

[原著論文]

回転円盤型角度測定器“RotorMeter”を用いた膝関節の 回旋可動域の測定方法の信頼性と妥当性の検討

柵木 聖也¹⁾, 石倉 孝樹²⁾, 石関 友也²⁾, 宮川 俊平³⁾

キーワード：膝関節、測定方法、回旋、弛緩性、RotorMeter

Evaluation of Reliability and Validity of An External Device to Measure The Knee Rotation

Seiya Masegi¹⁾, Kouki Ishikura²⁾, Tomoya Ishizeki²⁾, Shunpei Miyakawa³⁾

Abstract

The purpose of this study was to evaluate reliability and validity of the newly developed external device to measure the knee rotation. Twenty healthy male subjects were examined and passive rotation of the knee was measured by “RotorMeter”. Internal and external rotation was measured applying 8Nm torque by two testers. Statistical analysis was performed by using the intra-class correlation coefficients (ICC) and the Bland-Altman analysis. Internal rotation was 50.4 and 50.6 degrees, external rotation was 53.3 and 51.2 degrees and total (internal + external) rotation was 103.6 and 101.8 degrees. ICC (1,1) for total rotation was 0.904 and 0.939 and ICC (2,2) for total rotation was 0.968. Systematic error of this measurement was not found.

Keywords : knee joint, measurement, rotation, joint laxity, RotorMeter

和文要旨

膝関節の弛緩性は膝前十字靭帯損傷の内的危険因子とされ、前額面および矢状面内での弛緩性については多くの研究がなされてきた。しかし、水平面内での弛緩性、すなわち回旋方向の弛緩性と前十字靭帯損傷との関連については、膝関節の回旋量の定量化に関する方法論的課題から十分な検討がなされていない。そこで本研究は、新たに開発した回転円盤形角度測定器“RotorMeter”による、膝関節の回旋可動域の測定方法の信頼性と妥当性を検討することを目的とした。12名の健常男性を対象と

し、2名の検者による各2回の測定が行われた。負荷トルクは8Nmとした。測定方法の信頼性の検討には級内相関係数が、妥当性の検討にはBland-Altman分析が用いられた。両検者の測定結果の平均値は、内旋可動域は50.4度および50.6度、外旋可動域は53.3度および51.2度、両可動域の和である全回旋可動域は103.6度および101.8度であった。検者内での級内相関係数は0.801から0.939、検者間での級内相関係数は0.917から0.968であり、測定結果の検者内および検者間の信頼性は良好と判定された。また、両検者内での測定結果の系統誤差は見られな

1) 新潟医療福祉大学健康科学部健康スポーツ学科

2) 幸和会美咲クリニック

3) 筑波大学人間総合科学研究科

[連絡先]

1) 〒950-3198 新潟市北区鳥見町1398

新潟医療福祉大学

Phone/Fax: 025-257-4690

E-mail: masegi@nuhw.ac.jp

かった。以上の結果より、RotorMeterを用いた膝関節の回旋方向可動域の測定方法は信頼性および妥当性のあるものと判定されたが、先行研究との比較から足関節および足部の諸関節の運動が測定結果に介在したものと考えられた。

I 緒言

スポーツにおいて膝関節の果たす役割は非常に重要なものであるが、それ故に膝関節の傷害は多くみられる。特にバスケットボールやハンドボール、サッカーなどの球技型スポーツでは、前十字靭帯（Anterior Cruciate Ligament:以下、ACL）損傷や半月板損傷などの傷害が多くみられる。

ACL 損傷に注目すると、特に非接触型ACL 損傷発生の危険因子には、関節の弛緩性、膝関節の静的・動的 alignment、ACL のサイズ、性差など様々なものがあるとされている¹⁾。これらの危険因子のうち、関節の弛緩性とACL 損傷との関連については諸家により多くの報告がなされてきた。特に膝関節そのものの弛緩性については、Loudon ら²⁾ およびRamesh ら³⁾ によって、ACL 損傷群において過伸展膝が統計学的に有意に多いことが報告された。また、Uhorchak ら⁴⁾ によって、ACL 損傷膝の脛骨前方移動量が非損傷膝のそれに比して有意に大きいことが報告された。Shambaughら⁵⁾ は、ACL 損傷膝には外反膝が多いことを報告した。

このように、ACL 損傷と膝関節の弛緩性とは関連があることが示唆されてきた。しかし、膝関節の弛緩性についての研究はいずれも、矢状面内および前額面内での弛緩性について言及したものであり、水平面内での弛緩性、すなわち回旋方向の弛緩性について言及したものはない。

