The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	感覚装置と筋電を媒介とする生体フィードバック制御義足の開発ならびに応用に関する研究
Author(s)	広川, 俊二
Citation	大阪大学, 1980, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/364
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

【16】

氏名・(本籍)	広川俊二（ひろかわしゅんじ）
学位の種類	工学博士
学位記番号	第 4936 号
学位授与の日付	昭和55年3月25日
学位授与の要件	工学研究科 応用物理学専攻 学位規則第5条第1項該当
学位論文題目	**感覚装置と筋電を媒介とする生体フィードバック制御義足の開発ならびに応用に関する研究**
論文審査委員	(主査) 教授 杉山 博 (副査) 教授 橋本初次郎 教授 西村正太郎 教授 藤井 克彦 教授 小野 啓郎 教授 中川 憲治 教授 藤田 茂 教授 西田 俊夫

論文内容の要旨

本論文は義足の足底部と膝部に設けた人工受容器による感覚情報を下肢断端部を経て義足歩行者へ求心的に伝達する感覚フィードバック系と，義足歩行者の下肢断端部から得られる筋電信号により，義足歩行者自身の意志にもとづいて遠心的（能動的）に義足の運動を制御するための筋電制御系を併わせて組み込んだ義足システムの開発・試作・有効性の評価に関する理論的・実験的研究の成果を集大成したもので，7つの章から構成されている。

第1章は序論で，本研究全般に亘る研究目的と研究経過について述べている。

第2章では，義足の足底部と膝部に設けた人工受容器による感覚情報を電気刺激信号に変換して義足歩行者の下肢断端部へ的確かつ安全に伝達するための基礎的測定実験と，その結果として明らかにされた皮膚電気刺激感覚の諸特性について述べている。

第3章では，第2章で求めた至適な電気刺激条件を用いて，義足の足底部と膝部からの情報を義足歩行者の下肢断端部へ伝達する感覚フィードバック系の開発と試作について述べ，種々の臨床評価試験によって明らかにされた感覚フィードバック系の有効性を明らかにしている。

第4章では，まず義足の遊脚運動の力学モデルを設定して理論解析を行い，つぎに，リハビリテーション訓練による歩容向上の学習過程を最適条件探索のためのアルゴリズムによるフィードバックゲイン調整過程として捉えた上で，確率的なゆらぎを含めたシミュレーション実験を行ない，現用義足による歩容向上の限界を越えて，膝感覚フィードバック機構をもつ義足が極めて有効であることを確認している。

第5章では，下肢断端部から得られる筋電信号により，義足歩行者自らの意志による操作性を義足

に付与するため，下肢運動系の力学モデルにもとづいて下肢関節のトルク量，パワー，エネルギー等に関する検討を行ない，歩行動作の有限個の状態モデルによる解析により，遊脚期における義足の膝の屈伸動作を能動的に制御する筋電制御義足系の設計と開発について述べている。

さらに，臨床評価実験により，その有効性を明らかにしている。

第6章では，リハビリテーション歩行訓練によって病的歩容パターンが将来どのように推移していくかを定量的，客観的に予測するために，有限マルコフ連鎖論を応用する方法を提案し，その有用性を実証している。

そこでは，まず歩幅，歩調を用いて歩容パターンを有限個の状態で表現するとともに，状態から状態への推移確率行列を，歩行障害をもつ種々の症例について実測データから算出し，得られた推移確率行列にもとづいて，歩行訓練による歩容推移の予測を行うとともに，歩行障害者の歩容パターンを，目標とする歩容パターンへ改善していくためのリハビリテーション訓練方式を提案している。

さらに，その応用実験の結果，この方法によって短期間に著しい歩容改善が得られることを実証している。

第7章は総括で，本論文に述べられた各研究を総合し，併わせて今後の課題について述べている。

論文の審査結果の要旨

本論文は義足の足底部と膝部に設けた人工受容器により，義足の足裏ならびに膝部の情報を下肢断端部を経て義足歩行者へ求心的に伝達するための感覚フィードバック系及び下肢断端部から得られる筋電信号により義足歩行者自身の意志にもとづく能動的（遠心的）な義足の膝運動を可能にするための筋電制御系，の両者を併わせ組み込んだよりalive な義足システムの開発と試作と有効性の評価に関する理論的，実験的研究をまとめたものである。得られた研究成果の大要はつぎの通りである。

(1) 義足の足底部と膝部に設けた人工受容器による感覚情報を電気刺激信号に変換して義足歩行者の下肢断端部へ的確かつ安全に伝達するための基礎的研究として，義足患者の大腿断端部および健常者の大腿部を対象とし，電気刺激の皮膚感覚特性について綿密な実験計画のもとに測定実験と要因分析を行ない，つぎのような結果を得ている。すなわち，絶対閾値に対してはパルス幅が決定的な影響を及ぼしていること，一般に患者断端部の絶対閾値は健常者大腿部におけるそれに比べておよそ1.5倍高いこと，個人差よりも大腿部における各部位間の有意差の方が大きいこと，定電圧刺激の印加は極度の発汗時においても危険を伴なわず感覚強度の変化も小さいこと，周波数条件は200 ppsまでは自由に採択できるという臨界条件が明らかになったこと等である。また，一方において心理物理的測定により，周波数次元で刺激を確実かつ的確に識別できる絶対識別能力の最大水準数は4段階前後であること，また相対識別能力の最大水準数は5段階であることを導いている。

