

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360120

研究課題名（和文）NIRSによる高次脳機能解析と擬似三角マトリクス構造に基づく指の筋  
腱駆動系の解析研究課題名（英文）Investigation of the muscle-tendon driven system of the finger on  
analysis of the higher brain function using NIRS and the pseudo-inverse matrix structure.

研究代表者

横川 隆一（YOKOGAWA RYUICHI）

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：70220548

研究成果の概要（和文）：指の関節軸の位置および関節軸に対する筋腱の位置は、数値的には、個人差があるものの、機能は共通することが分かった。微細な指先力の調整を行うための筋・腱の働きには、個人差があるが、いくつかの場合に分類できることが分かった。その分類は、MRI データに基づいて構築されたモデルから説明できた。指先力の微細な操作において、指の操作性は指の姿勢によって異なるが、指先力を制御している脳の活動は、その操作性の変化に対応するように調整されていることがわかった。その成果は、制御対象である運動器の力学的特性が運動学習の神経機構に大きく影響している可能性を示すもので、運動神経生理学の分野に新しい知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：While the position of the phalangeal joint and the configuration of the muscles/tendons at the joint were numerically different among the subjects, the function of the muscles/tendons was common among them. While the roles of the muscles/tendons were different among the subjects in the manipulation of the fine fingertip force, the roles were able to be classified into some cases. The classification was explained using the tendon driven models developed on the MRI data. In the manipulation of the fine fingertip force, the manipulability of the finger depends on the finger posture. The brain activity controlling the fingertip changes in order to adjust the muscle forces to the variation of the manipulability of the finger. The conclusions indicate the possibility that the neural mechanism of the motor learning depends on the characteristics of the muscles/tendons, i.e. the controlled object. This could provide new insights for research into motor nerves physiology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2011年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景  
人の手は外部の脳であると言われており、

手・指の器用さを調べることは、脳の機能を知る上で重要である。運動神経生理学の分野

では、指の把持の違い（精密つまみ、強力把持）によって、脳活動が異なることや、同じ運動を繰り返すにつれて、参加する筋の数とその程度が軽減され、運動の遂行効率を高めていることが示されている。これらは、学習によって内部モデルが構築され、感覚器からのフィードバック制御だけでなくフィードフォワード制御により、脳が効率化を図っていることを示唆している。それら脳内での制御戦略は、制御対象である指の筋腱駆動系と密接に関係しているはずである。本研究代表者は、これまでに、腱駆動式ロボットの機構設計を参考に、人の示指の筋腱駆動系を解析してきた。その結果、複雑に見える人の示指の筋腱駆動系も、筋張力から関節トルクへ変換する行列（構造行列）が、静力学的には擬似三角行列に近似できることを示した（基盤研究(C)、平成19年度～平成20年度）。これは、人の筋腱駆動系が、筋張力により任意の各関節トルクを安定に出力できる筋の数と経路を持っていることを示している。さらに、手の中に内在する筋（内在筋）である骨間筋が指先の運動制御に大きく働いていること、および虫様筋は、指先の操作力には、ほとんど影響していないことがわかった。しかし、示指の筋腱駆動系を擬似三角行列構造のもつ腱の経路・配置に近似する際に、腱の分岐機構、（腱帽および支帯靭帯）や内在筋の働きを解明するには、筋腱駆動系だけの力学解析では不十分である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、脳活動、筋電位、指先力および指姿勢の同時計測結果を基にこれまでに開発した擬似三角行列構造に近似した筋腱駆動系モデルに対する運動制御系を組み、その計算機シミュレーション結果と実際の運動計測結果とを比較検討して、脳による指の運動制御戦略における外在筋（腕にある筋）、内在筋（手の中に内在する筋）、および腱の分岐機構の役割を調べることにある。

## 3. 研究の方法

すべての被験者は、実験に参加する前にあらかじめインフォームドコンセントにサインした。すべての実験は、同志社大学の人を対象とする研究倫理委員会の承認を得た。

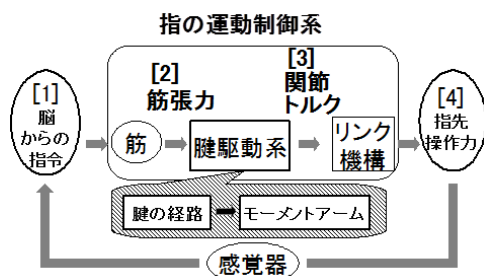


図1 指の運動制御系

(1) NIRS（近赤外分光法：光トポグラフィ）による対象作業中の高次脳機能の計測・作業中の指駆動筋の手の表面からの筋電位計測・作業中の指の位置・姿勢、および指先力の計測

