

## ロボティック・センス・オブ・ムーブメント

研究代表者 高西 淳夫  
(理工学術院・総合機械工学科・教授)

### 1. 研究課題

本研究では、外見だけでなく内面の運動制御系についても人体運動が模擬可能な2足ヒューマノイド・ロボットの開発を通して、ヒト感覚・運動機能を解明することを目的とする。

これまでに2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2を開発し、ヒトと同じく骨盤の回旋運動を巧みに利用することで、従来の2足歩行ロボットでは難しかった膝関節を伸ばした歩行を実現してきた。しかし、歩行の様子はヒトと同じように見えるが、ロボットの運動制御系はヒトの動きを参考にしていなかった。そこで本研究では、ヒトの歩行解析を通してバランス制御を開発することで、ロボット内面の運動制御系もヒトに近づけることを目指す。本年度は、特に軟弱路面において歩行解析を行い、それに基づきロボットのバランス制御を開発することで、軟弱路面でのロボットの歩行能力向上を目指した。

### 2. 主な研究成果

#### 2.1 軟弱路面での歩行解析

三次元動作分析装置 VICON 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  $23.2 \pm 0.70$  歳、平均身長  $1670 \pm 42$ [mm]、平均体重  $61.0 \pm 3.5$ [kg]である。被験者が歩行す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： $150 \pm 30$ [kg/m<sup>3</sup>]）と極めて柔らかいウレタンスポンジ（密度： $22 \pm 2$ [kg/m<sup>3</sup>]）の2種類を用意した。ウレタンスポンジの大きさは長さ4000[mm]×幅1000[mm]×高さ100[mm]である。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。

赤外線反射マーカについては Plug-in gait model の定める39箇所貼付し計測を行った。計測項目としては、足先軌跡（歩幅、歩隔、足上げ高さ）と重心軌跡に注目した。一被験者あたりの試行回数は5回である。計測の結果、足先軌跡と重心軌跡についてそれぞれ以下のような2つの知見を得た。

1つ目は、「軟弱路面では足上げ高さが高くなる傾向がある」ことである。これは先行研究においても報告されているが、足上げ高さを高くすることで軟弱路面との干渉を防いでいると考えられる。歩幅と歩隔については剛体路面と軟弱路面において有意な差は見られなかった。

2つ目は「剛体路面と軟弱路面において、重心の左右動揺に有意な差がない」ことである。このことから、人間は軟弱路面歩行時に重心位置を左右方向に安定化しているものと考えられる。重心の左右動揺を安定化する方法としては、着地位置を変更したり、足関節や股関節で補償トルクを発生したりなど様々考えられるが、歩隔に有意差がなかったため、下肢で補償トルクを発生し、床反力を調整しているものと考えられる。

以上の歩行解析結果から、まず足上げ高さに関しては、オフラインで歩行パターンを生成する際に、足上げ高さを高くすることとした。具体的には、剛体路面歩行時には約 30[mm]であるが、軟弱路面歩行時の足上げ高さを 50[mm]と高くした。人間の足上げ高さは実際にはこれよりも大きいですが、ロボットの関節可動角や角速度の制約から 50[mm]に制限している。また 2 つ目の知見に基づき、重心位置を安定化する制御法を開発することとした。

## 2.2 歩行解析に基づく軟弱路面歩行安定化制御

歩行解析から得られた知見をもとに、軟弱路面における歩行安定化制御を考案した。これは次の 2 つのポイントからなる。

- 片脚支持期には足関節でトルクを発生し、重心位置を安定化する。
- 両脚支持期には各足の床反力を目標床反力に収束させるように脚長を修正し、重心位置を安定化する。

提案手法を評価するために、本制御法を 2 足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R 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する。まず、剛体路面と軟弱路面での重心の動揺を比較するために、それぞれの路面において足踏み動作実験を行った。実験の結果、図 1 に示すように軟弱路面において足踏み動作に成功した。この際の歩行周期は  $0.9[\text{s}/\text{step}]$  である。図 2 に左右方向の重心動揺の全振幅を示すが、剛体路面歩行時と軟弱路面歩行時で有意差がないことから、軟弱路面歩行時に重心位置が安定化されていることが確認できる。以上の実験結果より、本提案手法の有効性が確認された。

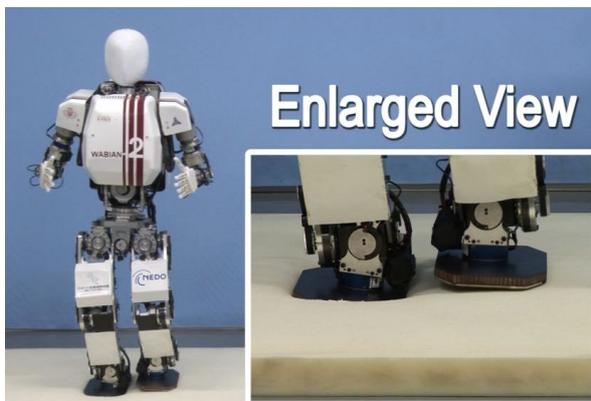


Fig. 1 軟弱路面での足踏み動作実験

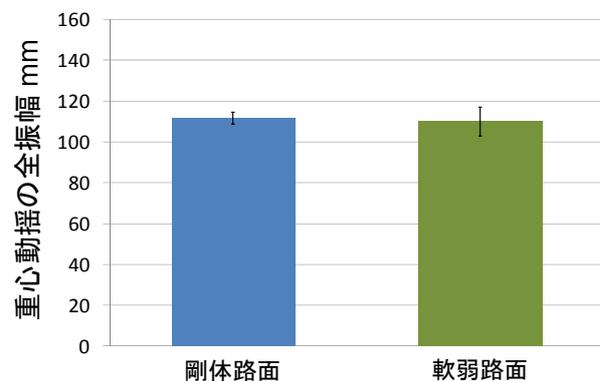


Fig. 2 左右方向の重心動揺の全振幅

## 3. 共同研究者

橋本 健二 (理工学術院・次席研究員)

Aiman Musa Mohamed Omer (理工学術院・助教)

林 憲玉 (理工研・客員教授)

## 4. 研究業績

### 4.1 学術論文

- 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, January, 2014.

#### 4.2 総説・著書

#### 4.3 招待講演

- Atsuo Takanishi, “Ethical and Social Implications of Humanoid Robotics,” International Conference: Going Beyond the Laboratory - Ethical and Societal Challenges for Robotics (GBTL 2014), Hanse Wissenschaftskolleg (HWK) - Institute for Advanced Study, Delmenhorst, Germany, February 14th, 2014.

#### 4.4 受賞・表彰

- Highly Commented Paper Award, 3rd IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, Singapore, October, 2013.

#### 4.5 学会および社会的活動

- 日本ロボット学会副会長, 2013.
- International Program Committee, “ISR 2013: 44th International Symposium on Robotics,” Seoul, Korea, October, 2013.

#### 4.6 国際会議における発表

- 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 (ROBIO2013), pp. 1408-1413, Shenzhen, China, December, 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.
- 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, Tatsuhiro 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.

### 5. 研究活動の課題と展望

本年度は、脚接地面が変形する軟弱路面において歩行解析を行い、それに基づきバランス制御を開発することで、ロボット内面の運動制御系もヒトに近づけることを目指した。その結果、実機での実験を通して提案手法の有効性を確認した。2014年度は、歩行運動だけでなく走行運動についても解析を行い、よりダイナミックな運動の模擬を目指す。