

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709019

研究課題名(和文) 超人的移動能力を持つ2足スプリント・ロボットの開発

研究課題名(英文) Bipedal Sprint Robot Having Superhuman Mobility Capabilities

研究代表者

橋本 健二 (Hashimoto, Kenji)

早稲田大学・高等研究所・助教

研究者番号：10449340

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：骨盤運動や走法の違いが走行運動に与える影響を定量的に評価し、新しいスポーツコーチング学を創出することを目指し、人間の構造と運動を模擬可能な2足スプリント・ロボットの開発を目的とする。人間の走行運動解析を通して、骨盤運動が走行運動に寄与していることを見出した。そこで、腰部関節を持ち、膝関節と足関節には弾性要素を持つ2足ロボットWATHLETE-1を開発した。WATHLETE-1は全身で22自由度を持ち、身長1,500mm、体重62kgである。走行運動制御を開発することで、片脚での跳躍運動を実現した。またYaw方向の角運動量制御も開発し、下半身で発生する角運動量を上半身で補償することができた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to develop a bipedal sprint robot that can mimic human running motion. Through the development of the robot, we aim to quantitatively evaluate the influence of differences in pelvic movements and running styles on running motion, and to create a novel sports coaching program. Through human motion analysis, we found that pelvic movement contributes to the running motion. Therefore, we developed a bipedal robot WATHLETE-1 which has a waist joint and has elastic elements in the knee joint and ankle joint. WATHLETE-1 has 22 degrees of freedom in total, has a height of 1,500mm, a weight of 62kg. By developing running motion control, the robot realized a one-leg jumping motion. We also developed an angular momentum control in the yaw direction, the robot could compensate the angular momentum generated in the lower body by the upper body.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ヒューマノイド 2足走行 走行運動解析 走行運動制御

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、これまで人間の歩行運動の解明を目的として、人間の構造と運動を模擬した2足ヒューマノイド・ロボットを開発している。これまでに開発した2足ヒューマノイド・ロボットは成人女性程度の寸法で、人間らしい膝関節を伸ばした踵接地爪先離地歩行を模擬してきた。これからはよりダイナミックな動作を実現するため、走行運動の解明やスポーツ科学への応用を目指して、人間の歩行・走行運動を模擬することが可能な2足スプリント・ロボットの開発を目標とする。

人間の走行時の特徴として、頭部の安定化や腕などの上体によるモーメント補償、脚の弾性、骨盤の動きなど様々なものが挙げられる。これらの特徴を2足スプリント・ロボットにより模擬することで、走行運動への寄与を明らかにするだけでなく、2足スプリント・ロボットによるスポーツ分野におけるパフォーマンス研究などが可能になると考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究課題では、人体運動を模擬した“歩行運動”と“走行運動”が可能な2足スプリント・ロボットを開発することを目的とする。具体的には下記3つの項目について研究する。

- (1) 人間の走行運動解析
- (2) ハードウェア開発
- (3) 走行運動制御

3. 研究の方法

(1) 人間の走行運動解析

骨盤運動に注目した走行運動解析の先行研究は少ないため、本研究では、まず人間の走行運動をモーションキャプチャシステムと床反力系で計測した。その結果、前額面における骨盤の運動に特徴が見られた。4[m/s] (14.4[km/h]) で走行時の立脚期 (右脚) の前額面における骨盤回転運動を図1に示す。これは、被験者3名について10回ずつ試行を行いその平均を取ったものである。ここで、骨盤が水平になっている状態を0[deg]とする。まず、踵接地時には5.9[deg]と遊脚側が下降している状態であり、その後足底接地まで遊脚側がさらに下降するように骨盤が回転して6.9[deg]に至る。その後爪先離地に向けて、遊脚が上昇するように回転し、爪先離地時には-5.1[deg]に至る。このように着地から離地にかけて、骨盤は一度遊脚を下降させるように回転した後、遊脚を上昇させるように回転している。これより、人間は骨盤を回転させることで着地衝撃吸収および蹴り出しの力の補助を行っているという仮説を立てた。着地時の回転が着地衝撃の吸収に、その後の回転が蹴り出しの補助に寄与していると考えられる。

