

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420215

研究課題名(和文) 歩行機の振動特性を巧みに利用した適応力の高い3次元2足動歩行の実現

研究課題名(英文) Development of adaptive and dynamic 3-D bipedal walking using oscillation property of body

研究代表者

衣笠 哲也 (Kinugasa, Tetsuya)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：20321474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、歩行機の身体的特徴である振動特性に注目し、これを巧みに利用しながら3次元2足動歩行を実現することを目的とする。2足歩行の手法は、動力を一切用いず、重力と身体的特徴および路面との相互作用で実現される受動的歩行を規範とするもの、数理モデルに基づき、何らかの方法で予め与えられた関節軌道に追従するというものである。本研究では、強制的な膝の伸縮によって3次元2足歩行が励起されるという現象を利用し、これにバックドライバブルな股関節トルクを導入し、足裏の接地感覚情報をフィードバックすることで左右の歩幅を意図的に変化させ旋回することおよび路面の微妙な凹凸への適応などを実現した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a three-dimensional dynamic biped walking using frequency characteristics of the biped body. Knee joints generates a sinusoidal oscillation, which excites bipedal walking gait. The oscillation is a kind of central pattern generator without any sensory feedback signals. An input torque from the hip joints are given with respect to the sensory feedback obtained by the ground contact. The sensory feedback of the ground contact synchronizes the hip torque with the knee oscillation. An ankle joint comprised a spherical joint and coil springs; thus the ankle was passive. Therefore, the bipedal gait was achieved by not only the knee oscillation and the hip torque, but also the frequency property of the biped body. From some experimental tests, the bipedal gait had a adaptive tendency toward a slight undulation of the ground surface. The biped could turn when we control the magnitude of the hip torque for the left and right hip joints.

研究分野：ロボティクス

キーワード：受動歩行 3次元2足動歩行

1. 研究開始当初の背景

生物が状況変化に対して身体的特性を巧く利用しながら適応することは知能の興味深い特徴の一つである。人の歩行もまた身体の物理的特性を利用して効率的な移動を実現していると考えられる。人の歩行に近いと考えられる歩行方法として受動歩行[1]が知られている。受動歩行のメカニズムに基づく歩行は非常に効率的で、しかも歩行機の物理特性に合わせた自然な歩容を達成することが知られている。しかし3次元2足受動歩行を実現することそのものが難しく、路面の凹凸をはじめとする外乱に対する脆弱性が顕著である。これに対して、足裏接地情報などの感覚フィードバックを伴うCPG (Central Pattern Generator) によって歩行を励起し環境適応能力を向上させる手法が注目され多くの成果を得ている[2]。最近では試行錯誤的に与えられていたCPGの感覚フィードバックゲインを強化学習することによって2足歩行が実現されている。

しかし、CPGを用いる手法の多くは股関節の軌道を直接目標として追従制御するため、たとえ学習手法を導入したとしても歩行機の物理特性に適した歩容を獲得ことはできない。なぜなら、股関節の直接的な追従制御は歩行機の振動特性などを矯正するため、歩行機の持つ物理特性にあわせて歩容を変化させるという受動歩行にみられるような重要な性質を失うからである。したがって、CPGによって周期的な力やトルクを関節に与える、もしくは、蹴り動作のように足関節や膝関節を周期運動させることで歩行機の特性をうまく利用した歩行を実現しなければ歩行機の物理特性にあった自然な歩容は得られないものとする。ところが、股関節の軌道追従を行わない場合は、平面拘束された実機で検証されるのみであり、しかも、歩行の物理特性はあくまで関節の受動的な性質を結果として利用しているのみで、これを積極的に利用するものはなかった。

2. 研究の目的

以上の背景に基づいて、本研究は2足歩行動作において歩行機の身体特性の一つである振動特性を巧く利用し、かつ路面の凹凸などに対する適応力を与えることを目的とする。具体的には、これまでの研究成果であるフィードフォワード的なCPGである膝関節の周期的蹴り動作により身体特性に合わせて励起される3次元2足動歩行に対して、足裏接地情報の感覚フィードバックと能動股関節を導入することで歩行機に環境適応力を与える。

