Uniform k-partition in Population Protocol Model

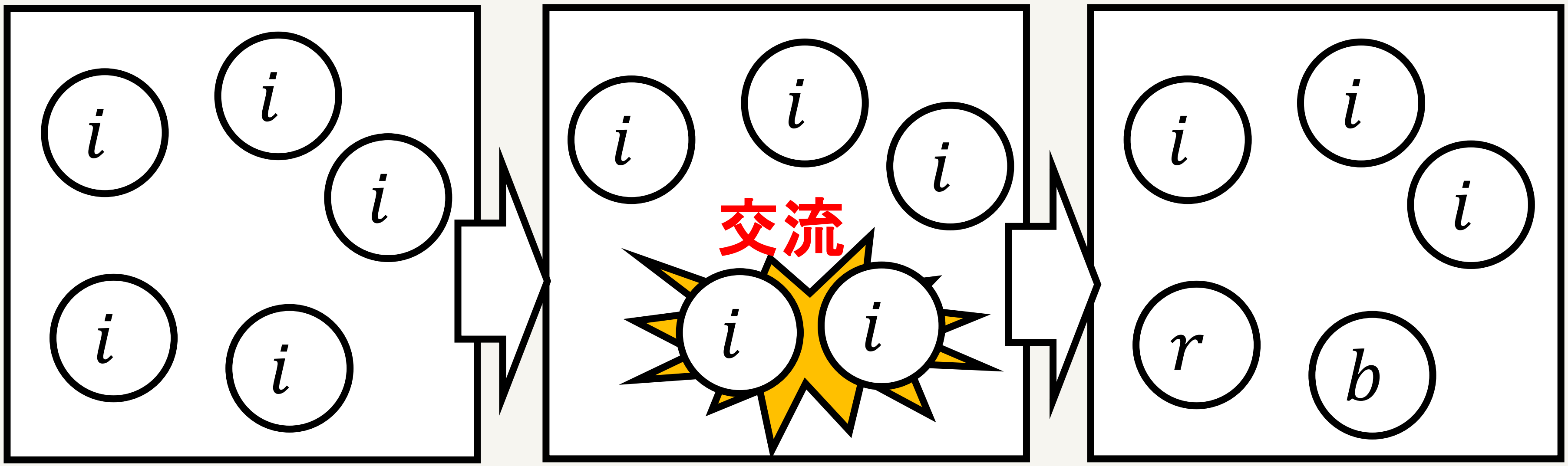
博士前期課程 2年
情報理工学プログラム
ディペンダブルシステム学研究室
安見 嘉人

背景

- 低性能デバイスを使った自律分散システムが注目を集めている
  - 小動物の群れの観察のためのセンサネットワーク
  - 分子ロボット

個体群プロトコルモデル [1]