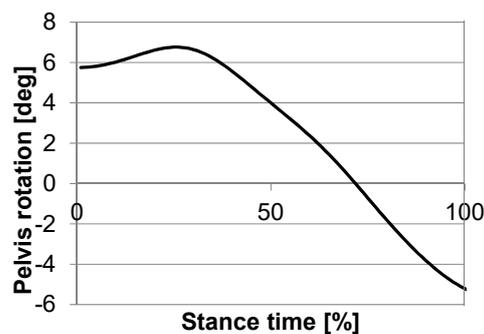


図1 走行時の前額面における骨盤運動

(2) ハードウェア開発

① 腰部関節

骨盤 Roll 軸・股関節 Roll 軸・股関節 Pitch 軸を持つ腰部関節を設計した (図2)。各関節の可動角は走行速度 4[m/s]における可動範囲を確保できるように決定され、股関節間距離は人間と同程度の180[mm]である。サイズは383 x 224 x 318[mm]、質量21.4[kg]である。

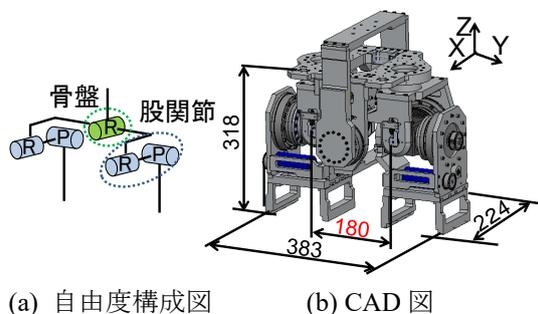


図2 腰部関節機構

② 膝関節

膝関節には2枚の板ばねを配置することで人間の弾性値を模擬した。板ばねの材質はCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) であり、軽量化を図っている。2枚の板ばねは大腿・下腿に連動しており、遊脚時にはモータで2枚の板ばねの間の角度を変更することで膝関節を屈伸できる (図3)。立脚時には、低く抑えた逆駆動時のトルク伝達効率により、ロボットに搭載可能な小型モータの発揮トルクであっても大きな荷重に耐え2枚の板ばねの角度を固定することで、板ばねが変形しエネルギーが蓄積される。この機構を用いることにより、遊脚時の要求仕様である6.5[rad/s]を超えた8.1[rad/s]で屈伸可能であり、かつ跳躍運動や走行運動の立脚期の大きな衝撃に耐えられる関節機構を開発できた (図4)。

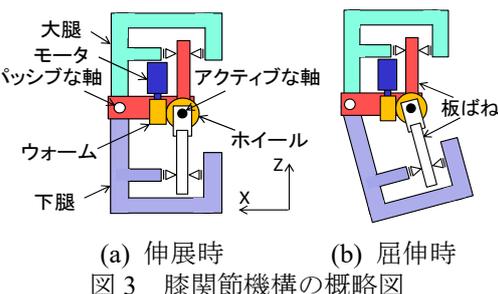


図3 膝関節機構の概略図

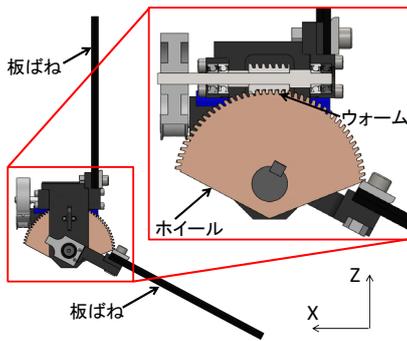


図4 設計した膝関節機構

### ③ 足関節・足部

ロボットの足関節は、能動動作可能で走行動作中の着地衝撃に耐えることができ、かつ着地時に足部が路面に倣う必要がある。さらにロボットの足部は点接地に加え、面接地および線接地が可能な形状にする。

開発した機構では、足関節 Pitch 軸の駆動に4節リンク機構を採用し、弾性要素である板ばねと足部を連動させる。足関節 Roll 軸には、これまでたわみ方向にのみ用いていた板ばねをねじり方向にも利用する機構を考案し、倣い機構として搭載した。さらに足裏に3つのゴム半球を搭載することで、点・線・面接地に対応可能とした(図5)。