ACL 損傷時の膝関節の回旋方向alignment についての研究では、Arnord ら⁶⁾、McNair ら⁷⁾、Olsen ら⁸⁾ による報告などがあり、いずれもACL 損傷と膝関節の回旋方向alignment の関連について言及している。しかしながら、膝関節の回旋方向の弛緩性がACL 損傷にどのような影響を及ぼすのかという点については明らかにされていない。これは、膝関節の回旋方向の可動域の測定方法が確立されていないことに起因するものと思われる。

この問題、すなわち膝関節の回旋方向の可動域の測定方法の開発については、Matsumoto ら⁹⁾ やJorn ら¹⁰⁾ によるX 線を用いた研究や、Samukawaら¹¹⁾ によるMRIを用いた研究、Tsaiら¹²⁾ による磁気追跡センサを用いた研究、さらに川野ら¹³⁾ による複合慣性センサを用いた研究などが報告されているものの、十分なsample sizeでの研究は行われていない。

そこで本研究は、臨床現場への適用が可能である、膝関節の回旋可動域を測定するための機器を開発・製作し、その信頼性と妥当性を検討することを目的とした。

II 方法

1 被験者

被験者は、下肢および下肢帯に重篤な傷害経験の無い健常男性12名である。被験者の年齢および身長、体重はそれぞれ 20.0 ± 1.19 歳、 171.3 ± 5.43 cm、 64.5 ± 5.74 kgであった。なお、全ての被験者で利き脚（ボールを蹴る脚）は右脚であり、測定の対象側は右脚とした。

2 測定器

本研究で用いた測定器“RotorMeter”を、**図1**に示す。RotorMeterは本研究にあたり著者らが開発したoriginalな測定器であり、メーター部とチェア部とで構成される。メーター部は2枚の木製板をball bearingを介して連結した構造であり、上側の円盤は下側に対して自由に回転することが可能である。上側は半径25cmの円盤、下側は一辺60cmの正方形の形状である。上側の円盤（以下、円盤）には、前足部固定用の20mm幅のベルクロテープが三本、および踵部固定用のプラスチック製ヒールカップが装着されている。このヒールカップには、踵部をヒールカップに密着させるための20mm幅のベルクロテープが一本装着されている。また下側の板（以下、台座）には角度測定用の大型の分度器が装着されており、円盤の下面に装着された指針と合わせて円盤の回転量の読み取りに用いられる。このメーター部はガスダンパーを介して土台に連結され、その高さを無段階に調節することが可能である。円盤の外周にはスチール製ワイヤ



図1 本研究で用いた“RotorMeter”

(以下、ワイヤ)が装着され、接線方向に沿って前方に引き出された後、台座に装着された定滑車によって下方に誘導される。ワイヤの先端には重錘が装着される。ワイヤと円盤の連結部分は、円盤の中心を挟んで180度反対方向に二箇所設置される。

チェア部は、スチールパイプで構成された縦×横×高さが65cm×85cm×105cmの直方体様のフレームに、木製座面を取り付けた構造である。フレームの上面前辺には大腿内・外側上顆を固定するためのクランプが装着されている。このクランプは、長さと角度を自由に設定することが可能である。また木製座面には、二本の幅50mmのベルクロテープが二本装着され、測定時に被験者の大腿部を座面に固定するのに用いられる。

3 測定方法

図2に測定時の被験者の肢位を示す。被験者はチェア部に、股関節屈曲90度、膝関節屈曲90度、足関節中間位にて座り、右大腿部を座面に、足部を円盤に固定された。加えて、大腿部の動揺を防ぐためにチェア部に装着されたクランプにて右大腿内・外側上顆を固定された。この状態で、ワイヤの先端に32Nの重錘を装着することで円盤に8Nmのトルクを負荷した。負荷時には下肢の脱力を被験者に指示した。負荷する方向は内旋、および外旋方向とし、方向の変更は円盤のワイヤとの連結部分を変更することで行った。負荷した際の円盤の回転量を内旋可動域、外旋可動域として記録した。さらに、両者の和を全回旋可動域として算出した。内旋および外旋方向の負荷順序はランダムとした。

上記の測定を24時間以上の間隔を開けて計2回実施し、さらにもう一名の検者による同手順の計測を再度実



図2 測定時の肢位

施した。

4 統計処理

両検者による各被験者の計測値について、級内相関係数(Intra-class Correlation Coefficients; 以下、ICC)をICC(1,1)について算出し、検者内信頼性を検討した。また、各検者による2回の計測値の平均値を用いてICC(2,2)を算出し、検者間信頼性を検討した。ICCについては0.7以上をもって「良好」と判定した。

