

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22240015

研究課題名(和文) 身体運動・感覚経験の蓄積に基づく動作理解機能の構成論

研究課題名(英文) Constructive Study of Action Understanding Based on Collection of Embodied Sensory-Motor Experiences

研究代表者

國吉 康夫 (Kuniyoshi, Yasuo)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：10333444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,000,000円、(間接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：人の動作生成は、多様な要素を状況に応じて動的に組織化している。本研究ではその代表例として、日常生活中での手指による多様な物体操作に着目し、独自開発の超薄型高分解能触覚運動計測グローブを用いて、人の自然な感覚運動情報を詳細に計測・蓄積・解析することに成功した。その結果、手指の感覚運動制御の複合的構造を明らかにし、2系統の脳神経系制御経路が関与するとの新たな仮説にも結び付いた。これ以外に武術動作や棒高跳びのコツの解析と実機実験も行った。

以上の成果により人の動作生成に関する新たな知見を提示し、また人の感覚運動計測解析技術の進歩にも寄与した。

研究成果の概要(英文)：In human motion generation, many elements are dynamically organized. We focused on manual manipulation of everyday objects as a representative example. We developed an ultra-thin high-resolution tactile-motion sensing glove. Using it we carried out detailed measurements of natural human sensory-motor information, accumulated and analyzed the data. It revealed a compound structure of sensory-motor control of human hand, suggesting a dual neural pathway in charge, a new hypothesis. Analyses and robotic experiments on the knacks of martial arts and pole vaulting skills are also carried out.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知覚情報処理 知能ロボティクス 感覚行動システム 実世界行動データベース

1. 研究開始当初の背景

「ロボット学」では、身体運動の生成過程を、単一の目的を志向した最適な動作と考える。しかし、人の身体運動の生成過程は、複数の解釈が可能で多面的・冗長な動作を多く含む創発的過程であると捉えることができる。

申請者らは、過去に、動作の「コツ」に相当する概念を、動力学的・情報論的構造上の疎らな分節点として定式化し、人間行動計測、ロボット実験を通じて具体的に明らかにし、これをもとに、実世界中でのロボット全身行動スキルを安定に実現する手法を構築した。具体的には、ダイナミックな起き上がり動作を研究対象とした。

人の動作は、「コツ」に注目する意識的な過程と無意識的な運動・感覚強調との相互作用によって創発的に生成されると考えられるが、「起き上がり」実験によって得られた知見が動作一般に見られる特性なのか、さらなる検証が不可欠である。

人の動作生成メカニズムを解明するためには、人の自由な行動とその際に得られる感覚情報を同時計測することが不可欠である。申請者らは、ロボットの全身分布触覚技術を開発してきており、本技術を応用することで、人の全身運動と接触状態を同時に計測する基盤技術の構築が可能となる。

2. 研究の目的

人の動作および感覚情報を同時計測し蓄積するための基盤技術を開発する。申請者らは過去に、全身の運動と接触情報を同時に計測可能な触覚センサスーツを開発しているが、人において際立って発達している「手」の運動については実現できていなかった。そこで、本研究では、特に人の手指の接触運動計測の基盤技術に注力する。そして、この基盤技術を応用し、運動と接触情報を同時計測することで、感覚運動のデータベースを構築し、無意識下の運動・感覚協調の原理を解明することが研究の目的である。

具体的には以下の要素からなる。

- (1) 全身行動の計測基盤技術の構築: 手指を含む全身の接触状態・その他感覚情報と運動を計測可能な動作計測技術を開発し、複数人の動作データを計測・蓄積するための基盤技術を構築する。
- (2) 動作データの構造化: 接触運動データの構造化のための計算手法を構築する。
- (3) 因果解析手法の構築: 感覚運動協調原理の抽出のために、因果関係解析手法を構築する。

3. 研究の方法

(1) 全身行動の計測基盤技術の構築:

