

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01462

研究課題名(和文) 脳卒中上肢リハビリ支援のためのバイラテラルマスタスレーブ型ロボット装具の開発

研究課題名(英文) Development of bilateral robotic orthosis for post stroke rehabilitation

研究代表者

坂井 伸朗 (Sakai, Nobuo)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60346814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：脳卒中運動治療の基本となる骨盤運動を基軸とし、療法士がバイラテラル制御により力覚を感じながら運動促進するための到達把持運動治療用の骨盤運動支援用双方向力覚フィードバックロボット装具の開発を行なった。ロボットシステムでは外乱オブザーバ・加速度型のバイラテラル制御により精密な双方向力覚を可能とした。本研究では当初のハンドルとスレーブデバイスである骨盤ロボット装具に加え、もう一台骨盤ロボット装具を備えることで、療法士がそれを装着しながら患者へ運動提示可能とした。無線センサ化把持ブロックについては、ロボットとの協調と並び単独運用の効果が期待されたため、健常者50名での把持様式の解析を行なった。

研究成果の概要(英文)：One of the first rehabilitation menus in post-stroke therapy is to recover the stability of pelvis motion before moving to other tasks. In the facilitation of patient's movement, therapists need delicate force sensation to control patient's body. So, we developed the robotic pelvis orthosis with bilateral control by disturbance observer and acceleration based control to realize precise force and motion control. In this study, the slave robotic orthosis for a patient was connected with the master control wheel as a basic configuration. And, additional master robotic orthosis for therapist was introduced to project the body motion. The new wireless sensor block for the training of the reach to grasp tasks would be expected not only as the cooperative operation with the robotic orthosis but also as the independent device for clinical settings. The sensor wireless block was evaluated by the experimental analysis of reach-to-grasp motion among 50 healthy subjects.

研究分野：生体医工学

キーワード：脳卒中 リハビリテーション 装着ロボット バイラテラル制御 理学療法 作業療法

1. 研究開始当初の背景

MIT Manus システムに見られるような上肢到達運動リハビリ支援ロボットは繰返し動作のほか、特に力覚を含むセンサを活用した感覚運動神経系の回復モニタリングと、その情報をフィードバックし到達把持運動を支援する運動療法技術体系への発展が期待されている。

日常動作における上肢の役割の一つは、様々な上肢動作の基本となる到達把持である。到達把持運動は上肢の機能と捕らえがちであるが、骨盤の安定、体幹の制御、重心移動、肩甲骨の安定といった一連の動作が必要である。さらに脳卒中リハビリにおいては、各関節運動の単独運動だけでなく協調運動も重要であり、上肢リハビリでは肢部の根元である体幹と骨盤の安定が得られてこそ到達把持といった運動が可能となる。上肢到達把持リハビリにおいては、療法士が背面から肩甲骨を把持しており、上肢の根元部位と体幹を同時に制御する。

脳卒中患者は腕部持ち上げ時に神経系に由来する肘屈曲を誘発し、到達運動を妨げる特徴的な動作を行うため、療法士は神経生理学的視点で多種の病的様態を緩和しながら、力の必要な体幹の安定と前腕部運動促進を含め多くの筋骨格運動の制御を同時に行う必要がある。運動療法が可能なのは、パワーアシストや自立支援用ロボットといった外部対象物の操作ではなく身体運動への介入を目的とする。よって、バイオメカニズム的視点をより積極的に適用することが望まれる。

運動療法の現場で直接患者と向き合うのは療法士であり、リハビリロボットはまず療法士に受け入れられる必要がある。そこで、著者らはこれまでに研究協力者である療法士らと、上肢到達把持運動の体幹運動追従可能な体幹運動(骨盤前後傾+体幹屈曲・回旋・側屈+肩甲骨運動)のためのロボットシステムを提案した。このモデルは体幹部に前後屈曲、左右揺動、ひねりの各動作のための運動軸を有し、肩甲骨運動を含めた体幹の動きを含む日常生活での様々な方向への到達運動に対応しうる構成である。

前記システムを構成するにあたり、著者らが改めて痛感したのは上肢のリハビリ以前に上肢を支える体幹運動の治療がリハビリメニューにあり、さらにその最初が骨盤運動であるということである。骨盤運動は着座や下肢(歩行)のリハビリにおいても重要であることは言うまでもなく、身体運動の基本要素として中心となる一つの運動要素である。全身運動の要となる部位であるため、その荷重負荷も大きい。脳卒中リハビリは全身協調運動の再学習とも言えるため、上肢到達把持であっても骨盤から体幹の運動促進が同時になされなければならない、療法士にとって労を要する。運動療法において重要な要素となるのは言うまでもなく療法士の力覚である。

