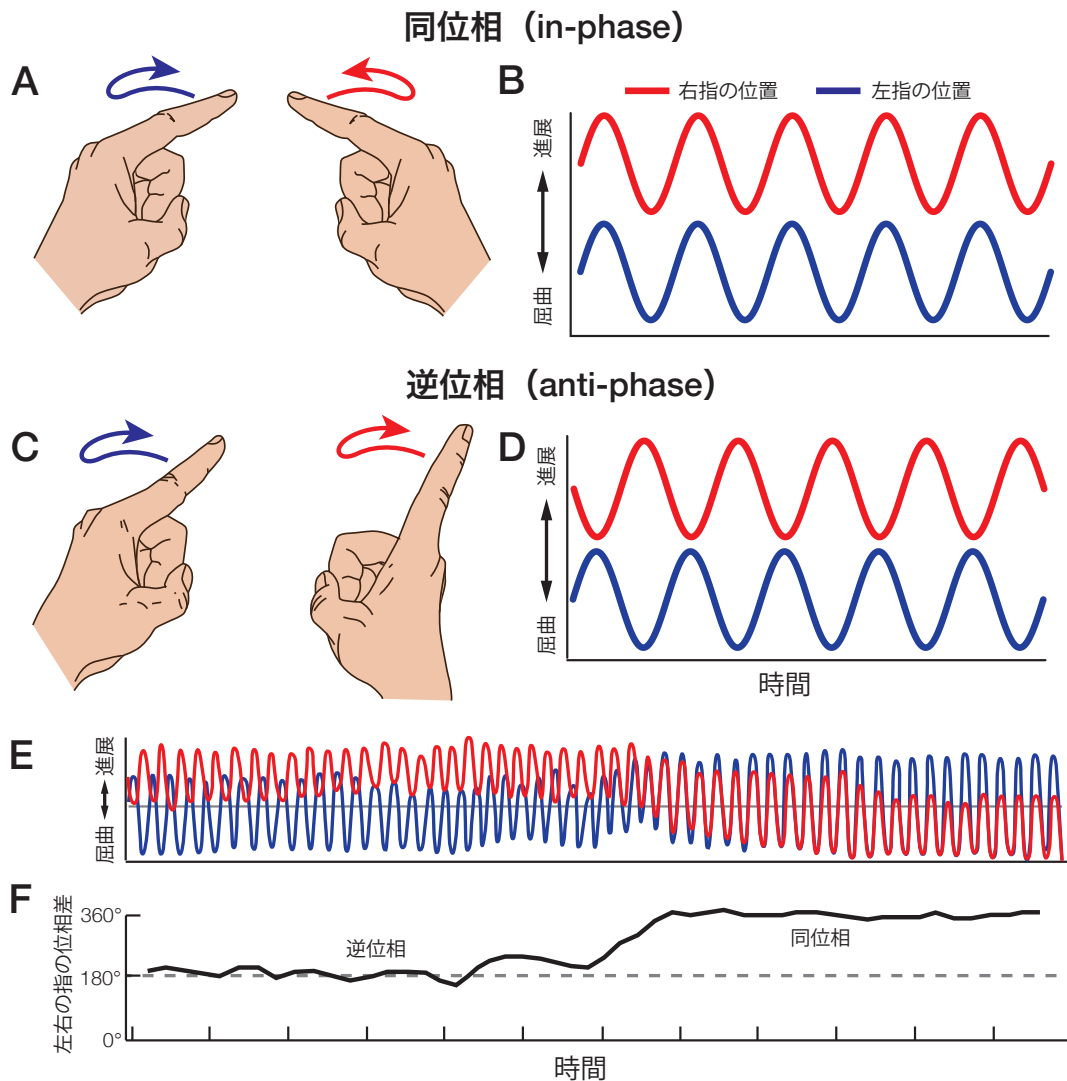


図2. 左右の指の同位相運動 (A) と逆位相運動 (C). 同位相運動 (B) と逆位相運動 (D) における指の位置 (Haken et al., 1979). 同位相の運動は左右の指を同時に屈曲伸展させ、それを繰り返す。逆位相は一方の指は屈曲し、他方の指を伸展させ、交互に屈曲伸展を繰り返す。両運動では、参加者は時間経過に伴って左右の指の運動を加速させた。逆位相運動時の左右の指の位置 (E) とその位相差 (F)。位相とは周期運動において指の位置が周期のどの点にあるのかを示す指標であるが、左右の指の位相差が 0° ($=360^\circ$) であれば、左右の指の運動は同位相であり、 180° であれば逆位相である。逆位相で運動を開始した時、運動速度を増加させると、左右の指の位相差が 180° から 360° になり、意図せず左右の指の運動が逆位相から同位相に移行した (E と F)。

移行し (図 2E と図 2F), 逆位相運動から同位相運動に移行した. したがって, この実験は両手の振動子の結合を示唆し, ダイナミカル・システム・アプローチを運動制御に応用した古典的な研究である. さらに, 振動子の概念において, 好みのペースの運動が振動子にとって最も安定した状態であり, その好みのペースから離れると運動が不安定になることを仮定した (Kugler and Turvey, 1986). その概念にしたがって, Sternad et al. (2000) は片手のタッピング運動を用いて, 力の変動が特定の運動頻度から離れるにつれて増加することを示した (図 3). したがって, Sternad et al. の結果は好みのペース (効果器固有の頻度) から逸脱すると大きくなり, 振動子の概念を証明した.

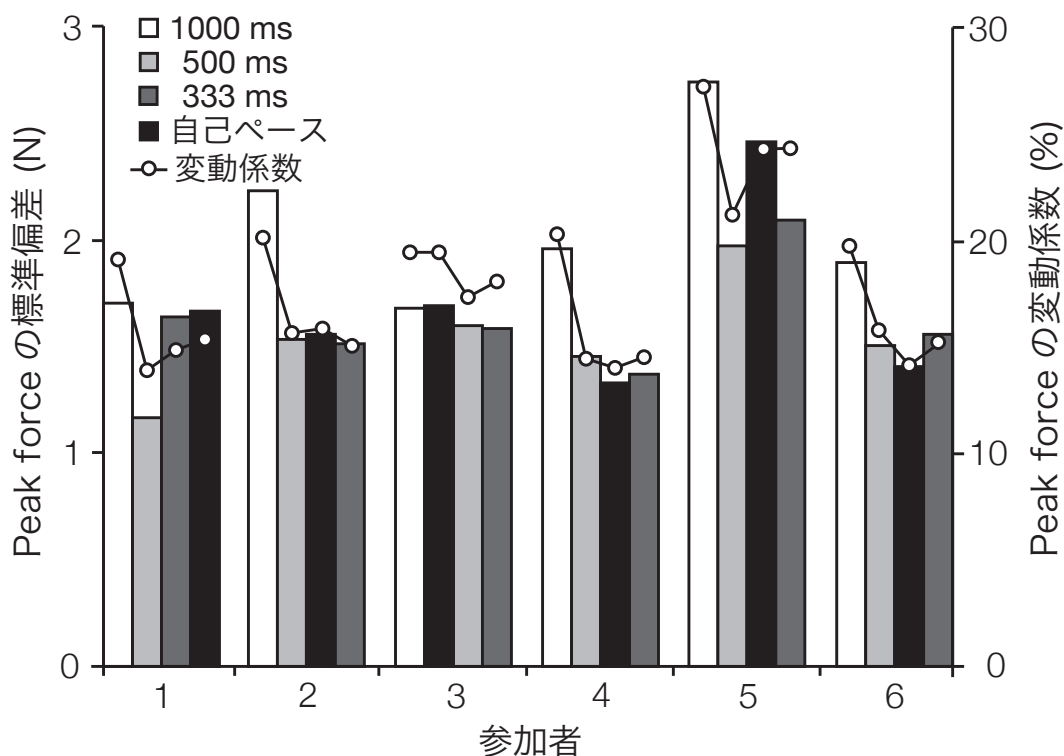


図 3. 1000 ms, 500 ms, 333 ms, 自己ペースのタップ間隔のタッピングにおける peak force の標準偏差と変動係数. その結果, 6 名の参加者において, peak force の標準偏差と変動係数が特定の運動間隔で最も小さくなるが, その運動間隔から離れると大きくなった. つまり, 好みのペースから離れると力の変動は増加し, 好みのペースが最も安定すると提唱した振動子仮説 (Kugler and Turvey, 1985) を支持した.

1.3.3 両手協応運動のメカニズム

左手を支配する右半球と右手を支配する左半球が脳梁を介して情報交換を行うことで、両手の協応運動が可能になる (図 4A). そのような知見は難治性てんかんを発症し、脳梁を切断した患者から得られている. 上述したように、神経学的に健常な参加者は両手で運動を行う時に、両手の運動の振幅やタイミングが同じになり、両手運動が空間的、時間的に結合した. 脳梁損傷患者の両手運動は空間的に結合せず、両手運動の空間的結合は大脳皮質間の情報交換に依存すると示唆された (Franz et al., 1996). しかし、脳梁損傷患者においても両手の時間的結合は観察されており、両手運動の時間的結合は大脳皮質より下位の領域で生じると考えられた (総説として, Diedrichsen et al., 2010). 近年の研究は時空間的な結合は分離 (discrete) 運動と周期運動で依存する情報交換が

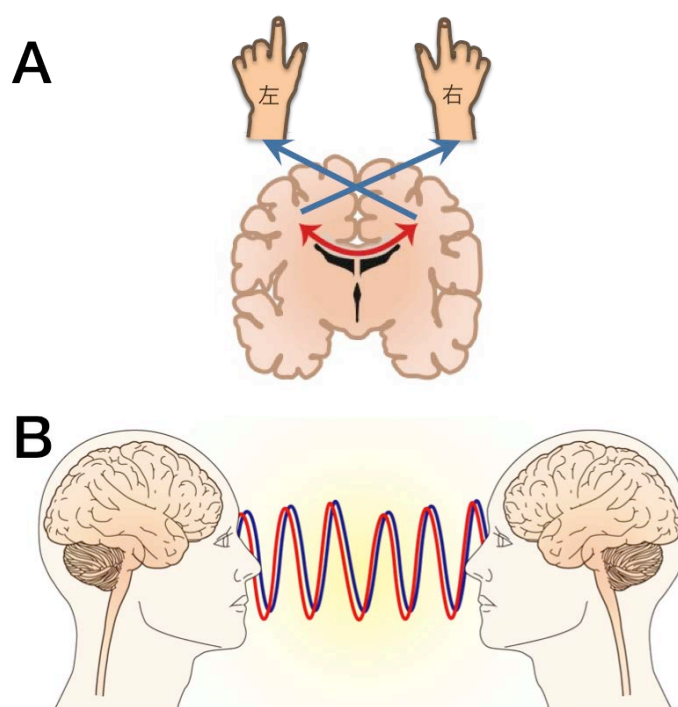


図4. 両手 (A) と個人間 (B) の協応に関するメカニズム. 両手協応は主に脳梁を介した大脳皮質間の情報交換や皮質下の働きに依存する (Diedrichsen et al., 2003; Spencer et al., 2003). 個人間協応運動は主に、他者の視覚情報や聴覚情報を介して情報交換によって成立する. つまり、個人間の情報交換はワイアレスに行われている (Hasson et al., 2012).

異なると考えられている。分離運動とは運動の開始と終了が前後の運動と区切られているものであり、例として投運動が挙げられる。周期運動とは一連の運動が繰り返されるものであり、例として走運動が挙げられる。Ivry らの研究グループ (Ivry and Hazeltine, 1999; Spencer et al., 2003) は脳梁損傷患者に左右の指の屈曲伸展を分離的、周期的に繰り返すことを要求した。その結果、分離的な運動を行った時、左右の指の空間的な結合は消失したが、時間的な結合はそのままであった (Ivry and Hazeltine, 1999)。それに対して、周期的な運動を行った時、左右の指の空間的結合だけでなく、時間的結合も消失した (Spencer et al., 2003)。したがって、周期的運動では、両手運動の空間的結合も時間的結合も脳梁を介した皮質間の情報交換に依存することが示唆された。このように、両手協応は大脳皮質間の結合や皮質下の働きによって両手の運動の情報を交換していると考えられているが、分離運動と周期運動で依存するメカニズムが異なるらしい。

1.4 協応運動における誤差補正

1.4.1 Uncontrolled manifold hypothesis

1980年代から四肢の運動の結合は精力的に検討されてきたが、近年になり、協応運動の誤差補正が検討されるようになった。たとえば、ピストルを撃つ際、初心者は肩関節、肘関節、手首の関節の運動を固定する (図5, Tuller et al., 1982)。しかし、初心者はピストルを撃つ時に生じる姿勢の変動によってピストルを正確に狙うことはできなかった。一方、ピストルの熟練者はピストルを撃つ時に生じる姿勢の変動を様々な関節を変動させ、吸収することで、銃身の動きを補正した。このように、スポーツの熟練者は様々な関節の自由度を柔軟に協応させ、誤差を補正することで、正確な運動を実現しているのかもしれない。

このような協応運動の誤差補正を理解するために、Latash ら (Scholz and Schöner, 1999; Latash et al., 2002b) は uncontrolled manifold hypothesis を提唱した。この仮説では、運動で生じる変動を課題のパフォーマンスに影響するもの (task-relevant) と影響しないもの (task-irrelevant) に分類する (図5)。つまり、task-irrelevant の変動は課題を達成するために必要以上の自由度であり、冗長性である。Uncontrolled

manifold hypothesis は task-irrelevant variance を用いて, task-relevant variance を補正すると仮定した (図5). 最近の実験では, Latash et al. (2001)は被験者に3本の指で力発揮し, その総和を目標値に一致させることを要求した (図6). その結果, 課題に関連しない個々の力の変動 (task-irrelevant variance) は課題に関連する力の総和の変動 (task-relevant variance) よりも大きくなった. したがって, 3本指の個々の力発揮を変動させ, 力の総和を補正していた. このような task-irrelevant variance の特徴から, Latash (2012) は, 身体運動の自由度の多さを冗長性と呼ぶよりも, 課題解決方法の柔軟性と捉え, ”豊富さ (abundance)” と呼ぶべきと強調した. uncontrolled manifold hypothesis 仮説は多くの場面における協応運動を理解するために非常に重要な仮説である (たとえば, Latash et al., 2001; Domkin et al., 2002) が, そのような協応方略に達するための処理過程は不明確なままであった.

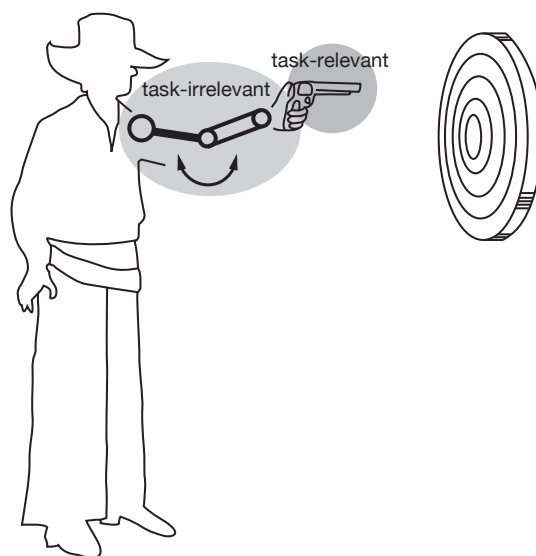


図5. ピストルで見られる運動の誤差補正 (Tuller et al. (1982)を基に作成). 銃身の動きの変動は的への狙いを狂わせ, 銃身の動きの変動は課題パフォーマンスに影響する (task-relevant variance). しかし, 肩, 肘, 手首の関節の動作は変動したとしても, 直接的に銃身は変動しない (task-irrelevant variance). したがって, それらの動作の変動は課題パフォーマンスに影響しない. 上級者はピストルを撃つ時に生じる姿勢の変動を様々な関節を変動させ, 吸収することで, 銃身の動きを補正する.

1.4.2 Optimal feedback control theory

最適化 (optimization) とは少ないコストで最大の成果を挙げることであり、運動制御における最適化とはより少ない運動指令でより正確に運動を制御することである。

過去四半世紀にわたって、運動を実行する前に、効率的で正確な運動計画が決定され、フィードフォワード制御が行われていると考えられてきた(たとえば, Flash and Hogan, 1985). この理由として、フィードバックを受けてから計画を決定し、運動を行うと、その間の時間遅延が生じる. そのような遅延を解消するために、運動前に運動計画を決定するようなフィードフォワード制御に依存する. しかし、フィードフォワード制御で運動計画が決定されるのなら、様々な関節や効果器を用いて1つの運動目標を達成する時に各関節の様々な運動パターンが存在するような自由度の問題を説明できない. しかも、協応方略は先行して各関節や効果器の運動を計画するよりも、フィードバックを利用して自分の身体や環境などの様々な状況に応じて柔軟に対応していると考えられる. したがって、協応運動はフィードフォワードの概念のみを用いて説明できない.

従来のフィードフォワードモデルと上述の uncontrolled manifold hypothesis で生じた処理過程の問題を解決するために、Todorov and Jordan (2002) はフィードバックを用いて協応運動を最適化しているという optimal feedback control theory を提唱した(図 7A) (総説として, Scott, 2004; Todorov, 2004). Optimal feedback control theory

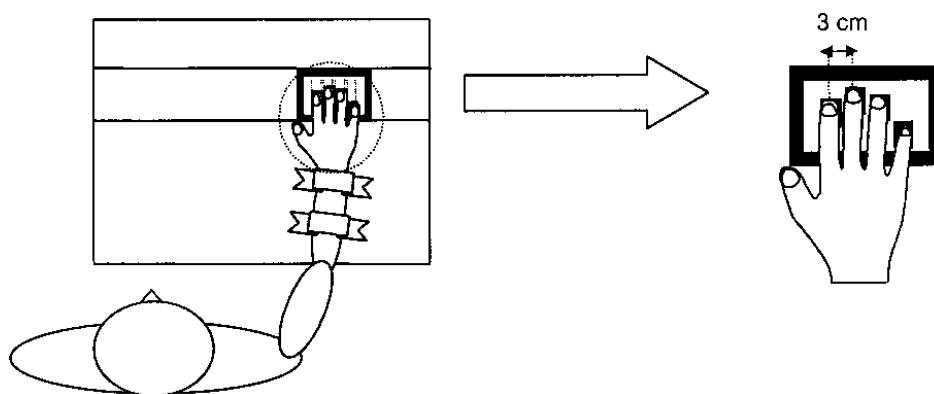


図 6. Latash et al. (2002) の実験設定. 被験者は右手の三本の指で力発揮し、その総和を目標値に一致させた. 参加者は個々の指を変動させ、力の総和を補正した.

では、フィードバック情報に基づいて形成された身体の状態に関する内的表象 (state estimate) は直ちに次の運動指令に変換される。State estimate は, internal forward model (運動指令の効果を予測するシミュレーター) から生じる運動指令の遠心性コピー (efference copy, これまでの運動結果に基づく予測) とフィードバックを照合することによって更新される (Optimal state estimator の部分, Wolpert et al., 1995). そして更新された state estimate は minimal intervention principle に基づいて運動指令に変換される。つまり, この処理過程では, 運動を新たに計画しないので, フィードバック遅延が解消される。Minimal intervention principle (図 7A の control policy の部分) は, 神経系が運動中に課題のパフォーマンスに影響する部分の誤差や分散を修正するが, 影響しない部分の偏差を修正しないと予測する (図 7B). Uncontrolled manifold hypothesis と同様に, この制御方略にしたがって運動を行うことは課題に関連しない部分の分散が関連する部分の分散よりも大きくなることを意味する。

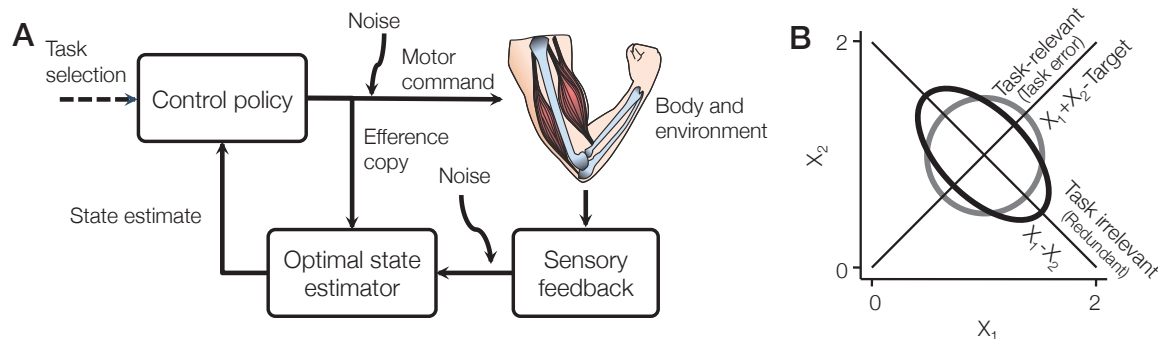


図 7. A : Todorov and Jordan によって提唱された optimal feedback control theory における情報処理回路 (Scott, 2004 を基に作成). 遠心性コピー (efference copy, 運動指令の結果予測) とフィードバック情報によって更新された state estimate を minimal intervention principle にしたがって次の運動指令に変換する。B : Minimal intervention principle における 2 つの変動。 x_1 と x_2 を 2 つの効果器とし, それらの出力の合計値の目標を 2 とする。Minimal intervention principle は神経系が 2 つの出力の配分を変動させてその合計値を補正すると予測した。

この制御方略が選択される理由には運動指令に付随する不規則なばらつきである運動雑音 (motor noise, 総説として, Faisai et al., 2008) が関連している. 課題に影響しない部分を制御することは余分な運動指令を引き起こすだけでなく運動雑音を伴い, 余計な運動指令と運動補正の悪循環が生じる. 現在, optimal feedback control theory は障害物に対する運動 (Liu and Todorov, 2007), 対象物の操作 (Nagengast et al., 2009), 両手運動 (Diedrichsen, 2007; O'sullivan et al., 2009) などの広い範囲の動作に応用されている.

1.4.3 両手の運動の誤差補正

スポーツ場面では, テニス選手はラケットを操作する時に, 一方の手の動作で誤差が生じると, その誤差を他方の手で補正するだろう (図 8, Miall, 2010). 両手の誤差補正の先駆的研究として, Diedrichsen (2007) は両手で個別にカーソルを動かし, 目標に到達させる課題 (図 9A, two cursor 課題) と両手の平均位置に提示されるカーソルを目

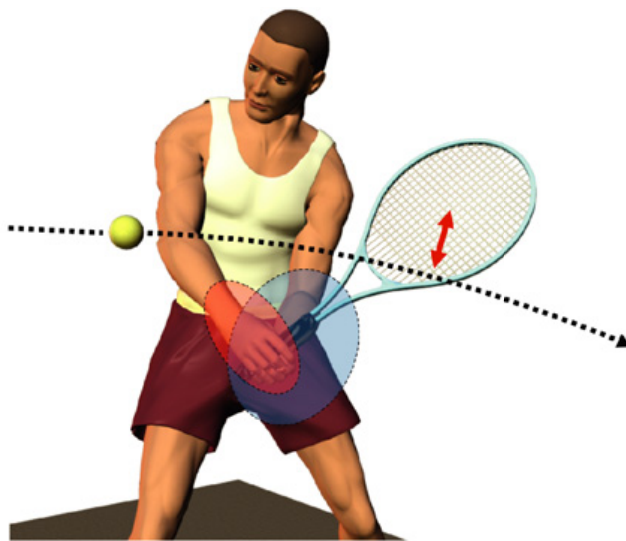


図 8. テニスにおける両手運動の誤差補正の予想図 (Miall, 2011). 選手はボールにラケットを当てるために, 右手を動かした時に生じたラケットの位置の誤差を左手で補正している. この例では, テニスラケットの位置がパフォーマンスに影響するが, 左右の手の位置は直接パフォーマンスに影響しない.

標位置まで動かす課題（図9B, one cursor 課題）を用いた。このような one cursor 課題は参加者が両手で1つのカーソルを制御するので、課題を達成するための両手の位置の組み合わせが多く存在し、冗長的課題（redundant task）とも呼ばれる。また、両課題において、参加者は運動中、片腕に機械によって外乱を与えられ、片腕の動作を妨げ

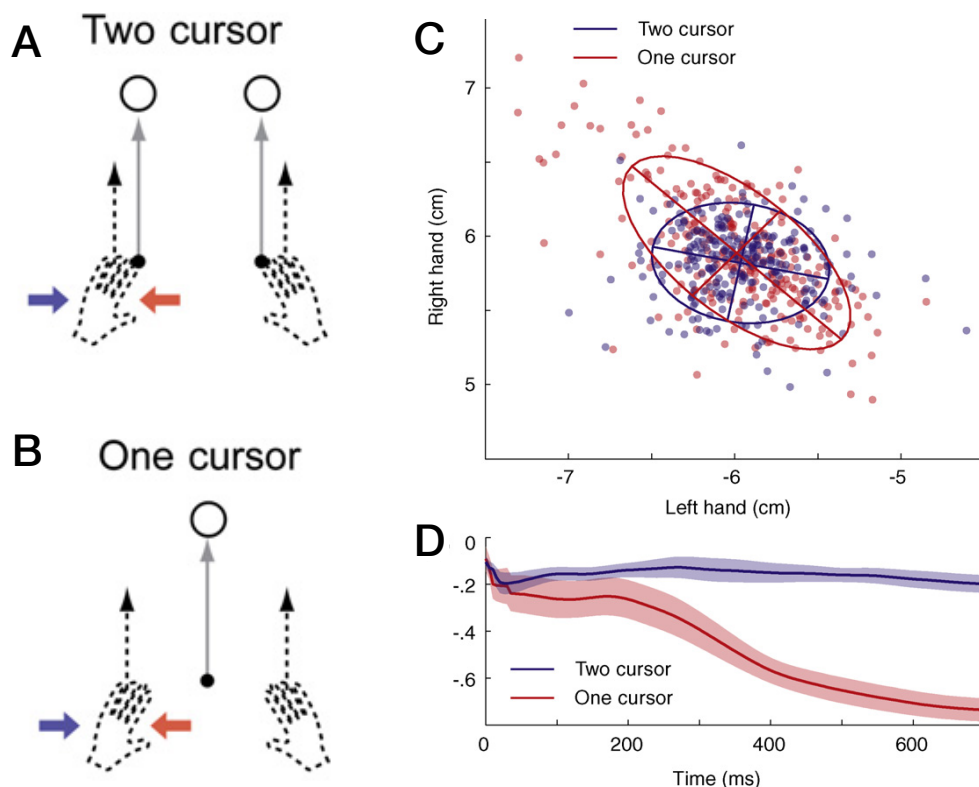


図9. Two cursor 課題(A)と one cursor 課題 (B). Two cursor 課題は両手で個別に2つのカーソルを動かす、目標位置に到達させる (A). One cursor 課題は両手の平均位置に提示されたカーソルを目標位置に到達させ、両手で1つの対象を操作する課題である (B). 到達を開始した後、一方の手に運動を妨げるような外乱 (右手では左向きの方場) が与えられた. C: 目標到達時における両手の位置の散布図. D; 両手の位置の相関関係における目標に到達するまでの時間経過. Two cursor 課題では、目標到達時の手の位置は相関せず (図CとDの青), 参加者は両手の到達運動を個別に制御していた. One cursor 課題では、目標到達時の手の位置が負の相関関係になり (図CとDの赤), 外乱によって右手に左側の誤差が生じると、他方の手を右に動かすことによりカーソルに位置を補正した.

