

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26462281

研究課題名(和文)術後下肢キネマティクスが再建前十字靭帯の機能に与える影響に関する運動解析学的研究

研究課題名(英文)The effects of kinematics in the legs in the subjects following anterior cruciate ligament reconstruction on biomechanical function of the graft

研究代表者

遠山 晴一 (TOHYAMA, HARUKAZU)

北海道大学・保健科学研究院・教授

研究者番号：60301884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ACL再建術後早期に歩行解析が可能なシステムの開発のため、装着型センサーによる評価システムを用いて反重力トレッドミル歩行時における下肢キネマティクスを評価した。その結果、免荷量の増加は遊脚期の股関節および膝関節の最大屈曲を有意に減少させることを明らかにした。次にACL再建術後症例に対しDrop vertical jumpにおける膝外反変化を検討し、患健側と性別に有意な交互作用を認め、女性症例では等速性膝伸筋力の患健比と膝外反変化量との間には有意な相関関係を認めなかった。これは女性ACL再建術後症例のジャンプ着地における膝外反は大腿四頭筋筋力より姿勢制御機能に影響を受けることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：For safe monitoring knee kinematics of the subjects during gait shortly after ACL reconstruction, we propose a new gait analytic technique using the combination of wearable sensors-based H-Gait system and anti gravity treadmill. Our study showed that the reduction of the weight-bearing in anti-gravity treadmill significantly decrease maximum flexion angles of the hip and knee joint at the swing phase. We also found a significant interaction effects of gender and ACL reconstruction on valgus motion at the landing after drop jump task, while there is no significant correlation between quadriceps strength and valgus motion at the landing after drop jump task in female subjects after ACL reconstruction.

研究分野：スポーツ整形外科

キーワード：スポーツ外傷 前十字靭帯 バイオメカニクス リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

近年の一般市民へのスポーツ活動の普及によりスポーツ競技人口は急速に増加し、それに伴いスポーツ障害に対する治療はスポーツ医学分野における重要な分野となった。スポーツ外傷の代表的疾患としてあげられる膝前十字靭帯(以下ACL)損傷は日本において年間5万人ものスポーツ選手が受傷し、2万件近くの靭帯再建手術が行われ、頻度が高くかつ重篤でその治療には多くの人的ならびに経済的コストを要することが知られている。さらに靭帯再建手術後、復帰までには1年近くのリハビリテーションを要し、スポーツ外傷の中でも最も注目され、また解決を急がれる外傷である。

研究者らがこれまで行ってきた移植腱のリモデリングに関する一連の研究では移植腱の力学特性低下はリモデリング過程においては不可避であり、その力学特性低下の程度は移植腱の力学的環境に著しく依存することを明らかとなっている。したがって、ACL再建術後症例の歩行時およびリハビリテーション訓練中のスポーツ関連動作時の下肢キネマティクスは移植腱の力学的環境を変化させ、術後の再建靭帯機能に多大なる影響を与えるものと考えられる。

しかしながら、ACL再建術後症例の歩行時あるいはスポーツ関連動作時の下肢キネマティクスは実験室レベルでの三次元動作解析にて評価解析されることがほとんどであり、医療機関診療レベルでの評価解析が困難なため、ACL再建術後症例の歩行時およびスポーツ関連動作時の下肢キネマティクスが再建術後症例の膝関節機能に与える影響は不明であった。この理由としては光学マーカー、CTあるいはMRIによる膝モデルを用いた三次元動作解析では計測設定およびその解析に膨大な時間を要し、医療機関診療レベルでの使用が困難なためと考えられる。

研究者らは装着型センサーによる三次元下肢キネマティクス評価手法の開発を行ってきた。本装着型センサーによる運動機能評価手法の応用することによりACL損傷症例の歩行時ならびにスポーツ関連動作時における三次元下肢キネマティクスを医療機関診療レベルで評価が可能となり、歩行時ならびにスポーツ関連動作時における三次元下肢キネマティクスが膝前十字靭帯再建術後症例の膝関節機能に与える影響を明らかにすることができるのではないかとこの着想のもと、本研究に着手した。