人の指は、その巧みさにおいて際立った存在である。人の動作の多くは指を用いたものであるし、人は多様な物体の操作、道具使用を行うことができる。

しかし、申請者らがいままで開発してきた「全身接触運動計測装置」は手指の接触運動を計測することができなかった。人の運動について理解するためには、手指の運動を計測することが不可欠であり、その計測基盤技術を構築した。

薄型・柔軟・高密度圧力センサ

手指の接触情報を取得するためには、薄く、柔軟で高密度に、広い領域を実装できる圧力センサが必要となる。シリコン技術を応用した高密度圧力センサは、高解像度という条件を満たすが、手全体という比較的広い領域に実装することは困難である。このような要望を満たす技術がないため、独自に高密度圧力センサの構成法を開発する。

広い領域に柔軟な圧力センサを実装するために、フレキシブル基板 (FPC) 技術を応用する。薄く柔軟とするために、FPC に圧力センサを埋め込む方法をとる。FPC 上に圧力センサを一体成型することで、任意の位置に任意のサイズの圧力センサを実現することができる。

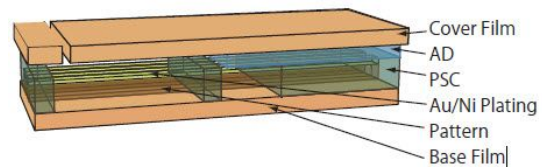


図1: 圧力センサの構造

圧力センサの構造は図1の通りである。通常のFPC製造工程を利用し、電極を構成する。配線部は光硬化樹脂 (PSC) でカバーした後、電極部を金メッキ処理する。その後、接着剤を用いて、導電性のカバーフィルムを貼り付ける。カバーフィルムが電極に接触することで変化する接触抵抗を測定することで圧力を検知することが可能となる。

小型化の実現のために、素材の薄型化、電極形状の最適化を行う。また、カバーフィルムにスリットを設けることで、曲げに対して鈍感にし、感度を向上させる。

手指運動の計測技術

接触運動の計測に適した姿勢センサとして慣性センサ (加速度センサ、ジャイロセンサ) を利用した装置を開発した。8mm角の姿勢センサモジュールを開発し、片手に18個のセンサを用いて計測するシステムとした。18個の姿勢センサの情報をリアルタイム計測するた

めに、独自の通信技術の開発を行った。また、慣性センサ方式でしばしば問題となる重力方向回りのドリフトを除去するために、手形を用いた初期姿勢を決める台を用いた。実験の開始と終了時の姿勢を等しくすることで、ドリフトの影響を除去するアルゴリズムを開発する。

さらに、この手形と初期姿勢台を用いることで、手の3次元モデルの作成、手に対する姿勢センサの取り付けキャリブレーション、骨格推定、後述の触覚センサグローブの圧力点情報のモデル化を行う。

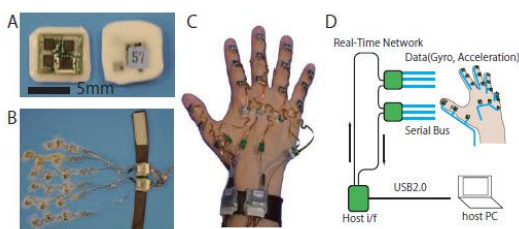


図2：開発した指の姿勢センサ

触覚センサグローブ

手の運動を阻害せず、人の手の触覚知覚を妨げない触覚センサグローブの開発を行う。実現のために、図3に示すような細帯基板に開発した圧力センサを埋め込む。

人の手の2点弁別域を考慮して、指先2~3mmピッチ、手のひら6mmピッチとして設計を行う。

細帯状の基板を用いて、エラストマーで覆うことで、伸縮性に富み運動を阻害しないグローブを構成する。

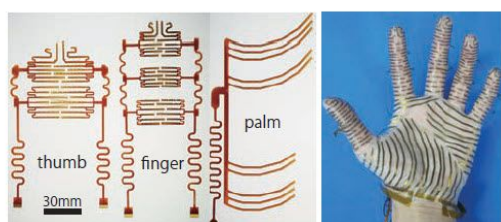


図3：開発した触覚センサグローブ

(2) 動作データの構造化：

手の上で円柱形状の物体を転がすタスクについて実験を行った。被験者には、回転の周期を一定とするために音刺激が与えられた。このときの手指の接触運動を、開発したシステムを用いて計測した。