られた。その結果、two cursor 課題では目標位置に到達した時の両手の位置は相関せず (図 9C と D)、両手の運動は個別に制御された。One cursor 課題では目標値に到達した時の手の位置は負の相関関係を示しており、外乱によって右手が過剰に右に動かされると、外乱のない左手を左に動かすことでカーソルの位置を補正した。したがって、1つの対象を制御する課題では、参加者は両手の運動を結合させるよりも、両手の運動の誤差補正によって課題を達成した。このような one cursor 課題における両手の運動の誤差補正は uncontrolled manifold hypothesis や optimal feedback control theory を用いて説明でき、課題パフォーマンスに影響しない両手の位置を変動させることで、カーソルの位置の変動を補正した。両手運動の誤差補正は冗長性のある課題におけるパフォーマンスを向上させるために重要な方略であるといえるが、両手の運動の結合と誤差補正のような2つの制御方略はどういった条件で決定されるのかは不明確な点が多い。

1.5 カとタイミングの相互作用

ヒトは両手協応運動のように四肢間の協応だけでなく、2以上つの運動パラメータを相互作用させることがある。先行研究はタッピング課題 (Inui et al., 1998; Sternad et al., 2000) や等尺性力発揮課題 (Newell and Carlton, 1985; Carlton et al., 1993) を用いて、力とタイミングの相互作用について検討している。たとえば、Inui et al. (1998) はタッピング課題を用いて、参加者に好みの運動間隔と力を1/2または2倍にするように要求した。つまり、この実験は3通りのタップ間隔と力を組み合わせて、9通りの課題を設定した。その結果、すべての力の強さにおいて、好みのタップ間隔は400 ms 前後であり、2倍の間隔は800–900 ms であり、1/2の間隔は230–250 ms であった (図 10A)。このように、力の増減に関わらず、タップ間隔はかなり正確に増減が制御されていた。それに対して、タップ間隔が2倍になると、力も顕著に強くなり、力は正確に制御されなかった (図 10B)。さらに、Inui らの一連の研究 (Inui and Ichihara, 2001; Inui and Hatta, 2002) は好みのペースに近い400 ms と500msの運動間隔で目標筋力2–4Nのタッピング課題では、タップ間隔の変動係数は5%未満であるが、力のそれは20%であり、タイミングの制御は力制御よりも著しく不正確であった。しかし、これらの変動も練習によって改善され、熟練したピアニストは力の変動係数を10%未満に

抑え、力発揮を正確に制御できた。この結果はタイミングと力の制御が独立でなく、タイミングは力の制御に一方的に影響を与えることを示した。この結果は力の制御よりも早く個々の動作のタイミングが習得できるが、力の微調節は膨大な時間を要することを示唆した。

1.5.2. 力とタイミングの階層性

複雑で大規模なシステムでは、階層性が存在する。2つの階層の間には、上位の階層がその構成単位である下位の階層の働きの引き金を引き、下位の階層に応じてあらかじめ決められたパターンにそってその機能を果たす構造が見られる(団, 1976)。この点に関連して、Rinkenauer et al. (2001) は2つの条件で両手の力発揮課題における力とタイミングの階層性を検討した。力非対称条件では参加者が両手で同時に力発揮し、左右で異なる力の目標に一致させた。時間非対称条件では参加者が左右の手で異なるタイミングで力発揮し、左右で同じ目標値に一致させた。力非対称条件では、両手の力は相関し

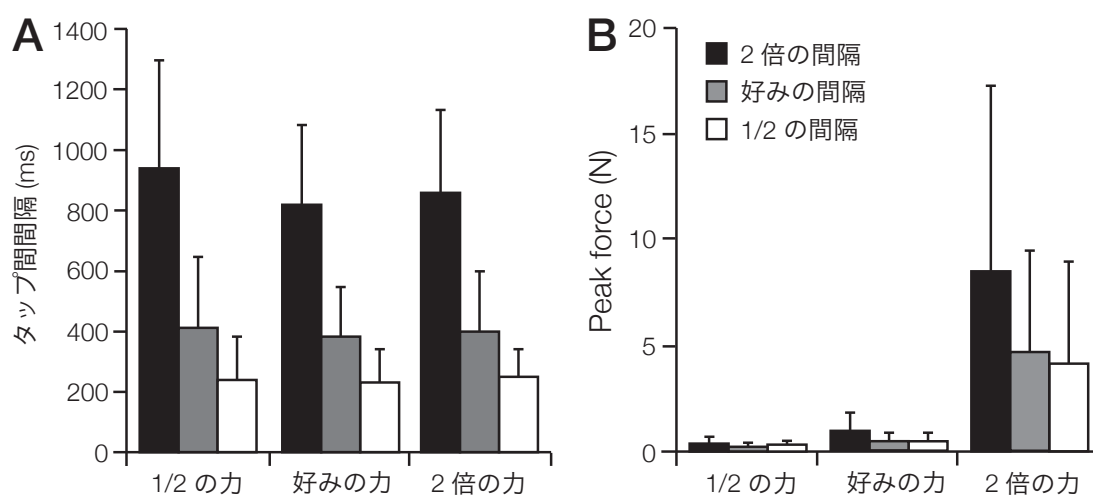


図 10. Inui et al. (1998) における力とタイミングの平均値。参加者は好みのペースと力でタッピング課題を行った後、好みのペースと力の1/2と2倍で課題遂行した。つまり、参加者は3通りの運動間隔と3通りの力を組み合わせ、計9通りの条件で課題を行った。

なかったが、力発揮時間は正の相関関係を示した（図 11）。つまり、左右の力発揮は異なる目標値に一致して、個別に制御できたが、左右の力発揮時間は結合しており、力の協応はタイミングの協応に影響を与えなかった。しかし、時間非対称条件では、両手の力発揮もその時間も正の相関関係を示し、両手のタイミングだけでなく、力も結合し、タイミングの協応は力の協応に影響を与えた。したがって、Rinkenauer et al. は両手のタイミングが力制御に一方向に影響し、タイミングが力制御よりも上位の階層に位置することを発見した。

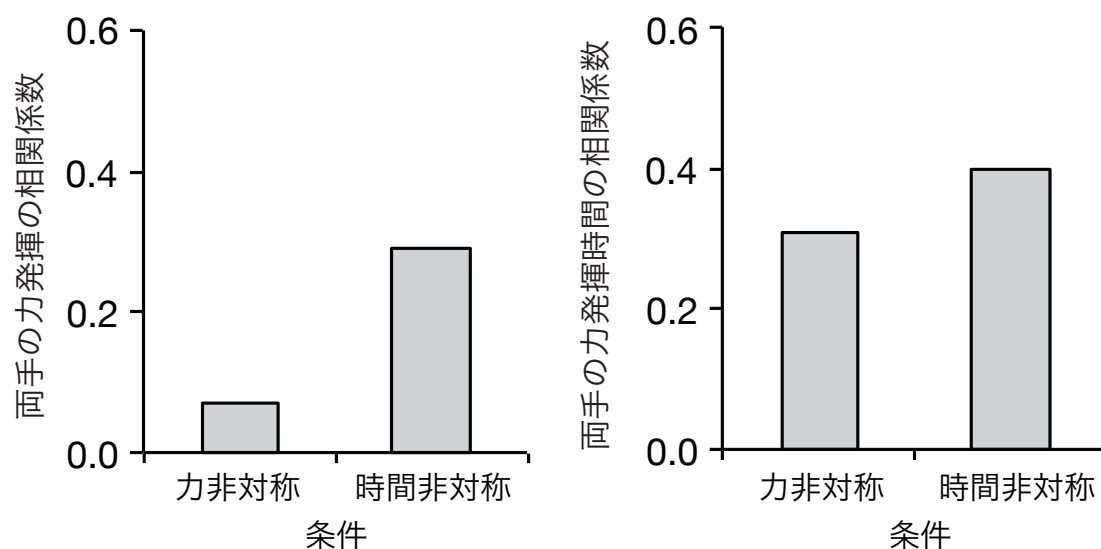


図 11. 両手の力非対称条件と時間非対称条件における両手の力発揮とその時間の相関係数 (Rinkenauer et al., 2001). 実験は両手で同時に力発揮し、左右の手で異なる力の目標値に一致させる力非対称条件と両手で異なる時間で力発揮し、左右の手で同じ力の目標値に一致させる時間非対称条件を設定した。その結果、力非対称条件では、左右の力発揮は相関しなかったが、その力発揮時間は正の相関関係になった。つまり両手の力は分離し、個別に制御されたが、タイミングは結合した。一方、時間非対称条件では、両手の力発揮とその時間もともに正の相関関係を示し、両手の力もタイミングも結合した。したがって、両手の力発揮のタイミングはその力制御に影響を与えたが、両手の力発揮はタイミングに影響を与えなかった。これらの結果から、Rinkenauer et al. はタイミングが力制御を支配する階層性の存在を示唆した。

1.6 個人間協応運動（社会的協応）

サッカーやバスケットなどの集団スポーツにおいて、個人間で共通の目標を達成するために、自分の運動と他者の運動を相互作用させなければならない。このような個人間協応は joint action とか social coordination と呼ばれ、joint action は「2人以上の人間が環境の変化を引き起こすために、彼らの動作を時空間的に協応化させる社会的相互作用」と定義されている (Sebanz et al., 2006)。

両手の協応運動のメカニズムとは異なり、当然個人間の協応運動には神経解剖学的なつながりはない。しかしながら、両手と個人間の協応運動は大きく異なる神経メカニズムに依存するにも関わらず、両手協応のいくつかの知見は個人間協応に拡張されている (たとえば, Schmidt et al., 1990)。したがって、両手の協応運動の知見は個人間のそれを理解するために重要なものである。このような個人間の協応を実現するために、2人の脳は視覚情報や聴覚情報などの物理的な信号を介して情報交換し、ワイアレス・コミュニケーション・システムを形成している (図 4B と図 12B, Hasson et al., 2012)。実際に、近年の個人間協応運動の研究は視覚情報 (Schmidt et al., 1990; 1998), 聴覚情報 (Neda et al., 2000, Konvalinka et al., 2010), 皮膚感覚 (van der Wel et al., 2011; 2012) を介して個人間の協応運動が成立することを示している。さらに、ヒトが

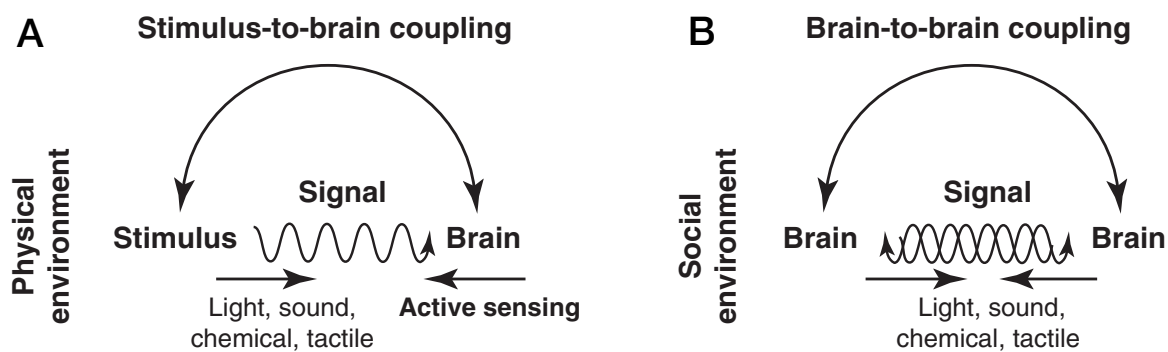


図 12. 外部環境と人の相互作用 (A), 人と人の相互作用 (B) (Hasson et al, 2012).

人間が外部環境に働きかける時、様々な刺激を基に、一方向的に働きかける (A)。他方、人と人が相互作用する時、互いが他者の情報を基に働きかけるので、双方向に影響し合う (B)。

環境と相互作用する時、ヒトが一方向的に、環境に働きかける(図 12A, Hasson et al., 2012). しかし、個人間の相互作用では、何人かの人間が他者の情報に基づいて働きかけるので、双方向の関係が成立する(図 12B).

1.6.1. 個人間協応運動の同期性

ダンスやシンクロナイズドスイミングでは、2人以上の人間が正確に動作を同期させられる。このように自分と他者の運動を同期させるためのメカニズムは非常に多くの研究で検討されている。特に、その研究の多くは自然発生的な個人間の運動の同期について検討してきた。たとえば、Schmidt et al. (1990) は2人の参加者に互いに運動を観察し、周期的に膝の屈曲伸展を行うように教示した(図 13)。その結果、2人の参加者は膝の屈曲伸展を交互に行ったにも関わらず、運動速度を増加させると、意図せずに2人の動作が同期した。したがって、Schmidt et al. は両手協応運動で観察されたダイナミック・システム・アプローチを個人間協応運動に発展させた。しかし、個人間の引き込

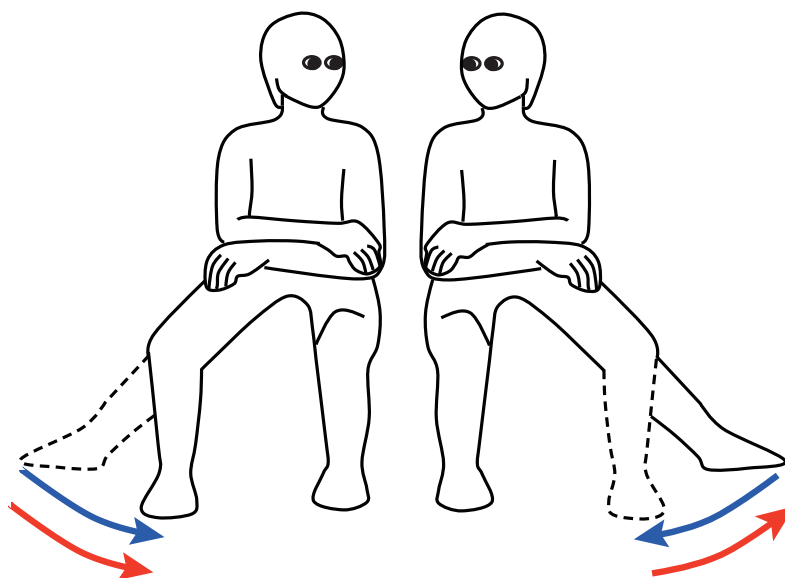


図 13. 2人の参加者が互いに観察し、膝関節を周期的に屈曲伸展させる課題 (Schmidt et al., 1990). 2人参加者は同時に屈曲伸展させる条件と交互に屈曲伸展させる条件を遂行した。交互に動作を行った条件では、2人の動作は意図せずに同期した。

みは両手のそれよりも弱いことも示されている (Schmidt and O' Brian, 1997). 興味深いことに, このような現象は音楽ホールの観客の拍手 (Neda et al., 2000) のように現実世界における多人数の協応運動まで拡張されており, 実験室実験で得られた知見が実際のスポーツ場面まで拡張できる可能性は高い.

しかし, このような引き込みは我々が意図しないうちに生じた. したがって, 意図しない同期だけではピアノの二重奏のように複雑なタイミングが必要とされる時, 2 人がどのようにタイミングを同期させているのかを説明できない (Sebanz and Knoblich, 2009). 実際に, ピアニストはピアノ二重奏において, 30 ms という少ない誤差で他者の演奏に同期させることができる (Keller et al., 2007). このような意図的な運動の同期は相手の運動を予測し, 運動を計画し, 実現すると考えられている. 相手の運動の予測は自分の運動プログラムに基づいて他者の運動をシミュレーションすることで得られ, これは action simulation と呼ばれる (Wolpert et al., 2003). つまり, 自分自身が他者の行う運動に関する運動プログラムを持っていなければ, 他者の運動を予測できない. このメカニズムを証明する実験として, バスケットボールでプロの選手, コーチ, 記者に他者のフリー・スローが入るかどうかを予測させた (Agoliti et al., 2008). コーチや記者はプロ選手よりバスケットボールの試合を多く観察しているので, 視覚的な経験が多い. しかし, プロ選手はコーチや記者よりもフリー・スローの結果を早く, 正確に予測した. つまり, 熟練した選手自身の優れた運動プログラムが他の選手のフリースローを正確に予測させた. したがって, 他者の動作を正確に予測するためには, 自分も他者が行う動作に熟練しなければならない.

1.6.2. 個人間協応運動の相補性

個人間の同期に関する研究だけでなく, 近年の研究は2人が1つの目標を達成するために, 両者の一方が運動を行った時に生じる誤差を他方が補うような相補運動 (complementary action) を検討している (Bosga and Meulenbroek, 2007; Newman-Norlund et al., 2008). 集団スポーツにおいて, 自身の運動の誤差を他者が補うように, 両者が補い合う運動を検討することは重要である. 実験室実験では, この相補性をともなう運動は自由度のある個人間協応運動課題を用いて観察されている. たど

例えば, Bosga and Meulenbroek (2007) は 2 人の参加者が両手あるいは片手の示指で力発揮し, モニター上に提示された 2 人の力の総和を目標値に持続的に保持させる課題 (持続的力保持課題, constant force) を行った (図 14). この実験設定では, 目標の力の合計値が 10N であった場合, 両者の一方が 6N の力発揮をした時, 他方が 4N の力を発揮するだろう. また, 一方が 3N の力発揮をした時, 他方は 7N の力を発揮するだろう. このように, 目標値の 10N を達成するための 2 人の力出力の配分は柔軟に変えることができ, 互いに誤差を補正することができる. 実験の結果, 2 人の力は負の相関関係になり, 両者の一方の力が強くなると他方の力が弱くなった. したがって, 両手協応運動における誤差補正と同様に, 一方の誤差を他方が補正する個人間の力の相補関係が観察された.

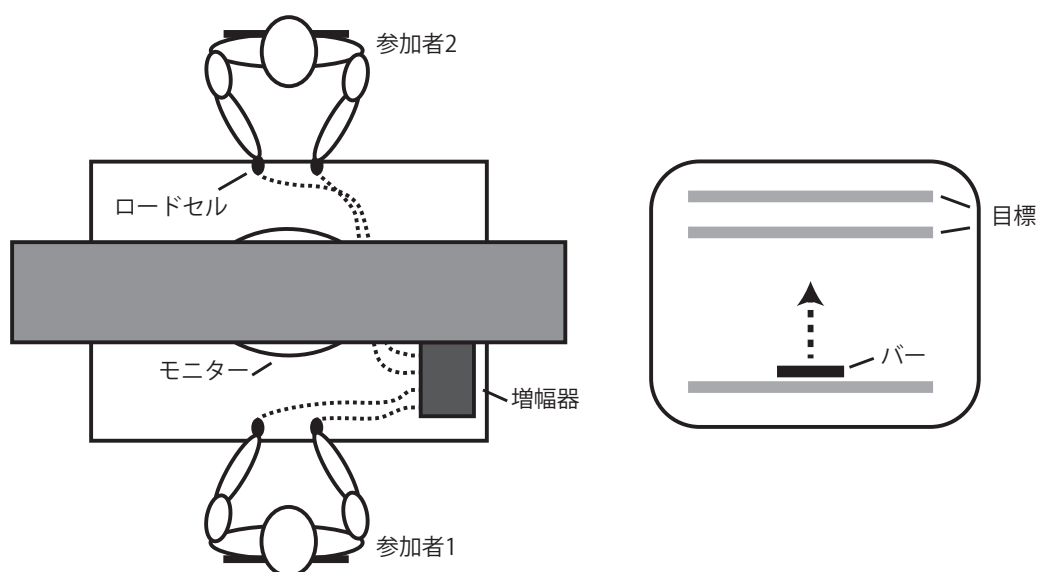


図 14. Bosga and Meulenbroek (2007) の実験設定 (左図) とそのモニター上の情報 (右図). 2 人の参加者はロードセルに対して両手で同時に力発揮した. モニター上のバーは 2 人の参加者の力発揮の総和が増加するにつれて上昇し, そのバーを 2 つの目標線の中に維持することが課題目標である. その結果, 両者の力は負の相関関係となり, 一方の力の誤差を他方が補正した. しかし, 1 人の両手の課題は 2 人の課題よりもバーの位置の変動が小さく, パフォーマンスが高かった.

しかし、個人間課題は個人内課題よりもバーの位置の変動が大きく、低いパフォーマンスを示した。また、Knoblich and Jordan (2003) は2人あるいは1人の参加者が加速と減速のキーを押してマーカーを目標に一致させる相補的課題を行った。その結果、練習初期では個人間課題は個人内課題よりもマーカーの誤差が大きかったが、練習終期には個人間課題と個人内課題のパフォーマンスの差異がなくなった。したがって、相補的運動を用いた課題では1人の課題パフォーマンスが2人のそれよりも高かった。しかし、現在においても、個人内と個人間の課題を比較した研究は少なく、2人の課題パフォーマンスが1人の課題のそれを凌駕する可能性は残されている。

1.6.3. ミラー・ニューロン・システム

神経科学的な研究はサルとヒトにおいて観察した他者の運動と同じ運動を行う時に下前頭回と下頭頂葉の活動が活発になることを示し、これらの領域はミラー・ニューロン・システムと呼ばれる (図15, 総説として, Rizzolatti and Craighero, 2004)。また、

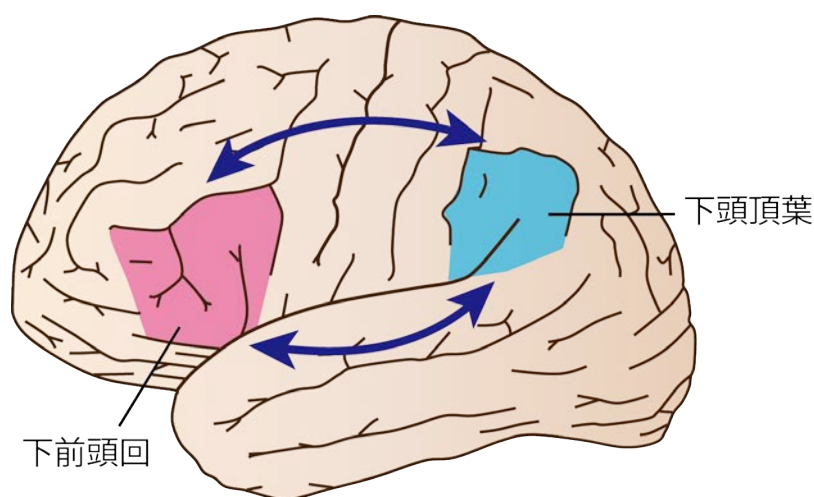


図15. ヒトで推定されているミラー・ニューロン・システム。機能的核時期共鳴画像法 (fMRI) による脳イメージング研究では、ヒトの下前頭回と下頭頂葉は実際に動作を行う時と他者の動作を観察する時の両方で活動を示す (総説として, Rizzolatti and Craighero, 2004)。このような特徴のため、2つの部位はミラー・ニューロン・システムと呼ばれる。

聴覚情報に反応するミラー・ニューロンも発見されている (Kohler et al., 2002). そして、このシステムは相手の運動のシミュレーションにも関連すると言われている (Gallese and Goldman, 1998; Gallese, 2006). しかし、興味深いことに、近年の研究では、ミラー・ニューロンの活動は相補運動の方が模倣運動よりも活発であると報告されている (Newman-Norlund et al., 2007). Newman-Norlund et al. (2007) は参加者に他者が棒を保持する画像を見せ、他者の手の位置と同じ場所を持つ模倣運動と、他者と異なる位置を持ち、棒を支えるような相補運動を要求した. その2つの課題中の参加者の脳活動は、機能的磁気共鳴断層撮影法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) を用いて撮影された. Bosga and Meulenbroek (2007) と同様に、Newman-Norland et al. (2008) は2人の参加者が同時に力発揮し、その力に応じて上昇するモニター上のバーを目標に一致させる課題を行い、脳活動を fMRI によって検討した. その結果、下前頭回と下頭頂葉の活動は個人内課題よりも個人間課題が活発になった. 彼らの結果はミラー・ニューロン・システムが視覚情報を運動に変換するシステムでなく、柔軟に自分と他者を相互作用させるシステムであることを示唆した.

1.7. 概要と目的

最初に、第1章で述べた重要な知見や問題を概観する. ヒトが両手で運動を行った時、両手運動を結合させ (Kelso et al., 1979), 制御しなければならない自由度を減少させる. 近年になり、両手で一つの対象を操作させる課題を用いて、一方の運動の誤差を他方で誤差補正する方略が観察され (Diedrichsen, 2007), この方略は左右の運動の自由度を利用することで制御する対象を誤差補正していた. このように、両手運動の結合と誤差補正では自由度を用いる方略が大きく異なるが、これらの協応方略がどのような条件で生じるのは未だ不明確である.

ヒトは両手運動のように効果器間の相互作用だけでなく、運動パラメータである力とタイミングも相互作用させる (Inui et al., 1998; Inui and Ichihara, 2001). さらに、両手協応運動の研究は両手の力制御はタイミングに影響しないが、タイミングは力制御に影響し、タイミングの制御が力制御を支配するような階層性が存在することを示した (Rinkenauer et al., 2001). しかし、この実験は分離的な力発揮課題を用いたので、

時間的拘束の強い周期的力発揮課題で力とタイミングの相互作用について調べる必要がある。

個人間の協応運動の研究は個人間の運動の同期 (Keller et al., 2007; Konvalinka et al., 2010) や相補的力発揮 (Bosga and Meulenbroek, 2007) を観察し、両手協応運動の研究を個人間協応運動に拡張した。しかし、いくつかの個人間協応課題では2人の方が1人よりも高いパフォーマンスであった (Knoblich and Jordan, 2003; Bosga and Meulenbroek, 2007)。それに対して、2人と1人の課題パフォーマンスを比較した研究は少なく、2人が1人の課題パフォーマンスを凌駕する可能性を検討する必要がある。このことに関連して、実際の生活場面では、2人で荷物を運ぶ時に、2人は相補的に力を発揮するだけでなく、2人の歩く速さを一致させなければならない。しかし、個人間協応運動研究は相補的力発揮と運動の同期の2つの協応方略を個別に検討したので、個人間協応運動における力とタイミングの相互作用が個人間協応運動のパフォーマンスを向上させることを確かめていない。

力とタイミングの制御の階層性だけでなく、片手、両手、個人間の運動は階層性を持つ。両手や個人間で協応させるためには、それぞれの手を制御しなければならない。本論は片手、両手、個人間の協応運動の階層性を検討し、しかもそれらの力制御とタイミングの相互作用について検討する。最初に、第2章では、片手の周期的力発揮を用いて、力制御やタイミングの相互作用を検討する。第3章と第4章では、両手の周期的力発揮課題を用いて、運動パラメータである力のタイミングの制御を含めた左右の手の協応運動を検討する。これらの章では両手の協応運動が片手の課題よりもパフォーマンスが高くなることを確かめ、どのような協応方略が力制御やタイミングを安定させるのかを探る。その知見をもとに、第5章では、力とタイミングの協応方略が個人間協応運動のパフォーマンスを向上させる可能性について検討する。

第 2 章

片手の周期的力発揮における力とタイミングの相互作用

2.1 目的

本論は片手，両手，個人間の協応運動の階層性を検討するため，まず最初に片手の力発揮における力とタイミングの制御を検討する。

力制御に関する研究は力発揮のピーク (peak force) を目標値に一致させる課題を行い，その力制御の正確さや変動を検討してきた。また，その研究の多くは力の強さと peak force の変動の関係について検討してきた (Schmidt., 1979; Slifkin and Newell, 1999; 2000)。たとえば，Schmidt et al. (1979) は中程度の力の強さで力発揮課題を行い，力の強さの増加に伴って peak force の標準偏差が増加することを示し，より強い力発揮では力の制御が不安定になるが，より弱い力発揮では，力制御が安定することを示した。しかし，Schmidt et al. は中程度の力の強さしか検討していなかった。その問題に対して，Slifkin and Newell (1999) は参加者に右示指で最大随意発揮筋力 (以下 MVC と省略，随意的に発揮できる最大筋力) の 5-95% にわたる等尺性力発揮課題を要求した。その結果，力の標準偏差は指数関数的に増加し，力レベルの増加に伴って力変動の増加量も増加した。

一方，学校体育やスポーツ指導において，「力を抜きなさい」という教示が行なわれるように，巧みな運動制御には正確に”力を入れる”だけでなく，正確に”力を抜く”ことが重要である。しかしながら，多くの先行研究は peak force の制御のみで，力を抜くこと (valley force) の制御を検討していない。それに対して，Harbst et al. (2000) は参加者に示指と拇指によって力を入れる (peak force) ことと力抜くこと (valley force) を周期的に繰り返すように教示した。実験は目標の peak force を MVC の 40% に設定し，目標の valley force を MVC の 20% に設定した。力の正確さは目標値からの誤差によって評価された。その結果，valley force は peak force よりも誤差が大きく，力を抜くことは力を入れることよりも不正確な制御であった。しかし，Harbst et al. の研究は異なる目標値で peak force と valley force を比較しており，上述のように力の強さが大き

くなると力変動も大きくなるので、同じ目標値の peak force と valley force を比較する必要があった。その問題に関して、森藤ら (2009) は周期的な示指の等尺性力発揮を行い (図 16)、同じ目標値の peak force と valley force の制御について検討した。彼らは目標 peak force が 4N であり、目標 valley force が 1N である 4-1 課題を設定した。また、目標 peak force が 7N であり、目標 valley force が 4N である 7-4 課題を設定した。この研究は 4-1 課題の peak force の制御と 7-4 課題の valley force を比較することにより、4 N の時の peak force と valley force を比較することを可能にした。その結果、4N の valley force は 4N の peak force よりも力の変動が高く、同じ力の強さでも力を抜くことは力を入れるよりも困難であった (図 17B)。しかしながら、森藤ら (2009) は周期的な等尺性力発揮を行い、筋力とタイミングの制御を検討したが、Harbst et al. のように MVC に対する相対的な目標発揮筋力を用いて力の制御を検討していない。また、4N の目標値以外の peak force と valley force の制御を比較していないので、他の力の強さにおける valley force の変動は検討していない。

したがって、本研究は動作タイミングを規定した周期的力発揮課題を行い、MVC に対する相対的な目標発揮筋力でも力の増加時よりも力の減少時のほうが不正確な制御であ

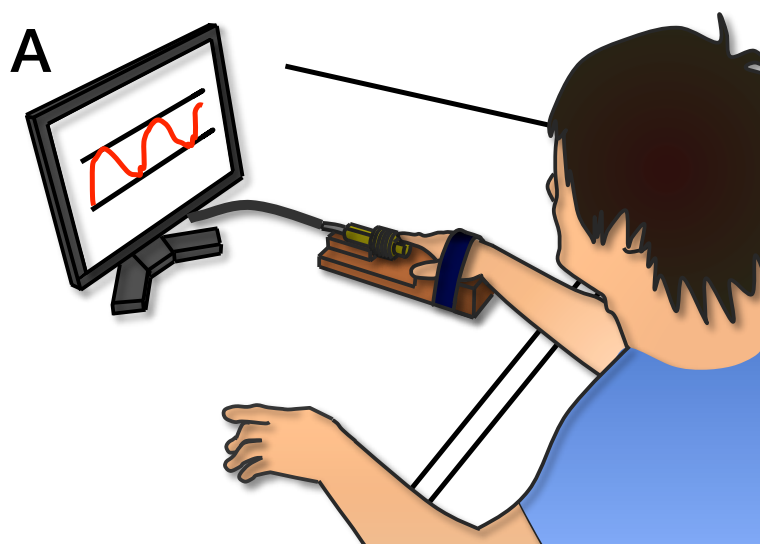


図 16. 片手の等尺性力発揮課題に関する実験設定 (森藤ら, 2009; 第 2, 第 3, 第 5 章の実験。参加者は右示指をロードセルにつけたままで等尺的な力発揮を行った。

ることを検討した。さらに、周期的な力発揮課題において力とタイミングの相互作用を検討した。

2.2 方 法

1) 参加者

参加者は10名の右利きの健康な男子大学生(平均年齢:20.5歳,標準偏差:0.69歳)である。利き手はEdinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971)によって検査された。右利きの参加者の一側優位性(laterality)の得点はすべて+100であった。すべての参加者から実験に関するインフォームド・コンセントを得た。

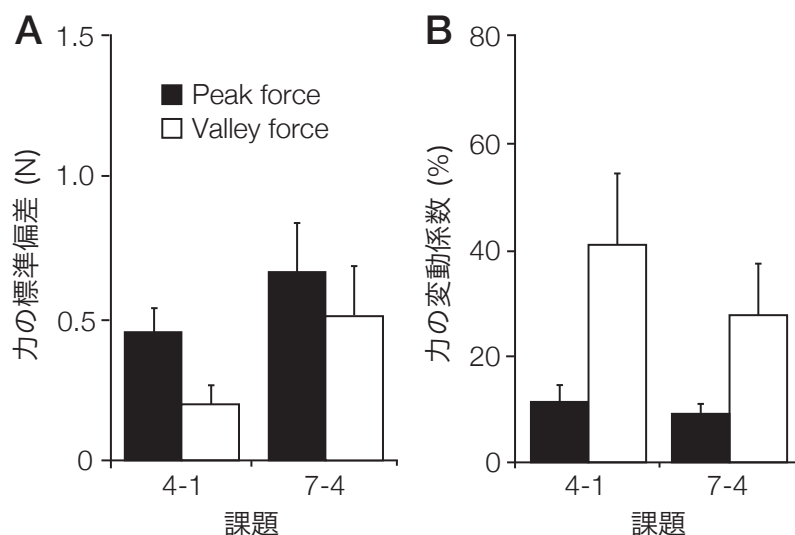


図17. 2つの課題におけるpeak forceとvalley forceの標準偏差 (A) , 変動係数 (B) . 森藤ら (2009) は周期的に力発揮し, 目標のpeak forceとvalley forceに一致させる課題を行った. 実験は2つの力レベルの課題を設定し, 4-1課題は目標peak forceが4N, 目標valley forceが1Nであり, 7-4課題は目標peak forceが7N, 目標valley forceが4Nであった. その結果, peak forceはvalley forceよりも標準偏差が大きかった (A) . 異なる力の強さにおける力変動を比較するために, 力の変動係数を算出すると, valley forceはpeak forceよりも変動係数が大きかった (B) .