また、Bland-Altman分析を用いて各検者の2回の計測値間の系統誤差について、固定誤差と比例誤差の有無を算出し検討した。固定誤差に関しては、各検者の同一被験者に対する2回の測定値間の差の平均の95%信頼区間を算出し、その区間が0を含む場合、固定誤差が無いものと判定した。比例誤差に関しては、Bland-Altman plotを作成したうえで相関係数を算出し、得られた相関係数が有意ではない場合、比例誤差が無いものと判定した。なお、有意水準は5%とした。

全ての統計量の算出には、IBM SPSS Statistics 20を使用した。

5 倫理面での配慮

研究の実施に先立っては、新潟医療福祉大学倫理委員会の審査および承認を得た(承認番号:17271)。被験者には研究内容に関する十分な説明を行い、同意書への署名をもって研究参加への同意を得た。

III 結果

1 下腿部の回旋可動域について

両検者による測定結果を図3に示す。検者Aの測定による結果(平均値±標準偏差)は、内旋可動域 50.4 ± 7.49 度、外旋可動域 53.3 ± 7.83 度、全回旋可動域 103.6 ± 13.57 度であった。検者Bの測定による結果は、内旋可動域 50.6 ± 8.23 度、外旋可動域 51.2 ± 9.19 度、全回旋可動域 101.8 ± 15.86 度であった。

2 測定値の信頼性について

測定値の信頼性の算出結果を表1に示す。検者AのICC(1,1)は、内旋可動域0.801、外旋可動域0.936、全回旋可動域0.904であった。検者BのICC(1,1)は、内旋可

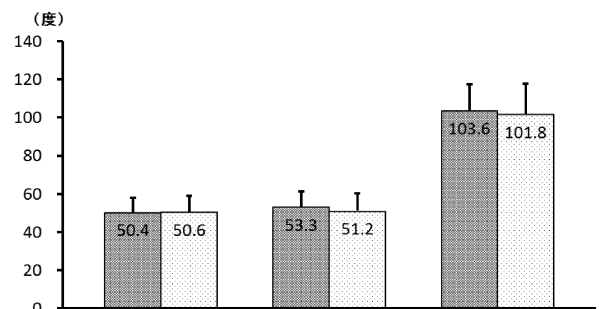


図3 各計測値の検者毎の平均値

表1 検者内および検者間の測定値の信頼性

	ICC (1, 1)			ICC (2, 2)		
	内旋可動域	外旋可動域	全回旋可動域	内旋可動域	外旋可動域	全回旋可動域
検者A	0.801	0.936	0.904	0.847	0.929	0.938
検者B	0.864	0.908	0.939			

動域0.864、外旋可動域0.908、全回旋可動域0.939であった。これらの結果より、RotorMeterによる測定値の検者内の信頼性については「良好」と判定された。

またICC (2, 2) は、内旋可動域0.847、外旋可動域0.929、全回旋可動域0.938であった。これらの結果より、RotorMeterによる測定値の検者間の信頼性についても「良好」と判定された。

3 測定結果の妥当性について

内旋可動域のBland-Altman plotを図4に、外旋可動域のBland-Altman plotを図5に、全回旋可動域のBland-Altman plotを図6に示す。また、Bland-Altman分析の結果を表2に示す。全ての項目で各検者の同一被験者に対する2回の測定値間の差の平均の95%信頼区間が0を含むことから、RotorMeterによる測定値には固定誤差が無いものと判定した。また、全ての項目で相関係数が

有意ではなかったことから、比例誤差が無いものと判定した。これらの結果より、RotorMeterによる測定に系統誤差は無いと判断された。

IV 考察

人体各関節の可動域や弛緩性を定量的に把握し評価することは、スポーツ医学の分野のみならず、バイオメカニクス、コンディショニング等の分野で重要視されている。また、臨床現場で用いられるspecial testと呼ばれる各種の徒手検査との関連性を明らかにすることにより、それらのテストの結果に客観的な裏付けを与えることが可能にするものと思われる。とりわけ膝関節については、大腿骨に対する脛骨の前後方向の弛緩性を評価するためのspecial testとしてanterior drawer testやLachman testが開発され、各種の測定機器を用いてその妥当性が検証されてきた¹⁴⁻¹⁶。

