

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 8 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21220004

研究課題名(和文) 全身受動性と注意誘導性を備えた等身大ヒューマノイドへの発展的身体行動構成法の研究

研究課題名(英文) Developmental Approach in Configuring Body and Behavior of Life-size Humanoids with Whole-body Passivity and Attention Inductivity

研究代表者

稲葉 雅幸 (Inaba, Masayuki)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：50184726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 195,500,000円、(間接経費) 58,650,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、不意の身体接触への安全性や注意喚起と誘導が随時可能なロボット身体を、関節駆動型と筋骨格腱駆動型のヒューマノイドをハイブリッドし構成する方法を発展的に明らかにした。全身受動性と注意誘導性の実現法に関して、ハードウェアの面から、剛性可変関節、全身被覆柔軟外装、衝撃吸収外装、障害時の体内反応システムを段階的に構築し実証し、ソフトウェアの面から、周囲の人や環境に注目した行動知識蓄積、人の割込みに対応する認識行動システムを統合し実証した。これらの知見から、人の側で人と相互作用しながら学習してゆく将来の生活支援ヒューマノイドのハードウェア、ソフトウェア両面における基盤を確立できた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we reveal design methodology of humanoid robot which can contact with human and have attention inductivity for human interaction. This design methodology based on hybrid type of conventional joint-driven humanoids and musculoskeletal tendon-driven ones. From hardware point of view, variable stiffness joint, whole-body flesh, energy-absorbing cover, and hardware level reaction during power failure or emergency stop were investigated and validated with real robots. From software point of view, accumulation of task knowledge by paying attention to environment and human, reaction of robot when interrupted by human were investigated and validated with an actual robot system. These results provide important basis of both hardware and software for daily assistive humanoids which can assist human and learn from human in daily environment.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：人間情報学・知能ロボティクス

キーワード：ヒューマノイド 全身受動性 注意誘導 発展的構成法 ロボットシステム 筋骨格剛性可変腱駆動 感覚行動統合 ロボット体内自律反応系

1. 研究開始当初の背景

今日では、人のように二脚二腕をもつヒューマノイドロボットを開発できるようになり、人の代わりに働く産業用ロボットから人の傍らで人の生活を支援するロボットへ、ロボットに求められる役割が拡大してきている。申請者は基盤研究S「等身大ヒューマノイドにおける知能ロボットカーネルの統合と対人行動創成への展開」において、申請者が20年にわたり発展させつつ構築し2-30種のロボットがこの上で動いている知能ロボット統合ソフトウェアを国のプロジェクトで開発された等身大ヒューマノイドロボットプラットフォーム(HRP)上でカーネルとして統合し、人の行動観察学習や人がロボットの手を引いて教示誘導するなどの対人行動生成が可能な基盤を構築している。

2. 研究の目的

人の生活空間において人を支援することを期待され、家庭における支援ロボット研究の対象となっている等身大ヒューマノイドであるが、日常空間における適切な認識判断機能や人と触れ合える柔軟な身体構造は、未だ家庭環境へ入って人間と共存していけるほど成熟していない。

本研究では、等身大ヒューマノイドが多様な作業を実行している際に、人の存在に気づき、人が寄りかかったり、不意の制止や注意喚起の働きかけに安全に反応でき、その働きかけを行なった人がロボットの行動を即座に誘導できるようにするために不可欠な全身の受動性と注意誘導性をどのように備えることができるかをテーマとし、身体ハードウェアと行動制御ソフトウェアの両面から段階的に検証可能で発展の差異を明示的に記述可能な形で構成する発展的構成法によってその有意性を明らかにすることを目的とする。

