

## 周期入力による二足準受動歩行ロボットの安定化制御

蜂谷 正泰<sup>1†</sup>, 鈴木 聡一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北見工業大学大学院

<sup>2</sup>北見工業大学 工学部 機械システム工学科

**要旨** 近年, 実用化が進められているヒューマノイドの多くはフィードバック閉回路により制御されている. このような制御手法は軌道計画が複雑なうえ, エネルギー効率や任意環境への適応性等に多くの問題を抱えている. これらの問題の解決策として受動歩行が注目されているが, その歩行の安定化理論は未だ明らかにされていない. 本研究では, ヒトの歩行解析結果を基にヒトと同様に三次元的な体重移動が可能な足部を有する受動歩行ロボットを実際に設計・製作し, 実験的に歩行の安定化条件を検討した. さらに, 歩行路性状が変化する任意の環境下においても常に安定した歩容を獲得するため, 強制引き込み現象を利用した準受動歩行ロボットをモデル化し, その制御手法について解析的に検討した.

**キーワード**: 二足準受動歩行, 安定化, 周期入力, 引き込み現象, van der Pol 方程式

### 1. 緒言

現在, 実用化されているロボットの多くは各関節に設置されたアクチュエータと減速機で駆動され, それぞれ独立したフィードバック閉回路により制御されている. このような制御手法は現実的に整合性のある軌道計画に複雑な計算が必要なうえ, エネルギー効率や任意環境への適応性等に多くの問題を抱えている. 特に近年実用化が進められているヒューマノイドは, 関節自由度が多く動作環境も多様なため, これらの問題が及ぼす影響は大きい. この問題解決の一方策として, 受動歩行の利用が注目されつつある. 受動歩行は基本的に各関節に作用する重力や慣性力による効果で, 駆動力を直接加えることなく傾斜路などを歩行するものであり, ロボット本体の設計と動作環境に応じて自動的に歩容が生成されるため, 高効率かつ高い環境適応性が期待できる. しかしながら, 受動歩行に関して様々な研究はなされているものの<sup>1~5)</sup>, 受動歩行の安定化理論は未だ明らかにされていないのが現状である.

著者らは, 受動歩行の特徴をヒューマノイドへの応用のみならず, 義足などヒトが装着する福祉機器の開発へ応用することを目的とし, ヒトの歩行動作を規範とした二足受動歩行ロボットについて検討してきた<sup>6)</sup>. 実際にロボットを設計・製作し歩行実験を行なった結果, 遊脚の振子運動周期と立脚切り替え運動周期を一致させることが歩行の安

定化に重要であることを明らかにした. さらに, 膝および足関節角度の調整で体軸の角度と歩幅を歩行路の斜度に対応させると, 斜度変化に適応した歩行の安定化が可能であることを明らかにした<sup>7)</sup>. しかしながら, この調整は斜度にあわせて手動で行う必要があった. 本研究では, ロボット自らが任意の歩行路斜度において安定した歩容を自動的に獲得することを目的とする. 本報では, 強制引き込み現象を利用した振動子の制御で, 立脚切り替え運動周期を常に遊脚の振子運動周期に同期させることが可能な準受動歩行ロボットをモデル化し, その制御手法について数値解析により検討する.

### 2. 受動歩行の安定化条件

受動歩行ロボットの安定化条件を見出すため, 図1に示すロボットを用いて歩行実験を行なった結果, 連続した歩容が得られた場合は歩行周期は一定となり, 遊脚の振子運動の周期とほぼ一致することが明らかになった<sup>6)</sup>. 遊脚の振子運動周期はロボットの設計で決定するので, この条件に立脚切り替え運動周期を適合させるためには, 遊脚の振子運動に同期するように立脚切り替え運動周期を調整する必要がある. 立脚の切り替え運動周期は図2で示すように矩形ブロックのロッキング運動に簡略化すると

$$T_1 = \frac{4}{\Omega_1} \cosh^{-1} \left( \frac{\phi}{\theta - \phi} \right) = \frac{4}{\Omega_1} \cosh^{-1} \left[ \frac{1}{1 - \frac{\theta}{\phi}} \right] \quad (1)$$

