

ロボットの身体と環境との相互作用に基づく地図作成法

上江洲 吉美[†] 中村 恭之[†] 和田 俊和[†]

[†]和歌山大学 システム工学部 情報通信システム学科
〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地

E-mail : uezu@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

あらまし

これまで、ある環境における移動ロボットの誘導や行動生成のためには、環境地図が有用であると考えられ、様々な手法が提案されてきた。それらの研究の多くは、センサ情報から環境構造を抽出することに専念してきた。ロボットと周囲環境との相互作用の結果発現されるロボットの多様な行動を生成するためには、環境構造に加えて、環境に内在する情報（環境の持つ力学的な特性など）も獲得することが必要不可欠である。そこで、本稿では、ロボットの身体と環境との相互作用に基づく地図生成法を提案し、ロボット本体と外部カメラを用いることにより、環境構造に加えて環境の持つ力学的な特性も同時に獲得すること示す。実ロボットを用いた実験を行い提案した手法の有効性を確認した。

The New method for Generating a Map Based on the Interaction between a Robot's body and its Surrounding Environment

Yoshimi Uezu[†], Takayuki Nakamura[†], Toshikazu Wada[†]

[†]Faculty of Systems Engineering,
Wakayama University,
930 Sakaedani, Wakayama City, 640-8510, Japan

E-mail : uezu@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

Abstract

So far, many researchers insisted that an environmental map is useful for navigating the robot and for generating robot's behaviors. As a result, there have been a variety of method for constructing the environmental map. Most of them focused on extracting the geometrical structure of the environment from the sensor information. To realize various robot's behaviors which come from the dynamic interaction between the robot and its surrounding environment, the acquisition of the inherent information in the environment, such as dynamical property of the environment is indispensable in addition to its geometrical information.

This paper presents a novel paradigm for understanding the environment based on the interaction between a robot's body and its surrounding environment. In our method, not only the geometrical information but also the dynamical property of the environment can be obtained by using the robot body as a sensor probe. The real robot experiments are conducted in order to show the validity of our method.

1 はじめに

これまで、センサー情報から周囲環境を認識して自律的に動作するロボットを実現する様々な方法が研究されてきた。それらの多くの研究では、ある環境におけるロボットの誘導や行動生成のためには環境地図が有用であると考え、環境地図を生成する様々な手法が提案されてきた。主な手法としては、内部センサまたは外部センサから得られる情報から、2次元または3次元の幾何学的な地図を正確に構築することを目的とするものがある(例えば、[1, 2, 3, 4])。これらの研究では、最終的な目的が、環境中でロボットを正確に誘導することであるために正確な地図が必要になる。

一方、環境を認識するためにはそのような正確な地図は必要ないと主張する研究者たちもいる。動物など、自然界に生息する生物は、正確な幾何学的地図を構築せずに環境を認識し、様々な行動を生成できる。このような事実に基づいて、環境の正確な地図を再構成せずにロボットを誘導したり、環境を認識させる研究がいくつかある(例えば、[5, 6, 7])。このうち、山田らは移動ロボットの環境認識手法として、行動に基づく環境モデルの生成手法(AEM)を提案した。この手法は、ロボットに取り付けられたセンサから環境に関する情報を得ようとするのではなく、ある環境内で生成される行動系列を、環境を表現する特徴として利用する。このようなアプローチに従うと、センサ情報に多少の雑音が含まれていたとしても、雑音の影響にロバストな行動生成手法を利用することにより、安定した行動系列が生成でき、最終的に、センサ情報に含まれる雑音の影響にロバストな環境表現が獲得できる。

これまででは、移動ロボットの行動生成の基本となる環境地図手法が、環境構造のみを考慮し、環境に内在する特性についてはあまり考慮してこなかった。ロボットと周囲環境との動的な相互作用の結果生成されるロボットの多様な行動を生成するためには、環境構造に加えて、環境に内在する情報(環境の持つ力学的な特性など)も獲得することが必要不可欠である。

