

氏名	千葉 馨
学位名	博士（システム情報科学）
学位記番号	第38号
学位授与年月日	平成30年9月20日
学位論文題目	脳血管疾患後遺症の片麻痺患者に適用する家庭用手指リハビリテーション支援装置の基礎的研究
論文審査委員	主査 三上 貞芳
	副査 藤野 雄一
	副査 櫻沢 繁
	副査 鈴木 昭二
	副査 石田 裕二（北海道文教大学）

論文要旨

近年の医学の進歩はめざましく、人工多能性幹細胞培養（iPS細胞）を用いヒトの臓器を試作するレベルに突入している。リハビリテーション分野において脳血管障害における脳のダメージや外傷による脊髄損傷の脊髄神経の損傷等の再生など多大な期待が寄せられている。脳は人間の機能を司る最高中枢とされ、機能局在と呼ばれる区域によって分けられている。脳や脊髄は人間の運動の源となる中枢神経でありこれら神経のダメージは不可逆的なものであるとされ、後遺症に苦しむ患者が多くいる。特に前頭葉における運動野の障害は運動麻痺としてヒトの随意的な運動を停止させ、頭頂葉における感覚野の障害は外界からの感覚入力を遮断するため日常生活において多大な支障を来し、人間ならではの生活の質を低下させることとなる。このiPS細胞の研究により細胞が再生されるのであればダメージを受けた中枢神経の働きが再獲得されるのではないかと考えるが、その道のりは現段階では陰しく想像を超える障壁があることも想像に難くない。

一方で、近年のニューロリハビリテーションの知見として、適切なリハビリテーションによって、失われた運動機能を代替するように脳の神経回路網が再生・再構築されるという事実が知られている。このことは、適切なリハビリテーションを長く継続することの重要性を改めて浮き彫りにしている。

中枢神経のリハビリテーションによる機能回復に関して、医療ロボティクスの分野が注目されている。この分野についてリハビリテーションが注目する理由は患者自身の意思や随意的な運動を微弱な段階においても惹起させ増幅しうる因子が包括されていることにあ

る。

普段ヒトの日常生活動作は随意的に行われている。しかしそれは無意識レベルの運動が幾層にも組み合わされた脳のプログラムによるものであり、それを言語化することは非常に難しい。例えば脳のダメージにより上肢が障害された場合、指一本を動かすことについての説明ができないことがこのことを証明する。また下肢が障害された場合でも同様であり、歩行するにいたる方法を語るができない。このような場合に患者に動作を提示する方法の一つは、生体信号の可視化によって、意思による指令が行き届いていることを実感させることである。この方法はバイオフィードバックと呼ばれ、長年研究されてきた。しかし、どのような手順で提示すべきかなど、バイオフィードバックの明確な適用理論はまだ確立されていない。

リハビリテーションにおける随意的な動作を再学習、再獲得するためには、意思の元により運動が起こり、その結果を表現することで遂行状態を知り、目的到達という結果を得るというループを擬似的に再現させることが必要である。しかし一見簡単に見えるこの動作生成のループも、片麻痺等の患者にとっては、意思による運動の結果が見えないなどの理由で、きわめて困難なものといえる。

そこで、生体により発せられた何らかの信号を明示することにより、患者に擬似的に動作の様子を確認させ、それを運動に反映させるというアプローチが考えられる。この手法は医療ロボティクスにより実現可能となりつつある。もしこれが簡便で安価で行えたならば、セルフリハビリテーションの普及が進むと考えられる。

わが国のリハビリテーションは医療費や介護保険の削減を理由により実施に上限が設けられている。後遺症があってもその上限日数を迎えることで不自由な体で不自由な生活を余儀なくされる。医療ロボティクスは、この上限を超えるリハビリテーションをセルフリハビリテーションによって助け、機能回復を補助する道筋となりうる。著者はリハビリテーションの分野に携わるものとして、このことに着目し、脳血管疾患における家庭用リハビリテーションの開発について提言したいと考えた。

片麻痺のリハビリテーションは50年前という古くから神経筋促通法（ファシリテーションテクニック）として長年研究されてきた。しかし一定の治療的根拠（エビデンス）が確立されていないのが現状である。麻痺は発達学的に粗大な運動を行う体幹に近い筋肉から回復が促されることは定説となっている。このため上肢においては体幹から遠位にある手指の回復が非常に遅く、治療に時間がかかることもあり治療をあきらめてしまうセラピストも多く、実際に治療がなされないまま放置されるケースも少なくない。しかし手指の麻痺が残って長年経過したケースにおいて根気強く反復練習運動練習や感覚入力を行った結果、手指の機能回復を遂げた例も経験されていることから、著者は“体幹から近い筋からアプローチする”という定石に疑問を抱いてきた。人間発達学的に考えれば小児の手足の発達には近位筋から粗大な動きの獲得を経て手指の巧緻性を獲得するのであるが、脳血管疾患の後遺症を受けたケースはその過程を経た成人である。粗大な動きであれば簡単なフィ

ードバックで再獲得が可能である。しかし日常生活で“目的的な動作を促す＝手指からの動きを促す”ことでその治療期間を短縮できる例は多く経験されている。

そこで、本研究では、手指の動きを促すことで上肢全体の機能回復を狙うというアプローチを提案し、これをロボット補助リハビリテーションとして実現することで、治療期間の短縮や機能の再獲得を日常生活で実現することを目標とすることとした。

