

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300206

研究課題名(和文)個人適応型肩義手システムの研究開発

研究課題名(英文)Development of Individual-Adaptive Shoulder Prosthetic Systems

研究代表者

俞文偉(YU, Wenwei)

千葉大学・フロンティア医工学センター・教授

研究者番号：20312390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円、(間接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は日常生活の使用に適する肩義手システムを構成、検証・評価することを目的とする。まず、空気圧アクチュエータとサーボモータを可動域、衝撃の吸収などを考慮し、適所で使い分けるハイブリッド型ロボットアームの設計、開発を行った。軽量(<800g)、多自由度(5)、そして安全な肩義手を実現することができた。また、統計的手法を用いて切断者の肩周辺の生体信号から前腕到達動作、手の把持姿勢を推定するインタフェースを構築した。さらに、音による義手の圧覚、関節角度を提示する音フィードバックを開発した。それらを統合し、構築した肩義手システムの検証・評価実験を行い、日常生活動作において、各手法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：This project aims at developing a trans-humeral prosthesis which can be used in daily living. A hybrid robotic arm was designed with pneumatic actuators and servo motors, taking into consideration the range of motion (ROM) and impact absorption. After verified with a simulation study, a robotic arm less than 800g, with 5 DOFs (degree of freedom) was prototyped. An adaptive user interface was established, in which around-shoulder bio-signals were used to detect direction of reaching and configuration of grasping to make. An audio-feedback for tactile information and joint angles was built. All the components developed were integrated to a trans-humeral prosthesis, and the effectiveness of each components and the system as a whole was verified through a set of experiments.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・(リハビリテーション科学・福祉工学)

キーワード：生体機能代行 インタフェース 肩義手

1. 研究開始当初の背景

上肢は人の知的作業の大半を担い、その切断は労働や日常生活に大きな障害となる。切断された上肢の機能再建を目的とし、切断者の意志で駆動される電動義手の重要性は非常に高い。

近年、メカトロニクス技術の発展より、ヒトのアームに形状的、機能的類似するモータ駆動・金属フレーム型電動肩義手が開発されてきた。ロボットアームについては、Politecnico di Milano アームは5本の人工筋肉で肩の3自由度を実現している。また、Festo社(<http://www.festo.com>)の Airic's Arm は、ヒト上肢の筋・骨格と同様な構造で、人工骨と人工筋肉を配置したロボットアームである。ただし、これらは、いずれ肩義手用ではない。Utah Arm 3 は肘動作を含む前腕動作をサポートする製品であるが、肩の動作を補助せず、また、モータを用いることで動作が“硬い”。一番先端的な肩義手といわれるアメリカ DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) の Bionic Arm もモータと金属フレームによって構成され、装着にはかなり手間がかかる。日常生活の使用における安全性に不可欠な固有柔軟性を持ち、軽量、装着・携帯便利なロボットアームはまだない。

また、前腕義手と異なり、制御信号源として用いられる残存上肢機能が少ないため、使用者と肩義手とのインタフェースの構築が困難である。侵襲性のインタフェース技術においては、関連残存神経から運動意思を直接に検知し、または関連残存神経を直接に刺激することに基づく。EU の CYBERHAND Project は埋め込み電極、また DARPA にサポートされている RIC Bionic 上肢義手プロジェクトは神経移植をインタフェース実現のベースとしている。しかし、それらの侵襲性インタフェース技術は、まだ予備的研究の段階にあり、免疫面、衛生面または材料の生体適合の問題に対処しなければならず、コスト面の問題点もあり、実用まではまだ長い年月がかかる。従って、当面非侵襲型インタフェースの技術基盤を確立する必要がある。

非侵襲型インタフェースとしては、指や前腕を動かすための残存運動イメージ(residual kinetic imaging)を適切なセンサー配置及び信号処理によって抽出し、それを手と前腕運動意図の識別に用いられた。しかし、肩義手のための制御信号源の検討はほとんどない。さらにこれまでの非侵襲型インタフェースには、筋肉や関節の状態を表す固有感覚情報(proprioception)などの求心性感覚フィードバック情報が欠如されており、視覚情報のみで、肩義手全体の状況を動的に把握するには、使用者への認知的負担(Cognitive Burden)が大き

