

# スワームロボットによる掃引作業 —レヴィフライトに関するシミュレーションを用いた考察

片田 喜章 (摂南大学)

## Sweeping by Swarm Robots —Computer Simulation for Lévy Flight

Yoshiaki KATADA (Setsunan University)

Abstract : We tackle the task for swarm robotics where robots explore the environment to detect many targets. When a robot detects a target, the robot must be connected with a base station via intermediate relay robots for wireless communication. In our previous results, we confirmed that Lévy flight outperformed the usual random walk for exploration strategy in real robot experiment. In this study, we investigated the performance of Lévy flight on a sweeping task through a series of computer simulations.

### 1. 緒言

スワームロボティクス (SR) とよばれる分野 [1][2][3] が近年、急速に注目を集めるようになってきている。その中でも Sahin ら [4] は単一ロボットでは問題解決が困難もしくは非効率なタスクに対して、構造が簡単で安価に構築でき制御器を含めて完全に均質な自律ロボット (シミュレーションではなく実機) を多数 (最低でも 10-20 台) 用いて解決策を提示しようというアプローチを提案している。このアプローチでは各ロボットに指示を出す監督的なエージェントの存在を前提としないため、スワームの群れ行動は各ロボットの局所的相互作用から必ず創発的に生成されることになる。上述の設計理念に従うと、各ロボットの構成は制御器を含めて均質であることが望ましい。均質でありながら、個々のロボットが多様な、時として役割分担的な振舞いを示すことが要求される。

我々の研究グループでは、協調探索に分類される、ターゲット探索 [5] をタスクとして取り扱ってきた。無線ネットワークによって通信可能な複数ロボットを用いてターゲットの探索を行い、あるロボットがターゲットを発見すると、その情報は無線ネットワークを介して基地局に送られる。これまで、スワームロボットネットワークにおける基地局と各ロボット間の無線通信の連結性 [6] を保証する通信可能距離とロボット台数の関係について、パーコレーション理論にもとづく計算機実験を行った [7]。さらに、上述の SR により構成される無線ネットワーク (以降、SR ネットワークとよぶ) の連結性を考慮したロボットの台数と無線通信装置を使用し、実環境においてターゲット探索の実機実験を行っている [8][9]。文献 [8] および [9] では、探索アルゴリズムとしてランダムウォークとレヴィフライト [10] を実装し、タスク達成率を比較した。その結果、移動距離が一定なランダムウォークに対し、移動距離が可変なレ

ヴィフライトが圧倒的に優位であることを確認した。上述のタスクでは環境内でロボットの初期位置から最も遠い場所に 1 つのターゲットを置いていた。

本稿では環境内をくまなく探索する、もしくは複数ターゲットを探索する、ことを想定し、SR ネットワークによる掃引作業を扱う。探索アルゴリズムとしてレヴィフライトの有効性に関して、計算機実験により考察を行う。

### 2. レヴィフライト

探索実行以前に環境に対する知識が全くない場合を想定する。この場合の探索行動としてランダムウォークが考えられる。ランダムウォークの中でもブラウン運動として扱われるものが一般的である。一方、ランダムウォークの 1 つで、移動距離がレヴィ分布とよばれる確率密度関数にしたがう、レヴィフライト (Lévy flight [10]) が知られている。レヴィ分布は以下の式で表される。

$$L_{\alpha,\gamma}(w) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\gamma q^\alpha} \cos(wq) dq, \quad \gamma > 0, w \in R \quad (1)$$

ここで、 $\gamma$  は分布の大きさを決めるパラメータであり、 $\alpha$  は分布の形状を決めるパラメータで  $0 < \alpha < 2$  の値をとる。本確率密度関数は  $w = 0$  に関して対称であり、無限大の 2 次モーメントをもつことが特徴である。本研究では文献 [11, 12] に従い、 $\gamma = 1$  とする。図 1 に (1) 式による確率分布 ( $\gamma = 1, \alpha = \{0.8, 1.8, 1.99\}$ ) を示す。

レヴィ分布に従う確率変数を生成するアルゴリズムが提案されている [11]。以下にその生成式を示す [11, 12]。

$$v = \frac{x}{|y|^{\frac{1}{\alpha}}},$$
$$w = \{(k(\alpha) - 1)e^{-\frac{|v|}{c(\alpha)}} + 1\}v \quad (2)$$

