

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 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246033

研究課題名（和文） 人と機械の融合マシン技術に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Cybernetic Technology among Man and Machine

研究代表者

横井 浩史 (YOKOI HIROSHI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90271634

研究成果の概要（和文）：

本研究では、運動と感覚の再建を補助するシステムの構築を目的として、人とロボットをシームレスに結合する技術・方法論の構築を行った。個性適応型筋電義手（高出力他自由度ロボットハンド、柔らかい触覚センサ、BMI 上腕義手）や麻痺指に対するリハビリ装置（症状に応じたアシスト、装着の簡易化、複雑な拇指のアシスト）および機能的電気刺激装置（多種類の感覚提示法、最適な刺激を探索するシステム）を開発し、日常生活環境下での使用可能なシステムの実現を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we had developed and studied the man machine interface technology to replace or rehabilitate human's movement and sense by robot system. Myoelectric prosthetic hand (high-torque drive mechanism, soft tactile sensor and upper arm controlled by Brain), power assist system for rehabilitation (assist methods accommodated for the conditions of a patient, mechanism that is easy to fit on the human hand and thumb's CM joint assist mechanism) and functional electrical stimulation devices (sensor feedback method by 2D Phantom sensation, exploring system of effectively the optimal stimulation method) are developed and ready to be tested in a daily environment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
2011 年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2012 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
年度			
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

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：人間機械システム、筋電義手、滑り覚センサ、機能的電気刺激、リハビリ装置

1. 研究開始当初の背景

本研究課題である「人と機械の融合マシン技術」の開発は関連する研究分野においてその必要性や有効性が強く認識されてきた。そのため、各研究分野の学会において BMI

(Brain Machine Interface) やサイボーグ技術（脳・神経・筋肉の信号源を用いて人と機械の相互通信や意図認識を実現する技術）などによる医療福祉機械の実現のための特設セッションが開かれるようになっていた。

その技術の確立は人の機能補助・代替技術のため福祉・医療における応用を目的として多くの研究分野において非常に要求が高まっていた。

2. 研究の目的

この技術の根幹は、人・機械相互適応システムに関する学問体系に属し、人が潜在的に持つ適応機能に合致するように機械側の学習や適応機能を構築することで成立する。その実現に資する主要技術は「個性適応型情報処理」と「生体フィードバック技術」である。前者は人の特性や残存機能を分析し機器の制御方針を適応的に構成する情報処理方法論であり、後者は人の感覚情報処理を通して機器の状態を人が機器を自分の一部であるかのように認識させる技術である。

本研究では、機械を人の外部機器として用いることにより、人の機能再建や代替などの医療福祉目的に資することを目的として、「個性適応型情報処理」と「生体フィードバック技術」の確立とともに、個性に適応しながら意図解析を実現する機械システムの開発を行う。

3. 研究の方法

人と機械の融合を図るために必要となる学問体系を整備し、これを実現するための技術開発を行うために、非侵襲的生体計測と生体フィードバック刺激および情報処理を統合し、モバイルシステムを構築する。

それぞれの到達目標およびランドマークを以下の4項目に整理し実施する。

[研究の全体像：非侵襲生体計測と生体フィードバック刺激を用いた人と機械の融合マシン技術の構築]

- 脳計測・解析：脳と筋活動の非侵襲計測による「意図推定と機器制御」課題の整備
- センシングデバイスの検討：幻覚の発生機序の調査と残存機能探索法の確立
- 基盤技術：個性適応型情報処理の高速化と小型化
- 応用・有用性検討：日常生活のための運動機能代替機器への応用

4. 研究成果

- (1) a. 脳の計測と解析：マルチ生体計測システムの構築と脳負荷の少ない自然な義手制御を可能とする触覚フィードバックの入力方法の確立

脳活動と筋活動の相関関係をリアルタイムに測定するために、脳活動（脳波計(10-20法)・16ch fNIRS）、筋活動（筋電センサ・超音波センサ）、身体運動（3D モーションキャプチャ）を同時に計測することのできるシステムを開発し、義手や手指パワーアシスト機器を用いて運動を行う時のデータ計測を開始した(2010年度)。

