

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H00768

研究課題名（和文）人型システム力学理論の新展開とインタラクション指向モーションシンセシスの創成

研究課題名（英文）New horizon in dynamics theory for anthropomorphic systems towards interaction-oriented motion synthesis

研究代表者

吉田 英一（Yoshida, Eiichi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・副研究センター長

研究者番号：30358329

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人型システムの力学・制御を新たな視点で捉え、インタラクションを伴う運動の最適化手法を汎用的な形で再構築することで、新たなモーションシンセシス手法を実現した。剛体の運動を包括的に扱う18次元多様体（CMTM）を考案し、人型システムの位置・姿勢および速度・加速度、力を含む動力学的な物理量の勾配計算を高速に行う手法を構築した。これらの物理量の組み合わせで表現されるエネルギー消費や動作安定性などの評価関数を最適化する運動生成手法の体系を創出した。実問題への適用として、人間型ロボットによる装着型支援機器評価のための人動作の再現や、慣性センサに基づく人間の運動と身体負荷の実時間推定を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

剛体の運動を包括的に扱う18次元多様体（CMTM）はこれまでの動力学解析にはない新たな着想である。これを人型システムに適用し、力や関節トルクを含む任意の物理量の一般化座標、速度、加速度に対する勾配を、数値微分でなく解析的に求める計算手法を構築したことは、学術面で新規性が高い。またこの成果は汎用性が高いため、人型ロボットを用いた定量評価による支援機器の普及、また簡易センサによる人の運動や負荷の解析・実時間モニタリングによる製品の人間工学的設計改良や労働環境の改善などに活用でき、社会的・産業的な波及効果も期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a new perspective on the dynamics and control of anthropomorphic systems and reconstructed an optimization method for motion involving interactions in a generic form to come up with a new motion synthesis method. We devised an 18-dimensional manifold (CMTM) that comprehensively handles the motion of rigid bodies and built a method for fast calculation of the gradient of physical quantities including the position, posture, velocity, acceleration, and force of an anthropomorphic system. We have developed a system of motion generation methods to optimize evaluation functions such as energy consumption or motion stability, which are expressed by the combination of these physical quantities. As applications to real-world problems, we have achieved the reproduction of human motions for the evaluation of wearable assistive devices by a humanoid robot and the real-time estimation of human motions and physical loads based on inertial sensors.

研究分野：ロボティクス

キーワード：デジタルヒューマンモデル モーションシンセシス 動力学解析 最適化 人間動作解析

1. 研究開始当初の背景

近年、人型ロボットによる複雑な作業や、より精緻な人体シミュレーションが可能となっている背景として、ロボット・計算機ハードウェアの進化とともに、ロボットの動力学理論の整備と、2次計画法等の数値運動制御・最適化を用いた運動の合成手法であるモーションシンセシス手法の進展がある。一方、大規模組立や災害対応、支援機器評価へのロボットの応用範囲拡大や、デジタルヒューマンによる機器設計の浸透に伴い、身体と外部環境や機器とのインタラクション(力のやりとり)を含むモーションシンセシス問題を扱う必要性が増している。

人間の複雑な全身動作の解析や、人型ロボットによる人動作再現などのモーションシンセシスには、上記の構成要素を複合した最適な軌道生成や動作制御の問題を解く必要がある。しかしながら、このような複雑な最適化問題を解析的に扱う手法は提案されていなかった。特にその原因として、**効率的かつロバストな勾配計算とそれに基づく時空間最適化の枠組みが確立していない**ことが課題であり、これを解決する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、人型システムの力学・制御を**物理量の相互関係から新たな視点で捉え、インタラクションを伴う運動の最適化手法を汎用的な形で再構築**することで、モーションシンセシスを実現することを目的とする。まず、基盤理論として、力や関節トルクを含む任意の物理量の一般化座標、速度、加速度に対する勾配を、数値微分でなく**解析的に求める計算手法の確立**を目指す。さらに、多数の物理量が関係する複合問題において、**運動生成・制御のための時空間最適化を効率的に行う手法を提案**する。構築した手法を、**人型システムの実問題に適用**して有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、人型システムのモーションシンセシス実現のため、下記の3つの観点からアプローチする。