申請者は、これまで等身大のヒューマノイドの研究において、全身を筋駆動型とし、100を超える数の筋肉型アクチュエータで背骨や肩甲骨を持ち全身の柔軟性を備えたロボットを構築してきている。これは、一つの関節を一つのモーターで駆動する関節駆動型のロボットとは異なり、複数の筋で関節を駆動し、筋で張力を常時検知しつつ関節の剛性柔軟性を操作でき、筋を並行追加することで全身の駆動力を増強可能な発展的な身体構成法である。これまでの関節駆動型ヒューマノイドの身体自体も段階的に発展させる方向として、全身筋骨格型ヒューマノイド研究において得た研究成果に基づき、ヒューマノイドプラットフォームの関節部に筋駆動型剛性可変関節を順に組み込み、その効果を組み込んでいないものと対比行動実験を行うことで段階的に有為性を検証してゆく発展的構成法の研究を行なう。

ハードウェアにおける受動性身体を利用し、人と共存する家事支援行動を可能とするソ



図1: 本研究の目的・構成

フトウェアの面では、ロボットが作業を行っている最中に、その受動性を利用して人が不意に寄りかかったり、別の行動を指示したりするために不意の制止や誘導操作を行なったとしても、それを検知し、安全にそれに対応できるようにする割り込み機能を常時備えた自律系を知能ソフトウェアカーネルの自律制御部に備えさせ、全身の安定性を維持しつつ、人が何を意図しているかを確認できる状況認識知能との連動を行えるソフトウェアのシステムを発展的に構成してゆく。

3. 研究の方法

本研究では、知能ロボットカーネルを統合した等身大ヒューマノイドプラットフォーム環境を基盤とし、全身筋骨格ヒューマノイド研究と全身柔軟外装ヒューマノイド研究をもとに、新しい身体ハードウェアと注意知覚ソフトウェアを段階的に実装し全身受動性と注意誘導性の評価を行い、有効な身体行動構成法を明らかにしてゆく。

(1) 身体行動表現モデルシステムの構築

ヒューマノイドの身体と行動記述のために、感覚動作要素機能、入出力情報モデルとそれに基づく行動表現記述系、身体改造の有無に対応して差分を記述する表現モデルシステムを作り、改造部の違い、注意行動状況の違いに基づいて、全身受動性、注意誘導性の評価記述を定量的に比較できるようにする。

(2) ヒューマノイド身体の段階的受動性付加(外装、首・手首・足首・肩・腰関節の柔構造)の検討

関節駆動型ヒューマノイドを基に、四肢取付部、四肢末端関節部を交換可能な改造用ヒューマノイドを構築し、状態監視感覚を埋込んだ拮抗非線形バネ駆動機構を組み合わせることで関節剛性を制御可能な部分改造を段階的に、非改造部と改造部の外装は分布触覚柔軟材で覆う。

(3) 全身受動性制御のための体内反応システムの構築

状況に応じ異なる受動性を持ち、かつ、部分的な受動性全身を使った受動性を持つロボットとするために、全身を実時間で駆動する中心管理型制御システムとの実時間通信系を構築し、全身の制御を統一的に実時間で、通信動作制御系からなる体内反応シス

テムを構築する。

(4) 検証評価支援システム基盤の構築、改造有/改造無の2台のロボットの全感覚データのオンライン可視化と蓄積を行なって差異を評価解析する開発システム統合環境を、関節駆動と筋駆動に共通の統合開発環境を発展させて、データロガー・通信機能を上位身体構造モデルから制御システムに組み込むモジュールを生成することで実現する。

(5) 物体移動環境操作タスク行動の段階的実現と全身受動性評価（随時割込み可能性、再行動計画立案）

部分改造身体において獲得された受動性を利用した行動を扱うことのできる、タスク行動制御プログラムへの展開を行ない、安定な歩行、歩行時の視野安定度、道具利用時の認識性能・操作性能、全身での物体操作と安定操作性評価のために、改造前後で運動性能の違いの比較検証実験を行う。

