

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04267

研究課題名(和文) 人型ロボットによるヒトのバランス制御と空中感覚理解

研究課題名(英文) Human Balance Control and Understanding of Aerial Sense by Humanoid Robots

研究代表者

橋本 健二 (HASHIMOTO, Kenji)

早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・教授

研究者番号：10449340

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)：ヒトの運動制御系をモデル化し、それを人型ロボットに実装することで、ヒトのバランス制御を理解することを目的とする。ヒトの歩容の特徴である運動学シナジー(節間協調の平面則)に着目し、この特徴を強化学習の報酬として導入したところ、節間協調の平面則が踵接地爪先離地歩行というヒトの歩行動作を特徴づける要因の1つであることが示唆された。ヒトの跳躍運動を参考に、圧力中心点が支持領域内に含まれるような不等式制約と浮遊期にロボットが回転しないという条件の等式制約のもと、線形モデル予測制御を利用してロボットの跳躍運動を生成する手法を考案し、シミュレーションと実機において跳躍運動が実現されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトのバランス制御をモデル化することができれば、平衡機能障害などの感覚器疾患の理解につながる。ロボットは各感覚器官のセンサ入力の大小や遅延を任意に変更することができるため、感覚器疾患の予防や治療、機能回復のためのリハビリテーションに有用なデータを提供することができる。ロボットはそれ自身がセンサの集合体であり、運動に関わる様々なデータを取得することはヒトに比べ容易であり、実験の再現性も高い。以上のように、本研究の成果はロボット工学、機械工学、人間工学などの幅広い工学分野だけでなく、脳科学やスポーツ科学、病態神経科学、実験病理学など様々な分野への波及効果が期待され、学術的・社会的に意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study aims to understand human balance control by modeling the human motor control system and implementing it into a humanoid robot. Focusing on the motion synergy (the planar covariation), which is a characteristic of human gait, we introduced this feature as a reward in reinforcement learning. This approach suggested that the planar covariation is one of the factors characterizing human walking motions, such as heel-strike and toe-off walking. Inspired by human jumping movements, we devised a method to generate jumping motions for robots using linear model predictive control. This method includes inequality constraints ensuring the center of pressure remains within the support area and equality constraints preventing the robot from rotating during the flight phase. The jumping motion was successfully realized in both simulations and actual robots.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒューマノイド 人型ロボット 脚型ロボット

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、「人間を工学する」という視点から人型ロボットの開発に取り組んできた。これまで、人体運動を模擬できる人型ロボットを活用し、歩行支援器などの福祉用具を定量的に評価した。しかし、ロボットの運動制御系に注目すると、ヒトの動きを参考にしておらず、ヒトの代わりに被験者を務めるにはまだ課題があった。そこで、全身の感覚器官に注目してロボットの運動制御系モデル構築し、外見だけでなく内面的な運動制御系についても人体運動を模擬することが重要であると考えに至った。

2. 研究の目的

本研究では、ヒトの運動制御系をモデル化し、それを人型ロボットに実装することで、ヒトのバランス制御を理解することを目的とする。具体的には、以下の3つの項目について研究を行う。

- (1) 節間協調の平面則に基づく2足ロボットの歩行運動生成
- (2) ヒト運動解析にもとづく跳躍運動生成
- (3) 跳躍運動の実現を目的とした脚ロボットの開発

3. 研究の方法

(1) 節間協調の平面則に基づく2足ロボットの歩行運動生成

本研究では、人間に見られる特徴的な歩容として **Borghese** らが指摘した運動学シナジー（節間協調の平面則）に着目する。節間協調の平面則とは、人間の矢状面内での大腿部・下腿部・足部の仰角を3軸として角度データをプロットすると1つの平面に載るという現象である。これにより、人間は関節の冗長自由度を低次元化し制御することができる。この運動学シナジーは歩行時の速度に寄らず、剛体路面、軟弱路面歩行時、階段昇降や跳躍時などにみられる。本研究は、節間協調の平面則を強化学習の報酬関数として設定し、人間らしい歩行を実現することを目指す。

