

氏名	たさと ひろし 田里 博
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第901号
学位授与の日付	平成30年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学位論文題目	歩行動作の冗長性に着目した膝関節機能評価パラメータの研究
審査委員	(主査)准教授 来田宣幸 教授 桑原教彰 教授 野村照夫

論文内容の要旨

厚生労働省では平成26年に健康・予防元年と題し健康寿命の延伸が必要であるとの報告がなされ、整形外科学会においても「運動器症候群 (locomotive syndrome) を提唱し、健康寿命の重要性を喚起している。健康寿命を伸ばすためには、自力で「立つ」、「歩く」といった日常動作を維持することが重要である。これらの日常動作を困難にする運動器障害のうち、その多くが関節疾患である。特に、変形性膝関節症の発生割合は多く、この治療には保存療法と手術療法があり、保存療法で効果が得られない場合に手術療法が行われる。また、保存療法は痛みの発生前、または発生初期に施すことで大きな効果を上げることが既に知られている。しかし、多くは症状が進行した状態で受診するために、有効な治療時期を逸することが多い。また、自身の健康状態を把握せず、過度な運動を行うことで症状を悪化させることも多い。先行研究では、加齢に伴う軟骨基質の弾性低下が、軟骨細胞への力学的負荷増大の助長をまねき、その治療には、早期発見、早期治療が重要で、MRIが有効であると報告されている。近年では体軟部組織の粘弾性を計測する研究が行われ実用化が期待されているものの、医療費、利便性の観点からMRIを関節疾患の前期、初期で使用することは殆どない。また、他の先行研究報告によると、「変形性膝関節症には明らかな原因がなく加齢に慢性的な機械的刺激が加わって発症する頻度が高い」と指摘されている。そこで、人間の冗長性により生じる、歩行ごとの左右の歩幅、歩隔、ケーデンスなどのばらつきと日常生活環境や長年の歩き方の癖や加齢に伴う運動器の劣化によって左右の膝の負担に偏りが生じ変形性膝関節症に陥ると考えた。

そこで、本論文では、検診で使える膝の状態を評価するパラメータを構築することを目的とし、膝に生じる振動(加速度センサから得る値)と足底面にかかる荷重(重心動揺計から得る荷重値)から両膝にかかる負担量の差異と振動の位相差を元に運動器機能評価パラメータ算出の可否を検討することとした。運動器機能評価パラメータにより、変形性膝関節症の発生前、または発生初期に注意喚起が行えることは大きな意義があり、また、本システムが、万歩計レベルに普及すれば医療費・介護費等の抑制につながり、社会的意義も大きいといえる。

第2章では、本論文で使用する重心動揺計の信頼性を担保するために、JIS規格(JIS T1190-1987)に基づいて検証した。その結果、JIS T1190-1987に適合していることが証明され、本論文

で使用する荷重値精度が±0.12%以内であることを確認した。

第3章では、人が歩行するたびに生じる、歩幅、歩隔、ケーデンス等の左右足でのばらつきに着目し、被験者（健常者）の脛骨外側顆（左右足）に加速度センサを装着し、床面に設置した重心計を踏み歩く平地歩行での左足と右足の負担（要素：荷重、加速度、負担量、負担量力積）のばらつきから、運動器機能評価パラメータを求める処方とその値について検証した。その結果、運動器機能評価パラメータの要素である左右足での対称性を示す相関係数は平均0.83、負担量力積の差は5.4%であることを明らかにした。

第4章では、被験者（健常者及び有疾患者）の脛骨外側顆（左右足）に加速度センサを装着し、床に設置した重心計を踏み歩く平地歩行と、蹴上1cmの外乱階段歩行において運動器評価パラメータについて検証した。その結果、平地歩行では年齢との相関が認められなかったが、外乱階段歩行では、49歳以降で2次曲線を用いて有意に近似できることが認められ、健常者の約51歳以降から運動器機能の衰えを示した。このことから、運動器機能評価パラメータは階段歩行において信頼性の向上を図ることで変形性膝関節症の予防に寄与すると考えられた。

第5章では、被験者（健常者及び有疾患者）の大腿骨外側上顆と脛骨外側顆に加速度センサを装着し、膝伸展での骨盤挙上動作を重心動揺計上でを行い、動作中の加速度と荷重から、加速度センサ装着部位に生じる衝撃力の差と加速度センサ信号の中間周波数（MF：median power frequency）の位相差が膝の緩衝機能評価パラメータとして有効か検討した。その結果、衝撃力の差は適さなかったが、MFの位相差においては、膝の弾性機能劣化に関するパラメータであると考えられた。

