

視認性の包含関係に基づく 監視配置決定法

Monitoring Arrangement by Using Inclusive Relation Based on Visibility

三栗 寛之[♥] 向 直人[♦] 渡邊 豊英[♦]

Hiroyuki MIKURI Naoto MUKAI
Toyohide WATANABE

近年、情報技術を活用した防犯対策が様々な面から進められている。本稿では、複数台の監視カメラを用いた施設管理システムを対象とし、領域内に死角がない完全な監視状態を実現する。そして、この際に必要となるカメラ台数を最小とする、効果的なカメラ配置を構築することを目標とする。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、対象領域を分割して視認性に基づくネットワークを構築する。このネットワーク内のノード間に生ずる包含関係に着目することで、監視カメラ配置に適したノードを抽出する。

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 security cameras, and our research objective is to search the monitoring arrangement that requires the minimum number of security cameras and has no dead zones in the target facility. To search such an arrangement for general target spaces is NP-hard. Therefore, there is no efficient solution method. In the proposed method, the target space is divided into partial regions based on the visibility concept, and a network is constructed. Utilizing the inclusive relations among nodes in the network enables extracting nodes which are valid for the optimal monitoring arrangement.

1. はじめに

近年、情報技術を活用した防犯対策が様々な面から行われている。例えば、監視カメラから得られる動画の自動解釈や、ネットワーク接続されたセンサー群を用いて侵入者を検知するシステムが実用化されている。また、住居やオフィスの出入口における生体情報を用いた個人認証システムの設置も進められている。

このような背景の中、我々は複数台の監視カメラを用いた施設管理システムを研究対象とする。施設内が確実に安全な状態であることを保障するためには、施設内の領域に死角な

く監視カメラを設置することが必要となる。一方、施設管理に必要なコストを抑えるためには、設置台数をできる限り少なくする必要がある。そこで、我々は安全な状態を保障すると同時にコストを抑えた効率的な施設管理の実現を目指し、監視カメラ配置決定法の確立を目標とする。

この問題は、一般には Art Gallery Problem として知られている [1], [2]。Art Gallery Problem では、各監視カメラは全方向性、すなわち各カメラが設置地点の周囲を 360° 監視可能である。そして、対象領域内に死角が発生しないように監視カメラを配置するために、必要な最小カメラ台数及びその配置を求めることが目的である。しかし、任意形状の領域に対してこれらを求めることは NP 困難であると証明されており [3]、近似アルゴリズムによる解法を用いなければならない。問題の性質として n 個の頂点を持つ任意の多角形領域に対しては、 $\lfloor n/3 \rfloor$ 台の監視カメラを設置すれば常に十分であり、対象領域の形状によっては $\lfloor n/3 \rfloor$ 台が必要な場合が存在することが証明されている [4]。また、 $\lfloor n/3 \rfloor$ 台の監視カメラを設置する計算量 $O(n \log n)$ のアルゴリズムも提案されている [5]。

我々は、対象領域内に監視カメラの設置位置として相応しくない部分領域が存在することに着目し、設置位置を段階的に決定するアプローチを採る。提案手法では、始めに対象領域を部分領域間での監視可能性に基づいて分割する。分割によって得られた各部分領域をノード、部分領域間で監視が可能かどうか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のリンクノード集合間に現れる包含関係を用いて、各ノードの監視カメラの設置位置としての適切さを評価する。この評価に基づいて設置位置候補を徐々に限定し、常に有効なカメラ設置位置のみを抽出する。

本稿の構成は以下の通りである。2章では、対象領域及び各監視カメラが持つ視野領域を形式化し、本問題における目標を定める。3章では、本問題に対する我々のアプローチを述べる。そして、アプローチを実現する手法として、対象領域の分割及び視認性に基づくネットワークの構築を4章で、ネットワークを用いた監視カメラ配置の決定法を5章でそれぞれ述べる。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. 形式化

監視対象とする施設を対象領域として式 (1) で与える。対象領域 $Target$ は、2次元平面上にそれぞれ表現される自由領域 $Free$ と占有領域 $Occupied$ から構成される。自由領域と占有領域は、それぞれセルの集合として表現され、各セルは要素としてセル中央の x, y 座標を持つ。

$$\begin{cases} Target = (Free, Occupied) \\ Free = \{cell_{f_1}, cell_{f_2}, \dots\} \\ Occupied = \{cell_{o_1}, cell_{o_2}, \dots\} \\ cell = (x, y) \end{cases} \quad (1)$$

