

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680021

研究課題名(和文) ロボットにおける弾性・慣性・位置エネルギーの巧みな利用による動的運動制御法の研究

研究課題名(英文) Dynamic Robot Motion Control Method Dexterously Utilizing Elastic, Inertial, and Gravitational Energies

研究代表者

水内 郁夫 (Mizuuchi, Ikuo)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60359651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果の概要は、(1)系の力学的エネルギーの総量をできるだけ増加させ続けるようなアクチュエータ指令決定法(フィードバック励振制御)、(2)多リンク系の力学的エネルギーの流れ(エネルギーフロー)の解析、(3)時間反転積分法とそれに基づく制御指令列生成法、(4)弾性を有する人工筋の筋経路決定法、(5)コンプレッサ搭載型空気圧駆動全身型ロボットの開発、などである。

当初実現性に確信を持てなかった課題に対し、コアとなる理論を生み出すことに成功し、さらにその理論の有効性をシミュレーションと実世界実験により確認することができた。

研究成果の概要(英文)：The results of the research includes (1) feedback excitation control method by which total mechanical energy of a system is increased as much as possible, (2) analysis of the flow of mechanical energies of articulated links, (3) proposal of "time-reversal integral" method and generating a control input sequence based on the method, which realizes an instantaneous very high speed of the end-tip, (4) muscle arrangement determination method for maximizing the integral of force to the center of mass, (5) proposal of concept of "compressor-embedded pneumatic robot", and design and development of several prototype pneumatic-muscle-driven whole-body robots based on the concept, and so on. Before starting this project, we were not sure if we would be able to achieve the goal. We are very happy to be able to propose a core theory and confirm the theory with simulations and experiments.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボット 動的動作 弾性活用 エネルギーフロー

1. 研究開始当初の背景

(1) トップアスリートは様々な動作の際に、身体の物理学的特性を最大限に活用している。腱や筋に弾性エネルギーを蓄積し、解放されるのに同期して筋力を発揮することで瞬間的に高い性能(速度や力)を発揮する。体操競技では、助走によって得た並進の運動エネルギーを、回転の運動エネルギーや重力の位置エネルギーに巧みに変換する。系の力学的エネルギーの総量はアクチュエータの仕事によって増減するが、その総力学的エネルギー量は、
 ○各リンクの並進・回転の運動エネルギー
 ○各リンクの重力のポテンシャルエネルギー
 ○物理的弾性要素のポテンシャルエネルギー
 の総和であり、各量への分配はエネルギー保存則を守りつつ時々刻々変化している。特定の姿勢で特定部位の速度や高度を最高にするようなロボットの制御方法を確立することが本研究の目的である。

(2) 物理的弾性要素をロボットの瞬発的な運動に活用しようという研究は 1995 年頃に G.Pratt らが Series Elastic Actuators を提唱して以来、いくつかの研究機関において研究されてきていたが、力学的エネルギーの内訳がどのように変化するか・変化させられるかという視点に立った研究は無く、評価関数を設定して最適制御等の枠組みを使うなどの、原理解明よりは高性能を得るといった観点からの研究がいくつか見られるだけであった。

(3) 本研究が完成すれば、性能の低いアクチュエータで瞬間的に高い性能を実現することができるようになる。投擲・跳躍・打撃等の瞬発的な動作だけでなく、通常の物体操作や移動等、ロボットが動作を行う状況の多くに本研究の成果は適用可能である。エネルギー効率の面からも、より少ない消費エネルギーでタスクを実行することができると考えられ

る。また、工学的な意義だけでなく、人間や動物の運動制御の巧みに迫りたいという思いが強かった。体操競技のような全身のバネをしなやかに使い、身をすぼめて高速回転をするような、ダイナミックな運動をロボットで実現する方法が明らかになれば、スポーツ科学等への貢献も期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人間や動物のしなやかな動的動作のように、多自由度系の力学的エネルギー(並進・回転の運動エネルギー、筋腱の弾性エネルギー、重力の位置エネルギー)が相互に変換し合う中で、特定部位の速度や発揮力を瞬間的に最大化するような、弾性パラメータ調節法とアクチュエータ制御法を示すことであった。低性能のアクチュエータで瞬発的高性能を得ることも狙っていた。

