

解 説

移動ロボットの環境認識と行動生成

Environment Recognition and Action Planning for Mobile Robots

三 浦

純*

*豊橋技術科学大学

Jun Miura* *Toyohashi University of Technology

1. は じ め に

ロボットは、視覚などのセンサ情報を基に環境を認識し行動する。一般に認識に手間をかけるほどより詳細な環境情報が得られるが、必要以上に詳細な情報を得ることはかえって行動全体の効率を落とす可能性がある。したがって、ロボットの行動の目的を考慮し、行動生成に必要な情報を得るように認識を設計・制御することが重要である [1]。

コンピュータビジョンの分野ではタスク指向視覚 [2] や能動視覚 [3] など、必要な情報を得るための注視点や処理の制御が提案されてきた。ロボットビジョンでは、通常ロボットの行動の目的を考慮して処理が設計されているが、目的と処理の関係を明示的に考慮するものはほとんどなかった。しかし、ロボットの動作環境が複雑になるにつれ認識処理もまた複雑になり、行動全体の効率化のためには認識の制御が重要になってきている。また、認識のための行動と本来の行動の目的を達成するための行動が干渉する場合もあり、認識の制御はますます重要な問題となりつつある。

本稿では、移動ロボットを対象とし、その環境認識と行動生成について二つの面から考える。一つは、ロボットの行動の目的を考慮して環境認識処理を設計するものである。もう一つは、認識と行動を統一的に計画することによって、ロボットの最適な行動を実現しようとするものである。前者はもちろん後者のための一構成要素となり得るが、認識自体が複雑な処理であるため、それ自身でも重要な問題となる。

以下、筆者らのこれまでの研究を中心として関連研究を紹介する。最初の一つが行動の目的を考慮した環境認識に関するものであり、後の三つが認識と行動の統一的計画に関するものである。

2. 利用目的を考慮した三次元環境の簡易モデリング

移動ロボットの自由な行動には、環境のモデル化が不可

欠である。しかし、環境の詳細なモデル化はその生成・維持にコストがかかり、またタスクによっては詳細な環境の三次元モデルが不要な場合もある。ここでは、作業移動ロボットとユーザが位置に関する情報交換を行うという目的の下で環境のモデル化を行った例を紹介する [4]。そこでは、以下の四つの行為を想定している (図 1)。

- ユーザがロボットのいる (遠隔) 環境を認識する。
- ユーザがロボットに目的地を指示する。
- ロボットが環境中の自己位置を認識する。
- ロボットが現在位置をユーザに伝える。

これらの行為をサポートするためには、三次元空間の形状と見えの情報は有用であるが、仮想現実で用いられるような精密なモデルは必ずしも必要ではない。しかし、どの程度の精密さが必要かをあらかじめ決めることは難しく、また対象とする環境によって適用可能な技術が異なる。ここでは、ある程度の形状と見えを保持できるデータ構造を考え、それによって上記の行為がサポートできるかどうか検証する、というアプローチをとった。

モデル生成は以下のように行う。ロボットは第 5 章の手法を用いて未知環境を移動しながら、全方位ステレオ視とレーザ距離センサによってデータを取得し、三次元障害物地図を生成する。環境の大まかな形状を得るために、通常のオフィスに存在する物体の高さに応じて空間を 4 層に分け、層ごとに自由空間の輪郭を動的輪郭法を用いて推定する。各層の輪郭は垂直平面の系列で表現されるので、画像データをテキストチャとして貼り付けて見えを表現する。多少の時間遅れはあるものの移動しながらオンラインでモデル作成が可能であった。

ロボットの自己位置認識は、現在の観測データとモデルとの間での形状と見えの照合により行う。その他の三つの行為については、図 2 に示すような GUI を作成してその支援を行うこととした。ユーザはモデリング結果から環境を認識し、さらにロボットの位置の確認や目的地の指示を行うことができる (GUI 中の領域 1)。実験では、この GUI を用いて上記の位置に関する情報交換を行って、ロボットに指示を与えることが確認できた。

