

能動的行動にもとづくロボットの知覚システムの開発

Perceptual system of a robot based on active motion

2001005



研究代表者

東北学院大学 工学部
機械知能工学科

准教授

郷 古 学

[研究の目的]

少子高齢化社会において、ロボットが人間の生活支援を行う、「人間と機械との調和にもとづく社会」の実現が熱望されている。このような要求に応えるため、ヒューマノイドロボットに代表される多くの生活支援型ロボットの研究が進められている。しかし、我々の生活環境で自律的に活動可能な適応型のロボットの実現は未だ困難である。

一方、生物は様々な環境に適応することが可能である。このような適応能力は、知覚や運動など各機能が相互作用をしながら発達することで発現すると考えられている。本研究では、人間と機械との調和を実現する適応型ロボットの構築を目指し、知覚と行動の相互作用にもとづく適応システムとしてのロボットの実現を目指す。

従来のロボットシステムは、知覚・行動などの各システムを独立して設計し統合することで実現してきた。しかし、この方法では、各システムが高機能であっても、統合システムとしてのロボットが必ずしも高性能となるとは限らない(図1, 上)。

そこで本研究では、各システムの相互作用を考慮してロボットを設計することが適応機能の発現の鍵となると考え(図1, 下)、能動的行動を利用した知覚システムを構築する。

一般に、ロボットはセンサからの情報にもと

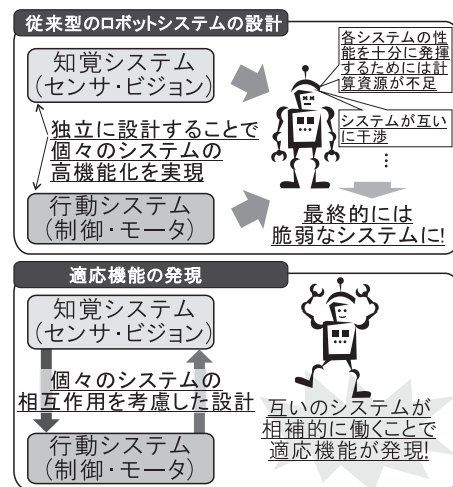


図1 従来型のロボットシステム(上)と適応機能の発現を実現する設計(下)

づき、外部環境を状態として表現する(state representation)。そして、状態→行動写像により行動を生成しタスクを達成する。外界を状態としてどのように表現すべきかは、タスクに応じて異なる。本研究では、照明条件などの環境変化によりセンサ情報が変化しても、その変化したセンサ出力を類似した状態と表現可能な状態表現手法を提案する。

[研究の内容・成果]

本章では、提案する状態表現について説明する。統計学や情報理論において、二つの分布の違いを計る量として、 f -divergence (以下、 f -div., 分布間距離と記す) と呼ばれる尺度が知られている [1]。二つの分布 $p_i(x)$, $p_j(x)$

の f -div. は次式で定義される。

$$f_{div}(p_i(x), p_j(x)) = \int p_j(x) f\left(\frac{p_i(x)}{p_j(x)}\right) dx \quad (1)$$

ここで、 $f(y)$ は $y > 0$ で定義する凸関数で、 $f(1) = 0$ を満たす関数である。Y. Qiao *et al.* は、式 (1) の形式で表現される二分布の分布間距離は、各分布に同一な連続かつ可逆な変換を行っても不変となることを示した [2]。

本研究では、このような f -div. の変換不変性を状態表現に利用する (図 2)。センサ出力が分布であるとするならば、ある環境下で観測される二つのセンサ出力 p_i, p_j の分布間距離 $f_{div}(p_i, p_j)$ (図 2 左) と、変化した環境における $q_i = g(p_i)$ と $q_j = g(p_j)$ との分布間距離 $f_{div}(q_i, q_j)$ (図 2 右) とは g が連続かつ可逆な変換であるならば、同一となることが期待できる。本研究では、このような複数のセンサの出力分布の分布間距離を用いて状態を表現する。