次に、運動意図に基づき制御される筋電義手使用時に対して、より自然な義手制御を可能とするようにフィードバック部位に対する錯覚現象（ファントムセンセーション）を利用した。離散的ではなく連続的な触覚フィードバックにより情報を提示し、その時の脳活動を fMRI によって検討した。その結果、離散的なフィードバックに比べ一次運動感覚野への活動が小さく、脳活動からの優位な結果は見いだせなかったが、主観報告により義手持持姿勢の知覚に対して7割近い正答率で姿勢が知覚できること明らかにした。今後、引き続き脳活動計測を行いながら詳細を検証する必要がある(2011年度)。

また、錯覚現象を利用する触覚提示では、その刺激電極の位置の決定が試行錯誤的であった。そこで、幻覚を用いた多点電気刺激法を確立するために、4ch 電気刺激装置の出力を多電極に動的に分配可能な刺激分配回路を作成した(図1)。これにより様々な電極配置を任意に選択できかつ動的に変更が可能となり、多点電気刺激によるリハビリ効果を効率的に探索することが可能となった。

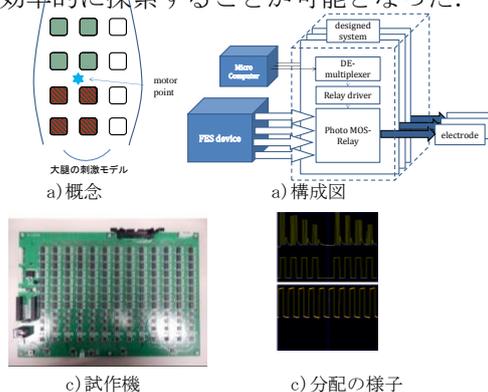


図1 多電極に動的に分配可能な刺激分配回路

さらに、これまで電極2組を用いて直線的な空間刺激に限定化されていた幻覚を用いた刺激提示を拡張し、3組の刺激電極を皮膚上位に3角形に配置し各電極における刺激強度を時間変化させることにより、皮膚表面上に新たな刺激感覚を10パターン提示することが可能となったことを被験者実験にて確認した(図2)。この成果は、義手の深部感覚を直感的に自然な形で知覚できる可能性を示している。(2012年度)

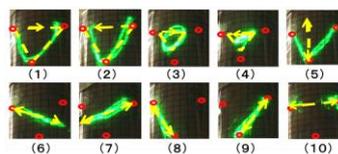


図2 2次元ファントムセンセーションによる触覚提示

- (2) b. センシングデバイスの検討：義指のためのすべり覚センサおよび全方位感圧センサの開発

これまで多くの義手にかかわる生体フィードバック研究で行われてきた受動感覚の

再建のみならず、能動感覚機能の再建を目的とし、滑り覚・全方位感覚センサを用いた上腕・前腕・手指義手の生体フィードバック手法の実現を試みた。

重心センサを多層化することで滑り覚センサを構成した。この接触点の移動に伴い生じる信号を解析することにより滑り方向と速度を抽出することができる。本センサを義手の手先運動を制御に応用し、把持物体が滑り落ちる直前に検知し把持しなおすことで落下防止することが可能となった（2010年度）。

一方、柔軟性があり、任意形状での制作が容易な「全方位感圧センサ」を開発した（図3）。柔軟部材に炭素粒子を浸透させることにより、柔軟素材の圧力による変形を抵抗値変化として人工指の全側面からの接触情報をセンシングすることが可能となった（2011年度）。

また、電極部材の検討も行い、柔軟な導電布を利用することにより外力に対する特性の安定化と感圧部材に対する電極配置の最適化により圧力の検出に方位性を持たせることができ、計測範囲の全方位の実現が可能となった（2012年度）。

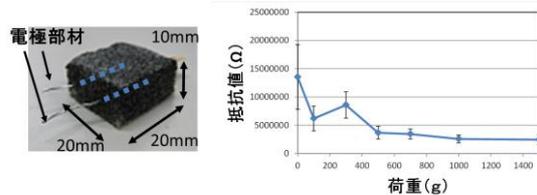


図3 導電性スポンジを用いた全方位感圧センサ

さらに、a)での成果でも説明したが、電気刺激を用いた幻覚提示方法を確立し、2対の電極を用いて干涉10mm四方程度の領域において幻覚的な刺激知覚の発生を可能にした。今後は、その領域を拡張するために電極数を増加させた検証が必要である。

