

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02235

研究課題名(和文)ADL維持回復のための人の内外複合モデルと力制御型生活支援機器(ITR)の開発

研究課題名(英文)A Study on Human Motion Model and Force Control Based Life Support for ADL

研究代表者

村上 俊之(MURAKAMI, TOSHIYUKI)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：00255598

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 30,500,000円

研究成果の概要(和文): 欧米や日本を中心に、ロボットの社会システムへの実応用が盛んに取り上げられている。特に、健康寿命引き上げのための実生活の支援機器として、ロボットが大きな変革をもたらすもの考えられている。本研究課題ではこうした現状を改善するため、人間支援機器のための人の内的外的状態を複合的に表現可能なモデルを構築し、そのモデルに基づいた支援機器(Intelligent Tension Rod: ITR)の設計・製作およびモード変換に基づいた支援機器制御アルゴリズムの開発を行った。提案システムの有効性については、シミュレーションおよび製作した実機による実験により示した。

研究成果の概要(英文): Practical application of robots to social systems has been considered positively in developed countries which are becoming the aging society. Especially, it is expected that robots will bring significant change as a life support equipment for increasing healthy life expectancy. To address this issue, the research project aims to develop a model capable of expressing a person's internal and external state for human-assisted devices, and to construct a supporting device (Intelligent Tension Rod: ITR) based on the model. Furthermore, the intelligent control algorithm based on mode transformation is constructed. To confirm the effectiveness of the proposed system, simulations and experiments were conducted.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：福祉機器システム 力制御 生体信号処理 IMUセンサ パワーエレクトロニクス 動作安定解析 転倒防止制御 日常生活動作支援

1. 研究開始当初の背景

近年の少子高齢化傾向は、今後さらに深刻化し、高齢者を対象とした社会システムの整備が最重要課題となりつつある。こうした背景のもと、高齢者を対象としたパワーアシスト機器やリハビリテーション機器の実用レベルでのニーズがより急速に増している。高齢者の支援機器において考慮すべき点は、1. 身体への負荷を適切に低減しつつ身体運動状態を維持すること、2. 継続的支援を可能とすること、が重要となる。こうしたことから、機器の小型化ならびに身体運動状態の適切な理解のための方法論に多くの関心が高まっている。また、ADL (Activities of Daily Living: 日常生活動作) において身体運動を支援できるロボットの応用開発も切に望まれる状況にある。

2. 研究の目的

欧米や日本を中心に、ロボットの社会システムへの実応用が盛んに取り上げられている。特に、人工知能を駆使したコミュニケーションロボットは、高齢化社会における高齢者の内面のケアを可能とするため、人の表情変化や行動パターンに応じてより知的な対応を行なえるロボットシステムとして多大な関心が寄せられている。しかしながら、人の内的状態を支援するに留まっており、その支援の持続性が不明確であるだけでなく、外的(物理的)な支援を行なえるものは皆無であり、実生活の支援機器として大きな変革をもたらすものとは言えない。本研究課題ではこうした現状を改善するため、人間支援機器のための人の内的外的状態を複合的に表現可能なモデルを構築し、そのモデルに基づいた支援機器(Intelligent Tension Rod: ITR)の設計および制御アルゴリズムの開発を目的とした。また、日常生活動作支援による内外複合モデルの実装評価を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、第一の大きな目標としては、人の状態測定に基づいた人の外部状態(身体運動)の評価および評価指標に応じた動作支援機器の制御、また第二の目標としては人の生体情報に基づいた人の内部状態評価にある。これらを達成するため、次の項目についてアルゴリズムの確立とその評価、また動作支援機器の製作とその評価を行った。

- 加速度センサ(IMU)による運動状態測定のアプローチ構築とその性能評価
- カメラ情報を仮定した人の状態認識と動作支援機器制御への応用
- 人の動作支援機器システムの製作と人の運動状態に準じた機器制御
- 脳波信号に基づいた内部状態判定の基本アルゴリズムの構築