ここでは、骨盤運動を療法士が双方向力覚フィードバックを用いて運動促進するロボットシステムの開発が望まれる。

2. 研究の目的

本研究において行なう事は、①脳卒中運動治療の基本となる骨盤運動を基軸とし、療法士がバイラテラル制御により力覚を感じながら運動促進するための到達把持運動治療用の双方向力覚フィードバックロボット装具の開発を行なうことである。さらに開発されたシステムに対し、身体運動を促進する場合における運動を双方向力覚フィードバックを最大限に活用しながら定量化・解析し、力覚に頼る施術法に対し「見える化」を推進することである。

運動療法は療法士の経験に拠る部分も少なくない。運動療法用ロボットの研究は、療法士がどのような手技を使っているかを、ロボット装具ならではの手法(センシング)で明確にしながらいかに定量的に評価することとも言える。また装着型ロボットでは、装着性が重要な課題であると我々は考えている。身体運動に非常に密着した外骨格機構を提案し、これにより精密な運動療法が可能となる。本研究はバイオメカニズムや運動療法学との融合的研究であり、知能機械技術を用いた実機による検証は、最も具現化された実証法であると著者は考えている。

3. 研究の方法

双方向力覚フィードバックとは、マスタスレーブ装置において両側から相手へ力を伝達することが出来るバイラテラル制御と呼ばれる制御法のことである。本研究では前述のように、骨盤を基軸とした双方向力覚フィードバック型マスタスレーブロボット装具を開発することである。骨盤ハンドリングの労力を低減させる効果以上に、療法士らはマスタハンドルへ運動を拡大して提示する感覚増強装置としての効果を求めた点が興味深い。骨盤運動等の身体運動への導入は、療法士らが患者をハンドリングする際に掴む「キーポイント」と呼ばれる部位で駆動する構成とし、ロボット運動軸はモーションキャプチャにより最適位置を決定することとした。本研究は、単にロボット技術を導入するだけではなく、運動療法手技そのものを観察しロボットシステムとして再構成することが求められ、開発を通じた医療技術そのものの定量的な理解にもつながることが期待される。

(1) 力覚センサ併用の加速度型バイラテラル制御の導入

本研究での双方向力覚型ロボット装具では、高品質な力覚が求められる。そこで高分解能なエンコーダにより繊細な力加減を表現可能な制御として外乱オブザーバ・加速度型と呼ばれる制御手法がある。これを用いな

が力センサから先のハンドル等の物体の加速度を計測しハンドル部の外力を正確に求める手法併用して、リハビリテーションに耐えうる高性能な力覚を得るシステムの開発を行なうことを計画した。療法士らは本ロボットを感覚増強装置としても見ており、力覚伝達は本ロボット装具において非常に重要な要素である。よって、本ロボット装具に、感覚増強機構を導入することで、より患者の運動を繊細に療法士に伝達可能な双方向力覚フィードバックシステムを構成し、療法士らの評価の下で運動療法におけるロボットの位置と力の最良なハンドルへの伝達率で運動支援を行なう。

(2) 無線化把持物の開発とロボットへの統合

臨床においてリハビリを行うためにはロボットといった要素技術に加え周辺要素があって初めて可能となる物である。本項目では、把持物に到達運動開始シグナルや加速度センサ、触覚センサ、位置センサを埋込んだ、無線通信可能な計測統合ブロックを開発し、ロボットシステムと統合する。これにより、到達把持において骨盤と反対にあるハンド部の運動時間等を定量測定し回復状態をモニタリングする。当該内容は、単独でも機能するシステムとして構成する計画である。

(3) 到達把持運動時のロボットによる運動計測

過去に様々なリハビリ支援ロボットが開発されてきた。本研究の結果は、臨床導入可能なシステムとして評価されることである。そのためには、本ロボット装具を用いながら、到達把持リハビリ時のハンドリング手法を計測・解析し定量化可能な状態を目指すことである。申請者はリハビリの自動化は現状では想定していないが、力覚をリアルタイムでも表示可能となることで、口頭での伝達以上に、多様な患者に的確に対応可能な定量的リハビリが可能となると考えている。

4. 研究成果

本研究のような身体を外部より運動させるためには、身体により密接した接触でなければならない。一方、身体に対する密接な接触は本来の身体の自由な運動に対し制限を加える可能性もある。そこでこれらの相反す