上記のモデリング手法は目的に対して最適化されたもの

原稿受付 2008 年 2 月 7 日

キーワード: Mobile Robots, Environment Recognition, Action Planning

*〒 441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

*Toyohashi-shi, Aichi

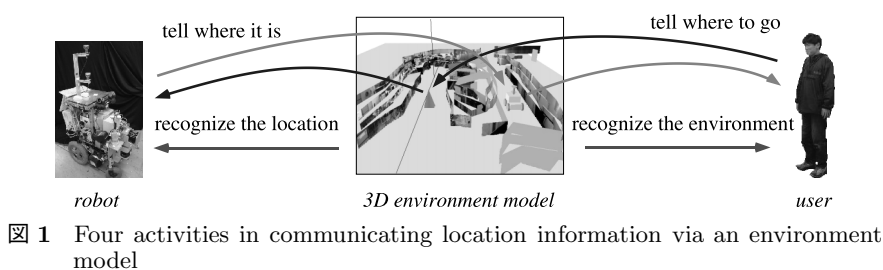


図 1 Four activities in communicating location information via an environment model

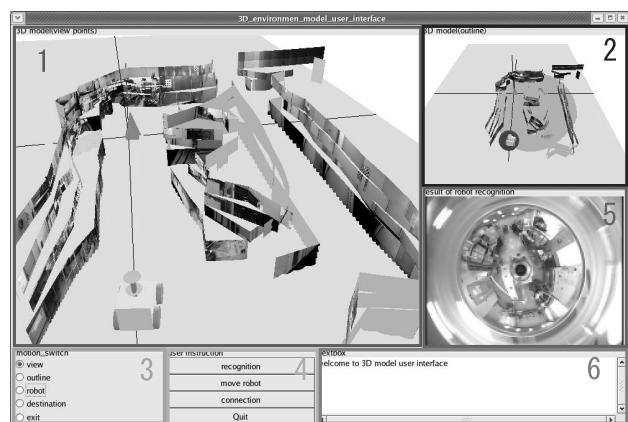


図 2 A graphical user interface

ではないが、目的を考慮してモデルの表現法や利用法を設計するアプローチの例を示している。タスクごとに必要な情報は異なり、例えばユーザがロボットに指示したものを取ってきてもらいたいときには、物体の配置等の情報もモデル内に表現する必要がある。

ロボットの目的や環境を注意深く分析することにより、環境を陽に表現することなく効率的かつロバスタな処理が実現できる場合もあるが（例えば、ステレオ視を用いた道路領域の検出 [5] [6]）、目的や環境がある程度汎用的であるならば、環境のモデリングは必要であろう。

3. 認識と行動の統一的計画生成

移動ロボットが周囲を観測し経路を選択しながら目的地へ向かう場合、目的地への移動とよりよい情報を得るための視点への移動が必ずしも一致しない。そのような場合、観測と移動を統一的に計画することが不可欠である。ここでは、観測の不確かさのために環境の状態が一意に決定できないときに、観測のコストと効果のトレードオフを考慮しながら最適な観測地点と移動経路を決定する問題を、決定理論的計画生成法を用いて扱った例 [7] を述べる。

図 3 で、ロボットはどちらかの経路を通して目的地へ向かう。短いほうの経路は途中の狭い領域（gate）の幅が不確かのため現時点では通れるかどうか分らず、通るためには観測によって通過可能であることを確かめる必要がある。一方、長いほうの経路は通れることが分かっているとす

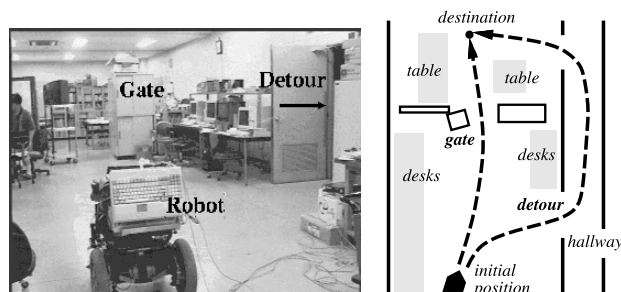
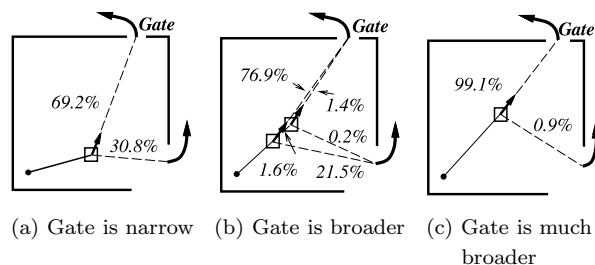


図 3 A view planning problem for a mobile robot



□ observation point ↗ observation direction

図 4 Simulation results

る。計画生成の目的は目的地へできるだけ早く到達するための観測地点の系列を選択することである。ここで、環境はほぼ既知であり gate の幅にのみ不確かさが存在するとする。