本稿では、この点に着目し新しい環境理解方法として、ロボットの身体と環境との相互作用に基づく新しい地図生成手法について述べる。提案手法では、環境中でロ

ボットを動作させている間、動作命令と外部視覚センサにより知覚されるロボットの状態との関係を調べる。ロボットが環境から何らかの影響を受けるとこの関係に変化が生じるため、本手法では、この変化を環境からの情報として検出し、変化の種類とその変化が観測された場所を記述する。実装したシステムでは、2種類の変化があると仮定して地図を生成している(詳細については後述する)。ロボットが環境を探索している間全ての現象は記録され、探索が終了すると、ロボットの動作を遮断する障害物、ロボットを遮蔽する障害物で囲まれる空間を記述した環境地図が生成される。遠隔操作可能な実移動ロボットと環境に埋め込まれた単眼カメラを用いた数々の実験の結果、提案手法の有効性を確認した。

2 環境理解のための新手法

これまで、環境理解のための地図生成手法として、主に二つの方法が取られてきた。

一つ目は、環境内の2次元または3次元の幾何学的情報(座標値表現)を正確に獲得する手法(以後これを、“幾何学的地図生成手法”と呼ぶ)である。この手法では、センサにより時々刻々と獲得される情報を、幾何学的な拘束や幾何学的なモデルに基づいて変換、更新することで、環境構造を再構成する(図1参照)。モデルに合致しないセンサ情報は、単に雑音として扱われ、統計的なモデルに基づいて平均化されたり除去されたりする。また、このようなアプローチでは、環境構造の復元が目的であるため、例えば床面の摩擦係数など、環境の持つ力学的特性を見積もる試みはなかった。



図 1: Geometrical approach

もう一つの手法は、センサ情報から非幾何学的な情報(例えば、環境構造のグラフ表現や行動系列によって表現された地図)を獲得する手法(以後この手法を“行動に基づく地図生成手法”と呼ぶ)である。

この手法では、環境構造を反映する特徴として、ロボットに搭載されているセンサからの情報の代わりに、ロボットの行動系列を用いる(図2参照)。結局のところ、行

動に基づく地図生成手法でも、行動系列をセンサ情報と考えれば、環境構造のみを再構成することに専念しており、幾何学的地図生成手法と同じ問題を扱っている。

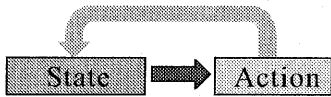


図 2: Action-based approach

これらの手法では、センサ情報の中で構造復元に利用されるモデルに合致しないものは、センサ情報に付随する雑音として取り扱われることが多かった。しかしながら、そのような情報は、全てが雑音であるとは限らず、環境からロボット本体への何らかの影響を表している可能性が高い。そのような環境からの影響は、環境に内在する特性と考えることもできる。これまでは、移動ロボットの行動生成の基本となる環境地図手法は、環境構造のみを考慮し、環境に内在する特性についてはあまり考慮してこなかった。ロボットと周囲環境との動的な相互作用の結果生成されるロボットの多様な行動を生成するためには、環境構造に加えて、環境に内在する情報（環境の持つ力学的な特性など）も獲得することが必要不可欠である。

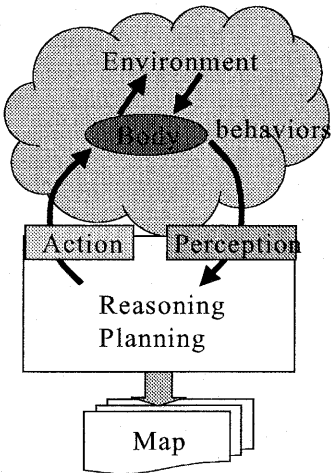


図 3: Our approach

図 3 に、提案する手法の概要を示す。提案手法では、state, action, behavior を次のように定義する。state は、知覚された状

態とする。例えば、知覚されたロボットの位置、速度や方向である。action はモータに送られる信号、動作命令とする。behavior は、ある state において action を送ったときに、知覚される状態の変化量とする。提案するシステムは、動作命令を送ることでロボットの身体を制御し、外部視覚センサによりロボットの状態を知覚する。動作命令と知覚された状態の変化量が互いに相関関係にある時、ロボットを正確に制御することができる。その他の場合、つまり相関関係が崩れた場合、環境からロボットへ何らかの影響が働くことになる。相関関係が崩れる場合としては、例えば、1) ある物体がロボットの運動を遮断して、ロボットは動作命令に関係なく移動しない場合。2) ある物体がロボットの身体を遮蔽し、観測される画像からロボットが見えなくなる場合、などである。

