

内部評価基準に基づく 感覚運動融合モデルの自律的形成に関する研究

Autonomous formation of sensory-motor fusion model
based on internal evaluation criteria

川崎 邦将¹ 長田 茂美¹

Kunimasa Kawasaki¹ and Shigemi Nagata¹

¹ 金沢工業大学 大学院 工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Kanazawa Institute of Technology

Abstract: For a personal robot to behave intelligently, its environmental conditions and the corresponding actions have to be prescribed by the designer in advance. Therefore, there is a problem that the appropriate actions cannot be performed in unexpected environments. On the other hand, it seems that human beings or organisms are able to behave in various environments adaptively. In this paper, we propose a method to realize autonomous action generation for a personal intelligent robot based on both its sensory-motor fusion model and internal evaluation criteria.

1. はじめに

人への情報提供や人とのコミュニケーションを行う一般家庭向けのパーソナルロボットは、産業用ロボットとは異なり、動作環境を限定することは難しい。そのため、現在の智能ロボットの多くは、ロボットが行動する環境条件や行動そのものが予め設計者によって規定されており、想定されていない環境下では、適切な行動がとれなくなってしまうという問題がある。一方、人をはじめ生物は、事前に環境に関する情報を知ることなく、環境および環境変化にも適応的かつ柔軟な行動をとることができる。これは、生物自身がその感覚器官や筋運動の運動器官などの身体性（身体情報）に基づいて、環境変化に頑健な智能システムを自律的に形成しているためだと考えられる。したがって、智能ロボットにおいても、生物と同様に、身体情報のみで環境変化に頑健な智能システムを自律的に形成できれば、上述の問題は解決できる。

本研究では、このような智能ロボット実現のアプローチの一環として、ロボットの環境条件や行動を事前に規定せず、センサやアクチュエータなどの身体情報のみで、感覚運動融合モデル[1]を自律的に形成するとともに、ロボット自らの内部評価基準に基づいて自律的な運動生成を実現する手法を提案する。さらに、その手法を実装した実ロボットによる評価実験を行い、提案手法の有効性を実証する。

2. 提案手法

提案手法は、センサ情報やアクチュエータへの運動指令などの身体情報のみに基づいて自律的に形成する感覚運動融合モデルと、その感覚運動融合モデルと運動生成の指針となる内部評価基準に基づいて運動を生成する運動生成モジュールから成る。

2.1 処理概要

図1に、提案手法における処理の流れを示す。本手法で想定する智能ロボットは、身体情報と内部評価基準にあたる以下の3種類の情報を利用できるものとする。

- (1) センサから得られる感覚情報
- (2) アクチュエータへの運動指令情報
- (3) 行動指針となる内部評価基準に基づく内部評価

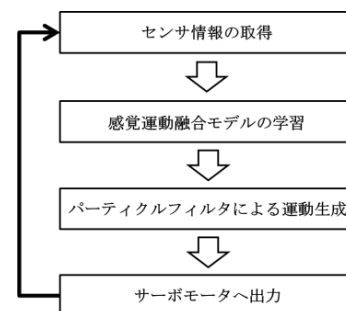


図1. 提案手法における処理の流れ

本手法では、これらの情報を用いて、まず始めに、知能ロボットが環境との相互作用を通じて、現時刻の感覚情報と運動指令情報から次時刻の感覚情報を予測する感覚運動融合モデルを深層学習により自律的に形成する。次に、形成した感覚運動融合モデルによる感覚情報の予測と内部評価基準による内部評価に基づき、内部評価を高める運動指令をパーティクルフィルタにより推定し、その運動指令をアクチュエータへ出力し、運動を生成する。これらの処理を繰り返すことで、身体情報だけに基づいた感覚運動融合モデルの自律的な形成と内部評価基準を満たす運動生成が実現できる。

2.2 感覚運動融合モデル

本研究では、知能ロボットの環境条件や動作パターンを事前に規定しないため、知能ロボットは、自律的に自身の運動とセンサからの感覚情報との関係性を獲得する必要がある。

したがって、本手法では、知能ロボット自身の運動とセンサからの感覚情報との関係性を自律的に獲得する感覚運動融合モデルを多層ニューラルネットワークによって実現する。ニューラルネットワークの学習には、1時刻前のセンサからの感覚情報 s_{t-1} 、サーボモータへの運動指令情報 a_{t-1} を入力とし、現時刻の感覚情報 s_t を教師データとして、誤差逆伝播法によるオンライン学習を用いる。

