

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360099

研究課題名(和文) 三次元歩行解析に基づく2足歩行ロボットの運動制御系モデル構築と福祉用具の定量評価

研究課題名(英文) Full-Body Motion Control Based on Gait Analysis for Biped Humanoid Robot and Quantitative Evaluation of Welfare Equipment

研究代表者

高西 淳夫 (TAKANISHI, Atsuo)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50179462

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、歩行解析に基づき人間の運動制御系をモデル化し、外見だけでなく制御の点からも人体運動が模擬可能な2足ヒューマノイドロボットを開発することを目的とし、研究を遂行した。具体的には、歩行解析を通して頭部姿勢安定化モデルと軟弱路面での歩行安定化制御を構築し、ロボットでの実験を通して、提案手法の有効性を確認した。また、水平面と前額面における人間の歩行運動が模擬可能な下腿機構と人間の足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study we developed a biped walking stabilization based on gait analysis for a humanoid robot. So far, we have developed a humanoid robot as a human motion simulator which can quantitatively evaluate welfare equipment instead of human subjects. However, the walking motion of the robot looked like human's, but a walking stabilization control was not based on gait analysis. To use a humanoid robot as a human motion simulator, not only mechanisms but also a stabilizer should be designed based on human beings.

We developed a head motion stabilization model and a walking stabilization control on a soft ground based on gait analysis. Verification of the proposed controls was conducted through experiments with a human-sized humanoid robot WABIAN-2.

We also developed a new shank mechanism to mimic human-like walking in the horizontal and frontal planes and a shoes-wearable foot mechanism which mimics human's foot arch structure and the characteristics of the foot skin.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボティクス ヒューマノイド 2足歩行 歩行解析

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、“人間を工学する”という視点から2足ヒューマノイドロボットWABIAN-2を開発してきている。人間が骨盤の回旋運動を巧みに利用して歩行していることに注目し、WABIAN-2には骨盤に相当する自由度を設け、この冗長自由度を利用することで膝を伸ばしての歩行を実現した。動きだけでなく、歩行中の床反力に注目すると、人間の歩行の特徴であるダブルピークもロボットで再現可能になった。

そこで、ある程度の人体運動模擬が可能になってきたため、その応用として、ロボットが人間の代わりに被験者になり、歩行支援機を用いた歩行実験も行ってきた。人間の場合、歩行支援機のアームレストの高さは、通常直立姿勢時の肘の位置を目安としており、障害が重いほど低めに設定すると良いことが経験的に分かっていた。ロボットを用いた実験では、アームレストの高さが下がるほど腕にかかる力が増加し、膝の負担が減少するという定量的なデータが得られた。これにより、2足ヒューマノイドロボットを用いることで、これまで経験的に分かっていた事実を定量的に評価可能であるということを示してきた。

しかし、ロボットの運動制御系に注目すると、人間の動きを参考にしておらず、人間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、さらなる人体運動の模擬を目指し、運動制御系についても人体運動の模擬が必要と考えるに至った。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、歩行解析に基づき人間の運動制御系をモデル化し、外見だけでなく制御の点からも人体運動が模擬可能な2足ヒューマノイドロボットを開発することを目的とする。また、人体運動を模擬する上で必要なハードウェアの開発も行う。

具体的には下記4つの項目を開発する。

- (1) 頭部姿勢の安定化モデル
- (2) 軟弱路面での歩行安定化制御
- (3) 水平面と前額面における人間の歩行運動が模擬可能な下腿機構
- (4) 人間の足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構

### 3. 研究の方法

#### (1) 頭部姿勢の安定化モデル

前庭頸反射による頭部姿勢の安定化をモデル化し、2足ヒューマノイドロボットへの実装を通して、提案手法の妥当性を検証する。そして、頭部姿勢安定化や視線安定化が実現されるかを評価する。

#### (2) 軟弱路面での歩行安定化制御

三次元動作分析装置を用いて、人間の軟弱路面における自由歩行を計測した。被験者は成人男性6名とし、被験者の平均年齢は23.2

±0.70歳、平均身長1670±42[mm]、平均体重61.0±3.5[kg]である。軟弱路面としては、中程度に柔らかいウレタンスポンジ(密度:150±30[kg/m<sup>3</sup>])と極めて柔らかいウレタンスポンジ(密度:22±2[kg/m<sup>3</sup>])の2種類を用意した。また比較対照のために、剛体路面においても歩行運動を計測した。

歩行解析の結果、歩幅と歩隔に有意差はないが、軟弱路面では足上げ高さが高くなる傾向がある。剛体路面と軟弱路面において左右方向の重心動揺に有意差がない、という2つの知見を得た。1つ目の知見についてはオフラインで歩行パターンを生成する際に反映し、2つ目の知見から左右方向の重心位置を安定化する制御法を考案した。