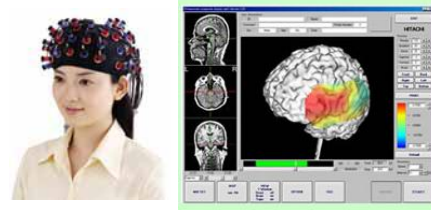


図2 光トポグラフィによる脳機能の解析（図1の[1]）

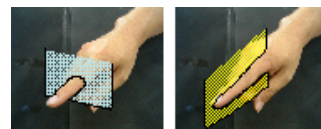


図3 表面筋電位計測（図1の[2]）

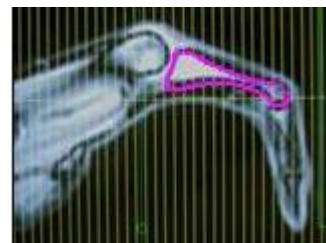
## 指先6軸力覚センサ



図4 指ロボットの力制御（指先インピーダンス制御）（図1の[4]）



(a) 横断面 (b) 矢状面

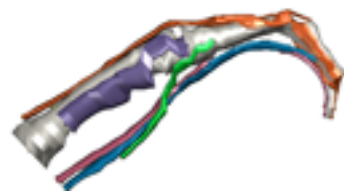


(c) 示指のMRI

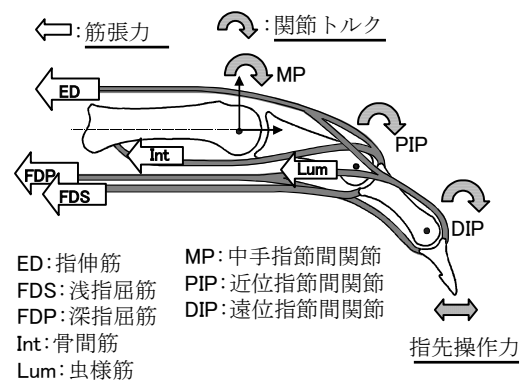
図5 人差し指のMRI計測

人の手の器用さは、指先力の巧妙な操作にあると考えられるので、研究対象の随意運動として、示指の指先を目標力(3(N))に追従させる作業とした。示指の運動は、屈曲・伸展面に限定した。この運動中の脳活動(NIRS(近赤外分光法:光トポグラフィ)による対象作業中の高次脳機能の計測)、対象作業中の指駆動筋の腕・手の表面からの筋電位計測、対象作業中の指の位置・姿勢、および指先力の計測の同時計測を行った。被験者数は20人とした。被験者の示指の指先に対して、インピーダンス制御された指ロボット(株)安川電機製が目標指先力(3(N))を加え、被験者は、その目標力に釣り合うように随意運動を行った。その運動中に脳活動、筋電位、指先力、および指姿勢の同時計測を行った。指の伸展姿勢と屈曲姿勢の2通りの姿勢において実験が行われた。1回の計測時間は160(秒)とした。高次脳機能の計測には、(株)日立メディコ製の光トポグラフィ装置(ETG-7100、120ch)を用いた。各計測位置は国際10-20法に基づき、前頭前野をカバーできるように、Fp1、Fp2を中心に22点、主運動野をカバーできるように、C3、C4を中心にそれぞれ24点、頭頂葉をカバーできるように、Czを中心に22点、そして視覚野をカバーできるように、Pz、O1、O2を中心に17点の合計109点とした。被験者1人に対して予備実験を行い、1回の計測における計測シーケンス(作業時間20秒と休憩時間30秒)を設計した。専用ソフトウェアによる統計解析によって計測の時間経過(作業の反復時間)に伴う被験者ごとの相対的な脳活動部位と活動量の変化を調べた。表面筋電位計測には、電極分離型表面筋電位測定器(原田電子工業製、Japan、型番EMG-025)を用いた。表面筋電位はdSPACE社のモジュラーハードウェアを通してA/D変換(分解能:16bit)された。電極にはディスプレイ電極(日本光電製、Japan、型番F-150S)を使用した。示指の屈曲・伸展運動に関わる浅指屈筋FDS、指伸筋ED、および背側骨間筋INTDの活動を計測した。筋電位データは2次のバターワースフィルタを通して処理した。バターワースフィルタのカットオフ周波数は、人の運動周波数、先行研究で用いられているカットオフ周波数を参考に2.6(Hz)とした。指先力の計測では、目標指先力を  $F_t = [3, 0, 0]^T$  (N) としており、指先力を調節する試行の開始から10秒経過した被験者全員の指先力は  $F_t = [3, 0, 0]^T$  [N] に収束した。そこで、X成分に着目し、指先力を調節する試行の開始10秒後から試行終了までの計測データの平均値と標準偏差の差の値よりも計測値が上回った時間から20秒後までを指先力調整期間とした。指先力調整期間中の計測値の平均値をその試行における指先力とした。指の位置姿勢には、赤外線発