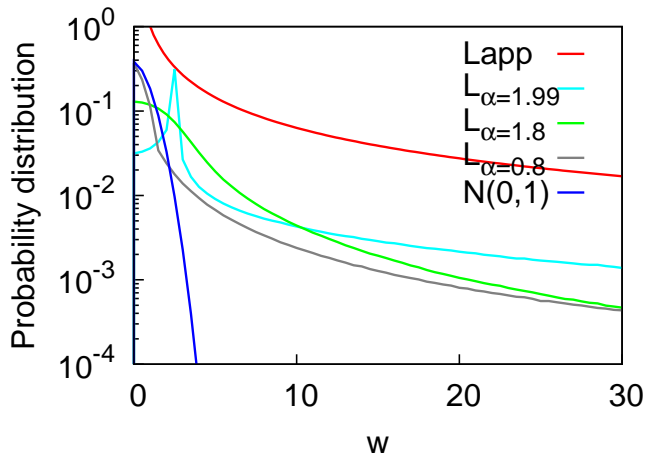


Fig. 1: Lévy and standard normal distributions

ここで、 $x$  と  $y$  はガウス分布に従う独立な確率変数であり、 $k(\alpha)$  と  $c(\alpha)$  は  $\alpha$  に依存し、文献 [11] によって  $0.8 \leq \alpha \leq 1.99$  の範囲で各値が得られている。

第 4.2 節で詳細を述べるが、本研究では (2) 式を用いて移動ロボットの直進移動時間を決定する。したがって、(2) 式の  $w \geq 0$  の範囲だけを必要とするため、(2) 式中の  $w$  を  $|w|$  として計算する。

計算機実験上の移動ロボットにレヴィフライトを実装した研究として文献 [13] がある。ここでは、 $w \gg 1$  としてレヴィ分布を近似した次式 [12][14] を移動距離の決定に使用している。

$$L(w) \propto w^{-\alpha} \quad (3)$$

ここで、 $w$  は移動距離、 $\alpha$  は分布の形状を変えるパラメータであり、本研究では文献 [13] に従い  $L(w) = w^{-1.2}$  に設定する。(3) 式および比較に用いる標準正規分布 ( $N(0,1)$ ) の確率分布を図 1 に示す。(2) 式よりも (3) 式から得られる確率密度関数値の方が移動距離の範囲全体に対して大きいことがわかる。

### 3. スwarmロボット構成

本研究では、文献 [9] の実験で使用した、左右二輪独立駆動型の移動ロボットを動力学シミュレータ ODE を用いてモデル化する (図 2)。設定を以下に示す。直径 170mm、高さ 75mm の台車に、距離センサ (前方に 4 個)、ターゲット検出センサ (両端に 2 個)、無線通信装置を搭載する。距離センサの計測可能距離は約 300mm、ターゲット検出センサの計測可能距離は約 200mm とする。駆動装置としてモータ 2 個を用いる。無線通信装置は Zigbee 規格を想定し、アドホックネットワークを構成し、マルチホップ通信が可能であると仮定する。

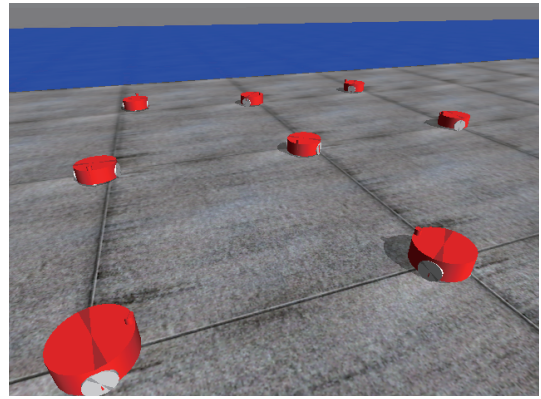


Fig. 2: Differential wheeled robots

## 4. コントローラ

### 4.1 サブサンクションアーキテクチャ

図 3 にスワームロボットに実装するサブサンクションアーキテクチャ (SSA) [15] のレイヤ構造 [9] を示す。本タスクを実現する SSA は、ターゲット発見情報送信レイヤ・障害物回避レイヤ・ターゲット探索レイヤの 3 層から構成されている。図中の I は抑制を表し、上位のレイヤが活性化する場合、下位のレイヤを抑制することを表している [15]。各レイヤはモジュールの結合により構成されている。

