

予測的かつ意識下な姿勢制御能の向上を目的とした過大誤差教示の効果の解明

小笠原一生

武庫川女子大学 健康・スポーツ科学部 健康・スポーツ科学科

1. 背景

前十字靭帯 (Anterior cruciate ligament : ACL) 損傷は重篤なスポーツ外傷の一つである。この外傷はジャンプ着地や方向変換など急激な減速を伴う動作で好発するため、バスケットボールやサッカーといった球技で多く発生する。また、ACL 損傷は女性に多い外傷であり、女性の受傷率は男性の 2 倍から 8 倍にもなる[1]。この 30 年間で、欧米を中心に ACL 損傷予防のためのトレーニングプログラムが考案され、その効果が検証されてきた。介入を行ったことで ACL 損傷率が低下したという報告も散見され[2]-[4]、本外傷は適切な介入によって予防が可能であると期待されてきた。しかしながら、近年の疫学的調査によると ACL 損傷率の永続的な低下は認められず[5], [6]、未だ ACL 損傷はスポーツ選手にとって重大な臨床的問題であるといえる。従来の予防プログラムが十分な抑止効果を挙げられていない理由には、それらのプログラムが構築された段階では、ACL 損傷の発生メカニズムが現在ほど深く理解されていなかった点があげられる[7]。より効率的かつ的確に ACL 損傷を予防するためには、受傷メカニズムを理解した上で、的確にその危険因子を排除できる予防プログラムの構築が必要である。

従来の予防プログラムにはなく、かつ ACL 損傷の予防に貢献すると考えられる要素として「外乱の予測」と「意識下」が挙げられる。その理由は以下のとおりである。ACL 損傷はジャンプ着地等で足部が床と衝突した直後に生じ、その潜時は 30~50 ミリ秒ほどである[8]。この潜時は反射に要する時間よりも短いため、大脳を経由した随意反応では外傷の回避は時間的に困難である。よって、ACL 損傷を防ぐためには、接地以前から、適切な着地肢位を予測的に生成できる能力が必須と考えられる。これに加えて、スポーツ選手の競技中の意識は競技そのものに向けられることが当然であり、ACL 損傷を防ぐための姿勢制御に意識が割かれることはほとんど無いと考えられる。よって、意識は競技に向けられながらも、ACL 損傷を起こさない予測的な下肢制御を並行的に行うスキルを獲得させることが予防プログラムの役割であり、単なるストレングストレーニングやバランストレーニングといった単純な運動機能単位よりも質的に異なる運動学習が求められる。

著者らはこのような ACL 損傷の特性の理解が、従来の予防プログラムの欠点を補うと予想し、まずそもそも、予測的かつ意識下な姿勢制御能がトレーニングによって獲得できるかを実験的に検証してきた。その結果、認知的負荷が高い環境下であっても 60 回程程度の片脚着地の繰り返しによって、姿勢動揺の軽減に一定の学習効果があることが示され、また、学習効率には個人差があることも明らかとなった[9]。より多くのアスリ

ートに対し普遍的に学習効果を生むためには、何らかの工夫によってアスリートの学習意欲を促し、効率的な姿勢制御能の獲得につなげる必要がある。そこで本研究は、予測的かつ意識下な姿勢制御能の学習効率の向上を目指した最適なフィードバック方法を検討することを目的とした。ここでは、片脚着地タスクの試行毎に、姿勢動揺の成績を視覚的にフィードバックし、学習者に対してどれほど着地後の姿勢動揺が抑えられたかを教示する。さらには、実際の成績より若干過大に（姿勢動揺が大きい：過大フィードバック）、あるいは過小に（姿勢動揺が小さい：過小フィードバック）操作した成績を示し、あたかも自分がよりよく姿勢動揺を抑えることができたという自信や、その逆の心理的印象を学習者に持たせた場合に、姿勢制御能の学習効率にどのように影響するかを検討した。本研究の仮説は、過小フィードバック（実際よりも姿勢動揺が小さいと教示するフィードバック）がなされた場合に、予測的かつ意識下な姿勢制御能の学習がより促進されるとした。

