

Nomadic Lévy Walk and Its Applications
Nomadic Lévy Walk とその応用に関する研究

by

Koichiro Sugihara
杉原功一郎

A Doctor Thesis
博士論文

Submitted to
the Graduate School of Frontier Informatics,
Kyoto Sangyo University
on February 18, 2022
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Informatics

Thesis Supervisor: Naohiro Hayashibara 林原尚浩
Associate Professor of Information Science

論文要旨

ランダムウォーク (Random Walk) は計算機科学分野においても重要なトピックとして注目されている。例えば P2P ネットワークの探索、ウィルスの拡散予測シミュレーション、人流解析、無線センサネットワークや遅延耐性ネットワークにおけるデータの収集やメッセージ配送を目的とした移動ノードのルーティングなどが挙げられる。特に、Lévy Walk は人間の狩猟行動や動物の採餌行動のモデルとされており、計算機科学分野のみならず物理学や生物学、医学などの分野においても応用されており注目されている。さらに、それぞれの用途に応じた様々なバリエーションが存在し、その中の一つに Homesick Lévy Walk がある。Homesick Lévy Walk は Lévy Walk の動作に加え、拠点という概念を導入して拠点へ一定の確率で回帰する行動を加えた行動モデルである。これによって人流解析における人と人との遭遇確率がべき乗則に従うという特性を持ち、より実際の状況に近い人流解析のシミュレーションが可能となった。一方で、拠点への回帰を行うことで移動ノードの行動範囲が制限され、本来 Lévy Walk が用いられてきた広範囲におけるブラインド探索の性能が大幅に低下することが報告されている。拠点への回帰行動は定期的にバッテリーを充電するような移動ノード (Electric Vehicle など) などにも応用することが出来るため有用であり、その場合、拠点回帰行動を残したまま Homesick Lévy Walk の広範囲探索性能を向上させることが必要である。本論文では、まず (i) Homesick Lévy Walk を拡張させた Nomadic Lévy Walk を提案し、Unit Disk Graph 上においてシミュレーションを行い、その特徴を明らかにしている。また、(ii) その応用事例についてシミュレーションを行うことで有効性を実証している。Homesick Lévy Walk が拠点を固定しているが、Nomadic Lévy Walk は拠点を与えられた確率に基づいて移動させることによって移動ノードの広範囲の探索性能を向上させている。また、次回の拠点候補の決定に「拠点再配置戦略」を導入し、その戦略に基づいて拠点を移動させるという特徴がある。(i) においては、Nomadic Lévy Walk の拠点再配置戦略ごとのグラフの被覆割合 (カバー率) などの基本性能に関する結果を示している。また、Lévy Walk, Homesick Lévy Walk とともに Nomadic Lévy Walk の比較を行い、これらの動作モデルに起因する違いについて考察している。(ii) においては、無線センサネットワークにおける移動ノードによるデータ収集や遅延耐性ネットワークにおけるメッセージフェリーを用いたメッセージ配送において、それぞれ移動ノードやメッセージフェリーのルーティング手法としての有効性についてシミュレーションを行って実証している。

Acknowledgements

本論文は、筆者が京都産業大学大学院先端情報学研究科先端情報学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻准教授林原尚浩先生には指導教員として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。また、本学位論文審査の副査である同専攻教授秋山先生、荻原先生には草稿をご精読頂き論文の質向上に資するたくさんのコメントを頂いた。ここに感謝の意を表す。

Contents

1	序論	1
1.1	背景	1
2	関連研究	3
2.1	Lévy Walk	3
2.2	グラフ上の Lévy Walk	3
2.3	Homesick Lévy Walk	5
2.3.1	Unit Disk Graph 上での Homesick Lévy Walk	7
3	システムモデル	9
3.1	環境	9
3.1.1	ユニットディスクグラフ	9
3.2	移動ノード	10
4	問題点	11
5	Nomadic Lévy Walk	13
5.1	アルゴリズム	13
5.2	拠点再配置戦略	15
5.2.1	Lévy Walk Strategy (LWS)	15
5.2.2	Reverse Prevention Strategy (RPS)	15
5.2.3	Clustering Reverse Prevention Strategy (CRPS)	16
5.3	Unit Disk Graph 上での評価	17
5.3.1	シミュレーション環境	17
5.3.2	パラメータ	18
5.3.3	評価シナリオ	19
5.3.4	評価指標	19
5.3.5	グラフの直径による評価	20
5.3.6	拠点再配置戦略による評価	29
6	Nomadic Lévy Walk の応用	35
6.1	無線センサネットワーク上におけるメッセージフェリーの経路制御	35
6.1.1	概要	35
6.1.2	システムモデル	35
6.1.3	性能評価	36
6.1.4	まとめ	43
6.2	遅延耐性ネットワークにおけるメッセージフェリーの経路制御	43
6.2.1	概要	43
6.2.2	システムモデル	44
6.2.3	性能評価	45
6.2.4	性能評価	45
6.2.5	まとめ	59

7 議論	60
8 まとめ	63
References	65

Chapter 1

序論

1.1 背景

Lévy Walk は、ランダムウォークの一種であり、広大な空間での希少資源の探索を効率的に行う行動モデルとして注目されている。生物学分野ではアホウドリや海洋捕食動物（シャチなど）の採餌行動のモデルとして用いられており [24, 7]、医学分野では、T細胞の移動モデルとして用いられている [12]。計算機科学分野においても、ブラインド探索 [18] やすれちがい通信によるメッセージ拡散 [17]、人流解析のシミュレーション [15]、組合せ最適化問題の解空間の探索アルゴリズム [10] として用いられており、多くの分野において広く応用されている。さらに、用途に応じて様々な Lévy Walk のバリエーションが存在している [14, 12, 9]。

我々は、藤原と巳波によって提案された Homesick Lévy Walk (HLW) に着目している [9]。この研究によると、実験によって得られた人間の遭遇確率の分布はべき乗則に従うが、Lévy Walk に従って移動するノード（移動ノード）同士の遭遇確率がべき乗則とならないことに注目している。実際の人間の行動は家などの拠点を基に行われる。具体的には拠点から出発し、その周囲を移動した後、再び拠点へ回帰するというものである。この人間の行動を基に Lévy Walk に拠点という概念と与えられた確率に基づいて拠点へ回帰するという行動を追加したものが HLW である。HLW はシミュレーションの結果、移動ノード同士の遭遇確率がべき乗則に従うということが明らかになっており、人流解析などに応用することが出来る。

探索性能に注目すると、HLW で導入した拠点は位置が固定であるため、移動ノードはその周辺でしか移動することができない。そのため、本来 Lévy Walk の特徴とされている広範囲の効率的な探索能力が失われている。一方で、HLW で導入された拠点への回帰行動は様々な応用が考えられるため有用である。例えば、バッテリーで動作するような移動ノード（Electric Vehicle や Unmanned Aerial Vehicle など）を想定した場合、一定時間ごとに移動ノードのバッテリーを充電するために拠点へ回帰するなどの動作を行う必要があり、HLW の拠点回帰行動と一致する。従って、HLW の拠点回帰行動を有したまま移動ノードの行動範囲を拡大する方法が必要となる。

本論文では、HLW を改良した Nomadic Lévy Walk (NLW) を提案する。NLW は拠点を移動させることで移動ノードの行動範囲を拡大する。また、NLW は次の拠点を決定する際に「拠点再配置戦略」に基づいて拠点の変更を行う。この拠点再配置戦略は、様々な応用に応じて個別に与えることが出来るため、行動モデルとしては汎用性が高い。実際、拠点再配置戦略に応じて NLW に基づいて動作する移動ノードの行動範囲が決定するため、NLW の性能評価として拠点再配置戦略ごとの比較を行っている。

また本論文では、応用として大規模な遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Network) 環境でのメッセージフェリーを用いたメッセージ配送や無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) における移動ノードを用いたセンサデータの収集を想定している。いずれの環境も各ノード間の通信路が常に形

成されておらず、相互通信を行うためには移動ノード（メッセージフェリーなど）を介して通信を行う必要がある。そのため、本論文ではユークリッド平面上ではなく Unit Disk Graph 上で移動ノードが動作することを想定している。Unit Disk Graph $G = (V, E)$ はパラメータ r に基づいて形成される。 V は頂点 v で構成される集合であり、 E はノード間のエッジ e の集合である。具体的には、2つのノード $v_i, v_j \in V$ のユークリッド距離 $edist(v_i, v_j)$ が $2r$ 以下の場合、 $\{v_i, v_j\} \in E$ となる。移動ノードが移動出来るのはグラフ G のリンクのみであるため、 G のリンク密度を変更することによって移動ノードの移動自由度を変更することが出来る。Unit Disk Graph は道路網などのモデルとして用いられており、実際の応用を考えた場合、移動ノードが移動するのは道路などを想定するため、シミュレーション環境として Unit Disk Graph を仮定することは妥当であると考えられる。

DTN 環境下における WSN には、固定のルートを巡回するルーティング手法と動的に行き先を変更するルーティング手法が存在する。前者は全てのセンサやノードを網羅することが出来る一方で、走行する道路が何らかの理由により不通になるような場合に柔軟性が乏しい。後者の場合、全体のセンサやノードへの到達は確率的である一方で、走行路の状況に対して柔軟性が高い。NLW は後者であるが、大量のセンサノードの値をランダムサンプリングする場合などにも有効である。さらに、メッセージフェリーなどの移動ノードが継続的に行動するためのバッテリー充電などの資源補給を必要とする場合には、NLW の拠点回帰行動が有用である。この拠点回帰行動と NLW の拠点再配置戦略によって広範囲の移動を実現することによって、DTN や WSN におけるメッセージ配送やセンサデータの収集に対する有効性があることをシミュレーション結果によって実証する。

Chapter 2

関連研究

本章では, 連続空間における Lévy Walk, 連続空間における Homesick Lévy Walk, そして Unit Disk Graph 上での Lévy Walk, Unit Disk Graph 上での Homesick Lévy Walk について説明する.

2.1 Lévy Walk

Lévy Walk とは, ランダムウォークの一種であり, ランダムウォークに加え, 時おり長距離移動を行う. これによって広大な空間において希少な資源を効率的に探索する事が出来る. アホウドリや海洋捕食動物, 蟻等が餌を探す時のモデルとしても用いられている [24, 7].

具体的な動き方として, 3つの手順を踏む. まず1つ目の手順として, 移動する方向を決定する. この方向は $[0, 2\pi]$ の範囲から一様ランダムに決定される. 次に2つ目の手順として, 移動する距離を決定する. そして3つ目の手順として, 決定した方向と距離を元に移動する. この距離 (d とする) は, 次の Lévy 分布の式に従う.

$$p(d) \propto d^{-\lambda} \quad (2.1)$$

λ は, 0 以上の実数値を取る. この値が大きくなるほどランダムウォークに近づき, $3.0 < \lambda$ の時, ランダムウォークと同様の軌跡になる. また, $\lambda = 1.2$ の時に探索効率が最大になる事が報告されている [11].

2.2 グラフ上の Lévy Walk

Unit Disk Graph などの幾何学的特性をもつグラフ上での Lévy Walk は, 信貴ら [19] によって定義されている. 連続空間上の Lévy Walk と異なるのは, まず距離 d の定義である. グラフ上での距離の指定はノード間の距離のことを指す. したがって距離 d とはグラフ上の2ノード間のノード数-1 (つまりホップ数) を意味している. 一方, 移動方向 θ については $[0, 2\pi)$ から決定する.

次にノードの移動について見ると, 連続空間上の Lévy walk が無制限に移動出来ることに対して, グラフ上の Lévy walk は隣接ノードにしか移動できないという制約がある. 従って, 指定された方向に対して一直線に移動することはできない. 信貴らの提案 [19] には, 指定された方向に対し許容誤差 δ を導入し, 指定された方向に対して $\pm\delta$ の範囲内にあってかつ, 指定された方向に対して δ が最も小さくなるような辺に接続された隣接ノードへ移動する. これにより, 直感的には目標としている方向に対して逆走することなく移動が可能となる. 一方で, $\pm\delta$ の範囲内に隣接ノードが存在しない場合は移動が失敗する. 移動の失敗はグラフ上の Lévy walk のみに発生する事象である. Figure 2.4~2.7 は時間の経過 (シミュレーションステップ 50~500) と共に変化するユニットディスクグラフ上の Lévy walk の軌跡を示している.

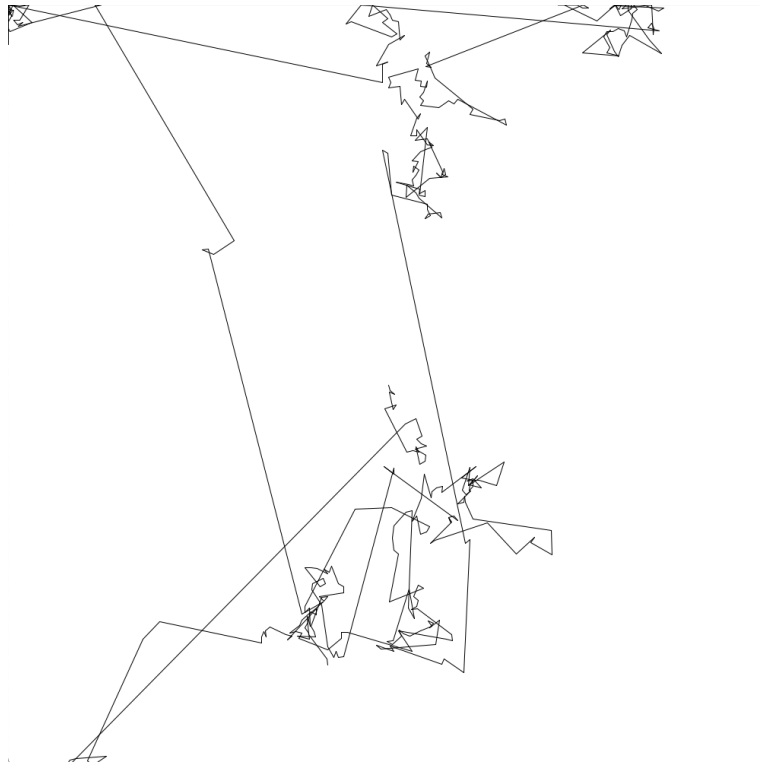


Figure 2.1: Lévy walk の軌跡 ($\lambda=1.2$)

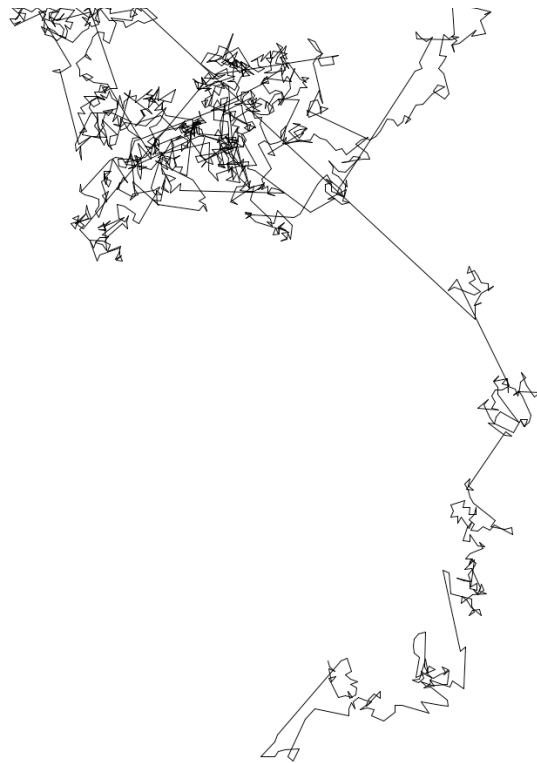


Figure 2.2: Lévy walk の軌跡 ($\lambda=2.0$)



Figure 2.3: Random walk の軌跡

これらを前提とした上で、以下の手順で移動ノードがグラフ上における Lévy walk を実行する。

1. 移動方向 o を一様ランダムに決定する。
2. 移動距離 d を Lévy 分布に従って決定する。
3. o に対して $\pm\delta$ の範囲内に隣接ノードの辺がある場合、その中で最も o に対する角度（誤差）が小さくなるような辺をもつ隣接ノードへ移動する。もし、 $\pm\delta$ の範囲内に隣接ノードの辺が存在しない場合は移動が失敗し、1. へ戻る。
4. 移動が成功した場合は $d - 1$ とし、 $d > 0$ の場合は 3. へ、 $d = 0$ の場合は 1. へ戻る。

グラフ上の Lévy walk のアルゴリズムの詳細は Algorithm 1 のとおりである。

Lévy walk はウォークの距離 (step length) d の分布がべき分布になるという特徴がある。Fig. 2.8 は Algorithm 1 をユニットディスクグラフ上実行した際の距離 d の分布を両対数プロットしたものである [18]。この結果によるとグラフ上の Lévy walk も平面上の Lévy walk と同様に距離 d の分布がべき分布となっているため、グラフ上で Lévy walk の特徴が再現できていると言える。距離 d が大きくなるとグラフが急激に下降しているのは移動するリンク先が許容誤差の範囲内がない場合に起こるウォークの失敗を示しており、グラフ固有の特徴であると言える。

2.3 Homesick Lévy Walk

Homesick Lévy Walk は、藤原らによって提案された、人間の行動をモデルにした Lévy Walk の一種である [9]。Lévy walk は人の行動のモデルとしても用いられているが、藤原らによる実験 [9] では、人との遭遇確率がべき分布に従うのに対して、Lévy walk はそのようにならないことが報告されている。

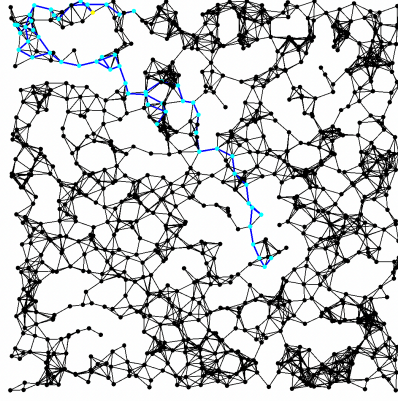


Figure 2.4: ユニットディスクグラフ上の Lévy walk の軌跡 (50 steps)

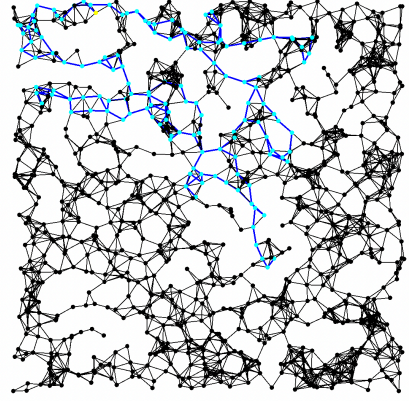


Figure 2.5: ユニットディスクグラフ上の Lévy walk の軌跡 (100 steps)

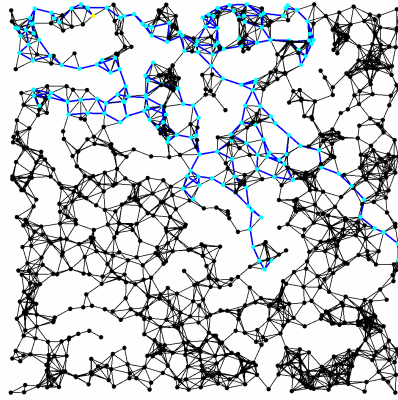


Figure 2.6: ユニットディスクグラフ上の Lévy walk の軌跡 (200 steps)

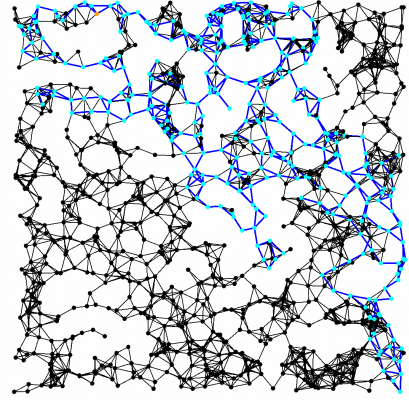


Figure 2.7: ユニットディスクグラフ上の Lévy walk の軌跡 (500 steps)

Algorithm 1 Unit Disk Graph 上での Lévy Walk が 1 ウォークする挙動

- 1: d はべき分布に従い決定される
 - 2: θ は $[0, 2\pi)$ の範囲から一様ランダムに決定される
 - 3: c は現在の移動ノードが存在しているノード
 - 4: N は近傍ノード
 - 5: $PN(c)$ は移動可能な近傍ノード
 - 6: **while** $d > 0$ **do**
 - 7: $PN(c) \leftarrow \{x \mid \text{abs}(\theta_{ox}) < \delta, x \in N(c)\}$
 - 8: **if** $PN(c) \neq \emptyset$ **then**
 - 9: $d \leftarrow d - 1$
 - 10: 移動先ノード $v \in PN(c)$ は v と c のなす角度 $\text{abs}(\theta_{ov})$ が最小となるよう決定される)
 - 11: $c \leftarrow v$
 - 12: **else**
 - 13: **break** { 移動可能なノードが存在しない場合
 - 14: **end if**
 - 15: **end while**
-

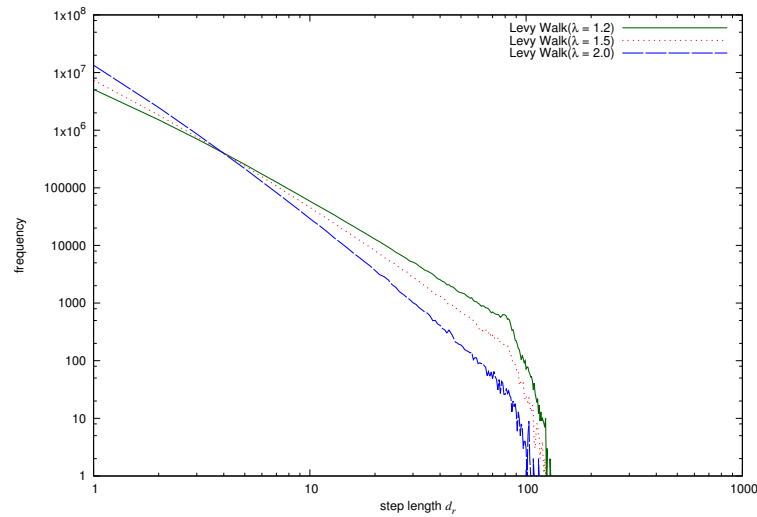


Figure 2.8: グラフ上の Lévy walk における距離 (step length) d とその頻度

この違いは、Lévy walk が周期的な行動モデルとなっていない一方で、一般的な人間の行動が家という拠点に基づき（家から職場などへの）周期的な行動を行う点にある。このような人間の周期的行動を、Lévy walk への拠点という概念の導入とその拠点への回帰行動という移動パターンの追加によって実現したのが Homesick Lévy Walk (HLW) である。

基本的な動作は Lévy Walk と同じであるが、まず拠点の位置を定めそこから移動を開始する。また、帰還確率 α というパラメータによって拠点へ向かって移動する。移動先を拠点に決定する際、Lévy Walk の手順に従い、移動する方向を現在地から拠点の方向へ決定し、拠点へ着くまで移動する。この帰還確率は $0 \leq \alpha \leq 1$ の範囲で与えられる。 $\alpha = 0$ の時、拠点に帰らないため Lévy Walk と同じになる。また、 $\alpha = 1$ の時、拠点からの出発と拠点への帰還を繰り返す。

2.3.1 Unit Disk Graph 上での Homesick Lévy Walk

Unit Disk Graph 上での Lévy Walk は、基本は Unit Disk Graph 上での Lévy Walk と同様に行われる。相違点として、拠点への帰還が挙げられる。 α によって拠点への帰還が決まった場合、移動方向を拠点の方向へと決定する。そして拠点へ到達するまでその方向への遷移を行う。もし、拠点へ移動するまでに遷移が行えなくなった場合は、その時点で拠点への帰還を止め、再び移動の再決定を行う。

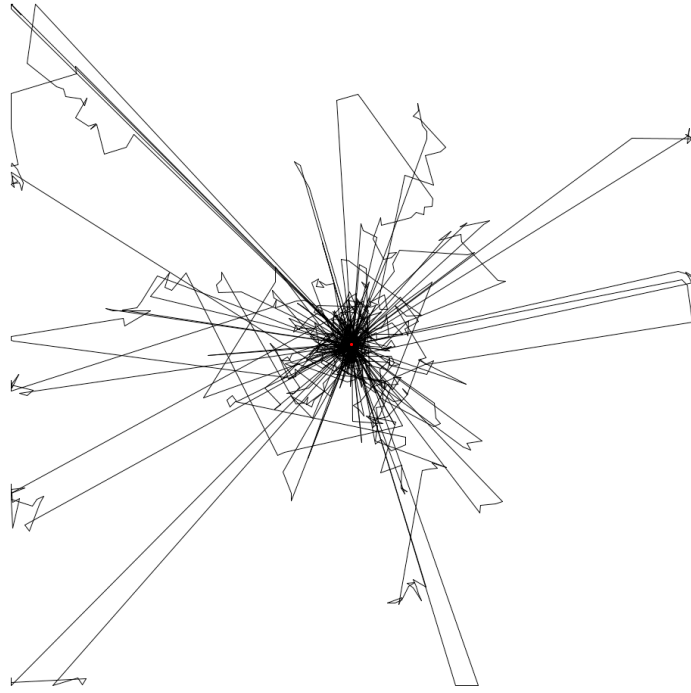


Figure 2.9: Homesick Lévy walk の軌跡 $\lambda = 1.2, \alpha = 0.2$

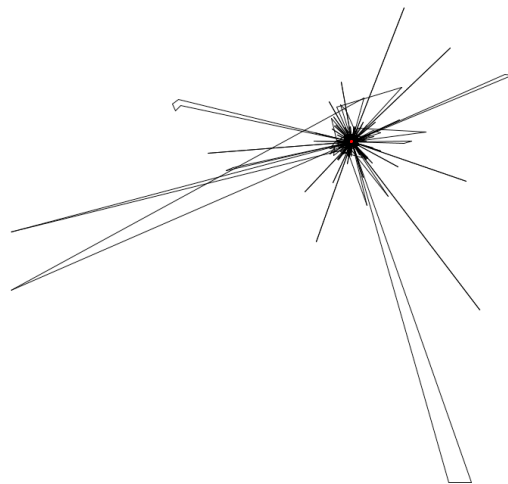


Figure 2.10: Homesick Lévy walk の軌跡 $\lambda = 1.2, \alpha = 0.8$

Chapter 3

システムモデル

本章では、本研究で仮定している事項や環境などについて述べる。

3.1 環境

本研究では、西田によって実装されたグラフ上の Lévy walk のシミュレータ [26] を使用してシミュレーションを行っている。このシミュレータではユニットディスクグラフを仮定してその上で Lévy walk を実行することが出来る。本節では、シミュレーション環境として仮定しているユニットディスクグラフについて説明する。

3.1.1 ユニットディスクグラフ

本研究では、幾何学的な特徴を有するグラフとしてユニットディスクグラフ (Unit Disk Graph) を用いる。Unit Disk Graph $G = (V, E)$ は、2次元平面上に配置されるノード群によって構成される。ノードには2次元平面上の座標が割り当てられており、ノード間の距離を計算出来るとする。これらのノード (静的ノード) はそれぞれ他のノードと接続出来る範囲 r を持っている。ある2つのノード間のユークリッド距離が $2r$ 未満であれば、この2つのノード間には辺が存在している。Unit Disk Graph はこのようにノード間のリンクの有無について幾何学的な制限があるため、リンクは必ずユークリッド距離が近いノード間に存在し、遠いノード間には存在しない。つまり、一般的なグラフに存在するような Jump Link ¹は存在しない。

