

茨城県立医療大学大学院博士論文

学習利得を高めるための
視覚フィードバック付与方法の追求

山本 良平

茨城県立医療大学大学院博士後期課程保健医療科学研究科
保健医療科学専攻理学療法学領域

2018年3月

目次

論文要旨	1
第1章 序論	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 理学療法と運動学習	3
1.2 運動学習理論における重要項目	4
1.2.1 Learning – performance distinction	4
1.2.2 練習条件	5
1.2.3 視覚情報を用いたフィードバック研究	7
1.2.3.1 視覚情報を用いたフィードバックを構成する要因	7
1.2.3.2 複雑な課題における視覚フィードバックによる運動学習効果	10
1.2.4 課題難易度	11
1.2.4.1 Gentile の課題分類	11
1.2.4.2 Challenge Point Framework	13
1.3 本研究の目的及び意義	15
1.4 本論文の構成	15
1.5 研究の倫理的配慮	15
第2章 第1研究	16
2.1 研究の背景と目的	16
2.2 対象	16
2.3 方法	17
2.3.1 本研究に用いた課題	17
2.3.1.1 学習課題	17
2.3.1.2 副課題	18
2.3.2 フィードバック	19
2.3.2.1 フィードバックの情報様式とその内容	19
2.3.2.2 フィードバック条件	20
2.3.3 初期スキルレベル	21
2.3.4 測定機器	22
2.3.5 手続き	24
2.3.5.1 測定の流れ	24
2.3.5.2 練習及びテストのスケジュール	24
2.3.6 分析方法	25
2.3.6.1 学習を評価するパラメータ	25
2.3.6.2 統計学的分析	26

2.4	結果.....	27
2.4.1	RMSE - T.....	27
2.4.2	RMSE - P.....	31
2.5	考察.....	35
2.6	小括.....	39
第3章	第2研究	40
3.1	研究の背景と目的.....	40
3.2	対象.....	42
3.3	方法.....	42
3.4	フィードバック.....	43
3.4.1	フィードバックの情報様式とその内容.....	43
3.4.2	フィードバック条件.....	43
3.5	分析方法.....	44
3.6	結果.....	45
3.6.1	RMSE - T.....	45
3.6.2	RMSE - P.....	47
3.7	考察.....	48
3.8	小括.....	50
第4章	総括	51
4.1	本論文の結論.....	51
4.2	理学療法への示唆.....	56
4.3	今後の展望.....	58
	謝辞.....	59
	引用文献.....	60

表一覧

表 1 .	Gentile の課題分類.....	12
表 2 .	フィードバック条件.....	21
表 3 .	RMSE - T のプレテストの成績によるフィードバック条件の内訳.....	27
表 4 .	RMSE - P のプレテストの成績によるフィードバック条件の内訳.....	31

図一覧

図 1 .	トランスファー・デザイン.....	5
図 2 .	様々なフィードバック付与方法における運動学習効果.....	7
図 3 .	削減的フィードバック.....	9
図 4 .	機能的課題難易度における最適な課題難易度.....	13
図 5 .	測定環境.....	17
図 6 .	荷重量調整の順序.....	18
図 7 .	視覚フィードバックの情報.....	19
図 8 .	測定機器.....	22
図 9 .	床反力計の出力電圧と MuWiC への入力電圧.....	23
図 10 .	練習とテストのスケジュール.....	24
図 11 .	RMSE - T の分析範囲.....	25
図 12 .	RMSE - P の分析範囲.....	26
図 13 .	各群の RMSE - T の推移.....	28
図 14 .	同時フィードバック条件と最終フィードバック条件における RMSE - T	29
図 15 .	初期スキル高条件と初期スキル低条件における RMSE - T の推移	30
図 16 .	各群の RMSE - P の推移.....	32
図 17 .	初期スキル高条件と初期スキル低条件における RMSE - P の推移	34
図 18 .	初期スキル高条件と差初期スキル低条件における パフォーマンスの推移	38
図 19 .	初期スキル高条件の学習者のブロック 3 における パフォーマンス	40
図 20 .	第 2 研究で用いた視覚フィードバックの情報.....	43
図 21 .	フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件 における RMSE - T	46
図 22 .	フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件 における RMSE - P	47
図 23 .	フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件 の機能的課題難易度	49
図 24 .	フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件 に用いたフィードバック情報	50

博士論文に関連する研究業績

1) 学術論文

- Yamamoto R, Ohashi Y. The effects of inaccessible visual feedback used concurrently or terminally. *Journal of Physical Therapy Science*, 2014; 26 (5): 731-735.

論文要旨

視覚フィードバックは理学療法場面でも用いられることの多いフィードバック付与方法である。これまでに、これまでに、課題の難易度との関係により視覚フィードバックを与えるタイミングや頻度による運動学習の効果が変化すると報告されている。しかし、学習者のスキルレベルを考慮してフィードバック条件を設定するための方法論は確立されていない。健常者にとって簡単な課題であっても理学療法の対象となる患者にとっては難しい課題となる可能性が高く、学習する課題そのものの難易度だけではなく学習者にとってどの程度難しい課題であるかを考慮してフィードバック条件を設定する必要がある。

そこで、本研究では、スキルレベルの異なる学習者に対して運動学習を効率的に生起させるフィードバック条件を設定するための方略を示すことを目的に、学習者のスキルレベルの高低により視覚フィードバックを与えるタイミングと頻度の運動学習に与える効果がどのように異なるのかを第1研究にて検証した。学習課題には連続した下肢荷重量調節課題を用い、下肢への荷重量に応じてランプを点灯させることでフィードバック情報とした。また、スキルレベルの異なる学習者に対して異なるタイミング（同時、最終）及び頻度（100%、50%）で構成されたフィードバック条件を設定した。第1研究の結果、フィードバック頻度の効果は認められなかったものの、フィードバック・タイミング及びスキルレベルの効果が認められた。同一の学習課題に対してスキルレベルの高い学習者とスキルレベルの低い学習者のうち最終フィードバックを用いた学習者では運動学習が生じなかったが、スキルレベルの低い学習者のうち同時フィードバックを用いた学習者では練習中のパフォーマンスの向上と運動学習が生じた。この結果から、学習課題に対するスキルレベルが低い場合には同時フィードバックが有効に働くことが明らかとなった。

第1研究の結果を受けて、練習前のスキルレベルが比較的高い学習者の運動学習を生起させるためのフィードバック条件を探索すべく第2研究を行った。第2研究では第1研究のスキルレベルの高かった学習者と同等のスキルレベルの学習者を研究協力者とした。フィードバックとして使用するランプの数を増やし、より精度の高い情報とすることでより高いパフォーマンス及び運動学習を生じさせるかを検証した。その結果、より精度の高いフィードバック情報を用いた条件では精度の低いフィードバック情報を用いた条件と比較して練習中に高いパフォーマンスを示した。この結果から、フィードバック・タイミング及び頻度の操作だけではパフォーマンスの向上が困難と考えられるスキルレベルの高い学習者においてはより精度の高いフィードバックが練習中のパフォーマンスの向上に有効に働くことが明らかとなった。

第1研究, 第2研究の結果から, 課題そのものの難易度の高い学習課題を練習する際の視覚フィードバック条件の設定については以下のように考えられる。学習者のスキルレベルが低い場合には同時フィードバックを用いて練習パフォーマンスを向上させ, 運動学習が生起するよう働きかけることが推奨される。しかし, 学習者の初期スキルレベルが比較的高いために, 同時フィードバックの利用を用いても練習パフォーマンスの向上が望めない場合には, フィードバックとして提示する視覚情報の利用のしやすさを向上させることで, 練習中のパフォーマンスを向上させるよう働きかけることが推奨される。

しかし, 本実験にはいくつかの限界が存在する。第2研究において, 初期スキル高条件の学習者のみを対象とし, フィードバック・タイミングとして同時フィードバックのみを使用しているため, 同様のフィードバック情報を初期スキル低条件の学習者が用いた場合や最終フィードバック条件で用いた場合に得られる効果については検討できない。また, 第2研究のフィードバック精度高条件では, 練習中のパフォーマンスの向上は認めたが, 運動学習は生起しなかった。これらのことから, 今後, 第2研究で用いた視覚情報を様々なスキルレベルの学習者に適用した研究を行うことで, 学習者のスキルレベルに応じてどのような情報をどのようなタイミング及び頻度で付与するかを決定するための指針が得られると考えられる。

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 理学療法と運動学習

本研究では学習者の練習前のスキルレベルを考慮して、運動学習に効果的な視覚フィードバック付与方法について検討した。理学療法士は様々な疾患や障害に起因する心身機能の低下に対して、運動や物理的手段を用いて治療介入し、心身機能の改善に努める。しかし、これらの患者では障害を有することにより、障害に起因する心身機能の低下が軽減・改善されたとしても、病前と同様の方法では目的とする動作を遂行できない場合が多く存在する。このような場合に理学療法士は、患者の目的とする動作を達成可能にする動作戦略を発見・指導し、達成可能な動作となるまで練習を行わせ学習させる。大橋¹⁾は、理学療法士の仕事の中核に「運動の仕方を教える」ことがあるとし、運動学習の概念なしに理学療法を行うことはできないと考えている。患者が動作を学習し実践できるようになることは患者が社会に復帰し、生活を送るために必要なことであり、患者に目的とする動作を学習させることは理学療法の重要な目的の1つである。

運動学習とは「技能的行動を行い得る能力の比較的永続的な変化を引き起こす練習や経験に基づく一連の過程」と定義されている^{2,3)}。つまり、健常児の発達によって獲得される寝返りや歩行に関しては運動学習とは言えないが、運動機能に制限のある小児、成人の障害者が様々な機能訓練や歩行訓練を通して歩行できるようになることは運動学習といえる。運動学習理論は心理学に端を発し、これまでに多くの研究が取り組まれ、様々な知見が積み上げられてきている。運動学習理論に基づいて理学療法を提供することで患者の必要とする動作の獲得を効率的に生じさせることが可能となると考えられる。しかし、運動学習理論に関しては後述するが、現状では具体的な方法を提示するような治療戦略を有しているわけではなく、多くの理学療法士が自己の経験や直観により運動学習理論を用いているとも指摘されている⁴⁾。よって運動学習理論を用いて患者の運動学習を効率的に生起させる方法論を確立することは急務であり、リハビリテーション分野の発展に寄与することのできる重要な研究課題といえる。次項より、運動学習に関わる重要な項目について概説していく。

1.2 運動学習理論に関わる重要項目

1.2.1 Learning – performance distinction

学習者は練習により運動技能の向上を図り運動学習を生起させようと試みる。しかし、この運動技能の変化はあくまでもその練習条件下における現象であり、練習中に用いられた手掛かりや指導がなくなった途端に練習前のパフォーマンスに戻る可能性がある。このように練習中のパフォーマンスと練習後のパフォーマンスに乖離が生じることを **Learning – Performance distinction** という⁵⁾。前項で示した運動学習の定義から、練習によるパフォーマンスの変化のうち、休憩などで生じた時間間隔により消失してしまうものは運動学習ではなく、練習・経験による永続的效果のみを運動学習とみなすことが出来る。**Learning – Performance distinction** は理学療法の臨床場面において重要な事柄である。なぜなら、患者が理学療法中に示しているパフォーマンスは確実に学習されたものとは限らず、翌日には失われる可能性を多分に含んでいるからである。患者は練習により向上させたパフォーマンスを生活場面で実行できるようになることを目指しており、生活場面で実行するには比較的永続的な効果を引き出す必要があると考えられる。

この **Learning – Performance distinction** の問題を解決し、練習により生じた能力の変化が一時的な効果ではなく、比較的永続的とされる運動学習の成果であるかどうかを評価するために **Schmidt** により考案されたのが **トランスファー・デザイン** である²⁾。トランスファー・デザインはプレテスト、練習試行、ポストテストの3つの段階で構成される(図1)。まず、プレテストは学習者の練習を行う前のスキルレベルを評価するために行われる。次に、練習試行では、実験の目的により課題配置方法やフィードバック付与方法、試行数などの練習条件が操作される。異なる練習条件を用いて同じ課題を練習させることで、その練習条件間で運動学習に対する効果が異なるのかについて検証することが可能である。最後にポストテストに関しては、一般にプレテストからの変化について検証するためにプレテストと同様の内容を実施する。プレテスト・ポストテストに関しては練習中に用いられる練習条件の効果をなくすためにフィードバック等の手掛かりは用いない。また、練習中に用いられた手掛かりや指導、疲労等の影響を取り除くため、練習試行終了後に一定の時間間隔を設けて行われる。設けられる時間間隔は研究により異なる。

保持テストにおいて練習中に用いられる手掛かりや指導がなくなった後にも練習中に得られた水準のパフォーマンスを発揮することができれば、これが練習によって形成された成果、つまり運動学習であると判定できる。

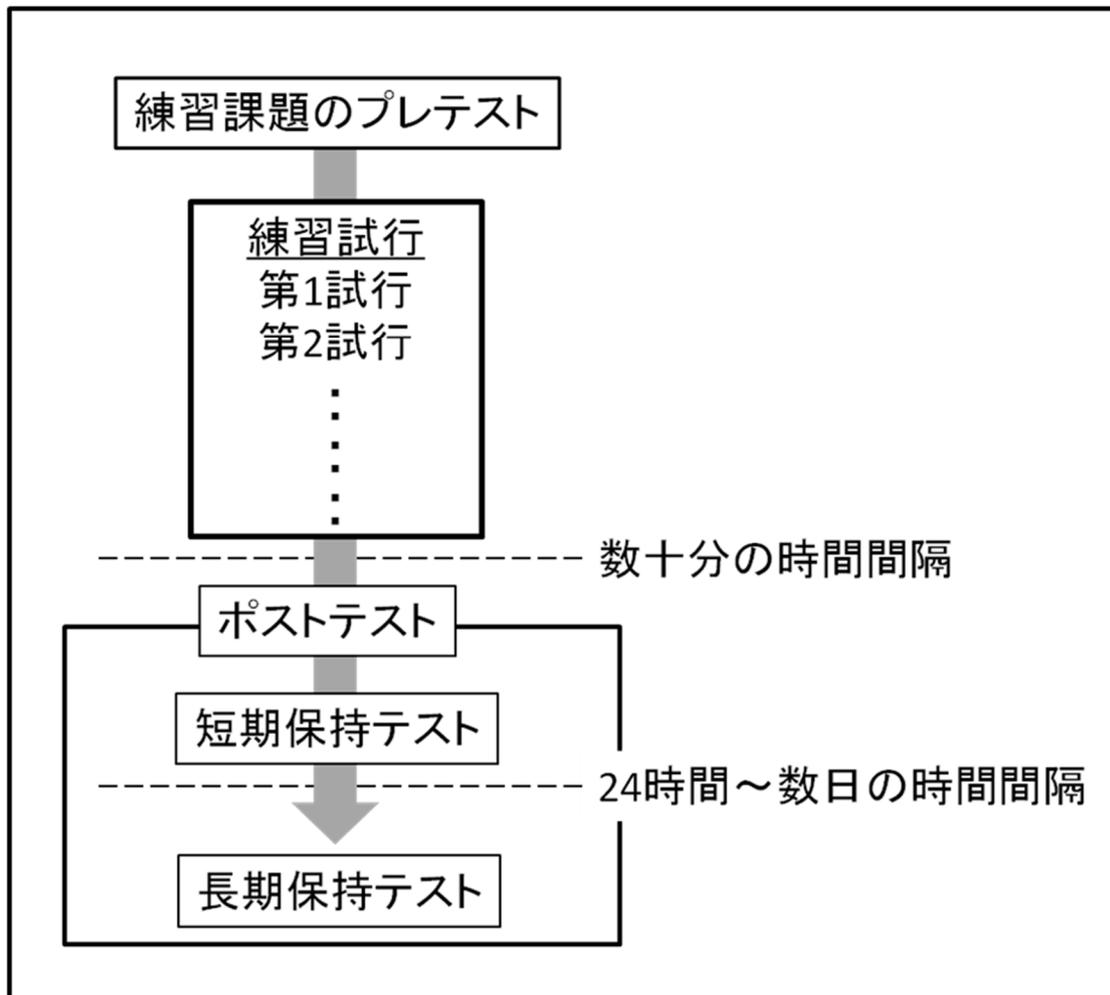


図1 トランスファー・デザイン

1.2.2 練習条件

学習者が学習課題を練習する際に理学療法士等の指導者は練習条件を操作する。練習条件を構成する項目としては練習試行数やフィードバック付与方法などが挙げられる。練習試行数に関しては、Crossman⁶⁾の葉巻作成の習熟度とその練習回数に関する調査がよく知られており、試行数は多いことが望ましいとされている。Crossmanによると、葉巻を作成するのに要する時間がそれ以上短縮しなくなるまでに2年を要し、課題の試行回数は約300万回であったと報告している。このことから動作の反復が運動学習を生起させ、長い時間をかけて高い運動技能の獲得につながることをわかる。しかし、この結果を理学療法に応用しようとする、回復期リハビリテーション病棟等においては入院日数に上限があり、ある程度限られた練習回数の中で移動、起居動作、日常生活活動等の多くの動作の獲得が迫られることとなる。このように練習回数が限られる中で必要となる動作の獲得を果たすためには、運動学習を効率的に生起させる必要がある。つまり、少

ない練習回数でより高い水準の動作能力を獲得させることがもとめられる。運動学習を効率よく生起させるために調整される練習条件の1つがフィードバック付与方法である。谷は、理学療法における徒手療法などの治療技術に加えて、誰にでも用いることの出来る口頭による指示や伝達の重要性を述べている⁷⁾。フィードバックに関する研究は心理学に端を発し、これまでに様々な研究がおこなわれ、多くの知見が得られてきた。

フィードバック付与方法に関しては、練習試行数とは異なり、構成する要因が多岐にわたる。フィードバック付与方法を構成する要因として、フィードバックの情報様式やフィードバックを与えるタイミング、フィードバックを与える頻度が挙げられる。また、フィードバックを与える頻度や与えられる試行を一定のルールに則って決めるフィードバック付与方法—要約フィードバック、平均フィードバック、削減的フィードバック、バンド幅フィードバック、セルフコントロール・フィードバック等—も存在する。