2. 方法

2.1 実験概要

軽微な姿勢外乱を伴う片脚着地後の姿勢動揺の大きさを足圧中心（Center of pressure：COP）軌跡長で定量化した[9]。片脚着地タスクを繰り返すことで生じた COP 軌跡長の減少率を姿勢制御能の学習率とし、その学習率がフィードバック情報の操作のあり方（過大：実際よりも姿勢動揺が大きく、過小：実際よりも姿勢動揺が小さく）によって異なるかを検討した。

2.2 対象

対象は過去 6 か月に下肢に既往症のなく、課題遂行に支障のない視力（矯正を含む）をもつ健康な女子大学生 30 名（ 21.3 ± 1.1 歳， 54.3 ± 6.8 kg， 152.8 ± 4.4 cm）であった。すべての被験者に対して書面を用いて研究目的と実験内容の説明を行い、研究参加についての同意を得た。なお、本実験は所属機関の研究倫理審査委員会によって審査され、承認を得たものである。被験者は無作為に過大フィードバック群 10 名、過小フィードバック群 10 名、対照群 10 名に分けられた。実験中、被験者は黒のタイトシャツとスパッツを着用し、シューズは普段から履きなれたものを使用した。

2.3 タスクとプロトコル

タスクは 20 cm の高さの台から前方に設置されたフォースプレート（Type-9281B, Kistler 社製）上に片脚で着地し、その後 5 秒間の片脚立位を保持するものとした。着地に用いる脚は、サッカーボールを蹴るときに使う脚とし、すべての被験者が右脚であった。

被験者が台の端で完全に静止した後、コンピュータ制御されたレーザーポインタによ

ってフォースプレート上にターゲットが示される。被験者にはターゲット上に右足拇指球が一致するように片脚着地するよう指示した。台から離れる際は、上方向にジャンプするのではなく、前方へずり落ちるように着地するものとした。なお、両腕は胸の前で組むものとした。

タスクは合計 20 試行を実施した。前半の 10 試行をノーマル条件とし、後半の 10 試行を外乱条件とした。ノーマル条件は、ターゲットが常にフォースプレートの中央に出現し、その位置が変わることはない。一方、外乱条件では、被験者がターゲットに向かって片脚着地を始めて、右足が台を離れた瞬間に、ターゲットが別の位置にジャンプする試行が含まれた。被験者には、もし着地を始めたあとにターゲットがジャンプした場合は、ジャンプ後のターゲット上になるべく着地できるよう動作を修正するよう指示した（図1）。このターゲットジャンプの狙いは、被験者の注意を着地後の姿勢保持ではなくターゲット追従に向けさせることであり、スポーツ場面における相手選手への対処やボール操作といった状況を再現することであった。