例として、3.1 は $1000 * 1000$ の平面に $r = 35$ で 1000 個ノードを配置した図である。

Unit Disk Graph では、パラメータ r を大きくすることによってグラフ内のリンクの密度が上がり、小さくすることによりリンクの密度が下がる。リンクの密度が上がればグラフ上での移動の自由度は上がり、リンクの密度が下がれば移動はより制限される。つまり、リンクの密度は移動の自由度を決定する要素であり、 r はそれを決定するパラメータでもある。

本研究で用いる Unit Disk Graph のパラメータ $r = 35, 50$ と直径、平均次数の関係は Table 3.1 の通りである。ここで言う直径とはグラフに含まれる任意の2頂点間における最小パスの最大値である。

Table 3.1: ユニットディスクグラフのパラメータ r と直径、平均次数について

r	直径	平均次数
35	24	14.6
50	16	28.9

¹極端な例としてはグラフの端と端を繋ぐようなリンクが挙げられる。このようなリンクがあると隣接ノードとリンクに関する幾何学的な関係が存在しなくなるため、2.2 節で紹介したアルゴリズムは正しく動作しない。

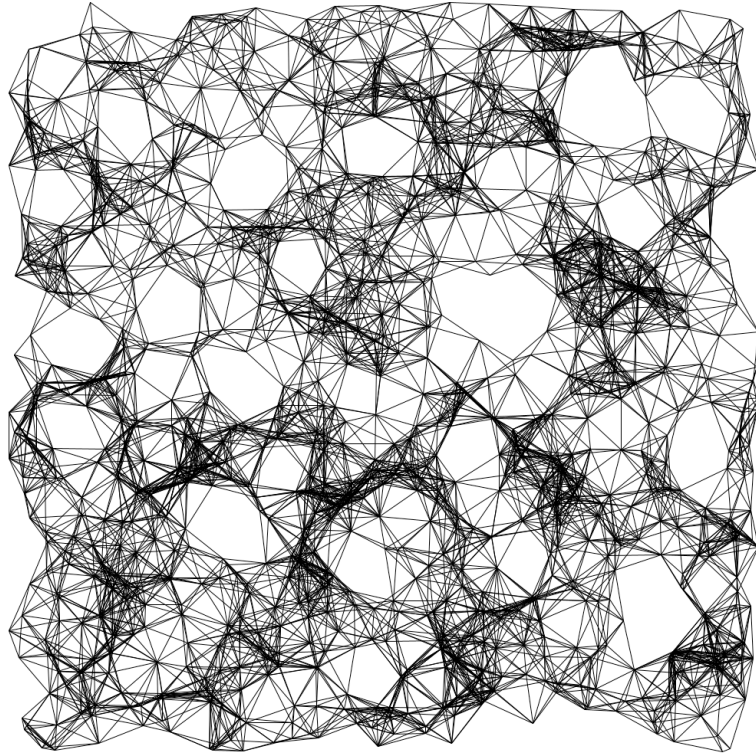


Figure 3.1: Unit Disk Graph

3.2 移動ノード

本研究ではグラフ上を移動するノード (移動ノード) を仮定している。この移動ノードは、5章では *Agent* と呼ばれ、グラフ上のリンクに従って静的ノード間を移動していくことが出来る。一方、6章では無線センサネットワークにおける移動ノードやDTNにおけるメッセージフェリーと呼ばれる。

この移動ノードはそれぞれ個別に情報を所持する事が可能である。メッセージやHomesick Lévy Walkでの拠点情報などである。そして、全ての移動ノードは、コンパスのようなものを所持しており、方向を知る事が出来る。また、現在のノードから近傍ノードの情報を得る事が出来る。更に、同じノードに複数の移動ノードが同時に存在している場合、移動ノード同士も通信を行う事が出来、その移動ノードから情報を得る事が出来る。本研究では、これらの移動ノードは全て同じ速度で動いているものとし、シミュレーション時間で1ターンに現在のノードから隣接ノードへ (1 step) 移動する。

移動ノード同士はBluetooth, UWB, IEEE802.11のアドホックモードなどによる近接通信によって通信することが出来ると仮定している。Unit Disk Graph上では、移動ノードがグラフ上の同一のノードにいるときに相互通信することが出来る。

Chapter 4

問題点

藤原らによって提案された Homesick Lévy Walk [9] は拠点を設定し、Agent は拠点回帰の動きを行う。これによって、人と人とが遭遇する確率がべき乗則に従うという人間の行動に近いモデルとなる。Homesick Lévy Walk は、この特性により様々なシミュレーションにおいて有用な行動モデルである一方で、拠点回帰行動によって広範囲を効率的に探索する Lévy Walk の特性を失っている。実際、我々の先行研究におけるシミュレーションで Unit Disk Graph 上での Homesick Lévy Walk は拠点回帰行動によってカバー率の上昇に制限がかかっていることが分かっている [22]~(Fig. 4.1 参照)。

拠点回帰行動自体は様々な応用が可能な概念であり、たとえば、バッテリー駆動車などのような限られた資源で動作する移動体などのルーティングに用いることが出来る。拠点を電源車、Agent をバッテリー駆動車とすると、バッテリー駆動車は定期的に拠点到回帰してバッテリーを充電するような行動モデルに Homesick Lévy Walk の拠点回帰行動は合致する。

実際、Electric Vehicle (EV) や Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を用いた災害救助や復旧活動などに関する研究や活動は行われている [27, 8, 23]。いずれも、動作を継続するにはバッテリーの充電は避けられない。また、災害復旧などを行うた

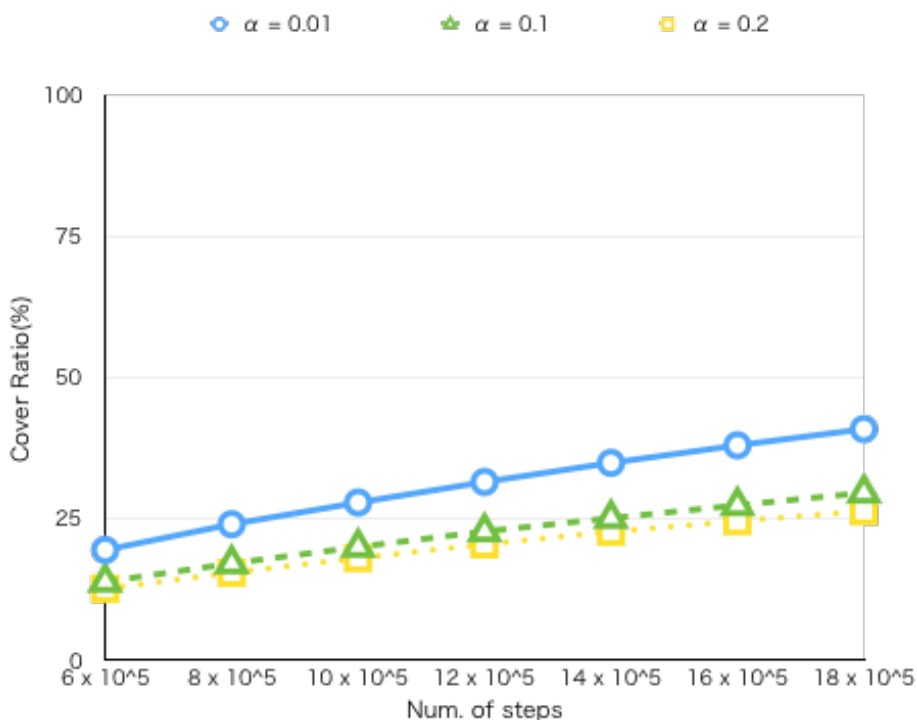


Figure 4.1: Unit Disk Graph 上の Homesick Lévy Walk のエリアカバー率

めには広範囲のエリアをカバーし、DTN のメッセージ配送や要救助者の搜索、被災した道路網などの探索などを行う必要がある。従って、広範囲に探索する能力を有する Homesick Lévy Walk は有用性があると考えられる。

ここで問題となるのは、Homesick Lévy Walk の拠点回帰行動を残したまま、Agent の行動範囲（つまりカバー率）を向上させる必要があることである。Unit Disk Graph 上では、Homesick Lévy Walk によって行動する一つの Agent は 8×10^5 ステップで全体の 25% 以下のエリアしかカバー出来ていないことが分かっている (Fig. 4.1 参照)。この原因のひとつとして考えられるのが拠点の位置が固定されていることである。この拠点の位置を移動させることで、Homesick Lévy Walk の拠点回帰行動を損なうことなく広範囲な探索が可能になると考えられる。また、充電が必要な移動体 (移動ノード) と電源車を用いた応用事例においても、このような行動モデルはそのまま適用出来るため有用性が高いと考えられる。

Chapter 5

Nomadic Lévy Walk

本章では、Homesick Lévy Walk (HLW) を拡張し、拠点の移動と拠点再配置戦略を導入した新たな Lévy Walk である Nomadic Lévy Walk (NLW) を提案する。

先行研究において、Unit Disk Graph 上での HLW の情報探索について計測を行った結果、Lévy Walk に比べて探索効率が落ちている事が判明している。しかし、拠点へと帰還する動作は、メッセージフェリー等の経路制御として利用する上では有用である。そのため、拠点へと帰還する動作を残したまま探索効率の向上を目指す必要があると考える。そこで我々は、HLW に拠点を移動させるという拡張を加え、拠点への回帰行動と効率的な探索の両立を図る。さらに、拠点位置の移動に対して特定の戦略 (方針) を与えることによって、より効率的な探索を行ったり、特定のアプリケーションへ適応出来るようにしている。つまり、HLW との違いは以下の2点である。

- 拠点遷移確率 γ により Homesick Lévy Walk における拠点が移動する
- 拠点を移動する際に戦略性を持って拠点を移動させる

HLW にこのような拡張を加えたランダムウォークを Nomadic Lévy Walk と定義する。拠点移動をするかしないかは、Agent が拠点へと帰ってきた時に確率 γ によって決定する。 $0 \leq \gamma < 1$ の値を取り、 $\gamma = 0$ の時、通常の HLW となる。拠点を移動する事に決定した場合、次の Agent の 1 ウォークの間、その Agent のウォーク終了位置が次の拠点の位置となる。もし、Lévy Walk での移動を行っていた場合、グラフ上では長距離移動の途中で d Step よりも少ない Step 数でウォークが終了する事もあるが、その場合でも終了位置に拠点を移動する。戦略が指定されていない場合は、後述する戦略による拠点移動を行わない場合は、この方針にしたがって拠点移動を行う。

図 5.1～図 5.2 は拠点移動が Lévy Walk に従う NLW の軌跡である。赤の点は現在の拠点位置であり、緑の点は過去の拠点位置をそれぞれ表している。

5.1 アルゴリズム

NLW のアルゴリズムの開始時には、各移動ノードは初期位置を自身の拠点位置に決定する。本研究では、各移動ノードが別々の拠点を保持する。各ウォークにおいて、Agent は、Step の長さ d を Lévy 分布に従って決定する。次にウォークの向き θ を一様ランダムに決定する。 $N(c)$ は近傍ノードの集合であり、 $PN(c)$ は Agent が移動可能な近傍ノードの集合である。Unit Disk Graph では、指定された方向への辺が存在するとは限らない。そこで、方向に対する許容誤差である δ を導入する。本論文では、 $\delta = \frac{\pi}{2}$ とする。これは Agent が方向 θ を中心として、 $\pm \frac{\pi}{2}$ の範囲内で移動するリンクを選択出来る事を意味している。また、HLW の拠点帰還の動きを継承するため、確率 α で、Agent は拠点に戻る。この場合、拠点位置への

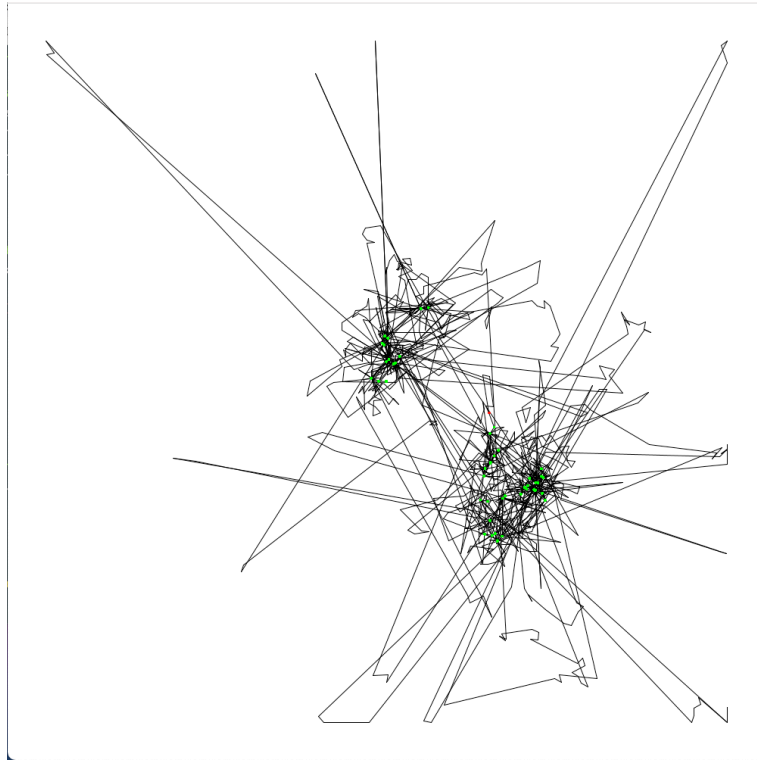


Figure 5.1: Nomadic Lévy walk の軌跡 $\lambda = 1.2, \alpha = 0.2, \gamma = 0.2$

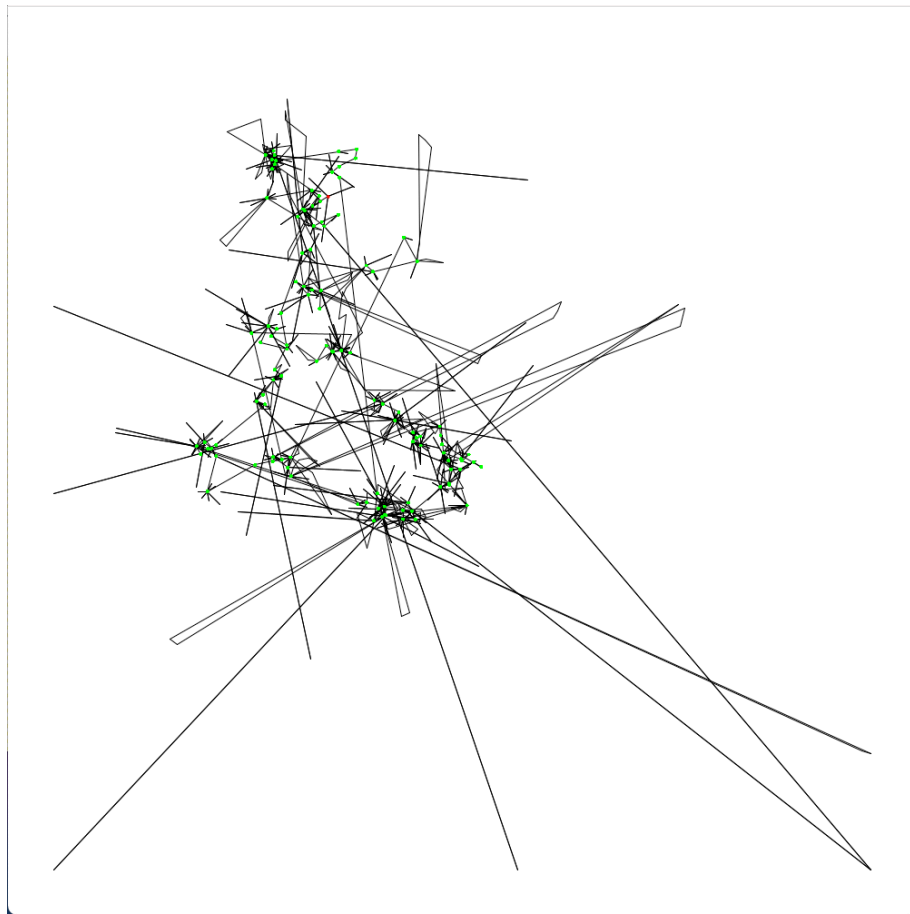


Figure 5.2: Nomadic Lévy walk の軌跡 $\lambda = 1.2, \alpha = 0.8, \gamma = 0.2$

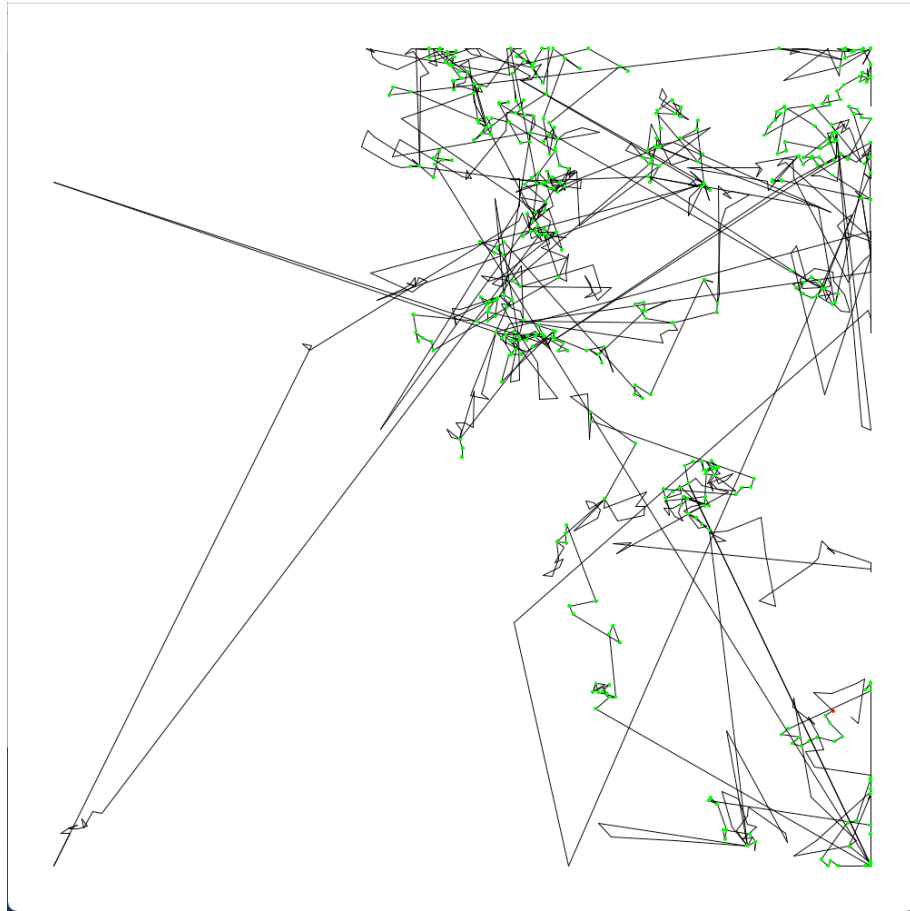


Figure 5.3: Nomadic Lévy walk の軌跡 $\lambda = 1.2, \alpha = 0.2, \gamma = 0.8$

向きを o とし，拠点までの距離を d とする．各 Agent は，拠点から移動を開始する時に，確率 γ で拠点の位置を変更する．

5.2 拠点再配置戦略

この章では，今回の実験において使う拠点移動戦略について説明する．各 Agent は，NLW の与えられた戦略に従って，その拠点位置を置き換える．グラフの広い範囲をカバーするためには，拠点位置が重要な要素の一つである事は明らかである．各 Agent は，過去に設置した拠点位置の履歴 H を管理している．この履歴は，一部の再配置戦略において計算に用いている．この我々は，NLW のためにいくつかの拠点再配置戦略を提案してきた．現時点では3つの再配置戦略を設定している．

5.2.1 Lévy Walk Strategy (LWS)

提案している拠点再配置戦略の中で一番基本的な戦略．拠点再配置を行う時，通常の Lévy Walk に従い方向と距離を決定し，1ウォークの到着地点に拠点を設定する．

5.2.2 Reverse Prevention Strategy (RPS)

この拠点再配置戦略では，過去拠点があった方向へ戻らないように次の拠点を決定する．Agent はそれぞれ過去に拠点を配置した座標を記憶し，現在の拠点位置から $o \pm \frac{\pi}{2}$ に方向を限定する事で後戻りを防止する．複数過去拠点を記憶している

Algorithm 2 Unit Disk Graph 上の Nomadic Lévy Walk

```
1:  $s \leftarrow$  Agent が記録している現在の拠点位置
2:  $c \leftarrow$  Agent の現在地
3:  $o \leftarrow 0$  {orientation for a walk.}
4:  $PN(c) \leftarrow$  the possible neighbors to move.
5: if  $s \neq c$  then
6:   if Probability:  $\alpha$  then
7:      $d \leftarrow$  the distance to  $s$ 
8:      $o \leftarrow$  the orientation of  $s$ 
9:   else
10:     $d$  is determined by the power-law distribution
11:     $o$  is randomly chosen from  $[0, 2\pi)$ 
12:   end if
13: else
14:    $d$  is determined by the power-law distribution
15:    $o$  is randomly chosen from  $[0, 2\pi)$ 
16:   if Probability:  $\gamma$  then
17:      $s \leftarrow c$  {update the position of the sink.}
18:   end if
19:   while  $d > 0$  do
20:      $PN(c) \leftarrow \{x | \text{abs}(\theta_{ox}) < \delta, x \in N(c)\}$ 
21:     if  $PN(c) \neq \emptyset$  then
22:        $d \leftarrow d - 1$ 
23:       move to  $v \in PN(c)$  where  $v$  has the minimum  $\text{abs}(\theta_{ov})$ 
24:        $c \leftarrow v$ 
25:     else
26:       break {no possible node to move.}
27:     end if
28:   end while
29: end if
```

場合は、それら全てと方向を計算し、最も多くの過去拠点と反対方向に移動出来る範囲から拠点を移動する方向を決定する。移動距離の決定は Lévy Walk に従う。

5.2.3 Clustering Reverse Prevention Strategy (CRPS)

CRPS は、RPS を元にした拠点再配置戦略になっている。RPS では、過去拠点との角度計算によって後戻りを防ぐため、過去拠点が増えるほど拠点位置が一部の方向に偏る。また、拠点の移動距離は LW に従うため λ の値によっては、大きな距離を拠点が移動しにくく、すでに探索を行った範囲を更に探索する事になる。これらの問題を解決するために、CRPS では、過去拠点の座標をクラスタリングし、拠点をすでに複数設置した場所、つまり探索を行った範囲を計算する。この戦略では、各拠点は、過去に拠点が位置した場所の座標を格納するために、サイズ $|H|$ の拠点位置の履歴の順序集合 Bhist を仮定する。そして、Bhist の各位置の反対方向を計算する。再配置の際に、拠点の位置がグラフの特定のエリアに偏ってしまう事がある。その結果、メッセージフェリーを用いてもカバー率を向上させる事が出来なかった。そこで、拠点の位置を検出するために、UPGMA(unweighted pair group method with arithmetic mean) クラスタリング法 [20] を用いる事にした。UPGMA 法は 2 つのクラスタに含まれるメンバーの平均距離に基づいた凝集型階層クラスタリング法である。pdist(A,B) は、2 つのクラスタ A と B の間の一

r	50	30
直径	16	29
平均次数	29.0	10.3

Table 5.1: パラメータ r と直径, 平均次数の関係

対の距離であり, 次のように計算する.

$$pdist(A, B) = \frac{1}{|A| \cdot |B|} \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} d(a, b) \quad (5.1)$$

$d(a, b)$ は要素 a と b の間の距離である. 各 Step では, $pdist(A, B)$ が最小値になるように, クラスタ A が別のクラスタ B をマージする. 最終的には, すべての要素が一つのクラスタになり, マージプロセスはバイナリツリーとして表現する事が出来る.

$pdist(\{x\}, \{y\})$ は, 式 5.1 で求められる. なお, 距離 $d(x, y)$ はユークリッド距離である. そして, $pdist(\{x\}, \{y\})$ が最小値であり, かつ, $pdist(\{x\}, \{y\}) \leq T$ であれば, 2つのクラスタ $\{x\}, \{y\}$ を1つにマージする. T には偏りがあるとであると判断するための距離を指定する. このマージのフェイズは, マージする候補が無くなるまで繰り返される. その結果, 拠点は最大のクラスタの大きさが $[\frac{H}{2}]$ よりも有意であれば, 過去の拠点位置が偏っていると判断する. 拠点位置の偏りが検出された場合は, 次の拠点 s は $C \subseteq H$ を最大のクラスタとした場合, 以下の条件で再配置される.

$$pdist(C, \{s\}) > T$$

5.3 Unit Disk Graph 上での評価

本節では, Unit Disk Graph 上における Nomadic Lévy Walk の性能評価について述べる.

5.3.1 シミュレーション環境

Unit Disk Graph 上の NLW のシミュレーションは西田によって実装された Unit Disk Graph 上の Lévy Walk シミュレータ [26] を用いて行う. このシミュレータは C++ で実装された離散事象型シミュレータで, 1つのシミュレーション時間 (Step) で全ての Agent が隣接ノードへの移動を行う.

シミュレーションの環境としては 1000×1000 のサイズのフィールドに 1000 ノードの Unit Disk Graph を構成する. 各ノードはフィールド上に一様ランダムに配置され, パラメータ r に基づいてリンクが構成される.

Agent は Unit Disk Graph のリンクやノードを通して移動するため, リンクの密度が大きくなると Agent の移動の自由度が上がる. 逆にリンクの密度が下がると移動する経路が制限されるため, 任意の地点への移動が困難になる. Unit Disk Graph におけるリンクの密度については Unit Disk Graph のパラメータ r によって決定される.

Unit Disk Graph のパラメータ r

Unit Disk Graph $G = (V, E)$ の2つのノード $v_i, v_j \in V(G)$ の間のユークリッド距離 $edist(v_i, v_j) < 2r$ のとき, $\{v_i, v_j\} \in E(G)$ となる. このパラメータは, Unit Disk Graph の平均次数と直径に関係している. ここで言う次数とはノードに接続されたエッジ数の事である. Table 5.1 にパラメータ r と直径, 平均次数との関係を示す.

