

自律分散ロボット群の理論モデルに対する実機シミュレーションに関する研究

田邊, 太一 / TANABE, Taichi

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00013281>

状態を持つ自律分散ロボット群の新しいモデル化と その計算能力に関する研究

A NEW MODEL OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS WITH LIGHTS AND ITS COMPUTATIONAL POWER

寺井智史

Satoshi TERAJI

指導教員 和田幸一

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

We study gathering problem for n robots that move on a two dimensional plane. Robots are autonomous, anonymous, and have *light* that represents robot's state. Gathering algorithm for $n=2$ robots is proposed in previous research. We propose a new model of robots with lights and gathering algorithm.

Key Words : *distributed , mobile robots , light*

1. はじめに

自律分散ロボット群とは, 平面(または空間)内にロボットと呼ばれる周囲の環境を観察するセンサを持ち, 平面内を自由に移動する機能を持つ計算ユニットが存在し, それらが観察(Look)-計算(Compute)-移動(Move)という単純なサイクルを繰り返しながら, 個々には自律的に動作しつつ全体で一つの目的を達成する分散システムの一つである. 主にロボットを理論モデル化し, その上での問題(一点集合やパターン形成等)の可解性を調べる研究が主流である. [1, 2, 3]

複数のロボットが, 予め決められていない1点に集まる集合問題は最も基本的な理論モデルでは一般に非可解な問題であることが知られている. そういった問題を解くために, 基本的な機能に加えて色によってロボットの状態を表すライトを装備した状態付きロボットモデルが提案されている. [1]

[1]では2台のロボットを用いた集合問題を, 状態を持つロボットを用いて解いている. [2]ではロボットの動作するタイミングを決めるスケジューラに制限を加えた上での可解性を調べている. またロボットの重なりを検知できる多重性検知の能力を仮定したうえでの可解性も調べ

ている. 多重性検知ができない場合は2台の集合問題は, スケジューラに片方ずつのロボットが動作するという制限を設けなければ解けないとしている.

本稿では3台以上のロボットを用いた集合問題を, 状態を持つロボットを用いて解くために既存の状態付きロボットモデルを拡張し, その上での集合問題を解くアルゴリズムを提案する.

2. 諸定義

(1) 全般

n 台のロボットの集合 $\mathcal{R} = \{r_1, \dots, r_n\}$ が 2 次元平面 $\mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}^2$ 上の点として存在する. ロボット r_i は自らを原点とする局所座標系 $CS_i (i = 1, \dots, n)$ を持つが, 必ずしも座標系同士は一致しない. 時計回りの方向に関して合意があるとき, キラリティを持つという.

ロボット r_i は平面内を観察し, 他ロボットの位置のスナップショット SS_i

$= \{(x_j, y_j) | (x_j, y_j) \text{ は局所座標系におけるロボット } r_j (1 \leq j \leq n) \text{ の座標}\}$ を撮影することができる. ただし (x_i, y_i) は r_i の局所座標系の原点とする.

ロボットはどの方向へも直線的な移動ができる. また

任意の中心点,半径を持つ円周上を移動することができる.

ロボット同士が直接的に通信することはできない.

ロボットは局所時計を持つが,示す値,クロックレートは必ずしも一致しておらず,同期しているとも限らない.

(2) 命令

ロボットは中央制御や外部操作されことなく自律的に動作し,共通のアルゴリズムに従って行動する.

ロボットは任意の時刻において **active** もしくは **inactive** であり,**active** であるときは以下の 3 命令を 1 サイクルとして行い,**inactive** になるか,次のサイクルを実行する.

① LOOK

周囲を観察し,自らの局所座標系に従った他ロボットの座標を得る.

② COMPUTE

LOOK 命令によって得たスナップショットから,全ロボット共通のアルゴリズムに従って次に移動すべき点を算出する.

③ MOVE

COMPUTE 命令によって算出した目的地に移動する.1 度の MOVE 命令によって必ず目的地に辿りつける(途中で停止する可能性がある)とき,移動は厳密(厳密でない)という.移動が厳密でないとき,1 度の MOVE 命令で移動できる最低限度の距離 δ が存在する.

(3) スケジュール

ロボットは命令の実行時刻を定めるスケジュールに従って行動する.各ロボット命令実行タイミングの同期の程度によって,主に 3 つのスケジューラが考えられている.

① ASYNC

全く同期を考えず,各ロボットが自由にサイクルを実行する.そのため,あるロボットが LOOK 命令を実行したときと MOVE 命令を実行したときで,他ロボットの位置が変わってしまうこともありうる.

② SSYNC

スケジュールをサイクルによって区切ることができる.そのため同じサイクルで LOOK 命令を実行したロボットは全て同じスナップショットを得る.しかし全てのサイクルで全ロボットが **active** であるとは限らない.

③ FSYNC

より制限の強い SSYNC であり,全てのサイクルで全ロボットが **active** である.

上記に加え,本研究では SSYNC に制限を加えたスケジューラを用いる.

④ centralized

任意の時刻において **active** なロボットは 1 台のみ.

⑤ k-bounded

任意のロボットの連続する 2 回のサイクルの間に,他ロボットがサイクルを実行する回数は高々 k 回である.

⑥ round-robin

centralized k-bounded スケジューラに等しく,ロボットが 1 台ずつ,決まった順番でサイクルを実行する.

ASYNC に従ったスケジュールの全体集合を SCH_{ASYNC} と表す(他も同様に表す)と,以下のような包含関係が得られる.

$$SCH_{FSYNC} \subset SCH_{SSYNC} \subset SCH_{ASYNC} \quad (1)$$

$$SCH_{round-robin} \subset SCH_{centralized} \subset SCH_{SSYNC} \quad (2)$$

$$SCH_{round-robin} \subset SCH_{k-bounded} \subset SCH_{SSYNC} \quad (3)$$

(4) 状態

ロボットは色によって内部状態を表すライトを装備しており,COMPUTE 命令実行時に色を変えることができる.このライトの可視性によって以下のようなモデルが考えられている.[1]

① full-light

LOOK 命令によって他ロボットの色を知ることができ,また自分の色も分かる.

② external-light

LOOK 命令によって他ロボットの色を知ることができるが,自分の色は分からない.

③ internal-light

LOOK 命令によって他ロボットの色を知ることができないが,自分の色は分かる.

(5) モデルの表記

本稿ではモデルを以下のように表記する.

$$SCHEDULE^{ln}(light, rigidity, chirality)$$

SCHEDULE : スケジュールを示す.ASYNC, SSYNC, FSYNC, CENT(centralized), k-B(k-bounded), RR(round-robin)のいずれかをとる.

ln : 状態数を示す.状態を持たない場合は ‘-’ をとる.

light : 状態の種類を示す.full(full-light),

ext(external-light), int(internal-light)のいずれかをとる.状態を持たない場合は ‘-’ をとる.

rigidity : 移動の厳密さを示す.移動が厳密であるとき r , そうでないとき nr をとる. δ の知識があるときは nr_δ と表記する.

chirality : キラリティの有無を表す.キラリティを持つとき c , 持たないとき nc をとる.

(6) 集合問題

時刻 t における全ロボットの $\mathcal{U}$ 上の座標の多重集合を状況といい,以下のように定義する

$$CNF_t = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n (x_i, y_i) \in \mathcal{U}\} \quad (4)$$

$n \in \mathbb{N} (n \neq 0)$ 台のロボットが任意の初期状況 CNF_0 から,以下に定義する,予め決められていない 1 点に全ロボットが存在する状況 CNF_{gather} になる問題を集合問題という.

$$CNF_{gather} = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n (x_i, y_i) \in \mathcal{U}\} \quad (5)$$

ただし $(x_1, y_1) = (x_2, y_2) = \dots = (x_n, y_n)$.

初期状況に制限を加え,

$$CNF_0 = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n (x_i, y_i) \in \mathcal{U}\} \quad (6)$$

ただし $\forall i, j (i \neq j \text{ かつ } i, j \in \{1, \dots, n\}) (x_i, y_i) \neq (x_j, y_j)$ とするものを **distinct gathering** という.この制限が無いものはこれと区別して **SS(Self Stabilization) gathering** という.

3. 先行研究

集合問題に関する先行研究によって得られた可解性に関する結果を紹介する.

(1) 状態を持たないモデル

状態を持たないロボットを用いた集合問題の可解性に関する結果を表 1 に示す.[2]

表 1 状態無しモデルによる結果

スケジューラ	$n = 2$	$n \geq 3$
ASync	×	
SSync	×	
k-bounded ($k \geq 1$)	×	
centralized	○	
2-bounded centralized		×
round-robin		× (SS)
FSync	○	○

状態を持たないモデルのロボットでは,2 台の集合問題は **centralized** スケジューラでは明らかに可解であるが,そうでないスケジューラでは,1-bounded スケジューラでも非可解である.3 台以上の集合問題は **SS gathering** は **round-robin** スケジューラですら非可解であり,distinct gathering は 2-bounded centralized スケジューラですら非可解である.

