

視認性の包含関係を用いた探索路設定法

三栗 寛之[†] 向 直人[†] 渡邊 豊英[†]

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科社会システム情報学専攻 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

E-mail: †{hiro,naoto,watanabe}@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 近年、犯罪の増加に伴い情報技術を活用した防犯対策が様々な側面から実施されている。本稿では、複数台の監視ロボットによる施設警備を対象に、監視ロボットが対象領域内に存在する侵入者の発見を保証する、完全な監視状態の実現を目指す。また、この際に各監視ロボットが用いる最短の探索経路の算出を研究目的とする。任意形状の領域に対してこの問題はNP困難であり、効率的な解法は存在しない。提案手法では、施設領域内の部分領域間で相互に監視可能かどうかを示す視認性に基づいたネットワークを構築し、監視ロボットによる監視に効果的な部分領域を抽出する。抽出された部分領域集合を用いて経路の探索対象を制限することで、計算量の削減が可能である。
キーワード 施設管理, 視認性に基づくネットワーク, Pursuit-Evasion Problem

Assigning Patrolling Routes Using Inclusive Relation of Visibility

Hiroyuki MIKURI[†], Naoto MUKAI[†], and Toyohide WATANABE[†]

[†] Department of Systems and Social Informatics, Graduate School of Information Science,
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan

E-mail: †{hiro,naoto,watanabe}@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract Recently, owing to the increase of crimes, anticrime measures utilizing information technologies have been in common use. Our research target is a facility management system utilizing plural patrolling robots, and our research objective is assigning the shortest patrolling route which assures that no intruder can conceal himself in the target facility to each robot. To search such patrolling routes for a general target space is NP-hard. Therefore, there is no efficient solving method. In our proposed method, the target space is divided into partial regions based on the visibility concept, and a network is constructed. Then, efficient nodes in monitoring can be extracted by utilizing the inclusive relations among nodes in the network. Searching patrolling routes only on the efficient nodes reduces the computational amount.

Key words facility management, visibility network, pursuit-evasion problem

1. はじめに

近年、情報技術を活用した防犯対策が様々な側面から実施されている。具体的には、監視カメラから得られる動画の自動解釈システムや、ネットワークで接続されたセンサー群を用いて侵入者の検知システムが実用化されている。また、現在監視ロボットを用いた施設警備が新たに注目され、研究開発が進められるとともに一部が既に実用化されている [1], [2]。

このような背景を受けて、我々は複数台の監視ロボットによる施設警備システムを研究対象とする。監視対象とする施設内が安全な状態であることを保証するためには、施設内に侵入者が存在すれば、監視ロボットは侵入者がどのように行動しても常に発見しなければならない。この目的は監視ロボットを無制限に配備すれば実現可能である。しかし、施設管理に要するコ

ストを抑えるためには配備台数を可能な限り少なくする必要がある。我々は、低コストで安全性の高い施設警備を実現するため、監視ロボット群に対して効果的な探索路を設定する手法の確立を研究目的とする。

対象とする探索路設定問題は、多角形領域における *Pursuit – Evasion Problem* として知られている [3], [4]。本問題では、各監視ロボットは全方位性カメラを備え、その周囲を 360°監視可能と仮定する。そして、対象領域内への侵入を防ぐために、「何台の監視ロボットが必要か」、また、「各監視ロボットはどのような経路で警備すれば良いか」を求めることが目的となる。問題を簡略化して、監視ロボットではなく、固定カメラでの監視を対象とすると、本問題は固定カメラの最適配置を求める *Art Gallery Problem* に対応する [5], [6]。*Art Gallery Problem* においても、任意形状の対象領域に対し

て死角がない監視状態を実現する「最小のカメラ台数」及び「カメラの配置」を求めることは *NP* 困難な組合せ最適化問題であると証明されている [7]。これは *Pursuit – Evasion Problem* でも同様であり [8]、任意形状の対象領域に対して本目的を達成することは *NP* 困難な組合せ最適化問題である。本問題では、監視ロボット 1 台を用いる場合のみ体系的な解法が確立されている。Steven M. LaValle らは、監視ロボット 1 台に対する周囲の監視状態の変化に着目することで、探索路設定を一般の最短経路設定に帰着させ、*Dijkstra* 法を用いて解を導出する手法を提案した [9]。この手法では、1 台の監視ロボットが移動しても周囲の監視状態が変化しない部分領域を 1 つのノードとしてネットワークを構築することで、冗長な探索路を除く。しかし、監視ロボット 1 台と対象領域の関係に焦点が当てられており、ループ構造を持つような複数台の監視ロボットを要する対象領域には適用不可能である。その後の研究では、L. Guilamo らが複数台を要する対象領域に対して、監視ロボット 1 台と複数の持ち運び可能な監視カメラを用いた探索路設定手法を提案した [10]。また、V. Isler らは確率的要素を取り込んだ探索路を用いることで、複数台を要する対象領域に監視ロボット 1 台で対応可能かどうかを検討した [11]。しかし、監視ロボット複数台を要する対象領域に、監視ロボットを複数台用いた探索路を体系的に求める手法は確立されておらず、探索路を求めるためには組合せ最適化問題としての総当り探索が必要である。

我々は、対象領域内には監視ロボットの訪問位置として不適切な部分領域が存在することに着目し、訪問候補位置を限定するアプローチを採る。これにより、監視ロボットの複数台使用に適用可能な、計算量を軽減した探索路設定法を提案する。提案手法では、分割された各部分領域をノード、ノード間の相互監視可能性をリンクで表現した「視認性に基づくネットワーク」を構築する。そして、ネットワーク内の各ノードが監視ロボットの訪問位置として他ノードと比較して優れているかどうかを評価する。この評価に基づいて訪問候補位置となり得るノードのみを選択し、「経路候補ネットワーク」を構成する。また、このネットワーク上で探索路を求めることで、計算量を軽減する。