簡略化した対象領域の例を図 1 に示す。

[♥] 学生会員 名古屋大学大学院情報科学研究科博士前期課程
hiro@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

[♦] 正会員 日本学術振興会特別研究員 PD
naoto@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

[♦] 正会員 名古屋大学大学院情報科学研究科
watanabe@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

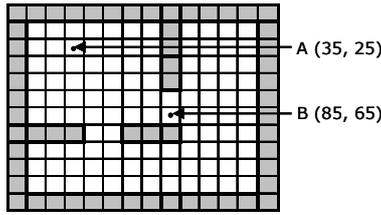


図1 対象領域例
Fig.1 Example of Target Space

図1は、各セルの辺の長さを10とした対象領域例である。自由領域は白いセルで、占有領域は灰色のセルでそれぞれ表現されている。また、各セルはそれぞれの x, y 座標を中心として 10×10 の面積を持つ。

監視カメラはその周囲全方向に視野領域を持つ。あるセル $cell_i = (x_i, y_i)$ に監視カメラを設置した場合の視野領域を $Capture(cell_i)$ 、ある x, y 座標を含むセルが自由領域であれば真を返す関数を $is_Free(x, y)$ と表現する。このとき、あるセル $cell_j = (x_j, y_j)$ が $Capture(cell_i)$ に含まれるかどうかは、 $x_i \neq x_j$ であれば式(2)、 $x_i = x_j$ であれば式(3)を用いて判定する。

$$\forall((x_i \leq x \leq x_j) \cup (x_j \leq x \leq x_i)) \left(is_Free \left(x, \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} (x - x_i) + y_i \right) \right) \quad (2)$$

$$\forall((y_i \leq y \leq y_j) \cup (y_j \leq y \leq y_i)) (is_Free(x_i, y)) \quad (3)$$

式(2)か式(3)が真であるとき、セル間を結ぶ直線上には占有領域が存在せず、セル間での相互監視が可能となる。図1では、 AB 間を結ぶ直線上に占有領域が存在しないため、 AB 間は相互に監視可能である。

本問題では、対象領域内に死角が発生しないように監視カメラを配置し、さらに必要となるカメラ台数が最小の配置の組合せを求める。対象領域に死角が発生しないように監視カメラを n 台配置した状態は、カメラが設置されたセルを $cell_{c_1}, cell_{c_2}, \dots, cell_{c_n}$ とおくと、式(4)で表現される。

$$\forall(cell_i \in Free) (cell_i \in (Capture(cell_{c_1}) \cup \dots \cup Capture(cell_{c_n}))) \quad (4)$$

すなわち、本問題は式(4)を満たす最小の n 及び n を最小とするカメラ配置 $cell_{c_1}, cell_{c_2}, \dots, cell_{c_n}$ を求めることに対応する。

3. アプローチ

任意形状の対象領域に対して必要な監視カメラの最小台数及びその配置を求めることはNP困難であり、効率的なアルゴリズムは存在しない。これは、2章で定めたように対象領域を多面体とみなし、その内角が全て 90° である場合にも同様である。しかし、あるセルより他のセルに監視カメラを設置する方が明らかに良いと判定可能な場合が存在するため、必ずしも全組合せの監視カメラ配置を試す必要はない。対象領域の一部を表す図2を用いて具体例を示す。

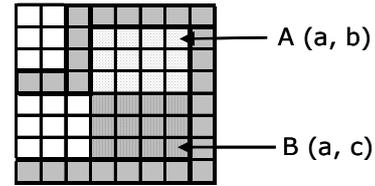


図2 監視カメラ設置位置の比較
Fig.2 Comparison of Cells in Setting Cameras

図2において、 A を含む矩形領域内全体を監視するためには A を含む矩形領域、もしくは B を含む矩形領域に監視カメラを設置する必要がある。ここで、 A と B のどちらかに設置するとして両セルを比較する。すると、 B に設置した場合の監視カメラの視野領域が A に設置した場合の視野領域を完全に包含するため、 B に設置すべきと考えられる。この関係は、 A を含む矩形領域内のセルと B を含む矩形領域内のセル間で全ての組合せにおいて成立する。すなわち、 A を含む矩形領域内ではなく、 B を含む矩形領域内に監視カメラを設置する方が常に有効である。この関係が成立するとき、部分領域間に視認性の包含関係が存在すると定める。

