

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220005

研究課題名(和文)人間共存型ロボットの能動的な働きかけによる人間協調技術の研究

研究課題名(英文)Research on Active Coordination Technology for Human Symbiotic Robot

研究代表者

菅野 重樹 (Sugano, Shigeki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00187634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 171,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、接近～弱い接触による協調的な意図伝達、人間-ロボットの接触ダイナミクスモデル、強い接触による協調的な人間運動の誘発、の3つの技術課題に取り組み、開発した各要素技術を統合し、人間協調技術として確立した。人間共存環境における移動を実証タスクとした実機実験において、意図推定に基づき算出した働きかけ行動をロボットが選択でき、特に接触行動を行う場合には、ダイナミクスモデルおよび心理注意量に基づき決定されたロボット・人間双方にとって安全・安心な接触方法を選択し、それを実行する枠組みを実現した。以上より、ロボットが人間へ能動的に働きかける人間協調に関する基盤技術確立に資する研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed core technologies of active coordination, such as (A) cooperative conveyance of robot's intention by approaching and light contact with human, (B) integrated dynamics modeling of human and robots in a contact state, and (C) safe and secure inducement of human movements by a strong contact force. We have then consolidated them as an active coordination technology for human symbiotic robots. Several experiments where a robot moves in the human coexisting environment have indicated that the proposed coordination system can adequately select inducement methods according to estimated human's intention. In particular, when the robot needs to touch and coordinate with human, the proposed system can provide a way of contact which is safe and secure for both human and robots. From the experimental results, we confirm that this study has established the fundamental technologies for cooperative human-coordination scheme that the robot actively induces the human.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：人間共存型ロボット 協調移動 意図伝達 安全

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化・労働人口減少といった社会的背景から、日常生活支援・医療・介護・福祉・公共サービス等の分野における社会基盤として、「人間作業の支援または代替が可能なロボット」の技術高度化と早期普及が期待されている。人間共存型ロボットは、人間とロボットが混在して活動空間を共有する環境において、安全性と作業性を両立して運用される必要がある。しかし、接近～接触の極近距離における人間とロボットのインタラクションに関する研究はこれまで限られてきた。その背景には、「絶対安全」を実現するために、ロボットの人間への接近・接触を禁忌とし徹底的な回避を行動原理とする考え方が、従来の産業機械分野に端を発して根強く浸透していたことが挙げられる。そこで、可能な限りリスク低減しつつ接近・接触を積極的に許容する新たな人間共存型ロボットの基盤技術が必要と考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究は、接近～接触の極近距離において人間と人間共存型ロボットが心理的・物理的なインタラクションを安全・安心・円滑に達成するための、ロボットが人間へ能動的に働きかける人間協調に関する基盤技術の構築を目的とする。申請者がこれまで開発してきた人間共存型ロボット TWENDY-ONE および人体運動再現ヒューマノイド WABIAN 等の特徴ある独自ハードウェア技術を活用するとともに、過去の研究で得られた人間協調技術を展開することで、独創的で確度の高い研究を行う。

3. 研究の方法

接近～接触の極近距離における基盤技術として、特に次の3課題を設定し取り組む。
(A) 接近～弱い接触による協調的な意図伝達：人間とロボットが互いに運動軌道を調整するため、双方向の働きかけに基づく意図伝達手法と軌道計画技術を開発する。
(B) 人間-ロボットの接触ダイナミクスモデル：3次元運動計測・力学解析に基づき、接触における人間-ロボットの力学的ダイナミクスをモデル化する。
(C) 強い接触による協調的な人間運動の誘発：ロボットが人間へ力を加える強い接触によって、人間の各関節・筋肉へ出力をサポートし、自然に人間の全身運動を誘発する協調技術を開発する。
(D) 統合実証実験：開発した各要素技術(特に、BおよびCをAに取り入れる形で)統合し人間協調技術として確立する。「人間共存環境における移動」を実証タスクとした統合実証実験を実施し、各技術の評価を行う。

