

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26240039

研究課題名(和文) 全身感覚運動情報の多相計測と能動再構成に基づく身体性変化即応認知行動機能の研究

研究課題名(英文) Embodiment Change Adaptive Cognition and Behavior Functions Based on Multi-modal Measurement and Reconstruction of Whole Body Sensory Motor Information

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：10333444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,600,000円

研究成果の概要(和文)：全身の触覚情報を含む多数の感覚情報を計測する装置を開発し、それを用いて手の平で行う物体操作など、人間が行う巧みな運動の原理を明らかにした。加えて、俊敏な動作を行うロボットの設計法と動作生成法を開発し、棒高跳びやバドミントンなど、柔軟な道具を用いた俊敏動作を実現した。さらに、生物の神経系を規範とした、情報処理系を構築、解析、応用することで、適応的な運動を即時的に生成する手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：We developed a device to measure multi-sensory information including whole body tactile information and clarified the principle of skilled motion performed by humans such as object manipulation done by palm using such information. In addition, we developed a robot designing method and motion generating method which performs agile motions, and realized agile motions using flexible tools such as pole vault and badminton. In addition, by establishing, analyzing, and applying information processing systems based on the nervous system of living organisms, we established a method of robots to instantaneously generate adaptive behavior.

研究分野：知能機械情報学

キーワード：知能ロボティクス 身体図式 適応行動 認知 人間計測

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 危険な災害現場で損傷を受けても這ってでも進み続け、持てない瓦礫は手近の棒を使ってどける。このレベルの状況即応能力をロボットで実現できれば真に有用であり、人間知能の新たな理解にもつながる。
- (2) 現在の多くの感覚運動学習・適応モデルの基礎となっている感覚マップと運動マップという静的な表象では捉えられない、高次までの多重構造が感覚運動ダイナミクスに存在し、高次構造が不変に保たれつつ低次構造が変化することが、ある具体的状況やモダリティから別の具体的状況やモダリティへの情報転移、予測、適応の原理となり得ることが示唆されている。
- (3) 全身の多相感覚運動に関してこの原理を構成論的に確立すれば、革新的な身体図式と認知行動適応方式の実現が可能となる。

## 2. 研究の目的

- (1) 身体・環境の障害、義肢装着、道具使用等の際に即応変化し、認知行動能力の適応・再利用を可能とする身体図式の解明と構成を行い、状況変化即応能力構成論の基盤を構築する。
- (2) 全身感覚運動計測技術と人体型筋骨格ロボット技術を統合し、即時適応中の人間の入出力計測と能動的再構成実験を行う。
- (3) 革新的な身体図式モデルを構築し、その応用を開拓する。

## 3. 研究の方法

- (1) 全身多相感覚運動計測装置の開発。
- (2) 身体・環境の障害、義肢装着、道具使用等の身体性変化の際の人間全身多相感覚運動計測。
- (3) 全身多相感覚運動情報の能動再構成用の人体型筋骨格ロボット開発と能動再構成実験。
- (4) 上の(2)、(3)のデータに基づく新たな身体図式モデル構築と(3)への導入実験。

- (5) 上の(4)に基づくロボット認知行動の身体・環境の障害や道具使用への即時適応機能の構築と実験。および人間の介護・介助機器や義肢設計への示唆を得る検討。

## 4. 研究成果

### (1) 全身多相感覚運動情報の計測

全身多相感覚運動計測装置の開発：独自開発の分布触覚センサやモーションセンサについて、小型化、薄型化、高密度化、耐久性向上等の改良を行い、身体表面に装着して日常動作中の触覚運動情報を高品質に計測できるセンサを開発し、ロボットに応用した。さらに、触覚運動データの同期計測と3次元表示等を行うソフトウェアを構築し、計測システムとしての完成度を高めた。これらの技術の一部は、産業応用に向けて企業に有償供与された。

人間全身多相感覚運動計測実験：多関節の運動データと多点接触データから、トルクと各点の3軸力を推定する手法を開発した。これを物体操作時の手の計測データに適用し、手法の有効性を検証した。また、物体操作における再現性の高い接触運動パターンを抽出して、タスク毎の特徴を明らかにした(学会発表)。