3. 研究の方法

身体の振動特性を活かした歩行を励起するためには何らかの振動を関節で発生させる必要がある。我々は、これまでの研究成果である伸縮脚に強制振動を与えることで3

次元2足動歩行を励起する手法を用いる。この手法は上述した軌道追従に基づくCPGを用いるものであるが、膝以外の関節である足関節はバネにより受動的に支持するものとし、股関節は自由振動させる。したがって、歩行そのものは身体の力学特性に合わせて励起されるため、膝の振動数や振幅を変化させると歩容も変化する。つまり、次式で表される歩行リズムを生成する振動子として膝の伸縮を用いることになる。

$$\dot{\zeta} = \omega \quad (1)$$

$$d_{ai} = A \sin\{\zeta - (i - 1)\pi\} + d_0 \quad (2)$$

ただし、 $i = 1, 2$ で左右を表し、 ω は膝伸縮の角振動数、 d_{ai} は膝の目標変位、 d_0 は振動中心、 A は膝の振幅を表している。歩行機はこの振動に合わせて歩容を生成するため膝の振動自体は定常波であり位相のリセットなどを必要としない。軌道の追従には以下のPD制御を用いている。

$$u_{ki} = -K_p(d_i - d_{ai}) - K_d(\dot{d}_i - \dot{d}_{ai}) \quad (3)$$

ただし、 u_{ki} は膝への入力、 d_i は膝の変位、 K_p と K_d はPD制御の比例ゲインと微分ゲインである。本課題では、この手法によって得られる歩容において足裏圧力中心軌跡が8ノ字を描くことも確認している (Fig. 1)。この軌跡は3次元受動歩行でも確認されていることから、膝の伸縮による歩行が受動歩行の特徴を継承していることを意味しているものとする。

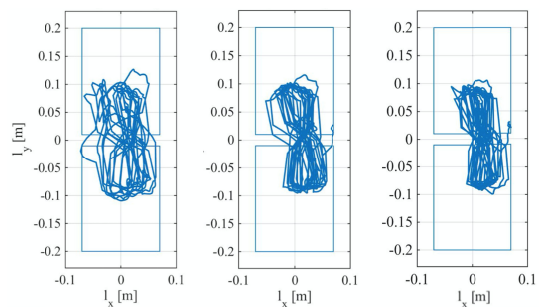


Fig. 1 '8' shape pattern of CoP trajectories

さらに、バックドライバビリティの高いダイレクトドライブ(DD)モータを股関節に導入することで脚の自由振動と振り出し動作を実現する。また、股関節トルクを制御するために、圧力センサを足裏に取り付け接地情報をフィードバックする。具体的には次式によって足裏接地感覚をフィードバックしDDモータによって振り出し動作を行う。

$$u_{hi} = T_i(f_i) - K_{hp}(q_{ai} - q_i) - K_{np}(\dot{q}_i - \dot{q}_{ai}) \quad (4)$$

$$T_i(f_i) = T, \text{ if } f_i > f_{i_threshold}$$

$$T_i(f_i) = 0, \text{ if } f_i < f_{i_threshold} \quad (5)$$

ただし、 u_{hi} は股関節トルク、 f_i は足裏接地圧力、 $T_i(f_i)$ は足裏接地感覚に基づくDDモータへの振り出しトルク、 q_i は股関節角度、 q_{di} は胴体の目標姿勢、 K_{hp} と K_{hd} はPD制御の比例ゲインと微分ゲインである。胴体の目標姿勢は両脚の中心としている。

4. 研究成果

Fig. 2 に研究課題によって実現された3次元2足歩行機RW06を示す。また、Table 1に総重量などの基本的な仕様を示す。

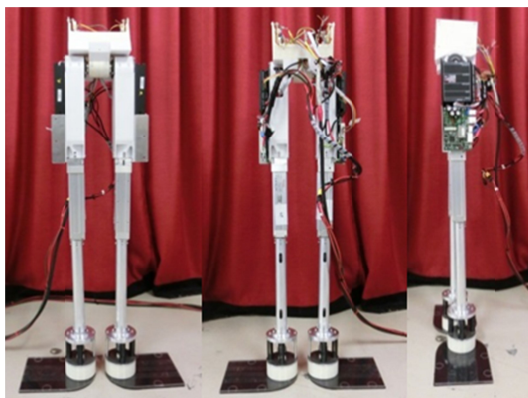


Fig. 2 RW06 frontal view (left), rear view (center), left side view (right)

Table 1 Specification of RW06

Specification	
Total mass	6.4 [kg]
Height	900 [mm]
CoG Position from the ground	450 [mm]
Natural freq. of swing leg	4.3 [rad/s]
Natural freq. (roll axis)	5.1 [rad/s]

