

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：17H02131
研究課題名（和文）身体・車両・環境の動的インタラクション最適化による上肢フリー移動支援機器の提案

研究課題名（英文）Proposal for an Hands-Free Personal Mobility Vehicle by Optimizing Dynamic Interaction between the Body, Vehicle and Environment

研究代表者
二瓶 美里（Nihei, Misato）
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：20409668
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中高年者の日常生活活動を支援する下肢駆動型ハンズフリーモビリティの開発を行った。開発した車両は、後輪駆動（インホイールモータ）、前輪オムニホイール、操作インタフェース（ペダル）、座位部（サドル）で構成される。移動体上で行うペダリング動作から、搭乗者の意図推定をペダルやサドルに取り付けたセンサ値をDBT（Deep Binary Tree）を用いて学習させることにより、個人の操作特性に合わせた協調学習操作系を実現した。また、協調学習下において人の能力を評価する指標を提案した。下肢駆動装置については、対象筋に負荷を与えるリンクとスライダクランク機構を組み合わせたペダル機構を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
加齢による筋力や活動が低下している虚弱な状態といわれるフレイルには、移動能力や筋力、バランス、認知機能、日常生活の活動性などの要素が含まれている。今後、高齢化の進展により、要支援・要介護予備群は急増していくため、各分野の対応が必要である。これらの問題について、移動活動においては主に医学・体育分野から運動プログラムなどの提案、工学分野から外出支援機器や転倒予防機器など研究は多く行われているが、高齢者の移動形態について、歩行中の下肢だけではなく上肢の役割の観点から総合的に検討を行っている事例は殆ど見受けられない。開発した移動支援機器は高齢期のフレイル予防および質向上の貢献を目指すものである。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a lower-limb-driven hands-free mobility system to support the daily activities of middle-aged and older people. The developed vehicle has a rear-wheel drive (in-wheel motor), a front-wheel omni-wheel and a control interface (two pedals and a saddle). We have developed a cooperative learning control system for the pedals and the saddle by using DBT (Deep Binary Tree) to learn the passenger's intentions from the pedaling motion on the vehicle. In addition, two indices were proposed to evaluate the human ability under cooperative learning. Furthermore, a lower extremity drive system with a pedal mechanism, incorporating a link and slider crank mechanism to load the target muscle, was proposed.

研究分野：生活支援工学

キーワード：移動支援機器 操作系 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人類は、進化の段階で上肢による道具使用や、道具使用をしながらの移動活動などを獲得してきた。移動活動は主に下肢によって行われるため、加齢や障害により下肢機能が低下すると杖や歩行器、車椅子などの移動支援機器を使用することになる。特に、近年では要支援・要介護の危険性が高い状態としてサルコペニアやフレイルなどが注目され、フレイルにおいては介入により再び健康な状態に戻る可逆性を含むことが指摘されている。このことから、移動支援機器を使用しながらでも下肢機能を維持することは医学的に重要な要件となる。さらに、移動支援機器は下肢機能の低下のある高齢者にとっては通院や買い物、コミュニティへの参加等、活動や社会参加に必要な足(道具)でもあることから移動機能の維持は社会的な意義も大きい。

ここで、既存の移動支援機器についてその操作方法を見ると、杖や歩行器については上体バランスを保つために上肢を支持に用い、車椅子や電動車椅子については操作に上腕・手指を用いることがわかる。つまり、支援機器を使用すると、上肢動作に制約が生じることとなるのである。手指の運動は、環境とのインタラクションを生み出すだけでなく、知的な作業も含むことから、脳への刺激となり認知機能などに影響を及ぼすと言われている。日常生活のレベルで見ると、家事作業や運搬作業、スポーツなどの様々な場面でそれらの活動を観察することができ、ADL や QOL、生きがいにも影響を与えられ考えられる。そのため、移動中に上肢や手指活動を維持することは極めて重要であると考えられる。

2. 研究の目的

ヒトは二足歩行を行うことで歩行移動時に上下肢の独立性を保つという特徴を持つ。手指を使いながらの移動が可能になったことで、ヒトは多様な生活様式を生み出し、高い知能を獲得し発達・発展してきた。一方、加齢による身体機能の低下により、歩行移動が困難になると、杖や歩行器、車椅子など体重支持や操作に上肢を用いる移動支援機器を導入することとなる。そのため、移動活動中に手指が使えないことで生じる種々の機会損失が存在すると考えられる。本研究では、それらの機会損失を機器で解消することを提案する。具体的には、身体と車両、環境との動的なインタラクションを最適化することによる上肢フリー移動支援機器の提案・開発を行うことを目的とする。これにより、高齢者のフレイル予防および生活の質向上の貢献を目指す。