自律移動ロボットを例に、提案する状態表現の具体的な実現方法について説明する。図 3 に実験で用いる自律移動ロボット e-puck

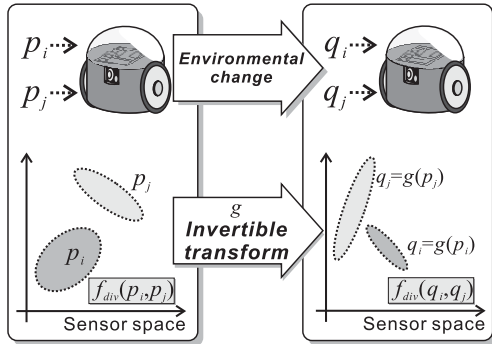


図 2 f -div. の変換不変性を用いた状態表現

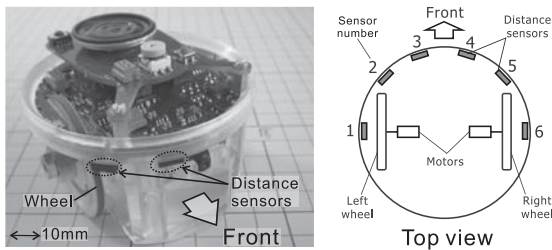


図 3 e-puck

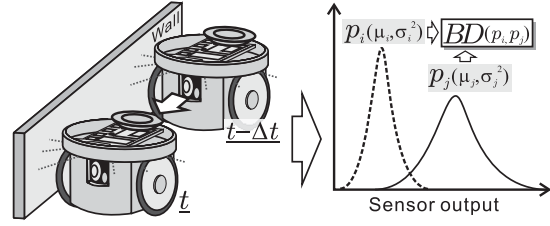


図 4 e-puck を用いた状態ベクトルの求め方

(EPFL 製) を示す。ロボットは計測範囲が 40 mm の 8 つの赤外線距離センサを持っている。ただし、後述の実験では図 3 右に示す 6 つのセンサのみ用いる。

図 4 に提案する状態の求め方を示す。まず、ロボットが微小時間 Δt 動く間に、センサ毎に M 個の出力値を取得する。続いて、得られた各センサ出力分布の分布間距離を求める。分布間距離は f -div. の一種で、対称性を持つバタチャリヤ距離 (Bhattacharyya distance 以下 BD と記す) を用いて計算する。二つのセンサ i, j の出力分布 $p_i(\mu_i, \sigma_i)$, $p_j(\mu_j, \sigma_j)$ 間のバタチャリヤ距離を次式に示す。

$$BD(p_i, p_j) = \frac{1}{4} \frac{(\mu_i - \mu_j)^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}{2\sigma_i^2\sigma_j^2} \quad (2)$$

本研究では、時刻 $t - \Delta t$ から t まで動く間に得られたセンサ出力分布をもとに、異なるセンサ i, j 間の $BD(p_i, p_j)$ を求め、それらを要素とするベクトル v を時刻 t における状態ベクトルと呼ぶ。本研究では、次のように状態ベクトル v を定義した。

$$v = [v_{1,2}, v_{1,3}, v_{1,4}, v_{1,5}, v_{1,6}, v_{2,3}, v_{2,4}, v_{2,5}, v_{2,6}, v_{3,4}, v_{3,5}, v_{3,6}, v_{4,5}, v_{4,6}, v_{5,6}]^T \quad (3)$$

ここで、 $v_{ij} = BD(p_i, p_j)$ である。

提案する状態表現では、計測対象がセンサの計測範囲外にある場合などに、微小時間のセンサ出力分布の分散が 0 となると、分布間距離を求めることができない。そのため、出力分布の分散が 0 となるセンサに関しては、そのセンサと他のすべてのセンサとの分布間距離は 0 とするとした。

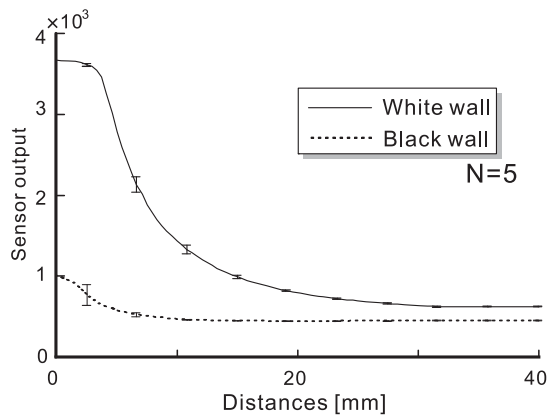


図5 壁の色の違いに対するセンサ出力(センサ No.3)

移動ロボットを用いた実機実験により、提案する状態表現の有効性を検証する。実験では、実ロボットを用いて環境の変化に対する有効性を確認した。

図5は表面が白と黒のポリスチレンボードの壁に対するセンサ (No.3) の距離とその出力の5回分の平均と分散である。図より距離が同一であっても、色の違いによりセンサ出力が大きく異なることが確認できる。

実験では、まず図6に示す環境（表面が白色のポリスチレンボードにより作成）でロボットが壁沿い移動できるように状態－行動画像を構築した。続いて、壁の色を黒に変更し、同様の状態－行動画像を用いて壁沿い移動が可能かどうかを確認した。実験では Δt を 1sec, $M=20$ とした。

図6は白色の壁でできた環境における、ロボットの壁沿い移動の様子である。続いて、同じ状態－行動画像を用いて、黒い色の壁でできた環境でロボットを動作させた(図7)。図7を見ると、壁の色が変わっても壁沿い移動が実現できていることが確認できる。

各環境下でロボットが移動中に観測する状態を比較した結果、壁の色によりセンサ情報は大きく異なるにもかかわらず、壁に対するロボットの距離や向きが同じ場合には、両環境において類似度の高い状態が観測されることを確認した。