この問題を次のように定式化する。ロボットの位置を $\mathbf{x}$ 、gate 幅の確率分布をロボットの持つ情報 $\mathbf{I}$ とする。さらに、 $C^*(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ を位置 $\mathbf{x}$ で情報 $\mathbf{I}$ を持っているときに目的地に到達するまでの期待時間の最小値、 $C_m(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ を $\mathbf{x}$ から $\mathbf{y}$ への移動に要する時間、 C_v を 1 回の観測にかかる時間、 $P(\mathbf{I})$ を情報 $\mathbf{I}$ を得る確率とすると、次の再帰式を得る。

$$C^*(\mathbf{x}_i, \mathbf{I}_i) = \min_{\mathbf{x}_{i+1} \in \mathcal{X}} \left(C_m(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i+1}) + C_v + \sum_k P(\mathbf{I}_{i+1}^k) C^*(\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{I}_{i+1}^k) \right).$$

この式を分枝限定法により解いて、目的地へ到達するまでの期待時間を最小化する計画が得られる [7]。計画はある選ばれた観測点を OR ノード、観測後の可能な状態を AND ノードとする AND/OR 木となる。図 4 に計画生成結果の例を示す。初期の gate 幅の推定値が狭い場合には（図 4 (a)）、右側の迂回路の入口へ向かう直線に近い位置に次の観測点を決めている。初期推定値が広くなるにつれ、次の観測点は gate へ向かう直線に近づく。

観測と行動の計画生成を期待コスト最小化問題として定式化する場合、センサ情報の不確かさなどにより起こり得る状況が多岐にわたる場合や、取り得る行動の集合が大きい場合には、計画生成コストが急激に増大する。これに対処するためには、タスクに関する知識を用いて探索範囲を限定する、高速な近似解法を利用する [8]、あるいは計画生成コストを陽に考慮する [9] といった方策が考えられる。

上記手法を一般化すると、まず認識結果を予測し、次にそれと現在持っている情報とを統合して得られる新たな情報を計算し（主にベイズ推論が用いられる）、それに基づいて行動を生成する、という手順になる。認識結果や環境に関する知識に不確かさがある場合の行動生成は、一般にこの手順に従う。例えば、対象物の種別のあいまいさ [10] や自己位置のあいまいさ [11] を解消するための行動生成がある。

4. 地図生成や位置推定のための観測計画

地図生成ではロボットは環境内を動きまわって情報を収集し、それらを統合して地図を生成する。できるだけ地図生成の効率を上げるためには、例えば未知の領域の境界 (frontier) へ向かうような探索行動を計画することが考えられる [12]。しかし、ただ未知の領域へ進んでいくだけでは、十分な自己位置推定の精度が得られず、地図全体の精度が低下する、といった問題が生じるおそれがある。タスクに複数の評価基準がある場合には、それらを全体として評価することがしばしば必要となる。

統合的探索 (Integrated Exploration) [13] では、次に進むべき目的地候補を、以下の三つの評価関数で評価する。

- 情報利得効用：そこへ進んで観測することによってどの程度の情報が得られるかを示すもので、確率的障害物グリッド地図の、目的地候補から観測される領域内でのエントロピーとして計算する。
- ナビゲーション効用：移動のコストを評価するもので、利用する軌道計画手法で計算された目的地候補までの移動コストの負の値を用いる。

● 位置推定効用：位置推定精度を評価するもので、既知のランドマークを用いて位置を推定したときの誤差共分散行列で示される確率分布のエントロピーを用いる。最終的にはこれら三つの関数の重み付和を用いる。適切な重みを用いることで、適度な効率と信頼性で未知空間の探索を行うことが期待される。同様に、複数の評価項目を考慮して行動を計画する手法がいくつか提案されているが [14] [15]、重みをどのように調節するかが問題となる。

5. 動きや地図の不確かさを考慮した移動ロボットの適応的速度選択

周囲環境を認識しながら移動するロボットにおいては、効率と安全性は一般にトレードオフの関係にある。効率を上げるために高速で移動すると認識の信頼性が低下し、その結果安全性が減少する。安全性を高めようとして速度を落とすと効率が落ちる。衝突を避けることが必要条件であれば、最適な速度を選ぶことは、衝突しない（安全である）という条件の下で、効率を最大化する速度（最大安全速度と呼んでいる [16]）を求めることで近似できる。

