

研究報告書

「力覚信号処理技術に基づくリハビリ支援ネットワーク」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 21 年 10 月～平成 27 年 3 月

研究者: 辻 俊明

1. 研究のねらい

本研究課題ではリハビリ支援機器の訓練動作をサーバにデータベースとして記録するシステムを提案した。本システムでは運動データに力覚信号処理を施すことにより療法士と患者の情報を抽出し、その情報を訓練に利用する。そして各患者の状態改善に関するデータを収集し、そのデータに基づいてライブラリに保存された各リハビリ動作の効果とリスクを数値化、提示することにより、個々の症例に合ったリハビリ動作の自律的再生や統計に基づく精緻な効果・リスク評価が可能となる。換言すると、力覚信号処理技術を媒体として実世界における知的機能(リハビリ装置)と情報環境(ネットワークサーバ)を組み合わせることで、個人の特性に合わせた高度なサービスを提供し、リハビリ支援ロボットの新たな設計指針を確立することを目指し、研究を実施した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究ではリハビリ支援機器の訓練動作をサーバにデータベースとして記録するシステムを開発した。そしてそのデータを有効利用することにより新たなリハビリ支援機器のサービスを創出することを目指した。研究成果は以下の 3 点に要約される。

1. リハビリ支援ロボットおよび力覚検知システムの開発
2. 力覚信号処理を応用した訓練方法・評価方法の確立
3. 訓練データベースの構築とその解析

その詳細を以下に述べる。



(2) 詳細

リハビリ支援ロボットおよび力覚検知システムの開発

上肢用、下肢用のリハビリ支援ロボットを開発した。それぞれの仕様と概要を表 1 に示す。いずれも椅子に座った状態で訓練する上肢用ロボットは力覚に基づく繊細なロボットとのインタラクションを被験者が得られるようにするため、軽量・高バックドライバビリティの特長を持つ空気圧人工筋を実装した。一方、下肢用ロボットは高い耐荷重を持つ電磁モータを採用した。空気圧人工筋を用いた制御系は制御帯域が低いことを課題とするため、自動介助運動時の誘導の性能が低下することが懸念される。そこで機械的な剛性が任意に設定できるという人工筋の特長を有効利用し、機械的剛性の調整により制御帯域の低いアクチュエータでの誘導を実現する技術を開発した。また、これらのリハビリ支援ロボットに力覚信号処理に基づく制御系を実装するためには安全性の確保が重要である。安全性を確保する上で最も大きな課題は、断線や衝突に起因する力覚センサの故障である。そこで冗長性を有する力覚センサを開発し、耐故障

信号処理技術を実装することにより故障のリスクを大幅に削減することに成功した。

表 1 開発したロボットの仕様比較

	上肢	下肢
自由度	2	2
運動平面	水平面	矢状面
アクチュエータ	空気圧人工筋	DC モータ
最大力	10N	50N
		

力覚信号処理を応用した訓練方法・評価方法の確立

リハビリ支援ロボットは運動中の定量的なデータを容易に取得できることを利点とする。また、得られたデータを信号処理で加工すればリハビリに資する情報を抽出することが可能となる。その最も基本的な一例として、訓練実施時の力センサの応答から上腕部の 3 対 6 筋の張力分布を推定し、CG により可視化、表示するプログラムを開発した。その概要を図 1 に示す。目に見えない力の情報をリアルタイムで可視化して表示することにより、患者と療法士が能率的に筋の状態を把握しながらトレーニングすることが可能となる。

次に、ロボットで定量的な評価が容易になる施術の一例として、上肢用リハビリ支援ロボットを利用した可動域(ROM: Range Of Motion)測定の方法を提案した。訓練中の手先の位置情報から情報圧縮された ROM のデータを抽出する方法を示した。従来は関節角などの一次元のデータで ROM を記録していたが、本来人の四肢の ROM は空間的分布を持つものである。健康者を被験者とする実験により、関節毎に試験を行う従来の手法よりも詳細なデータが得られることが確認された。それに対して試験の時間は短く、従来の方法との差は見られなかった。また、抵抗運動可動域試験の手法を新たに提案した。本提案法を実装した試験によりロボットを用いた可動域試験はその空間的分布を得るのに適していることが示された。また、ROM の分布のみならず、どの方位に力が多く出せるかを調べられることが確認された。