4. 研究成果

(A) 接近～弱い接触による協調的な意図伝達：
(A-1) 接近時のシグナリングシステム：人間

とロボットが互いに移動軌道を協調的に調整しながら移動を実現する意図伝達手法を構築するために、人間同士の協調移動を参考に2個体の距離・意図伝達の強度・移動効率の関係性について分析を行った。まず、人間の非言語的な意図伝達手法を心理的・力学的な観点より分析し、接近過程における全身を用いたジェスチャー、ライトシグナル、インジケータ、地面へのプロジェクションによる意図伝達手法を開発した(図1)。人環境での比較実験の結果、相対距離や速度、お互いの視認性などに応じて有効なシグナリング方法が変わるという知見を得た。



図1 ノンバーバルな進路示唆

(A-2) 軽接触を用いた人の移動誘導：人間とロボットの双方向の意図伝達手法を構築するための1つの手段として、軽い接触による人の移動誘導システムに着目した。人間とロボットの距離、接触位置・方向・力の大きさをパラメータとし、人間のロボットに対する反応行動の観測・分析を行った(図2)。



図2 軽接触実験の風景

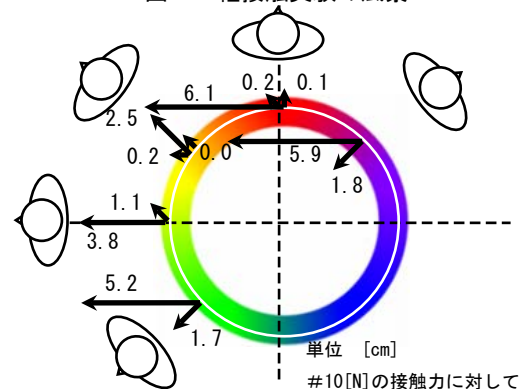


図3 移動性評価マップ

その結果、意図した方向へ人を制御しやすい接触パターンや、力を加えてもほとんど意図した方向へは制御できない接触が存在することが分かった。これは、状況や接触方向によってロボットの意図が人に十分に伝わ

っていないことが原因と考えられる。これらを考慮した接触戦略が求められる。

(A-3) マルチモーダルな働きかけを含む運動計画：人間とロボットのより高次の双方向意図伝達におけるロボットの働きかけ手法として、接触やジェスチャーなどに加え、言語などを用いた他の働きかけを含めて、一連の移動戦略を開発した。人間とロボットの相対位置関係、通路の幅、人間の向きなどを測域センサで計測して、これまでの知見（人間の反応モデルなど）を用いて、適応的にロボットへの働きかけ動作と経路を決定する（図4）。働きかけを用いない従来手法と比較実験を行った結果、提案手法は従来手法で生じていた立ち往生を解消し、移動効率や心理的評価を改善させられる可能性が示唆されることが分かった。



軽接触による移動誘導に基づく通路確保

人の間を通らない心理配慮

図4 マルチモーダルな働きかけを含む移動

(B) 人間-ロボットの接触ダイナミクスモデル：
(B-1) 人の歩行時ダイナミクスの解析：人間とロボットとが外力を受けた際のダイナミクスモデルを構築するために、ヒトの歩行時のダイナミクスを例として解析を行った。

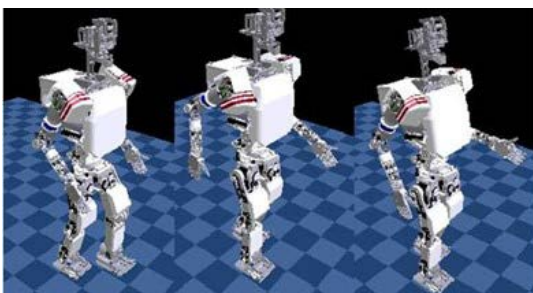


図5 シミュレーション環境下での全身協調運動の生成
その結果、人間の歩行は歩行前の軌道計画と歩行中の軌道修正によって成り立っており、

外力等を受けて転倒しそうになったときには、それを検知して歩行軌道を修正することで転倒を防いでことを、制御量の変化から定量的に示した。このモデルに基づいた2足歩行ロボットのシミュレーション実験・歩行実験により転倒を防げたことから人間とロボットとが接触した際の人間とロボットの安定性を維持する運動を表すダイナミクスモデル構築の手掛かりを得た（図5）。

