The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	密なモバイルセンサネットワークにおける地理的粒度を考慮したデータ収集に関する研究
Author(s)	後藤, 啓介
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55847
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

密なモバイルセンサネットワークにおける
地理的粒度を考慮したデータ収集に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月　2016年1月

後 藤　啓 介

関連発表論文

1. 学会論文誌発表論文

1. 松尾和哉, 後藤啓介, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, “モバイルセンサネットワーク上の欠損データ再収集のためのエージェント制御方式,” 情報処理学会論文誌 (採録済).

2. 松尾和哉, 後藤啓介, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおけるセンサデータの傍受とダイアグラムを用いた効率的な境界線検出手法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 3, pp. 1107–1120 (2015 年 3 月).

3. Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T., and Nishio, S., “Data Gathering Using Mobile Agents for Reducing Traffic in Dense Mobile Wireless Sensor Networks,” Mobile Information Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 295–314 (Oct. 2013).

4. 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおける地理的粒度を考慮したデータ収集のためのエージェント制御方式,” 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 2, pp. 741–753 (2012 年 2 月).

2. 国際会議発表論文

1. Matsuo, K., Goto, K., Kanzaki, A., Hara, T., and Nishio, S., “A Study on Efficient Event Monitoring in Dense Mobile Wireless Sensor Networks,” Proceedings of IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS 2014), pp. 341–342 (Oct. 2014).

2. Matsuo, K., Goto, K., Kanzaki, A., Hara, T., and Nishio, S., “Overhearing-Based Efficient Boundary Detection in Dense Mobile Wireless Sensor Networks,” Pro-

ceedings of IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM 2014), pp. 225–234 (July 2014).

3. Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T., and Nishio, S., "A Mobile Agents Control Scheme for Multiple Sinks in Dense Mobile Wireless Sensor Networks," Proceedings of EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2013), pp. 52–65 (Dec. 2013).

4. Matsuo, K., Goto, K., Kanzaki, A., Hara, T., and Nishio, S., "Agent Redeployment and Missing Data Regathering in Mobile Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2013) pp. 100–109 (July 2013).

5. Matsuo, K., Goto, K., Kanzaki, A., Hara, T., and Nishio, S., "Data Gathering Considering Geographical Distribution of Data Values in Dense Mobile Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2013) pp. 445–452 (Mar. 2013).

6. Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T., and Nishio, S., "Data Gathering Using Mobile Agents in Dense Mobile Wireless Sensor Networks," Proceedings of International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2011) pp. 58–65 (Dec. 2011).

3. 論文著書

1. Matsuo, K., Goto, K., Kanzaki, A., Hara, T., and Nishio, S., "Data Aggregation and Forwarding Route Control for Efficient Data Gathering in Dense Mobile Wireless Sensor Networks," Modelling and Processing for Next Generation Big-Data Technologies (Book Series: Modelling and Optimization in Science and Technologies), Springer International Publishing, pp. 113–143 (Nov. 2014).

4. 国内会議発表論文（査読付）

1. 松尾和哉, 後藤啓介, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおけるセンサデータの傍受を用いた効率的な境界線検出手法,” 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS 2013) 論文集, pp. 236–243 (2013 年 12 月).

2. 松尾和哉, 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおけるデータ値の地理的分布を考慮したデータ収集方式,” 情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO 2012) シンポジウム論文集, pp. 2257–2265 (2012 年 7 月).

5. その他の研究会等発表論文

1. 松尾和哉, 後藤啓介, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおける観測値の時間的変化を用いた定期的な境界線検出手法,” データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2015), online (2015 年 3 月).

2. 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおける複数シンクを考慮したデータ収集方式について,” 電子情報通信学会研究報告 (データ工学研究会 DE2013-7), Vol. 113, No. 150, pp. 19–24 (2013 年 7 月).

3. 松尾和哉, 後藤啓介, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, “モバイルセンサネットワーク上のエージェントを用いたデータ収集における欠損データ再収集方式,” 情報処理学会研究報告 (マルチメディア通信と分散処理研究会), Vol. 2012-DPS-153, No. 2, pp. 1–8 (2012 年 11 月).

4. 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおける複数シンクのデータ収集条件を考慮したエージェント制御方式,”

データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2012), online (2012 年 3 月).

5. 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集のためのエージェント再配置方式について,” 電子情報通信学会研究報告 (データ工学研究会 DE2011-8), Vol. 111, No. 173, pp. 7–12 (2011 年 8 月).

6. 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式の性能評価,” データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2011), online (2011 年 2 月).

7. 後藤啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式,” 平成 22 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, CD-ROM (2010 年 9 月).

以上

内容梗概

近年の半導体技術および無線通信技術の発展により，小型で安価なセンサデバイスの開発が進み，無線センサネットワークおよびモバイルアドホックネットワークへの関心が高まっている．無線センサネットワークでは，対象領域に分散して配置された多数の端末が，センサ機能により環境情報をセンシングし，得られたセンサデータを無線通信を用いて収集する．モバイルアドホックネットワークでは，既存の通信インフラを必要とせずに端末同士で自律分散的にネットワークを構築する．最近では，無線センサネットワークとモバイルアドホックネットワークを統合し，センサ機能を搭載した移動端末により構成されるモバイルセンサネットワークが注目されている．

ユーザ参加型センシングは，モバイルセンサネットワークの代表的な応用例であり，歩行者などの街中にいる人々が持ち歩いている端末から気温や湿度といった環境情報を収集する．特に，テーマパークや繁華街などにおいては，多数の歩行者がユーザ参加型センシングに参加することで，領域内の任意の位置に対して，その位置をセンシング可能な端末が常に多数存在する．

本研究では，密なモバイルセンサネットワークにおいて効率的なデータ収集方式の実現を目的とする．密なモバイルセンサネットワークでは，アプリケーションが要求する地理的粒度を保証する必要最小限の端末のみからセンサデータを収集することが重要な課題となる．また，モバイルセンサネットワークを構成する端末のユーザ操作やバッテリ切れにより，端末のネットワークへの参入，脱退が頻繁に発生する．そのため，地理的粒度の保証に関わっていた端末のネットワーク離脱に対応することも必要となる．さらに，複数のアプリケーションが存在する場合，それらアプリケーションが要求するセンサデータの地理的粒度は互いに異なると考えられる．そのため，地理的粒度の異なる複数のデータ収集の要求に対応することも必要となる．

本論文では，本論文を通した課題として，密なモバイルセンサネットワークにおける取得精度の維持とトラヒック削減に取り組む．また，個別の研究課題として，端末の移動への対応，端末の離脱への対応，および複数シンクへの対応に取

り組み，各課題について，その課題を解決するデータ収集方式を提案する．さらに，シミュレーション実験により各提案方式の性能評価を行い，その結果，各提案方式が特に有効な環境をそれぞれ明らかにした．

本論文は，5 章から構成され，各章の内容は次の通りである．まず，第 1 章において，序論として研究の背景と目的について述べる．

第 2 章では，密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いた効率的なデータ収集方式を提案する．この方式は，アプリケーションが要求するデータ収集粒度に対応する各サブ領域において，ある端末にエージェントを配置する．そして，各エージェントに自律的にセンサデータを送信させることで，アプリケーション要求を満たす最小限のセンサデータのみを収集する．また，収集データの転送において，各エージェントを節点，シンクを根とする木構造ネットワーク（転送木）を構築する．この転送木に沿って，各節点でセンサデータを集約しながらシンクへセンサデータを送信することで，センサデータの転送で生じるトラヒックを削減する．また，シミュレーション実験による性能評価を行い，その結果，提案方式は，データ収集頻度が高い環境およびサブ領域が多い環境に特に適した方式であることが明らかになった．