ただし,  $\Omega_1^2 = \frac{mgR}{I}$

2008年5月25日受付 2008年7月25日受理

<sup>†</sup>〒090-8507 北海道北見市公園町165

北見工業大学工学部機械システム工学科

蜂谷 正泰

Tel: 0157-26-9243 Fax: 0157-23-9375

E-mail: dse07006@std.kitami-it.ac.jp

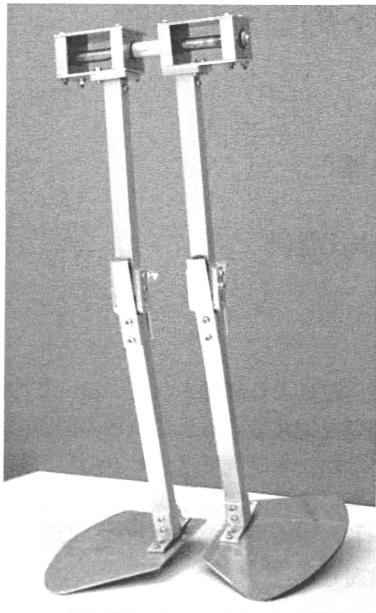


図1 二足受動歩行ロボット

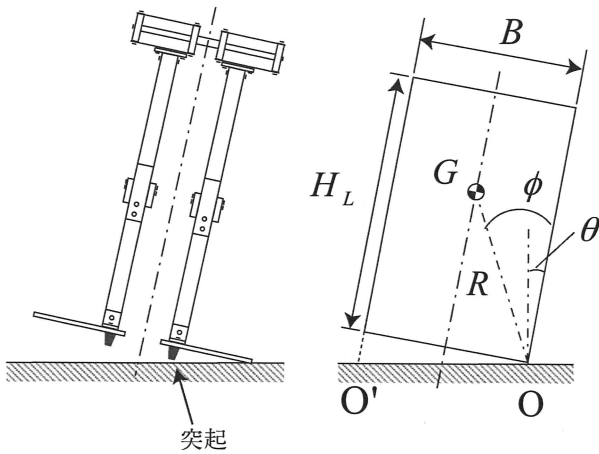


図2 立脚切り替え運動のモデル

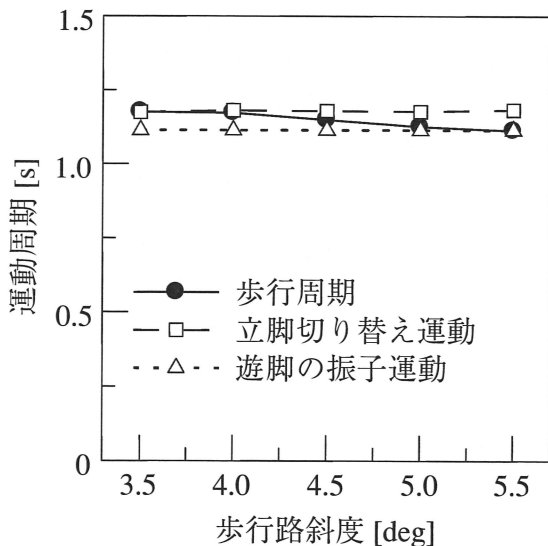


図3 安定歩行時の運動周期

となる. ここで,  $\theta_0$  [rad] はロボット初期傾斜角,  $\phi$  [rad] は重心角度,  $m$  [kg] はロボット質量,  $R$  [m] はロボット支点  $O(O')$  から重心までの距離,  $I$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] はロボットの支点周りの慣性モーメントである. 式 (1) から, 立脚の切り替え運動周期は初期傾斜角  $\theta = \theta_0$  [rad] によって変更可能である.

歩行路性状が一定の条件下では, 立脚切り替え運動周期を調整することで安定歩行が得られるが, その一方で, 歩行路の斜度が増加した場合, 歩幅が大きくなるとともに遊脚時間が遊脚の振り運動の二分の一周期よりも増大し, ロボットが転倒する現象が見られた. そこで遊脚時間を遊脚の振り運動の二分の一周期に一致させることを目的として, グローバル座標系におけるロボットの体軸の角度が斜度に関わりなく一定になるように膝および足関節角度を調整すると, 遊脚時間の変化が抑制され, 歩行の安定化条件に適合できることが明らかになった. その結果, 図3に示すように歩行路の斜度が増加しても安定した歩容を獲得できることが示された<sup>7)</sup>.