3. 研究の方法

大きく分けて3つのアプローチ(数学的解析手法、人間の運動データ解析・バイラテラル操縦装置によるコツ発見の観察、機械学習等の探索・最適化手法)を並行・連携して進めることで解決に迫りたいという計画であった。図1に研究計画時の研究方法の構想と実施体制の図を示す。

(1) 数学的解析手法に関しては、弾性要素を有する多リンク系の動的挙動を解析し、適切な制御法を考案する。

(2) 人間の運動データ解析・バイラテラル操縦装置によるコツ発見の観察に関しては、フィードバックがある操縦装置を用い人間の上達過程から学び取れないかを探る。

(3) 機械学習等の探索・最適化手法に関しては、最適化の結果から一般性のある法則や知見を抽出し、それを基に制御理論を組み上げることを目指す。

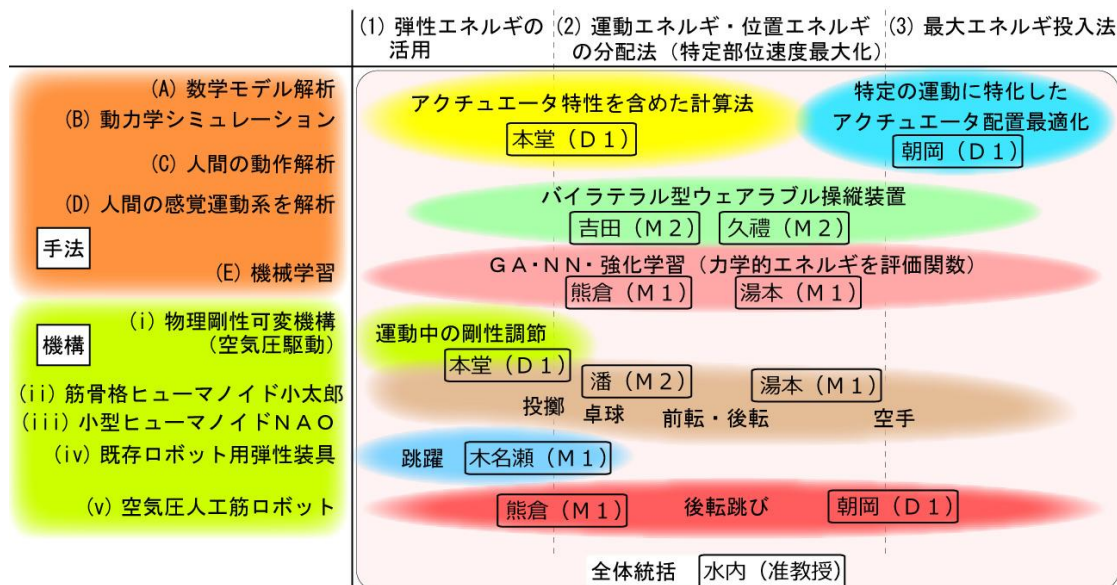


図1: 本研究計画時の研究構想と実施体制

4. 研究成果

本研究の成果の概要は、(1)系の力学的エネルギーの総量をできるだけ増加させ続けるようなアクチュエータ指令決定法(フィードバック励振制御)、(2)多リンク系の力学的エネルギーの流れ(エネルギーフロー)の解析、(3)時間反転積分法とそれに基づく制御指令列生成法、(4)弾性を有する人工筋の筋経路決定法、(5)コンプレッサ搭載型空気圧駆動全身型ロボットの開発、などである。

(1) 系の力学的エネルギーの総量をできるだけ増加させ続けるようなアクチュエータ指令決定法(フィードバック励振制御) :

何らかの振動をしている系に対し外部からアクチュエータで力を加えた時に、系の力学的エネルギーが増加または減少する。増加か減少かは、その瞬間の力の方向と、力の作用点の運動の方向のなす角が90度以内か90度以上かによって決まる。