我々は、以上で述べた部分領域間における視認性の包含関係に着目し、明らかに解決可能な部分を抽出することで監視カメラの配置を段階的に決定していく。

4. 視認性に基づくネットワークの構築

3章で示した視認性の包含関係を活用するために、本章では2章で定めた対象領域を抽象化して視認性に基づくネットワークを構築する。これにより、部分領域間の関係が明確に表現され、視認性の包含関係を活用できる。我々が提案するネットワークにおいて、各ノードは対象領域内の部分領域を表現し、ノード間を接続するリンクはノード間に相互に監視可能な関係の存在を意味する。以下で、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順に述べる。

4.1 領域分割によるノード設定

対象領域を分割する際には、 x, y 軸方向それぞれに対して自由領域に属するセルの連結数を分割基準とする。

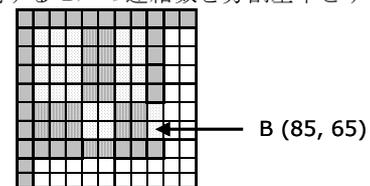


図3 領域分割例

Fig.3 Example of Dividing Target Space

図3の B では、 x 軸方向には図中で10個、 y 軸方向には2個の自由領域のセルが連結している。これに対し、 B の左に隣接するセルでは、 x 軸方向には10個、 y 軸方向には6個である。同様に、各セルに対して x, y 軸方向それぞれに対する自由領域のセルの連結数を設定する。そして、これらに連結するセルの左端及び上端の位置を加えた4項目が完全に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、矩形領域が自由領域内に隙間なく生成される。我々は、これらの各矩形領域をそれぞれノードと定め、セルの集合として表現する。

4.2 視認性に基づくリンク設定

本節では、視認性に基づく接続を持つノード間に対してリンクを設定し、ネットワークを完成させる。ノード間の視認性に基づく接続は、セル間における相互の監視関係を拡張して定める。すなわち、式(5)が真である場合に $Node_A$ と $Node_B$ の間に視認性に基づく接続が存在すると判定する。

$$\forall (cell_{Ai} \in Node_A) \forall (cell_{Bj} \in Node_B) (cell_{Ai} \in Capture(cell_{Bj})) \quad (5)$$

式(6)及び先に述べたセル間の関係より、 $Node_A$ と $Node_B$ の間にリンクが存在する場合には、 $Node_A$ を構成する全てのセルは $Node_B$ を構成する全てのセルに対して相互に監視可能である。

以上で述べた、ノード及びリンク設定を図1に対して適用すると、図4のネットワークを得る。

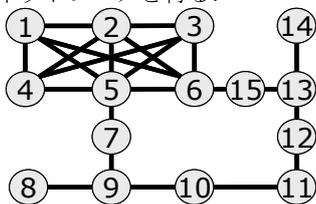


図4 視認性に基づくネットワーク例

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番号を表す。また、 x, y 軸に関して同方向への推移律と自ノードへの反射律がリンクに働くとして表現が省略されている。

5. ネットワークを用いた監視配置決定法

本章では、視認性に基づくネットワークを用いた監視カメラの配置決定法を述べる。視認性に基づくネットワークにおいては、同一ノード内に存在するどのセルに監視カメラを設置しても、その監視カメラから監視可能なノードの集合は同じである。この性質を用いて、以後ではネットワーク内のどのノードに監視カメラを配置すべきかを検討する。そして、監視カメラ配置に常に有効なノードを抽出するために、以下の手順を繰り返し適用する手法を提案する。

1. 候補ノード、不要ノードの設定
2. 必須ノードの検出
3. ネットワークの限定

以下で、これらそれぞれについて順に詳しく述べる。

5.1 候補ノード、不要ノードの設定

まず、3章で述べた部分領域間における視認性の包含関係に基づいて、ネットワーク内の全ノードを候補ノードと不要ノードのどちらかに振り分ける。候補ノードは監視カメラの効果的な設置位置になり得るノードであり、不要ノードはなり得ないノードである。ネットワーク内に存在するノード A が持つリンクノード集合を式(6)で表現する。このとき、式(7)が真となる場合にはノード A は候補ノード、偽となる場合には不要ノードと判定できる。

$$Link_A = \{Node_{L1}, Node_{L2}, \dots\} \quad (6)$$

$$\forall node_i (Link_A \not\subseteq Link_i) \quad (7)$$

視認性に基づくネットワークでは、部分領域がノードとして表現され、ノード間で相互に監視可能な関係が存在する場合にのみ、ノード間のリンクが存在する。このため、部分領域間における視認性の包含関係は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。これにより、式(7)を用いて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判定できる。候補ノード集合 $Candidate$ 及び不要ノード集合 $Unnecessary$ は該当するノードの集合で与える。