く、技能獲得は十分な感覚情報が得られないため遅くなる。現状としては、肩の切断者は、ワイヤーとハーネスを介して、体や肩の動きで操作する能動用義手以外に選択肢がない状態に陥っている。

2. 研究の目的

本研究は、小型空気アクチュエータを用いて、固有柔軟性を持つ軽量、高自由度、携帯可能なロボットアームを構築し、また、肩義手のための動的個人適応型インタフェースを開発することによって、日常生活の使用に適する肩義手システムを構成、検証・評価することを目的とする。

3. 研究の方法

以下の項で、研究開発を進めていく。

- ▶ 携帯可能で、すべて専用リュックパックに収納できる軽量(アーム部<6Kg)、高自由度(ハード部と合わせて15自由度)多節パラレルリンクロボットアームの開発；
- ▶ 異なる上肢動作を区別するための肩、背部の筋活動より前腕動作の動的モデルの構築、そのセンサーモジュールの確立、そして装着型センサハーネスの開発；
- ▶ 申請者らがこれまで提案、検証してきた補助機器と使用者の相互適応型学習法を肩-アーム-手複合体の協調動作(切断者にとって補助動作)へ拡張し、協調動作の個人差と時間変化性に対応する学習法の開発により動的意図識別法の確立；
- ▶ ボディ運動イメージ修正のメカニズムの解明、及び動的補助動作の過程に応じて、電気、機械振動、音声などの物理システムで身体に多くの情報量を転送できるマルチモーダル刺激スキームを開発し、感覚フィードバックの実現；
- ▶ システムの統合、検証・評価実験。

4. 研究成果

まず、小型空気圧アクチュエータとサーボモータの可動域、衝撃の吸収などを考慮し、適所で使い分けるハイブリッド型ロボットアームの設計、開発を行った。軽量(<800g)、多自由度(5)、そして安全な肩義手を実現することができた。また、統計的手法を用いて切断者の肩周辺の生体信号から前腕到達動作の方向、把持動作の手先姿勢を推定するインタフェースを構築した。さらに、音による義手の圧覚、関節角度を提示する音フィードバックを開発した。それらを統合し、構築した肩義手システムの検証・評価実験を行い、日常生活動作において、各手法の有効性を示し

た。

4.1 ロボットアームの構築

本研究プロジェクトは、Hand-to-Face 日常生活動作を中心にロボットアームの設計、検証を行った。日常生活動作の計測(図 1)によって、アームの作業空間、各関節の可動域を明らかにし、設計の基礎データとした。

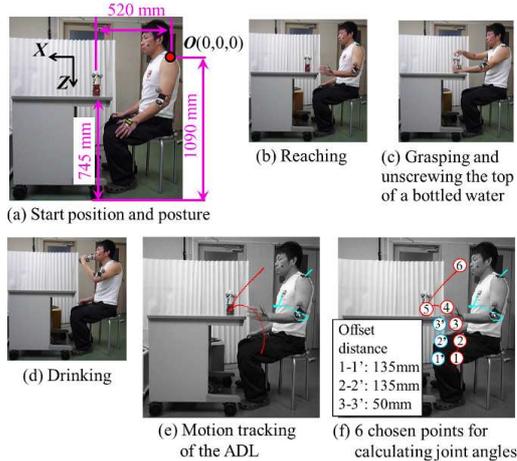


図 1 Hand-to-Face 動作の計測

上肢の各関節を考えると、肩関節の負荷が重く、また肩関節以下切断される場合、肩関節で、衝撃を吸収しなければならない。一方、Hand-to-Face 動作において、肘関節の肩関節と比べて、負荷が軽い、動作可動範囲が大きい。それらのことを考え、小型空気アクチュエータとモータの駆動特性、及び配置に必要なスペースを考慮し、小型空気アクチュエータとサーボモータを肩と肘関節のそれぞれに配置することとした。図 2 は設計図を示す。なお、図 2(c)には、装着のためのハーネスも表示している。その部分は、装着予定者の関節部の 3 次元計測データに基づき、設計することが可能となっている。