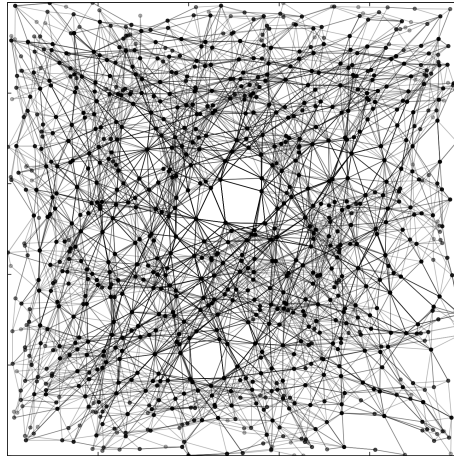


Figure 5.4: $r = 50$ の Unit Disk Graph

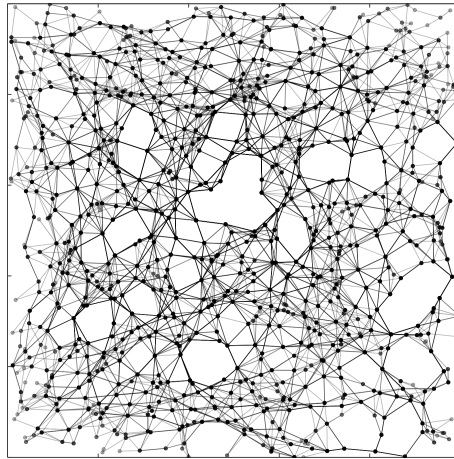


Figure 5.5: $r = 35$ の Unit Disk Graph

r を小さくすれば、一つのノードにつながる辺が少なくなり、自由度が低くなる。 r が大きくなれば、反対につながる辺が増え、自由度が増える。Fig. 5.4 は $r = 50$ のグラフであり、Fig. 5.5 は $r = 35$ のグラフである。

5.3.2 パラメータ

Agent 数 k

このパラメータは、グラフ上に配置される Agent の数である。 ($2 \leq k \leq 50$) Agent は指定されたアルゴリズムに基づいてグラフ上を移動する。本研究では、Homesick Lévy Walk または、Nomadic Lévy Walk に基づいて移動する。これらの Agent は、それぞれ別に拠点を持ち、初期値はそれぞれが配置された場所を拠点とする。

スケーリングパラメータ λ

スケーリングパラメータ λ は、LW のパラメータ λ の事である。今回の実験では、 $\lambda = 1.2$ で実験を行う。この値は、資源探索とターゲット探索において最も効率的な探索を行うパラメータと報告されている [11]。

許容誤差 δ

Unit Disk Graph では、必ずしも指定した方向に移動出来るノードが存在しないため、角度のズレを許容する。その値が許容誤差 δ であり、本論文では、 $\delta = \frac{\pi}{2}$ とする。

拠点帰還確率 α

拠点帰還確率 α は、Homesick Lévy Walk にて定義されていて、 α の値が大きくなるほど帰還頻度が高くなる。 $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$ を用いる。 Agent をメッセージフェリーとする場合、メッセージフェリーの行動可能時間によって帰還頻度を変更する必要があると考えられるため、複数の値で計測を行う。

拠点遷移確率 γ

拠点遷移確率は、 $\gamma \in \{0.2, 0.5, 0.8\}$ を用いる。これは、Nomadic Lévy Walk での拠点帰還時に拠点を移動するかを決定する確率である。

5.3.3 評価シナリオ

Nomadic Lévy Walk の評価については以下の2つのシナリオに基づいて行う。

1. Unit Disk Graph 上のブラインド探索
2. Unit Disk Graph 上のメッセージ拡散

1. のブラインド探索はひとつの Agent を Unit Disk Graph 上のランダムなノード (開始ノード) へ配置し、ターゲットとなるノード (ターゲットノード) を開始ノード以外からランダムに指定する。このとき、Agent はターゲットノードやグラフのサイズ、パラメータなどの情報を一切得ることが出来ないものとする。Agent がグラフ上を NLW に基づいて探索し、ターゲットのノードに到達した場合、シミュレーションが終了する。

2. のメッセージ拡散は、複数の Agent をランダムな開始ノードにそれぞれ配置し、その中のひとつの Agent にメッセージを配置する。その Agent が持つメッセージを全てのノードに拡散するまでのシミュレーションを行う。メッセージ送信は DTN における Store-Carry-Forward 方式で行われ、Agent 同士は近接通信によってメッセージ複製を行う。本シナリオでは、メッセージを持つ Agent が他の Agent と同じノードにいる場合にのみメッセージが複製される。各 Agent はメッセージを保存するストレージを持っており、このシナリオにおいてはストレージ内のメッセージは消失しないものとする。

5.3.4 評価指標

5.3.3 で述べたシナリオに基づいて行ったシミュレーションについて以下の指標で評価を行う。

グラフのカバー率 ひとつまたは複数の Agent によって訪問したノードの割合。 $V(G)_{visited}$ をすでに訪問済みのノードの集合とした場合、グラフのカバー率は $\frac{|V(G)_{visited}|}{|V(G)|}$ によって計算される。

ターゲットの探索効率 ブラインド探索シナリオにおける評価指標。ひとつの Agent がターゲットノードへ到達するまでのシミュレーション時間 (Step)。

メッセージ拡散効率 メッセージ拡散シナリオにおける評価指標。ひとつのメッセージが全てのノードに受信されるまでのシミュレーション時間 (Step)。

5.3.5 グラフの直径による評価

Unit Disk Graph では, communication radius r の値によってノード間の接続可能距離が変わる. r の値が大きくなるほど1つのノードに接続される辺の数が増えやすいため, 移動の自由度が上がる. 反対に r の値が小さくなるほど, 1つのノードに接続される辺の数が少なくなりやすいため, 移動の自由度が下がる.

グラフのカバー率

ここでは Clustering Reverse Prevention を拠点再配置戦略とする Nomadic Lévy Walk を用いた際の, グラフの直径によるカバー率への影響を評価する.

$\alpha=0.2, \gamma=\{0.2, 0.5, 0.8\}$, $r=35$ の時よりも $r=50$ の時, カバー率が向上している. 特に $\gamma=0.2$ の時, カバー率の r による差は最大7%ほどある. また $r=35$ と比較して $r=50$ の時, γ による差がわずかになる.

α の値が 0.8 の時, $\alpha=0.2$ と同様に $r=50$ の方がカバー率が高い. また, $\alpha=0.2$ では γ の影響は $r=35$ の場合に大きく出ているが, 反対に α の値が大きくなると $r=50$ の場合に γ の影響が大きく出ている. また α が 0.8, γ が 0.2 の時, γ が $\{0.5, 0.8\}$ の 2 パターンよりも r による影響を受けている.

図 5.6~5.13 は Unit Disk Graph 上で拠点再配置戦略に CRPS を用いた ($r = \{35, 50\}$, $\alpha = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$) 時のグラフのカバー率である.

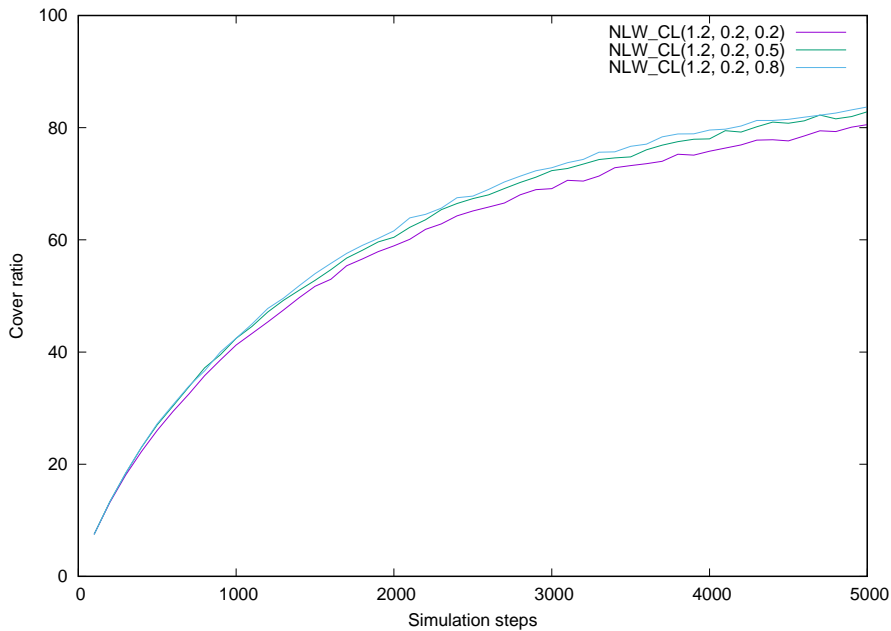


Figure 5.6: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

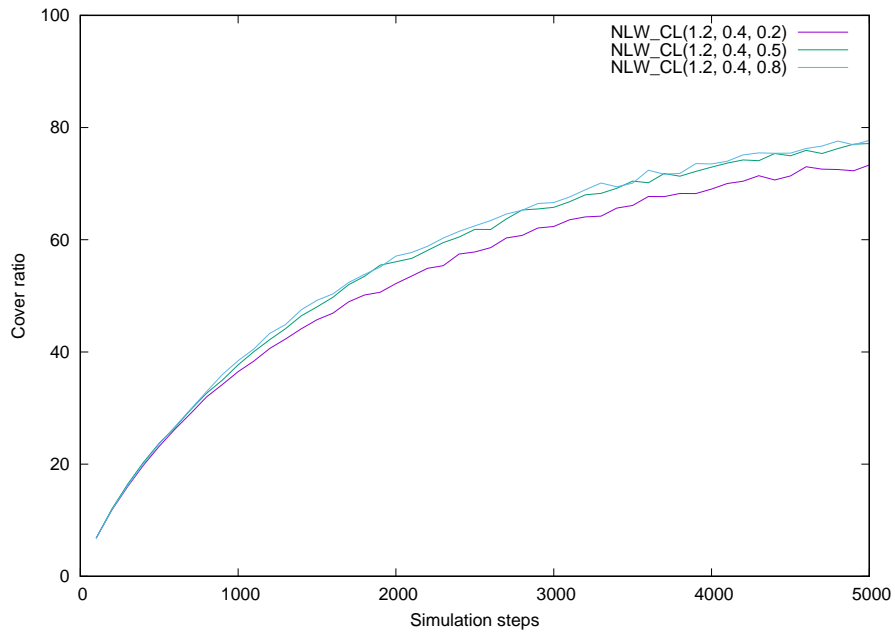


Figure 5.7: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

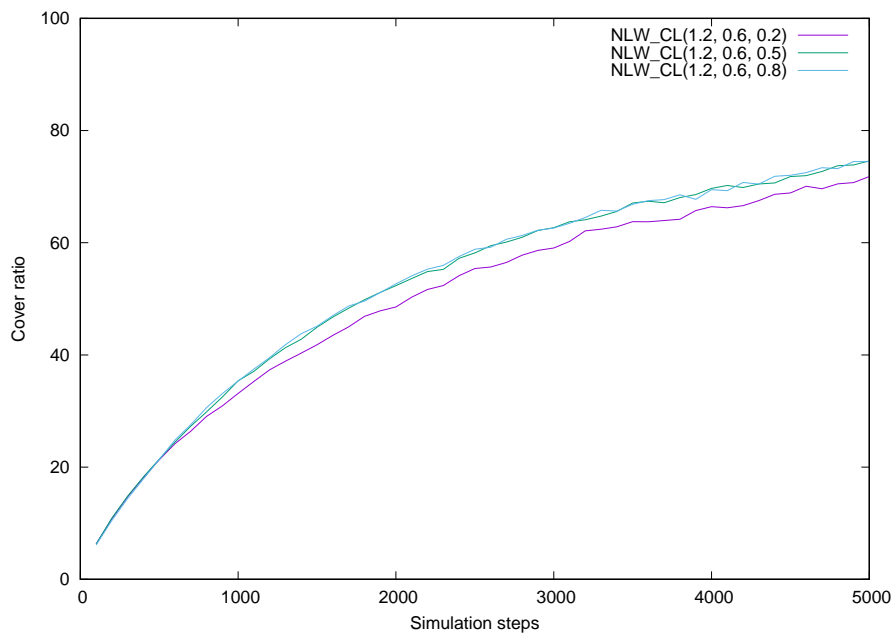


Figure 5.8: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.6$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

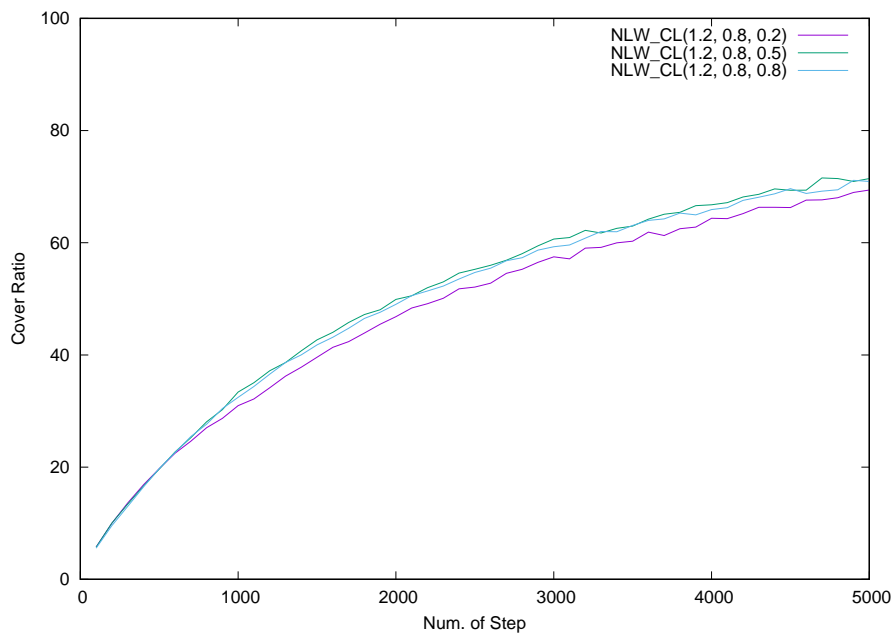


Figure 5.9: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.8$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

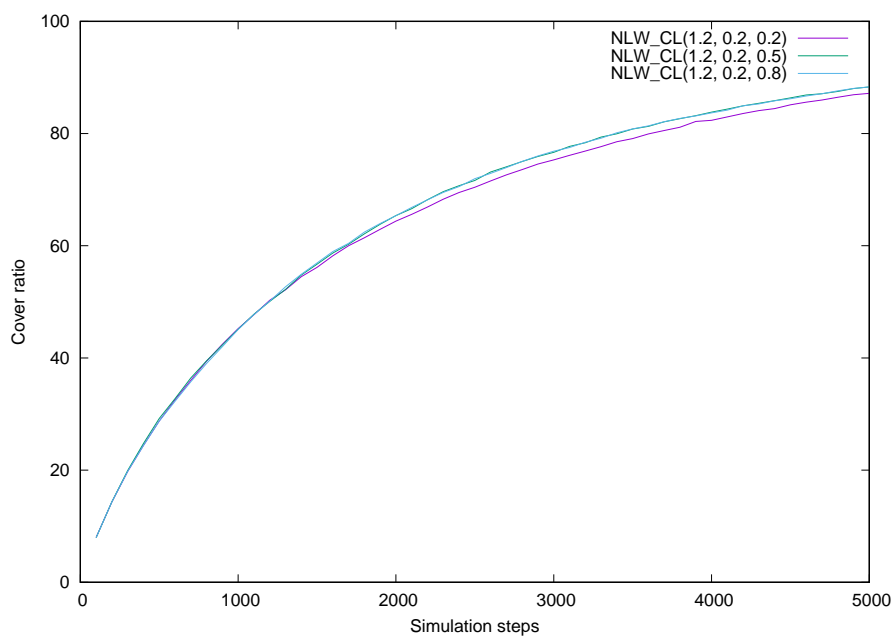


Figure 5.10: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

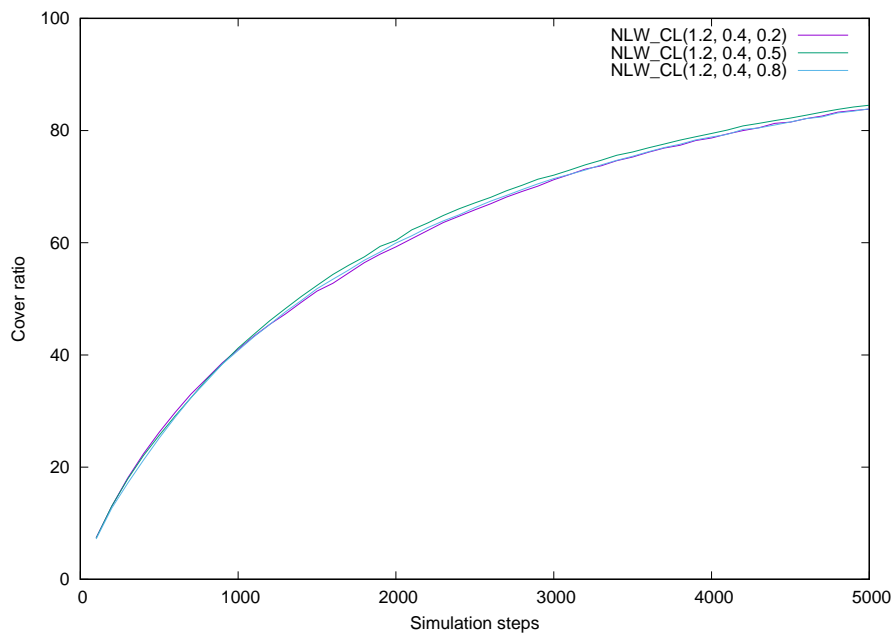


Figure 5.11: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

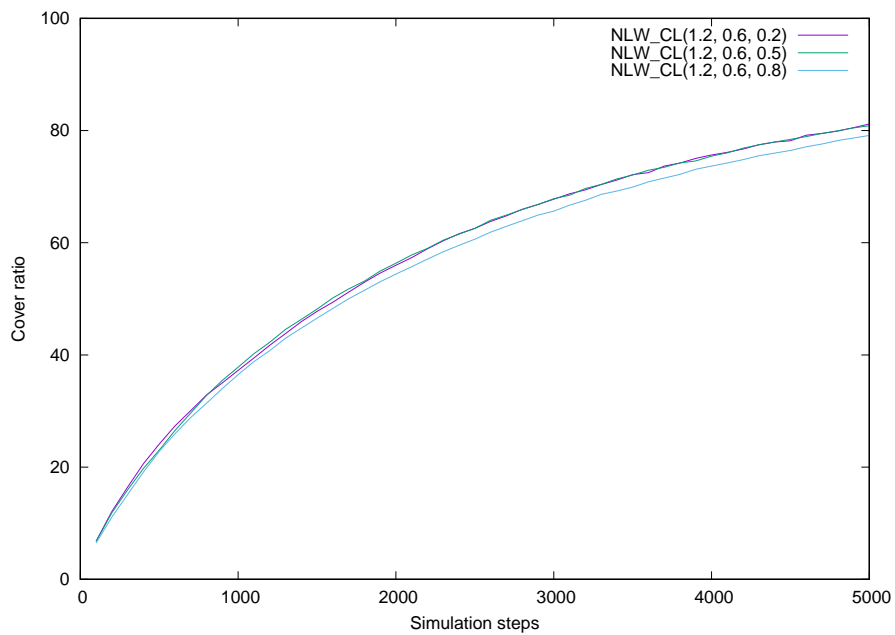


Figure 5.12: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.6$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

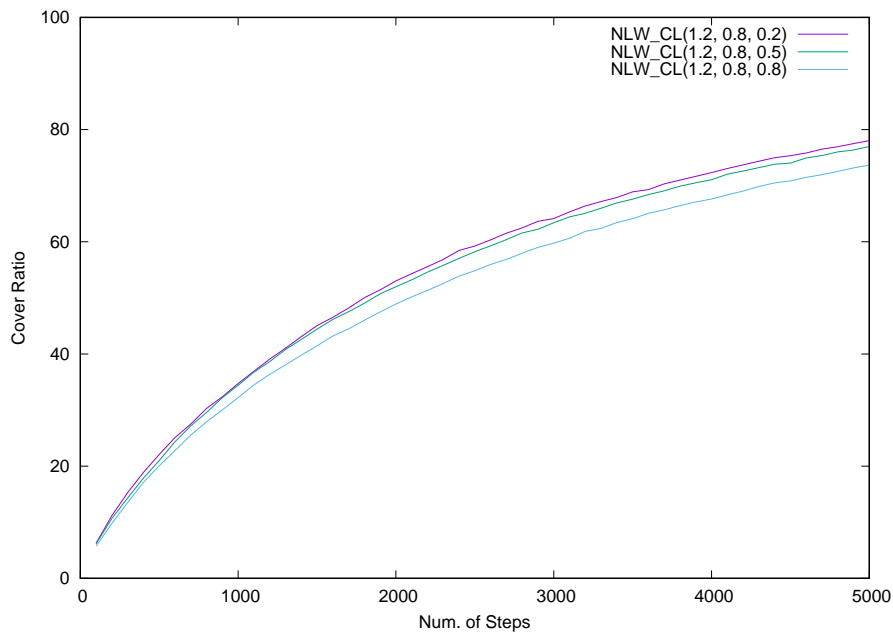


Figure 5.13: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.8$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

ターゲット探索効率

Unit Disk Graph 上に位置の重複が無いように配置された k 個の Agent がランダムに配置された 1 つのターゲット (希少な資源) を探索する. ターゲットと同じノードにいずれかの Agent が到達した時の Step 数を計測する. この節では, 特にグラフの直径による差を評価する. 図 5.14~5.17 は Unit Disk Graph 上で HLW と拠点再配置戦略に LWS を用いた ($r = \{35, 50\}$, $\alpha = \{0.4, 0.6\}$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$) 時のターゲット探索効率の比較である. 図 5.14 と図 5.16 を比較すると, 拠点再配置戦略に LWS を用いた NLW では, r による影響は確認できない. しかし, HLW に着目すると図 5.15 と図 5.17 では, エージェント数 = 5 の時で $r = 35$ の方が約 400step 多く掛かっている. これは同様のパラメータで $r = 50$ の方が $r = 35$ の時よりも性能の上昇率が良いと言える,

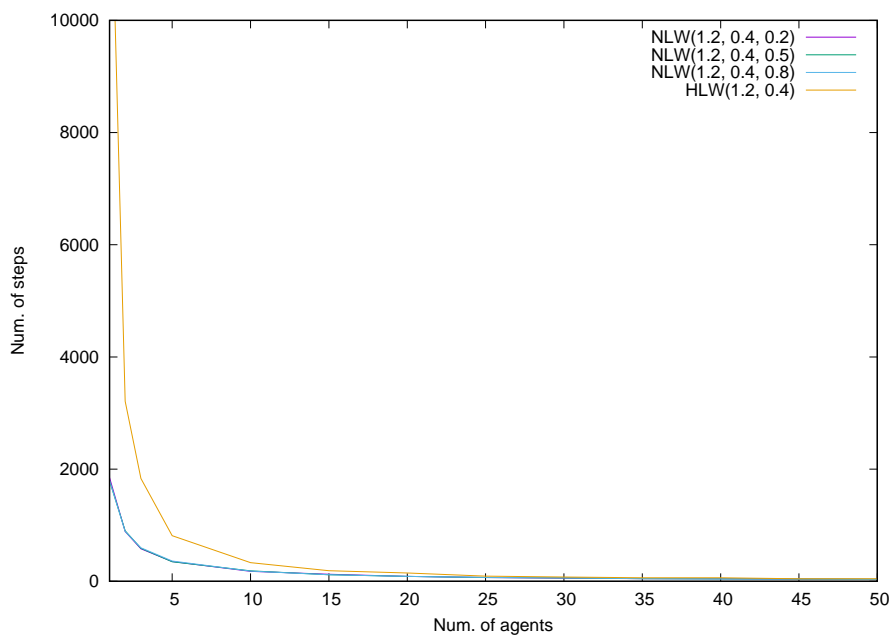


Figure 5.14: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 50$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

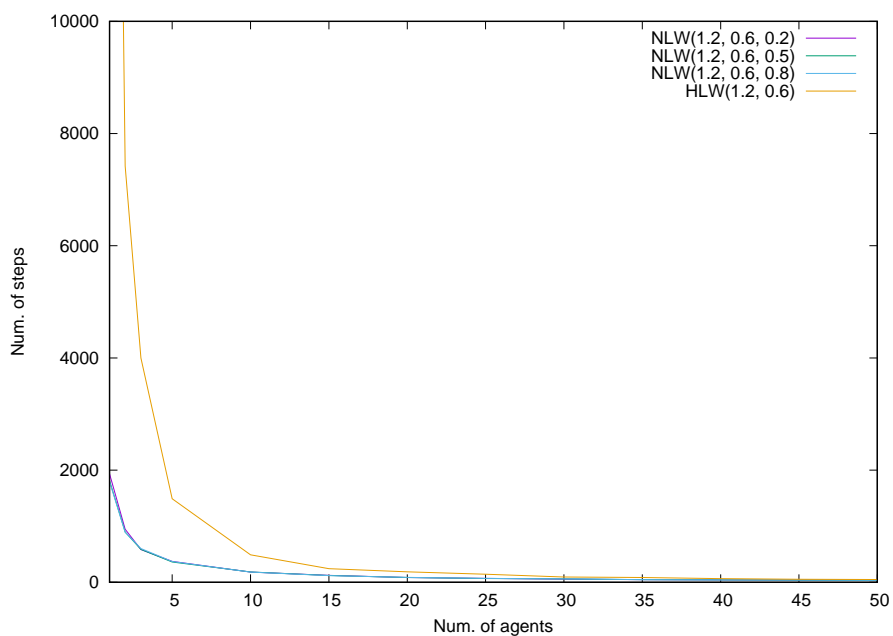


Figure 5.15: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 50$, $\alpha = 0.6$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

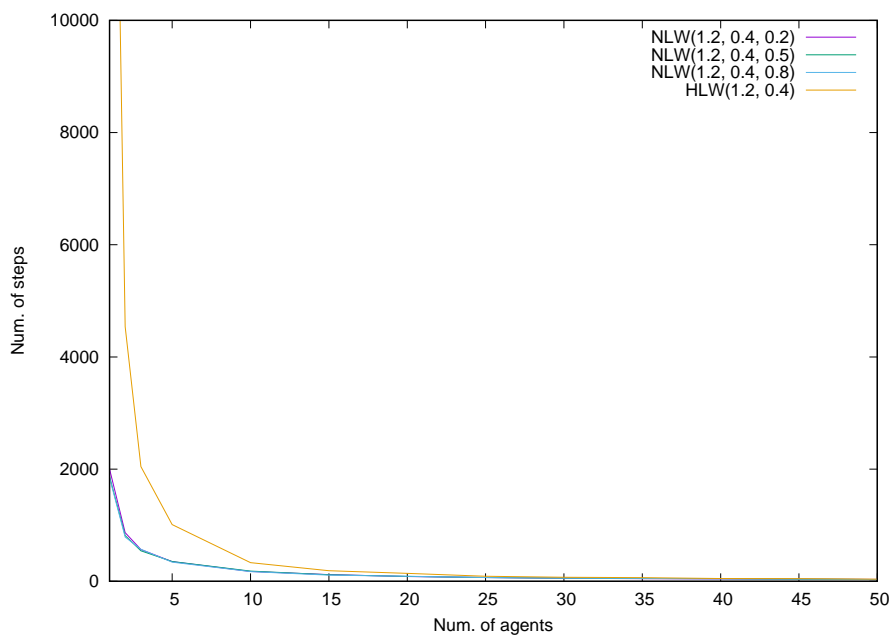


Figure 5.16: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 35$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