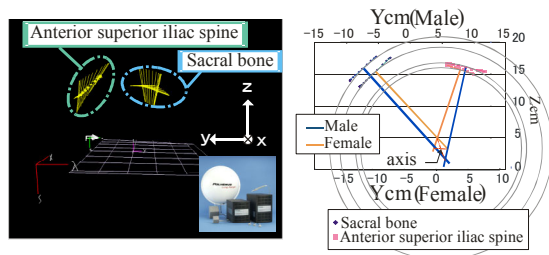


Fig.1 骨盤運動測定の概略図。運動軌道から回転中心を幾何学的に求めた

る要件を満たすためには、装着装具型とすることで密接な接触を確保しつつ、身体運動に十分に適合しうる装具運動の生成が求められる。そこで、3次元磁気型モーションキャプチャを用い、着座状態において座面での転がり運動も含む骨盤運動の解析を行なった。モーション解析を行なう部位は、療法士等がキーポイントと呼ぶ、患者の身体運動を制御する際に掴む位置より、骨盤における骨棘（仙骨、上前腸骨棘）の運動を取得し、運動軸を求めた。骨盤運動解析の図例を Fig. 1 に示す。

本研究では当初ハンドルにより到達把持運動時の運動促痛を行なう計画であったが、本ロボットの開発中に、骨盤装着ロボットを2台作成し、療法士が1台に装着し、もう一台を患者に装着するアイデアを当初のシステム案に加えて考案した。これにより療法士が側面や対面で患者に対し運動を視覚的に提示しながら、療法士が装着した骨盤ロボット装具により力覚を感じながら患者へ運動提示も行い、このとき療法士は上肢が自由のため、さらに到達の次に行なわれる把持に対しての治療も可能となる構成である。また、当初のハンドルもそのままシステムに残す事で、第3者が患者と療法士の運動感覚を得ることができ、また、介入も可能となると考えられる。これを実現するに、マスタ・スレーブに加え第3者も加えた3つの機材間での相互力覚を行なう制御を構成した。この3者間相互伝達力覚システムの写真を Fig. 2 に、概略図を Fig. 3 に示す。

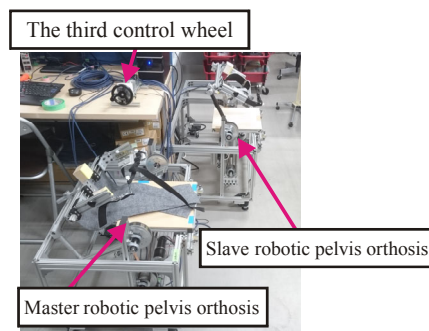


Fig.2 骨盤装着ロボット装具2台と第3者操作のための操作ハンドルの写真

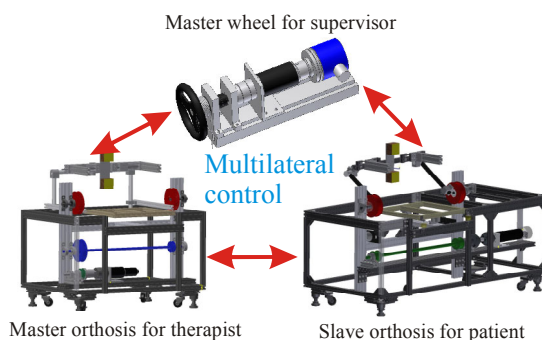


Fig.3 3者間力覚伝達システムの概略図

これらのシステムを用い、Fig. 4 に示す様に2台の装着ロボットにおいて、一方の装着者が到達把持運動における力覚を伴う骨盤運動の提示を行ない、もう一方の骨盤ロボット装具を装着した実験者に到達把持運動を促した実験を行なった例を示す。写真において手前の装着者がマスタであるが、本実験では力伝達ならびに移動量は等価であり、制御手法においても並列型であると考えられるため、マスタとスレーブの関係はない。

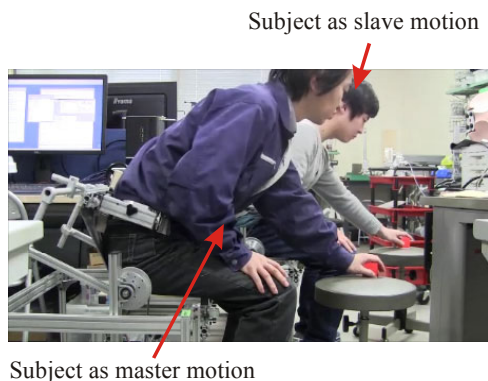


Fig.4 2台の骨盤装着ロボット装具を用いた実験者への運動提示を行なう写真例

2台の装着ロボットは双方向力覚伝達されたシステムであるので、双方の運動が記録されるだけでなく、双方が伝えあう力もロボット制御に取入れられたセンシング能力により可視化可能である。Fig. 5 にマスタである運動提示者とスレーブである実験者間で双方向力覚で運動提示を行なった時の骨盤前傾角ならびに双方の力をグラフ化した結果を示す。