(1) 複合問題解決のための力学理論基盤の整備

ロボットの力学制御系の複合的な実問題としての時空間最適化の実現のためには、各問題の陰的な関係で表現された様々な**力学的指標・制約関数の最適化変数に関する勾配計算**が求められる。固定型ロボットアームの分野における**解析的な定式化**を、人型ロボットに対して**多様体変数を扱う多様体最適化理論から再構築**する。また力学特徴量の再帰的な高速計算法と、筋骨格解析の分野における計算安定な勾配計算法を融合させることで、任意の力学指標への高速・安定な勾配計算法を明らかにする。

(2) インタラクションを伴う人型システム運動の時空間最適化手法の構築

(1)で導出した理論的基盤に基づき、人型システムのインタラクションを伴う複合問題に対する**モーションシンセシスのための時空間最適化手法を構築**する。具体的には、動作目的に応じ**評価指標として人動作への類似度、消費エネルギー**等を、また**制約関数として動力学方程式や機械的制約、接触条件、動的安定性**等を定式化する。

(3) 人体シミュレーションと人型ロボットの実験に基づく実問題への適用と検証

人体シミュレーションソフトウェア上に構築した手法を実装することにより、筋骨格モデルに基づく**腰部負担のリスク計算**や、負担を軽減する**動作支援機器の評価**などに適用する。実世界での検証として、ヒューマノイドの実機を用いて**能動的支援機器に対するインタラクティブな人間動作模擬**等を実行し、実験的に手法の有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) 複合問題解決のための力学理論基盤の整備

剛体の運動を包括的に扱う18次元多様体(Comprehensive Motion Transformation Matrix, CMTM)を考案し、剛体の位置・姿勢および速度・加速度を包括的に扱える新たな運動学理論を構築した(図1)。

上記の運動理論を用いることで、球面関節や非駆動自由関節を含む多リンク系の基礎的な物理量(位置・速度・加速度・力・モーメント・トルク)の、**一般化座標・速度・加速度に関して微分関係を表現するヤコビ行列の解析解**を導出した。これを利用してヤコビ行列の時間微分の高速計算法を導出し、**動力学的な制約を含めた人型システムの力学指標に基づいて、全身の動作生成を行う運動最適化法を開発**した。運動軌道はB-splineなどの軌道変数で表現し

ており、ある一定時間区間全体での評価関数が与えられた場合でも運動を最適化できる。この成果は、ロボティクス分野のトップ学術誌 Int. J. Robotics Research に掲載された。これまでの手法では制約の多さから計算量面で難しかった、人型ロボットのような大自由度系での動的評価に基づく運動最適化が可能となった。

また、この理論基盤に基づき、**将来の速度と加速度を制御できる逆運動学**

(Inverse Kinematics, IK) 手法を新たに導出した。この手法では、将来の関節軌道を最適化する二次計画法(Quadratic Programming, QP)として定式化される。この手法の特徴は、(1)将来の時間における加速度の評価、(2)QPに時間積分式を暗黙的に組み込むことができる軌道表現 (3)上記 CMTM を用いた理論に基づいた将来のヤコビ行列の計算である。これにより、将来の加速度を評価しながら安定かつ高速に IK を計算することができる。ロボットが関節角度・速度・加速度に制約がある条件下で、軌道全体で人の動作に近づけながら加速度を最小とするようなロボットの滑らかなリーチング動作軌道の最適化に適用し、有効性を検証した。この成果は、ロボティクス分野のトップ国際会議 IEEE/RSJ IROS2019 に採択された。