円柱形状の物体は2種類用意した。1つ目の条件は重心が中央にある条件。2つ目の条件は重心に偏りがある条件である。この2条件について、それぞれ、触覚情報と運動情報について分散解析を行う。

まず、回転動作を周期ごとに切り出し、周期を正規化する。その後、圧力素子ごとに、接触の再現性とタイミングの分散を評価する。

接触の再現性は、毎周期接触があったかを評価する。タイミングは、接触があった場合に、正規化したタイミングの一致度を評価する。

運動については、関節角度変化の極値について、そのタイミングの一致度を評価する。

2つの異なるタスク間で分散構造を比較することで、人の指運動の生成戦略について考察する。

(3) 因果解析手法の構築：

多次元時系列にも適用可能な因果指標を情報理論に基づいて統一的に定式化した。もっとも単純な線形な因果性を定式化する指標を導出し、その結果をもとに非線形拡張を行った指標を導出した。これによって、従来から提案されてきた様々な運河指標を情報理論に基づいたエントロピーの形で表現可能となった。

(4) ロボット応用

人の運動計測結果を「コツ」として抽出し、人に教示することで動作を改善する実験、および、ロボットに実装することで、「コツ」を満たすロボットを開発した。

「押し動作」の実現

達人と呼ばれる人の動作は、常識では理解しがたいことがある。本研究では、古武術の達人の運動を計測し、そこから「コツ」を抽出し、ロボット応用した。

具体的には、人を押す動作の計測・解析を行い、全身の重心移動に関する「コツ」を抽出した。導出した「コツ」はコンピュータシミュレーションを用いて確認し、さらに人への教示による動作の改善があることを確認した。最後に、得られた「コツ」の情報をもとにロボットの動作生成を行うことで、ロボットによる「押し動作」を実現した。

「棒高跳び」ロボット

棒高跳びは、道具を用いたダイナミックな全身運動である。本研究では、棒高跳び時の棒への力のかけ方に着目し、走行時、離陸時、空中時における力のかけ方が重要であることをコンピュータシミュレーション実験によって明らかにし、この「コツ」をロボットに実装することで、跳躍高さを向上した。

4. 研究成果

(1) 日常物体操作データベースの構築

製作した圧力センサのサイズは、1.2x0.75mmと小型で、厚さも0.1mmと薄い。このサイズにも関わらず、0.01MPaの感度と曲げに対する鈍感を実現した。この感度は、日常物体動作を計測するには不可欠な感度であるが、小型サイズで実現することは極めて困難であり、現状の製造法で理論的に出している限界値となっている。

この圧力センサを片手 1000 点実装した触覚センサグローブを被験者ごとにカスタム製作し、被験者実験を行った。計測は 1000Hz で可能となっている。

4 名の被験者に対して、60 種類の日常物体の操作を行ってもらった。結果を図 4 に示す。従来、手の接触を計測した実験は、物体にインクをつけて手に写す方法、動画を人の目で分類する方法などであり、似たようなグローブコンセプトは提案されているが、われわれのように被験者実験を行いデータベース作成した例は存在しない。人の手の巧みさの秘密を解明し、ロボットへ応用するための貴重なデータベースとなることが期待される。



図 4：日常物体操作データベース

(2) 動作データの解析結果

2 種類の円柱物体 (C: 重心が中央条件、NC: 重心に偏り) を手の中で回転する動作について、分散解析を行った。

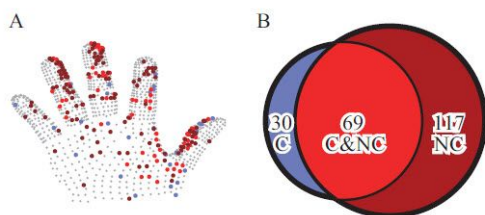


図 5：接触の分散解析の結果

2 つの条件について再現性が 90% を超え、タイミングの一致度が閾値を越える触覚センサをプロットしたのが図 5 である。

この結果より、再現性が得られた接触部位の多くが重複すること、NC 条件のほうが再現性の高い接触領域が広いことがわかる。条件 C では、重心が円柱の中央にあるために、重心が手のひらから外れることがなく安定性が高いのに対し、条件 NC では、重心が手のひらから外れやすく不安定な条件である。すな