これらセンシングデバイスおよび生体フィードバック手法を組み合わせることで、能動感覚機能代替のための基礎技術が確立できた。今後は、上肢機能不全者に対してどの程度残存感覚があり、再建可能かの検証及び残存能力の自動探索機能の実現が望まれる。

(3) c. 基盤技術：個性適応型情報処理の高速化と小型化

個性適応型情報処理の高速化と小型化を行うためGumstixs ボードコンピュータ (84mm x 40mm) を用いて筋電制御器を構築し、スペクトラム分析による特徴抽出機能と機械学習機能を有するソフトウェアを開発した。また、電源の小型化を行い、4時間の連続稼働を実現した（2010年度）

次に、個性適応型情報処理を搭載する小型 (43mm x 37mm) な SBC (Single Board Com-

puter) を2つのCPUを搭載し、相互に適切な機能分担を行うように開発した。小児・幼児用義手と手指パワーアシスト装置制御へ適用し、システムのコンパクト化を実現した。（2011年度）

さらに幼児用義手への組み込みが可能でありかつ意思疎通が困難な幼児の意図を推定するアルゴリズムが搭載可能なより高性能な小型マイコンボードを開発した。浮動小数点演算可能な SH2A-FPU を搭載し、機械学習アルゴリズムを人とのインターフェースに必要な周期 (100Hz) で実行可能となった（図4）（2012年度）。



図4 SHマイコンによる小型高速情報処理装置

(4) d. 応用・有用性検討：多運動自由度をもつ運動機能の代替機器の実現

a. b. c. で構築した技術を日常生活に応用するため、様々な運動機能障害を改善する運動機能代替機器の開発を実施した。

①上腕筋電義手(肩・肘・手指)の開発

事故などによる後天的な上肢欠損及び先天性欠損者の上肢機能を代替する多自由度上肢義手を開発した。肘関節の運動自由度は、屈伸1、回内外1であり、肩関節は、屈伸1、内外転1である。肘関節、肩関節は2自由度の干涉駆動関節を採用した。

肩関節の内外旋は、肘の回内外で代用し、肘の回内外は手首の回内外で代用するような機構とした。全体重量は肩関節を含めても最大で約1.2kgであり非常に軽量な上肢ロボットアームの構成となった。また、小型高トルクモータ (67.0kg・cm) を採用し、机上の500ml ペットボトルのピックアップを可能にする駆動力を実現している。

また、肩関節欠損の患者1名及び動物実験用サルへ適用し（筋電駆動）、机上の物体をピックアップするリーチングタスクによるロボットアームの耐久表試験を実施し、1日2時間1ヶ月の連続稼働が可能であることを確認した（図5）。

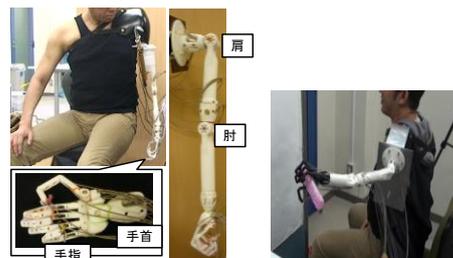
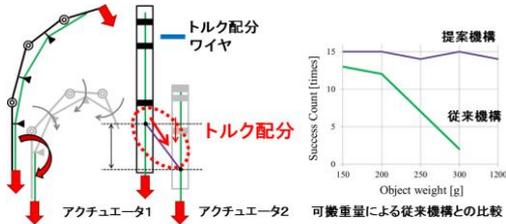


図5 干涉駆動系を用いた多制御自由度高出力ロボットアーム (左図)と耐久試験の様子 (右図)

また、上記筋電義手に搭載されているアクチュエータを効率的に利用するため、つまみなどの数本の指がタスクに関与しその他の指が関与しない状況において、その他の指の駆動に使用するアクチュエータの動力をタスクに関与する指へ配分可能な干渉駆動機構を開発した(図6)。配分の有無の切り替え条件を適切に設計することにより指間の独立性を一定程度確保しつつ目的とするタスクにおける指先力が飛躍的に向上した。