表 1. 3つの課題における目標の peak force と valley force

	10-5 課題	20-10 課題	40-20 課題
peak force	10	20	40
valley force	5	10	20

2) 実験課題と実験手続き

参加者はロードセルに向かって椅座位をとり、手掌を机から高さ 6cm の支持台に置いた。その体勢から、参加者は中手指節関節を支点に右示指の先端掌側部をロードセルに付けたままで周期的な等尺性力発揮を行った (図 16)。

最初に、実験は目標発揮筋力を設定するために、等尺性力発揮の MVC を測定した。MVC の測定は 3 秒間の力発揮を 1 回行った (図 18A)。Harbst et al. (2000) が用いた 10-40%MVC の目標発揮筋力を参考にして、本実験の運動課題は 10-5 課題 (peak force: 10%MVC, valley force: 5%MVC), 20-10 課題 (peak force: 20%MVC, valley force: 10%MVC), 40-20 課題 (peak force: 40%MVC, valley force: 20%MVC) を設定した (表 1)。最初に、20%MVC の peak force と 10%MVC の valley force である 20-10 課題を設定した。また、20%MVC の peak force と valley force を比較するために、40%MVC の peak force と 20%MVC の valley force である 40-20 課題を設定した。さらに、10%MVC の peak force と valley force を比較するために、10%MVC の peak force と 5%MVC の valley force である 10-5 課題を設定した。全ての運動課題の目標間隔は 500ms であった (たとえば, Inui, 2005)。課題の順序による交互作用を避けるために、参加者は 3 つの課題をランダムな順序で遂行した。

各課題において、練習試行は 30 秒間 4 回行い、目標の筋力と時間間隔を習得するように教示した。力発揮に関するフィードバックはパソコンのモニター上に目標の peak force と valley force を 2 つの水平線で示し、参加者によって発揮された力と目標値の差を提示した。時間間隔に関するフィードバックはメトロノーム (SQ100-88, Seiko) を介して音刺激を与え、参加者には音刺激を peak force に同期させた。参加者は練習試行終了直後にテスト試行を行い、テスト試行はフィードバックを与えず、習得した運動を 30 秒間遂行した。

3) 装置と測定

実験には1つのロードセルを用いて、周期的な等尺性力発揮がロードセルからの出力電圧として測定された (図 18B). ロードセルの出力は増幅器 (Model MCC-8A Koyowa) によって増幅された後に, 100Hz 以上の周波数を切り捨て, 12 ビットの A/D 変換器 (PowerLab/8sp, AD Instruments) によって, 1000Hz の周波数でサンプリングしてデジタル化された. その出力信号はパーソナル・コンピューター (Vostro 200, Dell) のモニター (解像度: 1280 × 960 ピクセル) に掃引して記録された. その記録された出力信号から, peak force, valley force, peak-to-peak interval (PPI), valley-to-valley interval (VVI), time-to-peak force, time-to-valley force がエミール・ソフト開発 (徳島) の力量解析ソフトによって自動的に計測された (図 19).

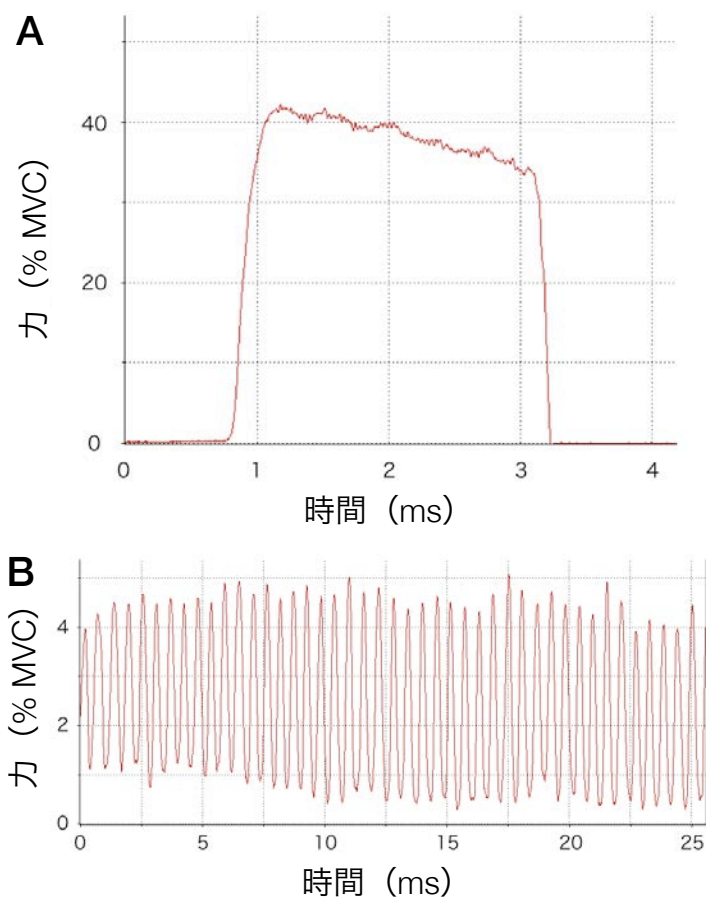


図 18. 最大随意収縮のサンプル (A) と実験のデータサンプル (B).

4) データ解析

実験から得られたデータはテスト試行の結果を分析した。その分析は各参加者の 30 回の力発揮からなり、その従属変数の分析は peak force, valley force, PPI, VWI, time-to-peak force, time-to-valley force の恒常誤差, 標準偏差, 変動係数 (coefficient of variation : 変動係数=標準偏差/平均値×100%) を用いた。恒常誤差は正負の符号をつけたままで目標からの誤差を計算したものであり (Smyth, 1984), 変動係数は平均値が大きく異なる標準偏差を比較するために標準偏差の相対値として用いた。

統計的分析は力と運動間隔に関する変数の主効果と交互作用を検討するために, 3 (10-5 課題, 20-10 課題, 40-20 課題) ×2 (peak force と valley force, PPI と VWI, time-to-peak force と time-to-valley force) の二要因の分散分析を行った。有意差が認められた時には Tukey の HSD (honestly significant difference) 検定による多重比較を行った。さらに, 個別に課題内の変数の主効果を検討するために一要因の分散分析を行った。統計的有意水準は5%に設定された。

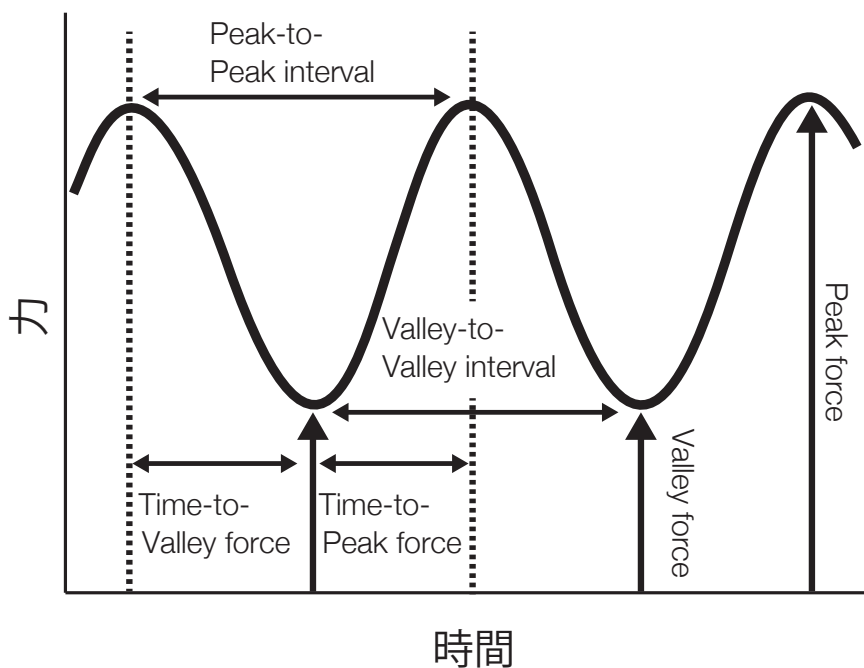


図 19. 測度の定義.

2.3 結 果

1) 力の平均値

参加者が課題目標にしたがって力発揮しているかどうかを確かめるために、図 20A には 3 つの課題 (10-5 課題, 20-10 課題, 40-20 課題) における peak force と valley force の平均値を示した。分析の結果, peak force は valley force よりも大きな力を示した ($F(1, 54)=233.60, p<0.0001$)。また, 10-5 課題は 20-10 課題と 40-20 課題よりも小さい力を示し, 40-20 課題は 20-10 課題よりも大きな力を呈した ($F(2, 54)=62.94, p<0.0001$)。これらの結果は参加者が課題目標にしたがって力発揮していたといえる。

2) 力の恒常誤差

力制御の正確性を検討するために、図 20C には 3 つの課題における peak force と valley force の恒常誤差を示した。分析の結果, valley force は peak force よりも大きな恒常誤差を示し ($F(1, 54)=40.66, p<0.0001$)、しかも負の方向に誤差を呈した。さらに, 40-20 課題は 20-10 課題よりも力の恒常誤差が大きく ($F(2, 54)=3.43, p<0.05$)、力レベルの増加に伴って力の恒常誤差が増加した。

3) 力の標準偏差

力の変動を調べるために、図 20B には 3 つの課題における peak force と valley force の標準偏差を示した。標準偏差の分析の結果, 力と課題に主効果が観察された。多重比較の結果, 10-5 課題は 20-10 課題と 40-20 課題のよりも標準偏差が小さく, 20-10 課題は 40-20 課題よりも標準偏差が小さく ($F(2, 54)=22.47, p<0.0001$)、力レベルの増加に伴って peak force と valley force の標準偏差は増加した。また, peak force は valley force よりも標準偏差が大きかった ($F(1, 54) = 7.07, p < 0.05$)。

4) 力の変動係数

目標値の異なる力変動を検討するために、図 20D には 3 つの課題における peak force と valley force の変動係数を示した。標準偏差の結果と対照的に, valley force は peak force よりも変動係数が著しく大きかった ($F(1, 54) = 97.14, p < 0.0001$)。しかも,

目標 valley force の 10%MVC は目標 peak force の 10%MVC より大きな変動係数であった ($F(1, 18) = 41.25, p < 0.0001$). 同様に, 目標 valley force の 20%MVC も目標 peak force の 20%MVC より大きな変動係数であった ($F(1, 18) = 24.82, p < 0.0001$). 本研究の重要な結果として, valley force は peak force よりも変動が大きく, 力を抜くことは力を入れることよりも不安定な制御であった. 一方, 課題と力の間には交互作用が観察された ($F(2, 54) = 3.39, p < 0.05$) ので, peak force と valley force を個別に分散分析した結果, peak force では力レベルの増加に伴って力の変動係数は増加した ($F(2, 27) = 6.58, p < 0.01$) が, valley force には力レベルによって有意な差がなかった. したがって, peak force は力の増加に伴って線形的に増加したが, valley force は線形関係を示さなかった.

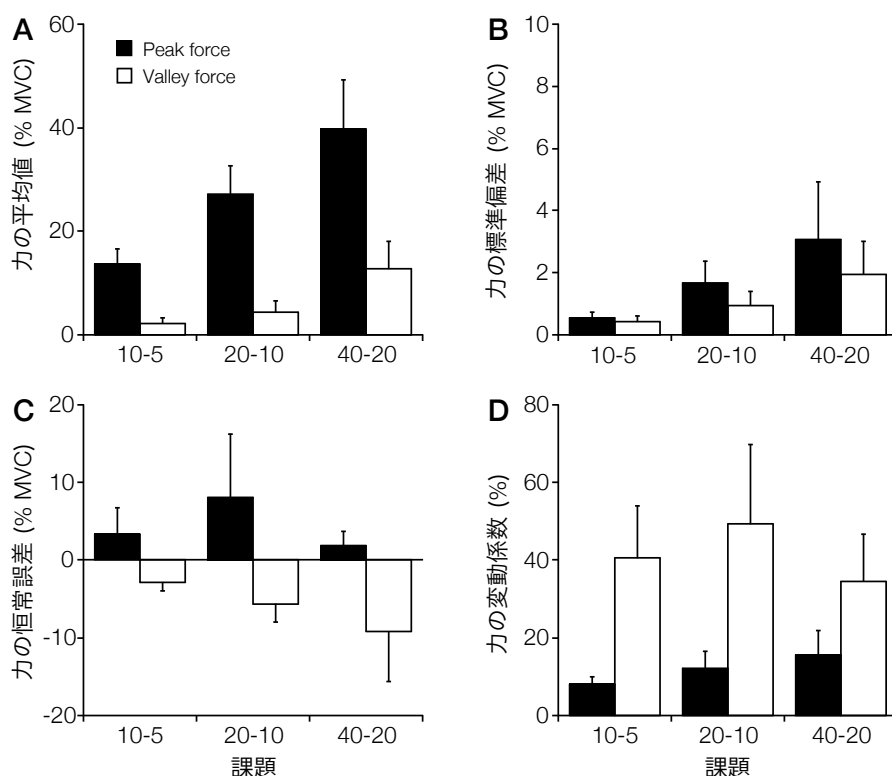


図 20. Peak force と valley force の平均値, 標準偏差, 恒常誤差, 変動係数. 課題は 3 つ設定し, 10-5 課題は目標 peak force と valley force がそれぞれ 10%と 5%MVC であり, 以下同様に 20-10 課題, 40-20 課題が設定された. エラーバーは標準偏差である.

5) 運動間隔の平均値

力とタイミングの制御における相互作用を検討するために、図 21A には3つの課題における PPI と VVI の平均値を示した。その平均値の分析は有意な主効果または交互作用を示さなかった。したがって、力の増加に伴って、運動間隔は変化しなかった。

6) 運動間隔の標準偏差と変動係数

図 21B と 21D は3つの課題に関する PPI と VVI の標準偏差と変動係数である。分析結果、VVI の標準偏差 ($F(1, 54) = 14.68, p < 0.0001$) と変動係数 ($F(1, 54) = 15.58, p < 0.0001$) が PPI のそれよりも大きかった。したがって、“力を入れること”から“力を抜くこと”への力の切り替えがその逆の切り替えしよりも大きな変動を示した。さらに、課題の主効果は観察されておらず、力レベルの増加を伴っても、運動間隔は変化せず、タイミングは力の制御の影響を受けなかった。

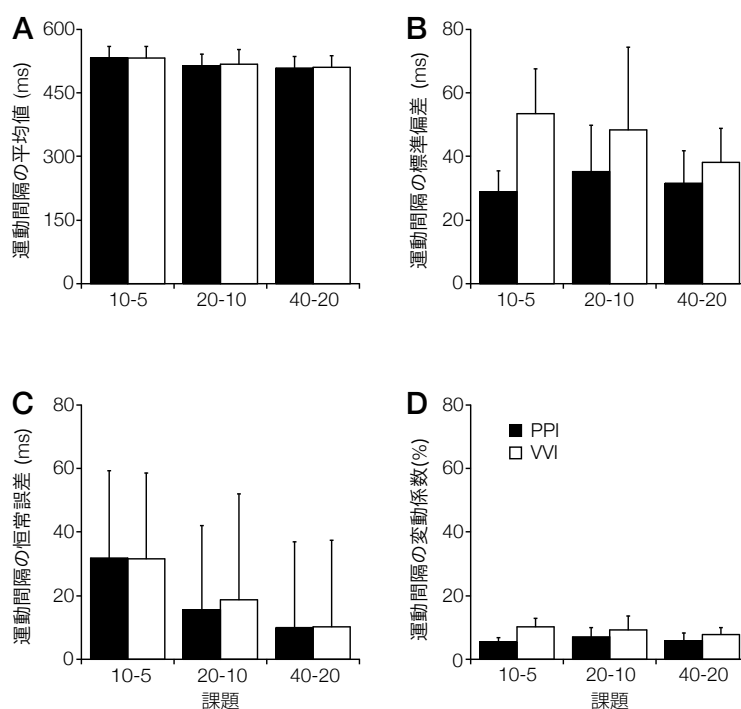


図 21. Peak-to-peak interval と valley-to-valley interval における恒常誤差と変動係数。正の恒常誤差は運動間隔が目標運動間隔よりも長いことを意味する。図中では Peak-to-peak interval と valley-to-valley interval はそれぞれ PPI と VVI と略した。

7) 運動間隔の恒常誤差

図 21C には 3 つの課題における PPI と WI の恒常誤差を示した。分析の結果、力の増加に伴って運動間隔は増加した ($F(2, 54) = 3.07, p < 0.05$)。

8) Time-to-peak force と time-to-valley force の平均値と変動係数

力発揮に要する時間の関係を検討するために、図 22 は 3 つの課題に関する time-to-peak force と time-to-valley force の平均値 (A) と変動係数 (B) を示した。その結果、time-to-peak force は time-to-valley force よりも長かった ($F(1, 54) = 23.57, p < 0.0001$)。力の増加に伴って、time-to-peak force と time-to-valley force の変動は小さくなった ($F(2, 54) = 15.58, p < 0.005$)。

2.4 考 察

本研究は valley force の誤差と変動が peak force のそれより大きいことを示した (図 20C と D)。しかも、10% および 20% MVC の目標 valley force の変動は同一の %MVC の目標 peak force のそれより大きかった。Harbst et al. (2000) は参加者に両手の自己ペースの等尺性つまみ課題を要求し、valley force は peak force 時よりも大きな恒常誤差

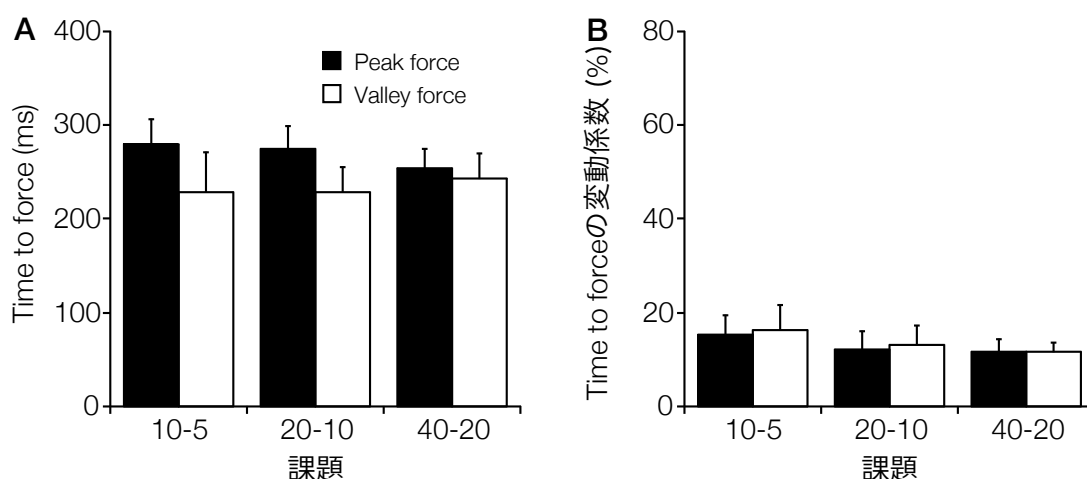


図 22. 3 つの課題における time-to-peak force と time-to-valley force の平均値と変動係数。

を示した。さらに、森藤ら (2009) は2つの目標発揮筋力の間を周期的な示指の等尺性力発揮を行い、同一の目標発揮筋力でも valley force は peak force よりも変動係数が大きかった。本研究は相対的な目標発揮筋力を設定し、同一の目標発揮筋力の valley force は peak force よりも変動係数が大きくなることを示した。したがって、本実験は“力を抜く”時の制御は“力を入れる”時よりも不正確で、不安定な制御であることを明らかにした。

また、正負の符号をつけた恒常誤差の結果から、peak force は小さな目標値を挟んで小さな正負の誤差を示したと思われるが、valley force の誤差は目標値から大きく下回った。さらに、恒常誤差の結果に変動係数の結果を考慮すると、peak force は目標値を挟んで変動したのに対して、valley force は目標値に達しないで大きく変動した。つまり、“力を入れる”時は目標値の近くに容易に力を制御できたが、“力を抜く”時は目標値で力を停止できず、大きく下方へ行き過ぎた。したがって、力の増減を制御する際、“力を抜くこと”は“力を入れること”よりも不正確であることを示した。

ニューロイメージングの研究によって、力発揮課題の中枢の影響をみると、脱力している時の第一次運動野の活動は力発揮している時のそれよりも少ないことを示した (Spraker et al., 2009)。しかし、体性感覚誘発電位は脱力している時の方が力発揮している時よりも大きかった (Wasaka et al., 2012)。この結果は運動制御に必要とされる体性感覚の情報が力発揮よりも脱力に関連しているらしい。おそらく、脱力時の運動出力と感覚情報のアンバランスが生じ、力を抜く時の制御は力を入れる時の制御よりも不正確であったと考えられる。

一方、力発揮課題の末梢要因を検討すると、主働筋全体の筋紡錘の活動は錘外筋の活動に比例するが (Burke et al., 1978)、5-10%MVC より小さい発揮筋力の等尺性収縮では、主働筋の 75%の筋紡錘が紡錘運動神経によって賦活されるが、残りの筋紡錘は脱負荷になると報告されている (Edin and Vallbo, 1990)。本研究では目標 peak force が 10%MVC, 20%MVC, 40%MVC であり、目標 valley force が 5%MVC, 10%MVC, 20%MVC であった。参加者が等尺性の力発揮した時に、その力発揮はおそらく α - γ 連関と β 運動ニューロンの働きによって錘外筋と錘内筋が共に収縮した (伊藤, 1985)。Peak force は valley force よりも相対的に強い錘外筋と錘内筋の活動になり、筋紡錘の脱負荷の割合が相対

的に低く、比較的正確な力の制御を可能にした。それに対して、valley force は peak force よりも相対的に弱い錘外筋と錘内筋の活動になり、筋紡錘の脱負荷の割合が相対的に高く、不正確な力制御をもたらしたと考えられる。

本研究の peak force と valley force の標準偏差は発揮筋力の増加に伴って増加し、peak force の変動係数も発揮筋力の増加を伴って増加した。しかし、valley force の変動係数は発揮筋力との線形関係を保持できなかった。多くの先行研究は力発揮、つまり peak force の増加に伴って、力の標準偏差が指数関数的に増加することを示した (Slifkin and Newell, 1999, 2000; Taylor et al., 2003)。しかしながら、先行研究 (Slifkin and Newell, 1999) は 5-95%MVC の範囲で示指の一定の発揮筋力を持続的に保持する課題と周期的力発揮を行い、力の標準偏差が発揮筋力に応じて指数関数的に増加したことを示した。彼らは発揮筋力が 30-40%MVC になった時に追加の運動単位を動員し、それ以上の力のレベルで発揮筋力を増加するために、運動単位の発射頻度を増加させたと考察した。しかし、本研究では、valley force の変動係数は低から中程度の力レベルを用いたが、その間においても valley force と力レベルの間に線形的な関係が観察されなかった。

一方、力制御とタイミングの関係は主として手指のタッピング運動で研究され、力とタイミングは概して独立に制御されているが (Keele et al., 1987)、両者の相互作用も知られている (Billon et al., 1996; Sternad et al., 2000)。等尺性力発揮課題を用いた先行研究 (Newell and Carlton, 1985; Carlton et al., 1993) は力とタイミングの変動における相互作用を検討している。たとえば、Carlton et al. (1993) は肘の分離的な等尺性力発揮課題を用いて、time-to-peak force の変化は力変動に影響し、力レベルの変化もタイミングの変動に影響し、力とタイミングは相互に影響し合うことを発見した。しかし、本実験では力レベルに伴って力の変動は増加したが、PPI と VVI の変動は変化しなかった。Carlton et al. と本研究の結果の違いは分離的力発揮課題と周期的力発揮で生じたと考えられる。しかし、本研究はタイミングが力制御に与える影響を検討していないので、その関係を確かめる必要がある。

Peak force あるいは valley force とタイミングの変動の相互作用について、VVI が PPI よりも大きい変動であり (図 22D)、peak force と valley force はタイミングに影響

響を与えた。したがって，“力を入れること”から“力を抜くこと”へ切り換える間隔であるWVIはその逆の繰り返しであるPPIよりも難しいタイミング制御であった。したがって，力制御そのものは“力を抜くことに”よって変動したが“力を入れること”から“力を抜くこと”へ切り替えると，力とタイミングの相互作用はタイミングの高い変動をもたらした。

第3章

両手協応運動における左右の力制御に与えるカレベルの影響

3.1. 目的

第3章では、運動パラメータである力とタイミングの制御を含む左右の手の協応運動を検討する。そして、この知見と第5章で行う個人間協応運動を比較することで、個人内協応運動の知見が個人間協応運動に発展できるかどうかを検討する。

両手協応の研究の多くは両手で交互に運動を行うと、両手の運動が時空間的に同じになり、両手運動が結合することを示した (Haken et al., 1985)。対照的に近年の研究では、Diedrichsen et al. (2007) は両手で一つのカーソルを目標に操作した時、目標到達時の手の位置が負の相関関係になり、一方の手の運動の誤差を他方の手で補正するような両手の誤差補正を発見した。両手運動の結合は2つの要素を1つの単位として制御することで自由度を減少させるが、両手運動の誤差補正は自由度を柔軟に利用している。このように2つの協応方略は対照的であるが、これらの2つの協応方略がどのように選択されるのかは未だに明らかでない。

その問題に対して、従来の研究はそれらの2つの協応方略がどのような要因に関連しているのかを検討した。たとえば、Ranganathan and Newell (2008) は両手で力発揮し、その総和を目標値に対して持続的に保持する課題 (持続的力保持課題) と分離的に一致する課題 (分離的力発揮課題) を行い、視覚情報が両手の協応方略に与える影響を検討した。視覚情報は力出力の時系列と目標値であった。その結果、両課題において、力の総和とその目標値をモニター上に提示した時、左右の力が負の相関関係になり、一方の力が強くなると他方の力が弱くなった (図 23A, B, C)。つまり、参加者は一方の力が強くなり過ぎて、力の総和の誤差が生じると、他方の力を弱くすることで誤差を補正した。しかし、モニター上の視覚情報を取り除くと、左右の力が正の相関関係になり、両手の力が同時に強くあるいは弱くなって結合された。したがって、視覚情報の有無によって両手の結合と誤差補正が決定された。

さらに, Hu et al. (2011) は両手で同時に力発揮し, その総和を一定の目標値に保持させる課題を行い, 視覚情報とカレベルの相互作用が両手の力発揮の関係に与える影響を検討した (図 24). その結果, 視覚情報の利用できる時では, カレベルの増加に伴って左右の力の負の相関 (誤差補正) が弱くなったが, 視覚情報を利用できない時では, カレベルの増加に伴って左右の力の正の相関 (結合) が強くなった. つまり, 左右の力発揮の関係は視覚情報とカレベルの相互作用に影響される. しかしながら, Hu et al. は2つのカレベルのみしか検討していないので, 本研究は両手で同時に力発揮し, その総和を2つの目標値に一致させる課題を行い, 4つのカレベルにおけるカレベルと視覚情報の相互作用を検討する. さらに, Hu et al. の課題では, タイミングを規定していな

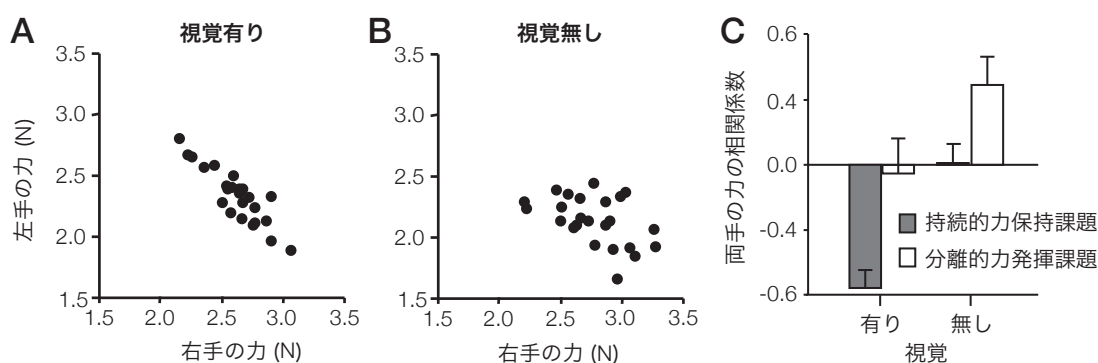


図 23. A: 両手の分離的力発揮課題における視覚情報が利用できる時の左右の力発揮の散布図 (Ranganathan and Newell, 2008). B: 視覚情報が利用できない時の左右の力発揮の散布図. この研究は両手で力発揮し, その総和を目標値に持続的に保持させる課題 (持続的力保持課題) と目標値に対して分離的に一致させる課題 (分離的力発揮課題) を行った. 両課題では参加者の発揮した両手の力の総和とその目標を提示する条件と視覚情報を取り除いた条件が設定された. 視覚情報は力出力の時系列とその目標値であり, 目標値は水平線で示された. C: 持続的力保持課題と分離的力発揮課題における両手の力発揮の相関係数. 重要な結果として, 持続的力保持課題と分離的力発揮課題共に, 視覚情報が利用できる時, 両手の力発揮が負の相関関係になり, 一方の力の誤差を他方で補正した. 対照的に, 視覚情報を取り除くと, 両手の力は正の相関関係になり, 両手の力が結合した.