本研究では、物理シミュレータの **PyBullet** を用いたオープンソースソフトウェアである **PyBullet Gymperium** を使用した。その中でも、2足ロボットを歩行させることを目的とした **Walker2DPyBulletEnv-v0** という環境を一部使用し、報酬を設定した。2足ロボットモデルは **walker2d** を使用した。ロボットモデルは2本の脚を有しておりそれぞれ脚に股関節、膝関節、足関節の3つの関節が存在する。**Walker2d** は各関節にトルクを指令値として制御されている。

使用する学習アルゴリズムの概略図を図1に示す。ある状態において次を取るべき行動をガウス方策に従って求め、実際にその行動を実行して次の状態と報酬を得ることを1ステップと定義する。1エピソードは2足ロボットが倒れるか、もしくは最大ステップ数に達するという終了条件を満たすまで繰り返すことと定義される。終了条件が満たされると状態、行動、報酬の履歴に基づき状態価値関数のニューラルネットワークが更新され、累積割引報酬が計算される。その後、アドバンテージ関数が更新され、ガウス方策のニューラルネットワークが更新される。本研究では、この学習過程を50万エピソード繰り返す。

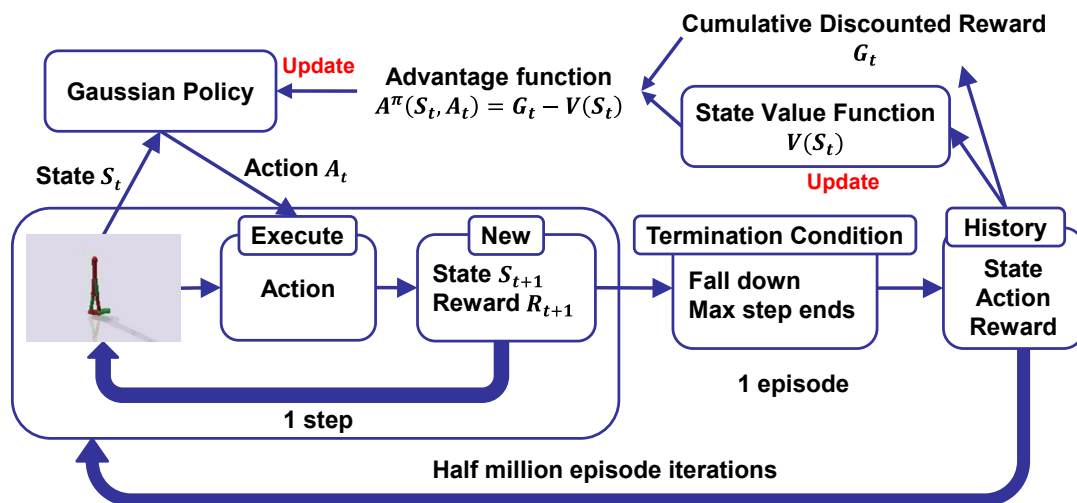


図1 学習アルゴリズムの概略図

(2) ヒト運動解析にもとづく跳躍運動生成

ヒトの跳躍運動を参考に、脚ロボットの跳躍運動生成手法を考案した。具体的には、脚ロボットの目標重心軌道を設定し、圧力中心点が支持領域内に含まれるような不等式制約と、浮遊期にロボットが回転しないという条件の等式制約のもと、線形モデル予測制御を利用してロボット

の跳躍運動を生成する手法である。

本研究では、転倒しにくい跳躍動作を生成するために Zero Moment Point (ZMP) ができる限りロボットの支持領域の中心に、重心角運動量になるべく 0 になるよう評価関数  $J$  を次のように設定する。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{H_p} \left\{ w_p (p_{k+i}^{ref} - p_{k+i})^2 + w_L L_{Gy,k+i}^2 \right\} + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{H_u} \left( w_{ux} \dot{L}_{Gy,k}^2 + w_{uL} \ddot{x}_{G,k}^2 \right)$$

ただし、 $w_p, w_L, w_{ux}, w_{uL}$  は重み定数、 $p_{k+i}^{ref}$  は目標 ZMP、 $H_p$  は予測ホライズン、 $H_u$  は制御ホライズンである。

