

矩形領域分割による誘導灯自動配置アルゴリズム

尾崎 昭 剛^{†1} 原 尾 政 輝^{†1}

本研究では、建物内の避難誘導灯の配置アルゴリズムについて提案する。建物内に避難誘導灯を設置する場合には、全ての領域を誘導灯の有効範囲で網羅できることが最低条件となる。これまでに、MAS 手法を用いたシミュレータなどで誘導灯の配置の影響については指摘されているが、配置を自動化したものはなかった。本論文で示すように、誘導灯数を最少とする配置は集合被覆問題へ帰着することができるため、NP 困難となる。多項式時間で解法が知られている類似の問題として、美術館定理で三角形分割に基づいた手法もあるが、誘導灯の有効距離が有限の場合や、外壁に接していない壁がある場合には適用できないといった制約がある。本研究では、一般的な建築物が矩形を基本として構成されていることに着目し、誘導灯の有効距離が有限であったり、外壁に接していない壁がある場合でも、設置数を抑えながら誘導灯設置パターンを多項式時間で得ることが出来る手法を提案する。

A exit sign placement algorithm based on rectangle devision

SHOGO OZAKI^{†1} and MASATERU HARAO^{†1}

We propose exit sign placement algorithm. In order to place signs to floor, it is necessity to fill all points of floor. We show it is possible to make minimum exit sign pattern by set covering problem. Therefore, this problem is NP-hard. In this paper, we propose the algorithm based on rectangle devision. Our algorithm is useful on various problems, and it is time complexity.

1. はじめに

不特定多数が利用する建築物においては、火災等の災害発生時に避難誘導を行なうことが

必要であり、そのための誘導灯の設置が消防法¹⁾で義務付けられている。確実な誘導のためには、建築物内の任意の位置から1つ以上の誘導灯が視界に入る、すなわち誘導灯の有効範囲で建築物内を網羅するようになる必要があるが、誘導灯の数をむやみに増やすことは、設置のためのコストが増加する、避難者の視界内に多数の誘導灯があると混乱が生じる、といった理由から避けるべきであり、効果的な避難のためには、必要最小限度の誘導灯を適切な位置に配置することが望ましい。

誘導灯の効果を確認する手段としては、マルチエージェントモデルに基づくシミュレーションを用いた検証が提案されている⁴⁾⁵⁾。しかし、これらのシステムでは誘導灯の配置を人間が決定しているため、建築物の構造が変更されるたびに、誘導灯の配置をやり直さなくてはならないという問題があった。また、人間の主観による配置になるため、配置場所、個数、誘導への効果といった性質の一貫性が保証されないという問題もあった。

そこで、多種多様な建築物へ対応するためには、限られた個数で建築物内部を網羅するよう誘導灯の配置を自動的に決定する手法が求められる。

最少個数の誘導灯で全体を網羅する配置を得るためには、後述のように集合被覆問題に帰着することができるが、これはNP 困難であることが知られている³⁾。多項式時間で解法が知られている類似の問題として、美術館内部に設置する監視設備の個数を得るための、美術館定理における三角形分割による配置手法がある⁶⁾⁷⁾。しかし、この手法では、監視設備の有効距離が無限という前提があるため、有効距離が有限である誘導灯には適用できない、また、外壁に接していない遮蔽物があると適用できないという問題があった。

そこで、本研究では、一般的な建築物が矩形を基本として構成されていることに着目し、建築物内を矩形領域に分割し、各矩形領域を満たすよう誘導灯を配置するという手法を提案する。本論文では、この手法が三角形分割に基づく手法と比べ、汎用性が高く、誘導数を抑えながら多項式時間で誘導灯設置パターンを取得できることを示す。