ある点 a に複数台のロボットが重なって存在しているとき, a を観察したロボットがその重なりを検知できるならば,ロボットは弱い多重性検知ができるという.また, a に

重なっているロボットの台数まで分かるならば,ロボットは強い多重性検知ができるという.次に多重性検知ができるときの集合問題に関する結果を表 2 に示す.[2]

表 2 多重性検知モデルによる結果

スケジューラ	$n = 2$	$n \geq 3$
SSync	×	○
k-bounded	×	○
centralized	○	○

2 台の集合問題では多重性検知能力が発揮されることはないので表 1 と変化はない.3 台以上の集合問題は,多重性検知ができるとスケジューラが **SSync** でも可解である.

(2) 状態を持つモデル

状態を持つロボットを用いた集合問題の可解性に関して,ロボットの台数が 2 台の場合の結果を表 3 に示す.[1,3]

表 3 状態付きモデルによる結果($n=2$)

schedule	full	internal	external
ASync	$\leq 12 / \leq 3$	?	$12 / 3$
SSync	2	$6 / 3$	3
FSync	1	1	1

※移動が厳密でなく δ の知識無

※移動が厳密でなく δ の知識有

※移動が厳密

ロボットに状態を持たせることによって,いくつかの仮定において集合問題を解くことができるようになる.

4. 新たなモデルの提案

本研究では,新たに 3 台以上の状態付きロボットを用いた集合問題に関する可解性を調べた.それにあたって既存の状態を持つロボットのモデルを拡張した新たなモデルを提案する.

ある点 p に q 種類の状態 $(\{s_1, \dots, s_q\})$ を持ち得るロボット $r_1, \dots, r_m (m \leq n)$ が重なっており,それぞれ $l_1, \dots, l_m$ という状態を持っているとする.新たなモデルでは p を観察したときの状態の見え方を,多重集合 $L = \{l_1, \dots, l_m\}$ の部分集合 L_{sub} として以下のように定義する.

① multiset

L がそのまま認識される.つまり,

$$L_{sub} = L \quad (7)$$

このモデルは強い多重性検知能力を持っているに等しい.

② set

重複要素を除いた集合が見える.つまり

$$L_{sub} = \{s_u | s_u \in L\} \quad (8)$$

③ arbitrary

L 中である一つの状態だけが見える.つまり,

$$L_{sub} = s_v (s_v \in L) \quad (9)$$

本稿でのモデルの表記を以下のように拡張する.

$SCHEDULE^{ln}(light, rigidity, chirality, optic)$

$SCHEDULE, ln, light, rigidity, chirality$: 先述のとおり.

$optic$: multi(multiset), set(set), arb(arbitrary)のいずれかをとる.

5. 結果・考察

本研究で提案するアルゴリズムのアイデアを紹介し, 得られた定理を示す.

[4]では $SSYNC^-(nr, c)$ モデルで任意の初期状況から 2 点もしくは 1 点に全ロボットを移動させるアルゴリズムが提案されている.本研究ではまずこのアルゴリズムを用いて 2 点に全ロボットを移動させ, 2 台のロボットの集合問題を解くアルゴリズムを拡張する形で 3 台以上のロボットの集合問題を解いた.

定理 1

$SSYNC^3(full, nr, c, set)$ モデルの $n(\geq 3)$ 台のロボットを用いた集合問題は可解である.

アルゴリズムの概要

2 点にロボットが集まって以降の初めてのサイクルで, あるロボットが両端点に他のロボットを残したまま中点に移動した場合には中点に, 片方の端点にしか残らなかった場合は残された端点に集まる.両端点にロボットが残らなかった場合は新たに両端点を考える.

定理 2

$SSYNC^2(ext, nr_\delta, c, set)$ モデルの $n(\geq 3)$ 台のロボットを用いた集合問題は可解である.

アルゴリズムの概要

2 点に集まった後, 両端の距離が δ 以下になるように縮める.その後状態を変えつつ移動して他ロボットが集まるための目標となるロボットを決定し, その点に集まる.

