

報告書

2021 年度力センサレス駆動力推定による全方位移動型電動歩行器の
知能化デザイン補助事業

2022 年 3 月

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

村上俊之

はじめに

本事業では、初期の筋萎縮性側索硬化症（以下、ALS）を患う歩行器利用者を中心とした電動歩行補助器の知能化デザインを目的としている。ALS 患者は上肢、下肢の動きが次第に衰えてしまう症状を持っており、近年では若年層においても患者が見られるようになってきている。ALS 患者においては、自由な移動が生きがいを感じるものとなり、それを可能とする電動歩行器が実現できれば上肢、下肢の動作の衰えを遅らせる効果も期待できる。しかしながら、現状ではこうした障がい者に適するインタフェースや移動自由度を有する歩行器が存在しない。電動歩行補助器における移動の多自由度化において、本事業ではメカナムホイールを利用する。従来からメカナムホイールを用いた車椅子をはじめとする移動システムの構築は多く行われているが、路面状態が不正の場合にすべりやすい等、移動時の安定性が確保しにくい問題があった。本事業では、メカナムホイールの駆動力制御を力（トルク）センサレスで行うことで、外部との障害物検知を含め、安全・安心が得られる全方位同型電動歩行補助器の知能化制御の開発を行った。最終的に介護者、被介護者の両方に優しい電動歩行補助器の実現を目指したものとなっている。

（関連論文）

1. K. Hirata, M. Sasayama, T. Murakami, "Realization of Synchronized Movement between Caregiver and Electric Wheelchair", SIE2021-Kyoto (The 30th International Symposium on Industrial Electronics), June 20-23, 2021.(JKA謝辞あり：車椅子の高機能化制御に関する論文)
2. T. Ohhira, T. Murakami, "Robust Stabilization Control of an Inverted Pendulum Type Robotic Wheelchair", Proceedings of the SICE Annual Conference 2021, September 8-10, 2021, Tokyo, Japan (JKA謝辞なし：車椅子の高機能化制御に関する論文)
3. T. Ohhira, A. Shimada, T. Murakami, "Variable Forgetting Factor-Based Adaptive Kalman Filter With Disturbance Estimation Considering Observation Noise Reduction", IEEE Access (Volume: 9), pp 100747 - 100756, 2021. (JKA謝辞あり：力制御の高機能化に関する論文)
4. Y. Tawaki, T. Nishimura, T. Murakami, "Linear Langevin-Based Models Providing Predictive Descriptive Statistics for Postural Sway", IEEE Access (Volume: 9), pp 114485 - 114494, 2021. (JKA謝辞あり：人の動作モデル化に関する論文)
5. A. Hiraoka, T. Murakami, "An Approach of Load-Side Disturbance Rejection Control for Series Elastic Actuators", IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control February 18-20, 2022 - Padova, Italy, pp18-23. (JKA謝辞あり：機構の振動制御に関する論文)
6. O. Kentaro, T. Murakami, "Estimation of Jacobian Matrix without accelerometer on Omni-directional Mobile Walker", IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control, February 18-20, 2022 - Padova, Italy, pp329-334. (JKA謝辞あり：メカナムホイールシステムの運動制御に関する論文)
7. T. Takenouchi, T. Murakami, "Performance Improvement of Bilateral Control under Time Delay using Gain Adjustment", IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp481-484. (JKA謝辞あり：人による遠隔

操作の運動制御に関する論文)

8. Y. Matsumoto, T. Murakami, " Ankle Angle Control Strategy for Passive/Active Unified Walking Based on Dynamics of Impact", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp489-494. (JKA 謝辞あり : 人の歩行解析に関する論文)
9. T. Sugaya, T. Murakami, " Attitude and Velocity Control of Quadcopter with Suspended-Payload with Payload Stabilization Control", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp489-494. (JKA 謝辞あり : 力情報に基づく不安定系の制御に関する論文)

(別紙1)