### (3) 跳躍運動の実現を目的とした脚ロボットの開発

跳躍・走行などのダイナミックな運動の実現を目的とした脚ロボットを開発した。跳躍時には脚を素早く振り出すため、脚の慣性モーメントを小さくする必要がある。そのため、股関節に配置した膝関節用モータの動力を膝関節へ伝達するために、バックラッシュが小さく比較的軽量なプーリ・ベルトを脚機構に採用した。図 2 に脚ロボットの機構を示す。

図 3 に完成機体を示す。機体の総質量は 4.6kg となり、大腿部が 0.6kg、下腿部が 0.1kg である。図 4 に脚ロボットのシステム構成図を示す。路面高さを検出するための路面検出センサとして 30~2000mm の範囲で計測可能な Time-of-Flight 距離センサモジュールを胴体部に搭載した。

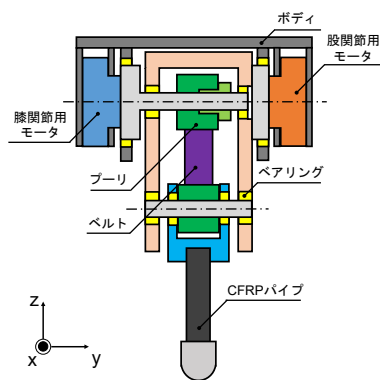


図 2 脚機構の詳細

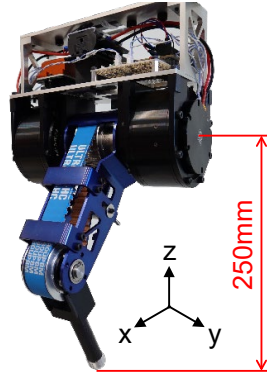


図 3 完成機体

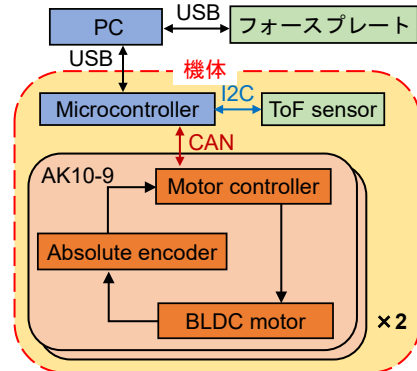


図 4 システム構成図

## 4. 研究成果

### (1) 節間協調の平面則に基づく 2 足ロボットの歩行運動生成

節間協調の平面則を強化学習の報酬の一部として組み込み、本研究で提案する手法を実行した時の 1 歩の歩行動作を図 5 に示す。図 5 より、2 足ロボットは歩行時にかかから着地し、つま先から離地する歩行となった。大腿部、下腿部、足部の仰角を 3 次元空間にプロットした図を点群の最小二乗平面に対して真横から見た図と上方から見た図を図 6 に示す。それぞれのグラフの青色の点はかかと着地のタイミング、赤色の点はつま先離地のタイミングを表し、図 6 (a) の黄色の線は最小二乗平面を表す。提案手法の第 2 主成分までの累積寄与率はそれぞれ 97% であり、ヒトに近い結果となった。

節間協調の平面則を強化学習の報酬として導入することにより、2 足ロボットが踵から着地し、つま先から離地するヒトらしい 2 足歩行を実現した。また、この特徴を使用しない時の歩行運動の学習結果と比較したところ、節間協調の平面則が踵接地爪先離地歩行というヒトの歩行動作を特徴づける要因の 1 つであることが示唆された。

