

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：32612

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2023

課題番号：19KK0367

研究課題名（和文）力触覚代替と動作代行を外部刺激としたニューロリハビリテーションシステムの開発

研究課題名（英文）Development of a neurorehabilitation system using haptic substitution and motion substitution as external stimuli

研究代表者

野崎 貴裕（Nozaki, Takahiro）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：20734479

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,400,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：米国マサチューセッツ工科大学のHermano Igo Krebs博士らとともに、Robot-aided neuro-rehabilitationに関する研究を実施した。人間が力を生成する仕組みの解明に取り組み「人間が発生させる力の微分値は十分に大きく、応答速度は視覚情報に起因すること」、「人間は先の動作を予想し、動作の改善を図っていること」、「力の微分値に関して重ね合わせの法則が成立すること」等が示唆された。また、距離、角度、力を同時に測定可能な新たな近接覚センサを開発することに成功した。研究成果はIF 8.236の国際論文誌への掲載や電気学会本部表彰の受賞など高い評価を得るに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、人間が力を生成する仕組みを探った。得られた結果は、脳や神経の可塑性を活用し身体機能の回復を促すニューロリハビリテーションや、人間が装置を操作する際に必要となるヒューマンインタフェースの設計において有用性が期待される。また、新たに開発したセンサは人間の動作情報の取得や、ロボットの制御において活用することで、多様な用途に応用可能である。

研究成果の概要（英文）：We conducted research on robot-assisted neuro-rehabilitation with Dr. Hermano Igo Krebs and colleagues at the Massachusetts Institute of Technology in the United States. Three types of tests, Discrete Movement, Rhythmic Movement, and Target Transition, were conducted to clarify the mechanism of human force generation. The results suggest that "the differential value of the force that humans can generate is sufficiently large, and that the response speed is due to visual information," "humans anticipate slight future movements and try to improve their movements," and "the law of superposition holds for the differential value of force. In addition, we succeeded in developing a new proximity sensor that can simultaneously measure distance, angle, and force. The research results were published in an international journal with Impact Factor 8.236 and received an award from the Institute of Electrical Engineers of Japan.

研究分野：ロボット工学

キーワード：動作解析 力センサ 近接覚センサ ニューロリハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

世界的な高齢化の進行を背景に、脳血管障害によって神経症状を患い、長期の後遺症に苦しむ患者の数は増加の一途を辿っている。運動麻痺や感覚障害、言語障害など脳血管障害の後遺症に苦しむ患者は日本国内だけでも 300 万人以上が存在すると言われており、早急な対応が求められている。

こうしたなか、近年の神経科学の成果が新たな突破口を開こうとしている。これまで脳血管障害によって損傷を受けた中枢神経系は回復が困難であると考えられてきた。しかし、脳や神経には外部からの刺激に呼応して、損傷した脳領域の機能を代替する新たな神経回路が生成される性質 (= 可塑性) が存在することが明らかとなってきた。1996 年に米国テキサス大学ヒューストン医療科学センターの Nudo らが実施した実験では、手指の運動を反復的に行ったサルの大脳において、皮質領域の拡大が確認されている。また、脳梗塞を患うサルを対象として、運動訓練の有無による脳への影響を検証した実験では、運動訓練を実施したサルにおいて皮質領域の拡大と運動機能の回復が観察されている。上述した脳や神経の可塑性を活用し、身体機能の回復を促す取り組みは「ニューロリハビリテーション」と呼ばれている。

1998 年になり、米国マサチューセッツ工科大学の Hermano Igo Krebs 博士らにより、ロボット工学を積極的に取り入れたニューロリハビリテーションとして robot-aided neuro-rehabilitation の概念が提唱された。同大学はロボット工学を活用したニューロリハビリテーションの草分け的立場にあり、Hermano Igo Krebs 博士を中心として現在も多くの医療機関と連携して robot-aided neuro-rehabilitation の研究を推し進めている。結果、膨大な量の臨床データと知見が当該研究機関に集約されており、当該研究機関はニューロリハビリテーションの分野において歴史的かつ規格的に他を圧倒する成果を上げている。robot-aided neuro-rehabilitation では、ロボットマニピュレータに仮想的な剛性、粘性、慣性などの機械特性 (= 機械的インピーダンス) を持たせることによって、患者に物理的な負荷を与え、ニューロリハビリテーションにおける運動訓練を促進することが可能となる。そして、より効果的な訓練を実施するためには、人間の動作を測定し、動作を生成する仕組みを明らかにすることが重要となる。しかしながら、動作生成に関する既往研究の多くが位置情報や軌道に関するものであった。