4. 研究成果

(1) 加速度センサ(IMU)による運動状態測定

加速度センサを利用するにあたって、信号に含まれるドリフトの補償と加速度応答を利用した角速度・角度推定について、従来手法との誤差評価を行った。結論から述べると、ドリフト補償については、カルマンフィルタと低域通過フィルタ(LPF)の併用が最も有効であり、角速度・角度推定については、ドリフト補償の第一のカルマンフィルタに加えて第二のカルマンフィルタを用いることで、推定誤差を抑えられる結果となった(図2)。ドリフト補償および角速度・角度推定過程のブロック線図を図1にまとめる。

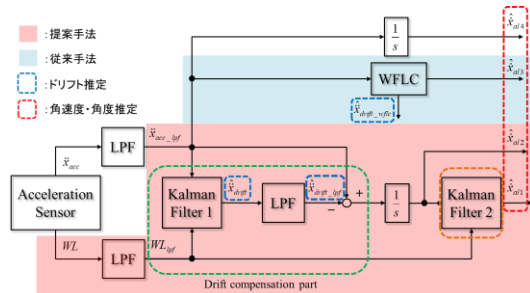


図1 推定アルゴリズムのブロック線図

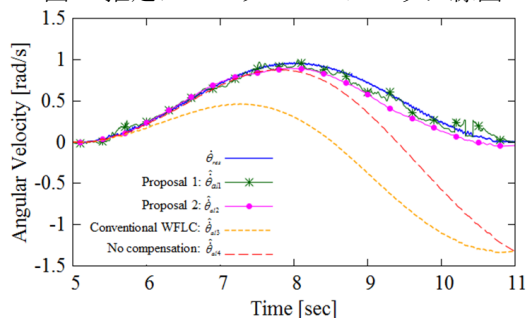
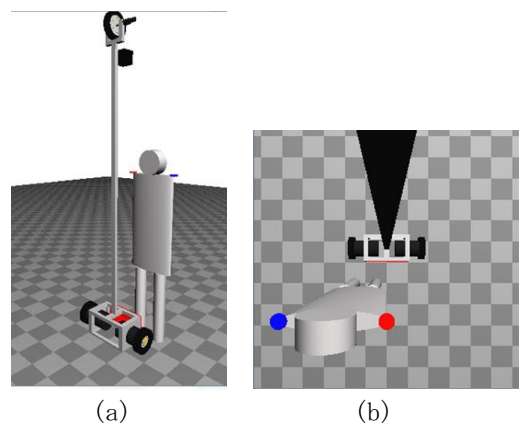


図2 角速度推定の実験結果

(2) カメラ情報を仮定した人の状態認識と動作支援性機器制御

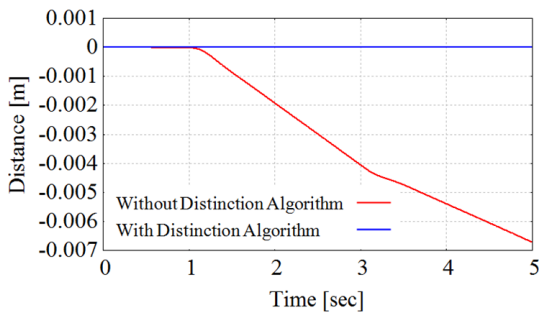


(a) カメラが設置された動作支援機器 (b) カメラによる

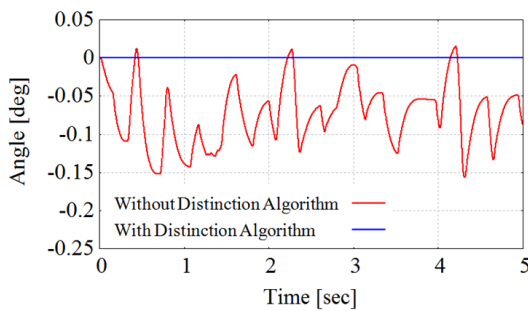
図3 動作支援機器 (ITR) とカメラ

本研究課題では、人の歩行動作に対して動作支援制御を行う機器 (ITR) の製作及びその制御アルゴリズムの構築を行うことが大きな目標となっており、その概念図は図3に