限られた可動範囲(すなわち限られた加速時間)内に増加させられる力学的エネルギー総量はアクチュエータの性能によって決まるが、本手法では「励振限界超曲面」を提唱し、可動範囲内で投入エネルギー総量を最大化する制御法を理論・実験により示した。

(2) 多リンク系の力学的エネルギーの流れ(エネルギーフロー)の解析 :

直列に回転関節が連なる形のロボットアームは、アクチュエータによるエネルギー入出力が無い場合にも、非常に複雑な挙動を示す。各リンクの並進・回転の運動エネルギー、各リンクの重力による位置エネルギー、弾性要素のポテンシャルエネルギー、の総和(総力学的エネルギー)がエネルギー保存の法則に従って保存されつつ、個別の各エネルギー項はエネルギーをやり取りして(エネルギーフロー)増減しているためである。

本研究では、このエネルギーフローの流れを巧みに制御し、手先速度が非常に高速になる瞬間を創り出す手法を提唱した。例えば、2リンク平面マニピュレータでは、動きの前半では第1関節を加速し第2関節は回転しない状態を維持し、動きの後半には第2関節をフル加速する。

(3) 時間反転積分法とそれに基づく制御指令列生成法 :

多関節ロボットアームシステムにおいて、投擲方向などの制御(終端状態制御)と力学的エネルギー増大制御を両立する手法として「時間反転積分法」を提案した。本手法は終端状態(投擲運動の場合ボールリリースの状態)から、運動方程式を、時間軸を遡る方向に解くことで、実現可能な初期状態(関節角速度がほぼ0の状態)から目標とする終端状態に到達するための制御入力時系列を計算する手法である。時間反転積分において、動力学モデルに力学的エネルギー増大制御を適

用することで、力学的エネルギーを増やしながらか終端状態制御を実現することが可能となった。

モータおよび減速機で直接駆動されるシステムにおいて、システムの総力学的エネルギー(リンクの運動エネルギーおよび重力ポテンシャルエネルギー)を考慮した力学的エネルギー増大制御を適用することで終端状態制御が実現され得ることを数値シミュレーションおよび実験で確認した。

(4) 弾性を有する人工筋の筋経路決定法 :

空気圧人工筋は物理的弾性を有するため、弾性エネルギーを動的動作に活用できる可能性がある。本研究では空気圧人工筋駆動ヒューマノイドの下半身の筋配置を、可能な配置パターンの中から探索し、しゃがんだ状態から膝が伸びた状態までの間の重心加速度が最大になるような筋配置を決定する方法を提唱した。この手法を用いて(5)に述べるコンプレッサ搭載型空気圧人工筋駆動ヒューマノイドの下半身の筋配置を決定した。

(5) コンプレッサ搭載型空気圧駆動全身型ロボットの開発 :

物理的弾性要素を持つロボットは、運動エネルギー・重力の位置エネルギーを、弾性のポテンシャルエネルギーの状態で一時的に保持し、再び慣性や重力のエネルギーの戻すことができるため、力学的エネルギーの総量を増やすことができる可能性を有する。我々は、(1)~(4)の成果を活用できるプラットフォームとして、空気圧人工筋肉により駆動するロボットを開発した(図1、図2)。

従来の空気圧駆動ロボットは、高圧空気源を外部に持つことが一般的だったが、ダイナミックな運動を行うことを想定し、空気圧コンプレッサとリザーバタンクやバルブ等の空気圧システムを全て搭載した全身型ロボットを開発した。今後、このようなロボットを用いて、慣性・弾性・重力のエネルギー分配制御を活用した全身運動の生成法を研究してゆく。

以上(1)~(5)をまとめると、当初実現性に確信を持てなかった課題に対し、コアとなる理論を生み出すことに成功し、さらにその理論の有効性をシミュレーションと実世界実験により確認することができた。

確認した運動は、全身の力学的エネルギーの流れを制御するには至っておらず、今後の更なる発展が必要であるが、本研究で生み出したコアアイデアを発展させることで実現可能であると考えている。