事業の実施内容及び成果に関する報告書

1 事業名

2021年度カセンサレス駆動力推定による全方位移動型電動歩行器の知能化デザイン補助事業

2 事業の実施経過

(1) 事務手続き関係

2021年 4月 2日 交付決定通知受理(4/1付)
5月10日 交付誓約書・振込依頼届・前金払申請書提出
5月27日 補助金受領(5,000,000円)
10月22日 状況に関する報告書提出
2022年 4月22日 補助金返還(350,573円)
4月25日 補助金精算申請書提出

(2) 事業関係

① 全方位移動型電動歩行器の機構設計

2021年 4-8月 重心移動機構の設計製作
6-9月 フレーム機構の設計製作
8-9月 アクチュエータ機構の設計製作
6-9月 シミュレーション評価

② カセンサレス制御の設計実装

2021年 4-9月 カセンサレス駆動力制御の設計実装
年 4-9月 カセンサレス障害物検知の設計実装
年 9-12月 スリップ補償のためのヤコビ行列推定アルゴリズム
2022年 1-3月 実機実験による検証

3 実施内容及び成果

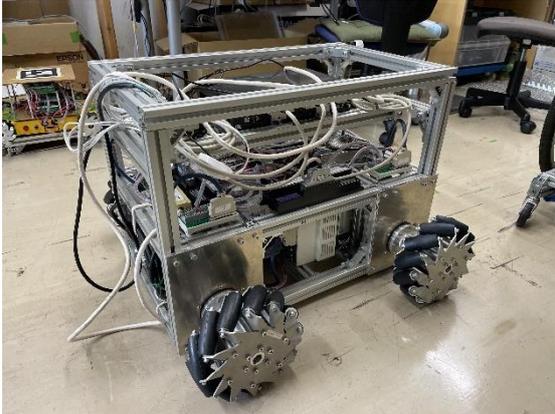
(1) 実施内容

① 全方位移動型電動歩行器の機構設計

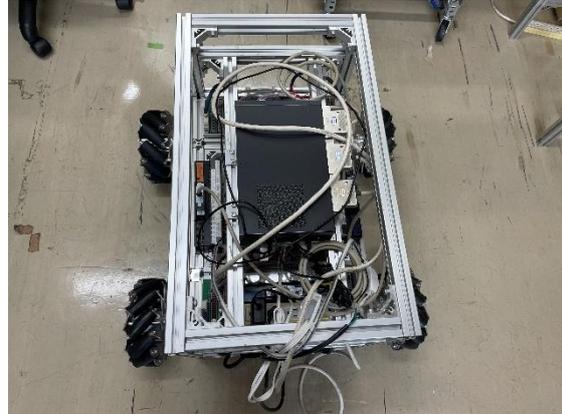
メカナムホイールを用いて構築を行った電動歩行補助器の実験機については図1の写真に示す通りである。電動歩行器の台車部分に支持アームを設置することで歩行者の歩行状態の安定化を行える機構となっている。制御用マイコンやインタフェース機器は台車部に

(別紙1)

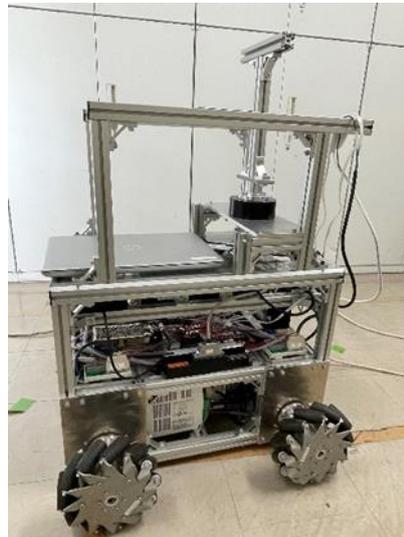
全て格納されている。本実験装置では、人による操作力の推定アルゴリズムの検証のため、支持アームの台座に力センサが設置されている。



