

距腿関節および距骨下関節アライメントの性差の検討
-荷重負荷による受動的な関節アライメントの変化について-

研究代表者名： 深野真子

目 次

要約.....	1
緒言.....	2
方法.....	3
結果.....	5
考察.....	6
謝辞.....	7
参考文献.....	8

距腿関節および距骨下関節アライメントの性差の検討
-荷重負荷による受動的な関節アライメントの変化について-

深野真子* 福林徹

要約

足関節は、脛骨・腓骨・距骨からなる距腿関節と距骨・踵骨からなる距骨下関節の二つの関節で構成され、足関節複合体ともよばれる。足関節は足部と共働し、歩行や走行などのスポーツ動作遂行時に衝撃機構として働くことが知られている。足部や足関節に起こるスポーツ外傷・障害は、スポーツ現場で頻発する問題であり、その発生状況を調べると男性よりも女性の発生率が有意に高いことが報告されている。従って、足関節の構造およびその機能に関する検討は外傷・障害の発生とその予防に重要だと考えられるが、生体を対象として距腿関節および距骨下関節の機能の性差について詳しく述べられた研究は少ない。本研究は、生体の足関節を対象として静的な荷重を負荷し、その際の距腿関節および距骨下関節の受動的なアライメントの変化の性差を三次元的に明らかにすることを目的として実施した。

健康な男女12名(男性:6名、女性:6名)を対象とし、非荷重位および荷重位で足関節のエックス線画像を矢状面より撮影した。また、足関節のCT撮影を実施した。得られたCT画像より脛骨・距骨および踵骨の三次元骨モデルを構築し、局所座標系を設定した。これらのモデルを矢状面から撮像したエックス線画像上で3D-2D model image registration techniqueを用いてそれぞれの相対的位置関係を求め、距腿関節および距骨下関節の運動学的データを算出し、荷重位から非荷重位に肢位を変えた際の変位量を求めて比較した。

非荷重位から片脚立位による荷重が負荷されることにより、男性女性ともに距腿関節・距骨下関節の両関節で背屈・外返し・外旋した。距腿関節において、底屈および外返しの変位量は男女で有意な差がなかったが、外旋の変位量は男性よりも女性が有意に大きい値を示した。 $(p < 0.05)$ 距骨下関節においては、底屈・外返しおよび外旋の変位量が男性よりも女性で有意に大きい値を示した。

本結果より、静的な荷重負荷による受動的なアライメント変化は男女で異なり、男性よりも女性の方が大きく起こることが明らかとなった。また、荷重によりアライメント変化が大きく起こることが、女性の足や足関節に外傷・障害が多く発生する一要因となり得ると考えられた。

*代表者所属

早稲田大学スポーツ科学学術院

〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15

【緒言】

ヒトの足部・足関節は多くの骨・靱帯・筋組織により優れた生体力学的構造をなしており、その複雑な構造ゆえに個々の関節が共同して機能し、スポーツ動作遂行時には衝撃の吸収や地面への適応を図る役割を果たすといわれている。

足関節は、脛骨・腓骨・距骨からなる距腿関節と距骨・踵骨からなる距骨下関節の二つの関節で構成され、足関節複合体ともよばれる。足部や足関節に起こるスポーツ外傷・障害は、スポーツ現場で頻発する問題であり、スポーツ実践者の増加に伴って増加傾向にある[1, 2]ことが示されている。また、足や足関節の外傷・障害は、若年のアスリートが専門医を受診する理由の第二位に位置する[3]こと、アスリートが運動を中止する理由は、膝関節の問題に次いで足関節・足部が多い[4]ことが報告されている。さらにスポーツ活動時の問題だけでなく、足や足関節に問題を抱えることにより、日常活動レベルの低下や活動範囲の狭小化など生活の質を低下させる要因ともなると予測される。