足関節 Pitch 軸は立脚期に180[Nm]のトルクを発揮し、遊脚期に角速度4.6[rad/s]で動作する必要があるため、既存の電磁モータ+減速機の組み合わせでは実現が困難である。そこでロボットの膝関節に搭載されているCFRP重ね板ばねを本機構にも採用し、弾性要素として関節に搭載することで高出力の発揮を可能とした。減速機には進み角を変えたウォームギアを採用し、モータ出力から減速機出力までの駆動伝達効率と、減速機出力からモータ出力までの逆駆動伝達効率を調節した。要求仕様を満たすよう各伝達効率を計算してウォームギアを設計したことで、立脚期に足関節 Pitch 軸にかかる大トルクをモータの小さな発揮トルクで受けることができる。しかし減速機を足関節部分に搭載すると足関節周囲のサイズが拡大し、足先に質点配置が移動するという問題があった。そこで Pitch 軸駆動に4節リンク機構を採用し、ウォームギアを下腿上部に駆動節として搭載、下腿下部に従動節を搭載し板ばねと連結させることで人間と同等の質点配置を実現した。さらに板ばねと足部を連動させることで足関節 Pitch 軸を駆動する。立脚期には板ばねの角度を固定することで、着地の床反力により弾性エネルギーを蓄積することが可能である。

足関節 Roll 軸にも他の減速機と比較して対衝撃性が高いという理由でウォームギアを採用した。しかし、人間の走行運動の特徴である倣い動作を模擬するためには減速機の後段で足部が高速に受動回転する必要がある。ウォームギアはバックドライブビリテ

ィが低いため、弾性要素として搭載している板ばねのねじれ変形に着目し、足部裏全体が路面に受動的に倣うような機構を考案した。

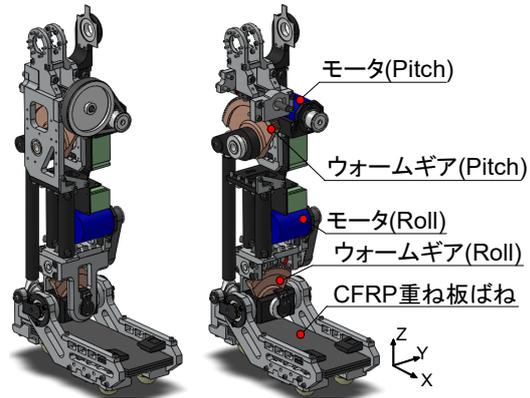


図5 足関節・足部機構のCAD図

### ④ 上半身

人間と同等の角運動量を発生するために、人間と同等の質量特性およびリンク長を有する上半身機構を設計した。

上腕部と体幹部の質量の要求仕様はそれぞれ1.6[kg], 16[kg]と軽量であったため、図6, 図7に示すように、構造部材にCFRPを用いることで軽量化を図った。また、CFRPパイプ内にモータ、モータドライバ、配線を格納する設計にすることで、人間の腕部のサイズに近づけた。

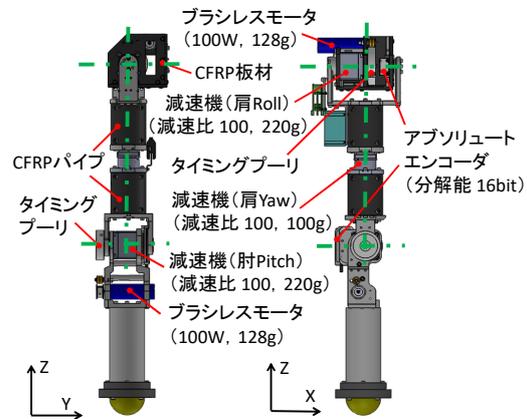


図6 腕部機構のCAD図

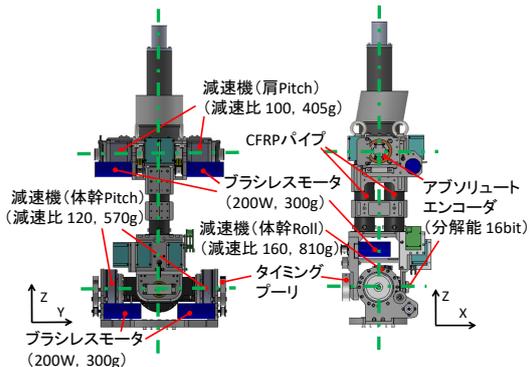


図7 体幹部機構のCAD図

### (3) 走行運動制御

人間のような骨盤運動と脚弾性を利用した走行運動の模擬を目指し、床反力が重心を貫く脚部の姿勢を動力学方程式により導出する手法を考案した。

また、人間の走行時の特徴である上半身の動きに着目した角運動量制御手法を開発した。人間は走行時に、下半身により発生した角運動量を補償し安定した走行を実現している。そこで、この特徴をロボットに取り入れ安定した走行を実現するために、下半身の運動により生じる角運動量を算出し、体幹部と腕部の動作により、Yaw 方向の角運動量を補償することとした。