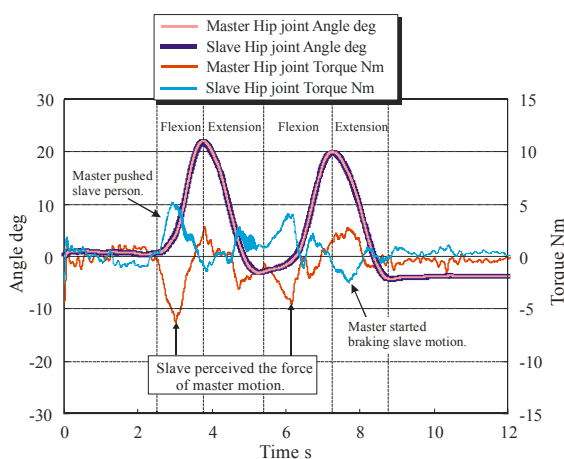


Fig.5 2台の骨盤装着ロボット装具における運動ならびに力の可視化例

この例では、双方向力覚を持つ構成が発揮され、位置だけでなく相互の力をやりとりしていることが分かる。制御開始からおよそ2.5秒後の屈曲動作の開始時にマスタスレー

ブ共に大きなトルクが掛かるが、途中から減少している。これはマスタの屈曲動作開始によりスレーブに屈曲を促す制御力が加わり、屈曲動作の途中でマスタの制御力を知覚したスレーブが自ら屈曲動作を開始したためであると考えられる。そして屈曲動作を終えると共に再び大きなトルクが生じているのは、マスタが屈曲動作を終えた際スレーブに屈曲動作の停止を促すための制御力が生じたためであると考えられる。マスタの制御力により、スレーブに骨盤運動を促し、スレーブはマスタからの制御力を感じながら運動が行うことができていることから、本ロボット装具を用いることでリハビリ治療に不可欠な力覚を提示しながら、患者の骨盤運動の制御が可能であると考えられる。

次に、本研究を進める中で改めて見いだした別の見識として、加速度センサ・タッチセンサ・位置センサを組込んだ無線型把持物は、それ単独でも十分に臨床において有用となることが見いだされた。ロボットを用いた実験と並び、メカトロセンシング機能を生かすことで、患者の運動様式の解析のみでなく、ヒト到達把持運動そのものの理解にも繋がることが期待された。また、把持物持ち上げ時において、外部デバイスへのトリガが可能となる、ブロック底面への距離測定装置を組込んだブロックの開発も行い、現在、経頭蓋磁気刺激と組合わせた研究が進められている。このブロックを用い、まず健常者50名について左右肢の到達把持運動時間を座面および足底反力計と同時に計測し、健常者においては左右肢において、到達時間そのものについては平均的には有意差はない事、個人内検定で左右肢での有意差の無い被験者は到達位置（距離）においても到達時間に差がないことなど興味深い結果が見いだされた。このブロック単体実験は、骨盤装着型ロボット装具と併せ、到達運動そのものより深い理解に繋がることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

① Nobuo Sakai, et.al., Transitional behaviour between biphasic lubrication and soft elastohydrodynamic lubrication of poly(vinyl alcohol) hydrogel using microelectromechanical system pressure sensor, *Biosurface and Biotribology*, 査読有, Vol.4, pp24-33, 2018.

② 中光神一, 坂井伸朗ら, 両側同時発生の上腕骨近位端骨折患者において、振り子運動可能な肩装具が手術後の固定とリハビリテーションに有用であった1例, *臨床整形外科*, 査読有, vol.51, pp763-768, 2016.

③ Nobuo Sakai, et.al., A functional effect of the superficial mechanical properties of articular cartilage as a load bearing system in a sliding condition, *Biosurface and Biotribology*, 査読有,

Vol.2, pp26-39, 2015.

④ Keiichiro Kume, Nobuo Sakai, et.al., Development of a novel endoscopic manipulation system: the Endoscopic Operation Robot ver. 3, Endoscopy, 査読有, vol.47, pp815-819, 2015.

