

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目 バイオメカニクスに基づく上肢用 CPM 装置の制御に関する研究

熊本大学大学院自然科学研究科 情報電気電子工学専攻 人間環境情報講座
(主任指導 川路茂保教授 松永信智准教授)

論文提出者 宮口 尚太

主論文要旨

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て、拘縮の予防・損傷関節の治癒と再生の促進・関節可動域 (ROM) の確保において格段の効果が確認されている。

現在、医療現場では下肢用 CPM 装置が頻用されているものの、上肢用 CPM 装置の臨床例は少ない。臨床で試みられている肘用 CPM 装置は下肢用と同じく、1 自由度で伸展・屈曲のみの動作を行うものが多い。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、1 自由度の CPM 装置と構造的に異なる。CPM 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が不明であり、この構造的差異により、ROM を超過して動作する、スティフネスの増大により ROM 限界付近で患者からの反力が過大になるなどの問題が生じる。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・回外運動を同時に実現する機構を有する CPM 装置を製作し、伸展・屈曲において回内・回外を制御することにより、疾患で制限された ROM 限界を予測して手先反力を抑制し、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する。

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る。

第 2 章では、従来の上肢用 CPM 装置の運動を、回内・回外動作を拘束／非拘束する場合ごとに計測・解析して、健常者の関節動作の特徴を明らかにする。これをもとに、従来の上肢用 CPM 装置が持つ課題を解決する方向性を示す。

第 3 章では、健常者の軌道を描くことで手先反力を抑制可能であることを指摘した後、健常動作を疾患患者に行わせるための 2 自由度 CPM 装置を製作し、柔らかな動作を実現するインピーダンス制御則を提案する。提案した制御則の有効性を検証するため、模擬疾患患者に対する実験を行い、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する。

骨や靭帯に疾患を持つ場合、これらの関節組織が過大に動作されないよう CPM 装置を制御す

る必要があるが、自動的にこの動作制限を設定することは安全上の観点から避けるべきである。そこで、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ような軌道生成が望ましい。第4章では、肘関節の尺側側副靭帯(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提案する。まず、UCLの伸長を推定するためにKecskemethyによる骨格モデルを導入する。次にそのモデルに基づいてUCL伸長の上限値を任意に設定でき、ROM終端における手先反力を抑制可能な目標軌道を設計し、本軌道の有効性を実験により検証する。

第5章では、関節が術後直後の数分から数時間で状態変化することから、患者自身の往復ごとに描く軌道に基づき目標軌道を更新する手法を提案し、インピーダンス制御則とを組み合わせ、目標軌道を統合するCPM装置の新たな制御スキームを提案する。

第6章では、本論文の成果と有意義性、今後の課題等について述べる。以上、本論文では、医療従事者により与えられる関節組織の動作制限値を用いて上肢骨格モデルにより疾患で制限されたROM限界を予測し、予測したROM内で手先反力を抑制するCPM装置の新たな回内・回外の制御スキームを提案している。本研究で提案した回内・回外の制御は、従来のCPM装置にない新規なものであり、提案手法から派生する新たな制御手法が今後活発に展開されると思われる。この意味において、本論文で提案した上肢用CPM装置における回内・回外の制御スキームは学術的にも医療現場での有用性の上からも極めて意義が大きいものである。