第 3 章では，端末の予期しないネットワーク離脱が発生する環境において，端末のネットワーク離脱に伴って消失したエージェントを再配置する方式を提案する．この方式では，エージェントは観測周期毎に待ち時間を設定し，待ち時間以内にセンサデータの転送を完了できなかった場合，エージェントの消失が発生したものと判断して，消失したエージェントの再配置およびセンサデータの再送を行う．また，シミュレーション実験による性能評価を行い，その結果，提案方式は，低頻度でエージェントが消失する環境に特に適した方式であることが明らかになった．

第 4 章では，複数のシンクが存在する環境において，複数シンクのそれぞれが要求するデータ収集粒度を保証し，効率的にセンサデータを収集するエージェントの共通化方式を提案する．この方式では，まず，エージェント数が増加することを防ぐために，複数の観測位置をセンシングできる端末上にエージェントを共通化する．さらに，観測時刻が重複した場合，複数のシンクに同時にセンサデータを集約して送信することで，センサデータの転送で生じるトラヒックを削減す

る．また，シミュレーション実験による性能評価を行い，その結果，提案方式は，シンクの位置や観測位置がそれぞれ地理的に集中している環境に特に適した方式であることが明らかになった．

最後に第 5 章では，本論文の成果を要約したのち，今後の研究課題について述べ，本論文のまとめとする．

目 次

第 1 章　序章 **1**
1.1　研究背景 1
1.2　密なモバイルセンサネットワーク 2
1.3　研究内容 3
1.4　本論文の構成 5

第 2 章　地理的粒度を考慮したデータ収集のためのエージェント制御方式 **9**
2.1　まえがき 9
2.2　関連研究 10
2.2.1　密な無線センサネットワークにおけるデータ収集 11
2.2.2　疎なアドホックネットワークにおけるデータ収集 12
2.2.3　アドホックネットワークにおけるブロードキャストを用いた位置情報サービス 13
2.2.4　モバイル P2P システム 14
2.3　想定環境 15
2.3.1　観測領域と観測位置 15
2.3.2　ネットワーク構成 16
2.3.3　ジオルーティング 17
2.4　提案方式 18
2.4.1　エージェントの配置 19
2.4.2　センサデータの転送 21
2.4.3　エージェントの移動 22
2.5　性能評価 23
2.5.1　シミュレーション環境 23

2.5.2 観測周期の影響 26
2.5.3 サブ領域数の影響 30
2.5.4 端末数の影響 32
2.5.5 センサデータサイズの影響 35
2.5.6 性能評価のまとめ 38
2.6 むすび 39

第 3 章 取得精度維持のための消失エージェント再配置方式 41
3.1 まえがき 41
3.2 関連研究 42
3.3 想定環境 43
3.4 提案方式 43
3.4.1 センサデータの再転送およびエージェントの再配置 43
3.4.2 エージェントの移動 46
3.5 性能評価 47
3.5.1 シミュレーション環境 47
3.5.2 観測周期の影響 49
3.5.3 端末離脱の影響 52
3.5.4 サブ領域数の影響 55
3.5.5 センサデータサイズの影響 57
3.5.6 性能評価のまとめ 60
3.6 むすび 60

第 4 章 複数シンクのデータ収集効率化のためのエージェント共通化方式 63
4.1 まえがき 63
4.2 関連研究 64
4.3 想定環境 65
4.4 提案方式 65
4.4.1 エージェント配置 66
4.4.2 エージェント移動 70

4.4.3 センサデータ転送 70
4.5 性能評価 73
4.5.1 シミュレーション環境 74
4.5.2 シンクの台数の影響 76
4.5.3 観測位置間の距離の影響 79
4.5.4 シンク間の距離の影響 81
4.5.5 性能評価のまとめ 84
4.6 むすび 84

第 5 章 結論 **87**
5.1 本論文のまとめ 87
5.2 検討課題 88

謝辞 **91**

第1章　序章

1.1　研究背景

近年の半導体技術および無線通信技術の発展により，小型で安価なセンサデバイスの開発が進み，無線センサネットワークへの関心が高まっている [4,41,61,67]. 無線センサネットワークでは，対象領域に分散して配置された多数の端末が，センサ機能により環境情報をセンシングし，得られたセンサデータを無線通信を用いて収集する．一方，無線通信技術の発展と計算機の小型化や高性能化に伴い，ルータ機能をもつ移動端末のみで一時的な無線ネットワークを形成するモバイルアドホックネットワークへの関心が高まっている [2, 26, 27, 33]．モバイルアドホックネットワークは，既存の通信インフラを必要とせずに端末同士で自律分散的にネットワークを構築できる．最近では，無線センサネットワークとモバイルアドホックネットワークを統合し，センサ機能を搭載した移動端末により構成されるモバイルセンサネットワークが注目されている [8, 37, 51, 52].

ユーザ参加型センシングはモバイルセンサネットワークの代表的な応用例である．ユーザ参加型センシングでは，歩行者などの街中にいる人々が持ち歩いている端末から気温や湿度といった環境情報を収集する．このように，ユーザ参加型センシングは，センシングのための専用端末の設置やメンテナンスを必要とせずにセンサデータを収集できるため，環境モニタリングなどへの応用が期待されている [11, 31].

一般に，ユーザ参加型センシングは，LTE や WiMAX といった通信インフラを用いたセンサデータ収集を想定している．しかし，多数の既存のアプリケーションが通信インフラの有限な通信帯域を共用しているため，ユーザ参加型センシングが大量のトラヒックを生成して，通信インフラに投入することは好ましくない.

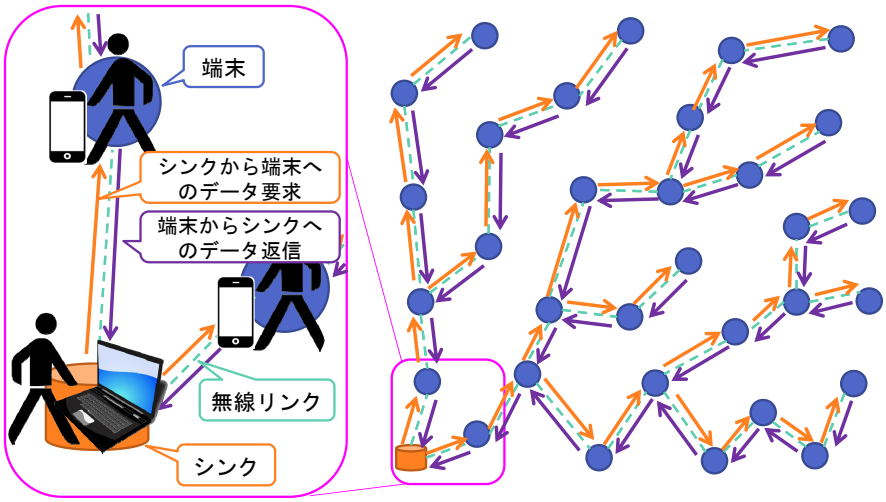

図 1.1: モバイルセンサネットワークにおけるセンサデータ収集の例

そのため，通信インフラを介さないセンサデータ収集の手段として，端末間の無線通信によりセンサデータを収集するモバイルセンサネットワークが注目されている [6, 13, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 56]．ここで，無線通信であってもセンサデータ収集に支障が出ない範囲のトラヒック量，すなわち，通信帯域が枯渇してしまうことのないトラヒック量に抑える必要がある．さらに，端末のバッテリが有限であることから，端末のバッテリ節約のため，トラヒックは少ないほど望ましい．