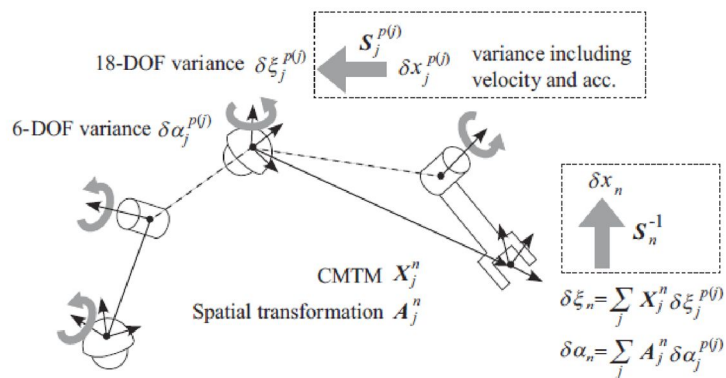
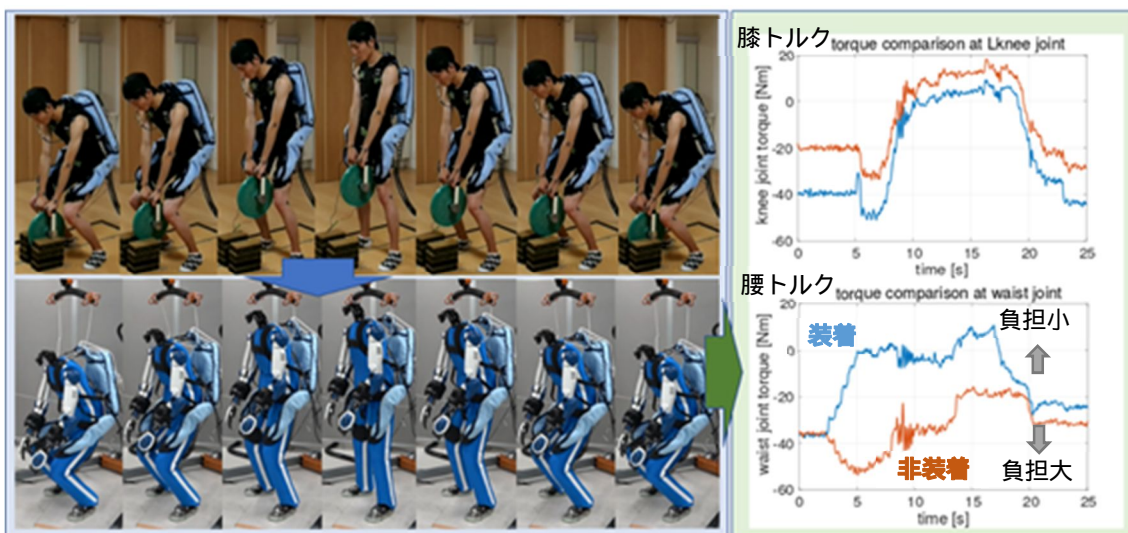


図1 18次元の多様体とCMTMによる包括的運動理論の構築

(2) インタラクショを伴う人型システム運動の時空間最適化手法の構築

インタラクショを伴うモーションシンセシスの複合問題の解決手法を汎用的な枠組みとして実装し、実際の課題に適用してその有効性を検証した。具体的には、(1)で構築した基盤理論・アルゴリズムに基づき、インタラクショ時の外力を含めた実ロボットの運動生成に関する問題に取り組んだ。ここでは、装着型アシスト機器を装着してアシスト力に合わせて動く人の運動を計測し、計測された外力と運動データから両者の関係を表すデータリブナベクトル場を設計した。このベクトル場に引き込まれるヒューマノイドロボットの身体運動制御を構築することで、人の外力に対するインタラクショを模擬できる人動作リターゲットング法を開発した。開発した手法により、実際にアシスト機器を装着したヒューマノイドロボットを用いて、同アシスト機器を使用している際の人の動作を模擬できることを実験的に示した。これにより、これまで定量的な評価が困難であった、**装着型アシスト機器の運動中における動的アシスト効果を抽出**できた(図2)。本成果は、ロボティクス分野の主要論文誌の一つである IEEE Robotics and Automation Letters に掲載された。