各レイヤの動作を説明する。ターゲット探索レイヤの探索モジュールは後述する探索アルゴリズムにより、直進モジュール・右回転モジュール・左回転モジュールのいずれかに実行指令信号を送る。障害物回避レイヤの障害物検出モジュールは第 3. 節で述べた距離センサからの入力値をもとに、左回転もしくは右回転モジュールに実行指令信号を送り、障害物を回避する。ターゲット発見情報送信レイヤの目標検出モジュールは第 3. 節で述べた左右いずれかのターゲット検出センサの出力値がしきい値を上回った場合に停止モジュールと情報送信モジュールに実行指令信号を送る。情報送信モジュールは SR ネットワークを介して基地局へターゲット発見情報を送信する。

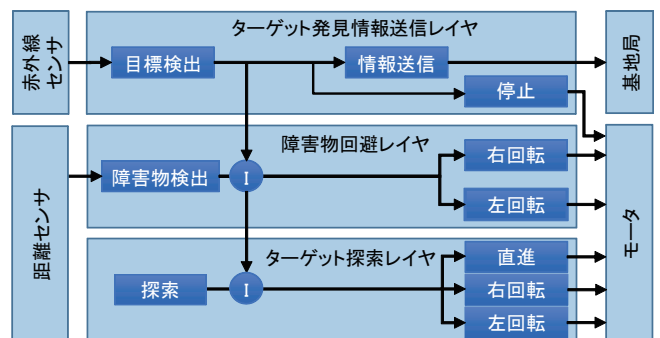


Fig. 3: Layer structure of SSA

## 4.2 探索アルゴリズムの実装

本研究で想定している左右二輪独立駆動型移動ロボットの仕様では、回転を伴う移動（一般的には旋回と言う）において回転方向をランダムにすることと、移動距離を一定にすることを同時に行うことがその構造上難しい。そこで、移動フェーズと回転フェーズを交互に選択する。移動フェーズでは、ロボットは左右モータを回転させ前進する（図3における直進モジュール）。移動フェーズにおける1ステップの実行時間は実機における予備実験の結果に基づいて6秒に設定した。移動フェーズ毎の移動ステップ数は第2節で述べたレヴィ分布および次節で述べる標準正規分布によって決定され、さまざまな値をとる。回転フェーズでは、 $\{45, 90, 135\}$  [°]のうちいずれかの角度と回転方向（時計回り、反時計回り）をランダムに選択し、あらかじめ測定しておいた、おおよそ、その角度に回転するであろう実行時間でその場で回転する（図3における左右回転モジュール）。

## 5. 掃引作業計算機実験

### 5.1 実験環境

壁に囲まれた正方形を実験環境とする（図4）。図4の左下に無線通信基地局（以下、基地局）の設置を仮定する。本実験は計算機実験のため、実際には基地局との通信を行わないが、SRネットワークの連結性のチェックに基地局の位置情報が必要となる。スワームロボットの初期位置は基地局近傍とし、図の左下方（赤色）とする。掃引作業を想定する場合、ロボットもしくは対象のセンサが通過した領域を掃引された領域とみなし、掃引可能面積に対する掃引された面積の比率を指標とすることが多い[16]。しかし、この方法では計算機実験の設定が煩雑になる。そこで、本研究ではロボットの初期位置付近を除く領域に336個の円柱（直径75mm、緑色）をターゲットとして設置し、センサにより発見できた円柱の数を掃引率としてスワームロボットの性能評価を行う。

### 5.2 実験設定

本スワームロボットのタスクは、所定の時間内にできる限り多くのターゲットを見つけ、ネットワークを介して基地局にその発見情報を送信することである。したがって、ターゲットの発見時には発見したロボットと基地局はネットワークを介し、連結されている必要がある。また、発見情報を送信されたターゲットは環境から取り除かれるものとする。