以上の検討から, 歩行路性状などの外的要因により歩調を変えざるを得ない状況下でも, 立脚切り替え運動周期を遊脚の振り運動周期に同期させることで, 安定した受動歩行を実現できる可能性がある.

### 3. 準受動歩行による安定化制御

#### 3.1 制御手法

歩行ロボットの現実的な動作環境を考慮すると, 斜度を含む歩行路性状の変化に応じた歩調の変化が予想され, 運動周期を実時間で調整する必要があると考えられる. そこで本報では, 準受動歩行により歩行路性状の変化に適応した歩行の安定化手法を検討する. 通常の受動歩行はポテンシャルエネルギーのみを利用して歩行するのに対し, 能動歩行と比較して少量のエネルギーの投入で脚部を直接駆動することなく制御された歩行を準受動歩行と呼ぶことにする. 周期運動の制御手法として, van der Pol 方程式を用いて強制引き込み現象を利用し, ロボットに周期入力をタイミングよく与えることで, 系全体のエネルギー増減により運動周期を制御する手法が提案されている<sup>8)</sup>. van der Pol 方程式は自励振動を表し, その振動は初期条件によらず, 非線形パラメータ  $\epsilon$  によってのみ一定の振動波形を生成する. よって, 一時的に外乱が発生しても元の振動波形に復元する. また, 周期的な外力の入力があれば, それに同期する性質がある. この同期現象は強制引き込み現象と呼ばれ, 周期的な外力がわずかに周期の異なる系の周期運動に影響を与え, 双方が同期する現象である. この手法を利用し, 遊脚の振り運動周期に合わせてロボットの立脚切り替え運動周期が制御できれば, 歩行路性状に適応して常に安定した歩行が可能になる. さらに, 傾斜路だけではなく, 平地での連続歩行にも期待できる. この制御手法の有効性を数値解析により検討する.



のように影響するかを検討した。その結果、入力位相を変化させた場合に立脚切り替え運動周期を自由に増減できることがわかった。さらに、図6に示すように、入力位相を立脚切り替え運動に対し  $\pi/2$  または  $-\pi/2$  に設定すると効果的に立脚切り替え運動周期を調節できることが明らかになった。そこでロボットの立脚切り替え運動に対し、設定した位相差で同期する振動子の目標軌道を算出する。振動子運動のタイミングは自励振動を表す van der Pol 方程式を利用して決定する。周期入力を与えた場合の van der Pol 方程式は

$$\ddot{y} - \epsilon(1 - y^2)\dot{y} + \Omega_2^2 y = Kx \quad (4)$$

となる。このとき van der Pol 方程式の自励角振動数を  $\Omega_2$ 、周期入力の角振動数を  $\omega$  とすると、係数  $K$  が十分に大きいとき、または  $\Omega_2 \approx \omega$  のときに強制引き込み現象によって van der Pol 方程式の解  $\dot{y}$  と入力  $x$  は同位相で、 $y$  は  $\pi/2$  [rad] の位相遅れで同期する性質がある。今回は van der Pol 方程式への入力  $x$  としてロボットの傾斜角度  $\theta$  を与え、振動子の回転角度を同期させることを考える。ロボットの立脚切り替え運動が

$$\theta = \alpha \cos(\omega t) \quad (5)$$

で運動するとき、振動子の回転角度は次式に従うとする。

$$\theta_w = \beta \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

ただし、 $\varphi$  はロボットの立脚切り替え運動に対する位相差を表す。式(6)を加法定理により展開すると、

$$\theta_w = \beta \{ \cos(\omega t) \cos \varphi - \sin(\omega t) \sin \varphi \} \quad (7)$$

と表せる。ここで、ロボットの傾斜角度  $\theta$  をセンシングし、ロボットと同期した van der Pol 方程式の解  $\dot{y}$ 、 $y$  を用いて周期変動する振動子の目標回転角度を次の式で与える。

$$\theta_w = \beta \left\{ \frac{1}{C_1} \dot{y} \cos \varphi - \frac{1}{C_2} y \sin \varphi \right\} \quad (8)$$