いので、本研究は運動間隔を規定した周期的力発揮課題を用いることによって両手の力の制御だけでなく、両手のタイミングの制御を検討することを可能にした。

さらに、近年の uncontrolled manifold hypothesis (Latash et al., 2002b) と optimal feedback theory (Todorov and Jordan, 2002) は運動変動を課題パフォーマンスに影響するもの (task-relevant variance) としないもの (task-irrelevant variance) に分類している。その理論に基づいて、Latash らは4本指で分離的 (Varadhan et al. 2010)、周期的な (Latash et al., 2002a; Friedman et al., 2009) に力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を用いて、task-relevant variance と irrelevant variance が力の大きさや力の変化率に伴ってどのように変化するかを検討した。この研究では、task-relevant variance は力の総和の変動であり、task-irrelevant variance は力の個々の変動であった。その結果、力の変化率の増加に伴って、task-relevant variance

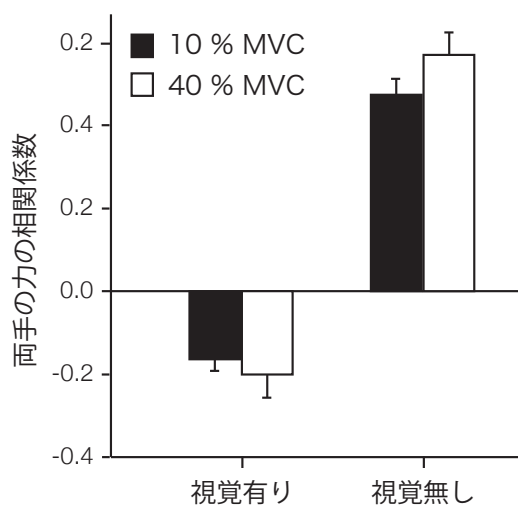


図 24. 視覚情報の有る時とない時の2つの力レベルにおける両手の力発揮の相関係数

(Hu et al., 2001). 参加者は10%MVCと40%MVCの2つの力レベルにおいて、両手で力発揮し、その総和を目標値に持続的に保持させた。モニターに両手の力の総和とその目標値を提示した条件とその視覚情報を取り除いた条件が設定された。その結果、視覚情報が利用できる時、両手の力の負の相関関係は力レベルの増加に伴って強くなった。視覚情報が取り除かれると、両手の力の正の相関関係は力レベルの増加に伴って強くなった。

は増加したが, task-irrelevant variance は変化しなかった. 対照的に, 力の増加に伴って, task-relevant variance は変化しなかったが, task-irrelevant variance は増加した. このような2つの分散に分解し, 検討することは相関関係で求めたような力発揮の協応関係がどのような要因で変化しているのかを理解するために重要であると考えられる. したがって, 本研究は力レベルに伴う両手の力の協応方略の変化が task-relevant variance と task-irrelevant variance のどちらの変化によって生じるのかを確かめた.

3.2 方法

3.2.1 手続き

参加者は右利きの10名の健康な男子大学生(平均 ± 標準偏差: 22.2 ± 1.2歳)である. 利き手はEdinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971)によって検査され, 右利きの参加者の一側優位性 (laterality) の得点はすべて+100であった. すべての参加者から実験に関するインフォームド・コンセントを得た.

参加者は2つのロードセルに向かって椅座位をとり, 手掌を机から高さ6cmの支持台の上に置いた. その体勢から, 参加者は中指指節関節を支点に左右の示指の先端掌側部をロードセルに付けたままで周期的な等尺性力発揮を行った(図25A). 実験は両手課題,

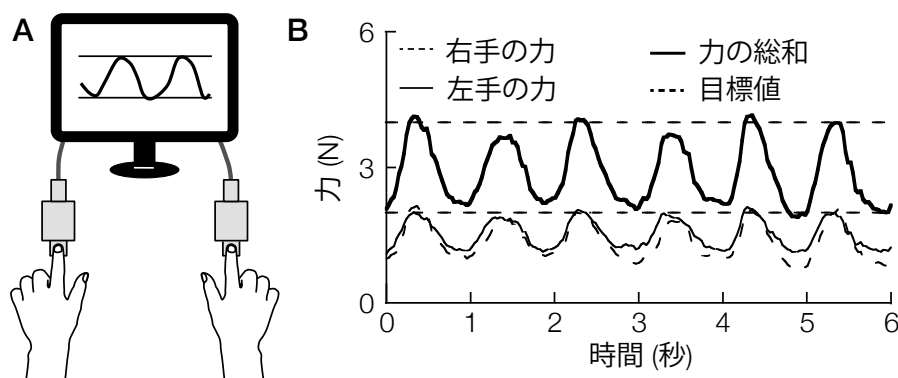


図25. A: 両手協応課題の実験設定. 両手同時に力発揮し, その総和を目標の peak force と valley force に一致させる. モニターには力発揮の総和と2つの目標の peak force と valley force を提示した. したがって, 実験参加者は両手個々の力発揮を見ることは出来ない. B: 両手課題の練習試行におけるデータサンプル.

右手課題, 左手課題を行った. 両手課題は左右の示指で同時に力発揮を行い, その総和が目標の peak force と valley force になるように力発揮した. 右手課題と左手課題は目標の peak force と valley force に対して左右の示指で力発揮した. 実験は両手同時 (86.41 ± 4.80 N), 右手 (右手: 45.08 ± 2.32 N), 左手 (左手: 42.12 ± 2.82 N) による最大随意収縮 (MVC) を計測し, 各条件の目標発揮筋力を設定した. 各課題において, 参加者は4つの条件を行い, カレベル5-2.5は peak force と valley force の目標をそれぞれ5% MVC と 2.5% MVC に設定し, 以下同様にカレベル10-5, 20-10, 40-20 を設定した. PPI と VVI の目標値は1000ms に設定し, 周期的に力発揮した (図 25B). 課題の順序による交互作用を避けるために, 参加者は課題と条件をランダムに遂行した. 各条件において, 視覚情報を提示する試行とそれを取り除いた試行を行った. 視覚有り試行は60秒間4回行い, 目標の力発揮と運動間隔を習得するように教示した. 力に関するフィードバックはパーソナル・コンピュータのモニター上に目標の peak force と valley force を水平線で示し, 参加者が発揮した力と力の目標値の差異を視覚化した. 目標の運動間隔はメトロノームを介して音刺激を提示し, 参加者は音刺激に peak force と valley force を同期した. その後, 視覚無し試行は力のフィードバックと音刺激を提示せず, 習得した運動を60秒間1回再生した.

2) 装置と測定

実験装置やその測定は第2章の実験と同じものを用いた.

3) データ解析

分析は視覚有り試行の4回目と視覚無し試行1回における各参加者の60回の力発揮からなり, peak force, valley force, PPI, VVI の標準偏差を算出した. 両手課題において, 左右の力発揮の関係を検討するため, peak force と valley force の左右の力の相関係数を算出した.

相関係数の変化が課題パフォーマンスに関連する分散とそうでない分散のどちらに依存するのかを検討するために, task-relevant variance と task-irrelevant variance を算出した. Task-relevant variance は両手の力の総和の分散であり, task-irrelevant

variance は左右の力の差の分散である。

時間的な結合は両手の力の relative phase を用いて測定した (Scholz and Kelso, 1989). 位相とは周期を角度で表したものであるが, relative phase は左右の運動の位相の差である. つまり, 位相差が 0° になると両手の力発揮が同位相 (両手の力発揮が時間的に結合) になり, 180° になると両手の力発揮が逆位相になる. Relative phase の分析は上述の分析方法と異なり, 一試行全体の力-時間系列 (データサンプル: 100 Hz) を用いた. その Relative phase は $\Phi = \theta_R - \theta_L = \tan^{-1}[(dX_R/dt)/X_R] - \tan^{-1}[(dX_L/dt)/X_L]$ の式によって求める. この時, X_R と X_L は右手と左手の力発揮であり, θ は力発揮の位相である. dX/dt は左右の力発揮を加速度として標準化した. 続いて, relative phase の不安定さは relative phase の標準偏差によって評価し, relative phase の標準偏差は両手の力の時間的結合を検討するために用いた.

4) 統計処理

左右の力の相関係数はFisherのZ変換を行ってから統計分析に用いた. 課題に関して, 全ての従属変数において右手課題と左手課題の間には差異がなかったため, 右手課題 (n=10) と左手課題 (n=10) は片手課題 (計, n=20) として統計分析を行った. 両手課題における左右の力の相関係数に関する統計的分析は 2 (試行: 視覚有り試行と視覚無し試行) \times 4 (力レベル: 5-2.5, 10-5, 20-10, 40-20) \times 2 (力: peak force と valley force) の三要因分散分析を行った. Task-relevant variance と task-irrelevant variance に関する統計分析は 2 (試行) \times 2 (課題: 両手課題と片手課題) \times 2 (力) \times 2 (分散: task-relevant variance と task-irrelevant variance) の四要因分散分析を行った. Peak force と valley force, PPI と VWI の標準偏差に関する統計分析は 2 (試行) \times 2 (課題) \times 4 (力レベル) \times 2 (力あるいは間隔: PPI と VWI) の四要因分散分析を行った. 全ての統計で交互作用の有意差が認められた時には Tukey の HSD (honestly significant difference) による多重比較検定を行った. さらに, それらの分析は必要に応じて各要因を個別に分析した.

3.3 結果

1) 両手の力発揮の協応方略

図 26 には、全参加者の 60 回の左右の力の関係を示した。視覚無し試行では左右の力は強い正の相関関係を示した。一方、視覚有り試行では、カレベル 5-2.5 の左右の力発揮は負の相関関係を示したが、カレベル 40-20 のそれは無相関のようであった。さらに、図 27 には視覚有り試行 (B) と視覚無し試行 (C) における左右の力の相関係数を示した。分析の結果、視覚無し試行は視覚有り試行よりも左右の力発揮が強い正の相関を示した ($F(1, 144)=241.80, p<0.001$)。さらに、カレベルと試行に有意な交互作用が観察された

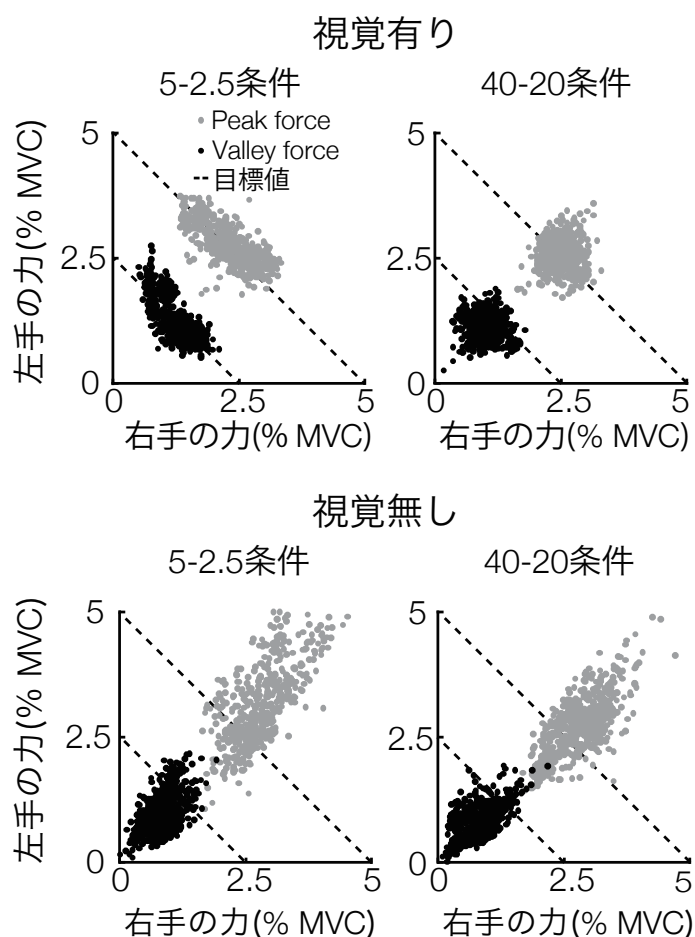


図 26. 全ての参加者の 50 回の力発揮 (1 試行) における両者の力発揮の散布図。破線は目標発揮筋力を示し、その破線の方角における変動は課題パフォーマンスに影響しない両手の力配分の変動である。

ので($F(1, 144)=3.91, p<0.05$), 試行を個別に検討した結果, 視覚無し試行ではカレベルに有意な主効果がなかった. それに対して, 視覚有り試行ではカレベル5-2.5が他のカレベルよりも強い負の相関を示し, カレベル20-10とカレベル40-20はカレベル10-5よりも強い正の相関を示した ($F(1, 144)=26.60, p<0.001$). したがって, カレベルの増加に伴って両手の力の相関関係は負の方向から正の方向に変化し, 両手の力の協応方略は誤差補正から結合に変化した.

2) Task-relevant variance と task-irrelevant variance

図28には視覚有り試行(AとB)と無し試行(CとD)におけるpeak force(AとC)とvalley force(BとD)のtask-relevant varianceとtask-irrelevant varianceを示した. 分析の結果, peak forceとvalley force共に, 視覚有り試行は無しの試行よりもtask-relevant varianceとtask-irrelevant varianceが大きかった ($F(3, 298)=7.643, p<0.01$). 重要な結果として, 両分散はカレベルの増加に伴って増加しており ($F(3, 360)=7.66, p<0.001$), カレベルの増加に伴って左右の力配分の変動が大きくなった. さらに, 視覚無し試行では, 全てのカレベルにわたってtask-relevant varianceはtask-irrelevant varianceよりも大きかった ($F(3, 180)=8.22, p<0.005$). 視覚有り

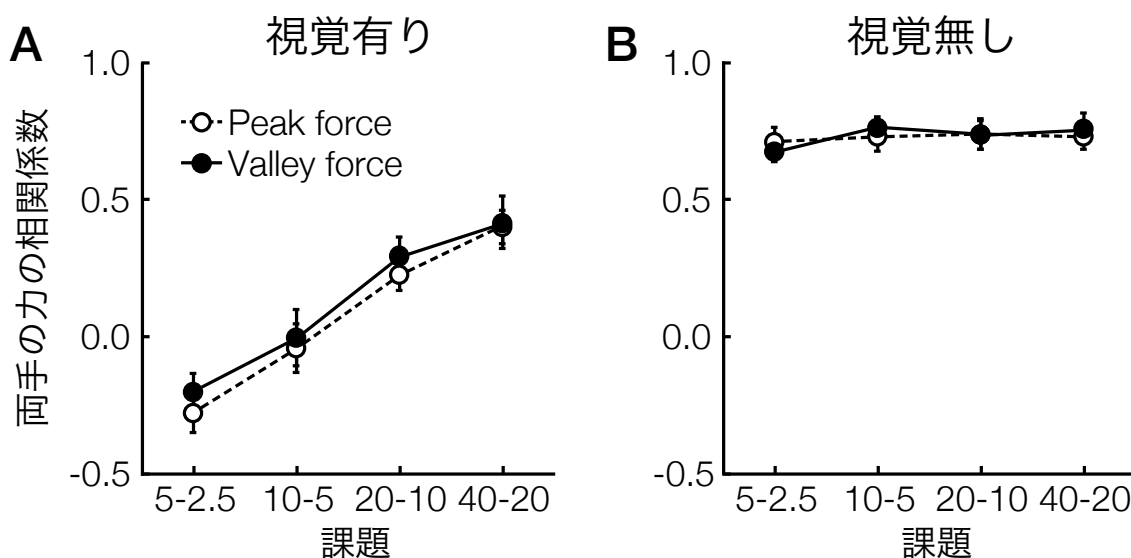


図27. 4つのカレベルにおける両手の力の相関係数. 各参加者から計算された相関係数は全ペアにわたって平均された. エラーバーは標準誤差を示した.

試行では、5-2.5 条件では task-irrelevant variance は task-relevant variance よりも大きかった ($F(1, 36)=7.625, p<0.01$) が、カレベル 20-10 ($F(1, 36)=8.221, p<0.01$) と 40-20 ($F(1, 36)=20.695, p<0.001$) では、task-relevant variance の方が task-irrelevant variance よりも大きかった。したがって、相関係数の結果と同様に、視覚情報が利用できる時、弱いカレベルでは左右の力配分を変動させて力の総和を補正していたが、強いカレベルでは左右の力を結合させた。

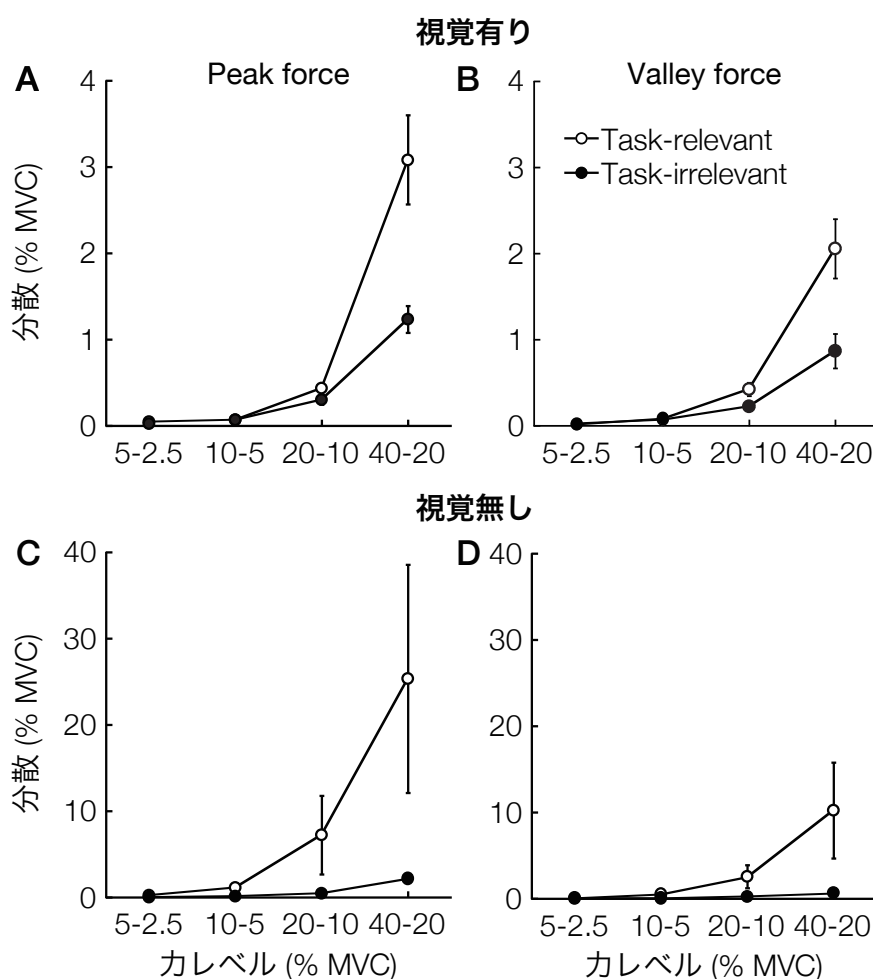


図 28. 4つのカレベルにおける両手の力の task-relevant variance と task-irrelevant variance. Task-relevant variance は両手の力の総和の分散であり、課題パフォーマンスに影響を及ぼす。Task-irrelevant variance は両手の力の差異の分散であり、課題パフォーマンスに影響しない両手の力の配分を変動である。エラーバーは標準誤差を示した。

3) 両手の力発揮の時間的結合

図 29 には視覚有り試行と視覚無し試行における両手の力-時間系列の relative phase の標準偏差を示した。両試行共に，relative phase の標準偏差はカレベルに伴って減少し ($F(3, 80) = 63.30, p < 0.001$)，視覚情報の有無にかかわらず，両手の時間的結合はカレベルに伴って増加した。したがって，視覚情報を提示した時では両手の力の結合と同様に，その時間的結合は増加したが，視覚情報を取り除くと両手の力の結合はカレベルに伴って変化しておらず (図 27B)，時間的結合と力の結合は異なる傾向を示した。

4) 力の変動

図 30 には片手課題と両手課題におけるにおける peak force と valley force の標準偏差を示した。その結果，カレベルの増加に伴って力の標準偏差は増加した ($F(3, 448) = 108.85, p < 0.001$)。視覚有り試行 (A) では両手課題は片手課題よりも力の標準偏差が小さかったが ($F(1, 448) = 25.24, p < 0.001$)，視覚無し試行 (B) では有意な主効

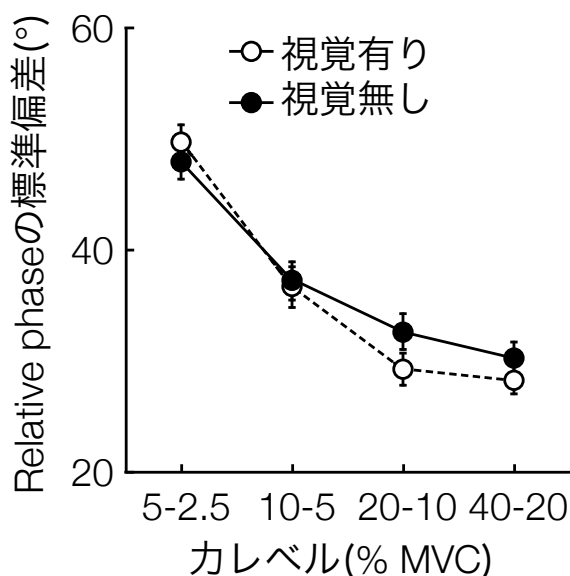


図 29. 両手の力-時間系列における Relative phase の標準偏差. Relative phase は 60 回の力発揮の力-時間系列から計算された。したがって，力-時間系列には peak force と valley force も含めて計算するので，peak force と valley force の分類はない。エラーバーは標準誤差を示した。

果が観察されなかった。両手の力の誤差補正は視覚情報を提示した時のみ生じていたので、両手課題の力の安定は両手の力の誤差補正によって生じたと考えられる。

5) 運動間隔の変動

図 30 には視覚有り試行 (C) と視覚無し試行 (D) における PPI と WI の標準偏差を示した。分散分析の結果、視覚情報の有無にかかわらず、両手課題は片手課題よりも PPI と WI の標準偏差が小さかった ($F(1, 448) = 25.24, p < 0.01$)。しかし、力レベルの主効果は観察されず、力の変動と異なり、タイミングの変動は力レベルの影響を受けなかった。

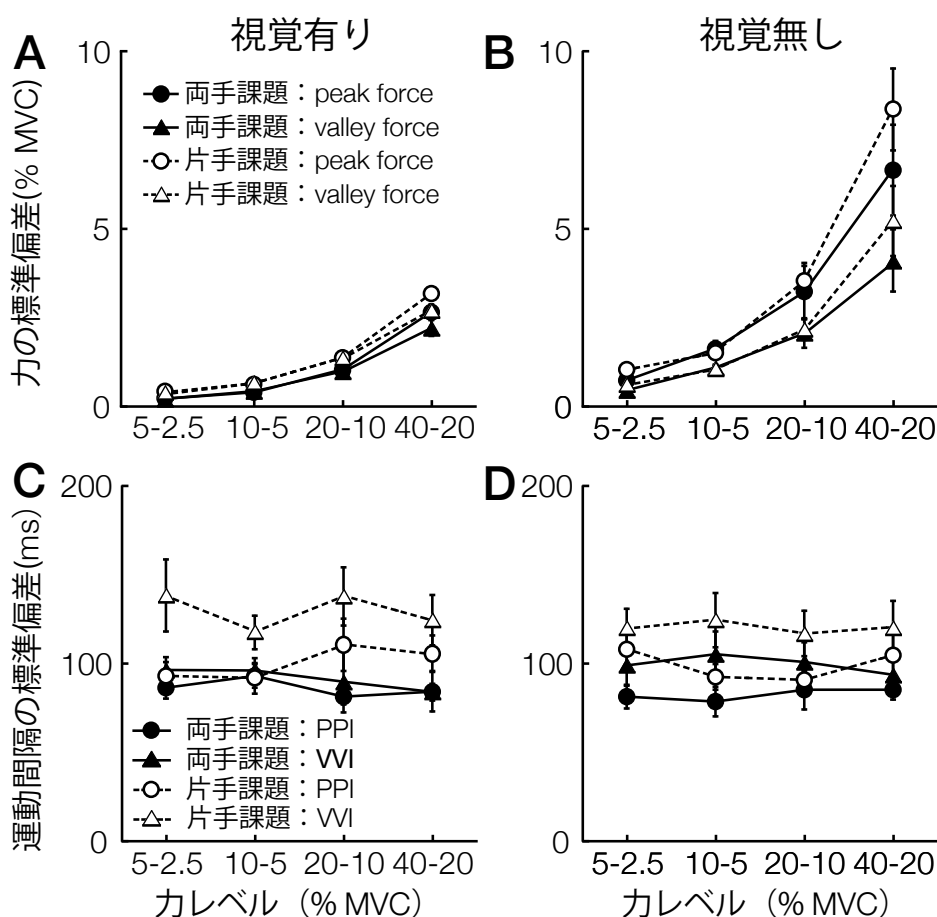


図 30. 両手課題と片手課題における力と運動間隔の標準偏差。両手の課題における力と運動間隔の標準偏差は力の総和から求めた。エラーバーは標準誤差を示した。

3.4 考察

本研究の新たな知見は視覚情報を利用できる時、カレベルの増加に伴って両手の力が負の相関関係から正の相関関係に変化したことである (図 27A). つまり、両手の力の制御方略はカレベルの増加に伴って力の誤差補正から力の結合に変化した. しかし、視覚情報を取り除くと、全てのカレベルにわたって、左右の力が強い正の相関関係になった (図 27B). 一方、両手の時間的結合は視覚情報の有無にかかわらず、カレベルの増加に伴って強くなっており (図 29)、この結果は両手の力の結合の傾向と一致しなかった. Ranganathan and Newell (2008) は1つのカレベルにおいて、両手で力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を行った. その結果、視覚情報を利用できる時、左右の力は負の相関関係になったが、視覚情報を取り除くと、左右の力は正の相関関係になった (図 23). さらに、Hu et al. (2011) は持続的力保持課題を用いて、視覚情報の利用できる時、カレベルの増加に伴って左右の力の負の相関関係は強くなった (図 24). 対照的に、視覚情報を取り除くと、カレベルの増加に伴って左右の正の相関関係が強くなった. Hu et al. の結果とは異なり、本研究の周期的力発揮では、視覚情報の利用できる時はカレベルの増加に伴って左右の力が負の相関関係から正の相関関係へ大きく変化した. また、視覚情報を利用できない時には、カレベルに関わらず、両手の力が強く結合した. これらの結果は本研究で用いた周期的力発揮は Hu et al. の用いた両手の持続的力保持課題よりも両手結合が強いことを示唆した.

