1A1-03

CPGを用いた人間型ロボットの歩行制御におけるSAによる最適化

An Optimization Method using SA in CPG based motion control for bipedal humanoid locomotion

伊藤 良彦[*1] 滝 健太[*1] 加藤 昇平[*1] 伊藤 英則[*1]
Yoshihiko Itoh Kenta Taki Shohei Kato Hidenori Itoh

[*1]名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

In this paper, we propose a motion control method for bipedal humanoid locomotion. The motion control is based on the Central Pattern Generator (CPG), and is optimized by Simulated Annealing. The motion control for a robot locomotion is a multiple-purpose optimization problem. The aim of this research, is to generate various gaits so as to meet the purposes; there may be a bias, such as stability or speed. Therefore, we consider plural evaluation functions for each of the purposes, and the motion control and the parameter optimization are designed to be conscious of the bias. To optimize all parameters simultaneously may cause explosion of search space. The optimization process, thus, has two phases; optimizing the parameters of leg part and then optimizing the parameters of arm part. In the experiments, our method performed some typical gaits, which respects stability, speed and both the two elements.

1. はじめに

近年，CPG(Central Pattern Generator) を用いたヒューマノイドロボットの運動生成が注目されている．多賀氏の研究ではCPG を運動の中枢とした「神経-筋骨格モデル」を用いて二足歩行運動生成を実現している [1]．しかし CPG を用いた運動生成において，パラメータの調節は非常に困難とされている．このため，われわれは複雑な最適化問題を解くためのヒューリスティック解法の一つである SA(Simulated Annealing) を用いてパラメータの準最適化を行い，脚部のみから形成される二足ロボットにおける歩行運動を実現してきた [4]．ところで，歩行運動の安定度や速度は，脚部のみならず腕振りなどの上体の働きによって向上する．そこで本研究では，上体を有する二足歩行ロボットを用いて上体の働きを活用した歩行制御を実現する．

ロボットの歩行運動における評価は安定度，歩行速度，歩行の外観などの複数の評価基準から評価される．そのため，歩行を評価する際の各評価基準に関する重み係数の決定は非常に複雑な問題となっている．遠藤らは進化的計算法を用いてパラメータ調節を行うにあたり，これらの問題を多目的最適化問題として扱い，二足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成を行なっている [5]．しかしながらロボットは上肢を持たず，また，偏った評価をしたときに生成される歩容については明確ではない．そこで本研究では，SA によりパラメータの最適化を行なう際，歩行を安定度，速度のそれぞれの評価基準に重点をおいた評価を行い重点に特化した二足歩行運動を実現した．最適化されたパラメータを用いて歩行シミュレーションを行ったところ，目的に応じた多様な二足歩行運動が生成された．

2. CPG

ロボットの二足歩行運動は周期的な運動である．そこで本研究では，周期的な運動生成に多く用いられる CPG を用いて歩行運動制御を行う．CPG とは動物の脊髄に存在する神経のリズム発生器である神経振動子を数学的にモデル化したものである．CPG は入力された周期的な信号に対して同調を示すという引き込み現象をもつ．この特長を用いれば，知覚情報を CPG にフィードバック入力することにより，知覚情報との引き込み現象が発生し，様々な外乱に対して頑健な運動生成が可能である．

CPG は複数の抑制結合を持つ神経素子から構成され，神経素子は以下の 2 変数 1 階非線形微分方程式 [2] でモデル化される．

$$\tau_i \dot{u}_i = -u_i - b \cdot f(v_i) + \sum_{j=1}^{n} w_{ij} f(u_i) + u_0 + S_i \quad (1)$$

$$\tau_i' \dot{v}_i = -v_i + f(u_i) \quad (2)$$

$$f(x) = max(x, 0) \quad (3)$$

二つの変数 u と v はそれぞれ内部状態と疲労度を表している．τ,τ' は時定数，w は神経素子間の結合の重み係数，b は疲労係数，S はセンサーフィードバック入力をそれぞれす．添字はそれぞれ神経素子の番号を表している．一定入力 u_0 によって励起された神経素子は自己抑制，相互抑制によって発振される．$f(u)$ が神経素子の出力となる．