本稿の構成は以下の通りである。2 章で、領域、監視ロボットの視野領域、領域内の監視状態、領域内での侵入者の移動をそれぞれ形式的に表現し、本問題における目標を示す。3 章では、本問題に対する我々のアプローチとして視認性の包含関係の概念を述べ、視認性に基づくネットワークを構築する。また、視認性に基づくネットワークを用いて、探索経路の探索空間となる経路候補ネットワークの構築を 4 章で述べる。5 章では視認性に基づくネットワーク及び経路候補ネットワークを用いた探索路設定法を示す。6 章では、提案手法の有効性をシミュレーションによる実験結果で示す。最後に、7 章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 問題モデル

2.1 領域

2 次元平面上の領域 *Target* は、*Cell* (式 (2)) の 2 次元行列で表現される (式 (1))。各セルはセル中央の座標 x, y 、自由領

域 *Free* と占有領域 *Occupied* のどちらに属するかを表す *type* (式 (3))、監視状態 *state* (式 (4)) を持つ。自由領域 *Free* に属するセルには障害物が存在せず、監視対象となる。一方、占有領域 *Occupied* に属するセルには壁や障害物が存在し、監視対象外となる。自由領域 *Free* 及び占有領域 *Occupied* は、それぞれ *type* が *free, occupied* であるセルの集合で表現される。

$$Target = \begin{pmatrix} cell_{00} & \dots & cell_{0n} \\ \vdots & cell_{ij} & \vdots \\ cell_{m0} & \dots & cell_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Cell_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, type_{ij}, state_{ij}) \quad (2)$$

$$type = (free|occupied) \quad (3)$$

$$state = (Contaminated|Observed|Assured_Safe) \quad (4)$$

領域の例を図 1 に示す。図 1 は、各セルの一辺の長さを 10 とした場合の例である。つまり、各セルはそれぞれ式 (2) で定める x, y 座標を中心として 10×10 の面積を持つ。

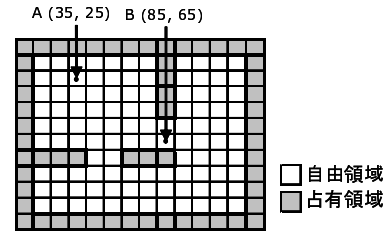


図 1 領域例

Fig. 1 Example of target space

2.2 監視ロボットの視野領域

全ての監視ロボットが備える監視カメラの性能は等しく、その周囲全方向への視野領域を持つと仮定する。監視ロボットがあるセル $Cell_{ij}$ に存在する場合の視野領域を $Capture(Cell_{ij})$ 、ある x, y 座標を含むセルが自由領域であれば真を返す述語を $is_Free(x, y)$ でそれぞれ表現する。このとき、 $Capture(Cell_{ij})$ がセル $Cell_{pq}$ を含むかどうかは式 (5) を用いて判定する。

$$\begin{cases} \forall((x_{ij} \leq x \leq x_{pq}) \vee (x_{pq} \leq x \leq x_{ij})) \\ (is_Free(x, \frac{y_{pq}-y_{ij}}{x_{pq}-x_{ij}}(x-x_{ij})+y_{pq})) & (x_{ij} = x_{pq}) \\ \forall((y_{ij} \leq y \leq y_{pq}) \vee (y_{pq} \leq y \leq y_{ij})) \\ (is_Free(x_{ij}, y)) & (x_{ij} \neq x_{pq}) \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) が真であるとき、セル $Cell_{pq}$ は $Capture(Cell_{ij})$ に含まれる。すなわち、 $Cell_{ij}$ と $Cell_{pq}$ 間を結ぶ直線上に占有領域が存在しなければ $Cell_{ij}$ から $Cell_{pq}$ が監視可能であり、 $Cell_{pq}$ から $Cell_{ij}$ についても同様となる。図 1 では、 AB 間を結ぶ直線上に占有領域が存在しない。このため、 AB 間は相互に監視可能である。

また、全監視ロボットによって監視されるセル集合で構成される監視領域 *Monitor* は、監視ロボットが n 台存在する場合には、 $Capture(Cell_{ri})$ の和集合となる (式 (6))。

$$Monitor = \cup_{i=1}^n Capture(Cell_{ri}) \quad (6)$$

2.3 監視状態

監視ロボットによる探索が進む過程で、領域内の各セルは以下の3種類の状態を取る。

- 要監視 (*Contaminated*)
- 監視中 (*Observed*)
- 監視済 (*Assured_Safe*)

「要監視」は該当セルに侵入者が存在する可能性があることを意味する。「監視中」は該当セルが現時点で監視ロボットに監視されることを意味する。また、「監視済」は該当セルが過去に監視されたため、現時点では監視されないものの、侵入者が存在しないことを意味する。ここで、時系列に沿って監視状態の変化の例を図2で示す。