2. 研究の目的

1) 装着型センサーにおける drift 除去手法の開発: ACL再建術後症例の歩行時の下肢三次元動作を臨床施設にて解析するため、種々の装着型センサーによる三次元下肢キネマティクス評価システムの開発が行われてきている。これら装着型センサーによるキネマティクス計測では装着型センサーに内蔵さ

れた加速度計あるいは角速度計からの加速度あるいは角速度データを積分加算し下肢各セグメントの相対的角度を算出する。しかしながら、この方法によるキネマティクス計算では時間経過とともに誤差が増大する「drift」を生じるという問題点が明らかとなっている。そこで研究者らは装着型センサーによる三次元下肢キネマティクス評価システムの「drift」を軽減手法を検討した。

2) 反重力トレッドミル歩行時における三次元下肢キネマティクスの評価: 術後早期のACL再建術後症例に歩行時の下肢三次元動作を臨床施設にて解析するため、装着型センサーによる三次元下肢キネマティクス評価システムを用いて、反重力トレッドミル歩行時における三次元下肢キネマティクスを評価した。

3) ACL再建術後の Drop vertical jump (DVJ)における前額面投影膝外反変化量の検討: ACL再建術後の二次損傷の予測因子の一つとされているDVJにおける前額面投影膝外反変化量の性差を検討した。

3. 研究の方法

1) 装着型センサーにおける drift 除去手法の開発: 研究者らが開発した装着型センサーによる三次元下肢キネマティクス評価システム「H-Gait」の「drift」を解決するため無限インパルス応答4次 Butterworth フィルターによる角速度センサノイズの軽減、歩行時の角速度センサーの信号から静止時の角速度センサーのモード値のオフセット、double derivative and integration methodによる線形的 drift の除去、2つの姿勢での各加速度センサーによる重力方向による各センサーの初期相対角度設定により誤差軽減を行った。

2) 反重力トレッドミル歩行時における三次元下肢キネマティクスの評価: 健康者 25 例(男性 13 名: 年齢 25.2 ± 4.4 歳, 女性 12 名: 年齢 25.1 ± 6.8 歳)に対し、反重力トレッドミル (Alter-G) (図 1) を使用し 100% 荷重、75% 荷重、50% 荷重の条件で歩行速度時速 2.5km における三次元下肢キネマティクスを計測し、反重力トレッドミルによる荷重の軽減が三次元下肢キネマティクスに与える効果を検討した。さらに女性 8 例に対しては歩行速度時速 2.5km、3.5km、4.5km と 3 速度で検討し荷重の軽減が三次元下肢キネマティクスに与える効果の速度依存性を検討した。

3) ACL再建術後の Drop vertical jump (DVJ)における前額面投影膝外反変化量の検討: ACL再建術後患者(女性 9 例, 男性 8 例, 20.4 歳, 術後 8.7 ヶ月)を対象とし、デジタルビデオカメラを用いて DVJ を記録し、前額面および矢状面上に投影した膝外反および屈曲角度変化量を比較した。さらに等速性筋力測定機器を用いて $60^\circ/\text{sec}$, $300^\circ/\text{sec}$ での等速性膝伸展筋力を測定し、膝外反およ

び屈曲角度変化量に等速性膝伸展筋力に与える効果を検討した。



図1 反重力トレッドミル

4. 研究成果

1) 装着型センサーにおける drift 除去手法の開発： 無限インパルス応答 4 次 Butterworth フィルターによる角速度センサーノイズの軽減、歩行時の角速度センサーの信号から静止時の角速度センサーのモード値のオフセット、double derivative and integration method による線形的 drift の除去、2 つの姿勢での各加速度センサーによる重力方向による各センサーの初期相対角度設定により誤差軽減により、股関節、膝関節、足関節の屈曲-伸展方向の「drift」は平均で 2.1°, 33.3°, 15.6° 減少した。これらの誤差軽減により、ACL 損傷症例の歩行時における三次元下肢キネマティクスを医療機関診療レベルで評価が可能となることが期待された。