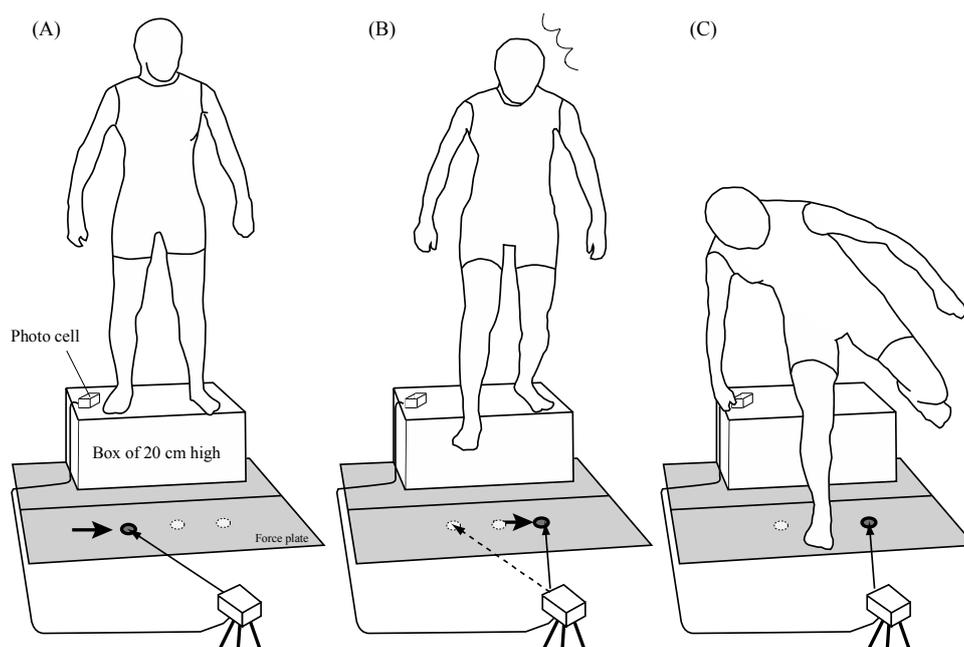


図1：外乱条件の様子

2.4 フィードバック

フィードバックは外乱条件の 10 試行のみ実施した。ノーマル条件の 10 試行が終了した時点で、接地後 20~100 ミリ秒間の COP 軌跡長の 10 試行分の平均値を算出し、その被験者の基準値とした。なお、この基準値は、「過去の複数の被験者の平均値である」と被験者に伝えており、被験者は他者と自身の成績の比較をフィードバックしていると教示されたことになる。被験者の前方 3 メートルに大型モニタ (LC-40E9, SHARP 社

製)を設置してその画面上に LabVIEW で折れ線グラフを描画した. 折れ線グラフには基準値 (白い横線) とともに 1 試行ごとの接地後 20~100 ミリ秒間の COP 軌跡長をグラフ描画 (赤い折れ線) し, もし基準値よりも COP 軌跡長が下回った場合は「素晴らしい」と表示された (図 2). 過大フィードバック群は実際の COP 軌跡長に 1.3 を乗じ, 過小フィードバック群には 0.7 を乗じて描画した. また, 対照群は基準値を表示せず, 実際の値をそのままフィードバックした. なお, 実験終了後に被験者全員に 1) 基準値が他者のものではなく, 自身のノーマル条件の成績であったこと, 2) フィードバック情報に操作があったこと, 以上 2 点に気付いたかどうかを質問した.

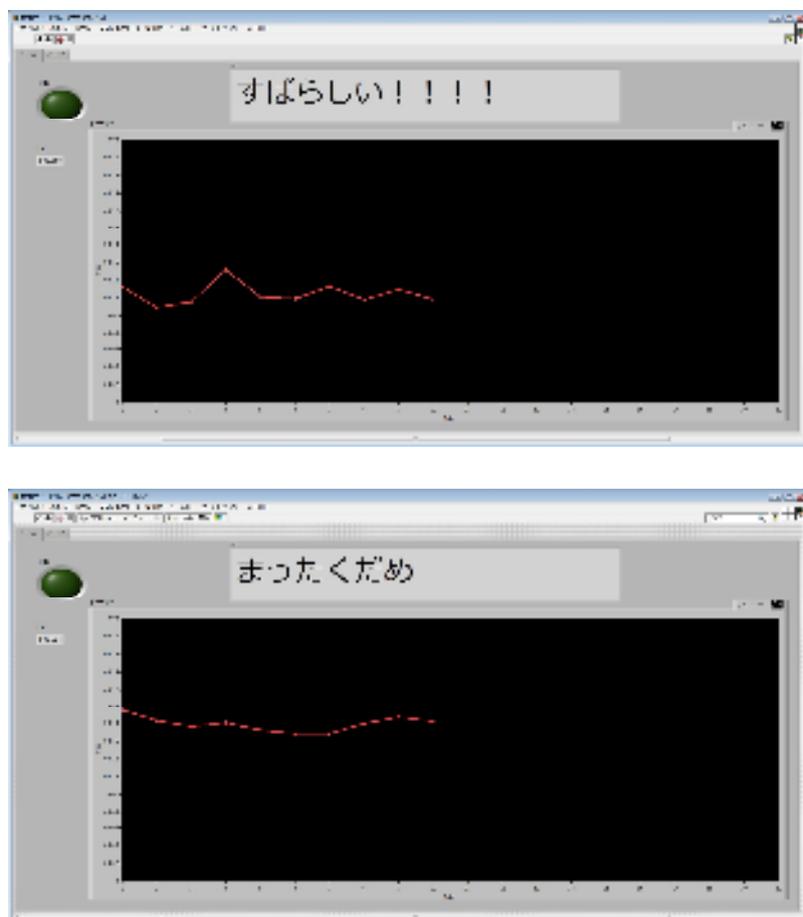


図 2 : フィードバックスクリーンの表示

2.5 データ計測と解析

片脚着地時の床反力および COP 位置は床反力計を用いてサンプリング周波数 1000Hz で計測し, パーソナルコンピュータ内のハードディスクに保存した. 計測には LabVIEW で記述した自作スクリプトを用いた.