3. ロボットの身体モデル

本研究では，複数の目的を考慮した多様な二足歩行運動の生成を目的としている．そこで本稿では下肢の動作に同調しつつ，上肢の運動が目的の偏重に応じてどのように制御されるかを検証する．そのため，CPG を用いた歩行運動生成において多く用いられる上体部，腰部，両足の上肢部，下肢部，足部から構成される 8 リンク 7 自由度の二足ロボットを基に，上体部の構造を体幹部，両腕の上腕部，前腕部に分割したモデルを考える．各リンクの長さ，重さは成人男性の平均程度のものとする．図 1 に本研究で用いる 12 リンク 11 自由度の人間型ロボットのリンク構造を示す．

4. 神経-筋骨格モデル

本研究では多賀によって提案された神経-筋骨格モデル [1] に基づく運動生成を用いる．神経-筋骨格モデルは，CPG のネットワークから構成される神経系と，筋肉を考慮した骨格から構

連絡先: 伊藤良彦，名古屋工業大学，名古屋市昭和区御器所町，052(732)2111(内線 5819)，yitoh@ics.nitech.ac.jp

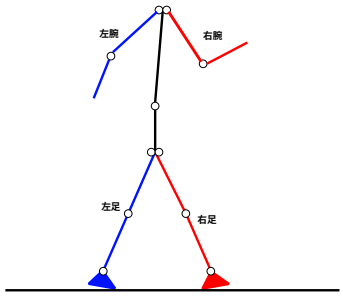

図 1: ロボットのリンクモデル

成される筋骨格系から形成される．神経系，筋骨格系，環境の相互作用によって柔軟で頑健な運動生成が可能である．

4.1 神経系

神経系は，9 対 18 個の神経素子から構成される．CPG は腰部，両足の臀部，膝，足首，両腕の肩の計 9 箇所の関節に 1 対ずつ割り当てられる．CPG の神経素子は関節の屈曲側と伸展側に割り付けられる．図 2 に CPG ネットワークの構成を示す．

4.2 筋骨格系

筋骨格系は，ロボットのリンク構造を骨格として，各関節を取り巻く単関節筋，二関節筋とあわせて計 28 個の筋肉を考慮する．図 3 に筋肉の配置構造を示す．

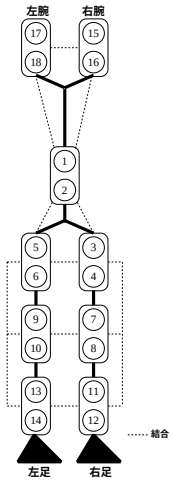

図 2: 神経系

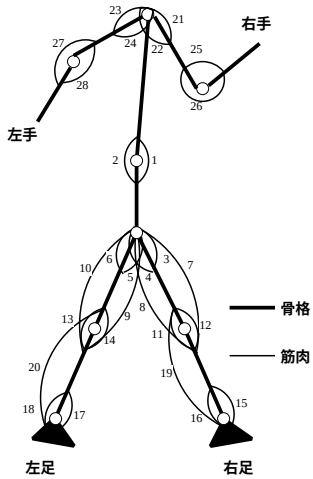

図 3: 筋骨格系

4.3 神経-筋骨格モデルに基づく運動制御

図 4 に多賀によって提案された神経-筋骨格モデルに基づく運動制御の概要図を示す．CPG への任意の定常入力 u_0 によって励起された時刻 t の CPG の出力 $f(u(t))$ は，まず時刻 t におけるロボットの知覚入力と併せて，律動トルク制御器によって律動的な特性を持つトルク成分 $T_{mr}(t+\Delta T)$ に変換される．これに並行して，時刻 t で知覚された各関節の角度 $\theta(t)$ および角速度 $\dot{\theta}(t)$ から，姿勢制御トルク制御器によって立位を維持するためのトルク成分 $T_{mi}(t+\Delta T)$ が算出される．次に，ロボットの筋肉に与えられるトルク $T_m(t+\Delta T)$ が $T_{mr}(t+\Delta T)$ と $T_{mi}(t+\Delta T)$ の和として生成され，ロボットの各関節に与えられる関節トルク $T(t+\Delta T)$ に変換される．

