

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 石川 雄己

石川雄己氏の博士論文は、「歩行障害患者の歩行運動解析」と題し、全 6 章より構成される。本論文では、歩行障害患者の疾患発症からリハビリテーションまでを理解するために必須である歩行機能を評価できる指標の提案、膝靱帯モデルの構築と歩行アシストロボットを用いたリハビリテーション技能の抽出を行っている。

第 1 章では、背景である歩行障害患者の歩行動作解析を行う重要性を確認している。歩行障害が引き起こされると生活の質が低下する。したがって、歩行障害を防ぐこと、歩行障害の進行を遅らせることや、歩行障害が起こってしまった後に回復することが求められており、これらを実現するために歩行動作解析が必要であると主張している。

歩行障害の進行を遅らせるためには、適切に診断して治療を行うことが重要であり、歩行動作を用いて健常者と患者を評価する手法が必要であると主張している。歩行障害を防ぐためには、患者数が多い変形性膝関節症の発症メカニズムを明らかにする必要があると主張している。歩行障害が起こってしまった後に回復するためには、歩行アシストロボットを用いた効果的なリハビリテーションを確立することが重要であると主張している。

第 2 章では、関連研究を調査し、本論文の位置づけを明確にしている。複数関節を用いて総合的に歩行を評価できる指標として、**Elevation angle** を用いた歩行解析手法を紹介している。本手法では平面法則が知られており、法則の特徴をまとめている。変形性膝関節症の発症メカニズムの関連研究を調査している。悪化には機械的ストレス、特に歩容と靱帯の変化が関連することを明らかにしている。メカニズム解明には、膝関節を表現したシミュレーションモデルが必要であると指摘している。歩行アシストロボットを用いたリハビリテーションは、手法が確立しておらず、効果的利用法が確立していないと指摘している。

第3章では、複数関節の動作を用いて総合的に歩行を評価できる指標として、**Elevation angle** を用いた歩行解析手法の提案を行っている。具体的には、変形性膝関節症患者とアキレス腱延長術を適用した尖足患者に対して **Elevation angle** を用いた歩行解析手法を適用し、平面法則を利用した解析を行っている。

両疾患患者においても健常者と同様に平面法則が成立するかを調べている。主成分分析の寄与率を用いて判定しており、累積寄与率から、患者においても平面法則が成立することを明らかにしている。

変形性膝関節症患者の歩行では、患者と健常者を適切に識別できるかを調べている。結果、主成分ベクトルの角度差を用いることで健常高齢者と患者を識別することがある程度できることが交差検定と **ROC** 解析によって示されている。アキレス腱延長術を適用した尖足患者の歩行では、術後経過を定量的に評価している。主成分ベクトルの角度差を用いることで、リハビリテーション過程において、定量的に健常者の近似平面の傾きに近づいていることを示している。

第4章では、変形性膝関節症の悪化メカニズムを明らかにするために、膝関節の靭帯に着目した筋骨格シミュレーションモデルを構築し、膝関節靭帯付着位置が靭帯張力に与える影響を調べている。構築したモデルは、膝関節の特徴である滑りと転がりと同時に起こる現象を、屈曲角度ごとに並進方向に動くように設計し、表現している。また、解剖学的特徴を踏まえた靭帯を有している。歩容の変化を調査するために、シミュレータ上に内外反歩行を生成している。

構築したモデルを用いて、歩容の個体差と膝関節構造の個体差による影響を解析している。歩容の影響を解析した結果、前十字靭帯と後十字靭帯のバランスの崩れが内反歩行時に見られ、内反歩行が変形性膝関節症の発症に関わる現象であると指摘している。靭帯付着位置の影響を解析した結果では、前十字靭帯と外側側副靭帯では上下方向へ靭帯付着位置を移動させることによって張力が変化することを示している。

第5章では、歩行アシストロボットを用いたリハビリテーション手法確立のために、片麻痺患者への歩行アシストロボットリハビリテーションの熟練者技能の抽出を行っている。具体的には、熟練者へのインタビューと歩行動画を用いた歩行解析を行っている。インタビューにおいて、熟練者は、患者を4タイプに分類し、それに対応してリハビリテーションを行うことを明らかにしている。技能を形式知とすることを次の目的として、患者の歩行動画からタイプ別分類に用いられる特徴を抽出し、熟練者と同様の分類ができる分類表を構築している。患者の歩行動画からタイプ別分類に用いられる特徴を抽出し、歩幅と歩行率で分類することで、熟練者のタイプ分類を再現できることを示している。最終的に、

タイプ別患者の分類表を作成し、検証を行っている。

第 6 章の結論では、本研究の成果が総括されている。結論として全体の貢献を確認し、今後の展望が述べられている。

以上、本論文では歩行障害患者の疾患発症からリハビリテーションまでを理解するために必須である歩行機能を評価できる指標の提案、膝靱帯モデルの構築と歩行アシストロボットを用いたリハビリテーション技能の抽出を達成した。従来の問題点を克服し、**Elevation angle** を用いた解析、並進運動を伴う膝靱帯モデルの構築や歩行アシストロボットを用いたリハビリテーション技能抽出を独自のアプローチで新規に達成しており、それらの有効性も十分に検証されている。以上の点において、博士論文として十分な独自性と貢献があると判断する。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。