視覚情報を提示した時の弱いカレベルにおける両手の力の誤差補正は Uncontrolled manifold hypothesis (Domkin et al. 2002; Latash et al. 2002b) と minimal intervention principle (Todorov, 2004; Todorov and Jordan, 2002; Valero-Cuevas et al., 2009) によって予想されたものである. それらの法則では、協応運動に含まれる分散において課題の目的達成に関与する分散 (task-relevant variance) と影響のない分散 (task-irrelevant variance) に分類し、task-irrelevant variance が task-relevant variance よりも大きくなると予測した. 本研究では、弱い力発揮では、課題のパフォーマンスに関連しない左右の力配分の変動が課題に影響する左右の力の総和の変動よりも大きくなっており、uncontrolled manifold hypothesis や minimal intervention principle を支持する結果が得られた. しかしながら、それらの法則に反して、本研究

は強いカレベルで、左右の力が正の相関関係になり、左右の力が結合したことを示した。したがって、本研究の新たな知見は視覚情報を利用できる時の両手の力制御における制御方略が2つの法則のみで予測できないことを示した。

なぜ、2つの法則に反して、左右の力の結合が生じたのだろうか？この問題に対して、相関係数を理解するために2つの分散を検討した結果、視覚情報の有無に関わらず、task-relevant variance と task-irrelevant variance はカレベルの増加に伴って増加した(図28)。しかし視覚情報の利用できる時、弱いカレベルでは task-irrelevant variance が task-relevant variance よりも大きかったが、強いカレベルでは逆の結果となった(図28AとB)。したがって、カレベルに伴って両手の力配分の変動は変化した、力の総和の変動は著しく大きくなった。その結果に関連して、従来の両手運動の研究は神経系が両手運動の結合を優先させる傾向を持つと報告している(Kelso, 1979)。たとえば、Kelso et al. (1979)は参加者に両手の示指の交互運動を要求した時、運動速度を増加させると、両手運動は同時になり、結合した。その理由として、左右の結合の状態は高い安定性を持つことが考えられる(Ranganathan and Newell, 2009)。つまり、Kelso et al.の研究では、運動速度の増加に伴って、両手運動が不安定になり、それを克服するために安定する左右の力の結合が選択されたのかもしれない。本研究では、同じカレベルにおける分析を行った結果、第1章と同様に valley force は peak force よりも変動が大きく、左右の力の相関係数が正の方向に強かった。したがって、左右の結合が両手の不安定な制御を克服するために選択され、左右の力の制御方略が力変動にしたがって決定されたと考えられる。さらに、脳梁を介した大脳半球間の情報交換はカレベルの増加に伴って増加したので、高いカレベルでは左右の力の結合が生じたと考えられる(Diedrichsen et al., 2003)。

本研究の結果とは異なり、Hu et al. (2011)の研究では、視覚情報を利用できる時、カレベルの増加に伴って両手の力の負の相関関係が強くなった。Hu et al. (2011)の用いた持続的力保持課題は自己ペースの運動であるが、本研究の周期的力発揮課題は規定された運動間隔で周期的に力発揮しなければならない。Hu et al.の研究では、視覚情報が利用できる時、カレベルの増加に伴って負の相関関係が弱くなったが、正の相関関係にはならなかった。対照的に、運動課題の目標を達成するために運動速度がパフォー

マンスを拘束し、参加者は視覚情報が利用できる時でもカレベルが増加すると両手の力を結合させて力を安定させたと考えられる。

一方、本研究はカレベルや視覚情報の有無にかかわらず、両手課題は片手課題よりも運動間隔の変動が小さいことを示した。Helmuth and Ivry (1996) は両手同時タッピングのタイミングの変動が片手タッピングのそれよりも小さいことを示し、両手のタイマーを結合させることで両手運動が安定したらしい。しかし、本研究では、視覚情報が提示された時、両手課題は片手課題よりも力変動が小さかったが、視覚情報が取り除かれると、その差は無くなった。さらに、両手の時間的結合は視覚情報に関わらず、カレベルの増加に伴って強くなった。したがって、タイミングの変動は力の変動と異なる傾向を示し、異なる系で制御されていたと考えられる。しかし、タイミングが力制御に与える影響は本研究で検討していないので、次の章で検討する。

概して、第3章の実験は両手の協応方略を決定する要因を明らかにした。視覚情報が利用できる時、カレベルの増加に伴って、両手の力の相関関係は負の方向から正の方向に変化し、両手の力の制御方略は誤差補正から結合に変化した。また、同じカレベルにおいて、valley force は peak force よりも変動が大きかったが、両手の相関は正の方向に強かった。これらの結果は力変動の増加に伴って両手の力は結合したことを示唆した。

第4章

両手協応運動における左右の力制御に与える運動速度の影響

4.1 目的

Rinkenauer et al. (2001) は両手で異なる強さで力発揮を行った時、左右の力発揮時間が同じになることを示した。しかし、両手で異なる時間で力発揮を行った時、左右の力発揮の時間だけでなく、その力発揮も左右で同じになった。つまり、力制御がタイミングに影響しないが、タイミングが力制御に影響した。これらの結果から、Rinkenauer et al. (2001) はタイミングが力制御を支配するような階層性の存在を示唆した。しかし、Rinkenauer et al. (2001) は力やタイミングの結合あるいは分離の協応方略を検討したが、タイミングの変化が力の誤差補正に与える影響を検討していない。

さらに、Hu et al. (2011) と第3章の実験は両手の力の総和を持続的あるいは周期的に目標値に一致させる課題を用いて、カレベルが両手の誤差補正に与える影響を検討した。その結果、視覚情報を利用できる時、カレベルの増加に伴って、両手の負の相関関係は弱くなることを示した。さらに、第3章の周期的力発揮課題では、視覚情報を利用できる時、カレベルの増加に伴って両手の力は負の相関関係から、正の相関関係に変化した。しかし、実際の運動場面では、様々な力の強さだけでなく、様々な速さで両手運動を行う。第3章は全てのカレベルにおいて目標の運動間隔を1000 msに固定しているので運動の間隔が両手の協応方略に与える影響を検討していない。したがって、第4章は第3章と同様の課題を用いて、両手の正確な力制御に関与する両手の誤差補正がタイミングの変化に伴ってどのように変化するかを検証する。

Inui et al. (1998) と Inui and Ichihara (2001) は片手のタッピング課題を用いて短い運動間隔では、力と運動間隔は正の相関関係になったが、長い運動間隔では、それらの相関関係は観察されなかった。Steglich et al. (2001) は参加者に両手で同時に力発揮し、両手で異なる目標値に一致させるように教示した。その結果、両手の力発揮は正の相関関係を示して結合した。しかし、目標値を提示してから運動を開始するまでの準備時間の増加に伴って両手の力の正の相関は弱くなった。これらの結果は、参加者

は運動速度の増加に伴って、2つのパラメータや両手の運動を結合させたことを示した。したがって、本研究は両手で同時に力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を用いて、長い運動間隔では、両手の力は負の相関関係を示すが、短い運動間隔では正の相関関係になることを確かめた。

さらに、Latash et al. (2002a) は人差指と中指で分離的あるいは周期的に力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を行った。その結果、遅い運動速度では task-irrelevant variance (2本指個々の力の変動) が task-relevant variance (力の総和の変動) よりも大きくなり、参加者は課題に影響しない個々の指の力配分を変動させることで力の総和を補正していた。しかし、速い運動速度では task-irrelevant variance と task-relevant variance の差が小さくなった。一方、第3章の両手協応課題の実験では、両手の力の task-relevant variance と task-irrelevant variance が共に力レベルの増加に伴って増加した。しかし、第3章では、タイミングが両手の力の task-relevant variance と task-irrelevant variance にどのように影響を与えるのかを検討していない。したがって、本研究は運動間隔に伴う力の制御方略の変化が task-relevant variance と task-irrelevant variance のどちらによって生じるのかを確かめる。本研究の周期的力発揮課題では、運動間隔の増加に伴って、フィードバックを利用して力の配分を変動させる時間が増加するので、task-irrelevant variance は増加するだろう。

4.2 方法

1) 参加者

参加者は右利きの10名の健康な男子大学生(平均 ± 標準誤差: 22.2 ± 0.42歳)である。利き手はEdinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971)によって検査され、右利きの参加者の一側優位性 (laterality) の得点はすべて+100であった。すべての参加者から実験に関するインフォームド・コンセントを得た。

2) 実験課題と実験手続き

参加者は2つロードセルに向かって椅座位をとり、手掌を机から高さ6cmの支持台の

上に置いた。その体勢から、参加者は中手指節関節を支点に左右の示指の先端掌側部をロードセルに付けたままで周期的な等尺性力発揮を行った (図 25A)。運動課題は左右の示指で同時に力発揮を行い、その総和が目標の peak force と valley force になるように力発揮することであった。最初に、実験は両手同時 (84.17 ± 4.48 N) による最大随意収縮 (MVC) を計測し、各条件の目標発揮筋力を設定した。条件は4つ設定し、500条件は peak-to-peak interval (PPI) と valley-to-valley interval (VVI) の目標値を 500ms に設定し、同様に 750 条件, 1000 条件, 1250 条件, 1500 条件を設定した。第3章を参考に、全ての条件において目標の peak force と valley force はそれぞれ MVC の 10% と 5% に設定し、参加者はその間で周期的に力発揮した。課題の順序による交互作用を避けるために、参加者は課題と条件をランダムに遂行した。

各条件において、メトロノームによる音刺激を提示する試行 (音有り試行) とそれを取り除いた試行 (音無し試行) を行った。音有り試行は 30 秒間 4 回行い、目標の運動間隔を習得するように教示した。目標の運動間隔はメトロノームを介して音刺激を提示し、参加者は音刺激に peak force と valley force を同期した。力に関するフィードバックはパーソナル・コンピュータのモニター上に目標の peak force と valley force を水平線で示し、参加者が発揮した力と力の目標値の差異を視覚化した。その後、音無し試行は音刺激を提示せず、力に関するフィードバックのみで習得した運動間隔を 30 秒間 1 回再生した。

3) 装置と測定

実験装置と測定は第2章の実験と同様である。

4) データ解析

分析は音有り試行の4回目と音無し試行における各参加者の30回の力発揮からなり、peak force, valley force, PPI, VVI の標準偏差を算出した。左右の力発揮の関係を検討するため、peak force と valley force の左右の力の相関係数を算出した。相関係数の変化が課題パフォーマンスに関連する分散とそうでない分散のどちらに依存するのかを検討するために、task-relevant variance と task-irrelevant variance を算出した。

両手の力の時間的結合を検討するために、両手の力の relative phase の標準偏差が算出された (Scholz and Kelso, 1989).

左右の力の相関係数は Fisher の Z 変換を行ってから統計分析に用いた。両手の力の相関係数, peak force と valley force または PPI と WI の標準偏差に関する統計的分析は 2 (試行: 音有り試行と音無し試行) × 5 (条件: 500 ms, 750 ms, 1000 ms, 1250 ms, 1500 ms) × 2 (力: peak force と valley force または間隔: PPI と WI) の三要因分散分析を行った。Task-relevant variance と task-irrelevant variance に関する統計的分析は 2 (試行) × 5 (条件) × 2 (力) × 2 (分散: task-relevant variance と task-irrelevant variance) Relative phase に関する統計的分析は 2 (試行) × 5 (条件) の二要因分散分析を行った。統計的有意差水準は 5% に設定された。

従属変数と運動間隔の線形あるいは曲線関係を検討するために、全参加者にわたる従属変数の平均値と運動間隔の間で線形回帰分析あるいは二次曲線回帰分析を行った。二次回帰曲線の方程式は $y = ax + bx^2 + c$ であり、 a は一次方程式 (傾き), b は二次方程式, c は切片であった。各従属変数には最初に二次曲線の回帰分析が行われ、二次方程式が有意であった時、二次曲線回帰が採用されたが、そうでない時、線形回帰が実行された。

4.3 結果

本研究の重要な結果として、音刺激の有無に関わらず 500–700 ms では両手の力が正の相関関係になったが、1000–1500 ms では負の相関関係になった。二次曲線の回帰分析を行った結果、1250 ms で両手の力の負の相関関係が最も強くなったが、1250 ms から離れると両手の力の相関係数が正の方向に強くなった。したがって、1250 ms で両手の力の誤差補正は最も強くなったが、1250 ms から離れると両手の力は結合した。

1) 両手の力発揮の関係

左右の力発揮の関係を検討するために、図 31 には全ての参加者の左右の力の散布図を示した。音有り試行と音無し試行共に、1000–1500 ms では、左右の力発揮は負の相関関係を示したが、500 ms では正の相関を示した。運動間隔の減少に伴って両手の力発揮の相関関係は負の方向から正の方向に移行した。さらに、図 32 は音有り試行 (A) と音無

し試行 (B) の4つの運動間隔における両手の力の相関係数を示した。分析の結果、音有り試行は音無し試行よりも相関が正の方向に強く ($F(1, 180)=18.55, p<0.001$), valley force は peak force よりも相関が正の方向に強かった ($F(1, 180)=4.374, p<0.05$)。500条件と750条件は正の相関を示し、1000条件、1250条件、1500条件は負の相関を示した ($F(1, 180)=149.06, p<0.001$)。さらに、全ての条件にわたって二次曲線の回帰分析を行った結果、音有り試行 (peak force, $r^2=0.980, p<0.019$; valley force, $r^2=0.977, p<0.05$) と音無し試行 (peak force, $r^2=0.969, p>0.05$; valley force, $r^2=0.994, p>0.01$) において、相関係数と運動間隔の間に有意な曲線関係が認められた。その曲線に関して、左右の力の相関が運動間隔1250msの時でも最も負の方向に強くなったが、その運動間隔から離れると、左右の力の相関は正の方向に強くなった。したがって、左右の力の誤差補正は1250msで最も強くなったが、その運動間隔から逸脱すると、左右の力は結合した。

2) 力の標準偏差

さらに、力変動の視点から検討するために、図32には音有り試行 (C) と音無し試行

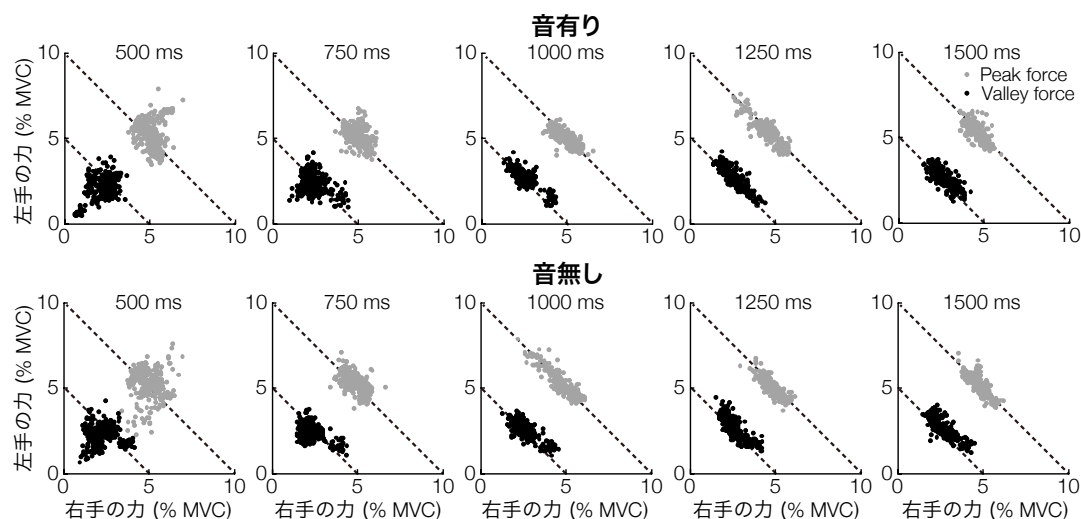


図31. 全ての参加者の60回の力発揮(1試行)における両者の力発揮の散布図。破線は目標発揮筋力を示し、その破線の方向における変動は課題パフォーマンスに影響しない。

(D) の力の総和の標準偏差を示した。二次曲線の回帰分析の結果、力の相関係数と誤差の結果と対応して、音有り試行 (peak force, $r^2 = 0.992$, $p > 0.01$; valley force, $r^2 = 0.955$, $p > 0.05$) と音無し試行 (peak force, $r^2 = 0.999$, $p > 0.05$; valley force, $r^2 = 0.978$, $p > 0.05$) 共に、5つの条件にわたって力の標準偏差は有意な曲線関係が認められ、1250ms で最も力の変動が小さくなったが、1250ms から離れると力の変動が大きくなった。

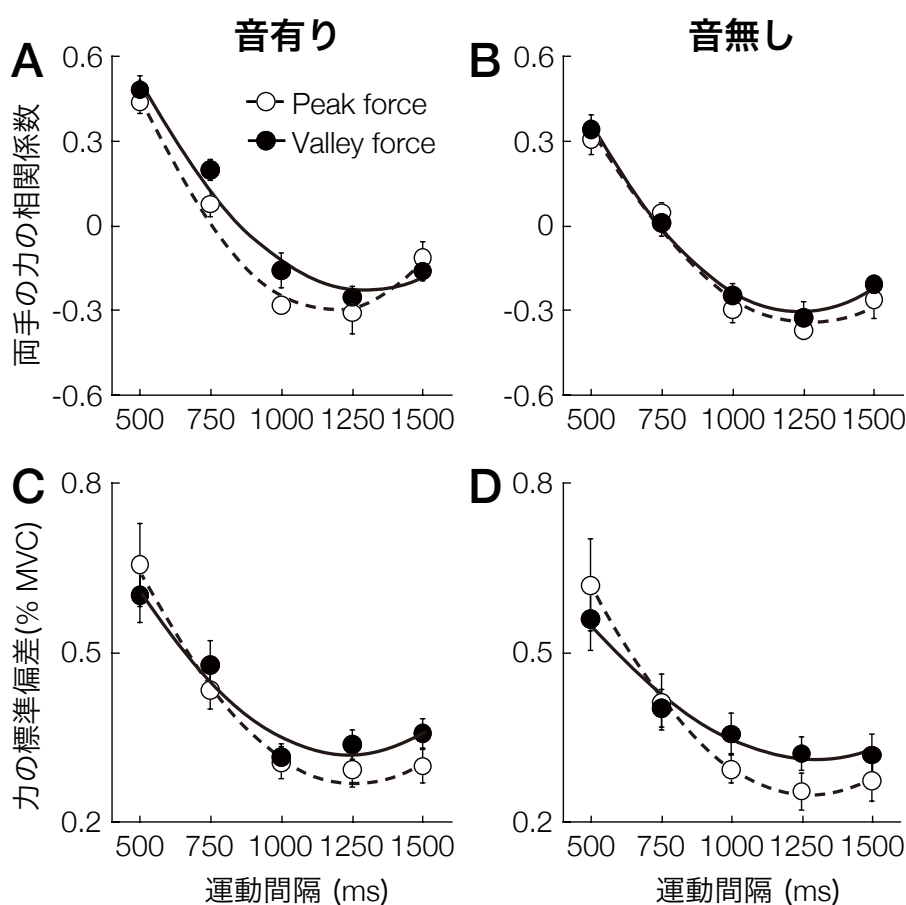


図 32. 音有り試行 (A) と音無し試行 (B) の 4 つの運動間隔における両手の peak force と valley force の相関係数. 音有り試行 (A) と音無し試行 (B) の 4 つの運動間隔における力の標準偏差. 曲線は二次回帰曲線を示した. その二次回帰曲線の方程式は $y = ax + bx^2 + c$ であり, a は線形方程式 (傾き, 一次方程式), b は二次方程式, c は切片であった.

3) Task-relevant variance と task-irrelevant variance

相関係数の変化が task-relevant variance と task-irrelevant variance のどちらの変化によって生じたのかを確かめるために、図 33 は 5 つの運動間隔における peak force と valley force の 2 つの分散を示した。分散分析の結果、分散に有意な主効果 ($F(1, 360)=16.40$, $p<0.0001$) と条件と分散の間に有意な交互作用が観察された ($F(4, 360)=22.19$, $p<0.0001$)。Task-irrelevant variance は運動間隔の有意な主効果が観察

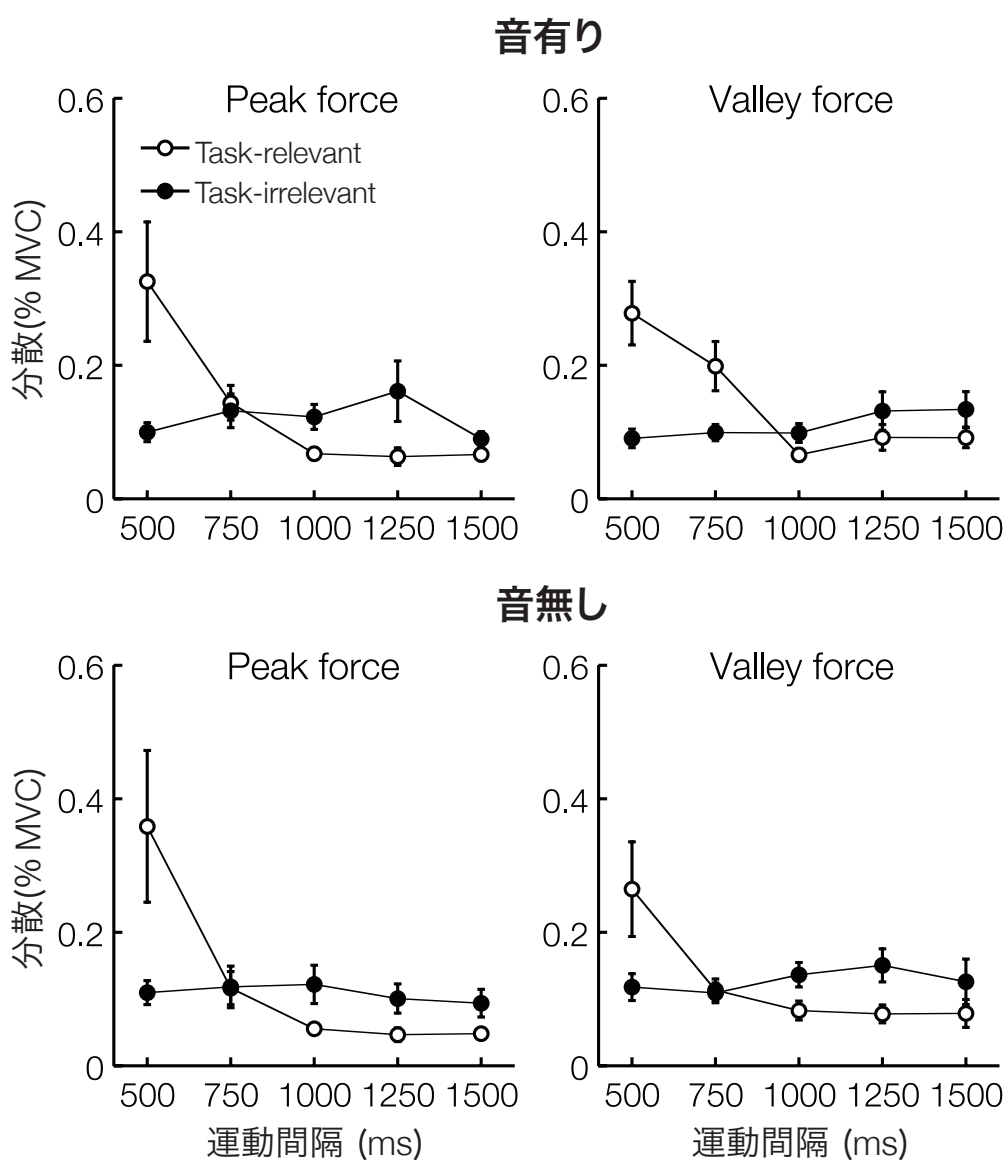


図 33. 4 つの運動間隔における左右の力の task-relevant variance (総和の分散) と task-irrelevant variance (力配分の分散).