関節トルク $T(t+\Delta T)$ がロボットに与えられると，ニュートン・オイラー法に基づく 2 次元動力学シミュレータは，ロボットの動作をシミュレートし，運動後の各関節の角度 $\theta(t+\Delta T)$ と $\dot{\theta}(t+\Delta T)$，ならびに，各リンクの座標 $p(t+\Delta T) = (x(t+\Delta T), y(t+\Delta T))^T$ を算出し，時刻を ΔT 進める．

その後，$p(t)$ から接地判定により得られた両足の接地情報 $S_{ron}(t)$，$S_{roff}(t)$，$S_{lon}(t)$，$S_{loff}(t)$ から姿勢状態 $S_g(t)$ を判別する．その後 $S_g(t)$ と $\theta(t)$ から算出された知覚入力 $S(t)$ が時刻 t の CPG および律動トルク制御器へのフィードバック入力となり $u(t)$ が求められる．

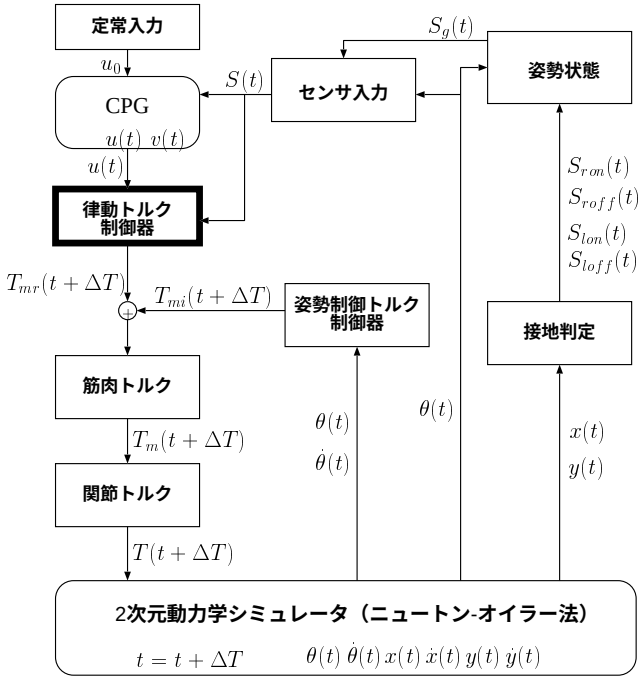

図 4: 運動制御の概要図

5. 適応的 SA によるパラメータの準最適化

本研究では，SA によるパラメータ最適化制御手法を用いてロボットの歩行動作を実現する．本稿では，「律動トルク制御器」(図 4) の構成を最適化する．律動トルク制御器は，ロボットの知覚情報と CPG の出力を用いて筋肉へのトルク制御を行う部分であり，歩行動作の成否とその安定性のために重要な制御器である．二足歩行運動において，下肢の動作の重要度は非常に高い．そこで本稿では，堅実に二足歩行運動を獲得することを目的に，まず下肢の構成を最適化した後，上肢の構成の最適化を行う．このように最適化を 2 段階にすることにより探索空間が縮小され，計算時間の短縮が図られる．本稿では，下肢の律動トルク制御器の構成に多賀氏のモデル [1] を用いた．肘関節を取り巻く筋肉 (図 3 中 25〜28) は，歩行への影響が微小であるため律動トルク制御がないものと定義した．肩関節を取り巻く筋肉 (図 3 中 21〜24) の律動トルク制御は，脚部の動作，体の重心などの知覚情報に影響があると考え，次のように定義した．i 番目の神経素子 (図 2) の出力を $f(u_i)$ とし，j 番目の筋肉 (図 3) に作用する律動トルクを Tmr_j とすると，肩関節を取り巻く筋肉に作用する律動トルク