スポーツ活動中に起こる外傷や障害の種類やその発生率は、男女で異なる傾向がある。ナショナルレベルの若年アスリートを対象として障害発生状況を調べた研究においては、男女ともに足部・足関節にもっとも多く障害が発生し、また女性が男性の約 2 倍多く障害を起こしていたと報告されている[5]。また、高校生を対象とし、同一競技ごとに障害発生について調査・比較した研究においても、男性よりも女性の方が外傷・障害の発生率が高いことが明らかとなっている[6]。障害発生率が女性に高い要因は、骨盤が横に広い形状をしており Q アングルが大きいこと[7, 8]、関節弛緩性が高いこと[9, 10]、体脂肪率が高く相対的に筋量が少ないこと、また周期的にホルモンが変動すること[11]など、女性に特徴的ともいえる身体的特性が挙げられている。現在のところ、衝撃吸収機構とされる足関節機能の性差について詳しく述べられた研究は少ない。

我々はこれまでにエックス線画像を用いた足部アーチの解析を行い、非荷重時におけるアーチ構造のアライメントに性差はないが、静的な荷重によって女性の足アーチは男性の足アーチよりも大きく変位することを明らかにしている[12]。また、この研究においては着地動作時のアーチの変位についても性差の比較を行い、動的な荷重によっても女性の足アーチが男性の足アーチよりも大きく変位することを明らかにした。このことから、女性に多いとされる足底軟部組織の障害は、静的・動的荷重負荷により女性の足アーチが大きく変位することが発生要因の一因となりうると予測した[12]。しかしながら、足部と共同して機能すると考えられている足関節に関する検討は未だなされていない。

足関節の動きは、距腿関節および距骨下関節の動きの複合的な動きであり、単なる蝶番関節ではない[13]。着地動作やランニング中の足関節のキネマティクスに関する研究の多くは、解剖学的ランドマークの皮膚上に貼付されたマーカーに基づき計算されているものが多くを占める[14-16]。しかしながら、距腿関節および距骨下関節それぞれの動きの記述を試みる場合、距骨には皮膚上より触知可能なランドマークが存在せず、また、皮膚マーカーに基づき算出する値には関節の動きに伴う皮膚および軟部組織変形の誤差が含まれる[17, 18]ため、算出された値の妥当性は保証されていない。動作中の骨の動きを計測する方法として、骨ピンを刺入し、その先に配置した反射マーカーより各関節のキネマティクスを計算する方法があり、歩行中の距腿関節および距骨下関節のキネマティクス[19, 20]、およびランニング中の脛骨に対する踵骨の動き [18, 21, 22]が調べられているが、この方法は骨ピン刺入の侵襲が大きく、倫理的観点から生体での実施が推奨されるものではない。

近年、関節のキネマティクスを分析する方法として 3D-2D model image registration technique[23]が注目されており、ごく近年この手法が足関節に応用されつつある[24-26]。しかしながら現段階では、

極めて基礎的な研究にとどまっており、3D-2D model image registration technique を用いて足関節機能の性差に新たな知見を加えるような検討はなされていない。

したがって本研究においては、生体の足関節を対象として静的な荷重を負荷し、その際の距腿関節および距骨下関節の受動的なアライメントの変化を三次元的に明らかにすることを目的として実施した。

【方法】

1) 被験者

健康な若年男女 12 名(男性：6 名、女性：6 名)を対象として実験を行った。被験者の身体特性は、男女それぞれ男性 7 名：年齢 22.4 ± 1.1 歳、身長 170.3 ± 5.0 cm、体重 65.0 ± 3.0 kg、女性 6 名：年齢 22.5 ± 3.0 、身長 161.5 ± 6.2 、体重 57.1 ± 6.0 kg であった。全ての被験者は、下肢に重篤な外傷・障害や手術歴の無い者であり、また実験を実施する時点で歩行やスポーツ活動に支障をきたすような症状を有さない者であった。