2) 反重力トレッドミル歩行時における三次元下肢キネマティクスの評価：反重力トレッドミルによる荷重の軽減により、歩幅は有意に減少し、歩行率は有意に増加した。性別の効果が認められたものの、免荷と性別の交互作用は認められなかった。遊脚期キネマティクスに関しては免荷は股関節および膝関節の最大屈曲を有意に減少させ、足関節底屈を有意に増加させたが、免荷と性別の交互作用は認められなかった(図2)。

立脚期キネマティクスに関しては免荷は足関節最大背屈を有意に減少させ、性別の効果が認められたものの、免荷と性別の交互作用は認められなかった。また、股関節および膝関節の立脚期キネマティクスに関しては免荷は有意の効果を有さなかった。

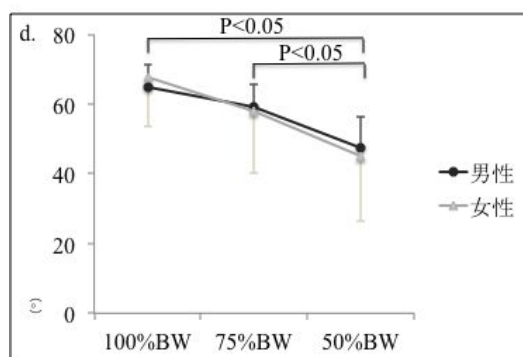


図2 荷重の軽減が膝関節の遊脚期最大屈曲角度に与える効果

荷重の軽減が三次元下肢キネマティクスに与える効果の速度依存性に関しては歩行速度の増加は歩幅および歩行率を有意に増加させたが、免荷との交互作用は認められなかった。その他の下肢キネマティクスに関しても免荷と速度との有意な交互作用は認められなかった。

以上より反重力トレッドミルによる荷重の軽減は、股関節および膝関節の歩行中の可動域変化を減少させ、その結果、歩幅を減少させることが明らかとなった。術後早期の ACL 再建術後症例においては過大な膝関節の屈曲は移植腱の伸張や骨孔の拡大をもたらす可能性がある。したがって、装着型センサーによる三次元下肢キネマティクス評価システムと反重力トレッドミルを用いることにより、術後早期の ACL 再建術後症例に歩行時の下肢三次元動作を安全に評価することが可能となった。

3) ACL 再建術後の Drop vertical jump (DVJ) における前額面投影膝外反変化量の検討：再建側の膝外反変化量は女性 10.5°, 男性 3.4°, 健側は女性 4.3°, 男性 0.9° であり、有意な患健側と性の交互作用を認めた (P=0.035)。膝屈曲変化量は再建側 59.4°, 健側 65.6° であり、有意な患健側の効果を認めた (P=0.001)。また、等速性膝伸展筋力の患健比と DVJ における膝外反および屈曲変化量の患健差の間に有意な相関関係は検出されなかった (R=-0.232 ~ 0.088, P=0.548 ~ 0.909)。

これら知見は女性 ACL 再建術後症例の DVJ における膝外反変化は大腿四頭筋筋力より姿勢制御機能に影響を受けることを示唆していた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

Koshino Y, Ishida T, Yamanaka M, Samukawa M, Kobayashi T, Tohyama H. Toe-in Landing Increases the Ankle Inversion Angle and Moment During Single-Leg Landing: Implications in the Prevention of Lateral Ankle Sprains. J Sport

Rehabil、査読有、19、2016、1-16
Tadano S, Takeda R, Sasaki K,
Fujisawa T, Tohyama H, Gait
characterization for osteoarthritis
patients using wearable gait sensors,
J Biomech、査読有、49、2016、684-90
DOI : 10.1016
生田亮平,石田知也,山中正紀,谷口翔
平,上野亮,越野裕太,寒川美奈,遠山
晴二,Drop vertical jump におけるハム
ストリングスの着地前筋活動と着地中
の膝関節外反角度および外反モーメン
トとの関係. 日本臨床スポーツ医学会
誌、査読有、24、2016、71-77
Koshino Y, Ishida T, Yamanaka M,
Ezawa Y, Okunuki T, Kobayashi T,
Samukawa M, Saito H, Tohyama H,
Kinematics and muscle activities of
the lower limb during a side-cutting
task in subjects with chronic ankle
instability, Knee Surg Sports
Traumatol Arthrosc、査読有、4、2015、
1071-80 DOI:10.1007
Ishigaki T, Ishida T, Samukawa M,
Saito H, Hirokawa M, Ezawa Y,
Sugawara M, Tohyama H, Yamanaka
M, Comparing trapezius muscle
activity in the different planes of
shoulder elevation, J Phys Ther Sci,
査読有、5、2015、1495-7 DOI: 10.1589
片岡 義明, 遠山 晴二, 損傷靭帯の修
復過程, 臨床スポーツ医学, 査読無、32,
2015、830-834
Takeda R, Lisco G, Fujisawa T,
Gastaldi L, Tohyama H, Tadano S,
Drift removal for improving the
accuracy of gait parameters using
wearable sensor systems, Sensors
(Basel), 査読有、14、2015、
23230-472014 DOI:
10.3390/s141223230