ただし、 $C_1$ 、 $C_2$  は  $\dot{y}$ 、 $y$  の振幅であり、式(8)により任意の位相差  $\varphi$  でロボットの立脚切り替え運動と同期した振動子回転角度の目標波形を生成できる。振幅  $\beta$  は、遊脚の振子運動の周期  $T_i$  と現在の立脚切り替え運動周期  $T_p$  から、

$$\beta = K_{pt}(T_i - T_p) + K_{dt}\dot{T} \quad (9)$$

と決定できる。 $\dot{T}$  は周期の変化率であり、 $\beta$  の変化に着目すると、 $T_p$  が  $T_i$  に近づくにつれて振動子の振幅が小さくなり、やがて一致すると振動子が停止し、ロボットは定常状態で運動すると考えられる。そして再び  $T_p$  と  $T_i$  の間に差が生じると、自動的に振動子が運動を開始し、ロボットの立脚切り替え運動を制御する。決定された  $\beta$  の符号により位相差  $\varphi$  の符号も変化し、立脚切り替え運動周期の増減制御は自動的に切り替わる。

### 3.5 P-D コントローラの性能評価

準受動歩行の安定化制御を行なうに際し、システムに存在する2つのP-Dコントローラの制御性能をそれぞれ評価する。はじめに振動子の目標軌道を生成する際のP-Dコントローラについて検証する。ロボットの立脚切り替え運動周期の初期設定を1[s]とし、目標とする運動周期を1[s]から0.1[s]ずつ大きくなるステップ関数として与え、それに追従するようにロボットの立脚切り替え運動周期を制御する。また、振動子の目標軌道の算出式(8)の位相差は最も効率よく立脚切り替え運動を制御できると考えられる  $\varphi = \pi/2$  に設定した。制御ゲイン  $K_{pt}$  および  $K_{dt}$  の調整による軌道の変化によって目標の立脚切り替え運動周期への追従性がどう変化するかを検証する。シミュレーション開始から10[s]後に制御を行なった場合の結果を図7ならびに図8に示す。これらの図は振動子の運動によって立脚切り替え運動周期が増加していく様子が示されている。図7のように比例ゲイン  $K_{pt}$  を三種類設定し、 $K_{dt} = 0$  とするとロボットの立脚切り替え運動周期は約3[s]で収束した。また、図8で示されるように、 $K_{pt} = 1.6$  に設定しを4種類設定すると、オーバーシュートに対する制御性能の改善が見られるが、収束性にはあまり違いが現れず、逆に転倒により制御不能となることがあった。以上の結果から、振動子の振幅決定に際しては  $K_{dt} = 0$  としてP制御のみで行うこととした。したがって式(9)の振幅  $\beta$  は、