本研究は、早稲田大学人を対象とする研究に関する倫理委員会の審査・承認を受けて実施した。被験者には実験に先立ち、研究の目的と内容の説明を文書および口頭で行い、実験に被験者として自主的に参加する旨の同意を得た。

2) 画像データの取得

被験者には、静止状態で非荷重位および荷重位を取らせ、矢状面より足関節の撮影を行った。非荷重位の撮影の際は、被験者に左足での片脚立位姿勢を取らせ、右足関節を撮像範囲に据え、撮影を行った。撮影の際は右足関節をニュートラルポジション(足関節底背屈 0 度かつ中間位)にし、第二趾と踵骨中央を結んだ足部の長軸と image intensifier とが平行になるように位置させた。実験試技は、fluoroscopy (Infinix Celeve- I INFX-8000C, TOSHIBA 社製)を用いてエックス線撮影を行った。(Figure 1.)



Figure 1. 実験の様子(図は荷重位(片脚立位)での撮影)

Computed Tomography (CT) の撮影は、マルチスライス CT 撮影装置 (PHILIPS IDT 16, Koninklijke Philips Electronics 社製) を使用して撮影した。被験者には装置のテーブル上で仰臥位を取らせ、足関節をニュートラルポジションに固定した状態で撮影を行った。撮影時間は準備を含めて約 5 分であった。CT 画像は、足底から、外果近位方向に 15cm の範囲を対象とし、0.4 mm ギャップ・オーバーラップの設定で撮影した。その際の撮影条件は、120 kV・200 mA/slice, 15.5 m グレイであった。

3) 解析

非荷重位および荷重位での距腿関節および距骨下関節について、3D-2D model image registration technique[23]を用いて骨の相対的な位置関係を求めた。

i) 骨モデルの作成・骨座標軸の設定

得られた CT データより、被験者それぞれの脛骨・距骨および踵骨の三次元骨モデルを作成した(ITK-SNAP, open source[27])。作成した三次元骨モデルには、先行する研究[24]に則り骨座標軸を設定した(Geomagic studio, Raindrop Geomagic)。座標軸設定の概要を以下に記す。脛骨においては、脛骨天蓋の関節面中央を原点とし、脛骨天蓋前方の直線に直交する線を X 軸、脛骨軸を Y 軸とした。距骨においては、距骨滑車の内側縁と外側縁の中央を通る関節面を矢状面上で円に部分近似し、その中点を原点とした。原点を通り、前額面上で距骨滑車の内側縁と外側縁を結んだ直線と平行な直線を Z 軸とし、原点と距骨滑車の内側縁と外側縁の中央を通る線を通り、かつ脛骨距骨滑車の最も高い点を通る直線を Y 軸とした。踵骨においては、前額面より踵骨関節面を観察し、中距骨関節面および後距骨関節面それぞれの外側カーブの変曲点を結んだ直線の中点を原点とした。原点を通り、踵骨底面に平行な直線を X 軸とし、踵骨の外側壁と平行な直線を Y 軸とした。(Figure 2)