(B-2) 力学的安定性を考慮した歩行軌道計画：ロボットが人間への働きかけを行う場面においては、力学的には働きかけるべき点（位置）と働きかける力ベクトルの決定が行われ、続いてその決定に基づきロボットが自律的に働きかけ動作を生成する2段階となる。そこで、例とした2足歩行ロボットを対象に、3次元空間内の任意の位置に任意の力ベクトルを作用させる動作を実現するためのアルゴリズムを構築した（図6）

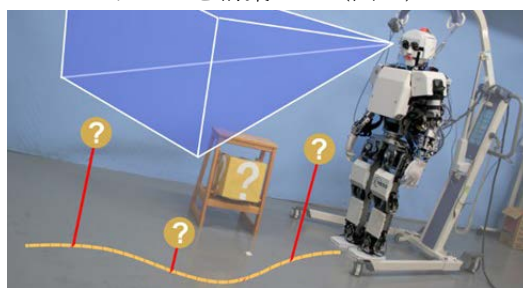


図6 最適な歩行軌道の選択

(B-3) 反力と画像情報に基づく行動決定の最適化：(B-1)および(B-2)の成果を踏まえ、両者を統合した制御系の構築を行った。ロボットが腕を伸ばして人間に働きかける際、反力に基づく軌道修正の効果が大きいと、設定した外力を人間に作用させるために軌道が修正され、十分な力を作用させられない。そこで、視覚情報を使った画像処理に基づき、2足歩行ロボットを使った実験を行った。その結果、両者の最適なバランスを見出すことができ、行動決定に反映させられた（図7）。

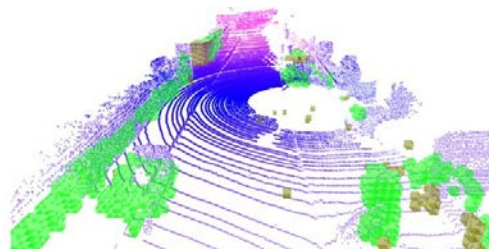


図7 画像処理による空間認識

(C) 強い接触による協調的な人間運動の誘発：
(C-1) 心理的注意量の定量化：ロボットによる強い接触をともなう運動の作用を受ける人間のダイナミクスを、運動の効率や生成に必要な心理的アテンション量の増減の観点から解析するための基礎実験を行った。具体的には、ロボットが人体に積極的に接触する必要のある触診動作を例として、触診ロボットマニピュレータのプロトタイプを製作した。接触時の人間の心理状態を定量表現する物理量の候補として、筋電や瞳孔径、脳波、

圧覚刺激電流量などを選定した。実験の結果、ロボットの接触部位や接触力がどのように人間の心理に影響を与えているかを数値的に定量化するための知見を得た(図8)。

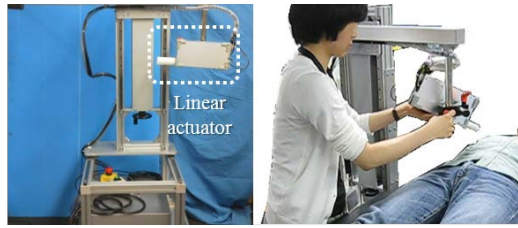


図8 触診ロボットマニピュレータ試作機

(C-2) 心理的注意量の個人モデルの構築：ロボットによる強い接触によってもたらされる人間の心理的注意量の変化に基づいた人間運動の誘発制御手法の構築については、ロボットによる接触を受けたときの人間の心理状態モデル構築のための実験と、ロボットの接触動作を個人特有の身体機能差に基づき決定する運動解析、とに分けて行った。触診ロボットマニピュレータを用いて、人間とロボットの配置によって人間が抱く不快感情を調査する実験の準備を行い、生活支援ロボットにおける人間の運動の支援をモデルケースに、ロボットにより支援する物理量を、個人によって異なる身体的特徴や能力に応じて決定する手法を開発した(図9)。