Ishigaki T, Yamanaka M, Hirokawa M,
Tai K, Ezawa Y, Samukawa M,
Tohyama H, Sugawara M,
Rehabilitation Exercises to Induce
Balanced Scapular Muscle Activity in
an Anti-gravity Posture. J Phys Ther
Sci, 査読有、26、2014、1871-4 DOI:
10.1589/jpts.26.1871

Miura T, Yamanaka M, Ukishiro K,
Tohyama H, Saito H, Samukawa M,
Kobayashi T, Ino T, Takeda N,
Individuals with chronic low back
pain do not modulate the level of
transversus abdominis muscle
contraction across different postures,
Man Ther, 査読有、19、2014、534-40
DOI: 10.1016/j.math.2014.05.010

Inagaki Y, Kitamura N, Kurokawa T,
Tanaka Y, Gong JP, Yasuda K,
Tohyama H, Effects of culture on
PAMPS/PDMAAm double-network
gel on chondrogenic differentiation of
mouse C3H10T1/2 cells: in vitro
experimental study, BMC
Musculoskelet Disord, 査読有、27,
2014、320 DOI: 10.1186 / 1471-2474-
15-320

〔学会発表〕(計12件)

Ueno R, Ishida T, Yamanaka M,
Taniguchi S, Samukawa M, Saito H,
Tohyama H, Peak Times of
Quadriceps Force And Anterior Tibial
Force Are Significantly Later Than
That of Vertical Ground Reaction
Force During Single Leg
Landing.63th Orthopaedic Research
Society Annual Meeting, 2017.3.19-2,
San Diego, USA
Kataoka Y, Homan K, Takeda R,
Tadano R, Chiba T, Tohyama H, The
Effects of Unweighting by a Lower
Body Positive Pressure Treadmill on
3-D Gait Kinematics, 63th
Orthopaedic Research Society Annual
Meeting, 2017. 3.19-2, San Diego,
USA
Saito Y, Yamanaka M, Miura T, Ino T,
Kataoka Y, Otsuka Y, Samukawa M,
Saito H, Tohyama H, The Comparison
of the Thickness of Abdominal Muscle
between Traditional Motor Control
Exercise and Sling Exercise.63th
Orthopaedic Research Society Annual
Meeting, 2017.3.19-2, San Diego,
USA
Okunuki T, Koshino Y, Tohyama H,
Igarashi M, Ezawa Y, Samukawa M,
Saito M, Yamanaka M,
Multi-segmental Foot Kinematics
During Walking In Subjects With
Medial Tibial Stress Syndrome, 62th
Orthopaedic Research Society Annual
Meeting, 2016.3.28-31, Orlando, USA
Taniguchi S, Ishida T, Tohyama H,
Ueno R, Ikuta R, Koshino Y,
Samukawa M, Saito H, Yamanaka M,
The Effects Of The Lateral Trunk
Lean And Gender-difference On The
Peak Moment Of The Knee And Hip
In The Frontal Plane During Single
Leg Landing, 62th Orthopaedic
Research Society Annual Meeting,
2016.3.28-31, Orlando, USA
Ueno R, Yamanaka M, Ishida T,
Taniguchi S, Ikuta R, Tohyama H,

Peak Muscle Forces Around The Knee Joint Do Not Significantly Contribute To The Peak Valgus Knee Moment During A Drop Vertical Jump Task In Female Subjects, 62th Orthopaedic Research Society Annual Meeting, 2016.3.28-31, Orlando, USA