$Tm_{arm} = (Tmr_{21}, Tmr_{22}, Tmr_{23}, Tmr_{24})^T$ は以下の式で算出される．

$$Tm_{arm} = U \cdot P \cdot B \quad (4)$$

$$U = \begin{bmatrix} f(u_{15}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f(u_{16}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f(u_{17}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f(u_{18}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_9 & 0 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 & 0 & p_{10} \\ p_3 & p_4 & p_1 & p_2 & p_9 & 0 \\ p_7 & p_8 & p_5 & p_6 & 0 & p_{10} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = (S_{ron}, S_{roff}, S_{lon}, S_{loff}, f(\phi - 0.5\pi), f(0.5\pi - \phi))^T \quad (7)$$

ここで，$S_{lon}(S_{loff})$，$S_{ron}(S_{roff})$ はそれぞれ左右の足裏の接地 (非接地) 状態を示すフラグである．ϕ は，体の重心を表す COG と床反力の重心を表す COP を結ぶ直線と水平面とのなす角である (図 5)．ϕ を用いることにより，体の前後の傾きを

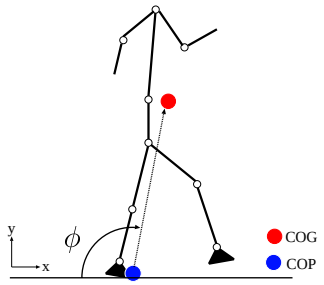

図 5: COP と COG，ϕ の関係

得ることが出来る．

本稿では，問題に適応する摂動近傍をもって最適解探索を行う適応的 SA [3] を用いて下肢の最適化あらかじめ行う．その後，上記の $p_i(i = 1, \cdots 10)$ のパラメータ値を準最適化することにより，目的や下肢の動作に対応しながら上体が動作する歩行運動を獲得する．

5.1 歩容の評価

ロボットにおける優良な二足歩行の条件とは，歩行の安定度が高いこと，歩行速度が速いことが主要であると考えられる．そこで，本研究では SA において試行される歩行運動を，歩行の安定度と歩行速度の 2 つの評価基準から評価した．

歩行の安定度に関する評価は以下の評価関数により評価される．

$$E_{stablity} = endtime - falltime \quad (8)$$

$endtime$ はシミュレーション終了時刻，$falltime$ は転倒した時刻である．出来るだけ長い時間を転倒しないものほど，高い評価を得る．

歩行速度に関する評価関数は以下の通りである．

$$E_{speed} = L_{goal} - L_{result} \quad (9)$$

L_{goal} は目標歩行距離，L_{result} は実際に到達した距離である．出来るだけ長い距離を前進したものが，高い評価を得る．

これらの 2 つの評価関数に評価基準の重要度を掛けて足し合わせた以下の評価関数を SA で用いた．

$$E = \alpha E_{stabilty} + \beta E_{speed} \quad (10)$$

α，β は各評価関数に関する重み係数である．高い評価を得たものほど評価値の値は小さくなる．本稿では，α，β に差をつけることにより，評価基準の重要度に偏りを置いた最適化を行う．

6. 歩容の生成

本研究では SA による最適化において，各評価基準の重要度を変化させることにより，目的に応じた多様な二足歩行運動の生成を目的としている．本稿では本研究の有効性を確認するため，偏った重み係数で最適化した実験結果について報告する．実験に用いた重み係数 α，β を表 1 に示す． 実験 1 では安定

	実験 1	実験 2	実験 3
α(安定度)	0.9	0.5	0.1
β(歩行速度)	0.1	0.5	0.9
	安定重視 $\longleftrightarrow$ 速さ重視		

表 1: 各実験における重み係数

度を重視した歩容，実験 2 では安定度と速度のバランスの良い歩容，実験 3 では歩行速度を重視した歩容がそれぞれ生成されることを目的とする．本実験では，SA における 1 試行のシミュレート時間を 10 秒とし．移動環境は外乱のない平地とした．また目標歩行距離は，実際の成人男性の歩行速度である 1.2m/s より少し速い 1.5m/s を想定して 15m とする．