本手法は、環境からの影響の結果生じる相関関係崩れを検出し、衝突状態と遮蔽状態に囲まれている空間を記述する環境地図を生成する。本手法の利点を以下に示す。ロボットの身体をセンサプローブとすると、環境の構造的な情報だけでなく以下の情報も得ることができる：

- 画像の枠、または目標物を遮蔽する境界線
- 床面の摩擦係数など。

本稿では、図 4 で示すような、先述した 2 種類の相関関係の崩れを検出する実験システムを実装した。

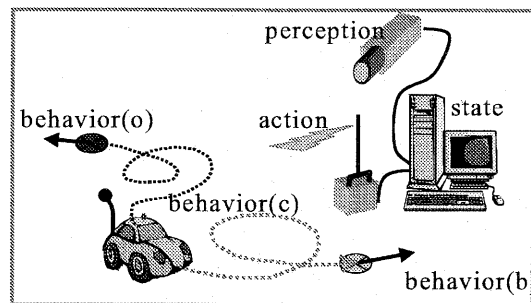


図 4: Our system based on our approach

3 地図生成法の手順

我々の地図生成手順の概要を以下に示す。

1. ロボットを使用したキャリブレーション手法により外部カメラのパラメータを推定する。
2. ロボットが周囲の環境を探索する。
3. behavior の変化点を検出し、記録する。
4. 記録された変化点の位置とラベル情報に基づいて地図を生成する。

以上の4つのステップを、ロボットが環境中を探索し終えるまで繰り返す。

3.1 ロボットによるキャリブレーション

呉 [8] らは外部カメラとラジコンカー制御システムを使用した新しいカメラキャリブレーション手法を開発した。このシステムは、キャリブレーション用の物体として安価なロボットの車体が利用可能で、外部カメラの正確なキャリブレーションが可能であるという利点がある。一般的に、外部カメラからの視覚情報に基づいてロボットを制御するためには正確なカメラキャリブレーションが必要である。そのためには、特別に設計されたキャリブレーション物体が必要であったり、観測画像内の座標値と実空間での座標値の対応関係が必要である。

一方、この手法は特定のキャリブレーション対象や、厳密な画像と実空間との対応を全く必要としない。この手法ではロボット本体をキャリブレーション用物体として利用する。自動車型の移動ロボットではステアリング角を一定にして、低速で動かすことによって真円を描かせることは容易である。ロボットの作る円軌道は、透視投影によって画像平面に投影され、楕円を形成する。本手法は、このような幾何学的関係に基づいて、カメラの焦点距離とロボットが動作している平面へのカメラの視線方向を推定する。提案する地図生成システムでは、このカメラキャリブレーションの結果推定されたカメラパラメータに基づいて画像上の座標から実空間内の座標値を獲得することができる。後述する behavior の変化点の位置を記録する際には、この実座標を使用する。

3.2 環境の探索

ある環境中で、未探索領域を探索するための行動を生成する手法はいろいろなものが考えられるが、本稿では、単純な探索アルゴリズムを考えた。ロボットの初期位置を決め、そこから全ての方向へ向かって探索するというものである。現在のロボットの姿勢を、目的の方向（未探索領域がある方向）へ向けるために、現在の位置から目的の方向へ移動する軌道を、円軌道と直線軌道を組み合わせることによって生成する。ある方向への探索が終わると画像の中心位置へ戻る。中心付近までは、比例航法により移動し、中心近くなると円軌道と直線軌道を組み合わせた軌道を生成し、次の目的の方向を向いた状態で中心付近を通る。全ての方向の探索が終了するまでこれらの動作を繰り返す。