本研究の成果は、東京農工大学水内研究室に所属し、研究代表者ととともに研究を推進した学生・大学院生・研究生・訪問大学院生等の力無くしては得られなかったものである。関係者各位に感謝する。



図 1 : コンプレッサ搭載型空気圧人工筋駆動ヒューマノイド buEnwa

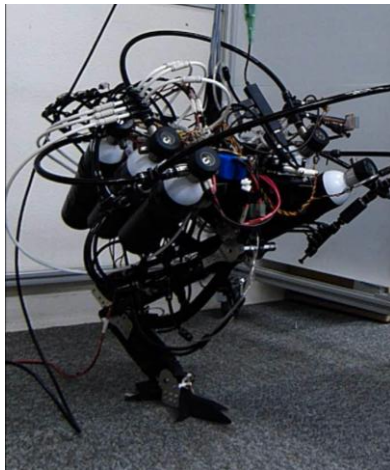


図 2 : 開発したコンプレッサを搭載した跳躍ロボット BIRDLEG

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 10 件)

- [1] Takatoshi Hondo, Ikuo Mizuuchi. End-tip Speed Maximization for Noncyclic Swing Motion Based on Time Reversal Integral in Multiple-joint Robots, in Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 756-761, 2015. (査読有)
http://ras.papercept.net/conferences/conferences/ICRA15/program/ICRA15_ContentListWeb_2.html#wea2t3_01
- [2] Shouhei Kumakura, Ikuo Mizuuchi. Developing a Super-Small High-Pressure Compressor and a Regenerative Air

Pressure System for High Efficiency of Self-Contained Pneumatic Robots, in Proceedings of The 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp. 305-310, 2014. (査読有)

<http://www.jfps.jp/net/9thjfps/Program.html>

- [3] Takatoshi Hondo, Ikuo Mizuuchi. Design and Modal Analysis of Feedback Excitation Control System for Vertical Series Elastic Manipulator, in Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2888-2893, 2013. (査読有) (DOI: 10.1109/IROS.2013.6696765)
- [4] Tadashi Asaoka, Ikuo Mizuuchi. Robot Motion Evaluation of a Musculoskeletal Robot by Simulation in Terms of Energy Flow in the Kinetic Chain, in Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 721-726, 2013. (査読有) (DOI: 10.1109/ICMA.2013.6618005)
- [5] Takatoshi Hondo, Ikuo Mizuuchi. Kinetic Energy Maximization on Elastic Joint Robots Based on Feedback Excitation Control and Excitation Limit Hypersurface, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 25, No. 2, pp. 347-354, 2013. (査読有)
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002500020009.xml>
- [6] Ikuo Mizuuchi, Masaki Kawamura, Tadashi Asaoka, Shouhei Kumakura. Design and Development of a Compressor-Embedded Pneumatic-Driven Musculoskeletal Humanoid, in Proceedings of 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 811-816, 2012. (査読有) (DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651613)
- [7] Takatoshi Hondo, Yuta Kinase, Ikuo Mizuuchi. Jumping Motion Experiments on a NAO Robot with Elastic Devices, in Proceedings of 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 823-828, 2012. (査読有) (DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651615)
- [8] Tadashi Asaoka, Masaki Kawamura, Shouhei Kumakura, Ikuo Mizuuchi. Determining the Optimal Multiarticular Muscle Arrangement of a Musculoskeletal Robot for a Specific Motion using Dynamics Simulation, in Proceedings of 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 216-221, 2012. (査読有) (DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651523)
- [9] Yuya Yumoto, Ikuo Mizuuchi. Exploring the Possibility of Mechanical Energy as

a Multipurpose Evaluation Function for Learning of Whole Body Dynamic Motions, in Proceedings of 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 632-637, 2012. (査読有) (DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651586)

- [10] Tadashi Asaoka, Masaki Kawamura, Shouhei Kumakura, Ikuo Mizuuchi. Determining an Optimal Multiarticular Muscle Arrangement of a Musculoskeletal Robot for a Specific Motion using Human Motion Data, in Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 2120-2127, 2012. (査読有) (DOI:10.1109/ICMA.2012.6285671)

