

移動ロボットのための確率的空間問合せシステムの構築

早矢仕 新[†] 董 ていてい[§] 加藤 翔[§] 石川 佳治^{††}[†] 名古屋大学工学部電気・電子情報工学科 [§] ^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科^{††} 名古屋大学情報基盤センター ^{††} 国立情報学研究所

1 はじめに

データベースの研究の分野では時間的、空間的情報を持つデータへの問合せ処理を実現する時空間データベースや、移動オブジェクトの移動状況や移動履歴を管理する移動オブジェクトデータベースに関する研究が進んでいる [1].

一方、ロボット研究の分野では移動ロボットの実用化が進んでいる [2]. 移動ロボット、特に自律型の移動ロボットの場合、行動の管理が重要となる. 移動ロボットの行動履歴をデータベースで管理、問い合わせることを実現することで、移動パターンのマイニングや自律型ロボットの行動決定といった応用が可能になると考えられる.

本稿では、位置が確率的に表現された移動ロボットの移動履歴をデータベースで管理し、移動履歴に対する問合せ機能を提供するシステムについて、その概要と実現技術のアイデアを述べる.

2 確率的位置情報と行動履歴問合せ

確率的位置情報の推定手法の代表的なものとしてパーティクルフィルタ (particle filter) が存在する [2, 3]. 特定の確率分布の形式を想定せず、位置を大量のサンプル (パーティクルと呼ぶ) の集合で表現する点の特徴である. モンテカルロ法の考えに基づいて、センサ情報等をもとに確率的な位置情報を逐次更新する. 本研究では、ロボットの確率的位置情報の推定にパーティクルフィルタが用いられている状況を想定する.

図1は、ある時刻におけるロボットの位置情報 (サンプル集合) をロボットが保持する地図データ上にプロットしたイメージを示す. 各点がパーティクルを表している

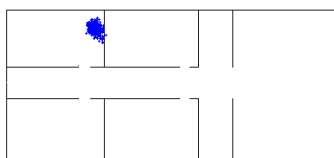


図1: サンプル集合による確率的位置表現

Development of Probabilistic Spatial Query System for Moving Robots

Arata Hayashi[†], Tingting Dong[§], Sho Kato[§], Yoshiharu Ishikawa^{††}

[†] Department of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University

[§] Information Technology Center, Nagoya University

^{††} Information Technology Center, Nagoya University and National Institute of Informatics

ロボットの行動履歴のイメージを図2に示す. 各時点において、ロボットの位置を確率的に表すパーティクルの集合が得られるが、これを時刻情報と対応付けたものが行動履歴である.

| 時刻 | パーティクル集合 |
|----------|--|
| 11:11:11 | $S_1 = \{(613, -467), (583, -579), \dots, (649, -547)\}$ |
| 11:11:13 | $S_2 = \{(294, -304), (254, -318), \dots, (214, -369)\}$ |
| 11:11:15 | $S_3 = \{(93, -309), (121, -172), \dots, (151, 170)\}$ |
| 11:11:17 | $S_4 = \{(278, -283), (261, -219), \dots, (312, -161)\}$ |
| 11:11:19 | $S_5 = \{(604, 240), (454, 164), \dots, (335, 356)\}$ |

図2: ロボットの行動履歴の例

このように得られた行動履歴に対する遡及的な履歴問合せを支援することを考える. 「ある時刻に指定されたロボットがどの位置にいたか」という問合せが最も単純なものであり、時刻により検索を行い対応するパーティクルを集合を取得すればよい. もう一つの基本的な問合せで、より複雑な問合せを実現するための構成要素となるものが、「指定された領域内にある確率以上で存在したロボットのIDとその時刻を求めよ」というものである. ここではこの問合せを範囲問合せ (range query) と呼ぶ. 本稿で対象とする範囲問合せを以下のように定義する.

定義 1 (範囲問合せ) 問合せ矩形領域 r と確率の閾値 θ が与えられたとき、範囲問合せ $RQ(r, \theta)$ は、 r 内に存在した確率が θ 以上であるようなロボットのIDとその時刻のペア $(id, time)$ を返す. \square

以下では主にこの範囲問合せの支援に焦点を絞って、システムの概要と問合せ処理手法について述べる.

3 システム実現のためのアプローチ

本システムは図2に示すような行動履歴を管理し、範囲問合せ機能を支援する. ただし、履歴情報の削減と問合せ処理の効率化のために以下のようなアプローチをとる.

スナップショットの保存 図2のような行動履歴をすべてデータベースで管理すると、データ量が膨大になってしまう. そこで、一定周期 τ ごとに $(t = 0, \tau, 2\tau, \dots)$ スナップショットとしてパーティクル集合を保存するものとし、各時刻ごとに保存する場合に比べ格納コストを削減する.