光マーカの位置を計測するOPTOTRAK CERTUS(Northern Digital Inc.製)を用いた。さらに、被験者の示指のリンクモデルの作成およびそのモデルを用いた指先力操作性のシミュレーションを行った。高次脳機能計測における被験者20人に対して、示指の屈曲・伸展運動中の指の姿勢をOPTOTRAK CERTUS指の背側に取り付けた赤外線発光マーカの位置計測より求めた。屈曲・伸展運動中の各マーカの軌跡より指の関節回転軸の位置を求め、この関節軸の位置より指のリンク長を決定した。得られた指のリンク長と高次脳機能計測における関節角度から各被験者ごとの指のリンクモデルを作成した。指の筋腱駆動系モデルについてはChaoらの正規化されたモデルに本研究で計測された指のリンク長を適用することによりモデル化した。指のリンクモデルおよび筋腱駆動系モデルより被験者ごとの指先力の可操作性多角形を導出した。以上のことより、微小な指先力の操作中の脳活動、筋活動、および指先力の可操作性のシミュレーションより、脳による指の運動制御戦略における外在筋(浅指屈筋FDS、指伸筋ED)、内在筋(背側骨間筋INTD)の役割を調べた。



(a) 示指の3次元筋・腱駆動系モデル



(b) 示指の筋腱駆動系モデル

図6 MRI計測に基づく示指のリンク機構、および示指の筋・腱駆動系モデルの構築

(2) MRI計測に基づく被験者のリンク機構および示指の筋・腱駆動系モデルの構築

矢状面における屈曲・伸展運動のみを考えるとき、示指は、3つのリンクを3つの回転関節軸で繋いだリンクモデルとして仮定でき



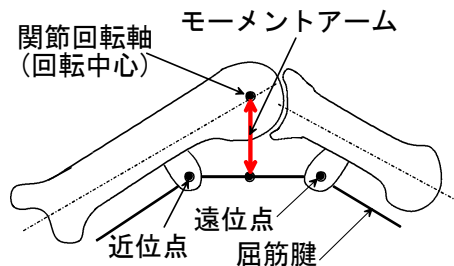


図7 回転関節軸とモーメントアーム

る。日立メディコ製 Echelon Vega (1.5T) あるいは AIRIS II (0.3T) を使用して、被験者5人の示指のMRI撮影を行った。計測する際の撮影用コイルは Echelon Vega では頭部用コイル、AIRIS II では膝用のコイルを使用した。各関節 (MP 関節、PIP 関節、DIP 関節) 角度を伸展状態から完全に屈曲するまでを5つの姿勢に分割して計測を行った。撮影間隔は3.0(mm) (撮影厚さ2(mm)、ギャップ1(mm))とした。横断面のMRI撮影画像から骨・筋・腱の3次元モデルを作成した。画像処理ソフトウェア MVTEC HALCON 8.0.2 (MVTEC社) を使用して撮影されたMR画像を平滑化した。固定閾値法によって骨、筋あるいは腱の領域を抽出した。骨、筋あるいは腱の輪郭が囲んでいる領域から骨領域の面積および図心を算出し、座標データと図心をプロットした画像を出力した。骨、筋あるいは腱領域がうまく抽出できてなかった場合、閾値を手動で設定し直し、作業を繰り返した。以上の手順で、骨、筋あるいは腱の横断面の図心の座標データ、および輪郭データより ICP アルゴリズムを用いて5つの姿勢ごとの3次元の骨・筋・腱のモデルを作製した。横断面の図心をマーカーとして、5つの姿勢における各指骨のマーカーの軌跡より、関節回転軸を求めた。横断面の筋/腱の図心を2次曲線で補間した。その2次曲線と関節回転軸との最短距離を筋/腱のモーメントアームとした。このモーメントアームの計算には Mathematica を使用した。