図 3 は、設計したロボットアームのプロトタイプを示す。当該ロボットアームは、5 自由度を持ち、重量は、写真で示す装着用部分を含め、800g 以下となる。なお、バッテリーや小型制御回路、小型コンプレッサ等を入れても 3Kg 以下となっている。それらの重量は、体幹に対する回転モーメントの最小化という原則で、重量分布していく。よって、使用者に大きな負担にならない。この点については、動的モデルの研究ですでに、明らかにしている。

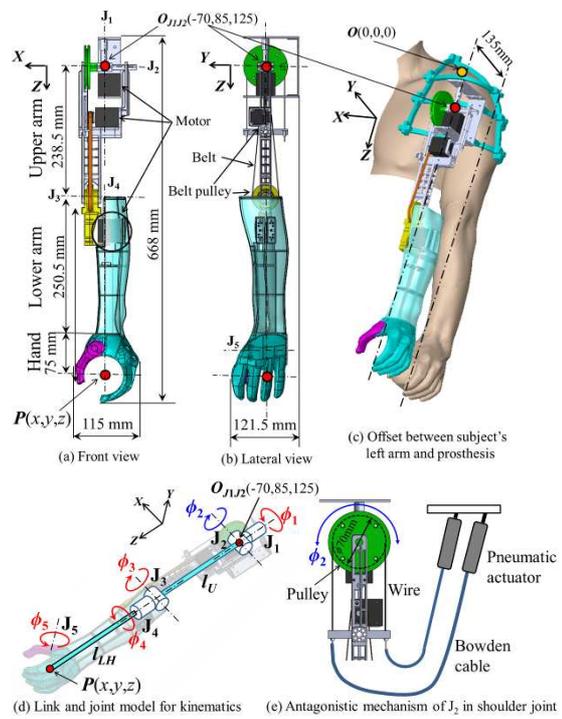


図 2 ハイブリッド型肩義手の設計

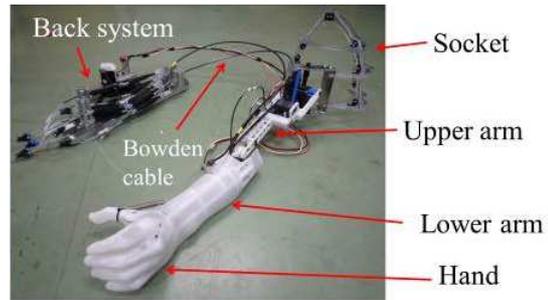


図 3 ロボットアームのプロトタイプ

4.2 肩周辺筋活動よりリーチング動作の方向と把持動作の手先の姿勢の識別

本研究では、上肢のリーチング運動の 5 方向、および把持動作の手先の 3 姿勢(図 4)と筋活動・関節運動情報の中に、識別に有用な因果関係が存在すると仮説を立て、その抽出方法を提案し、仮説を証明していく。

複数要素間の因果関係探索にはベイジアンネットワーク (BN) が利用される。BN は確率的な因果関係を示すグラフィカルモデリングであり、変数 (ノード) と変数間の因果関係を表すアークからなる。本研究では、肩近傍で計測した筋活動・関節運動情報をノードとした BN を構築し、上肢運動—筋活動・関節運動情報間の因果関係から識別に有用な関係の抽出を試みる。

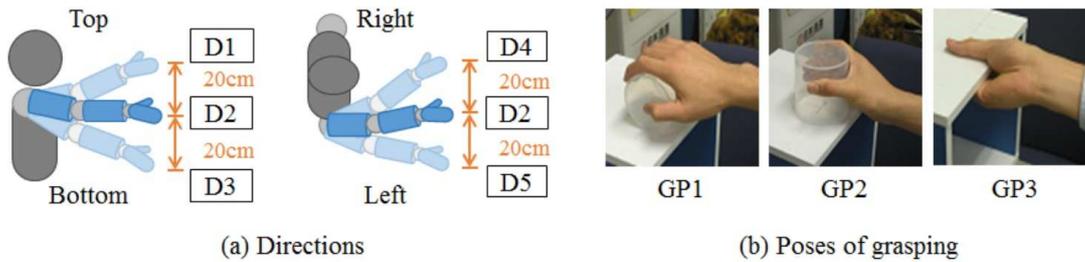


図4 リーチングの5方向と把持の3手先姿勢

被験者4名の実験データより、解析した結果、すべての被験者において方向と把持姿勢を少なくとも70%以上識別できるノードを確認することができた。図5では、一名の被験者において、5リーチング方法(D1-D5)、3把持姿勢(GP1-G3)を識別用のノードを示している。以上より、上肢運動—筋活動・関節運動の間に、リーチング方向と把持姿勢の識別に有用な因果関係が存在することが示唆され、また識別システムの構築が可能であることを示した。