股関節トルクを発生させるために Fig. 3 左に示す DD モータを用いている。DD モータはマイクロテックラボラトリー株式会社製 MDH-4012 (瞬時最大トルク 0.6 [Nm]) である。この DD モータはバックドライバピリティが高く、股関節の自由振動を実現しながら適切な大きさのトルクを印加できるという筋肉と類似した機能を再現できる。そのため、従来の3次元2足歩行機に見られる角度制御に基づいた軌道追従ではなく、トルクベースの制御が可能となる。また、これまでに実現されている空気圧人工筋などを用いる場合に比べ高精度に出力トルクを制御することが可能である。具体的には(4)式および(5)式で表される制御則により Fig. 3 右に示す足裏の圧力センサから得られる接地感覚情報

を用いて感覚フィードバックを行い股関節に取り付けた DD モータに出力を与える。RW06 には左右の股関節に1つずつ、計2個の DD モータが取り付けられている。

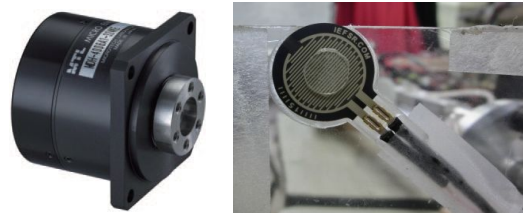


Fig. 3 Direct Drive Motor (left) and pressure sensor (right)

RW06 は膝の振動によって歩行が励起されるそのため、RW06 の振動特性を予め計測しておくことが歩行実現のためには肝要である。そこで、遊脚と歩行機のロール軸回りの固有振動数を計測した。その結果、遊脚は固有周期が 1.47 [s] で角振動数が 0.68 [Hz] で、ロール軸回りの固有周期が 1.25[s] で固有角振動数が 0.81[Hz] となった。一歩あたりの時間(ステップ時間)は遊脚で 0.74[s]、歩行機のロール軸回りで 0.63 秒である。この結果から、ロール軸回りの振動数付近もしくは若干速い振動数で膝を振動させると歩行が励起されやすくなる。Fig. 4 に振動数 1.2 [Hz]、振幅 5.0 [mm] とした場合の歩行の様子を連続写真を示す。

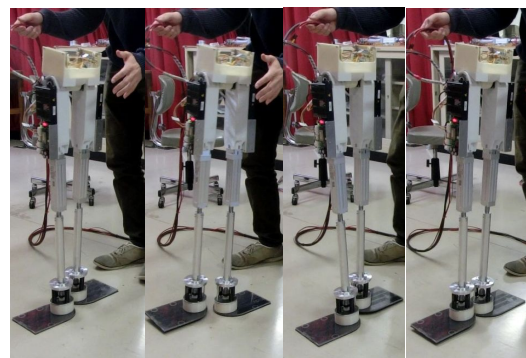


Fig. 4 Walking gait of RW06

次に、膝の振動数を 1.0 [Hz]、振幅 8 [mm] で股関節の振り出し指令を 0V (したがって感覚フィードバックに基づく遊脚の振り出しは行わない) として歩行させた結果を Fig. 5 に示す。この図からわかるように、歩幅が大きく増減するようにはあるが歩行機は前進していることがわかる。このばらつきは床面の微妙な凹凸によって遊脚の振り出しが大きく影響を受けていることが原因である。特に、歩幅が大きくなった後に極端に減少するという現象が確認できる。

Fig. 6 に振り出し指令を左 2V、右 3.5V として歩行させた結果を示す。左右の指令値が

異なるのはRW06が右に曲がる傾向を持つため、なるべく直進するように設定する必要からである。この場合、歩幅は両脚支持期における両脚間角度(ステップ角度)でおよそ 7° ~ 10° と安定している。特に 10° を越えて大きく振り出した直後も極端に歩幅が減少することはない。他の実験でもある程度の変動はあるが同様の傾向を示した。また、Fig. 5とFig. 6を比較すると、振り出しトルクを印可した場合の歩幅がばらつかない傾向を確認することができる。このことから、足裏接地情報に基づいて振り出しトルクを与えると床面の微妙な凹凸に対してある程度適応的な歩容が得られる傾向を示すことがわかる。この歩幅が安定化する傾向はCPG手法などと異なり意図的に設計できるものではなく、興味深い現象である。安定化原理については今後詳細に解析する必要がある。