1.2　密なモバイルセンサネットワーク

モバイルセンサネットワークにおけるセンサデータ収集の例を図 1.1 に示す．この図では，ノート PC（シンク）と複数のスマートフォン（端末）が無線で接続し，ネットワークを形成している．シンクは，アプリケーションが要求するセンサデータを収集するために，無線リンクを介して各端末へデータ要求メッセージを送信する．シンクと直接接続している端末は，データ要求メッセージを直接受信し，シンクと直接接続していない端末は，シンクとの間に存在する端末の中継によってデータ要求メッセージを受信する．データ要求メッセージを受信した各端末は，自身が搭載しているセンサデバイスを使用してセンシングを実行し，得られたセン

サデータをシンクへ返信する．シンクは自身と直接接続している端末から返信メッセージを受信する．また，シンクと直接接続していない端末の返信メッセージは，データ要求メッセージと同様に中継によって，シンクへと転送される．

ここで，ユーザ参加型センシングを利用する気象観測などのアプリケーションは，ある領域を対象とした 100[m] 四方単位での気温のモニタリングといった，地理的に一定の粒度でセンサデータを要求するものが多いものと考えられる．本論文では，これらすべての観測位置のセンシングを保証することを「地理的粒度を保証する」と表現する．一方，テーマパークなどの多数の歩行者がいる場所においては，端末が多数存在すると考えられるが，仮に対象領域内のすべての端末からセンサデータを収集すると，過剰にセンサデータを集めることとなり，通信帯域や端末のバッテリを浪費してしまう．本研究では，領域内の任意の位置に対して，センシングした場合にその位置と同じ結果が得られる地理的範囲内に常に複数の端末が存在するモバイルセンサネットワークを密なモバイルセンサネットワークと呼ぶ．この問題を解決するために，アプリケーションが要求するすべての観測位置のセンシングを保証する，すなわち地理的粒度を保証する必要最小限の端末のみからセンサデータを収集することが望まれる．

1.3 研究内容

本論文では，トラヒックを削減しつつ，取得精度を維持することを目的として，密なモバイルセンサネットワークにおけるデータ収集方式について議論する．具体的には，通信量の削減と取得精度の維持を共通の課題として，三つの研究課題に取り組む．

- 端末の移動への対応

  密なモバイルセンサネットワークでは，地理的粒度を保証する必要最小限の端末のみからセンサデータを収集することが望まれる一方で，端末は自由に移動するため，要求された地理的粒度を同じ端末で継続して保証することはできない．そこで，地理的粒度を保証する必要最小限の端末のみからセンサ

データを収集する単純な方法として，観測周期毎に，シンクがセンシングおよびセンサデータの返信を行う端末を決定する方法が考えられる．この場合，シンクはこれらの端末と要求メッセージおよび返信メッセージを交換することでセンサデータを収集する．しかし，シンクと端末がネットワーク的に離れていた場合，このメッセージ交換にトラヒックが発生する．そこで，エージェントを用いた効率的なデータ収集方式を提案する．ここでエージェントとは，端末上で自律的に動作するアプリケーションプログラムである．この方式は，各サブ領域内の端末にエージェントを配置し，各エージェントに自律的にセンサデータを送信させることで，アプリケーション要求を満たす最小限のセンサデータのみ収集する．また，センサデータの転送において，各エージェントを節点，シンクを根とする木構造ネットワーク（転送木）を構築し，この転送木に沿って，各節点でセンサデータを集約しながらシンクへセンサデータを送信することで，センサデータの転送で生じるトラヒックを削減する．

- 端末のネットワーク離脱への対応

  密なモバイルセンサネットワークを構成する端末は，端末のバッテリ切れ，また端末のユーザによる操作（例えば，電源オフ）等を原因として，予期しないネットワーク離脱を行うことがある．エージェントを用いたデータ収集方式においては，ネットワークを離脱した端末上でエージェントが動作していた場合，そのエージェントは消失してしまう．エージェントが消失した状態では地理的粒度を保証できないため，消失したエージェントの検出および再配置が必要となる．そこで，データ収集の効率性を維持しつつ端末のネットワーク離脱に対応するエージェント再配置方式を提案する．この方式では，エージェントは観測周期毎に待ち時間を設定し，待ち時間以内にセンサデータの転送を完了できなかった場合，エージェントの消失が発生したものと判断して，消失したエージェントの再配置およびセンサデータの再送を行う．

- 複数シンクへの対応

  複数のシンクが，同種のデータを異なる地理的粒度で収集する場合，前述の

方法を単純適用すれば，各シンクがそれぞれエージェントを配置して，独立してセンサデータを収集してしまう．したがって，同一のセンサデータであっても複数の端末および転送経路から集めてしまい，無駄なトラヒックが発生する．そのため，観測周期や地理的粒度といったデータ収集の条件が異なる複数のシンクがセンサデータを収集する環境において，効果的にトラヒックを削減できない．そこで，複数シンクのそれぞれが要求する地理的粒度を保証し，効率的にセンサデータを収集するデータ収集方式を提案する．この方式では，まず，エージェント数が増加することを防ぐために，複数の観測位置をセンシングできる端末上にエージェントを共通化する．さらに，観測時刻が重複した場合，複数のシンクに同時にセンサデータを集約して送信する．

1.4 本論文の構成

本論文は，5 章から構成され，本章以降の内容は次の通りである．

第 2 章では，端末の移動に対して地理的粒度を保証するためのトラヒックを削減するため，密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式を提案する．この方式では，シンクは各観測位置付近に存在する端末へエージェントを配置する．配置された各エージェントが，自身の担当する観測位置をセンシング可能なように端末間の移動を繰り返すことで，アプリケーションが要求する地理的粒度を継続的に保証する．また，観測領域の上下端に位置する観測位置を担当するエージェントを転送木上の葉として，各エージェントが転送木上の子から受信したセンサデータと自身のセンサデータを集約し，転送木上の親へ送信することでデータ収集のトラヒックを削減する．また，シミュレーション実験による性能評価を行い，観測周期等を変化させることで，提案方式が適する環境を検証した．検証結果として，提案方式は，データ収集頻度が高い環境およびサブ領域が多い環境に適しており，一方で，データ収集頻度が低い環境およびサブ領域が少ない環境では，端末間の移動で増加するトラヒックの影響が大きいために適さないことが明らかになった．

第 3 章では，端末の予期しないネットワーク離脱が発生する環境において，端

末のネットワーク離脱に対して取得精度を維持するため，データ収集の効率性を維持しつつ端末のネットワーク離脱により消失したエージェントを再配置する方式を提案する．この方式では，エージェントおよびシンクは，センサデータの収集タイミングから一定時間経過した時点で，センサデータを受信できていない各エージェントへセンサデータの再送を要求する．さらに，エージェントおよびシンクは，センサデータの再送要求後，一定時間以内に応答のなかったエージェントが担当する観測位置へエージェントの再配置を行う．センサデータの再送を要求されたエージェントおよび再配置されたエージェントがセンサデータを返信することにより，エージェント消失時のデータ収集が可能となる．また，シミュレーション実験による性能評価を行い，端末のネットワーク離脱確率等を変化させることで，提案方式が適する環境を検証した．検証結果として，提案方式は，低頻度でエージェントが消失する環境に適しており，一方で，高頻度でエージェントが消失する環境およびデータ収集頻度が低い環境では，消失したエージェントの再配置で増加するトラヒックの影響が大きいために適さないことが明らかになった．