本研究は、指先のリハビリテーション支援装置を提案することをテーマとし、この提案が妥当なのかを研究するものである。結果は以下3つにまとめられる。(1) 家庭での使用を可能とした指先リハビリテーション支援ロボット装置を提案した。(2) 神経伝導テストによる実験で、指先から感覚入力をした場合、多指の筋の緊張が抑制されることを見出した。この筋緊張の抑制は、指先の巧緻性動作に欠かせない因子であることが確認され、開発を提案したデバイスは指先のリハビリテーションに有効であることがわかった。(3) 指先発生力と肘発生力の相互学習に関する実験により、指先の運動機能学習が上肢の運動機能学習の促進に寄与し得ることを明らかにした。これにより指先のリハビリテーションデバイスが、上肢全体のリハビリテーションに寄与し得るという可能性を見出し、家庭用リハビリサポート装置の設計として指先を対象とすることの妥当性が得られた。

現時点で開発されているリハビリテーション支援ロボット装置は、大変高価で大型のものであり、家庭でのセルフリハビリテーションには利用できない。本研究で提案し、その有用性の根拠が示された家庭向け指先リハビリテーションデバイスは安価で簡便な装置である。この研究成果は家庭での正しく効果的なリハビリテーションの継続に貢献できるものと考えている。

キーワード： 手指リハビリテーション, 誘発筋電位 F 波, 脳血管疾患,
リハビリテーションロボティクス

審査結果の要旨

本論文は、脳血管疾患による片麻痺患者に対して、(1)上肢の機能回復を実現するための自動化可能なシンプルな手順を提案し、(2)それを自動化させるハードウェアを提案し、(3)その設計の妥当性を実験により検証した結果を論じたものである。

片麻痺患者の上肢の機能回復を目的としたリハビリテーションにおいては、麻痺の回復を発達学的に粗大な運動を行う体幹に近い筋肉から促すという定説に基づいて行われている。機能回復のためのリハビリテーションを長く継続させることが望ましいという点からは、このようなリハビリテーションを在宅で、専門家の補助なしで患者あるいは家族が実

施できることが望ましい。

そのため近年では医療ロボティクスの分野において、表面筋電位等により患者の随意動作の発生およびその強度を検出し、上肢あるいは下肢をモータアシストで持ち上げ、自身の体の動きを感じさせ、動作の結果を提示する形のリハビリテーションロボット装置が多く提案されている。

しかし現在提案されているこれら装置は、麻痺の回復を発達学的に粗大な運動を行う体幹に近い筋肉から促すという定説に基づいて、上肢あるいは下肢の体幹に近い部分のアシストを目的としているため、装置が大掛かりであり、さらに表面筋電位等、療法士による調整やサポートが必要であるものがほとんどである。

これに対して申請者千葉は、本論文において、上肢ではなく指先の制御にかかわる脳領域の大きさに注目し、指先のみに対する集中的なリハビリテーションを行う手法を提案している。そのために、(1)受動的な指の屈曲ではなく、随意的に持ち上げさせることで、運動と結果の関連を再獲得させる方法、(2)手指先端で能動探索を行わせることで麻痺を軽減させる方法、を提案している。

論文では、これらの方法が家庭にも設置できるような小型のハードウェアに実現できることを論じている。具体的には、(1)手指を載せる鍵盤、(2)示指に組み込まれた能動探索提示装置、(3)各鍵盤に組み込まれた力センサ、(4)示指の持ち上げを補助するモータを用意したハードウェアを提案している。

具体的な手順として、(1)鍵盤に手指を載せ、示指でなぞるパターンを1つ提示し、そのパターンを当ててもらった課題を行い、(2)示指を自力で持ち上げを指示し、(3)その間に他の指が発生する力を測定し、(4)持ち上げが不十分と判断した場合に、示指の持ち上げをモータアシストし、(5)(3)で測定した結果に基づいた患者の症状の改善度を提示する、という手順を明らかにしている。

これらは設置や利用が容易であり、また(3)で手指の運動の分離度を測り、これによる回復度の評価を患者に提示することで、装置を仮定に設置し療法士等の補助を利用せずに継続的にリハビリテーションを利用する環境が提供できる点で意義が大きい。

本論文の後半では、この提案の妥当性を、2つの実験により明らかにした結果を述べている。

最初の実験では、手指先端で能動探索を行うことで、多指の筋の緊張が抑制され、指先の巧緻性動作の改善に有効な効果が得られることを示している。このために申請者は、指先で凹凸図形を識別する能動探索課題を行わせながら、誘導筋電位により脊髄の活性度を調べる実験を提案し、健常者での実験により仮説の正当性を明らかにしている。

続く実験では、指先のリハビリテーションが上肢のリハビリテーションに寄与しうる可能性を明らかにしている。このために申請者は、手指で発生させる力の調整の運動学習と、肘発生力の調整の運動学習の相互影響を測る実験を提案し、健常者での実験により手指の運動学習が肘発生力の運動学習に転移している可能性を示し、仮説の正当性を明らかにし

ている。

以上のような研究の展開，成果は，家庭で利用できる片麻痺リハビリテーションの新しい手順，およびそのロボット装置による実現の設計指針を与える新規なものであり，検証手法も妥当であると判断した。

総括すると，この論文は知能情報および情報システムの分野である医療ロボティクスの分野にかかわるものであり，論じる内容は，新しい手法の提案，それに基づいた装置の設計の提案，その妥当性の検証である。得られた知見は，主著者として査読のある国際会議1件，および査読のある国際論文誌に1件採択され，正当性の評価を受けている。また共同研究者として数多くの学会発表等を行っており，今後のシステム情報科学分野の研究の進歩に貢献し得るものと判断した。

以上より，システム情報科学分野での新しい成果として意義があると判断し，学位論文として十分値するものと結論する。