

安定周期軌道をもつ非線形力学系の構成法とその歩行パターン生成への応用

書籍番号：90113025 潮 研究室 大野 温子

1 はじめに

安定な周期軌道をもつ力学系を構成するという事は工学的に重要である。また、環境が変化しても安定な周期運動を継続できるように過渡的な軌道の目標値を生成する必要がある。本報告では、CPG に基づいたヒューノイドロボットの歩行運動に注目する。土屋ら [1] はロボットの歩行環境が水平面から斜面に変化しても CPG の位相と各関節角をリセットすることで歩行運動を継続させる手法を提案している。しかし、この手法では位相リセット時に目標信号が不連続になる。本報告では、安定周期軌道を持つ力学系を用いて CPG を構成することで、環境が変化しても連続な目標信号を発生させる手法を提案する。

2 安定周期軌道を持つ力学系

まず、任意の安定なリミットサイクルを生成するシステムについて議論する。状態空間において、周期軌道はフーリエ級数展開とチェビシェフ多項式によって以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\xi(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \alpha_k \cos(k\omega t) + \beta_k \sin(k\omega t) \right\} \\ &= F_1(\cos(\omega t)) + \sin(\omega t)F_2(\cos(\omega t))\end{aligned}\quad (1)$$

このとき、次の非線形システムを考える [2]。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x) \\ &= \omega \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\partial F_1(x_2)}{\partial x_2} - x_1 \frac{\partial F_2(x_2)}{\partial x_2} & F_2(x_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \\ &\quad + \begin{pmatrix} (1+K_1)x_1(1-x_1^2-x_2^2) \\ (1+K_2)x_2(1-x_1^2-x_2^2) \\ (1+\alpha)(F_1(x_2) + x_1F_2(x_2) - x_3) \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (2)$$

但し、 K_1, K_2, α は収束パラメータである。このシステムは、関数

$$V(x) = \begin{pmatrix} x_1^2 + x_2^2 - 1 \\ F_1(x_2) + x_1F_2(x_2) - x_3 \end{pmatrix}$$

に対して、 $\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) = 0, \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) < 0$ を満足するため、 $V(x)$ をある種のエネルギー関数と考え、 $f(x)$ はエネルギーを保存する項であり、 $g(x)$ はエネルギーを 0 に収束させる項と捉えることができる。よって、(2) の全ての解軌道 $x(t)$ は $t \rightarrow \infty$ で $V(x(t)) = 0$ となる。さらに、このとき $x_1(t), x_2(t)$ はそれぞれ $\sin(\omega t), \cos(\omega t)$ に収束し $x_1^2 + x_2^2 - 1 = 0$ を満たす。同様に $x_3(t)$ は $F_1(x_2) + x_1F_2(x_2)$ に収束するため、(1) で表される任意の周期軌道に収束することになる。

3 歩行パターンの生成方法

ヒューノイドロボットの歩行において、歩行環境が水平面から斜面に移ったときに、足裏の接地タイミングがずれるため転倒することがしばしば発生する。これを避けるために土屋らは足が接地したときに CPG の位相と各関節角をリセットすることで安定な歩行を実現している。しかし、この方法ではリセットしたときに急激なトルクが各関節にかかる可能性がある。そこで本報告では各関節角の値をリセットするのではなく、安定周期軌道への収束軌道を利用する歩行パターン生成法を提案する。

以下の手順に従って水平面上での標準歩行パターンを生成するために必要なデータを作成する。

- (I) 水平面上の歩行パターンから (1) の F_1, F_2 を求め、CPG の位相 ϕ と歩行パターンの対応を付ける。
- (II) 水平面上における歩行データから、ロボットの足が接地したときの CPG の位相 $\phi_{\text{heel_strike}}$ を左右の足それぞれについて求める。

歩行時は以下の処理を行う。

- Step1: (2) を解いて歩行データを生成する。
- Step2: 足裏タッチセンサからのデータを基に足が接地したと判断したとき、各関節の値はそのまま CPG の位相のみを $\phi = \phi_{\text{heel_strike}}$ にリセットする。
- Step3: Step1 に戻る。

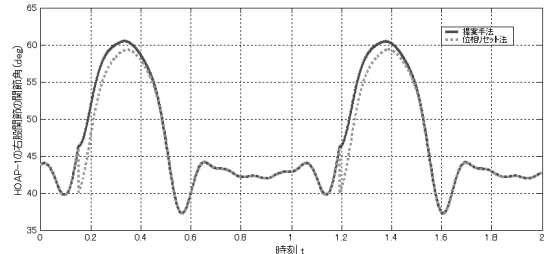


図1 提案手法と位相リセットによる関節角の変化の比較

図1はヒューノイドロボット HOAP-1 の歩行時における右股関節角の変化をシミュレーションしたものである。シミュレーション時間は 2sec で CPG の位相が 54 度になったときに強制的に位相を 15 度ずつリセットしたときの図である。図から明らかなように、位相リセット法では位相リセット後の角度が急峻に変化しているのに対し、提案手法では位相をリセットしても関節角度が滑らかに変化しており、急激なトルクを発生させることなく軌道は標準歩行パターンに収束していることが分かる。

4 ヒューノイドロボットによる実装

水平面から斜面に環境が変化すると想定してヒューノイドロボット HOAP-1 の歩行運動実験を行った。水平面で安定な歩行動作を行うヒューノイドロボットが、2 節で述べた方法を用いて斜面上においても同様に歩行する様子を図 2 に示す。勾配は 2.9 度、用いたパラメータは $K_1 = K_2 = 2.0, \alpha = 2.74$ である。

5 おわりに

本報告では、ヒューノイドロボットの歩行において、環境の変化に対する適応性を実現するために、安定な周期軌道を持つ力学系を構成した。そして、歩行環境が変化した場合には、CPG の位相のみをリセットすることで過渡的な軌道を生成する手法を提案した。さらに、提案手法をヒューノイドロボットの歩行軌道生成に応用し、実用性を示した。

参考文献

- [1] K.Tsuchiya, S.Aoi and K.Tsujita. Locomotion control of a biped locomotion robot using nonlinear oscillators. *IEEE/RSJ Int. Conf on Intelligent Robotics and Systems(IROS2003)*, 2003.
- [2] D. N. Green. Synthesis of systems with periodic solutions satisfying $V(x) = 0$. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 31, No. 4, pp. 317-326, April 1984.

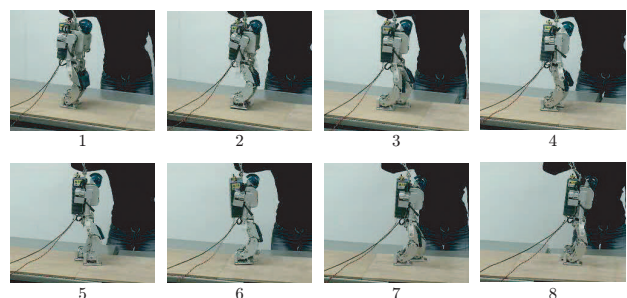


図2 HOAP-1 の斜面上での歩行の様子