COP 位置の時間データは 2 次のバターワース型デジタルフィルタ (low-pass, 0 time shift, cut-off frequency at 80 Hz) にて高周波ノイズを除去し平滑化を施した。床反力鉛直成分が 4 ニュートンを超えた時刻を接地とし、以降、接地後 20 から 100 ミリ秒区間の COP 軌跡長を算出した。接地後 0 から 20 ミリ秒を解析から除外したのは、床反力鉛直成分が微小な時間では COP の算出過程で生じる数値的困難を回避するためであった。試行の繰り返しに伴う COP 軌跡長の減少を定量化するため、指数関数 $I(n)=Ae^{b(n)}$ をフィットさせ、曲線の傾きを表す係数 b を学習率とした。試行に伴い COP 軌跡長が減少した場合、学習率 b は負の値を取る。負の値が大きいほど、学習率が高いことを表す。

2.6 統計処理

学習率 b は平均±標準偏差で表した。学習率におけるフィードバックタイプ (過大, 過小, 対照) および外乱の有無 (ノーマル, 外乱) の効果を検討するため、二元配置の分散分析を行い、主効果が認められた要因については、事後検定として Tukey HSD 法を用いた。有意水準は 5%未満とした。

3. 結果

被験者のフィードバックに対する内省では、どの被験者も基準値が自身の成績であったことや、フィードバック情報が操作されたものとは気付いていなかった。

図 3 には、COP 軌跡長の試行毎の変化に指数関数をフィットした全被験者データをフィードバック条件ごとに示した。二元配置の分散分析の結果、フィードバックタイプ ($p < 0.05$) と外乱の有無 ($p < 0.01$) に主効果が見られた。交互作用は有意ではなかった ($p = 0.39$)。図 4 は、学習率 b をフィードバックタイプと外乱の有無ごとにプロットしたものである。ノーマル条件では、各フィードバックタイプの間には有意な差は無かった。一方、外乱条件に移ると、どのフィードバックタイプにおいても、ノーマル条件よりも学習率が悪化し (負の値が正に近づく、あるいは正になる)、特に対照群の外乱条件では、過大フィードバック群に比べて有意に低い学習率を示した ($p < 0.01$)。仮説では過小フィードバック群が他群に比べて高い学習率を示すとしたが、これは誤りであり、過大フィードバック群が対照群に比べて高い学習率を示した。