フィードバック情報様式に関しては視覚情報、聴覚情報、固有受容感覚情報の3つがある。どの情報様式も理学療法の様々な臨床場面で用いられている。視覚情報は筋電図バイオフィードバックや鏡面像を利用したフィードバック、カメラで撮影した映像によるフィードバックなどが挙げられる。聴覚情報に関しては口頭によるフィードバックや音声を用いた姿勢矯正装置などが挙げられる。固有感覚情報に関しては、ロボティクス・トレーニングや歩行時のハンドリングなどが挙げられる。Sigrist⁸⁾は、フィードバックの運動学習への影響についてレビューを報告している。図2はこのレビューの中で示されている種々のフィードバック情報様式における運動学習効果を課題の難易度との関係から示したものである。左端に示された矢印は学習課題が学習者にとってどの程度難しい課題であることを示し、上に行くほど難易度が高いことを示している。次に、各図形の横幅は運動学習の利得を示しており、幅が大きいほど学習利得が高いことを意味する。

general と記載された左端の図形は高頻度なフィードバックを与える一般的な運動学習効果を示しており、課題が学習者にとって複雑であるほど高頻度なフィードバックによる運動学習効果が大きくなることを示している。**visual, auditory, haptic, multimodal** と記載された図形はそれぞれ視覚、聴覚、固有受容感覚、複合感覚のフィードバックの情報様式を示している。視覚情報については2つの図形が示され、フィードバックの与えられるタイミングが運動学習に与える影響を示している。下部に**concurrent** と記載した視覚の左側の図は動作遂行中に与えられる同時フィードバックの運動学習効果を示しており、図の形から学習課題が学習者にとって難しい課題であるほど高い運動学習効果を示すことを表している。次に下部に**terminal** と記載した右側の図は動作終了後に与えられる最終フィードバックの運動学習効果を示しており、学習課題が学習者にとって簡単な課題であるほど高い運動学習効果を示すことを表している。各図形の実線部分はこれまで

に多くの研究がなされ、ある程度その効果が保証されているが、点線部分に関してはこれまでに行われてきた先行研究の結果からはその効果を十分に保証できないことを示している。情報様式の中で視覚フィードバックにおいては実線でのみ示されており、その効果がその他の情報様式と比べて保証されているため、最も利用可能性の高いフィードバックの情報様式であるといえる。そこで次節で視覚フィードバックの与えられるタイミング及び頻度が運動学習に与える影響について概説する。

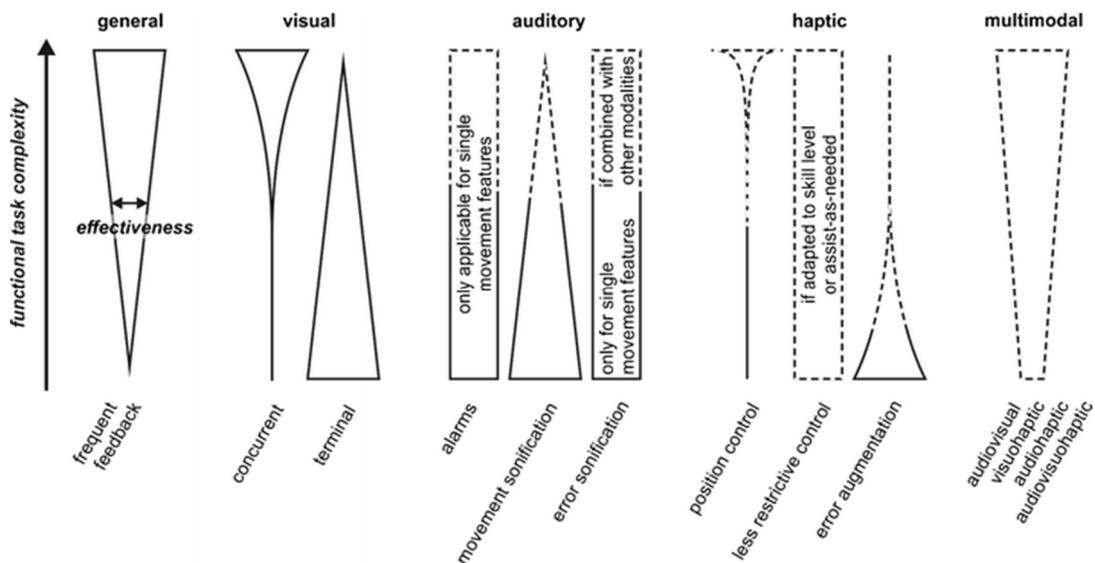


図2 様々なフィードバック付与方法における運動学習効果

Psychonomic Bulletin & Review 2013

Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review より引用

1.2.3 視覚情報を用いたフィードバック研究

1.2.3.1 視覚情報を用いたフィードバックを構成する要因

視覚情報を用いたフィードバックの運動学習への影響に関する多くの研究においてSigristのレビューでも説明されている通り、フィードバック頻度とフィードバック・タイミングが操作されている。

まず、フィードバック頻度について述べる。フィードバック頻度は視覚情報を用いたフィードバックに限らず聴覚性フィードバック、固有受容感覚フィードバック等でも操作される要因であり、練習試行数に対する与えられるフィードバックの割合で定義される。多くの研究では、全試行に対してフィードバックを与える方法と比較し、頻度を削減させたフィードバックは短期的なパフォーマンスの向上には有害であるが、長期的な学習という面ではポジティブに影響すると報告されている^{9・11}。

これらの結果はガイダンス仮説により説明される¹²。[大橋1] ガイダンス仮説では、フィードバックとは誤差を伝える情報であるという性質から、高頻度あるいは即時的なフィードバックには、練習中の学習者のパフォーマンスをより誤差の小さいものへと誘導する作用があると考えられている。しかし、このようにフィードバック情報は誤差を小さくする効果を有する反面、学習課題が単純な場合には高頻度あるいは即時的なフィードバックは学習者のフィードバックへの依存を生じさせ、運動学習に重要とされる課題遂行中の内在性フィードバックへの注意をおろそかにさせてしまい、練習中に高いパフォーマンスを示したとしても運動学習が十分に生起しなくなってしまう。ガイダンス仮説は単純な課題を用いた研究結果において支持されている^{13・15}。

フィードバック頻度を操作する方法として、削減的フィードバックがある。図3は1つの練習ブロックを5試行とする場合の削減的フィードバックの一例である。図に示すように、練習初期には練習試行数に対して高頻度のフィードバックを提供されるが、練習の経過に伴いフィードバック頻度が減少していく。減少のさせ方は研究の手法によって異なる。学習者は練習初期にフィードバック情報を十分に利用することでパフォーマンスを向上させ、練習後半にはフィードバック頻度が減少するため、ガイダンス仮説で示されているフィードバックへの依存を防ぐことが可能となり、運動学習に効果的であるという結果が得られている^{16,17}。ただし、フィードバック頻度の削減のさせ方はあらかじめ決められているため、学習者の練習中のパフォーマンスが向上していなくてもフィードバック頻度は減少してしまう。学習者のパフォーマンスの変化に準じてフィードバックを減少させる必要があると考えられるが、適切な漸減のさせ方については明らかとなっていない。

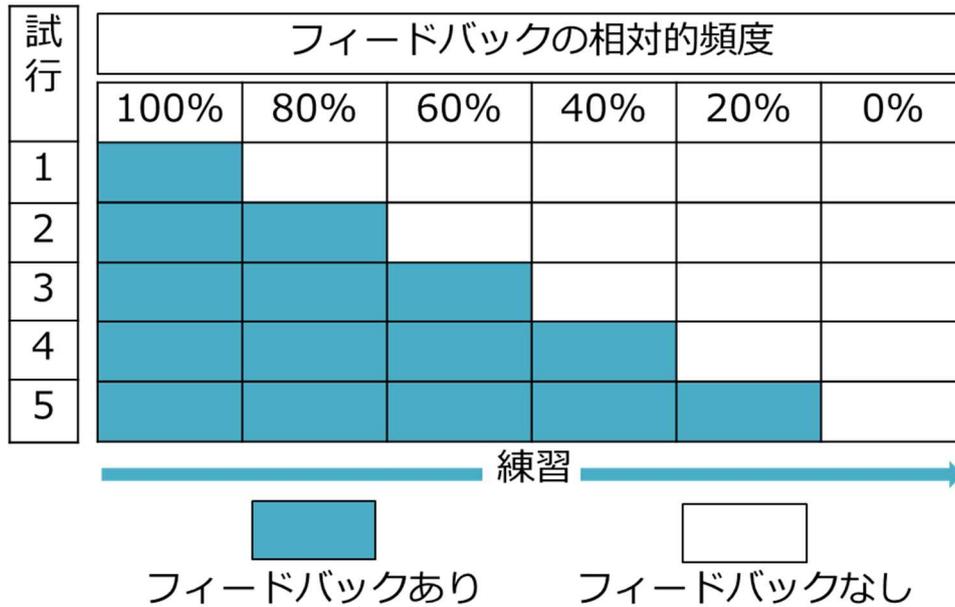


図3 削減的フィードバック

次に、フィードバック・タイミングは視覚フィードバックを操作する代表的な要因であり、同時フィードバックと最終フィードバックの2種類のフィードバック・タイミングが定義されている。動作遂行中に与えるフィードバックを同時フィードバック、動作終了後に与えるフィードバックを最終フィードバックと呼ぶ¹⁸⁾。同時フィードバックの特徴は、動作に関する情報が動作と並行して与えられ、練習時にほぼ正しい反応のみが反復され、動作が外部から規制されることである。最終フィードバックは対照的に、動作に関する情報が動作中に与えられないために、エラーが大きくなることも多い。

視覚情報を用いた同時フィードバックに関する研究の多くは、同時フィードバックは練習中のパフォーマンスを向上させるが、保持テストにおいては増幅されたパフォーマンスを保持することが出来ないと報告している¹⁹⁻²¹⁾。これらの研究の多くは学習課題として単純な目標位置へのレバーの移動課題等を用いて行われてきた^{13-15, 22)}。単純な学習課題における同時フィードバック使用後の保持テストでのパフォーマンスの低下に関しては、フィードバック頻度と同様にガイダンス仮説で説明することが可能である。

フィードバック・タイミングとフィードバック頻度の2つの要因の学習効果について検証している研究も報告されている。Fox²³⁾は1回おきに視覚情報を与えない試行を設けて行われる同時フィードバック条件を設定して研究を行っており、その結果、最終フィードバック条件群との間に学習レベルの差は見られなかった

ことを示している。Fox はフィードバック頻度を削減する条件を用いたことで、同時フィードバック条件でも視覚情報への依存性が低下し、その結果、最終フィードバック条件と同様の学習成績を示すことができたのではないかと示唆している。Park ら²⁴⁾も同様に、同時フィードバック条件のフィードバック頻度を削減させることで運動学習が効率的に生起することを示している。単純課題の学習においては練習中にフィードバックのない試行が設定されている場合²⁵⁾、もしくは最終フィードバックと組み合わせて用いられる場合、同時フィードバックが運動学習効果を示すと報告されている²⁶⁾。Park, Shae, Wright²⁷⁾は同時フィードバックが上肢の力量調節課題において、最終フィードバックや交互にフィードバックを与えない試行を設けた時にのみその効果が得られたと報告し、練習中のフィードバックを与えない試行は内部の誤差検出や修正の能力の発達、外来性のフィードバックへの依存を避けるために重要であると述べている。

これらの研究結果は単純課題の学習において視覚フィードバックの与えられるタイミングと頻度がガイダンス仮説で説明されるような効果を有しており、互いに影響しあうことを示している。しかし、学習課題における視覚フィードバックのタイミング及びフィードバック頻度の効果は学習課題の難易度により変化するとされている²⁵⁾。

1.2.3.2 複雑な課題における視覚フィードバックによる運動学習効果

視覚フィードバックの運動学習効果に関する研究はタッピング課題やレバーの操作課題などの単純な課題を用いて行われてきたが、近年単純な課題を用いた研究結果をスポーツ課題のような複雑な課題の練習場面にそのまま適応することに対して懐疑的な意見が見られるようになった。Camachon ら²⁸⁾は、1Hzの周波数で開閉する一対の仮想のスライドドアが学習者の前方に配置され、そのドアを通過するために、トレッドミルを用いて作成された仮想の直進廊下を進行することを学習課題とした。この研究では、同時フィードバックの複雑な課題に対する学習効果が検証され、同時フィードバックは学習者が課題に特化した情報にアクセスするのを補助すると報告されている。Huet らも同様の結果を報告している²⁹⁾。さらに、卓球のスイング課題の学習の初期段階においては、学習者は同時フィードバックから良い効果を得ると報告されており、単純課題を用いた研究結果とは異なる結果が報告されている³⁰⁾。

Snodgrass ら³¹⁾は、理学療法におけるモビライゼーション技術の施術中の力量を、目標とする力量に一致させるよう調節する課題を用いて、同時フィードバックと最終フィードバックの組み合わせとフィードバックなし条件を比較した。その結果、保持テストにおけるフィードバック群の優位性が確認された。Chang

ら³²⁾も類似したモビライゼーション課題を用いて、最終フィードバックと同時フィードバックが同等の効果を示したと報告しており、同時フィードバックが運動学習の促通に寄与する可能性はあるが、最終フィードバックを超えるほどのものではなかったとしている。

一般的に、複雑な課題の学習を促進するためには、認知的過負荷を避けるために **cognitive demand** を減少させることが望ましい。これに関しては、高頻度なフィードバックは認知的な負荷を低下させるとする報告がある²⁵⁾。複雑なスラローム様課題の学習では、全試行に対する同時フィードバックが2回に1度のフィードバックと比較して効果的に働いたと報告されている³³⁾。これらの研究はフィードバック・タイミングだけではなくフィードバック頻度も複雑な学習課題の運動学習に影響を与えることを示している。さらに、削減的フィードバックを用いるならば、同時フィードバックでも最終フィードバックでも運動学習効果を示したとする報告もある^{16,17)}。**Blandin** ら²⁶⁾は、同時フィードバックと最終フィードバックを組み合わせると、同時フィードバックの情報処理を制限することにより、同時フィードバックへの依存を低下させると報告している。このように、複雑な学習課題のフィードバック条件を設定する際にも最終的にはフィードバックへの依存を低下させる必要があることが示唆されている。

これまで、視覚フィードバック条件の運動学習への効果に関する研究では比較的複雑な課題が用いられてきたが、用いられている課題そのものは研究によって異なる^{30,31,34-36)}。学習課題が複雑であるか単純であるかを定義・判断するには課題難易度の概念が有用である。そこで次に、学習課題の難易度に関する知見について述べる。

1.2.4 課題難易度

1.2.4.1 Gentile の課題分類

Gentile³⁷⁾は、課題を、課題遂行中の環境変化の有無、試行間における環境変化の有無、身体移動の有無、対象物操作の有無の4つの面から分類している(表1)。この分類では、課題遂行中の環境と試行間における環境に変化が無く、身体移動や対象物の操作を伴わない課題において最も課題の変動性が低く、課題の有する情報量が少ないことを示している。一方で、課題遂行中の環境と試行間に

おける環境に変化が有り，身体移動や対象物の操作を伴う課題において最も課題の変動性が高く，課題の有する情報量が多くなると示している。この分類では多くの場合，環境の変化や身体移動，対象物の操作がないほど課題難易度が低くなると考えられる。

環境規制 状況	試行間 変動	身体移動なし		身体移動あり	
		対象物の操作		対象物の操作	
		なし	あり	なし	あり
環境の変化 なし	試行間変動 なし	身体移動のない閉運動課題	対象物の操作を含む身体移動のない閉運動課題	身体移動のある閉運動課題	対象物の操作を含む身体移動のある閉運動課題
	試行間変動 あり	異なる固定環境における身体移動のない閉運動課題	異なる固定環境において対象物の操作を含む身体移動のない閉運動課題	異なる固定環境における身体移動のある閉運動課題	異なる固定環境において対象物の操作を含む身体移動のある閉運動課題
環境の変化 あり	試行間変動 なし	一定の動的環境における身体移動のない閉運動課題	一定の動的環境において対象物の操作を含む身体移動のない閉運動課題	一定の動的環境における身体移動のある閉運動課題	一定の動的環境において対象物の操作を含む身体移動のある閉運動課題
	試行間変動 あり	身体移動のない開運動課題	対象物の操作を含む身体移動のない開運動課題	身体移動のある開運動課題	対象物の操作を含む身体移動のある開運動課題

表 1 Gentile の課題分類

1. 2. 3. 2 Challenge Point Framework

Guadagnoli ら³⁸⁾は課題難易度に関して、様々な先行研究で得られた知見を基に Challenge Point Framework を提唱した。Challenge Point Framework では課題難易度を名目的課題難易度 (nominal task difficulty) と機能的課題難易度 (functional task difficulty) という2つの枠組みに分類している。名目的課題難易度とは、実施環境や誰が行うのかということにかかわらず、課題そのものの有する難易度のことである。つまり、2足交互型の歩行という課題は健常者にとっても脳卒中片麻痺患者にとっても名目的課題難易度は変わらない。一方、機能的課題難易度とは、学習者の技能レベルや練習環境により変化し得る課題難易度のことである。つまり、2足交互型の歩行は健常者にとってははいたもたやすく機能的課題難易度は低い。一方、脳卒中片麻痺患者の場合には、その重症度により機能的課題難易度は変化し、健常者と比較した場合には往々にして高くなる。ただし、患者が杖や装具などの歩行補助具の使用や理学療法士による徒手誘導などの歩きやすくなるような手段を用いると機能的課題難易度が低下する可能性がある。

Challenge Point Framework の中で機能的課題難易度と練習中のパフォーマンスおよび運動学習の成果の関係は図4のように示されている。機能的課題難易度の上昇により練習中のパフォーマンスは低下していく。それに対し、学習の成果は逆U字型に推移する。つまり、機能的課題難易度が低すぎると練習中は高いパフォーマンスを示すが、運動学習が生起せず、対照的に機能的課題難易度が高すぎると練習中に十分にパフォーマンスが向上せず、運動学習も生起しない。機能的課題難易度が低すぎず、高すぎない場合に学習の成果は最大となる。この学習の成果が最大となる機能的課題難易度を Challenge Point Framework では最適な課題難易度 (optimal challenge point) と呼んでいる。