(a) 歩行補助台車（側面より）



(b) 歩行補助台車（上面より）



(c) 歩行補助台車（支持アーム付き）

図1：製作した電動歩行補助器の外観

製作計画としてはほぼ予定通りであるが、事業終了後も実機制御アルゴリズムの検討に合わせてハードウェアの改良を行うことを考えてる。

② カセンサレス制御のためのヤコビ行列推定アルゴリズムの構築とその実装

本研究課題は電動歩行器の移動自由度の多自由度化を目指したものである。特に、初期のALS（筋萎縮性側索硬化症）患者のように、頭脳は明晰であるにも関わらず、上肢・下肢の動作が次第に不自由となる患者に対して、自らの意思による移動の喜びとともに、自由な移動を提供できる移動歩行器の実現を目的としている。そのため、メカナムホイールを用いた機構を活用した全方位移動型電動歩行器の構築を行っている。メカナム機構につい

(別紙1)

では従来から多くの研究があり、車椅子等への応用も見られるが、駆動力制御を考慮したすべり動作防止や障害物との接触を検出するアルゴリズムを組み入れたものは見られない。メカナム機構は全方位への移動を可能とする一方で、路面の不正によるすべりや障害物との接触が生じやすい欠点を有しており、これらを考慮したアルゴリズム構築は安全・安心を優先した移動歩行器の開発においては必須となる。本事業の前半では、制御アルゴリズムのみに特化した開発を行うものではなく、すべり難い機構や障害物との接触検知が行いやすい歩行器自体のフレーム構造も新に開発することを目的としており、まずは接触検知において必要となるメカナムホイールを用いた多自由度移動車におけるすべりを考慮したヤコビ行列の推定アルゴリズムについて開発を行った。図2に電動歩行補助器のモデルとそれに準じた運動学関係式を示す。

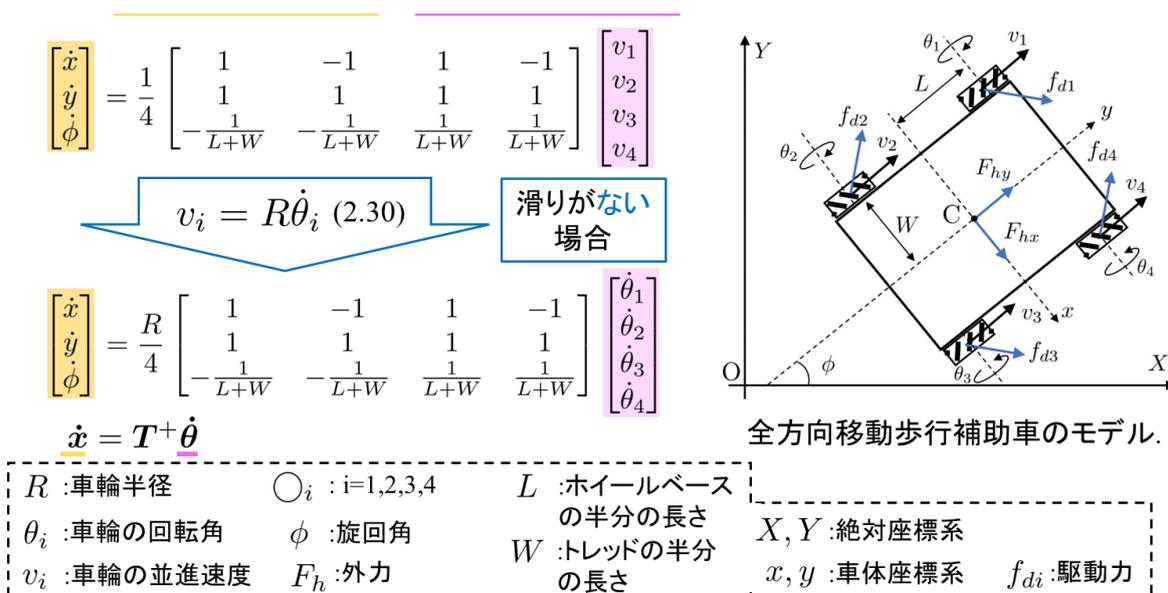
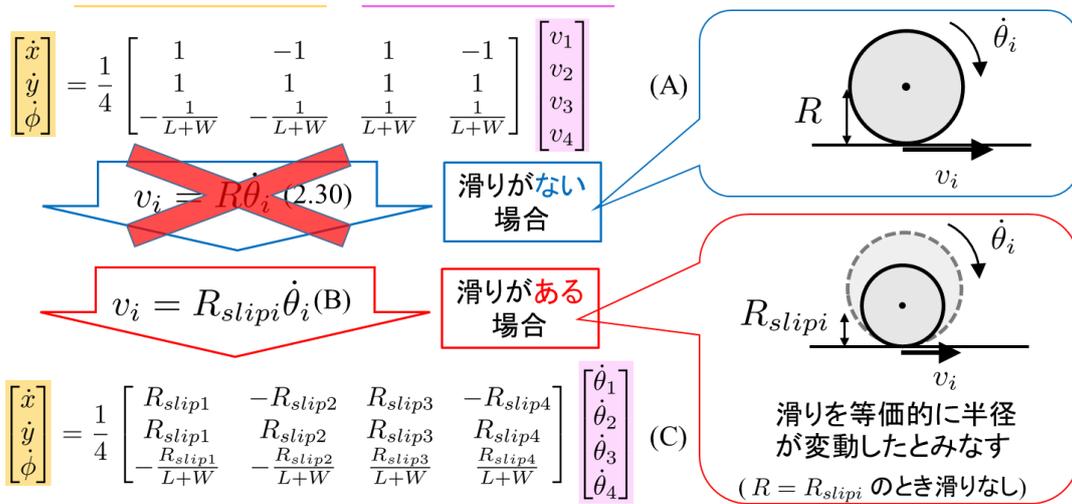