MRI に基づいて作成された示指の関節回転軸のモデルの検証を行うため、被験者1人の屈曲・伸展運動中の指先および各リンクの位置変化をリアルタイム3次元モーション計測システム VENUS3D (Nobby Tech. Ltd. 製) を用いて、計測した。MP 関節の外転・内転運動をできるだけ小さくし、屈曲・伸展運動に限定した運動にするため、被験者は、支持板に沿って1往復約30秒の速さで計4往復の屈曲・伸展運動を行った。この計測結果 (指先、各関節の位置) とMRIに基づいて作成された示指モデルの屈曲・伸展運動における指先、各関節の位置とを比較した。

### (3) 計算機シミュレーションに基づく示指

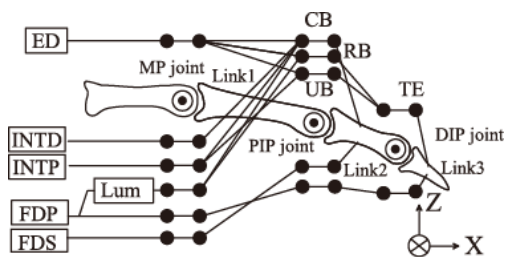


図8 示指の筋・腱駆動系

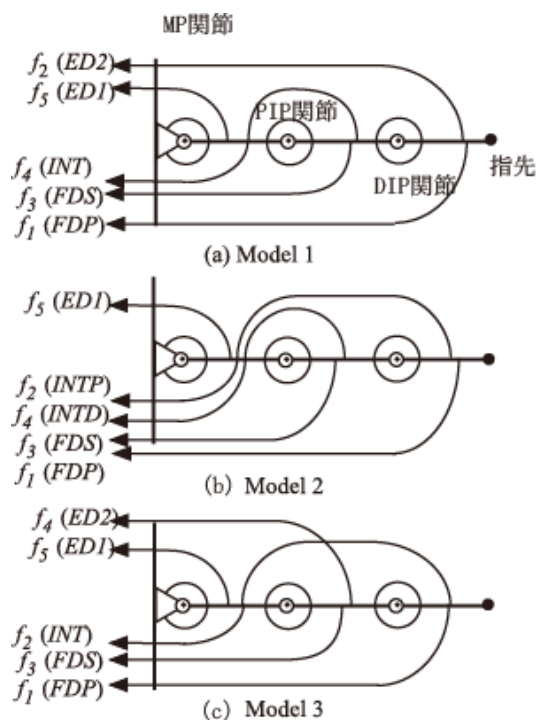


図9 擬似三角行列構造に基づく示指の筋・腱系モデル

### の筋腱駆動系モデルの解析

MRI に基づいて作成した示指の筋腱駆動モデルは、その運動を屈曲・伸展に限定すると、屈曲・伸展平面に垂直な3回転関節を有するリンク機構としてモデル化される。その筋は、外在筋である指伸筋 ED、深指屈筋 FDP、および浅指屈筋 FDS と内在筋である掌側骨間筋 INTP、背側骨間筋 INTD、および虫様筋 Lum の6つから構成された。N自由度/N+1腱駆動のロボット指の設計に利用されている Structural Isomorphism の概念を導入し、3自由度4腱機構における入力 (腱の張力) から出力 (関節トルク) への変換を擬似三角行列として表現した。この擬似三角行列として表される構造行列の候補の多くは制御不可能な構造や重複している構造などを含んでいる。そこで、次の処理を施すことにより制御不可能なおよび重複した構造行列の候補

を削除した。

- 筋・腱駆動機構において、筋・腱のたるみを防ぎ、かつある姿勢で静止させるのに必要な張力（バイアス張力）が出力できない構造行列は削除する。

- 鏡像関係にある構造行列を削除する。

- 構造行列において、その第1、2列を入れ替えると等しくなる構造行列は削除する。

得られた腱駆動系モデルの中で、指の屈曲・伸展における静力学的な近似モデルとなるのは、どのモデルであるかをMRIから得られたモデルの筋・腱の配置の特徴を基に調べた。指の筋・腱経路には、次のような特徴がある。