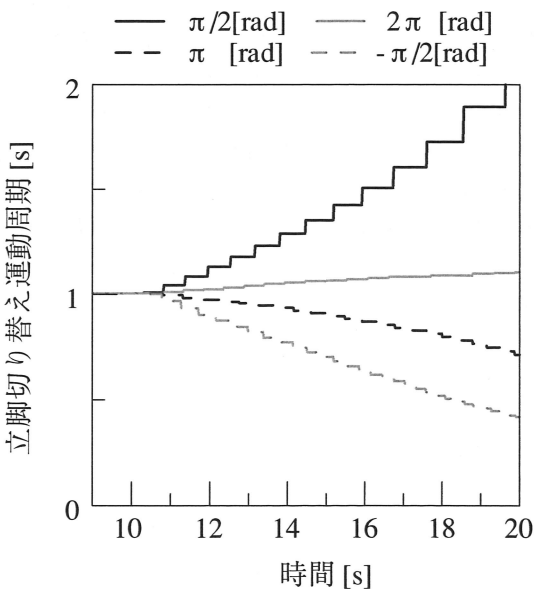


図6 立脚切り替え運動周期と周期入力位相差の関係



$$\beta = K_p(T_i - T_p) \quad (10)$$

で表すことができる。

同様に振動子の運動制御用 P-D コントローラについても、 $K_{pm}$  および  $K_{dm}$  を調整してシミュレーションを行い、制御性能の違いについて検討した。図9に示す (a), (b) いずれの結果も、立脚切り替え運動周期を増加させる制御であるため、ロボットの傾斜角と振動子目標軌道の位相差はほぼ目標通り  $\pi/2$ [rad] になっていることがわかる。 $K_{dm} = 0$  と設定した (a) において、振動子の運動は目標軌道に対し振動的となり生成した軌道通りに運動していない。一方、 $K_{dm} = 0.02$  とした (b) においては目標軌道どおりに振動子が運動しており、徐々に振動子の振幅は小さくなっていくことから、設定した制御系が正しく機能していることが確認できた。この結果、(a) と (b) の制御結果を比較すると、(a) の P 制御のみでは不十分であり、(b) の P-D 制御を行うことが望ましいといえる。

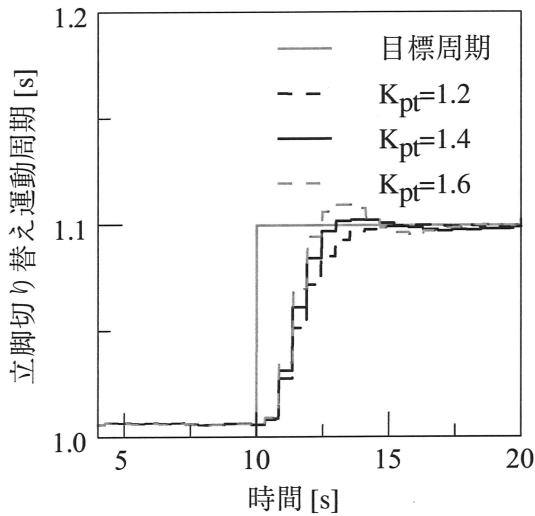


図7 振幅決定用 P-D コントローラの制御性能 ( $K_d = 0.0$ )

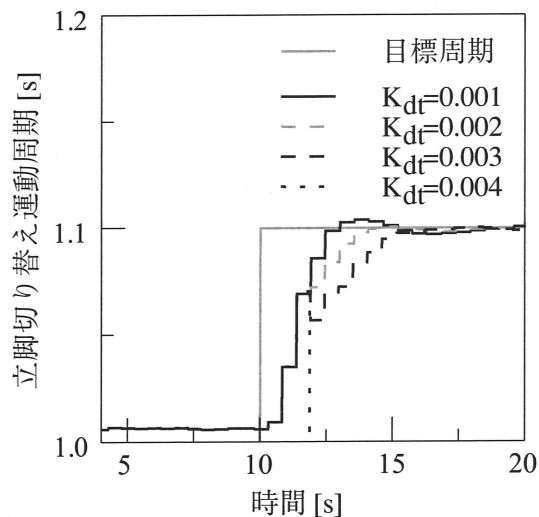


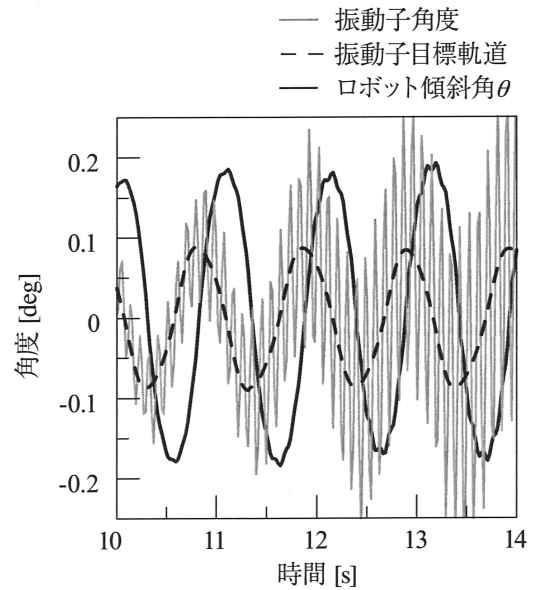
図8 振幅決定用 P-D コントローラの制御性能 ( $K_d = 1.6$ )