身体性変化課題の検討：想定外の進展として、医学者との共同研究の機会を得て、歩行器利用中の転倒実験データを入手し、解析した(学会発表)。

今後の展望：触覚、視聴覚など多感覚の情報を統合的に解析する方法をより発展させていく。

### (2) 能動再構成のためのロボットの開発

人体型筋骨格ロボットプロトタイプの開発と構成検討：ダイナミック道具使用運動に関して、空気圧人工筋を用いた棒高跳び動作実験用ロボットを開発した。棒高跳び動作の力学モデル解析を詳細に行い、これに基づきロボットを用いて実験に成功した

(学会発表、雑誌論文)。また、瞬発的リーチング動作実験用ロボット要素、独自のパウチモータ要素に基づく新たな生体筋型アクチュエータとそれを用いた腕機構などを構築し、動作実験を行った。

身体性変化即応実験のためのロボットシステム：全身多自由度ロボットを改良し、バレーボールのフライングレシーブ（学会発表、雑誌論文）やバドミントンのスマッシュ・巧みなショットを行わせ、その運動性能を確認した（雑誌論文）。また、筋骨格ロボットを改良し、身体変化のためにパーツの交換を容易化した。また、大きな身体性変化を伴うロボットとして、柔軟で伸縮可能な連続ロボットアームも開発した（雑誌論文、）。

### (3) 身体性変化即応認知行動の生成法

身体図式の基礎理論と手法の検討：手で把持した物体を振った時の対象物の長さ知覚（ダイナミックタッチ）に関して、複雑な筋骨格系を通した筋固有感覚と対象物運動との関係を、主に力学系理論に基づき解析した。

筋骨格ロボットによる能動再構成実験：人間計測とロボットによる能動再構成を統合的に実行可能なウェアラブルバイラテラルテレオペレーション装置を開発した。この装置は力センサ搭載により、ロボットの感覚運動経験をヒトにフィードバックできる。これによりヒトの適応能力を活用した感覚運動情報が取得可能になった。モデルを超えて情報を活用するために、接触情報からの視覚情報の再構築を行い、拭き取りタスクを実施することで環境とのインタラクションのあるタスクへの適用可能性を示した（雑誌論文、学会発表）。

再構成・モデル化のサイクルの高度化：多点接触データの取扱いを容易にするために、非同期センサ入力からの運動学計算アルゴリズムを構築した。

データ解析と身体図式モデル構築：感覚運動ダイナミクスの学習に、リカレントニューラルネットワークの使用を検討した。ダイナミクス学習に適したネットワークとして Reservoir Computing に着目し、自己運動の予測や、ネットワークの内部構造が機能に与える効果を調査した。

身体性変化による感覚運動情報構造の変化の調査：テンセグリティ構造における Physical reservoir computing を用いて、身体性変化が感覚運動情報の構造に与える効果を調べた（雑誌論文、学会発表）。複合的なテンセグリティにおいて周期の異なる van der pol 振動子を学習でき、環境接触によりその周期が変わることを示した。

予測・適応機能の構築：ダイナミクスを活用した予測・適応機能として Reservoir Computing、カオス結合系に着目し、以下を実施した。予測に関して Predictive Coding のために Reservoir Computing の 1 種である Echo State Network を用い、自己接触と他者接触が判別できること、他者からの自己運動への影響の大きさと予測誤差に関係が見られることを確認した。また、身体の柔軟性を備えたソフトロボットにカオス結合系を組み込み、粘弾性の違いによる創発運動の変化、障害物に対する適応動作の変化を調査した。実世界でも柔軟な連続弾性体からなるリング型ロボットを開発し、カオス結合系を用いて動かすことで、動作が遮られた時に別の運動に遷移することを確認した（学会発表）。さらに、身体による計算である Physical Reservoir Computing の考えに基づき、ロボット身体へのカオスの埋め込みも実現した。

即時適応行動ロボット実験：ロボットによる即時適応行動として、ダイナミックで破損のリスクが高いため多数の試行を行えないタスクである跳躍打撃動作に着目し、実際のロボットを用いて、少ない試行から

飛来するボールを打ち返す動作を生成することに成功した(学会発表 )。

道具使用ロボット実験：ラケットを用いてバドミントンを行う空気圧ロボットアームにより、飛来するシャトルを認識し、瞬時に動作を選択して、打撃することに成功した (学会発表 )。

人間支援技術等への適用の検討：即時適応行動を生成するロボットなどに幅広く知見を応用するために、ロボット一般の高速な運動生成アルゴリズムを提案し、その有効性を示した (学会発表 、雑誌論文 )。