(6) 全感覚注意知覚と反応行動系の発展的実現と注意誘導性評価

目的タスク行動中に、人の働きかけに対して、それを知覚し、どのように受け止め動作を行なうかを、人の働きかけ具合から人が誘導を行なおうとしているならばその誘導内容を解釈して行動の継続か変更か、または、誘導による修正や教示を受けなければならないかの判断自体を人が教示できる仕組みを構築しつつ、注意誘導性の獲得を段階的に実現し、その有意な効果を与える反応機構が何であるかを明確にする構成法によって発展的構成法の意義を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 大出力ヒューマノイドプラットフォームのための受動性関節評価

関節駆動方式と機械受動機構を容易に交換可能な足首関節を構築し比較検証を行い、歩行時安定制御性及び着地時対衝撃柔軟性を両立可能な足首としてモジュール化された超小型非線形バネユニットを組み込んだ（図2に示す）。剛性可変足首機構を備えた腱駆動関節が有効であることを示し、十分な歩行性能と着地衝撃吸収性能を兼ね備えた脚部を実現した。

これにより、未知環境での二脚歩行や跳躍や着地、バランスを失ったときの補償ステップなどに必要な高剛性時の歩行安定性、及び低剛性による馴染みや衝撃吸収特性を両立できる関節機構として非線形バネ機構を足首に備えた脚ロボットが有意であることを示した。

(2) 大出力面状筋ユニットを用いた腱駆動ヒューマノイドロボット

小型非線形バネ搭載腱駆動モジュールを全身に搭載し、全関節の機械的剛性が調整可能な上半身ロボットを構築し、衝撃応答性及びアクチュエータ負荷を計測することで、従来のソフトウェア関節剛性制御との比較を行

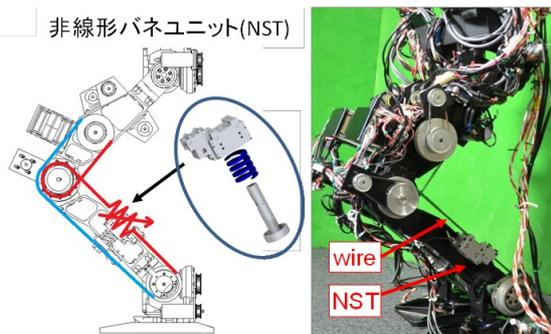


図2: 非線形バネユニットを組み込んだ大出力ヒューマノイド脚

い、機械的柔軟関節の有効性を検証した。

従来の腱駆動において問題となっていた運動性能を向上させるために、高強度なモジュール接続部を実現する特殊形状金属骨格を採用し、体幹、脚関節、膝関節、肩関節を、関節軸駆動式と筋駆動式に交換可能なモジュールリンク式全身筋骨格ヒューマノイドを構築した。図3にロボットの構成を示す。このヒューマノイドロボットは低速であるが大出力を出すことのできる面状筋ユニットを体幹部用い長時間の姿勢維持が可能となっている。

これらから、人間と接触した行動に必要な柔軟性と運動に必要な剛性、衝撃を逃すための受動性を一つのロボットシステムとして構築する手法として、腱駆動モジュールを用いたロボットが有効であることが示された。

大出力面状筋ユニット

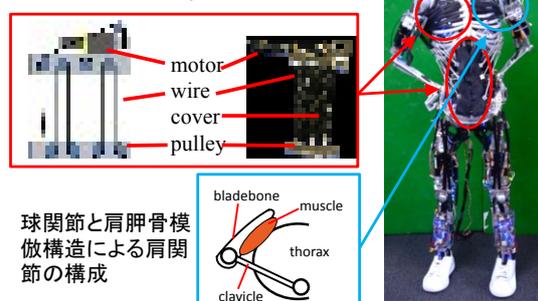


図3: 大出力面状筋ユニットを組み込んだ全身筋骨格腱駆動ヒューマノイドロボット

(3) アドオン可能な小型非線形バネユニットの開発

関節の剛性可変とするための機構として、非線形バネユニット（図4に示す）を開発し、特許として登録された。このユニットは既存の構造へ追加可能で、既存の関節を剛性可変な受動関節とすることができることを特徴とし、全筋モジュールを剛性可変にした筋骨格ヒューマノイドロボットや(1)の成果である大出力脚に組み込んで実証を行った。等身大ヒューマノイドプラットフォームの腰・体幹へも追加する形で機械的な重力補償バランスの構成が可能となる。