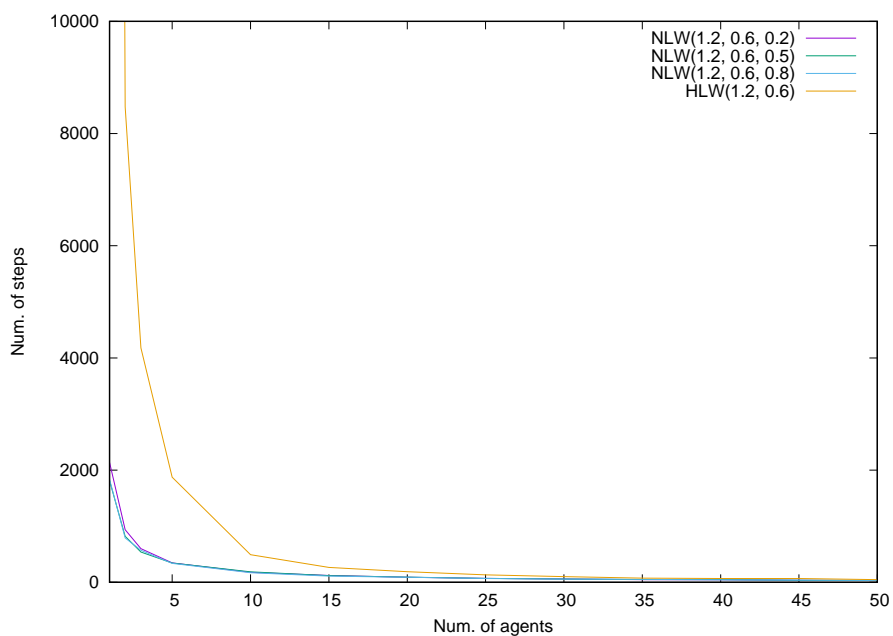


Figure 5.17: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 35$, $\alpha = 0.6$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

メッセージ拡散効率

グラフ上のノードに一様ランダムな確率で重複されないように k 個の Agent が配置される。その中の一つの Agent はメッセージを持っている。Agent はすべてのノードへメッセージを拡散させる。同じ座標にメッセージを持った Agent とメッセージを所持していない Agent が存在する場合、メッセージを持っていない Agent へメッセージが複製される。すべてのノードへメッセージが拡散された Step 数を計測する。

ここでは特に、 r による性能比較を行う。LWS と CRPS では、Agent 数が増えると r によるメッセージ拡散性能の差は小さくなる。RPS は特に Agent 数が少ない場合において、 r の影響を大きく受ける。

図 5.18~5.20 は Unit Disk Graph 上で拠点再配置戦略に LWS,RPS,CRPS をそれぞれ用いた ($r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$) 時のメッセージ拡散率である。

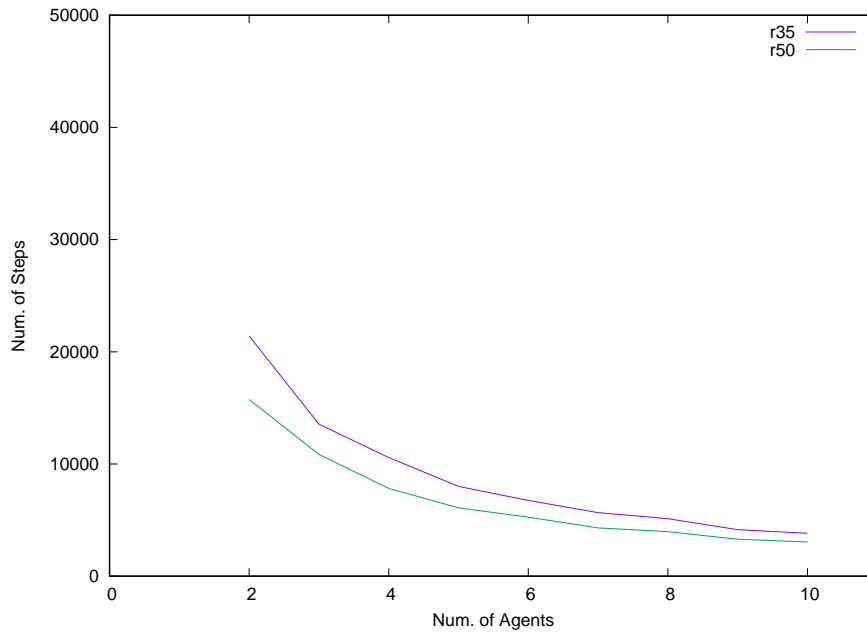


Figure 5.18: センサノードへのメッセージ拡散効率 (NLW with LWS) $r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$

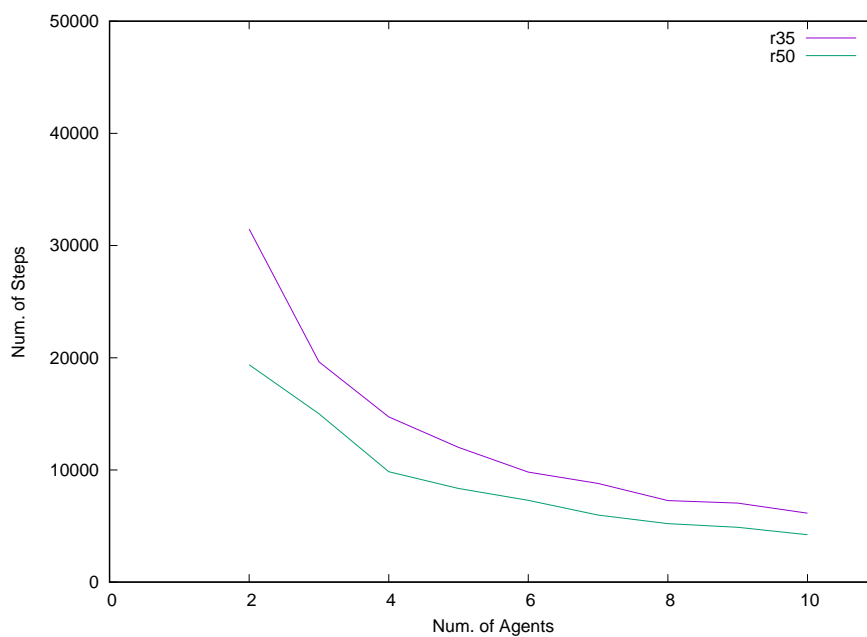


Figure 5.19: センサノードへのメッセージ拡散効率 (NLW with RPS) $r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$

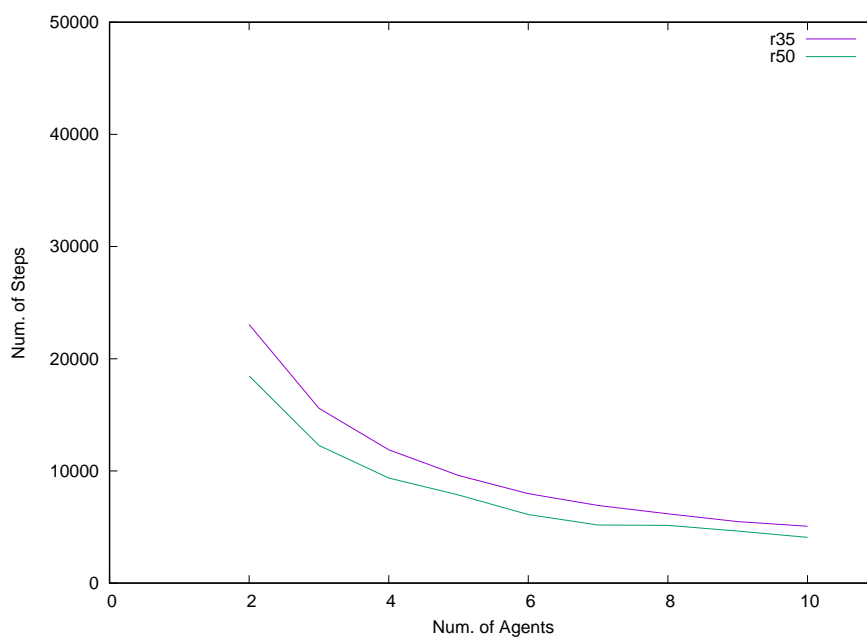


Figure 5.20: センサノードへのメッセージ拡散効率 (NLW with CRPS) $r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$

5.3.6 拠点再配置戦略による評価

ここでは、Nomadic Lévy Walk の拠点再配置戦略での基本性能の違いについて評価する。

グラフのカバー率

拠点再配置戦略ごとのグラフのカバー率を比較する。

図 5.21 ~ 図 5.23 は、 $r=50$ の Unit Disk Graph 上の NLW を有するメッセージフェリーのカバー率を示している。NLW_RP の線では、Reverse Prevention の結果を表している。RP 自体では、 $\gamma=\{0.2, 0.8\}$ を比較すると、 γ の値が小さい方がカバー率が高く、Step 数が増加するに従ってカバー率の差も増加する。この戦略では、過去拠点群から反対方向へ拠点を作っていくため、Graph の端に拠点を作りやすく、また、戻る事を防止しているため再び中央方向を探索する事が難しくなっている。結果として、拠点再配置確率が少なく、それぞれの拠点での探索が増える γ の小さい場合において、 γ が大きい場合よりもカバー率が高くなっている。NLW_BP の線では、Clustering Reverse Prevention Strategy の結果を表している。Reverse Prevention の結果とは反対に γ の値が大きい時にカバー率が増加している。Clustering Reverse Prevention Strategy では、Reverse Prevention Strategy を基本として動くが、過去拠点の数が増えると過去拠点座標のクラスタリングを行う。その状態で新しく拠点を作成する際、クラスタの範囲から外れるまで Lévy Walk を行ってから、新しい拠点位置を設定する。この行動によって Reverse Prevention Strategy の同じ方向に移動し続け、結果として同じような場所しか探索出来ない問題を解決している。そのため、両者を比較すると、 γ の値に関係なく CRPS の方がカバー率が大きくなっている。

また、図 5.21 ~ 図 5.23 より、 α が大きくなると CRPS での γ とカバー率の関係が逆になる。まず α の値が大きくなると拠点帰還頻度が増え、各拠点での探索範囲が少なくなるため、全ての拠点再配置戦略においてカバー率が低下している。特に CRPS の拠点遷移確率が高い場合にカバー率が低下しているのは、RP で作成した過去拠点群をクラスタリングした際、拠点帰還確率が大きくなっているためクラスタ内の拠点間を探索出来ていないためだと考えられる。

図 5.21~5.23 は Unit Disk Graph 上で拠点再配置戦略に CRPS と RPS を用いた ($r = 50, \alpha = \{0.2, 0.4, 0.6\}, \gamma = \{0.2, 0.8\}$) カバー率の比較である。

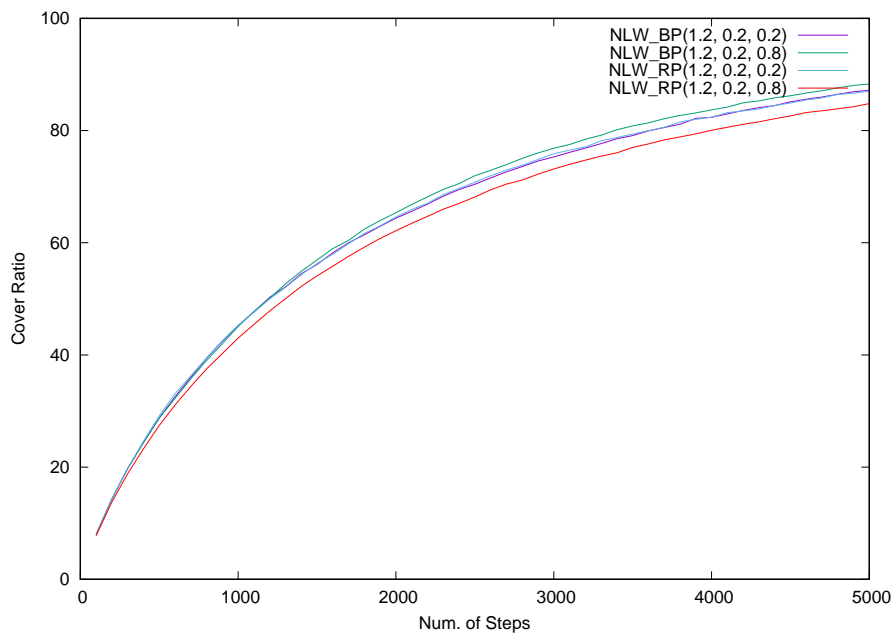


Figure 5.21: グラフのカバー率 (NLW with CRPS vs. RPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.8\}$

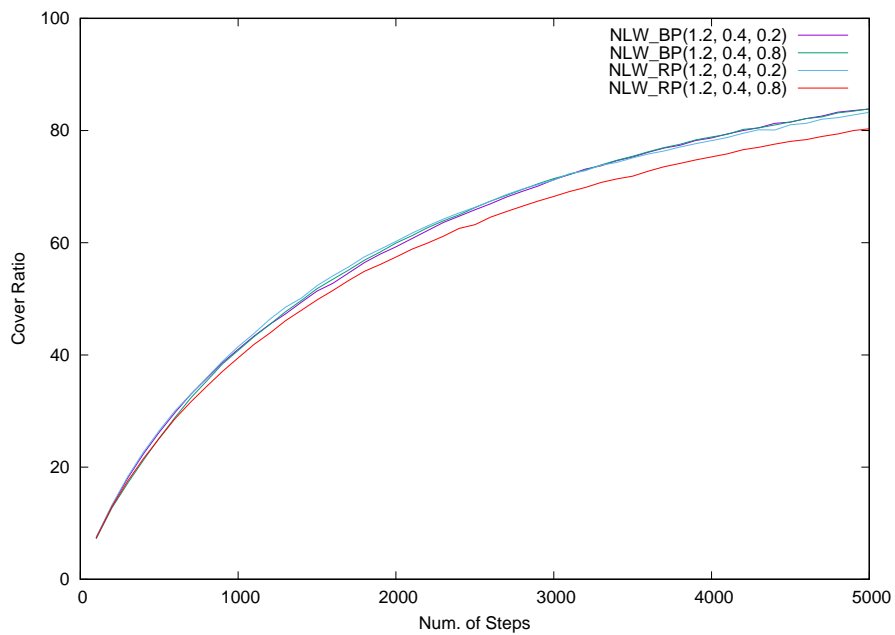


Figure 5.22: グラフのカバー率 (NLW with CRPS vs. RPS) $r = 50$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = \{0.2, 0.8\}$

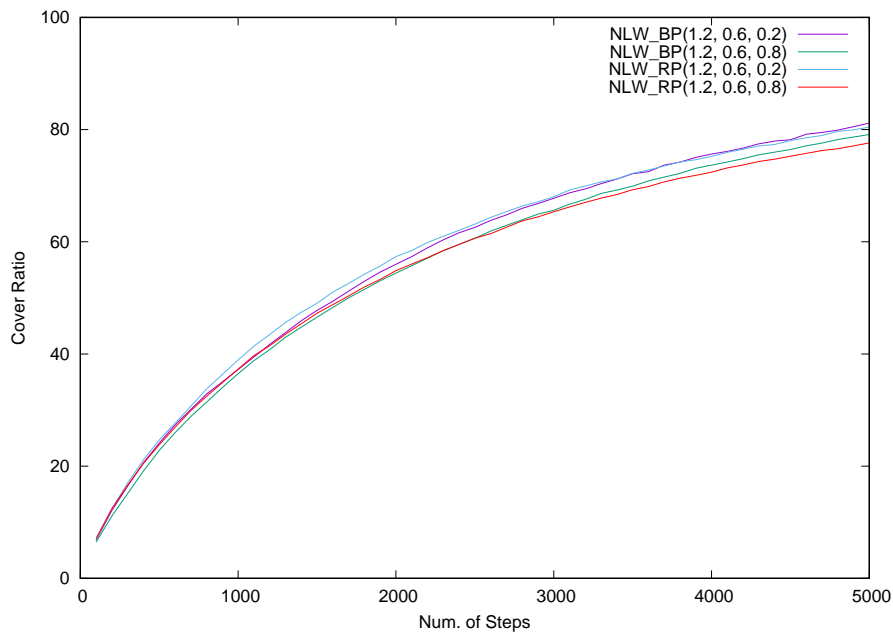


Figure 5.23: グラフのカバー率 (NLW with CRPS vs. RPS) $r = 50$, $\alpha = 0.6$, $\gamma = \{0.2, 0.8\}$

ターゲット探索効率

この節では、ターゲットの探索効率について拠点再配置戦略ありのNLWとHLWの間で比較を行い、拠点再配置戦略の有無やパラメータによる差を評価する。図5.24~5.27はUnit Disk Graph上でHLWと拠点再配置戦略にLWSを用いた($r = \{35, 50\}$, $\alpha = \{0.4, 0.6\}$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$)時のターゲット探索効率の比較である。図5.24~5.27から、Agentの数が少ない場合、 α の値、 r の値に関わらず拠点再配置戦略にLWSを用いたNLWの方がHLWよりも短いStep数でターゲット探索を終えている。図5.24より α の値が少ない時HLWとNLWの探索効率の差は小さくなる。またターゲット探索効率には、拠点再配置の確率は有意な差がなかった。

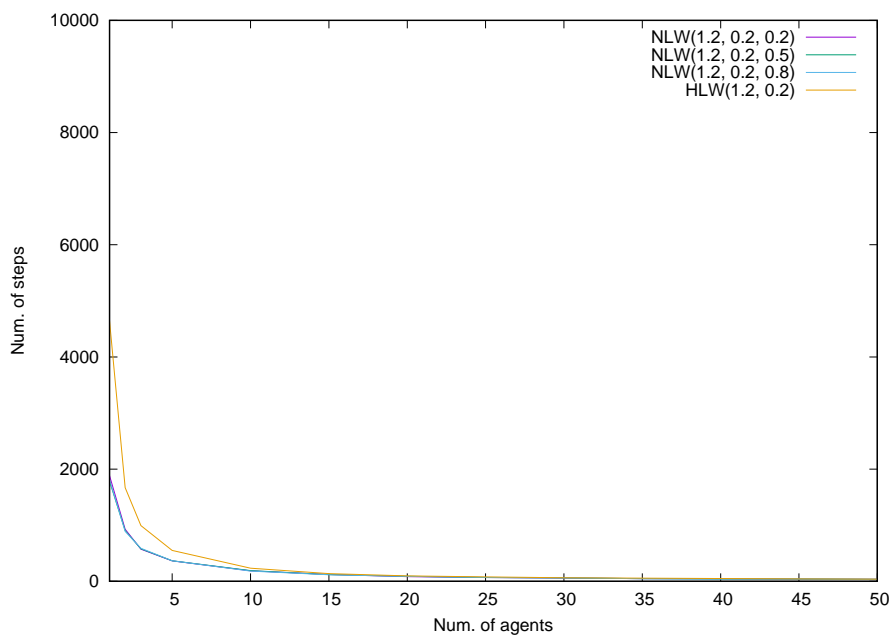


Figure 5.24: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

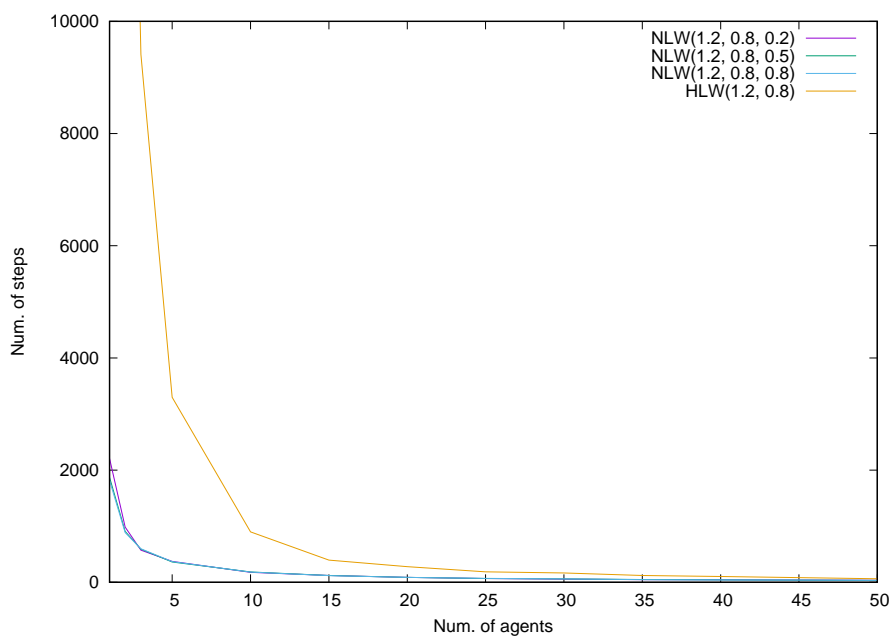


Figure 5.25: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 50$, $\alpha = 0.8$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

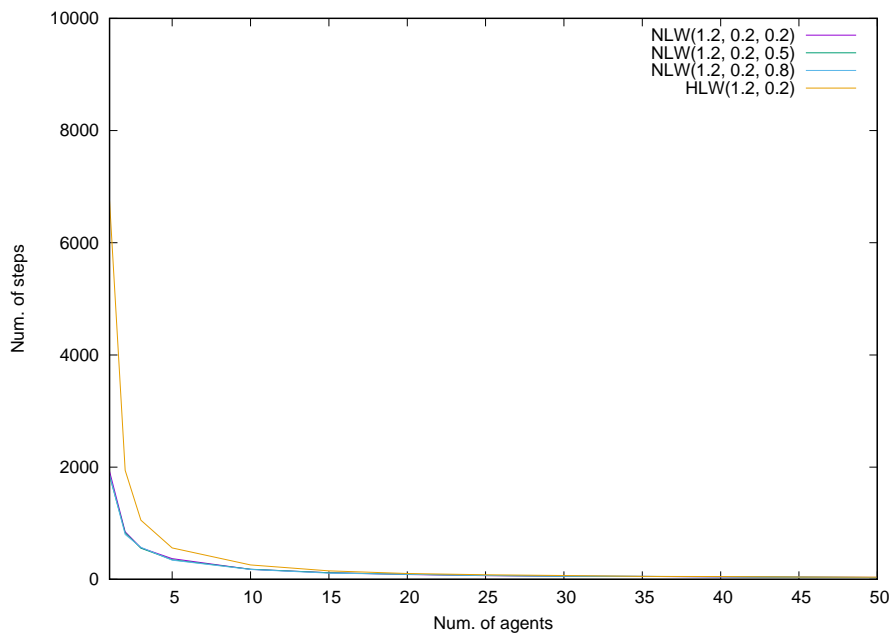


Figure 5.26: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

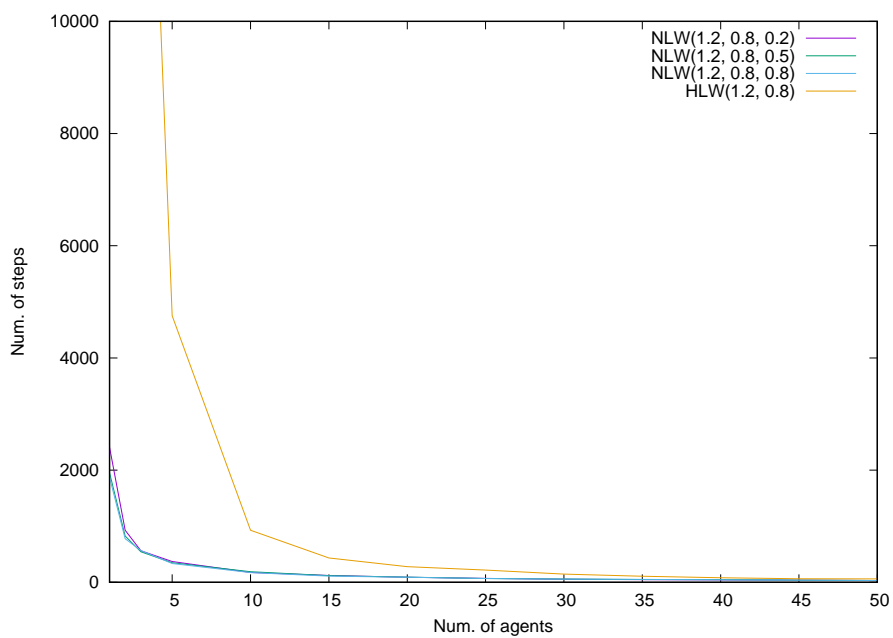


Figure 5.27: グラフ上のターゲット探索効率 (HLW vs. NLW with LWS) $r = 35$, $\alpha = 0.8$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

メッセージ拡散効率

r に関係なく LWS, CRPS は RPS よりも短い Step 数でメッセージ拡散が終わっている。また特に $r=35$ かつ Agent 数が少ない時 RPS は他の拠点再配置戦略に比べて約 10,000 Step 性能が悪い。

図 5.28~5.29 は Unit Disk Graph 上での NLW($r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$) のメッセージ拡散率の拠点再配置戦略 (LWS, RPS, CRPS) の比較である。

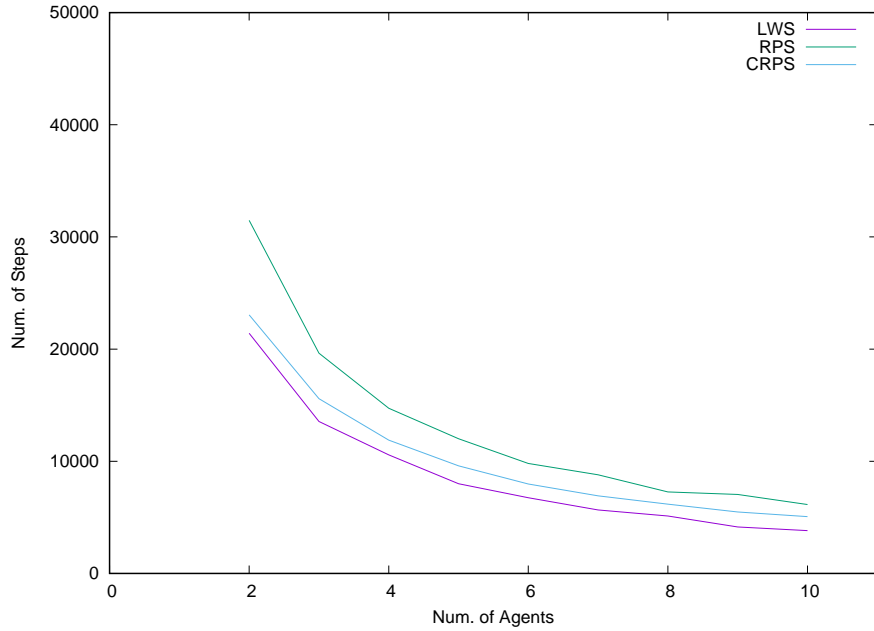


Figure 5.28: センサノードへのメッセージ拡散効率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$