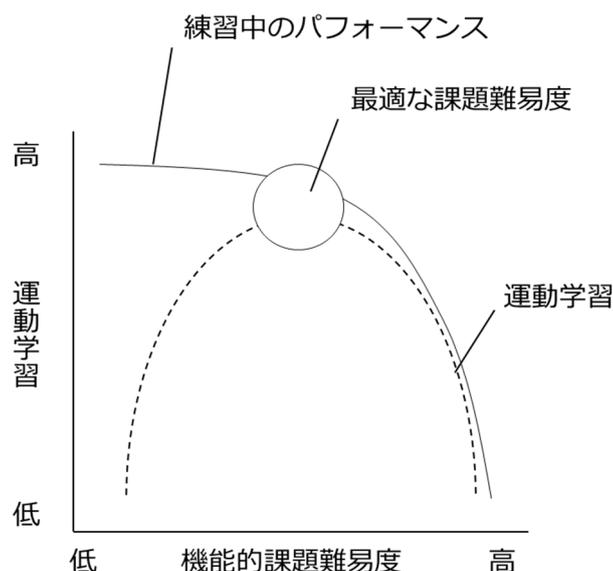


図4 機能的課題難易度における最適な課題難易度

先行研究で示された結果から、フィードバック・タイミング及びフィードバック頻度の操作により練習条件を設定する場合の名目的課題難易度との関係を考慮すると次のように考えられる。単純な課題の練習場面に同時フィードバックや高頻度のフィードバックを用いると機能的課題難易度が過度に低くなるために練習中には高いパフォーマンスを示すが運動学習が生じない。一方、同じ課題を用いても、最終フィードバックや低頻度のフィードバックを用いることで機能的課題難易度が高まり比較的運動学習効果が高くなると予想される。一方、複雑な課題の練習場面において同時フィードバックや高頻度のフィードバックはその機能的課題難易度を低下させるため、練習中にパフォーマンスを向上させ、運動学習を生起させるが、最終フィードバックや低頻度のフィードバックは同時フィードバックと比較して練習中のパフォーマンスが十分に向上せず運動学習効果も低くなる可能性がある。Challenge Point Frameworkの提唱者であるGuadagnoliらも名目的課題難易度により必要とされるフィードバックが異なると述べている。

このように先行研究において単純な課題と複雑な課題の違いによって運動学習を効果的に生起させるフィードバック・タイミング及びフィードバック頻度が異なることが示されてきた。しかし、そのほとんどは名目的課題難易度の違いに着目して行われてきている。Challenge Point Frameworkにおいて説明されている通り、運動学習効果は学習課題と学習者のスキルレベル、フィードバック付与方法などの練習条件の関係によって変化する機能的課題難易度が規定している。しかし、学習課題に対する学習者のスキルレベルに着目して行われたフィードバック・タイミング及びフィードバック頻度の運動学習効果に関する研究は行われてきていないのが現状である。

1.3 本研究の目的及び意義

本研究の目的は、理学療法場面における効果的なフィードバック付与方法を明らかにするための基礎的研究として、初期スキルレベルの高い学習者及び低い学習者の運動学習を効率化させるための視覚フィードバックのタイミング及びフィードバック頻度の組み合わせについて知見を得ることである。

従来、フィードバックのタイミングやフィードバック頻度により規定される視覚情報を用いたフィードバック研究の多くは、学習課題の難易度に着目して取り組まれてきた。しかし、学習者のスキルレベルを考慮した研究は十分に行われていない。このため、視覚フィードバックは利用可能性が高いにもかかわらず、実際の練習場面でフィードバックを提示するタイミング及び頻度を決定するための知見が得られていない。学習者の練習前のスキルレベルを考慮して、視覚フィードバック条件を設定することが可能になれば、患者に対する運動学習も効率よく提供できるものと考えられる。

1.4 本論文の構成

第2章では、連続的な運動課題を用いて、学習者の練習前のスキルレベルによって運動学習に効果的なフィードバックのタイミング及びフィードバック頻度が異なるのかどうかを検討し、各スキルレベルにおいて推奨されるフィードバック付与方法を提案する。第3章では、さらにフィードバックの精度を変化させることにより、機能的課題難易度を調整した場合の学習効果について検討する。

第4章では、研究成果を統括し、論を結ぶ。

1.5 研究の倫理的配慮

研究協力者には、事前に書面と口頭にて研究の目的と方法、研究上の不利益、プライバシー保護などについて十分な説明を行った。尚、本研究は茨城県立医療大学の倫理委員会の承認を受けて実施した（承認番号：684）。

第2章 第1研究

2.1 研究の背景と目的

第1研究では、初期スキルレベルの高い学習者及び低い学習者の運動学習を効率化させるための視覚フィードバックのタイミングと頻度の組み合わせについて知見を得ることを目的とした。

2.2 対象

研究協力者（以下，“協力者”と記す）は、健常若年成人 64 名、男性 32 名、女性 32 名で、平均年齢は 22.2 ± 1.9 歳であった。全ての協力者は過去に今回用いた課題を行った経験はなかった。

協力者には、事前に本研究の内容及び結果の取り扱いについて研究説明書を示しながら口頭で説明した上で協力を依頼し、承諾書への自著により承諾を得た。

2.3 方法

2.3.1 本研究に用いた課題

2.3.1.1 学習課題

本研究では学習課題を「適切なタイミングで左下肢への荷重量を指定された荷重量に調整する課題」とした。

協力者には可搬式床反力計 9286B(Kitsler 社製) に左足部を載せた状態で立位姿勢をとらせ、これを開始肢位とした。測定環境を図 5 に示す。床反力計の前方 1.5m の位置にフィードバック用のモニターと音刺激再生用のスピーカーを配置した。発泡スチロールで作成した板 (30 cm × 21 cm) を協力者の胸部前方に取り付け、課題遂行中に下肢を視覚的に捉えられないようにした上で、前方に配置したモニターを注視させた。

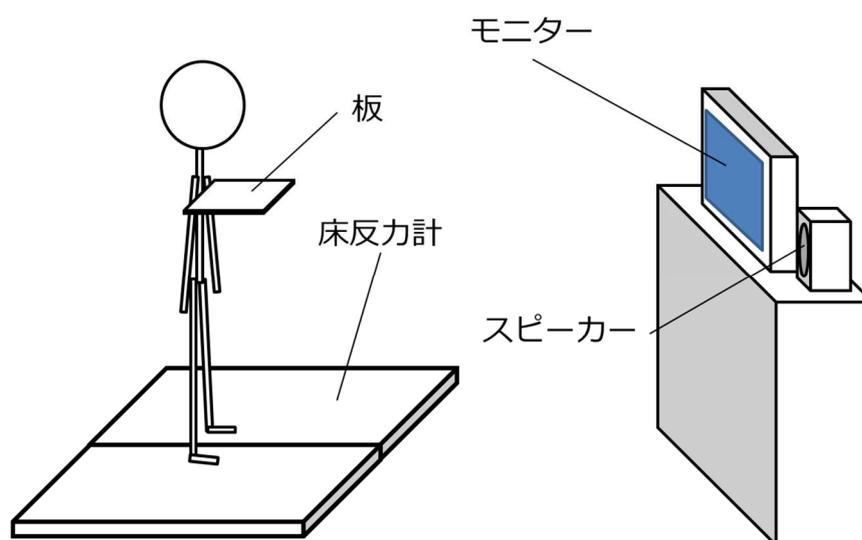


図 5 測定環境

協力者は一定のリズムで鳴る音刺激に合わせて、左下肢への荷重量調整を行うものとした。音刺激は、パソコン上でメトロノームソフトを使用して作成し、スピーカーに接続して鳴らした。メトロノームの設定は 1Hz とし、1 拍目にベル音、2, 3, 4 拍目にクリック音が鳴り、それが繰り返されるように設定した。

本研究では各協力者の体重の 55%, 65%, 80% の 3 つの荷重量を結ぶ軌跡に沿って荷重量を調整する課題を用いた。協力者にはメトロノームの 5 拍目までは動作開始のタイミングを図るため動作を行わず、6 拍目から左下肢への荷重を開始させた。6 拍目から 1 拍ごとに 55%, 65%, 80%, 65%, 55%, 65%, 55% の順で荷重量調整を行わせ、各荷重量切り替えの間は等速度で荷重量調整を行うよう指示した。荷重量の変化で描かれる軌跡を用いると本課題は図 6 のグラフのように表される。なお、6 拍目から 12 拍目までをそれぞれ第 1 荷重点から第 7 荷重点と定義した。

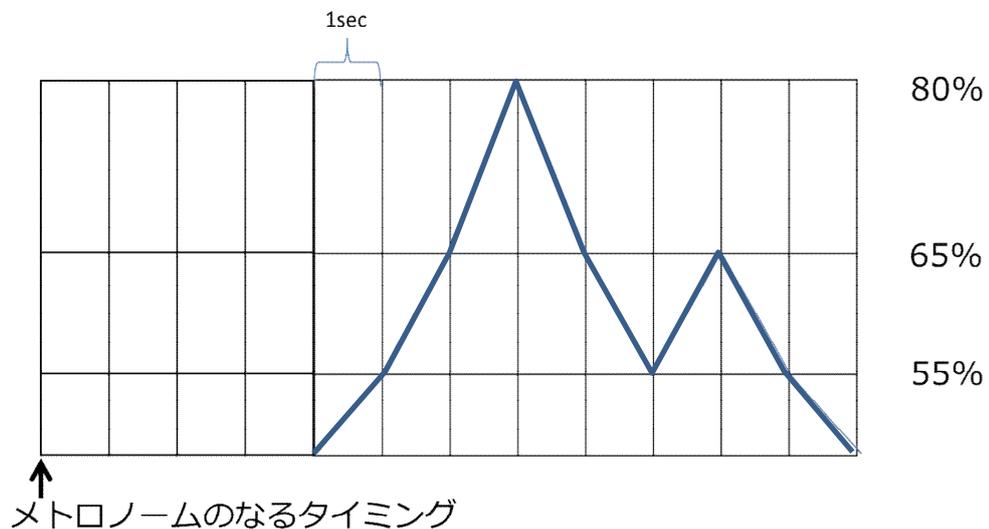


図 6 荷重量調整の順序

2.3.1.2 副課題

同時50%, 100% フィードバック条件の全試行および最終50%フィードバック条件のフィードバックを与えない試行後では、試行間の休止時間にメンタル・プラクティスを行わせないために副課題として日本語童話の音読を行わせた。なお音読の時間は約 20 秒間とし、内容理解は求めなかった。

2.3.2 フィードバック

2.3.2.1 フィードバックの情報様式とその内容

本研究で取り扱うフィードバックの情報様式は視覚情報とした。モニター上に左から順に赤、青、緑のランプを表示させた(図7)。左下肢への荷重量が各協力者の体重の $80 \pm 2\%$ の範囲内の場合には赤いランプが点灯し、 $65 \pm 2\%$ の範囲内の場合には青いランプ、 $55 \pm 2\%$ の範囲内の場合には緑のランプが点灯するよう設定した。左下肢への荷重量が上記設定の範囲外の場合、ランプは点灯しないように設定した。

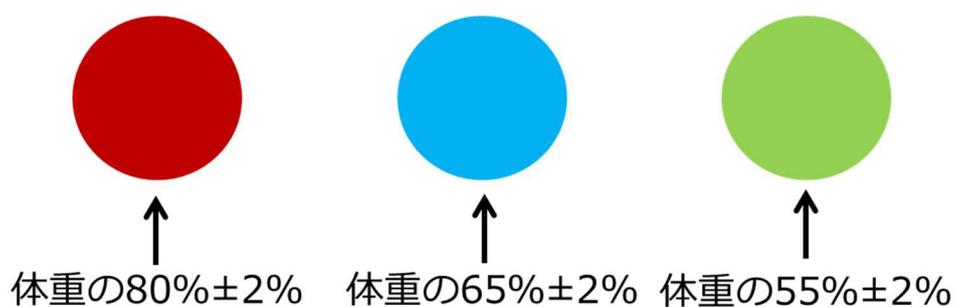


図7 視覚フィードバックの情報

2.3.2.2 フィードバック条件

本研究では“フィードバックを与えるタイミング（同時，最終）”と“フィードバックを与える頻度（50%，100%）”の2つの要因からフィードバック条件を構成した。

フィードバック頻度

フィードバック頻度に関して，100%フィードバック条件では全試行に対してフィードバックを与えた。50%フィードバック条件では2試行に1回フィードバックを与え，全てのブロックで第1,3,5試行に対してフィードバックを与えた。

フィードバック・タイミング

同時フィードバック条件

動作遂行中にモニターに表示されたランプの様子を確認させることでフィードバックを与えた。

最終フィードバック条件

動作遂行中にはモニターには何も表示しなかった。動作終了後に，ビデオカメラにて撮影した動作遂行中のランプの様子とメトロノームの音声をモニター及びスピーカーを通して示し，これをフィードバックとした。

本研究は異なるフィードバック付与方法を用いて練習を行うため、測定に先立ち協力者を“同時100%フィードバック群”，“同時50%フィードバック群”，“最終100%フィードバック群”，“最終50%フィードバック群”の4群に振り分けた（表2）。4群間で協力者数が同数になること、及び男女比が一定になることに配慮した以外は無作為に協力者を振り分けた。

頻度 \ タイミング	最終	同時
50%	最終50%	同時50%
100%	最終100%	同時100%

表2 フィードバック条件

2.3.3 初期スキルレベル

協力者の練習開始前のスキルレベルの違いにより、フィードバック・タイミング及び頻度の運動学習に対する効果に変化するかを検討することとした。全協力者の測定終了後にプレテストの成績から初期スキル高条件、初期スキル低条件が同数となるように振り分けた。

2.3.4 測定機器

本研究で使用した機器を図8に示す。床反力計への荷重量データは床反力計用8chチャージアンプ9865E1Y28（Kistler社製）を通して床反力測定用コンピュータに送信し、BioWare ver. 3.27を使用し記録した。なお本研究ではサンプリング周波数100Hzですべての測定を行った。

床反力計への荷重量に応じてランプを点灯させるために荷重時の床反力計Z軸方向の電気信号を出力させ、アナログ多点コンパレータMuWiC（ユニメーション株式会社製）へ入力した。MuWiCはアナログ入力（電圧）をあらかじめ設定した閾値で判定し、最大8つのチャンネルに対して結果をON/OFFで出力することのできるコントローラーである。本研究では3つのランプそれぞれに対し、閾値を設定した。本研究では床反力計アンプを5000pc = 10Vに設定し測定した。

Kistler社の提示している既定値を用いてアンプからMuWiCへの入力電圧を次の計算式から算出した。

$$\begin{aligned} 1 \text{ (N) あたり } 3.574 \text{ (pc)} &\rightarrow 1 / 3.574 \text{ (N / pc)} \\ \text{アンプ : } 5000 \text{ (pc)} = 10 \text{ (V)} &\rightarrow 500 \text{ (pc / V)} \\ 1 / 3.574 \times 500 &= 139.9 \text{ (N / V)} \end{aligned}$$

体重 X (N) の際の電圧 Y (V) = 体重 X (N) × 1 / 139.9 (N / V)

各目標荷重量における MuWiC 設定値 (V) :

体重の 55 ± 2 %	上限 : (0.55 + 0.02) Y	下限 : (0.55 - 0.02) Y
体重の 65 ± 2 %	上限 : (0.65 + 0.02) Y	下限 : (0.65 - 0.02) Y
体重の 80 ± 2 %	上限 : (0.80 + 0.02) Y	下限 : (0.80 - 0.02) Y

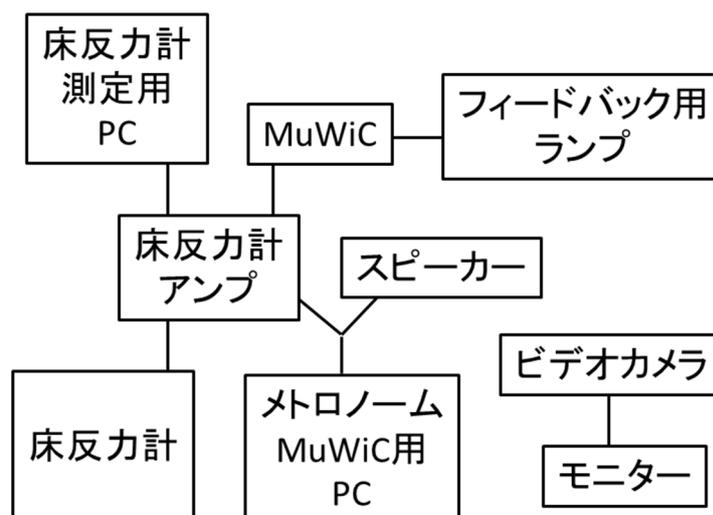


図8 測定機器

床反力計アンプの出力電圧と MuWiC への入力電圧に差異がないかを確認するために重錘（2kg, 4kg, 6kg, 8kg, 10kg, 12kg, 14kg, 16kg, 18kg, 20kg）を床反力計に載せ測定されたデータを上記の計算式に代入して得られた数値とその際の MuWiC への入力電圧の相関を調べた。その結果、 $y = 0.9953x - 0.0183$, $R^2 = 0.9999$ と高い正の相関がえられた（図 9）。なお MuWiC への入力電圧は MuWiC ソフトウェア（ユニメーション株式会社製）を使用して測定した。

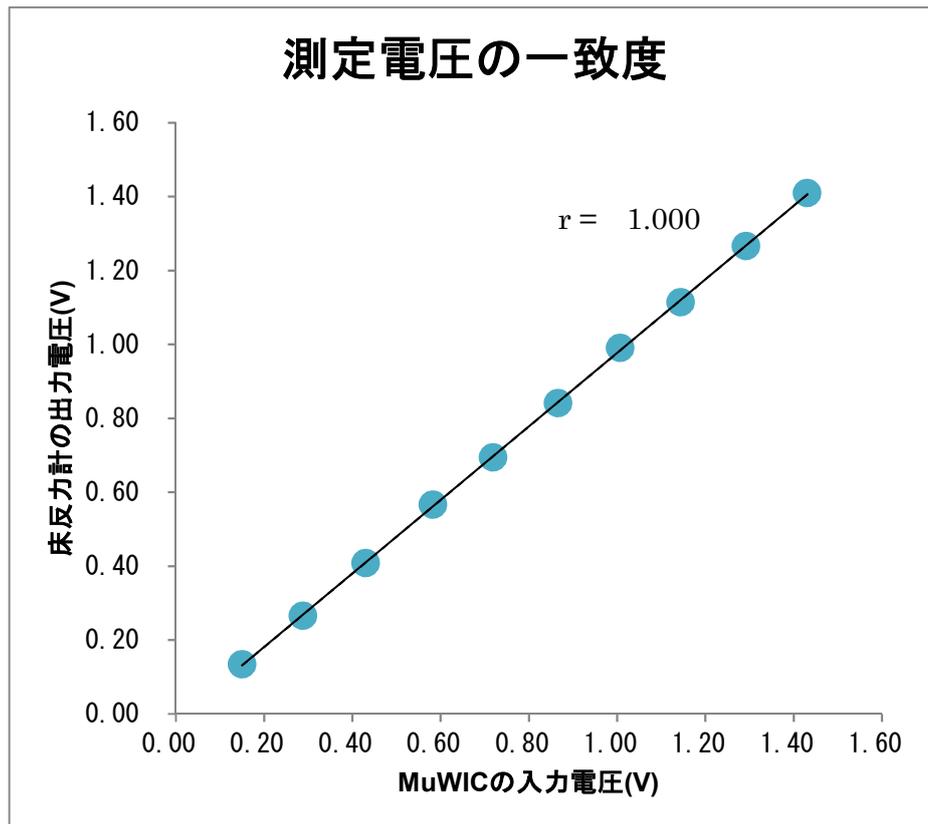


図 9 床反力計の出力電圧と MuWiC への入力電圧

床反力計の測定開始と音刺激開始のタイミングを同期させるため、メトロノーム及び MuWiC 操作用コンピュータからスピーカーへの入力を分岐させ床反力計アンプへ入力させ測定開始のトリガーとした。