(4) 全身受動性身体と全身受動性制御のための体内反応システムの構築

全身の受動性を用いて、転倒時、上位の制

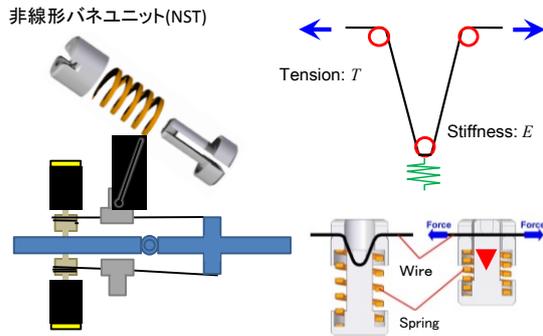


図 4: アドオン可能な非線形バネユニット

御喪失時などにおける、ロボット身体の故障、環境や周囲の人への危険を最小限に抑えるために、衝撃吸収可能なエアバック機構を有した特殊柔軟外装を構築し、等身大ヒューマノイドプラットフォームへ搭載して転倒時の衝撃による身体損傷を防止可能な全身受動性の検証を行った。制御系からのアプローチとして、下位の制御基板ネットワークに上位の制御に依存しない、体内センサの診断によって安全にロボットを停止させる機能を追加している。

周辺の環境を認識し人や障害物を避けるようにロボットを安全に停止させ、かつ、ロボット身体、環境や周囲の人への危険を最小限に抑える周辺注意を備えた全身受動ロボットの、ハードウェア、下位の制御ネットワークのレイヤにおける構築方法を示した。図 5 に周辺状況を観察し安全に運動停止できる方向を判定する実験について示す。

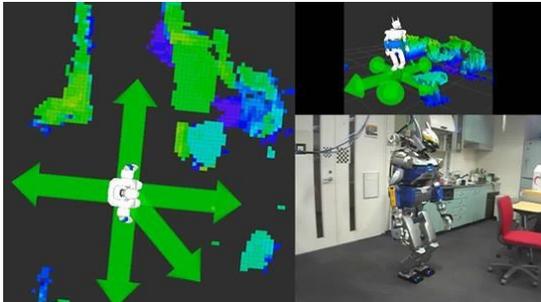


図 5: 周辺状況の観察による安全な運動停止が可能な方向の判定

(5) 大出力ヒューマノイドプラットフォームによる全身環境接触動作制御

全身を環境に接触しながら動作することのできるヒューマノイドプラットフォームとして、多様な関節自由度及び関節機構を備えた上半身の重量増加に対しても、十分な歩行運動性能を実現するために、負荷の高い股関節・膝関節に関して水冷ダブルモータユニットを搭載した下半身脚プラットフォームと、体幹/肩関節/頭/腕関節を十分な関節出力を有し適宜交換可能なモジュールユニットで構成した等身大ヒューマノイド上半身を設計開発し、脚部と統合し等身大全身プラットフォームを構築した。

開発した大出力等身大ヒューマノイドプラットフォームを用いて、不整地や段差乗り越

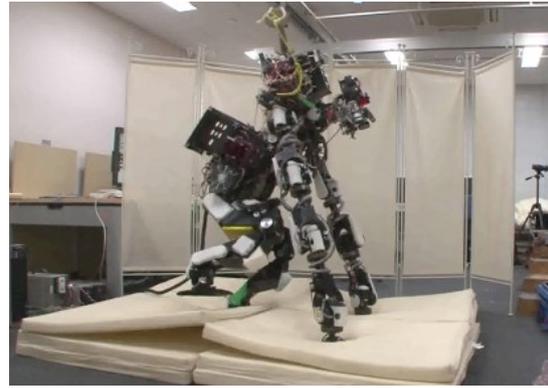


図 6: 柔軟な環境上の脚腕を用いた移動実験
えにおける脚腕の協調による四肢を用いた全身動作(図 6 に柔軟環境上の移動実験を示す)、脚腕以外の全身が環境に接触した状態からの回復動作の実証実験を行い、環境に接触し動作するロボットに必要な関節速度、出力を実証的に示すことができた。

