

## 移動ロボットデータベースにおけるモニタリング問合せ処理手法

杉浦 健人<sup>†</sup> 早矢仕 新<sup>§</sup> 董 ていてい<sup>§</sup> 石川 佳治<sup>††</sup><sup>†</sup> 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科 <sup>§</sup> <sup>††</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科<sup>††</sup> 国立情報学研究所

## 1 はじめに

センサネットワークの研究では、温度や湿度などの室内環境を効率的にモニタリングする手法が提案されている [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]。室内環境のモニタリングはセンサネットワークを利用したものが中心であるが、移動ロボットの実用化に伴い、ロボットによる室内のモニタリングが行われるようになると考えられる。

本稿では、室内環境のモニタリングを要求することをモニタリング問合せとみなし、移動ロボットにおけるモニタリング問合せを支援するシステムについて、概要と処理手法を述べる。

## 2 モニタリング問合せと統計モデル

室内の温度を監視するモニタリング問合せを考える。「ある地点の温度は何度か」という問合せが最も単純なものであり、要求された地点への移動と温度センサの使用によって問合せに答えることができる。しかし、一般に室内のモニタリングを行うのにあらゆる地点の温度を考える必要はなく、あらかじめ観測点としていくつかの地点を選択し、それらのみを監視するだけで十分なことが多い。本稿では、あらかじめ設けられた観測点に対してのみモニタリング問合せを行う状況を想定する。

また、一般に室内の温度変化は緩やかであり、ある時間帯の温度は毎日似たような値を取ることが多い。そのため、あらかじめ観測点の温度を大量に取得し統計モデルを構築することで、観測点の温度をある程度推定することができる。推定の計算時間はロボットの移動時間に比べはるかに小さいため、システムに統計モデルを組み込むことで効率的な問合せ処理が可能になる。さらに、問合せ結果の確からしさとして**確信度** (confidence) を付与することもできるようになる。

統計モデルを利用した確率的なモニタリング問合せを支援するシステムを考える。本稿では、ある観測点の温度を求める問合せを**値問合せ** (value query) と呼び、以下のように定義する。

**定義 1 (値問合せ)** 観測点の ID  $id$  と確信度の閾値  $\theta$  と許容誤差  $\epsilon$  が与えられたとき、値問合せ  $VQ(id, \theta, \epsilon)$

Processing Methods of Monitoring Queries in Moving Robot Databases

Kento Sugiura<sup>†</sup>, Arata Hayashi<sup>§</sup>, Tingting Dong<sup>§</sup>, Yoshiharu Ishikawa<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Department of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University

<sup>§</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University

<sup>††</sup> National Institute of Informatics

は、観測点の ID と温度と確信度の組  $(id, temp, conf)$  を返す。 □

以下では主にこの値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

本システムは値問合せ機能を支援する。システムの動作は主に次のようになる。まず値問合せにより指定された観測点の温度を、統計モデルを使用して推定する。本研究では温度の統計モデルとして多次元ガウス分布  $\Pr(\mathbf{x})$  を用いる。値問合せ  $VQ(id, \theta, \epsilon)$  が与えられたとき、式 (1) を用いて確信度を計算する。なお、 $\bar{x}$  は観測点  $x$  の温度の期待値を表す。

$$\Pr(x_{id} \in [\bar{x}_{id} - \epsilon, \bar{x}_{id} + \epsilon]) = \int_{\bar{x}_{id} - \epsilon}^{\bar{x}_{id} + \epsilon} \Pr(x_{id}) dx_{id} \quad (1)$$

確信度がユーザの指定する閾値  $\theta$  を超える場合は、期待値  $\bar{x}$  を観測点の温度として値問合せに答える。確信度が閾値以下である場合は、ロボットを要求された観測点に向けて移動させて、温度センサによって実際に取得した温度を用いて値問合せに答える。なお要求された観測点の温度を取得した場合は、確信度を 100% として値問合せに答える。

統計モデルにより問合せに答えられるとき、問合せの実行時間は極めて小さくなる。しかしユーザの要求する閾値が大きい場合、ロボットを使用しなければならないことが多くなる。そこでロボットによる温度取得の効率化のために以下のようなアプローチをとる。

**グラフ表現による最短経路の導出** 観測点の集合を各観測点をノードとしたグラフで表現する。観測点間の移動にかかる時間をエッジの重みとしてダイクストラ法を用いることで、2つの観測点間の最短経路を導出する。

**関連の利用** 距離の近い2地点の温度がおよそ同じ値になるように、一般に同じ室内の温度には何らかの相関がある。多次元ガウス分布では、そのような相関は条件付き確率分布として表される。条件付き確率分布はある観測点の温度を取得したときに計算でき、計算した条件付き確率分布を使用することで、他の観測点ではより正確な推定ができる。再推定をした際に確信度が閾値を超えた場合、要求された観測点までロボットを移動させることなく問合せに答えることができる。