3.3 behavior の変化点発見と地図生成

先述したように behavior とは、現在の状態において動作命令が行われた結果知覚される状態変化であると定義した。ロボットは常に環境と相互作用しており、一定の特性を持つ環境と相互作用している時は、動作命令と知覚される状態変化が一定の相関関係にある。環境の特性が異なるとロボット本体への環境からの影響も変化するために動作命令と知覚される状態変化との相関関係も変化する。ここでは、この相関関係が変化する地点のことを「behavior の変化点」と呼んでいる。従って、behavior の変化点を検出できれば環境の持つ特性が変化する地点を検出できる。この環境の影響が環境の特徴を表す情報である。ここでは、環境からロボット本体への影響の仕方に基づいて3種類の behavior があると仮定する。

Correlating behavior:

動作命令と知覚される状態変化の間に、一定の相関関係がある。このときロボットは制御可能である。

Blocking behavior:

動作命令に対応する状態変化が起こらない。このとき、ある物体がロボットの行動を阻害している。

Occluding behavior:

状態変化が観測できない。このとき、ある

物体がロボットの身体を遮蔽して、ロボットが観測されている画像から消えている。

behavior の変化点では、動作命令と知覚される行動との関係が変化する。仮定された行動の定義から、2種類の変化点 CB と CO を発見することができる。 CB と CO はそれぞれ、*Correlating behavior* が *Occluding behavior* に変化する点、 *Correlating behavior* が *Occluding behavior* に変化する点を意味している。このシステムは、センサ情報と動作命令を常に観測して、それまでに蓄積された相関関係と観測結果を比較することで、変化点を検出する。

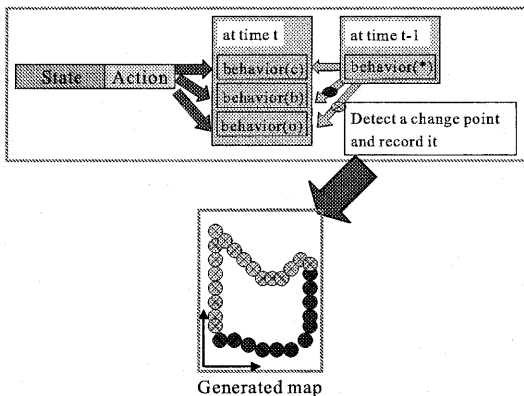


図 5: Detecting an inflection point and generating a map

提案システムにより生成される地図は、 $\langle T, P \rangle$ の組によって表された記述子で構成されている。 T と P はそれぞれ変化点 $\in CB, CO$ の種類と、変化点が発生した地点 (x, y) を示す。システムは行動の変化点を検出したら T と P を地図に記録し、地図を生成していく。

4 実験結果

4.1 システム

提案システムの概観を図6に示す。実験では移動ロボットとして、4輪のラジコンカー（以降 RCcar）を利用している。RCcar の上部には赤と緑のLEDが取り付けられており、RCcar の位置と方位を推定するためにこのLEDを使用している。RCcar の行動はIEEE1394カメラ (SONY DFW-VL500) によって観測する。画像中のLED

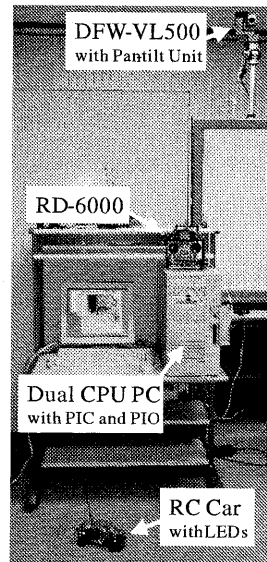


図 6: Detecting an inflection point and generating a map

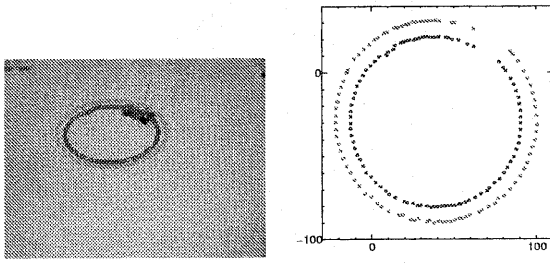
の位置の追跡には、和田 [9] によって開発された色データ追跡システムを使用している。この視覚追跡システムは最近傍識別を利用しており、実環境中でロボスタな追跡が可能になっている。前述したカメラキャリブレーション手法により推定されたカメラパラメータに基づいて Homography 行列を計算し、画像座標を Homography 行列により実座標に変換する。