(6) 周囲の環境や人に注目した行動知識の蓄積

周囲の環境へ着目し、色つき三次元点群による環境認識によって、操作対象物切替え、道具操作作用点の着目、移動時の環境衝突回避自律移動機能といった、適切な行動タスクを選択可能な注意誘導性を備えた行動カーネルを等身大ヒューマノイド上に統合し、関節機構を持つ環境の操作認識モデルを人による操縦時に獲得してゆく、変化に富んだ実生活環境に対応する随時環境獲得/蓄積を行うロボットシステムについて示した。

複数の観察対象の互いの遮蔽関係や随伴関係を空間的近傍および近傍時刻の観察結果に基づいて推定可能な視覚モジュールを用いて、調理道具による基本操作、箱や袋への収納操作など、視野から見えなくなる操作などを含む家事タスクの観察学習を行い、その目的と観察対象の道具としての使い方を推定・記憶し、道具利用行動の成否判定と失敗復帰を含むタスク行動としてロボットが獲得できることを実験とともに示した(図 7)。

これらの手法は、ロボットに周囲の環境や人の行動に注目し、環境や道具の使い方を覚えタスク行動として蓄積していくことのできる、周囲観察型のロボット知能の構築方法となっている。

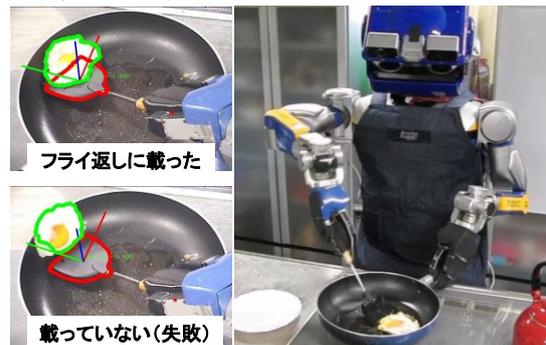


図 7: 道具の利用の成否判定を含んだ調理タスク実験

(7) 人の意図提示/注意誘導を受けて作業手順や動作を修正可能にするロボットの行動基盤ソフトウェア

ロボットの注意機能として、スマートデバイス、音声認識デバイス、身体接触等を用いてロボットの動作中に割り込み、ロボットタスク行動の制止、作業の順序や動作の修正、未知の物体や行動のセマンティクスの教示を行うことのできるロボットの行動基盤システムを、Robot Operating System(ROS)を用いて、複数の意図提示、注意事象の監視プロセスがロボットの行動実行状態遷移マシンへ復帰可能な状態を保持しつつ割り込みを行い、動作修正及び教示シーケンスの実行後に復帰できる継続的なシステムとして構築した。図8にシステムの概念を示す。

これは、人の生活環境中で行動する生活支援ロボットに必要な、人の意図・注意によってロボットが動作を修正し、人間の意図が蓄積されていく、人の意図を反映した家事支援行動構築のための基盤ソフトウェアとなっている。