これによって、現時刻の感覚情報 s_t と運動指令情報 a_t から次時刻の感覚情報 s_{t+1} を予測する感覚運動融合モデルを自律的に形成することができる。図2に、感覚運動融合モデルの構造を示す。

2.3 内部評価基準

ここでは、運動生成の指針となる内部評価基準の規定方針について述べる。

内部評価基準は、生物が持つ1次的欲求[2]から着想を得ており、外部から与えられる刺激や評価の基準ではなく、例えば、身体に大きな負荷がかかっている状態から負荷の少ない状態に移行したいとか、新陳代謝を維持するためのエネルギーが不足しているため食糧を摂取したいなどといった、自身の健康状態を無意識的に維持するための欲求を想定する。

知能ロボットにおいても、アクチュエータへの負荷が均一になるような姿勢の評価や、電力不足のために充電を行う行動の評価など、感覚情報と運動指令情報から決定可能な内部状態を評価する基準である。

2.4 運動生成モジュール

図3に、運動生成モジュールの処理の流れを示す。

2.3節で規定した内部評価基準と2.2節で述べた感覚運動融合モデルによる次時刻の感覚情報の予測に基づいて、運動生成モジュールは、パーティクルフィルタにより、現在の状態から内部評価値を高める状態に遷移する運動指令情報を生成する。以下に、運動生成を行うまでの具体的な処理手順を示す。

Step.1: 1時刻前の重み $w_{t-1}^{(i)}$ を基に、パーティクルの

位置を更新する。ただし、初期状態は一様分布で初期化する。なお、時刻 t での i 番目のパーティクルは、サーボモータへの運動指令情報 a_t をもつ

$$p_t^{(i)} = (a_{t,0}, \dots, a_{t,i}) \text{ とする。}$$

Step.2: 各パーティクルの運動指令情報を基に、感覚運動融合モデルで次時刻の感覚情報を予測する。

予測した感覚情報から予測内部評価値 $b_{t+1}^{(i)}$ を計算する。

Step.3: 予測内部評価値から各パーティクルの重み $w_t^{(i)}$ を更新する。

Step.4: 出力する運動指令情報となる全パーティクルの期待値 a'_t を計算する。

Step.5: 予測内部評価値の平均値 b_{t+1}^{Ave} が、現時刻の内部評価値 b_t よりも高ければ、その運動指令情報 a'_t を出力し、Step.1に戻る。

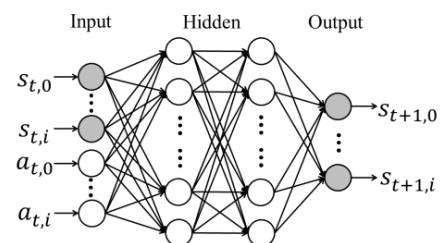


図2. 感覚運動融合モデルの構造

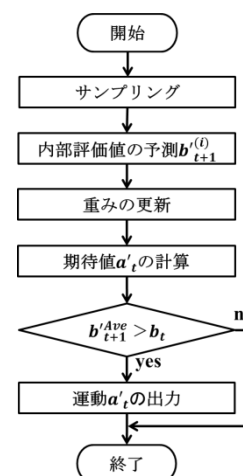


図3. 運動生成モジュールの処理の流れ

3. 実験

本章では、提案手法の有効性を検証するために行った評価実験について述べる。評価実験では、姿勢センサとサーボモータを備えた実ロボットを用いて、水平姿勢状態を実現するための運動指令情報を決定する姿勢制御問題を扱う。

3.1 ロボットの構成

図4に、実験に用いるロボットの概要を、表1に、その仕様を示す。ロボットは、卓上で使用するパーソナルロボットを想定して大きさは最大でも高さ20 [cm]とし、外部PC等に接続せず完全自律動作を実現するために、小型PC、カメラ、姿勢センサ、サーボモータおよびバッテリーを搭載している。

本実験では、水平姿勢状態を計測するために、姿勢センサから取得した加速度±8 [g]と、roll, pitch軸の3つのサーボモータをそれぞれ用いる。なお、サーボモータへの出力はPWMのパルス幅であり、上下限値をそれぞれ1800, 1200 [μs], 1回のループに出力する運動指令範囲を±50 [μs]とする。