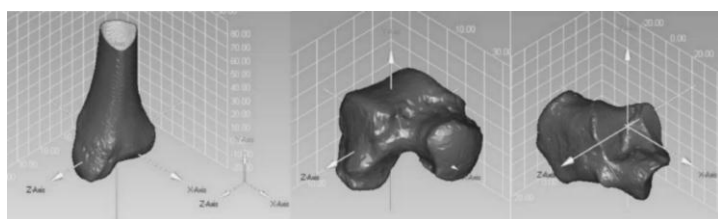


Figure 2. 脛骨・距骨・踵骨の骨座標系

ii) キネマティックデータの取得

3D-2D model image registration technique を使用し、エックス線画像上で三次元骨モデルをマッチングさせて脛骨・距骨および踵骨の座標データを得た(JointTrack, open source) (Figure 3)。3D-2D model image registration technique は、遠近法の原理を利用し、得られたエックス線画像上での骨の輪郭に三次元骨モデルのシルエットを重ね合わせて三次元的な骨の位置関係を求める方法である。得られた座標データより、荷重による距腿関節および距骨下関節の変位を求めた。なお、骨モデルをマッチングする際のマニュアル誤差を低減するため、同一の検者が解析手順を3度繰り返して値を求め、その平均を個人の値とした。解析手順を3度繰り返した際の最大誤差は、エックス線画像面上で 0.61 mm、エックス線画像面上から逸脱する方向には 1.7 mm であった。またその時の ICC は、底背屈方向 >0.97、内返し・外返し方向 >0.79、内旋・外旋 >0.94 であった。距腿関節の動きは、脛骨に対する距骨の動きとし、距骨下関節の動きは距骨に対する踵骨の動きと定義した。また、X 軸(前後方向)周りの回転を内返し・外返し、Y 軸(上下方向)周りの回転を内旋・外旋とし、Z 軸(内側外側方向)周りの回転を底背屈とした。

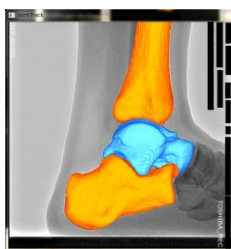


Figure 3. 骨モデルマッチングの例

iii) 統計検定

統計検定は、非荷重位から片脚立位による荷重を行った際の距腿関節および距骨下関節の変位量の性差を比較するため、対応のない t 検定を行った。有意水準は、 $p < 0.05$ とした。

【結果】

Table 1 に非荷重位から片脚立位による荷重を加えた際の距腿関節・距骨下関節の角度変位の性差を示す。男性女性ともに、荷重負荷されることにより、距腿関節・距骨下関節の両関節で背屈・外返し・外旋した。距腿関節において、底屈および外返しの変位は男女で有意な差はなかった。外旋の変位量は男性よりも女性が有意に大きい値を示した。 $(p < 0.05)$ 距骨下関節においては、底屈・外返しおよび外旋の全ての変位量が男性よりも女性で有意に大きい値を示した。 $(p < 0.05)$

Table 1. 非荷重位から片脚立位による荷重を行った際の距腿関節・距骨下関節の角度変位の男女比較

	motion (in degrees)	<u>Mean $\pm$ (SD)</u> Males	<u>Mean $\pm$ (SD)</u> Females	Significance
Talocrural joint	Dorsiflexion	$9^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$10^{\circ} \pm 4^{\circ}$	n. s.
	Eversion	$7^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$9^{\circ} \pm 3^{\circ}$	n. s.
	External rotation	$5^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$6^{\circ} \pm 3^{\circ}$	*
Subtalar joint	Dorsiflexion	$6^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$12^{\circ} \pm 2^{\circ}$	*
	Eversion	$13^{\circ} \pm 4^{\circ}$	$18^{\circ} \pm 4^{\circ}$	*
	External rotation	$9^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$13^{\circ} \pm 4^{\circ}$	*

* $p < 0.05$

【考察】

本研究は、生体の足関節を対象として静的な荷重を負荷し、その際の距腿関節および距骨下関節の受動的なアライメントの変化を三次元的に明らかにすることを目的として実施した。非荷重位から片脚立位により荷重した際の距腿関節および距骨下関節の角度変位は、距腿関節では底屈・外返しに男女で差が無かったが、外旋変位量は女性が男性よりも有意に大きい値を示した。また、距骨下関節においては、底屈・外返しおよび外旋のすべてで男性よりも女性が有意に大きく変位した。本結果より、静的な荷重負荷による受動的なアライメント変化は男女で異なり、男性よりも女性の方が大きく起こることが明らかとなった。

