

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01818

研究課題名(和文) 運動器外傷後の巧緻性(Dexterity)再獲得における脳内可塑性

研究課題名(英文) Neural plasticity in dexterity reacquisition after musculoskeletal trauma

研究代表者

小笠原 一生(Ogasawara, Issei)

大阪大学・医学系研究科・助教

研究者番号：70443249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、膝前十字靭帯(ACL)損傷後の回復過程にて、巧緻性(下肢関節間の巧みな協調運動)に着目し、その回復を評価するための新手法の開発(目的1)、および、巧緻性の回復に貢献する中枢の可塑性を評価をすることを目的とした(目的2)。なお、目的2は技術的限界により途中で取りやめた。目的1において、下技巧緻性評価デバイス(Multiple Dexterity Evaluation Device:mDex)を開発した。6名のACL再建患者を対象にmDexを用いた評価を行った。ACL再建をすることで、下肢関節協調運動における正確さと複雑さが回復することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ACL損傷後の下技巧緻性を評価するデバイス(mDex)の開発、作成と、テスト法の確立によって、巧緻性の着目した下肢機能評価の方法を新規に提案できた。本手法は、従来までの臨床テストにはない、動的な中での協調性に着目したものであり、より人らしい動きが回復したかを評価できるものである。ACL再建術等、重篤なスポーツ外傷からの復帰においては、筋力もさることながら、いかに自然な動きが回復しているかが重要である。本手法は、この自然で巧みな協調性を数値化することで、より確度の高いスポーツ復帰判断に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to evaluate the lower limb dexterity in the recovery process after anterior cruciate ligament (ACL) injury. To this end, we developed a unique device named mDex. We further aimed to evaluate the central plasticity that contributes to the recovery of dexterity; however, this aim was not completed due to technical limitation. Six ACL reconstructed athletes were assessed with the mDex. The athletes were asked to perform a precise target pursuing task with their legs, and their lower limb movements were quantified with mDex. The complexity, smoothness, and accuracy of their limb movements were evaluated. The results showed that the ACL-reconstructed limb showed high complexity, less smooth, and moderately accurate pattern as compared to the uninvolved leg, suggesting that the ACL reconstruction contributes to regain excellent inter-joint coordination. Reconstruction may help not only rebuilding the ligamentous structure but also restoring a dexterity of the movement.

研究分野：スポーツ医工学

キーワード：巧緻性 協調性 スポーツ復帰 前十字靭帯 スポーツ外傷 機能評価 下肢 膝

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯(ACL)損傷は重篤なスポーツ外傷の一つである。この外傷は、膝の力学的構造に影響を与える上、靭帯に存在しセンサーの役割をする固有受容器をも損傷する。中枢は、この固有受容器からの感覚情報をもとに運動状態を正しく把握し、動作の協調に役立っているため、固有受容器が損傷した場合、動作の“巧緻性(たくみさ、Dexterity)”が損なわれ、競技力やQOLの著しい低下に繋がる。

近年、脳イメージング技術の進歩に伴い、運動器外傷後の脳内機構についてよく調べられるようになってきた。興味深いことに、外傷後十分に時間が経過した患者では、注意や集中に関わる前頭前野や、感覚入力処理を担う体性感覚野の活動が高まることが複数報告されている。つまり中枢には感覚入力の欠損を脳の多領域でカバーする可塑性があり、それが運動の“巧みさ”の再獲得に貢献していることが示唆される。しかし現状は断片的な理解に過ぎず、この大脳皮質の可塑的变化と運動制御の巧緻性との関わりは未知な点が多い。特に、この中枢の変化が運動器の回復と同調的に起こるのかという点や、その機能局在に関する研究は存在しない。

一方、ACL 損傷・再建後のスポーツ復帰には、十分な筋力と可動域、そして競技に必要な運動機能の回復が重要であり、これらの回復が復帰判断の主たる柱となる。筋力や可動域といった静的な臨床指標について、その測定方法は十分に確立されている。しかし、動作の“協調性”や“正確さ”といった巧緻性に関わる動的指標については、これを定量化する方法は未だ確立されていない。そのため、スポーツ復帰に際して、巧緻性が十分に再獲得されているか否かを確かめることができず、下肢運動機能が未熟なままスポーツ復帰を迎えて、その後、再受傷に至るケースも多い。

2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究では、巧緻性の再獲得に関わる中枢の可塑性について明らかにすること(目的1)、ACL 損傷後の下技巧緻性評価手法を確立すること(目的2)、を通して、スポーツ外傷後の回復過程における、下技巧緻性再獲得に貢献する中枢可塑性の様相について言及することを目的とした。