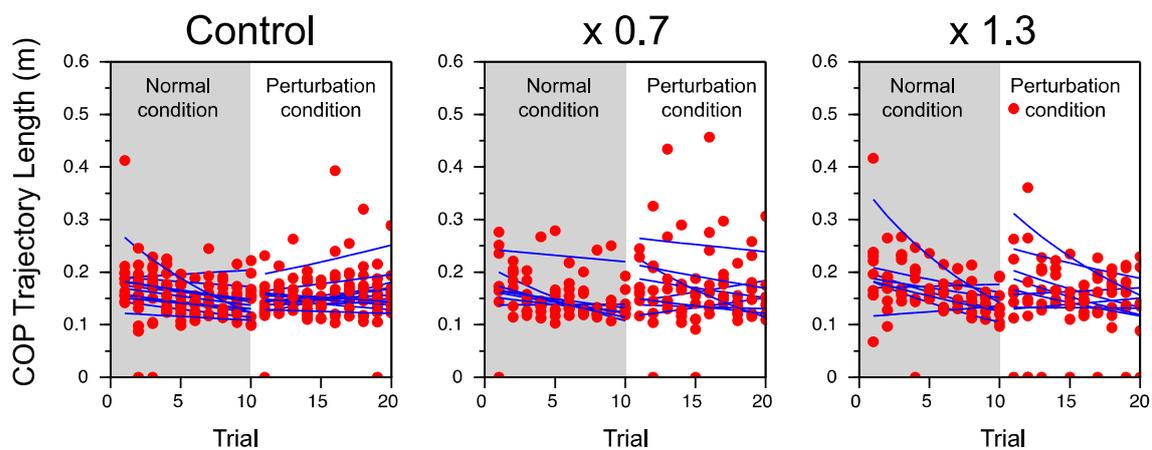


図3 フィードバックタイプ別の COP 軌跡長の変化

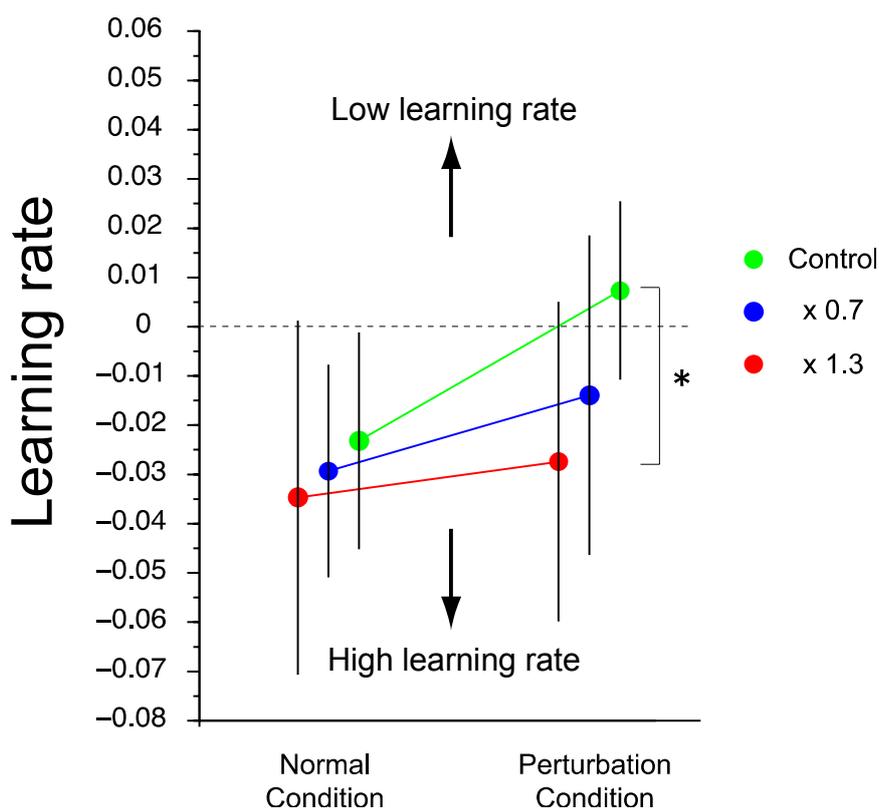


図4 フィードバックタイプおよび外乱の有無別の学習率 b

4. 考察

本研究の目的は予測的かつ意識下な姿勢制御能の学習率向上に適したフィードバック方法を検討することであった。仮説では過小フィードバック群が他群に比べて高い学習率を示すとしたが、この予想は誤りであり、過大フィードバック群が対照群に比べて高い学習率を示す結果となった。過小フィードバックが学習率に好影響を及ぼすと予想した背景には、自身の評価が、他者の基準値に比べて優れているとフィードバックされた方がより高い動機付けにつながり、かつ基準値よりも劣るとフィードバックし続けられた場合は、学習意欲の喪失につながると考えたためである。今回の結果では、姿勢保持がより困難な外乱条件において、過大、過小フィードバック群は学習率 b がいずれも負の値を保っていた。ノーマル条件から外乱条件に移行することで、学習率 b が低下（正の値に近づく）することは予想されたが、これらいずれの群でも負の値を保ったということは、過大あるいは過小値をフィードバックするという手法は、いずれも学習者の動機付けに肯定的な働きかけがあったと考えられる。まず、過大、過小フィードバック双方に肯定的な結果が見られた背景には、どの被験者も実験の過程でフィードバックに操作が加えられたものとは気づかず、与えられたフィードバック値が正しいものであると信じていた点が挙げられる。小川ら[10]の報告では、視野探索課題におけるフィードバック操作が反応時間の短縮にどれほど貢献するかを検討しており、実験中にフィードバックが偽りと気付いた被験者には運動学習の効果が見られなかったとしている。本研究で用いたフィードバック操作は、実際の値に係数 0.7 あるいは 1.3 を乗じたものであり、この係数は見破られない適当な値を予備実験を繰り返すことで同定したものであった。また、実際の数値に係数を乗じてフィードバックするため、例えば他の試技に比べて明らかに動揺が大きかった試技は、それなりに成績が悪くなり、被験者に対して不自然さを与えないものであった。これらの工夫は、被験者にフィードバック操作を見破られず、学習に集中させることに貢献していたと考えられる。Schmidt et al. [11]は被験者が運動を学習する際、正しいフィードバック情報が課題成績を向上させたことから、フィードバック情報が被験者の動機付けを高めたために学習が促進されたと報告している。本研究で与えたフィードバックは正しい情報ではなかったが、被験者に正しいと信じさせたことによっても、運動学習に肯定的な効果が期待されることが示唆された。