3. 研究の方法

本研究課題では、上肢フリーの移動の実現とその可能性についての検討を行うため次の目標を設定する。

- (1) 移動支援機器使用時の上肢動作の分析による操作により他の上肢動作が制限される項目の抽出
- (2) 移動中の上肢作業の非拘束性による効果と評価について検討し、上下肢の機能独立がもたらす効果の想定と評価項目の設計
- (3) 上肢フリーの一人乗り移動体の開発のために、上下肢動作を拘束しない上体・座位保持システムの開発、身体特性と環境外乱に合わせた移動体の開発、下肢操作型最小車両機構の開発および安全設計、設計に必要な環境情報及び車両移動方法の検討

4. 研究成果

- (1) 移動支援機器使用時の上肢動作の分析による操作により他の上肢動作が制限される項目の抽出

本研究では日常生活の動作に対し、移動支援機器を使用することによって制限される、あるいは動作の変更を余儀なくされる動作を明らかにするための調査を行った。日常生活の立位・移動活動中の上肢動作に対し、その発生頻度や移動支援機器の使用により制限される動作の種類・時間的割合を定量的に示すことを目的とし、360°カメラによるライフログデータの収集と分析を行った。ここで上肢動作とは、手指や上肢を用いて行う動作とする。

本来、歩行補助杖や歩行器、シルバーカーを用いる主なユーザーは片麻痺の患者や下肢機能、歩行機能の低下が生じている高齢者である。しかし、本実験においては、移動支援機器を使用した場合と使用しない場合のそれぞれの条件において発生する立位・移動時の上肢動作の比較を行う必要がある。そのため、機器導入の実験については、移動支援機器を使用しない場合においても日常生活を送るのに問題がないと考えられる、若年健常者4名(23-24歳、男性3名、女性1名)を参加者とした。一方、移動支援機器を必要としない若年者は、機器の実際の使い方に差異が生じる可能性があることから、日常的に移動支援機器を使用している高齢障害者1名(87歳、女性、要支援度2)を実験参加者とした。

分類方法を図1に、結果の一例を図2に示す。

日常生活の動作をその特徴に従って13個に分類して発生頻度を調査した結果、移動中・静止中の物の移動と手指動作、身体矢状面に水平に物を引く・押す、といった5つの発生頻度が高い動作が明らかになった。移動支援機器導入の影響として、(1) 機器使用中には機器の把持により移動中の物の移動や手指を用いる細かい動作の頻度の低下、(2) 身体支持基底面の増加や機器操作の必要性に伴う動作時間の増加、の2点が発生することが定量的に示された。

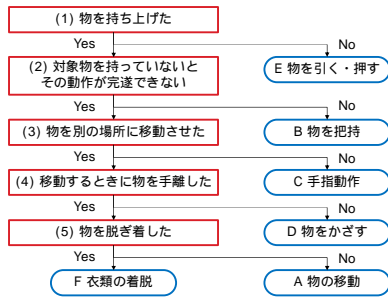


図1 分類方法

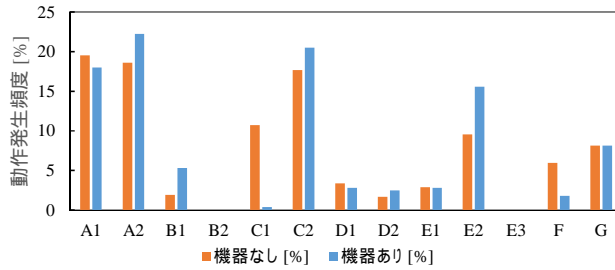


図2 被験者 YH1 (歩行器導入前後) の分液結果

(2) 移動中の上肢作業の非拘束性による効果と評価について検討し，上下肢の機能独立がもたらす効果の想定と評価項目の設計

(1)の調査結果から，日常動作の分類をまとめ，上肢作業の非拘束性による効果と評価についての検討結果をまとめた。また，機器使用中には機器の把持により移動中の物の移動や手指を用いる細かい動作頻度の低下，身体支持基底面の増加や機器操作の必要性に伴う動作時間の増加，の2点が発生することが定量的に示された。