なる。そこで、先に述べた IMU センサに加えて、カメラ情報が取得できる場合の ITR の制御手法について、シミュレーションを中心に検証を行っている。カメラ情報に基づいた ITR の制御では、特に動きのブレに準じた ITR のブレを抑制するため、動作判定に閾値を設定し、人への追従動作を実現している。図 4 にその応答結果の一例を示す。この結果より、旋回方向の応答に関しては人のブレ動作に準じた ITR の振動的な応答が抑制されており、提案アルゴリズムの有用性が確認できる。本研究課題では、最終的な実験検証において IMU を用いた検証を行うが、カメラ情報を用いた検証においても提案手法により安定した動作支援制御が行えることが確認できた。



(a) Y 方向の追従動作



(b) 旋回方向の追従動作

図 4 ITR の追従応答例

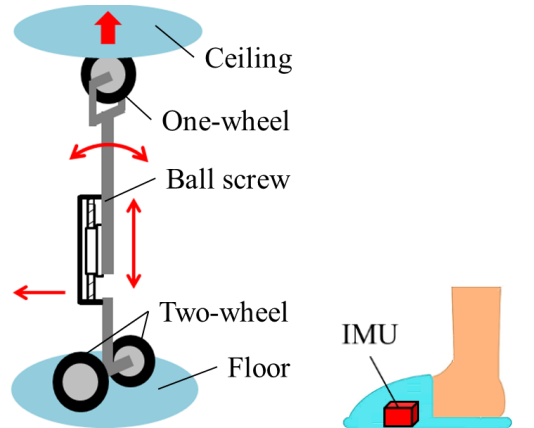
### (3) 人の動作支援機器の製作とその制御

機構面	制御面
<ul style="list-style-type: none"> <li>移動突っ張り棒型手すり Intelligent Tension Pole (ITP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使い心地</li> <li>・<b>走行制御</b>: 加速度変動の抑制</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>安定性</li> <li>・<b>姿勢制御</b>: ZMP, COG に基づく安定化</li> <li>・<b>突っ張り力制御</b>: 接地点の滑り防止</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>突っ張り棒型手すり</li> <li>モータ駆動車輪</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使い心地と安定性の両立</li> <li>・<b>モード変換</b>: 走行・姿勢の独立制御</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>起立・着座支援</li> <li>歩行支援</li> <li>・省スペース、多点接地、非装着</li> </ul>	

図 5 ITR 製作における目標概念

本研究課題で狙いとした動作支援機器では、「歩行・起立・着座」の支援を行える機能を実現するため、機構面および制御面から図 5 に示す概念を取り入れた新たな支援機器システムを提案している。具体的な構成については、その模式図を図 6(a) に示す。また、人の動作を検知するための IMU の設置状態を図 6(b) に示す。基本的には ITR の重心 (中心

位置) に設置された直動モータにより床面と天井面との突っ張り力を発生し ITR の安定状態を保ち、床面と天井面に設置された車輪モータの協調制御により人の状態に準じた ITR の姿勢制御を実現している。これにより、力学的に安定しつつも、人の状態に適応した使い易い支援機器の実現が期待できる。



(a) ITR の機構 (b) IMU の設置例  
図 6 ITR の機構設計概念と IMU の設置状態

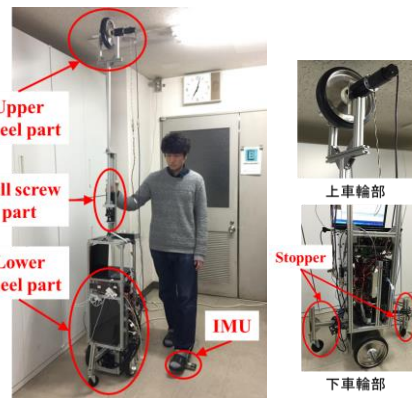
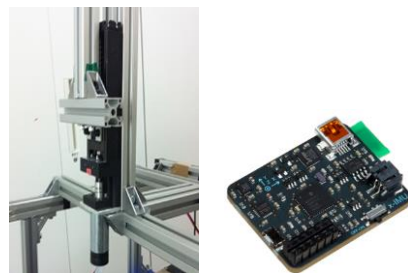