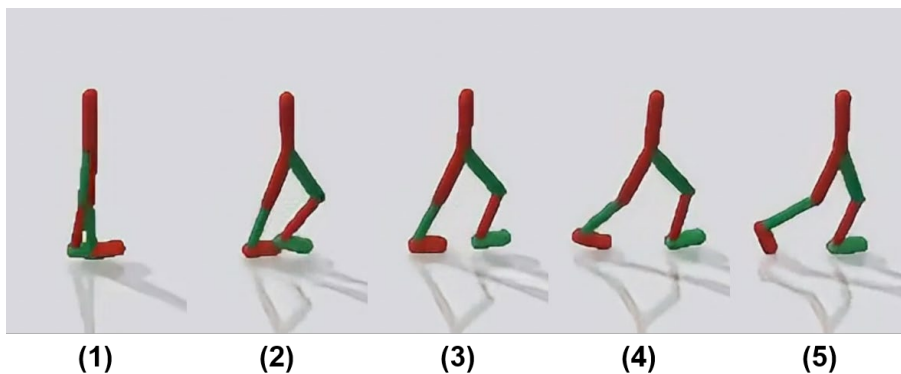


図 5 提案手法を用いたときの歩行動作

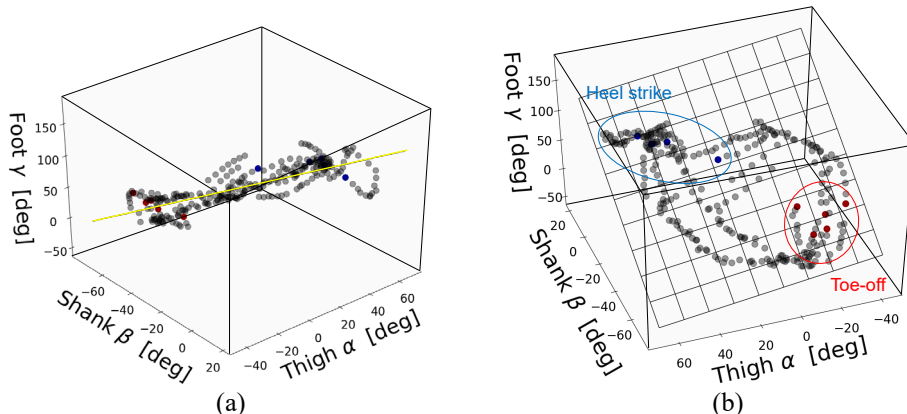


図6 提案手法を用いて大腿部, 下腿部, 足部の仰角を3次元空間にプロットした図. (a) 点群の最小二乗平面に対して真横から見た図, (b) 点群の最小二乗平面に対して上方から見た図.

(2) ヒト運動解析にもとづく跳躍運動生成

提案する跳躍運動生成手法の有効性を確かめるためシミュレーションで検証を行った. 物理シミュレータには動力学シミュレータ Choreonoid を使用し, 二次計画問題のソルバーには qpOASES を使用する.

跳躍運動時のスナップショットを図7に, ロボットの重心位置, 重心角運動量, 足先位置, ZMP それぞれの生成した軌道と計測値を図8に示す. ただし, 茶色と紫色の破線の間はロボットの支持領域を表しており, 浮遊期中のZMPは表記していない. 運動生成した全期間において, 生成したZMPがロボットの支持領域の端には存在せず, 生成した重心角運動量がほぼ0となっているため, 転倒しにくい跳躍運動が生成できていることが分かる.

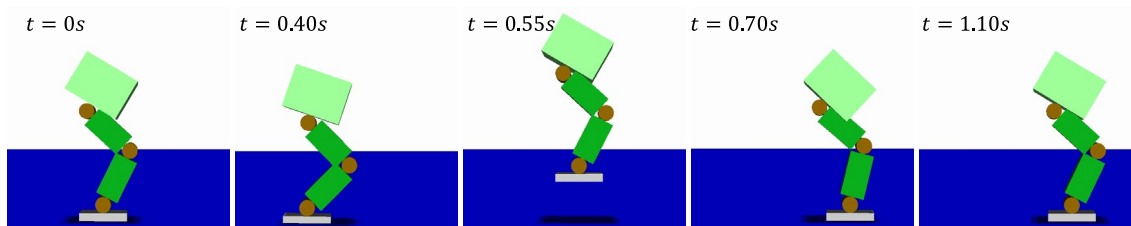
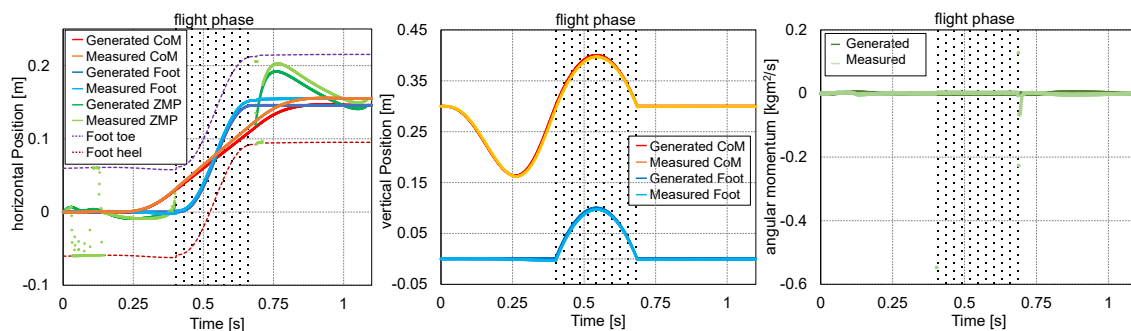