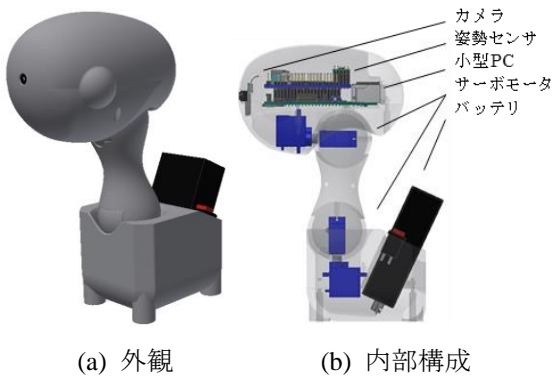


図4. ロボットの概要

表1. ロボットの仕様

高さ [cm]	20
重量 [g]	500
サーボモータ: トルク [kgf·cm]	SG92R 2
自由度	4 (roll×1, pitch×2, yaw×1)
姿勢センサ	MPU-9150
制御 PC	Raspberry Pi 3 model B
バッテリー: 容量 [mAh] 最大出力 [A]	DE-M01L-6030-BK 6000 3

3.2 方法

ここでは、3.1節で述べたロボットを使用して、水平姿勢状態を実現するための運動指令情報を決定する姿勢制御の実証方法について述べる。

評価実験では、ロボットを実際に数十分動作させ、加速度、内部評価値および予測誤差の遷移から、内部評価基準に基づいた運動生成が実現できているかどうかを、以下の3つの観点からの実験により検証する。

- (1) 内部評価値を高める運動生成の実現性
- (2) 状態変化に対する頑健性
- (3) ハードウェアの変化に対する頑健性

具体的には、実験(1)では、ロボット上部の roll 軸と pitch 軸の2つのサーボモータを使用して、内部評価値を高める運動生成を、ロボットが水平姿勢を実現するまで動作させる。次に、実験(2)では、水平姿勢を実現したロボットの姿勢を外部から強制的に変更し、再度水平姿勢が実現可能かを検証する。最後に、実験(3)では、実験(1)で用いるロボット上部の pitch 軸のサーボモータではなく、ロボット下部の pitch 軸のものに変更し、ロボット上部の roll 軸のサーボモータと併せて2つを使用する。これにより、リンクモデルが異なる場合においても、実験(1)と同様に、水平姿勢が実現可能かを検証する。

各実験の内部評価基準は、ロボットが水平姿勢状態のときに内部評価値が最大となるように、式(1)で規定する。ここで、 b は内部評価値、 $s = (s_x, s_y, s_z)$ は現時刻の加速度、 $k = (k_x, k_y, k_z)$ は水平姿勢状態の加速度の規定値である。

$$b(s, k) = 1.0 - \sqrt{(s_x - k_x)^2 + (s_y - k_y)^2 + (s_z - k_z)^2} \quad (1)$$

また、図5に、各実験に用いた感覚運動融合モデルの構造を示す。運動生成に用いるパーティクルフィルタのパーティクル数は100とし、サーボモータへの過剰な負荷を抑えるために、パーティクルのもつ運動指令情報がサーボモータの上下限値を超える場合には、重みを低下させる例外処理を行う。

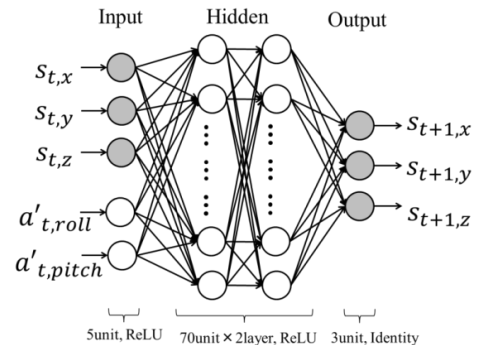


図5. 実験に用いた感覚運動融合モデルの構造

3.3 結果および考察

図 6, 図 7 に, 実験(1), (2)の結果を, 図 8 に, 実験(3)の結果を示す. 実験(1)では, ロボットは 17 分間(約 1000 ループ)で水平姿勢を実現し, 実験(2)では, 8 分間(約 500 ループ)で再度水平姿勢を実現した. また, 実験(3)では, 33 分間(約 2000 ループ)で水平姿勢を実現した.

3.3.1 実験(1), (2)について

図 6 より, 300 ループ以前は, 感覚運動融合モデルの予測誤差が大きく, 運動生成がほとんど行われていない初期学習段階にあり, また, 300 から 800 ループの間は, 運動生成が行われるが, 予測誤差に増減があり, 内部評価値を高める運動生成とはなっておらず, さまざまな運動指令情報と感覚情報との関係性を学習している段階といえる. 800 ループ以降は, 確実に水平姿勢へ向かう運動生成が実現されており, 予測誤差も非常に小さいことから, 感覚運動融合モデルが十分に学習でき, 内部評価基準に基づいた運動生成が実現されていることがわかる.