図 7 製作した ITR の全体図

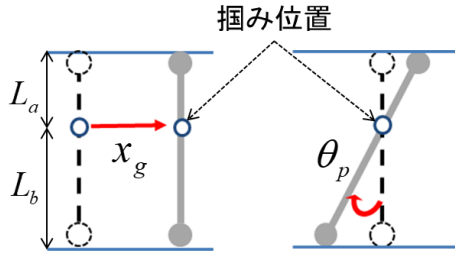


(a) ボールねじ部 (b) IMU センサ  
図 8 ITR におけるボールねじ部と IMU センサ

図 7, 8 に製作した ITR を示している。その制御としては、使い易さと力学的な安定性を保証するため、「走行モード」と「姿勢モード」に分類したモード毎の制御系構成を提案している。これらのモード状態の概念図を図 9 に示す。

走行モード (図 10) では、掴み位置 (ITR の重心位置) に準じて、並進動作および停止動作が行われる。走行モードでは、IMU によ

り検出された人の歩行速度に基づいて ITR の重心位置への速度指令が生成される．この際、歩行時の動作のブレを低減するため、足の並進速度を用いた仮想力を設定し、ITR への速度指令を滑らかなものとしている．これにより、利用者の使い易さの向上を達成している．



(a) 走行モード (b) 姿勢モード  
図 9 モード毎の状態図

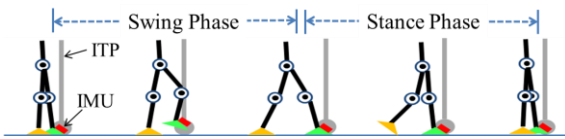
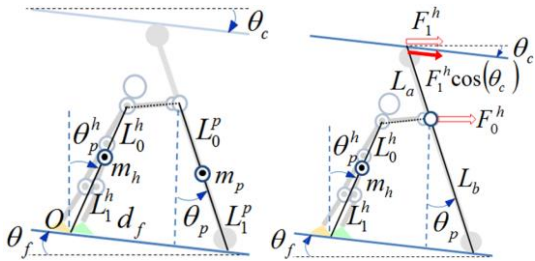


図 10 走行モードでの動作状態

姿勢モードでは図 10(a)に示すように、人と ITR の合成モデルを設定することで、運動学的な関係性を明確化する．さらに、図 11 (b) に示すように、人の姿勢を上部車輪のモータに作用する外力から推定し、ITR との協調制御を実現している．



(a) ITR と人の合成モデル (b) 姿勢推定  
図 11 ITR と人のモデル

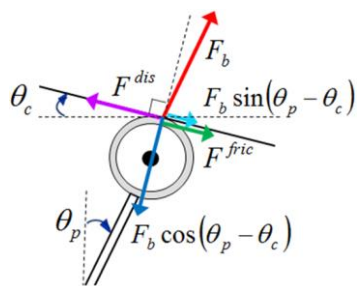


図 12 上部車輪の力関係モデル

さらに、姿勢モードでは安定性を保つためにボールねじモータにより突っ張り力の制御も行う．ここで、図 11(b)、図 12 のモデルから、上部の車輪モータの接線方向の外力を推定することができ、その接線方向の外力が摩擦と釣り合うための法線方向の外力を決定することができる．ただし、上部車輪と天