〔学会発表〕(計 18 件)

①和田宗一郎, 林克樹, 坂井伸朗ら, ワイヤレス把持用デバイスを用いた到達把持運動の測定機器の開発—健常者における到達・把持時間の分析, 第 52 回日本作業療法学会, 2018 年 9 月 7~9 日, 名古屋市 (採択済)

②坂井伸朗, 林克樹ら, 脳卒中上肢リハビリ支援のためのロボット装具の開発, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2018, 2018 年 6 月 5 日, 北九州市

③ Nobuo Sakai, Katsuki Hayashi, et.al., Development of robotic orthosis for stroke rehabilitation, The 10th International Biotribology Forum, 2018 年 3 月 17 日, 熊本市

④坂井伸朗, 林克樹ら, 脳卒中上肢リハビリ支援のためのロボット装具の開発, 2017 年 11 月 5 日, 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, 別府市

⑤坂井伸朗ら, ロッカーファンクションによる筋骨格型ロボット歩行シミュレータの開発, 2017 年 11 月 5 日, 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, 別府市

⑥徳一宏晃, 坂井伸朗ら, ロッカーファンクションにより構築した筋骨格型ロボット歩行シミュレータの動力学数値解析, 2017 年 11 月 5 日, 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, 別府市

⑦ Nobuo Sakai, Katsuki Hayashi, et.al., DEVELOPMENT OF BILATERAL ROBOTIC PELVIS ORTHOSIS FOR POST STROKE REHABILITATION, 2017 年 7 月 23 日, オーストラリアブリスベン

⑧古場友貴, 林克樹, 坂井伸朗ら, 脳卒中被殻損傷患者の到達把持動作時の肩甲骨・体幹運動の特徴, 第 42 回日本脳卒中学会学術集会, 2017 年 3 月 16 日, 大阪市

⑨坂井伸朗, リハビリ・バイオメカのためのロボット開発の試み, 大山リハビリテーション病院講演会, 2016 年 9 月 23 日, 鳥取県大山

⑩坂井伸朗, 医療・リハビリへのメカトロ手法応用の取組み, 第 7 回社会ロボット具現化ワークショップ, 2016 年 6 月 21 日, 北九州市

⑪松井政憲, 坂井伸朗ら, 筋骨格型ヒト歩行シミュレータの開発, 日本機械学会第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 2016 年 1 月 9 日, 東京都

⑫ Nobuo Sakai, et.al., The musculoskeletal walking simulator, International Conference on Bioelectronics, Biosensors Biomedical Devices, BioMEMS/MEMS and Applications 2015, 2015 年 12 月 9 日, 福岡市

⑬坂井伸朗, 林克樹ら, ロボット装具を用い

た到達把持運動における肩甲骨—体幹系の運動測定, 第 5 回日本ロボットリハビリテーション・ケア研究会, 2015 年 7 月 11 日, 沼津市

⑭古場友貴, 林克樹, 坂井伸朗ら, 脳卒中片麻痺患者の到達把持動作時の肩甲骨・体幹機能の分析—上肢治療用ロボット開発, 第 49 回日本作業療法学会, 2015 年 6 月 19 日, 神戸市

⑮松田貴郁, 林克樹, 坂井伸朗ら, 脳卒中片麻痺患者の上肢治療用ロボット—到達把持動作時の上肢と体幹の運動の特徴, 第 49 回日本作業療法学会, 2015 年 6 月 19 日, 神戸市

⑯涌野広行, 林克樹, 坂井伸朗ら, 脳卒中片麻痺患者の到達把持動作における肩甲骨・体幹機能の特徴—上肢治療用ロボットを用いて, 第 50 回日本理学療法学会大会, 2015 年 6 月 5 日, 東京都

⑰涌野広行, 林克樹, 坂井伸朗ら, 脳卒中片麻痺患者の上肢治療用ロボットの開発—脳卒中患者の到達把持動作時の肩甲骨・体幹運動の分析, 第 52 回日本リハビリテーション医学会, 2015 年 5 月 28 日, 新潟市

⑱坂井伸朗, 林克樹ら, 脳卒中上肢リハビリテーションのためのロボット装具による到達把持運動の体幹運動計測, 第 54 回日本生体医工学会大会, 2015 年 5 月 7 日, 名古屋市

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂井 伸朗 (SAKAI, Nobuo)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 60346814

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

村上 輝夫 (MURAKAMI, Teruo)

帝京大学・福岡医療技術部・教授
研究者番号: 90091347

林 克樹 (HAYASHI, Katsuki)

誠愛リハビリテーション病院・リハビリテーション部・作業療法士・特任副院長