されなかったが、task-relevant variance は500msの方が他の運動間隔よりも大きかった($F(1, 180)=25.46, p<0.0001$)。これらの結果は運動間隔に伴う相関係数の変化は両手の力配分の変動 (task-irrelevant variance) でなく、力の総和の変動における変化によって生じた。

4) Relative phase の標準偏差

左右の時間的結合を検討するために、図34には音有り試行 (C) と音無し試行 (D) における左右の relative phase の標準偏差を示した。線形回帰分析を行った結果、音有り試行 ($r^2 = 0.846, p < 0.001$) と音無し試行 ($r^2 = 0.826, p < 0.05$) 共に、relative phase の標準偏差は運動間隔の増加に伴って減少し、両手の結合は弱くなった。

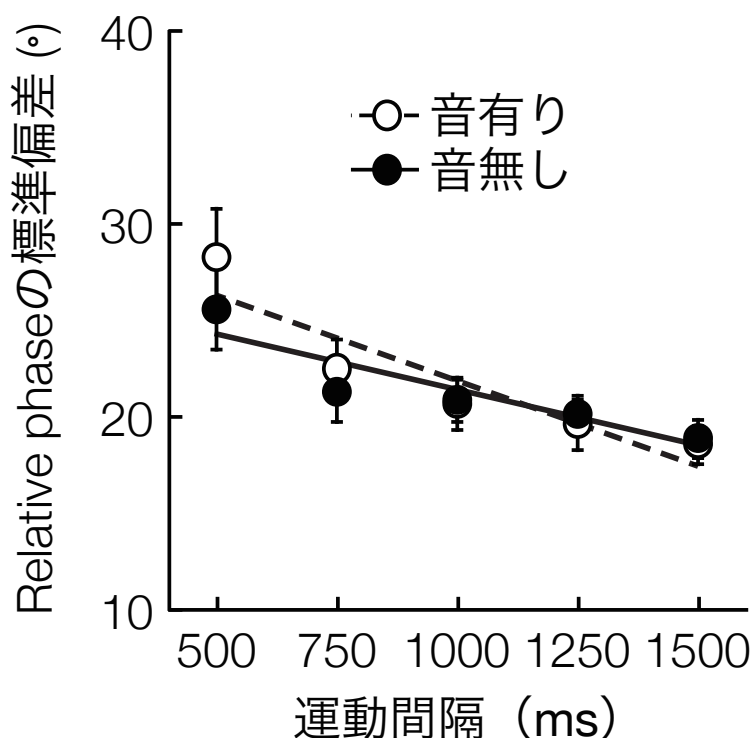


図34. 両手の力-時間系列における relative phase の標準偏差。実線と点線は5つの運動間隔に亘る Peak-to-peak interval と valley-to-valley interval における回帰直線であった。

5) タイミングの変動

タイミングの変動を検討するために、図 35 には音有り試行 (C) と音無し試行 (D) における PPI と VVI の標準偏差を示した。線形回帰を行うと、音有り試行 (peak force, $r^2 = 0.920$, $p > 0.01$; valley force, $r^2 = 0.954$, $p < 0.005$) と音無し試行 (peak force, $r^2 = 0.960$, $p < 0.005$; valley force, $r^2 = 0.971$, $p < 0.05$) において、タイミングの変動は運動間隔の増加に伴って増加した。

4.4 考察

1) 両手の力の協応方略

第 3 章の実験 (Masumoto and Inui, 2012) は両手で同時に力発揮し、その総和を目標値に対して周期的に一致させる課題を用いて、カレベルが両手の力の制御方略に与える影響を検討した。その結果、視覚情報の利用できる時、弱いカレベルでは左右の力が負の相関関係になり、両手の力の誤差補正が生じた。しかし、カレベルの増加に伴って左右の力が正の相関関係になり、両手の力が結合した。さらに、valley force は peak force よりも変動が大きくなり、両手の力の相関関係が正の方向に強かった。これらの結果から、3 章の実験では、力変動の増加に伴って左右の力の結合が強くなると考察した。第 4

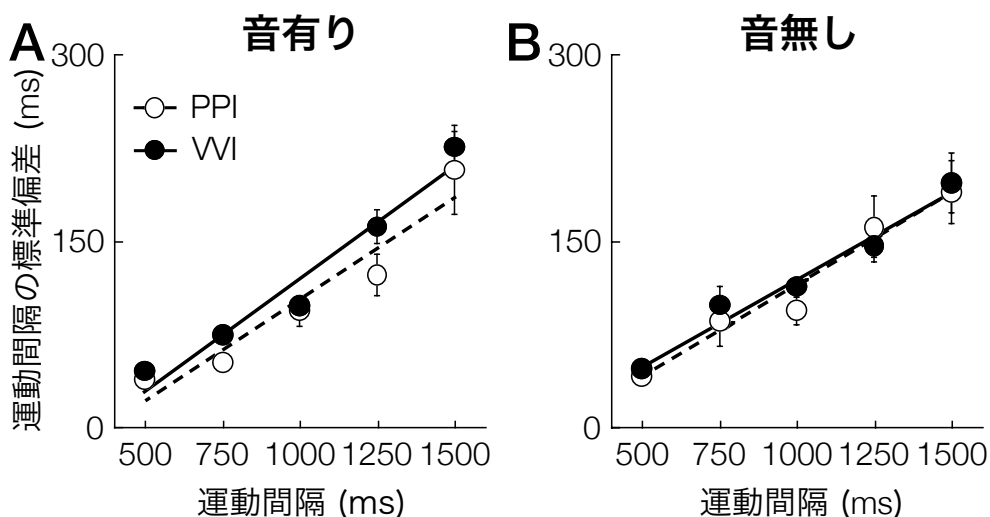


図 35. Peak-to-peak interval と valley-to-valley interval の標準偏差。実線と点線は 5 つの運動間隔に亘る peak-to-peak interval と valley-to-valley interval における回帰直線であった。

章の実験は、第3章の実験の結果と一致して、長い運動間隔（1000–1500 ms）では左右の力は負の相関関係になった（図 32A と B）。しかし、本研究は新たに弱い力レベルであっても短い運動間隔（500–750 ms）では左右の力が正の相関関係になり、両手の力が結合することを示した。さらに、二次曲線の回帰分析を行った結果、両手の力発揮の相関係数は 1250 ms において最も負の方向に強くなったが、その運動間隔から離れると、正の方向に強くなった。相関係数と同様に、力の変動は 1250 ms で最も小さくなったが、1250ms を離れると大きくなった（図 32C と D）。したがって、1250 ms で両手の力の誤差補正が最も強くなり、力制御は安定した。

Optimal feedback control theory は神経系がフィードバックを用いて課題パフォーマンスに影響しない部分を変動させることで、課題パフォーマンスに影響する部分（誤差）を補正すると予想した（Todorov and Jordan, 2002; Todorov, 2004）。運動間隔の増加に伴って処理に要する時間が増加するので、フィードバックを用いた誤差補正は増加すると考えられる。その仮説に反して、500ms は 1250ms よりも負の相関が弱くなっており、誤差補正は運動間隔の増加に伴って増加しなかった。この問題に関して、本研究は task-irrelevant variance が運動間隔に伴って変化せず、参加者は視覚的フィードバックに基づいて力の配分を変動させて誤差補正をしていたが、運動間隔の変化に伴ってもその方略を変化させなかった。しかし、第3章の実験では、task-relevant variance と task-irrelevant variance は力レベルの増加に伴って増加した。両手の制御方略は力レベルと運動間隔に伴って変化するが、力レベルと運動間隔に伴う両手の制御方略の変化には違いがあった。これらの結果は本実験の 1250ms の負の相関はフィードバックを用いた誤差補正の概念だけでは説明できない。

そのような力の変動の問題を解決するためには、振動子の概念が重要であると考えられる。振動子の概念において、好みのペースの運動が振動子にとって最も安定した状態であり、その好みのペースから離れると運動が不安定になることを仮定した。その概念にしたがって、Sternad et al. (2000) は片手のタッピング運動を用いて、力とタイミングの変動が特定の運動頻度から離れるにつれて増加し、効果器固有の運動頻度から逸脱すると大きくなることを示した。本研究では、Sternad et al. (2000) と一致して、力の変動は効果器固有の頻度（1250ms）から逸脱に伴って増加し、その力の変動に応じて

両手の力の制御方略が変化したと考えられる。したがって、本研究の結果は運動間隔に伴う制御方略の変化がフィードバック処理の変化でなく、振動子の機構によって生じたことを示唆した。

2) 力とタイミングの階層性

Rinkenauer et al. (2001)は両手の分離的力発揮課題を用いて力とタイミングの階層性を検討した。分離的力発揮とは力発揮の開始と終了が前後の力発揮と区切られているものである。その結果、両手で同時に力発揮し、左右で異なる目標値に一致させた時、両手の力発揮は結合しなかったが、タイミングが結合した。しかし、両手で異なるタイミングで力発揮し、左右で同じ目標値に一致させた時、両手のタイミングだけでなく力発揮も結合した。これらの結果はタイミングが力の制御を一方的に支配する階層性を示唆した。このように、Rinkenauer et al.はタイミングと力の協応方略を観察することで階層性を観察した。

一方、第2章の片手と第3章の両手の周期的な等尺性力発揮において、力の増加に伴って力の変動は増加したが、運動時間の変動は変化しなかった。それに対して、本研究は運動時間の変化に伴って力とタイミングの変動は変化した。つまり、タイミングの変化は力の変動に影響を与えたが、力の変化はタイミングの変動に影響を与えなかったので、周期的な力発揮においてタイミングの制御は力制御よりも上位の階層性で制御されていた。これに関して、片手の分離的な等尺性力発揮では、力とタイミングの制御における双方向の相互作用が報告されている。Carlton et al. (1993)は肘の分離的な等尺性力発揮課題を用いて、time-to-peak force の変化は力変動に影響し、カレベルの変化もタイミングの変動に影響し、力とタイミングは相互に影響し合うことを発見した。つまり、分離的力発揮課題の力とタイミングの変動の間に階層性はなかった。それに対して、本研究はカレベルの変化に伴ってタイミングの変動が変化しなかったので、Carlton et al.の研究結果と一致しなかった。この問題に関して、Carlton et al. (1983)と我々の一連の研究は分離運動と周期運動という点で異なる。分離運動と連続運動は異なる神経系メカニズムに依存すると想定されている (Spencer et al., 2003 ; Robertson et al., 1999)。たとえば、タッピングを用いた一連の研究では、タップ間で一度運動を

静止する分離タッピングと静止せずに周期的にタップを繰り返す周期タッピングを比較した。その結果、分離タッピング課題と周期タッピング課題におけるタイミングの変動は相関しなかった (Robertson et al., 1999)。さらに, Spencer et al. (2003) は小脳損傷患者に分離タッピングと周期タッピング課題を課した。その結果, 周期タッピングでは小脳損傷患者と統制群はタイミング変動に差異が観察されなかったが, 分離タッピングでは小脳損傷患者の方が統制群よりもタイミングの変動が大きくなった。これらの結果は分離運動のタイミングは小脳に依存するが, 周期運動のそれは依存しないことを示唆した。上述の Carlton et al. の研究では分離的力発揮課題を用いたので, 本研究と Carlton et al. の結果の違いは周期的力発揮と分離的力発揮のメカニズムの違いによって生じたと考察できる。したがって, 我々は Carlton et al. のような分離運動では力とタイミングの制御は同じ階層のメカニズムで制御され, 両者が相互に影響し合うと予想した。それに対して, 本研究のような周期運動ではタイミングは力よりも上位の階層のメカニズムで制御されており, タイミングの変化は力制御に影響するが, 力の変化はタイミングに影響しないと考えられる。したがって, 本研究は両手の分離的力発揮課題の協応方略で観察された力制御とタイミングの階層性を両手の周期的力発揮課題に拡張した。

第5章

個人間協応運動における力とタイミングの制御

5.1 目的

2人で荷物を運ぶ時に、2人は力の発揮を分担するだけでなく、2人の歩く速さを一致させなければならない。第3章の実験結果では、両手課題は片手課題よりも力変動が小さく、両手は片手よりも課題パフォーマンスが高かった。しかし、個人間協応の先行研究は、2人は1人よりも低い課題パフォーマンスを報告している。たとえば、Bosga and Meulenbroek (2007) は2人あるいは1人の参加者が両手で同時に力発揮し、その力に応じて上昇するモニター上のバーを目標値に一致させ、2秒間保持する課題を行った。その結果、個人間課題では両者の力発揮が負の相関関係になり、両者は相補的に力発揮していたが、個人内課題では両手の力発揮は正の相関関係になった。しかし、個人間課題は個人内課題よりもバーの位置の変動が大きく、低いパフォーマンスを示した。また、Knoblich and Jordan (2003) は2人あるいは1人の参加者が加速と減速のキーを押してマーカーを目標に一致させる課題を行った。その結果、練習初期では個人間課題は個人内課題よりもマーカーの誤差が大きかったが、練習終期には個人間課題と個人内課題のパフォーマンスの差異がなくなった。

一方、第3章と第4章の両手協応運動の研究では、視覚情報が利用できる時、両手の力が負の相関関係になった。つまり、参加者は両手で力の誤差補正を行い、両手協応運動のパフォーマンスを向上させていた。さらに、4章の実験は力の誤差補正はタイミングの制御に影響を受け、力制御だけでなくタイミングの改善することが力の誤差補正を向上させるらしい。したがって、第5章では、個人間協応運動において、力とタイミングの相互作用を検討することにより、2人の課題が1人の課題のパフォーマンスを凌駕する可能性を探る。

個人間協応運動の先行研究でも2人のタイミングの一致や相補的力発揮は検討されている。たとえば、2人が互いに観察しながら、屈曲伸展を繰り返した時、意図せずに2人の動作は同期した。一方、Bosga and Meulenbroek は2人が力発揮し、その総和に応じ

て上昇するバーを目標値に一致させた時、2人の力発揮は負の相関関係になり、2人は相補的に力発揮した。しかし、個人間協応運動の先行研究では2人の相補的力発揮 (Bosga and Meulenbroek, 2007) とタイミングの一致 (同期, Keller et al., 2007) は別々に検討され、2つの協応方略が同時に成立するかどうかは検討されていない。したがって、本研究は個人間の相補的力発揮とその力発揮の一致が同時に成立するかどうかを検討するために、2人が周期的に力発揮し、その総和を目標値に対して同時に一致させる課題を行った。さらに、上述の先行研究は相手の運動 (Brass et al., 2001) や2人で操作する対象 (Bosga and Meulenbroek, 2007) に関するフィードバックを提示していたが、そのような視覚情報の種類が個人間の協応方略の形成に影響を及ぼすと予想される。したがって、本研究は視覚情報の種類が個人間運動における力とタイミングの協応方略に与える影響を検討するために、視覚情報の異なる4つの条件を設定した。

5. 2 方法

1) 参加者

参加者は右利きの20名の健康な男子大学生 (平均±標準誤差: 22.6 ± 1.88 歳) である。2人の参加者は1組を形成し、合わせて10組が運動課題を行った。右利きの参加者の一側優位性 (laterality) の得点はすべて+100であった。すべての参加者から実験に関するインフォームド・コンセントを得た。

2) 実験手続き

2人の参加者は机を挟んで対面し、机の上にあるロードセルに向かって椅座位をとり、それぞれ手掌を机から高さ6cmの支持台の上に置いた (図36)。その体勢から、2人の参加者は中手指節関節を支点に右示指の先端掌側部をロードセルに付けたままで周期的な等尺性力発揮を行った。最初に、等尺性力発揮の最大随意収縮 (maximum voluntary contraction, MVC) を決定するために、参加者は3秒間の力発揮を3回行い、その3回の平均値から MVC (45.08 ± 2.32 N) が決定された。参加者は個人間課題と個人内課題を遂行した。個人間課題では2人の参加者が同時に力発揮し、その総和を目標の peak force と valley force に一致させた。個人内課題では1人の参加者が右示指で力発揮し

た. 両課題において, 目標 peak force は MVC の 10% であり, 目標 valley force は MVC の 5% であり, 目標運動間隔は 1000ms であった. 個人間課題における目標の peak force と valley force は 2 人の参加者の MVC の合計値から決定された.

参加者は個人内課題の individual 条件と個人間課題の total force 条件, both forces 条件, partner force 条件, no-feedback 条件を遂行した (図 37). 1) individual force 条件では, 参加者が発揮した力と目標の力の差異を確認できるように, ロードセルの出力はモニター上に提示され, 目標の peak force と valley force は 2 つの水平線で示された. 2) total force 条件はモニター上に 2 人の力発揮の総和と目標値を提示した. 3) both forces 条件はモニター上に 2 人の参加者の力発揮と目標値を個別に提示した. 4) partner force 条件は相手の力発揮と目標値のみを提示した. 5) no-feedback 条件はモニターから全ての視覚情報を取り除いた. 条件の提示順序は交互作用を避けるために, ランダムに提示された.

各条件では練習試行 5 回とテスト試行 1 回を行った. 練習試行では時間間隔に関するフィードバックがメトロノーム (SQ100-88, Seiko Holdings Corp, Tokyo) から音刺激を

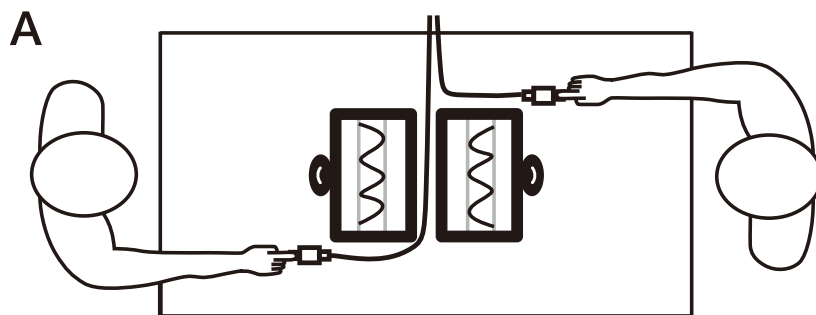


図 36. 個人間協応課題の実験設定. 本実験では, individual 条件, total-force 条件, both-forces 条件, partner-force 条件, no-feedback 条件の 5 つの条件を設定した. Individual 条件では, 参加者は 1 人で力発揮を行った (図の半分, 図 16 を参照). Total-force 条件, both-forces 条件, partner-force 条件, no-feedback 条件では, 2 人の参加者が同時に力発揮し, 力の総和を目標値に一致させた. 参加者は前方にモニターがあるので, 相手の表情や指の動きを観察することができず, 相手と言語的な相互作用しないように教示された.

提示され、参加者は peak force と valley force を音刺激に一致させ、目標の運動間隔を習得した。その後、テスト試行では音刺激を取り除き、練習試行で習得した運動間隔を再生した。

3) 装置と測定

実験装置と測定は第2章の実験と同様であった。

4) データ解析

データの分析はテスト試行で行い、試行の最初と最後の5回の力発揮を取り除き、50

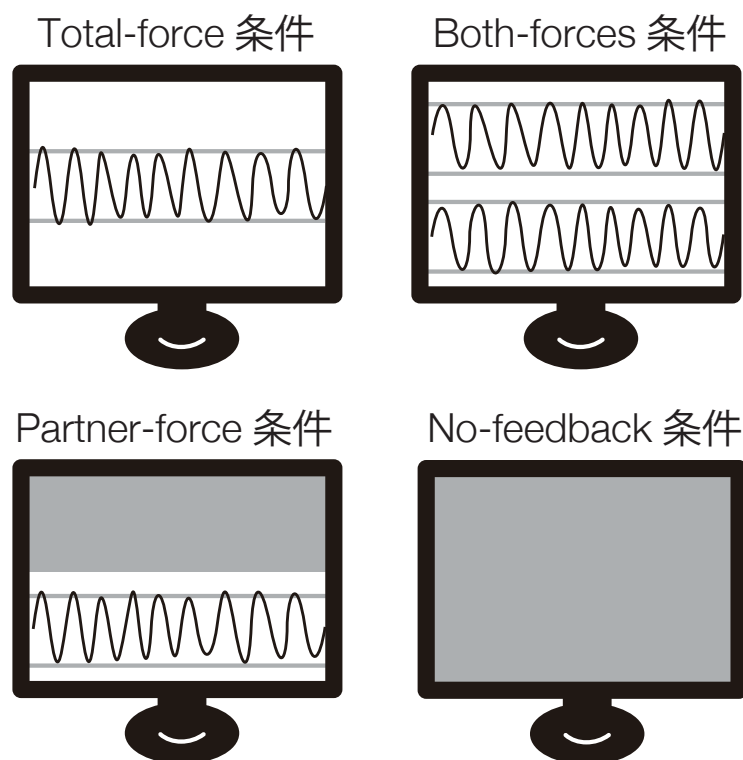


図 37. 個人間課題の4条件におけるコンピューター・ディスプレイ。Total-force 条件は2人の発揮した力の総和と2つの目標値に関する水平線を提示した。Both-forces 条件は自分と相手の力発揮と目標値をそれぞれ個別に提示し、個別の目標値は個人の最大随意収縮の10%と5%であった。Partner-force 条件は自分の力発揮を隠し、他者の力発揮と目標値を提示した。No-feedback 条件 (No-FB 条件) は視覚情報を取り除いた。

回の力発揮を用いた。Peak force, valley force, PPI, VVI の変動を分析するために、変動係数（標準偏差/平均値×100）を算出した。2人の力発揮の関係は相関係数を算出して検討した。2人の力発揮におけるタイミングはcross-spectral coherence解析を用いて検討した。Cross spectral coherence解析は様々な周波数領域にわたって2つの時系列における位相の相関関係を算出した。算出されたcoherenceは1から0の値をとり、1に近づくと2つの時系列における位相の相関関係が強くなるが、0に近づくとその相関関係が弱くなる。Cross-spectral coherence解析には1試行全体にわたって力-時間系列（100 サンプル/s）を用いた。その解析はoctave forge ver. 3.6.1（John W. Eaton, freeware）のmscohereコマンドによって実行され、周波数領域の解像度は0.2 Hzに設定された。全ての周波数領域にわたるcoherenceの最大値（peak coherence）は2人の力発揮の一致を検討するために用いられた。

4) 統計処理

相関係数の平均値を求めるために、全ての相関係数はFisherのz変換を行った。相関係数における統計的分析は4（条件：total-force, both-forces, partner-force, no-feedback）×2（力：peak forceとvalley force）の二要因の分散分析を行った。Cross-spectral coherenceにおける統計的分析は4（条件）の一要因の分散分析を行った。Peak forceとvalley forceあるいはPPIとVVIの変動係数の統計的分析は5（条件：total-force, both-forces, partner-force, no-feedback, individual）×2（力または間隔：PPIとVVI）の二要因の分散分析を行った。全ての統計で交互作用の有意差が認められた時にはTukeyのHSD（honestly significant difference）による多重比較検定を行った。さらに、それらの分析は必要に応じて各要因を個別に分析した。

5. 3 結果

本研究の重要な知見として、total-force条件では2人の力発揮が強い負の相関関係になり、2人の力-時間系列のcoherenceは1Hzで著しく強くなった。つまり、2人の力の総和を提示した時だけ、2人は相補的に力を発揮し、その力発揮を同期させた。驚いたことに、total-force条件はindividual条件よりも力とタイミングの変動が小さくな

り、力の総和の視覚情報が利用できる時だけ、個人間課題は個人内課題よりも力とタイミングの制御が安定した。

1) 2人の力発揮の関係

図 38 には 4 つの条件における 2 人の力発揮とその総和のデータサンプルを示した。Total-force 条件では、両者の位相差は 0° であり、2 人の力の総和は目標 peak force と valley force に一致していた。このように 2 つの力発揮の位相が一致し、力の総和が正確に制御された。No-feedback 条件の最初の 2 サイクルでは、2 人の力発揮の位相差は 90° であったが、3 サイクル目ではその位相差は 0° になり、力の総和は目標値に一致した。そして、5-7 サイクル目では両者の力の位相差が 180° になり、両者の力発揮は逆位相なり、力の総和は小さな振幅となった。したがって、no-feedback 条件では、2 人の力発揮の位相が一致しなかったため、2 人の力の総和の制御は困難であった。

2) 2人の相補的力発揮

2 人の力発揮の関係を検討するために、図 39 には個人間課題における 2 人の参加者の力発揮に関する散布図を示した。その結果、total-force 条件では peak force と valley force 共に、2 人の力発揮は負の相関関係を示したが (図 39A), both-forces 条件 (B), partner-force 条件 (C), no-feedback 条件 (D) では 2 人の力発揮が相関しなかった。

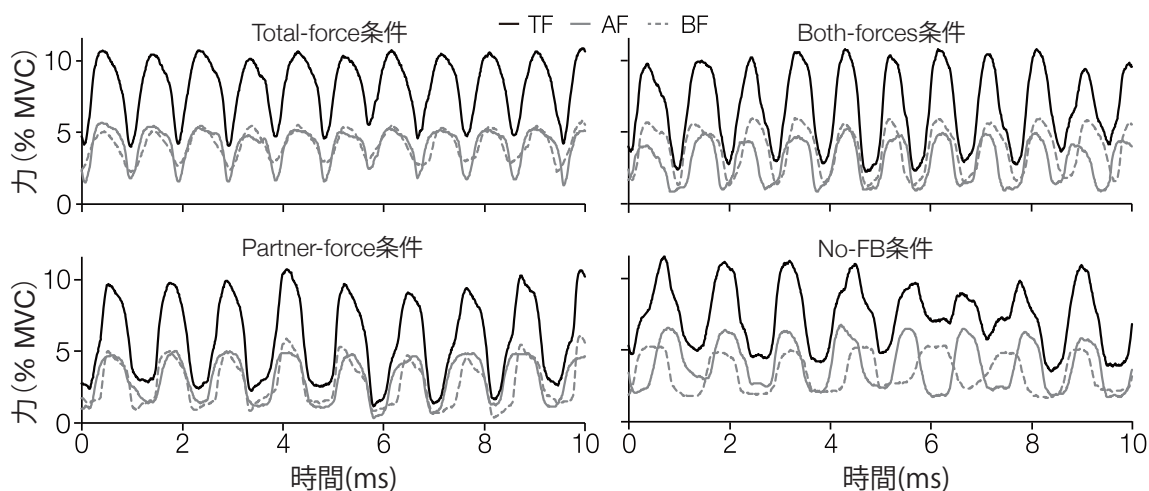


図 38. 4 つの条件における 2 人の力発揮とその総和のデータサンプル。

図39Eには4条件における相関係数の平均値を示した。分析の結果, peak force と valley force 共に total force 条件は他の課題よりも著しく両者の力の負の相関が強かった ($F(3, 72) = 81.01, p < 0.001$)。したがって, 力の総和の視覚情報が利用できる時のみ, 2人の参加者は相補的に力を発揮した。

3) 2人の力発揮の同期性

周波数の分析

2人の力発揮の周波数の一致を検討するために, 図40には4条件における2人の力-時間系列の coherence を示した。その結果, total-force 条件(A), both-forces 条件(B), partner-force 条件(C)では1Hz (1000 ms)の時に coherence が著しく高くなったが, no-feedback 条件では coherence が全ての周波数領域にわたって低くなった。図40Eには4条件における左右の力発揮の peak coherence を示した。分析の結果, no-feedback 条件は他の条件よりも peak coherence が顕著に低く ($p < 0.0001$), total-force 条件は

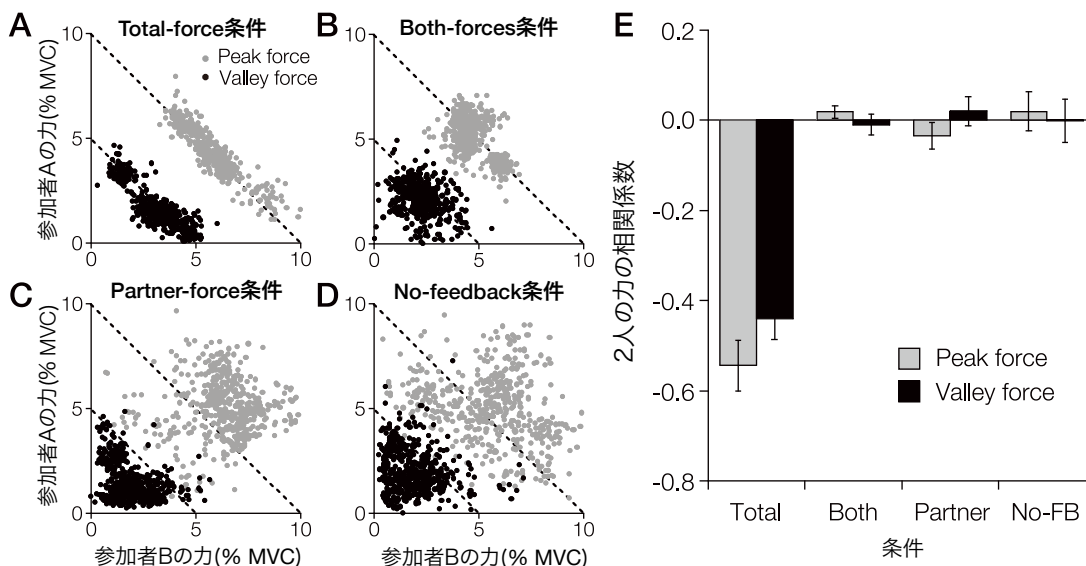


図39. Total-force 条件(A), both-forces 条件(B), partner-force 条件(C), no-feedback (D)における両者の力発揮の散布図。この散布図は全ペアの50回の力発揮をプロットした。点線は目標 peak force と valley force を示した。4つの条件における両者の力発揮の相関係数 (E)。エラーバーは標準誤差である。

both-forces 条件と partner-force 条件よりも peak coherence が高かった ($p < 0.05$). したがって、力の総和あるいは相手の力発揮に関する視覚情報の利用できる時、2 人の参加者は目標間隔である 1Hz (目標の PPI と VVI : 1000 ms) で同期して力を発揮した。

4) 位相領域の分析

2 人の力発揮の位相の一致を検討するために、図 41 には 4 条件における 2 人の力-時間系列の relative phase を示した。その結果、位相領域に主効果が観察され ($F(8, 324) = 135.47, p < 0.001$)、条件と位相領域の間に有意な交互作用が認められた ($F(24, 324) = 10.20, p < 0.001$)。位相領域を個別に分析した結果、 $0-20^\circ$ の位相領域の出現頻度は total-force 条件と both-forces 条件の方が no-feedback 条件よりも著しく高く

($F(3, 36) = 9.51, p < 0.0001$)、 $21-40^\circ$ の位相領域のそれは no-feedback 条件よりも

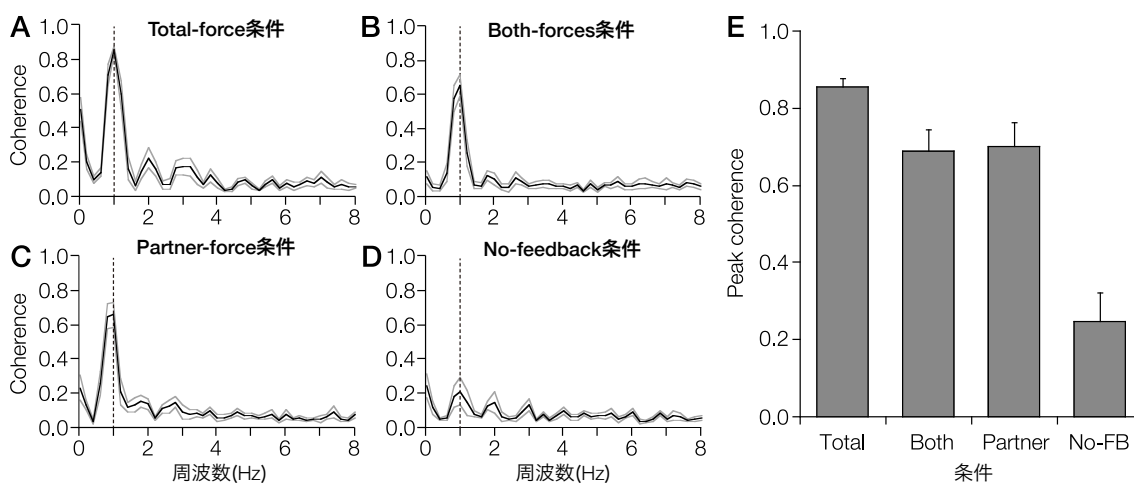


図 40. Total-force 条件, both-forces 条件, partner-force 条件, no-feedback (No-FB) 条件における 2 人の力の cross-spectral coherence. Cross-spectral coherence は一試行全体の時系列 (50 サイクル) から算出され、2 人の力発揮がどのような周波数で同期しているのかを示す。つまり、2 人が課題目標の 1Hz で力発揮を同期させた時、1Hz における coherence が大きくなる。図は 10 ペアの cross-spectral coherence の平均値である。垂直の点線は目標運動間隔 (1Hz) を示す。4 つの条件における peak coherence (各ペアにおける coherence の最大値)。エラーバーは標準誤差である。

他の3条件の方が著しく高かった ($F(3, 36) = 10.18, p < 0.0001$). また, $141-160^\circ$ ($F(3, 36) = 5.58, p < 0.005$), $161-180^\circ$ ($F(3, 36) = 6.37, p < 0.001$) の位相領域の出現頻度は total-force 条件と both-forces 条件の方が no-feedback 条件よりも低く, $81-100^\circ$ ($F(3, 36) = 8.65, p < 0.0001$), $101-120^\circ$ ($F(3, 36) = 13.72, p < 0.001$), $121-140^\circ$ ($F(3, 36) = 11.20, p < 0.0001$) の位相領域の出現頻度は no-feedback 条件よりも他の条件の方が低かった. これらの結果は no-feedback 条件の relative phase の角度の頻度は広い範囲にわたって分布したが, 他の3条件では, $0-40^\circ$ の位相領域の出現頻度が著しく高くなったことを示した. したがって, 2人の力発揮の位相は力の総和, 他者の力発揮を提示した時に一致したが, 視覚情報を取り除くと一致しなかった.