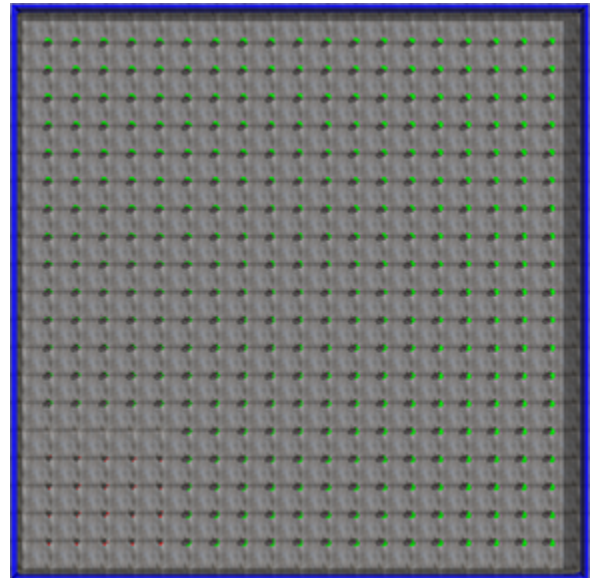
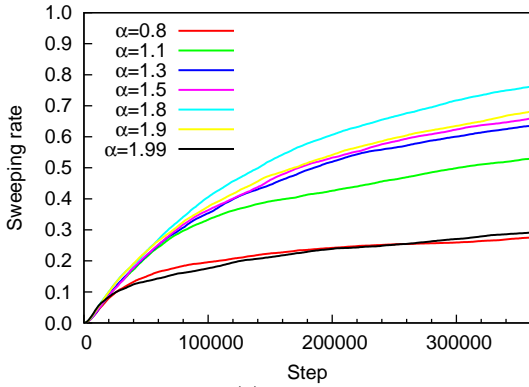


Fig. 4: Set up for computer simulation

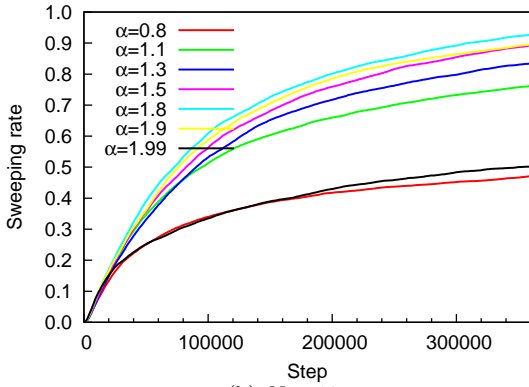
探索アルゴリズムとしてレヴィフライトまたはランダムウォークを採用し、性能を比較する。ランダムウォークでは移動ステップ数を決定する確率密度関数として第2節の末尾で述べた標準正規分布 ( $N(0, 1)$ ) を採用する。第2節で述べた(1)式におけるレヴィ分布（以降、 $L_\alpha$ と表示）の形状を決めるパラメータ  $\alpha$  は  $0.8 \leq \alpha \leq 1.99$  の範囲で設定する。(3)式におけるレヴィ分布（以降、 $L_{app}$ ）のパラメータは第2節で述べたものを採用する。正方形環境の一辺の長さを  $L = 20\text{m}$  とし、 $L$  に対する無線の通信可能距離の相対値を  $R \in \{0, 2, 0.5, 1.0\}$  とする。つまり、確率密度関数による移動距離の決定法が通信可能距離によってタスク達成能力にどのような影響を与えるかを考察する。なお、無線の通信可能範囲は半径  $R$  の円を仮定し、幾何学計算だけで連結性を判定する。第1節で述べたスワームロボットの定義および連結性を満たす通信可能距離と必要ロボット数の関係[7]を参考に、ロボット台数を  $N \in \{5, 10, 15, 20\}$  と変化させて実験を行う。タスクはすべてのターゲットを発見するか、3600秒（60分）経過した場合に終了とする。各実験の試行は各ロボットの初期姿勢を変えて50回行う。