ロボットに図 4 の運動制御を実行し，得られた歩容を評価することで SA によるパラメータの最適化を行い，二足歩行運動を生成した．SA によって準最適化されたパラメータによる歩行動作シミュレーションの様子を図 6，図 7，図 8，に示す．図は 0.2 秒毎の歩行の様子である．

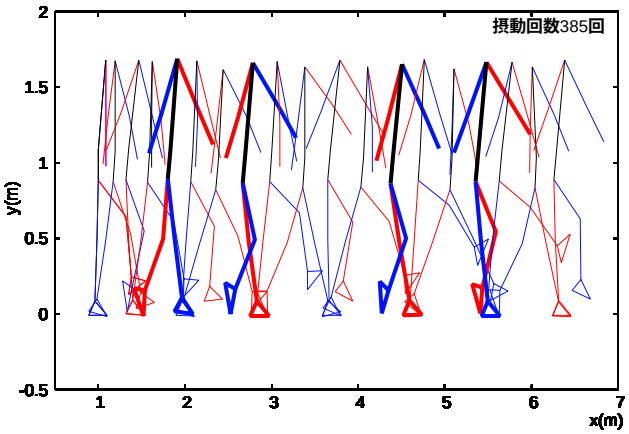

図 6: 安定重視の二足歩行運動の様子 (実験 1)

安定度重視の歩行 (図 6，実験 1) では，前後バランス良く腕を振っている．重点に偏りのない歩行 (図 7，実験 2) では，腕を後方には振らず，前方にのみ振りながら歩行運動を行っている．歩行速度を重視した歩行 (図 8，実験 3) では，実験 2 よりも前方に腕を振っている．このように腕振りが異なるのは，

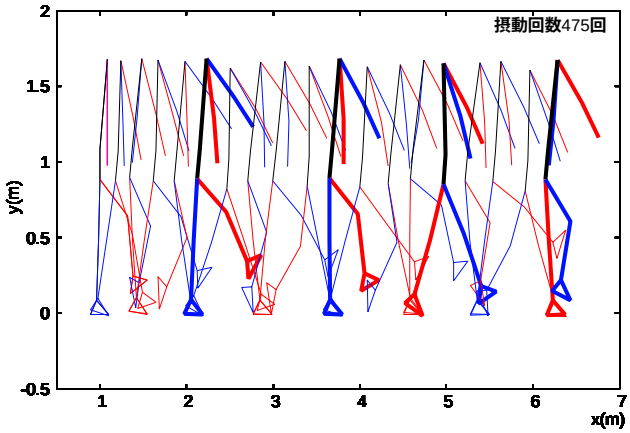

図 7: 偏りのない評価による二足歩行運動の様子 (実験 2)

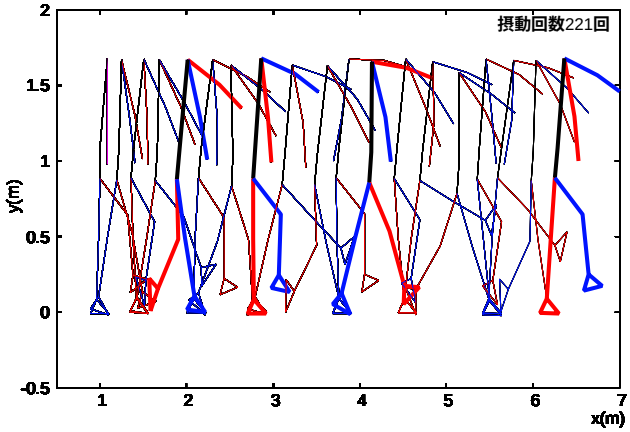

図 8: 歩行速度重視の二足歩行運動の様子 (実験 3)