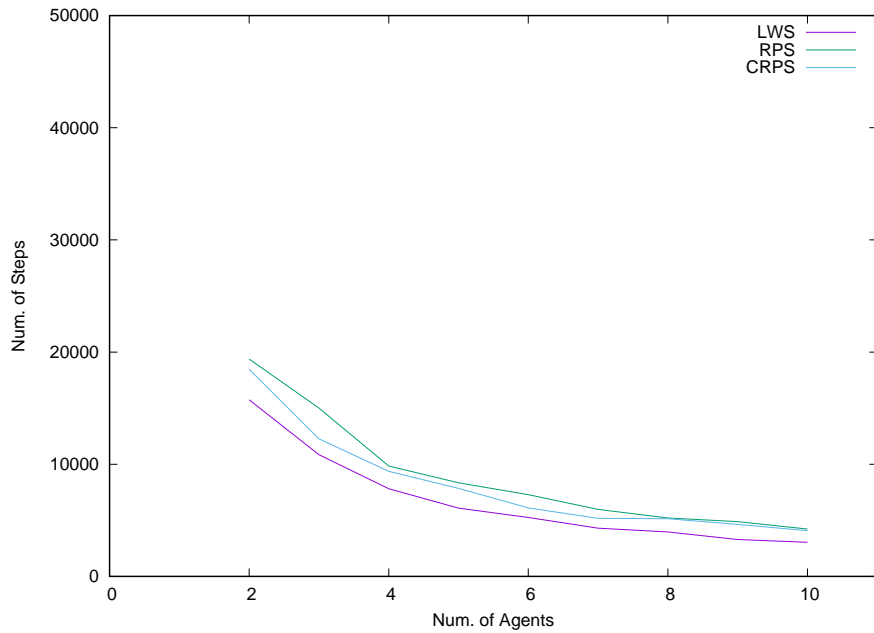


Figure 5.29: センサノードへのメッセージ拡散効率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$

Chapter 6

Nomadic Lévy Walkの応用

6.1 無線センサネットワーク上におけるメッセージフェリーの経路制御

6.1.1 概要

メッセージフェリーは、通信に遅延/中断耐性のある無線センサネットワークにおける通信手段である。メッセージフェリーは、断続的に接続される2つのノード間でメッセージを収集し、中継するためのものである。メッセージフェリーを用いたメッセージ配送の効率は、メッセージフェリーのルーティング手法に依存する。Lévy Walkの一種であるNomadic Lévy Walkは、メッセージフェリーのルーティング手法として有力な候補である。本研究では、Lévy Walkの一種であるNomadic Lévy Walkを用いて、Lévy Walkと同様の動作に加えて、拠点位置を戦略的に移動させる事を提案した。本章では、無線センサネットワーク上で数回のシミュレーションを行い、いくつかのルーティング方式を用いてメッセージフェリーのメッセージ配送率を測定した。また、Nomadic Lévy WalkとLW, HLWを比較する事によってNLWがメッセージフェリーのルーティング手法として適している事を評価した。その結果、Nomadic Lévy Walkがデータ収集やメッセージ配送に実用的である事が分かった。

6.1.2 システムモデル

ここでは、各センサノードがフィールド内に配置された無線センサネットワークを想定する。Unit Disk Graphはフィールド内にめぐらされる道路ネットワークのモデル化によく用いられる。各ノード間 $v \in V$ はユークリッド平面上に位置しており、これらのノード間の距離が $2r$ 以下である場合にのみ、2つのノード v_i と v_j の間に無向エッジ（リンク） $v_i, v_j \in E$ が存在する。 r は平面上のユークリッド距離である事に注意する。グラフ上の任意のノードのペアには経路があると仮定する（連結グラフ）。グラフ内のノードはセンサノードを表す。ここでは、移動体の移動をリンクで制限するフィールドを想定している。

また、センサノードからのメッセージやデータを収集し、目的地に転送するメッセージフェリーと呼ばれるモバイルエンティティ（端末）を想定する。この仮定は、既存研究[25, 16, 3, 4]と同様である。実際には、メッセージフェリーもモバイルエンティティも、Bluetooth, IEEE 802.11のアドホックモード, NFC (Near Field Communication), 赤外線伝達などの近距離通信機能を持っている。各メッセージフェリーは、シンクと呼ばれるホームポジションから移動を開始し、時々シンクポジションに戻る。

ここでは、メッセージフェリーは自律走行型の電気自動車であり、シンクは実際には電源車であると仮定する。そのため、メッセージフェリーは充電のためにシンクに戻る必要がある。

また、各ノードは、メッセージフェリーからアクセス可能な自分の位置（例えば、GPSによって得られた）を識別し、Walkに用いる方向を得るためのコンパス

のような機能を持っていると仮定する。各ノードは隣接ノードの集合を持っており、そのような情報（隣接ノードの位置）にもアクセス可能である。さらに、メッセージフェリーは環境に関する予備知識を持たない。

無線センサネットワーク

無線センサネットワークは一般的に、1つまたは複数のシンクと、物理的な空間に散在する数十から数千のセンサノードによって構成されている。センサノードは情報感知、計算、および無線通信が搭載され粗い情報を処理して、シンクに報告する。そして、次の要素を持つ [2].

- 独自のネットワークトポロジ
- 多様なアプリケーション
- 固有のトラフィック特性
- リソースの制約

特にリソースの制約によって、効率的な探索が必要となっていて、様々なルーティング方法が研究されている [1].

本研究では、特に DTN 環境での無線センサネットワークについて注目するため、センサ間は直接通信が行えず、センサ及びシンク間で通信の中継が必要だと想定する。

メッセージフェリー

メッセージフェリー (MF:Message Ferry) とは、直接通信が出来ないようなノード間を仲介する端末である。例えば、自動走行車やドローンのような物が考えられる。多くの場合これらは、移動に制限がかかっている場合が多いと考えられる。自動走行車であれば、道路や走行が可能な道となる場所しか通行出来ない。ドローンであれば、建物や法律によって飛行出来る空域が決まっている。また、燃料やバッテリーにより行動出来る時間には限りがある。そして、情報を伝達するためにメモリが積まれていて、容量には限りがある。

本論文では、メッセージフェリーの移動経路に NLW を用いると仮定し、シミュレーションを行う。

6.1.3 性能評価

カバー率

グラフのカバー率とは、グラフ内のノード全体に対して、メッセージフェリーがノードの何%に到達出来たかという事である。ここでは communication radius r の差によるカバー率の差について記述する。

図 6.1~ 図 6.3 は、 $r=50$ の Unit Disk Graph 上の NLW を有する MF のカバー率を示している。この結果から、拠点帰還確率 α と γ がカバー率に与える影響を確認する事が出来る。結果によると、 α を減少させると、MF は拠点に戻る事なく長時間フィールドを移動し続けるため、平均カバー率が向上する事が確認された。一方、 γ はカバー率にあまり影響を与えない。

図 6.4~ 図 6.6 は、NLW を用いた MF のカバー率を、 $r=35$ の Unit Disk Graph 上に示したものである。カバー率の傾向は、 $r=50$ の場合と同様である。カバー率については、 $\gamma=0.5, 0.8$ と $\gamma=0.2$ の間に差がある事が分かった。これは疎なグラフの中での拠点再配置の確率に依存している事を意味している。

図 6.1~6.6 は Unit Disk Graph 上で拠点再配置戦略に CRPS を用いた ($r = 50$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, MF 数 = $\{2, 5, 8\}$) のグラフのカバー率である。

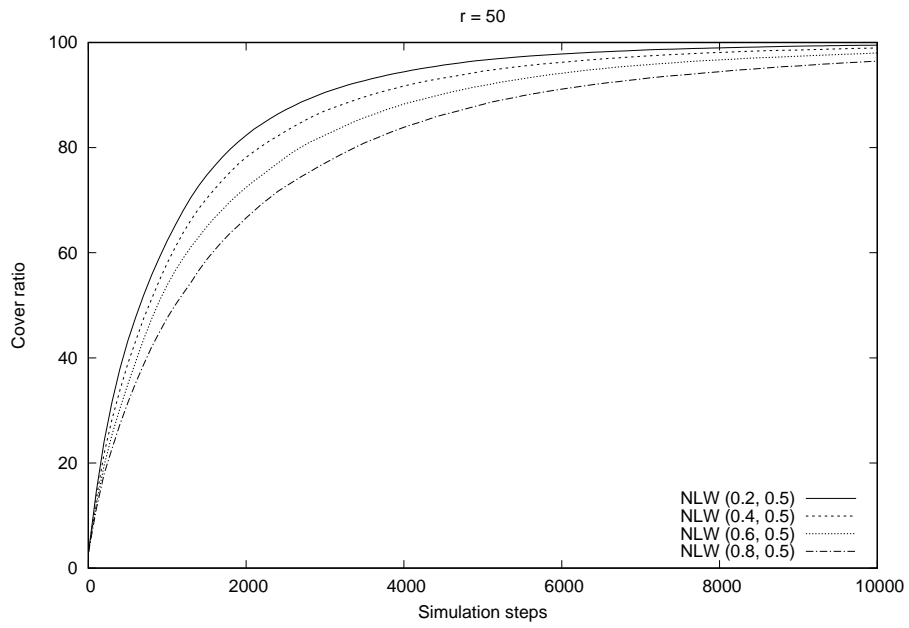


Figure 6.1: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $\lambda = 1.2$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, $r = 50$, MF 数 = 2.

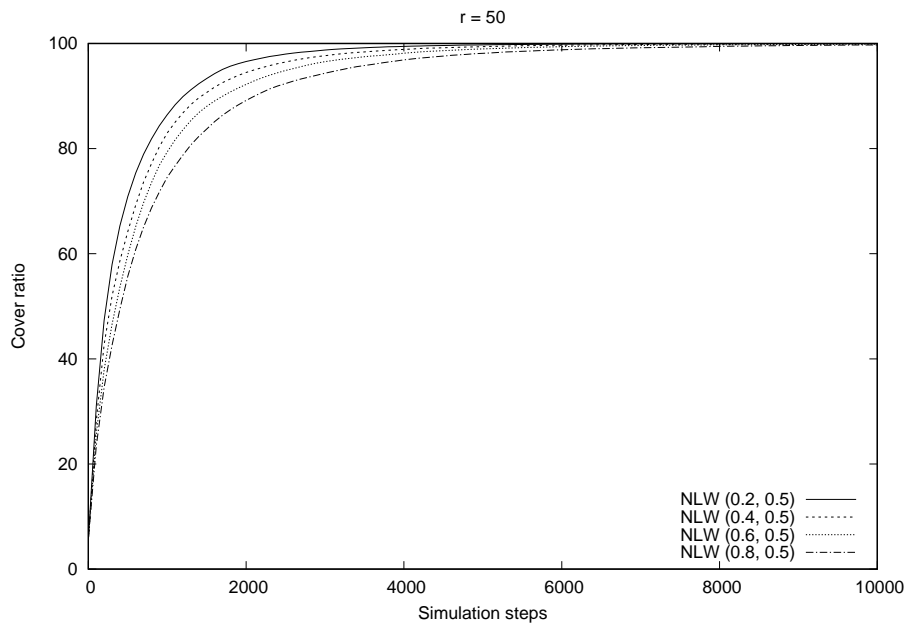


Figure 6.2: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $\lambda = 1.2$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, $r = 50$, MF 数 = 5.

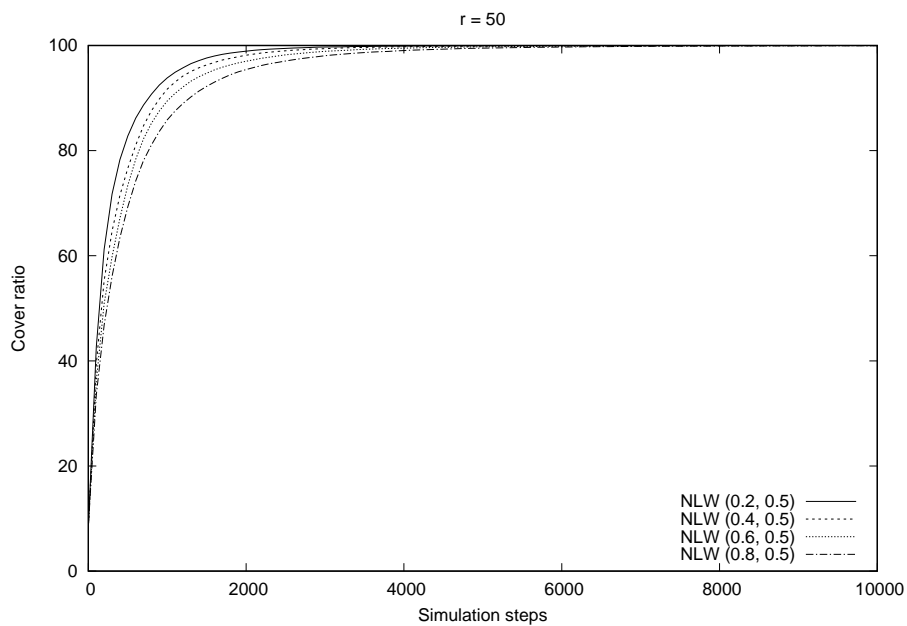


Figure 6.3: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $\lambda = 1.2$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, $r = 50$, MF 数 = 8.

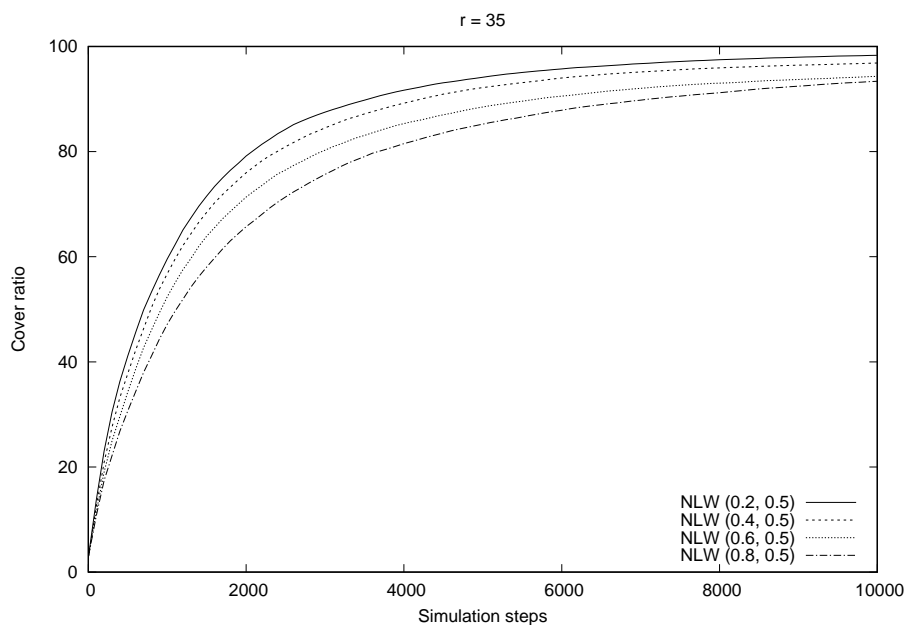


Figure 6.4: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $\lambda = 1.2$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, $r = 35$, MF 数 = 2.

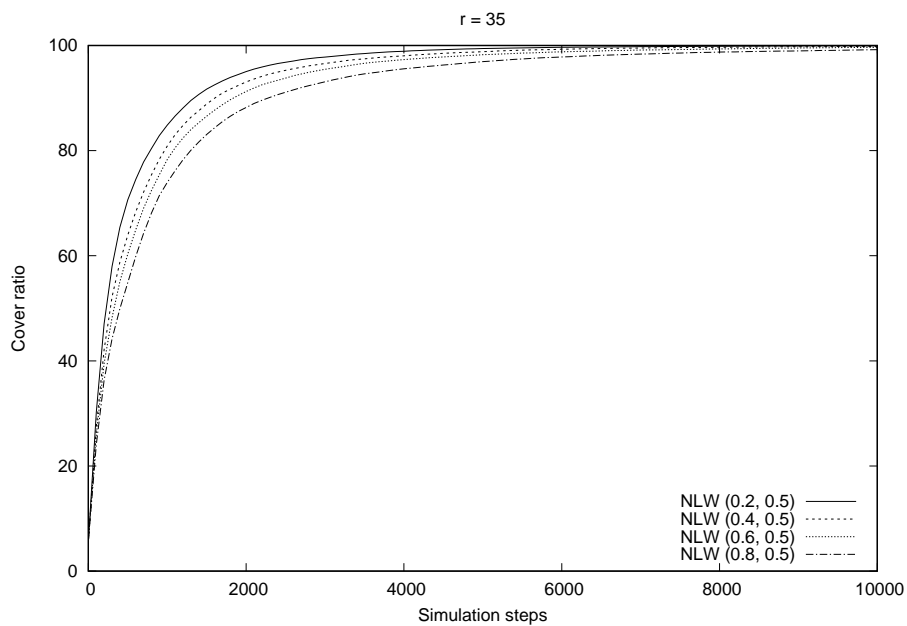


Figure 6.5: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $\lambda = 1.2$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, $r = 35$, MF 数 = 5.

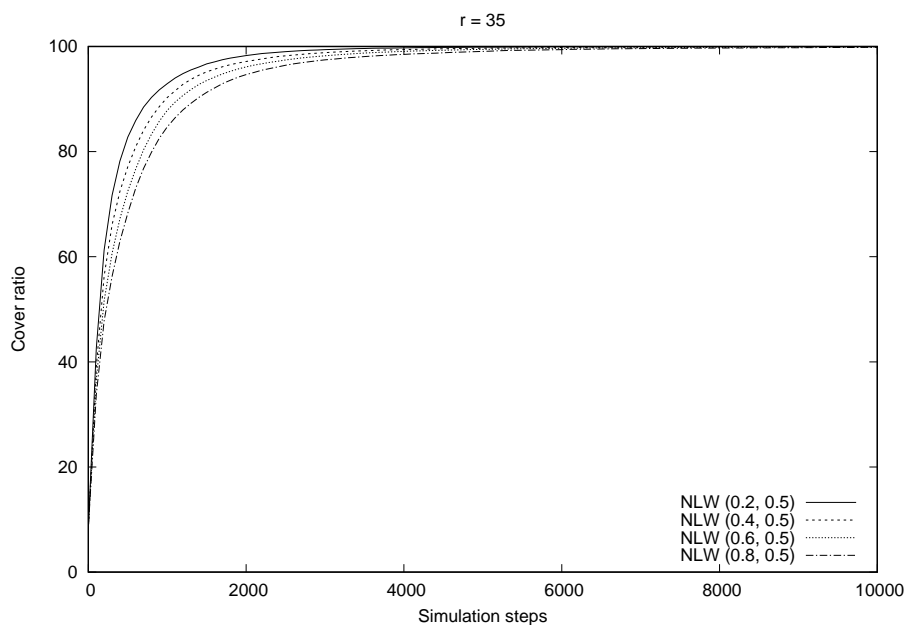


Figure 6.6: グラフのカバー率 (NLW with CRPS) $\lambda = 1.2$, $\alpha \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $\gamma = 0.5$, $r = 35$, MF 数 = 8.

メッセージ拡散率

メッセージ拡散率は、送信先を特定しないメッセージがどれだけのセンサへ到達出来たかの指標である。メッセージを所持するメッセージフェリーは同じ座標に存在する他のメッセージフェリーにメッセージを複製する。この実験では、メッセージの種類は一つであり、メッセージには生存時間が設定されていない。NLW と Random Way Point (RWP) ベースの MF を用いてメッセージ拡散率を比較していく。RWP は、ランダムに長距離移動を行う移動モデルである。UDG 上では、方向 θ を $[0, 2\pi)$ の範囲からランダムに決定し、距離をランダムに決定する。ノード間を移動する際には、許容誤差 δ を考慮する。MF の数は、3,6,9 とした。

図 6.7 から図 6.9 は、 $r=50$ の Unit Disk Graph におけるメッセージ拡散率を示しており、図 6.10 から図 6.12 は、 $r=35$ の Unit Disk Graph におけるメッセージ拡散率を示している。

また、MF の数が少ない疎なグラフ (図 6.10) では、両者の間の差が大きくなる。しかし、シミュレーションのステップが長くなるにつれて両者の差は小さくなる。

なお NLW は拠点に戻り、RWP は拠点に戻らない。背景でも想定したように、MF は電気自動車であり、定期的にバッテリーを充電する必要がある。このような場合でも、NLW は実用的に有用である。

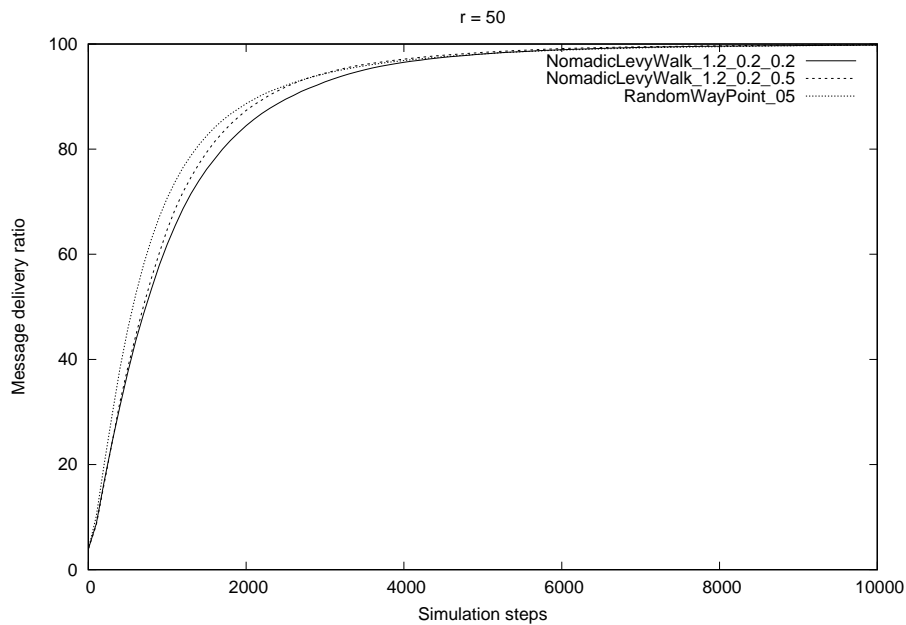


Figure 6.7: UDG 上でのメッセージ拡散率 (RWP vs. NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5\}$, MF 数 = 3

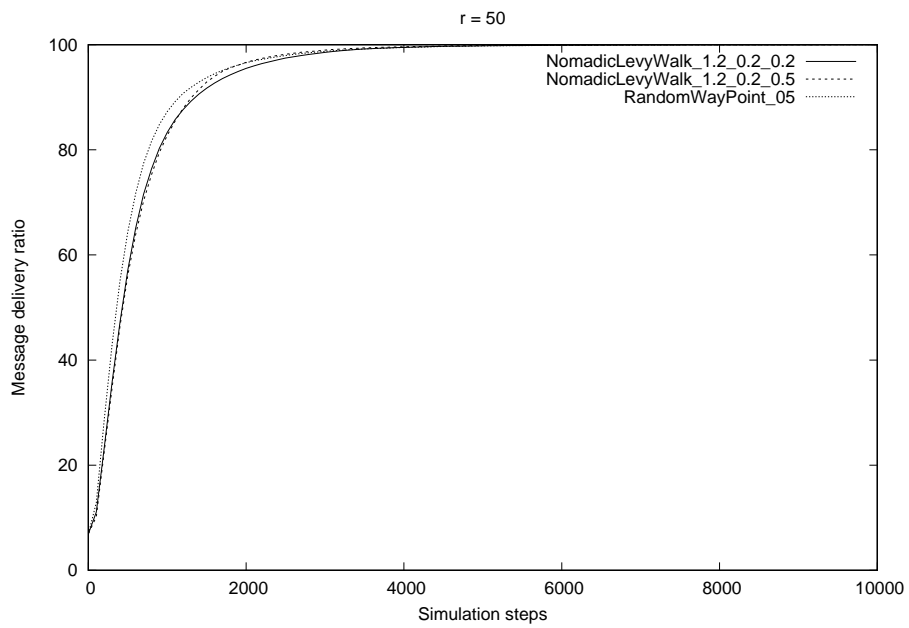


Figure 6.8: UDG 上でのメッセージ拡散率 (RWP vs. NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5\}$, MF 数 = 6

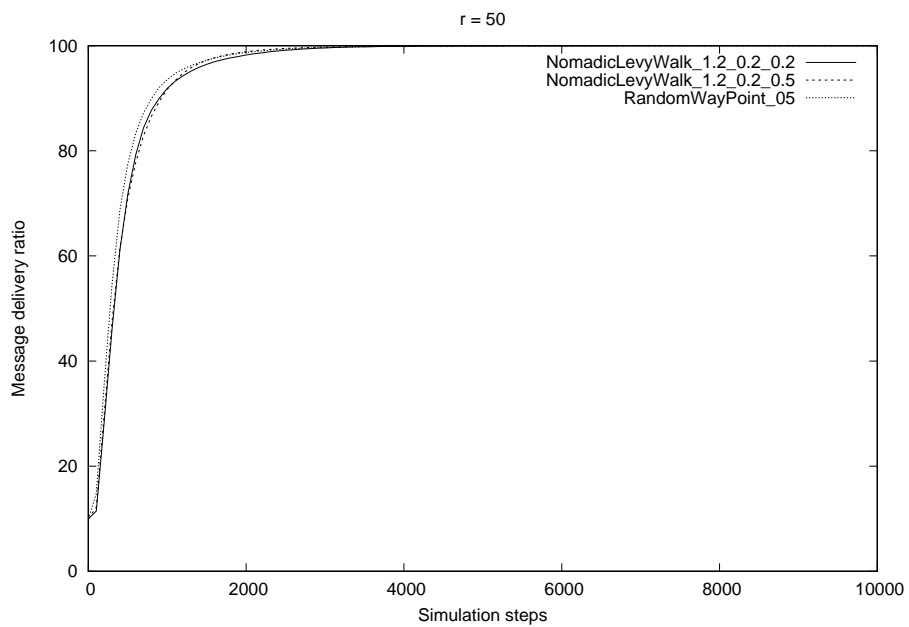


Figure 6.9: UDG 上でのメッセージ拡散率 (RWP vs. NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5\}$, MF 数 = 9

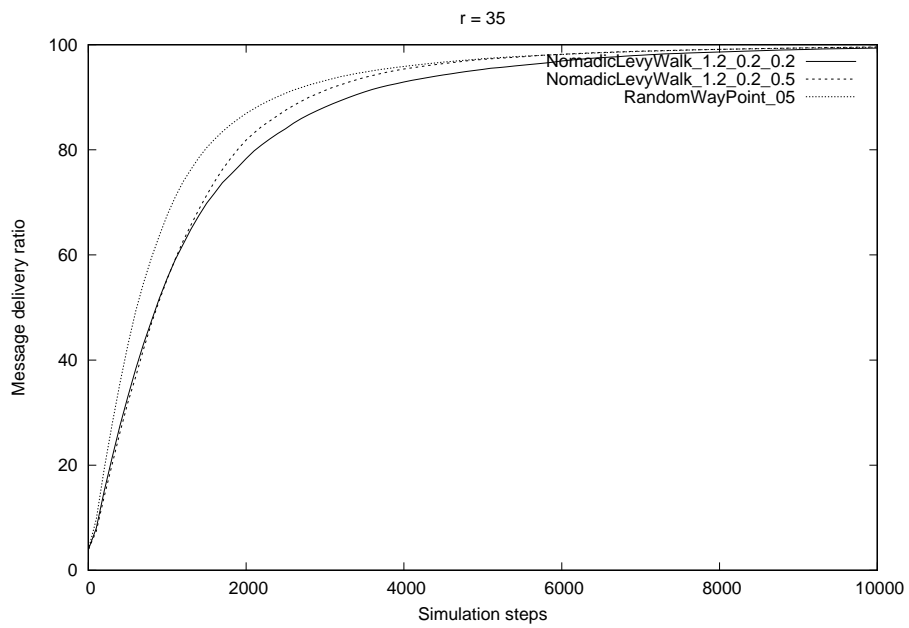


Figure 6.10: UDG 上でのメッセージ拡散率 (RWP vs. NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5\}$, MF 数 = 3