わち、安定なタスクにおいてより分散が大きいという結果が得られた。

同様の結果は姿勢についても得られた。

このような分散構造の違いを、手指運動において、接触部位とタイミングについて解析した例は世界で初であり、われわれが過去に全身運動で示した「コツ」に相当する情報構造を反映した分散構造が、人の手指の制御でも得られること、さらに、接触情報と運動情報の両方について得られたことは、理論の一般化にとって重要である。

(3) 人の動作生成原理に関する考察

近年の動物実験などの結果から、巧みな運動において、大脳皮質からモータニューロンへの投射だけでなく、脊髄の介在ニューロンや脳幹脊髄路の重要性が明らかになりつつある。特に運動の自動化には、小脳 - 脳幹脊髄路の寄与が古くから提案されてきたが、人の手指の運動については例外視されてきた。

手指の運動を例外視する理由は、1) 皮質からモータニューロンへの投射数が手の巧みさと相関すること、2) 皮質からのモータニューロンへの投射が人においては十分な活動電位を生じること、3) 小脳 - 脳幹脊髄路系で手指の運動を担うとされる赤核脊髄路が人において退化していること、の 3 点である。このため、体幹の運動制御に成り立つことを安易に人の手指の運動制御に当てはめることはできない。

本研究課題で得られた知見は、手指の運動であっても、タスクの難易度が高い条件 (不安定な条件) で、より高い精度の制御を行うことを示し、これは、われわれが全身運動で過去に示した現象を手指でも示したことを意味し、この結果は、開発した高分解能触覚センサグローブによって得ることが可能となった。

これを説明するモデルとして、生物は、小脳 - 脳幹脊髄路によって大雑把に制御を行い、皮質による随意運動によってより精密な制御を行うという 2 つの制御系による調整制御モデルを提案することができる。

さらに、本研究で得られた知見は、人の手指の接触運動においても自動化が存在することを示唆するものであり、従来ほとんど無視されていた人の手指運動における小脳 - 脳幹脊髄路系の寄与を示唆している。

今後の展望としては、1) 大雑把系と精密系の 2 つの制御系による調整制御モデルのロボット応用、2) 人の運動制御の生成原理としての妥当性検証、3) 運動発達の観点からの人の運動制御生成原理の検証があげられる。

(4) まとめ

従来のロボット運動制御では、最適軌道と

いう単一の運動を扱ってきたが、実環境中での自然な感覚運動ループの下での人の動作生成はこれと異なり、多様な要素を状況に応じて動的に組織化していると考えられる。これが特に顕在化するの日常生活での手指による多様な物体操作であることに着目し、その感覚運動情報を詳細に計測することで、人の自然な感覚運動制御を解析することにした。

まず、世界でも他に例を見ない超薄型高分解能触覚運動計測グローブを開発し、人の手指の自然な触覚と運動を妨げずに様々な物体操作について計測しデータを蓄積した。これを解析し、状況に応じて異なる感覚運動戦略が用いられていることを定量的に明らかにした。これに基づき、人の手指動作制御の特性について、脳科学的にも興味深い新たな仮説の提示に至った。

また、手指動作以外の全身動作についても、コツの解析と人への教示実験、身体以外の道具を活用した棒高跳びのスキルの解析と実機実験等も行い、当研究グループが従来発見したコツの概念を一般化し深化させた。