リハビリ分野への応用：レーザーとオプトジェネティクスを用いて神経刺激を与える機構を開発した(雑誌論文 )。

今後の展望：他の即応的な認知行動を必要とする状況として、人間とのやり取りを含むタスク等に発展させていく。また、神経系を規範として動作生成をより深化していく。

## 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 16 件 )

Shotaro Mori, Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi: High-Speed and Lightweight Humanoid Robot Arm for a Skillful Badminton Robot, IEEE Robotics and Automation Letters, 査読有, Vol.3, Issue:3, pp. 1727-1734, July, 2018. DOI: 10.1109/LRA.2018.2803207  
Taigo Yukisawa, Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa, Yoshihiro Kawahara, Yasuo Kuniyoshi: Ceiling Continuum Arm with Extensible Pneumatic Actuators for Desktop Workspace, In Proceedings of IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 査読有, April, 2018.  
Xi Chen, Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi: Bilateral Teleoperation System for a Musculoskeletal Robot Arm using a Musculoskeletal Exoskeleton, in Proceedings of the IEEE

International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 査読有, pp.2734-2739, December, 2017.

Taigo Yukisawa, Yasuaki Ishii, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi: Modeling of Extensible Pneumatic Actuator with Bellows (EPAB) for Continuum Arm, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 査読有, pp.2303-2308, December, 2017.  
Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi: Humanoid robot performing jump-and-hit motions using structure-integrated pneumatic cable cylinders, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 査読有, pp. 696-702, November, 2017

Kenichi Fujita, Syogo Yonekura, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi: Environmental and Structural Effects on Physical Reservoir Computing with Tensegrity, in Proceedings of The 5th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing (ICISIP), 査読有, September, 2017.

Katsuma Inoue, Yoshiyuki Ohmura, Shogo Yonekura, Yasuo Kuniyoshi: The contribution of topology for inclusion of feedforward network and biased synaptic strength to the long-term memory effect in a cortical microcircuit, 26 th Annual Computational Neuroscience Meeting (CNS), 査読有, July, 2017.

Ryo Wakatabe, Yasuo Kuniyoshi, Gordon Cheng:  $O(\log N)$  Algorithm for Forward Kinematics under Asynchronous Sensory Input, in Proceedings of The IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 査読有, pp.2502-2507, May, 2017.

Shih-Yin Chang, Kazunori Naganuma, Hoshinori Kanazawa, Kenta Takashima, Kuniaki Konishi, Takao Someya, Masaki Sekino, Yasuo Kuniyoshi, and Hiroshi Onodera: Single Laser to Multiple Optical Fiber Device for Optogenetics-based Epidural Spinal Cord Stimulation, in Proceedings of The 8th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering (NER),

査読有, May, 2017.

Satoshi Nishikawa, Kazuya Shida, Yasuo Kuniyoshi: Musculoskeletal Quadruped Robot with Torque-Angle Relationship Control System, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 査読有, pp.4044-4050, May 19, 2016.

尾形邦裕, 國吉康夫: 他者を引き上げる動作の身体力学構造の解析とモデル化, 日本ロボット学会誌, 査読有, vol.33, no.6, pp.470-480, 2015.

Weiwei Wan, Matthew T. Mason, Rui Fukui Yasuo Kuniyoshi: Improving regrasp Algorithms to Analyze the utility of Work Surfaces in a Workcell, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 査読有, pp.4326-4333, May, 2015

Shih-Yin Chang, Kenta Takashima, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Takao Someya, Hiroshi Onodera, and Yasuo Kuniyoshi: Design of Small-Size Pouch Motors for Rat Gait Rehabilitation Device, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), 査読有, pp.4578-4581, August, 2015.

Satoshi Nishikawa, Tomohiro Kobayashi, Toshihiko Fukushima, Yasuo Kuniyoshi: Pole Vaulting Robot with Dual Articulated Arms That Can Change Reaching Position Using Active Bending Motion, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 査読有, pp.395-pp.400, November, 2015.

Toshihiko Fukushima, Satoshi Nishikawa, Yasuo Kuniyoshi: Active Bending Motion of Pole Vault Robot to Improve Reachable Height, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.4208-4214, 査読有, June, 2014.

Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Yasuo Kuniyoshi: Adjustment of Pressure in Antagonistic Joints with Pneumatic Artificial Muscles for Rapid Reacting Motions, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), pp.183-190, 査読有, July, 2014.

[学会発表](計 19 件)

田中一敏, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫:

空気圧ヒト型ロボットによる生成モデルを用いた即応的な跳躍打撃動作の生成法, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, 東洋大学川越キャンパス(埼玉県・川越市), 9月13日, 2017.