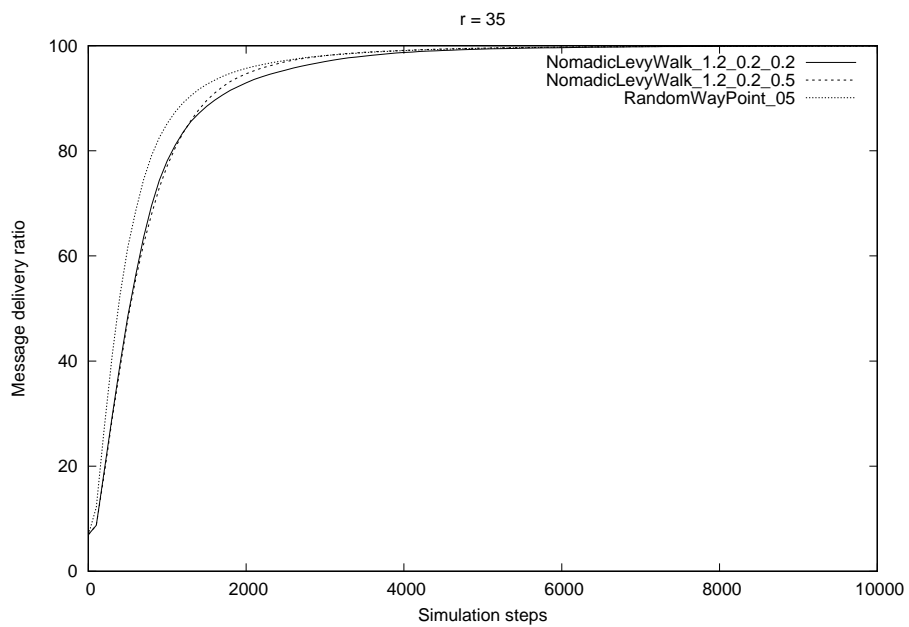


Figure 6.11: UDG 上でのメッセージ拡散率 (RWP vs. NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5\}$, MF 数 = 6

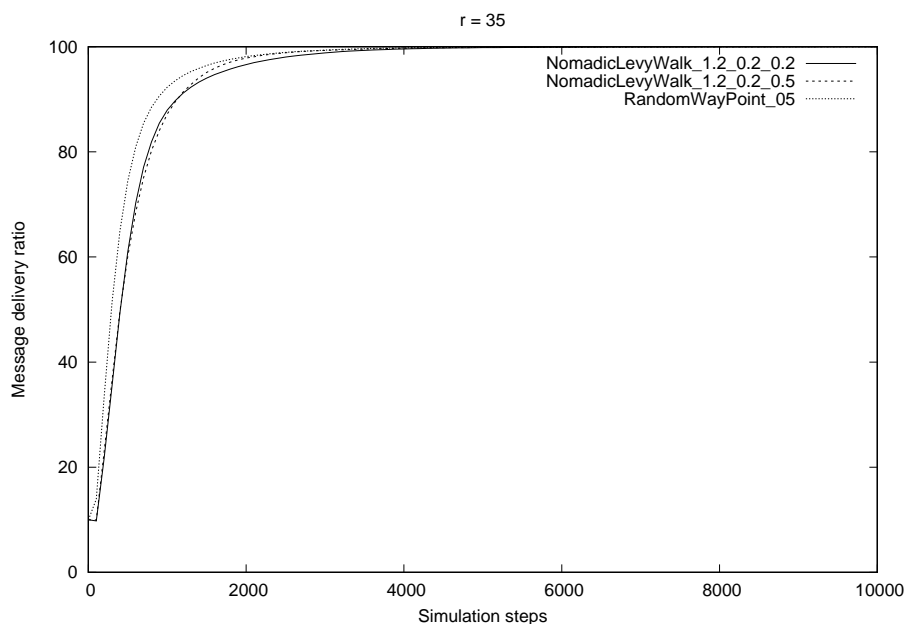


Figure 6.12: UDG 上でのメッセージ拡散率 (RWP vs. NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5\}$, MF 数 = 9

6.1.4 まとめ

この章では、NLW ベースの MF のカバー率を評価し、NLW と RWP ベースのメッセージ拡散率を比較した。その結果、疎なグラフでは拠点の拠点遷移確率 γ がカバー率に影響を与える事がわかった。一方、密なグラフでは、カバー率に影響をあまり与えない。

異なるルーティング方式を用いた場合のメッセージ拡散率の比較では、特に疎なグラフでは、NLW よりも RWP の方が優れている。しかし、シミュレーションのステップ数を増やすと、両者の差は小さくなる。

ここでは、各メッセージフェリーのバッテリーには限りがあり、定期的に充電する必要があると仮定している。RWP で計測したデータを、拠点回帰の行動が無いブラインド探索を行ったデータだとすると、拠点回帰の行動（充電等に使える）を取り入れながらも同程度の性能を示せた NLW はメッセージフェリーのランダムルーティング手法として十分に有効である。そのため、このような場合には NLW が実用的であると言える。

6.2 遅延耐性ネットワークにおけるメッセージフェリーの経路制御

6.2.1 概要

このセクションでは、DTN におけるデータ収集のためのメッセージフェリーをベースにしたアプローチに注目する。メッセージフェリーは、ノードからメッセージを収集し、目的地に配送するためにフィールドを移動するモバイルエンティティである。ノードがネットワーク内の他のノードにメッセージを送信する際には、まず、近距離通信機能を持ったメッセージフェリーが近づいてきたら、メッセージを送信する。メッセージはメッセージフェリーによって宛先に届くか、または送信が失敗する。そのため、メッセージ配送の効率性は、メッセージフェリーのルーティング手法に依存する。メッセージフェリーのルーティング手法の多くは、固定ルートを前提としている。例えば、メッセージフェリーは円形のパス上を移動する。しかし、

道路の整備や災害などで経路の一部が利用できなくなると、固定経路ベースのルーティング手法は機能しなくなる。

本研究では、メッセージフェリーのルーティングのために、ランダムウォークに基づくルーティング手法に注目する。特に、LWは、動物の採餌における最適探索 [7, 25] や、人間の移動性の統計的類似性 [15] から、最近注目されている。

本節では、メッセージフェीलルーティングとしてNLWを適用し、DTNにおけるメッセージ配送率と遅延時間を測定する。更に、これらの基準を測定するために、いくつかの異なる構成でシミュレーションを行った。次に、シミュレーション結果を分析し、パラメータ γ とNLWの拠点再配置戦略がメッセージ配送率と遅延時間に与える影響を明らかにする。また、グラフのリンク密度が配送率や配送遅延にどのように影響するかについても議論する。

6.2.2 システムモデル

遅延耐性ネットワーク

遅延耐性ネットワーク (DTN) は、通信の中断や切断、伝送遅延が多く生じる環境である。遅延耐性ネットワークは無線センサネットワークのオーソドックスな想定環境の一つであり、無線センサネットワークが様々な研究分野で注目されている事もあり、様々なDTNにおけるメッセージングプロトコルが提案されている [13]。この種類のネットワークでは、通信範囲が限られた無線通信機能を持つモバイル/ステーションナリーノードがフィールドに配置されており、エンド・ツー・エンドのパスが常に存在するわけではないため、ノードから送信されたメッセージは、ストアキャリーフォワード方式で宛先に配送される。これは、各メッセージやデータが、互いにメッセージの受け渡しを繰り返すいくつかのモバイル端末によって宛先まで運ばれる事を意味する。このような方式は、特に災害時など、安定したネットワークインフラが無い状態でメッセージを送受信するのに有効である。

メッセージフェリー

ここでは、DTNにおけるデータ収集のためのメッセージフェリーベースのアプローチに注目する。メッセージフェリーは、ノードからメッセージを収集し、目的地に適切に届けるためにフィールドを移動するモバイルエンティティである。ノードがネットワーク内の他のノードにメッセージを送信するには、まず近距離通信機能 (Bluetooth など) を持つメッセージフェリーが近づいてきたら、メッセージを送信する。メッセージはメッセージフェリーによって宛先に届く、または配送が失敗する。Tariqらは、疎なアドホックネットワーク上での接続性を向上させるために、OPWP (Optimized Way-points) フェीलルーティング方式を提案している [6]。シミュレーション結果によると、OPWPベースのメッセージフェリーはRWPベースの他のルーティング手法よりも優れている事が分かった。Shinらは、Lévy Walkの移動パターンをDTNにおけるメッセージフェリーのルーティングに適用している [15]。彼らは、Lévy Walkの様々な構成に基づいて、メッセージフェリーを用いたメッセージ拡散を実証した。シミュレーション結果によると、メッセージフェリーの弾道的な動き (Lévy Walkのスケールパラメータが小さくなる) は、メッセージの遅延に対して効率的である事が示された。Basagniらは、モバイルシンクノードの概念とそのヒューリスティックルーティング方式であるGreedy Maximum Residual Energy (GMRE) を提案している [5]。本研究の動機は、大規模なフィールドに配置され、定期的にシンクにデータを送信する無線センサノードから効率的にデータを集める事でセンサのバッテリー寿命を延ばす事である。データ収集・処理ポイントとしてのモバイルシンクは、センサノードの消費エネルギーを節約するためにフィールド内を移動する。シミュレーションの結果、提案したルーティング方式を用いたモバイルシンクがセンサノードの寿命を向上させる事が示された。Alnuaimiらは、無線センサネットワークでセンサデータを収集するためのフェリー

ベースのアプローチを提案している [3, 4]. これはフィールドを仮想グリッドに分割し、移動フェリーが最短の往復時間でデータを収集するための最適な経路を計算するためのものである. パスの決定には、遺伝子アルゴリズムとノードランキングクラスタリングアルゴリズムを利用している.

6.2.3 性能評価

メッセージフェリーがデータを収集したセンサノードの割合を示す平均メッセージ配送率を測定する. メッセージ配送率は、メッセージフェリーによるデータ収集の効率を意味する. また、Nomadic Lévy Walk を用いたメッセージフェリールーティングでは、 α と γ をパラメータとして、メッセージフェリーによるメッセージ配送率と遅延時間を示している.

実験環境

この章のシミュレーションでは、 $1,000 \times 1,000$ のユークリッド平面上に、 $1,000$ 個のノードをランダムに配置する. 2つのノード間のリンクは、これらのノードのユークリッド距離が $2r$ よりも小さい場合のみに接続され、無向リンクを持つ. このような Unit Disk Graph を自動的に生成した.

パラメータ

スケールパラメータ λ と拠点帰還確率 α は、NLW と HLW に共通のものである. $\lambda = 1.2$ としたのは、Unit Disk Graph での効率的な探索を実現するパラメータとして知られているからである. 各メッセージには、メッセージの有効期限を示す TTL (Time to Life) が設定されている. TTL は、実験開始時に有効になりシミュレーションステップが進行するごとに減少する. シミュレーションステップは全ての Agent が 1Step ずつ移動したタイミングで 1 ターン進行する. TTL が 0 になると、そのメッセージを所持しているメッセージフェリーからメッセージが削除される. メッセージフェリーの数は、 $k \in \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ とする. 各メッセージフェリーには、特定のシンクノード (例えば、移動電源車) が存在する.

6.2.4 性能評価

ここでは、特定のセンサノードから特定のセンサノードへのメッセージ送信を仲介するメッセージフェリーのランダムルーティングとして Nomadic Lévy Walk を適用した場合の性能を評価する. シミュレーションは Unit Disk Graph 上で行う. メッセージは実験開始時に作成され、各メッセージの送信先はノードからランダムに選択される.

メッセージ配送率

異なる拠点再配置戦略と拠点遷移確率 γ を用いて Nomadic Lévy Walk を用いたメッセージフェリーのメッセージ配送率を比較した. メッセージフェリーの数は $2 \sim 10$ 個とした. 各メッセージには TTL 値が設定されている. TTL = 無限の場合、すべてのメッセージは最終的に宛先に到達する. しかし、この条件はメッセージがモバイル端末のストレージからメッセージが削除されない事を意味する. 今回のシミュレーションでは、メッセージフェリーのカバー率が 8 割になるまでのシミュレーション時間に応じて各メッセージの初期 TTL 値を設定した. 初期値の TTL = 800 ターンは、以前の研究でのシミュレーション結果を元に設定した. [21]

図 6.13~ 図 6.15 は $r=50$ の Unit Disk Graph でのメッセージ配送率、図 6.16~ 図 6.18 は $r=35$ の Unit Disk Graph でのメッセージ配送率を示している. パラメータ γ は、拠点位置を変更する頻度を決定するためのものである. γ が大きくなると、

拠点再配置の頻度が高くなる。CRPSとLWSでは、 $\gamma = 0.8$ のメッセージ配送率は、 $\gamma = 0.2$ と0.5のメッセージ配送率よりも常に良い。メッセージ配送率に関する戦略の違いについては、CRPSとLWSがRPSよりも若干優れている。

$r=50$ のグラフは $r=35$ のグラフよりもリンク数が多く、これは前者の方が後者よりもメッセージフェリーの移動に自由が効く事を意味している。一般的に、移動の自由度はカバー率に影響を与えられていると言われており、我々の過去の研究では、この事例をシミュレーション結果で示した。また、メッセージ配送率もカバー率と同じ傾向を示している。

図 6.15 と図 6.18 を比較すると CRPS を用いた $r=50$ のメッセージ配送率は、 $r = 35$ のものと比較して、 $k = 3$ で 19.1%、 $k = 4$ で 17.8%、 $k = 5$ で 15.3% 増加した。しかし、その差は $k = 10$ の時 2.2% まで縮まった。移動の自由度がメッセージ配送率に影響を与えているが、ネットワーク上にメッセージフェリーを増やす事ができれば解決出来る可能性がある。災害時には道路網が遮断される事で、移動の自由度が低下する可能性がある。そのような場合、必要なメッセージ配送率に合わせてメッセージフェリーの数を調整する必要がある。

図 6.13~6.18 は Unit Disk Graph 上で拠点再配置戦略に (LWS,RPS,CRPS) をそれぞれ用いた ($r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$, MF 数 = $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$) メッセージ配送率である

図 6.19~6.24 は Unit Disk Graph 上で NLW を用いた ($r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$, MF 数 = $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$) 各拠点再配置戦略 (LWS, RPS, CRPS) によるメッセージ配送率の比較である。

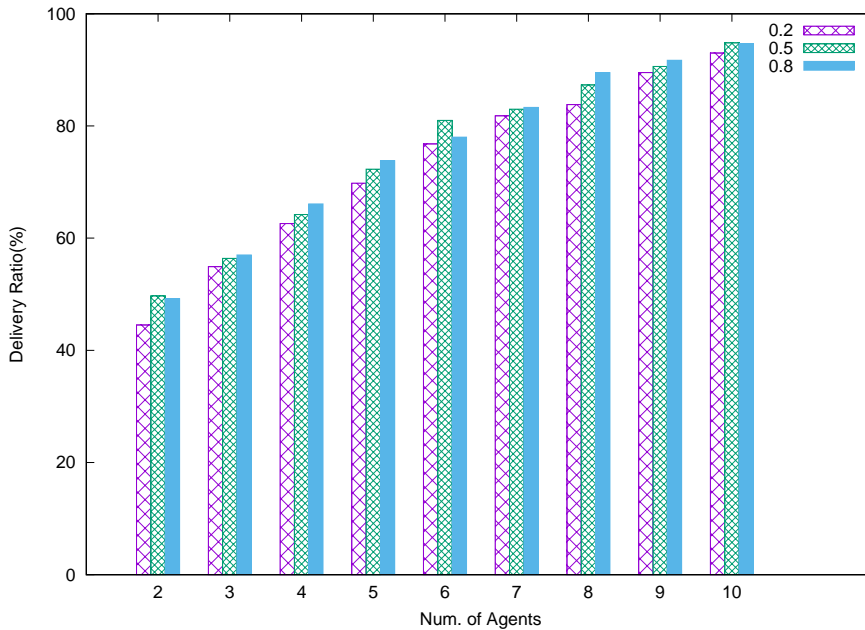


Figure 6.13: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$

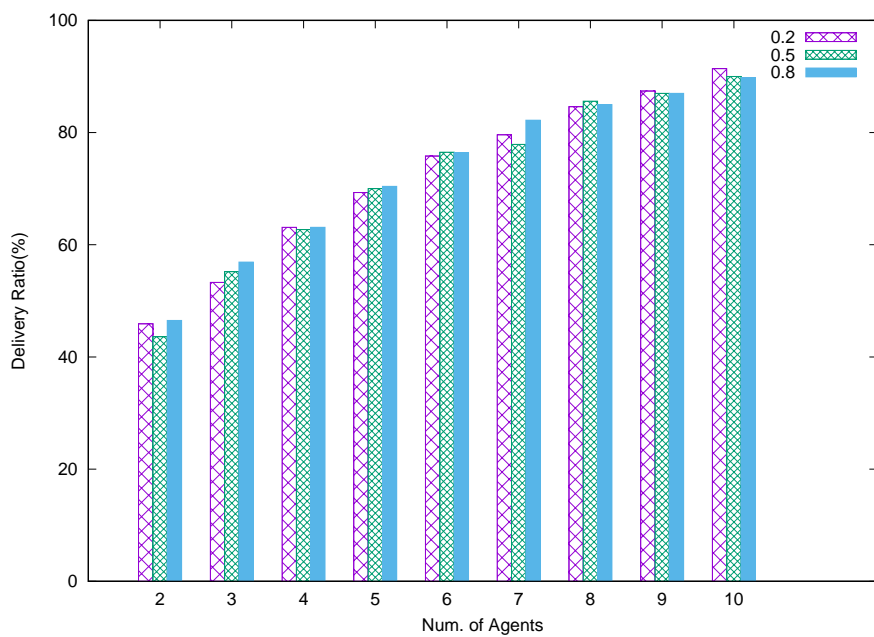


Figure 6.14: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with RPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

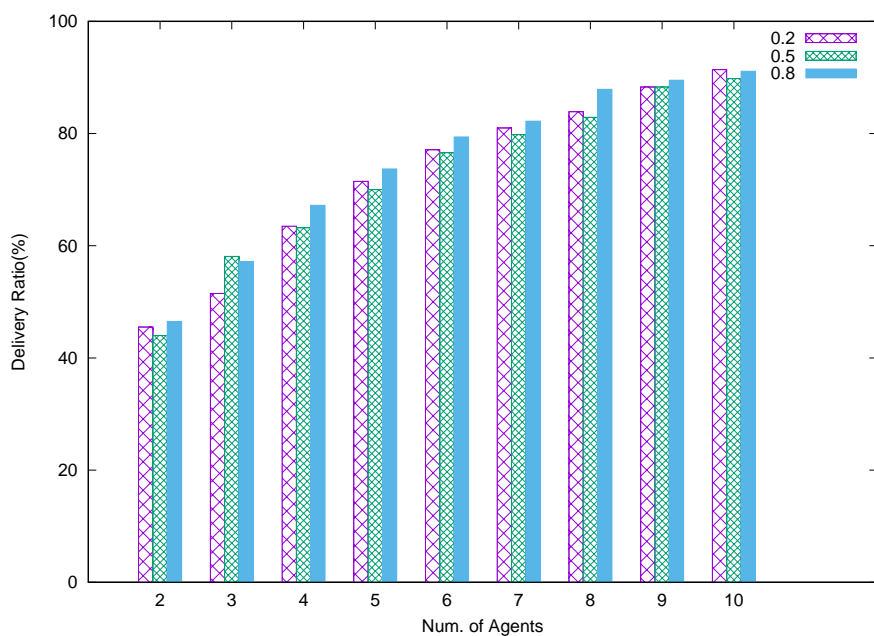


Figure 6.15: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

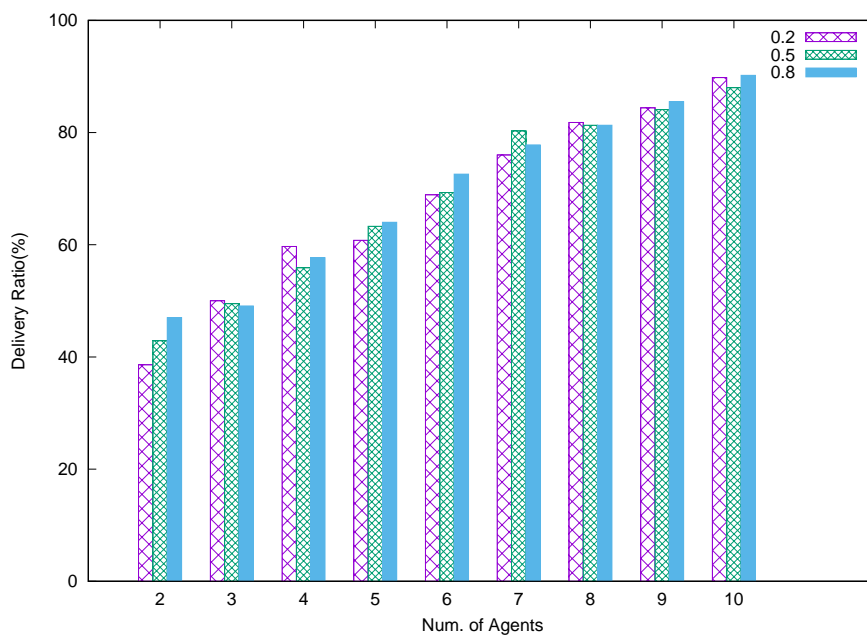


Figure 6.16: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

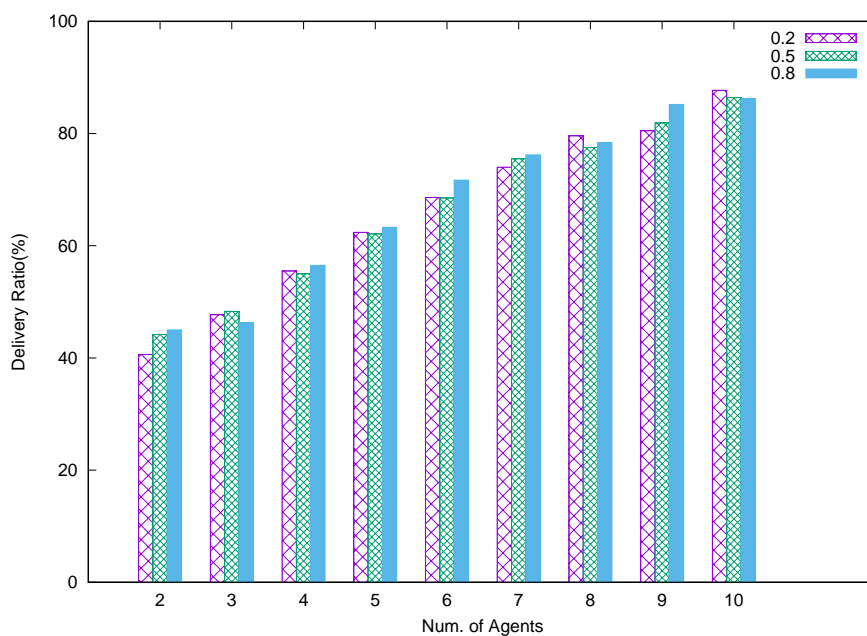


Figure 6.17: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with RPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

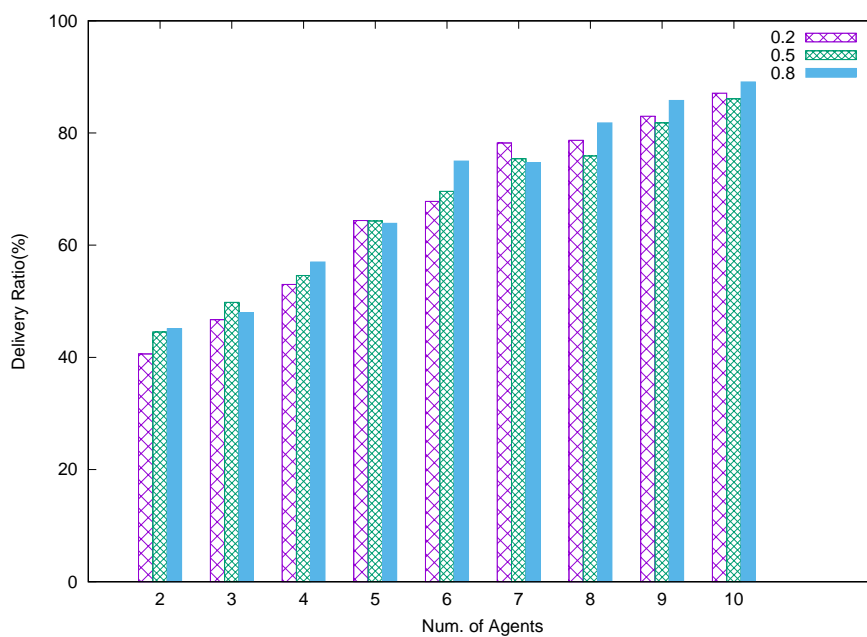


Figure 6.18: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

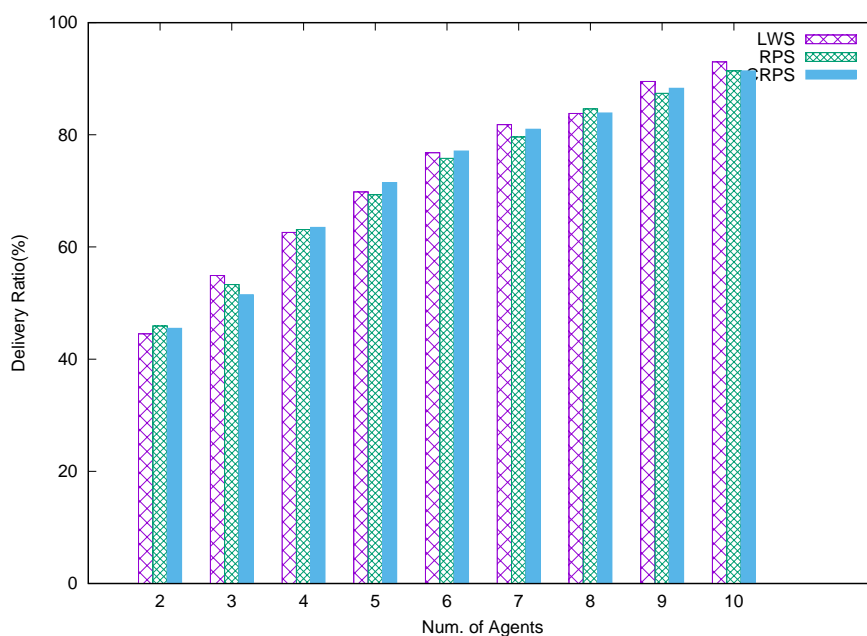


Figure 6.19: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$.