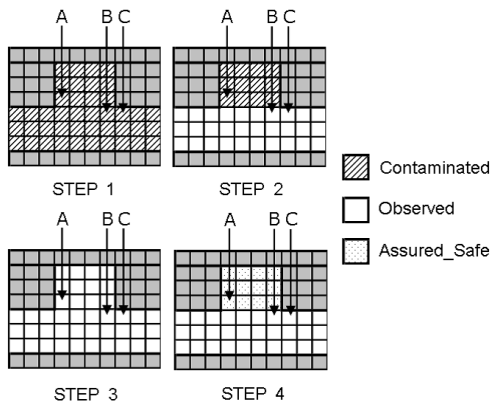


図2 監視状態の変化

Fig.2 Change of Monitoring Condition

STEP 1では、領域内に監視ロボットが存在せず、領域内全体が「要監視」である。STEP 2は、セルCに監視ロボットが存在する場合の監視状態である。このとき、セルAを含む矩形領域が依然として「要監視」であるが、その他の部分は「監視中」に変わる。STEP 3は、セルBに監視ロボットが存在する場合の監視状態である。このとき、STEP 2では「要監視」であったセルAを含む矩形領域も「監視中」となる。STEP 4は、セルCに監視ロボットが存在する場合の監視状態である。このとき、セルAを含む矩形領域は直接監視されない。しかし、セルBを含む矩形領域は「監視中」であるため、セルAを含む矩形領域に侵入者が存在する可能性はない。故に、セルAを含む矩形領域は「監視済」となる。

2.4 侵入者の移動

侵入者は以下の能力を持ち、監視ロボットに発見されないように移動する。

- 監視ロボット位置を検知
- 監視ロボットの探索路は既知
- 領域内での自由な移動

本問題では、侵入者が具体的に領域内のどの位置に存在するかは考慮しない。監視ロボットを移動させることで、侵入者が存在する可能性のある領域を如何に潰していくかを問題とする。このとき、ある時刻 t において「監視済」であり、かつ時刻 $t+1$ において「要監視」のセルと隣接した全てのセルは、即座に「要監視」とする。

2.5 目標状態

本問題では、領域内に侵入者が存在不可能な状態を目標とする。これは、侵入者が領域内に存在すれば必ず発見されることに対応する。このとき、領域内の全セルは「監視済」か「監視中」のどちらかの状態となる。よって、本問題では、初期状態で領域内の全セルを「要監視」とし、目標を最も早く達成する探索路を各監視ロボットに対して設定することが目的である。

3. 視認性に基づくネットワーク

3.1 アプローチ

任意形状の領域を対象とした本問題はNP困難であり、効率的に解を求めるアルゴリズムは存在しない。これは、2章で定めた領域でも同様である。しかし、自由領域に含まれる全セルの全組合せから、最適な探索路を求めることは困難である。我々は、領域内のセル間には「あるセルより他のセルの方が監視地点として良い」という監視地点としての優劣が存在することを利用する。

この具体例を図2の領域において示す。セルAを含む矩形領域を監視するためには、監視ロボットがセルA、もしくはセルBを含む矩形領域を訪問する必要がある。ここで、セルAとセルBのどちらかに訪問位置を限定すると、セルAから監視可能な領域がセルBから監視可能な領域に完全に包含されるため、明らかにセルBを選択すべきと判定できる。また、この包含関係は「セルAを含む矩形領域」と「セルBを含む矩形領域」において、セルの全組合せで成立する。すなわち、図2の場合、監視ロボットは「セルAを含む矩形領域」を訪問するよりも、「セルBを含む矩形領域」を訪問する方が常により有効である。この関係を「視認性の包含関係」と定める。

我々は、この視認性の包含関係に着目する。この関係は領域の形状特徴を捉えており、各部分領域の監視ロボットの訪問地点としての優劣を評価する基準となる。これを用い、監視ロボットの訪問位置候補にならない部分領域を探索空間から削除することで問題を簡略化して計算量の軽減を狙う。本章の以下の節では、「視認性に基づくネットワーク」の構築を述べる。視認性に基づくネットワークとは、2章で定めた領域を抽象化したネットワーク構造であり、ネットワーク内の各ノードは「領域内の部分領域」、ノード間を接続するリンクは「ノード間における視認可能性」をそれぞれ意味する。視認性に基づくネットワークを構築することで、部分領域間の優劣関係が明確になる。

3.2 領域分割によるノード設定

領域分割では、 x, y 軸方向それぞれに対して自由領域に属するセルがいくつ連結しているかを判断基準として用いる。図3のセルAでは、 x 軸方向には7個、 y 軸方向には6個の自由領域に属するセルが連結する。これに対し、セルBでは、 x 軸方向には7個、 y 軸方向には7個が連結する。同様にして、各セルに対して x, y 軸方向における自由領域に属するセルの連結数を求める。そして、これらに連結するセルの左端及び上端のセルを加えた4項目が一致するセルをまとめ、それぞれを一つの部分領域とする。これにより、図3のように領域は、自由領域に属する矩形領域の集合に分割される。我々は、これらの各矩

形領域をノードと定め、セルの集合で表現する (式 (7)) .

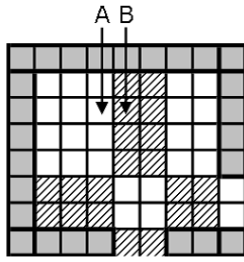


図 3 領域分割例

Fig. 3 Example of dividing target space

$$Node_A = \{Cell_{A1}, Cell_{A2}, \dots\} \quad (7)$$

3.3 視認性に基づくリンク設定

相互に監視可能なノード間にリンクを設定する．ノード間の視認可能性は、セル間における相互の監視関係を拡張して定義する．すなわち、式 (8) が真である場合に $Node_A$ と $Node_B$ の間にリンクが存在する．

$$\forall i (Cell_{Ai} \in Node_A) \forall j (Cell_{Bj} \in Node_B) \\ (Cell_{Ai} \in Capture(Cell_{Bj})) \quad (8)$$

結果的に、 $Node_A$ と $Node_B$ の間にリンクが存在する場合、 $Node_A$ を構成する全セルは $Node_B$ を構成する全セルに対して相互に監視可能であることを意味する．