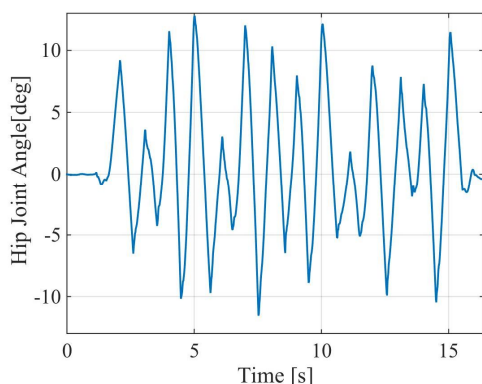


Fig. 5 Hip joint angle (input voltage for Left and right DD motors: 0V)

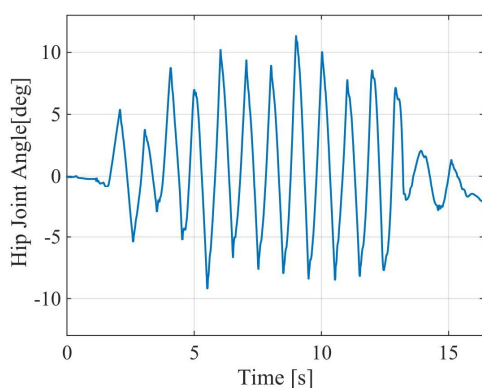


Fig. 6 Hip joint angle (input voltage for Left and right DD motors: 2V and 3.5V, respectively)

次に、片側の股関節にのみ振り出しトルクを設定し旋回動作の可能性について検討する。実験は左右の股関節振り出しトルクを条件1として左0V右5V (Fig. 7)、条件2として左5V右0V (Fig. 8)としておこなった。両図からわかるように振り出しトルクを印可した脚が大きく振り出されていることが確認できる。RW06の歩容は、左右の脚や足の

取付誤差によって右方向へ曲がる傾向を持つ。そのため、右脚を振り出す条件は直進し、左脚を振り出すとき大きく右に曲がる傾向を示した。

以上の結果から、膝の伸縮と足裏接地感覚フィードバックおよび股関節振り出しによる3次元2足動歩行が実現された。また、感覚フィードバックに基づく股関節振り出しを組み合わせることで歩容の適応的な傾向が確認されると共に、左右脚の歩幅を変化させることで旋回動作を実現できることを示した。これらの歩容は受動歩行を実現する歩行機の身体構造を継承する形で設計することで身体の動力学特性を巧く利用しながら実現される点が重要である。さらに、一般的に、3次元2足受動歩行は路面の凹凸などの軽微な外乱にも弱く、受動歩行に基づく能動的2足動歩行がこのようなある程度の適応性や旋回動作を可能とする点は重要な結果であるものとする。今後の課題として、振り出しトルクの増大とトルクの連続的な制御、適応的歩容の解析等が挙げられる。

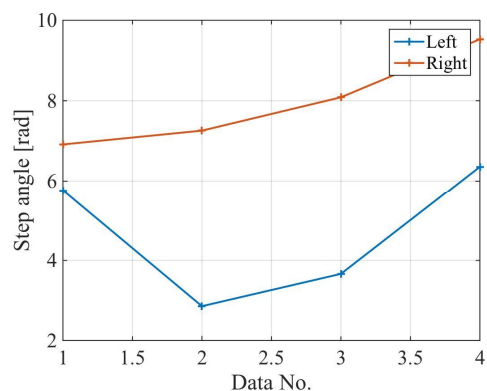


Fig. 7 Step angle (input voltage for Left DD motor: 0V, and for Right DD motor: 5V)

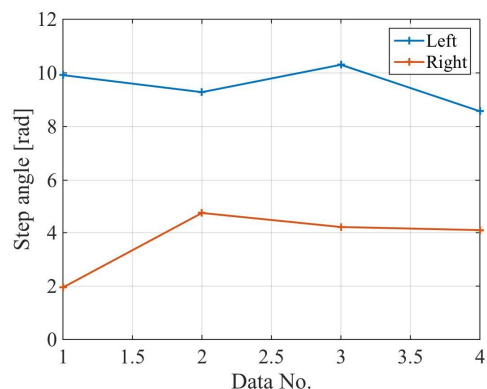


Fig. 8 Step angle (input voltage for Left DD motor: 5V, and for Right DD motor: 0V)