図7 シミュレーション結果のスナップショット



(a) 重心, 足先, ZMP 位置 (b) 重心, 足先高さ (c) 重心角運動量

図8 生成した目標軌道とシミュレーション結果の計測値

(3) 跳躍運動の実現を目的とした脚ロボットの開発

開発した脚ロボットにて評価実験を行ったところ, 図9に示すように連続跳躍運動を実現した.

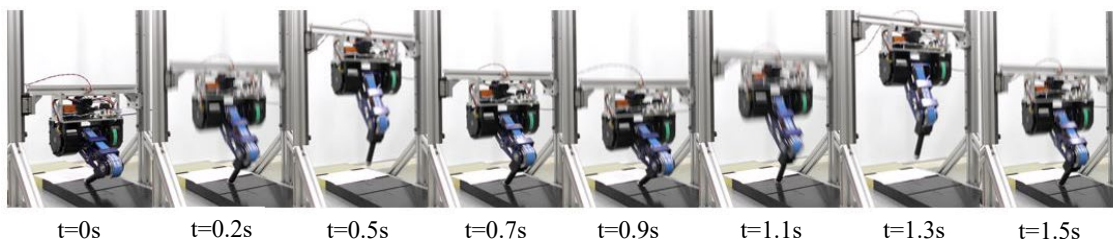


図9 連続跳躍運動の連続写真

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamano Junsei, Kurokawa Masaki, Sakai Yuki, Hashimoto Kenji	4. 巻 12
2. 論文標題 Realization of a Human-like Gait for a Bipedal Robot Based on Gait Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Machines	6. 最初と最後の頁 92～92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/machines12020092	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 Suzuki Taisei, Ota Hayato, Takenaka Hiroki, Tanaka Takayuki, Ishizawa Yuta, Hashimoto Kenji	4. 巻 811
2. 論文標題 Leg Mechanism of a Quadruped Wheeled Robot with a 4-DoF Spherical Parallel Link Mechanism	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Synergetic Cooperation between Robots and Humans. CLAWAR 2023.	6. 最初と最後の頁 15～27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-47272-5_2	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 Yamano Junsei, Kurokawa Masaki, Sakai Yuki, Hashimoto Kenji	4. 巻 810
2. 論文標題 Walking Motion Generation of Bipedal Robot Based on Planar Covariation Using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Synergetic Cooperation between Robots and Humans. CLAWAR 2023.	6. 最初と最後の頁 217～228
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-47269-5_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 -
1. 著者名 Han Lianqiang, Chen Xuechao, Yu Zhangguo, Gao Zhifa, Huang Gao, Zhang Jintao, Hashimoto Kenji, Huang Qiang	4. 巻 41
2. 論文標題 A heuristic gait template planning and dynamic motion control for biped robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Robotica	6. 最初と最後の頁 789～805
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S026357472200162X	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 該当する

1. 著者名 Han Lianqiang, Chen Xuechao, Yu Zhangguo, Zhu Xishuo, Hashimoto Kenji, Huang Qiang	4. 巻 66
2. 論文標題 Trajectory-free dynamic locomotion using key trend states for biped robots with point feet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science China Information Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11432-021-3450-5	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 該当する