以上で述べた「領域分割によるノード設定」、及び「視認性に基づくリンク設定」を図 1 に適用すると、図 4 のネットワークを得る．

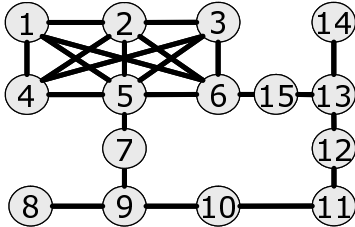


図 4 視認性に基づくネットワーク例

Fig. 4 Example of network based on visibility

図 4 では、ノードは円で、リンクはノード間を結ぶ線分でそれぞれ表現されており、円の中の数字はノード ID を表す．また、図 4 では、「反射律」及び同方向への「推移律」を持つとしてリンクの表現が簡略化されている．このため、全ノードが自ノードに対するリンクを持つ．また、ノード 8 とノード 9、ノード 9 とノード 10 の間にはそれぞれ x 軸方向のリンクが存在する．つまり、ノード 8 とノード 10 の間に存在するリンクの表現は省略されている．ノード A がリンクを持つノードの集合を式 (9) で表現し、以下では「リンクノード集合」と呼ぶ．

$$Link (node_A) = \{node_{L1}, node_{L2}, \dots\} \quad (9)$$

以上の手順で構築された「視認性に基づくネットワーク」では、ノード間で相互に監視可能である場合に、ノード間にリンクが存在する．このため、「視認性の包含関係」は各ノードの

リンクノード集合における包含関係として表現される．以後では、視認性に基づくネットワーク内のどのノードを監視ロボットが訪問すべきかを検討する．また、ノード内の全セルが「監視中」もしくは「監視済」であればノードとしても同様とし、ノード内のセルが 1 つでも「要監視」であればノードとしては「要監視」と定める．

4. 経路候補ネットワーク

本章では、経路候補ネットワークの構築法を述べる．経路候補ネットワークとは、領域を表現する視認性に基づくネットワークから、監視ロボットの訪問すべきノードのみを抽出することで構築される部分ネットワークである．経路候補ネットワークの構築は次の手順を取る．

- (1) 候補ノードの抽出
- (2) 候補ノード間の連結

以下で、それぞれについて順に詳しく述べる．

4.1 候補ノードの抽出

本節では、視認性に基づくネットワーク内の各ノードに対して視認性の包含関係に基づく評価を適用することで、監視ロボットの訪問地点として有効なノードを抽出する．この抽出処理では、次の 2 つの処理を繰り返し適用することで、領域に対して最小の候補ノード集合を抽出する．

- (1) 候補ノード、不要ノードの設定
- (2) 全域監視制約によるリンクノード削除

4.1.1 候補ノード、不要ノードの設定

3 章で述べた視認性の包含関係を用いて、ネットワーク内の全ノードを「候補ノード」と「不要ノード」に分類する．候補ノード及び不要ノードを以下のように定める．

- 候補ノード
効果的な監視地点となるノード．監視地点としての評価が該当ノードを完全に上回る他ノードが存在しない．
- 不要ノード
効果的な監視地点とならないノード．監視地点としての評価が該当ノードを完全に上回る他ノードが存在する．

ノードの分類は、式 (10)、式 (11) を用いて判定される．すなわち、リンクノード集合が他ノードのリンクノード集合に包含されないものを候補ノード、包含されるものを不要ノードと設定する．

$$i \neq A \Rightarrow (Link (node_A) \not\subseteq Link (node_i)) \quad (10)$$

$$\exists (i | i \neq A) (Link (node_A) \subseteq Link (node_i)) \quad (11)$$

視認性に基づくネットワークでは、領域の部分領域間における視認性の包含関係が各ノードが持つリンクノード集合間の包含関係として表現される．故に、式 (10) 及び式 (11) のように、各ノードの監視地点としての優劣をリンクノード集合間の比較によって評価できる．図 4 のネットワークにおける、候補ノード及び不要ノードの設定の具体例を示す．図 4 のネットワークにおいて、ここではノード 8 とノード 9 のリンクノード集合に着目する．ノード 8 のリンクノード集合の要素は、ノード 8, 9,

10, 11 であり, ノード 9 のリンクノード集合の要素は, これらに加えてノード 2, 5, 7 である. すなわち, ノード 8 のリンクノード集合に含まれる全ノードがノード 9 のリンクノード集合に含まれる. このため, ノード 8 を不要ノードと設定できる.

この分類処理を図 4 のネットワークにおける, ノードの全組合せに対して適用すると, ノード 5, 9, 11, 13 が候補ノードであり, その他は不要ノードと判定でき, 結果として図 5 を得る.

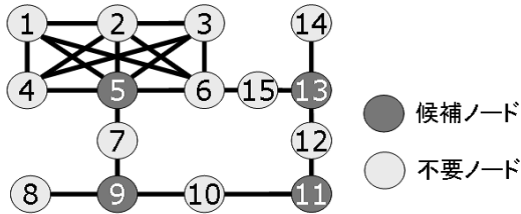


図 5 図 4 における候補ノードと不要ノード

Fig. 5 Candidate nodes and unnecessary nodes in Fig. 4

4.1.2 全域監視制約によるリンクノード削除

前小節では, 視認性の包含関係を用いてネットワーク内の各ノードを候補ノードと不要ノードに分類する方法を述べた. また, この分類を図 4 のネットワークに適用した結果として, 図 5 を示した. この分類を 1 回適用しただけで監視ロボットの訪問位置として不適切なノードが全て削除された. しかし, 図 5 のような結果を得ることは稀である. より複雑な領域に対してこの分類を 1 回適用すると, 図 6 のような結果を得る.

