

## 進化型 CPG を用いたヒューマノイドエージェントの歩行動作生成

内種岳詞 島中利治

大阪大学大学院情報科学研究科

はじめに- 近年, ロボットの動作制御に生物模範型のモデルを用いたシステムがよく利用されている. 特に, 周期運動のリズムを生成する CPG (Central Pattern Generator) を用いた研究が数多く行われている [1]. CPG から発生する周期パターンに従って各部の筋肉が駆動し, 歩行のような周期的な運動が発現する. CPG を用いたリズム生成器は, CPG 間の相互作用により, 外乱が加わる状況下でも, 本来のリズムに戻そうとする特性を持つ. この現象は, CPG の引き込み効果と呼ばれている [2]. 引き込み効果により, CPG を用いた周期運動は, 不整地のような環境に対してもロバストであることが知られている. 本論文では, CPG の一種である位相振動子モデルを取り上げる. 松本は, 2007 年の RoboCup 世界大会の Soccer Simulation 3D リーグで採用されたロボットモデル “soccerbot” にこのモデルを適応し, 歩行動作の生成が可能であることを確認している [3]. さらに, 歩行開始時や歩行終了時といった動作の切り替わり時において, 安定して次の動作に移る目的で歩幅更新則を導入している. また, 足裏の圧力センサの情報を利用している. 本論文では, 2008 年の RoboCup 世界大会から新しく採用されている “Nao” (図 1) ロボットに基づくエージェントモデルに対して, 歩幅更新則と足裏の圧力センサによるフィードバックを取り入れた位相振動子モデルを適用した結果を紹介する. 進行方向に対し速く直進しかつ, 安定した歩行動作の獲得を目的とし, ハンドコーディングでは決定が困難な複数のパラメータの調整を進化戦略で行った. そして, 歩幅更新の効果および, 足裏の圧力センサのフィードバックの効果を検証した.

**RoboCup Soccer Simulation 3D と Nao モデル**  
RoboCup Soccer は, 2050 年までに, FIFA のルールのもとで, ワールドカップ優勝チームに勝てるロボットサッカーチームを作ることを目的

とする, ワールドワイドなランドマークプロジェクトである. RoboCup Soccer Simulation 3D は, Soccer Simulation リーグを構成するリーグの 1 つであり, サーバの力学シミュレータによって, エージェントの動作が摩擦力や重力の作用等も考慮したもとの力学演算によって生成されている. また, 2008 年の世界大会からは, エージェントモデルに, Aldebaran Robotics 社製のロボット Nao に基づくモデルが採用されている. このエージェントモデルは, 首に 1 つ, 左右の肩に 2 つ, 両肘に 1 つ, 股関節に 3 つ, 両膝に 1 つ, 左右の足首に 2 つずつ, 合わせて 20 の自由度を持ち, 各関節に角速度を与えることによって, 歩行やキックなどの動作が実現されている. 各関節には, 関節の角度を検出するセンサが取り付けられている. また, 足裏には圧力センサが設けられ, 足と地面との接触が判定できる仕様となっている.

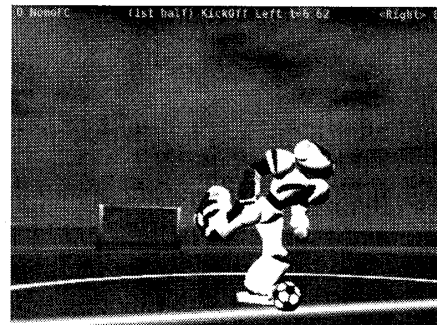


図 1 “Nao” モデル

**位相振動子モデル** 図 2 に示す 3 つの振動子によるモデルを考える. 左右方向の揺れ運動を制御する位相 (roll) を出力する振動子が 1 つ, 両足に対して, それぞれの位相 (pitch) を出力する振動子が 2 つあり, 各振動子は互いの出力による影響を受け, 統合された歩行パターンを形成する. 左右の足の振動子は, それぞれ足裏の圧力センサからの情報を受け取ることができ, 振動子のダイナミクスは,

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \sum_{j \neq i} K_{ij} \sin(\phi_i - \phi_j + \delta_{ij}) + F_i \quad (1)$$

$$F_i = (\phi_i^{\text{touch}} - \phi_i) \delta(t - t^{\text{touch}}) \quad (2)$$

Generation of a biped locomotion in 3D soccer simulation using CPG and evolution strategies  
Takeshi Uchitane and Toshiharu Hatanaka, Department of Information and Physical Sciences, Osaka University, Japan