図2 : 滑りが無い場合の電動歩行補助器の運動学関係式

一般に全方位置動車として構成されたシステムでは滑りを利用した移動となるため、滑りを考慮した制御系の構成を行う必要がある。しかしながら、滑りの物理モデルを図2に盛り込むことは困難であり、不正確なモデルを組み込んでしまうと運動制御の制御性能が低下しかねない危惧もある。そこで、本事業では滑りの影響を車輪径の変動によるものと仮定し、車輪径の変動を見かけ上の等価車輪径の変動として推定することで、その推定車輪径を運動学関係式に組み込み、滑りに対してロバストな運動制御系のアルゴリズム構築を行

(別紙1)

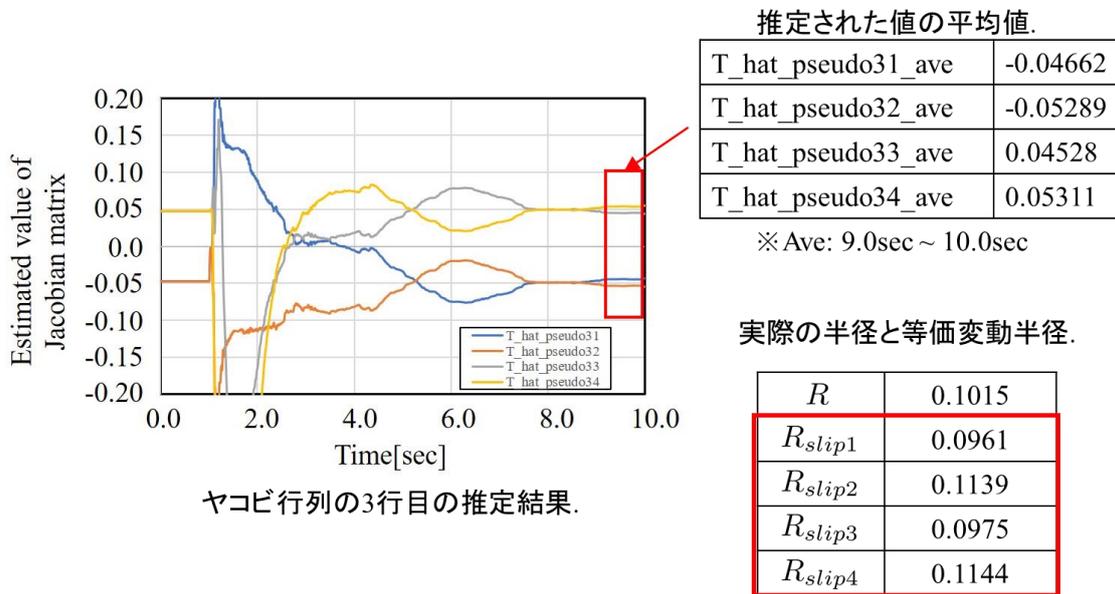
った。この概念に基づき図2の運動学関係式の修正を行ったものを図3に示す。



等価変動半径 R_{slip} を推定し、滑りを考慮したヤコビ行列を導出

図3：滑りを考慮した運動学関係式

図3に示すシステムによる車輪径の推定プロセスについては論文投稿の準備を行っている関係でここでは詳細を省略する。図4に等価車輪径の推定の一例を示す。これより、滑りを考慮した車輪径の推定が可能であることが分かる。



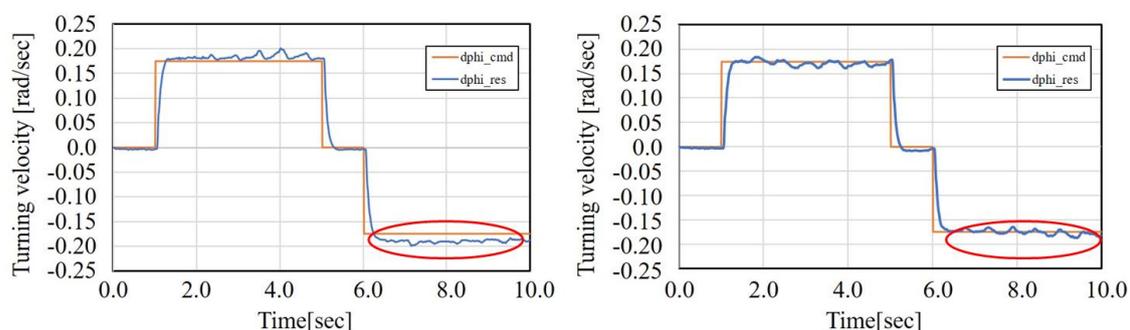
提案手法では、推定した等価変動半径を用いて実験を行う

図4：等価車輪径の推定例

図4の等価車輪径を用いて制御系を構成し、旋回動作の結果を確認したものを図5に示

(別紙1)

す。これより滑り動作が抑えられ、旋回動作の追従性能が改善できていることが分かる。



従来手法における絶対座標系の旋回角速度. 提案手法における絶対座標系の旋回角速度.

提案手法により、旋回方向の速度追従性能の向上を確認

図5：等価車輪径を用いた旋回動作の

先ほども述べたように現在論文投稿のための執筆を行っているため、外力推定の詳細なアルゴリズムについては本報告書では省略する。図6に外力有の場合の駆動力の推定結果を示す。本来ならば外力推定の結果を示すべきであるが、駆動力がほぼ正確に推定できていれば外力の推定も問題無く行えることになり、カセンサレスによる外力推定が可能であることを確認できることになる。図6から等価車輪径を考慮したモデルに基づいたアルゴリズムにより、外力も適切に推定できていることが分かる。