2.3.5 手続き

2.3.5.1 測定の流れ

測定1日目では、はじめに各協力者の目標荷重量の設定のために床反力計を使用し、体重を測定した。10秒間測定し、後半5秒間のデータを平均し各協力者の体重とした。得られた体重のデータから各協力者の体重の55%、65%、80%（単位：N）を算出し、協力者に伝えた。次に測定を行う前に、メトロノームの音声を聞かせ、音刺激のタイミングを確認させた。その後、他者が課題を行った際のランプの点灯状態の映像とメトロノームの音を協力者に示し、フィードバックがどのような情報であるかを確認させた。また、各協力者に対して、練習の際に実際に用いるフィードバック条件について口頭で説明した。

測定2日目では、1日目と体重が変動している可能性があるため、再度同じ条件で体重測定を行った。その後、動作のタイミングを再度確認させるため、メトロノームの音を1試行分聞かせた後、保持テストを行った。

2.3.5.2 練習及びテストのスケジュール

本実験ではトランスファー・デザインを用いて練習とテストのスケジュールを構成した（図10）。

各協力者に対する測定は2日連続で行われた。まず、1日目に6試行で構成されるプレテストおよび1ブロックを6試行として3ブロックで構成される練習試行の合計24試行を実施した。2日目には、1日目の測定の約24時間後に保持テストとしてプレテストと同様の内容を行った。

テスト試行ではプレテスト・保持テストともにフィードバックは与えなかった。練習試行では各群にそれぞれのフィードバック条件に沿った方法でフィードバックを与えた。

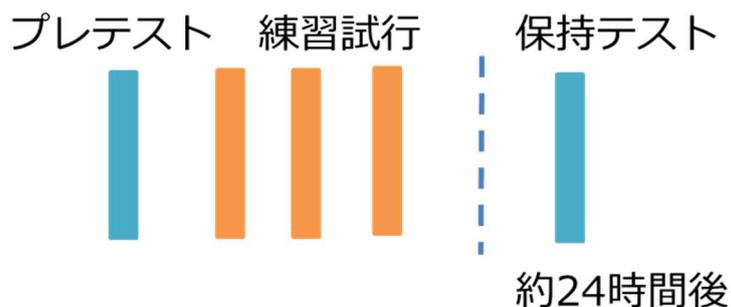


図 10 練習とテストのスケジュール

2.3.6 分析方法

2.3.6.1 学習を評価するパラメータ

第1研究の課題では1秒間隔で指定された荷重量を経由しながら、指定された荷重量間では等速度で荷重量調整を行うよう求めた。本研究課題では課題全体でパフォーマンスを評価するためのRoot Mean Square Error - Total（以下 RMSE - Tと記す）と視覚フィードバックのランプを点灯させるよう求めたタイミングにおける誤差を反映するRoot Mean Square Error - Partial（以下 RMSE - P）の2つを、運動学習を評価するパラメータとして用いた。

RMSE - T

測定したデータのうちメトロノームの6拍目から12拍目までを測定範囲として使用することとし、床反力計の測定データのうち600msから1200msまでのデータを使用した（図11）。本研究では測定範囲におけるサンプリング周波数毎の目標値からの変位（絶対誤差）の平均値を各協力者の体重で除した値を誤差の指標とした。

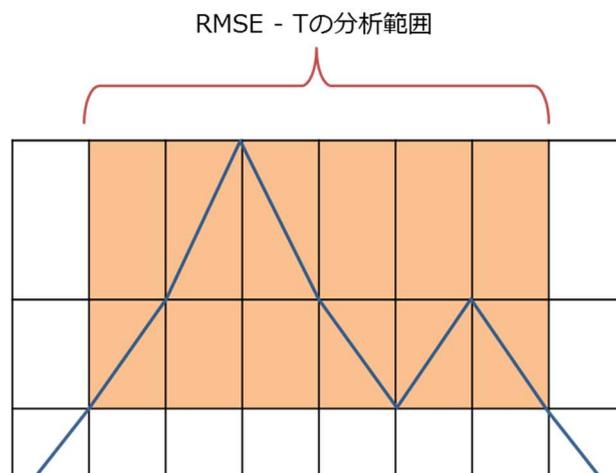


図11 RMSE - T の分析範囲

RMSE - T は測定範囲全体におけるサンプリング周波数毎の目標値からの変位の平均値としたため、図のオレンジで塗りつぶした範囲全体で算出した。

RMSE - P

測定したデータのうち、フィードバック用ランプを点灯させるよう求めた 598～602ms, 698～702ms, 798～802ms, 898～902ms, 998～1002ms, 1098～1102ms, 1198～1202ms におけるサンプリング周波数毎の目標値からの変位（絶対誤差）の平均値を各協力者の体重で除した値を誤差の指標とした（図 12）。

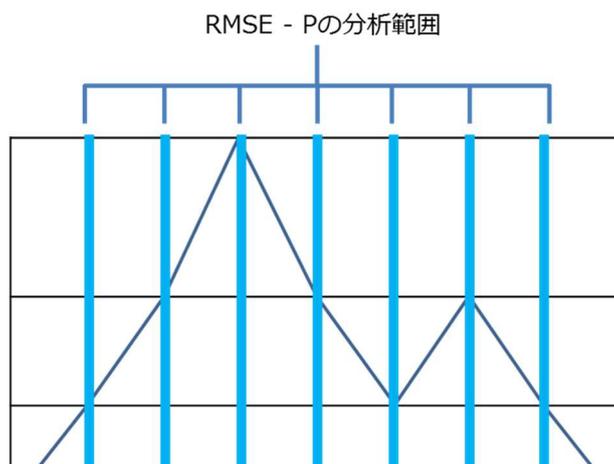


図 12 RMSE - P の分析範囲

RMSE - P はランプを点灯させるよう求めた範囲におけるサンプリング周波数毎の目標値からの変位の平均値としたため、図の水色の線の示された範囲（各荷重点±2msの範囲）で算出した。

2.3.6.2 統計学的分析

各群の RMSE - T および RMSE - P について、要因を時期、フィードバック・タイミング、フィードバック頻度およびスキルレベルとする 4 元配置分散分析を行った。なお、統計処理には IBM SPSS Statics 24 を使用し、すべての分析において危険率 5% 未満を統計学的有意とした。

2.4 結果

2.4.1 RMSE - T

RMSE - T のプレテストの成績により，初期スキル高条件と初期スキル低条件に分類した。表 3 に各スキルレベルにおけるフィードバック条件の内訳を示す。

	最終		同時	
	100%	50%	100%	50%
スキル高	7	9	8	8
スキル低	9	7	8	8

単位：名

表 3 RMSE - T のプレテストの成績による
フィードバック条件の内訳

プレテスト，練習試行，保持テストにおける各群の RMSE - T の推移を図 13 に示す。

練習試行におけるフィードバック・タイミング及びフィードバック頻度，スキルレベルの違いが左下肢における荷重量調整課題の学習に与える影響を分析するために，従属変数を RMSE - T，要因を時期，フィードバック・タイミング，フィードバック頻度，スキルレベルとする 4 元配置分散分析を行った。要因のうち時期は協力者内要因，フィードバック・タイミング，フィードバック頻度，スキルレベルは協力者間要因である。本分析では Mauchly の球面性検定の有意確立が 0.05 を下回り，帰無仮説が棄却されたため，Huynh-Feldt の ϵ によって誤差の自由度を修正した。その結果，時期 ($F(3.481, 194.933) = 31.039, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.357$) に有意な主効果が認められた。また，時期とフィードバック・タイミング ($F(3.481, 194.933) = 5.129, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.236$)，時期とスキルレベル ($F(3.481, 194.933) = 17.274, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.084$) に有意な交互作用が認められた。

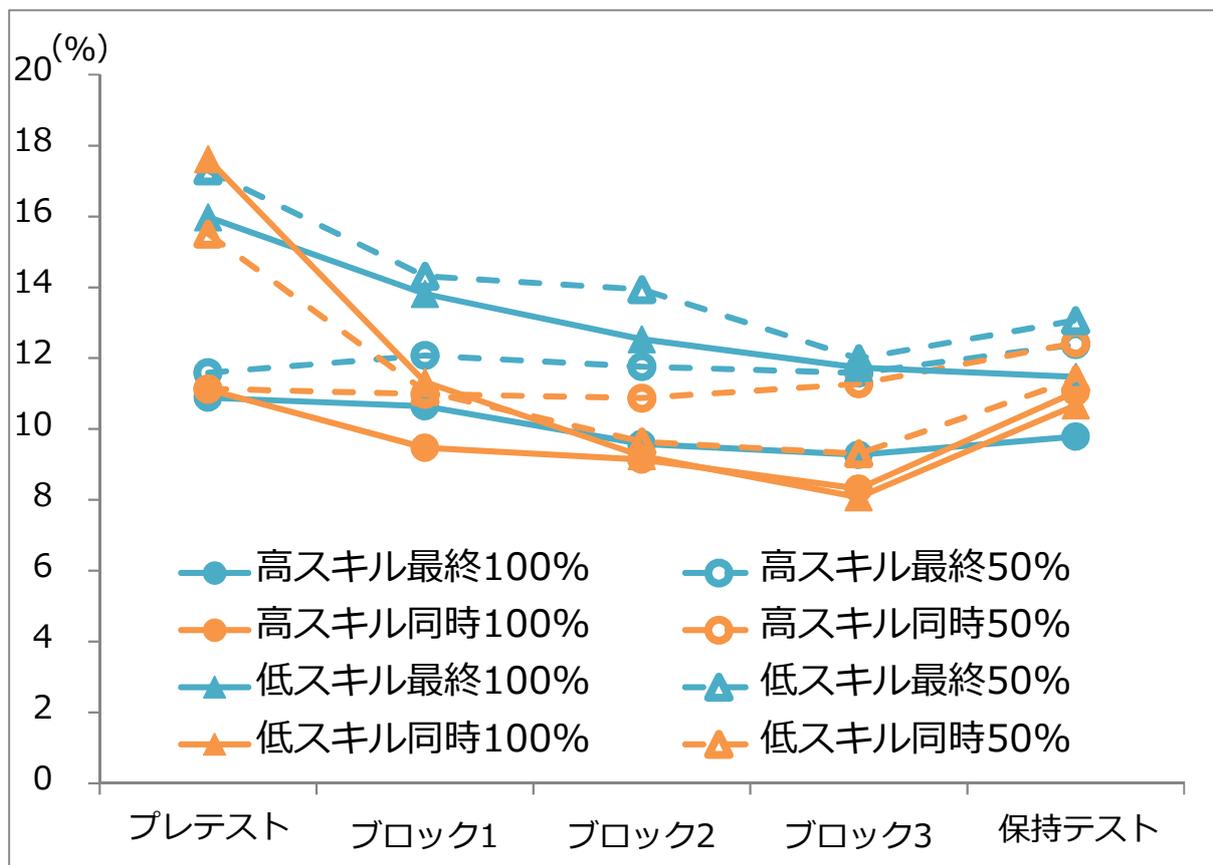


図 13 各群の RMSE - T の推移

フィードバック・タイミングと時期に有意な交互作用が認められたことから、同時フィードバック条件、最終フィードバック条件それぞれに時期を要因とする 1 元配置分散分析及び Tukey 法による多重比較を行った。さらに各テスト・練習ブロックにおいて各フィードバック条件に対する独立したサンプルの t 検定を行った。最終フィードバック条件及び同時フィードバック条件のプレテスト、練習試行、保持テストにおける各群の RMSE - T の推移を図 14 に示す。

まず、時期に関して、最終フィードバック条件では、1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(4, 155) = 2.497, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.061$) が認められ、Tukey 法による多重比較の結果プレテストに比較しブロック 3 が有意に小さい値を示した。同時フィードバック条件では、1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(4, 155) = 16.695, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.301$) が認められ、Tukey 法による多重比較の結果プレテストに比較しブロック 1、ブロック 2、ブロック 3、保持テストが有意に小さい値を示し、保持に比較しブロック 3 が有意に小さい値を示した。

次に、独立したサンプルの t 検定を行った結果、プレテスト及び保持テストにおいて有意差は認められなかったが、ブロック 1, 2, 3 においては同時フィードバック条件が最終フィードバック条件と比較し、有意に小さい値を示した。

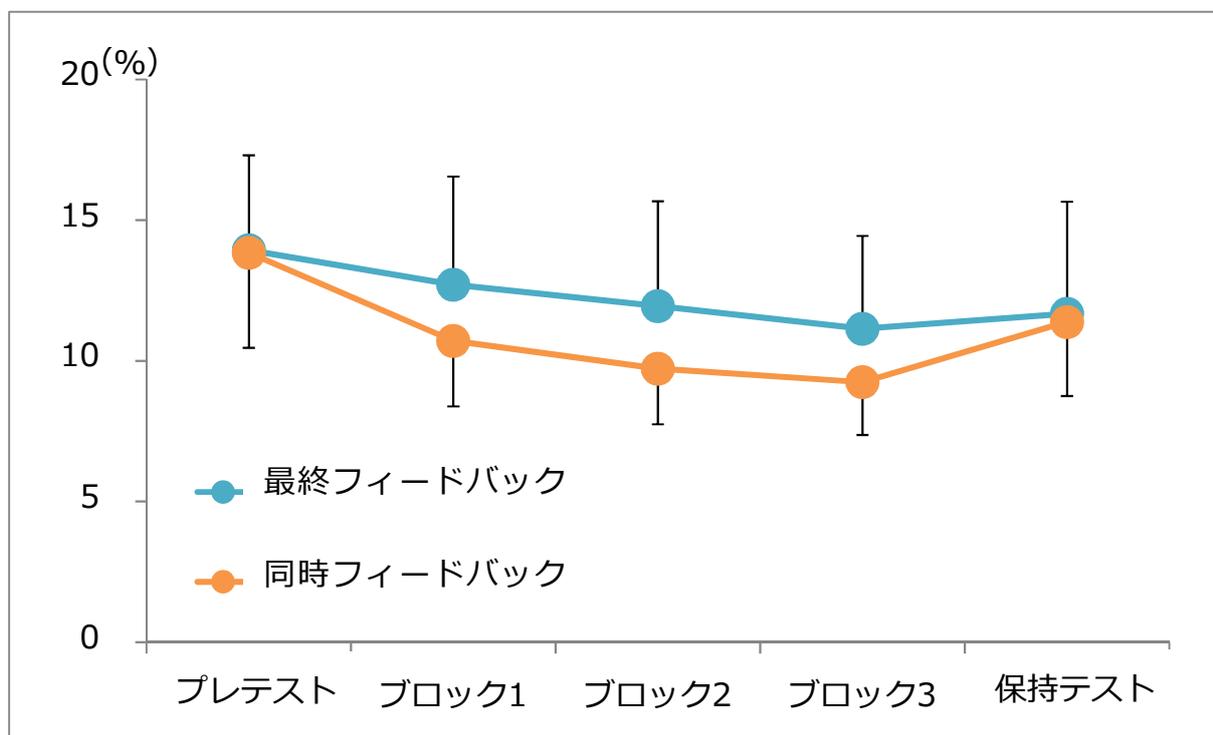


図 14 同時フィードバック条件と最終フィードバック条件における RMSE - T

次に、スキルレベルと時期に有意な交互作用が認められたことから、初期スキル高条件、初期スキル低条件それぞれに時期を要因とする 1 元配置分散分析及び Tukey 法による多重比較を行った。さらに各テスト・練習ブロックにおいて各スキルレベル条件に対する独立したサンプルの t 検定を行った。初期スキル高条件及び初期スキル低条件のプレテスト、練習試行、保持テストにおける各群の RMSE - T の推移を図 15 に示す。

まず、時期に関して、初期スキル高条件では、1 元配置分散分析の結果有意な主効果が認められなかった。次に初期スキル低条件では、1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(4, 155) = 18.680, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.325$) が認められ、Tukey 法による多重比較の結果プレテストに比較しブロック 1、ブロック 2、ブロック 3、保持テストが有意に小さい値を示し、ブロック 1 に比較しブロック 3 が有意に小さい値を示した。