井間の摩擦モデルは事前に分かっているものと仮定している．図 13 に走行モードおよび姿勢モードにおける制御系の全体図を示す．

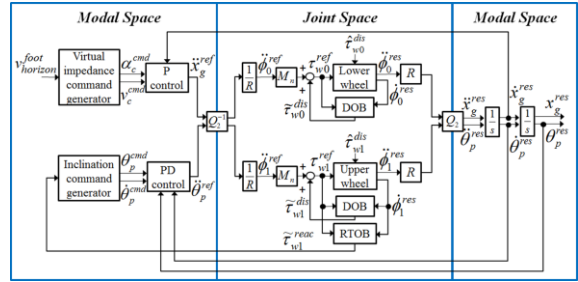


図 13 ITR の制御系全体図

各モードにおける設定モデルと動作の有効性を確認するため、実機 ITR を用いた検証実験をモード毎に行った．図 14 に歩行動作の動作モデル図を示す．同図にあるように歩行+停止の動作を繰り返す形で実験を行った．実験では 5 セットの動作実験を行い、その平均値応答を評価することとした．

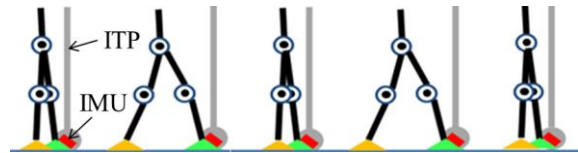


図 14 走行モードにおける検証実験

図 15 に足と掴み位置の位置応答結果を示す．ここで、赤線が足に設置された IMU センサからの位置応答、青線が ITR の掴み位置(重心)の応答を示している．この結果より、ITR は人の歩行動作に対して滑らかに追従していることが分かる．ITR の応答については、上部、下部のモータに内蔵しているエンコーダ応答から求めている．また、ITR の姿勢角応答は緑線で示されているが、安定に  $0^\circ$  の角度を保持していることが分かる．

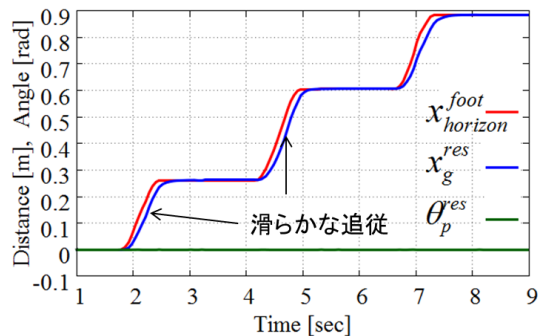


図 15 足と掴み位置の位置応答

図 15 に加え、図 16 に足と掴み位置の加速度応答を示す．この結果より、ISO5349-1 の結果に準じた加速度の評価パラメータを求めると表 1 が得られ、仮想力に基づいた並進運動制御によって掴み位置における加速度振動が抑えられ、使い心地が改善できている

ことが分かる。

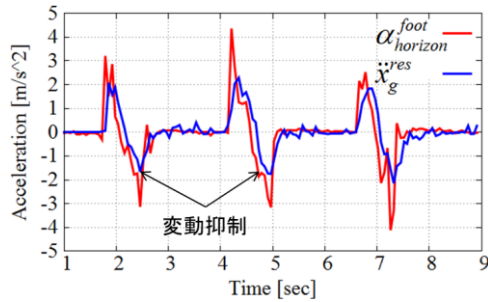


図 16 足と掴み位置の加速度応答

表 1 IS05349-1 の結果

Method	Average of $a_t$ [m/s <sup>2</sup> ]
Without Virtual Impedance	0.044
With Virtual Impedance	0.019 ↓

次に姿勢モードでの検証実験を行った。実験では、図 17 に示すように ITR に対して人が寄りかかる姿勢（最左図）と ITR に対して人が反対方向に倒れる姿勢（最右図）を取ることで、人の姿勢に応じた ITR の姿勢応答の確認を行った。図 18 にその応答結果を示す。これより、ITR と人の融合モデルにおいて、人の姿勢に準じて全体の安定性を保つように ITR の姿勢応答が調整されていることが分かる。