ID	名前	概要
A1	移動しながら物を移動	物を異なる位置へ置く・物を取り出す動作
A2	静止して物を移動	
B1	移動しながら物を把持	必ずしも必要はない物を持ち続けている動作
B2	静止中の物の把持	
C1	移動しながらの手指動作	主に指先を用いて行う巧緻性のある動作
C2	静止中の手指動作	
D1	移動しながら物をかざす	手にしている物を対象に近づける動作
D2	静止して物をかざす	
E1	前額面に水平な方向へ物を引く・押す	物を持ち上げずに移動・引きずる動作
E2	矢状面に水平な方向に物を引く・押す	
E3	斜め下方に物を引く・押す	
F	衣類の着脱	衣類を脱ぎ着する動作
G	その他	上記以外の動作

(3) 上肢フリーの一人乗り移動体の開発のために，上下肢動作を拘束しない上体・座位保持システムの開発，身体特性と環境外乱に合わせた移動体の開発，下肢操作型最小車両機構の開発および安全設計，設計に必要な環境情報及び車両移動方法の検討

開発コンセプト

対象者：サルコペニアやフレイルを予防するには，早期の介入が効果的であると言われている。つまり加齢による筋肉量の低下や筋力低下，身体機能の低下や活動量の低下などが起こり始める頃に何らかの介入をすることが望ましい。筋力量の変化量は，20歳を基準とすると，50歳から低下しはじめ，70歳では女性で約6%，男性で約10%低下すると報告されている³⁾。したがって，本研究での対象者は，60代から70代前半の中年および前期高齢者と設定した。

本研究では，対象者や移動活動のニーズ，移動手段や支援機器，歩行機能や上肢機能についての要件について，総合的に検討し，中距離の移動が最も効率よく可能な乗車型機器に着目し，走行中にハンドル操作やジョイスティック操作などで手指や上肢の動作を妨げない機能，および身体機能(下肢機能)の活用ができることを要件とすることとした。図3に利用シーン，図4にモビリティデザイン案を示す。

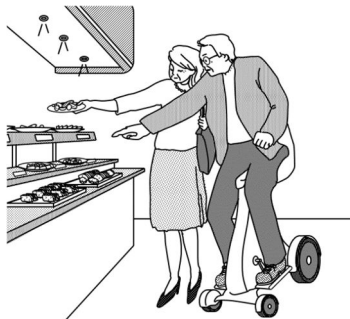


図3 ユーザーシーン



図4 モビリティデザイン案

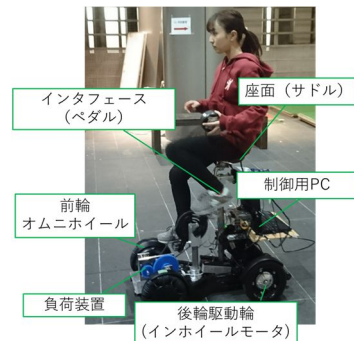


図5 開発したハンズフリーモビリティ

開発したハンズフリーモビリティ (図5)

機器の概要：開発した移動体は，後輪駆動輪(インホイールモータ)，前輪オムニホイール，操

作インタフェース（ペダル）、座位部（サドル）で構成される。ペダルとサドルに取り付けた 6 軸力センサ値とクランク回転数を用いて移動体上で行うペダリング動作から、車両の速度と旋回角速度を決定する。旋回角速度については、DBT（Deep Binary Tree）を用いて、個人に合わせた初期条件を得たのち、直進性を向上させるための追加学習を行う手法を提案した。

人-機械協調操作系：開発する移動体は入力動作と移動体の運動が直接接続されているわけではないため、乗車する人のイメージ次第で内部モデルが異なってくるという特徴を持つ。このため、移動体の操作系については操作者が移動体の操作学習を行う中で、移動体側も操作者の特性を学習するような学習器を備えていることが望ましい。ペダリング動作から移動体の進行動作や旋回動作に必要な速度や角速度の推定を行わなくてはならないため、入出力共に連続値を扱える学習器として力学系学習器を使用することを検討した。

力学系学習器は小型船舶の速度状況から加速度の推定を行うことができるものの、小型船舶の旋回性はパーソナルモビリティよりも低いため、直進性と旋回性の対立が生じうる。このため、直進性と旋回性を両立できるような学習アルゴリズムを備えている必要があると考えられる。