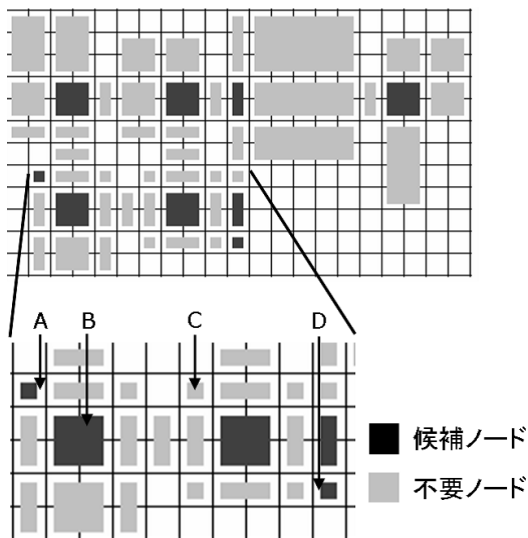


図 6 複雑な領域における分類結果

Fig. 6 Result for a complex target space

図 6 では, 図中の各矩形領域がノードを表し, 矩形領域の色でノードが候補ノード及び不要ノードのどちらかを表現している. 領域内の他部分への距離やそれぞれから監視可能なノードを比較すると, ノード A とノード B では明らかにノード B を訪問すべきである. しかし, 前小節での分類ではノード A, ノード B が共に候補ノードである.

そこで, 我々は各候補ノードが持つリンクの重要性を評価することで候補ノードをさらに絞り込む. ノード A とノード C に着目して議論を進める. ノード A は候補ノードであり, リン

クノード集合を他と比較しても包含関係を持たない. 例えば, ノード B と比較した場合, ノード B がリンクを持たないノード D へのリンクを持つ. このため, ノード A は候補ノードと分類される. 一方, ノード C は不要ノードであり, そのリンクノード集合にはノード D を含めて 3 つの候補ノードが存在する. 監視地点を候補ノードに限定すると, ノード C の監視のために 3 つの候補ノードの中で少なくとも 1 つを訪問する必要がある. また, 3 つの候補ノードは全てノード D とリンクを持つ. このため, ノード C を監視するには常にノード D も監視されることにより, ノード A からノード D を監視可能なことは重要ではない. 故に, ノード A のリンクノード集合からノード D を削除して包含関係による分類処理を適用することで, ノード A を不要ノードと判定できる.

以上のように, 候補ノードが持つ重要性の薄いリンクノードを検出し, これを除外してから包含関係による分類処理を適用することで, 候補ノードをさらに絞り込む. この考え方を, 領域内全体を監視する制約として, 「全域監視制約」と呼ぶ. また, 新たに候補ノードを絞り込むことで, 全域監視制約を再び適用してリンクノードを削除できる. 提案手法では, 候補ノード, 不要ノードの設定と全域監視制約によるリンクノード削除を繰り返し適用することで領域に対する最小の候補ノード集合を得る. 一連の処理を図 6 の領域に対して適用すると, 図 7 を結果として得る.

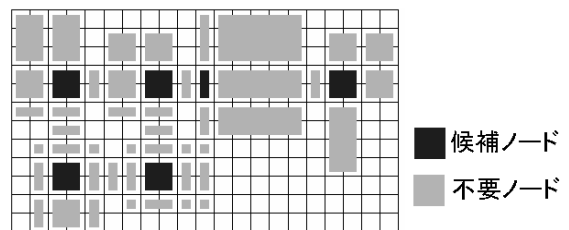


図 7 候補ノード抽出結果

Fig. 7 Result for extracting candidate nodes

4.2 候補ノード間の連結

前節で抽出した候補ノード集合は領域の形状特徴を捉えており, 集合中の候補ノードよりも領域内を効果的に監視可能なノードは存在しない. また, 各不要ノードのリンクノード集合中には候補ノードが少なくとも 1 つ存在する. このため, 複数台の監視ロボットを用いた領域内の監視では, 移動範囲を候補ノード間のみとしても領域全体を監視できる. 故に, 候補ノードの全組合せに対して最短経路を求め, その中で一部の非効果的な経路を除き, 残り全てに用いられるノードを監視ロボットの移動位置候補として「経路候補ネットワーク」と定める.

非効果的な経路の例を挙げる. 図 8 のノード B からノード H へノード D を通過して達する経路は非効果的な経路である. この経路をノードの系列として, 式 (12) で表現する. 式 (12) の経路が非効果的だと判定可能なのは, 式 (13) で表現される経路もノード B からノード H への最短経路であることに拠る.

$$[node_B, \dots, node_C, node_D, node_E, \dots, node_H] \quad (12)$$

$$[node_B, \dots, node_C, node_A, node_E, \dots, node_H] \quad (13)$$

式(12)と式(13)を比較すると、差異はノードA、ノードDだけである。また、ノードAとノードDを比較すると、ノードDのリンクノード集合はノードAのリンクノード集合に含まれる。このため、監視ロボットは常にノードDよりもノードAを通過するべきであり、ノードDを通過する経路は非効果的だと判定する。非効果的な経路のみで用いられるノードは監視ロボットの移動経路として不適切であり、経路候補ネットワークには用いない。この処理によって構成される経路候補ネットワークを図9に示す。