4.3) 音による感覚フィードバック

上肢切断者は、その運動機能のみならず感覚機能も失っている。日常生活における生活支援にとっては、感覚機能の代行も不可欠である。これまでの感覚機能代行の研究分野においては、運動機能の代行を果たす義手の把持運動時の触覚を電気刺激、機械刺激でフィードバックする研究、及び視覚に頼って運動覚(Kinesthesia)をフィードバックする研究が主流であった。しかし、前者には情報量が少ない、直感性に欠けるなどの問題点があり、後者には、認知負荷が高く、日常生活での使用に適しないといった問題点がある。さらに、感覚機能代行の評価には目標達成時間、スコアなどのパフォーマンス評価のみが用いら

れており、精神作業負荷(Mental Load)や注意などの認知的側面は考慮されていない。

本研究は、日常生活における運動・感覚機能代行を目指し、音響ディスプレイ(Auditory Display)を用いて、上肢動作の到達・把持運動時の触覚、運動覚を使用者にフィードバックする感覚機能代行法を提案、検証したものである。また心理生理学における生体信号モニタリング手法、アンケート手法を用いて、感覚機能代行の認知的側面を客観的、主観的両面から評価を行った。

表1 音によるフィードバックとフィードバック無しの比較

Measurement	Comparison
Trial Duration	NAF>AF**
Trial Duration with an Error	NAF>AF*
Trial Duration with No Error	NAF>AF
Error Fixing Duration	NAF>AF**
Grip Force	NAF>AF**
EMG Activation	NAF>AF**

NAF: No Feedback, AF: Auditory Feedback
*: p<0.05, **: p<0.01

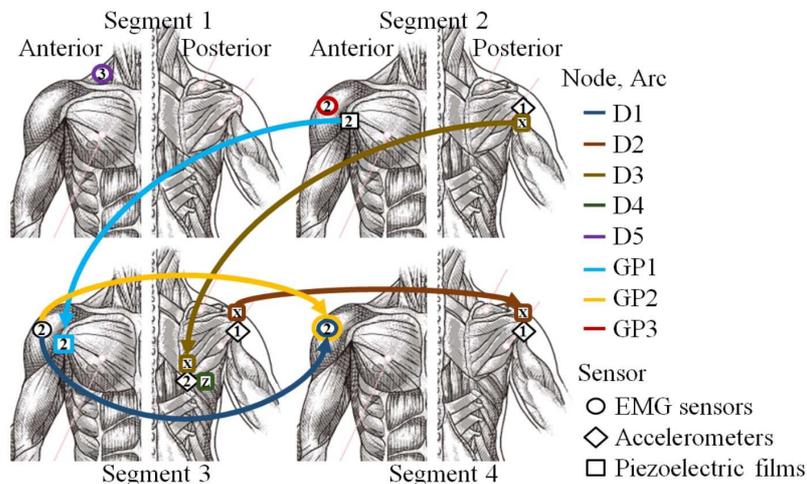


図5 各動作の識別に有用なノードとアーク

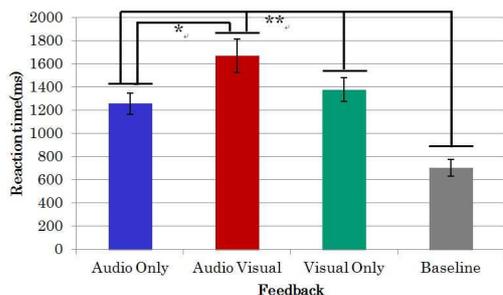


図 6 OddBall 課題を用いたメンタルワークロード計測実験の結果：目標刺激に対する反応時間(**: $p < 0.01$)