以上、筋力可視化と ROM 評価というロボットの特長を活かした新規サービスの方法論を論文誌、国際会議、展示会等で発表した。学会のみならず医療・福祉・介護の分野からも大きな反響が得られたため現在その社会実装に向けた活動を進めている。



図 1 上肢 3 対 6 筋の張力推定と可視化

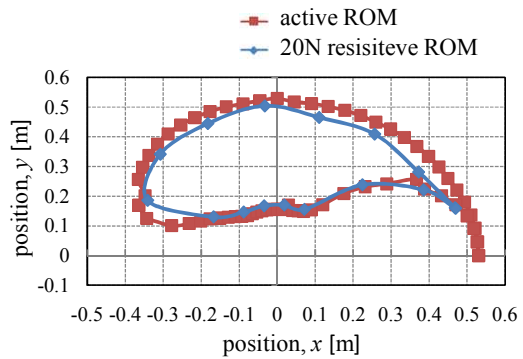


図 2 上肢の可動域計測結果

訓練データベースの構築とその解析

上記力覚信号処理技術を実装した訓練システムを用いて運動訓練のデータベースを構築した。そしてそのデータベースが創出する新しい付加価値について検証した。具体的には運動データベースから類似運動を検索する技術を開発したほか、データベースの情報を実際にインタフェースの設計に有効利用する事例を提示した。

まず検索技術の基礎検証を実施した。被験者 5 名に対して拘束なし、肩拘束、肘拘束、肩・肘拘束の 4 通りの拘束条件を与え、リハビリ支援ロボットで楕円を描く運動を 5 回実施させた。従って、リハビリ支援データベースは計 100 データで構築されている。運動照合する技術として DP マッチング法を導入し、入力データと登録データとのデータ間距離を以下の式を用いた算出した。

$$D(X, F) = (1 - \alpha)X + \alpha F \quad (1)$$

$D(X, F)$ はデータ間距離である。 X, F は位置情報、力情報を規格化したもののデータ間距離であり、 α は位置情報の重み係数である。計算結果の内、最もデータ間距離の小さい登録データを導出し、これを照合結果とする。統計的な性能評価を行うため Leave One Out Cross Validation (LOOCV) 法を導入し、検証を実施した。その結果、力情報を導入した運動照合は位置情報のみの運動照合よりも高い精度を持つという結果が得られた。

次に訓練データベースを利用し、新たな付加価値を創出する例として、インタフェースの設計にデータベースを利用する方法論を開発した。片麻痺患者を対象とした上肢の他動運動訓練を患者自身が実施するためには他動運動を行うロボットアームの操作を健側で行う必要がある。そこで 5 名の訓練データから健側のジョイスティックの操作性を評価するための項目を抽出した。その結果を図 4 に示す。ここで x 軸は運動と垂直に交わる方向、y 軸は運動と同じ方向を指す。ジョイスティックの剛性が低いほど力の制御が容易になる反面、遅れによる位置の誤差が顕著になる傾向にあること、操作力がジョイスティックに正確に伝わり、操作の誤差が低減できる適切な剛性が存在することが明らかになった。また、運動訓練のデータベースから適切なパラメータ値が抽出できることが実証された。