まず、視覚情報を用いたペダリング動作の計測実験から得られたセンサ値と動画中の移動体の速度、角速度を用いてデータベースを作成し、それを主成分分析することで速度、角速度に寄与する主成分を抽出した。その結果、角速度は実験参加者ごとに相関が見られるセンサ値が異なっていたが、旋回時に行っていた動作として、回旋動作型、屈曲動作型、左ペダル/右ペダル踏み込み型の 4 通りの動作に分類することが可能であった。そこで、速度については高齢者の身体機能特性を考慮してクランクの回転数によって速度を規定し、前進後退の切り替えは、座面の前後方向に力を加える動作と上体を前後傾させる動作に起因するセンサ値の 2 つを用いることと定めた。図 6 に操作システムの概要図を示す。

開発した操作系について、その評価を行うためにシミュレータを用いた仮想空間内で走行実験を行った。評価の目的は、ペダリング操作系による仮想空間における走行に大きく遅延・逸脱した走行がないか、追加学習は効果があるかを調べることである。基準としてまず、ジョイスティック操作系を用いることによって、不慣れた操作系に対して走行時間や逸脱度がどのように変化するか、操作に慣れた場合に収束する値が存在するか検証した。結果の一部を図 8, 9 に示す。

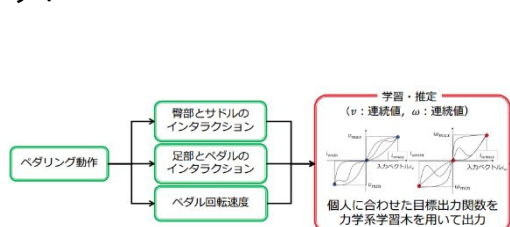


図 6 操作システムの概要

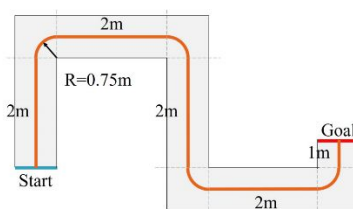


図 7 仮想空間上の走行コース

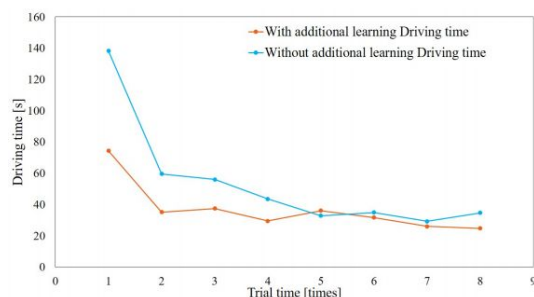


図 8 被験者 A による走行結果の一例

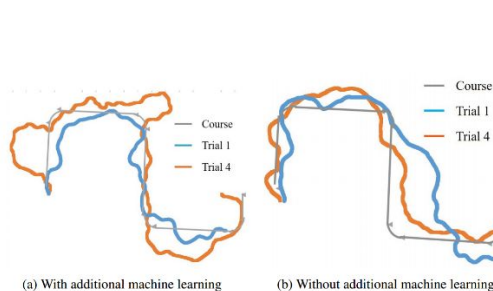


図 9 被験者 B による走行評価結果（1・4 回目）

③筋骨格シミュレーションに基づくペダリングシステム

平面 4 節機構を用いたペダリングシステム：モビリティの使用中に歩行機能改善を目的とした足部経路に沿ってペダリング運動を行うことで下肢に適切な運動負荷を与えるためのペダリングシステムの開発を行った。歩行機能改善に有効な足部経路として、立脚期の経路と股関節膝関節の屈曲動作を促す経路を組み合わせた足部の目標経路を設計した。設計した経路通りにペダルを動かすための平面 4 節機構の探索を行い、設計した足部経路に対し偏差が僅少な中間節曲線を持つ平面 4 節機構を得た。下肢に適切な運動負荷を与えるために、下肢三大関節の発揮トルクの目標値から最大ペダル反力と機構の原動節に必要なトルクを算出する手法を提案した。提案したペダル機構（図 10 左）と制御系を用いたペダリング実験によって母指球の軌道とペダル踏力を得、これに基づき筋骨格シミュレータでペダリング運動を再現し（図 10 右）、腸骨筋と前脛骨筋の筋発揮力を確認したところ、歩行動作や自転車のペダリングに比べ腸骨筋・前脛骨筋が長期間大きい力を発揮していることが確認できた。