#### (3) 水平面と前額面における人間の歩行運動が模擬可能な下腿機構

水平面における人間の歩行の特徴として、90[mm]という狭い歩隔や12[deg]の爪先開き角(足角)がある。また、前額面に注目すると、歩行時の重心軌跡は字を描き、左右動揺が30[mm]と小さい特徴がある。それに対し、WABIAN-2の歩行時の重心の左右動揺は100[mm]である。その原因として人間の狭い歩隔に対し、WABIAN-2の歩隔は180[mm]であることが挙げられる。そこで人間と同程度の重心の左右動揺を実現するために人間の水平面における歩隔の模擬が必要であると考えた。そこで、人間の下腿サイズ、および人間の水平面における歩行の特徴である歩隔、足角を模擬することが可能な下腿機構を開発し、WABIAN-2の前額面における歩行中の重心の左右動揺を人間に近づけることを目指す。

下腿機構の要求仕様は以下の通り決定した。寸法は足関節同士の干渉回避、人間と同程度の足関節高さの実現のため、日本人成人女性を参考に、足関節高さ65±5[mm]、足関節太さ65±5[mm]、下腿太さ105±5[mm]とした。足関節高さ低減のため、足関節Yaw軸は膝関節下に配置し、減速には波動歯車減速機を用いた。足関節Roll、Pitch軸は、従来手法のように波動歯車減速機を用いたのは足関節高さの低減が難しいため、直動パラレルリンク機構を採用した。その結果、新たに設計した下腿機構は、足関節高さ67[mm]、足関節太さ67[mm]、下腿太さ110[mm]と、要求仕様を満たすことを設計上確認した。

#### (4) 人間の足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構

人間の足部のアーチ構造を回転ばね・ダンパ系でモデル化し、皮膚を圧縮方向とせん断方向に弾性をもつ弾性体としてモデル化した。アーチ構造の回転弾性係数の目標値については、先行研究より第II相では386[Nm/rad]、第III相では488[Nm/rad]と分かっている。そこで、高さの異なる2種類のばねを並列に用いることでアーチ構造の弾性の模擬を図つ

た。

足底の機械的特性に関しては、せん断弾性特性に関する先行研究を見つけないことができなかったため、測定装置を本研究で開発し、足裏のせん断弾性測定実験を行い、目標値を11.2[N/mm]と定めた。さらに、靴が歩行に与える影響を調査できるように、足部機構の外形は靴が履けるように設計した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 頭部姿勢の安定化モデル

頭部の姿勢指令値を地面と平行になるように設定し、体幹部に外乱を加えた際の頭部姿勢の安定性を評価した。その結果、ロボットを吊った状態で体幹部を大きく揺らした場合と、前進歩行させた場合において、頭部姿勢が安定化されていることが確認できた。

また、仮想視標追従実験においては、提案モデルが視線の安定化にも効果的であることが確認できた。

##### (2) 軟弱路面での歩行安定化制御

提案手法を評価するために、開発した制御手法を2足ヒューマノイドロボットWABIAN-2に実装し、評価実験を行った。軟弱路面としては人体計測でも使用した密度 $22 \pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$ の極めて柔らかいウレタンスポンジを使用した。

実際にロボットを用いた歩行実験より、軟弱路面において足踏み動作と前進歩行を実現した(図1)。また、剛体路面歩行時と軟弱路面歩行時において重心動揺に有意差がないことから、本提案手法の有効性を確認した。

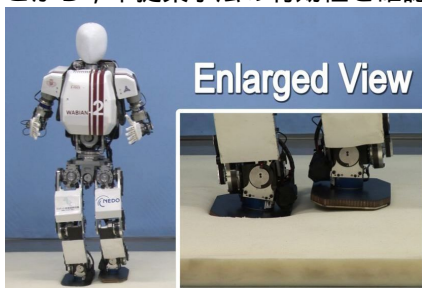


図1 軟弱路面での歩行実験

##### (3) 水平面と前額面における人間の歩行運動が模擬可能な下腿機構

開発した下腿機構を用いることで、歩隔90[mm]、足角12[deg]での歩行を実現した。さらに、歩行周期を0.6[s/step]と人間と同程度に短くすることで、重心の左右動揺が34[mm]となり、人間の重心の左右動揺と同程度となることが確認できた。

##### (4) 人間の足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構

内側縦アーチの回転弾性を評価するために、圧縮試験機を用いて足部機構に圧縮荷重を加える実験を行った。その結果、第II相における回転弾性係数は365[Nm/rad]、第III相における回転弾性係数は456[Nm/rad]と目標