① リンク1と腱との交差について、近位側から遠位側への腱の経路において、手のひら側から背側へ配置される腱が存在する。

② リンク2と腱とは交差していない。

③ LUMの働きを無視するとき、FDPはDIP、PIP、およびMP関節の屈筋としてのみ働く。FDSはPIP、およびMP関節の屈筋としてのみ働く。

④ EDは、CBを通して、PIPおよびMP関節の伸筋として働く。また、EDはRB、UB、およびTEを通して、DIP、PIP、およびMP関節の伸筋として働く。

⑤ INTDはCBを通して、PIP関節の伸筋であり、MP関節の屈筋である。

⑥ INTPはCBを通して、PIP関節の伸筋であり、MP関節の屈筋である。さらに、UBおよびTEを通して、DIPおよびPIP関節の伸筋であり、MP関節の屈筋である。

⑤および⑥から、INTDおよびINTPの両方が、PIP関節においては伸展、そしてMP関節においては、屈曲の働きがあるので、PIPおよびMP関節においてINTDとINTPを1本のINTとする。以上のことから、MRIに基づいた腱駆動系モデルを修正し、人の指の近似駆動系モデル(3関節5筋・腱駆動モデル)を構築した。モデルでは、各筋への入力値、入力値を0から1として正規化すると、筋肉の生理断面積より重みづけ行列と構造行列によって、関節トルク空間(MP、PIP、およびDIP関節トルクを座標軸とする3次元のカーチアン座標系)における多面体となる。重みづけ行列と構造行列によって変換された関節トルク空間における各筋ベクトルの配置および多面体の形状によって、筋・腱駆動系の静力学的な特性を調べることができる。Chaoらのモーメントアーム値を用いたとき、関節トルク空間における多面体の形状を基に、MRIに基づく指示の筋腱駆動モデルと3関節5筋・腱駆動モデルの静力学的特性を調べた。

#### 4. 研究成果

(1) 示指の微小指先力制御において、最も有効な腱であった骨間筋を使用した被験者で

は、指先力の可操作性が低い姿勢では、指先力を一定値に制御することが困難であり、制御器である大脳主運動野が活発に活動することが示唆された。結論として、指先力の微小な操作において、指のリンク機構のもつ操作性は指の姿勢によって異なるが、指先力を制御している脳の活動は、その操作性の変化に対応するように調整されていることがわかった。指の筋・腱駆動系は指先の運動制御に対して、冗長な筋・腱の配置になっている。同じ指先力を出力するために必要な筋・腱の組み合わせは、複数考えられる。本研究結果は、同じ微小指先力の調整でも、筋・腱の制御戦略が被験者に依存し、筋・腱の使用方法が被験者によって異なることが示された。このことは、指先の運動制御系は、日常の成長過程で獲得されたものである可能性が高いことを示している。本研究の成果は、制御対象である運動器の力学的特性が運動学習の神経機構に大きく影響している可能性を示すもので、運動神経生理学の分野に新しい知見を与えるものである。

(2) MRIデータに基づいた生体の示指の筋・腱駆動系のモデルを構築することができた。関節は、回転軸として近似してモデル化することができることを計測結果より示すことができた。そのモデルは、示指の筋腱駆動系を用いた指の運動解析あるいは指のリハビリテーション技術などに広く応用できる。したがって、医学、および工学の両面において高く評価できる。

(3) 計算機シミュレーションに基づく示指の筋腱駆動系モデルの解析とNIRS(近赤外分光法：光トポグラフィ)による対象作業中の高次脳機能の計測結果から、次のような結論が得られた。示指の筋腱駆動系(関節軸の位置および関節軸に対する筋腱の配置)は、定量的には(数値としては)、被験者間で異なるものの、定性的(機能的)には共通する特徴を持つことが分かった。微小な指先力の調整を行うための筋腱の働きについては、被験者間でばらつきがあるものの、いくつかの場合に分類できることが分かった。その分類は、指先力を調整するために最低限必要な筋腱の数よりも、示指の持つ筋腱の数が多く、またその経路が複数存在することから説明できた。指先力の微小な操作において、指のリンク機構のもつ操作性は指の姿勢によって異なるが、指先力を制御している脳の活動は、その操作性の変化に対応するように調整されていることがわかった。本研究の成果は、制御対象である運動器の力学的特性が運動学習の神経機構に大きく影響している可能性を示すもので、運動神経生理学の分野に新しい知見を与えるものである。