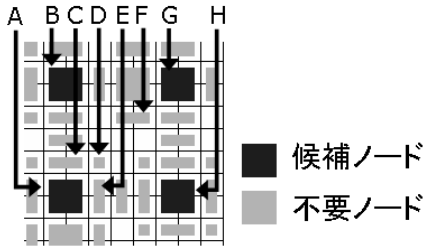


図8 非効果的な経路の例

Fig. 8 Example of redundant routes

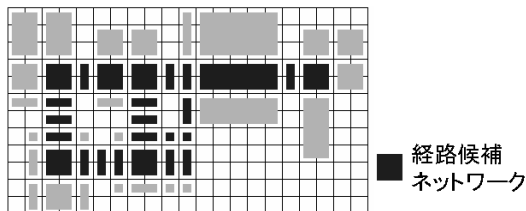


図9 経路候補ネットワーク

Fig. 9 Network for searching routes

以上の手順で構築された経路ネットワークは領域の形状特徴を捉えており、ネットワーク上のノードのみで領域内全域を監視可能な探索路を作成できる。また、経路候補ネットワークに含まれるノードは、含まれないノードと比較して効果的な監視地点である。故に、経路候補ネットワーク外を含む全ての探索路に対して、経路候補ネットワーク内のみで同経路長の探索路を生成できる。このため、経路候補ネットワークを構築して探索空間を限定しても、常に最短の探索路を求められる。

5. 探索路設定法

本章では、探索路設定問題をどのように扱うかを述べ、「視認性に基づくネットワーク」と「経路候補ネットワーク」を用いて探索路設定に必要な計算量を軽減可能なことを示す。本稿では、説明の簡便のため2台の監視ロボットを用い、視認性に基づくネットワーク上のノードの系列として探索路を求める。監視ロボットは、探索路における1ステップで隣接ノードへの移動、もしくは、移動せずに待機すると仮定する。

5.1 組合せ問題としての探索路設定

本節では、探索路設定を組合せ問題としてどのように扱うかを述べる。本問題では、総当りを基本として探索路の探索を進め、その過程で不要な系列を枝刈りする。探索を進める際に用いる次状態の生成法及び、枝刈り手法を以下で述べる。

5.1.1 総当りを基本とした次状態生成

2台の監視ロボットをロボットA、Bとおき、時刻 t における位置をそれぞれノード P 、 Q とする。仮定より、時刻 $t+1$ にはロボットAはノード P の隣接ノードに移動、もしくはノード P に待機できる。これは、ロボットBについても同様である。このとき、次状態数 $|State(t+1)|$ は、双方が移動しない場合を考慮から除き、ノード P 、 Q の隣接ノード数をそれぞれ $Neighbor(node_P)$ 、 $Neighbor(node_Q)$ で表現する場合、式(14)で与えられる。

$$|State(t+1)| = (Neighbor(node_P) + 1) \times (Neighbor(node_Q) + 1) - 1 \quad (14)$$

一般の経路探索では、あるノードでの待機や一度通過したノードへの後戻りは考えない。しかし、本問題では侵入者が存在可能な「要監視」なノードを順次監視して「監視済」とするために、例えば領域内のループ構造部分を監視するための待機や後戻りが必要になる。このため、探索路の経路長を n とすると、全ての組合せを探索した場合の計算量は $\prod_{i=1}^n |State(t_i)|$ となる。各ノードに対して隣接ノードの最大数が4であるため、最悪計算量は $O(24^{n-1})$ である。最短の探索路を求めるために経路長1から幅優先で探索を進め、条件を満たす探索路を発見した場合にそれを最短の探索路とする。

5.1.2 探索路の必要条件に基づく枝刈り

監視ロボットが探索路に沿って移動することで、領域内の全ノードが「監視中」、もしくは「監視済」とならねばならない。このため、監視ロボットは全てのノードを少なくとも一度は監視する必要がある。つまり、監視ロボットが各ノードのリンクノード集合に含まれる少なくとも1つのノードを訪問するという必要条件が探索路には存在する。

この必要条件を用いることで、次状態を生成する意味がない部分系列を、系列の生成過程で検出できる。生成済みの部分系列長を $Generated$ 、生成済みの状態から全要監視ノードの監視に必要な最小系列長を $Necessary$ 、探索経路長を n とおく場合、式(15)が成立する部分系列は明らかに探索路とならない。

$$Generated + Necessary > n \quad (15)$$

5.1.3 監視状態の変化に基づく枝刈り

要監視ノード集合を変化させない移動は警備としての意味を持たない。監視ロボットが移動することで、新たに要監視ノードを監視できるノードを「目標ノード」と定め、次の制約を付加することで冗長な移動を含む系列を検出し、枝刈りする。

- (1) 全ての目標ノードから遠ざかる移動は生成しない。
- (2) 要監視ノード集合が変化するまで、一定の目標ノードへ向けて移動する。

これらの制約を用いることは、監視ロボットがノード間を移動する意味を周囲の監視状態に基づいて評価することに対応する。これにより、冗長な移動を含む系列が検出され、計算量を軽減可能である。

5.2 提案ネットワークに基づく枝刈り

対象とする警備路設定において、「視認性に基づくネットワー

ク」及び「経路候補ネットワーク」を活用すると、以下の2つの効果から計算量が軽減される。

- (1) 移動候補ノードの制限
 - (2) 視認性の包含関係に基づく冗長な系列の削除
- 以下でこれらについて順に述べる。

5.2.1 移動候補ノードの制限

前節では、各監視ロボットの移動可能なノードを、現在位置ノードの隣接ノードとした。しかし、このとき生成される次状態には、監視ロボットの訪問位置として不適切なノードが含まれる。これに対し、提案した経路候補ネットワークには領域内の監視に効果的なノードが漏れなく含まれるため、次状態で監視ロボットが存在可能なノードを経路候補ネットワーク上のみに制限することで、生成される状態数を削減できる。