楕円経路創成機構と揺動スライダクランク機構を用いたペダリングシステム：コンパクトでペ

ダル角度を制御可能な、楕円経路創成機構と揺動スライダクランク機構による 1 自由度ペダル機構を提案し、またこれによって再現される下肢動作と負荷パターンの組み合わせについて、筋骨格シミュレーションに基づく最適設計を行った。具体的には関節角度について一定以上の可動域を使用する制約条件を設定し、また経路の各位相で目標とする筋活動量を設定し、シミュレーション結果との差の二乗和 S を最小にするような負荷パターンを設計した。これらの組み合わせについて、1 周期当たりの S の総和を最小にするようなペダル経路、ペダル角度とペダル反力の組み合わせを最終解として選択した。筋骨格シミュレーションの結果、設計したペダル機構と制御系によって特に腸骨筋、前脛骨筋、大腿四頭筋で高い筋活動を確認できたので、これに基づく実験装置を設計した(図 11)。

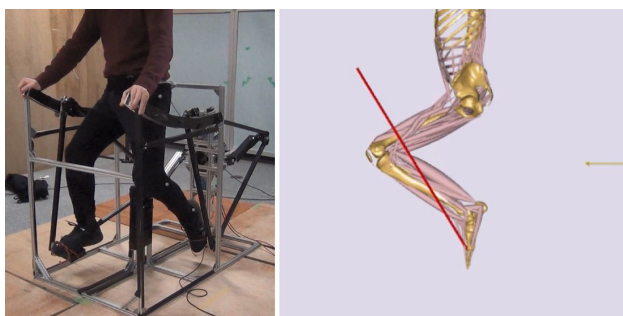


図 10 開発した 4 節ペダル機構と筋骨格シミュレーションの様子

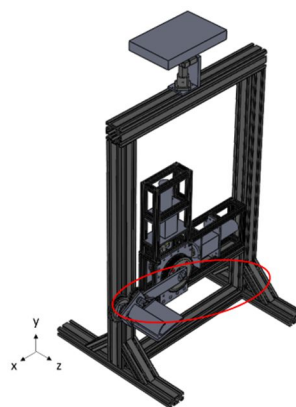


図 11 開発した楕円経路式ペダリングシステム

協調学習操作系における人の学習習熟を評価する手法

本研究で開発した移動支援機器の協調学習操作性の評価において、走破時間・逸脱度の推移を確認したところ、収束過程に個人差があることが明らかになった。また、この要因として操作者の操作学習能力が影響することが示唆された。これらのことから、人-機械系の協調学習を検討するには、個人の運動学習能力やその段階を考慮する必要があることが明らかになった。また、人-機械系の協調学習操作系の機能評価を行うにあたっては、人が学習したのか、機械が学習したのかを分離して考える必要がある。そこで、本研究では、電動車椅子などのノンホロノミック車両を操作する際に、人の運動学習を協調学習の手法を用いてアシストするために、人の運動学習能力や運動学習の段階と関連する簡便な指標を提案した。図 12 に学習能力を評価する学習速度に関する例を示す。この指標は、予測誤差 e_t の不定周期の振動が生じる時間変化を、これらの極大値が収束する傾向を捉えることによって判断することができる指標で、学習速度が小さい時間帯 A では、予測誤差の周期的な振幅の最大値の変化が小さく、運動学習が停滞している状態であることを表す。一方、学習段階については、学習率 D は忘却率を含む関数で、それらの守勢部分分析を行った結果の第一主成分 Q を指標とした。ジョイスティック操作において、単純視覚回転外乱と複雑視覚回転外乱を与えた場合で仮想環境での走行実験を行い、提案した指標が運動学習段階と学習能力と関連があることを示した。図 13 に明らかに学習段階の異なる条件における指標 Q を用いた検証実験の結果を示す。