次に、独立したサンプルの t 検定を行った結果、プレテスト及びブロック 1 においては初期スキル高条件が初期スキル低条件と比較し、有意に小さい値を示した。

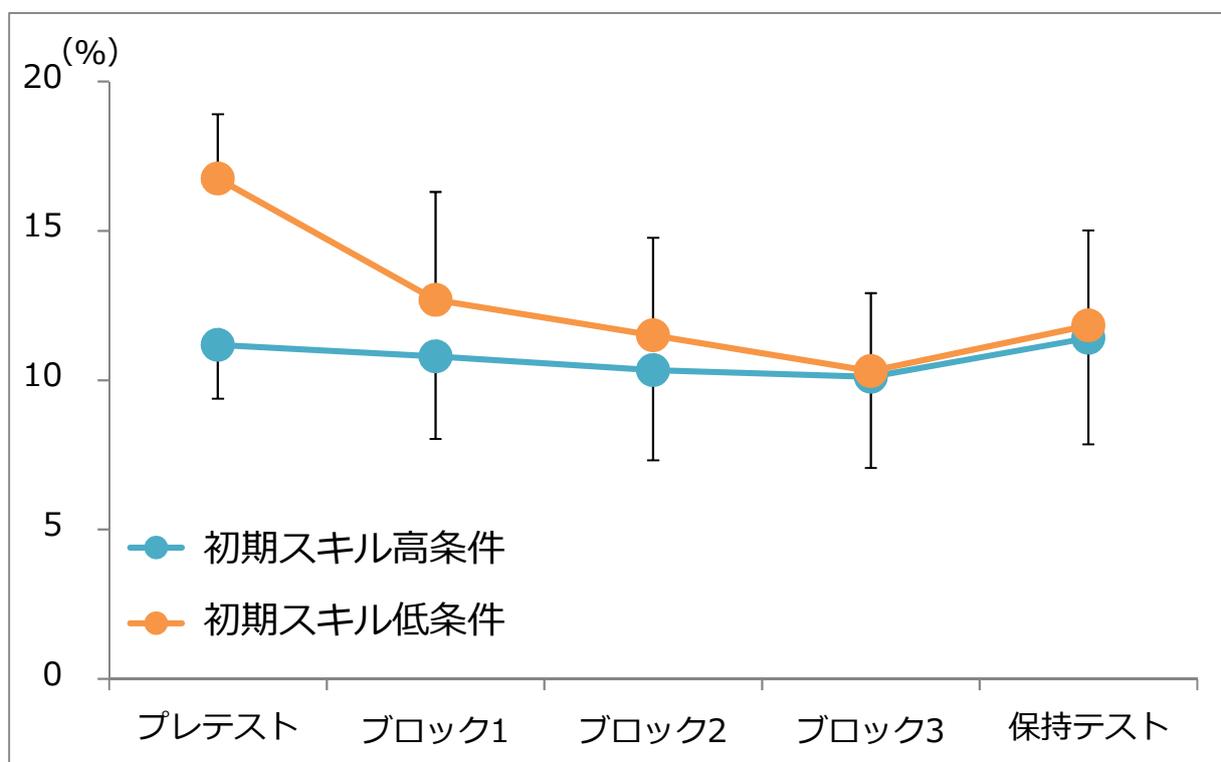


図 15 初期スキル高条件と初期スキル低条件における RMSE - T の推移

2.4.2 RMSE - P

RMSE - P のプレテストの成績により，初期スキル高条件と初期スキル低条件に分類した。表 4 に各スキルレベルにおけるフィードバック条件の内訳を示す。

	最終		同時	
	100%	50%	100%	50%
スキル高	7	9	6	10
スキル低	9	7	10	6

単位・名

表 4 RMSE - P のプレテストの成績による
フィードバック条件の内訳

プレテスト，練習試行，保持テストにおける各群の RMSE - P の推移を図 16 に示す。

練習試行におけるフィードバック・タイミング及びフィードバック頻度，スキルレベルの違いが左下肢における荷重量調整課題の学習に与える影響を分析するために，従属変数を RMSE - P，要因を時期，フィードバック・タイミング，フィードバック頻度，スキルレベルとする 4 元配置分散分析を行った。要因のうち時期は協力者内要因，フィードバック・タイミング，フィードバック頻度，スキルレベルは協力者間要因である。本分析では Mauchly の球面性検定の有意確立が 0.05 を下回り，帰無仮説が棄却されたため，Huynh-Feldt の ϵ によって誤差の自由度を修正した。その結果，時期 ($F(3.520, 197.130) = 18.383, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.247$) に有意な主効果が認められた。また，時期とスキルレベル，フィードバック・タイミング ($F(3.520, 197.130) = 3.680, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.062$) に有意な交互作用が認められた。

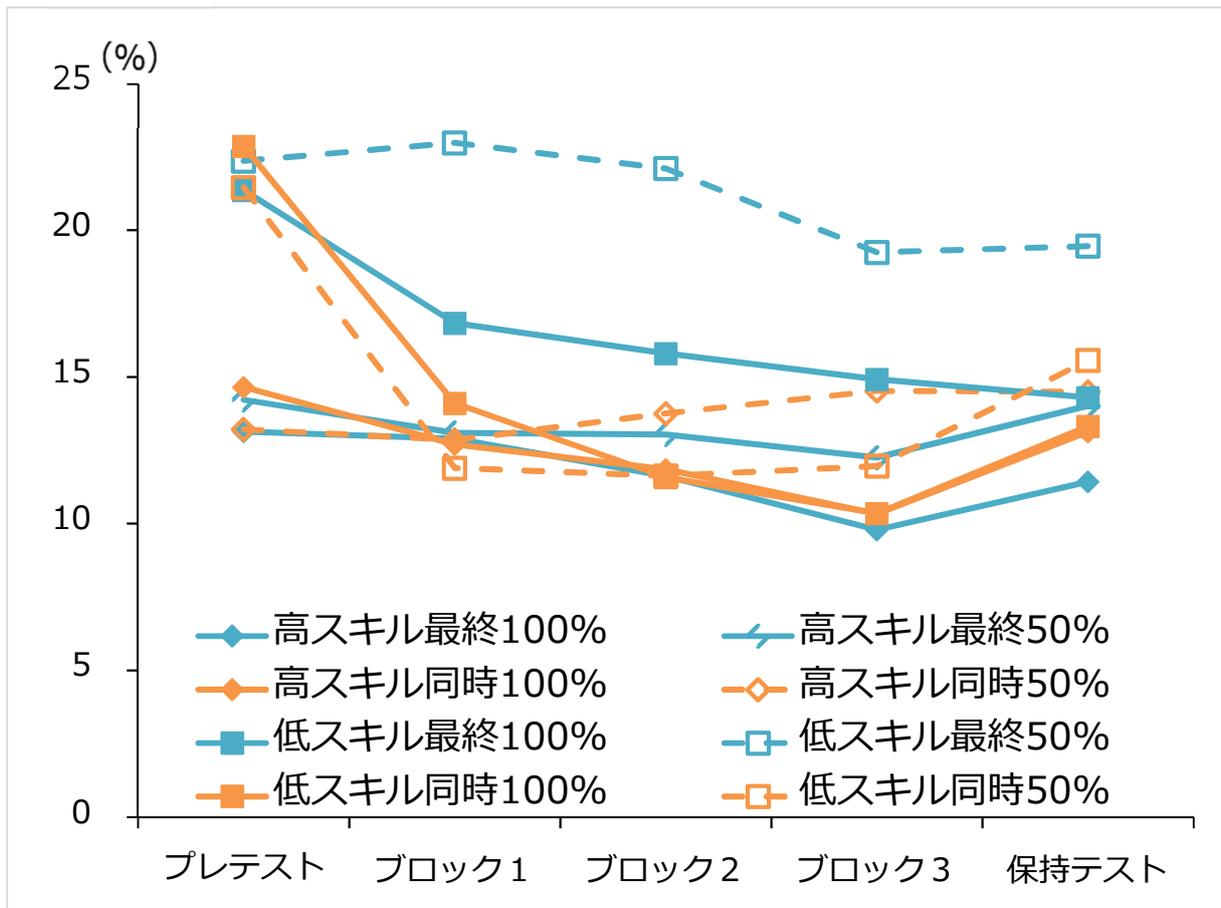


図 16 各群の RMSE - P の推移

時期とスキルレベル、フィードバック・タイミングに有意な交互作用が認められたことから、高スキル最終条件、高スキル同時条件、低スキル最終条件、低スキル同時条件それぞれに時期を要因とする 1 元配置分散分析及び Tukey 法による多重比較を行った。さらに各テスト・練習ブロックにおいて各条件に対する 1 元配置分散分析及び Tukey 法による多重比較を行った。高スキル最終条件及び高スキル同時条件、低スキル最終条件、低スキル同時条件のプレテスト、練習試行、保持テストにおける各群の RMSE - P の推移を図 17 に示す。

まず、時期に関して、低スキル同時条件では、1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(4, 75) = 19.807, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.514$) が認められ、Tukey 法による多重比較の結果プレテストに比較しブロック 1, 2, 3, 保持テストが有意に小さい値を示した。そのほかの条件では有意な主効果は認められなかった。

次に、各時期における条件間の比較では、プレテストにおいて 1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(3, 60) = 40.152, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.668$) が認められ、低スキル最終、低スキル同時条件と比較して高スキル最終、高スキル同時条件は有意に小さい値を示した。ブロック 1 では有意な主効果 ($F(3, 60) = 6.487.497, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.245$) が認められ、下位検定をおこなった結果、低スキル最終条件と比較して高スキル最終、高スキル同時、低スキル同時条件は有意に小さい値を示した。ブロック 2 において有意な主効果 ($F(3, 60) = 5.446, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.214$) が認められ、低スキル最終条件と比較して高スキル最終、高スキル同時、低スキル同時条件は有意に小さい値を示した。ブロック 3 において有意な主効果 ($F(3, 60) = 4.634, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.188$) が認められ、低スキル最終条件と比較して高スキル最終、低スキル同時条件は有意に小さい値を示した。保持テストでは有意な主効果は認められなかった。

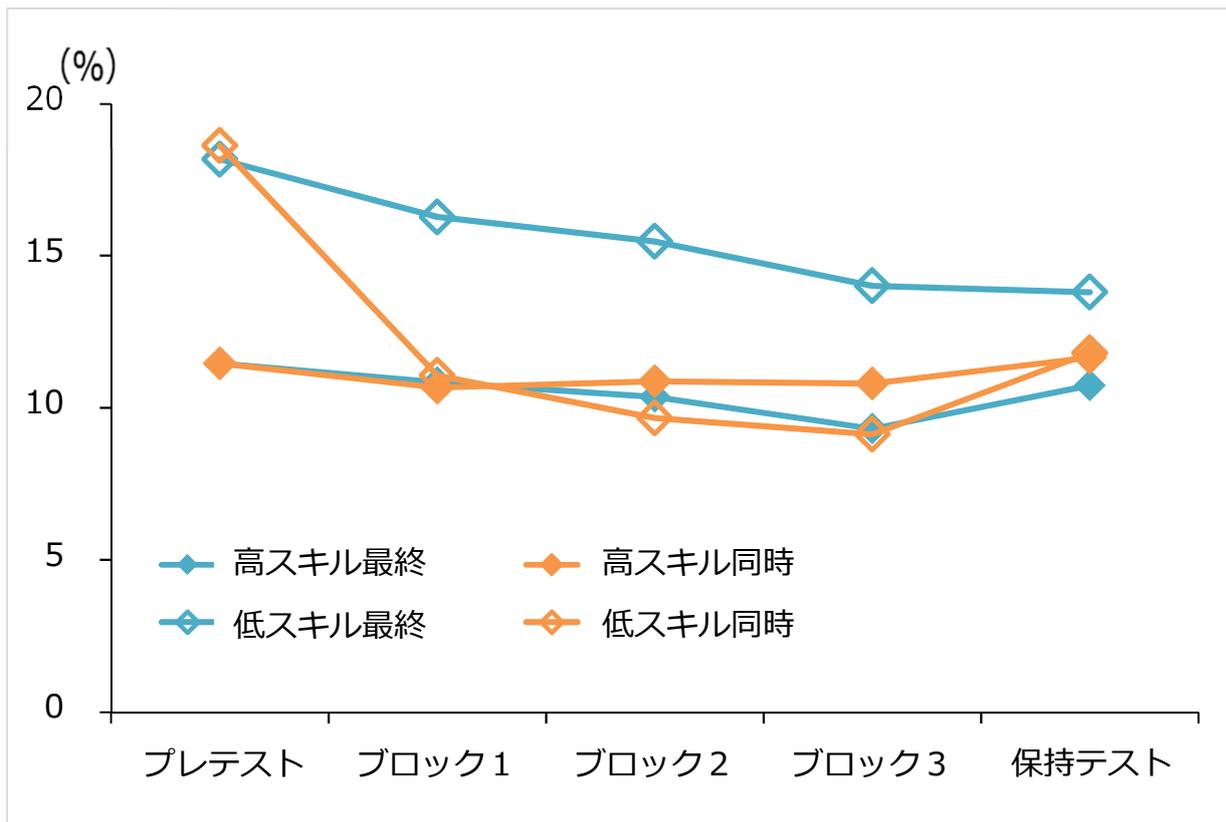


図 17 初期スキル高条件と初期スキル低条件における RMSE・P の推移

2.5 考察

本研究では、「適切なタイミングで左下肢への荷重量を指定された荷重量に調整する課題」を用い、練習中に用いられる視覚フィードバックの与えられるタイミングや頻度が学習者の初期スキルレベルとの関係により運動学習にどのように影響するのかを検討することを目的とした。

同時 100% フィードバック条件では練習中は常に視覚的フィードバックを得ながら課題を遂行している。2 日目の保持テストにおいて初めて練習中とは異なる状況で課題を遂行する。先行研究では練習直後にも保持テストを行っている研究もあるが、削減的フィードバックが同時フィードバックの運動学習の生起に効果を示したと報告されている^{16,17)}。そのため、同時フィードバック条件の協力者は、練習試行の中では常に視覚フィードバックを得ながら課題を遂行し、2 日目の保持テストで、練習開始以降初めて練習中とは異なる状況で課題を遂行することになる。しかし、練習直後の保持テストを行うとフィードバックなしでの試行を行うことになり、約 24 時間後の保持テストにおけるパフォーマンスに影響を与える可能性がある。そのため、本研究では練習直後の保持テストは行わなかった。

最初に RMSE - T の結果から考察する。まずフィードバック頻度に関して、本研究で用いた学習課題に対する有効なフィードバック頻度は明らかにならなかった。先行研究において高頻度なフィードバックは認知的な負荷を低下させ^[大橋2]ると報告されている²⁵⁾。また、複雑なスラローム課題では、同時 100% フィードバックが同時 50% フィードバックと比較して効果的に働いた³³⁾と報告されている一方で、削減的フィードバックが最終フィードバックでも同時フィードバックでも効果を示したという報告もなされている^{16,17)}。このように複雑な課題に対するフィードバック頻度に関しては一定の見解が得られていないのが現状であり、本研究結果からも適切なフィードバック頻度に関する知見は得られなかった。

次に、フィードバック・タイミングに関して、プレテスト、保持テストには群間で差が認められなかったが、練習試行においては同時フィードバック条件が最終フィードバック条件に比べ有意に低い誤差を示していた。各フィードバック条件の分析において、同時フィードバック条件はブロック 1 から即座にパフォーマンスを向上させ、運動学習を生起させた。一方、最終フィードバック条件ではブロック 3 でパフォーマンスが向上したが、保持テストではパフォーマンスが保持できず、運動学習が生起しなかった。これらのことから本研究で用いた連続的な下肢荷重量調整課題の学習において、同時フィードバックは最終フィードバック

に比べ効果的に練習中のパフォーマンスを向上させ、運動学習に関しても有利に働く可能性が示された。実験室的な学習課題を用いた先行研究では課題難易度が低すぎるため、同時フィードバック条件はフィードバック情報への依存を強め運動学習の生起を妨げる^{39,40)}一方で、スポーツに関連するような複雑な課題を用いた先行研究では同時フィードバックが学習に効果的に働く場合があると報告されている^{25,42)}。Leeら³⁴⁾、Changら³²⁾の複雑な課題を用いた研究でも同様の結果が報告されていることから、本研究の学習課題の名目的課題難易度は高かったと考えられる。また、同時フィードバック条件でのみ運動学習が生じたことから、本研究課題のような名目的課題難易度の高い課題を初めて練習する場合には、同時フィードバックを用いて即時的なパフォーマンスの向上を図り、運動学習が生じるよう働きかけることが望ましいと考えられる。

最後に、学習者の初期スキルレベルに関して、プレテストとブロック1においては初期スキル高条件が有意に小さい値を示していたが、ブロック2、ブロック3、保持テストでは有意差が示されなかった。また、初期スキル低条件はプレテストに比べブロック1、ブロック2、ブロック3、保持テストが有意に小さい値を示し、運動学習が生起していたが、初期スキル高条件では有意な主効果を認めず、運動学習が生起しなかった。つまり、練習が進むにつれ初期スキル低条件の学習者が初期スキル高条件の学習者と同等の水準となり、フィードバックのないテスト試行においても高スキル条件の学習者と同等のパフォーマンスを発揮したと考えられる。このことから初期スキルレベルの異なる学習者では同様のフィードバックから得られる効果が異なると判断できる。

これまで課題難易度とフィードバックに関する先行研究では名目的課題難易度の違いによって有効なフィードバック・タイミングやフィードバック頻度が異なるかという報告がなされてきた^{34,36,42)}。本研究では学習課題に対する練習前のスキルレベルの異なる学習者に対して同様のフィードバックを提供したが、得られる効果は異なるという結果が示された。課題そのものの難易度に加えて、課題が学習者にとってどの程度難しい課題であるかによって用いられるべきフィードバック条件が変化することを示している。これは **Challenge Point Framework** における名目的課題難易度と学習者のスキルレベル、練習条件の関係によって機能的課題難易度が決定されるという説明に合致する。Herbertら⁴³⁾の研究では、学習者のスキルレベルによって運動学習に効果的な課題配置方法が変化するかを検討している。その結果、スキルレベルの低い学習者ではブロック練習が運動学習に有効であったのに対し、スキルレベルの高い学習者では有意差はないものの、交互練習がより効果的に働く傾向を示したと報告しており、学習者のスキルレベルによって用いるべき練習条件が異なることを示している。本研究では課題配置方法ではなくフィードバック・タイミングにおいても学習者の初期スキルレベルと学習課題の関係によってその効果が変化する傾向が示された。

さらに、RMSE - P の分析において、フィードバック頻度は RMSE - T の分析と同様に効果を示さなかったものの、時期、フィードバック・タイミング、スキルレベルの 3 つの要因に有意な交互作用を認め、異なる傾向を示した。下位検定の結果、プレテストではスキルレベルの違いが検出されたが、練習初期から低スキル同時条件が高スキル同時条件、高スキル最終条件と同等のパフォーマンスを示していた。また、保持テストにおいては群間で差が認められなかったものの、各フィードバック条件の分析において、低スキル同時条件ではブロック 1 から即座にパフォーマンスを向上させ、運動学習を生起させた。しかし、その他の条件では練習中のパフォーマンスの向上を認めず、運動学習も生起しなかった。

RMSE - T、RMSE - P の 2 つのパラメータの結果から、以下のようなことが考えられる。まず、高スキルの協力者はランプを点灯させるよう要求された範囲以外では等速度での荷重量調整を求められたが、本研究では、協力者が生成した波形全体をフィードバックとして示す方法をとらなかったため、誤差修正が困難であったと考えられる。さらにフィードバック情報でランプを点灯させるよう求められた範囲では練習初期である程度のパフォーマンスを発揮できていたため、それ以上パフォーマンスを向上させることもなかったと考えられる。