Pinching motions	(non-allocation)	トルク配分あり	トルク配分なし	トルク配分あり
Index power	33.6 N	54.8N (+63%)	46.0N (+37%)	41.6N (+24%)
Middle power	32.6 N	-	45.4N (+39%)	35.0N (-)
Ring power	32.2 N	-	-	41.4N (+29%)
Pinky power	33.6 N	-	-	-

トルク配分の有無による各指先力とその増加率

図6 パラレルワイヤ干渉駆動を用いた動力配分メカニズムとその効果

さらに、本研究成果で開発された上肢ロボットアームは、生理学研究所伊佐グループ及び大阪大学医学部吉峰・平田研究グループに技術供与し、サル及びヒトの皮質脳波による上腕ロボットアームの制御に関するBMI研究の発展に寄与している技術である。また、国立障害者リハビリセンター森研究グループにも技術供与し、触手話ロボットへの応用も検討され、上肢機能欠損以外にも、難聴者の情報インターフェースの実現にも寄与している。

② 拇指を含む手指リハビリ装置の開発

手指麻痺者のリハビリ支援を目的として、麻痺指を他動的にロボットによって動かす手指リハビリ装置の開発を行った。手先重量の軽減と様々な指長に対応するリンク機構をベースにしたワイヤ駆動型の5指屈伸補助装置を実現した(図7)。さらに、複雑な構造である拇指CM関節の2自由度をそれぞれ独立にアシスト可能な「拇指CM関節のパワーアシスト」を開発した。これにより、複雑な物体への把持を適切な形でアシストすることが可能となった。

一方、日常生活利用を考えた装着性の向上を試みた。麻痺者自身が単独で装着可能なフック型固定機構による指伸展機構を開発し装着性を向上させ、また様々な麻痺症状を考慮した意図推定アルゴリズムによって動作する、利用者の負担が軽減された長期リハビ

リが可能なアシスト装置が完成した。



図7 拇指CM関節アシスト機構と簡易装着機構

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① 佐藤圭太, 森下壮一郎, 渡辺秀典, 西村幸男, 加藤龍, 伊佐正, 横井浩史:” 硬膜下電位からのサル捕食運動中の状態判別とロボットアーム動作決定”, 日本ロボット学会誌, 査読有、Vol.31 No. 1, pp. 51-59, 2013, <http://dx.doi.org/10.7210/jrsj.31.51>
- ② Soichiro Morishita and Hiroshi Yokoi、Internal Security Issues Related to Automatic System Malfunction and a model to Explain Foresight of Experts and Non-Experts、Journal of Disaster Research、査読有、6巻5号、2011、498-505, <http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=DSSTR00060005004.xml>
- ③ Masayuki Hirata, Kojiro Matsushita, Takuhumi Yanagisawa, Tetsu Goto, Shayne Morris, Hiroshi Yokoi, Takafumi Suzuki, Tekeshi Yoshida, Fumihiro Sato, Osamu Sakura, Yasuyuki Kamitani, Toshiki Yoshimine, Motor Restoration based on the Brain Machine Interface using Brain Surface Electrodes: Real Time Robot Control and a Fully-implantable Wireless System, Advanced Robotics, 査読有、26/3-4, 399-408, 2011/10. DOI:10.1163/156855311X614581
- ④ 中村達弘、加藤龍、森下壮一郎、横井浩史、五指ハンド筋電義手のための制御システム、まぐね(日本磁気学会学会誌)、査読有、6巻4号、2011、206-212
- ⑤ 横井浩史, 山村修, 小林康孝, 加藤龍, 中村達弘, 森下壮一郎, 歩行運動補助のための反射運動系の電気刺激装置開発, BRAIN and NERVE, 査読有、第62/11、1227-1238, 2010/11

[学会発表] (計 27 件)