1 回の観測にかかる時間を一定とすると、速度は次の観測位置までの距離を決定する。動きの誤差は距離に依存することから、速度と衝突可能性の関係を調べることができる。文献 [16] では、予測される位置誤差範囲の中で最も目標軌道から遠い位置になったとしても衝突することなく目

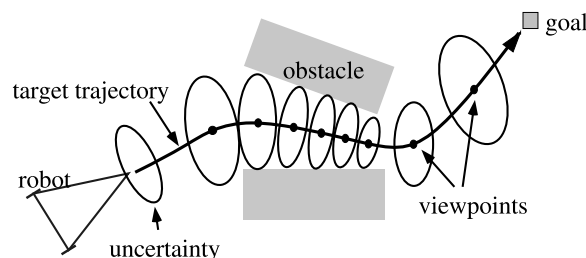


図 5 An example of adaptive speed selection. Viewpoint intervals are short in a narrow space

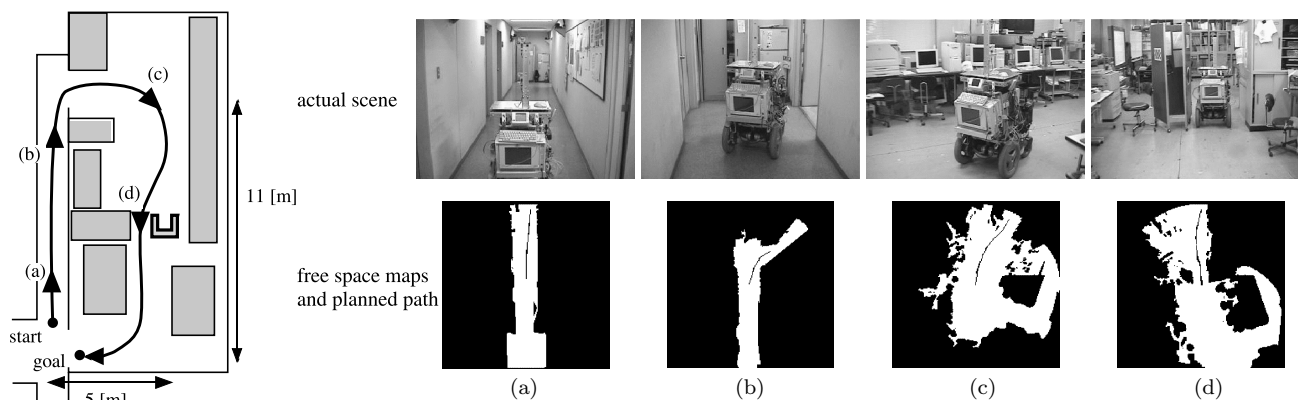


図 6 Result of adaptive speed selection

標軌道に復帰する軌道が生成できることを安全の基準とし、安全と判断された速度の中で最大のものを選択した。この戦略は単純であるが効果的であり、図5に示すような適応的な速度選択（観測位置間隔の選択）を自然に実現することができる。このような速度選択は、我々の自動車の運転に類似しているが、それを最大安全速度という考え方で定式化したところに意味がある。

未知環境を移動する場合には、認識した自由空間の信頼性が問題となる。一般に、ある領域が自由空間であるかどうかはセンサ情報の不確かさのため1回の観測で決められず、複数回の観測結果を統合することにより初めて自由空間であると確信できる[17]。したがって、まだ自由空間であると確信できない領域（不定領域と呼ぶ）へ進入することは安全性の面から望ましくなく、あと何回程度観測すれば確実に安全とみなせるかを考えてその領域に到達するための速度を選択する手法を提案した[18]。

図6は、障害物までの距離による速度の制限と、不定領域までの距離による速度の制限の両方を考慮して未知空間を移動した結果を示す。図6の左に示す廊下と部屋を含む実験環境において、経路点の座標のみを与え図6に示すような経路を移動させた。右は、経路中の(a)～(d)地点で生成された自由空間地図と計画されたロボット経路、および移動の様子を示す。ロボットの周囲の空間が広く先の見通しがよい場合には高速で移動するが((a)および(c))、どちらかの速度制限が効く場合には低速で移動する((b)および(d))。

6. おわりに

複雑環境で適切に行動するためには、必要十分な環境情報を効率よく獲得するための認識の制御が不可欠である。本稿では、そのためのアプローチとして、目的を考慮した環境認識処理の設計、および認識と行動の統一的計画生成を取り上げ、いくつかの研究を紹介した。