値に近い値を取ることができ、アーチ構造の機械的特性は十分に模擬できていることを確認した。

また、皮膚の機械的特性に関しては、人肌ゲル(超軟質ウレタン造形用樹脂)の厚みが6[mm]の時にせん断弾性係数の平均値は15.7[N/mm]であり、厚みが8[mm]のときは10.9[N/mm]であった。以上の結果から、厚み8[mm]の人肌ゲルがヒト足部の皮膚の機械的特性をよく模擬できることが確認できた。開発した足部機構を図2に示す。

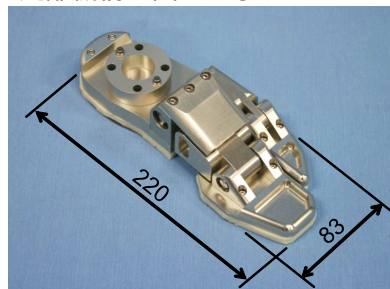


図2 人間の足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

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, 2015. (査読有)

Aiman Omer, Kenji Hashimoto, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Study of Bipedal Robot Walking Motion in Low Gravity: Investigation and Analysis,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11:139, 14 pages, 2014. (査読有)

DOI: 10.5772/58731

Kenji Hashimoto, Kentaro Hattori, Takuya Otani, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Foot Placement Modification for a Biped Humanoid Robot with Narrow Feet,” *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article ID 259570, 9 pages, 2014. (査読有)

DOI: 10.1155/2014/259570

Kenji Hashimoto, Yuki Takezaki, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Walking Stabilization Based on Gait Analysis for Biped Humanoid Robot,” *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 7, pp. 541-551, 2013. (査読有)

DOI: 10.1080/01691864.2013.777015

[学会発表](計24件)

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, Madrid, Spain, November, 2014.

Martim Brandão, Kenji Hashimoto, José Santos-Victor and Atsuo Takanishi, “Gait planning for biped locomotion on slippery terrain,” Proceedings of the 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 303-308, Madrid, Spain, November, 2014.

Martim Brandão, Ricardo Ferreira, Kenji Hashimoto, José Santos-Victor and Atsuo Takanishi, “On the formulation, performance and design choices of Cost-Curve Occupancy Grids for stereo-vision based 3D reconstruction,” Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1818-1823, Chicago, IL, USA, September, 2014.

橋本健二, 本橋弘光, 吉村勇希, 林憲玉, 高西淳夫, “ヒト足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構の開発,” 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1M3-05, 福岡県, 2014年9月.

Yukitoshi Minami, Przemyslaw Kryczka, Kenji Hashimoto, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Heel-contact Toe-off Walking Model Based on the Linear Inverted Pendulum,” Proceedings of the 5th IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, pp. 221-226, São Paulo, Brazil, August, 2014.

Kenji Hashimoto, Hyun-jin Kang, Hiromitsu Motohashi, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Terrain-Adaptive Biped Walking Control Using Three-point Contact Foot Mechanism Detectable Ground Surface,” Proceedings of 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practical of Robots and Manipulators, pp. 255-263, Moscow, Russia, June, 2014.

Gautam Narang, Weisheng Kong, Xu Pu, Arjun Narang, Soumya Singh, Kenji Hashimoto, Massimiliano Zecca, Atsuo Takanishi, “Comparison of Bipedal Humanoid Walking with Human Being Using Inertial Measurement Units and Force-Torque Sensors,” Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 198-203, Kobe, Japan, December, 2013.

Przemyslaw Kryczka, Yukitoshi Minami Shiguematsu, Petar Kormushev, Kenji Hashimoto, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, “Towards Dynamically Consistent

Real-time Gait Pattern Generation for Full-size Humanoid Robots,” Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1408-1413, Shenzhen, China, December, 2013.

Martim Brandão, Ricardo Ferreira, Kenji Hashimoto, José Santos-Victor and Atsuo Takanishi, “Integrating the whole cost-curve of stereo into occupancy grids,” Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4681-4686, Tokyo, Japan, November, 2013.

Przemyslaw Kryczka, Petar Kormushev, Kenji Hashimoto, Hun-Ok Lim, Nikos G. Tsagarakis, Darwin G. Caldwell and Atsuo Takanishi, “Hybrid gait pattern generator capable of rapid and dynamically consistent pattern regeneration,” Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp. 475-480, Jeju, Korea, October, 2013.

Martim Brandão, Lorenzo Jamone, Przemyslaw Kryczka, Nobutsuna Endo, Kenji Hashimoto and Atsuo Takanishi, “Reaching for the unreachable: integration of locomotion and whole-body movements for extended visually guided reaching,” Proceedings of the 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 28-33, Atlanta, GA, October, 2013.

Martim Brandão, Ricardo Ferreira, Kenji Hashimoto, José Santos-Victor and Atsuo Takanishi, “Active Gaze Strategy for Reducing Map Uncertainty along a Path,” Proceedings of the 3rd IFTOMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, pp. 455-466, Singapore, October, 2013.