本目的遂行のための計画は、中枢負荷が求められる下技巧緻課題中の大脳皮質の賦活状態を、近赤外線分光法(NIRS)で多点同時計測し、巧緻性パフォーマンスと多領域に渡る大脳皮質の活動パターンとの関連を精査するものとした。我々は上記実験を、運動器側の回復過程がよくわかっている ACL 損傷・再建術後の回復期をモデルとして調査し、巧緻性再獲得における脳活動パターン変化の貢献や、予後の QOL 満足度と脳再組織化レベルの関連に注目することで実施するものとした。

対象者に課す下技巧緻課題は、本研究で開発する多角的巧緻性評価デバイス(Multiple dexterity evaluation device: mDex)を用いて行った。図1にはデバイスの構想図、プロトタイプとパイロットデータを示す。mDex の課題は仰臥位で行うレッグプレスタイプの運動であり、目的に応じて様々な課題を組むことができる訓練装置である。また、mDex は計測機能を備えており、機器に組み込まれた加速度センサや角度センサによって対象者の下肢運動を計測し、これを解析することで巧緻性を評価するものである。



図1 mDex 原案、プロトタイプ、パイロットデータ

なお、NIRS を用いた脳活動の記録は、技術的限界により妥当な結果を得ることが困難であったこと、また測定時の対象者の姿勢保持や時間的負担等の問題が顕在化したこと、担当技術者の退職が生じたことなどにより計画に著しい遅延を生じた。よって総合的に検討した結果、NIRS 計測は実施しないこととし、目的2である下技巧緻性評価の装置開発、方法論の確立と ACL 再建者を対象とした下肢機能評価を実施した。

3. 研究の方法

2016年度は mDex デバイスの設計と製作およびテストを実施した。図2に完成したデバイスを示す。mDex はアルミ製シャフトと木製フットプレート部から成る倒立振り子の構造であり、

仰臥位にて下肢でシャフトを上下動させることで使用する。シャフトの上下運動はシャフト結合部に配置したポテンシオメータ(角度センサ)およびシャフトに配置した 1 軸加速度センサで計測できる。また、シャフト結合部は 6 軸床反力センサに固定されており、シャフト結合部に作用する力が計測できる。シャフトを 1 自由度の剛体と見なし、運動方程式を解くことで、患者の下肢がフットプレート部に作用した力(足先力)を推定することが可能である。推定した足先力を運動学データと合わせることで足関節、膝関節、股関節トルクを評価することも可能である。mDex はプログラミング言語 LabVIEW で記述したソフトウェアで制御、計測を行う。サンプリング周波数は 1000Hz であり、モーションキャプチャシステムや筋電図といった他の機器とも同期計測が可能である。

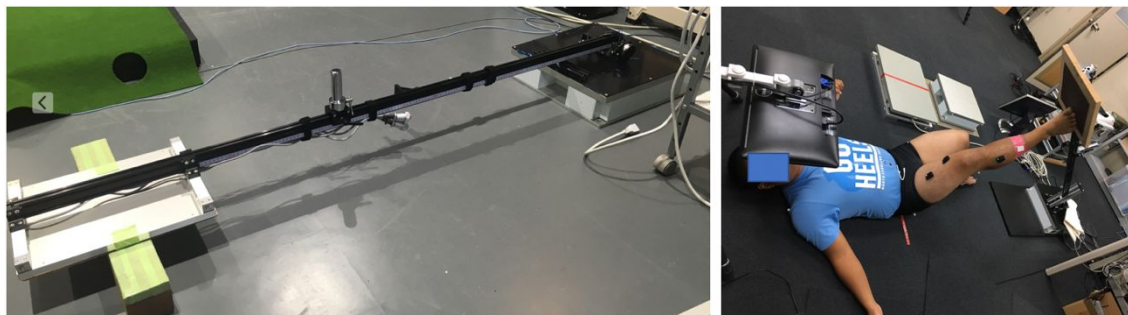


図 2 多角的巧緻性評価デバイス(Multiple dexterity evaluation device: mDex)

