

氏名	星野 智史
所属機関	宇都宮大学大学院工学研究科
研究題目	侵入者の存在確率と情報エントロピーに基づきロボットが巡視する防犯・警備システム

1. 研究の目的

現状の防犯・警備ロボットによる巡視では、出入り口、窓、部屋など規定の場所を効率的に訪れることが課題とされている。これは、ロボティクスにおける(I)動作計画問題および(II)順回路計画問題として取り組まれてきた。より確かな防犯・警備に向けては、必要に応じて空間全体の巡視がロボットには求められる。これは、ロボティクスにおける(III)探索問題となる。

本申請課題では、ロボティクスにおける動作計画、巡回回路計画、空間探索の3つの問題を統合的に扱った研究に取り組む。これらの問題に対して、ロボットが侵入者の存在情報に基づき、規定の場所に加え空間全体を対象にどこを巡視すべきか決定することは、学術的に極めて難解である。

侵入者の数や居場所という不確定要素は確率で表現することができる。本研究では、(1)複数の侵入者が、(2)空間内を動くという、従来にはないより現実的な環境を対象としている。本問題への新たなアプローチとして、巡視対象となる空間をセルに分割し、セルごとに独立した事象として侵入者の存在を扱う。そのため、各セルに対する存在確率と情報エントロピーの数理的なモデル化を図る。

ベイズ推定により、侵入者の存在確率を分布形式で定量化することができる。また、エントロピーを利用することで、ベイズ推定だけでは対象となりにえない場所も巡視することができる。これにより、人間の思考過程に基づいた巡視がロボットでも可能となる。日中や夜間といった時々刻々と変化する環境に適応した巡視は、高度な防犯・警備システムをロボットで実現するために求められる最も重要な性能である。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

ベイズ推定に基づいたロボットによる巡視アルゴリズムの開発

本研究では、右図に示すように、ロボットの巡視空間をセルに分割する。ロボットは、各セル内の領域をセンサで被覆することにより、侵入者の有無を探知する。これにより、当該セルに対して侵入者が存在する確率は、ベイズの定理に基づき $P(A|X) = \frac{P(X|A)P(A)}{\int P(X|A)P(A)dA}$ と更新される。ここで、 $P(A)$ は更新前の確率分



布、 $P(X|A)$ は尤度関数のことである。本研究では、ベータ分布を更新前の確率分布とし、ベルヌーイ試行により発見の有無をパラメータとした二項分布を尤度関数として用いる。そして、ロボットが更新後の確率分布 $P(A|X)$ から期待値を求め、この値が最も高いセルを巡視するアルゴリズムを開発する。これにより、侵入者の存在傾向を考慮した巡視を実現する。

ベイズ推定を用いた侵入者巡視の最適性と環境適応性に関する検討

学習・最適化のベンチマークとして、 K -Armedバンディットがある。これは、 K 個の確率変数から一つを選択する試行を繰り返し、得られる値(報酬)の総和を最大化する問題のことである。これに対し、ベイズ推定による最適解への収束が優れていることが知られている。本研究では、巡視を本問題と置き換える。そのため、 K 個の巡視セルに対して侵入者がある確率で発生する環境を想定する。そして、ロボットがベイズ推定に基づき最適、すなわち最も侵入確率の高いセルを学習することを示す。さらに、侵入者の発生確率を変化させた際の存在確率の変遷を考察し、環境変動に適応した巡視の可能性について検討する。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

ヒューリスティック関数としての情報エントロピーの導入

ベイズ推定のみでは、ロボットが発見した侵入者がそこに居続けた場合、存在確率が高くなり、別の場所を巡視できなくなってしまう。そこで、ロボットが巡視目的地を決定する際のヒューリスティック関数として、各セルに対する情報エントロピーを導入する。本研究における $P(A)$ は確率分布である。これにより、連続系のエントロピーは $H(A) = -\int P(A) \log P(A) dA$ から求めることができる。さらに、各セルにおける侵入者の情報量（「いるか」「いないか」）は、時間とともに不明瞭になることに着目し、過去の侵入者の統計量（ベルヌーイ試行における発見の有無）をある時間幅で棄却することで、 $P(A|X)$ の確率分布の期待値が 0.5 に漸近するよう尤度関数を更新する。これにより、巡視されていないセルのエントロピーは 1 に近づき、巡視目的地の評価関数 $O()$ を $\max_i O(c_i) = P(c_i) + H(c_i)$ とすることで、侵入者を見つけた場所を重点的に巡視しながらも、さらに侵入者が多く存在している場所を見つけるよう巡視することが可能となる。なお、 c はセル、 i はセル番号、 $P()$ と $H()$ はそれぞれ侵入者の存在確率の期待値と情報エントロピーを示している。