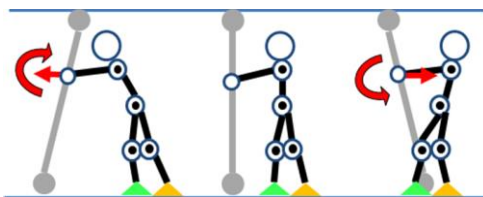


図 17 姿勢モードにおける検証実験

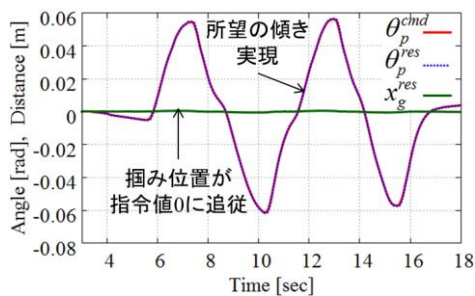


図 18 掴み位置の位置応答と姿勢応答

上記の姿勢応答に関連して、ITR と人の融合モデルにおける安定性評価を行うため、融合モデルと重心位置および ZMP（床面に対する力の作用位置）の位置応答の差を図 19 に示す。これより、差の変動が 30cm 以内（足底の大きさ程度）に留まっており、融合モデルが安定な姿勢状態を維持していることが分かる。これらの結果より、本研究課題で狙いとした支援機器システムの動作制御を実現できていることが確認できた。

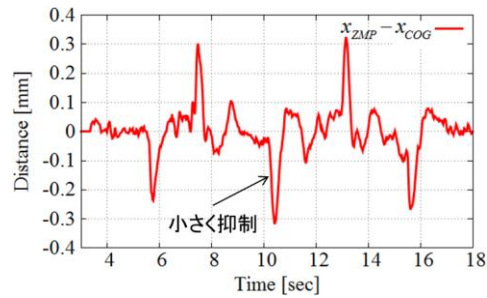


図 19 ITR と人の融合モデルにおける安定性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① S. Kim, K. Hirota, T. Nozaki, and T. Murakami, Human Motion Analysis and its Application to Walking Stabilization with COG and ZMP, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 査読有, April 2018 (Early access), <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2830341>
- ② R. Hanaoka, T. Nozaki and T. Murakami, Translation and Inclination Control for Intelligent Tension Pole Based on Mode Decoupling Method, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol. 7, No. 2, 2018, pp 158-165, DOI:<https://doi.org/10.1541/ieejia.7.158>
- ③ K. Hirota and T. Murakami, IMU Sensor based Human Motion Detection and Its Application to Braking Control of Electric Wheeled Walker for Fall-prevention, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol. 5, No. 4, 2016, pp347-354 DOI:<https://doi.org/10.1541/ieejia.5.347>
- ④ 叶賀 卓, 満倉 靖恵, 単極脳波信号を用いた子どもの集中状態判別, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol. 136, No. 8, 2016, pp1047-1055, DOI:<https://doi.org/10.1541/ieejieiss.136.1047>
- ⑤ S. Kanoga, M. Nakanishi and Y. Mitsukura, Assessing the Effects of Voluntary and Involuntary Eyeblinks in Independent Components of Electroencephalogram, Neurocomputing, 査読有, Vol. 193, 12 June 2016, pp20-32, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.01.057>

[学会発表] (計 22 件)

- ① H. Uchida and T. Murakami, An Approach to Power Assist Hand Exoskeleton for Patients with Paralysis, AMC2018, Tokyo, Japan, March 2018.
- ② H. Kimura, R. Mori and T. Murakami, Analysis and Evaluation of Fall Prevention Assist, Related with the Angle of Trunk, IECON2017, Beijing, China, October 2017.
- ③ S. Amagai, M. Kamatani and T. Murakami, A Comparison Study of Velocity and Torque