本稿では誘導灯の個数の節約を考え、避難誘導の効率化については別稿に譲る。

2. 誘導灯配置問題

本研究では、建築物内の避難誘導灯の設置を目的とする。避難誘導灯設置の前提条件として、本論文は以下の条件を用いる。

- 建築物内は、天井方向から俯瞰した二次元平面で表現する
- 建築物内は、視界・移動を遮蔽する壁と、何も無く見通し、移動が可能な地点（以後フロアと呼ぶ）からなる

^{†1} 崇城大学
Sojo University

- 壁、フロアなどの設置は、建築物内を格子状に区切ったセルで表現する
- 建築物の外壁（外枠）は矩形で構成される
- 誘導灯の効果範囲には角度の限定はない（全方向で有効）

以上の条件の下で、フロア内の任意の地点から最低 1 つ以上の誘導灯が見えるように誘導灯の配置パターンを考えることを、**誘導灯配置問題と呼ぶ**。この問題には、避難の効率化、誘導灯の個数節約の 2 つの目的がある。これまでに、消防法の設置基準を元に、より効率的な配置を考案しマルチエージェントモデルに基づくシミュレーションで検証が行なわれている⁴⁾⁵⁾。しかし、この研究では配置自体はユーザが行っており、効率化の検証だけが計算機上で自動的にシミュレートできるようになっているため、汎用的な建築物の構造に対して有用とはいえないという問題があった。

そこで、本研究では、MAS 手法でのシミュレータで誘導灯の配置パターンを検証できることを前提に、配置の自動化を目指す。

最少誘導灯で全体を網羅できる配置パターンを得るためには、フロア内の各セルを要素とした集合より、集合被覆問題として扱うことが出来る。

A : 全フロアセルの集合

$S_{(x,y)}$: 座標 (x,y) に設置した誘導灯。効果範囲内のフロアセルを要素とする集合

T : フロア全体に設置された誘導灯の配置パターン。 $S_{(x,y)}$ を要素にもつ集合族とすると、ある誘導灯の効果範囲は必ずフロア内であるため、任意の $S_{(x,y)}$ に対し $S_{(x,y)} \in A$ となることは自明である。また、配置パターン T が誘導灯配置問題を満たすということは、T 内の誘導灯の効果範囲の和集合が A の全要素と同じになる、ということであるので、 $A = \cup_{S \in T} S$ となる。

この時、誘導灯の個数を最少にするということは、 $A = \cup_{S \in T} S$ を最少の |T| で満たすということなので、集合被覆問題に帰着する。しかし、この問題は NP 困難であることが知られている³⁾。

そのため、配置誘導灯数を抑えながら、多項式時間で解が得られる手法が必要となる。

3. 矩形分割による誘導灯配置アルゴリズム

本研究では、一般に建築物内部が矩形で構成されることに着目した自動配置手法を提案する。この手法は、フロアを矩形領域に分割、そして、分割された各領域を誘導灯の有効範囲で網羅する、という 2 段階の手順で全フロア領域を有効範囲内へ収める。

3.1 矩形領域への分割

90° 又は 180° で構成された領域を矩形領域へ分割する手法としては、大附らの手法⁸⁾ が知られており、内部に窓がある場合でも、最少個数の分割を得ることができる。本論文では、外壁と接していない壁を窓としてみなすことで、大附らの手法が適用できる。

3.2 矩形領域への誘導灯配置

分割で得られた各矩形領域に対し、誘導灯を有効距離に基づいて配置していく。誘導灯の有効距離 r とすると、矩形の角から距離 r 以下の場所に最低 1 個の誘導灯を配置する必要がある。誘導灯の有効範囲は半径 r の円内となるが、この円に内接する正方形（1 辺の長さ $\sqrt{2}r$ の正方形）を矩形内に並べていく、という形で矩形内を網羅していく（図 1）。

