

振動子系を用いた2脚歩行ロボットの歩行制御

土屋和雄 青井伸也 辻田勝吉 (京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻)

Locomotion Control of a Biped Locomotion Robot

Kazuo Tsuchiya, Shinya Aoi, Katsuyoshi Tsujita

(Dept. of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Engineering, Kyoto University)

Abstract: This paper proposes a new method of locomotion control of a biped locomotion robot. The control system composed of joint controllers and nonlinear oscillators. The oscillators, which generate reference trajectories of the joints, tune the phases with the signals from the touch sensors. As a result, a stable locomotion corresponding to the properties of the environment is established.

1. まえがき

2脚歩行ロボットの歩行制御は多リンク系の運動制御である。その標準的方法は、(1) 指定された運動を実現する各関節の基準軌道を求めること(運動計画)、(2) 基準運動を実現する各関節の制御系を設計すること(運動制御)で行われる。本論文は、2脚歩行ロボットの運動制御を扱う。2脚歩行ロボットの歩行制御の特徴、あるいは困難さは、(1) 目標運動が定常周期運動であること、(2) 床面における支持点まわりの姿勢運動を直接駆動することができないこと(劣駆動システム)である。従来、支持点まわりの姿勢運動の制御は、(1) 脚先支持点における床反力を利用する方法、(2) 胴体における関節の運動を制御する方法が用いられている。本論文では、(1) 各関節の基準運動を振動子により生成する。(2) 振動子の位相を、姿勢運動の情報に基づき調整することにより姿勢運動を安定化する制御方法を提案する¹⁾。

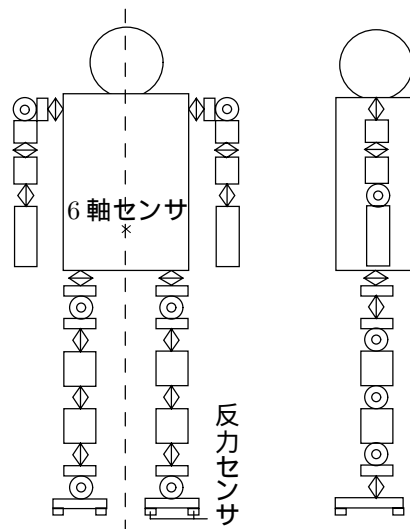


Fig. 1: Schematic model of biped locomotion robot

2. 基礎方程式

Fig.1 に示す2脚歩行ロボットを考える。ロボットは1リンクの胴体と、左右各4リンクの腕、左右各6リンクの脚から構成される。それぞれのリンクは図に示されるような1回転自由度のジョイントで結合されている。左腕、右腕をそれぞれ腕1、腕2とし、左脚、右脚をそれぞれ脚1、脚2とする。腕、脚の各リンク、各ジョイントを胴体側から順番にリンク1、リンク2、同様にジョイント1、ジョイント2と番号を付ける。各脚先には4個の床の垂直抗力を検出する反力センサが付いており、胴体には3軸の加速度センサと3軸の角速度センサが搭載されている。

状態変数を次のように定義する。

$$q^T = [r_{0m} \theta_{0m} \theta_{Ajm}^{(i)} \theta_{Lkm}^{(i)}] \quad (1)$$
$$i = 1, 2, j = 1, \dots, 4, k = 1, \dots, 6, m = 1, 2, 3$$

ここで r_0, θ_0 は胴体の並進、回転変位、 $\theta_{Aj}^{(i)}$ は腕 i リンク j の相対回転角、 $\theta_{Lk}^{(i)}$ は脚 i リンク k の相対回転角を表す。状態変数 q に対する運動方程式はラグランジュの運動方程式から次のように得られる。

$$M\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = G + \sum (\tau_{Aj}^{(i)} + \tau_{Lj}^{(i)}) + \Lambda \quad (2)$$

ただし、 M は慣性マトリクス、 $H(q, \dot{q})$ はコリオリ力や遠心力を含んだ非線形項、 G は重力項、 $\tau_{Aj}^{(i)}, \tau_{Lj}^{(i)}$ は腕 i ジョ