- Based Control of Two-Wheel Mobile Robot for Human Operation, M2VIP2017, Auckland, New Zealand, November 2017.
- ④ P. Roussel and T. Murakami, Design of an EEG-based brain-computer interface using motor imagery for wheelchair control, 第11回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会, 2017年6月.
- ⑤ 松岡 将司, 満倉 靖恵, 前頭前野における脳波を用いた耳鳴の検出および苦痛度の推定, 第11回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会, 2017年6月.
- ⑥ 鍵田 潤一郎, 満倉 靖恵, 簡易脳波計を用いた脳波による疼痛有無の識別, 第11回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会, 2017年6月.
- ⑦ 遠藤 真央香, 満倉 靖恵, 近赤外分光法を用いた不快音聴取時における脳機能活性化箇所の特定, 第11回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会, 2017年6月.
- ⑧ 山田 早紀, 満倉 靖恵, 針筋電図に混入する心電図抽出方法の提案, 第11回コンピューターショナル・インテリジェンス研究会, 2017年6月.
- ⑨ 松岡 将司, 満倉 靖恵, 浜田 望, 神崎 晶, 前頭前野における脳波を用いた耳鳴の検出, 平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2017年9月.
- ⑩ 今井 信太郎, 満倉 靖恵, 吉田 慶多朗, 木村 生, 高田 則雄, 田中 謙二, 意欲的行動下のマウス腹外側線条体における神経活動の特徴抽出, 平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2017年9月.
- ⑪ 近藤大介, 満倉 靖恵, 吉田 慶多朗, 木村 生, 高田 則雄, 田中 謙二, 海馬におけるセロトニン抑制効果の特徴抽出および持続性の検証, 平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2017年9月.
- ⑫ 浅野 貴大, 尾山 匡浩, 満倉 靖恵, 浜田 望, 脳波計と赤外線分光法を併用したストレス評価, 平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2017年9月.
- ⑬ T. Kaneda, N. Hamada and Y. Mitsukura, Automatic Alignment Method for Projection Mapping on Planes with Depth, CSPA2016, Melaka, Malaysia, March 2016.
- ⑭ N. Hirata, S. Hamatani and T. Murakami, Traveling Assist Control of Two-wheel Wheelchair in Unknown Step Passage, ISIE2016, Santa Clara, USA, June 2016.
- ⑮ M. Dai, T. Ishikawa and T. Murakami, Analysis and Evaluation for Assistance of Standing-up Motion, Mecatronics-REM2016, Compiègne, France, June 2016.
- ⑯ S. Yamada and Y. Mitsukura, Detection of Circadian Rhythms using Simple EEG

Device, Mecatronics-REM2016, Compiègne, France, June 2016.

- ⑰ S. Kim, T. Nozaki and T. Murakami, An Approach to Categorization Analysis for Human Motion by Kinect and IMU, IECON2016, Florence, Italy, October 2016.
- ⑱ R. Hanaoka, T. Nozaki and T. Murakami, Cooperation Control of ITP with Human Based Inertial Measurement Unit, IECON2016, Florence, Italy, October 2016.
- ⑲ S. Hamatani, T. Nozaki and T. Murakami, Steering Control in Multi-degrees-of-freedom Two-wheeled Wheel Chair on Slope Environment, IECON2016, Florence, Italy, October 2016.
- ⑳ K. Hirota and T. Murakami, New Exoskeleton Structure and Control Algorithm Considering Walking Characteristics, AISM2015, Guilin, China, October 2015.
- ㉑ R. Hanaoka and T. Murakami, A Novel Assist Device for Tension Pole Based Movable Handrail, IECON2015, Yokohama, Japan, November 2015.
- ㉒ T. Ishikawa and T. Murakami, An Approach to 3D Gyro Sensor Based Motion Analysis in Tennis Forehand Stroke, IECON2015, Yokohama, Japan, November 2015.

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村上 俊之 (MURAKAMI, Toshiyuki)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 00255598

### (2) 研究分担者

満倉 靖恵 (MITSUKURA, Yasue)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 60314845

野崎 貴裕 (NOZAKI, Takahiro)  
慶應義塾大学・理工学部. 専任講師  
研究者番号: 20734479

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし