限られた視界を持つ自律ロボット群による線分被覆問題

門出顕宏 * 山内由紀子 † 来嶋秀治 † 山下雅史 †
* 九州大学工学部電気情報工学科
† 九州大学大学院システム情報科学研究院

1 はじめに

限られた視界を持つ自律ロボット群において，その視界で線分を被覆するアルゴリズム SCA (Segment Cover Algorithm) を提案する．本研究で用いたロボットシステムのモデルは，(1) 無記憶 (2) 完全同期 (3) 匿名 (4) 視野の制限有の自律分散モデルである．ロボットは，自身を原点とした局所座標系を持ち，その動作は，周囲のロボットの位置を観測 (Look)，移動先を計算 (Compute)，移動 (Move) による一連のサイクルの繰返しからなる．

既存の研究において，この問題が求解可能であるためのロボットモデルの条件を幾つか提案している．Cohen ら [1] は，視界の制限のないロボットによる線分上の等間隔配列問題を解決するアルゴリズムを示している．Eftekhari ら [2] は，侵入者を感知するセンサーの半径が r で，他のロボットを確認することができる視界半径が $2r$ であるロボットについて線分被覆問題を解決している．本稿では，各ロボットが自身の持つ視界の範囲を知らないという条件を新たに加え，[2] でいうところの侵入者を感知するセンサーと他のロボットを確認することができる視界の半径が等しいとしている．これらの条件下で，線分をロボットの視界で被覆するのに十分なロボットの台数に対し，いくらか多くロボットを投入することで，この問題を解く．ロボットを多く投入することについては，後に議論する．また，ロボットは与えられた線分の両端をロボットと同様に認識するものとする．

本研究は，一次元空間でのロボットによる監視を目標としている．被覆のためのロボットの台数に余分を持たせるのは，自身の視界範囲を知らないためである．このような制約を要求するのは，ロボットシステムをよりロバストなシステムにするためである．例えば，各ロボットの視界半径に差が生じた場合，アルゴリズム SCA では，視界半径を情報として用いていないため，線分被覆問題を解決可能である．

ここで，ロボットの可視グラフ (Visivility graph) という概念を導入しておく．ロボットを**頂点**とみなし，相互に確認できるロボットどうしを**辺**で結んだものをロボットの可視グラフと言う．つまり，可視グラフにおいて，**隣接**しているロボット対は，相互に確認しているロボットの対である．

2 問題

与えられた被覆する線分の長さを L とし，ロボットの視界を半径 V の円とする．このとき，線分被覆問題を解くとは，任意の初期配置から，半径 V の視界を持つ n 台のロボットを等間隔に配列し，それら視界で長さ L の線分を被覆することを言う．ただし，各ロボットは目標の点に収束し，終端配置においてすべてのロボットは連結であることを条件とする．

3 アルゴリズム

ロボットは視界半径 V を知らず，メモリを持たないため，アルゴリズムに使用できる情報は，視界内にいる他のロボットとの距離のみである．ロボットの台数 n は，$n \geq \frac{L}{V} - 1$ を満たせば，線分全体を視界で被覆するのに十分であるが，アルゴリズム SCA では $n > \frac{m}{m-2}\frac{L}{V} - 1$ のロボットを投入することで線分被覆問題を解決する．ただし，$m \geq 2$ はアルゴリズムが与えるパラメータであり，$m \geq 2$ としているのはロボットどうしの衝突を避けるためである．どのようにして衝突を避けているかについては，次章に

て説明する．

与えられた線分の一端の座標を $x = 0$，他端の座標を $x = L$ とし，$x = 0$ にもっと近いロボットから順番に，$r_1, r_2, ..., r_n$ とし，投入されたロボットすべての集合を $R = \{r_1, r_2, ..., r_n\}$ とする．このようにしてロボットに与えた順番は，時間によらず不変である．ロボットは視界内に存在するすべてのロボットを認識可能であるが，ロボット r_i がアルゴリズムで使用するのは，ロボット r_{i-1}, r_{i+1} との距離で，自身から見てロボットが (1) 両側に確認できる場合 (2) 片側にのみ確認できる場合 (3) どちら側にも確認できない場合で分けている．各ロボットが同一のアルゴリズム SCA をそれぞれ用いることで，任意の初期配置について，ロボットどうしの衝突なしに線分の被覆を実現する．

アルゴリズムにより，視界内の線分上に，自身を原点とする一次元座標系を各ロボットに定義させる．

3.1　両側にロボットが確認できる場合

自身の両隣のロボットを結ぶ線分の中点へ移動する．

局所座標系においては，原点からの距離が最も小さい正方向のロボットの座標を x_{i+1} とし，原点からの距離が最も小さい負方向のロボットの座標を x_{i-1} ととする．このとき，$(x_{i-1} + x_{i+1})/2$ へ移動する．

3.2　片側にのみロボットが確認できる場合

自身の隣のロボットとの距離を d とすると，自身とそのロボットを結ぶ直線上の点へ d/m だけそのロボットから遠ざかるように移動する．

局所座標系においては，原点からの距離が最も小さいロボットの座標を x_{i+1} とし，$-x_{i+1}/m$ へ移動する．

3.3　どちら側にもロボットが確認できない場合

ロボットは今いる点で静止する．

4　アルゴリズムの正当性

まず，ロボットどうしの衝突の問題について，衝突が発生しないことを明確にしておく．ロボット r_i について，前章の 3.1 より，自身の両側にロボットが確認できる場合は，明らかに衝突しない．3.3 より，どちらにもロボットが確認できないとき，自身は移動しない．r_{i+1}, r_{i-1} との距離は，どちらも V より大きく，この 2 台の移動距離はそれぞれ高々 V/m である．ここで，$m \geq 2$ より，衝突は起こらない．最後に，片側にのみロボットが確認できる場合，r_{i-1} が確認できているとすると，r_{i+1} と最も接近するのは，r_i, r_{i+1} ともに V/m だけお互いに近づくように移動するときである．ここで，r_i と r_{i+1} との距離は V より大きく，$m \geq 2$ より，$V/m + V/m \leq V$ であるから，衝突は起こらない．以上より，すべての場合において衝突は発生しないことが言える．仮に，$m < 2$ とすると，衝突が発生することがわかる．

次に，実際にアルゴリズム SCA で，線分被覆問題を解決できることを示す．

定理 1. $n > \frac{m}{m-2}\frac{L}{V} - 1$ を満たすとき，アルゴリズム SCA により，n 台のロボットで線分被覆問題を解決できる．

定理 1 は，$n > \frac{m}{m-2}\frac{L}{V} - 1$ の下でアルゴリズム SCA を実行した場合に成り立つ以下の補題 3, 4 より証明される．

与えられた線分の一端の座標を $x = 0$，他端の座標を $x = L$ とする．時刻 t におけるロボットの間隔を $x = 0$ の方から，$d_0(t), d_1(t), ..., d_n(t)$ とし，$D(t) = \{d_i(t) | i = 0, 1, ..., n\}$ とする．$D(t)$ のうち，最小のものを $d_{\min}(t)$ とする．このとき，以下の補題 1, 2 が成り立つ．

補題 1. 任意の時刻 t について，$d_{\min}(t+1) \geq d_{\min}(t)$ が成り立つ．

補題 2. $d_{\min} < \frac{m-2}{m}V$ のとき，$d_{\min}(t+1) > d_{\min}(t)$ となる時刻 t が存在する．

$d_{\min} < \frac{m-2}{m}V$ は常に成り立つため，以上の補題 1, 2 より，以下が成り立つ．

補題 3. すべてのロボットは，それぞれの両隣のロボットと相互に確認できる状態に到達する．r_1, r_n については，それぞれ線分の一端と r_2，他方の線分の一端と r_{n-1} を確認できる状態に到達する．