イント j 、脚 i ジョイント j に加えられるアクチュエータのトルク、 Λ は脚先が床に接しているときに加えられる床からの反力である。脚先と床との相互作用は脚先接地点がバネ・ダンパーを介し、床に接触しているとモデル化した。

3. 歩行制御

(制御系構成)

歩行制御系は機構駆動系と運動生成系から構成される。機構駆動系は各関節に取り付けられた駆動モータとその駆動系から構成され、運動生成系からの指令値に従って各関節を駆動する。運動生成系は、脚、胴体、腕の各関節の駆動系に指令値を与える機構振動子とペースメーカ振動子から構成される (Fig.2)。各機構振動子はそれぞれペースメーカ振動子と相互作用を行う。すなわち、胴体振動子及び腕振動子はペースメーカ振動子から一方向の相互作用を受け、脚振動子はペースメーカ振動子と双方向の相互作用を行う。また、脚振動子は脚先の接地センサからフィードバック信号を受ける。

(軌道生成)

各機構の関節に対する軌道は、対応する振動子の位相の関数として与えられる。脚に対する軌道は次のように

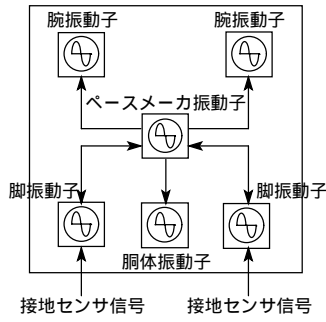


Fig. 2: Motion generator system

設計される。脚 i に対し、胴体に対して相対的に着地点 $\hat{\eta}_{AEP}^{(i)}$ 、離脱点 $\hat{\eta}_{PEP}^{(i)}$ を設定する。脚 i の脚先座標 $\eta_L^{(i)}$ に対し、2つの基準軌道、遊脚軌道 $\hat{\eta}_{Sw}^{(i)}$ 、支持脚軌道 $\hat{\eta}_{Sp}^{(i)}$ を脚振動子の位相 $\phi_L^{(i)}$ の関数として与える。ここで各軌道は AEP、PEP で次の関係を満足する。

$$\hat{\eta}_{Sw}^{(i)}(\phi_{AEP}^{(i)}) = \hat{\eta}_{AEP}^{(i)}, \quad \hat{\eta}_{Sp}^{(i)}(0) = \hat{\eta}_{PEP}^{(i)} \quad (3)$$

脚先の基準軌道はこれら2つの軌道を切り替えることにより構成される。

$$\hat{\eta}_L^{(i)}(\hat{\phi}_L^{(i)}) = \begin{cases} \hat{\eta}_{Sw}^{(i)}(\hat{\phi}_L^{(i)}) & 0 \leq \hat{\phi}_L^{(i)} < \hat{\phi}_{AEP}^{(i)} \\ \hat{\eta}_{Sp}^{(i)}(\hat{\phi}_L^{(i)}) & \hat{\phi}_{AEP}^{(i)} \leq \hat{\phi}_L^{(i)} < 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

その他の機構の各関節に対する基準軌道は基準歩行状態において、安定な歩行が実現できるように設計される。

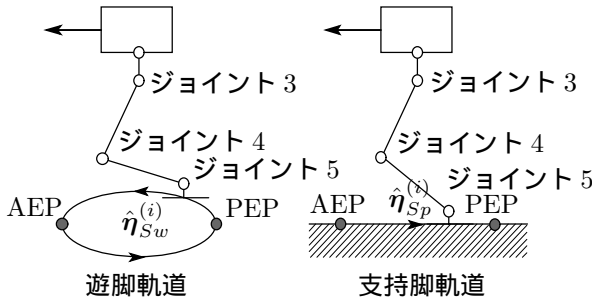


Fig. 3: Nominal trajectory of the leg

(軌道制御、姿勢制御)