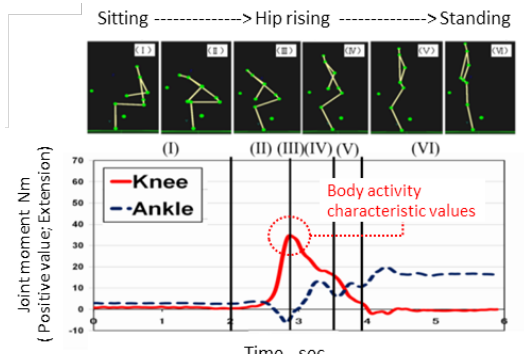


図9 立ち上がり時の個人の身体機能特性解析

(C-3) 心理的注意量の変化に基づいた運動の誘発制御手法：人間の身体、ここでは、肢体への接触をモデルケースとして、肢体の力学特性分布や組織形状を計測し、接触時の人体内部変形状態を解析するための有限要素モデルを構築した(図10)。

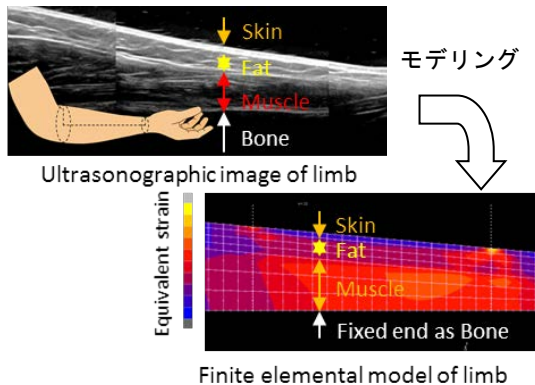
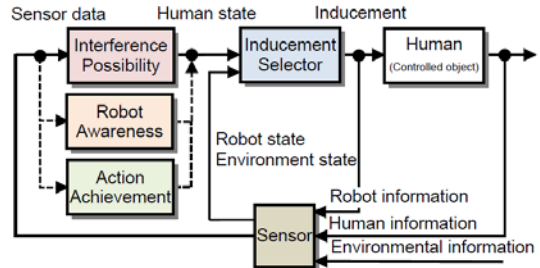


図10 肢体の接触解析に向けた有限要素モデル

構築した有限要素モデルにより解析された複数の変形指標と不快感情を定量表現す

る生理指標や主観評価値との関連性について知見を得た。さらに、ロボットと人体の弱い接触による意図伝達を行うために、人間の目の位置と視線方向を検出し、人間の動作意図を検知するセンサモジュールを構築した。(D) 統合実証実験：人共存環境でロボットがより自然かつ効率的に振舞うためには、働きかけが人に伝わる状態であるか、また、ロボットによる働きかけが伝わったのかを読み取り、それらに応じた行動選択を行う機能が必要である。働きかけの前後で意図伝達度を推定し、それに基づき、人の動的な移動行動にも対応可能な連続的な働きかけを実現できる人間協調システムを開発した(図11)。



Interference Possibility : Judging need of robot's action
 Robot Awareness : Estimating prior intention conveyance
 Action Achievement : Estimating posterior intention conveyance

図11 意図推定に基づく協調移動システム

(D-1) 接近～近接における人間協調技術：人とロボットのすれ違い幅から働きかけが必要かどうかを判定する干渉度(有/無)を、人およびロボットの移動ベクトルを用いて計算する(B-3 技術を実装)。また、ロボットの働きかけの意図が人へ伝達される度合いを推定する認知度(大/小/無)を、人とロボットを結ぶ直線と人の顔の向きのなす角度により推定する(B-2 技術を応用)。ロボットが通