第4章では，複数のシンクが存在する環境において，複数シンクのデータ収集に対して地理的粒度の保証およびデータ転送のトラヒックを削減するため，複数シンクの観測範囲を保証し，効率的にセンサデータを収集するエージェント共通化方式を提案する．この方式では，エージェントが観測位置へ配置される際，既にその観測位置をセンシング可能なエージェントが存在している場合，エージェントの配置を中止し，既存のエージェントが自身が担当する観測位置に加えて，配置を中止したエージェントの観測位置を担当する．複数の観測位置を担当するエージェントが，それらすべてをセンシング可能な地点に留まり，観測位置ごとにセンサデータを送信する代わりに，複数の観測位置のデータとして有効なセンサデータ1つを送信することで，データ収集で生じるトラヒックを削減する．また，シミュレーション実験による性能評価を行い，シンクの台数等を変化させることで，提案方式が適する環境を検証した．検証結果として，提案方式は，シンクの位置や観測位置がそれぞれ地理的に近い環境に適しており，一方で，シンクの位置や観測位置が地理的に遠い環境では，エージェントやセンサデータの共通化が行われにくくなるために適さないことが明らかになった．

最後に第 5 章では，本論文の成果を要約したのち，今後の研究課題について述べ，本論文のまとめとする．

第 2 章は文献 [17, 19, 20, 23] で公表した結果に，第 3 章は文献 [18, 24] で公表した結果に，第 4 章は文献 [22, 25] で公表した結果に基づき論述する．

第2章　地理的粒度を考慮したデータ収集のためのエージェント制御方式

2.1　まえがき

テーマパークなどの多数の歩行者がいる場所においては，端末が多数存在した場合に，密なモバイルセンサネットワークが構築される．一方，アプリケーションの観点からは，多数の同じセンサデータは役に立たず，限られた通信帯域を浪費してしまう．むしろ，多くの場合，アプリケーションは，100 [m] ×100 [m] の領域毎のセンサデータなどといった，地理的にある一定の粒度のデータを要求する場合が多いものと考えられる．このような環境では，シンクがすべての端末からセンサデータを収集した場合，通信帯域と端末のバッテリが浪費される．この問題を解決するために，アプリケーションが要求する地理的粒度を保証する必要最小限の端末のみからセンサデータを収集することで，センサデータの収集におけるトラヒックを削減することが望まれる．本研究では，アプリケーションがグリッド状の観測位置を指定することを想定しており，これらすべての観測位置のセンシングを保証することを「地理的粒度を保証する」と表現する．

ここで，端末は自由に移動するため，要求された地理的粒度を同じ端末で継続して保証することはできない．これを解決する最も単純な方法としては，観測周期毎に，シンクがセンシングおよび観測値，すなわちセンサデータの返信を行う端末を決定する方法が考えらえる．この方法では，シンクはこれらの端末と要求メッセージおよび応答メッセージを交換することでセンサデータを収集する．しかし，シンクと端末がネットワーク的に離れていた場合，このメッセージ交換に

トラヒックが発生する．

そこで本章では，密なモバイルセンサネットワークにおいて，端末の管理をエージェントに行わせることにより，効率的にセンサデータを収集する手法を提案する．エージェントは，端末上で自律的に動作し，端末間を移動するアプリケーションプログラムである．提案方式では，エージェントはシンクによって生成され，要求された地理的粒度によって決定される，観測位置付近の端末に配置される．各エージェントは，端末の移動を受けて観測位置に最も近い端末へと移動し，観測位置付近に留まり続ける．観測周期毎に，エージェントが動作している端末は，センシングを行い，センサデータをシンクへ送信する．エージェントが，センシングおよびセンサデータの転送を制御することで，データ収集におけるトラヒックを削減できる．

以下では，2.2 節で関連研究を紹介する．2.3 節で本章の想定環境を示し，2.4 節で提案方式について述べる．2.5 節でシミュレーション実験の結果を示す．最後に 2.6 節で本章のまとめと課題について述べる．

2.2　関連研究

無線センサネットワークおよびモバイルアドホックネットワークの分野において，本研究と同様に端末間の無線通信によって構築されるネットワークを扱った既存研究が多数存在する [9,10,12,28,36,42,43,44,45,46,47,50,55,57,60,63,64,65,66,69,70].

本研究は，無線センサネットワークの研究分野における，多数の端末がネットワークを構築する密な無線センサネットワークの研究に位置づけられる．密な無線センサネットワークの既存研究では，固定端末を想定しており，本研究は端末が自由に移動する環境を想定している点でそれらの既存研究と異なる．

本研究では，収集対象であるセンサデータの発生地点が地理的に固定である環境を想定しており，同様の環境を想定した既存研究が，疎なアドホックネットワークの研究にある．疎なアドホックネットワークでは，端末とシンクがネットワーク的に分断状態にあり，地理的に端末とシンクの間に存在する，移動型端末を経由してデータを収集する．

提案方式では，エージェントを観測位置に留まらせることで，端末の移動に対して地理的粒度を保証しており，データを地理的に固定させるという点で類似のアプローチをとった既存研究が，アドホックネットワークにおける位置情報サービスの研究およびモバイル P2P システムの研究にある．

本節では，これらの既存研究と本研究の関連性について述べ，本研究の位置づけを明らかにする．

2.2.1 密な無線センサネットワークにおけるデータ収集

密な無線センサネットワークにおけるデータ収集に関する既存研究を紹介する．

文献 [28,43,45] では，端末間に階層構造を設けてデータを収集する階層的なデータ収集方式を提案している．これらの文献の方式では，まず，各端末に 2 階層以上からなる階層のいずれかの層を割り当てる．そして，データ収集時に，各端末は自身より下位層の端末から受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，自身より上位層の端末へ送信する．これにより，データ収集時に発生するパケット数およびパケットのサイズを減らし，トラヒックを削減している．

文献 [12, 50, 64] では，エージェントを用いたデータ収集方式を提案している．エージェントを用いたデータ収集は，端末数の増減に対するスケーラビリティが高く，動的ネットワークにおける負荷分散が可能である．また，エージェントはセンサデータを保持しながら移動するため，一時的なネットワーク障害が発生しても，センサデータが失われず，信頼性が高い．さらに，エージェントがセンサデータを収集することで，パケット衝突などによってセンサデータが失われることを防ぎ，取得精度を向上できる．

文献 [10, 70] では，無線センサネットワークにおいて，トポロジ情報やルーティングテーブルの代わりに端末間の位置関係を用いたルーティング手法を提案している．これらの文献の手法では，端末がシンクにデータパケット，つまりセンサデータを送信する場合，まずシンクの位置情報を添付した RTS パケットをアクティブ状態の隣接する端末へブロードキャストする．RTS パケットを受信した各端末は，自身とシンクの距離に基づいて自身の優先度を決定し，優先度の情報を添付

した CTS パケットを返信する．このときに設定される優先度は，シンクとの距離が近いほど高く設定される．RTS パケットを送信した端末は，最も優先度の高い CTS パケットを返信した端末へデータパケットを送信する．これにより，少ないホップ数で効率的にデータパケットをシンクへ送ることができる．