2. 研究の目的

効果的な動作訓練を実施する上で、人間の動作生成の原理を理解することは極めて重要であるが、これまでの研究では、運動学に焦点が当てられていることがほとんどであり、力には焦点が当てられていない。本論文では、力追跡タスクを実行する際の人間の動作の特徴を明らかにすることを目的とした。また、動作を測定するためのセンサの開発を行った。

3. 研究の方法

力の変調 (離散的、リズムカル、目標遷移) に対する動作の特徴を明らかにするため、3 種類の測定を 3 人の健康な若年成人男性被験者に対して行った (図 1)。被験者には、力追跡の課題中にロードセルに加わる力を制御するよう指示した。視覚的に誘導された離散的な試みは、目標が離散的 (5 秒ごと) に変化したときの人間の行動を調査した。リズムカルな試行では、ターゲットが連続的かつ周期的 (1 秒ごと) に変化するときの人間の行動を調査した。ターゲットが変化する際には、被験者は入力される力の挙動を変化させた。これらの実験と並行して、フォトダイオードと position sensitive detector を用いた新たなセンサの開発を行った。

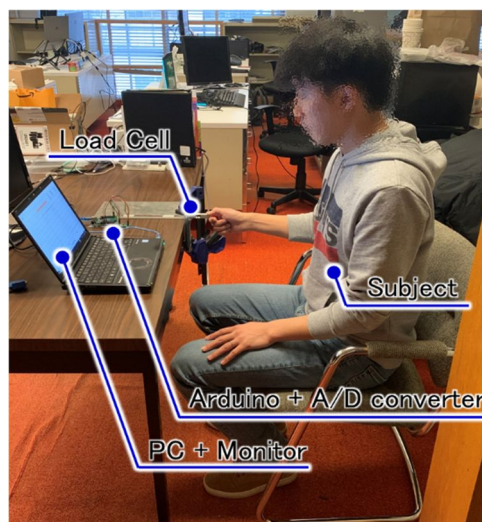


図1 測定の様子

4. 研究成果

力の変調に関する測定の結果、人間が発生させる力の微分値は十分に大きく、一方、反応速度は視覚情報に基づくこと、人間は将来の参照先を少なからず予測し、力の改善や修正を試みるこ

とができること、力の微分値に関しては重ね合わせの法則が働くこと、などが示唆された。

距離、角度、力を同時に測定可能な新たな近接覚センサを開発することに成功した。研究成果は IF 8.236 の国際論文誌への掲載や電気学会本部表彰の受賞など高い評価を得るに至った。