シミュレーションおよび実機実験による有効性の検証

上記項目で開発した巡視手法を統合し、その有効性を計算機シミュレーションにより検証する。さらに、実環境での巡視に向け、制御用 PC ならびにセンサをロボットに搭載し、本学の廊下を対象とした実験を行う。

3. 研究の結論、今後の課題

研究の結論

本助成金による研究を行った結果、「2. 研究の内容」で挙げた各課題に対して、以下のような結論を得ることができた。

1. ベイズ推定に基づいたロボットによる巡視アルゴリズムの開発

侵入者の存在確率と出現頻度を、巡視の結果からベイズの定理に基づき更新することで、侵入者の傾向を特定することに成功した。また、これによりロボットは、より傾向のある場所を重点的に、一方で傾向のない場所に関しては稀に巡視を行うことが可能であることが明らかになった。

2. ベイズ推定を用いた侵入者巡視の最適性と環境適応性に関する検討

巡視問題を K-Armed バンディットとして扱うことで、ベイズ推定に基づき、ロボットが K 個の部屋における侵入者の存在確率を学習できるか検証した。その結果、ロボットが正確に侵入者の存在確率を学習できていることを示した。

3. ヒューリスティック関数としての情報エントロピーの導入

結果的に、情報エントロピーは使えないことが判明した。その一方で、存在確率と出現頻度に基づき、動的計画法(価値反復法)を用いることで、巡視経路の最適化が可能であることを示した。

今後の課題

本研究では、1 台の自律移動ロボットによる警備に主眼を置いた課題解決に取り組んできた。しかし、対象となる環境が広域になるにつれ、1 台のロボットでは警備が不十分になってしまう恐れがある。そこで、今後は複数台ロボットによる警備システムの研究に取り組む必要がある。1 台から複数台に拡張するにあたっては、警備タスクの割り当て問題が生じることとなる。今後はこの課題に取り組む。

また、本研究では、侵入者のモデルを静的なものと仮定してきた。すなわち、侵入者は環境中のある場所から出現し、一定時間経過後消失するモデルの下、シミュレーション実験を行ってきた。しかしながら、実際の侵入者は動いている。そこで今後は、動く侵入者のモデル化ならびに動く侵入者に対する有効性の検証を行う。さらに、ロボットが動く侵入者を巡視した際、その動きから侵入の目的地を推定することができれば、そこで巡視を行うことも可能である。したがって、これらが今後の課題となる。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

我が国では、未だ1日当たり166件もの侵入窃盗被害が住宅にて発生している。本研究の成果として、ロボットが人間と同じような思考過程に基づき巡視することが可能となれば、人間と協力した防犯・警備システムが実現し得る。加えて、これらの作業をロボットで代替することにより、人間への危険度も軽減することができる。これは現在、大手警備会社がロボットをターゲットに取り組んでいる研究を先行した内容となっており、本研究成果が与える社会的なインパクトは大きい。

一方海外に目を向けると、本ロボットシステムが建物だけでなく、町(街)の安全、すなわち犯罪の抑止にも貢献できるものと期待できる。2001年の米国同時多発テロ以降、治安や安全に関する問題の解決は、全世界規模での課題であり、本研究成果は、ロボティクスの平和利用として、高い波及効果が見込まれる。

4. 2. 学術的価値

本申請課題で取り組む動作計画、巡回路計画、空間探索は、それぞれが計算量理論におけるNP困難なクラスに属する問題である。本研究では、これら3つの問題を独立して扱うのではなく全てを統合的に扱う。これは、従来の関連する研究には見られない、学術的に極めて斬新なアプローチである。

本研究の成果として、確率により表現された空間に対しては、動的計画法を適用することにより、ロボットの最適な巡視を実現することが可能となる。すなわち、NP困難な個々の問題を確率理論に基づき統合化することで、侵入者を最適に巡視するための目的地、経路、そして動作が同時に得られる。これは、学術的には初めて、数と居場所が不確かな侵入者に対する最適巡視問題を解決することを意味しており、その意義は非常に大きい。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

国際会議論文

1. S. Hoshino, S. Ugajin, and T. Ishiwata: Patrolling Robot based on Bayesian Learning for Multiple Intruders, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 603-609, 2015.
2. S. Hoshino and T. Ishiwata: Probabilistic Surveillance by Mobile Robot for Unknown Intruders, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 623-629, 2015.

国内口頭発表論文

3. 宇賀神慎吾, 石渡貴仁, 星野智史: ベイズ学習に基づいた知的警備ロボットによる侵入者巡視, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 東京電機大学, RSJ2015AC1B1-05, 2015.
4. 星野智史, 石渡貴仁: 不特定進入者に対するロボットの確率論的巡視アプローチの提案, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 東京電機大学, RSJ2015AC2B2-03, 2015.