文献 [9,63,65] では，観測領域内の任意の位置に対して，少なくとも 1 台の端末がセンシングを保証している環境を想定し，領域全体のカバレッジを保証するネットワーク構築手法を提案している．これらの文献の手法では，各端末は隣接端末と互いの位置情報を交換し，自身がセンシング可能な領域内について，少なくとも 1 台の端末がセンシングするように，自身の状態をアクティブまたはスリープに切り替える．アクティブ状態の端末の端末からセンサデータを収集することで，領域全体のカバレッジを保証すると共に，スリープ状態の端末の通信およびセンシング機能を一時的に停止することで，無駄な電力消費を抑え，端末のバッテリ切れによるネットワーク分断の発生を遅らせている．

これらの既存研究では，端末が密に存在している環境における効率的なデータ収集の実現を目的としている点で本研究と類似している．また，データ収集のトラヒックを削減するために，必要最小限のセンサデータのみを収集することや，シンクへのデータ転送時にセンサデータを集約することなどのアプローチは，提案方式と共通している．一方で，端末が移動しないことを想定している点で，本研究と異なっており，これらの既存研究で提案されている手法では，本研究の課題である，端末が移動する環境においてアプリケーションが要求する地理的粒度を継続して保証することは困難である．

2.2.2　疎なアドホックネットワークにおけるデータ収集

次に，疎なアドホックネットワークにおけるデータ収集に関する既存研究を紹介する．疎なアドホックネットワークでは，端末とシンクがネットワーク的に分断状態にあり，地理的に端末とシンクの間に存在する，移動型端末を経由してデータを収集する．

文献 [55] では，MULE と呼ばれる移動体を用いた，データ収集方式を提案して

いる．MULE には，歩行者や自動車，農場における家畜などが該当し，これらの移動体は，端末から受信したデータを保持する．シンクの通信範囲内に入った MULE は，保持しているセンサデータをシンクへ送信し，これによりシンクはセンサデータを取得できる．文献 [57] では，複数の移動型端末を経由して，端末からシンクへセンサデータを転送するデータ収集方式を提案している．端末からセンサデータを受信した移動型端末は，一定の確率で，隣接する移動型端末にセンサデータの複製を転送する．いずれかの移動型端末の通信範囲内にシンクが入った場合，その移動型端末は保持しているセンサデータをシンクへ送信し，センサデータの転送が完了する．文献 [69] では，シンクまたは移動型端末が定められた経路を移動していることを想定し，センサデータを保持する端末の移動経路およびビーコンを制御することで，効率的にセンサデータを転送する方式を提案している．文献 [47] では，文献 [55] を拡張し，都市において，一般ユーザの持つ携帯端末を MULE としてセンサデータを収集する方式を提案している．携帯端末は IEEE802.11[1] や Bluetooth[2] を用いて通信を行い，無線端末からセンサデータを受信する．センサデータを保持する携帯端末は，インフラへのアクセスが可能な領域に移動した時点で，センサデータをサーバへアップロードする．携帯端末がインフラへの接続状態に関わらず，端末のセンサデータを中継することで，インフラが利用できない領域に設置した端末からのデータ収集を容易にしている．

これらの研究は，収集対象であるセンサデータの発生地点が地理的に固定である点において本研究の想定と類似しているが，端末の移動が既知であったり，制御可能であることを想定している点で本研究と異なる．

2.2.3 アドホックネットワークにおけるブロードキャストを用いた位置情報サービス

アドホックネットワークにおける位置情報サービスに関する研究では，各地で発生した情報をその情報の発生位置周辺に存在する端末に保持させることにより，情報を端末の移動から切り離し，物理的な位置に継続的に存在させる方式が提案

[1] http://grouper.ieee.org/groups/802/11/
[2] http://www.bluetooth.com/

されている．文献 [44] では，情報生成端末によって設定された期間，特定領域に対して繰り返し情報を配信する方式を提案している．文献 [66] では，配布端末によって生成された，位置依存情報を付近の移動型端末へ配布するサービスを想定し，端末上で自律的に動作するプログラムであるエージェントを用いた方式を提案している．エージェントは端末間を移動することにより，特定の領域に長時間にわたって存在し続け，データの収集および提供を行う．文献 [60] では，特定領域内において，情報の複製を繰り返しブロードキャストすることにより，特定領域内の端末間で情報を共有する方式を提案している．

これらの研究では，端末が移動する環境においてデータを地理的に固定させる点において，提案方式のアプローチであるエージェントを観測位置に留まらせる点と類似しているが，データをその地点の近傍にのみ提供しており，観測位置から離れたシンクへのデータ送信を想定する本研究とは異なる．

2.2.4　モバイル P2P システム

最後に，モバイル P2P システムに関する既存研究を紹介する．文献 [36] では，移動端末が密に存在する環境で，データを地理的に固定させることで，効率的にデータにアクセスする方式を提案している．この方式では，データに対応する座標から通信半径の 1/2 の距離内にいる端末がそのデータを保持するように，端末間でデータを交換する．これにより，データに対応する座標への，位置情報に基づくマルチホップ通信によって，データへのアクセスを保証している．文献 [42] では，モバイルファイル共有システムのための P2P に基づく分散文書検索サービスを提案している．この方式では，文書を検索するクエリが転送される際，クエリを転送する端末が自身の保持するクエリに該当する文書の情報をクエリに添付することにより，同一の文書が複数の端末から返信されることを防いでいる．文献 [46] では，移動端末がホスト，つまりインターネットにアクセスしている端末にアクセスできない状態の場合，無線マルチホップ通信によってホストと接続することでインターネットにアクセスする方式を提案している．この方式では，インターネットにアクセスできない移動端末が，自身が設定した一定の間隔でクエリ

を配布する．このクエリには，クエリを配布する移動端末がアクセスしたい URL や，その移動端末の MAC アドレスなどが含まれる．このクエリを受信したホストは，自身がクエリによって要求されたインターネットにアクセスできるかどうかを調べ，アクセスできるなら，クエリの配布元の移動端末へメッセージを送信し，クエリの配布元の移動端末が，そのホストを介してインターネットにアクセスできるようにする．

これらの研究では，インターネットあるいは端末が保持する既存データへのアクセスを想定しており，アプリケーションが要求する地理的粒度を保証したデータ収集を想定する本研究とは異なる．ただし，文献 [36] におけるデータを特定位置の周辺に留まらせる方式は，本研究におけるエージェントを観測位置に留まらせる方式と類似したアイデアに基づいている．

2.3 想定環境

本章では，一般ユーザの携帯する無線通信機能を搭載した移動型センサ端末が構成する，密なモバイルセンサネットワークを想定する．端末は，温度や光などの物理現象の定期的な観測，すなわちセンシングを行い，互いに無線マルチホップ通信で接続している．アプリケーションの要求に基づいて，シンクは定期的に，観測領域をある一定の地理的粒度を保証するように観測する．具体的には，観測のタイミングで，地理的粒度から決定される観測位置付近に位置する端末からセンサデータを収集する．

2.3.1 観測領域と観測位置

対象とする観測領域は縦横が M:N の整数比となる 2 次元平面を想定する．アプリケーションは，$k^2 \cdot M \cdot N (k = 1, 2, \cdots)$ の整数値として，地理的粒度を指定する．シンクは観測領域を $k \cdot M \times k \cdot N$ の格子状のサブ領域に分割し，$k^2 \cdot M \cdot N$ 個あるサブ領域の各々の中心点をセンシング対象となる観測位置と定める (図 2.1).