達成度判定あり 達成度判定なし

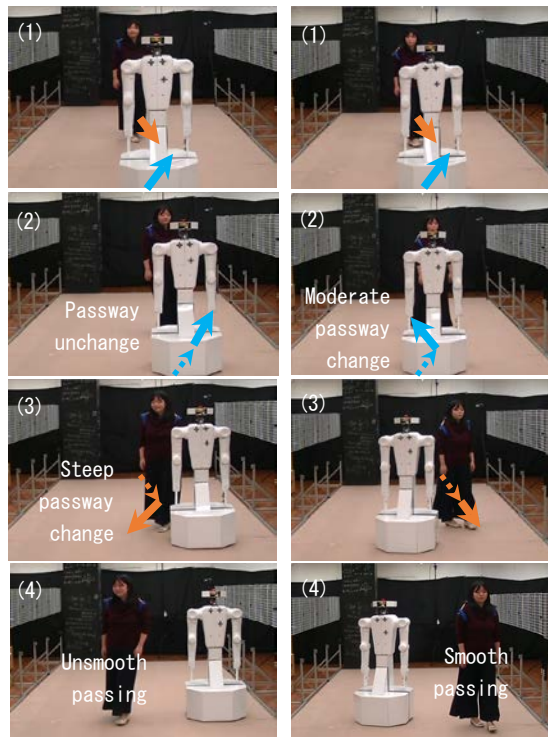


図12 意図推定に基づく連続的働きかけ

路を移動中に干渉度(有)が判定された場合、推定した認知度に応じて、進路示唆(大)、声掛け・接触(小)といった働きかけを行う。働きかけの意図がどの程度伝わったのかを判断する働きかけ達成度(小/大)を、期待する変化と実際の変化との差分から計算する。働きかけ後、規定時間内に人の行動変化が観察されない場合は、より意図伝達度の強い働きかけを実行する。接触(Cでの技術を応用)という最も強い働きかけにおいても達成度(小)の場合は、別経路を選択する。通路での人・ロボット移動実験を、働きかけ達成度評価の有無で比較実験を行った結果、有りのほうが人の動きがよりスムーズになり、心理的負担が軽減できることを確認した(図12)。

(D-2) 近接～接触における人間協調技術：通路幅によって適した接触パターンを判別し、能動接触・許容接触を切り替える軽接触移動制御システムを開発した。接触の部位・方向・力は、BおよびCで得られた知見を応用して設定した。実験を行った結果、相手の力を受け止める許容接触では、人からの接触の大きさに応じて動作を変えることで効率と安全の両立ができていて、接触量が少ない場合にはすり抜け、接触量が大きい場合には後退、接触量が中程度であれば速度を落としつつアームで人を支えながら前進することが確認できた(図13)。

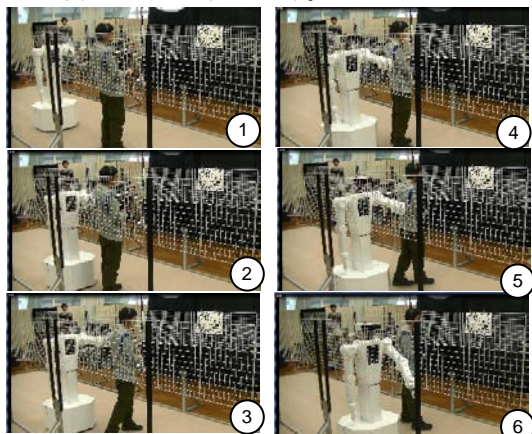


図13 能動接触と許容接触の選択

まとめ

本研究では、接近～接触距離における、人間と人間共存型ロボットの安全・安心な心理的・物理的インタラクションの実現のため、(A)接近～弱い接触による協調的な意図伝達、(B)人間-ロボットの接触ダイナミクスモデル、(C)強い接触による協調的な人間運動の誘発の3つの技術課題に取り組み、(D)開発した各要素技術を統合し人間協調技術として確立した。「人間共存環境における移動」を実証タスクとした実機を用いた統合実証実験から、意図推定に基づき算出した働きかけ行動が選択され、特に接触行動を行う場合には、ダイナミクスモデルおよび心理注意量に基づき決定されたロボット・人間双方にとって安全・安心な接触方法を選択し、実行する枠組みを実現できた。以上より、ロボットが