インタラクショを含む人動作の人型ロボットによる再現

アシスト機器装着・非装着時の出力トルクの比較

図2 インタラクショを含む人動作の再現による支援機器の評価

(3) 人体シミュレーションと人型ロボットの実験に基づく実問題への適用と検証

開発した理論基盤に基づき、人型システムの運動軌道が与えられたときに、その運動軌道における各時刻を新たな変数として、非駆動ベースの一般化座標を含めた時間軌道を最適化する二次計画法を考案した。このような人型システムの運動最適化の枠組みを応用して、人型ロボットの力学パラメータ同定のための動作生成、これを発展させた重心・運動量の実時間推定を行う手法を構築した。特に、CMTM の導入により、動的な安定化規範であり加速度が含まれる ZMP (Zero Moment Point) を評価指標に含めて最適化のための微分を実施することが可能となったことが大きく貢献している。これらの手法を、等身大のヒューマノイドロボットの動的な動作に適用して実験を行い、手法の有効性を検証した(図3)。

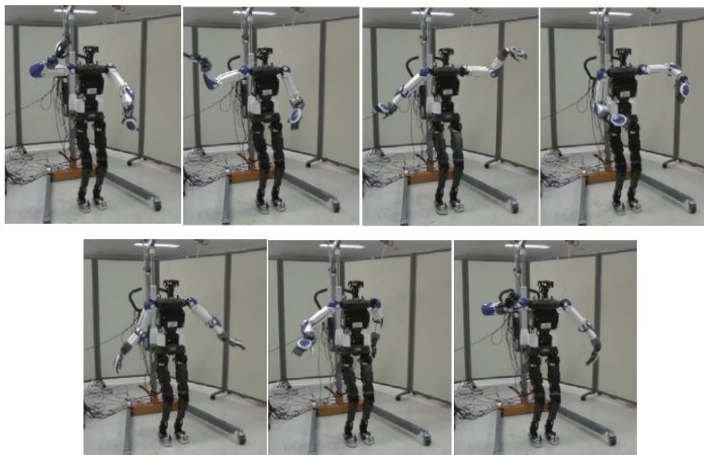


図3 人型ロボットの動力学パラメータ同定のための最適動作生成

人間動作解析・理解への適用においては、光学式モーションキャプチャによる計測において、環境や機器による身体の隠れがおこったり、被験者がカメラ計測に抵抗を覚えたりといった実験条件下でも被験者動作の計測を可能とするため、複数の慣性センサを用いて、実時間にて人体姿勢シーケンスを計測・再現する手法を開発した。これにより、人間の動作中の運動と身体負荷をリアルタイムで推定する技術を開発した(図4)。