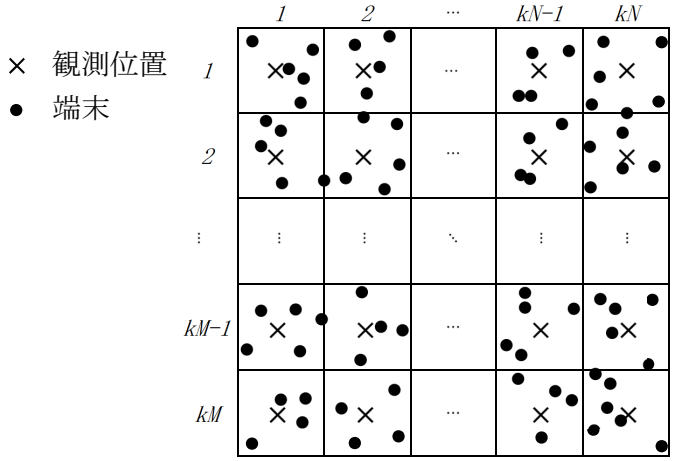

図 2.1: 観測領域と観測位置

2.3.2　ネットワーク構成

先述のように，一般ユーザの携帯する移動型センサ端末によって構成されるモバイルセンサネットワークを想定する．シンクは端末間で構成される無線アドホックネットワークを用いてセンサデータを収集する．各端末の無線通信範囲は等しく，半径 r とする．各端末は GPS あるいはそれに類する測地装置を備えており，位置情報に基づくマルチホップ通信，すなわち 2.3.3 項で述べるジオルーティングを可能とする．位置情報は経度と緯度で表され，観測領域全体を表す M:N の矩形領域のマップは，すべての端末およびシンクが共有しているものとする．また，地理的粒度を決定する値 k はアプリケーションによって指定され，シンクのみが知っているものとする．端末は初期状態では k の値を知らないが，シンクから k の値を受け取ることで，シンクと同様にサブ領域を一意に計算できるようになる．

各端末は領域を自由に移動するが，シンクは，観測領域内で固定されているものとする．端末がセンシングすることで得られる値は，端末の位置から一定距離内のセンサデータとして有効とし，これを端末のセンシングの有効距離と呼ぶ．また，領域内には多数の端末が存在し，すべての観測位置について，その観測位置との距離がセンシングの有効距離内である，すなわちその観測位置をセンシング可能な端末が常に複数存在するものとする．

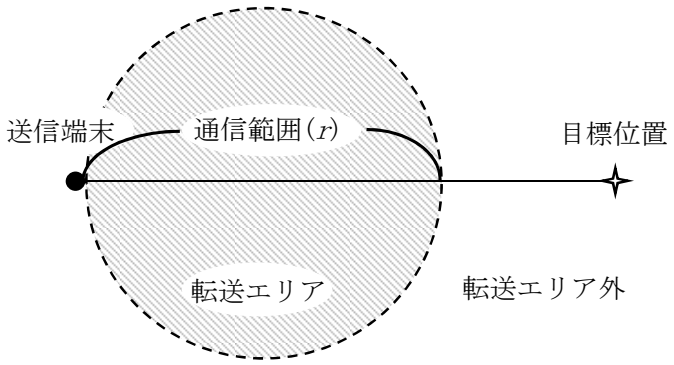

図 2.2: 転送エリアの例

2.3.3 ジオルーティング

本研究で収集すべきデータは，端末ではなく地理的に指定されるため，端末ではなく特定の目標位置までデータを転送するルーティング（ジオルーティング [29]）が必要になる．仮に，特定の端末までデータを転送するルーティングを用いたとしても，その上層で特定の目標位置までデータを転送する処理が必要になり，さらに端末の移動により目標位置へ近づく経路は常に変化し，これに対応するにはテーブルを頻繁に更新しなければならない．本研究の目的であるトラヒック削減の観点から，データ収集方式に関わらず，端末はジオルーティングを備えているものとする．具体的には，文献 [29] で提案された手法をもとにした，ジオルーティングプロトコルを備えているものとする．

このプロトコルでは，目標位置および送信端末の位置情報からなるパケットヘッダを用いて転送処理を行う．送信すべきデータパケットを持つ発信端末は，目標位置および自身の位置情報をパケットヘッダに書き込み，隣接端末へパケットをブロードキャストする．パケットの受信端末は，パケットヘッダ内の目標位置および送信端末の位置情報から，自身が転送エリアにいるかどうかを判定する．ここで，転送エリアとは，送信端末よりも目標位置に近く，かつ転送エリア内の端末が互いに直接，すなわち 1 ホップで通信可能な領域である．図 2.2 に転送エリアの例を示す．転送エリアは端末の通信半径 r を直径とする斜線領域で表される．

転送エリア内にいる端末は，待ち時間を設け，待ち時間内に他の端末からのパケットの転送が確認できなかった場合，自身がパケットを転送する．待ち時間（WT）

は次式で与えられ，距離 P は目標位置により近い端末ほど，小さい値をとる．

$$WT = Max_delay \cdot (\frac{r-P}{r}) \tag{2.1}$$

ここで Max_delay は待ち時間の最大値である．

このようにすることで，転送エリア内において目標位置に最も近い端末が最初にパケットを転送でき，さらに，一つのパケットが複数の経路で送信されるのを防ぐことができる．転送エリア内の他の端末は，このパケットを検知できるため，転送処理を中止する．同様の処理を繰り返すことにより，パケットは目標位置付近へと転送される．

送信端末が目標位置から $r/2$ 以内に存在する場合，パケットを受信した端末は，パケットを転送する代わりに ACK を送信する．目標位置から $r/2$ 以内の端末が送信したパケットは，目標位置を中心とする半径 $r/2$ 以内のすべての端末が検知できるため，目標位置，すなわち観測位置に最も近い端末を把握することができる．送信端末自身は，他の ACK を受信しなかった場合，自身が最も近い端末と判断できる．

2.4　提案方式

本章の提案方式である，端末の移動に対して地理的粒度を保証するためのトラヒックを削減することを目的とした，エージェントを用いたデータ収集方式について述べる．提案方式は，各サブ領域内の端末にエージェントを配置し，各エージェントに自律的にセンサデータを送信させることで，必要最小限の端末で地理的粒度を保証する．また，センサデータの転送において，各エージェントを節点，シンクを根とする木構造ネットワーク（転送木）を構築し，この転送木に沿って，各節点でセンサデータを集約しながらシンクへセンサデータを送信することで，センサデータの転送で生じるトラヒックを削減する．

提案方式では，まずシンクによるエージェントのデータの生成，および配置が行われる．シンクは，2.3.1 項で述べた方法で決定した $k^2 \cdot M \cdot N$ 個の観測位置を目標位置として，エージェントデータを送信する．その後，2.4.1 項の手順に従っ

表 2.1: エージェントデータの転送方向

エージェントデータの送信元	エージェントデータの転送方向
シンク	上，下，左，右
右隣のサブ領域	上，下，左
左隣のサブ領域	上，下，右
下隣のサブ領域	上
上隣のサブ領域	下

て，観測位置に最も近い端末はエージェントデータを受信し，エージェントを起動する．

エージェントは，2.4.2 項の方法に従って，センサデータをシンクへと転送する．また，エージェントが動作中の端末が観測位置から離れた場合，2.4.3 項の方法に従って，エージェントは観測位置に最も近い端末へと移動する．

2.4.1 エージェントの配置

提案方式は少ないトラヒックでネットワーク内にエージェントを配置する．具体的には，シンクは観測位置間の地理的関係に基づいて作成される，転送木に沿ってエージェントデータを送信する．以下では，エージェントを配置するためのシンクおよびエージェントの動作について述べる．