(4) これまで、運動学習の神経機構に関する研究では、脳機能の計測・解析が中心であつ

た。一方、本研究は、制御対象である指の筋腱駆動系の力学的解析を基に、制御工学的なアプローチにより、その機構の解明を試みる独創的な研究であり、その研究手法は、運動神経生理学の分野に新しい知見を与えるものである。さらに、高次脳機能の解明や新しいロボットハンド、あるいは腱駆動マニピュレータの開発に利用できるだけでなく、指のリハビリテーションや外科手術においても広く利用できるように、今後、工学から医学分野まで、幅広い分野で重要な役割を果たすものと期待できる。

#### 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0件)

[学会発表] (計14件)

- ①中谷英嗣、積際 徹、横川隆一、MRI 計測データを用いた示指の筋・腱駆動系のモデル化、日本機械学会シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011、2011年11月1日、京都大学 吉田キャンパス百周年時計台記念館
- ②清 良彰、積際 徹、横川隆一、指の機能的肢位と表面筋電位、日本機械学会シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011、2011年11月1日、京都大学 吉田キャンパス百周年時計台記念館
- ③中谷英嗣、積際 徹、横川隆一、MRI 計測データを用いた示指の筋・腱駆動系のモデル化、第55回システム制御情報学会研究発表講演会、2011年5月17日、大阪大学吹田キャンパスコンベンションセンター
- ④生信 愛、横川隆一、積際 徹、小型情報端末操作時の母指の負担軽減用補助器具の有効性、日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会、2011年3月20日、京都工芸繊維大学
- ⑤松村侑祐、積際 徹、横川隆一、MR画像データを用いた母指の静力学的モデルの作製、日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会、2011年3月20日、京都工芸繊維大学
- ⑥二見奨太、積際 徹、横川隆一、MRIを用いた示指のIPおよびMP関節軸のモデル化、日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会、2011年3月20日、京都工芸繊維大学
- ⑦家田亜沙美、積際 徹、横川隆一、示指の筋腱駆動系の工学モデルの検証、第28回日本ロボット学会学術講演会、2010年9月22日、名古屋工業大学
- ⑧竹田滋紀、積際 徹、横川隆一、指先力調

節における示指の操作性と大脳賦活状態、第27回 日本ロボット学会学術講演会、2009年9月16日、横浜国立大学

- ⑨吉野寛康、積際 徹、横川隆一、MRIを用いた示指の筋・腱配置の静力学モデルの検証、第27回 日本ロボット学会学術講演会、2009年9月15日、横浜国立大学
- ⑩竹田滋紀、積際 徹、横川隆一、携帯電話の親指キー入力操作における親指の操作性と大脳の賦活状態の関係、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009、2009年5月26日、福岡国際会議場
- ⑪吉野寛康、積際 徹、横川隆一、MRIを用いた示指の筋・腱配置の静力学モデル、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009、2009年5月25日、福岡国際会議場
- ⑫ T. Tsumugiwa, Y. Watanabe, and R. Yokogawa, Robot Motion Control Using Mechanical Load Adjuster with Motion Measurement Interface for Human-Robot Cooperation, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009/10/12, Hyatt Regency St. Louis Riverfront (St. Louis, Missouri, USA)
- ⑬ T. Tsumugiwa, Y. Watanabe, and R. Yokogawa, Development of Mechanical Load Adjusting Device with Motion Measurement Interface for Robotic Assistive Rehabilitation System, 2009 IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2009/06/24, Kyoto International Conference Center (Kyoto, Japan)
- ⑭ T. Tsumugiwa, and R. Yokogawa, Object Inherent Dynamics Based Motion Control in Human-Robot Cooperative Task System, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009/05/16 (SAT), Kobe International Conference Center (Kobe, Japan)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

横川 隆一 (YOKOGAWA RYUICHI)  
同志社大学・生命医科学部・教授  
研究者番号：70220548

##### (2) 研究分担者

積際 徹 (TSUMUGIWA TORU)  
同志社大学・生命医科学部・准教授  
研究者番号：90362912