これに対し、回旋方向の弛緩性の評価にはpivot shift testやlosee testが開発され^{17,18}、臨床現場で用いられてきたが、それらの結果の評価は検者の臨床経験の影響を受けるものと思われる。このため、膝関節の回旋方向の弛緩性を定量化し評価することのできる測定方法を開発することが必要であると思われる。

膝関節および下腿部の回旋方向可動域の定量化に関する先行研究については、X線⁹、MRI^{11,19}、複合慣性センサ¹³、あるいは死体膝^{20,21}を用いたものなどが見られる。しかし、これらの手法はいずれも経済性、大量性、簡便性、汎用性などの課題から、臨床現場での適用は困

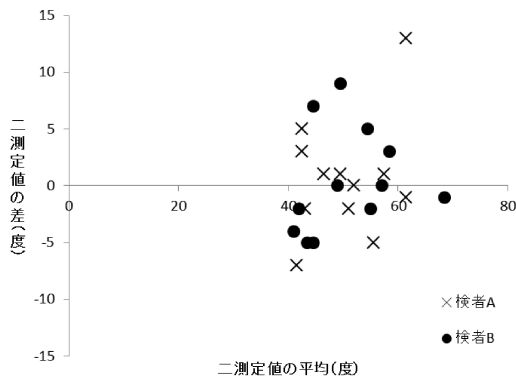


図4 Bland-Altman plot (内旋可動域)

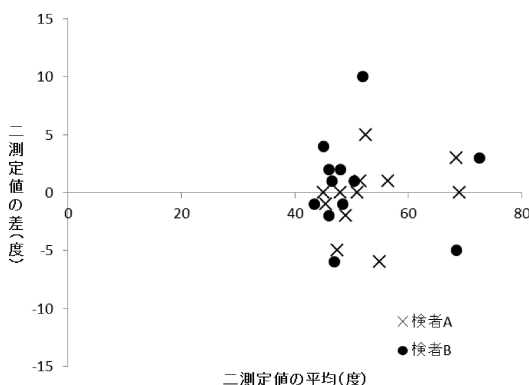


図5 Bland-Altman plot (外旋可動域)

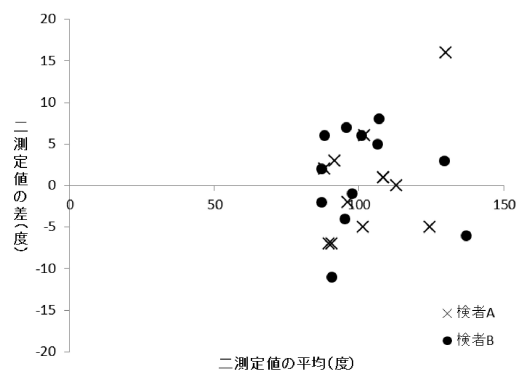


図6 Bland-Altman plot (全回旋可動域)

表2 Bland-Altman分析の結果

		固定誤差		比例誤差		
		95%信頼区間	結果	相関係数	p値	結果
検者A	内旋可動域	-0.82~1.99	無し	0.29	0.34	無し
	外旋可動域	-1.41~0.75	無し	0.29	0.35	無し
	全回旋可動域	-1.33~1.83	無し	0.11	0.11	無し
検者B	内旋可動域	-0.92~1.76	無し	0.20	0.52	無し
	外旋可動域	-0.61~1.95	無し	-0.11	0.91	無し
	全回旋可動域	-0.39~2.56	無し	-0.03	0.91	無し

難であると思われる。本研究と類似した原理を用いた研究^{12,22-25)}は散見されるものの、測定肢位や負荷トルクは様々である。また、得られた数値の報告間でのばらつきは小さくない。加えて、下腿の回旋運動は大腿部および下腿部筋群の緊張の影響を受けることが、その可動域の測定を困難なものにしてきた要因であると考えられる。

以上より、膝関節および下腿部の回旋方向の可動域測定方法については、未だ統一した見解が得られていないのが現状であると言える。そこで本研究では、簡易的で汎用性が高く、かつ非侵襲的で広く臨床現場で利用することが可能と思われる回転円盤型測定器“RotorMeter”を試作し、これを用いた測定法の信頼性と妥当性を検討した。

本研究でのRotorMeterによる12名の測定値の級内相関係数は、2名の検者内それぞれにおいて全ての測定項目で0.7以上であった。また検者間においても、全ての測定項目で0.7以上であった。これらの結果から、RotorMeterによる下腿部の回旋方向可動域の測定方法は、再現性について良好なものであると判定できた。Bland-Altman分析の結果については、全ての測定項目で加算誤差、比例誤差ともに認められなかったことから、系統誤差がみられないものと判定できた。これらの結果より、本研究で用いたRotorMeterは、信頼性、妥当性ともに満足できる水準の測定器であることが示唆された。