### 5.3 実験結果

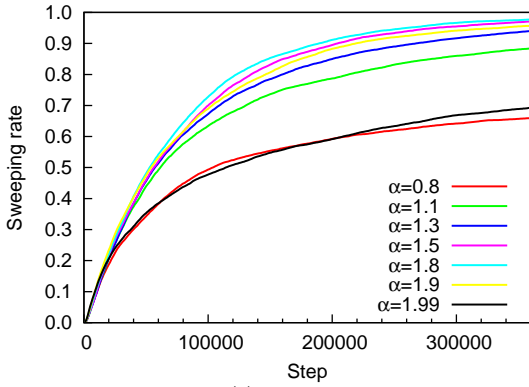
図5に  $R = 1.0$  の場合の  $L_\alpha$  を用いた結果を示す。各  $N$  に関して、 $\alpha$  を変えた場合の時間経過に対する掃引率を示している。 $\alpha \leq 1.8$  の範囲では  $\alpha$  の値が増加すると掃引率も増加している。 $1.9 \leq \alpha$  の範囲では  $\alpha$  の値が増加すると掃引率は低下する。 $\alpha$  に関する性能の優劣は時間経過に対しほぼ変わることはない。図6に  $R = 1.0$  の場合の  $(N, \alpha)$  の各組合せに関するタスク終了時における掃引率を示す。



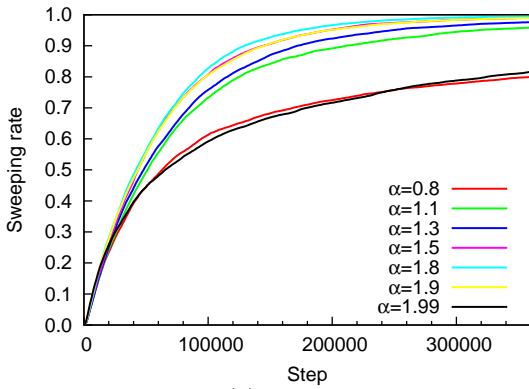
(a)  $N = 5$



(b)  $N = 10$



(c)  $N = 15$



(d)  $N = 20$

Fig. 5: Average sweeping rate for each time step with  $R = 1.0$  for  $L_\alpha$

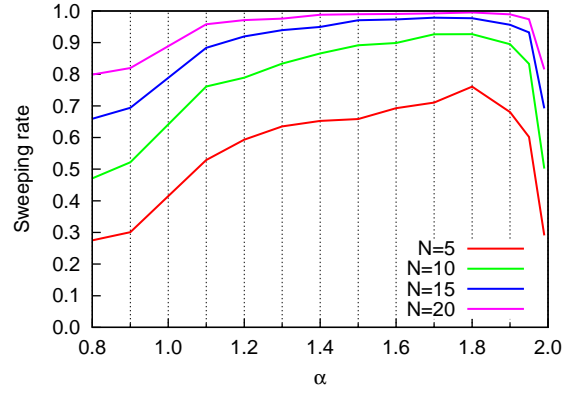


Fig. 6: Average sweeping rate for each  $\alpha$  and  $N$  with  $R = 1.0$  for  $L_\alpha$

上述の傾向に加えて、 $N$ が増加すると掃引率が増加することが確認できる。

つぎに、 $L_{\alpha=1.8}$ ,  $L_{app}$ , 標準正規分布 ( $N(0, 1)$ ) を用いた場合の比較を図 7 ( $R = 1.0$ ) に示す。時間経過に対し  $L_{app}$  が最も掃引率が高く、ついで  $L_{\alpha=1.8}$ ,  $N(0, 1)$  の順となる。とくに  $L_{app}$  の立ち上がりがよい。 $N$ が増加するほど、掃引率の立ち上がり・最終的な収束値ともに良い性能を示す。 $N = 20$  の場合には最終的な収束値に確率分布間の差はほとんどみられない。

以上の結果より、 $R = 1.0$  の場合には  $N$  が大きい方がよい性能を示し、 $L_{app}$  ((3) 式) を用いたレヴィフライトが掃引スピード・掃引率ともに最も良い性能を示すことを確認した。つまり、短距離および長距離の移動頻度がそれぞれに大きい確率分布が支持されたということになる。また、 $L_{app}$  の立ち上がりがよいことは初期位置に対する遠方だけではなく、近場の探索にも有効であることを示している。

$R = 0.5$  および  $R = 0.2$  についても、同様の傾向を確認した (図 8, 9)<sup>1</sup>。ただし、 $R$  の値が減少すると、掃引率は低下する。これは任意のロボットがターゲットを発見したとしても、基地局までの連結性が保たれていない場合、発見ターゲットとしてカウントされないためである。とくに  $R = 0.2$  のときには掃引率が 1 になることはなかった。

## 6. 結言

本稿では、スワームロボットネットワークによる掃引作業を扱った。本テスクでも、レヴィフライトの性能がランダムウォークよりも優位であった。また、文献 [13] で提案されているレヴィフライトの式を用いた場合の性能が文献 [11] で提案されている式を用いた性能よりも優れていることを確認した。これらの結果において、無線の連結性を満

<sup>1</sup>  $R = 0.5, N = 10, 15$  の  $L_\alpha$  に関しては最も最終掃引率が良かった  $\alpha = 1.7$  の結果を示している。

たし、ロボット台数が多ければ、掃引作業において良い性能を示すことを確認した。障害物回避行動が機能しているためデッドロックに陥ることはないが、探索過程で個体同士が密集する状態が散見された。効率改善のため、環境の疎な領域への早期展開を可能にする機構を開発したい。

## 参考文献

- [1] Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M., "Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective," *Swarm Intelligence*, Vol.7, No.1, pp.1–41, 2013.
- [2] Trianni, V., *Evolutionary Swarm Robotics*, Springer-Verlag 2008.
- [3] "スワーム：群れの創発的挙動生成", 計測と制御, Vol.52, No.3, pp.179–276, 2013.
- [4] Sahin, E., "Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application," *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 3342/2005, pp.10–20, 2005.
- [5] 杉山久桂, 辻岡哲夫, 村田正, ネットワーク化された群ロボットにおける被災者発見システム, *情報処理学会論文誌*, Vol. 46, No. 7, pp.1777–1788, 2005.
- [6] Li, J., Andrew, L.L.H., Foh, C. H., Zukerman, M., Hsiao-Hwa, C., "Connectivity, Coverage and Placement in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, Vol.9, No.10, pp.7664–7693, 2009.
- [7] 西口晃央, 片田喜章, "パーコレーション理論を用いたスワームロボットネットワークの連結性 通信距離とロボット数に関する考察", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'14, 講演論文集 CD-ROM*, 2A2-X06, 2014.
- [8] 片田喜章, 西口晃央, 森脇和也, 渡壁亮介, "レヴィフライトを用いたスワームロボットネットワークのターゲット探索", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'15, 講演論文集 CD-ROM*, 2A1-K06, 2015.
- [9] Katada, Y., Nishiguchi, A., Moriwaki, K. and Watakabe, R., "Swarm Robotic Network Using Levy Flight in Target Detection Problem", *Artificial Life and Robotics*, Volume 21, Issue 3, pp.295–301, 2016.
- [10] Lévy, P., "Theorie de l'Addition des Variables Aleatoires", Gauthier-Villars, 1937.
- [11] Mantegna, R.N., "Accurate Algorithm for Numerical Simulation of Lévy Stable Stochastic Processes," *Physical Review E*, Vol. 49, No. 5 pp.4677–4689, 1994.
- [12] Lee, C-Y. and Yao, X., "Evolutionary Programming Using Mutations Based on the Lévy Probability Distribution," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 8, No. 1, pp.1–13, 2004.
- [13] 小山英朗, 生天目章, "Random Walk と Levy Flight に基づく探索方法の比較", *電子情報通信学会技術研究報告 AI, 人工知能と知識処理*, Vol.107, No.523, pp.19–24, 2008.
- [14] Buldyrev, S. V., Goldberger, A. L., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H. E., "Generalized Levy-walk Model for DNA Nucleotide Sequences", *Physical review*. Vol.47, No.6, pp.4514–4523, 1993.
- [15] Brooks, R., "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.2, No.1, pp.14–23, 1986.
- [16] 江沢昌紀, 福本裕介, 斉藤雄樹, 鳥毛明, 小方博之, "掃引ロボットの掃引アルゴリズムの分析", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'14 講演論文集*, 2P1-L2-8, 2004.