1. 著者名 Asahi Anzai, Toshihide Doi, Kazuki Hashida, Xuechao Chen, Lianqiang Han, and Kenji Hashimoto	4. 巻 8
2. 論文標題 Monopod robot prototype with reaction wheel for hopping and posture stabilisation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 163-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJMA.2021.10044164	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 該当する

1. 著者名 Asahi Anzai, Toshihide Doi, Kazuki Hashida, Xuechao Chen, Lianqiang Han, and Kenji Hashimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Prototype Electric-driven 2-DoF Monopod Robot for Hopping Motion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 1182-1187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMA52036.2021.9512643	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 該当する

1. 著者名 Hashimoto Kenji	4. 巻 34
2. 論文標題 Mechanics of humanoid robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1390 ~ 1397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1813624	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yilin Zhang, Xiaohan Du, Huimin Sun, Shanshan Wang and Kenji Hashimoto
2. 発表標題 Stable Walking Method of Biped Robots in Gusty Environments with Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Huimin Sun, Yuan Huang, Yilin Zhang, Chi Li and Kenji Hashimoto
2. 発表標題 Manipulator Grasp Detection Based on a Novel CAG Block and Multi-Scale Inception
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川島悠輔, 石沢悠太, 鈴木大晟, 青田旅人, 橋本 健二
2. 発表標題 4自由度の脚を活かした車輪走行が可能な2脚車輪ロボットの設計・製作
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 2 0 2 3 (ROBOMECH 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木大晟, 太田隼人, 竹中拓輝, 田中隆之, 石沢悠太, 酒井悠貴, 橋本健二
2. 発表標題 4自由度球面パラレルリンク機構を有する脚部の機構解析
3. 学会等名 日本機械学会第21回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木大晟, 太田隼人, 竹中拓輝, 田中隆之, 石沢悠太, 橋本健二
2. 発表標題 4自由度球面パラレルリンク機構を有する4脚車輪ロボットの脚部の設計・製作
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中原崇智, 安西あさひ, 熊岡光志, 橋本健二
2. 発表標題 月面環境に対応可能な脚型ロボット足部の開発と月面模擬環境の構築
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐竹慶洸, 酒井悠貴, 橋本健二
2. 発表標題 手をついた状態からの姿勢復帰と2足歩行再開を継続的に行う人型ロボットの運動パターン生成法
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠原吉展, 酒井悠貴, Lianqiang HAN, Xuechao CHEN, 橋本健二
2. 発表標題 2足ロボットCRANEの矢状面内での歩行のための実験環境と運動生成システムの構築
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2022
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 山野潤生, 黒川真暉, 橋本健二
2. 発表標題 深層強化学習を用いた節間協調の平面則に基づく2足ロボットの歩行運動生成
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2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊岡光志, 土井俊秀, 安西あさひ, 田中大樹, 橋本健二
2. 発表標題 路面検出センサを備えた2自由度単脚ロボットMH-2の開発と連続跳躍運動の実現
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田上直樹, 橋本健二
2. 発表標題 弾性体と多孔質リンクの強固な接続の実現とアクチュエータ化に向けた検討
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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒川真暉, 橋本健二
2. 発表標題 強化学習による2足ロボットの矢状面内での歩行運動獲得
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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井悠貴, 橋本健二
2. 発表標題 上肢の着地位置決定に可捕性解析を用いた2足ロボットの転倒制御
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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安西あさひ, 土井俊秀, 橋田一樹, 橋本健二
2. 発表標題 跳躍運動の実現を目的とした電動駆動型2自由度単脚ロボット試作機の開発
3. 学会等名 第21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 2020年

1. 発表者名 田中大樹, 渡辺寛基, 織田健吾, 玄相昊, 橋本健二
2. 発表標題 油圧ロボットの実験環境構築と2自由度単脚ロボット試作機の開発
3. 学会等名 第21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 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

早稲田大学 大学院情報生産システム研究科 橋本健二研究室のホームページ  
<https://hashimoto-lab.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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------