2017 年-2018 年度に掛けて、ACL 損傷選手 6 名を対象とした下肢巧緻性評価実験を行った。対象者の競技はハンドボール 3 名、アメリカンフットボール 2 名、スキー 1 名であった。下肢巧緻性課題は mDex を用いた下肢によるターゲット追従課題であった(図 3)。対象者は仰臥位となり、片脚を股関節から挙上して mDex のフットプレート部を操作するものとした。対象者の眼前 40 センチの位置に、24 インチ PC モニタを配置した。モニタ上には 0.5Hz でサイン波状に上下するバーグラフ(教師信号)と、mDex のシャフト角度によって上下するカーソルが提示された。対象者は、下肢で mDex のシャフトを上下に操作することで、教師信号とカーソルの上下位置を可能な限り一致させるよう求められた。教師信号の上限、下限は対象者の下肢可動域の最大最小値から 10%内側に設定された。1 試行を 20 往復とし、片脚 3 試行実施した。また、試技は健側から実施した。試行間は 2 分以上の十分な休息を設け、疲労の影響を最小限とした。また、必要があれば、対象者の求めに応じて休息を追加した。関節角度評価のため、両側の外果、大腿骨外側上顆、大転子、肩峰に直径 14mm の反射マーカを貼付した。反射マーカの貼り付けは一貫性のため同一の検者が行った。モーションキャプチャカメラには OptiTrack Prime 17W を使用し反射マーカの 3 次元位置座標を 360Hz にて取得した。

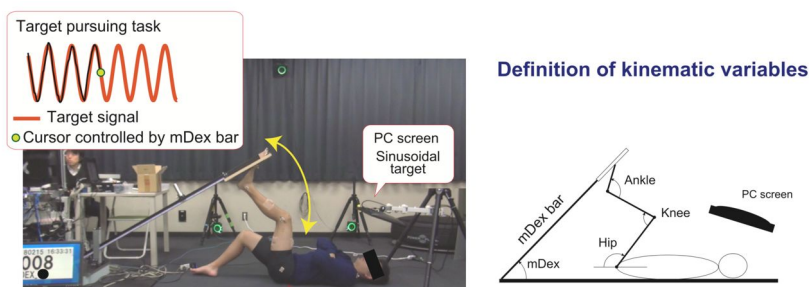


図 3 mDex を用いた下肢によるターゲット追従課題

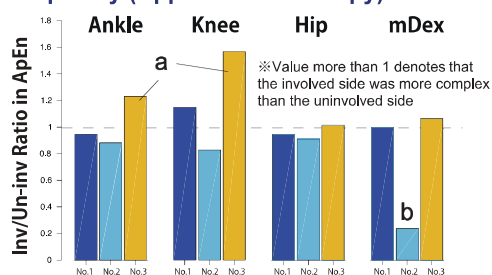
巧緻性の評価は、mDex および各関節角度の変化の「複雑さ」、「滑らかさ」を健側と患側で比較することで行った。複雑さを定量する指標として Approximate Entropy (ApEn)を、滑らかさを定量する指標として、Root mean square jerk(RMSJ)を、それぞれ、足関節角度、膝関節角度、股関節角度、および mDex 角度について算出した。また、正確さを定量する指標として、mDex 角度と教師信号の差分(Root mean square error :RMSE)を算出した。以上の指標は、患側を 100% とした比で表した。

4 . 研究成果

ここでは特徴的な差異が認められた 3 名(No.1-3)について結果を述べる。動作の複雑さを表す ApEn において、対象者 No.1 は、足関節、膝関節、股関節および mDex 角度において健患側差が認められなかった(図 4)。対象者 No.2 は、足・膝・股関節では健患差が無いものの、mDex 角度で患側が健側に比して低い ApEn を示した。一方、再建後の対象者 No.3 は、足・膝関節で患側が健側よりも ApEn が大きく複雑な運動をし、mDex 角度では健患差が無かった。動作の滑らか