で表わされる．ここで， $\phi_i$  は振動子の位相， $\omega_i$  は基本角速度， $K_{ij}$  は他の CPG との相互作用係数  $\delta_{ij}$  は定数， $F_i$  は足裏のセンサからの入力を表す． $\delta(t)$  は， $\delta(0)=1$  であり，その他では 0 を取る関数である．式(2)によって，足が着地したとき，振動子の位相が定数  $\phi_i^{touch}$  にリセットされる．左右の足の振動子からの出力は，

$$x_{support} = \frac{\alpha}{2} \cos(\phi_i) \quad (3)$$

$$z_{support} = -H \quad (4)$$

$$x_{swing} = \frac{\alpha}{2} \cos(\phi_j) \quad (5)$$

$$z_{swing} = -H + h \cos(\phi_j) \quad (6)$$

を用いて，図 3 の楕円と長軸で構成された軌道上の点に変換される．図 3 の  $H$ ， $h$ ， $\alpha$ ， $\gamma$  はそれぞれ，腰から地面までの高さ，地面からの足を浮かせる高さ(短軸)，歩幅(長軸)，上体の傾きを表す．この軌道上の点  $(x, z)$  に足を運ぶための股関節，膝，足首の関節の目標角度は，逆運動学を解くことによって一意に決まる．また，各関節を目標角度へ制御するために，本研究では PD 制御を用いた．PD 制御の比例ゲイン ( $p^{(i)}_{gain}$ ) および，微分ゲイン ( $d^{(i)}_{gain}$ ) は，足の前後運動のために，股関節，膝，足首にそれぞれ 1 組，左右の揺れ運動のために股関節と足首で 1 組，合計 8 つのパラメータとなる．

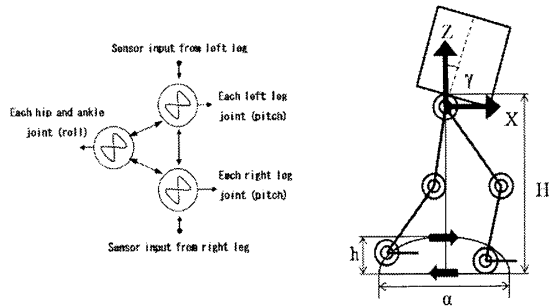


図 2 位相振動子モデル 図 3 目標軌道

**歩幅更新規範** 歩行の開始時など，大きな状態変化に対しては CPG の引き込み効果では対応できない．歩行開始時の安定性を向上させるため，以下の歩幅更新則[3]を導入した．

$$\alpha_{t+1} = \begin{cases} \alpha_t + stride \delta(t - t^{touch}) & \text{if } \alpha_{t+1} < \alpha_{max} \\ \alpha_{max} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ここで， $\alpha_t$  は図 3 の楕円の長軸， $stride$  は歩幅の更新幅を表す．式(7)に従って歩幅を更新するこ

とにより歩行開始時の歩幅を小さくし，徐々に歩幅を大きくすることが可能になる．

**実験** 本研究では，速い歩行と，安定した歩行を実現するための評価関数として，適応度を

$$fitness_i = \begin{cases} d_i, & \text{if } d_{ave} < s \text{ if } d_{ave} = \frac{1}{N} \sum_i d_i, \\ d_i - c_1 |d_{i\_y}| - c_2 \sum_i g_{i\_y}(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

と設定し，パラメータの調整に進化戦略を適用した．式(8)の添え字  $i$  は個体番号， $d_i$  は，個体  $i$  のパラメータによりエージェントが測定開始位置から一定時間の間に移動した距離， $d_{ave}$  は，その世代の全個体による移動距離の平均， $g_{i\_y}(t)$  は時刻  $t$  における左右方向のジャイロセンサの出力値， $s$ ， $c_1$ ， $c_2$  はそれぞれ定数を表す．個体は， $(\omega, K_{12}(=K_{31}), K_{23}, H, h, \gamma, p^{(1)}_{gain}, d^{(1)}_{gain}, p^{(2)}_{gain}, d^{(2)}_{gain}, p^{(3)}_{gain}, d^{(3)}_{gain}, p^{(4)}_{gain}, d^{(4)}_{gain}, roll, stride, \alpha_{max})$  からなる 17 次元の実数値ベクトルで構成される．本研究では，(40+40)-ES を適用した．初期集団は一樣乱数を用いて生成するが，ランダムに生成された個体の多くは，すぐに転倒する．このため，一定以上の距離を前進できる個体数が 40 に到達するまで，ランダムに個体を生成し，これらを初期集団とした．突然変異は，平均 0 の正規乱数によるものとし，また，交叉確率を 5% とし，親個体の重心から子個体を生成するものとした．なお，紙面の都合上，実験結果の詳細は，発表の際に述べる．

**おわりに** 本研究では，歩幅更新規範と足裏の圧力センサによるフィードバックを取り入れた位相振動子モデルを RoboCup Soccer Simulation 3D で用いる “Nao” モデルに適用し，進化計算による歩行動作の生成を行った．その結果，歩行開始時の安定性を保ちつつ，速く安定した歩行動作が獲得された．

#### 参考文献

- [1] Tsuchiya, K., Aoi, S., and Tsujita, K., “Locomotion control of a biped locomotion robot using nonlinear oscillators,” *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1745-1750 (2003)
- [2] Taga, G., Yamaguchi, Y., and Shimizu, H., “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment,” *Biological cybernetics*, 65, pp. 147-159 (1991)
- [3] 松本裕一，“進化型CPGを用いたヒューマノイドエージェントの歩行動作獲得,” 大阪大学大学院情報科学研究科平成19年度修士論文 (2008)