低スキルの協力者においては、最終フィードバック条件では練習中のパフォーマンスが十分に向上せず運動学習も生起しなかったが、同時フィードバック条件では練習中に即座にパフォーマンスを向上させ、運動学習が生起した。練習開始時のスキルレベルが低い学習者では最終フィードバックではフィードバック情報の利用が比較的困難であるため誤差修正が容易ではなく、運動学習が生起しなかったと考えられる。一方、同時フィードバックは練習開始時のスキルレベルの低い学習者において利用が比較的容易であるため、ランプを点灯させるよう求められた範囲での誤差修正が十分になされ、運動学習が生起したと考えられる。

しかし、初期スキルの高い学習者、低い学習者ともにランプを点灯させるよう求められた範囲外でのパフォーマンスの改善は困難であったと考えられる。

第 1 研究の結果から、名目的課題難易度の高い学習課題を練習する際のフィードバックとして、学習者の初期スキルレベルが低い場合には、同時フィードバックを用いて即自的な練習パフォーマンスの向上を図り、運動学習を生起させることが推奨される。しかし、本研究で用いた全てのフィードバック条件において初期スキル高条件の学習者の練習パフォーマンスは向上せず、運動学習も生じなかった。練習パフォーマンスの向上及び運動学習が生起しなかった理由として、学習者の初期スキルレベルが高くランプを点灯させるよう求めていた範囲における誤差が床効果を示していたこと、ランプを点灯させるよう求められた範囲外での誤差修正が行えなかったことの 2 つが考えられる。図 18 は同時 100% 高スキル

条件のうちプレテストのパフォーマンスが最も高かった学習者Aと同時100%低スキル条件のうちプレテストのパフォーマンスが最も低かった学習者Bのブロック1, 2, 3におけるある試行の目標とする荷重量と実際の荷重量を表している。協力者Aは練習初期から荷重量切り替えのタイミングでの誤差は小さいが、それ以外の部分での誤差が大きく、練習後期までパフォーマンスに大きな変化がないことがわかる。一方、協力者Bでは練習初期は目標とする荷重量から大きく逸脱しているが、練習が進むにつれ目標とする荷重量に近似していく。初期スキル低条件の学習者においては、本研究で用いたフィードバック情報が正しい荷重量へと適切にガイダンスしているが、初期スキル高条件の学習者においては与えられているフィードバック情報が正しいパフォーマンスへとガイダンスする効果を有しておらず、フィードバック・タイミングとフィードバック頻度の操作だけでは練習パフォーマンスを向上させられなかったと考えられる。

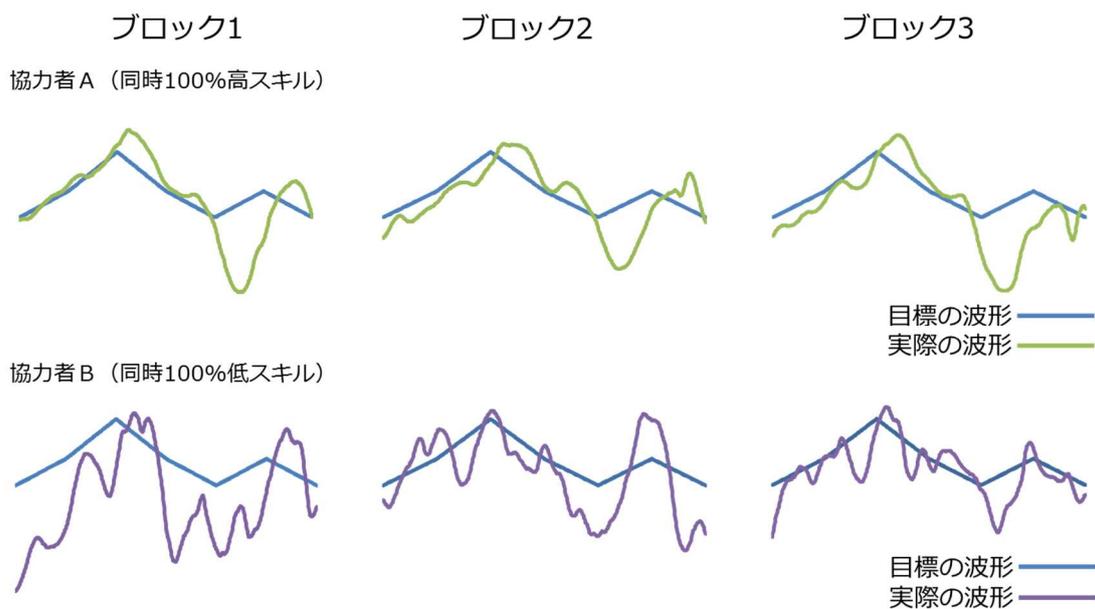


図 18 初期スキル高条件と差初期スキル低条件におけるパフォーマンスの推移

2.6 小括

第1研究では、初期スキルの高い学習者及び低い学習者の運動学習を効率化させるための視覚フィードバックのタイミングと頻度の組み合わせについて検討した。

その結果、名目的課題難易度の高い連続課題の練習の際には、練習初期のスキルレベルの低い学習者に対しては同時フィードバックを用いた練習により練習パフォーマンスを向上させ、運動学習を生起させるよう取り組むことが推奨される。しかし、練習初期のスキルレベルの高い学習者においては与えられる視覚情報がパフォーマンスを変化させるのに適切でない場合にはフィードバック・タイミングや頻度の操作では練習パフォーマンスの向上及び運動学習に効果を示さない可能性がある。

第3章 第2研究

3.1 研究の背景と目的

第2章では、初期スキルレベルの高い学習者及び低い学習者の運動学習を効率化させるための視覚フィードバックのタイミングと頻度の組み合わせについて検討した。その結果、練習初期にスキルレベルの低い学習者は同時フィードバックを使用することが推奨されたが、スキルレベルの高い学習者の運動学習に対する効果的なフィードバック付与方法は提案できなかった。Challenge Point

Framework に基づいて考えると学習者の初期スキルレベルが高いために機能的課題難易度が相対的に低くなっている場合には、最終フィードバックの使用やフィードバック頻度を減少させることで機能的課題難易度を高くする措置をとることが求められる。

図19は第1研究の“同時100%高スキル条件”のうちプレテストのパフォーマンスが最も高かった学習者Aのブロック3における1つの試行の目標とする荷重量と実際の荷重量を表している。図に示す通り、第1研究でフィードバック用ランプを点灯させるよう求めていた学習者の体重の55, 65, 80% 周囲での誤差は比較的小さいが、それ以外の部分での誤差が大きい。これらの誤差を減少させるためには図の矢印を示した部分の誤差が減少するような視覚情報を与える必要がある。

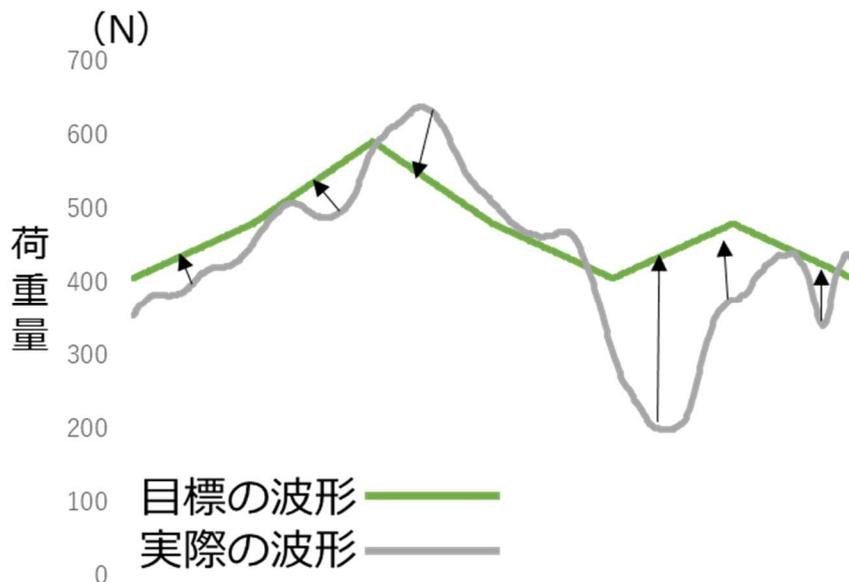


図19 初期スキル高条件の学習者のブロック3におけるパフォーマンス

このように第1研究でランプを点灯させるよう求めた箇所以外での誤差を修正させるような情報を用いて機能的課題難易度を変化させることで、第1研究の初期スキルの高い学習者と同等のスキルレベルの学習者においても練習中にパフォーマンスを向上させ、運動学習を生起させることが可能となると考えられる。

そこで第2研究では、視覚フィードバック精度の変更により、フィードバック・タイミング及び頻度の操作だけではパフォーマンスの向上が困難だった初期スキルレベルの高い学習者においても練習パフォーマンスを向上させ運動学習を生じさせることができるのかを検討することとした。

3.2 対象

協力者は、健常若年成人 15 名，男性 8 名，女性 7 名，年齢 22.4 ± 0.8 歳であった。全ての協力者は過去に今回用いた課題を行った経験はなかった。

協力者には、事前に本研究の内容及び結果の取り扱いについて研究説明書を示しながら口頭で説明した上で協力を依頼し、承諾書への自著により承諾を得た。

3.3 方法

第 2 研究では学習課題，副課題ともに第 1 研究と同様の課題を用いた。測定機器，手続き，練習及びテストのスケジュールに関しても第 1 研究と同様とした。

次項に第 1 研究からの変更点のみ記載した。

3.4 フィードバック

3.4.1 フィードバックの情報様式とその内容

本研究でとりあつかうフィードバックの情報様式は第1研究と同様に視覚情報とした。

モニター上に図20に示す順序でランプを表示させた。左下肢への荷重量が各協力者の体重の $80 \pm 2\%$, $65 \pm 2\%$, $55 \pm 2\%$ の範囲内の場合には緑のランプが点灯するよう設定した。また、 55% と 65% のランプの間に 50% のランプ、 65% と 80% のランプの間に 70% 、 75% のランプを配置し、荷重量がそれぞれの $\pm 2\%$ の範囲内の場合に点灯するよう設定した。なお荷重量が 83% 以上の場合には赤いランプが、 52% 以下の場合には青いランプが点灯するよう設定した。

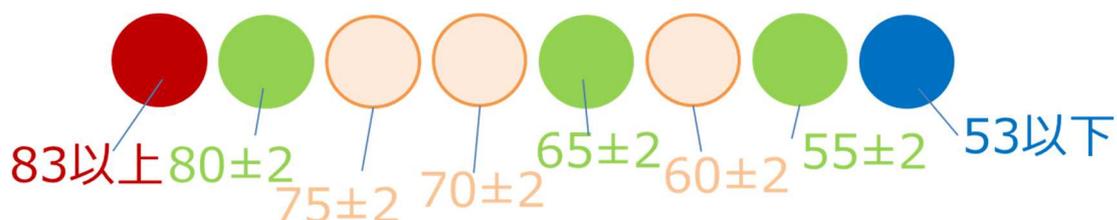


図20 第2研究で用いた視覚フィードバックの情報

3.4.2 フィードバック条件

本研究では同時100%条件でのみ練習を行った。また、第1研究の同時100%初期スキル高条件をフィードバック精度低条件として分析対象に加え、第2研究で新たに測定した協力者をフィードバック精度高条件として2群間の比較を行った。

3.5 分析方法

第2研究では第1研究の同時100%初期スキル高条件の学習者をフィードバック精度低条件として分析した。そのため、第2研究の協力者の内プレテストの成績がフィードバック精度低精度条件の協力者のプレテストにおける平均値±2SDの範囲に相当する協力者のみを分析対象とした。第2研究で分析対象となったのは協力者14名中8名^[大橋3]であった。

第1研究同様に各群のRMSE-TとRMSE-Pについて、時期およびフィードバック精度とする2元配置分散分析を行った。なお、統計処理にはIBM SPSS Statics 24を使用し、すべての分析において危険率5%未満を統計学的有意とした。

3.6 結果

3.6.1 RMSE - T

プレテスト，練習試行，保持テストにおける各群の RMSE - T を図 21 に示す。

練習試行におけるフィードバック精度の違いが左下肢における荷重量調整課題の学習に与える影響を分析するために，従属変数を RMSE - T，要因を時期及びフィードバック精度とする 2 元配置分散分析を行った。その結果，時期 ($F(81.782, 3.556) = 18.752, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.449$) に有意な主効果が認められた。また，時期とフィードバック精度に有意な交互作用 ($F(81.782, 3.556) = 4.988, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.178$) が認められた。

フィードバック精度と時期に有意な交互作用が認められたことから，フィードバック精度高条件，フィードバック精度低条件それぞれに時期を要因とする 1 元配置分散分析及び Tukey 法による多重比較を行った。さらに各テスト・練習ブロックにおいて各フィードバック条件に対する独立したサンプルの t 検定を行った。

まず，時期に関して，フィードバック精度高条件では，1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(4, 35) = 6.266, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.417$) が認められ，Tukey 法による多重比較の結果プレテストに比較しブロック 1，ブロック 2，ブロック 3 が有意に小さい値を示した。フィードバック精度低条件では，1 元配置分散分析の結果有意な主効果 ($F(4, 80) = 3.063, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.133$) が認められたが，Tukey 法による多重比較の結果すべての時期において有意差を認めなかった。

次に，独立したサンプルの t 検定の結果，プレテストにおいて有意差は認められなかったが，ブロック 1，ブロック 2，ブロック 3 においてはフィードバック精度高条件がフィードバック精度低条件と比較し，有意に小さい値を示した ($p < 0.05$)。

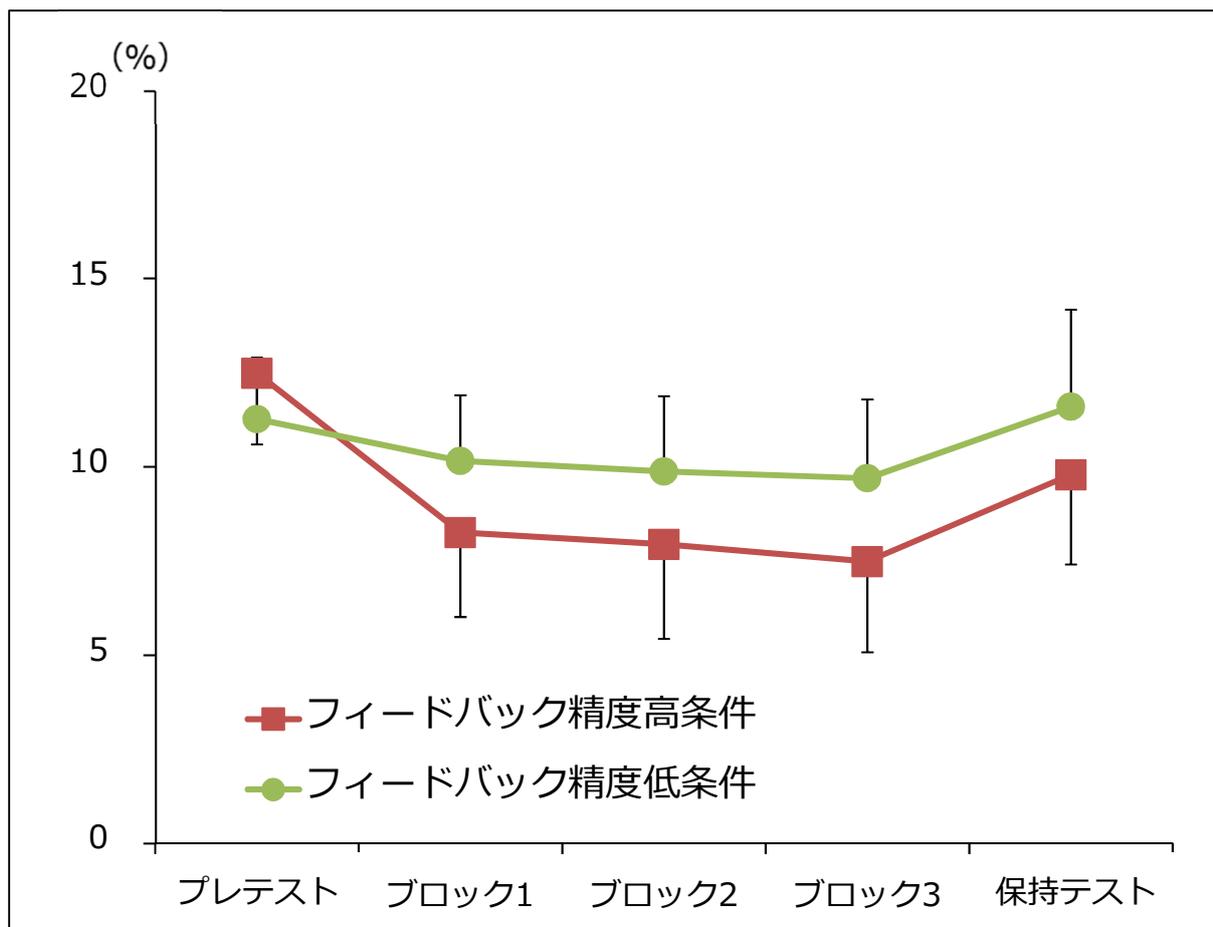


図 21 フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件における RMSE・T

3.6.2 RMSE - P

プレテスト，練習試行，保持テストにおける各群の RMSE - P を図 22 に示す。

練習試行におけるフィードバック精度の違いが左下肢における荷重量調整課題の学習に与える影響を分析するために，従属変数を RMSE - P，要因を時期，フィードバック精度とする 2 元配置分散分析を行った。その結果，有意な主効果及び交互作用は認められなかった。