誘導灯の配置対象となる矩形の左上頂点座標を (x,y)、大きさを横 w、縦 h とする時、具体的な配置手法は以下の通りである。

- (1) $w < \sqrt{2}r$ の場合は、誘導灯の x 座標を $x + \frac{w}{2}$ に固定する
- (2) $h < \sqrt{2}r$ の場合は、誘導灯の y 座標を $y + \frac{h}{2}$ に固定する
- (3) 1 つ目の誘導灯を座標 $(x + \frac{r}{\sqrt{2}}, y + \frac{r}{\sqrt{2}})$ に配置する
- (4) 1 行の誘導灯が $\lceil \frac{w}{\sqrt{2}r} \rceil$ 個になるまで、前の誘導灯の x 座標 $+\sqrt{2}r$ の位置へ配置し続ける
- (5) 誘導灯の行数が $\lceil \frac{h}{\sqrt{2}r} \rceil$ 行になるまで、前の行の y 座標 $+\sqrt{2}r$ として (4) を繰り返すこの矩形に必要な誘導灯の数 s は、

$$s = \lceil \frac{w}{\sqrt{2}r} \rceil \times \lceil \frac{h}{\sqrt{2}r} \rceil \quad (1)$$

となる。ただし、誘導灯の効果範囲が無限の場合には、矩形 1 つに対して誘導灯 1 つで十分であるため、s=1 で固定となる。

3.3 不要誘導灯の削除

大附らの手法では、矩形分割数を最少にする分割が得られる。しかし、L 字型に接続された 2 つの矩形組（詳細は後述）のように、複数の矩形を 1 つの誘導灯で網羅できる場合があるため、誘導灯の数は矩形分割数より少なくできる可能性がある。このようなパターンを見つけるため本システムでは以下のアルゴリズムを用いる。

既に全体を網羅する誘導灯が配置されているものとし、誘導灯の集合 S、1 つの誘導灯を s_i ($s_i \in S$) で表す。このとき、任意の誘導灯の組 $(s_i, s_j) \in S \times S$ に対して以下の処理を行う。

- (1) 集合 S から s_i, s_j を削除する

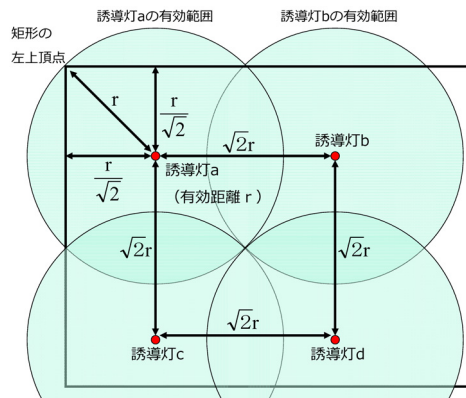


図 1 矩形への誘導灯の配置
Fig. 1 Allocation sign to a rectangle

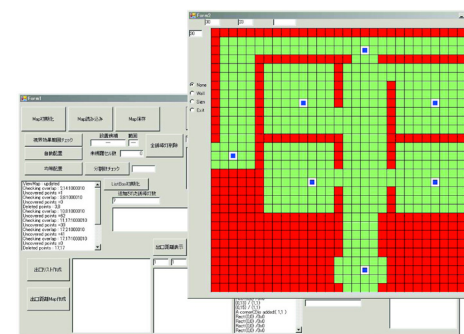


図 2 システムの GUI
Fig. 2 GUI

- (2) 1つの誘導灯 s_k によってフロア内未網羅領域を網羅できる場所があるか確認する
- (3) (2)の処理で網羅できる場所がある場合には、集合 S に s_k を追加する
- (4) (2)の処理で網羅できる場所が無い場合には、集合 S に s_i, s_j を戻す。

建築物内部の大きさを横 w 、縦 h とすると、本手法の計算量は以下の通りである。集合 S 内の全ての要素の組を列挙するために $O(|S|^2)$ 、1つの組 (s_1, s_2) を1つの誘導灯で代替できる場所の探索に、 $O(wh)$ となるため、この手法全体の計算量は、 $O(wh|S|^2)$ となる。

4. 実装と実験

本研究では、2次元格子上で壁と誘導灯を設置し、誘導灯の効果範囲を確認できるシステム図2を作成し、前述の避難誘導灯自動配置アルゴリズムを Visual Basic 2010 で実装した。

本システムによる配置例を図3、図4に示す。図3における内部の線は、フロアの外周を結ぶ辺、並びに分割された三角形を構成する辺である。図4における内部の線は、認識された矩形の対角線を表す。