参考文献

- [1] T. McGeer, "Passive dynamic walking," Intl. J of Robotics Research, Vol.9, No.2, 62-82,

1990

- [2] G. Taga, et al., "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biological Cybernetics, Vol.65, 147-159, 1991

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2件)

1. T. Kinugasa, K. Ando, S. Fujimoto, K. Yoshida and M. Iribe, Development of a three-dimensional dynamic biped walking via the oscillation of telescopic knee joint and its gait analysis, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, ISSN (Print): 2289-4659; e-ISSN: 2231-8380; Volume 9, pp. 1529-1537, December 2015
2. T. Kinugasa, T. Ito, H. Kitamura, K. Ando, S. Fujimoto, K. Yoshida, M. Iribe, 3D Dynamic Biped Walker with Flat Feet and Ankle Springs: Passive Gait Analysis and Extension to Active Walking, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.27 No.4, pp. 444 - 452, 2015

[学会発表](計10件)

1. 多田智貴, 土出裕輝, 衣笠哲也, 吉田浩治, 林良太, 藤本真作, 膝の伸縮と股関節トルクを用いた3次元2足歩行機の開発, 日本機械学会中国四国支部講演会, 2016
2. T. Kinugasa, K. Ando, Y. Onishi, K. Yoshida, S. Fujimoto, M. Okugawa, M. Kurisu, Y. Katayama, M. Iribe, Development of 3D Dynamic Walker RW05 based on Passive Dynamic Walking, Proceedings of Intl. Symposium on Artificial Life and Robotics 2016.
3. 安藤和宏, 大西勇太, 衣笠哲也, 吉田浩治, 藤本真作, 膝の伸縮を用いた3次元2足歩行機の開発, 無線化した新しい歩行機の実現と歩容解析, 日本機械学会中国四国支部講演会, 2016.
4. 大西勇太, 安藤和宏, 衣笠哲也, 吉田浩治, 藤本真作, 膝の伸縮を用いた3次元2足歩行機の開発-柔軟変位センサによる歩行データの取得と解析, 日本機械学会中国四国支部講演会, 2016.
5. 安藤和宏, 大西勇太, 衣笠哲也, 吉田浩治, 藤本真作, 膝の伸縮を用いた3次元2足歩行機の開発, 第24回計測自動制御学科中国支部講演会, 2016.
6. T. Kinugasa, K. Ando, S. Fujimoto, K. Yoshida and M. Iribe, Development of a three-dimensional dynamic biped walking via the oscillation of telescopic knee joint and its gait analysis, Proc. of Intl. Conf. on Mechanical engineering research (ICMER), 2015

7. 伊藤崇志, 安藤和宏, 衣笠哲也, 吉田浩治, 藤本真作, 膝の伸縮を用いた3次元2足歩行機の実現-受動歩行機に基づく歩行機設計と単純な正弦波による歩行の励起析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.
8. 安藤和宏, 北村拓明, 衣笠哲也, 藤本真作, 吉田浩治, 膝の伸縮を用いた3次元2足歩行機の実現とその歩行特性の解析, 第23回計測自動制御学科中国支部講演会, 2015.
9. T. Kinugasa, Frequency Response of Three Dimensional Dynamic Biped Walking: Walking Excitation, Dynamic Walking 2015.
10. T. Kinugasa, T. Ito, S. Fujimoto, K. Yoshida, M. Iribe, 3D Dynamic Biped Walker 'RW04' with Telescopic Knees, Flat Feet, and Ankle Springs, 2014 Intl. Symposium on Flexible Automation, 2014

[図書](計1件)

衣笠哲也, 大須賀公一, 土師貴史, 受動歩行ロボットのすすめ, コロナ社, 2016/10/20

[その他]

ホームページ

岡山理科大学工学部機械システム工学科ロボット工学研究室

<http://www.mech.ous.ac.jp/robotics>

6. 研究組織

(1)研究代表者

衣笠 哲也 (KINUGASA, Tetsuya)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号: 20321474

(2)研究分担者

吉田 浩治 (YOSHIDA, Koji)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号: 00254433
栗栖 正充 (KURISU, Masamitsu)
東京電機大学・工学部・教授
研究者番号: 30287429
奥川 雅之 (OKUGASA, Masayuki)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号: 502970747

(3)連携研究者

入部 正継 (IRIBE, Masatsugu)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号: 60469228

(4)研究協力者

藤本 真作 (FUJIMOTO, Shinsaku)
岡山理科大学・工学部・教授