- ① 羽石雅貴、關達也、鈴木陽介、横井浩史、下条誠、“義手のための滑り覚センサの研究開発と実装”、第 13 回計測自動制御学会 SI 部門講演会、福岡国際会議場、2012. 10
- ② 高澤駿介、田中啓太、關達也、加藤龍、横井浩史 “多様な把持形態が可能な筋電義手を実現するためのワイヤ駆動型母指CM関節の開発” 第 30 回ロボット学会学術講演会、札幌コンベンションセンター、2012. 9
- ③ 田中啓太、中川慎也、關達也、加藤龍、横井浩史：“乳幼児および小児のための多自由度筋電義手の開発” 日本機械 2012 年度年次大会、J154013、金沢大学 角間キャンパス、石川、2012. 9
- ④ 望月 大二郎、中村 達弘、加藤龍、横井浩史：“多点振動子アレイを用いた義手の体性感覚フィードバック” 日本機械 2012 年度年次大会、J241021、金沢大学 角間キャンパス、石川、2012. 9
- ⑤ Tatsuhiro Nakamura, Ryu Kato and Hiroshi Yokoi：“The Effects of Delay Time Elements in Myoelectric Prosthetic Hand” SICE Annual Conference 2012, Akita University, Akita, Japan, 2012. 8
- ⑥ 鈴木美奈子、森崇、静井章朗、加藤龍、横井浩史：“機能的電気刺激を用いた麻痺肢の運動補助に関する研究” 第 29 回日本ロボット学会 学術講演会、1H1-5、芝浦工業大学 豊洲キャンパス、東京、2011. 9
- ⑦ 佐藤圭太、森下壮一郎、西村幸男、渡辺秀典、加藤龍、南部篤、伊佐正、横井浩史：“硬膜下電位からのサル捕食運動中の状態判別とロボットアーム動作決定” 第 29 回日本ロボット学会 学術講演会、301-5、芝浦工業大学 豊洲キャンパス、東京、2011. 9
- ⑧ 酒井康行、中川慎也、加藤龍、横井浩史：“自力簡易装着を可能とする手指伸展運動支援装置の開発” 第 32 回バイオメカニズム学術講演会、2B-5、大阪科学技術センター、大阪、2011. 11
- ⑨ 中村達弘、加藤龍、横井浩史：“筋電義手システムにおける無駄時間要素が操作性に及ぼす影響について” 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011、03-4、芝浦工業大学 芝浦キャンパス、東京、2011. 11
- ⑩ 關達也、加藤龍、横井浩史：“把持の多様性と高い把持力を実現する指を跨ぐワイヤ干渉駆動系を用いた五指型筋電義手の開発” 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011、03-4、芝浦工業大学、東京、2011. 11
- ⑪ 田中啓太、中川慎也、關達也、加藤龍、横井浩史：“先天性前腕欠損を対象とした幼児用多自由度筋電義手の開発” 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011、03-3、芝浦工業大学 芝浦キャンパス、東京、2011. 11
- ⑫ 望月大二郎、中村達弘、加藤龍、森下壮一郎、横井浩史：“多点振動子アレイによる義手の体性感覚フィードバック” 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011、03-3、芝浦工業大学 芝浦キャンパス、東京、2011. 11
- ⑬ 安藤啓祐、酒井康行、中川慎也、加藤龍、横井浩史：“母指の麻痺を改善するリハビリテーション支援装置の開発” 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011、02-14、芝浦工業大学 芝浦キャンパス、東京、2011. 11
- ⑭ 加藤龍、中川慎也、横井浩史：“手指リハビリテーションのための筋電制御型手指パワーアシスト装置の開発” 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会、J09、金沢大学 角間キャンパス、石川、2011. 9
- ⑮ 酒井康行、加藤龍、横井浩史：“拘縮指の伸展姿勢を維持するための器具を用いた手指リハビリテーション支援装置の装着法” 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会、J08、金沢大学 角間キャンパス、石川、2011. 9
- ⑯ 酒井康行、加藤龍、横井浩史：“自力簡易装着を実現する伸展運動支援機構の開発” 第 29 回日本ロボット学会 学術講演会、3H1-7、芝浦工業大学 豊洲キャンパス、東京、2011. 11
- ⑰ 中川慎也、關達也、加藤龍、横井浩史、山村修：“手指リハビリテーション支援装置の随意制御のための表面筋電位を用いた動作意図の推定に関する研究” 第 29 回日本ロボット学会 学術講演会、3H1-2、芝浦工業大学 豊洲キャンパス、東京、2011. 11
- ⑱ Taketomo Hirata, Tatsuhiro Nakamura, Ryu Kato, Soichiro Morishita, and Hiroshi Yokoi：“Development of Mobile Controller for EMG prosthetic hand with Tactile Feedback” 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 査読有、MA4.2, Hotel Mercure Budapest Buda, Budapest, Hungary, 2011. 7
- ⑲ 森下壮一郎、佐藤圭太、中村達弘、梅田達也、渡辺秀典、加藤龍、伊佐正、横井