時刻 t におけるロボットの可視グラフを無向グラフ $G(t) = (R', E(t))$ で定義する．また，線分に

における $x = 0, L$ の点 (線分の両端点) をそれぞれ，r_0, r_{n+1} とする．$R' = R \cup \{r_0, r_{n+1}\}$ は，すべてのロボットと線分の両端点の集合であり，時刻 t において，r_i, r_{i+1} が相互に確認できるかつそのときに限り，$(r_i, r_{i+1}) \in E(t)$ を定義する．自身の両側にロボットが確認できる場合に適用されるアルゴリズムにより，次のことが言える．

補題 4. 可視グラフ $G(t)$ が一つの連結成分となった時刻を $t = t_c$ とすると，$t \geq t_c$ において，$G(t+1) = G(t)$ であり，ロボットの位置は線分の両端点を含むすべてのロボットが等間隔になる点へ収束する．

5　余剰台数の必要性

図 1 に 1 台のロボットで線分を被覆する場合を示す．図 2 には，アルゴリズム SCA の (2) 片側にのみ確認できる場合のロボットの動きを示す．

アルゴリズム SCA は，長さ $L = 2V$ の線分が与えられたとき，1 台のロボットでは線分被覆問題を解決できない．更に，$\frac{2m+1}{m+1}V < L < 2V$ の線分が与えられた場合においても，1 台のロボットでは線分被覆問題を解決できない．$d_1(t+1) = d_2(t)$ すなわち，$d_1(t) + \frac{d_1(t)}{m} = L - d_1(t)$ となるとき，ロボットの動きは周期的になり，収束しない．また，$d_1(t) > \frac{m}{2m+1}L$ のとき，$d_1(t) > d_2(t)$ となり，これもロボットの動きは収束しない．$d_1(t) < \frac{m}{2m+1}L$ ($d_2(t) < \frac{m}{2m+1}L$) のとき，$d_1(t) < d_2(t+1)$ ($d(t+1) > d_2(t)$) が常に成り立つ．よって，$L - \frac{m}{2m+1}L = \frac{m+1}{2m+1}L \leq V$ であれば，(2) 片側のみ確認できる場合に適用されるアルゴリズムによって，与えられた線分の両端点が確認できる領域へ必ず進入できる．

このように，1 台のロボットにアルゴリズム SCA を適用して線分を被覆させる場合にも，$L < 2V$ の条件では解決できないことがわかる．

6　おわりに

本研究は，一次元空間におけるロボットの監視を目的としている．これを今回と同じ条件下で二次元空間へ拡張し，平面図形のロボットの監視へと繋げたいと考えている．

参考文献

[1] R. Cohen, and D. Peleg, “Local spreading algorithms for autonomous robot systems,” Theoretical Computer Science, **399**, pp.71–82, 2008.

[2] M. Eftekhari, P. Flocchini, L. Narayanan, J. Opatrny, and N. Santoro, “Distributed Barrier Coverage with Relocatable Sensors.” Proc. of the 21st International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, pp.235–249, 2014.

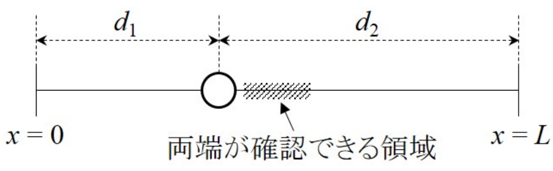

図 1　1 台のロボットによる線分被覆

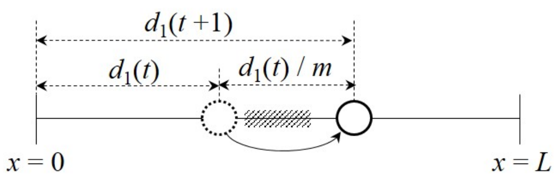

図 2　アルゴリズム SCA によるロボットの動き