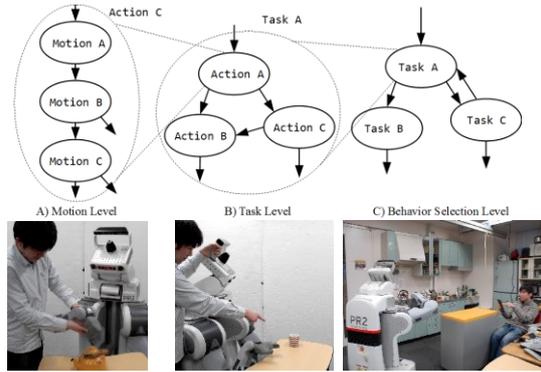


図7: ロボット動作中に割り込み動作を変えるロボットシステムの構成

(8) ヒューマノイドロボットの統合制御システムと透過的な制御検証シミュレータ環境の構築

等身大ヒューマノイド固有のデバイス制御層を、共通したオープンな運動制御基盤ソフトウェア(hrpsys-base, ROS)上に拡張することで、異なるロボットプラットフォームにおける検証動作比較解析が容易な環境を構築した。異なるプラットフォームを同じソフトウェアインターフェースから動作させることが可能になり、過去に構築したソフトウェアへ機能を追加していくことでソフトウェアを発展させていく基盤となる。本研究において作成した大出力ロボットはこの環境を用いて制御されており、継続して使用している等身大ヒューマノイドロボットプラットフォーム(HRP)のソフトウェア資産を引き継ぎ、短期間で全身行動を行う制御ソフトウェアが構築できた。図8にその構成を示す。

また、オープンな環境において構築した運動制御基盤ソフトウェアを、実環境のみでなく様々な仮想的な外部環境において検証するために、外部環境構築が多く公開されてい

るオープンなロボットシミュレータと実機と透過的に接続出来る環境を構築した。

これらにより、本研究のみならず今後開発されるロボットプラットフォームにおいても容易に過去のソフトウェア資産を継承し、発展させていくことができる。

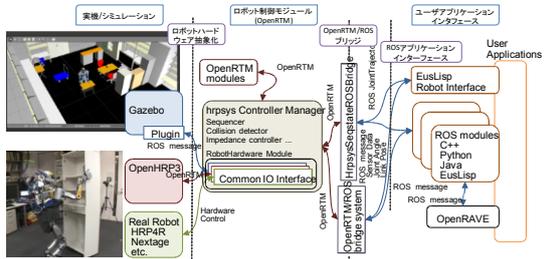


図8: シミュレータと実機を切り替え可能なヒューマノイドロボットの統合ソフトウェアシステム

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

(1) 稲葉 雅幸, 知能ロボットフロンティアとしての筋骨格ヒューマノイド, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 6, pp. 666-671, 2010.

(2) 浦田 順一, 中西 雄飛, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 高速・高トルク動作のための大出力2脚ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 865-871, 2010. (査読有り)

(3) 稲葉 雅幸, 知能ロボットのソフトウェア, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 9, pp. 824-829, 2012.

(4) Kotaro Nagahama, Tomohiro Nishino, Kimitoshi Yamazaki, Kei Okada, Masayuki Inaba, Attention Region Detection and Tracking for Observing a Person Manipulating Day-to-day Objects, International Journal of Mechatronics and Automation, Vol. 3, No. 1, pp. 58-67, 2013. (査読有り)

(5) Yuto Nakanishi, Shigeki Ohta, Takuma Shirai, Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Yuriko Kakehashi, Hironori Mizoguchi, Tomoko Kurotobi, Yotaro Motegi, Kazuhiro Sasabuchi, Junichi Urata, Kei Okada, Ikuo Mizuuchi, Masayuki Inaba, Design Approach of Biologically-Inspired Musculoskeletal Humanoids, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 10, pp. 1-18, 2013. (査読有り)

(6) 小林一也, 吉海智晃, 後藤健文, 稲葉 雅幸, 柔軟性多層分布外装と関節脱臼復帰機構を備えたロボットの転倒・転落時衝撃吸収自己保護行動の実現, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 416-423, 2013. (査読有り)

(7) 東 馳, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 対話画面インタフェースでのマルチタッチ

ジェスチャ指示と操作候補提示に基づくロボット遠隔操作システム, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 409-415, 2013. (査読有り)