(2) このような結果をふまえて，足圧分布および膝角度に関する感覚情報を検出するための人工受器とこれをそなえた感覚フィードバック装置の電子回路を設計するとともに，健常者による実験用の

模擬膝義足を試作し，これを装着した被験者による実地の評価試験を行った結果，つぎのような結論を得ている。

すなわち，足底部感覚フィードバックの効果については，義足による床面傾斜検知能力の向上，義足足裏の物体に対する大小判別能力の向上，義足側への体重負荷率の増大，等著しい有効性を確認している。また，膝感覚フィードバック装置は義足の踵の叩きつけ現象の軽減に役立つことを，この人工受容器のON，OFFによる比較測定により確認している。

(3) さらに，義足歩行のリハビリテーション訓練によって，より滑らかな遊脚運動を実現し，より安定せる歩容に到達するために膝感覚フィードバック機構が必要であることを明らかにしている。そのため，まず義足の遊脚運動の力学モデルを設定し，滑らかな遊脚運動と安定せる歩容を実現するという観点から，到達すべき目標としての理想状態と，調整すべきフィードバックゲインを具体的に述べ，ついでリハビリ訓練による義足歩行動作の学習過程を，最適条件探索のアルゴリズムによるフィードバックゲインの調整過程として捉え，各歩行サイクルごとの状態変数のバラツキを確率的なゆらぎで表現したモデルにもとづいて，的確なシミュレーション実験を行い，膝感覚フィードバックの有効性を検討している。その結果，膝感覚フィードバック系の有無によって義足歩行者が究極的に体得しうる歩容のパターンに著しい差違を生じること，また，現用義足では如何程訓練を続けても歩容の向上には限界があることを確認し，さらに，このシミュレーション結果は実地の測定による臨床的知見とも合致するものであることを確認している。

(4) つぎに，義足患者の下肢断端部から得られる筋電信号により，義足歩行者自身の意志にもとづいて遊脚期における義足の膝の屈伸動作を遠心的（能動的）に制御するための筋電制御義足を設計・試作し，適用評価実験を行っている。そこでは，まず，下肢運動系の力学モデルにもとづき，生体物理定数の近似値を想定した上で平坦地歩行時における下肢関節トルク量，パワー(工率)，エネルギーの検討を行ない，ついで歩行動作の有限個からなる状態モデルにもとづいて義足膝関節の動力化や駆動方式を検討している。このような検討結果にもとづいて筋電義足を設計し，立脚期には電磁ソレノイドで膝ロックを行わせるとともに，別途，遊脚期には別のソレノイドで下腿部を振らせるという電磁ソレイドの作動シーケンスについて述べ，その制御電子回路を設計し，ついで，試作した筋電制御義足系の有効性を確認するための適用評価実験を行っている。その結果，現用義足を装着した場合に比べて，著しい歩容の改善，膝折れ防止や雨道・坂道など滑り易い道での歩行安全性の向上，歩幅や歩行速度に対する随意性など筋電制御義足系が極めて有効であることを確認している。

(5) リハビリテーション歩行訓練によって病的歩容パターンが将来どのように推移していくかを定量的，客観的に予測するために有限マルコフ連鎖論を採用する方法を提案し，かつその有用性を実証している。そのため，まず歩容パターンを歩幅と歩調を用いたベクトル状態変数によって記述する方法について述べ，これを用いて有限マルコフ連鎖論における状態（states）を定義した上で，種々の病的症例ごとに実測データから推移確率行列の要素を数値によって算出している。

つぎに，このような推移確率行列に対して有限マルコフ連鎖の理論を応用し，病的歩容パターン

が歩行訓練によってどのような推移をたどるかの予測を行うとともに，算出された推移確率行列の要素のうちから，目標とする歩容パターンへの推移を確率的に阻害すると判定される状態を見出し，その阻害要因をリハビリテーション歩行訓練によって重点的，集中的，計画的に除去する方法を提案している。さらに，このような解析の結果をオン・ラインで直接用いながら自己修正的に歩行訓練を重ねていくフィードバック歩行訓練システムとその装置を開発し，その実地臨床応用を試みている。その結果として，かなり重度の歩行障害患者においても，歩容パターンが短期間で著しく改善されることを解析用としての$\overline{X}$管理図法によって確認，実証している。

以上，ウィーナーのサイバネティックスの実践とも云える本論文の研究成果は，生体医療工学に寄与するところが大であるのみならず，広く，工学の進歩発展に寄与するところが大きい。よって，本論文は，博士論文として価値あるものと認める。