音によるフィードバックの効果をフィードバック無しの結果との比較で明らかにした (表 1)。

パフォーマンス指標、及び心理生理学指標 (図 6) によって、異種複数感覚情報伝送においては、適切な音響ディスプレイは視覚に相当する感覚情報フィードバック能力を有することが立証された。

また、主観的評価に用いられたアンケート調査と客観的評価に用いられた生体信号モニタリングの比較によって、感覚機能代行の評価に適する生体信号チャンネルが存在することが示された。

4.4 評価実験

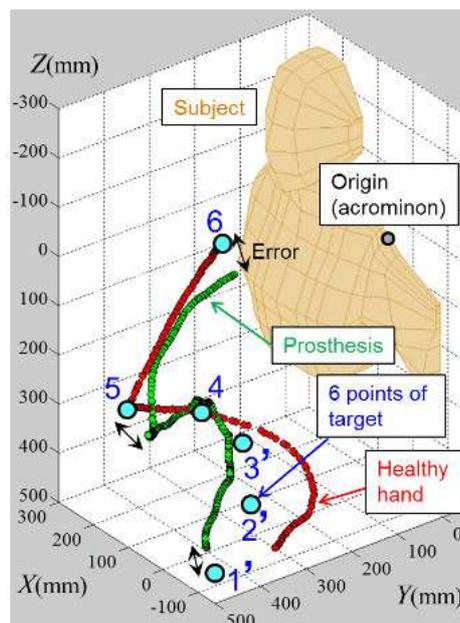
すでに開発している動作識別システムとの連動を実現した。その統合した肩義手システムを用い、Fugl-Meyer Assessment (FMA) から、日常生活活動の中でも重要とされる食事を取るための動作を中心に、リーチングや把持機能を実験的評価した。運動学的指標と臨床評価指標を上肢機能の改善を評価に用いた。図 7 には、肩義手制御実験における目標軌跡と実現した軌跡を示す。被験者が肩義手を使用していくにつれて、慣れていく過程が記録され、また、ハーネスと肩のはめ込みによって、手先が多少ずれることが分かった。装着性、携帯性について、引き続き改善する必要がある。

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 9 件)

- 1) Masashi Sekine, Kento Sugimori, Jose Gonzalez and Wenwei Yu, Optimization-Based Design of a Small Pneumatic Actuator Driven Parallel Mechanism for Shoulder Prosthetic Arm with Statics and Spatial Accessibility Evaluation, International Journal of Advanced Robotic



Error between 6 points and trajectory:(unit:mm)
1: 43.6, 2: 58.0, 3: 37.2, 4: 19.2, 5: 59.8, 6: 74.5

図 7 制御実験の義手の関節軌跡誤差

- 2) Jose Gomez-Tames, Jose Gonzalez, and Wenwei Yu, A Simulation Study on the Dominance of the Tissues' Conductivity in the Muscle Recruitment, J. Med. Imaging Health Inf. 3, 72-78, 2013
- 3) Nevrez Imamoglu, Jose David Gomez-Tames, Wenwei Yu, "Salient Region Detection and Analysis Based on the Weighted Band-Pass," Journal of Software Engineering and Applications, Vol.6 No.5B, pp. 43-48, DOI: 10.4236/jsea.2013.65B009, May 2013.
- 4) Nergui Myagmarbayar, Yoshida Yuki, Nevrez Imamoglu, Jose Gonzalez, Mihoko Otake, and Wenwei Yu, Human Activity Recognition Using Body Contour Parameters Extracted from Depth Images, Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 3(3), pp. 455-461, 2013
- 5) Myagmarbayar Nergui, Yuki Yoshida, Nevrez Imamoglu, Jose Gonzalez, Masashi Sekine, Wenwei Yu, "Human motion tracking and recognition using HMM by a mobile robot", International Journal of Intelligent Unmanned Systems, Vol. 1 Iss: 1, pp.76 – 92, 2013
- 6) Jose Gonzalez, Hirokazu Soma, Masashi Sekine, Wenwei Yu, Psycho-physiological Assessment of a Prosthetic Hand Sensory Feedback System base on an Auditory Display: A Preliminary Study, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Vol. 9, issue 1, pp.9-33, 2012
- 7) Bao Ping Yuan, Wenwei YU, Feedback Error Learning for FES Control, Applied Mechanics and Materials, Vols. 220-223, pp.