図5、図6は、外壁に接していない壁（いわゆる窓）を持つ場合の例である。三角形分割による結果（図5）では、窓となる部分が想定されていないため、窓内部の部分、ならびに窓によって四角になる右上方向に誘導灯の効果範囲外の部分が生じている。一方、矩形分割による結果（図6）では、窓があっても、分割矩形数を増やすことで、窓内部まで含めて、全体を網羅するよう誘導灯の配置が行えていることが分かる。

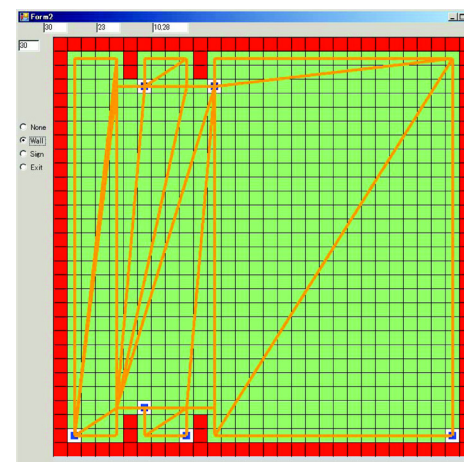


図 3 三角形分割による配置
Fig. 3 A sign pattern by ArtGallery problem

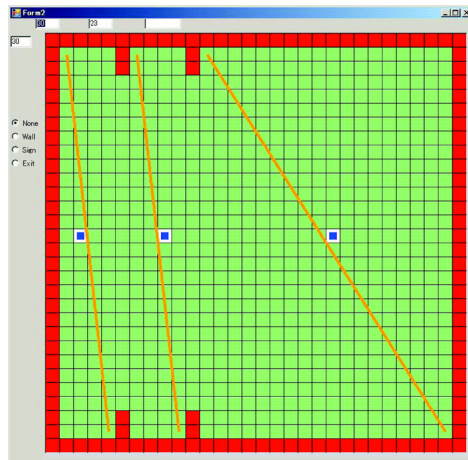


図 4 矩形分割による配置

Fig. 4 A sign pattern by rectangle division

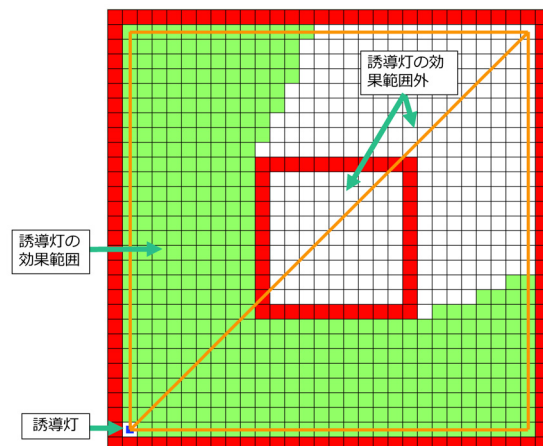


図 5 三角形分割による配置 2

Fig. 5 A sign pattern by ArtGallery problem

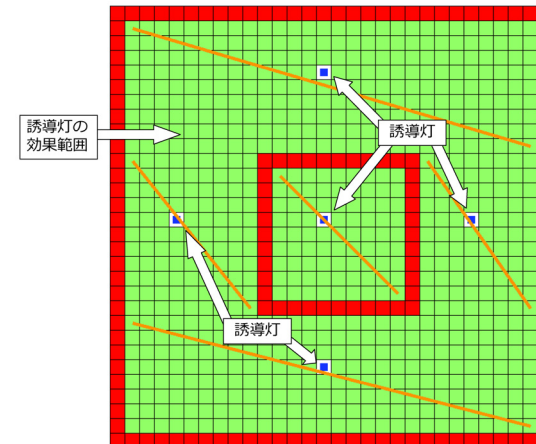


図 6 矩形分割による配置 2

Fig. 6 A sign pattern by rectangle division

図 7 は、効果範囲が重複する 2 つの誘導灯を 1 つで置き換えた例である。この例では、図 6 に対して誘導灯の置き換えを適用している。その例では、矩形 2 個が接続された L 字型領域が 2 つあるため、それぞれに 1 つずつ誘導灯を配置し、誘導灯数の削減が行えていることが分かる。