1. シンクは，エージェントデータを生成し，自身が存在するサブ領域の観測位置へ，2.3.3 項の方法に基づいてエージェントデータを送信する．

2. 観測位置に最も近い端末は，エージェントデータを受信した後，エージェントを起動する．初期動作として，エージェントは隣接サブ領域の観測位置にエージェントデータを再転送する．表 2.1 は，格子状のサブ領域にエージェントデータを転送する際の方向を表している．例えば，エージェントデータがシンクから送られた場合，エージェントは上，下，左，右，のサブ領域にエージェントデータを転送する．左隣のサブ領域内のエージェントから送ら

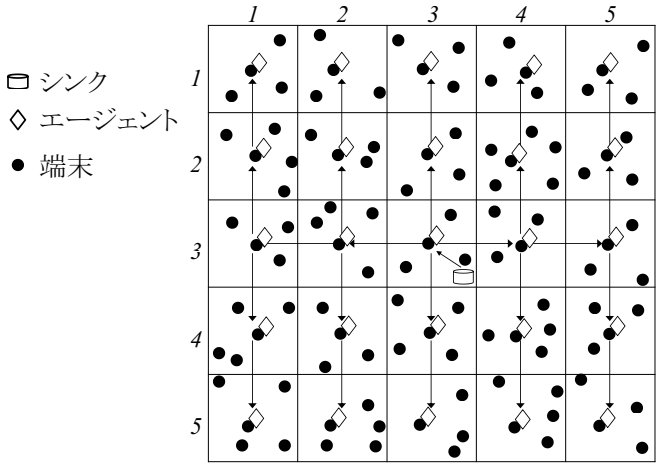

図 2.3: エージェントの配置の例

れた場合は，上，下，右に転送する．ここで，観測領域上下端に位置するサブ領域にいるエージェントはエージェントデータを再転送しない．手順（2）へ戻る．

上記の手続きを通して，エージェントはエージェントデータを転送するための木，すなわち転送木を動的に構築する（図 2.3）．転送木はセンサデータを収集する際にも用いることでトラヒックを削減できる．具体的には，エージェントがセンサデータを親エージェントに返信する時，子エージェントから受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約することで，ヘッダサイズ分のトラヒックを削減できる（詳細は次項で述べる）．

図 2.3 を用いて，シンクが観測位置にエージェントを配置する例を示す．観測領域は 5×5 のサブ領域に分割され，シンクは $(3, 3)$ のサブ領域に位置することを想定する．まず，シンクがエージェントデータを生成し，自身が位置するサブ領域の観測位置へエージェントデータを送信する．観測位置に最も近い端末上で起動したエージェントは，隣接する 4 箇所のサブ領域の観測位置へエージェントデータを再転送する．その後，4 箇所のサブ領域で起動したエージェントが，表 2.1 の規則に従ってエージェントデータを再転送する．以降，同様の処理を繰り返すことにより，すべての観測位置にエージェントを配置できる．

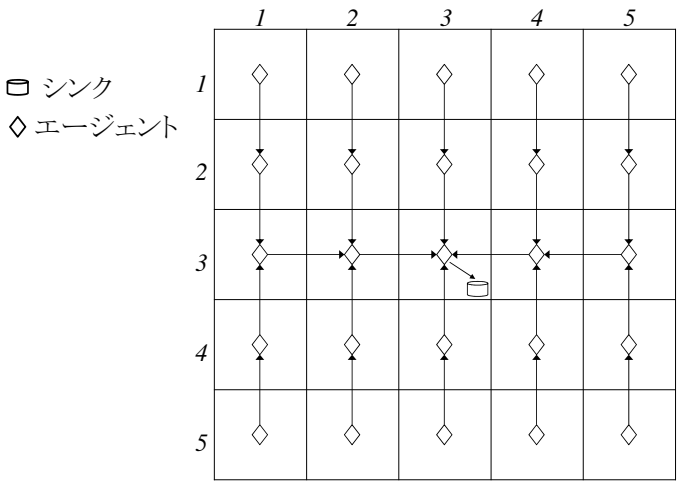

図 2.4: センサデータ転送の例

2.4.2 センサデータの転送

観測位置，またはその付近の端末に配置されたエージェントは，観測周期毎にセンサデータをシンクへ送信する．提案方式は，エージェントがセンサデータを集約しながら，転送木の逆順に転送することで，センサデータを送るためのトラヒックを削減できる (図 2.4)．以下では，エージェントの動作について述べる．

1. 観測周期毎に，観測領域上下端に位置するサブ領域にいるエージェントは，センサデータを自身のエージェントデータの転送元のエージェントへ送信する．その際，2.3.3 項のジオルーティングを用いる．ここで，エージェントは，エージェントの動作している端末の移動により，観測位置から離れている可能性がある．提案方式のジオルーティングでは，エージェントの動作する端末が観測位置から $r/2$ 以上離れている場合，エージェントは観測位置を宛先とするセンサデータを受信できない場合がある．そのため，エージェントは，自身の動作する端末から観測位置に最も近い端末へ移動することで，観測位置から $r/2$ 以内に留まり続ける．この処理の詳細は次項で述べる．これにより，エージェントはいつでも転送木上の子エージェントが送信したエージェントデータを受信できる．

2. 領域上下端に位置するサブ領域およびシンクが存在するサブ領域を除いた各

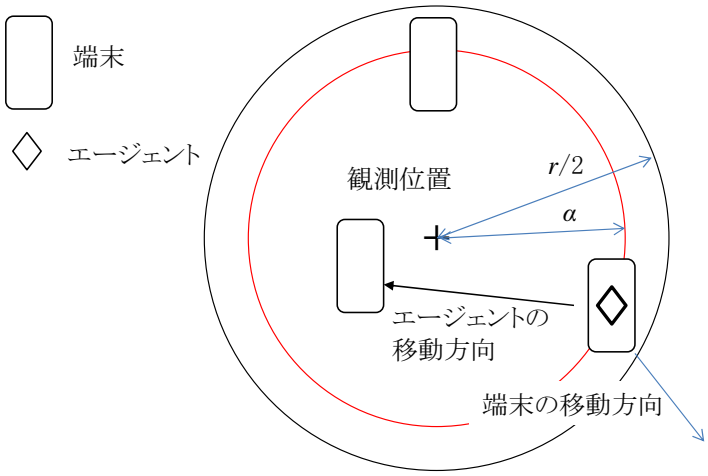

図 2.5: エージェントの移動の例

サブ領域にいるエージェントは，転送木上のすべての子エージェントからセンサデータを受信した後，受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，転送木上の親エージェントへ送る．手順 2 に戻る．

3. シンクが存在するサブ領域にいるエージェントは，受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，シンクに送信する．

2.4.3　エージェントの移動

エージェントが動作している端末が観測位置から離れてしまった場合，エージェントは観測位置を観測，すなわちカバーできなく可能性がある．また，既に述べたように，転送木上の子エージェントが送信したセンサデータを受信できない可能性がある．そのため，エージェントは，自身の動作する端末から観測位置に最も近い端末へ移動することでこれを回避する．

具体的には，エージェントは，自身の位置と観測位置の距離が閾値 α より大きくなったら移動を開始する (図 2.5)．ここで，α は，自身より観測位置に近いすべての端末と通信が可能な距離 $r/2$ 以下，かつ端末が観測位置をセンシング可能な距離とする．