## 4. 研究成果

### (1) 人間の走行運動解析

歩行研究の多くでは、人間およびヒューマノイド・ロボットのモデルとして倒立振り子モデルが使われている。走行運動については、1つの質点と1つの減衰のないばねによるSLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) モデルが用いられている。これは、人間の走行時の立脚期には重心の垂直方向の位置の変化に応じて重心加速度が変化していることから、脚のばねのような特性をモデル化したものである。跳躍期は、単質点の放物運動として扱う。

図1に示すように走行時の骨盤運動を見ると正弦運動に近い挙動を示しており、これはSLIPモデルでの共振運動に大きな影響を与える。この知見を基に、新たに骨盤を有するSLIP<sup>2</sup> (Spring Loaded Inverted Pendulum using Pelvis) モデルを考案した。立脚期には図8に示すように、上体を模した質点および脚を模したばね、そして骨盤からなるSLIPモデルとして、跳躍期にはSLIPモデルと同様に単質点の放物運動としてモデル化する。

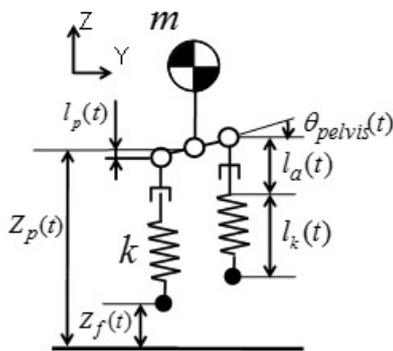
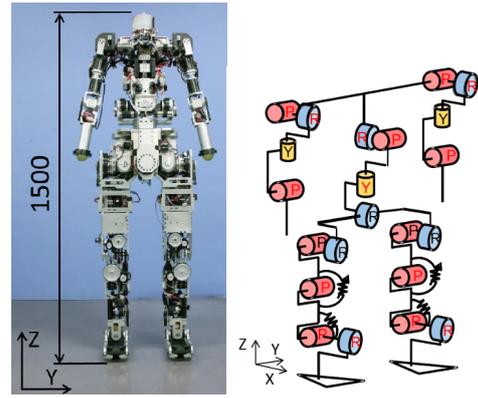


図8 SLIP<sup>2</sup>モデル

### (2) ハードウェア開発

本研究で開発した2足スプリント・ロボット WATHLETE-1 (Waseda ATHLETE - No. 1) を図9に示す。身長は約1,500[mm]、体重は約62[kg]である。図9(b)の自由度はすべて能動であり、赤字で示した一部の自由度には、インクリメンタルエンコーダに加えて、アブソリュートエンコーダを実装した。



(a) 全体図 (b) 自由度配置図  
図9 2足走行ロボット WATHLETE-1

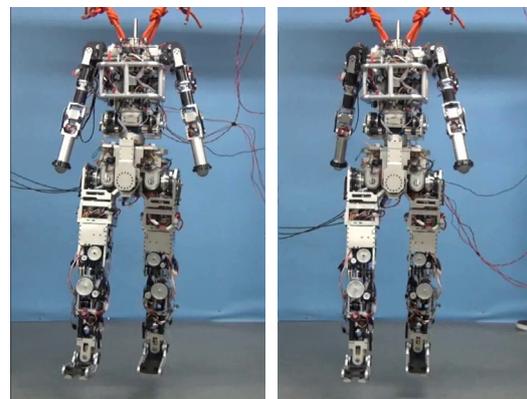
### (3) 走行運動制御

床反力が重心を通るように脚部の姿勢を設定し、立脚している状態から骨盤揺動により跳躍力を獲得し、跳躍中に着地位置を変更することで走行速度を制御する実験を行った。下半身ロボットにおいて骨盤の揺動と脚弾性により矢状面での走行運動を実現した(図10)。