定理 3

$centralized^2(ext, nr, c, set)$ モデルの $n(\geq 3)$ 台のロボットを用いた集合問題は可解である.

アルゴリズムの概要

まず集合する目標になる状態を持つロボットを 1 点のみに存在するように状態を変える.それが済みしだい目標となる状態を持つロボットがいる点に集まる.

定理 4

$k - B^{k^2+3k+5}(int, nr_\delta, c, set)$ モデルの $n(\geq 3)$ 台のロボットを用いた集合問題は, 1 状態のロボットが現れるまでに全ロボットが少なくとも 1 回行動するならば可解である.
アルゴリズムの概要

2 点に集まった後, あるロボットが $k+1$ 回行動すると他のロボットは少なくとも 1 回行動しているという性質を用いて, 両端点の距離を縮めるフェイズと 1 点に集まるフェイズを分離する.

定理 5

$RR^2(int, r, nc, set)$ モデルの $n(\geq 3)$ 台のロボットを用いた集合問題は可解である.

アルゴリズムの概要

動作の順番が決まっているため, 2 点に集まった後全ロボットが 1 回ずつ動作すると, 1 番目から $i(1 \leq i \leq n)$ 番目と $i+1$ から n 番目に動作するロボットを 2 点に分離できる.すると片方の点のロボットだけが動くことが保障できるため, 集合することができる.

以上の 5 つの定理から得られた可解性を表 4 にまとめる.

表 4 状態付きのモデルによる結果($n \geq 2$)

スケジューラ	<i>full</i>	<i>internal</i>	<i>external</i>
SSYNC	3	?	2
k-bounded	$k^2 + 3k + 5$		
centralized	≤ 2	?	2
round-robin	≤ 2	2	≤ 2

※移動が厳密でなく δ の知識無

※移動が厳密でなく δ の知識有

※移動が厳密

状態を持たないロボットを用いた場合と比べると, 状態とキラリティを持たせることで集合問題を解くことができた.表 3 と比較すると, SSYNC スケジューラで *full-light* を持つ場合は状態が 1 つ増え, *external-light* を持つ場合は δ の知識が有ると状態が 1 つ減る結果となった. *k-bounded* スケジューラを用いたアルゴリズムでは, 移動の厳密さ以外にも特別な仮定を設けた.

6. まとめ

状態を持つロボットにキラリティを持たせることで, 3 台以上のロボットを用いた場合でも集合問題を解けることが分かった.今後はさらに様々な仮定において集合問題や他の問題の可解性, また *external-light* と *internal-light* の能力差を調べる必要がある.

謝辞

本研究を進めるにあたり,ご指導を頂いた修士論文指導教員の和田幸一教授,ならびに名古屋工業大学院工学研究科情報工学専攻片山喜章教授に感謝いたします,また,日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた和田研究室の皆様にも感謝いたします.

参考文献

- 1) P.Flocchini , N.Santoro , G.Viglietta , M.Yamashita , Rendezvous of Two robots with Constant Memory ,20th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2013) , Lecture Notes in Computer Science 8179, pp 189-200.
- 2) X D'efago , M Gradinariu , P Julien , C St'ephane , M Philippe , R Parv'edy , Fault and Byzantine Tolerant Self-stabilizing Mobile Robots Gathering — Feasibility Study — , 20th International Symposium, DISC 2006, Lecture Notes in Computer Science , 4167 , pp 46-60.
- 3) S Das , P Flocchini , G Prencipe , N Santoro , M Yamashita , The Power of Lights: Synchronizing Asynchronous robots using Visible Bits , 32nd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2012) , pp 506-515
- 4) T Izumi, Y Katayama, N Inuzuka, and K Wada, Gathering Autonomous Mobile Robots with Dynamic Compasses: An Optimal Result, 21st International Symposium on Distributed Computing (DISC 2007), Lecture note in Computer Science 4731, pp 298-312,

本論文に関する発表

- 1) 寺井智史,和田幸一,片山喜章,状態を持つ自律分散ロボット群を用いた集合問題の可解性について,第 11 回情報科学ワークショップ,2015
- 2) S Terai, K Wada, Y Katayama, A new model for autonomous mobile robots with lights and its solvability of gathering problems, 29th International Symposium on Distributed Computing Workshops, (DISC 2015),
- 3) 寺井智史,和田幸一,片山喜章,状態を持つ自律分散ロボット群における集合問題に対するアルゴリズムについて,コンピュテーション研究会(COMP),2016