図4のネットワークにおいて、式(7)の判定を用いた候補ノード及び不要ノードの設定の具体例を示す。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。それぞれ、式(8)及び式(9)で表現される。

$$Link_8 = \{Node_8, Node_9, Node_{10}, Node_{11}\} \quad (8)$$

$$Link_9 = \left\{ \begin{array}{l} Node_2, Node_5, Node_7, \\ Node_8, Node_9, Node_{10}, Node_{11} \end{array} \right\} \quad (9)$$

式(8)及び式(9)より、ノード8のリンクノード集合はノード9のリンクノード集合に包含され、ノード8を不要ノードと設定できる。同様の処理により、候補ノードはノード5、ノード9、ノード11、ノード13の4個、その他は不要ノードと設定できる。以下では、この処理によって設定された候補ノードのみを監視カメラの設置位置候補として扱う。

5.2 必須ノードの検出

前節で不要ノードを監視カメラの設置位置候補から除き、候補ノードのみを設置位置候補とした。このため、候補ノード集合中には、監視カメラを設置しなければ対象領域内に監視不可能な領域が必ず生ずるノードが存在し得る。我々はこれを必須ノードと呼び、式(10)で定義する。

$$\exists (node_i \in (Link_A \cap Unnecessary)) \forall ((node_B \in Candidate) \cap (node_B \neq node_A)) (node_i \notin Link_B) \quad (10)$$

この判定を前節の例に適用して具体的に述べる。まず、候補ノードであるノード5に着目する。ノード5とリンクを持つ不要ノードであるノード1は、ノード5以外の候補ノードとリンクを持たない。故に、ノード5以外のどの候補ノードに監視カメラを設置しても、ノード5に監視カメラを設置しなければ監視不可能である。よって、ノード5は必須ノードとなる。次に、候補ノードであるノード9に着目する。ノード9とリンクを持つ全ての不要ノードは、他の候補ノードともリンクを持つ。このため、ノード9に監視カメラを設置しないとしても、必ずしも監視不可能なノードが生じない。故に、ノード9は必須ノードではない。同様にして、ノード11及びノード13も必須ノードではないと判定できる。

5.3 ネットワークの限定

監視カメラの設置が確定された必須ノードのリンクノードである不要ノードは、それ以降の監視カメラ配置において考慮する必要がない。このため、該当ノードを除くことでネットワークを限定し、監視配置の探索空間を縮小させる。これにより、先に定めた候補ノード集合中から監視カメラの設置位置として不適切な、不要ノードを新たに発見可能となる。また、これにより新たに必須ノードも検出可能となる。

以下で、具体例を示す。前節では、図4のネットワーク内の必須ノードとしてノード5のみを検出した。図4のネットワークからノード5とリンクを持つ不要ノードを削除すると、

ノード 8～ノード 14 の 7 個のノードからなるネットワークを得る。このネットワークに対して、改めて不要ノード及び候補ノードの設定、必須ノードの検出、ネットワークの限定の処理を順に繰り返す。すると、前段階では候補ノードであったノード 9 及びノード 13 が新たに不要ノードと設定でき、候補ノードはノード 11 のみとなる。これにより、ネットワーク内で唯一の候補ノードであるノード 11 を必須ノードとして検出可能である。この結果、図 1 の対象領域の場合には、図 4 のネットワークを構築した上で、ノード 5 とノード 11 に監視カメラを設置すれば良いと言える。

また、対象領域の形状の複雑さによっては監視カメラの配置を一意に決定不可能な場合も生じる。この場合、必須ノードが検出されなくなるまで提案手法を繰り返し適用する。

6. 評価実験

提案手法の有効性を確かめるために、シミュレーションによる評価実験を行った。実験手順は以下の通りである。

1. ランダムな形状を持つ対象領域を生成。
2. 対象領域を表現する視認性に基づくネットワークを構築し、ネットワーク内の全ノード数を測定。
3. 必須ノードが検出されなくなるまで提案手法を適用。
4. 適用後に残った候補ノード数を測定。