また、角運動量制御については、動力学シミュレーションおよび実際のロボットに実装した評価実験において、宙に吊られているロボットが下半身の動作に合わせて上半身の運動を生成することでYaw方向回転の減少を実現した(図11)。



図10 着地位置変更による走行速度制御



(a) 制御なし (b) 制御あり  
図11 Yaw方向の角運動量補償制御

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Takaya Isomichi, Shunsuke Miyamae, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-Ok Lim and Atsuo Takanishi, “Joint Mechanism Coping with both of Active Pushing-off and Joint Stiffness Based on Human,” Proceedings of the 21st CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, pp. 243-250, June, 2016. (査読有)  
DOI: 10.1007/978-3-319-33714-2\_27
- ② Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Takaya Isomichi, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-Ok Lim and Atsuo Takanishi, “Joint Mechanism That Mimics Elastic Characteristics in Human Running,” Machines, Vol. 4, Issue 1, Article 5, January, 2016. (査読有)  
DOI: 10.3390/machines4010005
- ③ Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Shinya Hamamoto, Shunsuke Miyamae, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Knee Joint Mechanism That Mimics Elastic Characteristics and Bending in Human Running,” Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5156-5161, September, 2015. (査読有)  
DOI: 10.1109/IROS.2015.7354103
- ④ Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Masaaki Yahara, Shunsuke Miyamae, Takaya Isomichi, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Running with Lower-Body Robot That Mimics Joint Stiffness of Humans,” Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3969-3974, September, 2015. (査読有)  
DOI: 10.1109/IROS.2015.7353936
- ⑤ Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Masaaki Yahara, Shunsuke Miyamae, Takaya Isomichi, Shintaro Hanawa, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Utilization of Human-Like Pelvic Rotation for Running Robot,” Frontiers in Robotics and AI, Vol. 2, Article 17, 9 pages, July, 2015. (査読有)  
DOI: 10.3389/frobt.2015.00017
- ⑥ Kenji Hashimoto and Atsuo Takanishi, “Biped Robot Research at Waseda University,” Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. 1, Issue 4, pp. 261-264, February, 2015. (査読有)  
DOI: 10.2991/jrnal.2015.1.4.4
- ⑦ Takuya Otani, Thomas George, Kazuhiro Uryu, Masaaki Yahara, Akihiro Iizuka, Shinya Hamamoto, Shunsuke Miyamae, Kenji Hashimoto, Matthieu Destephe, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Leg with Rotational Joint That Mimics Elastic Characteristics of Human Leg in Running Stance Phase,” Proceedings of the 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 481-486, November, 2014. (査読有)  
DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2014.7041405
- ⑧ Takuya Otani, Kazuhiro Uryu, Masaaki Yahara, Akihiro Iizuka, Shinya Hamamoto, Shunsuke Miyamae, Kenji Hashimoto, Matthieu Destephe, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Hopping Robot Using Pelvic Movement and Leg Elasticity,” Proceedings of 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practical of Robots and Manipulators, pp. 235-243, June, 2014. (査読有)  
DOI: 10.1007/978-3-319-07058-2\_27
- ⑨ Takuya Otani, Masaaki Yahara, Kazuhiro Uryu, Akihiro Iizuka, Kenji Hashimoto, Tatsuhiro Kishi, Nobutsuna Endo, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Sang-Ho Hyon, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Running Model and Hopping Robot Using Pelvic Movement and Leg Elasticity,” Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2313-2318, May, 2014. (査読有)  
DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907179
- [学会発表] (計 16 件)
- ① 植田大貴, 大谷拓也, 橋本健二, 宮前俊介, 磯道貴矢, 夏原彬, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第13報: 人間と同等の角運動量が発生可能で人間の質量特性を模擬した上半身機構),” 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3Y3-07, 山形県, 2016年9月.
- ② 夏原彬, 大谷拓也, 橋本健二, 宮前俊介, 磯道貴矢, 植田大貴, 赤堀孝太, 尾原睦月, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第14報: 弾性要素を有し能動動作と路面への倣い動作が可能な足関節・足部機構),” 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3Y2-01, 山形県, 2016年9月.
- ③ 大谷拓也, 夏原彬, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “ヒューマノイドロボットによる人間の走行模擬のための足関節に着目した人体運動解析,” 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2X2-04, 山形県, 2016年9月.
- ④ 大谷拓也, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “ヒト走行時の骨盤運動解析に基づくヒューマノイドによる跳躍運動,” LIFE2016, 2A1-C02, pp.