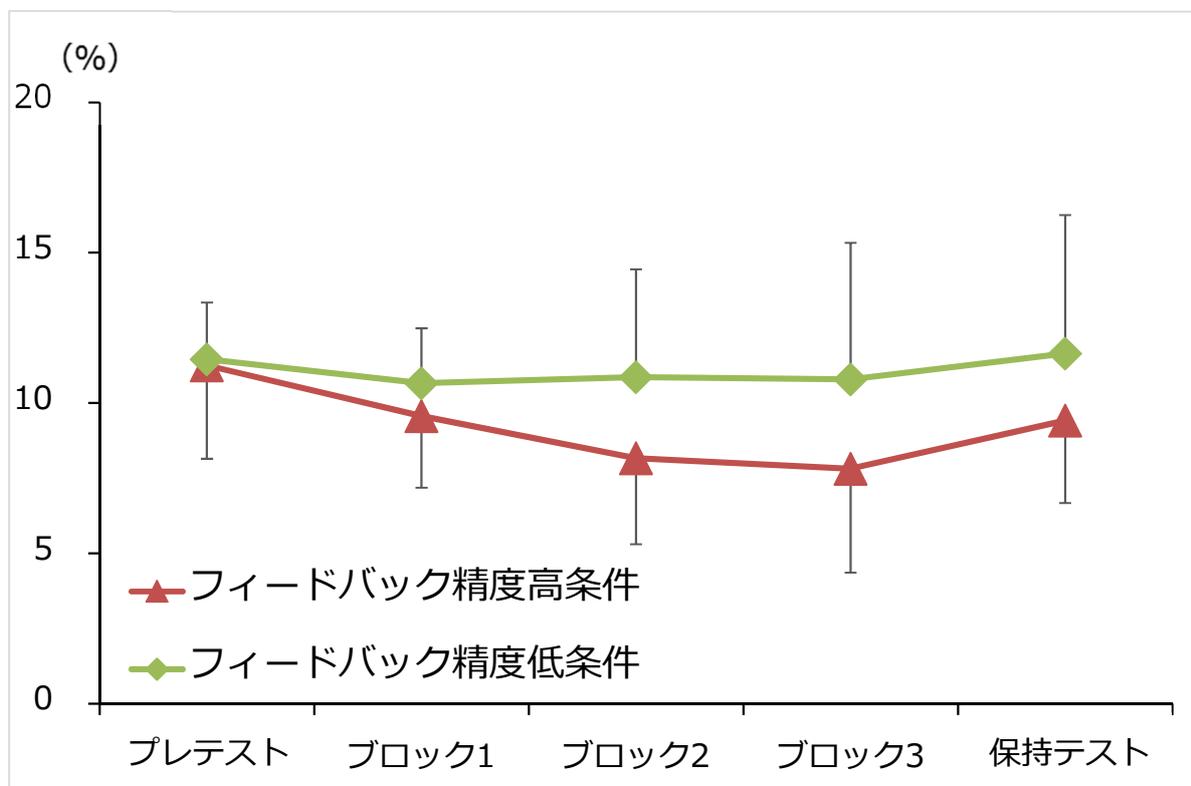


図 22 フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件における RMSE - P

3.7 考察

第2研究では、「適切なタイミングで左下肢への荷重量を指定された荷重量に調整する課題」の練習時に用いる視覚フィードバック精度の変更により機能的課題難易度を変更することで、パフォーマンスの向上が困難と考えられる学習者においても練習パフォーマンスを向上させ運動学習を生じさせることができるのかを検討した。

RMSE・Tの分析の結果、プレテスト、保持テストには群間で差が認められなかったが、練習試行においてはフィードバック精度高条件がフィードバック精度低条件に比べ有意に低い値を示し、高いパフォーマンスを示していた。各フィードバック条件の分析において、フィードバック精度高条件ではブロック1から即座にパフォーマンスを向上させ、練習後半まで高いパフォーマンスを示したが、フィードバック精度低条件では練習パフォーマンスが向上せず、運動学習も生起しなかった。これらのことから、フィードバック精度高条件は運動学習を生起させなかったものの、フィードバック精度低条件に比べ効果的に練習中のパフォーマンスを向上させた。しかし、RMSE・Pの分析の結果では、両条件ともに練習パフォーマンスの向上及び運動学習が生じなかった。

これらの結果から、フィードバック精度低条件の協力者がランプを点灯させるよう求められていた範囲での誤差はフィードバック精度にかかわらず練習開始前から高いパフォーマンスを示していたため、練習を通して変化が生じなかったと考えられる。しかし、フィードバック精度高条件の協力者はフィードバック精度低条件の協力者がランプを点灯させるよう求められた範囲外でも視覚情報を与えられ、その情報を利用してパフォーマンスを改善させることが出来ていたと考えられる。

第2研究では比較的スキルレベルの高い協力者に対して与えられるフィードバックの情報を変更することで、練習中のパフォーマンスの改善を認めた。この結果について Challenge Point Framework の概念を基に考察する。

図23は最適な課題難易度と機能的課題難易度の関係を表している。第2研究の結果、フィードバック精度高条件はフィードバック精度低条件と比較し、練習中に高いパフォーマンスを示したが、運動学習に関しては両条件ともに生起しないという結果であった。この結果はそれぞれのフィードバック条件が最適な課題難易度に対して図23のような関係となることを示している。しかし、フィードバック精度高条件で用いた視覚情報がフィードバック精度低条件と比較して複雑であると仮定した場合、Challenge Point Framework の概念では機能的課題難易度が高くなるはずである。

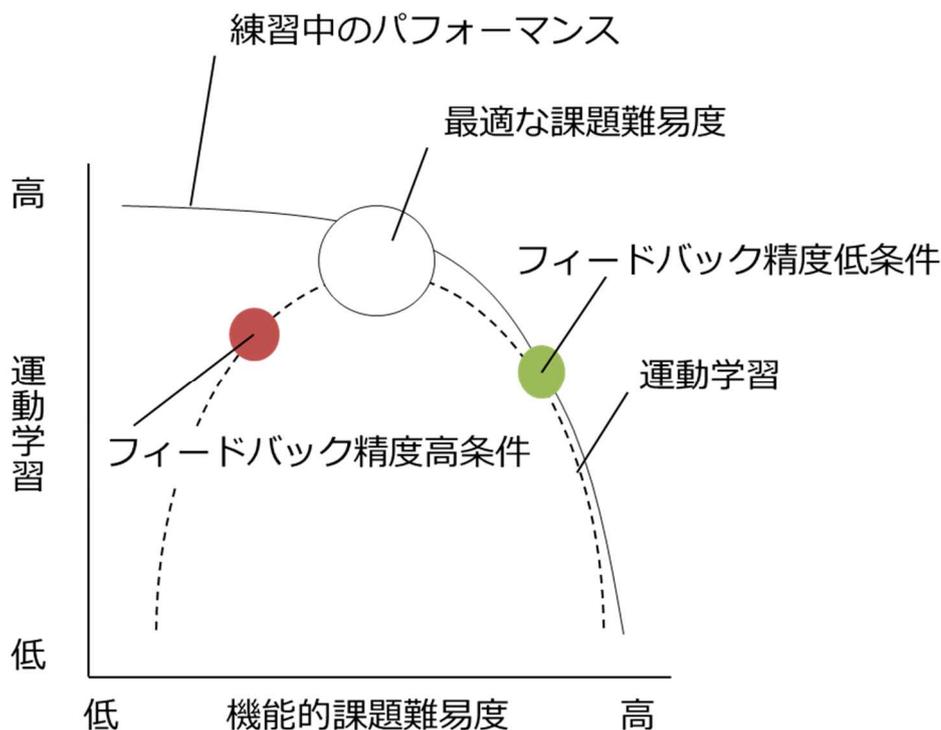


図 23 フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件の機能的課題難易度

図 24 にフィードバック精度低条件とフィードバック精度高条件のランプを示す。まずフィードバック精度低条件に関しては 55, 65, 80% に対するランプが与えられているが、それ以外の範囲には情報が与えられず、学習者は等速度での運動が可能となっているのかわかることができない。次にフィードバック精度高条件においては 55, 65, 80% の間に 5% 間隔でランプが配置されていることから等速度で運動を行えているのかわかることが比較的容易である。また、83%以上に荷重してしまうことや52%を下回ってしまうことを予防できる。さらに 55, 65, 80% の間にランプが配置されていることから、55, 65, 80% に対するガイダンス効果も得られると考えられる。これらのことからフィードバック精度高条件で提示されたフィードバック情報はフィードバック精度低条件で提示されたフィードバック情報と比較して、情報としての確実性が増していたと考えることができる。その結果として、フィードバック精度高条件では、フィードバック精度低条件と比較して機能的課題難易度が低下し、練習中に高いパフォーマンスを示すことができたと考えられる。

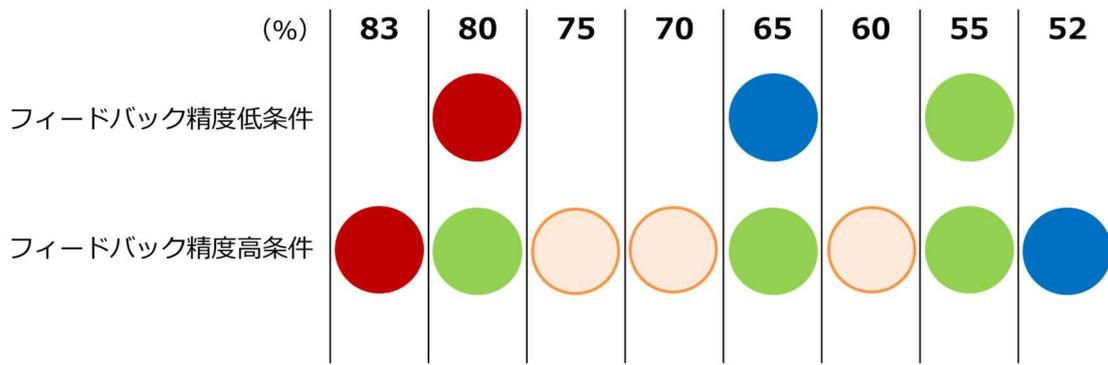


図 24 フィードバック精度高条件とフィードバック精度低条件に用いたフィードバック情報

フィードバック精度高条件が視覚情報の変更による機能的課題難易度の低下に伴い高い練習パフォーマンスを示したとすると、フィードバック精度低条件、フィードバック精度高条件の機能的課題難易度は図 23 で示すような関係となると考えられ、Challenge Point Framework との矛盾は解消される。フィードバック精度低条件は練習中にも高いパフォーマンスを示さず、運動学習も生起しないという結果を示し、最適な課題難易度よりも機能的課題難易度が過度に高い状態にあったと考えられる。一方、フィードバック精度高条件では運動学習は生起しなかったものの練習中はフィードバック精度低条件と比較してパフォーマンスを示しており、機能的課題難易度が最適な課題難易度よりもやや低い状態にあったと考えられる。

3.8 小括

第 2 研究では、視覚フィードバック精度の変更により、比較的初期スキルが高く、練習によるパフォーマンスの向上が困難と考えられる学習者においても練習パフォーマンスを向上させ運動学習を生じさせることができるのかを検討した。

その結果、比較的初期スキルの高い学習者においてもフィードバックとして用いる視覚情報の不確実性を低下させることで、フィードバック・タイミングや頻度の操作のみでは練習パフォーマンスの向上が難しいと想定される学習者においても練習中のパフォーマンスを向上させることが示された。また、比較的初期スキルレベルの高い学習者においてもフィードバック条件によっては機能的課題難易度が過度に高くなる場合があることが示された。しかし、第 2 研究では運動学習を生起させるまでには至らなかった。

第4章 総括

4.1 本論文の結論

本研究では、スキルレベルの異なる学習者に対して運動学習を効率的に生起させるフィードバック条件を設定するための方略を示すことを目的に、健常若年成人を協力者に迎え、スキルレベルの異なる学習者に対して視覚フィードバックを与えるタイミングと頻度がそれぞれのスキルレベルにおいてどのような効果をもたらすのかを第1研究にて検証した。さらに第1研究の結果を受けて、練習前のスキルレベルが比較的高い学習者の運動学習を生起させるためのフィードバック条件を探索すべく第2研究を行った。第1研究、第2研究の結果を踏まえ以下に総合的に考察する。

第1研究の結果、連続的な下肢荷重量調整課題の学習において、フィードバック頻度は効果を認めなかったが、フィードバック・タイミングは効果を認め、同時フィードバックは最終フィードバックに比べ効果的に練習中のパフォーマンスを向上させ、運動学習に関しても有利に働く可能性が示された。特に、初期スキルの低い学習者においてその効果が強く認められた。つまり、**challenge point framework**における名目的課題難易度に加えて、学習課題が学習者にとってどの程度難しい課題であるかによって用いられるべきフィードバックなどの練習条件が変化することを示している。

これまでフィードバック・タイミングの違いによる運動学習効果を検討した研究では、上肢の位置調節課題、筋出力調整課題、部分荷重課題等の学習課題の違いにより、その効果が変わるのかについても同時に検討されてきている。本研究で用いた学習課題は連続的な部分荷重課題であった。Winsteinら³⁹⁾は、部分荷重課題の練習における同時フィードバックと最終フィードバックの運動学習効果を検討している。この研究で用いた学習課題は各対象者の体重の30%を片脚に荷重して保持するという課題である。その結果、同時フィードバックは練習中ではその他の条件と比較して高いパフォーマンスを示したものの、保持テストでは最も低いパフォーマンスを示したと報告されており、実験室的な研究課題を用いてきた多くの先行研究と類似した結果を示している。本研究で用いた学習課題も片脚への荷重量を調整する課題ではあったが、Winsteinの研究結果とは異なる結果となった。その原因として片脚への荷重量を調整するという出力の調整に加えて、その荷重量調整を指定されたタイミングで行うという時間的な要素を含む課題であったことが挙げられ、Winsteinの用いた学習課題と比較して名目的課題難易度が高かったと考えられる。本研究結果とWinsteinの研究結果から、学習課題の種類によって運動学習に有効なフィードバック条件が決まるとは限らず、類似した課題であっても取り扱っている変数の複雑さなどの影響を受けて名目的課題

難易度が変化し、それに伴い有効なフィードバック付与方法も変化すると考えられる。

このことについて Gentile の課題分類を参考にすることができる。本研究で用いた学習課題と Winstein の用いた学習課題を Gentile の課題分類に当てはめると、どちらの課題も環境の変化や対象物の操作はないが、本研究で用いた学習課題は身体の移動があり、Winstein の用いた学習課題は身体移動がない。このことから、本研究で用いた学習課題の難易度が比較的高いことが推察される。スポーツに関連するような複雑な課題を用いてフィードバック・タイミングの運動学習効果について分析している先行研究では同時フィードバックが学習に効果的に働く場合があると報告されており、本研究の結果はこれらの結果の一部を支持する内容となった^{25, 42)}。

しかし、これらの先行研究の結果からは、第1研究で得られた初期スキル高条件の学習者において練習中のパフォーマンスが向上せず、運動学習も生起しなかったことについて説明することはできない。Challenge Point Framework では名目的課題難易度と学習者のスキルレベル、練習条件の関係によって機能的課題難易度が決定されると説明されているが、この観点から行われた視覚フィードバックに関する研究は少ない。

Laurie ら⁴⁴⁾ は、若年者と高齢者を協力者とすることで加齢の影響によってフィードバック・タイミングが運動学習に与える影響が異なるのかを検討している。この研究は比較的難易度が高いと考えられる両上肢でのレバー操作課題 (bimanual coordination task) を学習課題として行われた。その結果、若年者では同時フィードバック条件、最終フィードバック条件の両方で運動学習が生起したが、高齢者では同時フィードバック条件のみで運動学習が生起した。さらに、若年者は練習初期に練習中のパフォーマンスが劇的に向上するが、高齢者では練習に伴い徐々に練習中のパフォーマンスが向上したと報告している。この結果から、両上肢の協調パターンの学習において高齢者は若年者と比較し、練習条件の影響をより強くうけ、同時フィードバックはその利用可能性が高く、練習中のパフォーマンスと目標とする課題の関係を強化するような情報を有すると述べている。Laurie らの研究結果から、高齢者において同時フィードバックの有効性が示されたが、若年者においては同時フィードバック条件、最終フィードバック条件ともに練習パフォーマンスが向上し、運動学習が生起した。高齢者が第1研究の初期スキル低条件の学習者のようにスキルレベルの低い学習者と想定するとしたら、第1研究の結果と一致するが、若年者を初期スキル高条件の学習者と想定した場合、第1研究で得られた結果とは一部異なる結果となる。第1研究の結果との相違の原因として、Laurie らの研究では若年者と高齢者においてプレテストで有意差が認められていなかった。このことから若年者の初期スキルレベルが高く

なかった可能性があり、第1研究の初期スキル高条件の学習者の練習中のパフォーマンスが向上せず、運動学習が生起しなかった原因についての明確な説明はできない。

そこで、第1研究の初期スキル高条件の学習者と同等の初期スキルを有する学習者に対する有効な視覚フィードバック条件を探索することを目的に第2研究を行った。

第1研究で用いたフィードバック情報は下肢への荷重量に応じてランプを断続的に点灯させることで与えた。そのため、第1研究でランプを点灯させるよう求めた箇所以外での誤差を修正させるような情報を用いて機能的課題難易度を変化させることで、第1研究の初期スキルの高い学習者と同等のスキルレベルの学習者においても練習中にパフォーマンスを向上させ、運動学習を生起させることが可能となると仮説を立てた。第2研究の結果、第1研究でランプを点灯させるよう求めた範囲のパフォーマンスにおいてはフィードバック精度の条件間に差は認められなかったが、動作全体のパフォーマンスにおいては運動学習は生起しなかったものの、精度の高い視覚フィードバックを提示することで練習中のパフォーマンスの向上を認めた。

このことから、第1研究の初期スキル高条件の学習者の練習中のパフォーマンスが向上せず、運動学習が生起しなかった理由として、学習者の初期スキルレベルが高くランプを点灯させるよう求めていた範囲における誤差が練習開始時点で床効果を示していたことが挙げられる。また、初期スキル高条件の学習者においては与えられているフィードバック情報が正しいパフォーマンスへとガイダンスする効果を有しておらず、フィードバック・タイミングとフィードバック頻度の操作だけでは練習パフォーマンスを向上させられなかったと考えられる。それに対して第2研究では第1研究でランプを点灯させるよう求めた範囲外にもパフォーマンスに関する情報を提示することで練習中のパフォーマンスを向上させることに成功した。

Challenge Point Framework では学習者のスキルレベルが高くそのために機能的課題難易度が相対的に低くなっている場合には、最終フィードバックの使用やフィードバック頻度の削減を通して機能的課題難易度を高める措置を求められるが、これは練習に伴いパフォーマンスの向上が認められる場合に限られると考えられる。第1研究の初期スキル高条件の学習者は練習のパフォーマンスの向上を認めなかった。これは、初期スキル高条件に分類された学習者に同時フィードバックや高頻度のフィードバックを用いていたとしてもなお機能的課題難易度が高かった可能性がある。第2研究の結果、そのような場合には視覚情報の精度を変更し機能的課題難易度を低下させることで練習中のパフォーマンスを改善させる