Przemyslaw Kryczka, 南重松行紀, 大谷拓也, 橋本健二, Egidio Falotico, Cecilia Laschi, Paolo Dario, Alain Berthoz, 林憲玉, 高西淳夫, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発(第17報:歩行中の視線安定を維持する頭部姿勢安定化モデル),” 日本ロボット学会第31回学術講演会予稿集, 1C1-01, 東京都, 2013年9月.

Przemyslaw Kryczka, Kenji Hashimoto, Atsuo Takanishi, Hun-ok Lim, Peter Kormushev, Nikos G. Tsagarakis and Darwin G. Caldwell, “Walking despite the Passive Compliance: Techniques for Using Conventional Pattern Generators to Control Intrinsically Compliant Humanoid Robots,” Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots, pp. 487-494, Sydney, Australia, July, 2013.

Kenji Hashimoto, Egidio Falotico, Atsuo Takanishi, Cecilia Laschi, Paolo Dario and Alain Berthoz, "Human Balance Control during Walking on Compliant Ground," Proceedings of the 2nd Joint World Congress ISPGR / Gait & Mental Function, P3-O-238, Akita, Japan, June, 2013.

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IFToMM会議シンポジウム前刷集(第19回) pp. 51-54, 東京都, 2013年6月.

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.

Kenji Hashimoto, Hiromitsu Motohashi, Takamichi Takashima, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, "Shoes-wearable Foot Mechanism Mimicking Characteristics of Human's Foot Arch and Skin," Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 678-683, Karlsruhe, Germany, May, 2013.

Takuya Otani, Akihiro Iizuka, Daiki Takamoto, Hiromitsu Motohashi, Tatsuhiko Kishi, Przemyslaw Kryczka, Nobutsuna Endo, Lorenzo Jamone, Kenji Hashimoto, Takamichi Takashima, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, "New Shank Mechanism for Humanoid Robot Mimicking Human-like Walking in Horizontal and Frontal Plane," Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 659-664, Karlsruhe, Germany, May, 2013.

Przemyslaw Kryczka, Egidio Falotico, Kenji Hashimoto, Hun-ok Lim, Atsuo Takanishi, Cecilia Laschi, Paolo Dario and Alain Berthoz, "A robotic implementation of a bio-inspired head motion stabilization model on a humanoid platform," Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2076-2081, Vilamoura, Algarve, Portugal, October, 2012.

- ②1 蒲旭, 本橋弘光, 大谷拓也, 瓜生和寛, 八原昌亨, クリチェカ・プシエミスワフ, リン・ゾウウ, ピーターセン・クラウド, 橋本健二, セッサ・サルバトーレ, ゼッカ・マッシミリアーノ, 高西淳夫, "超小型無線慣性センサユニット WB-4 の開発 - 2足ヒューマノイドロボットの脚部姿勢とたわみ量測定 - ," 第13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予稿集, pp. 2798-2803, 福岡県, 2012年12月.

- ②2 Kenji Hashimoto, Hyun-jin Kang, Masashi Nakamura, Egidio Falotico, Hun-ok Lim, Atsuo Takanishi, Cecilia Laschi, Paolo Dario and Alain Berthoz, "Realization of Biped Walking on Soft Ground with Stabilization Control Based on Gait Analysis," Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2064-2069, Vilamoura, Algarve, Portugal, October, 2012.

- ②3 橋本健二, 姜賢珍, 中村真志, 西川浩介, Egidio Falotico, Cecilia Laschi, Paolo Dario, Alain Berthoz, 林憲玉, 高西淳夫, "人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発(第15報:歩行解析に基づく軟弱路面歩行安定化制御と軟弱路面での歩行実現)," 日本ロボット学会第30回記念学術講演会予稿集, 4K1-5, 北海道, 2012年9月.

- ②4 飯塚晃弘, 高本大己, 大谷拓也, 本橋弘光, Przemyslaw Kryczka, 遠藤信綱, 橋本健二, 高嶋孝倫, 林憲玉, 高西淳夫, "人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発(第16報:水平面と前額面における人間の歩行運動が模擬可能な下腿機構)," 日本ロボット学会第30回記念学術講演会予稿集, 4K1-6, 北海道, 2012年9月.

#### [図書](計1件)

Kenji Hashimoto, Hideki Kondo, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, "Motion and Operation Planning of Robotic Systems: Background and Practical Approaches," pp. 417-438, Springer International Publishing, 2015.

#### [その他]

ホームページ等

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

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

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

##### (2) 研究分担者

林 憲玉 (LIM, Hun-ok)  
神奈川大学・工学部・教授  
研究者番号: 10318769

橋本 健二 (HASHIMOTO, Kenji)  
早稲田大学・理工学術院・講師  
研究者番号: 10449340