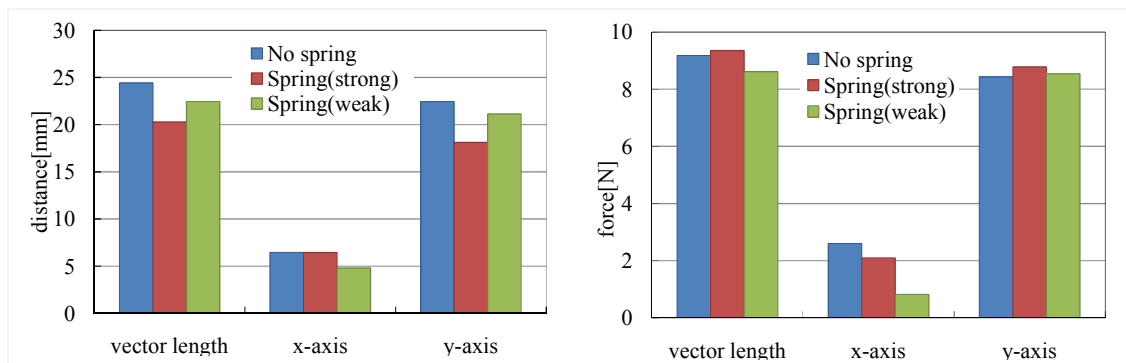


図 4 健側でジョイスティックを操作した際のロボットの追従誤差および操作力

3. 今後の展開

平成 26 年度よりメーカー・介護施設等と協働で本さがけ研究の成果の実用化を目指した活動を開始している。強固な連携体制とこれまでのさがけ研究における実績が評価され埼玉県先端産業創造プロジェクトに指定されている。産官学の連携のもと、社会実装を目指して活動する予定である。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究課題では、運動データに力覚信号処理を施すことにより療法士と患者の情報を抽出し、その情報を訓練に利用する技術を開発した。力覚信号処理の実装によって、ロボット特有の付加価値が得られることが、複数の事例を通じて実証された。その結果、既存にない新しいサービスの創出に成功しており、この点において当初の目的は達成されている。既に実用を想定した実証研究が企業との連携で始動していることは、本研究成果の現場における期待の高さを示すものである。ネットワーク上でのデータベースの利用に関する効果の検証は引き続き研究が進められており、その成果を近く公知となる予定である。以上まとめると、当初の計画内容は概ね達成され、その成果を展開する次のステージに進みつつある。

現在連携している介護施設の数 は 2 社であり、本さがけ研究の成果の社会実装に向けて活動を進めている。現時点では限られた企業を対象としたプロジェクトであるが、他に同様のフレームワークを展開している組織は存在せず、我々の試みの有効性を世界に先駆けて実証すれば、2 社にとどまらず、日本国内、ひいては世界の標準の方式として広められると期待される。高齢者の介護や未病予防のための運動訓練について必要性が高まっているという社会的背景を踏まえれば、研究成果の波及効果は大きいと予想される。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年 2 回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

患者の状態を測るツールとしての、リハビリ支援ロボットの可能性に着目したユニークな研究である。訓練中のセンサ情報を有効利用する新たなサービスの創出を目指し、人に接する機構とその安全技術、患者の状態を推定する力覚信号処理技術、訓練効果を高める

力の可視化技術などの技術開発を進めてきた。力覚信号処理により患者の運動能力や体調を定量化できることを示すと共に、力の可視化が運動訓練の効果を高めることを明らかにしている。リハビリ支援ロボットのネットワーク化による情報共有については引き続き研究が必要であるものの、地道な開発が必要とされる医療介護機器の分野において、既に大きな成果を挙げている。とりわけ、情報技術と力覚信号処理技術の導入によって、リハビリ支援ロボットに、労働力の代替という枠組みを超えた新たな方向を示したことは高く評価できる。本研究の反響は大きく、研究の成果を核に据えた複数企業との共同研究に発展し、埼玉県の先端産業創造プロジェクトにも指定された。現場で多くの人々に使われることが前提の研究であるので、地方自治体や介護施設の後押しを得たことによる今後の展開への期待は大きい。学術コミュニティでも、IEEE Industrial Electronics Society, Technical Committee on Motion Control の Chair への就任が決まるなど、世界から研究者が集う技術委員会の若手の牽引役として活躍している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. T. Tsuji, T. Yokoo, Y. Hasegawa, K. Abe, Y. Sakurai, S. Ishii: "Development of Rehabilitation Support Robot with Guidance Control Based on Biarticular Muscle Mechanism," IEEJ Journal of Industry Applications, 2014, Vol. 3, No. 4, pp. 350-357
2. T. Tsuji, C. Momiki, S. Sakaino: "Development and Evaluation of an Operation Interface for Physical Therapy Devices Based on Rehabilitation Database," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp.3543-3548
3. T. Tsuji, M. Yamada, Y. Kaneko: "A Robot Measuring Upper Limb Range of Motion for Rehabilitation Database," Journal of Robotics and Mechatronics, 2013, Vol. 25, No. 3, pp. 515-520
4. T. Tsuji, C. Momiki, S. Sakaino: "Stiffness Control of a Pneumatic Rehabilitation Robot for Exercise Therapy with Multiple Stages," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2013, pp. 1480-1485
5. T. Tsuji, N. Kurita, M. Yamada, S. Sakaino, Y. Kaneko: "Rehabilitation Database Based on Haptic Signal Processing," IEEE Humanitarian Technology Conference, 2013, pp. 13-18