次に, 1050 ループ付近で, ロボットの姿勢を 5 度前方に傾けても, 約 1500 ループで再度水平姿勢へ近づいており, 強制的な状態変更後も, 感覚運動融合モデルが学習により更新され, 状態変化に応じた内部評価値を高める運動生成を実現したと考える.

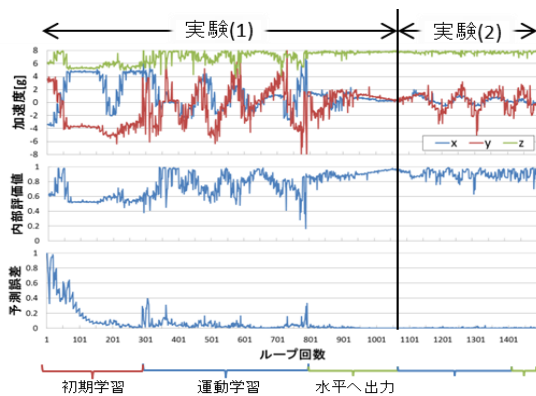
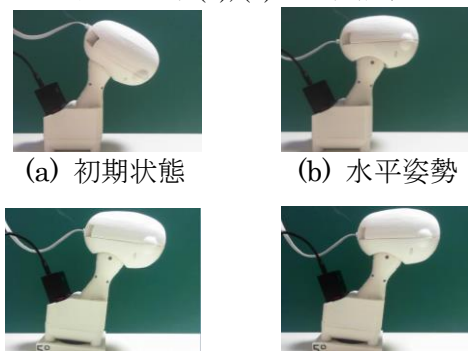


図 6. 実験(1), (2)の実験結果



(c) 状態変更後 (d) 状態変更後の水平姿勢

図 7. 実験(1), (2)のロボットの概観

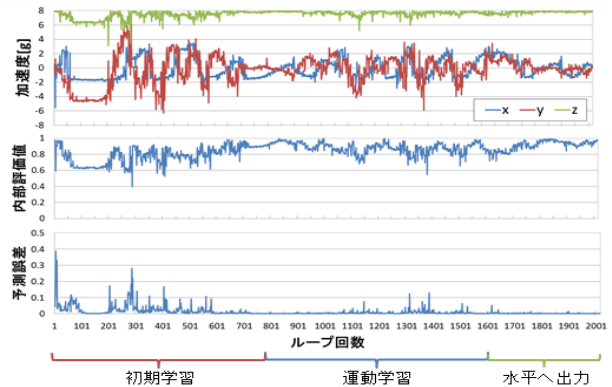


図 8. 実験(3)の実験結果

3.3.2 実験(3)について

図 8 より, 1600 ループ以降から振動が小さくなり, 確実に水平姿勢へ向かう運動生成を行ったことから, リンクモデルが異なる場合においても, パラメータを変更することなく, 内部評価値を高める運動生成が実現できることがわかる.

しかし, 初期学習段階が 800 ループ, 運動学習段階が 800 から 1600 ループと, 感覚運動融合モデルの学習による獲得にかかる時間が, 実験(1)のほぼ 2 倍となっている. これは, pitch 軸のサーボモータと姿勢センサの距離が遠くなったため, 実験(1)の場合と比較して, pitch 軸の運動量に対する加速度の変化量が大きくなったことが要因と考えられる. つまり, 加速度の変化量が大きくなったことにより, 実験(1)の場合よりも, きめ細かい姿勢制御が必要となり, 学習および水平姿勢実現までの時間が長くなったものと考えられる.

4. 結論

本研究では, 身体情報から感覚運動融合モデルを自律的に形成し, 内部評価基準に基づき運動生成を実現する手法を提案した. また, 提案手法を実ロボットの姿勢制御問題に適用し, 内部評価値を高くする運動生成の実現, 外部からの状態変化とハードウェア構成の変化に対する頑健性を実証した.

今後は, より多くのタスクを遂行できる知能ロボットの実現を目指し, 複数のセンサや複数の内部評価基準をもつ場合においても適用できるように, 提案手法の拡張および評価・改良を図っていく予定である.

参考文献

- [1] 長田, 増本, 山川, 木本, “ニューラルネットによる感覚運動融合の階層型モデル,” 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 675-694, 1994.
- [2] 無藤, 森, 遠藤, 玉瀬, 心理学, 有斐閣, 2004.