5) 力の誤差と変動

力制御の正確性を検討するために, 図42Aには5条件にける peak force と valley force

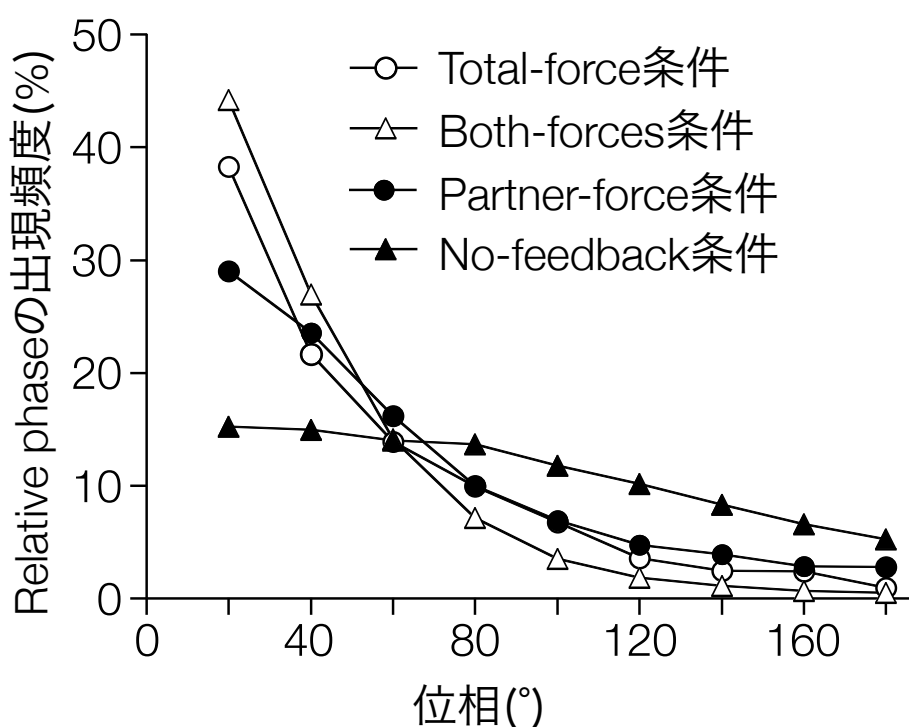


図41. Relative phase の角度の出現頻度. 頻度領域は 20° ごとに区分した. $0^\circ -20^\circ$ の relative phase の出現は2人の力発揮の位相が一致したことを示す.

の絶対誤差を示した。多重比較の結果, partner-force 条件と no-feedback 条件は total force 条件 ($P < 0.0001$), both-forces 条件, individual 条件よりも力の絶対誤差が大きかった ($F(4, 110) = 19.63, p < 0.001$)。注目すべき結果として, total-force 条件は individual 条件よりも力の絶対誤差が小さく, 力の総和の視覚情報の利用できる個人間課題は個人内課題よりも正確な力制御であった。

力の制御の安定性を検討するために, 図 42B には 5 条件における peak force と valley force の標準偏差を示した。分析の結果, 多重比較の結果, partner-force 条件と no-feedback 条件は total-force 条件, both-forces 条件よりも力の標準偏差が大きかった ($F(4, 110) = 34.26, p < 0.001$)。重要な結果として, total-force 条件は individual 条件よりも力の標準偏差が小さく ($P < 0.05$), 力の総和が提示された時, 個人間課題は個人内課題よりも力変動が小さくなった。

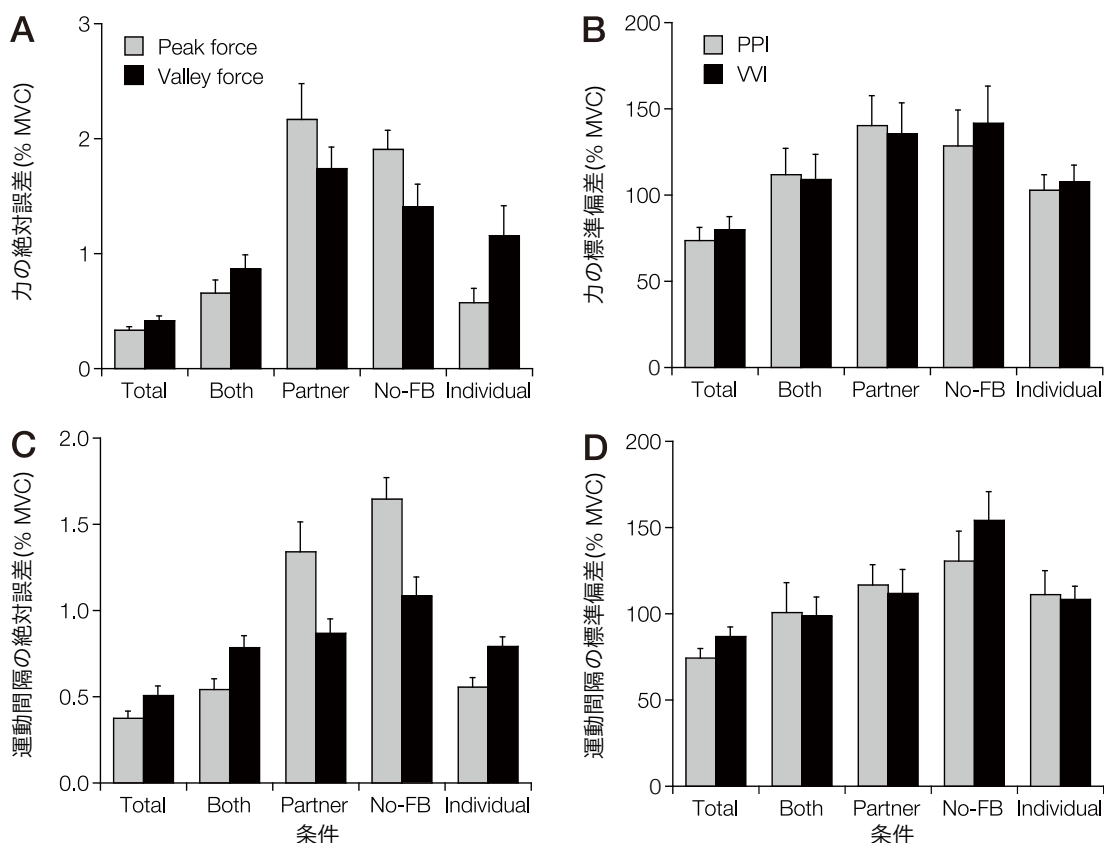


図 42. 5 条件における力と運動間隔の絶対誤差と標準偏差。個人間課題では力の総和から絶対誤差と標準偏差を算出した。エラーバーは標準誤差である。

6) タイミングの誤差と変動

タイミングの正確性を検討するために、図 42C は 5 条件における PPI と VWI の絶対誤差を示した。その結果、no-feedback 条件は他の条件よりも PPI と VWI の絶対誤差が大きかった ($F(1, 110) = 4.20, p < 0.001$)。さらに、total-force 条件と individual 条件を比較すると、total-force 条件は individual 条件よりもタイミングの誤差が小さかった ($F(1, 56) = 6.51, p < 0.05$)。したがって、力の総和の視覚情報を提示した時、個人間課題は個人内課題よりも力と同様にタイミングの制御も正確であった。

タイミングの変動を検討するために、図 42D は 5 条件における PPI と VWI の標準偏差を示した。その結果、no-feedback 条件は他の条件よりも PPI と VWI の標準偏差が大きかった ($F(1, 110) = 6.23, p < 0.001$)。さらに、total-force 条件と individual 条件を比較すると、total-force 条件は individual 条件よりもタイミングの標準偏差が小さかった ($F(1, 56) = 4.54, p < 0.05$)。したがって、力の総和の視覚情報を提示した時、個人間課題は個人内課題よりも力と同様にタイミングの制御も安定していた。

5. 4. 考 察

本研究は力の総和を提示した時、2 人の参加者の力発揮が負の相関関係になり (図 38A と E)、一方の誤差を他方が補正する相補関係を示した。また、力の総和と他者の力を提示した時、2 人の力-時間系列の coherence は 1Hz の周波数で著しく高くなり (図 39A, B, C, E)、2 人の力の位相は一致し (図 40)、2 人は目標運動間隔で力の発揮を同期させた。したがって、本研究の重要な知見として、力の総和を提示した時、2 人の参加者は相補的に力を発揮し、その力発揮を同期させた。驚いたことに、力の総和を提示した時、個人間課題は個人内課題よりも力とタイミングの変動が小さくなり、それらの制御が安定した。このように、両者の相補的力発揮と力発揮の一致は相乗効果をもたらし、個人間課題の力とタイミングの制御を促進した。

1) 1 人と 2 人による課題のパフォーマンス

Knoblich and Jordan (2003) は 2 人あるいは 1 人の参加者が加速と減速のキーを押し、マーカーを目標に一致させる課題を行った。その結果、練習初期では個人間課題は個

人内課題よりもマーカーの誤差が大きかったが、練習終期には個人間課題と個人内課題のパフォーマンスの差異がなくなった。さらに、Bosga and Meulenbroek (2007) は、2人あるいは1人の参加者が両手で同時に力発揮し、その力に応じて上昇するモニター上のバーを目標値に一致させ、その状態を2秒間保持する課題を行った。その結果、個人間課題では両者の力発揮が負の相関関係になり、両者は相補的に力発揮していたが、個人内課題では両手の力発揮は正の相関関係になった。しかし、個人間課題は個人内課題よりもバーの位置の変動が大きく、低いパフォーマンスを示した。Bosga and Meulenbroek (2007) や Knoblich and Jordan (2003) の研究とは対照的に、本研究では2人は1人よりもパフォーマンスが高かった。Bosga and Meulenbroek (2007) は自己ペースでバーを目標値に保持する課題を用いたが、本研究はタイミングを規定した周期的な力発揮課題を用いており、2人の参加者が周期的に力発揮を同期しなければならなかった。本研究の運動課題は周期的運動であり、このことによって Bosga and Meulenbroek (2007) の運動課題よりも両者の力の相補関係が強くなったと考えられる。したがって、本研究では両者の相補的力発揮と力発揮の同期が相乗効果をもたらし、個人間課題のパフォーマンスは個人内課題のそれを凌駕した。

2) 個人間協応運動における力とタイミングの階層性

第4章では1250 msで両手の力の誤差補正が最も強くなったが、1250 msを離れると両手の協応方略は誤差補正から結合に変化した。つまり、タイミングは両手の協応方略に影響した。さらに、第2章と第3章では力制御はタイミングに影響しなかったが、第4章ではタイミングは力制御に影響した。これらの研究は周期的力発揮課題ではタイミングが力制御を支配するような階層性が存在することを示唆した。上述の本研究と Bosga and Meulenbroek の研究と比較することで得られた知見では、個人間協応運動において個人間の力発揮を同期させることが力の誤差補正を促進させており、力とタイミングの制御が改善した。個人間協応運動においてタイミング協応方略が力のそれに影響しており、個人間協応運動における力のタイミングの階層性を示唆し、個人内の力発揮課題における知見を個人間協応運動に拡張した。実際の集団・競技スポーツでは、個人間の運動のタイミングを改善することは力の制御の改善することを示唆した。

3) 個人間の相補性

Uncontrolled manifold hypothesis と optimal feedback control theory (Todorov and Jordan, 2002; Todorov, 2004) は神経系が課題パフォーマンスに関連しない部分を変動させることで、課題パフォーマンスに影響する部分を補正すると予想した。本研究の2人の力発揮は負の相関関係を示し、両手の力の共分散が両者の力の標準偏差の積よりも大きくなった。この関係は課題に関連しない両者の力配分の分散が課題に関連する力の総和の分散よりも大きくなることを意味し、参加者は両者の力配分を変化させることで力の総和を補正していた。したがって、本研究の相補的力発揮は minimal intervention principle と一致している。さらに、両者の相補的力発揮は力の総和を提示した時のみ成立したので、おそらく2人の参加者は力の総和の変化の予測とフィードバック情報を照合して2人の間で state estimate を共有した。したがって、本研究は optimal feedback control theory を個人間の協応運動に拡張できた。

4) 個人間の同期性と相補性

2人の運動の同期 (Keller et al., 2007) と相補的力発揮 (Bosga and Meulenbroek, 2007; Newman-Norlund et al., 2008) のためには、相手の運動を観察し、その運動を予測しなければならない。本研究では、力の総和の視覚情報を利用できる時、2人の力-時間系列の coherence が 1Hz で最も高かったが、それ以外の周波数領域で顕著に低かった。この結果は力発揮の同期が意図して生じたのであり、参加者は相手の力発揮のタイミングを予測していたことを意味する。相手の運動の予測は自分の運動の予測に基づき、他者の運動をシミュレーションすることで得られる (Wolpert et al., 2003; Sebanz and Knoblich, 2009)。たとえば、バスケットボールで他者のフリースローが入るかどうかを予測した時、プロ選手は未経験者よりもフリースローの結果を早く、正確に予測した (Agoliti et al., 2008)。つまり、熟練した選手自身の優れた運動の予測能力が他の選手のフリースローを正確に予測することを可能にした。しかし、joint action を遂行するためには、相手の運動の予測だけでなく、自分の運動や操作する対象の変化も予測しなければならない。この問題に対して、action simulation が joint action に関与するためには、2つの方法がある (総説として、Sebanz and Knoblich, 2009; Knoblich et al.,

2011). 1つの方法は他者の運動に自分の運動を同期させるために、相手の運動だけでなく、自分の運動もシミュレーションし、両者の運動の差異を予測しなければならない。たとえば、ピアニストは自分の演奏を他者の演奏に同期させるよりも、自分の演奏を録音したものに同期させる方が正確にタイミングを同期させた (Keller et al., 2007)。つまり、自分の演奏を他者の演奏に同期させる時は自分と他者の演奏を個別に予測しなければならず、それらの間に誤差が生じやすいが、自分の演奏とその録音した演奏は同じモデルで予測できるので、それらの誤差が少なかった。もう1つの方法は2人で1つの対象を制御する時に、2人で行った運動によって生じた環境 (制御する対象) の変化 (joint effect) を予測することである。上述の先行研究 (Knoblich and Jordan, 2003; Bosga and Meulenbroek, 2007) においても、2人の参加者は自分と他者の運動に関するフィードバックを利用できなくても、操作する対象に関する視覚情報の利用によって、1つの対象を制御できた。本研究では、2人の相補的な力発揮は力の総和を提示した時のみ成立したが、2人の力発揮の一致は力の総和の視覚情報だけでなく、他者の力発揮の視覚情報を提示した時でも成立した。この知見から、参加者は相補的に力発揮する時、力の総和の変化をシミュレーションしたが、他者の力発揮に自分の力発揮を同期させる時、おそらく平行して他者と自分の力発揮をシミュレーションし、それらの差異を予測した。したがって、本研究の個人間協応運動は action simulation の2つの方法を用いて促進されたと考えられる。

6 章

総括

6.1 概要

第1章は両手と個人間の協応運動，力とタイミングの相互作用に関する知見や問題を取り上げ，本研究の目的を示した．第2章は片手の等尺性力発揮課題を行い，片手の力とタイミングの制御を検討した．第3章と第4章は両手協応運動の実験を行い，両手の力の協応方略が力やタイミングの変化によってどのように変化するかを検討した．第5章は個人間協応における力とタイミングの相互作用を検討した．以下に実験結果を概要する（表2）．

6.1.1 力を入れることと力を抜くこと

第2章は片手示指の周期的な等尺性力発揮課題を行い，周期的力発揮では力を入れる時と力を抜く時の制御を比較した．その結果，同一のカレベルでも valley force は peak force よりも誤差と変動が大きく，力を抜くことは力を入れることよりも不正確で，不安定な制御であった．この結果は第3章と第4章の両手協応課題と第5章の個人間協応課題でも同様であった．

6.1.2 力とタイミングの階層性

第2章の片手の力発揮課題と第3章の両手の力発揮課題では，カレベルの増加に伴って力の変動が増加したが，運動間隔の変動は変化せず，力制御はタイミングに影響しなかった．しかし，第4章の両手の力発揮課題では，運動間隔によって運動間隔の変動だけでなく，力の変動は変化した．したがって，タイミングが力制御を支配する階層性が観察された．

6.1.3 両手協応運動における結合と誤差補正

第3章と第4章は両手で同時に力発揮し，その総和を目標の peak force と valley force

表 2. 実験結果の総括

	片手 (第2章)	両手 (第3と第4章)	個人間 (第5章)
力発揮の正確性		力を入れる<力を抜く	
力の制御			相補性
タイミング			同期性
力の変動	片手 >	両手, 個人間	
タイミングの変動	片手 >	両手, 個人間	

に対して周期的に一致させる課題を用いて、力レベルと運動間隔の変化によって両手の力の協応方略がどのように変化するかを検討した。

第3章の実験結果、視覚情報を提示しなかった時、力レベルに関わらず左右の力の関係が正の相関になること示した。しかし、視覚情報を提示した時、低い力レベルでは、左右の力の関係が負の相関になり、一方の力の誤差を他方で補正した。しかし、力レベルの増加に伴って、両手の力は負の相関関係から正の相関関係になり、両手の力の制御方略は誤差補正から結合に移行した。さらに、視覚情報を提示した時のみ両手課題は片手課題よりも力の変動が小さかった。一方、視覚情報の有無に関わらず運動間隔（力を入れる間隔と抜く間隔）の変動は両手課題の方が片手課題よりも小さく、参加者は両手のタイマーを結合させることで両手のタイミングを安定させた。

第4章では、運動間隔の減少に伴って両手の力は負の相関関係から正の相関関係になり、両手の力の制御方略は誤差補正から結合に移行した。さらに、視覚情報の利用できる時、両手の力は1250 msで最も負の相関が強くなったが、1250 msから離れると正の方向に変化し、両手の力の誤差補正は1250 msで最も強くなった。同様に、1250 msで力の標準偏差が最も低くなったが、1250 msから離れると大きくなり、この結果は両手の力の誤差補正が力制御を安定させたことを示唆した。

6.1.4 個人間協応における相補的力発揮とその同期

第5章は個人間の力発揮課題において力発揮の同期が相補的力発揮に与える影響を検

討した。個人間課題は2人が同時に力発揮し、その総和を目標の peak force と valley force に対して周期的に一致させる課題であった。その結果、力の総和を視覚情報として提示した時、2人の力は負の相関関係になり、相補的力発揮が観察された。また、力の総和または他者の力発揮が提示された時、2人の力発揮の周波数と位相は一致し、2人は力発揮を同期させた。本研究の課題はタイミングを規定しない力発揮課題よりも2人の力の負の相関関係が強く、この結果は力発揮の同期が相補的力発揮を強くさせた可能性を示唆した。さらに、重要なことに、力の総和を提示した時の個人間課題は個人の片手の力発揮よりも力とタイミングの誤差と変動が小さく、相補的力発揮とその同期の相乗効果に伴って2人のパフォーマンスは1人のそれを凌駕した。したがって、第5章の結果は個人間協応運動においてもタイミングが力制御を支配する階層構造が成立し、その構造が個人間協応運動のパフォーマンスに影響を及ぼすことを示唆した。

6.2 運動学習への示唆

6.2.1 Fitts and Posner の運動学習段階

運動学習の過程を理解するためにはFitts and Posner (1967) の運動学習段階が重要であると考えられる。その運動学習段階は初期の言語-認知的段階、中期の連合段階、終期の自動化の段階である。初期の言語-認知段階は学習者が運動の手順を知り、運動の計画を立てる時期である。中期の連合段階では、フィードバックによって運動修正をする時期である。つまり目標とする運動と学習者が実際に行った運動との誤差を修正していく過程である。終期の自動化の段階は長期間の練習の結果、運動系列が円滑に遂行されるようになる。

本研究の片手、両手、個人間協応運動のすべてにおいて、タイミングが力制御を支配する階層性が成立した。この階層性は力制御に比較して、早く個々の動作のタイミングは習得できるが、力の微調節は膨大な時間を要することを示唆した。しかし、Fitts and Posner (1967) は中期の連合段階では力とタイミングの制御について言及していない。タイミングと力の制御は同時進行で練習されているが、主として、中期の連合段階の前半では個々の動作の順序性とそのタイミングの習得が中心となり、後半では膨大な時間をかけて力のパターンを習得することになる。たとえば、タイミングの拘束の強い周期運

動では、先に力制御を練習するよりも先行して力を抜くタイミングを習得することにより、力を抜く時の制御はよりよく改善されると考えられる。したがって、個人競技から集団・対人競技において、先行してタイミング制御を練習し、その後力制御の習得することが重要であると考えられる。

6.2.2 自由度から見た運動学習段階

自由度の問題を提唱した Bernstein (1967) は自由度の学習段階についても言及している。彼は練習初期の段階では運動の自由度を結合 (freezing) させるが、運動の経験に伴って自由度を解放 (freeing あるいは releasing) するようになると考えた (総説として Newell and Vaillancourt, 2001)。第1章のガンマンの例において、初心者はピストルを撃つ際、肩関節、肘関節、手首の関節の運動を固定したが、上級者はそれらの関節の運動を固定せず、変動させることで銃口を補正した (図5)。つまり、初心者は関節間の運動を検討していたが、上級者は関節間の運動を解放していた。さらに, Vereijken et al. (1992) は両足を台に乗せて、台を左右に動かすスキー・シミュレーター (図43) を用いて、関節の自由度に与える練習効果を検討した。その結果、練習初期では関節間の相関係数は高い正の値を示し、参加者は関節を結合させた。しかし、練習の進行に伴って、その正の相関係数は低くなり、参加者は関節間の自由度を解放させた。この結果から、Bernstein の自由度の学習段階を支持する結果を得られたが、練習の経過の中でどのようなパラメータの自由度が結合され、どの自由度が解放されるのかは未だに不明確な点が多い。本研究の両手協応と同様に、個人間協応では2人の参加者は力発揮のタイミングを一致させ、時間的に結合させた。しかし、彼らは相補的に力発揮しており、2人の力配分を変動させて力の総和を補正した。つまり、参加者は力の自由度を解放していたといえる。しかも、個人間の力発揮のタイミングの一致が相補的力発揮を向上させた。これらの結果は先行して運動のタイミングの自由度を減少させ、その後、力の自由度を解放することが重要であると示唆した。荷物を運ぶ時、2人の歩調を合わせる (タイミングの自由度の結合) ことを習得してから、荷物を相補的に持つ (力の自由度の解放) ことを習得する必要があるだろう。したがって、両手と個人間の協応運動の学習に

において、学習者は練習初期にタイミングの自由度を減少させるが、練習の進行に伴って力の自由度を増加させなければならないだろう。

Fitts & Posner あるいは自由度から見た運動学習段階から、個人内と個人間の協応運動の学習では、タイミングを習得してから力の制御を練習すると円滑に学習が進むと考えられる。逆に、力の制御を習得してからタイミングの練習をすると再び力の制御を練習しなければならないだろう。

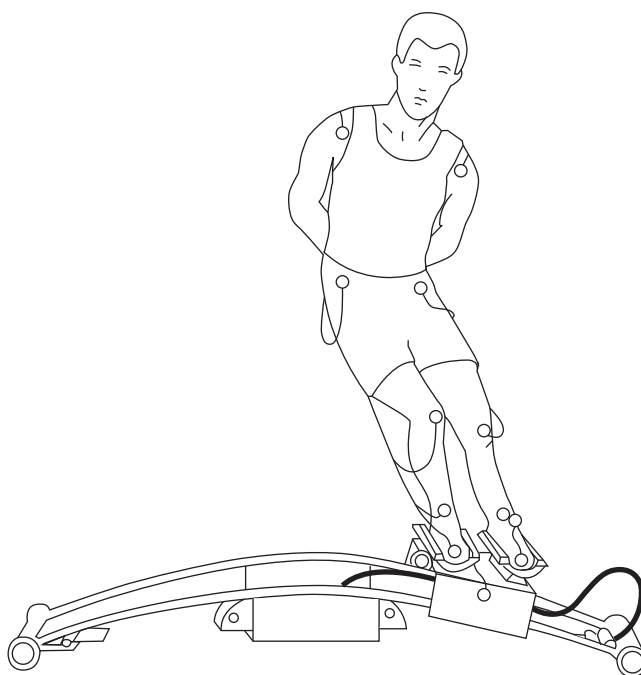


図 43. スキー・シミュレーター。参加者は台に足を乗せ、左右に動かした。

6. 3 展望

第5章では、個人間の相互補完と同期によって、片手が両手よりもパフォーマンスが高くなり、2人が1人よりもパフォーマンスが高くなることを示した。この知見が実際の運動場面に貢献するには、このような協応方略がどのような条件で向上し、どのような練習で改善されるのかを検討する必要がある。一方、近年、個人間協応運動の研究は活発になってきており、様々な知見が得られてきたが、個人間協応運動に影響を与える要因は未だかなり存在するだろう。したがって、本論文で得られた個人間協応の知見は大きな発展の余地があり、本節は検討する必要がある事項を以下で述べ、今後の研究課題を示す。

6.3.1 個人間協応の力とタイミングの制御に与える声かけの影響

集団スポーツで、人間はパスを行う時に、他者に声をかける時がある。このような個人間の発声と身体運動の相互作用は観察的研究によって報告されている (Condon, 1976; Kendon, 1970) が、実験的な研究は少ない。例えば、Gentilucci et al. (2001) は被験者に物体を把持する時に、音節 (例えば, GU, GA) を発声するように要求した。その結果、大きな物体を把持した時は小さな物体を把持した時よりも音節を発した時のパワースペクトルの最大値が高かった。さらに、Gentilucci (2003) は、被験者に他者の把持運動を観察し、把持する時に音節 (BA) を発声するように要求した。その結果、他者が大きな物体を把持した時に、被験者の発声のパワースペクトルの振幅が大きくなった。つまり他者の運動の観察は発声に影響をもたらし、視覚と発声は相互作用した。

Shockely et al. (2003) は2人の被験者は立位姿勢をとり、それぞれわずかに異なる絵を観察し、会話によってそれらの絵の違いを特定する課題を行った。興味深いことに、互いの身体動揺が2人の会話によって意図せずに同期し、身体動揺の引き込みが生じた。さらに、Richardson et al. (2005) は2人の被験者が自己ペースで振り子を振りながら、絵の違いを会話によって特定する課題を用いた。その結果、互いに観察し、会話をしない時では、両者の振り子運動は意図せずに同期し、視覚的な相互作用は意図しない同期を引き起こした (Schmidt et al., 1998)。視覚情報を利用できない時、会話を行うと、2人の振り子のタイミングは同期せず、Shockely et al. (2003) の研究における身体動

揺とは異なり、振り子運動のような周期運動では引き込みが生じなかった。一方、視覚情報が利用できる時、2人の運動は引き込まれた。しかし、興味深いことに、会話を行った時はそうでない時よりも引き込みが弱く、視覚情報と会話の相互作用は個人間の引き込みを弱くさせた。つまり、Richardson et al. (2005) は会話が視覚情報を介した個人間の引き込みを妨げたようだった。

しかし、2人以上でカヌーを漕ぐときに、人はパドルを漕ぐタイミングを合わせるためにリズムカルに声を掛ける。このような声かけが個人間協応をよりよく成立させるために重要であると考えられる。しかし、Richardson et al. (2005) の研究では、2人の被験者は絵の違いを特定するための会話を行っていたので、その会話は運動課題（振り子課題）とは直接関係しない発声である。それに対して、「声かけ」は自身の動作の特徴を伝えるので、Richardson et al. (2005) の用いた会話よりも個人間の周期運動に大きな影響を与えると予想される。一方、第5章では、相補的力発揮とその同期が課題パフォーマンスに与える影響を検討したが、参加者は言語的な相互作用をしないように教示されており、かけ声を行っていなかった。ここで、周期的なかけ声が力発揮に関連づけられ、個人間協応運動の協応方略が促進されるかもしれない。したがって、第5章で用いた運動課題と同様の課題を用いて、かけ声が個人間の相補的力発揮とその同期に与える影響を検討する必要があるだろう。

6.3.2 個人間協応における leader-follower の関係

個人間協応運動には2人の役割が平等なものだけでなく、異なるものも存在する (Clark et al., 1996)。例えば、両者の一方が先行して運動を行い (leader)、他方が一方の運動を追従 (follower) するような leader-follower の関係がある。しかし、joint action における leader-follower の関係を検討した研究は非常に少ない (Konvalinka et al., 2010; Noy et al., 2010)。Noy et al. (2010) は2人の参加者が互いに観察しながら、左右にカーソルを操作する課題を用い、即興的な個人間協応を検討した。この実験では、一方の参加者の即興的な動作を行い、その動作を他方が追従する条件 (leader-follower 条件) と両者が自由に動作を行い、互いに一致させる条件 (joint improvisation 条件) を比較した。その結果、leader-follower の条件では、follower

は leader よりも動作の変動が大きくなり, follower の運動が leader のそれよりも不安定であった. さらに, joint improvisation 条件は leader-follower 条件よりも両者の動作の加速度の差が小さく, 両者の動作が同期した. また, Konvalinka et al. (2010) は個人間のタッピング課題を用い, 両方の参加者がタップ音を聞ける (unidirectional coupling) 条件と一方の参加者のみが他方の参加者のタップ音を聞ける (bidirectional coupling) 条件を設定した. 両者の ITI の相互相関を行った結果, unidirectional coupling 条件では, 他者のタップ音の聞けない参加者が先行してタップし, タップ音を聞くことのできる参加者が追従した. Bidirectional coupling 条件において両者が他者の先行するタップが早くなると, 次のタップを早くし, 追従した. Bidirectional coupling 条件の結果について, Konvalinka et al. は両者が follower となる” hyper-follower の関係” が成立したと考察した. また, Noy et al. (2011) の研究と一致して, unidirectional coupling が bidirectional coupling よりも両者のタップが同期しなかった. したがって, Noy et al. と Konvalinka et al. は両者に異なる教示や聴覚情報を与え, 個人間で一方方向に相互作用するような実験設定を作り出し, leader-follower の関係を検討した. また, 彼らの実験では時空間的に一致させる課題であったので, 両者の時間的差異が生じる leader-follower の関係は適切な方略でなかったのかもしれない.