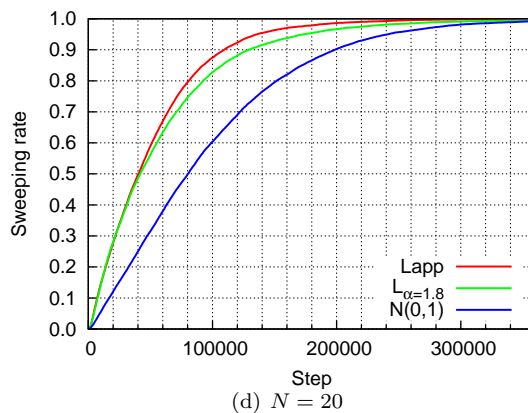
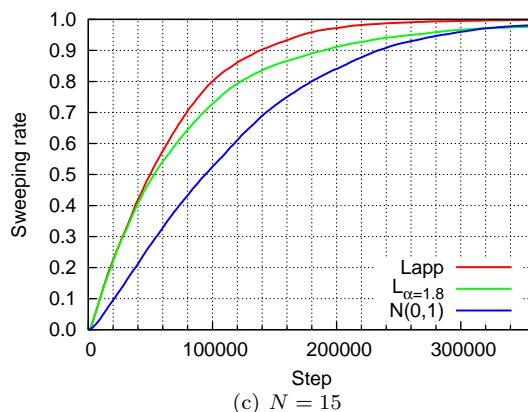
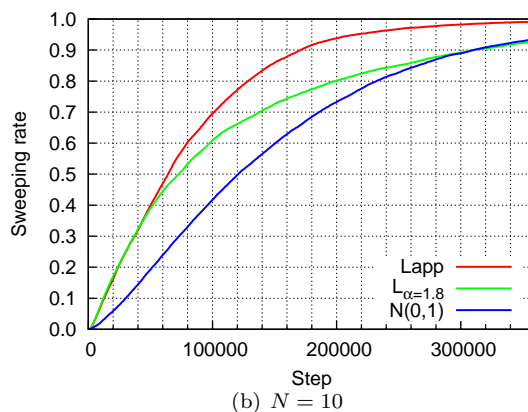
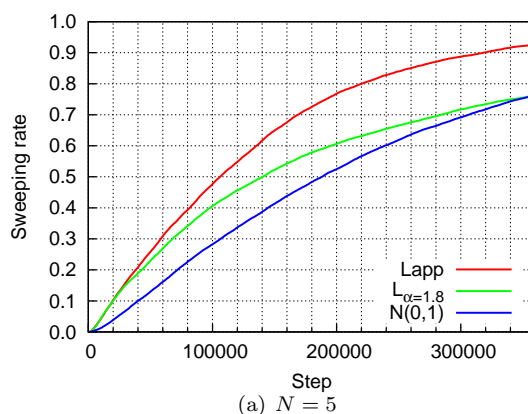


Fig. 7: Average sweeping rate for each time step with  $R = 1.0$  for each probability distribution