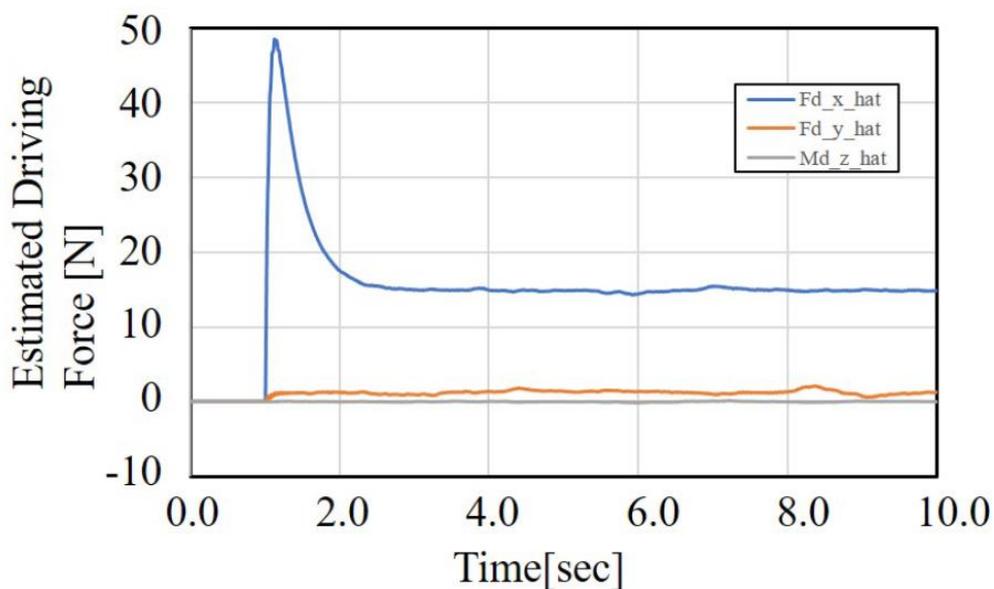


図6：駆動力の推定結果（外力有の場合）

(別紙1)

図6では、定常状態で推定駆動力が15Nとなっている。今回の実験では外力を印加しなかった場合の駆動力も予め測定しており、その値も15Nとなっている。したがって、外力とは無関係に駆動力のみを推定できていることになる。外力を含む全駆動力については、電動機の電流および車体の加速度応答から計算できるため、算出された全駆動力から推定駆動力を差し引くことで外力のみを抽出することが可能となる。

(2) 成 果

各実施事業に対してその成果を以下にまとめる。2021年度はコロナ禍のため、一部の機構解析やその改善、また実験的検証が十分行えたとは言えないが、提案アルゴリズムの有用性を確認できる成果は得られている。

① 全方位移動型電動歩行器の機構設計

- メカナムホイールを用いた全方位移動可能な電動歩行補助器の構築を行った。電動歩行補助器としての最適な設計となっているかの検証が不十分であるが、この点については今後の課題としたい。
- メカナムホイールを用いた電動歩行補助器の運動学関係式ならびに動力学関係式を明確化し、等価車輪径を考慮した運動学関係式を提案した。

② カセンサレス制御のためのヤコビ行列推定アルゴリズムの構築とその実装

- 等価車輪径を導入した運動学関係式に基づいた運動制御系の提案を行い、その有用性を実験的に検証した。特に、旋回動作に対する性能改善がみられることが明らかとなった。これより、等価車輪径の推定アルゴリズムの有用性も確認できたといえる。
- 等価車輪径に基づいた運動学関係式を用いることで、外力を除いた駆動力の推定が行えることを実験的に実証した。これにより、外力の推定も行え、推定外力による電動歩行補助器の制御も実現できることになる。カセンサレスでの補助車の誘導制御については、補助車の機構最適設計と併せて今後の課題としたい。また、今回の実験的実証では等価車輪径のリアルタイム推定が行えていない。実際の利用においては、路面状態が大きく変動する可能性もあり、リアルタイムでの等価車輪径のアルゴリズム実装が重要になると考えている。本事業のサブテーマとして、すべり状態を考慮した移動ロボットシステムの速度推定を実施しており、リアルタイムでの速度推定は行えることは確認できている。今後はこの速度推定アルゴリズムと等価車輪径の推定アルゴリズムの融合化を行う予定である。

(別紙1)

(論文発表)