本研究の結果で興味深いのは、外乱下であっても過大フィードバック群が他群に比べて高い学習率を維持できた点である。ここでのフィードバックは実際の COP 軌跡長よりも大きく示されたので、COP 軌跡長のグラフは概ね基準値の上を推移し、「まったくだめ」という否定的なテキストが表示され続けた（図 2）。なぜ過大フィードバックが学習率の維持に肯定的であったかの理由は、以下のように考えられる。まず、過大フィードバック群での、成績が基準値を下回らず目標が未達成であるという状況が被験者の学習意欲を逆に亢進したものと推察される。本研究で用いたフィードバックのインターフェイスには、基準値とともに、COP 軌跡長の試行ごとの履歴が示されるが、過大

フィードバックの 1.3 という係数は、努力を続ければ、なんとか基準値を下回ることができそうという印象を被験者に与えられる係数であったと思われる。一方、係数 0.7 の過小フィードバックでは、外乱条件の 1 試行目から基準値を下回る成績が表示されたことで、被験者に対してすでに目標が達成できたという印象を与えたため、これ以降に積極的に COP 軌跡長を減少させようとする意欲につながらなかったと考えられる。一般には、自身の成績が他者に比較して優れているとフィードバックされた場合に、動機付けに対してより肯定的な印象を持つが、このことは同時に、課された運動課題や目標設定に対して満足感や達成感を惹起してしまい、運動学習に対するさらなる意欲形成につながらなかったと推察される。

対照群は外乱条件において学習率を負に保つことができなかった (図 4)。対照群と、他の 2 群の違いは、モニタ画面上に基準値が示されなかった点である。すなわち、自分の成績が他者に照らし合わせて良いのか、あるいは悪いのかがわからないまま試行を続ける必要があった。被験者には、「試行を重ねるごとに COP 軌跡長のグラフが右に傾くように」という指示を与えているため、1 試行前の自身の成績が過大・過小フィードバック群における基準値と同様の効果を持つかと予想されたが、結果として、そうではなかった。このことから、運動意欲の向上に有益なフィードバック情報として重要な点は、実際の数値 (ここでは COP 軌跡長) と基準値との誤差であったと推察される。過大・過小フィードバックでは基準値が示されており、学習者はこの基準値と自身の成績の誤差が視覚的に明確にフィードバックされたために、動機付けにつながった一方で、基準値が示されず自身の成績の”良し悪し”が判断できなかった対照群では、どの方向に運動を修正すべきかが示されないため、外乱有り条件での学習率の保持ができなかったと考えられる。

以上より、本研究の条件下において姿勢制御能の学習に肯定的な影響を及ぼしたのは、実際よりの成績よりも悪い値を返す過大フィードバックであった。フィードバック情報の操作は、正確な情報を返すといったフィードバックとは意味合いが異なるが、学習者の動機付けにつながる心理作用を促す点で、運動の学習過程に適切に用いることは有用と思われる。本研究は、ACL 損傷の予防プログラムの効率化という文脈の中で着想を得たため、運動課題として片脚着地後の姿勢保持を採用したが、他の運動においてもフィードバック情報の性質を考慮すれば、情報の操作は有効となる可能性はある。例えばフィードバック情報がある動作のキネマティクス情報であった場合は、これを操作することは妥当なフィードバックとはなり得ないだろう。フィードバック情報がキネマティクスである場合は、その情報が持つ多自由度さゆえ、正確な情報を伝えて学習者の内省と照らし合わせることが適切であると思われる。一方、フィードバック情報が、本研究のような、ある課題に対する評価値であり、かつ、よい・悪いといった自由度の低い情報であった場合は、情報操作が有効となると考えられる。今後、どのような運動課題に対してフィードバック情報の操作が有効かといった点も検討する必要がある。