- 複数の受動的に移動する個体で構成
  - 各個体は同一の状態機械
  - 2つの個体が近づいたとき，交流により状態を更新

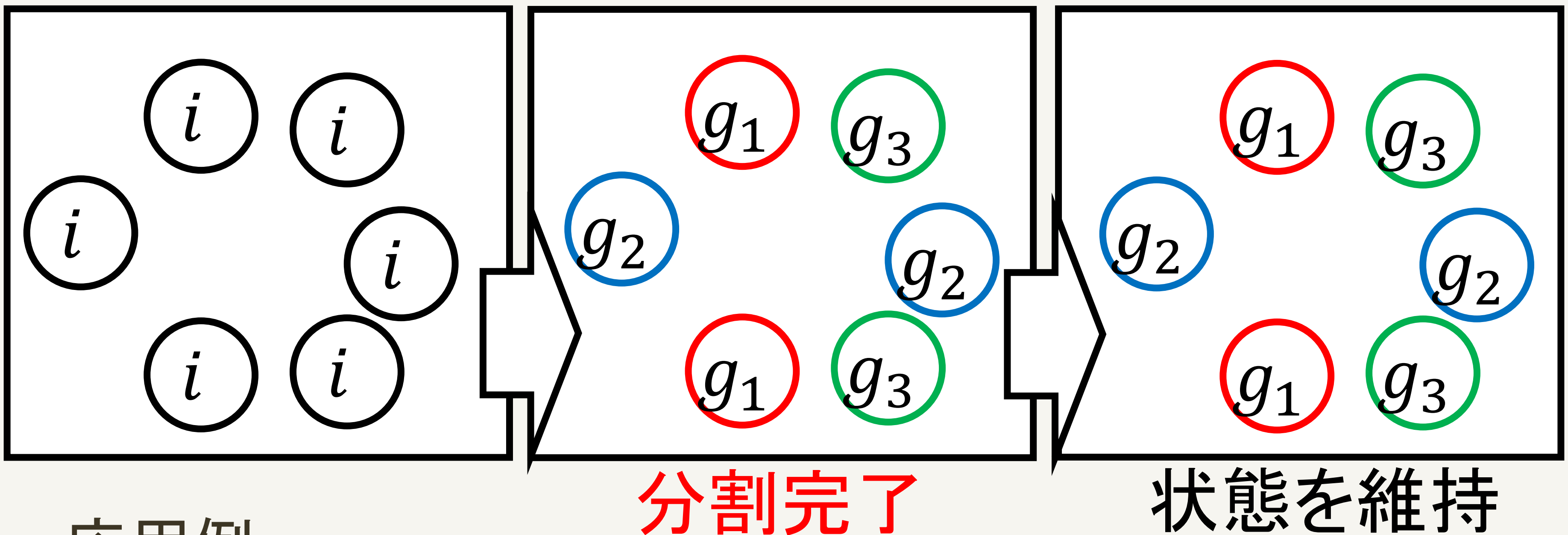


- 低性能なデバイスのモデル化なので空間計算量が大事

[1] D. Angluin et al.,"Computation in networks of passively mobile finite-state sensors", *Distributed Computing*, Vol.18, No.4, pp.235-253(2006)

k分割問題

- 個体群をk個の同数のグループに分ける
- kは任意の正の整数(例はk=3)



- 応用例
  - グループごとに役割を与えることが可能
  - 一部のグループだけ動かすことでバッテリーを節約

研究成果

1. いくつかのモデルで2分割問題を解くのに必要な最小状態数を解明

2. いくつかのモデルでk分割問題を解くのに必要な最小状態数を解明

3. 交流に制限を加えたモデルで2分割問題を解くのに必要な最小状態数を解明

※2分割問題: $k=2$のみに限定した分割問題

2分割問題(初期値任意)

初期状態が任意で2分割問題を解く最小状態数 (Pは個体数の上界)

モデル			先行研究[2]		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	4	4		
	弱公平	非対称	?	$P-2$	P	P
		対称	?	$P-2$	$P+1$	$P+1$
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	?		不可	
	弱公平	非対称/対称	?		不可	
なし	全体公平	非対称/対称	不可			
	弱公平	非対称/対称	不可			

※初期状態が一定の場合の最小状態数は[2]で完全に明らかにされている

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

k分割問題(初期値任意)

初期状態が任意でk分割問題を解く最小状態数(Pは個体数の上界)

モデル			先行研究 (2分割)[2]		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	?	4		
	弱公平	非対称	?	$P-2$	P	P
		対称	?	$P-2$	$P+1$	$P+1$
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	?		不可	
	弱公平	非対称/対称	?		不可	
なし	全体公平	非対称/対称	不可			
	弱公平	非対称/対称	不可			

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

k分割問題(初期値一定)

初期状態が一定でk分割問題を解く最小状態数

モデル			自明な解		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
	弱公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
	弱公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
なし	全体公平	非対称/対称	?	k	$3k-2$	$k+1$
	弱公平	非対称	?	k		$k+1$
		対称	不可[2]			

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

2分割問題(初期値一定･交流制限モデル)

初期状態が一定で2分割問題を解く最小状態数 (Pは個体数の上界)

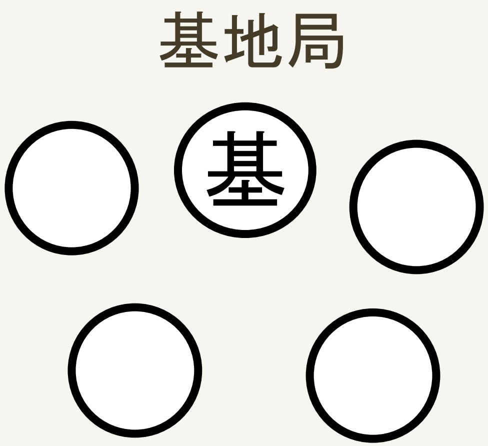
モデル			先行研究[2][3]		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	3	3		
	弱公平	非対称/対称	?	3	$3P+1$	
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	3	3		
	弱公平	非対称/対称	?	3	$3P+1$	
なし	全体公平	非対称	?	3	4	4
		対称	?	4	5	5
	弱公平	非対称/対称	不可			

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.
[3] J. Beauquier, et al., *International Conference on Principles of Distributed Systems*, 2013.

基地局

- 基地局あり(初期化あり)
  - 特別な個体（基地局）が一つ存在
    - 他の個体と区別可能
    - 強力な性能を仮定可能(状態数無制限など)
  - 基地局の初期状態は一定

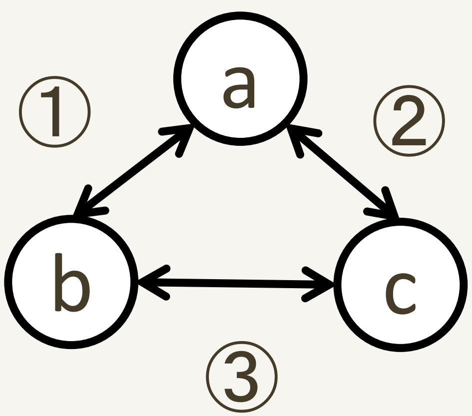
- 基地局あり(初期化なし)
  - 基地局が一つ存在
  - 基地局の初期状態が任意



- 基地局なし

公平性

- 交流順序に関する仮定
- 公平性の種類
  - 弱公平性
    - 各個体間で無限回交流が発生
  - 全体公平性
    - 直感的には，あらゆる順序の交流が無限回発生



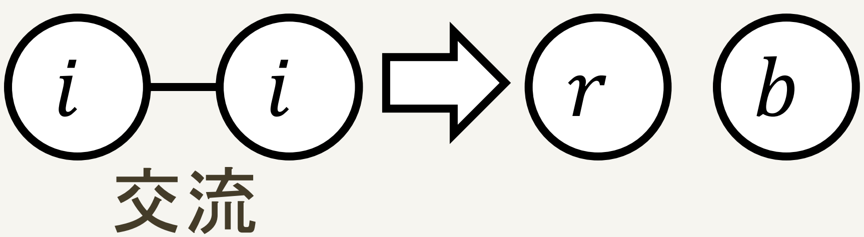
弱公平：①→②→③→①→②→ ③ → ･･･
の順で無限に交流するかもしれない

全体公平： ①→②→③→ ③→②→① →･･･
など別の順の交流も起こる

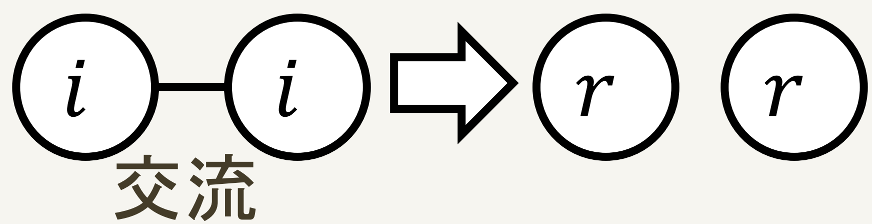
対称性

- 非対称なアルゴリズム
  - 非対称な遷移を含む
    - 非対称な遷移: 同状態で交流したら，別状態に遷移

- 対称なアルゴリズム
  - 非対称な遷移を含まない



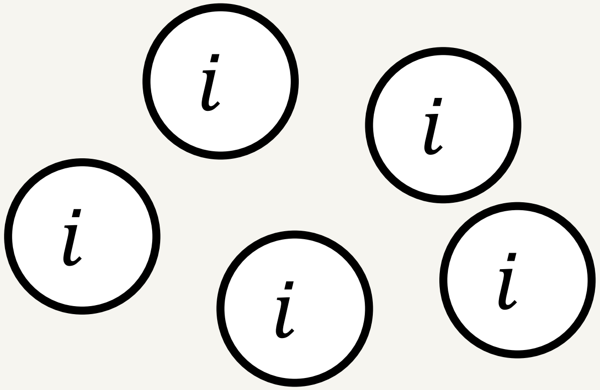
非対称な遷移



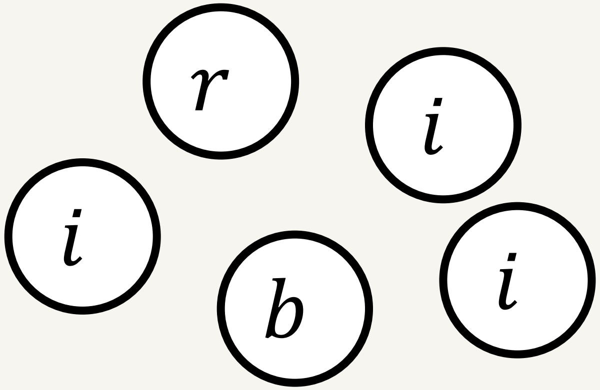
対称な遷移

個体の初期値

- 初期値が一定
  - 個体の初期化が必要
- 初期値が任意
  - 個体の初期化が不要



初期値一定



初期値任意

2分割問題(初期値任意)

初期状態が任意で2分割問題を解く最小状態数 (Pは個体数の上界)

モデル			先行研究[2]		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	4	4		
	弱公平	非対称	?	$P-2$	P	P
		対称	?	$P-2$	$P+1$	$P+1$
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	?		不可	
	弱公平	非対称/対称	?		不可	
なし	全体公平	非対称/対称	不可			
	弱公平	非対称/対称	不可			

※初期状態が一定の場合の最小状態数は[2]で完全に明らかにされている

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

k分割問題(初期値任意)

初期状態が任意でk分割問題を解く最小状態数(Pは個体数の上界)

モデル			先行研究 (2分割)[2]		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	?	4		
	弱公平	非対称	?	$P-2$	P	P
		対称	?	$P-2$	$P+1$	$P+1$
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	?		不可	
	弱公平	非対称/対称	?		不可	
なし	全体公平	非対称/対称	不可			
	弱公平	非対称/対称	不可			

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

k分割問題(初期値一定)

初期状態が一定でk分割問題を解く最小状態数

モデル			自明な解		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
	弱公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
	弱公平	非対称/対称	?	k	$k+1$	$k+1$
なし	全体公平	非対称/対称	?	k	$3k-2$	$k+1$
	弱公平	非対称	?	k		$k+1$
		対称	不可[2]			

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

2分割問題(初期値一定・交流制限モデル)

初期状態が一定で2分割問題を解く最小状態数 (Pは個体数の上界)

モデル			先行研究[2][3]		本研究	
基地局	公平性	対称性	上界	下界	上界	下界
あり(初期化あり)	全体公平	非対称/対称	3	3		
	弱公平	非対称/対称	?	3	$3P+1$	
あり(初期化なし)	全体公平	非対称/対称	3	3		
	弱公平	非対称/対称	?	3	$3P+1$	
なし	全体公平	非対称	?	3	4	4
		対称	?	4	5	5
	弱公平	非対称/対称	不可			

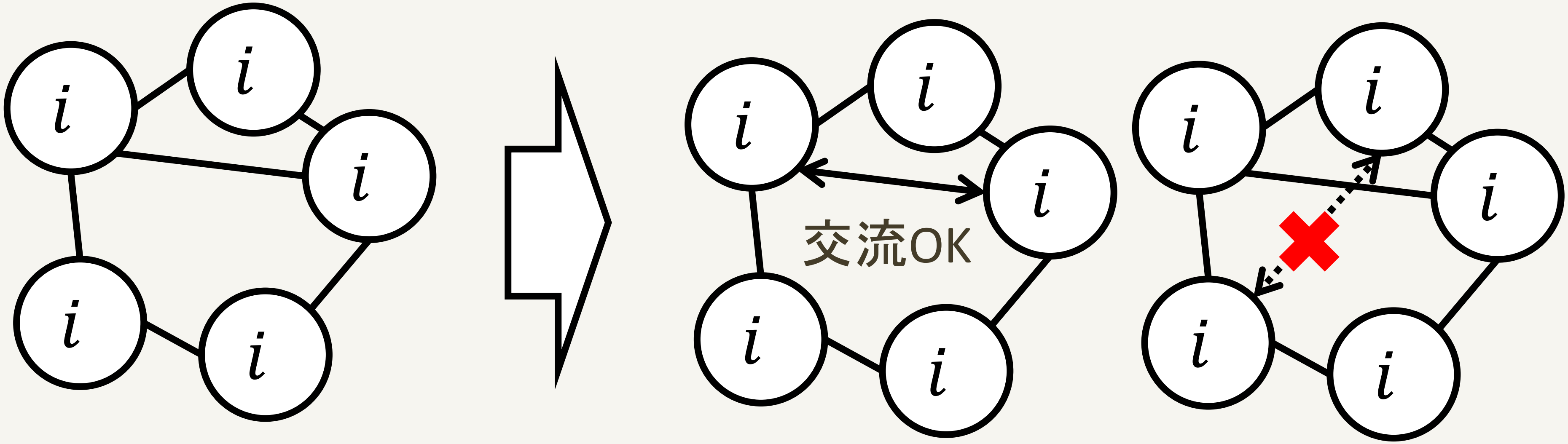
[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

[3] J. Beauquier, et al., *International Conference on Principles of Distributed Systems*, 2013.

交流に制限を加えたモデル

- 個体間の交流の可否をグラフにして表す
  - グラフのノードは個体
  - グラフの辺はその個体間で交流可能かどうか

- 任意の連結グラフで問題を考える
  - 交流できる個体に制限がある



2分割問題(初期値一定・任意グラフ)

初期状態が一定で2分割問題を解く最小状態数 (Pは個体数の上界)

モデル			先行研究[2][3]		本研究	
基地局	**公平性**	**対称性**	**上界**	**下界**	**上界**	**下界**
あり (初期化あり)	全体公平	非対称/対称	3	3		
	弱公平	非対称/対称	?	3	$3P+1$	
あり (初期化なし)	全体公平	非対称/対称	3	3		
	弱公平	非対称/対称	?	3	$3P+1$	
なし	全体公平	非対称	?	3	4	4
		対称	?	4	5	5
	弱公平	非対称/対称	不可			

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.

[3] J. Beauquier, et al., *International Conference on Principles of Distributed Systems*, 2013.

2分割問題(初期値一定・任意グラフ)

初期状態が一定で2分割問題を解く最小状態数 (Pは個体数の上界)

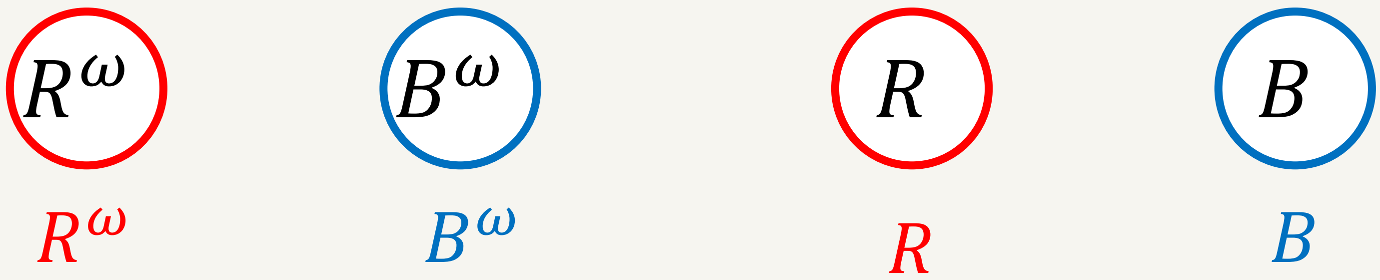
<table>
<tr><th colspan="3">モデル</th><th colspan="2">先行研究[2][3]</th><th colspan="2">本研究</th></tr>
<tr><th>基地局</th><th>公平性</th><th>対称性</th><th>上界</th><th>下界</th><th>上界</th><th>下界</th></tr>
<tr><td rowspan="2">あり
(初期化あり)</td><td>全体公平</td><td>非対称/対称</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>弱公平</td><td>非対称/対称</td><td>?</td><td>3</td><td>$3P+1$</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">あり
(初期化なし)</td><td>全体公平</td><td>非対称/対称</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>弱公平</td><td>非対称/対称</td><td>?</td><td>3</td><td>$3P+1$</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">なし</td><td rowspan="2">全体公平</td><td>非対称</td><td>?</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td></tr>
<tr><td>対称</td><td>?</td><td>4</td><td>5</td><td>5</td></tr>
<tr><td>弱公平</td><td>非対称/対称</td><td colspan="2">不可</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

[2] H. Yasumi, et al., *the 21st International conference on Principles of Distributed Systems*, 2017.
[3] J. Beauquier, et al., *International Conference on Principles of Distributed Systems*, 2013.

前準備

- 個体の状態集合 $\{R^\omega, B^\omega, R, B\}$
  - R^ωと R が赤グループ
  - B^ωと B が青グループ
- 各個体の状態は以下のように表記

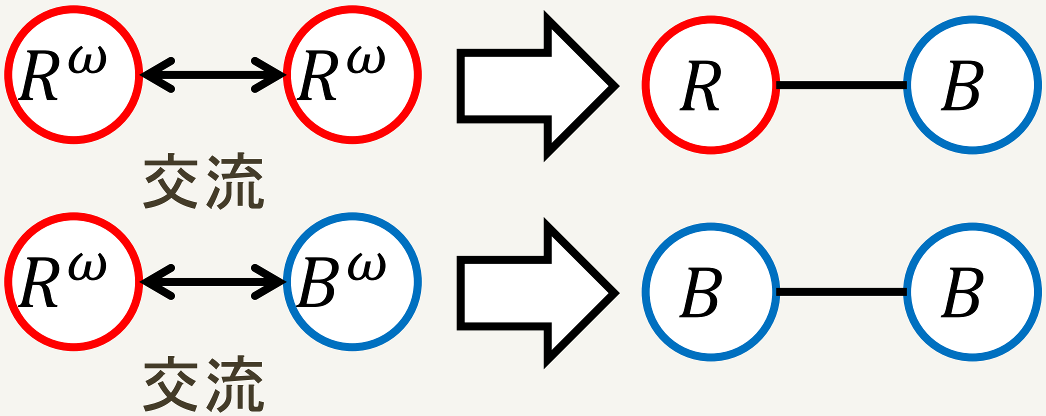
任意グラフ
全体公平
初期値一定



- 個体の初期状態はR^ω
- R^ωとB^ωはトークン持ち

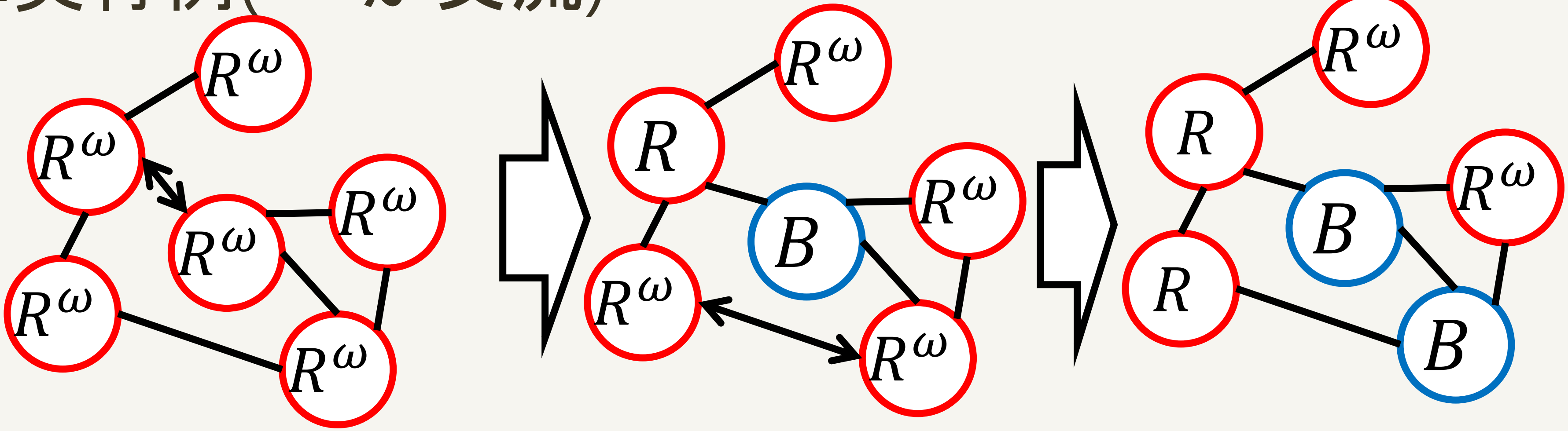