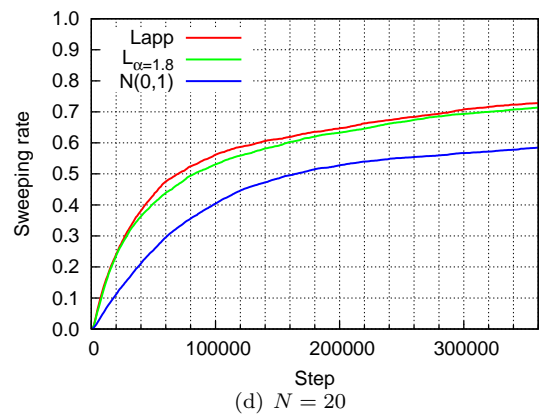
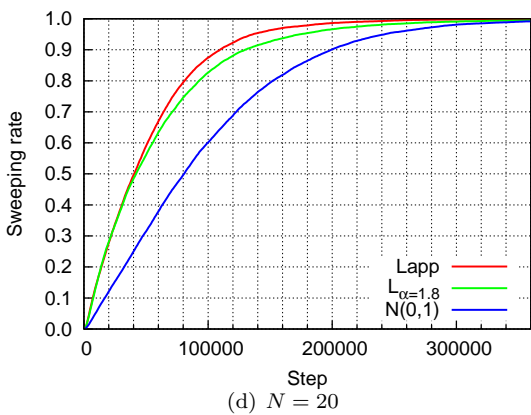
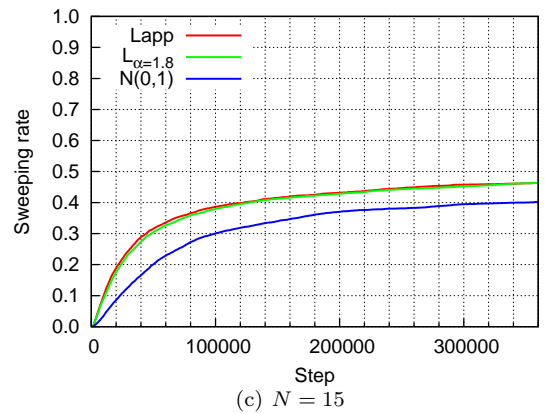
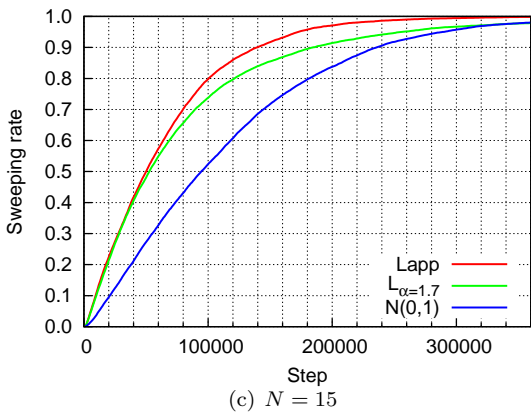
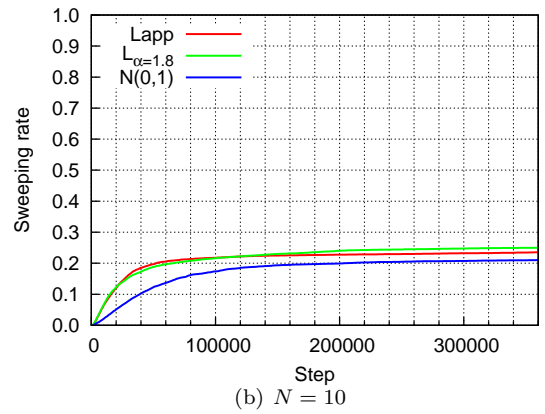
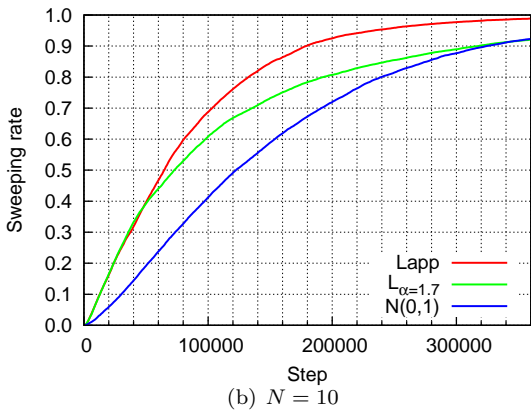
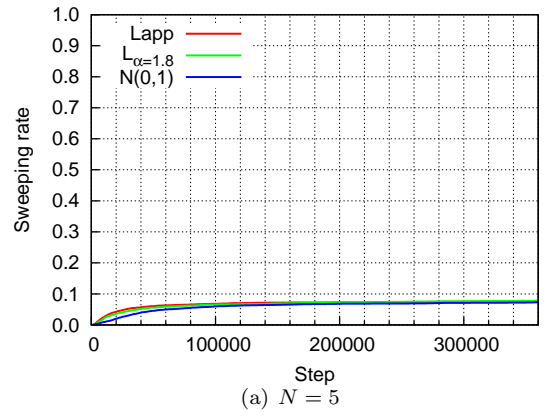
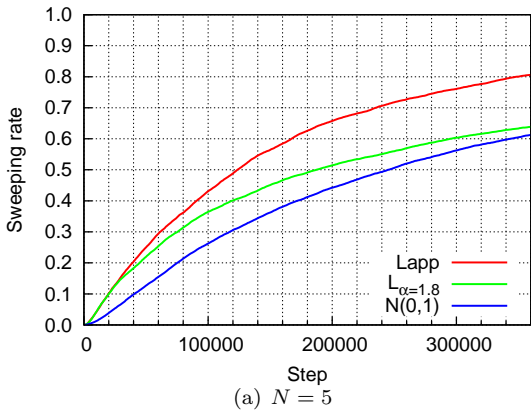


Fig. 8: Average sweeping rate for each time step with  $R = 0.5$  for each probability distribution

Fig. 9: Average sweeping rate for each time step with  $R = 0.2$  for each probability distribution