1. K. Hirata, M. Sasayama, T. Murakami, "Realization of Synchronized Movement between Caregiver and Electric Wheelchair", SIE2021-Kyoto (The 30th International Symposium on Industrial Electronics), June 20-23, 2021. (JKA謝辞あり：車椅子の高機能化制御に関する論文)
2. T. Ohhira, T. Murakami, "Robust Stabilization Control of an Inverted Pendulum Type Robotic Wheelchair", Proceedings of the SICE Annual Conference 2021, September 8-10, 2021, Tokyo, Japan (JKA謝辞なし：車椅子の高機能化制御に関する論文)
3. T. Ohhira, A. Shimada, T. Murakami, "Variable Forgetting Factor-Based Adaptive Kalman Filter With Disturbance Estimation Considering Observation Noise Reduction", IEEE Access (Volume: 9), pp 100747 - 100756, 2021. (JKA謝辞あり：力制御の高機能化に関する論文)
4. Y. Tawaki, T. Nishimura, T. Murakami, "Linear Langevin-Based Models Providing Predictive Descriptive Statistics for Postural Sway", IEEE Access (Volume: 9), pp 114485 - 114494, 2021. (JKA謝辞あり：人の動作モデル化に関する論文)
5. A. Hiraoka, T. Murakami, "An Approach of Load-Side Disturbance Rejection Control for Series Elastic Actuators", IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control February 18-20, 2022 - Padova, Italy, pp18-23. (JKA謝辞あり：機構の振動制御に関する論文)
6. O. Kentaro, T. Murakami, "Estimation of Jacobian Matrix without accelerometer on Omni-directional Mobile Walker", IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control, February 18-20, 2022 - Padova, Italy, pp329-334. (JKA謝辞あり：メカナムホイールシステムの運動制御に関する論文)
7. T. Takenouchi, T. Murakami, "Performance Improvement of Bilateral Control under Time Delay using Gain Adjustment", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp481-484.

(別紙1)

(JKA謝辞あり：人による遠隔操作の運動制御に関する論文)

8. Y. Matsumoto, T. Murakami, " Ankle Angle Control Strategy for Passive/Active Unified Walking Based on Dynamics of Impact", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp489-494. (JKA 謝辞あり：人の歩行解析に関する論文)
9. T. Sugaya, T. Murakami, " Attitude and Velocity Control of Quadcopter with Suspended-Payload with Payload Stabilization Control", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp489-494. (JKA 謝辞あり：力情報に基づく不安定系の制御に関する論文)

(3) 成果を公表している研究室ホームページ上のURL

(<https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>)

(4) JKA補助事業バナーを表示している研究室ホームページ上のURL

(<https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>)

4 事業実施に関して特許権、実用新案権等を申請又は取得したときはその内容特に無し

5 今後予想される効果

① 全方位移動型電動歩行器の機構設計

本事業で提案した「等価車輪径の推定アルゴリズム」についてはメカナムホイールに限ったものではなく、多種の車輪においても展開が行えると考えている。また、「ヤコビ行列の推定アルゴリズム」については産業用ロボットシステムにも応用可能と考えており、人とのロボットの協働空間においてロボットの動作安定性の向上と共に安全性向上へも貢献できると考えている。

② カセンサレス制御のためのヤコビ行列推定アルゴリズムの構築とその実装

「ヤコビ行列の推定アルゴリズム」に基づいた移動車の駆動力指定については他の移動ロボットへの応用展開も可能である。全ての移動ロボットシステムにおいて移動路面に対して発生する滑りの問題は避けることはできず、提案手法の幅広い応用が可能であると期待している。

(別紙1)

6 本事業により作成した印刷物（研究報告書等）

「2021年度カセンサレス駆動力推定による全方位移動型電動歩行器の
知能化デザイン補助事業」報告書 10部（PDFでの配布も検討）

7 その他

特に無し

事業内容についての問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 村上俊之研究室

〒223-8522

横浜市港北区日吉3-14-1

教授 村上俊之

E-mail: mura@sd.keio.ac.jp

URL: <https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>