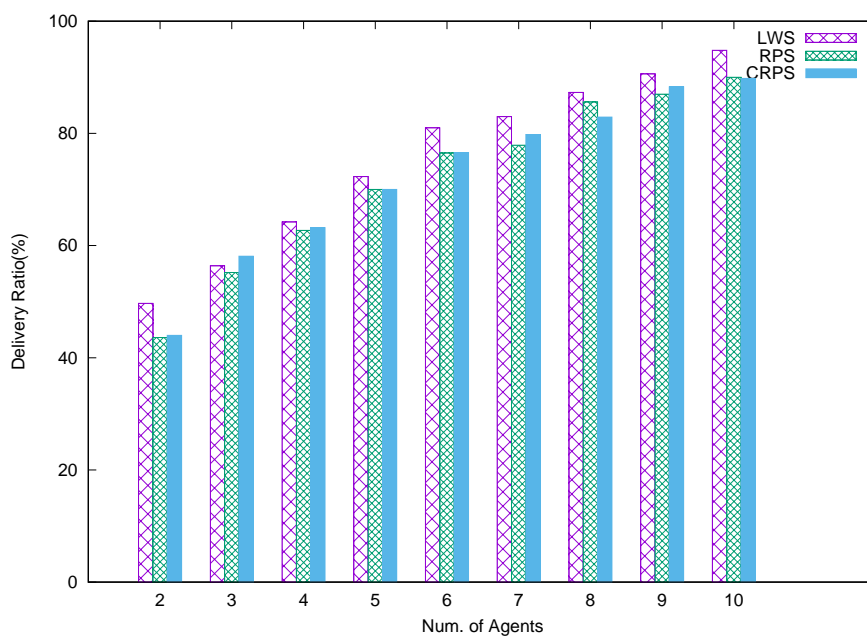


Figure 6.20: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS)
 $r = 50, \alpha = 0.2, \gamma = 0.5$.

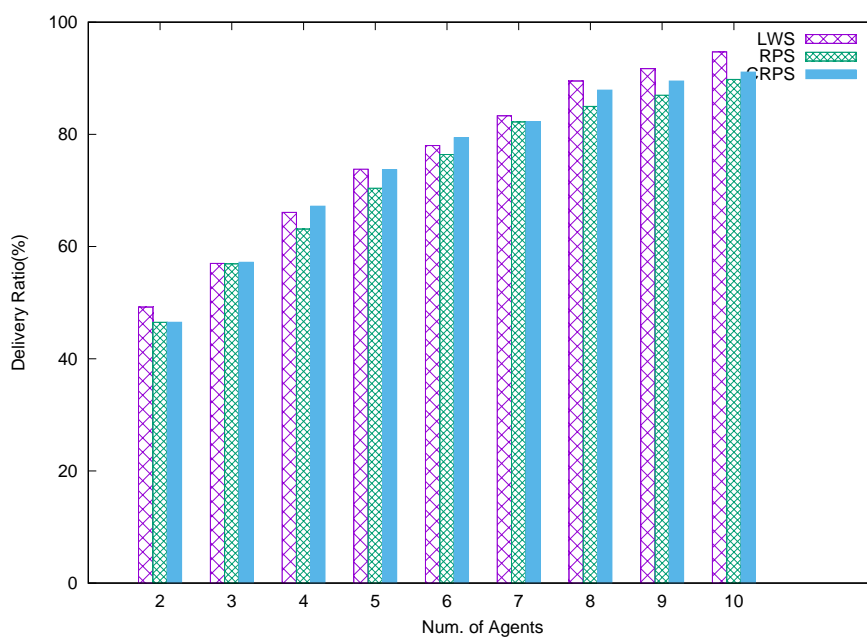


Figure 6.21: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS)
 $r = 50, \alpha = 0.2, \gamma = 0.8$.

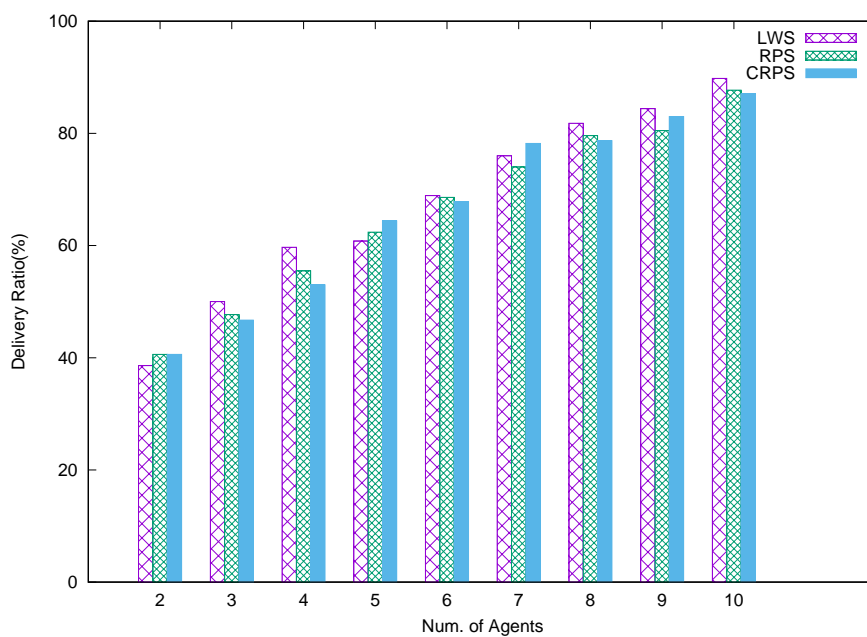


Figure 6.22: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS)
 $r = 35, \alpha = 0.2, \gamma = 0.2$.

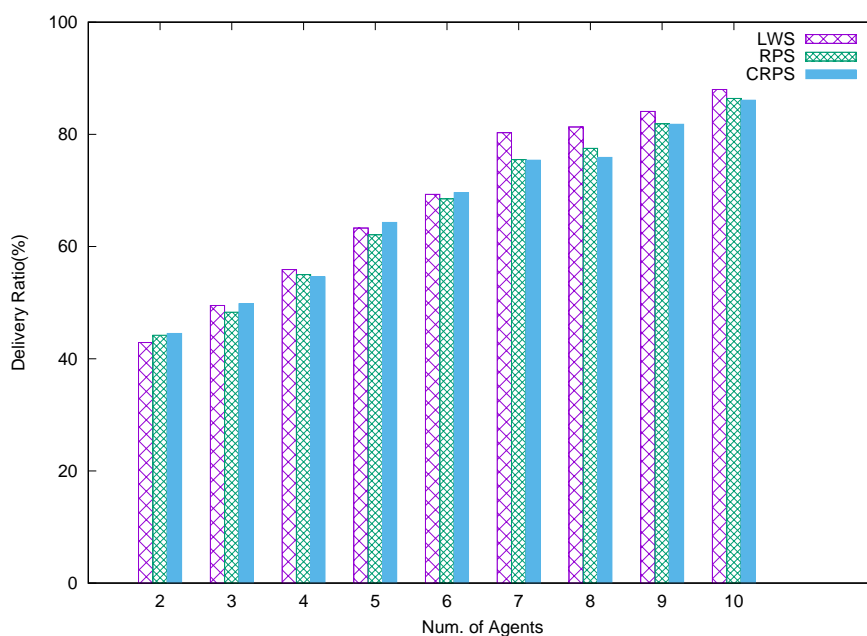


Figure 6.23: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS)
 $r = 35, \alpha = 0.2, \gamma = 0.5$.

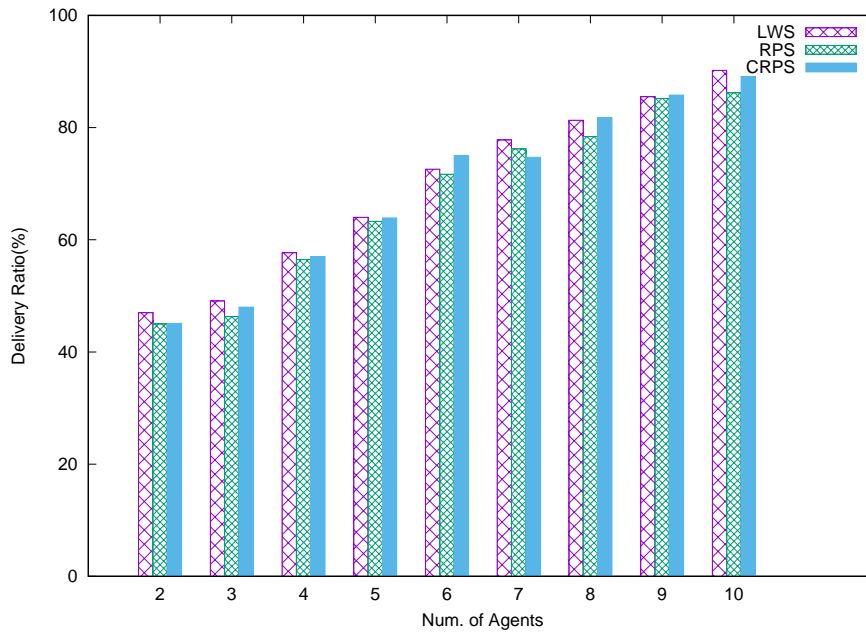


Figure 6.24: UDG 上でのメッセージ配送率 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS)
 $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.8$.

遅延時間

Nomadic Lévy Walk を用いたメッセージフェリーを、異なる拠点再配置戦略とパラメータ γ で使用した場合のメッセージ配送にかかる遅延時間を比較する。メッセージフェリーの数の構成は、メッセージ配送率の構成と同じである。図 6.25~図 6.27, 図 6.31~図 6.33 は $r=50$ の Unit Disk Graph におけるメッセージ配送の遅延時間を、図 6.28~図 6.30, 図 6.34~図 6.36 は $r=35$ の Unit Disk Graph における遅延時間を示している。前述のメッセージ配送率のシミュレーションでは、各メッセージに $TTL=800$ を設定していた。今回のシミュレーションでは、純粋にメッセージ配送の平均遅延時間を測定するために、 $TTL=無限$ を設定した。CRPS と LWS では、 $r = 35$ のグラフ 6.34 において、 $\gamma=0.8$ のメッセージ遅延時間は、 $\gamma = 0.2$ と 0.5 の遅延時間よりもわずかに良い。しかし、その差はごくわずかである。LW と CRPS は遅延時間に関してはほぼ同じである。 k が 8 以上の場合、LWS は CRPS よりもわずかに優れている。 r が小さくなると、LWS と CRPS の差は大きくなる。LWS の遅延時間は、 $r = 35$ のグラフでは CRPS の遅延時間に比べて $k \geq 4$ で 15% から 28% 減少しているが、 $r = 50$ のグラフでは、数% の減少にとどまっている。CRPS は、広い範囲をカバーするのに適した戦略だが、一方で、移動の自由度が制限されている場合、メッセージ配送の遅延を改善するためには、LWS の方が CRPS よりもはるかに優れている。

図 6.25~6.30 は Unit Disk Graph 上で拠点再配置戦略に (LWS,RPS,CRPS) をそれぞれ用いた ($r = \{35, 50\}$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$, MF 数 = $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$) 場合のメッセージ遅延時間の比較である。

図 6.31~6.36 は Unit Disk Graph 上で NLW を用いた ($r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$, MF 数 = $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$) 各拠点再配置戦略 (LWS, RPS, CRPS) によるメッセージ遅延時間の比較である。

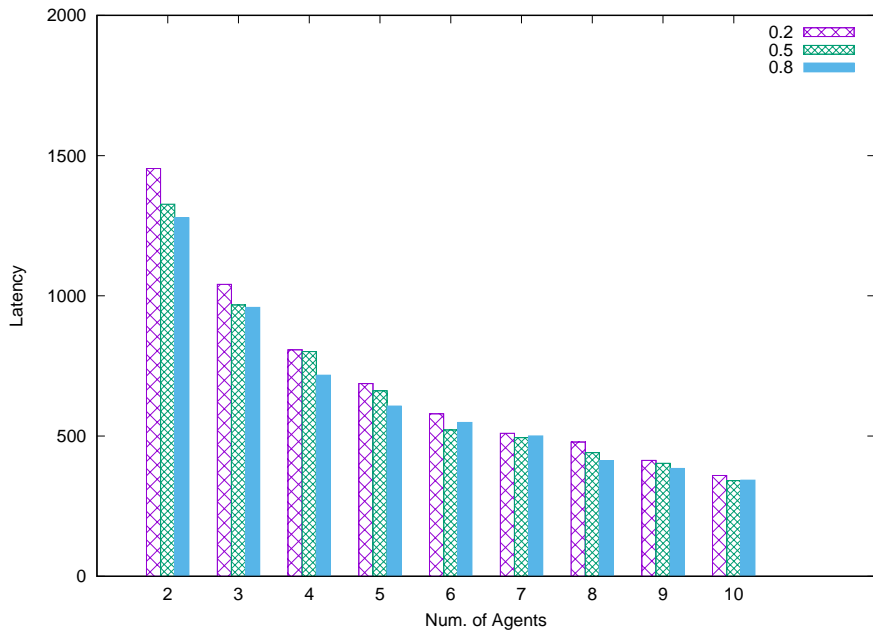


Figure 6.25: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

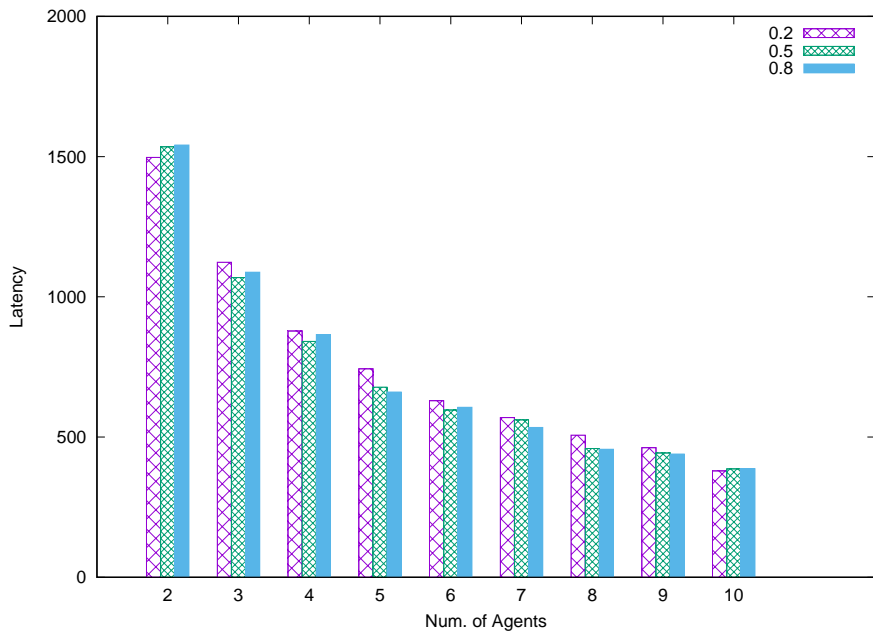


Figure 6.26: メッセージ遅延時間 (NLW with RPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

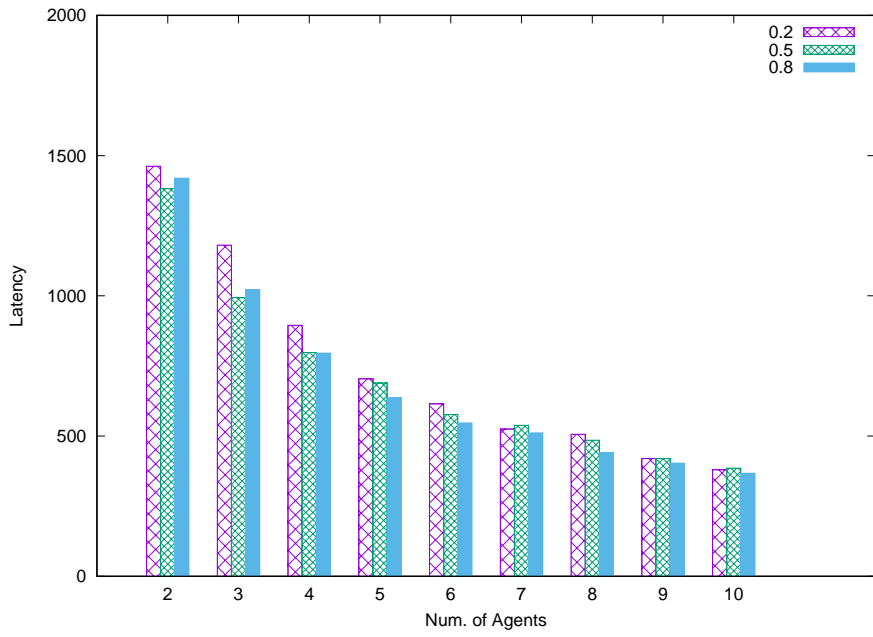


Figure 6.27: メッセージ遅延時間 (NLW with CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

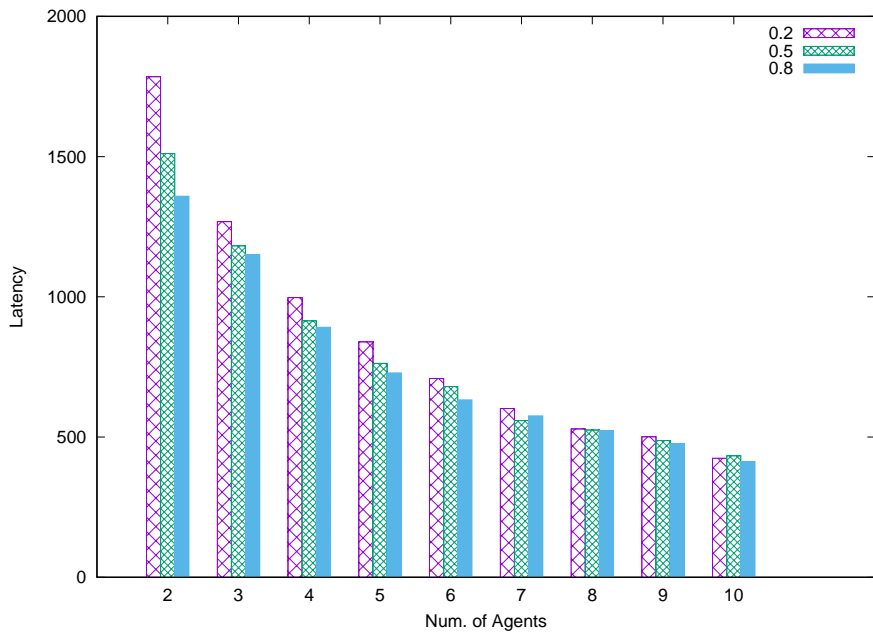


Figure 6.28: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

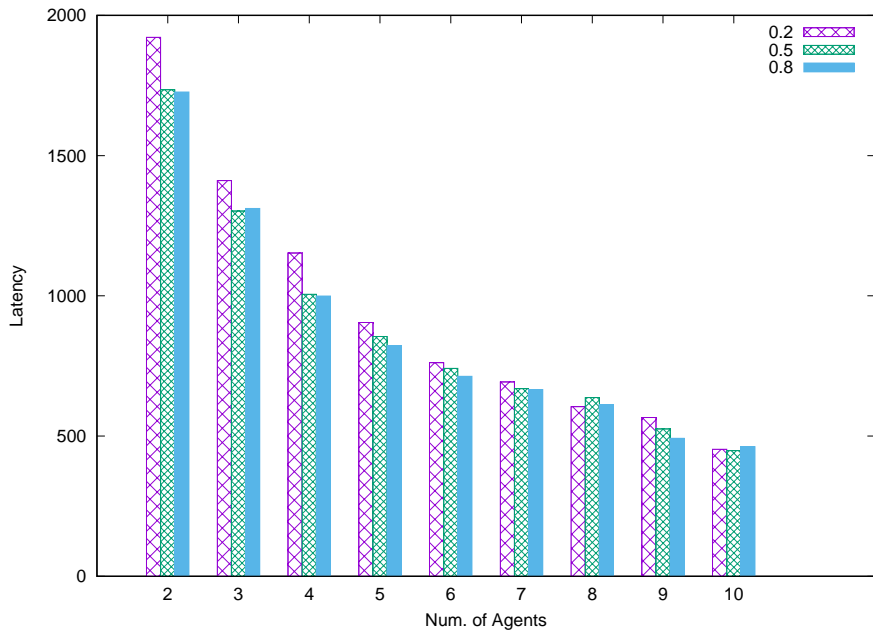


Figure 6.29: メッセージ遅延時間 (NLW with RPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

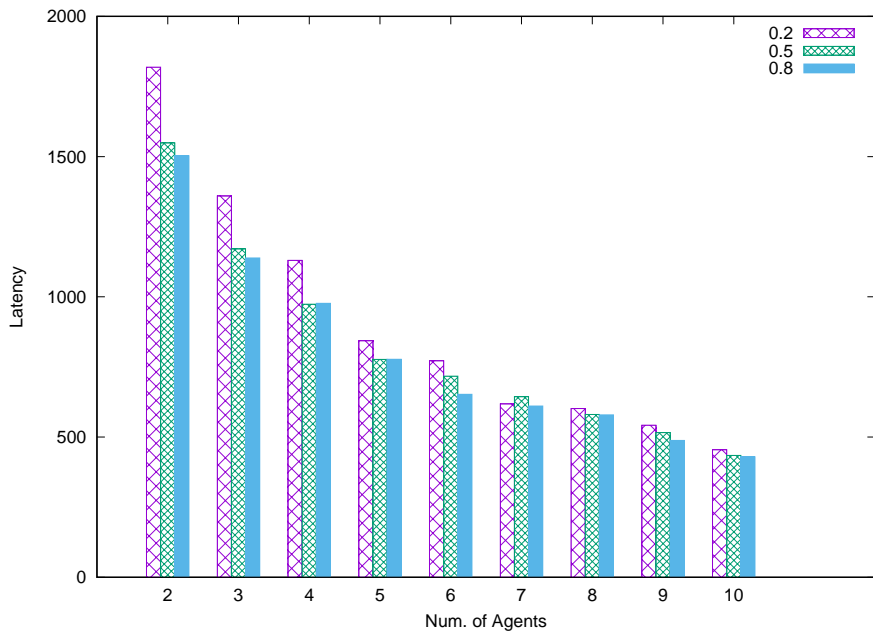


Figure 6.30: メッセージ遅延時間 (NLW with CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = \{0.2, 0.5, 0.8\}$.

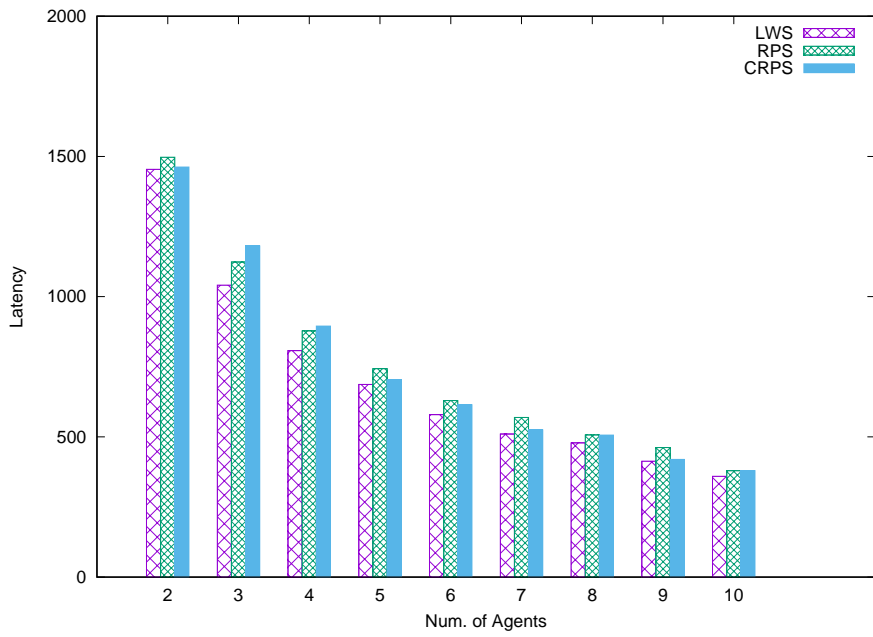


Figure 6.31: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 50, \alpha = 0.2, \gamma = 0.2$.

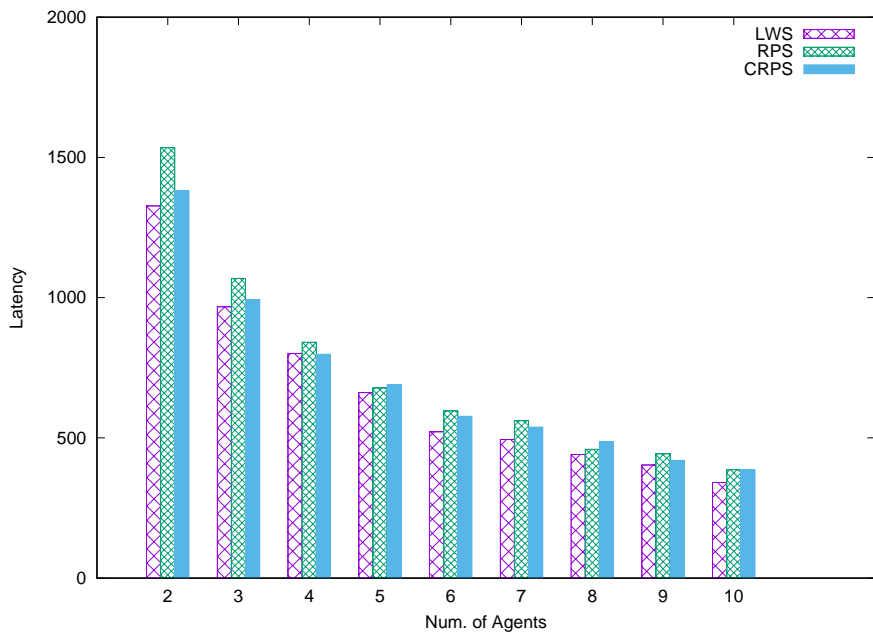


Figure 6.32: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 50, \alpha = 0.2, \gamma = 0.5$.

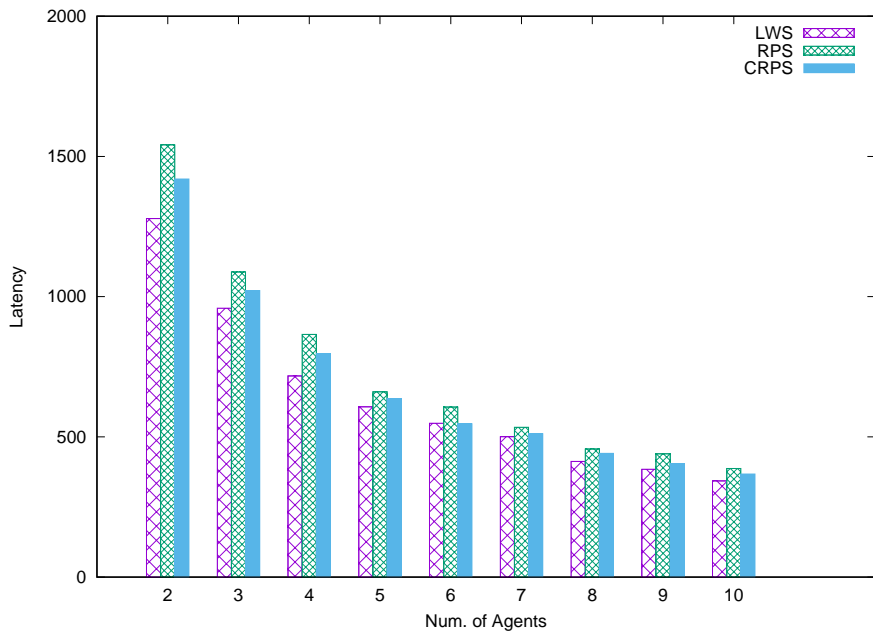


Figure 6.33: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 50$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.8$.

