

氏名 宮口 尚太

## 主論文審査の要旨

少子高齢化の急速な進行はあらゆる分野に影響を及ぼし、医療分野においても治療やリハビリテーションを支援・補助する技術の導入が喫緊の課題となっている。そのような技術の一つに CPM 装置がある。CPM(Continuous Passive Motion、持続的他動運動)とは、外傷後或いは手術後の関節を外部から連続的に動かして回復を促進する整形外科の治療法である。患部をギブスで固定し治療後にリハビリテーションを行う従来法に比し、拘縮の予防・損傷関節の治癒と再生の促進・関節可動域 (ROM) の確保など格段の効果があることが確認されている。

現在、医療現場では下肢用 CPM 装置が頻用されているが、上肢用 CPM 装置の臨床例は少ない。臨床で試みられている上肢用 CPM 装置は、下肢用 CPM 装置と同じく、1 自由度で伸展・屈曲のみの動作を行うものである。しかし、肘関節は尺骨と橈骨、上腕骨からなる複雑な関節であり、1 自由度の CPM 装置と構造的に異なり、また装置の動作に伴う骨格や骨格に付着する関節組織の動作も解明されていない。この構造的差異により、ROM を超過して動作したり、ROM 限界付近で患者からの反力が過大になる等の問題が生じ、これらが上肢用 CPM 装置の臨床例が少ない要因となっている。そこで、疾患によって制限された ROM 限界を超えることなく、かつ CPM 中の疾患部の変化に適応可能な新たな CPM 装置が求められる。

これに対し、本研究では、伸展・屈曲および回内・回外動作を同時に実現する機構を有する CPM 装置を製作し、疾患で制限された ROM 限界を予測して伸展・屈曲に応じて回内・回外動作を制御することにより、手先反力を抑制し、疾患の状態変化に適応できる CPM 装置の新たな制御スキームとアルゴリズムを提案している。

本論文は、全 6 章から構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、上肢用 CPM 装置の意義と課題を指摘し、本研究の目的を述べている。

第 2 章では、従来の上肢用 CPM 装置において、回内・回外動作を拘束／非拘束する場合に関節運動を計測・解析してその特徴を明らかにし、これを基に従来の上肢用 CPM 装置が持つ課題の解決の方向性を示している。

第 3 章では、健常者の動作を規範軌道とすることで手先反力が抑制可能であることを指摘した後、健常者の運動を疾患患者に行わせるための 2 自由度 CPM 装置を製作し、インピーダンス制御則を導入している。提案制御系の有効性を検証するため、模擬疾患患者に対して実験を行い、健常者の軌道へ近づき手先反力が抑制されることを確認している。

第 4 章では、医療従事者が診断に基づき骨や靭帯などの動作制限を設定できる軌道生成を提案している。肘関節内の尺側側副靭帯 (UCL) の術式後の拘縮に対し、伸展・屈曲において手先反力と UCL 伸長を抑制し、治癒後に自然な回内・回外動作を実現する軌道生成法を考案している。まず、上肢の骨格モデルを導入し、その運動学に基づいて UCL 伸長の上限值が回内角の上限值に変換されることを明らかにし、次にこの回内角の上限值と ROM 終端における手先反力を抑制する目標軌道の生成法を提示し、その有効性を実験的に検証している。

第 5 章では、術後直後の関節状態が CPM 訓練中でも変化することから、往復ごとの患者自身の軌道に基づく目標軌道の更新則を提案し、前章までに提案した制御則と組み合わせて、疾患の状態変化に適応できる CPM 装置の新たな制御スキームを提案している。

第6章では、本論文の成果とその有意義性、および今後の課題等について述べている。

以上、本論文では、上肢のバイオメカニクスに基づき、疾患がもたらす ROM 限界を侵さずに、かつ CPM 中の疾患部の変化に適応可能な新たな制御スキームとアルゴリズムを提案し、模擬疾患者を対象にその効果の実験的検証を行っている。本研究は、伸展・屈曲に対して自然に回内・回外運動が起こるといった人間の上肢運動の特徴を初めて明らかにしたこと、軌道生成あるいはその軌道の制約に上肢骨格モデルを用いたこと、制御系を用いることで現場のノウハウを反映しやすく疾患の状態変化に適応できる階層的な制御系を提案したことなど、学術的にも臨床的にも大きな意義を持つ。本研究のように、上肢用 CPM 装置がこれまで臨床例が少なかった阻害要因を医学的知識と工学技術の融合により解決したことは、今後の医工連携による課題解決の一つの礎となると期待される。

したがって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

#### 最終試験の結果の要旨

審査委員会は、学位論文提出者に対して、当該専門分野及び関連学問分野について口頭により試験を行った。その結果、学位論文提出者は上記分野に関して十分な知識と理解力を有するものと判定した。また、外国語に関しては、国際会議での多くの発表がなされていることから、十分な能力を有していると判定した。以上の結果に基づき、最終試験は合格と判定した。

#### 4 学位授与の可否及び授与すべき学位の種類

学位授与  可  否 （いずれかを○で囲むこと。）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

#### 審査委員会

審査委員	情報電気電子工学専攻人間環境情報講座担当教授	上田 裕市
審査委員	情報電気電子工学専攻人間環境情報講座担当教授	村山 伸樹
審査委員	産業創造工学専攻先端機械システム講座担当教授	中西 義孝
審査委員	情報電気電子工学専攻人間環境情報講座担当准教授	松永 信智
審査委員	熊本大学名誉教授	川路 茂保