Tsai¹²⁾らは、同一の負荷トルクにて膝関節屈曲角度を変化させた場合、膝関節回旋方向の可動性が影響を受けると報告している。またAlmquistら²²⁾は、同一の測定肢位にて負荷トルクを変化させた場合、同様に膝関節回旋方向の可動性が変化したことを報告している。Shultzら²⁶⁾は、同一の測定肢位および負荷トルクにおいても荷重条件の際によって測定結果が異なることを報告している。これらより、膝関節の回旋方向の可動性測定時の肢位および負荷トルク、荷重条件を統一することの重要性が示唆される。本研究で用いた測定方法では測定時の肢

位の規定が容易であり、また重錘を用いてトルクを負荷することから測定中のトルクの変動は無いものと推察される。加えて、測定器の操作に特段の習熟等は必要とされない。よって、測定誤差の介入は最小限度に留められているものと考えられる。

しかしながら、同様の原理を用いた先行研究との比較においては、本研究で得られた結果は比較的大きいものであった。

Almquistら²⁷⁾は、9 Nmのトルクを負荷した際の成人女性の膝関節回旋方向の可動域を約77度と報告している。またLorbach²⁵⁾らは成人男女を対象にした同様の研究において、10Nmを負荷した結果を95.0度から98.7度と報告している。本研究では8 Nmを負荷したが、その結果は103.8度から107.6度とこれらの値に比して大きい値を得た。これは、本研究の結果に距腿関節および距骨下関節、および足部の諸関節の運動が介在したことによるものと推察される。

本研究においては、足部は円盤に、大腿部は座面に固定されたが、下腿部は固定されなかった。また、足部は主に前足部がベルクロテープを用いて、踵部がプラスチック製ヒールカップを介して円盤に固定されたものの、中足部は固定されなかったため、足関節の運動は十分に制限されなかった。このため測定器を介して足部にトルクが負荷された際、距骨下関節および距腿関節の内転が誘発されたものと思われる。また、三本のベルクロテープを用いて前足部を回転円盤に固定したため、トルク負荷時に横足根関節、足根中足関節、中足間関節など足部の諸関節の運動を招いたものと思われる。これより本研究で得られた値は、足関節および足部の諸関節と膝関節の可動域を併せた値であると考えられた。

今後は、足部の諸関節を固定できるよう測定器を改良し、純粋な膝関節の回旋方向の可動域を測定できることを可能にする必要があると思われる。また、トルク負荷時の骨性の指標と本研究で用いた方法の結果の相関を検