- 浩史：“サル
の脳神経活動パターンからの動作識別と上腕電動義手の制御に関する研究”，第12回日本電気生理運動学会，東京工業大学 すすかけ台キャンパス，神奈川，2011.3
- ⑳ 加藤 龍，中川 慎也，横井 浩史，山村 修：“筋電制御型手指パワーアシスト装置による手指リハビリテーション”，東京工業大学 すすかけ台キャンパス，神奈川，Mar. 2011.3
- ㉑ 森崇，關達也，加藤龍，森下壯一郎，横井浩史：“表面電気刺激を用いた下肢麻痺者の歩行補助に関する研究—補助とリハビリテーションを目的とした小型刺激装置の開発—”，第31回バイオメカニズム学術講演会，pp.279-280，静岡大学，浜松，2010.11
- ㉒ 中川慎也，酒井康行，關達也，加藤龍，横井浩史：“手指リハビリテーションのための筋電制御型手指パワーアシスト装置の開発”，第31回バイオメカニズム学術講演会，pp.277-278，静岡大学，浜松，2010.11
- ㉓ 山岸大亮，關達也，加藤龍，横井浩史，“日常生活を想定した五指型筋電義手の開発—五指による把持動作の違いが操作性に与える影響—” 第28回日本ロボット学会 学術講演会、1C3-3、名古屋工業大学、名古屋、2010.9
- ㉔ 關達也，加藤龍，横井浩史，“五指型筋電義手のためのワイヤ干渉駆動メカニズム—多指を跨ぐ二関節筋構造の提案—” 第28回日本ロボット学会 学術講演会、1J2-7、名古屋工業大学、名古屋、2010.9
- ㉕ Keita Sato, Tatsuhiko Nakamura, Soichiro Morishita, Tatsuya Umeda, Hidenori Watanabe, Ryu Kato, Tadashi Isa and Hiroshi Yokoi, “Classification analysis of Monkey ECoG data for reaching motion,” UEC & SJTU Proceedings of 3rd International Symposium on Robot and Artificial Intelligence, Shanghai, CHINA, 2010.6
- ㉖ Yasuyuki Sakai, Hiroshi Yamaura, Ryu Kato and Hiroshi Yokoi, “Power assist device of finger motion for stroke patient,” UEC & SJTU Proceedings of 3rd International Symposium on Robot and Artificial Intelligence, Shanghai, CHINA, 2010.6
- ㉗ 佐藤圭太，中村達弘，森下壯一郎，梅田達也，渡辺秀典，加藤龍，伊佐正，横井浩史：“硬膜下電位を用いたサルの捕食運動の識別，” 第28回日本ロボット学会 学術講演会，1H1-1，名古屋工業大学，名古屋，2010.9

〔図書〕（計2件）

- ① Hiroshi Yokoi, Sato Keita, Soichiro Morishita, Tatsuhiko Nakamura, Ryu Kato, Tatsuya Umeda, Hidenori Watanabe, Yukio Nishimura, Tadashi Isa, Katsunori Ikoma, Tamaki Miyamoto, and Osamu Yamamura, “Advances in Therapeutic Engineering” p219-250, 2012
- ② Hiroshi Yokoi, Ryu Kato, Takashi Mori, Osamu Yamamura and Masafumi Kubota, Technological Advancements in Biomedicine for Healthcare Applications, IGI Global, USA, p180-192, 2012

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：ロボットハンドおよびロボットシステム

発明者：横井浩史，加藤龍，中村達弘

権利者：東京大学

種類：特許

番号：特願 2010-119237

出願年月日：2010年5月26日

国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

横井・加藤研究室ホームページ

<http://www.hi.mce.uec.ac.jp/ykclub/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横井 浩史 (YOKOI HIROSHI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90271634

(2) 研究分担者

下条 誠 (SHIMOJO MAKOTO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90292474

生駒 一憲 (IKOMA KATSUNORI)

北海道大学・大学病院・教授

研究者番号：70202918

加藤 龍 (KATO RYU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：70516905