腕振りにより発生するモーメントによって歩行速度の変化が生じるためと考えられる．つまり腕を前方に振るほど，体を前方に傾けるモーメントが発生するため歩行速度は向上するが，体の揺れが大きくなるため安定度は低下する．

次に，これらの歩容における速度と安定度を評価した．表 2 に結果を示す．表中の θ_{trunk} とは，歩行中の体幹部の絶対角を意味し，分散値を測定することで体幹部の揺れの大小，すなわち安定度を評価した．図 9 に各実験での θ_{trunk} の軌跡を示す．歩行速度に関しては，速度評価の重要度を上げたものほど

	歩行速度 (m/s)	θ_{trunk} の分散値
実験 1(安定重視)	1.45981	0.00532232
実験 2(偏りなし)	1.51181	0.00708473
実験 3(速度重視)	1.52385	0.00880714

表 2: 各実験での歩行速度，θ_{trunk} の分散値

歩行速度の向上が行れていることがわかる．図 9 から，θ_{trunk} の軌跡が安定度を重視するほど振幅が小さくなっている．また，θ_{trunk} の分散値が安定度を重視したものほど小さくなっていることより，安定度を重視するほど安定した歩行を獲得している．以上のことから，SA による最適化において各評価基準

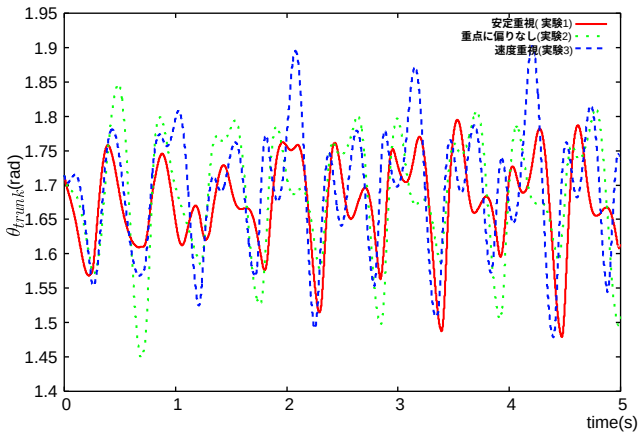

図 9: θ_{trunk} の軌跡

の重要度を変化させることにより，目的に応じた多様な二足歩行運動が生成されることを確認した．

7. おわりに

二足ロボットの歩行制御におけるパラメータの最適化は多目的最適化問題である．そこで，本研究では目的に偏った評価をして最適化を行うことにより，目的に応じた歩容を獲得した．今回は探索空間の爆発を回避するため，下肢の最適化を行った後に，上肢の最適化を行なった．そのため，比較的少ない計算量でパラメータの最適化を行うことが出来た．今後，探索空間の爆発を回避しながら下肢と上肢のパラメータを同時に最適化することで，目的に応じてロボットがどのような動作をするか検討する予定である．また，今回はパラメータの最適化手法として，複雑なヒューリスティック解法の一つである SA を用いた．今後，GA など，その他の最適化手法を用いたパラメータの最適化について検討する．

参考文献

[1] G.Taga: “ A model of neuro-musculo-skeltal system for human locomotion I. Emergence of basic gait ” Biol.Cybern. Vol.73, pp.97-111, (1995)

[2] K.Matsuoka: “ Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaption ” Biol.Cybern, Vol.52,pp367-376,(1985)

[3] 三木 光範，廣安 知之，笠井 誠之，小野 景子: “ 適応的近傍を持つ温度並列シミュレーテッドアニーリング ” 情報処理学会誌，Vol42, No4, pp.745-753,(2001)

[4] 滝 健太，伊藤 良彦，加藤 昇平，伊藤 英則: “ CPG ネットワークと SA を用いた二足ロボットの歩行運動生成 ”情報処理学会 全国大会, 2004

[5] 遠藤 謙，山崎 文敬，北野 宏明，前野 隆司: “ 進化的計算法を用いた 2 足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成-2 次元多リンクモデルを用いた手法の確立- ”日本機械学会 [No.02-6] ロボティックス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集