本研究にはいくつかの課題がある。まず、先述したとおり、本研究の着想は ACL 損傷の予防プログラムの効率化という文脈から得たものであるが、フィードバック情報の操作を通じて獲得された予測的かつ意識下な姿勢制御能が ACL 損傷の予防に貢献するかどうかは、本研究のみでは検討できない。この点については、今後の前向き無作為化試験によって検討すべきであろう。今回は各フィードバック群 10 名という少ない被験者での検討となった。そのため、過大フィードバック群で学習率に肯定的な作用が見られた背景には、未達成の課題に対して意欲をもって取り組もうとする性格の被験者がたまたま多く集まったためという可能性も否定できない。しかし、達成可能性のある適度なハードルを課せられた方が学習意欲の亢進につながるといった本研究の結果は、運動や勉学の学習過程において示唆に富むものであるため、この作用が普遍的なものなのか、あるいは個人の性格に依存するものなのかは、今後、さらに大きな集団を対象に調査すべきであると思われる。

5. 結語

本研究では、予測的かつ意識下な姿勢制御能の効率的な学習を狙った成績フィードバック方法を検討するため、片脚着地後の姿勢保持課題をモデルとして、過大、過小フィードバックが着地後の姿勢動揺の軽減に果たす効果を検討した。その結果、姿勢保持が困難な外乱条件において、過大フィードバック群（すなわち自分の姿勢動揺レベルが基準値よりも悪く示されるフィードバックを受けた群）は、対照群よりも有意に高い学習率を保持することが示された。

参考文献

- [1] E. Arendt and R. Dick, "Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature.," *Am J Sports Med*, vol. 23, no. 6, pp. 694–701, Nov. 1995.
- [2] B. R. Mandelbaum, H. J. Silvers, D. S. Watanabe, J. F. Knarr, S. D. Thomas, L. Y. Griffin, D. T. Kirkendall, and W. Garrett, "Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up.," *Am J Sports Med*, vol. 33, no. 7, pp. 1003–1010, Jul. 2005.
- [3] G. Myklebust, L. Engebretsen, I. H. Brækken, A. Skjølberg, O.-E. Olsen, and R. Bahr, "Prevention of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Team Handball Players: A Prospective Intervention Study Over Three

- Seasons,” *Clinical Journal of Sport Medicine*, vol. 13, no. 2, pp. 71–78, Mar. 2003.
- [4] T. E. Hewett, T. N. Lindenfeld, J. V. Riccobene, and F. R. Noyes, “The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study,” *Am J Sports Med*, vol. 27, no. 6, pp. 699–706, 1999.
- [5] J. Agel, E. A. Arendt, and B. Bershadsky, “Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review,” *Am J Sports Med*, vol. 33, no. 4, pp. 524–530, 2005.
- [6] J. M. Hootman, R. Dick, and J. Agel, “Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives,” *J Athl Train*, vol. 42, no. 2, p. 311, 2007.
- [7] S. G. Mclean, Y. K. Oh, M. L. Palmer, S. M. Lucey, D. G. Lucarelli, J. A. Ashton-Miller, and E. M. Wojtys, “The Relationship Between Anterior Tibial Acceleration, Tibial Slope, and ACL Strain During a Simulated Jump Landing Task,” *J Bone Joint Surg Am*, vol. 93, no. 14, pp. 1310–1317, Jul. 2011.
- [8] T. Krosshaug, A. Nakamae, B. P. Boden, L. Engebretsen, G. Smith, J. R. Slauterbeck, T. E. Hewett, and R. Bahr, “Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases.,” *Am J Sports Med*, vol. 35, no. 3, pp. 359–367, Mar. 2007.
- [9] I. Ogasawara, Y. Koyanagi, and K. Nakata, “Assessment of prediction and learning effect on dynamic postural stability in single leg landing task,” *Med Sci Sports Exerc*, vol. 44, p. s545, Apr. 2012.
- [10] 小川洋和 and 渡邊克巳, “フィードバックが視覚探索における潜在学習に与える影響,” *信学技報*, vol. 106, no. 143, pp. 19–22, Apr. 2006.
- [11] R. A. Schmidt and T. Lee, *Motor control and learning*. Illinois: Human Kinetics Publishers, 1988.