人間へ能動的に働きかける人間協調に関する基盤技術たる研究成果が得られたといえる。また、各技術(安全・安心接触技術、人の意図推定、ダイナミクスモデリング、心理値推定)は、その他の人間協調ロボット(介護など)へ応用できると考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計68件)

- [1] S. Murata, Y. Li, H. Arie, T. Ogata, S. Sugano, Learning to Achieve Different Levels of Adaptability for Human-Robot Collaboration Utilizing a Neuro-dynamical System, IEEE Trans. Cognitive and Developmental Systems, PP, 1-14, 2018, 10.1109/TCDS.2018.2797260 (査読有)
- [2] W. Wang, C. Wei, Y. Suga, C. Kuo, A. Schmitz, S. Sugano, Large Range Impedance Shaping for Physical Human Robot Interaction Through Light Quantity Measurement Based Torque Regulation, IEEE Robotics and Automation Letters, 3, 187-194, 2018, 10.1109/LRA.2017.2738332 (査読有)
- [3] Y. Wang, A. Schmitz, K. Kobayashi, J.A. Alvarez Lopez, Y. Matsuo, Y. Sakamoto, S. Sugano, Evaluation of Series Clutch Actuators With a High Torque-to-Weight Ratio for Open-Loop Torque Control and Collision Safety, IEEE Robotics and Automation Letters, 3, 297-304, 2018, 10.1109/LRA.2017.2737482 (査読有)
- [4] T.P. Tomo, A. Schmitz, W.K. Wong, H. Kristanto, S. Somlor, J. Hwang, L. Jamone, S. Sugano, Covering a Robot Fingertip With uSkin: A Soft Electronic Skin With Distributed 3-Axis Force Sensitive Elements for Robot Hands, IEEE Robotics and Automation Letters, 3, 124-131 2018, 10.1109/LRA.2017.2734965 (査読有)
- [5] T. Otani, K. Hashimoto, S. Miyamae, H. Ueta, A. Natsuhara, M. Sakaguchi, Y. Kawakami, H.O. Lim, A. Takanishi, Upper-Body Control and Mechanism of Humanoids to Compensate for Angular Momentum in the Yaw Direction Based on Human Running, Applied Science, 44, 1-16, 2018, 10.3390/app8010044 (査読有)
- [6] K. Takahashi, T. Ogata, J. Nakanishi, G. Cheng, S. Sugano, Dynamic Motion Learning for Multi-DOF Flexible-Joint Robots Using Active-Passive Motor Babbling through Deep Learning, Advanced Robotics, 31, 1002-1015, 2017, 10.1080/01691864.2017.1383939 (査読有)
- [7] Y. Kobayashi, M. Tsukune, T. Miyashita, M. G. Fujie, Simple empirical model for identifying rheological properties of soft biological tissues, PHYSICAL REVIEW E, 95, 1-18, 2017,