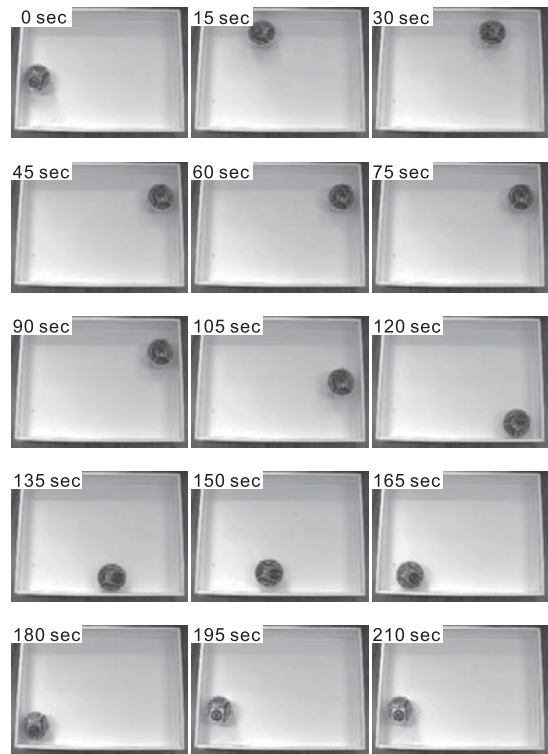


図6 白い壁に対する壁沿い移動

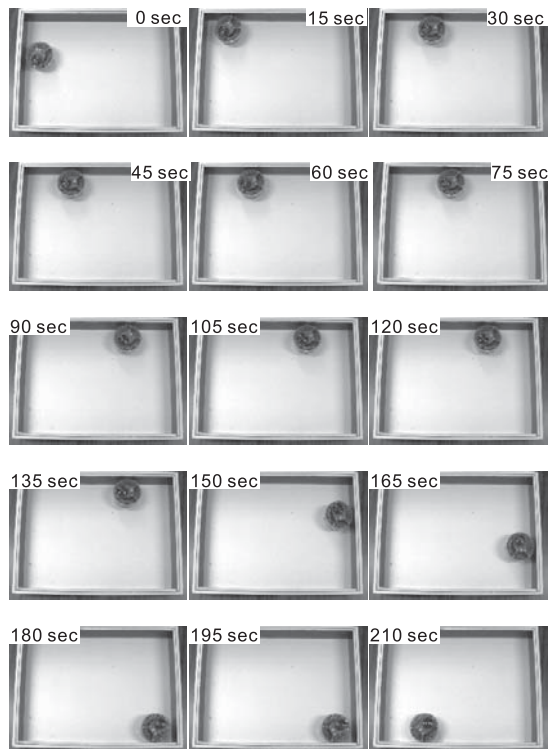


図7 黒い壁に対する壁沿い移動

[今後の研究の方向・課題]

提案する f -div. の変換不変性にもとづく状態表現法は、環境の変化により生じるセンサ出力の変化（変換）が可逆かつ連続である場合には対応することができる。しかし、本論文で扱ったように、分布をガウス分布であると仮定した場合、非線形変換された分布が必ずしもガウス分布になるとは限らない。そのため、変換が可逆かつ連続であっても変換の性質によっては、得られる状態ベクトルの類似度が低下することが考えられる。これに対しては、センサ出力の分布を表現する上で、他の分布を導入するなどの方策により対応可能であると考えられる。

また、今後はヒューマノイドなどの自由度の大きいロボットや他の種類のセンサに対しても提案する状態表現および、それを基礎とする知覚システムを適用していく予定である。

参考文献

- [1] I. Csiszar and P. C. Shields, Information Theory And Statistics: A Tutorial, Now Publishers, 2004.
- [2] Y. Qiao and N. Minematsu, " f -divergence is a generalized invariant measure between distributions," Proc. of 10th Annual Conf. of the Intl. Speech Communication Association, pp. 1349-1352, 2008.

[成果の発表・論文等]

(原著論文)

- [1] 郷古, 小林, "能動的な動きにもとづく知覚の恒常性を実現する状態表現," 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J94-D, no. 5, pp. 862-871, 2011.

(国際会議論文)

- [1] M. Gouko, Y. Kobayashi, "A state representation unaffected by environmental changes," Proc. of the 15th Intl. Conf. on Advanced Robotics (ICAR2011), pp. 396-401, (2011-6).
- [2] M. Gouko, Y. Kobayashi, "State representation with perceptual constancy based on active motion," Proc. of Intl. Conf. on Social Robotics 2010 (ICSR2010), pp. 100-109, (2010-6).
- [3] M. Gouko, K. Ito, "A fundamental study of a state representation using f -divergence," Proc. of 4th Intl. Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, pp. 84-89, (2010-6).

(口頭発表)

- [1] 郷古 学, 小林祐一, "能動的な動きにもとづく不変量を用いた状態表現," 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (DVD), 1G1-1, (2010-12).
- [2] 郷古 学, 小林祐一, "恒常性を有するロボットの状態表現," 日本生態心理学会第 3 回大会発表論文集 (CD-ROM), (2010-9).
- [3] 郷古 学, 小林祐一, "恒常性を実現する能動知覚と行動学習," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 (ROBOMECH2010), 講演論文集 (DVD), 2P1-F19, (2010-6).
- [4] 郷古 学, 小林祐一, "能動的な動きにもとづく知覚の恒常性の実現と行動学習," 第 24 回人工知能学会全国大会, 講演論文集 (CD-ROM), 2E3-1, (2010-6).