第6章では、本研究で得られた知見から運動器機能評価パラメータと緩衝機能評価パラメータが、膝の状態を評価するパラメータになり得る可能性と有用性及び、臨床意義確立の必要性について報告し、今後の展望として医療現場における変形性膝関節症予防の促進に寄与し一般に広く活用することで社会的貢献につながるという点について述べた。

論文審査の結果の要旨

本論文では、高齢者に多い膝OA（変形性膝関節症）において予防および早期発見の視点から、人間のもつ冗長性に着目した。すなわち、長年の歩き方の癖が膝にかかる負担の偏りや加齢にともなう運動器の劣化を引き起こし、膝OAに近づくと仮説を立て、膝OAの予防、早期発見には膝の状態を把握することが重要であると捉え、検診など診療所レベルで使える膝の状態評価パラメータについて、加速度センサと荷重センサを用いた非侵襲な簡易システムを構築し検証実験を行い、膝の状態が評価可能であるかを論じている。

まず、予防医学の観点から膝OAに関する先行研究を適切にレビューし、現状の把握や研究動向を踏まえ、問題の所在を明らかにしつつ、その解決策として新たな計測法を立案・提案しており、本論文の位置づけは明確であり、適切な手続きによって研究が遂行されている。

研究の新規性に関して、膝の状態を評価するパラメータ設定について、膝に生じる振動と足底面にかかる荷重から両膝の衝撃力を求め、ヒールコンタクトからトゥオフまでの経過時間で積分し、左肢と右肢各々に生じる衝撃力の力積値のばらつき（負担量）を運動器機能評価パラメータとしている。平地歩行と階段歩行において、平地歩行での運動器機能評価パラメータは、被

験者の平地歩行に対する歩容を示すが、予防を目的とした運動器機能評価パラメータとしては不向きで、階段歩行の運動器機能評価パラメータは年齢と高い相関が認められ、膝全体としての状態を簡易評価するパラメータとしての可能性を示唆している点において新規性・独創性が高い。また、膝をバネモデルとし、バネのもつ弾性機能が働けば、バネ振動の位相差がゼロに近くなる性質を使い、大腿骨と脛骨に生じる振動の位相差を膝緩衝機能評価パラメータとしており、膝伸展位での最大背屈下における骨盤挙上動作において、位相差は膝の弾性機能劣化にともなう膝緩衝機能評価パラメータとしての可能性を示している点で新規性が高い。

研究の有用性については、本研究はパラメータの探索的研究が主たる研究目的であるため、実証的妥当性の検証にまでは至っていないが、本研究で得られた成果をもとに、運動器機能評価パラメータおよび膝緩衝機能評価パラメータともに 10~60 代の各年代層でのデータに粗密が生じないよう配慮し、多くの試行数を収集することで、信頼性の向上と臨床的意義が確立できれば、膝 OA に対する簡便な定量的評価法として運動器障害の早期発見、早期対処および予防的機能強化などの領域への貢献が強く期待される社会的意義の高い研究である。

また、本研究はパラメータ設定のための計測方法として、床反力と膝に取り付けた加速度センサの値を同時に高いサンプリング周波数でデータ収集できるよう回路等の工夫を加えており、また JIS 規格に適合する計測精度を確認しており、工学的にも新規性及び有用性が認められる研究である。

なお、本論文はいずれも申請者が筆頭著者である国際誌への掲載を含む、学術誌に既に公開（内、1 編印刷中）されている以下の 4 編の論文で構成されている。また、研究者倫理に反する行為がないことを確認した。

- ・ 田里博, 来田宣幸, 重心動揺計の構造と精度の規格について, *Journal of Clinical Physical Therapy*, 18 : 13-26, 2016
- ・ 田里博, 来田宣幸, 両足の膝負担量差異による膝 OA 予防のための簡易評価法の検討, *実験力学*, 17 (1) : 34-38, 2017
- ・ Hiroshi Tasato, Noriyuki Kida, Evaluation of left-right difference of impulse in impact forces at stance phase: comparison of measurements on flat land and stairs. *Journal of Physical Therapy Science*. 30: 525-533, 2018
- ・ 田里博, 来田宣幸, 3 軸加速度センサを用いた振動と衝撃力による膝緩衝機能評価パラメータの検討, *Journal of Clinical Physical Therapy* (2018 年 4 月 25 日受理・印刷中)

以上の結果より、本論文の内容は学術的および工学的な観点から十分な新規性と有用性があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。