各関節の軌道運動は、各関節に取り付けられたモータの駆動系に対し、その基準軌道を指令値としてハイゲイン PD フィードバック制御系を構成し制御する。一方、非駆動自由度である支持点まわりの姿勢運動は直接的にその運動を制御することができない。ここでは運動生成系の振動子の位相制御を通し、姿勢制御を行う。すなわち、脚 i に対応する振動子の位相を次のように調整する。

1. 脚 i が接地した瞬間、脚 i の振動子の位相を $\phi_{AEP}^{(i)}$ から $\hat{\phi}_{AEP}^{(i)}$ に変える。
2. 脚 i の基準軌道を基準遊脚軌道 $\hat{\eta}_{Sw}^{(i)}$ から基準支持脚軌道 $\hat{\eta}_{Sp}^{(i)}$ に変える。
3. 基準軌道 $\hat{\eta}_{Sp}^{(i)}$ のパラメータの一つである $\hat{\eta}_{AEP}^{(i)}$ を $\eta_{AEP}^{(i)}$ に置き換える。

4. 数値シミュレーション結果

数値シミュレーションにおける物理パラメータは Hoap-1(富士通)を用いる。基準歩行状態として、デューティ比=0.5、歩幅=5cm とする。これらを変化させ、提案する制御方式の環境変化に対する適応性を検討する。比較対象として振動子の位相調整を行わないもの(固定方式)を用いる。デューティ比を0.5から0.95まで変化させた場合の結果を Fig.4 に示す。提案する制御方式は、全域において安定に歩行する。一方、固定方式はデューティ比0.65で転倒した。

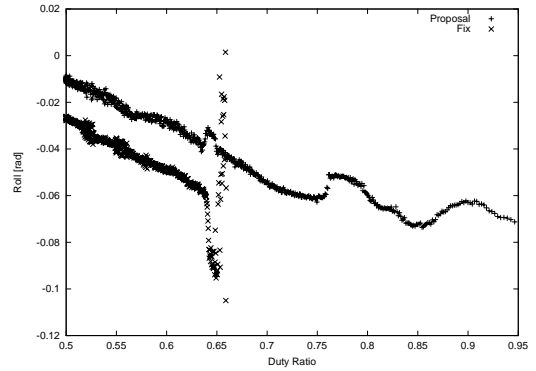


Fig. 4: Profile of roll angle vs duty ratio

5. ハードウェア実験結果

Hoap-1(富士通)を用いたハードウェア実験を行った。基準歩行状態はデューティ比=0.7、歩幅=3cm である。提案する制御方式において、歩幅を2cmから5cmに増加させ、その後2cmに戻す実験を行った。結果を Fig.5 に示す。安定な歩行を実現している。本研究は科学技術振興事業団戦略的研究推進事業「ロボットの脳を創る」の一環として行った。

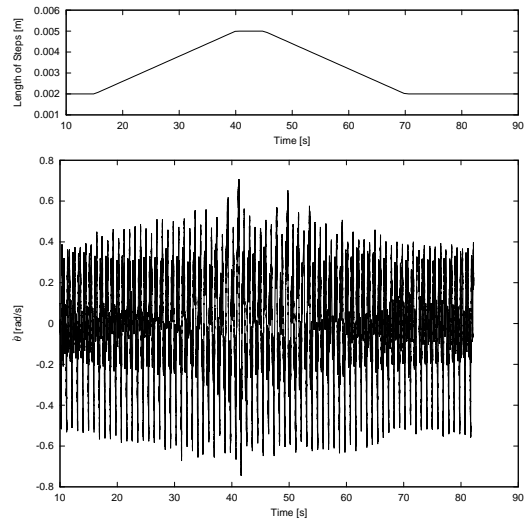


Fig. 5: Time profile of length of steps and velocity of roll angle

References

- [1] 土屋和雄, 辻田勝吉: Central Pattern Generator モデルに基づく4脚歩行ロボットの歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.243-246, 2002.