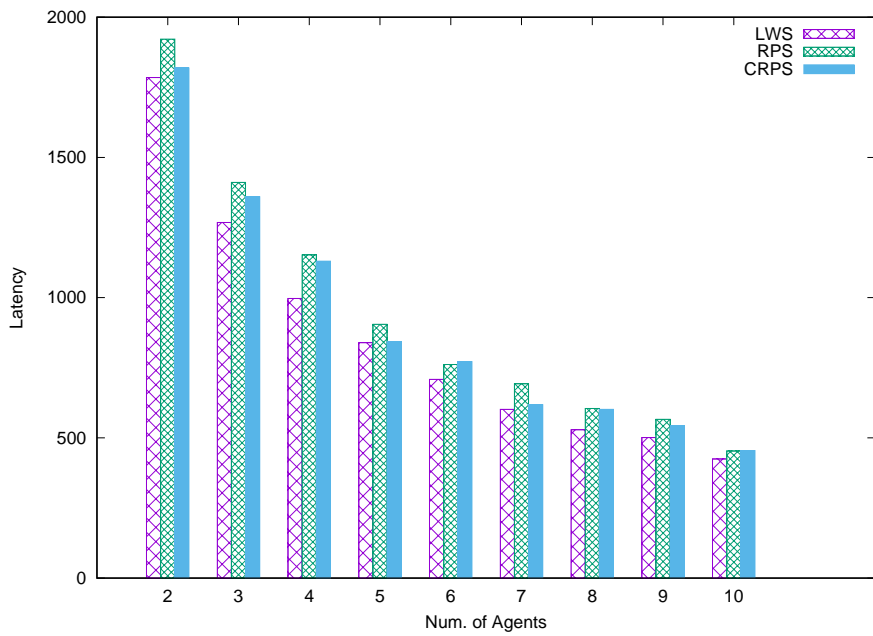


Figure 6.34: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$.

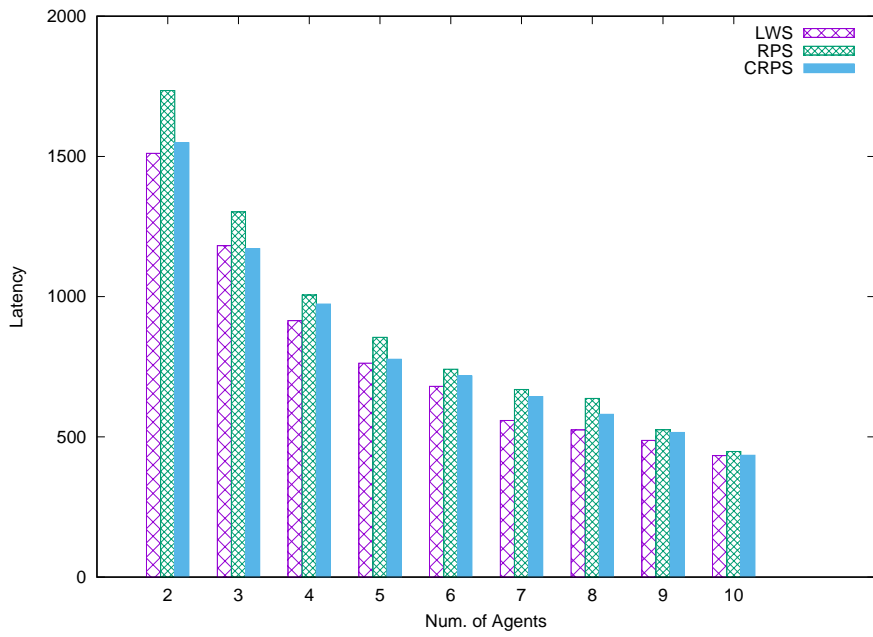


Figure 6.35: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.5$.

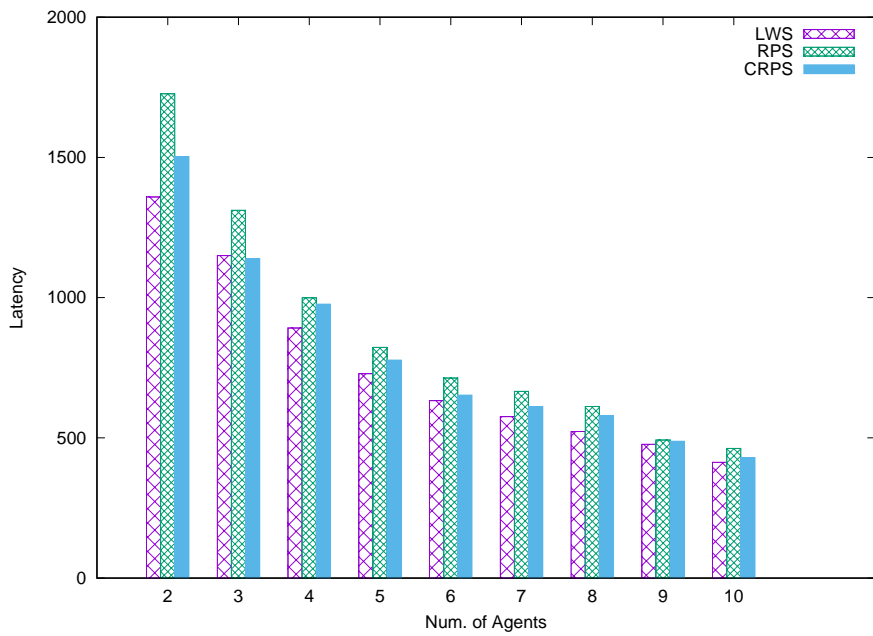


Figure 6.36: メッセージ遅延時間 (NLW with LWS vs. RPS vs. CRPS) $r = 35$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.8$.

6.2.5 まとめ

この章では、遅延耐性ネットワーク (DTN) において、NLW ベースのメッセージフェリーによるメッセージ配送の到達率と遅延時間を評価した。NLW の拠点再配置戦略では、LWS と CRPS が RPS よりも配送率と遅延時間の面で優れている。 $\gamma = 0.8$ の LWS は、Graph の密度が低くなると遅延時間の面で他の戦略よりも優れている。グラフの密度が低い (r が小さい) という事は、移動の自由度が制限されているという事である。これは、拠点の位置を頻繁に変更する必要がある事を意味しており、遅延を改善するには、拠点の再配置戦略として LWS を使用する必要がある。この結果は、特に移動が制限されている DTN において、MF を用いたメッセージ配送に役立つと考えられる。

Chapter 7

議論

本論文では、Nomadic Lévy Walk(NLW)の提案とNLWにおける拠点再配置戦略としてLévy Walk Strategy(LWS), Reverse Prevention Strategy(RPS), Clustering Reverse Prevention Strategy(CRPS)の3戦略を提案した。

まず最初に、Homesick Lévy Walk(HLW)の問題点である探索効率の低さを解決出来たのかを議論する。HLWとの探索効率の比較には、UDG上でのターゲット探索効率のデータを用いる。5.3.5節では、HLWとNLWの一番基本的な戦略であるLWSを用いてターゲット探索効率を比較した。その結果、NLWはLWS戦略を適用した場合HLWよりもターゲット探索効率が向上している事が確認出来た。特に拠点帰還確率 α の値が大きくなるにつれHLWとNLWのStep数の差も広がる。本論文のターゲット探索問題は、シミュレーションの最初にターゲットがランダムなノードに配置され移動しない。そのため探索済みのノードを探索するほど問題が終了するまでのStep数が増える。HLWでは、拠点帰還の確率が高くなるほど拠点に戻るため拠点からの探索が増え、拠点周囲に存在するノードを再度探索する確率が高くなる。NLWにおいても拠点帰還確率が高くなるほどHLWと同様に拠点周囲の探索が増えるが、拠点が移動するため未探索のノードをHLWよりも探索しやすくなっている。そのため、 α の値が増えたとしてもターゲット探索効率が落ちにくいと考える。HLWとNLWのターゲット探索効率の比較によって、NLWではHLWの問題点であった探索効率の低さを解決出来た事を明らかにした。

次に応用として、DTN環境でのWSN間の通信を補助するメッセージフェリーのランダムルーティング手法として、NLWが有用なのかを議論する。6.1章では、Random Way Point(RWP)とノード全体へのメッセージ拡散率の比較を行う事でNLWのランダムルーティングとしての性能評価を行った。メッセージ拡散率の評価には、宛先を特定しないメッセージを持ったメッセージフェリーが他メッセージフェリーへのメッセージの複製とノードへの配送を行い、メッセージが配送されたノードの割合を比較する。これによりNLWのネットワーク全体への不特定多数に対するメッセージ拡散性能を評価出来る。RWPと拠点再配置戦略にCRPSを用いたNLWのメッセージ拡散率を比較した結果、特にStep数が低い時RWPの方がメッセージ拡散率に優れている。しかし、シミュレーション時間が伸びる(Step数が増える)とNLWとRWPのメッセージ拡散率の差は縮まる。また、 r に注目すると、NLWの方がRWPよりも r による性能への影響が大きかった。これはNLWの拠点回帰行動によって、 $r = 35$ の時、拠点への経路が少なくなる影響を受けたのだと考える。RWPは一定以上離れた場所に移動するため、1ウォークごとの探索効率が良かったのだと考える。また、メッセージフェリー数ごとのメッセージ拡散率の上昇幅はNLWの方が大きかった。これは、拠点周りの探索が得意なHLWの特徴を受け継いだNLWにおいて、メッセージフェリーごとに異なる範囲をカバー出来たためだと考える。本論文の応用問題としては、メッセージフェリーは電気自動車を想定しており、バッテリーの充電を必要とする。RWPは拠点に戻る動きを必要とせず、充電行動を行わずメッセージ拡散を行っている。本論文では、拠点に戻る充電行動を行いながらメッセージ拡散するNLWにおいて、RWPと同程度の

メッセージ拡散性能を確認し、NLWはメッセージフェリーのランダムルーティング手法として十分に有効性を持つ事を明らかにした。

続いて、NLWの拠点再配置戦略について議論する。本論文で提案したLWS、RPS、CRPSについて、5.3.6節では、メッセージ拡散効率による比較を行った。メッセージ拡散効率の比較では、計測した全ての結果においてLWSとCRPSがRPSよりも短いStep数でメッセージ拡散を終えた。

6.2章では、特定ノードへのメッセージ配送率とメッセージが到達するまでの遅延時間による比較を行った。メッセージ配送率は、LWS及びCRPSを拠点再配置戦略に用いたNLWがRPSを用いた場合よりも優れている。遅延時間に注目すると、移動の自由度が制限されている場合($r = 35$)、拠点遷移確率を高く($\gamma = 0.8$)設定したLWSが最も少ない遅延時間でメッセージを配送出来た。LWSでは拠点移動頻度を高くした場合、広域探索に効果的なLWの動きをする拠点移動が多くなり他の戦略よりも効果的に探索出来たのだろう。

メッセージ拡散効率、メッセージ配送率、遅延時間の結果をまとめると、今回提案した3つの戦略ではLWSが最も探索効率が良い事が明らかになった。探索効率だけを求めた場合、ランダムルーティング手法としては、 $LWS > CRPS > RPS$ の順番に有効である。そのため、特定ノードへのメッセージ配信にNLWベースのメッセージフェリーを用いる場合、現在提案されている戦略の中ではLWSを用いるべきである。ただし拠点の再配置方向が予測出来る点において、CRPSが有効になる場面もあるのではないか。

本論文のシミュレーションには、道路網のモデルとしてUnit Disk Graph(UDG)を用いた。ユークリッド平面と比較するとUDGは、移動の自由度が接続半径 r によって調整出来るため、移動の自由度による評価を簡単に行えた。しかし、UDG上ではエッジ上を移動してのみノード間の移動が行えないため、シミュレーションの際、許容誤差や移動方向へ接続エッジが無い場合を想定する必要があった。

またシミュレーションのパラメータとして、UDGの接続半径 r 、拠点帰還確率 α 、拠点遷移確率 γ を用いた。

接続半径 r について注目すると、 r が小さい場合、移動の自由度が低くなる。これは1つのノードに接続されるエッジの数が少なくなる事を示しており、1ホップで移動出来る距離が短くなりやすくなる。また、エッジの接続数は拠点位置にも影響を及ぼす。 $r = 35$ よりも $r = 50$ の時、今回計測した全ての問題において性能が高い事が確認出来た。これは、接続エッジが少ないノードが拠点位置になると帰還経路が制限されるため、 $r = 35$ の場合、探索済みのノードをたどる可能性が高くなるからである。 $r = 50$ では $r = 35$ に比べ、1つのノードに接続されるエッジが増え、同じノードから探索を開始する場合でも、方向 o が少しでも異なっていれば別のノードを選択出来る可能性が増える。更に、 r の増大によって接続されるエッジは大きく距離を移動出来る。そのため、同様のホップ数でもより遠くのノードに到達可能になる。

次に拠点帰還確率 α について注目する。 α の値が高いと全ての問題に対して、NLWの性能が落ちた。これは α の値が高くなると、1度のウォークで帰還する可能性が高くなり、拠点から始まる2度のウォークで同じ経路を通りやすくなるためだろう。

拠点再配置確率 γ の値が低いほど、NLWはHLWの動きに動きに近づく。そのため、メッセージ遅延時間、メッセージ配送率共に γ とメッセージフェリー数が少ない時全ての戦略に共通して性能が低い。これはHLWの動きの中で探索を行った範囲から拠点を移動する事が、探索効率の向上に関係している事を示す。

本研究では、CRPSやRPSにおいて、計算に用いる過去拠点の数を固定して計測を行っていたが、数によって動きが大きく変わる可能性が高く、複数のパターンで計測を行うべきである。例えば、RPSでは過去に拠点があった方向に戻らないため、計算に用いる拠点数が増えるほど拠点の移動先に指定出来る範囲が狭くなり、直線的に拠点を設置するだろう。また、グラフの端に到達した際に、グラフの中央側に過去拠点がなかった場合、中央側の拠点数を超えない限り、中央方向へ拠点

を設置する事が出来ない。反対に、計算に用いる数が少なくなるほど拠点の移動先に指定出来る範囲が広くなり、蛇行するように拠点を設置出来るようになるため、拠点位置に大きな差が出る事が予想出来る。

今後の展望としては、まずUDG上以外のフィールドで計測を行う事が必要だと考える。HLWやLWは元々ユークリッド平面上で定義されており、NLWもユークリッド平面上で定義する事でユークリッド平面上での先行研究とも比較する事が可能になるため、非常に重要である。また、UDG上での計測に関しても、災害時の道路網等を考えると動的にエッジの有無が変化したり、瓦礫等環境によってエッジ上を移動出来る速度が変わる事が想定される。今回のシミュレーションでは、 r による自由度の変化がNLWの性能に影響する事が明らかになったため、同様に移動速度によって行動が制限されるケースでもNLWの性能に影響が出る可能性が高く実験する意義は高い。そのような実験においては、Agentに速度を指定し、エッジに重みを設定する他、Agentには通信出来る範囲を設定し、移動の途中でもメッセージの交換等を行えるようにする必要がある。

次に複数Agentによる協調動作について考えると本論文では、同時にシミュレートする複数のAgentあるいはメッセージフェリーは一つのアルゴリズムや同じパラメータにしたがって移動を行っていた。そのため、別のアルゴリズムやパラメータを設定したグループを混ぜる事によって性能がどう変化するか計測出来ておらず、人流解析のような問題に適用出来るのか不明である。また、Agent同士の情報交換もメッセージのみに留められており、例えば拠点位置情報の共有は重要度が高い。拠点位置情報を共有する事により、探索出来ていない範囲を把握する事が容易になるためである。

本研究では、NLWの拠点再配置戦略はランダム性の高い3つの戦略を提案したが、探索を行う中でフィールドの情報が蓄積されると仮定すると、蓄積された情報を使って、より確実に探索効率を上げられるようなランダム性の低い戦略を考える事が出来る。例えば、ノードの接続エッジ数を収集するようなモデルを考えると、新しく拠点を移動する時に、接続エッジ数の多いノードを目指す事で、探索に向いている拠点位置を探る事が可能になる。

また、本論文では探索の効率に注目し、シミュレーションの際にメッセージのサイズやAgentの記憶容量を設定しなかった。しかし、実際のメッセージ配送には記憶容量の問題が付随する。そのため、メッセージ配送効率の面でNLWはメッセージフェリーのランダムルーティング手法として十分に有効だと明らかにしたが、記憶容量を考慮したケースに関して実験を行う必要がある。

Chapter 8

まとめ

本研究では、Nomadic Lévy Walk (NLW) 及び付随する拠点再配置戦略を提案した。また、メッセージフェリールーティングとして Nomadic Lévy Walk を適用し、カバー率、メッセージ拡散率、メッセージ配送率、遅延時間について評価を行った。まず本研究では、藤原らによって提案された Homesick Lévy Walk (HLW) とメッセージフェリーの組み合わせに着目した。Lévy Walk の一種である Homesick Lévy Walk では、Homesick Lévy Walk 同士の遭遇確率が人と人との遭遇確率に従うように設計されており、Lévy Walk (LW) との違いとして設定された拠点への回帰特性を持っている。Homesick Lévy Walk の元となる Lévy Walk は探索効率が良いという特徴を持つが、Homesick Lévy Walk では回帰確率とのトレードオフとなっている。この回帰特性により、人間や動物などのシミュレーションや、バッテリーなどで稼働する端末が燃料補給を行いながら長期的な稼働を行うなど様々な分野での応用が考えられる。

実際に、定期的に燃料補給が必要で探索を行う場面として、EV や UAV を用いた災害時の救助活動や復旧活動が研究されている。災害時の状況として、要救助者の探索や被害状況の確認、通信インフラが故障しており Delay Tolerant Network (DTN) 環境での通信補助等が考えられ、効率的な探索能力も必要となる。Homesick Lévy Walk では、拠点の位置が固定されているため、特に拠点位置から離れた位置において端末の燃料容量に探索効率が大きく左右されてしまう。しかし、Homesick Lévy Walk の探索効率が高ければ非常に有用であると考えられる。

そのため、本研究では回帰特性を保持しながら、探索能力が向上した Homesick Lévy Walk である Nomadic Lévy Walk を提案した。Nomadic Lévy Walk では、拠点を移動可能で燃料補給を行えるようなもの（例えば電源車）と仮定する事によって、効率的に探索を行える範囲を拡大した。また、NLW では、拠点を再配置する際に「拠点再配置戦略」に基づいて効率的な再配置を行う。これにより、様々な場面に適した再配置戦略を適用する事でよりよい探索を行う事が可能となる。

本研究では最初に、拠点位置を Lévy Walk に従い移動する事でフラクタルな探索を行う Lévy Walk Strategy (LWS)、過去拠点位置を保持し直近で探索していない方向を目指す Reverse Prevention Strategy (RPS)、過去拠点位置をクラスタ化する事によって範囲で探索していない箇所を探す Clustering Reverse Prevention Strategy (CRPS) の3戦略を提案した。

次にこれらの性能を評価するために、Unit Disk Graph (UDG) を用いたシミュレーションを行った。カバー率の計測では、複数の拠点再配置戦略を用い、移動の自由度が NLW のカバー率に与える影響について評価を行った。更に、応用事例として、DTN 環境での無線センサネットワーク上を通信を仲介するメッセージフェリーの動きとして NLW を用いた場合の評価を行った。この評価では比較対象としてランダムルーティングの Random Way Point (RWP) を用いた。DTN 環境では移動経路が遮断されたり、対象が想定された場所に無い可能性もあるため固定したルートでのルーティングは難しく、ランダムルーティングにも有効性がある。メッセージ配送能力の指標として、カバー率、メッセージ拡散率を評価した。これらの

値は、メッセージを受け取るために特に必要な能力である。RWP と比較した結果、十分な時間があれば、多くのノードの探索が行える事が分かった。

次に、メッセージ配送率、メッセージの遅延時間を評価した。メッセージフェリーはモバイルエンティティからメッセージを受け取り、宛先に配送する役割があるため、これらの能力はメッセージフェリーとして特に必要な性能である。各拠点再配置戦略によって比較した結果、LWS が最も少ない遅延時間でメッセージを配送可能であった。

これらの事から、メッセージフェリーのルーティング方法として Nomadic Lévy Walk は十分有効であると考ええる。また、本研究では、 α や γ の値は静的に設定していた。今後の課題として、実際に燃料の消費状況から α を変動させる、拠点周囲の探索が少ない状況では γ の値を低く抑えるなど、動的に行動を変える拠点再配置戦略を考える事で Nomadic Lévy Walk の応用性を向上させる必要があると考ええる。

References

- [1] Kemal Akkaya and Mohamed Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3):325–349, 2005.
- [2] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [3] Mariam Alnuaimi, Khaled Shuaib, Klaithem Alnuaimi, and Mohammed Abdel-Hafez. Data gathering in delay tolerant wireless sensor networks using a ferry. *Sensors*, 15(10):25809–25830, 2015.
- [4] Mariam Alnuaimi, Khaled Shuaib, Klaithem Alnuaimi, and Mohammed Abdel-Hafez. Ferry-based data gathering in wireless sensor networks with path selection. *Procedia Computer Science*, 52:286–293, 2015.
- [5] Stefano Basagni, Alessio Carosi, Emanuel Melachrinoudis, Chiara Petrioli, and Z Maria Wang. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. *Wireless Networks*, 14(6):831–858, 2008.
- [6] Muhammad Mukarram Bin Tariq, Mostafa Ammar, and Ellen Zegura. Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes. In *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, MobiHoc '06, pages 37–48. Association for Computing Machinery, 2006.
- [7] Andrew M. Edwards, Richard A. Phillips, Nicholas W. Watkins, Mervyn P. Freeman, Eugene J. Murphy, Vsevolod Afanasyev, Sergey V. Buldyrev, M. G. E. da Luz, E. P. Raposo, H. Eugene Stanley, and Gandhimohan M. Viswanathan. Revisiting lévy flight search patterns of wandering albatrosses, bumblebees and deer. *Nature*, 449:1044–1048, 2007.
- [8] Kairui Feng, Ning Lin, Siyuan Xian, and Mikhail V. Chester. Can we evacuate from hurricanes with electric vehicles? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86:102458, 2020.
- [9] Akihiro Fujihara and Hiroyoshi Miwa. Homesick lévy walk and optimal forwarding criterion of utility-based routing under sequential encounters. In *Proc. of the Internet of Things and Inter-cooperative Computational Technologies for Collective Intelligence 2013*, 2013.
- [10] Cong Hu, Zhi Li, Tian Zhou, Aijun Zhu, and Chuanpei Xu. A multi-verse optimizer with levy flights for numerical optimization and its application in test scheduling for network-on-chip. *PloS one*, 11(12):e0167341, 2016.
- [11] H. Koyama and A. Namatame. Comparison of efficiency of random walk based search and levy flight search. Technical Report 20, Information Processing Society of Japan, 2008. in Japanese.

- [12] H. Li, S. Qi, H. Jin, Z. Qi, Z. Zhang, L. Fu, and Q. Luo. Zigzag generalized lévy walk: the in vivo search strategy of immunocytes. *Theranostics*, 5(11):1275–1290, 2015.
- [13] Ying Li and Radim Bartos. A survey of protocols for intermittently connected delay-tolerant wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 41:411–423, 2014.
- [14] A. M. Reynolds. Truncated lévy walks are expected beyond the scale of data collection when correlated random walks embody observed movement patterns. *J. R. Soc. Interface*, 9:528–534, 2012.
- [15] Injong Rhee, Minsu Shin, Seongik Hong, Kyunghan Lee, Seong Joon Kim, and Song Chong. On the levy-walk nature of human mobility. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 19(3):630–643, June 2011.
- [16] Minsu Shin, Seongik Hong, and Injong Rhee. Dtn routing strategies using optimal search patterns. In *Proceedings of the third ACM workshop on Challenged networks*, pages 27–32, 2008.
- [17] Kenya Shinki and Naohiro Hayashibara. Performance evaluation of lévy walk on message dissemination in unit disk graphs. In *The 6th International Conference on Emerging Internet, Data & Web Technologies (EIDWT-2018)*, March 2018.
- [18] Kenya Shinki and Naohiro Hayashibara. Resource exploration using lévy walk on unit disk graphs. In *the 32nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2018)*, May 2018.
- [19] Kenya Shinki, Masahiko Nishida, and Naohiro Hayashibara. Message dissemination using lévy flight on unit disk graphs. In *the 31st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2017)*, Mar. 2017.
- [20] Robert R Sokal. A statistical method for evaluating systematic relationships. *Univ. Kansas, Sci. Bull.*, 38:1409–1438, 1958.
- [21] Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara. Message ferry routing based on nomadic lévy walk in delay tolerant networks. In *International Conference on Network-Based Information Systems*, pages 82–93. Springer, 2021.
- [22] Kouichirou Sugihara and Naohiro Hayashibara. Collecting data in sensor networks using homesick lévy walk. In *the 11th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2017)*, pages 779–786, Aug. 2017.
- [23] Razvan Udroi, Adrian Marius Deaconu, and Corina-Ştefania Nanau. Data delivery in a disaster or quarantined area divided into triangles using dtn-based algorithms for unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 21(11), 2021.
- [24] G. M. Viswanathan, V. Afanasyev, S. V. Buldyrev, E. J. Murphy, P. A. Prince, and H. E. Stanley. Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. *Nature*, 381:413–415, 1996.
- [25] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 5th ACM*

International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, pages 187–198. Association for Computing Machinery, 2004.

- [26] 西田 昌彦. グラフ上の lévy walk に関する研究. Master's thesis, 京都産業大学大学院 先端情報学研究科, 2 2016.
- [27] 檜原 茂. 罹災地における dtm 技術を用いた情報収集手法. In **第 57 回自動制御連合講演会**, pages 1052–1055. 計測自動制御学会, 2014.

研究業績

- Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara, "Message Ferry Routing Based on Nomadic Lévy Walk in Delay Tolerant Networks", In Proc. of the 24th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2021), pp. 82-93, 2021.
- Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara, "Message Ferry Routing Based on Nomadic Lévy Walk in Wireless Sensor Networks", In Proc. of the 35th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2021), pp. 436-447, 2021.
- Kenya Shinki, Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara, "Message broadcasting by opportunistic communication on unit disk graphs", *Evolutionary Intelligence*, 13(1), pp. 93-102, Springer, 2020.
- Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara, "Target exploration by Nomadic Lévy walk on unit disk graphs", *International Journal of Grid and Utility Computing*, 11(2), pp. 221-229, Inderscience, 2020.
- Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara, "Performance Evaluation of Nomadic Lévy Walk on Unit Disk Graphs Using Hierarchical Clustering", In Proc. of the 34th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2020), pp. 512-522, 2020.
- Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara, "Message Dissemination Using Nomadic Lévy Walk on Unit Disk Graphs", In Proc. of the 13th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS 2019), pp. 136-147, 2019.