それに対して, 第5章で用いた運動課題は同じ教示や視覚情報を与えており, 双方向的な相互作用を必要とするものであったが, 課題中に leader-follower の関係が成立するかどうかは検討していない. また, 第5章の課題は2人の参加者に力発揮を同期させるように教示していたので, 時間的な差が生じるような leader-follower は好まれなかった可能性もある. ここで, 本研究は我々の先行研究と同じ実験装置を用いるが, タイミングを規定しない分離的な力発揮課題を行い, leader-follower の関係が生じることを確かめる必要がある. つまり, 本研究で用いる課題は個人間の力の目標値を達成するのであれば, 個人間の力配分や時間的順序は自由である. さらに, 経験者と未経験者で組んで課題を行った時, leader-follower の関係が顕著に現れ, その関係が練習によって促進すると予想される. このことは課題を経験した参加者と未経験者に組んで課題を練習させることで検討できるだろう.

6.3.3 4人の協応運動における力とタイミングの制御

多くの研究は2人の参加者に運動課題を行わせ、個人間協応運動における協応方略を観察してきたが、実際の運動場面では、3人以上の人間が相互作用することが多くある。しかし、個人間協応を検討した研究のほとんどは2人の協応運動を検討しており、3人以上の協応運動はわずかしかない。例えば、Neda et al. (2001) はコンサートホールで多くの人間の拍手が同期することを見出した。しかし、意図的に成立させた協応方略つまり相補的力発揮のような協応方略は2人の参加者による課題のみでしか観察されていない。したがって、3人以上の協応運動において、2人の協応運動と同じ協応方略が観察されるのかどうかを検討する必要がある。我々の先行研究を参考に、今後は3・4人の個人間協応運動では、相補的力発揮やそのタイミングの同期が遂行されるのかを検討する。また、2, 3, 4人の協応運動を比較し、どちらの課題パフォーマンスが高いのかも確かめる。

しかし、3人以上の力発揮の関係性を検討するには問題がある。2人の運動の関係性を検討するためには相関係数やrelative phaseなどの指標を用いられるが、それらの指標は2つの要素の関係だけで3つ以上の要素の関係を検討することはできない。その問題に対して、主成分分析 (principle component analysis) を用いて3以上の要素の関係が検討できるだろう。この手法は4本指の力制御 (Latash et al., 2004) や姿勢制御時の多くの関節 (Scholz & Schöner, 1999) の誤差補正を理解するために用いられている。例えば、4人の課題を行った時、誰が誤差を補完し、誰が他者と相互作用していないのかを数量的に表すことができるだろう。また、力発揮のタイミングの一致という要素が抽出された時、誰が最もタイミングを一致させているのかを知る事ができる。逆に、参加者が他者のタイミングを一致させていないことも数量化できる。

さらに、集団スポーツでは複数人の間に協力関係と競争関係があり、そのような関係の違いが個人間協応にもたらす影響を検討しなければならない。例えば、2人は協力関係であり、残り1人はその2人の協応運動を妨害する場合がありますと仮定する。その時、協力関係にある2人が1人の妨害に対して、どのような協応方略をとるのかを検討する必要がある。このことを検討するために、5章のような個人間の等尺性力発揮課題に基づいて、実験設定を考えることができる。例えば、2人は同時に力発揮し、その総和を

目標値に一致させるが、1人の参加者は自由に力発揮し、2人の総和が目標値に一致することを妨害する。おそらく、1人の妨害によって誤差が強く生じるので、2人はより強く相補的力発揮を行うだろう。つまり、他者の妨害によって、協力関係にある2人の相補関係は強くなるかもしれない。

6.3.4 個人間と両手の協応運動における階層構造

人間は自身の運動を他者の運動と相互作用させる時、自身の四肢を相互作用させなければならぬ。つまり、実際の運動場面では、個人間の協応が上位の階層に位置し、個人内協応が下位の階層に位置するだろう。しかし、従来の研究は個人間と個人内（両手）の協応運動の比較は行ってきた（Bosga and Meulenbroek, 2007）が、個人間協応運動を遂行している時どのように個人内の運動が協応化されるのかを検討してこなかった。例えば、Bosga and Meulenbroek (2007) は1人あるいは2人の被験者が両手で力発揮し、その総和を目標値に一致させた。その結果、1人では、両手の力は正の相関関係を示したが、2人では、2人の力は負の相関関係を示した。しかし、Bosga and Meulenbroekらは2人の課題遂行時の両手の力発揮の関係を検討していない。したがって、今後の研究課題は第5章の研究を参考に、2人の被験者が両手で同時に力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を用いて、個人内（両手）協応運動が個人間協応運動に与える影響を検討する。個人間協応を行っている時の両手の協応方略は両手の協応運動のみを行っている時とは異なると予想される。つまり、個人間と両手の協応方略に階層性が生じ、下位の階層となる両手の力は結合させ、上位の階層となる個人間協応は相互補完させると考えられる。

6.3.5 自閉症患者における個人間協応運動

健全な人間と比較して、自閉症の患者は心の理論(theory of mind, Baron-Cohen et al, 1985; Peterson et al., 2005)、共同注意 (joint attention, Osterling et al., 2002)、模倣運動、自身と他者の区別 (Rogers and Pennington, 1991) に困難が生じるらしい。共同注意とは他者が注意を向けていることに同じように注意を向けることであり、心の理論とは相手の気持ちや意図を察して自身の行動を決定する働きである (Premack and

Woodruff, 1978). さらに、自閉症患者はミラー・ニューロン・システムの一部と考えられている運動前野の活動が低下しているらしい (Hadjikhani et al., 2006; Dapretto et al., 2006; Oberman et al., 2005). 一方、第1章で述べたように、個人間の相補的力発揮はミラー・ニューロン・システムに依存していることが示唆されている。これらの結果から、自閉症患者は相補的な力発揮やその同期をうまく行えないと推測される。したがって、自閉症患者が組んで第5章で用いた個人間協応課題を行った時、相補的力発揮とその同期が成立するかどうかを確かめる必要がある。このような知見は自閉症患者の個人間協応運動の特徴を理解するだけでなく、ミラー・ニューロンの働きが個人間協応運動にどのように関与してくるのかを理解するためにも重要だろう。

6.3.6 個人間協応運動に与える発達と老化の影響

当然、個人間協応は発達に伴って向上し、老化に伴って低下するだろう。幼児に関する先行研究では、共同注意が12-18ヶ月で発達するらしい (Tollefsen, 2005; Frischen and Tipper et al., 2004)。また、幼児はその時期に個人間協応に行うようになり、他者とボール遊びするようになると考えられている (総説として、Sebanz et al., 2006)。しかしながら、共同注意という一つの働きの発達過程を調べた研究は行われているが、先行研究は個人間協応運動が発達に伴ってどのように変化するのかを検討していない。したがって、様々な年齢の子供達に第5章で用いた個人間協応課題を行わせ、発達に伴って個人間の相補的力発揮やその同期がどのように向上するのかを調べる必要がある。このような知見はいつどの時期にどのような個人間協応運動を行うことが発育発達にとって重要であるかを示すことができる。さらに、老化に伴ってそれらが低下するのかも調べる必要があり、個人間で相互作用する能力がどのように低下するのかを明らかにできるだろう。

引用文献

- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008) Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, 11: 1109-1116.
- Asanuma, H. (1973) Cerebral cortical control of movement. *Physiologist*, 16:143-166.
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985) Does the autistic-child have a "Theory of Mind" ?. *Cognition*, 21, 37-46.
- Bernstein, N. A. (1967) *The co-ordination and regulation of movement*. Oxford, NY: Pergamon Press.
- Brass, M., Bekkering, H., & Prinz, W. (2001) Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta Psychologica (Amsterdam)* 106: 3-22.
- Burke, D., Hagbarth, K. E., & Skuse, N. F. (1978) Recruitment order of human spindle endings in isometric voluntary contractions. *Journal of Physiology*, 285: 101-112.
- Billon, M., Semjen, A., & Stelmach, G. E. (1996) The timing effects of accent production in periodic finger-tapping sequences. *Journal of Motor Behavior*, 28: 198-210.
- Bosga, J., & Meulenbroek, R. G. (2007) Joint-action coordination of redundant force contributions in a virtual lifting task. *Motor Control*, 11: 235-258.
- Carlton, L. G., Kim, K. H., Liu, Y. T., & Newell, K. M. (1993) Impulse variability in isometric tasks. *Journal of Motor Behavior*, 25:33-43.
- Christou, E. A., Grossman, M., & Carlton, L. G. (2002) Modeling variability of force during isometric contractions of the quadriceps femoris. *Journal of Motor Behavior*, 34: 67-81.
- Clark H (1996) *Using language*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Condon, W. (1976). An analysis of behavioral organization. *Sign Language Studies*, 13, 285-318.
- 団まりな (1976) 「生物界の階層を求めて I」 *生物科学*, 28:57-62.
- Dapretto, M., Davies, M. S., Pfeifer, J. H, Scott, A. A., Bookheimer, S. Y., et al. (2006) Understanding emotions in others: Mirror neuron dysfunction in children with autism spectrum disorders. *Nature Neuroscience*, 9: 28-30.
- Diedrichsen, J. (2007) Optimal task-dependent changes of bimanual feedback control and adaptation. *Current Biology*, 17: 1675-1679.
- Diedrichsen, J., Hazeltine, E., Nurss, W. K., & Ivry, R. B. (2003) The role of the corpus callosum in the coupling of bimanual isometric force pulses. *Journal of Neurophysiology*, 90: 2409-2418.
- Diedrichsen, J., Shadmehr, R., & Ivry, R. B. (2010) The coordination of movement: optimal feedback control and beyond. *Trends in Cognitive Sciences*, 14: 31-39.
- Domkin, D., Laczko, J., Jaric, S., Johansson, H., & Latash, M. L. (2002) Structure of joint variability in bimanual pointing tasks. *Experimental Brain Research*, 143: 11-23.
- Edin, B. B., & Vallbo, A. B. (1990) Muscle afferent response to isometric contraction and relaxations in humans. *Journal of Neurophysiology*, 63:1307-1313.
- Faisal, A. A., Selen, L. P. J., & Wolpert, D. M. (2008) Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*. 9: 292-303.
- Flash, T., & Hogan, N. (1985) The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, 5:1688-1703.
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1976) *Human Performance*. Belmont, California: Brooks/Cole.
- Franz, E., Eliassen, J., & Ivry, R. R., & Gazzaniga, M. (1996) Dissociation of spatial and temporal coupling in the bimanual movements of callosotomy patients. *Psychological Science*, 7: 306-310.

- Frischen, A., Tipper, S. P. (2004) Orienting attention via observed gaze shift evokes longer term inhibitory effects: implications for social interactions, attention, and memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133: 516-533.
- Friedman, J, Varadhan, S. K. M., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2009) The sources of two components of variance: an example of multifinger cyclic force production tasks at different frequencies. *Experimental Brain Research*, 196: 263-277.
- Gallese, V. (2006) Intentional attunement: a neurophysiological perspective on social cognition and its disruption in autism. *Brain Research*, 1079: 15-24.
- Gallese, V., & Goldman, A. (1999) Mirror neurons and the simulation theory of mind reading. *Trends in Cognitive Science*, 2: 493-501.
- Gentilucci, M. (2003) Grasp observation influences speech production. *European Journal of Neuroscience*, 17:179-184.
- Gentilucci, M., Benuzzi, F., Gangitano, M., & Grimaldi, S. (2001) Grasp with hand and mouth: a kinematic study on healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, 86:1685-99.
- Hadjikhani, N., Joseph, R.M., Snyder, J., & Tager-Flusberg, H. (2006) Anatomical differences in the mirror neuron system and social cognition network in autism. *Cerebral Cortex*, 16, 1276-1282.
- Haken, H., Kelso, J. A., & Bunz, H. A. (1985) Theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51: 347-356.
- Harbst, K. B., Lazarus, J. C., & Whittall, J. (2000). Accuracy of dynamic isometric force production: The influence of age and bimanual activation patterns. *Motor Control*, 4: 232-256.
- Hasson, U., Ghazanfar, A. A., Galantucci, B., Garrod, S., & Keysers, C. (2012) Brain-to-brain coupling: a mechanism for creating and sharing a social world.

- Trends in Cognitive Sciences, 16: 114-121.
- Helmuth, L. L., & Ivry, R. B. (1996) When two hands are better than one: Reduced timing variability during bimanual movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22: 278-293.
- Hu, X., Loncharich, M., & Newell, K. M. (2011) Visual information interacts with neuromuscular factors in the coordination of bimanual isometric force. *Experimental Brain Research*, 209:129-138.
- Inui, N. (2005) Coupling of force variability in bimanual tapping with asymmetrical force. *Motor Control*, 9: 164-179.
- Inui, N., & Hatta, H. (2002) Asymmetric control of force and symmetric control of timing in bimanual finger tapping. *Human Movement Science*, 11: 131-146.
- Inui, N., & Ichihara T (2001) Comparison of the relation between timing and force control during finger-tapping sequences by pianists and nonpianists. *Motor Control*, 5:385-398.
- Inui, N., Ichihara, T., Minami, T., & Matsui, A. (1998) Interactions: timing and force control of finger-tapping sequences. *Perceptual and Motor Skills*, 86:1395-1401.
- Ivry, R. B., & Hazeltine, E. (1999) Subcortical locus of temporal coupling in the bimanual movements of a callosotomy patient. *Human Movement Science*, 18: 345-375.
- 伊藤文雄 (1985) 筋感覚の科学:運動のたくみさをさぐる (pp. 78-85). 名古屋大学出版会:名古屋.
- 石河利寛 (1976) 調整力を科学する. *体育の科学*, 630-637.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (1991) *Principles of Neural Science*, 3rd edition. NY: McGraw-Hill.
- Keele, S. W., Ivry, R. B., & Pokorny, R. A. (1987) Force control and its relation to timing. *Journal of Motor Behavior*, 19: 96-114.

- Kendon, A. (1970). Movement coordination in social interaction. *Acta Psychologica*, 32, 1-25.
- Keller, P. E., Knoblich, G., & Repp, B. H. (2007) Pianists duet better when they play with themselves: on the possible role of action simulation in synchronization. *Consciousness and Cognition*, 16: 102-111.
- Kelso, J. A., Southard, D. L., & Goodman, D. (1979) On the coordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5: 229-238.
- Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011) Psychological research on joint action: theory and data. In: Ross, B. (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation*, vol. 54 (pp. 59-101), Burlington, MA: Academic.
- Knoblich, G., & Jordan, J. S. (2003) Action coordination in groups and individuals: learning anticipatory control. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 29: 1006-1016.
- Konvalinka, I., Vuust, P., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2010) Follow you, follow me: continuous mutual prediction and adaptation in joint tapping. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63: 2220-2230.
- Kohler, E., Keysers, C, Umiltà, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2002) Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297: 846-848.
- Kugler, & P. N., & Turvey, M. T. (1987) *Information, natural law, and self-assembly of rhythmic movement*. Erlbaum, NJ: Hillsdale.
- Latash, M. L. (2012) The bliss (not the problem) of motor abundance (not redundancy). *Experimental Brain Research*, 217:1-5.
- Latash, M. L., Scholz, J. F., Danion, F., & Schöner, G. (2001) Structure of motor variability in marginally redundant multi-finger force production tasks. *Experimental Brain Research*, 141:153-165.

- Latash, M. L., Scholz, J. F., Danion, F., & Schöner, G. (2002a) Finger coordination during discrete and oscillatory force production tasks. *Experimental Brain Research*, 146:419-432.
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. (2002b) Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exercise and Sports Sciences Reviews*, 30:26-31.
- Latash, M. J., Shim, J. K., & Zatsiorsky, V. M. (2004) Is there a timing synergy during multi-finger production of quick force pulses?. *Experimental Brain Research*, 159: 65-71.
- Liu, D., & Todorov, E. (2007) Evidence for the flexible sensorimotor strategies predicted by optimal feedback control. *Journal of Neuroscience*, 27: 9354-9368.
- Miall, C. (2010) Motor control: correcting errors and learning from mistakes. *Current Biology*, 20: R596-R598.
- 森藤孝文, 乾 信之, 升本絢也 (2009) 手指の周期的な等尺性力発揮における力とタイミングの制御, *体育学研究*, 54 : 67-76
- Nagengast, A. J., Braun, D. A., & Wolpert, D. M. (2009) Optimal control predicts human performance on objects with internal degrees of freedom. *PLoS Computational Biology*, 5: e1000419.
- Neda, Z., Ravasz, E., Brechte, Y., Vicsek, T., & Barabasi, A.-L. (2000) The sound of many hands clapping. *Nature*, 403: 849-850.
- Newell, K. M., & Carlton, L. G. (1985) On the relationship between peak force and peak force variability in isometric tasks. *Journal of Motor Behavior*, 17:230-241.
- Newell, K. M., & Vaillancourt, D. E. (2001) Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science*, 20: 695-715.

- Newman-Norlund, R. D., Bosga, J., Meulenbroek, R. G., & Bekkering, H (2008)
Anatomical substrates of cooperative joint-action in a continuous motor
task: virtual lifting and balancing. *Neuroimage*, 41: 169-177.
- Newman-Norlund, R. D., van Schie, H. T., van Zuijlen, A. M., & Bekkering, H. (2007)
The mirror neuron system is more active during complementary compared with
imitative action. *Nature Neuroscience*, 10: 817-818.
- Noy, L., Dekel, E., & Alon, U. (2011) The mirror game as a paradigm for studying
the dynamics of two people improvising motion together. *Proceeding of the
National Academy of Sciences of the United States of America*,
108:20947-20952.
- Oldfield, R. C. (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh
inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97-113.
- Oberman, L. M., Hubbard, E. M., McCleery, J. P., Altschuler, El., Ramaachandran,
V. S., & Pineda, J A. (2005) EEG evidence for mirror neuron dysfunction in
autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*, 24: 190-198.
- Osterling, J. A., Dawson, G., & Munson, J. A. (2002) Early recognition of 1-year-old
infants with autism spectrum disorder versus mental retardation. *Development
and Psychopathology*, 14: 239-251.
- O' Sullivan, I., Burdet, E., & Diedrichsen, J. (2009) Dissociating variability and
effort as determinants of coordination. *PLoS Computational Biology*,
5:e1000345.
- Perterson, C. C., Wellman, H. M., & Liu, D. (2005) Steps in theory-of-mind
development for children with deafness or autism. *Child Development*, 76,
502-517.
- Porter, R. & Lemon, R. (1995) *Corticospinal Function and Voluntary Movement*. Oxford
University Press, New York, pp. 219-228.
- Premack, D. G. & Woodruff, G. (1978) Does the chimpanzee have a theory of mind ?.
Behavioral and Brain Sciences, 1: 515-526.

- Ranganathan, R., & Newell, K. M. (2008) Motor synergies: Feedback and error compensation within and between trials. *Experimental Brain Research*, 186: 561-570.
- Ranganathan, R., & Newell, K. M. (2009) Influence of augmented feedback on coordination strategies. *Journal of Motor Behavior*, 41: 317-330.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Schmidt, R. C. (2005). Effects of visual and verbal interaction on unintentional interpersonal coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31: 62-79.
- Rinkenauer, G., Ulrich, R., & Wing, A. M. (2001) Brief bimanual force pulses: Correlations between the hands in force and time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27: 1485-1497.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004) The mirror-neuron system. *Annual Review Neuroscience*, 27: 169-192.
- Robertson, S. D., Zelaznik, H. N., Lantero, D. A., Bojczyk, K. G., Spencer, R. M., Doffin, J. G., & Schneidt, T. (1999) Correlations for timing consistency among tapping and drawing tasks: evidence against a single timing process for motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 25:1316-30.
- Rogers, S. J., & Pennington, B. F. (1991) Atheoretical approach to the deficits in infantile autism. *Developmental and Psychopathology*
- Scott, S. H. (2004) Optimal feedback control and the neural basis of volitional motor control. *Nature Review Neuroscience*, 5: 532-46.
- Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998) A comparison of within- and between-person coordination: Coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24: 884-900.
- Schmidt, R. C., & O' Brien, B. (1997) Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, 9: 189-206.

- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990) Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16: 227-247.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T. (1979) Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86: 415-451.
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1989) A quantitative approach to understanding the formation and change of coordinated movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, 21: 122-144.
- Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999) The uncontrolled manifold concept: Identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, 126: 289-306.
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006) Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Science*, 10: 70-76.
- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009) Prediction in joint action: what, when, and where. *Topics in Cognitive Science*, 1: 353-367.
- Shockley, K., Santana, M. V., & Fowler, C. A. (2003). Mutual interpersonal postural constraints are involved in cooperative conversation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29: 326-332.
- Slifkin, A. B., & Newell, K. M. (1999) Noise, information transmission and force variability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25: 837-851.
- Slifkin, A. B., & Newell, K. M. (2000) Variability and noise in continuous force production. *Journal of Motor Behavior*, 32:141-50.
- Smyth, M. M. (1984). Memory for movements. In M. M. Smyth & A. M. Wing (Eds.), *The psychology of human movement* (pp. 83-117). London: Academic Press.

- Spencer, R.M.C., Zelaznik, H.N., Diedrichsen, J., Ivry, R.B., 2003. Disrupted timing of discontinuous movements by cerebellar lesions. *Science*, 300: 1437-1439.
- Spraker, M. B., Crocos, D. M., & Vaillancourt, D. E. (2009) Cortical and subcortical mechanisms for precisely controlled force generation and force relaxation. *Cerebral Cortex*, 19: 2640-2640.
- Sternad, D., Dean, W. J., & Newell, K. M. (2000) Force and timing variability in rhythmic unimanual tapping. *Journal of Motor Behavior*, 32:249-387.
- Steglich, C., Heuer, H., Spijkers, W., & Kleinsorge, T. (1999) Bimanual coupling during the specification of isometric forces. *Experimental Brain Reserach*, 129:302-316.
- Taylor, A. M., Christou, E. A., & Enoka, R. M. (2003). Multiple features of motor-unit activity influence force fluctuations during isometric contractions. *Journal of Neurophysiology*, 90:1350-1361.
- Tuller, B., Turvey, M. T., & Fitch, H. L. (1982) The Bernstein perspective: II. The concept of muscle linkage or coordinative structure. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Human motor behavior: An introduction* (pp. 253-270). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Todorov, E. (2004) Optimality principle in sensorimotor control. *Nature Neuroscience*, 7:907-915.
- Todorov, E, & Jordan, M. I. (2002) Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, 5:1226-1235.
- Tollefsen, D. (2005) Let' s pretend! Children and joint action. *Philosophy of the Social Sciences*, 35: 75-97.
- Turvey, M. T. (1990) Coordination. *American Psychologist*, 45:938-53.
- Valero-Cuevas, F. J., Venkadesan, M., & Todorov, E. (2009) Structured variability of muscle activations supports the minimal intervention principle of motor control. *Journal of Neurophysiology*, 102: 59-68.

- Van der Wel, R. P. R. D., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2011). Let the force be with us: Dyads exploit haptic coupling for coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37: 1420–1431.
- van der Wel, R. P. R. D., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2012) The sense of agency during skill learning in individuals and dyads. *Consciousness and Cognition*, 21:1267–1279.
- Varadhan, S. K. M., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2010) Variance components in discrete force production tasks. *Experimental Brain Research*, 205:335–349.
- Vereijken, V.B., Van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992) Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 24, 133–142.
- Wasaka, T., Kida, T., & Kakigi, R. (2012) Modulation of somatosensory evoked potentials during force generation and relaxation. *Experimental Brain Research*, 219: 227–233.
- Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003) A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal SocietyB: Biological Sciences*, 358: 593–602.

付記

本論文に関する主要学術論文は以下のとおりである。

第二章

Masumoto, J., and Inui, N. (2010) Control of increasing or decreasing force during periodic isometric movement of the finger. *Human Movement Science*, 29, 339-348.

第三章

Masumoto, J., and Inui, N. (2012) Effects of force levels on error compensation in periodic bimanual isometric force control. *Journal of Motor Behavior*, 44, 261-266.

第四章

Masumoto, J., and Inui, N. (2013) Effects of movement duration on error compensation in periodic bimanual isometric force production. *Experimental Brain Research*. 227: 447-455.

第五章

Masumoto, J., and Inui, N. (2013) Two heads are better than one: both complementary and synchronous strategies facilitate joint action. *Journal of Neurophysiology*, 109: 1307-1314.

本論文の参考文献は以下のとおりである。

Masumoto, J., & Inui, N. (2011) Practice effects on decreasing and increasing force-control during periodic isometric movements of the index finger. *Perceptual and Motor Skills*, 113: 1027-1037.

Masumoto, J., & Inui, N (2012) Effects of practice on magnitude and structure of force variability during periodic unimanual isometric force production. *Perceptual and Motor Skills*, 115: 702-714.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、丁寧なご指導、ご鞭撻を頂いた鳴門教育大学乾信之教授に心より感謝申し上げます。乾信之教授には、鳴門教育大学大学院修士課程より、運動の制御と学習に関してご指導頂きました。また、修士課程から博士課程まで、研究を進めるための環境を整備して頂きました。このような支援のおかげで、私は充実した研究生を送り、多くの成果を上げられたので、心から感謝しております。

鳴門教育大学梅野圭司教授と岡山大学足立稔教授には、講義等の時間以外でも、親身になって相談にのっていただき、多大な助言を頂きました。深くお礼申し上げます。梅野教授と足立教授は自身の研究分野に一辺倒になりがちだった私に広い視野を授けてもらいました。

博士論文を書くにあたり、兵庫教育連合大学大学院連合学校教育研究化の先生方には、博士課程のセミナー等で多くの助言を頂き、心よりお礼申し上げます。

福山平成大学山西正記には、学部時代に熱心に勉強に取り組んだことも無かった私を研究の世界に誘っていただきました。さらに、修士課程から博士課程まで、気にかけていただき厳しくも暖かい助言を何度も頂き、心からより感謝申し上げます。

最後に、これまで自分の思う道を進むことに対し、暖かくみまもり辛抱強く支援してくださった両親に対しては深く感謝しています。