手順 2 で測定したノード数と手順 4 で測定したノード数の比率である配置決定率で、監視カメラ配置を求める組合せ問題としてどの程度簡略化することができるかを評価した。以上の手順を 20 回繰り返した結果を図 5 に示す。

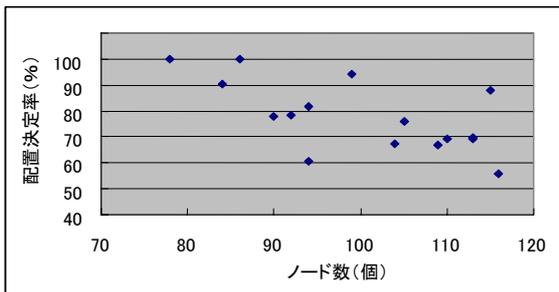


図 5 実験結果

Fig. 5 Experimental Result

図 5 において、横軸は手順 2 で測定されるネットワーク内のノード数、縦軸は配置決定率である。20 回の試行において、配置決定率の平均は約 75% であり、これは組合せ問題を十分簡略化したと言える。配置決定率が 100% である場合には、対象領域全体を監視するために必要な監視カメラの配置を、提案手法で完全に決定可能である。

また、図 5 では生成されるノード数が増えるのに従って、配置決定率が下がる傾向が読みとれる。これは、生成されるノード数が多い場合には対象領域が複雑な形状を持つことが多くなり、各ノードのリンクノード集合間に包含関係が成り立たないことが増える。このため、比較的多数のノードが候補ノードとなり、必須ノードを検出しにくくなるのが原因である。

7. まとめと今後の課題

本稿では、複数台の監視カメラを効果的に配置する手法を提案した。対象領域内に死角のない監視状態を実現する際に、必要な監視カメラ台数を最小化すること、及びその配置を求

めることは NP 困難な組合せ問題である。最初に対象領域や各監視カメラが保持する視野領域を形式化した。その後、監視カメラの設置位置として明らかに相応しくない部分領域が存在することに着目し、設置候補位置を段階的に決定するアプローチを述べた。具体的には、視認性に基づくネットワークの構築とネットワークを用いた監視配置決定法を提案した。最後に、シミュレーション実験結果で、提案手法の有効性を示した。

今後の課題は、監視カメラを備えて対象領域内を移動可能な、ロボット群を活用したシステムへの拡張である。移動可能なロボット群を用いて対象領域内が安全な状態であることを保障する問題は、一般に Pursuit-Evasion Problem として知られており、これも NP 困難な組合せ問題である。本稿で提案した、視認性に基づくネットワークと対象領域の形状から得られるロボット間で同期した動きの制約を用いて、各ロボットに対する監視タスクの割当て手法を確立したい。

【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] J. O'Rourke.: "Art Gallery Theorems and Algorithms", Oxford University Press(1987).
- [2] T. Shermer.: "Recent results in Art Galleries", Proc. of THE IEEE, Vol. 80, No. 9, pp. 1384-1399(1992).
- [3] D. T. Lee, and A. K. Lin.: "Computational Complexity of Art Gallery Problems", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 32, pp. 276-282(1986).
- [4] V. Chvatal.: "A combinatorial theorem in plane geometry", Journal of Combinatorial Theory (Series B), pp.39-41(1975).
- [5] D. Avis and G. T. Toussaint.: "An Efficient Algorithm for Decomposing a Polygon into Star-Shaped Polygons", Journal of Pattern Recognition, Vol. 13, No. 6, pp. 395-398(1981).

三栗 寛之 Hiroyuki MIKURI

名古屋大学大学院情報科学研究科博士前期課程在学中。2005 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。セキュリティ情報システムに興味を持つ。情報処理学会学生会員。日本データベース学会学生会員。

向 直人 Naoto MUKAI

日本学術振興会特別研究員 PD。2006 名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2003 名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了。博士(情報科学)。時空間データベースと高度交通情報システムの研究・開発に従事。情報処理学会会員。日本データベース学会会員。

渡邊 豊英 Toyohide WATANABE

名古屋大学大学院情報科学研究科教授。1974 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1975 同大学工学研究科博士課程中退。工学博士。統合化環境、分散協調環境、データベース環境、教育支援システム、文書理解に興味を持つ。情報処理学会、電子情報通信学会(フェロー)、日本ソフトウェア科学会、人工知能学会、システム制御情報学会、教育システム情報学会、日本データベース学会会員、ACM、IEEE-CS、AAAI、AACE 各会員。