距腿関節では、特に外旋の変位量が男性よりも女性で有意に大きかった。MRI を用いて脛骨の腓骨切痕の前関節面・後関節面および深さを調べた研究では、それぞれ女性よりも男性が有意に大きく、腓骨切痕と腓骨がより適合する[28, 29]ことが報告されている。距腿関節を構成する骨の形状およびその適合性が男女で異なるため、荷重によるアライメント変化の大きさが男女で異なることが考えられた。また、足関節の靭帯の弛緩性は、男性よりも女性に高い[30]ことが示されている。したがって、距腿関節については男性よりも女性に大きな変位が生じ得る構造および靭帯による支持機構となっていると推察された。またこの点が、足関節の外傷・障害発生が女性に多いことと関連する可能性があることが示唆された。

距骨下関節では、底屈・外返し・外旋のすべての変位が男性よりも女性で有意に大きかった。距骨下関節は内側縦アーチ構造の一部を構成する。これまでの研究で、非荷重時におけるアーチ構造のアライメントに性差はないが、女性の足部アーチスチフネスは男性よりも低い[31]こと、また静的および動的な荷重負荷によって女性の足アーチは男性の足アーチよりも大きく変位する[12]ことが示されている。このことより、スチフネスの低い女性の足部アーチは荷重により大きく変位し、アーチ構造の一部でもある距骨下関節の変位も男性よりも大きく変位したものと推察される。また、距骨下関節の背屈・外返し・外旋の複合的な動きは後足部の回内と呼ばれる動きであり、後足部回内が大きい足はランニング障害等の発生率が高くなる可能性が示されている[32, 33]。したがって、女性の足や足関節の可動性が高いことが足部足関節の外傷障害発生が女性に多い一要因となり得ることが推察された。

非荷重から荷重負荷されることにより、男性・女性ともに距腿関節・距骨下関節の両関節で背屈・外返し・外旋が起こった。先行する研究によると、距骨下関節は外返しのポジションで後方の関節面同士の接する面積が約 54% 大きくなる[34]ことが明らかになっており、今回の実験においても荷重負荷を受けて外返しのポジションを取り、接する関節面の面積を大きくして関節の安定化を図っていたものと予測された。一方で、一般的に距腿関節は主に底背屈の動きを担うとされている。しかしながら本研究においては、距腿関節においても底背屈と同程度の外返しおよび外旋が見られた。Lundberg らは、距骨滑車の内側関節面の曲率半径が前方と後方で異なるため足関節の肢位によって距腿関節の運動軸の傾きが変化すると報告している。本研究でみられた距腿関節の前額面および水平面上での動きについても、距骨滑車の形状が関与すると予測したが、その証明には並進運動である距骨の脛骨に対する前後方向の動きを分析する必要がある。

本研究の限界として、エックス線を使用する計測であるため被験者数が少ないこと、また一方向より撮像した画像を基にした解析であることがあげられる。近年は二方向から撮像した透視画像を使用し、より精度の高いデータ計測が技術的に可能となっている。しかしながら、試技エリアの制約やエックス線による被ばく量が増加する可能性が考えられるため、これら技術的な問題の解決が必要と考える。ま

た、本研究は健康な者を対象として行った研究である。今後外傷や障害を有する足のデータとの比較をすることにより、外傷・障害の発生メカニズム解明や予防法の検討に寄与することが期待できる。

【結語】

生体の足関節を対象とし、静的な荷重を負荷に応ずる距腿関節および距骨下関節の受動的なアライメントの変化を三次元的に明らかにすることを目的として実験を行った。

実験の結果、荷重により距腿関節において外旋、距骨下関節においては底屈・外返しおよび外旋の変位量が男性よりも女性で有意に大きい値を示した。荷重により関節の変位が大きく起こることは、女性の足や足関節に外傷・障害が多く発生する一要因となり得ると考えられた。

謝辞

本研究は財団法人上月スポーツ教育財団の第 10 回スポーツ研究助成事業による助成を受けて実施しました。ここに深い感謝の意を表します。

本研究の実験実施に際し、筑波大学附属病院大山高一先生には多大なるご協力を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。また、University of Florida の Scott A. Banks 教授には、本研究データの解析にご意見やご指導を賜り、心より感謝申し上げます。