ことが可能であることが示された。

Robin ら⁴⁵⁾の研究では単純な上肢の位置調節課題を用いて視覚的な理解のしやすさの異なるフィードバックが運動学習に与える影響について検討している。その結果、完全に視覚化されたフィードバックと比較して弱化された視覚フィードバックのほうが学習を強化したと報告しており、これは学習者の受け取る情報の利用のしやすさが練習の効果に影響を与えることを示している。この研究では名目的課題難易度の低いと予想される上肢の位置調節課題に対して利用が比較的困難な視覚情報を用いて機能的課題難易度を高めることが運動学習に有効に働いたと解釈できる。Yamamoto ら⁴⁶⁾は名目的課題難易度の低いと予想される上肢の位置調節課題に対して上肢の運動の速度や位置情報と比較して利用の困難と考えられる加速度情報を視覚化した同時フィードバックを用いて運動学習の生起に効果を示したと報告している。これらの研究は学習課題の名目的課題難易度が低い場合に、フィードバックとして用いられる視覚情報の利用のしやすさを低下させ学習者の情報処理を複雑にし、機能的課題難易度を増加させることで運動学習が生起する可能性を示している。これらの研究では名目的課題難易度が低いと想定される学習課題を用いて行われている。第2研究では、名目的課題難易度が高いと考えられる学習課題を用いて、視覚情報の利用のしやすさを向上させるような情報を提供することで練習中のパフォーマンスを改善させた。

第1研究、第2研究の結果から、名目的課題難易度の高い学習課題を練習する際の視覚フィードバック条件の設定については次のように考えることができる。名目的課題難易度の高い練習の場面で、練習条件を設定する際は、学習者のスキルレベルが低い場合には同時フィードバックを用いて練習パフォーマンスを向上させ、運動学習が生起するよう働きかけることが推奨される。しかし、学習者の初期スキルレベルが比較的高いために誤差が床効果を示し、同時フィードバックを用いても練習パフォーマンスの向上が望めない場合には、フィードバックとして提示する視覚情報の利用のしやすさを向上させることで、練習中のパフォーマンスを向上させることが推奨される。

しかし、本実験にはいくつかの限界が存在する。第1研究では学習者の初期スキルレベルの違いによってフィードバック・タイミング及びフィードバック頻度によって操作された視覚フィードバック条件により得られる運動学習効果が変化するかを検討することを目的とした。多くの先行研究において課題難易度とフィードバック頻度の効果が報告されているものの、第1研究ではフィードバック頻度の効果を検出することが出来なかった。また、第2研究において、初期スキル高条件の学習者のみを対象とし、フィードバック・タイミングとして同時フィードバックのみを使用しているため、同様のフィードバック情報を初期スキル低条件の学習者が用いた場合や最終フィードバック条件で用いた場合に得られる効

果については検討できない。また、第2研究のフィードバック精度高条件においては練習中のパフォーマンスの向上は認めたが、運動学習は生起しなかった。これらのことから、その他の条件の学習者にも第2研究で用いた視覚フィードバックを用いて、その効果について検討する必要がある。最後に、初期スキルの高低を判断する基準は学習課題によって異なる。その他の学習課題の練習においても本研究結果から得られた知見が適応できるのかを検証する必要がある。

4.2 理学療法への示唆

理学療法場面では、様々なスキルレベルの患者に対して、課題を与え、練習条件を設定することで運動学習を促していく。この過程で学習する課題は患者の必要とする動作であるため、課題そのものを変更することは難しい。また、練習回数は理学療法を提供している時間に限定されるため、その限られた練習回数の中で効率的に動作の学習を生起させることが求められる。フィードバック付与方法は運動学習を効率よく生起させるために操作される代表的な練習条件である。視覚フィードバックは理学療法の臨床場面では筋電図や関節角度計等のバイオフィードバック、鏡面像やビデオで撮影した映像などの形式で用いられている。視覚フィードバックの与えられるタイミングと頻度が運動学習に与える影響について多くの研究で検討されてきた。まず、フィードバック・タイミングに関しては、動作遂行中に与えられる同時フィードバックと動作終了後に与えられる最終フィードバックがあり、複雑な課題では同時フィードバック、単純な課題では最終フィードバックが有効とであるとされている。一方、フィードバック頻度は練習試行回数に対する相対的なフィードバックの回数により定義され、複雑な課題では高頻度、単純な課題では低頻度のフィードバックが有効とされている。このようにフィードバックを与えるタイミングや頻度の運動学習への効果については様々な研究がなされてきているにもかかわらず、学習者のスキルレベルを考慮した研究は行われていなかった。健常者にとって簡単な課題であっても理学療法の対象となる患者にとっては難しい課題である可能性が高く、課題そのものの難易度に加えて、学習者にとってどの程度難しい課題であるかが重要だと考えられる。しかし、学習者のスキルレベルを考慮してフィードバック条件を設定するための方法は確立されていない。

そこで、本研究では、連続的な下肢荷重量調節課題に対する学習者のスキルレベルを考慮して、フィードバック・タイミング及び頻度が運動学習に与える影響について検討した。その結果、フィードバック頻度の効果は認められなかったものの、フィードバック・タイミングの効果が認められた。同一の学習課題に対してスキルレベルの高い学習者と最終フィードバックを用いたスキルレベルの低い学習者では練習中のパフォーマンスの向上及び運動学習を生じなかった。唯一、練習中のパフォーマンスの向上と運動学習を生じたのが同時フィードバック条件で練習を行ったスキルレベルの低い学習者であった。つまり、学習課題に対するスキルレベルが低い場合には同時フィードバックが有効に働くことを表している。さらに追加の研究ではスキルレベルの高い学習者に対して、フィードバック・タイミング及び頻度の操作ではなく提示する視覚情報の精度を変更させることで練習中のパフォーマンスの向上を認めた。これらの結果から、練習場面で用いるフィードバック条件を設定する際、練習開始時は同時フィードバックを用いて練習を行い、練習中のパフォーマンスの向上と運動学習を生じさせるよう取り組むこ

とが推奨される。しかし、学習者が練習前にある程度のパフォーマンスを発揮している場合には、与える視覚情報を変更して練習中のパフォーマンスを向上させられないかを確認する必要がある。

このように、セラピストの経験や直感で練習条件を決定するのではなく、学習者の学習課題に対するスキルレベルを確認してフィードバック条件を設定することで効率的に運動学習を生起させることが可能となる。その結果、患者の動作の獲得が効率的になされ、入院中に必要なその他の動作の練習時間を確保することが可能となり、早期退院につながると考える。

4.3 今後の展望

本研究により、学習課題に対するスキルレベルによって用いるべきフィードバック・タイミングや視覚情報が変化することが明らかとなった。

しかし、これまでに多くの研究でその効果が確かめられているにもかかわらず、本研究ではフィードバック頻度の効果を検出することが出来なかった。本研究においてフィードバック頻度の効果が検出できなかった原因を明らかにするとともに、フィードバック頻度の効果を練習場面でどのように応用していくのかについて検討が必要である。

また、本研究は連続的な下肢荷重量調節課題という1つの学習課題のみを用いて行われた。学習課題によってどの程度のパフォーマンスを発揮していればスキルレベルが高いといえるのかは異なる。そのため、臨床場面で設定する学習課題すべてに本研究結果を反映させることは可能ではないと考えられる。ただし、現存するすべての運動学習課題について検討するのは現実的ではない。そこで、課題の種類（連続課題、離散課題、系列課題）ごとにフィードバック・タイミング及び頻度の効果を検討し、その利用可能性を明らかにしていく必要がある。

さらに、本研究の研究協力者は健常若年成人であった。理学療法の対象は脳血管疾患等の神経疾患や骨折等の運動器障害を呈した患者や高齢者が多い。これらの患者の必要とする動作の練習場面でフィードバック付与方法が与える影響についての検討が必要となる。また、症例を対象とした研究においても上記のスキルレベルの影響を考慮した分析を行うことが必要となる。

これらのことを踏まえ、今後はその他の種類の学習課題に対する視覚フィードバック・タイミング及び頻度の効果を検証するとともに、高齢者や脳卒中片麻痺患者等を協力者とするこゝで、理学療法場面での視覚フィードバックの設定に対して様々な提案をすることが今後の課題であるといえる。

謝辞

本研究は指導教員である大橋ゆかり教授の指導のもとに行われました。大橋ゆかり教授には、終始親切丁寧な御指導を頂き、本稿を完成に導いて頂きました。さらに、博士前期課程から約8年間に亘って、右も左も分からない自分に対して、運動学習研究の様々な手法、考え方、面白さを教えて頂きました。深く感謝申し上げます。

茨城県立医療大学理学療法学科 富田和秀教授には、副指導教員として多大なご指導を頂いたことに心より感謝いたします。

また、本稿をまとめるにあたり、的確なご助言を頂きました主査 茨城県立医療大学人間科学センター 岩井浩一教授，副査 茨城県立医療大学理学療法学科 浅川育世教授，橘香織准教授，学外審査員 国際医療福祉大学理学療法学科 谷浩明教授に心から御礼申し上げます。

本研究で用いた測定機器や測定手法に関して、多くの助言と支援をして頂きました作新学院大学経営学部 小林育斗特任准教授に心から御礼申し上げます。

本研究の全測定は茨城県立医療大学で行いました。測定にご協力頂いた茨城県立医療大学大学院生，学部生の皆様に深く感謝いたします。

茨城県立医療大学大学院大橋研究室（通称，RTC）の皆様には、本研究を進めるにあたり研究者・臨床家としての様々な視点からご助言を賜りました。

RTCでの活動があったからこそ研究を完遂することが出来ました。また、公私ともに暖かく関わっていただいたことに心より感謝いたします。

最後に、思うように研究が進まず苦しい思いをしたときも、遠く故郷から常に気かけ、励まし暖かく見守ってくれた両親に心より感謝を申し上げます。

2018年3月
山本 良平

引用文献

- 1) 大橋ゆかり . 運動学習理論と理学療法—オーバービュー . 理学療法ジャーナル , 2012; 46 (1), 9 -15
- 2) Richard A. Schmidt. Motor Control and Learning : A Behavior Emphasis. Human Kinetics Champaign, IL, 1988; 345 - 348
- 3) 大橋ゆかり . セラピストのための運動学習 ABC. 文光堂 , 2004; 7 - 14
- 4) Lister MJ, ed. Contemporary Management of Motor Control Problems: Proceedings of the II STEP Conference. Foundation for Physical Therapy (Alexandria); 1991.
- 5) Katak SS, Winstein CJ. Learning-performance distinction and memory processes for motor skills: a focused review and perspective. Behavioural Brain Research, 2012; 228 (1): 219 - 231.
- 6) Crossman E. R. F. W. A theory of the acquisition of speed-skill. Ergonomics, 1959; 2(2): 153 - 166.
- 7) 谷浩明 . セラピストによる教示やフィードバックは学習に効果的か? 理学療法科学, 2006; 21(1): 69 - 73
- 8) Roland Sigrist, Georg Rauter, Robert Riener, Peter Wolf. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review, 2013; 20 (1): 21 - 53
- 9) Guadagnoli. Optimal Length for Summary Knowledge of Results: The Influence of Task-Related Experience and Complexity Research Quarterly for Exercise and Sport. 1996; 67 (2): 239 - 248
- 10) Lavery J. Retention of simple motor skills as a function of type of knowledge of results. Canadian Journal of Psychology, 1962; 16: 300
- 11) Schmidt, R. A., Young, D. E., Swinnen, S., & Shapiro, D. C. Summary knowledge of results for skill acquisition: Support for the guidance hypothesis. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 1989; 15(2): 352 - 359.
- 12) Salmoni, S. Knowledge of results and motor learning. A review and critical reappraisal. Psychological Bulletin, 1984; 95 (3): 355 - 386.
- 13) Bernier, P. M., Chua, R., & Franks, I. M. Is proprioception calibrated during visually guided movements? Experimental Brain Research, 2005; 167 (2): 292 - 296.
- 14) Heuer, H., & Hegele, M. Constraints on visuo-motor adaptation depend on the type of visual feedback during practice. Experimental Brain Research, 2008; 185 (1): 101 - 110.

- 15) Sulzenbruck, S., & Heuer, H. Type of visual feedback during practice influences the precision of the acquired internal model of a complex visuo-motor transformation. *Ergonomics*, 2011; 54 (1): 34 - 46.
- 16) Crowell, H. P., & Davis, I. S. Gait retraining to reduce lower extremity loading in runners. *Clinical Biomechanics*, 2011; 26 (2): 78 - 83.
- 17) Kovacs, A. J., & Shea, C. H. The learning of 90° continuous relative phase with and without lissajous feedback: External and internally generated bimanual coordination. *Acta Psychologica*, 2011; 136 (3): 311 - 320.
- 18) D. H. Holding. *Principles of Training: Knowledge of Results*. Pergamon Press, 1965; 15 - 35.
- 19) Mary M. Smyth. Attention to Visual Feedback in Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 1978; 10 (3): 185 - 190.
- 20) Annett J. Learning a Pressure under Conditions of Immediate and Delayed Knowledge of Results. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1959; 11: 3 - 15.
- 21) Darl W. Vander linden, James Cauraugh. The Effect of Frequency of Kinetic Feedback on Learning an Isometric Force Production Task in Nondisabled Subjects. *Physical Therapy*, 1993; 73: 79 - 87.
- 22) Richard A. Schmidt, Gabriele Wulf. Continuous Concurrent Feedback Degrades Skill Learning: Implications for Training and Simulation. *Human Factors*, 1997; 39 (4): 509 - 525.
- 23) Paul W. Fox, C. Michael Levy. Acquisition of a Simple Motor Response as Influenced by the Presence or Absence of Action Visual Feedback. *Journal of Motor Behavior*, 1969; 1 (3): 169 - 180.
- 24) Jin-Hoon Park, Charles H. Shea. Reduced-Frequency Concurrent and Terminal Feedback: A Test of the Guidance Hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 2000; 32 (3): 287 - 296.
- 25) Wulf, G., & Shea, C. H. Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2002; 9 (2): 185 - 211.
- 26) Blandin, Y., Toussaint, L., & Shea, C. H. Specificity of practice: Interaction between concurrent sensory information and terminal feedback. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2008; 34 (4): 994 - 1000.
- 27) Park, J. H., Shea, C. H., & Wright, D. L. Reduced-frequency concurrent and terminal feedback: A test of the guidance hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 2000; 32 (3): 287 - 296.

- 28) Camachon, C., Jacobs, D. M., Huet, M., Buekers, M., & Montagne, G. The role of concurrent feedback in learning to walk through sliding doors. *Ecological Psychology*, 2007; 19 (4): 367 - 382.
- 29) Huet, M., Camachon, C., Fernandez, L., Jacobs, D. M., & Montagne, G. Self-controlled concurrent feedback and the education of attention towards perceptual invariants. *Human Movement Science*, 2009; 28 (4): 450 - 467.
- 30) Todorov, E., Shadmehr, R., & Bizzi, E. Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task. *Journal of Motor Behavior*, 1997; 29 (2): 147 - 158.
- 31) Snodgrass, S. J., Rivett, D. A., Robertson, V. J., & Stojanovski, E. Real-time feedback improves accuracy of manually applied forces during cervical spine mobilisation. *Manual Therapy*, 2010; 15: 19 - 25.
- 32) Chang, J., Chang, G., Chien, C., Chung, K., & Hsu, A. Effectiveness of two forms of feedback on training of a joint mobilization skill by using a joint translation simulator. *Physical Therapy*, 2007; 87 (4): 418 - 430.
- 33) Wulf, G., Shea, C. H., & Matschiner, S. Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *Journal of Motor Behavior*, 1998; 30 (2): 180 - 192.
- 34) Eaves, D., Breslin, G., van Schaik, P., Robinson, E., & Spears, I. The short-term effects of real-time virtual reality feedback on motor learning in dance. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2011; 20 (1): 62 - 77.
- 35) Lee, M., Moseley, A., & Refshauge, K. Effect of feedback on learning a vertebral joint mobilization skill. *Physical Therapy*, 1990; 70 (2): 97 - 102.
- 36) Wulf, G., Hörger, M., & Shea, C. H. Benefits of blocked over serial feedback on complex motor skill learning. *Journal of Motor Behavior*, 1999; 31(1): 95 - 103.
- 37) Gentile AM. Skill acquisition: action, movement, and neuromotor processes. In Carr JH, Shepherd RB (eds.), *Movement science. Foundations for rehabilitation*, 2nd ed. Aspen (Gaithersburg); 93 - 154.
- 38) Guadagnoli MA, Lee TD. Challenge point: a framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 2004; 36 (2): 212 - 224.
- 39) Winstein, C. J., Pohl, P. S., Cardinale, C., Green, A., Scholtz, L., & Waters, C. S. Learning a partial-weight-bearing skill: Effectiveness of two forms of feedback. *Physical Therapy*, 1996; 76 (9): 985 - 993.
- 40) Bernier, P. M., Chua, R., & Franks, I. M. Is proprioception calibrated during visually guided movements? *Experimental Brain Research*, 2005; 167 (2): 292 - 296.

- 41) Heuer, H., & Hegele, M. Constraints on visuo-motor adaptation depend on the type of visual feedback during practice. *Experimental Brain Research*, 2008; 185 (1): 101 - 110.
- 42) Maslovat, D., Brunke, K. M., Chua, R., & Franks, I. M. Feedback effects on learning a novel bimanual coordination pattern: Support for the guidance hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 2009; 41 (1): 45 - 54.
- 43) Hebert EP, Landin D, Solmon MA. Practice schedule effects on the performance and learning of low- and high-skilled students: an applied study. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1996; 67 (1): 52 - 58.
- 44) Laurie R Wishart, Timothy D Lee, Sheri J Cunningham. Age-related differences and the role of augmented visual feedback in learning a bimanual coordination pattern. *Acta Psychologica*, 2002; 110 (2 - 3): 247 - 263.
- 45) Robin, C., Toussaint, L., Blandin, Y., & Proteau, L. Specificity of learning in a video-aiming task: Modifying the salience of dynamic visual cues. *Journal of Motor Behavior*, 2005; 37 (5): 367 - 376.
- 46) Yamamoto R, Ohashi Y. The effects of inaccessible visual feedback used concurrently or terminally. *Journal of Physical Therapy Science*, 2014; 26 (5): 731 - 735.