5. 考 察

5.1 必要な誘導灯の個数

本手法を用いた場合に、全フロアを網羅するのに必要な誘導灯個数は以下の通りである。

5.1.1 矩形分割配置法の誘導灯数

誘導灯の有効距離が無限の場合^{*1}を考える。ある矩形領域内部に壁が無い場合には、任意の地点に 1 つ誘導灯を設置するとその矩形内全体を網羅できる。この性質により、誘導灯の有効距離が無限の場合、全フロアを網羅するのに必要な誘導灯の数は、高々壁により分割された矩形領域の数となる。 n : 頂点数, w : 窓の数, k : 連結成分の数, d : 独立な縮退線の最大数 とするとき、大附らにより最少分割数 p が以下の式で表されている。

*1 美術館定理と同じ設定となる

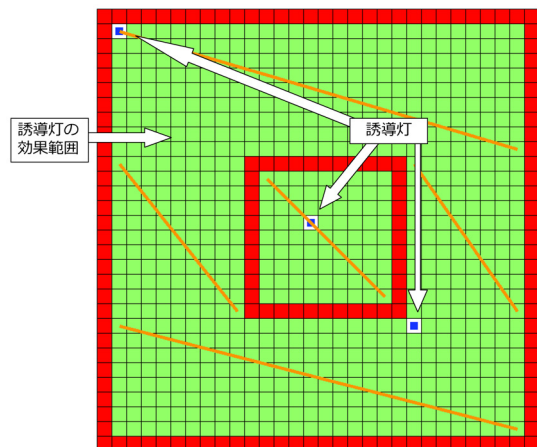


図 7 重複誘導灯の削除
Fig. 7 A example of signs deletion

$$p = \frac{n}{2} + w - k - d \quad (2)$$

美術館問題と同じ条件とする場合には、 $w=0, k=1$ となるため、

$$p = \frac{n}{2} - 1 - d \quad (3)$$

となる。独立な縮退線の最大数 d に関しては、同じ頂点数でも壁の配置次第で変わる可能性があるが、 p が $\frac{n}{2} - 1$ を超えることがないことが分かる。

このとき、分割された領域のうち隣接する 2 つを取り出すと、L 字型となる。図 8 の場合、矩形 1、2 をあわせると L 字型になるが、①の地点からは矩形 1、2 の全ての地点が視界に入る。このように、誘導灯の有効距離が無限の場合は、隣接する矩形 2 個を 1 つの誘導灯で、有効範囲に収めることが可能となる。

図 8 のように、元の矩形領域内に壁を設置すると L 字型の領域 2 つ（矩形の組 (1, 2) と (3, 4)）に分割される。矩形領域 2 つで L 字型領域 1 つを構成することから、L 字型領域 1 とすると、

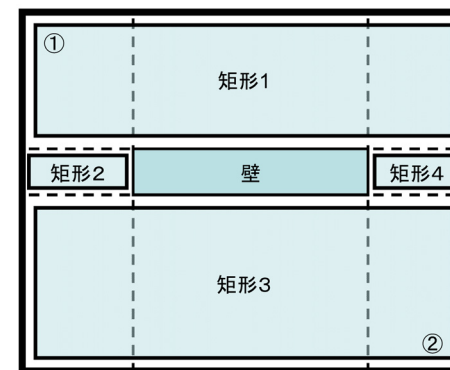


図 8 矩形の分割
Fig. 8 A division of a rectangle.

$$l = \frac{p}{2} \quad (4)$$

となる。

このことから、ある矩形領域内部に壁を追加して分割されると、必要な誘導灯は 2 個ということになる。

壁の設置前前後の差分で考えると、設置前（単純な矩形）の領域には最低 1 つ誘導灯が必要である。壁の設置後は、2 個必要であるため、壁 1 つの設置につき誘導灯が 1 つ増加するという事が分かる。