1. van Gent RN, Siem D, van Middelkoop M, van Os AG, Bierma-Zeinstra SM, Koes BW: **Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review.** *British journal of sports medicine* 2007, **41**:469-480; discussion 480.
2. Satterthwaite P, Norton R, Larmer P, Robinson E: **Risk factors for injuries and other health problems sustained in a marathon.** *British journal of sports medicine* 1999, **33**:22-26.
3. Stanish WD: **Lower leg, foot, and ankle injuries in young athletes.** *Clinics in sports medicine* 1995, **14**:651-668.
4. Withnall R, Eastaugh J, Freemantle N: **Do shock absorbing insoles in recruits undertaking high levels of physical activity reduce lower limb injury? A randomized controlled trial.** *J R Soc Med* 2006, **99**:32-37.
5. Frisch A, Seil R, Urhausen A, Croisier JL, Lair ML, Theisen D: **Analysis of sex-specific injury patterns and risk factors in young high-level athletes.** *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 2009, **19**:834-841.
6. Darrow CJ, Collins CL, Yard EE, Comstock RD: **Epidemiology of severe injuries among United States high school athletes: 2005-2007.** *The American journal of sports medicine* 2009, **37**:1798-1805.
7. Horton MG, Hall TL: **Quadriceps femoris muscle angle: normal values and relationships with gender and selected skeletal measures.** *Phys Ther* 1989, **69**:897-901.
8. Woodland LH, Francis RS: **Parameters and comparisons of the quadriceps angle of college-aged men and women in the supine and standing positions.** *The American journal of sports medicine* 1992, **20**:208-211.
9. Shultz SJ, Shimokochi Y, Nguyen AD, Schmitz RJ, Beynnon BD, Perrin DH: **Measurement of varus-valgus and internal-external rotational knee laxities in vivo--Part II: relationship with anterior-posterior and general joint laxity in males and females.** *J Orthop Res* 2007, **25**:989-996.
10. Wilkerson RD, Mason MA: **Differences in men's and women's mean ankle ligamentous laxity.** *Iowa Orthop J* 2000, **20**:46-48.
11. Park SK, Stefanyshyn DJ, Loitz-Ramage B, Hart DA, Ronsky JL: **Changing hormone levels during the menstrual cycle affect knee laxity and stiffness in healthy female subjects.** *The American journal of sports medicine* 2009, **37**:588-598.
12. Fukano M, Fukubayashi T: **Gender-based differences in the functional deformation of the foot longitudinal arch.** *Foot (Edinb)* 2012, **22**:6-9.
13. Mann R: *Biomechanics of the foot and ankle linkage.* Philadelphia: W.B. Saunders; 1994.
14. Dixon PC, Bohm H, Doderlein L: **Ankle and midfoot kinetics during normal gait: a multi-segment approach.** *J Biomech* 2012, **45**:1011-1016.
15. Drewes LK, McKeon PO, Paolini G, Riley P, Kerrigan DC, Ingersoll CD, Hertel J: **Altered ankle kinematics and shank-rear-foot coupling in those with chronic ankle instability.** *J Sport Rehabil* 2009, **18**:375-388.
16. Ferber R, McClay Davis I, Williams DS, 3rd, Laughton C: **A comparison of within- and between-day reliability of discrete 3D lower extremity variables in runners.** *J Orthop Res* 2002,

20:1139-1145.