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 3 件

1.

発明者: 辻俊明、羽生良輔:
 発明の名称: 外力検出インタフェースの故障検知方法
 出願人: 埼玉大学
 出願日: 2010/6/9
 出願番号: 特願 2010-131795

(2) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. R. Matsuzaki, J. Okuma, S. Sakaino, T. Tsuji: "Contact State Recognition Based on Haptic Signal Processing for Robotic Tool Use," Int. Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014), 2014
2. T. Kaneko, S. Ito, S. Sakaino, T. Tsuji: "Haptic Data Compression for Rehabilitation Databases," IEEE Workshop on Advanced Motion Control, 2014
3. D. Takahashi, T. Furuya, S. Sakaino, T. Tsuji: "Experimental Evaluation of Bilateral Control of Velocity Control System Using Electric and Hydraulic Actuators," The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4118-4123, 2013
4. T. Tsuji, C. Momiki, S. Sakaino: "Stiffness Control of a Pneumatic Rehabilitation Robot for Exercise Therapy with Multiple Stages," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1480-1485, 2013
5. T. Tsuji, N. Kurita, M. Yamada, S. Sakaino, Y. Kaneko: "Rehabilitation Database Based on Haptic Signal Processing," IEEE Humanitarian Technology Conference, pp. 13-18, 2013
6. R. Matsuzaki, M. Kamibayashi, S. Sakaino, T. Tsuji: "Classification of a Hybrid Control System for Robotic Tool Use," IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 712-717, 2013
7. N. Kurita, S. Sakaino, T. Tsuji: "Whole-body Force Sensation by Force Sensor with End-effector of Arbitrary Shape," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5428-5433, 2012
8. T. Tsuji, T. Yokoo, S. Sakaino: "High Bandwidth Attitude Control Based on Musculoskeletal System with Biarticular Muscles," The 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5428-5433, 2012
9. 辻 俊明, 大西 公平: "筋骨格アクチュエータに基づくモーションコントロール," 電気学会誌, 2012, Vol. 132, No. 9, pp. 606-609. (解説記事)
10. T. Yokoo, T. Tsuji, S. Sakaino, S. Abe: "Development of a Physical Therapy Robot for Rehabilitation Databases," IEEE Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012), 2012

受賞

1. Best presentation recognition, IEEE IECON2014, 2014年10月29日
2. 日本機械学会奨励賞(研究), 日本機械学会, 2014年4月18日
3. 日本機械学会賞(論文), 日本機械学会, 2011年4月21日
4. 研究奨励賞, 日本ロボット学会, 2010年9月23日

著作物

1. "筋力可視化による筋トレ支援装置の開発", 進化する運動科学の研究最前線, pp.347-353, 株式会社エヌ・ティ・エス

メディア報道

1. “筋肉を鍛えるロボット”，テレビ東京、2013年12月6日
2. 未来の起源，TBS，2014年3月16日
3. “腕の筋トレ効率支援”，日経産業新聞、2014年1月10日
4. “筋肉の動きを可視化したリハビリ支援ロボット R-cloud”、DigInfo TV，2013年12月4日
5. “Rehabilitation support robot R-cloud makes muscle movement visible”，DigInfo TV，Dec. 4th，2014. _