### 3.6 立脚切り替え運動周期の制御

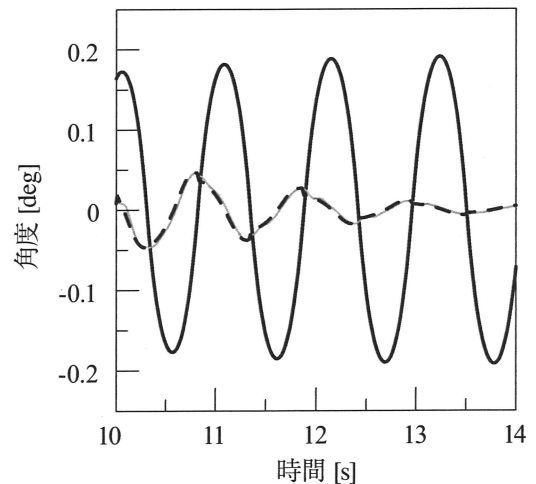
最終的にシステム全体の制御性能の評価として、立脚切り替え運動を任意の運動周期に制御できるかをシミュレーションで検証した。立脚切り替え運動周期の目標値を 0.1[s] 間隔で増加するように設定し、初期周期 1[s] で運動をしているロボットの制御を試みる。立脚切り替え運動周期を増加させた場合、図10に示す通り、3[s] の制御時間内で周期を最大 1.5[s] まで増加させることができた。制御時間を限定しなければ、このプロセスを繰り返すことによって自由に立脚切り替え運動周期を調整することが可能である。

## 4. 結言

本報では、ヒトの歩行解析結果を基に設計・製作した二足受動歩行ロボットの歩行解析から得られた安定化手法をもとに、歩行路性状の変化に適応可能な準受動歩行ロボッ



(a)  $K_{pm}=100, K_{dm}=0.0$



(b)  $K_{pm}=100, K_{dm}=0.02$

図9 振動子の制御性能

参考文献

- 1) T.McGeer: Passive dynamic walking, International Journal of Robotics Research 9(2), 68-82, (1990).
- 2) S.H. Collins, M. Wisse, A. Runia: A Three- Dimensional Passive-Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees, The International Journal of Robotics Research, 20(7), 607-615, (2001).
- 3) 大須賀公一：受動的歩行を規範とした歩行ロボットと制御, 日本ロボット学会誌, 20(3), 233-236, (2002).
- 4) 藤本英雄, 池俣吉人, 佐野明人：上体を含んだ受動二足歩行の運動解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 2002(02-6,Pt.1), 1A1.H07(1)-1A1.H 07(2), (2002).
- 5) 西井康人, 石黒章夫, 川勝年洋：共同現象を活用した四脚受動歩行機械の引き込み領域の拡大, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, (2003).
- 6) 白井孝志, 鈴木聡一郎：2 足受動歩行ロボットの安定化に関する基礎的検討, 第 19 回計測自動制御学会北海道支部シンポジウム, (2003).
- 7) 鈴木聡一郎, 蜂谷正泰：三次元歩行が可能な二足受動歩行ロボットの安定化に関する実験的検討, バイオメカニズム学会誌, 32(4), (2008).
- 8) 梶原秀一, 橋本幸男, 土谷武士：周期入力による振子の運動制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 67(633), (2001).