以上の成果により、本研究は当初設定した目標を達成し、その過程で開発した計測装置やロボットに関し特許2件を含む技術的貢献も行い、手指制御に関する新たな脳科学的仮説など、当初想定以外の知見も得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Kazuya Shida, Toshihiko Fukushima, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi, A Musculoskeletal Bipedal Robot Designed with Angle-Dependent Moment Arm for Dynamic Motion from Multiple States, *Advanced Robotics "Cutting Edge of Robotics in Japan 2014"*, 査読あり, Vol. 28, No. 7, 2014, pp. 487-489, DOI:10.1080/01691864.2013.876936

尾形邦裕, 國吉康夫, 押し動作における自他身体誘導スキルの計測と解析, *日本ロボット学会誌*, 査読あり, vol.31, no.4, 2013, pp.72-82

Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Yasuo Kuniyoshi, Effect of preliminary motions on agile motions, *Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR2013)*, 査読あり, 2013

DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766534

Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Yasuo Kuniyoshi, Improvement of Energy Consumption by Movement of Center of Rotation of Joint", *Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2013)*, 査読あり, 2013, p.273-280

椋田悠介, 原田達也, 確率的偏正準相関

分析, *信学技報*, 第16回情報論的学習理論ワークショップ, 査読なし, 113巻, 2013, pp. 169-176

Weiwei Wan, Fukui Rui, Masamichi Shimosaka, Tomomasa Sato, Yasuo Kuniyoshi, A New "Grasping by Caging" Solution by Using Eigen-shapes and Space Mapping, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2013)*, 査読あり, 2013, pp.1558 -1565

鷺坂隆志, 大村吉幸, 長久保晶彦, 國吉康夫, 尾崎和行, 皮膚の変形に追従する高密度触覚センサグローブ, *日本ロボット学会誌*, 査読あり, Vol.30, No.7, 2012, pp.711--717

Takashi Sagisaka, Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, Akihiko Nagakubo, Kazuyuki Ozaki, Development and applications of High-Density Tactile Sensing Glove, *EuroHaptics2012*, 査読あり, 2012, pp.445-456

大村吉幸, 慣性センサによる手の姿勢計測時のドリフト削除, 第18回ロボティクスシンポジウム, 査読あり, 2013, pp.316-321

Takashi Sagisaka, Yoshiyuki Ohmura, Akihiko Nagakubo, Yasuo Kuniyoshi, High-density Conformable Tactile Sensor Glove, 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 査読あり, 2011, pp.537-542

Takashi Shibuya, Tatsuya Harada, Yasuo Kuniyoshi, Reliable index for measuring information flow, *PHYSICAL REVIEW E*, 査読あり, 2011, Vol.84, Issue 6, pp.061109-1 - 061109-7

原田達也, 國吉康夫, サイバー世界と実世界と人間社会を融合する情報爆発時代のロボット知能, *電子情報通信学会論文誌*, 査読あり, 2011, Vol.J94-No.6, pp706-710,

Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa, Yasuo Kuniyoshi, A Biomechanical Approach for Openloop Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot, *Advanced Robotics "Cutting Edge of Robotics in Japan 2012"*, 査読あり, 2012, Vol.26, No.1, pp383-398

鷺坂隆志, 大村吉幸, 國吉康夫, 森平智久, 手探りによる複数物体からの目標物探索, 第16回ロボティクスシンポジウム, 査読あり, 2011, pp.347-352

Cota Nabeshima, Yasuo Kuniyoshi, A Method for Sustaining Consistent Sensory-Motor Coordination under Body Property Changes Including Tool Grasp/Release, *Advanced Robotics*, 査読あり, 2010, Vol.24, No.5-6, pp. 687-717

Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi, Design principle based on maximum output

force profile for a musculoskeletal robot, Industrial Robot: An International Journal, 査読あり, 2010年, Vol. 37, No.3, pp.250 -255

〔学会発表〕(計 20 件)

西川鋭, 福島俊彦, 國吉康夫, 棒高跳びにおける跳躍パフォーマンス向上のための溜め動作, 第 7 回 Motor Control 研究会, 2013 年 9 月 7 日, 東京大学弥生講堂
田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, 敏捷動作に先立つ構えの効果検討, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 2013 年 9 月 6 日, 首都大学東京