Ikuta R, Ishida T, Tohyama H, Taniguchi S, Ueno R, Koshino Y, Samukawa M, Saito H, Yamanaka M, The Pelvic Lateral Tilting At Ground Contact Increases The Knee Abduction Moment During A Single Leg Landing Task, 62th Orthopaedic Research Society Annual Meeting, 2016.3.28-31, Orlando, USA

Ueno R, Yamanaka M, Ishida T, Taniguchi S, Ikuta R, Tohyama H, Comparisons of Angular Velocities of Knee Abduction and Tibial Internal Rotation between Female and Male Subjects during a Landing Task, 61st Orthopaedic Research Society Annual Meeting, 2015.3.28-31, Las Vegas, USA

Ishigaki T, Yamanaka M, Ezawa Y, Hirokawa M, Samukawa M, Saito H, Sugawara M, Tohyama H, Side-specific difference in the supraspinatus muscle and tendon morphological properties in collegiate baseball player with and without shoulder injuries, 61st Orthopaedic Research Society Annual Meeting, 2015.3.28-31, Las Vegas, USA

Ishida T, Yamanaka M, Taniguchi S, Ueno R, Minami S, Koshino Y, Samukawa M, Saito H, Kobayashi T, Mtsumoto H, Aoki Y, Tohyama H, The Hip Internal Rotation is Negatively Correlated to Valgus Knee Motion and Internal Tibial Rotation in the Early Phase during a Landing Task in Drop Jumping, 61st Orthopaedic Research Society Annual Meeting, 2015.3.28-31, Las Vegas, USA

Miura T, Yamanaka M, Morii Y, Samukawa M, Saito H, Kobayashi T, Ino T, Tohyama H, The Relationship Between Transversus Abdominis and Lumbar Multifidus During the Lifting Task, 61st Orthopaedic Research Society Annual Meeting, 2015.3.28-31, Las Vegas, USA

H.Tohyama, E.Kondo, H.Fujiki, K.Yasuda, The effects of knocking out macrophage migration inhibitory factor (MIF) gene on healing of the tendon and ligament tissues, 7th World Congress of Biomechanics, 2014.7.6-11, Boston, USA

〔図書〕(計2件)

Mina Samukawa, Harukazu Tohyama, Kazunori Yasuda. Future Challenges of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Biological Modulation Using a Growth Factor Application for Enhancement of Graft Healing. ACL Injury and Its Treatment (Ochi, M., Shino, K., Yasuda, K., Kurosaka, M. Eds.). 523-536, Springer, Tokyo, 2016

Harukazu Tohyama, Kazunori Yasuda. Growth Factors and Other New Methods for Graft-Healing Enhancement. The Anterior Cruciate Ligament: Reconstruction and Basic Science, 2e (Chadwick Prodromos Eds.), Elsevier, ISBN: 9780323389624

〔産業財産権〕

出願状況(計3件)

名称: 歩行解析方法および歩行解析システム
発明者: 但野 茂, 武田 量, 遠山 晴一, 原田 証英, 佐野 嘉彦

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2014-244753

出願年月日: 2014年12月3日

国内外の別: 国内

名称: 歩行解析方法および歩行解析システム
発明者: 但野 茂, 武田 量, 遠山 晴一, 原田 証英, 佐野 嘉彦

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2015-145395

出願年月日: 2015年7月23日

国内外の別: 国内

名称: 歩行解析方法および歩行解析システム
発明者: 但野 茂, 武田 量, 遠山 晴一, 原田 証英, 佐野 嘉彦

権利者: 同上

種類: 特許

番号: PCT/JP2015/084034

出願年月日: 2015年12月3日

国内外の別: 国際出願

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠山 晴一 (TOHYAMA, Harukazu)

北海道大学・大学院保健科学研究院・教授

研究者番号：60301884

(2)研究分担者

山中 正紀 (YAMANAKA, Masanori)
北海道大学・大学院保健科学研究院・教授
研究者番号：40166757

但野 茂 (TADANO, Shigeru)
北海道大学・大学院工学研究院・名誉教授
研究者番号：50175444