4.2 ロボットを用いたカメラキャリブレーションの結果

図7にロボットを利用したカメラキャリブレーションの結果を示す。図7(a)と(b)は画像上のラジコンの位置とカメラパラメータに基づいて変換された各々の実座標を表している。このロボットを用いたキャリブレーション手法を用いたキャリブレーションにより、画像上の座標（楕円の点列）から実座標（円の点列）に正確に変換することができることが分かる。

4.3 環境の探索結果

図8(a)と(b)は3.2節で説明した軌道生成アルゴリズムに従ってロボットが環境

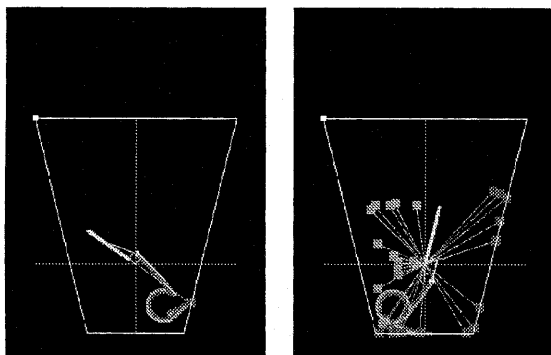


(a) Test environment and the observation result of robot movement

(b) The estimated locus of the robot

図 7: Result of robot-guided calibration method

中を探索している様子を示す。図 8(a) が初期段階で、図 8(b) が中期の段階の様子を示している。白い太線は未探索地域の方向、つまり目標方位を示している。白い小さな点と細い直線は、ロボットの現在の位置と姿勢を表している。直線と弧形の線の部分からなる灰色の線は、ロボットが動いた軌跡を表す。このようにロボットは進行方向を未探索領域の方向に修正しながら環境中を探索していくことができる。



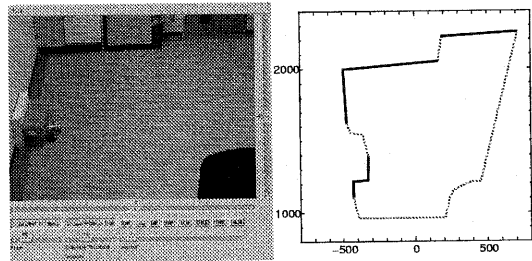
(a) beginning of exploration

(b) middle of exploration

図 8: Exploring the environment

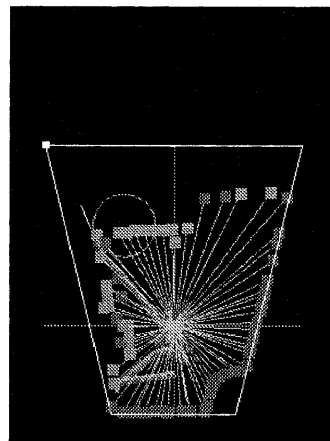
4.4 地図生成の結果

図 9(a), (b), (c) はそれぞれ実験環境の様子、実際の構造、生成された地図を示している。図 9(a) に示されるように、左側の壁には箱があり右下の角には黒い椅子がある。箱の奥側の面と黒い椅子は画像中で遮蔽を意味する境界線を形成する。箱の手前の面と、壁と床の間の輪郭は障害を意味する境界線を形成する。図 9(b) 中の実線と点線は壁と床面の境界線と遮蔽境界線をそれぞれ表している。図 9(c) は、提案された手法により生成された地図を示す。明るい灰色と暗い灰色の四角は CB と CO の位置を表している。図 9(c) で表されるように、本手法は行動の変化点を発見するのに成功し、構造情報に加えて物理的性質を反映した地図を生成した。