5.1.2 三角形分割法の誘導灯数

美術館定理では、多角形を三角形分割することで多角形内部全てを網羅する監視点の設置位置を得ることができる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この手法では、頂点数 n とすると、 $\lfloor \frac{n}{3} \rfloor$ 個の監視点で十分であることが知られている。

外壁に接した壁が追加されると、外壁を構成する多角形の頂点数が増えたとみなすことができ、壁が 1 つ増加すると、多角形の頂点が 4 つ増加することになる（図 9）。この時、上式より $\frac{4}{3}$ 個の監視点が増加する可能性がある。

矩形分割による手法は、壁 1 つの増加に対して誘導灯 1 つの追加で十分であるため、提案手法の方がより少ない可能性でフロアを網羅できることが言える。

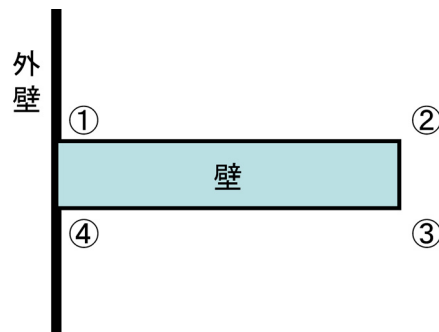


図 9 壁による頂点の増加
Fig. 9 A increase of vertexes with a wall rectangle

5.2 計 算 量

美術館定理で用いられる三角形分割による配置手法は、計算量 $O(n \log n)$ であることが知られている。

一方、今回、本研究で用いた矩形分割は、 $O(n^{\frac{5}{2}})$ 必要であることが報告されている。また、不要誘導灯の削除は、計算量 $O(wh|S|^2)$ であるが、シミュレーション空間が固定の場合には、 w, h は定数とみなすことができる。また、2 式より、誘導灯数 $|S|$ は n に比例するため、実質的な計算量は $O(n^2)$ となる。

この結果、今回提案する手法全体の計算量は $O(n^{\frac{5}{2}})$ となり、多項式時間となっていることが分かる。

6. まとめと今後の課題

本論文では、避難誘導シミュレーションへの適用を考えた、避難誘導灯配置問題の解法の提案を行った。建築物内部を矩形に分割することを基本とした手法により、内部に窓がある場合や、誘導灯が有限である場合にも、汎用的に自動配置を多項式時間で得られる事を示した。

しかし、今回の手法は、配置される誘導灯数の削減に主眼を置いたものとなっており、今後は、避難者の誘導の効率を考慮する必要があると思われる。また、集合被覆問題の近似解の手法に基づいた手法も実装を行っているが、別稿に譲る。

参 考 文 献

- 1) 消防法施行規則：(オンライン)
入手先<<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36F04301000006.html>>
- 2) 建築基準法施行令：(オンライン)
入手先<<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>>
- 3) M.R.Garey, D.S.Johnson, Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. W.H. Freeman and Company, (1979)
- 4) 辻優介：MAS 手法を用いた屋内避難誘導灯の最適配置法に関する研究，第 11 回 MAS コンペティション，(オンライン)
入手先<<http://mas.kke.co.jp/modules/tinyd3/index.php?id=13>> (2011).
- 5) 渡邊卓也，大上俊之，小山茂：マルチエージェントモデルを用いた建物火災の避難行動シミュレーション，計算数理工学論文集 Vol.7, pp.7-12(2007)
- 6) Chva'tal, V.: "A combinatorial theorem in plane geometry", Journal of Combinatorial Theory, Series B 18: pp39-41(1978)
- 7) Fisk, S.: "A Short Proof of Chva'tal's Watchman Theorem." J. Combin. Theory B 24, 374 (1978)
- 8) 大附 辰夫，佐藤 政生，橘 昌良，鳥居 司郎：複合長方形領域の最小分割，情報処理学会論文誌， Vol.24, No.5, pp.647-653 (1983).