一般に、問題が複雑になれば計画生成のコストは増大する。実世界で動作するロボットは他の知的システムに比べて時間の制約が厳しいので、それに対処することが特に重要となる。一方でロボット動作には厳密な意味での最適化は必要でなく、ある程度の効率で動作すれば十分な場合も多い。そのためには、ロボットのタスクをよく理解し、適切な環境表現や行動の制約、あるいは適度な近似解を得る行動生成法などを検討する必要があるだろう。また、それらをロボットが経験から学習することも重要であろう。

参考文献

- [1] 三浦純：“センサ情報に基づく行動決定のための環境モデリング”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.3，pp.325-330，2000。
- [2] K. Ikeuchi and M. Hebert: “Task Oriented Vision,” Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2187-2194,

1992.

- [3] R. Bajcsy: “Active Perception,” Proceedings of IEEE, vol.76, no.8, pp.996-1005, 1988.
- [4] S. Ikeda and J. Miura: “3D Indoor Environment Modeling by a Mobile Robot with Omnidirectional Stereo and Laser Range Finder,” Proceedings of 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3435-3440, 2006.
- [5] K. Onoguchi, N. Takeda and M. Watanabe: “Planar Projection Stereopsis Method for Road Extraction,” Proceedings of 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.249-256, 1995.
- [6] 奥富正敏, 野口卓, 中野勝之: “ステレオ画像からの射影変換行列の抽出による道路領域検出”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8, pp.1105-1111, 2000.
- [7] J. Miura and Y. Shirai: “Vision and Motion Planning for a Mobile Robot under Uncertainty,” Int. J. of Robotics Research, vol.16, no.6, pp.806-825, 1997.
- [8] 武村紀子, 三浦純: “多スタート局所探索法を用いた多人数追跡のための同時視線プランニング”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.8, pp.1226-1233, 2007.
- [9] 三浦純, 白井良明: “プランニングコストと視覚の不確かさを考慮した移動ロボットの視覚と行動のプランニング”, 人工知能学会誌, vol.13, no.4, pp.588-596, 1998.
- [10] 滝沢徳高, 白井良明, 三浦純, 久野義徳: “不確実性を考慮した道路交差点シーン解釈のための注視行動の決定”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.3, pp.345-352, 1998.
- [11] 周洪鈞, 坂根茂幸: “ベイジアンネットワークの構造学習と推論を用いた移動ロボットの位置決めのためのセンサプランニング”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.2, pp.245-255, 2004.
- [12] B. Yamauchi: “A Frontier-Based Approach for Autonomous Navigation,” Proceedings of the 1997 IEEE Int. Conf. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp.146-151, 1997.
- [13] A.A. Makarenko, S.B. Williams, F. Bourgault and H.F. Durrant-Whyte: “An Experiment in Integrated Exploration,” Proceedings of 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.534-539, 2002.
- [14] D. Fox, W. Burgard and S. Thrun: “Active Markov Localization for Mobile Robots,” Robotics and Autonomous Systems, vol.25, no.3-4, pp.195-207, 1998.
- [15] H.J.S. Feder, J.J. Leonard and C.M. Smith: “Adaptive Mobile Robot Navigation and Mapping,” Int. J. of Robotics Research, vol.18, no.7, pp.650-668, 1999.
- [16] 文仁赫, 三浦純, 白井良明: “不確かさを考慮した観測位置と移動のオンライン計画手法”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1107-1113, 1999.
- [17] 根岸善朗, 三浦純, 白井良明: “全方位ステレオとレーザレンジファインダの統合による移動ロボットの地図生成”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.6, pp.690-696, 2003.
- [18] 三浦純, 根岸善朗, 白井良明: “地図と移動の不確かさを考慮した未知環境における適応的速度制御”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.1, pp.47-55, 2006.



三浦 純 (Jun Miura)

1984年東京大学工学部機械工学科卒業。1989年同大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了，工学博士。同年大阪大学助手。同大学大学院工学系研究科機械工学専攻助教授を経て，2007年豊橋技術科学大学情報工学系教授。知能ロボット，人工知能，コンピュータビジョンの研究に従事。1994～1995年CMU客員研究員。1997年ロボット学会論文賞受賞。人工知能学会，電子情報通信学会，情報処理学会，システム制御情報学会，日本機械学会，IEEE，AAAI各会員。
(日本ロボット学会正会員)