討するなどして、RotorMeterを用いた測定方法の妥当性をより詳細に検討する必要があるものと思われる。

付記；

本研究の一部は、平成24年度新潟医療福祉大学研究奨励金制度（萌芽的研究費）の助成を受けて遂行された。

V 引用文献

- 1) Ireland M.L.: Anterior cruciate ligament injury in female athletes: epidemiology, *Journal of Athletic Training*, 34 (2):150 – 154, 1999.
- 2) Loudon J.K., Jenkins W., Loudon K.L.: The relationship between static posture and ACL injury in female athletes, *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 24 (2) :91 – 97, 1996.
- 3) Ramesh R., Von A.O., Azzopardi T. et al: The risk of anterior cruciate ligament rupture with generalised joint laxity, *The Journal of Bone and Joint Surgery British Volume*, 87 (6) :800 – 803, 2005.
- 4) Uhorchak J.M., Scoville C.R., Williams G.N. et al: Risk Factors Associated with Noncontact Injury of the Anterior Cruciate Ligament. A Prospective Four-Year Evaluation of 859 West Point Cadets, *The American Journal of Sports Medicine*, 31 (6) : 831 – 842, 2003.
- 5) Shambaugh J.P., Andrew K., Herbert J.H.: Structural measures as predictors of injury in basketball players, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23 (5) :522 – 527, 1991.
- 6) Arnold J.A., Coker T.P., Heaton L.M. et al: Natural history of anterior cruciate tears, *The American journal of sports medicine*, 7 (6) :305 – 313, 1979.
- 7) McNair P.J., Marshall R.N., Matheson J.A.: Important features associated with acute anterior cruciate ligament injury, *The New Zealand Medical Journal*, 103 (901) :537 – 539, 1990.
- 8) Olsen O.E., Myklebust G., Engebretsen L. et al: Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball a systematic video analysis, *The American Journal of Sports Medicine*, 32 (4) : 1002 – 1012, 2004.
- 9) Matsumoto H., Seedhom B.B.: Rotation of the tibia in the normal and ligament-deficient knee. A study using biplanar photography, *Journal of Engineering in Medicine*, 207 (3) :175 – 184, 1993.
- 10) Jorn L.P., Friden T., Ryd L. et al: Simultaneous measurements of sagittal knee laxity with an external device and radiostereometric analysis, *The Journal of Bone and Joint Surgery British Volume*, 80:169 – 172, 1998.
- 11) Samukawa M., Yamamoto T., Miyamoto S. et al: Analysis of tibial rotation using magnetic resonance imaging, *Manual Therapy*, 14 (6) :712 – 715, 2009.
- 12) Tsai A.G., Musahl V., Steckel H. et al: Rotational knee laxity: reliability of a simple measurement device in vivo, *BMC Musculoskeletal disorders*, 9 (1) : 35, 2008.
- 13) 川野圭朗, 小橋昌司, 津森洋平ら: 複合慣性センサを用いた周波数解析による膝不安定性定量化システム, *電子情報通信学会技術研究報告*, 107 (461) :457 – 462, 2008.
- 14) Daniel D.M., Malcom L.L., Losse G. et al: Instrumented measurement of anterior laxity of the knee, *The Journal of Bone Joint Surgery*, 67A (5) : 720 – 726, 1985.
- 15) Konig D.P., Rutt J., Kumm D., et al: Diagnosis of anterior knee instability. Comparison between the Lachman test, the KT-1,000 arthrometer and the ultrasound Lachman test, *Unfallchirurg*, 101 (3) :209 – 213, 1998.
- 16) Highgenboten C.L., Jackson A., Meske N.B.: Genucom, KT-1000, and Stryker knee laxity measuring device comparisons. Device reproducibility and interdevice comparison in asymptomatic subjects, *The American Journal of Sports Medicine*, 17 (6) : 743 – 746, 1989.
- 17) Bach B.R., Warren R.F., Wickiewicz T.L.: The pivot shift phenomenon: Results and description of a modified clinical test for anterior cruciate ligament insufficiency, *The American Journal of Sports Medicine*, 16 (6) :571 – 576, 1988.
- 18) Noyes F.R., Grood E.S., Cummings J.F., et al: An analysis of the pivot shift phenomenon. The knee motions and subluxations induced by different examiners, *The American Journal of Sports Medicine*, 19 (2) :148 – 155, 1991.
- 19) Haughom BD, Souza R, Schairer W, et al: Evaluating rotational kinematics of the knee in ACL-ruptured and healthy patients using 3.0 Tesla magnetic resonance imaging, *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 20 (4) :663 – 670, 2012.
- 20) Lane J.G., Irby S.E., Kaufman K. et al: The Anterior Cruciate Ligament in Controlling Axial Rotation.

- An Evaluation of Its Effect, *The American Journal of Sports Medicine*, 22(2):289–293, 1994.
- 21) Lorbach O., Wilmes P., Maas S., et al: A non-invasive device to objectively measure tibial rotation: verification of the device, *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 17:756–762, 2009.
 - 22) Almquist P.O., Arnbjornsson A., Zatterstorm R., et al: Evaluation of an external device measuring knee joint rotation, *Journal of Orthopaedic Research*, 20:427–432, 2002.
 - 23) Zarins B., Rowe C.R., Harris B.A. et al: Rotational motion of the knee, *The American Journal of Sports Medicine*, 11(3):152–156, 1983.
 - 24) Shoemaker S.C., Markolf K.L.: In Vivo Rotatory Knee stability, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 64A(2):208–216, 1982.
 - 25) Lorbach O., Wilmes P., Theisen D. et al: Reliability testing of a new device to measure tibial rotation, *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 17:920–926, 2009.
 - 26) Shultz S.J., Shimokochi Y., Nguyen A.D. et al: Measurement of Varus-Valgus and Internal-External Rotational Knee Laxities in Vivo-Part I: Assessment of Measurement Reliability and Bilateral asymmetry, *Journal of Orthopaedic Research*, 25:981–988, 2007.
 - 27) Almquist P.O., Ekdahl C., Isberg P.E. et al: Knee rotation in healthy individuals related to age and gender, *Journal of Orthopaedic Research*, 31(1):23–28, 2013.