(8)熊谷伊織, 小林一也, 野沢峻一, 垣内洋平, 吉海智晃, 岡田慧, 稲葉雅幸, 柔軟変形多軸触覚を分散配置した等身大ヒューマノイド用外装による物体受渡作用の検知反応行動の実現, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 10, pp. 985-991, 2013. (査読有り)

[学会発表] (計 127 件)

(1)M. Osada, N. Ito, Y. Nakanishi, M. Inaba, Realization of Flexible Motion by Musculoskeletal Humanoid "Kojiro" with Add-on Nonlinear Spring Units, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 174-179, USA, 2010 年 12 月 6 日-8 日. (査読有り)

(2)M. Osada, T. Izawa, J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada, M. Inaba, Approach of "planar muscle" suitable for musculoskeletal humanoids, especially for their body trunk with spine having multiple vertebral, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 358-363, スロベニア, 2011 年 10 月 26-28 日. (査読有り)

(3)J. Urata, K. Nshiwaki, Y. Nakanishi, K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, Online walking pattern generation for push recovery and minimum delay to commanded change of direction and speed, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3411-3416, ポルトガル, 2012 年 10 月 7-12 日. (査読有り)

(4)Yuto Nakanishi, Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yotaro Motegi, Masahiko Osada, Takuma Shirai, Junichi Urata, Kei Okada, Masayuki Inaba, Design Concept of Detail Musculoskeletal Humanoid "Kenshiro" - Toward a Real Human Body Musculoskeletal Simulator -, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 475-480, 日本, 2012 年 11 月 29 日-12 月 1 日. (査読有り)

(5)Ito Yoshito, Junichi Urata, Yuto Nakanishi, Kei Okada, Masayuki Inaba, Design and Development of a Tendon-Driven and Axial-Driven Hybrid Humanoid Leg with High-Power Motor Driving System, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 475-480, 日本, 2012 年 11 月 29 日-12 月 1 日. (査読有り)

(6)Shunichi Nozawa, Masaki Murooka, Shintaro Noda, Kei Okada, Masayuki Inaba, Description and Execution of Humanoid's Object Manipulation based on Object-environment-robot Contact States, pp. 2608-2615, 東京, 2013 年 11 月 3-8 日. (査読有り)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 調整ユニット

発明者: 稲葉雅幸, 長田将彦, 本郷一生, 中西雄飛

権利者: 国立大学法人 東京大学

種類: 特許

番号: 特許・特願 2010-134031

出願年月日: 2010 年 6 月 11 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 調整ユニット

発明者: 稲葉雅幸, 長田将彦, 本郷一生, 中西雄飛

権利者: 国立大学法人 東京大学

種類: 特許

番号: 特許第 5 1 9 0 9 0 0 号

取得年月日: 2013 年 2 月 8 日

国内外の別: 国内

[その他]

幾何モデリング機能を持つ基盤ソフトウェアの公開リポジトリ

<https://github.com/euslisp>

オープンソースロボット制御認識モジュールの公開リポジトリ

<https://github.com/jsk-ros-pkg>

6. 研究組織

(1)研究代表者

稲葉 雅幸 (INABA MASAYUKI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
研究者番号: 5 0 1 8 4 7 2 6

(2)研究分担者

岡田 慧 (KEI OKADA)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 7 0 3 5 9 6 5 2

吉海 智晃 (YOSHIKAI TOMOAKI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任講師

研究者番号: 6 0 4 3 6 5 5 8

中西 雄飛 (NAKANISHI YUTO)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・技術補佐員

研究者番号: 5 0 5 5 9 4 5 8

浦田 順一 (URATA JUNICHI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・技術補佐員

研究者番号: 1 0 6 2 5 4 7 9

垣内 洋平 (KAKIUCHI YOHEI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号: 7 0 5 0 1 3 2 8

野沢 峻一 (NOZAWA SHUNICHI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号: 8 0 7 0 7 6 2 0

(3)連携研究者

なし