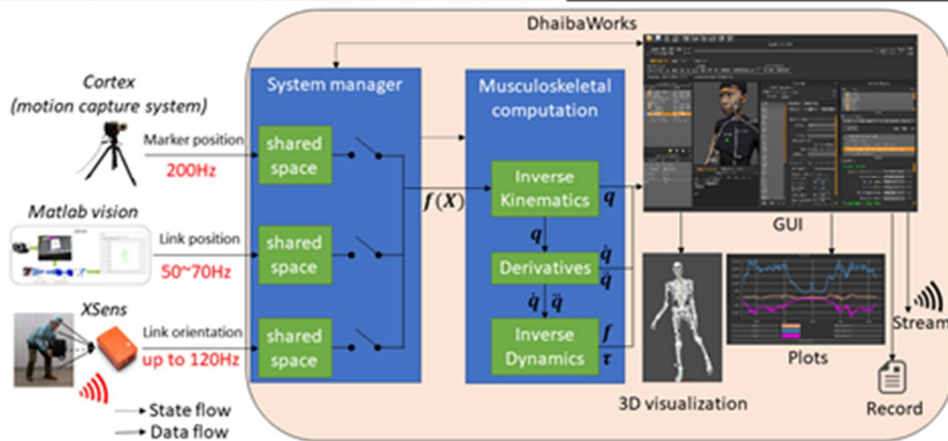


図4 慣性センサを用いた実時間での筋骨格モデルの計算と身体負荷の評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi	4. 巻 37
2. 論文標題 Comprehensive theory of differential kinematics and dynamics towards extensive motion optimization framework	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The International Journal of Robotics Research	6. 最初と最後の頁 1554-1572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/0278364918772893	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 Mori Kenya, Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Online Center of Mass and Momentum Estimation for a Humanoid Robot Based on Identification of Inertial Parameters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 257-263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS.2018.8625037	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 Masuda Shimpei, Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Optimization Framework of Humanoid Walking Pattern for Human Motion Retargeting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 725-731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS.2018.8625060	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 Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Comprehensive Theory of Differential Kinematics and Dynamics for Motion Optimization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. Robotics: Science and Systems XIII	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15607/RSS.2017.XIII.063	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 Ayusawa Ko, Rioux Antoine, Yoshida Eiichi, Venture Gentiane, Gautier Maxime	4. 巻 1
2. 論文標題 Generating persistently exciting trajectory based on condition number optimization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation	6. 最初と最後の頁 6518-6524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICRA.2017.7989770	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 Suleiman Wael, Ayusawa Ko, Kanehiro Fumio, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 On Prioritized Inverse Kinematics Tasks: Time-Space Decoupling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. Int. Workshop on Advanced Motion Control	6. 最初と最後の頁 108-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Pirk Soren, Krs Vojtech, Hu Kaimo, Rajasekaran Suren Deepak, Kang Hao, Yoshiyasu Yusuke, Benes Bedrich, Guibas Leonidas J.	4. 巻 36
2. 論文標題 Understanding and Exploiting Object Interaction Landscapes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Graphics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3072959.3083725	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 Imamura Yumeko, Ayusawa Ko, Endo Yui, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Simulation-based design for robotic care device: Optimizing trajectory of transfer support robot	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics	6. 最初と最後の頁 851-856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICORR.2017.8009355	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 Ito Takahiro, Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi, Kobayashi Hiroshi	4. 巻 5
2. 論文標題 Simultaneous Control Framework for Humanoid Tracking Human Movement With Interacting Wearable Assistive Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3604 ~ 3611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.2979663	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 Samy Vincent, Ayusawa Ko, Yoshiyasu Yusuke, Sagawa Ryusuke, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Fusion of Multiple Motion Capture Systems for Musculoskeletal Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 295 ~ 299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9025818	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 Ayusawa Ko, Suleiman Wael, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Predictive Inverse Kinematics: optimizing Future Trajectory through Implicit Time Integration and Future Jacobian Estimation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems	6. 最初と最後の頁 566 ~ 573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRoS40897.2019.8968110	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 Samy Vincent, Ayusawa Ko, Yoshiyasu Yusuke, Sagawa Ryusuke, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Musculoskeletal Estimation Using Inertial Measurement Units and Single Video Image	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE Int. Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts	6. 最初と最後の頁 39 ~ 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ARSO46408.2019.8948820	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 Yoshida Eiichi, Ayusawa Ko	4. 巻 10
2. 論文標題 Towards Unified Framework for Trajectory Optimization Using General Differential Kinematics and Dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotics Research. Springer Proceedings in Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 217 ~ 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-28619-4_21	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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 森 賢哉、鮎澤 光、吉田 英一
2. 発表標題 力学パラメータの同定法に基づいた人型ロボットの重心・運動量の実時間推定
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 増田 慎平、鮎澤 光、吉田 英一
2. 発表標題 歩行パターンジェネレータを用いた人間歩行動作のヒューマノイドによる再現手法
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 Endo Yui, Yoshida Eiichi
2. 発表標題 Real-time Motion Reconstruction using Digital Human Models and IMU-based MoCap System
3. 学会等名 1st International Conference on Intelligent Human Systems Integration (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田英一
2. 発表標題 Digital and Physical Twins for Design and Evaluation: Human, Digital Actor and Humanoid
3. 学会等名 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田英一
2. 発表標題 Comprehensive Theory of Differential Kinematics and Dynamics Towards Extensive Motion Optimization Framework
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation 2019, Workshop on Toward Online Optimal Control of Dynamic Robots: From Algorithmic Advances to Field Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	鮎澤 光 (Ayusawa Ko) (60649086)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	吉安 祐介 (Yoshiyasu Yusuke) (10712234)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	今村 由芽子 (Imamura Yumeko) (60760436)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	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	遠藤 維 (Endo Yui) (40599073)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	K h e d d a r A b d e r (Kheddar Abderrahmane) (90572082)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・客員研究員 (82626)	

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