17. Tranberg R, Karlsson D: **The relative skin movement of the foot: a 2-D roentgen photogrammetry study.** *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 1998, **13**:71-76.
18. Reinschmidt C, van Den Bogert AJ, Murphy N, Lundberg A, Nigg BM: **Tibiocalcaneal motion during running, measured with external and bone markers.** *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 1997, **12**:8-16.
19. Arndt A, Westblad P, Winson I, Hashimoto T, Lundberg A: **Ankle and subtalar kinematics measured with intracortical pins during the stance phase of walking.** *Foot Ankle Int* 2004, **25**:357-364.
20. Westblad P, Hashimoto T, Winson I, Lundberg A, Arndt A: **Differences in ankle-joint complex motion during the stance phase of walking as measured by superficial and bone-anchored markers.** *Foot Ankle Int* 2002, **23**:856-863.
21. Stacoff A, Nigg BM, Reinschmidt C, van den Bogert AJ, Lundberg A, Stussi E, Denoth J: **Movement coupling at the ankle during the stance phase of running.** *Foot Ankle Int* 2000, **21**:232-239.
22. Arndt A, Wolf P, Liu A, Nester C, Stacoff A, Jones R, Lundgren P, Lundberg A: **Intrinsic foot kinematics measured in vivo during the stance phase of slow running.** *J Biomech* 2007, **40**:2672-2678.
23. Banks SAY, 2006 #27}, Hodge WA: **2003 Hap Paul Award Paper of the International Society for Technology in Arthroplasty. Design and activity dependence of kinematics in fixed and mobile-bearing knee arthroplasties.** *J Arthroplasty* 2004, **19**:809-816.
24. Yamaguchi S, Sasho T, Kato H, Kuroyanagi Y, Banks SA: **Ankle and subtalar kinematics during dorsiflexion-plantarflexion activities.** *Foot Ankle Int* 2009, **30**:361-366.
25. de Asla RJ, Wan L, Rubash HE, Li G: **Six DOF in vivo kinematics of the ankle joint complex: Application of a combined dual-orthogonal fluoroscopic and magnetic resonance imaging technique.** *J Orthop Res* 2006, **24**:1019-1027.
26. Fukano M, Kuroyanagi Y, Fukubayashi T, Banks S: **Three-dimensional kinematics of the talocrural and subtalar joints during drop landing.** *Journal of applied biomechanics* 2014, **30**:160-165.
27. Yushkevich PA, Piven J, Hazlett HC, Smith RG, Ho S, Gee JC, Gerig G: **User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability.** *Neuroimage* 2006, **31**:1116-1128.
28. Mavi A, Yildirim H, Gunes H, Pestamalci T, Gumusburun E: **The fibular incisura of the tibia with recurrent sprained ankle on magnetic resonance imaging.** *Saudi medical journal* 2002, **23**:845-849.
29. Yildirim H, Mavi A, Buyukbebeci O, Gumusburun E: **Evaluation of the fibular incisura of the tibia with magnetic resonance imaging.** *Foot Ankle Int* 2003, **24**:387-391.
30. Schwarz NA, Kovalski JE, Heitman RJ, Gurchiek LR, Gubler-Hanna C: **Arthrometric measurement of ankle-complex motion: normative values.** *Journal of athletic training* 2011,

46:126-132.

31. Zifchock RA, Davis I, Hillstrom H, Song J: **The effect of gender, age, and lateral dominance on arch height and arch stiffness.** *Foot Ankle Int* 2006, **27**:367-372.
32. Hamill J, Bates BT, Holt KG: **Timing of lower extremity joint actions during treadmill running.** *Med Sci Sports Exerc* 1992, **24**:807-813.
33. Tweed JL, Campbell JA, Avil SJ: **Biomechanical risk factors in the development of medial tibial stress syndrome in distance runners.** *J Am Podiatr Med Assoc* 2008, **98**:436-444.
34. Wagner UA, Sangeorzan BJ, Harrington RM, Tencer AF: **Contact characteristics of the subtalar joint: load distribution between the anterior and posterior facets.** *Journal of orthopaedic research : official publication of the Orthopaedic Research Society* 1992, **10**:535-543.
35. Lundberg A, Svensson OK, Nemeth G, Selvik G: **The axis of rotation of the ankle joint.** *The Journal of bone and joint surgery British volume* 1989, **71**:94-99.