(a) Test environment

(b) The actual structure

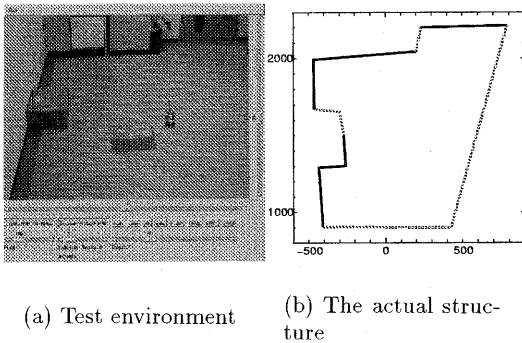


(c) The generated map

図 9: A result 1

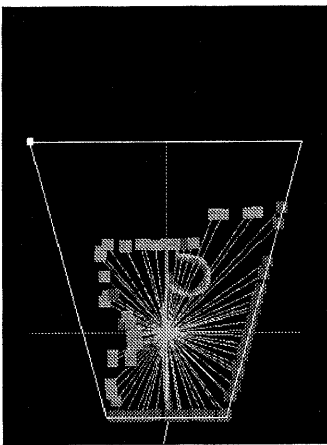
本手法の利点を明確にするために、図10(a)に示すように本物と偽者の箱をその環境に配置して実験を行った。偽者の箱は本物の箱の写真であり、その写真を床面上に貼り付けてある。図10(b)に提案手法に基づいて生成された地図を示す。このような状況下では、視覚に基づく一般的な環境認識システムは視覚情報だけからでは本物、偽者の箱の区別がつかないため環境構造を誤認識する可能性が高い。

一方提案手法では、図10(c)に示したように、環境の物理的な情報と構造的な情報が反映した地図の生成に成功している。



(a) Test environment

(b) The actual structure



(c) The generated map

図10: A result 2

5 考察

我々はロボットと環境との相互作用に基づいた環境認識のための新しい手法を提案した。そしてその手法を検証するために、ロボットを利用したカメラキャリブレーションシステムと、behaviorの変化点を検出するシステムからなる地図生成システムを開発した。実ロボットを用いた実験で示したように、本システムはその環境中に画像処理システムに対する障害があっても、環境地図の生成に成功した。提案手法により環境の構造に関する情報だけでなく、環境に内在する特性に関する情報も同時に獲得できることを示した。今後の予定として、環境の摩擦係数の違いを検出できるシステムを作る予定である。さらに、生成された地図に基づいて、RCcarがドリフトやスピンターンなどの動的な行動を生み出せるような行動生成システムを開発する予定である。

謝辞

本研究は、平成14年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究A(2)「ロボットの身体を用いた環境認識に関する研究」(課題番号:12308016)により行われた。

参考文献

- [1] A. Elfes. "Sonar-based real-world mapping and navigation". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3(3), pp. 249-265, 1987.
- [2] M. Asada. "Map building for a mobile robot from sensory data". *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 20:6, pp. 1326-1336, 1990.
- [3] J. A. Janet, R. Gutierrez-Osuna, T. A. Chase, M. White, and R. C. Luo. "Global self-localization for autonomous mobile robots using self-organizing kohonen neural networks". In *Proc. of IROS 95*, pp. 504-509, 1995.
- [4] F. Wallner and R. Dillman. "Real-time map refinement by use of sonar and active

stereo-vision". *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 16, pp. 47–56, 1995.

- [5] U. Nehmzow and T. Smithers. "Map-building using self-organizing networks in really useful robots". In *Proc. of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 152–159, 1991.
- [6] M. J. Mataric. "Integration of representation into goal-driven behavior based robots". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-8(3), pp. 304–312, 1992.
- [7] S. Yamada and M. Murota. "Unsupervised learning to recognize environments from behavior sequences in a mobile robot". In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1871–1876, 1998.
- [8] H. Wu, T. Wada, and Y. Hagiwara. "Robot guided camera calibration". In *IPSJ SIG Notes CVIM*, pp. 2003–CVIM-136, pp.67–74, 2003.
- [9] T. Wada. "Color-target detection based on nearest neighbor classifier: Example based classification and its applications". In *IPSJ SIG Notes CVIM*, pp. 2002–CVIM-134, pp.17–24, 2002.