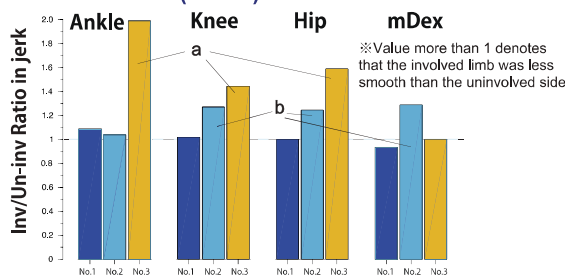
さを示す RMSJ では対象者 No.1 はいずれの関節、mDex において健患差が認められなかった。対象者 No.3 は足・膝・股関節で患側が健側よりも滑らかではない角度変化を呈したが、mDex 角度変化は健患差が無かった。動作の正確さでは、対象者 No.1 が誤差の小さく、また健患差も無かった。対象者 No.2 は患側において絶対的な誤差が大きかった。一方、再建後の対象者 No.3 は健患差はあるものの、絶対的な誤差は、対象者 No.2 に比べて小さいものであった(図5)。これらの結果を受け、対象者 No.1 は ACL 再建手術を未実施ながらも、健患差が認められず、他に評価した QOL レベルも高かったことから、Cooper であると考えられた。同じく ACL 再建未実施の対象者 No.2 の患側は動作の複雑さが低く、各関節の運動が定常的であるために、患側の mDex 角度変化の複雑さが低かった。再建術後の対象者 No.3 では、患側の ApEn が足関節、膝関節において高く(複雑である)、mDex 角度変化では健患差が無かった。このことは、対象者 No.3 では足関節、膝関節が互いに協調してばらつきを補償し合うことで、端点の mDex 角度のばらつきを軽減する協調性が再獲得されていることを示唆している。動作の滑らかさを表す RMSJ においても、対象者 No.3 の患側は3関節とも患側が健側に比して滑らかではない運動パターンを示しつつも、端点の mDex 角度の躍度は健患差が無かった。この RMSJ の結果も、先の ApEn の結果を支持し、再建後の患側では下肢3関節間の協調性が再獲得されつつあることを示すものと考えられた。

Complexity (Approximate Entropy)



a. In No.3, ankle and knee of the involved limb showed a highly complex motion pattern.
 b. In No.2, the involved limb had a less complex motion pattern than that of the uninvolved limb.
 Contrary to intuition, it was reported that the complexity of joint movement increases with the postoperative progress.

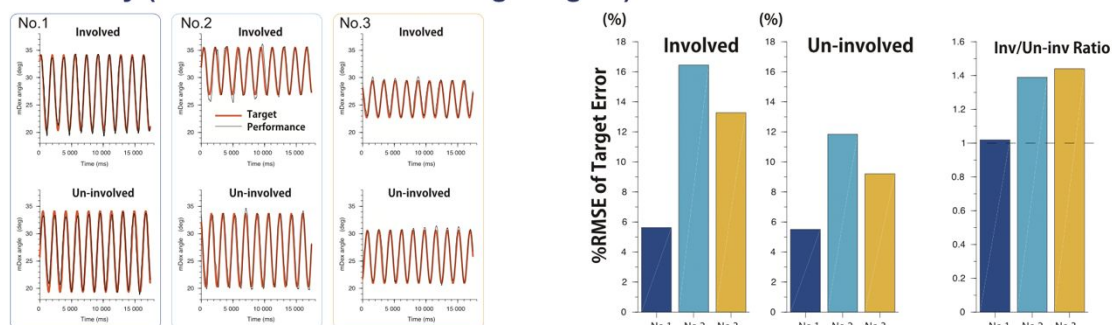
Smoothness (RMSJ)



a. Involved limb of No.3 showed a less smooth motion pattern as compared to un-involved limb; however, there was no side to side difference in the smoothness of the mDex movement.
 b. Involved limb of No.2 showed less smooth motion patterns in knee, hip and mDex movement.

図4 複雑さ指標 ApEn および滑らかさ指標 RMSJ

Accuracy (RMSE: Error from the target signal)



No.1 showed small errors in both limbs. The range of motions of both limbs were almost the same.
 No.2 showed a large error in the involved limb. The range of motion of the involved limb was smaller than that of the un-involved limb.
 No.3 also showed a relatively large error in the involved limb.

図5 ターゲット追従の正確さ指標 RMSE

mDex を用いることで異なる特長を持つ3名の ACL 損傷(再建)患者の下肢機能の差異を鋭敏に定量できた。mDex による定量方法は、従来の筋力や可動域といった静的な臨床指標とは異なり、関節角度の時間方向にわたる変化特徴を、多関節間協調の観点から定量化するものである。従来にはない評価機器として、巧緻性というこれまで捉えどころの無かった機能を数値化することに貢献するものである。また、mDex の評価は仰臥位で行うため、免荷時期から導入が可能であり、転倒の恐れもない。また、シャフトが1自由度のみ可動するので、膝に内/外反やねじりといった危険な動きを生じない。リスクの小さいトレーニング、リハビリテーション機器としても発展が見込まれるデバイスである。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計2件)

1. Issei Ogasawara, Yohei Shimokochi, Ken Nakata. Dexterity of the lower limb coordination in ACL injured athletes. American college of sports medicine 66th annual meeting. Orlando, Florida, US, 2019.

2. 小笠原一生、中田研. 動作のランダムさに着目した前十字靭帯再建後の下技巧緻性評価の試み. 第 29 回日本臨床スポーツ医学会学術集会.札幌.2018.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。