1619-1624, 2012

- 8) 関根雅, 兪 文偉, 空間アクセス性評価に基づく肩義手の研究—小型空気圧アクチュエータを用いたパラレルリンクアームの設計試作—, ライフサポート, Vol. 24, No. 4, pp. 170-177, 2012
- 9) Jose Gonzalez, Hirokazu Soma, Masashi Sekine, Wenwei Yu Auditory Display as a Prosthetic Hand Biofeedback, Journal of Medical Imaging and Health Informatics, Vol. 1, Num. 4, pp. 325-333, 2011

[学会発表] (計 10 件)

- 1) Natsuki Hayata, Jose Gonzalez, Wenwei Yu, Audio Displays as Sensory Feedback for Prosthetic Application, its Performance and Mental Workload Evaluation, The 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), accepted
- 2) Yuto Fukuhara, José Gómez-Tames, Wenwei Yu, An Experimental Study on the Effect of Fat Conductivity on Voltage Distribution and Muscle Recruitment Using Tissue-Equivalent Phantoms, The 4th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB 2013, Iași, Romania, November 21-23, 2013
- 3) Wenwei Yu, (invited), Towards Dynamical Coupling in Motor-Sensory Function Substitution, 2013 International Symposium on InfoComm & Media Technology in Biology Medical & Healthcare Applications (2013 IS 3T-in-3A) Taiwan, Nov., 2013
- 4) Wenwei Yu, (invited), Upper Limb Function Restoration: Interface, Sensory Feedback and Training, 2013 International Conference of Rehabilitation Medicine and Engineering, Shanghai, China, May, 2013
- 5) Masashi Sekine, Wenwei Yu, Dynamical Analysis of Trunk Load Caused by Different Weight Distribution of Prosthetic Arm Systems, The 15th IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2013), Hawaii, USA, Aug., 2013
- 6) Tapio V. J. Tarvainen, Wenwei YU, Development of MorphHand: Design of an Underactuated Anthropomorphic Rubber Finger for a Prosthetic Hand Using Compliant Joints, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2012年12月11日～2012年12月14日, GuangZhou, China
- 7) Masashi Sekine, Tapio V. J. Tarvainen, Wenwei YU, Prototyping a Parallel Link Arm Driven by Small Pneumatic Actuator for Shoulder Prostheses, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2012. Feb. 23, Chiba, Japan

- 8) Masashi Sekine, Wenwei YU, Designing Shoulder Prostheses with a Small Pneumatic Actuator Driven Parallel Mechanism for Spatial Accessibility in Daily Living Use, 34th Annual International IEEE EMBS Conference, 2012年08月28日～2012年09月03日, San Diego, USA
- 9) Hiroyuki Suzuki, Wenwei YU, Using Piezoelectric Films for Classification of Upper Arm Motions: A Preliminary Report, 34th Annual International IEEE EMBS Conference, 2012年08月28日～2012年09月03日, San Diego, USA
- 10) Hirokazu Soma, Wenwei YU, A Study on the Upper Limb Muscular Reflexes For Prosthetic Applications, Medical Engineering Week 2012 in Chiba, 2012. Feb. 23, Chiba, Japan

[図書] (計 3 件)

- 1) Wenwei Yu, Advances in Therapeutic Engineering, CRC Press, 474p, 2012
- 2) Hirokazu Soma, Yuse Horiuchi, Jose Gonzalez and Wenwei Yu, Chapter 3: Classification of Upper Limb Motions from Around-Shoulder Muscle Activities of Advances in “Applied Electromyography”, InTech Publisher, 14 (p.41-54), 2011
- 3) Masashi Sekine, Kento Sugimori and Wenwei Yu, Chapter 6: To Design a Small Pneumatic Actuator Driven Parallel Link Mechanism for Shoulder Prostheses for Daily Living Use in “On Biomimetics”, InTech Publisher, 26 (p. 107-132), 2011

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等
http://www.tms.chiba-u.jp/~yu/research_gishu.html

6. 研究組織
(1)研究代表者

兪 文偉 (Yu Wenwei)
千葉大学・フロンティア医工学センター・
教授
研究者番号 : 20312390