[学会発表] (計34件)

- [1] Ikuo Mizuuchi. Human-Inspired Robot Design of Hardware and Software, Seminar at Italian Institute of Technology, Genoa, Italy, July, 15, 2014. (招待講演)
- [2] Ikuo Mizuuchi. Musculoskeletal Humanoids: Human-Inspired Design of Hardware and Software, Invited Talk at Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brazil, November 25, 2013. (招待講演)
- [3] Ikuo Mizuuchi. Musculoskeletal Humanoids: Human-Inspired Design of Hardware and Software, Plenary Talk at 10th Latin American Robotics Symposium (X LARS) (IEEE-RAS), Arequipa, Peru, October 24, 2013. (招待講演)
- [4] Ikuo Mizuuchi. Biologically-inspired musculoskeletal humanoids, International Summer School on Humanoid Soccer Robots 2013, Bonn, Germany, July 23, 2013. (招待講演)
- [5] 水内郁夫. 人体とロボットの形と機能, 第74回形の科学シンポジウム, 東京, November 17, 2012. (招待講演) (形の科学会誌, 第27巻, 第2号, pp. 84-85, 2012)
- [6] 朝岡忠, 水内郁夫. 先端リンクの瞬間的な高エネルギー状態創出のための自由振動理論に基づく運動パターン生成, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集, 2P1-F08, May 19, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)
- [7] 恒岡 佑哉, 水内 郁夫. 空気圧駆動筋骨格ロボットにおいて一回の二値弁操作で特定方向力を発揮し続ける非円形プーリ設計法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2A1-Q03, May 19, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)
- [8] 朝岡忠, 水内郁夫. ロボットリンク間干渉力の巧みな活用による対象部位の瞬間的な高エネルギー状態創出の力学的原理の解明 - 平面3リンクロボットでの解明 -, ロ

ボティクスシンポジウム予稿集, pp. 571-578, March 16, 2015. (軽井沢プリンスホテル, 長野県軽井沢町) (査読有)

- [9] 本堂貴敏, 水内郁夫. 直列弾性関節ロボットにおける重力を考慮した時間反転積分法を用いた3次元投擲運動計画, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2014AC1Q3-08, September 4, 2014. (九州産業大学, 福岡県福岡市)
- [10] 朝岡忠, 水内郁夫. ロボットリンク間干渉力の活用による対象部位の瞬間的な高エネルギー状態遷移の実機実験, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2014AC1B3-07, September 4, 2014. (九州産業大学, 福岡県福岡市)
- [11] 鈴木駿介, 水内郁夫. 直接教示によるロボット動作修正を通じた修正言語獲得法, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2014AC2H2-02, September 5, 2014. (九州産業大学, 福岡県福岡市)
- [12] 本堂貴敏, 水内郁夫. 弾性・リンク運動エネルギー増加条件の導入による時間反転積分法の直列弾性関節ロボットへの拡張法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 3P2-I04, May 28, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)
- [13] 朝岡忠, 水内郁夫. 運動指令とロボットリンク間におけるエネルギー伝達との関係の状態行動価値関数に基づく解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1P2-Q05, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)
- [14] ハンビンイク, 水内郁夫. 回転ボールの軌道予測に基づき動作する家庭向け卓上移動型卓球ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A1-003, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)
- [15] 熊倉翔平, 水内郁夫. 高圧コンプレッサと空気圧回生システムを搭載した自立型空気圧駆動ロボット BIRDLEG の開発と跳躍動作実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A2-P03, May 27, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)
- [16] 恒岡佑哉, 水内郁夫. 空気圧駆動筋骨格ヒューマノイドによる弾性を活用した跳躍動作のための足裏反力制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A1-C06, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)
- [17] 朝岡忠, 水内郁夫. 運動連鎖の活用による効率の良いエネルギー伝達を目的としたロボット運動パターン生成, ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 497-503, March 14, 2014. (有馬グランドホテル, 兵庫県神戸市) (査読有)
- [18] 本堂貴敏, 水内郁夫. 時間反転積分法と終端状態最適化に基づく多関節投擲運動における制御入力計画法, 日本ロボット学