**取得プランの最適化** ロボットが温度を取得する観測点の集合と取得する順番を**取得プラン**と呼ぶ。ある値問合せに対して複数の取得プランが考えられるが、プラン実行後の確信度がユーザの要求する閾値  $\theta$  を上回り、かつ最も実行時間の少ない取得プランを選択する必要がある。この問題は最適化問題として式 (2) のように定義できる。なお  $P$  は取得プラン、 $C(P)$  はロボットの移動時間、 $R(P)$  はプラン実行後の確信度の期待値をそれぞれ表す。

$$\begin{aligned} \min \quad & C(P) \\ \text{s.t.} \quad & R(P) \geq \theta \end{aligned} \quad (2)$$

$C(P)$  は取得プランを実行する際のロボットの移動時間を合計することで計算できる。例えば  $P = \{A, B, C\}$  であるとき、 $C(P)$  は観測点 A から観測点 B までの移動時間と観測点 B から観測点 C までの移動時間を足し合わせることで求められる。

温度取得後の確信度は条件付き確率を用いることで計算できる。しかし、取得プランを生成する時点では実際の温度はまだ分からない。そこで式 (3) のように温度取得後の確信度の期待値  $R(P)$  を計算し、取得プランの生成に利用する。なお、 $\mathbf{o}$  は取得した温度の集合を表す。

$$R(P) = \int \Pr(x_{id} \in [\bar{x}_{id} - \epsilon, \bar{x}_{id} + \epsilon] | \mathbf{o}) d\mathbf{o} \quad (3)$$

式 (2) の最適化問題は NP 困難であり、最適解を見つけるための時間計算量は極めて大きい。そこで図 1 に示す貪欲法を用いたアルゴリズムを使用して次善解を求める [1]。このアルゴリズムは閾値  $\theta$  を入力とし、取得プラン  $P$  を出力とする。取得プランは空集合から始まり、観測点を 1 つずつ加えることで次善解となる取得プランを生成する。図 1 の 13 行目に示すように、加える観測点は移動時間あたりの確信度の値が最も大きいものを選択する。

1.  $P = \emptyset, G = \emptyset$
2. //  $G$  は出力の候補となる取得プランの集合
3. **for**
4.   **foreach** 現在の取得プラン  $P$  に含まれていない観測点  $i$  について **do**
5.      $C(P \cup \{i\}), R(P \cup \{i\})$  を計算
6.     **if** 観測点  $i$  を加えた取得プランの確信度  $R(P \cup \{i\})$  が閾値  $\theta$  を超える **then**
7.       候補集合  $G$  に取得プラン  $P \cup \{i\}$  を加える
8.     **end**
9.   **end**
10. **if** 候補集合  $G$  が取得プランを持つ **then**
11.    **break**
12.   **end**
13.   移動時間あたりの確信度の値  $R(P \cup \{i\})/C(P \cup \{i\})$  が最も大きくなる観測点  $i$  を取得プラン  $P$  に加える
14. **end**
15. 候補集合  $G$  の中で移動時間  $C(P)$  が最も小さい取得プラン  $P$  を出力する

図 1: 取得プランの生成アルゴリズム

**取得プランの更新** 図 1 のアルゴリズムは、確信度の期待値を使用することで、実際の温度を知ることなく取得プランを生成している。しかし、確信度の期待値は統計モデルに依存しており、一般に実際の温度を利用して計算した確信度の方が正確である。そこで、取得プラン実行中に動的にプランを更新することを考える。実際の処理では、図 1 のアルゴリズムにおいてすでに温度を取得した観測点を取得プランの要素の候補から外し、取得した温度から求めた条件付き確率分布を用いることで、動的な取得プランの更新を行うことができる。

#### 4 システムの構成

本システムの構成を図 2 に示す。本システムは問合せに対してデータを処理するモジュール、室内の温度情報を保持するデータベース、室内を移動し温度情報を取得する移動ロボットの 3 つから構成される。本稿で紹介した処理は問合せ処理モジュールで行われる。

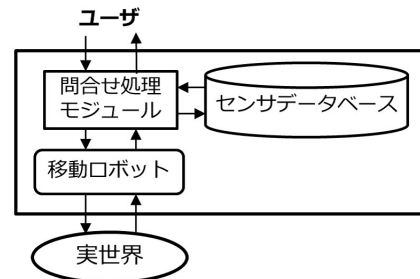


図 2: システム構成図

本研究では、移動ロボットとしてモバイルロボット社の Pioneer3-DX を使用する。また温度測定では、ストロベリー・リナックス社の USB 温度・湿度計モジュール USBRH-FG を使用する。

#### 5 まとめと今後の課題

本稿では、移動ロボットデータベースにおけるモニタリング問合せを支援するシステムについて、概要と設計を述べた。処理方式については、モニタリング問合せの例として値問合せに焦点をあて、その概略を示した。今後の課題としては、値問合せ以外の問合せの実装、統計モデルとして最適なモデルの選択、異常値の検出などが挙げられる。

#### 謝辞

本研究は内閣府最先端研究開発プロジェクト (FIRST) の助成による。

#### 参考文献

- [1] Amol Deshpande, Carlos Guestrin, Samuel R. Madden, Joseph M. Hellerstein, and Wei Hong. Model-based approximate querying in sensor networks. *The VLDB Journal*, Vol. 14, No. 4, pp. 417–443, 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.