概要

■トークン2つで青を一つ作成



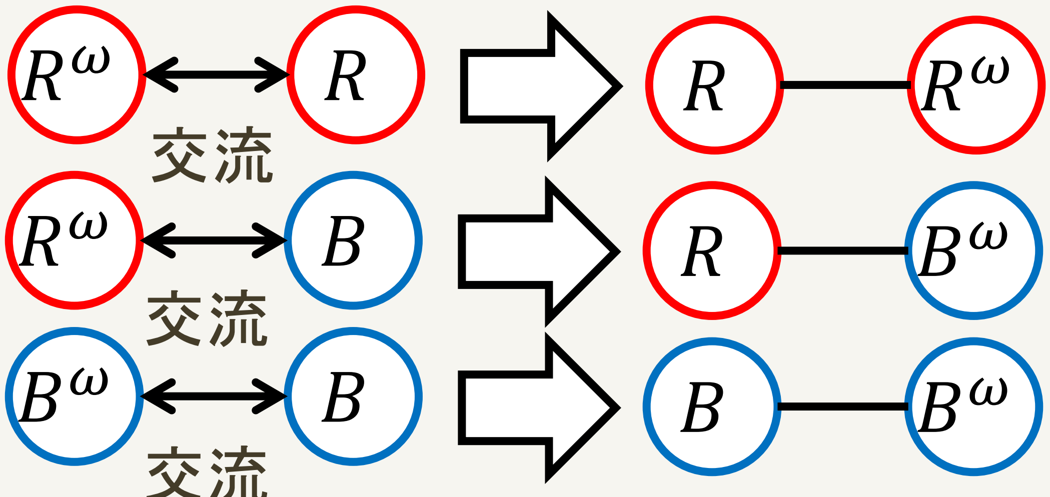
任意グラフ
全体公平
初期値一定

■実行例(↔が交流)



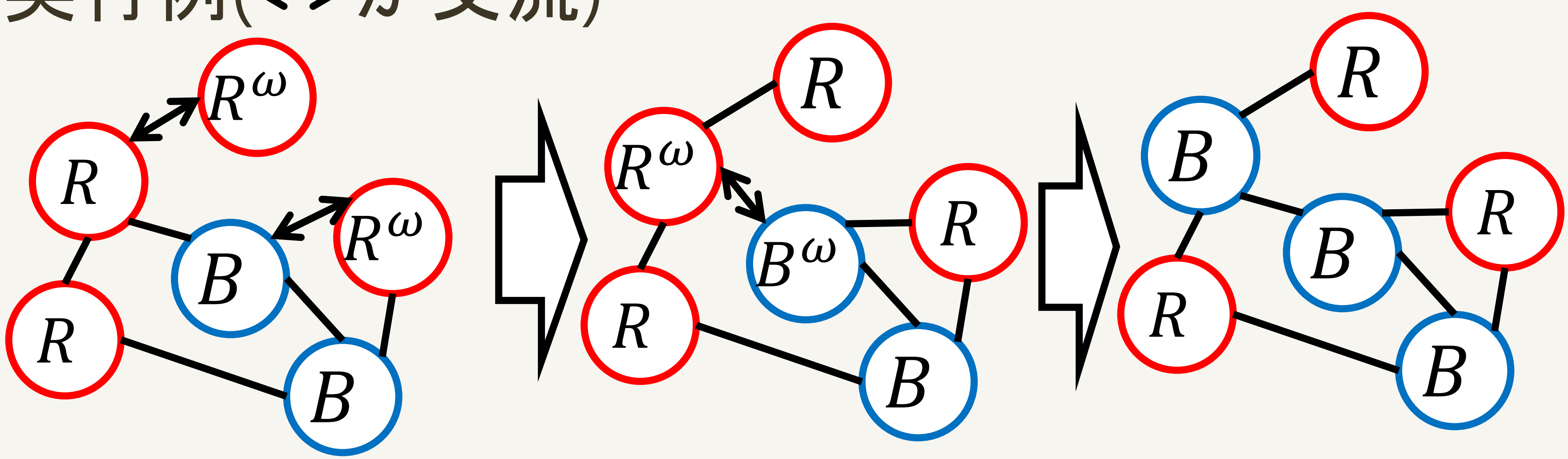
概要

- ■トークンは状態の交換により，グラフ中を移動



任意グラフ
全体公平
初期値一定

- ■実行例(↔ が交流)



注意

■トークン同士は必ず交流する?