5.2.2 視認性の包含関係に基づく冗長な系列の削除

目標とする探索路を求める過程では、冗長な移動を含む系列が多数生成される。特に、ノードでの待機や通過したノードへの後戻りは冗長な系列となり易い。探索路にはこれらが必要な場合が存在するが、これは領域の形状や監視状態、監視ロボット間での位置関係に依存する。

我々は、冗長な移動を含む系列を検出するために、視認性に基づくネットワークを利用する。すなわち、視認性の包含関係による各ノードの監視位置としての優劣を用いて、監視ロボットが領域内を移動することの意味を評価する。これにより、冗長な移動を含む系列を領域内の監視状態に依存せず検出できる。また、検出した系列を探索路の候補から外すことで計算量を軽減する。この具体例を、図10及び図11を用いて示す。

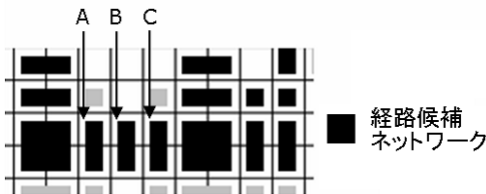


図10 冗長な移動を検出可能な例

Fig. 10 Example of detecting redundant sequence

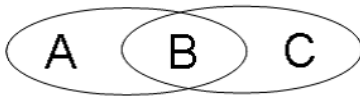


図11 図10における各ノードから監視可能な領域

Fig. 11 Observable region by nodes in Fig.10

時刻 t において、図10のノード A に監視ロボット P が存在するとおく。また、1ステップ毎の移動の有効性を視認性の包含関係を用いて評価することで、ノード系列を探索路の候補となるかどうかを判定する。図11は、図10中のノード A , B , C のそれぞれから監視可能な領域、すなわち各ノードのリンクノード集合を概念的に示したものである。

まず、時刻 $t+1$ におけるノード B への移動を考える。ノード A とノード B の間には視認性の包含関係が成立し、ノード A がノード B より上位となるため、移動によって監視ロボット P が監視可能な領域は縮小する。このため、時刻 $t+1$ におけるノード B への移動は1ステップの移動としては有効では

ない。この場合、ノード A に留まる系列を探索路の候補とし、ノード B へ移動する系列を探索路の候補から外すことで計算量の軽減を図る。

しかし、時刻 $t+1$ においてノード B へ移動した後、さらに移動する系列には探索路の候補となる場合とならない場合の双方がある。まず、時刻 $t+2$ においてノード B からノード C へ移動した場合を考える。この場合、移動することで監視可能な領域が拡大する。このため、時刻 $t+2$ におけるノード C への移動は1ステップの移動として有効である。すなわち、移動することで侵入者が存在可能な領域が存在しないことが新たに確定し、系列が目標とする探索路となる場合がある。このため、この系列は探索路の候補となる。次に、時刻 $t+2$ においてノード A へ後戻りした場合を考える。この場合、時系列に沿って考えると監視可能な領域が時刻 $t+1$ において一度縮小し、時刻 $t+2$ において時刻 t の状態に戻ったと捉えることができる。このため、リンクノード集合間の包含関係から時刻 $t+1, t+2$ における移動は全く無意味であったと言える。すなわち、この場合ノード A に時刻 $t+2$ まで留まる系列がノード B へ移動する系列より上位となり、常により有効となる。このため、時刻 $t+2$ までノード A に留まる系列のみが探索路の候補となる。

以上で示した冗長な移動を含む系列を形式的に表現する。生成過程の部分系列を $Route_P$ (式(16))とおくと、式(17)が成立する場合には、 $Route_P$ は冗長な移動を持つ。

$$Route_P = [node_{P1}, node_{P2}, \dots, node_{Pi}, \dots, node_{Pk}] \quad (16)$$

$$\exists i((Pi = Pk) \wedge (\forall j|(i < j < k)))$$

$$(Link(node_j) \subseteq Link(node_k)) \quad (17)$$

6. 評価実験

提案手法の有効性を確かめるために、評価実験を行った。実験手順は以下の通りである。

- (1) ランダムな形状を持つ領域を生成する。
- (2) 領域に対する視認性に基づくネットワーク、経路候補ネットワークを構築する。
- (3) ランダムな位置に監視ロボット2台を配置する。
- (4) 探索路設定法1を用いて探索路を求める。
- (5) 探索路設定法2を用いて探索路を求める。

手順4の「探索路設定法1」は、「総当りを基本とした次状態生成」で生成される各状態において、探索路の必要条件に基づく枝刈りを適用する手法である。手順5の「探索路設定法2」は、提案ネットワークに基づく枝刈りを探索路設定法1に追加した手法である。手順4及び手順5で探索路を求めるために生成される系列数を測定・比較する。これにより、提案ネットワークに基づく枝刈りを用いることでどの程度計算量を軽減できたかを評価する。測定される系列数には、最短の探索路の長さが n であれば長さ $n-1$ 以下の部分系列も含める。

手順を50回繰り返した結果、全試行において探索路設定法1と探索路設定法2で得られる探索路の系列長が一致した。これは、提案ネットワークを用いて枝刈りしても、最短の探索路

となる系列を発見可能であることを意味する．また，全試行において生成された系列数は探索路設定法 2 の方が少なく，提案ネットワークに基づく枝刈りを適用することで冗長な系列を削除可能なことを確認した．実験結果として，探索路設定法 1 で生成した系列数を探索路設定法 2 でどの程度削減できたかを表す比率「削減率」を図 12 で示す．