本研究では、人間が力を生成する仕組みを探った。得られた結果は、脳や神経の可塑性を活用し身体機能の回復を促すニューロリハビリテーションや、人間が装置を操作する際に必要となるヒューマンインタフェースの設計において有用性が期待される。また、新たに開発したセンサは人間の動作情報の取得や、ロボットの制御において活用することで、多様な用途に応用可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yane Kazuki, Kido Yusuke, Yazawa Masaki, Asoda Seiji, Kawana Hiromasa, Nozaki Takahiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Development of Penetration Detection/Automatic Stop System for Dental Implant Surgery Based on Frequency Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery	6. 最初と最後の頁 226 ~ 233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5759/jscas.24.226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Baba Tomoaki, Murakami Toshiyuki, Krebs Hermano Igo, Nozaki Takahiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of Optical Distance, Normal Force, Shear Force Sensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 894 ~ 900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.22004598	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nozaki Takahiro, Krebs Hermano Igo	4. 巻 69
2. 論文標題 Development of an Optical Sensor Capable of Measuring Distance, Tilt, and Contact Force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 4938 ~ 4945
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2021.3084168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chaichaowarat Ronnapee, Nishimura Satoshi, Nozaki Takahiro, Krebs Hermano Igo	4. 巻 11
2. 論文標題 Work in the Time of Covid-19: Actuators and Sensors for Rehabilitation Robotics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 256 ~ 265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21006581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hangai Satoshi, Nozaki Takahiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Haptic Data Prediction and Extrapolation for Communication Traffic Reduction of Four-Channel Bilateral Control System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Informatics	6. 最初と最後の頁 2611 ~ 2620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TII.2020.2995627	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hangai Satoshi, Nozaki Takahiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Impedance Field-Based Teleoperation With Data Holders for Reducing Data Traffic in Haptic Transmission and Its Analysis of Performance and Stability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 6334 ~ 6343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3047853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Handa Hinako, Nozaki Takahiro, Murakami Toshiyuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Identification of Contact Position and Force Estimation on Manipulator Using Force Sensor Implemented on Base Frame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.20004772	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Kazuki Yane, Hermano Igo Krebs, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Delay Time of Human Motion Generation in Response to Changing Periods in Force Tracking Task
3. 学会等名 The 9th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics & Biomechatronics. (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬場智章、村上俊之、Hermano Igo Krebs、野崎貴裕
2. 発表標題 反射鏡を用いた薄型近接覚・カセンサの開発
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Yane, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Preliminary Study of Object Recognition by Converting Physical Responses to Images in Two Dimensions
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Mechatronics 2023. (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryosuke Nakatsuka, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Position and Speed Estimation in Low Speed Range for IPMSM Based on Disturbance Observer
3. 学会等名 The 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Asai, Kei Sugihara, Tomoya Kitamura, Yuki Saito, Kouhei Ohnishi, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Experimental Verification of a Novel Continuously Variable Transmission with Electro-Hydrostatic Actuator
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Kido, Hiromasa Kawana, Seiji Asoda, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Model-Free Detection of Penetration and Automatic Stop Control in Dental Implant Surgery Based on Differential Value of Torque
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Nakatsuka, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Improvement and Analysis of Position and Speed Estimator in Low Speed Range for IPMSM Based on Disturbance Observer
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hinako Handa, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Force Control at Arbitrary Position of Manipulator Based on Estimated Contact State by Force/Torque Sensor Installed at Base Frame
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Saito, Hiroshi Asai, Tomoya Kitamura, Wataru Iida, Takahiro Nozaki, Kouhei Ohnishi
2. 発表標題 Performance Improvement of Bilateral Teleoperation with Hydraulic Actuator by Friction Compensation
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Yane, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Recognition of Environmental Impedance Configuration by Neural Network Using Time-Series Contact State Response
3. 学会等名 The IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Baba, Makoto Yoshihara, Ryo Kondo, Toshiyuki Murakami, Hermano Igo Krebs, Takahiro Nozaki
2. 発表標題 Development of Optical Proximity/Contact Force/Shear Force Sensor
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Manami Shinoda, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Wireless Power Line Communication Using Magnetic Resonance and Its Application for Motor Control
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Erika Takeuchi, Takahiro Nozaki, Yuki Saito, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Time-Domain Modal Transformation for Friction Compensation of Hydraulic Actuators
3. 学会等名 The 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Karato, Takahiro Nozaki, Hermano Igo Krebs, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Perception of Approaching Objects in Bilateral Control Using Proximity Sensor
3. 学会等名 The 9th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Sugihara, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Development of a Novel Hydrostatic Continuously Variable Transmission with Fast Path Switching
3. 学会等名 The 9th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuheii Kimura, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Admittance-based Bilateral Control System Implementing Communication Traffic Reduction Method
3. 学会等名 The 9th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Yane, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Imitation Learning to Generate Motions by Discriminating Between Position and Force Control from Human Motions
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Kido, Takumi Karato, Takahiro Nozaki, Hiromasa Kawana, Seiji Asoda, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Automatic Stop Control Just After Penetration for Drilling Device in Dental Implant Surgery in the Upper Jaw Based on the Cutting Resistance Variation
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuhei Kimura, Takahiro Nozaki, Toshiyuki Murakami
2. 発表標題 Admittance Control-based Bilateral Control System Considering Position Error
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Nozaki, Hermano Igo Krebs
2. 発表標題 Characteristics of Human Behavior in Force Modulation while Performing Force Tracking Tasks
3. 学会等名 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎貴裕、Hermano Igo Krebs
2. 発表標題 距離・傾き・接触力を測定可能な光学センサによる接触前可変インピーダンス制御
3. 学会等名 電気学会産業応用部門産業計測制御研究会「高度センサ情報処理技術とその応用」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科野崎研究室
<https://nozaki-lab.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
	ハーmano クレブス (Hermano Krebs)	マサチューセッツ工科大学・Department of Mechanical Engineering・Principal Research Scientist	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	マサチューセッツ工科大学			