田中一敏, 西川鋭, Xi Chen, 新山龍馬, 國吉康夫: 跳躍打撃動作を行う構造一体型空気圧ケーブルシリンダロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, ビックパレットふくしま(福島県郡山市), 5月12日, 2017.

森翔太郎, 田中一敏, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: バドミントンのための高速・高速な手首を有する人型ロボットアームの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, ビックパレットふくしま(福島県郡山市), 5月12日, 2017.

堀内喜恵, 新山龍馬, 國吉康夫: ソフトロボットの粘弾性によるカオス結合系の運動創発変化, ロボティクス・メカトロニクス講演会, ビックパレットふくしま(福島県郡山市), 5月11日, 2017.

藤田健一, 米倉将吾, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: 身体構造のダイナミクスを利用した Reservoir Computing に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会, ビックパレットふくしま(福島県郡山市), 5月11日, 2017.

若田部亮, Gordon Cheng, 國吉康夫: 開リンク系の  $O(\log^2 n)$  非同期運動学計算法, ロボティクス・メカトロニクス講演会, ビックパレットふくしま(福島県郡山市), 5月11日, 2017.

陳熙, 田中一敏, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: 筋骨格ロボットの運動学習のための Human-in-the-loop 教師あり学習システム, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市), 12月17日, 2016.

北浦広海, 大村吉幸, 國吉康夫: 小型ヒューマノイドロボットの全身に実装可能な高密度触覚センサ, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 山形大学(山形県山形市), 9月9日, 2016.

新井悠介, 若田部亮, 田中一敏, 大村吉幸, 國吉康夫: ロボットの即応的柔軟物使用のための単純モデルによる動作生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市), 5月18日, 2015.

浪岡憲正, 山田康智, 新山龍馬, 國吉康夫: 情報量最大化に基づくロボットの即時的な口コモーション生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市), 5

月 19 日, 2015.

西川鋭, 小林智裕, 福島俊彦, 國吉康夫: ポール局所曲げ動作により跳躍方向を調節する双腕棒高跳びロボット, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 東京電機大学 東京千住キャンパス(東京都足立区), 9 月 3 日, 2015.

松澤陽介, 山口健, 堀切川一男, 染谷隆夫, 小野寺宏, 國吉康夫: 歩行器利用時における転倒予測と防止, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, 函館アリーナ(北海道函館市) 11 月 18 日, 2015.

田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫: 確率的目標状態への遷移時間を最小化する準備動作, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 富山市総合体育館(富山県富山市), 5 月 26 日, 2014.

西川鋭, 福島俊彦, 國吉康夫: 二関節バネダンパ機構が外乱下の棒高跳びに与える効果, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 富山市総合体育館(富山県富山市), 5 月 26 日, 2014.

若田部亮, 山田康智, 鷺坂隆志, 大村吉幸, 國吉康夫: 高時空間分解データグループを用いた勿体操作の口バスタな接触運動パターンの抽出, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 富山市総合体育館(富山県富山市), 5 月 28 日, 2014.

田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫: 準備局面の拮抗的な下肢筋活動が踏み出しリーチングに与える効果, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 九州産業大学(福岡県福岡市), 9 月 6 日, 2014.

前田研一郎, 新山龍馬, 國吉康夫: 膨張収縮を用いて形態変化するアクティブなロボット外装の開発, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 東京ビックサイト(東京都江東区), 12 月 16 日, 2014.

糸谷侑紀, 新山龍馬, 國吉康夫: ソフトアクチュエータの自動配置によるプリンタブルロボットの設計支援, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 東京ビックサイト(東京都江東区), 12 月 16 日, 2014.

菊野智矢, 新山龍馬, 國吉康夫: 尺取虫型ロコモーションを規範とした自立移動ソフトロボット, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 東京ビックサイト(東京都江東区), 12 月 18 日, 2014.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 圧力センサ

発明者: 國吉康夫, 大村吉幸, 鷺坂隆志, 長久保晶彦, 尾崎和行, 他

権利者: 日本メクトロン, 産業技術総合研究所, 東京大学

種類: 特許

番号: 特開 2015-145881

出願年月日: 平成 27 年 4 月 6 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

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

## 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: 10333444

### (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・人間工学領域・主任研究員

研究者番号: 00357617

大村 吉幸 (OHMURA, Yoshiyuki)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任研究員

研究者番号: 10598022