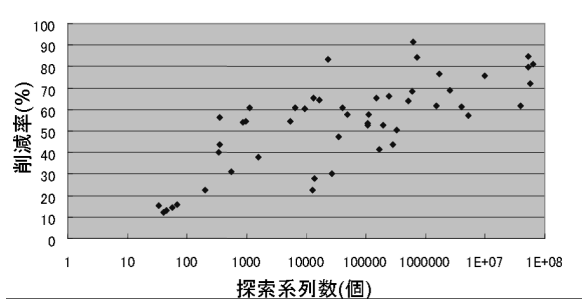


図 12 実験結果

Fig. 12 Experimental Result

図 12 において，横軸は探索系列数を，縦軸は削減率を表す．全試行における平均の削減率は約 53% であり，ネットワークを用いた枝刈りが効果的に働く場合には 90% 近い削減率を得る一方，削減率が 10% 台前半に留まる場合も存在する．これは，提案ネットワークに基づく枝刈りを適用可能かどうかはノード間での視認性と密接に関係し，領域の形状及び監視ロボットの初期位置に依存することに拠る．同じ 1 回の枝刈りでも生成される状態によって枝刈りされる系列数は異なるため，探索のどの段階で枝刈り可能かが削減率の違いとなって現れる．

また，図 12 から，探索路設定法 1 における探索系列数が多い場合に削減率が高くなる傾向の存在を見て取れる．これは，探索路設定法 1 における探索系列数が多い場合に，提案ネットワークに基づく枝刈りが適用され易いという性質に拠る．探索路設定法 1 における探索系列数が少ない場合には，冗長な移動を含む系列を既に十分削除できている．このため，提案ネットワークに基づく枝刈りを適用することで探索路設定法 1 との差が生じる箇所があまり存在せず，削減率が向上しにくい．これに対し，探索路設定法 1 における探索系列数が多い場合には，提案ネットワークに基づく枝刈りを適用することで，削除可能な系列が多く残されていると捉えられる．このため，探索系列数が少ない場合と比較すると枝刈りが適用される可能性が高く，削減率が向上し易い．

7. おわりに

本稿では，複数台の監視ロボットを用いた施設警備を対象とした．領域内に侵入者が潜むことのできない，完全な監視状態の実現するための探索路を各監視ロボットに対して設定することは NP 困難な組合せ最適化問題である．最初に計算機上で問題を扱うために領域やその監視状態，監視ロボットが保持する視野領域，侵入者の移動を形式化した．その後，領域内には監視ロボットが明らかに訪問不要な位置が存在することを活用し，探索空間を限定することで計算量を軽減するアプローチを

示した．また，この考えを視認性の包含関係として定義し，視認性に基づくネットワークを構築することで明確化した．そして，視認性に基づくネットワークを用いて探索空間となる経路候補ネットワークを構築した．提案手法を用いた枝狩り手法を述べた後，これを適用することで探索路設定に必要なとなる計算量を軽減可能であることを評価実験で示した．

今後の課題としては，探索路を求めるために必要な探索系列数が非常に多い場合に対応することが挙げられる．提案手法により，探索路設定に必要な計算量は確かに軽減されたが，それでも多数の系列の探索を必要とし，探索路の導出に長時間を要する場合が存在する．本稿で構築した経路ネットワークを用いると，監視ロボットの配備台数や初期位置に依存せず，最短の探索路を得ることが可能である．しかし，これらを考慮すると，明らかに探索路として用いないノードを含み，これが探索系列数を増大させる原因の一部となっている．故に，これらを考慮して訪問不要となるノードを状況に応じて除外できれば，さらに計算量を軽減できると考える．

謝辞 本研究は名古屋大学 21 世紀 COE プログラム「社会情報基盤のための音声・映像の知的統合」の援助を受けた．

文 献

- [1] セコム株式会社ホームページ内「報道資料」
http://www.secom.co.jp/corporate/release/2005/nr_20051006.html
- [2] 総合警備保障株式会社ホームページ内「R & D 研究開発」
http://www.alsok.co.jp/r_d/g-robot_top.html
- [3] I. Suzuki and M. Yamashita. Searching for a mobile intruder in a polygonal region, SIAM Journal on Computing, Vol.21, No.5, pp.863-888, 1992.
- [4] V. Isler, S. Kannan, and S. Khanna. Locating and capturing an evader in a polygonal environment, Proceedings of 6th Workshop on Algorithmic Problems in Robotics(WAFR'04), pp.351-367, 2004.
- [5] J. O'Rourke. Art Gallery Theorems and Algorithms. Oxford University Press, New York, August 1987.
- [6] T. Shermer. Recent results in Art Galleries, Proceedings of THE IEEE, Vol. 80, No. 9, pp.1384-1399, 1992.
- [7] D. T. Lee, and A. K. Lin. Computational Complexity of Art Gallery Problems. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 32, pp. 276-282, 1986.
- [8] L. J. Guibas, J.-C. Latombe, S. M. LaValle, D. Lin, and R. Motwani. A Visibility-Based Pursuit-Evasion Problem, International Journal of Computational Geometry and Applications, Vol.9, No.5, pp.471-494, 1999.
- [9] S. M. LaValle, D. Lin, L. J. Guibas, J.-C. Latombe, and R. Motwani. Finding an unpredictable target in a workspace with obstacles, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 737-742, 1997.
- [10] L. Guilamo, B. Tovar, and S. M. LaValle. Pursuit-Evasion in an Unknown Environment Using Gap Navigation Graphs, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.4, pp.3456-3462, 2004.
- [11] V. Isler, S. Kannan, and S. Khanna. Randomized Pursuit-Evasion in a Polygonal Environment, IEEE Transactions on Robotics, Vol.5, pp.864-875, 2005.