- 10.1103/PhysRevE.95.022418 (査読有)
- [8] K. Takahashi, K. Kim, T. Ogata, S. Sugano, Tool-body Assimilation Model Considering Grasping Motion through Deep Learning, *Robotics and Autonomous Systems*, 91, 115-127, 2017. 10.1016/j.robot.2017.01.002 (査読有)
- [9] M. Brandão, K. Hashimoto, J. Santos-Victor, A. Takanishi, Footstep Planning for Slippery and Slanted Terrain Using Human-Inspired Models, *IEEE Trans. Robotics*, 32, 868-879, 2016. 10.1109/TRO.2016.2581219 (査読有)
- [10] T. Kishi, S. Shimomura, H. Futaki, H. Yanagino, M. Yahara, S. Cosentino, Y. Nozawa, K. Hashimoto, A. Takanishi, Development of a Humorous Humanoid Robot Capable of Quick-and-Wide Arm Motion, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1, 1081-1088, 2016. 10.1109/LRA.2016.2530871 (査読有)
- [11] M. Brandão, R. Ferreira, K. Hashimoto, A. Takanishi, J. Santos-Victor, On Stereo Confidence Measures For Global Methods: Evaluation, New Model And Integration Into Occupancy Grids, *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 38 (1), 116-128, 2016. 10.1109/TPAMI.2015.2437381 (査読有)
- [12] L. Jamone, M. Brandao, L. Natale, K. Hashimoto, G. Sandini, A. Takanishi, Autonomous Online Generation Of A Motor Representation Of The Workspace For Intelligent Whole-Body Reaching, *Robotics and Autonomous Systems*, 62, 556-567, 2014, 201410.1016/j.robot.2013.12.011 (査読有)
- [13] G. Trovato, T. Kishi, N. Endo, M. Zecca, K. Hashimoto, A. Takanishi, Cross-Cultural Perspectives on Emotion Expressive Humanoid Head: Recognition of Facial Expressions and Symbols, *Int. J. Social Robotics*, Vol. 5, No. 4, 515-527, 2013. 10.1007/s12369-013-0213-z (査読有)

[学会発表] (計 210 件)

- [1] T. Otani, A. Takanishi, Angular momentum compensation in yaw direction using upper body based on human running. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2017.
- [2] 河野遼介, 菅野重樹, 連続的な働きかけによる協調移動手法の提案～ロボットから人への意図伝達度に着目した人状態推定技術～, *SICE-SI 部門講演会論文集*, 2017
- [3] 小林彩乃, 菅野重樹, 人の感情と印象に基づく協調移動時のロボットの行動評価と関連性分析, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 論文集*
- [4] M. Shrestha, S. Sugano, Communicating Directional Intent in Robot Navigation

- using Projection and Display Indicators, *Proc. IEEE Int. Symp. Robot and Human Interactive Communication*, 2016.
- [5] M. Shrestha, S. Sugano, Exploring the Use of Light and Display Indicators for Communicating Directional Intent, *Proc. IEEE/ ASME Int. Conf. Adv. Intelligent Mechatronics*, 2016.
- [6] M. Shrestha, S. Sugano, Intent Communication in Navigation through the use of Light and Screen Indicators, *Proc. ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interaction*, 2016.
- [7] M. Shrestha, A. Kobayashi, T. Onishi, E. Uno, H. Yanagawa, Y. Yokoyama, M. Kamezaki, A. Schmitz, S. Sugano, An Investigation into the Social Acceptance of Using Contact for Inducing an Obstructing Human, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2015
- [8] S. Qing, H. Ishii, A. Takanishi, Control of posture and trajectory for a rat-like robot interacting with multiple real rats, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2014.

[その他]

ホームページ等:

- [1] 菅野研 Web ページ:
<http://www.sugano.mech.waseda.ac.jp/jp/>
- [2] 高西研 Web ページ:
<http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/>

受賞等:

- [1] Technical contributions & innovation in human-symbiotic anthropomorphic robotics という業績で, 2016 年度 IROS Harashima Award を受賞(菅野).
- [2] 人間共存ロボットの設計と制御に関する研究で, 平成 29 年度文部科学大臣表彰 (科学技術賞・研究部門) 受賞(菅野)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 重樹 (SUGANO Shigeki)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00187634

(2) 研究分担者

高西 淳夫 (TAKANISHI Atsuo)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 50179462

石井 裕之 (ISHII Hiroyuki)
早稲田大学・理工学術院・准教授
研究者番号: 10398927

小林 洋 (KOBAYASHI Yo)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 50424817

藤江 正克 (FUJIE Masakatsu)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 20339716