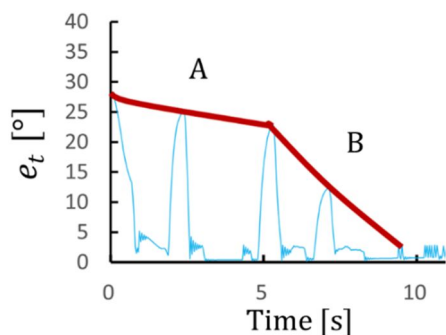


図 12 予測誤差と学習速度

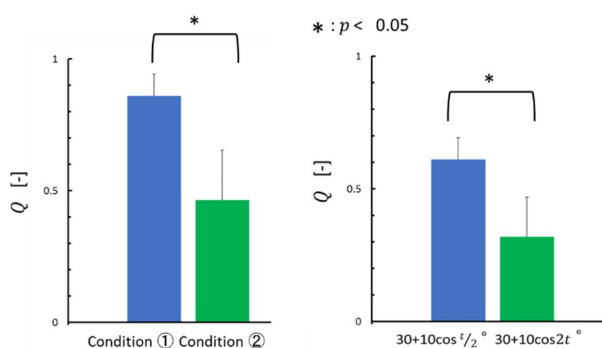


図 13 学習段階を表現する Q を用いた条件別実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐久間菜月, 二瓶美里, 西畑智道, 菅原雄介, 松浦大輔, 島悠貴, 武田行生, 鎌田実
2. 発表標題 高齢者向け上肢フリー移動体のための下肢動作を活用した操作手法の開発
3. 学会等名 第18回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐久間菜月, 二瓶美里, 西畑智通, 鎌田実
2. 発表標題 ライフログを用いた歩行支援機により制限される生活動作の分析
3. 学会等名 バイオメカニズム学術講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 二瓶美里
2. 発表標題 高齢者の生活とリハビリテーションのこれから - 福祉工学, 生活支援工学の立場から -
3. 学会等名 第4回再生医療とリハビリテーション研究会 (大阪大学) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西畑智通, 佐久間菜月, 二瓶美里, 鎌田実, 菅原雄介, 島悠貴, 松浦大輔, 武田行生, 金天海
2. 発表標題 ハンズフリーモビリティの提案 - 個人のメンタルモデルに合わせた人・機械相互学習型操作系 -
3. 学会等名 LIFE2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二瓶美里
2. 発表標題 高齢者のためのモビリティデザイン
3. 学会等名 日本設計工学会2018年春季研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二瓶美里, 佐久間菜月, 西畑智道, 鎌田実, 菅原雄介, 島悠貴, 松浦大輔, 武田行生
2. 発表標題 高齢者向けハンズフリー下肢操作式モビリティの提案 開発コンセプト -
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島悠貴, 佐久間菜月, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 西畑智道, 二瓶美里, 鎌田実
2. 発表標題 高齢者向け下肢操作式モビリティにおける歩行機能改善に有効な運動負荷を与えるペダル機構の設計
3. 学会等名 第18回日本機械学会基礎潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原雄介, ムハマドシャフィック, 島悠貴, 松浦大輔, 武田行生, 遠藤央, 岡本淳
2. 発表標題 入力ロボティクスの研究 (第10報, CVTとパワーアシストを用いた人力関節駆動機構の操作負担低減)
3. 学会等名 Proceedings of the 2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Sugahara, Hayato Akiyama, Jeremy Jong, Mitsuru Endo, Jun Okamoto
2. 発表標題 Design and Control of a Human-Powered Robotic Personal Mobility Vehicle Prototype
3. 学会等名 Proceedings of the 22nd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY22) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部智也, 西畑智道, 二瓶美里, 鎌田実, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 遠藤央, 金天海
2. 発表標題 移動支援機器の協調学習操作系における人の学習習熟を評価する手法の提案
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西畑智道, 二瓶美里, 鎌田実, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 金天海, 遠藤央
2. 発表標題 力学系学習木を用いたノンホロノミック車両のための人-機械協調学習操作系の開発
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原雄介, 島悠貴, 松浦大輔, 武田行生, 二瓶美里, 佐久間菜月, 西畑智道, 鎌田実, 遠藤央
2. 発表標題 高齢者向けハンズフリーモビリティのためのペダリング運動負荷システム
3. 学会等名 LIFE2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本航平, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 遠藤央, 岡本淳
2. 発表標題 人形ロボティクスの研究 (第11報, 回生クラッチと定荷重ばねを用いた2自由度人形ロボット)
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Sugahara, Kohei Tsukamoto, Mitsuru Endo, Jun Okamoto, Daisuke Matsuura, Yukio Takeda
2. 発表標題 A Multi-DOF Human-Powered Robot Using Regenerative Clutches and Constant-Force Springs
3. 学会等名 Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 生活支援工学分野
<http://www.atl.u-tokyo.ac.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
研究 分 担 者	菅原 雄介 (Sugahara Yusuke) (60373031)	東京工業大学・工学院・准教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	硯川 潤 (Suzurikawa Jun) (50571577)	国立障害者リハビリテーションセンター（研究所）・研究所 福祉機器開発部・研究室長 (82404)	
研究分担者	遠藤 央 (Endo Mitsuru) (50547825)	日本大学・工学部・講師 (32665)	