- 会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC2I1-03, September 5, 2013. (首都大学東京, 東京都八王子市)
- [19] 鈴木駿介, 湯本裕矢, 水内郁夫. ヒューマノイド操縦の主観的評価を用いて生成した評価関数の運動学習における有効性の検証, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC3I3-04, September 6, 2013. (首都大学東京, 東京都八王子市)
- [20] 恒岡佑哉, 水内郁夫. 多関節筋を有する空気圧駆動筋骨格ヒューマノイドの二値弁を用いた関節角度制御システム, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC2G2-03, September 5, 2013. (首都大学東京, 東京都八王子市)
- [21] 熊倉翔平, 水内郁夫. 高効率自立型空気圧駆動ロボットのための超小型高圧コンプレッサ及び空気圧回生システムの実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-D13, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [22] 鈴木駿介, 湯本裕矢, 水内郁夫. 人間のヒューマノイド操縦上達過程における感覚運動制御の変化に基づく評価器自動生成法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-H02, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [23] 本堂貴敏, 水内郁夫. 重力・弾性ポテンシャルエネルギーを考慮したフィードバック励振制御系の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-007, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [24] ハンビンイク, 水内郁夫. 卓球ロボットのための回転ボールの三次元回転状態推定法及び軌道予測法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-Q11, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [25] 本堂貴敏, 水内郁夫. 1 質点棒高跳びモデルの助走速度・棒接地角・跳躍方向解析に基づく棒高跳び運動における最適剛性の検証, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2012AC2F1-6, September 18, 2012. (札幌コンベンションセンター, 北海道札幌市)
- [26] 吉田修子, 水内郁夫. 人間の物体操作スキル抽出を目的とした摩擦状態提示可能なウェアラブル操縦装置の開発, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2012AC4E2-8, September 20, 2012. (札幌コンベンションセンター, 北海道札幌市)
- [27] ハンビンイク, 水内郁夫. 低速カメラを用いた被写体ブレに基づくボール軌道予測法, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2012AC2J2-3, September 18, 2012. (札幌コンベンションセンター, 北海道札幌市)
- [28] 川村政貴, 朝岡忠, 熊倉翔平, 水内郁夫. コンプレッサ搭載型空気圧駆動筋骨格ヒューマノイド buEnwa の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A1-L09, May 28, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [29] 本堂貴敏, 水内郁夫. フィードバック励振制御と等エネルギー面解析に基づく弾性関節を活用した高運動エネルギー実現法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-G10, May 29, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [30] 朝岡忠, 川村政貴, 熊倉翔平, 水内郁夫. 重心加速度を最大化する筋張力に基づく動力学解析による筋骨格ロボットの多関節筋配置法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A2-E03, May 29, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [31] 湯本裕矢, 水内郁夫. 動的全身運動の学習における汎用的評価指標としての力学的エネルギーの有効性の検討, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A2-D06, May 28, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [32] 熊倉翔平, 水内郁夫. 様々な制御量目標を設定可能な学習制御器による筋骨格ヒューマノイドの動作実現法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A2-D07, May 28, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [33] 木名瀬裕太, 本堂貴敏, 水内郁夫. 弾性を有する跳躍用装具によるヒューマノイドの跳躍運動実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-G11, May 29, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [34] ハンビンイク, 水内郁夫. 卓球ロボットを想定したボールの並進・回転速度の観測に基づく軌道予測計算法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1P1-P08, May 28, 2012. (アクトシティ浜松, 静岡県浜松市)
- [その他]
- ・ ウェブページ: mizuuchi.lab.tuat.ac.jp
 - ・ 商業雑誌記事: 空気の力で動く筋骨格ロボット, 週刊ロビ 第 62 号, 2014.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
水内 郁夫 (MIZUUCHI, Ikuo)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 6 0 3 5 9 6 5 1
- (2) 研究分担者
無し
- (3) 連携研究者
無し