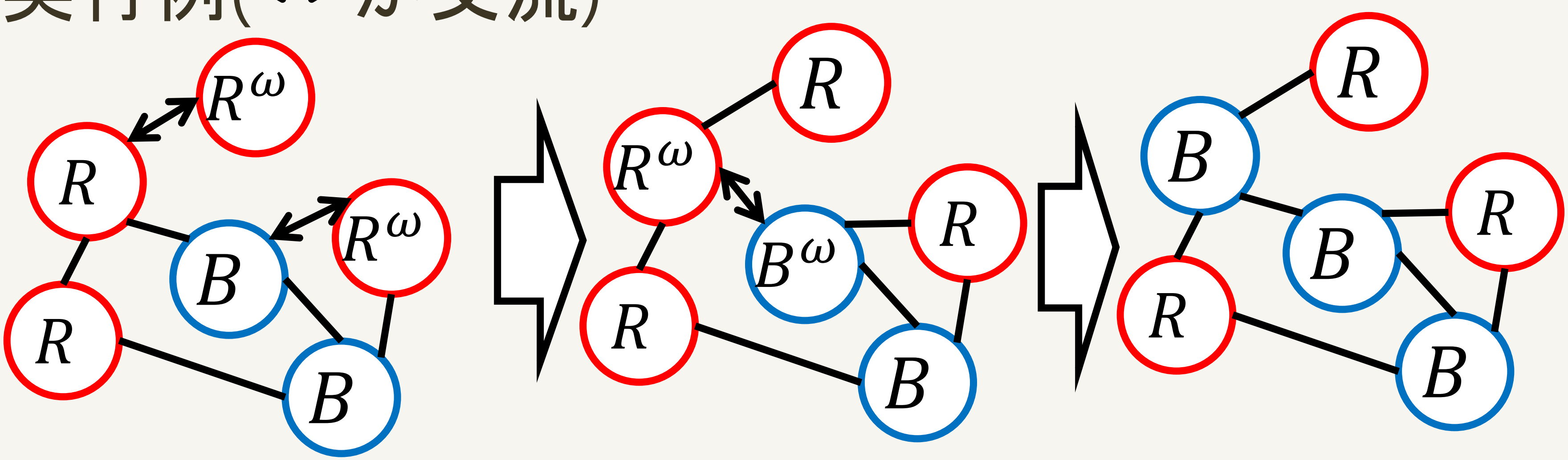
→全体公平なので, いつか交流する

任意グラフ
全体公平
初期値一定

全体公平性

(直感的には)あらゆる順序の交流が
無限回発生する

■実行例(↔が交流)



まとめと今後の課題

- まとめ
  - 個体群プロトコルモデルの分割問題を考え多くの設定で最小状態数を解明

- 今後の課題
  - 時間効率のよいアルゴリズムの検討
  - 任意グラフの2分割問題で未解明の部分の解明
  - 任意グラフでのk分割問題

成果発表

- 国際会議
  - Hiroto Yasumi, Naoki Kitamura, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, and Michiko Inoue, “A population protocol for uniform k-partition under global fairness”, 20th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models(APDCM2018), May 21, 2018 , JW Marriott Parq Vancouver, Vancouver, British Columbia, CANADA
  - Hiroto Yasumi, Fukuhito Ooshita, and Michiko Inoue, “Uniform partition in population protocol model under weak fairness”, 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems, 2019, Switzerland
- 論文誌
  - Hiroto Yasumi, Naoki Kitamura, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, and Michiko Inoue “A population protocol for uniform k-partition under global fairness” , International Journal of Networking and Computing (IJNC) Special Issue on APDCM 2018
  - Hiroto Yasumi, Fukuhito Ooshita, Ken’ichi Yamaguchi, and Michiko Inoue, “Space-optimal population protocols for uniform bipartition under global fairness”. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 102(3), 454-463 (2019).
- 受賞
  - APDCM2018 Outstanding paper award: “A population protocol for uniform k-partition under global fairness”