- 100-103, 宮城県, 2016年9月.
- ⑤ 大谷拓也, 宮前俊介, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第12報: 上半身を用いるYaw方向角運動量制御),” 日本IFTToMM会議シンポジウム前刷集 (第22回), pp. 29-36, 東京都, 2016年7月.
- ⑥ 大谷拓也, 磯道貴矢, 橋本健二, 八原昌亨, 宮前俊介, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第11報: CFRP重ね板ばねによる軽量高出力弾性関節機構),” 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I1-04, 東京都, 2015年9月.
- ⑦ 磯道貴矢, 大谷拓也, 橋本健二, 八原昌亨, 宮前俊介, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第10報: 弾性要素と能動的な蹴り出しから跳躍力を獲得できる膝関節機構),” 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I1-03, 東京都, 2015年9月.
- ⑧ 大谷拓也, 八原昌亨, 橋本健二, 宮前俊介, 磯道貴矢, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第9報: 人間の脚弾性を模擬した下半身ロボットによる矢状面における片脚走行の実現),” 日本IFTToMM会議シンポジウム前刷集 (第21回), pp. 39-46, 東京都, 2015年7月.
- ⑨ 濱元伸也, 大谷拓也, 飯塚晃弘, 宮前俊介, 瓜生和寛, 八原昌亨, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第8報: 膝関節に能動屈伸機構と弾性要素を有する2足走行ロボット脚部),” 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B1-03, 福岡県, 2014年9月.
- ⑩ 大谷拓也, 飯塚晃弘, 宮前俊介, 濱元伸也, 八原昌亨, 橋本健二, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第7報: 着地時間推定を用いた連続跳躍の実現),” 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B1-02, 福岡県, 2014年9月.
- ⑪ 宮前俊介, 大谷拓也, 飯塚晃弘, 濱元伸也, 八原昌亨, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第6報: 走行運動を目指した腰部関節の強度強化),” 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B1-01, 福岡県, 2014年9月.
- ⑫ 大谷拓也, 八原昌亨, 瓜生和寛, 飯塚晃弘, 濱元伸也, 宮前俊介, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第5報: 人間の骨盤動揺と多関節

節脚の関節弾性を模擬した跳躍ロボット),” 日本IFTToMM会議シンポジウム前刷集 (第20回), pp. 36-41, 東京都, 2014年5月.

- ⑬ 大谷拓也, 飯塚晃弘, 八原昌亨, 瓜生和寛, 橋本健二, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第4報: 骨盤回旋運動を利用した走行制御),” 日本ロボット学会第31回学術講演会予稿集, 1C1-03, 東京都, 2013年9月.
- ⑭ 瓜生和寛, 大谷拓也, 八原昌亨, 飯塚晃弘, 濱元伸也, デステフ マチュー, 橋本健二, 保原浩明, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第3報: 板ばねを用いた弾性可変機構を持つ回転関節脚),” 日本ロボット学会第31回学術講演会予稿集, 1C1-02, 東京都, 2013年9月.
- ⑮ 八原昌亨, 大谷拓也, 瓜生和寛, 飯塚晃弘, 岸竜弘, 遠藤信綱, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第2報: 骨盤運動と脚弾性を活用した跳躍運動の実現),” 日本IFTToMM会議シンポジウム前刷集 (第19回), pp. 51-54, 東京都, 2013年6月.
- ⑯ 大谷拓也, 八原昌亨, 瓜生和寛, 橋本健二, 阪口正律, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第1報: 骨盤運動と脚弾性を活用した走行モデルの考案),” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2013, 2A1-I04, 筑波, 茨城県, 2013年5月.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 2足歩行ロボットの移動制御システム  
発明者: 高西淳夫, 川上泰雄, 橋本健二, 阪口正律, 大谷拓也, 飯塚晃弘, 八原昌亨, 瓜生和寛, 宮前俊介, 濱元伸也

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2013-238123 号

出願年月日: 2013年11月18日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

[http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/running/index\\_j.htm](http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/running/index_j.htm)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 健二 (HASHIMOTO, Kenji)

早稲田大学・高等研究所・助教

研究者番号: 10449340