田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, 敏捷動作生成に先立つ構え生成手法の検証, 第 19 回創発システムシンポジウム, 2013 年 8 月 31 日 9 月 2 日, 大阪アカデミア

西川鋭, 志田和也, 國吉康夫, 可変な関節トルク分配比を備えた筋骨格四脚ロボット, 第 19 回創発システムシンポジウム, 2013 年 8 月 31 日 9 月 2 日, 大阪アカデミア

Kazutoshi Tanaka, Kunihiro Ogata, Yasuo Kuniyoshi, Role of Vertical Component in Skillful Pushing Motion, Full-day workshop on Computational Techniques in Natural Motion Analysis and Reconstruction (ICRA2013), 2013 年 5 月 6 日, Karlsruhe, Germany

Yasuo Kuniyoshi, Flexible tactile skin for haptic interaction studies, Workshop on Research Frontiers in Electronic Skin Technology, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013 年 5 月 6 日 Karlsruhe, Germany, Invited Talk

尾形邦裕, 國吉康夫, 他者を押す動作の運動スキルにおける有効性の検証と考察, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 19 日, 札幌コンベンションセンター

大村吉幸, 國吉康夫, 分布姿勢センサによる手の運動計測システム, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 19 日, 札幌コンベンションセンター

田中一敏, 尾形邦裕, 國吉康夫, 熟練者の運動解析に基づく筋骨格ロボットによる押し動作におけるスキルの再現, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 18 日, 札幌コンベンションセンター

西川鋭, 志田和也, 新山龍馬, 國吉康夫, 筋骨格系駆動のヒト規範足部を備えたロボットによる跳躍, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 18 日, 札幌コンベンションセンター

西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫, 少数筋群からなるフェーズ分けによる運動学習, Motor Control 研究会, 2012 年 6 月 22 日, 岡崎カンファレンスセンター

大村吉幸, 鷺坂隆志, 長久保晶彦, 國吉

康夫, 尾崎和行, フレキシブル基板に埋め込まれた小型・柔軟触覚センサ, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011 年 9 月 8 日, 芝浦工業大学

鷺坂隆志, 大村吉幸, 長久保晶彦, 國吉康夫, 尾崎和行: 皮膚の変形に追従する高密度触覚センサグローブの開発, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011 年 9 月 8 日, 芝浦工業大学

尾形邦裕, 國吉康夫, 甲野善紀, 人型ロボット制御のための押し動作における自他身体操作スキルの計測と解析, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011 年 9 月 7 日, 芝浦工業大学

國吉康夫, ロボットを通してみる身体と技と心の関係, シンポジウム「ロボットと人の『心・技・体』」, 2010 年 11 月 23 日, 日本科学未来館

西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫, 筋骨格ロボットによる走行実現のための筋脈活パターン制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010 年 6 月 15 日, 旭川大雪アリーナ

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 人工筋アクチュエータ, 人工筋クチュエータの長さ推定装置及び方法
発明者: 米倉将吾, 國吉康夫

権利者: 国立大学法人東京大学

種類: 特許, 番号: 特願 2013-105766 号

出願年月日: 2 5 年 5 月 2 0 日

国内外の別: 国内

名称: 圧力センサ及びその製造方法並びに圧力検出モジュール

発明者: 國吉康夫, 大村吉幸, 鷺坂隆志, 長久保晶彦, 尾崎和行

権利者: 国立大学法人東京大学, 産業技術総合研究所, 日本メクトロン株式会社

種類: 特許, 番号: 特願 2011-121090 号

出願年月日: 2 3 年 5 月 3 0 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國吉 康夫 (KUNIYOSHI, Yasuo)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授, 研究者番号: 1 0 3 3 3 4 4 4

(2) 研究分担者

長久保 晶彦 (NAGAKUBO, Akihiko)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究員

研究者番号: 0 0 3 5 7 6 1 7

原田 達也 (HARADA, Tatsuya)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授, 研究者番号: 6 0 3 4 5 1 1 3