位置情報の動的な復元 たとえば $t = 3$ におけるロボットの位置情報（パーティクル集合）を得たいとする。しかし、たとえば $\tau = 5$ の場合、スナップショットにはその時刻の位置情報が保存されていない。指定された時点の位置情報を取得可能とするため、次のようなアプローチをとる。スナップショット取得時刻以外の時刻については、その時点においてロボットの位置推定の際に用いられたセンサ入力をログとしてデータベースに蓄積しておく。直前のスナップショット（この例では $t = 0$ の時点）と $t = 1, 2, 3$ の時点のセンサ情報があれば、パーティクルフィルタによる位置推定を $t = 1, 2, 3$ の時点について順次再実行することで、余分な時間は発生するものの、 $t = 3$ の時点のパーティクル集合を復元することができる。ただし、乱数発生シードの設定なども同一にする必要がある。

最小包囲矩形を用いた索引 範囲問合せを効率的に処理するためには、図 2 のエン트리の中から、問合せの矩形領域 r とパーティクル集合の分布が交わるものを効率よく調べ、候補となるエントリを容易に絞り込みできることが有効である。そこで、パーティクル集合の点の分布をきっちりと囲むような最小包囲矩形（minimum bounding rectangle, MBR）を求めておき、R-木のような空間索引（spatial index）により索引付けする。MBR の計算と空間索引への登録は、スナップショットをとったエン트리（ $t = 0, \tau, 2\tau, \dots$ ）だけではなく、すべての時刻のエントリについて作成する。これにより、スナップショットが存在しない時刻に対しても、MBR によるフィルタリング処理が適用できる。

問合せ処理アルゴリズム 範囲問合せに対する問合せ処理アルゴリズムを図 3 に示す。先に述べたとおり、5 行目においては、直近のスナップショットの情報をもとにパーティクルフィルタの処理を再実行して対応するパーティクル集合を復元する。7 行目において確率の閾値を満たすか否かを判断しているが、このためにはパーティクルの集合がどれだけ r 内に存在しているかの割合を求める。

1. 空間索引を用いて、 r と MBR が交わる履歴エントリの集合 H を求める
2. foreach $e \in H$ について do
3. // $e = (id, time)$ という形式を想定
4. if e に対するスナップショットが存在しない then
5. 直近のスナップショットと関連するセンサ情報を検索し、対応するパーティクル集合を復元する
6. end
7. if パーティクル集合の r 中の存在確率が θ 以上 then
8. e を問合せ結果の 1 つとして出力
9. end
10. end

図 3: 範囲問合せ $RQ(r, \theta)$ の処理アルゴリズム

4 システムの構成

図 4 はシステムの構成図である。本システムは行動履歴データベースに対して格納するデータを作成するモジュールと問合せ時にデータを処理するモジュールから構成される。情報抽出モジュールは、移動ロボットとの通信を行い、各時刻におけるセンサ情報やパーティクルフィルタによる位置推定結果を取得・計算して行動履歴データベースに格納する。インタフェースモジュールは、問合せ言語を解釈し実行プランに変更する言語処理モジュールと、実行プランを実行する問合せ処理モジュールからなる。後者が問合せ処理における主たる役割を果たす。位置情報索引作成モジュールは、前節で述べた空間索引の管理を行う。

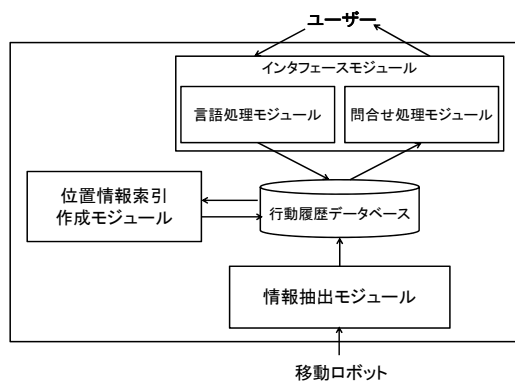


図 4: システム構成図

現在は PostgreSQL をベースとした実装を開発している。PostgreSQL が提供している空間索引の機能を有効に活用した実現を行っている。

5 まとめと今後の課題

本稿では、移動ロボットのための確率的空間問合せシステムについて、その概要と設計について述べた。範囲問合せに焦点を当てて、その処理方式について概略を示した。現在はシステムの実装を進めている。今後の課題としては、適切なスナップショット取得間隔の設定方式の開発、他の条件も含むより一般的な問合せに対応するための拡張、移動ロボットの実システムとの連携などが挙げられる。

謝辞

本研究の経費の一部は科学研究費（23650047）および内閣府最先端研究開発プロジェクト（FIRST）による。

参考文献

- [1] Ralf Hartmut Güting and Markus Schneider. *Moving Objects Databases*. Morgan Kaufmann, 2005.
- [2] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *確率ロボティクス*. 毎日コミュニケーションズ, 2007.
- [3] 樋口知之. 予測にいかす統計モデリングの基本 - ベイズ統計入門から応用まで. 講談社, 2011.