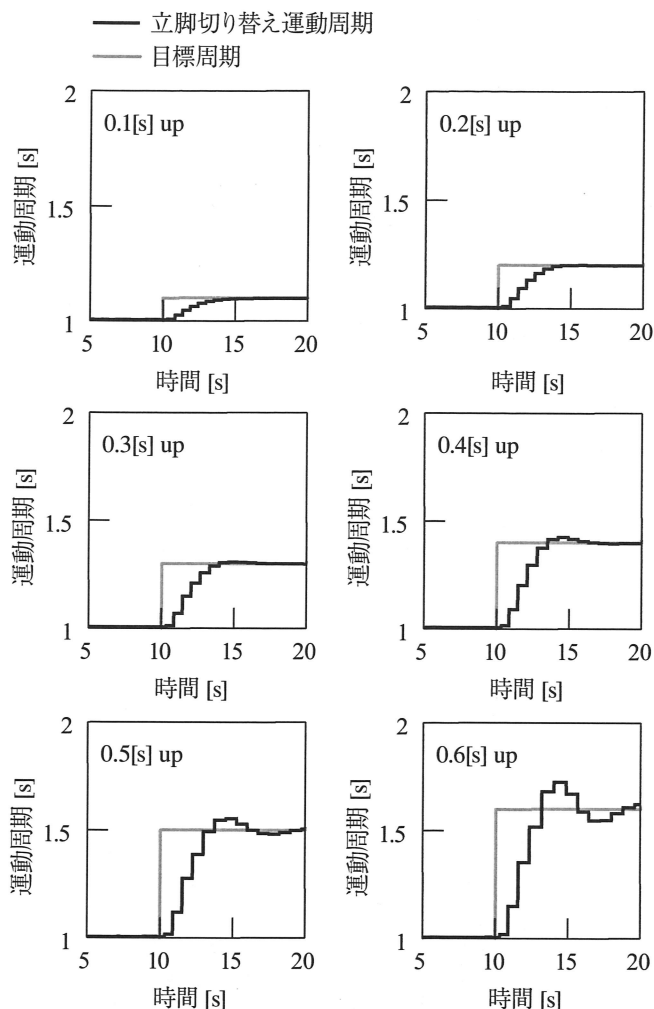


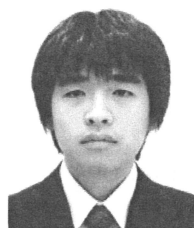
図 10 立脚切り替え運動周期の制御

トの制御手法について解析的に検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- ① 運動周期を一致させる手法として、ロボットの立脚切り替え運動を矩形ブロックのロッキング運動に置き換え、矢状面内の遊脚の振子運動周期に一致するように初期傾斜角を調整する方法が有効である。
- ② 準受動歩行による歩行の安定化制御手法として、ロボットの上半身に振動子を設け、van der Pol 方程式の強制引き込み現象を利用して振動子を制御すると、立脚切り替え運動周期を任意の値に調整でき、歩調の変化を伴うような歩行路性状の変化にも対応できる可能性がある。

謝辞

この研究を行なうにあたって、多くの御助言を頂戴いたしました釧路工業高等専門学校電子工学科梶原秀一先生に深く感謝の意を表します。



蜂谷 正泰 (はちや まさやす)

2005 年 3 月北見工業大学工学部機械システム工学科卒業。2007 年 3 月同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。現在、同博士後期課程在学中。日本機械学会、日本ロボット学会などの会員 (バイオメカニズム学会学生会員)。

鈴木 聡一郎 (すずき そういちろう)

1984 年北海道大学工学部金属工学科卒業。1999 年東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報工学)。1984 年 (株) アシックス。1993 年北見工業大学機械システム工学科助手。現在、同准教授。この間、2004 年から 2005 年まで英国シェフィールド大学客員教授。人間のスキルを応用したロボット、アクティブ制御義足の研究等、主としてロボット工学、スポーツ工学、福祉工学の研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会、ISEA などの会員 (バイオメカニズム学会正会員)。

## Stabilization of a Biped Quasi Passive Walking Robot via Periodic Input

Masayasu HACHIYA<sup>1</sup>†, Soichiro SUZUKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate school of Kitami Institute of Technology

<sup>2</sup>Department of Mechanical System Engineering, Kitami Institute of Technology

**Abstract** This study aims to apply passive walking to the biped robot. We examined the stabilization method of a passive walking robot with three dimensional weight shifts in a frontal and a sagittal plane to resemble a human gait. As a result, it was demonstrated that the passive walking was stabilized when both the robotic motions in a frontal plane and in a sagittal plane were synchronized. Then we analytically examined the control method of the quasi-passive walk in an arbitrary environment utilizing the van der Pol equation. Finally, it was determined that the biped quasi-passive walking robot was able to be controlled by periodic input generated by an oscillator.

**Key Words:** Biped quasi passive walk, Stabilization, Periodic input, Entrainment van der Pol's equation

---

Received May 25, 2008 Accepted Jul 25, 2008

† Masayasu HACHIYA

Department of Mechanical System Engineering,  
Kitami Institute of Technology

165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido, 090-8507, Japan

Tel: 0157-26-9243 Fax: 0157-23-9375

E-mail: dse07006@std.kitami-it.ac.jp