エージェントは観測位置に最も近い端末へ移動するために，エージェントデータを添付したパケットを観測位置から $r/2$ 以内の隣接端末へブロードキャストする．このパケットを受信した端末は，(2.1) 式に従って待ち時間を設け，他の端末へ ACK を送信する．2.3.3 節と同様に，観測位置に最も近い端末が最初に ACK を送信し，エージェントを起動する．他の端末は，この ACK を検知できるため，ACK の送信を中止する．ACK を受信した元のエージェントは，自身の動作を終了する．

2.5 性能評価

本節では，提案方式の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す．本性能評価は，提案方式に適した環境および適さない環境を明らかすることを目的とする．具体的には，シミュレーション実験により，データ収集頻度やサブ領域数等を変化させた時の，提案方式の振る舞いを測定し，その結果を考察する．

本実験では，ネットワークシミュレータ Scenargie 1.3[1] を用いた．

2.5.1 シミュレーション環境

1000[m]×1000[m] の 2 次元平面上に n 台の移動型センサ端末（$node_1, \cdots, node_n$）および 1 台のシンク（S_1）が存在する．シンクは，領域左端および下端から (580 [m], 580 [m]) の座標に静止している．各端末はランダムウォークモデル [7] に従って移動し，50 [秒] おきに，0 [m/秒] から 1 [m/秒] の速度でランダムに決定した方向に移動する．シンクおよび各端末は，IEEE 802.11g を使用し，伝送速度 6 [Mbps]，通信伝搬距離が 100 [m] 程度となる送信電力でデータを送信する．各端末は，継続的に領域をセンシングしており，センシングの有効距離を 100 [m] とする．シンクは観測領域を $1000/\sqrt{G}$ [m] $\times$ $1000/\sqrt{G}$ [m] の大きさの格子状の G 個のサブ領域に分割し，各サブ領域の中央点を観測位置と定める．

[1]Scenargie 1.3 Base Simulator revision 4938, Space-Time Engineering, http://www.spacetime-eng.com/

上記の評価環境は，テーマパークや交通規制の行われている大規模屋外イベントといった歩行者の通行を阻害するものが極めて少ない環境において，テーマパーク事業者やイベント主催者が会場内の気温分布をモニタリングするシチュエーションを想定している．観測領域のサイズは，会場の一部であり，モニタリングを実施するユーザが注目している領域を包含可能な大きさとして設定した．簡単化のため，2 次元平面の大きさを固定としたが，一定の地理的粒度でセンサデータを収集するために，2 次元平面の大きさによって収集するセンサデータの数が異なる．具体的には，2 次元平面が大きい程，収集するセンサデータの数が増加し，トラヒックが増加する．一方，同一の広さであれば，形状の異なる 2 次元平面であっても，収集するセンサデータの数が変化しないため，本性能評価と同じ傾向の結果が得られると考えられる．端末の台数は，会場に来場している参加者のうち，気温を測定可能なデバイスを備えた携帯端末を保持している人の数として設定した．端末の移動モデルは，会場内を移動している歩行者を再現するものとして設定した．シンクおよび各端末が備えている通信機能は，参加者が携帯しているスマートフォンやタブレットが備えている機能として設定した．センシングの有効距離およびサブ領域のサイズは，ユーザが来場者に対して熱中症予防を注意喚起するかどうかの判断材料として必要な気温分布の地理的粒度として設定した．

シンクはシミュレーション開始から 400 [秒] が経過した時点で，各観測位置へエージェントを配置する．エージェントデータのサイズは 128 [B] とし，各端末は事前にエージェントのソースコードを所持しているものとした．観測周期は T [秒] とし，シミュレーションの開始から終了まで，$400 + mT\ (m = 1, 2, \cdots)$ [秒] の時刻，すなわち観測時刻にセンシングを行う．エージェントは各観測時刻にセンサデータをシンクへ送信する．また，エージェントは，自身の動作する端末が観測位置から 47 [m]（$\alpha = 47$）以上離れた場合，観測位置に最も近い端末へと移動する．この値は予備実験の結果に基づいて決定した．予備実験では，評価環境と同じ 2 次元平面および端末数において，無作為に選んだ端末が無作為に選んだ位置を宛先として，ジオルーティングを用いてセンサデータ相当のサイズのメッセージを送信する．このメッセージを検知した端末の宛先からの最大距離を測定し，この試行を繰り返した時の最大距離の平均値を α とした．

表 2.2: パラメータ設定

パラメータ	意味	値
T	観測周期 [秒]	120 (30 ∼ 300)
G	サブ領域数	25 (1 ∼ 100)
n	端末数	2000 (1000 ∼ 3000)
D	センサデータサイズ [B]	32 (24 ∼ 240)

提案方式の比較対象として，シンクが観測周期毎に各観測位置へデータ要求メッセージを送信し，データを収集する方式の性能を調べた．比較方式では，シンクは各観測時刻に，2.3.3 項の方法に基づいてすべての観測位置へ個別にデータ要求メッセージを送信する．ここで，データ要求メッセージは，パケット衝突を回避するために，領域左下端に位置するサブ領域の観測位置から，領域右上端に位置するサブ領域の観測位置まで，一定の送信間隔 0.1 [秒] をおいて順番に送信される．この送信間隔も予備実験に基づいて適当な値を設定した．各サブ領域において，観測位置に最も近い端末はデータ要求メッセージを受信し，2.3.3 項の方法に基づいてセンサデータをシンクへ返信する．

表 2.2 に本実験で用いたパラメータを示す．各パラメータは基本的には定数値をとるが，そのパラメータの影響を調べる際には括弧内の範囲で変化させた．以上のシミュレーション環境において，サブ領域毎の端末数が同数となるように，各端末の初期位置をランダムに決定し，20 回試行した．シミュレーション時間は 4000 [秒] であり，以下の 4 つの評価値を調べた．

- 取得精度: 各観測周期において，すべての観測位置のセンサデータをシンクが取得した場合，データ取得に成功したと定める．取得精度は，データ取得に成功した回数のデータ要求の総数，すなわち観測回数に対する割合とする．
- 取得待ち時間: 各観測時刻からデータ取得に成功した時刻までの平均経過時間．
- パケット数: シミュレーション時間内にシンクおよびすべての端末が送信したパケットの総数．

表 2.3: メッセージサイズ

手法	手順	メッセージ名	サイズ [B]
提案	エージェント配置	配置メッセージ	192
	データ返信	返信メッセージ	$64 + D \cdot i$
	エージェント移動	移動メッセージ	160
比較	データ要求	要求メッセージ	72
	データ返信	返信メッセージ	96
共通	共通	ACK	32

- トラヒック: シミュレーション時間内にシンクおよびすべての端末が送信したパケットのデータサイズを合計した値．表 2.3 にアプリケーション層における各メッセージサイズを表す．ここで，i は，返信メッセージに含まれるデータ数を表す．また，各メッセージサイズにヘッダ分である 64 [B] を加えた値を Mac 層におけるトラヒックとする．

2.5.2　観測周期の影響

観測周期 T を変化させたときの実験結果を図 2.6 から図 2.9 に示す．この図において，グラフの横軸は T を表し，縦軸は，図 2.6 では取得精度，図 2.7 では取得待ち時間，図 2.8 ではアプリケーション層でのパケット数およびその内訳，図 2.9 ではアプリケーション層および Mac 層でのトラヒックを表す．

図 2.6 より，提案方式，比較方式ともに取得精度が高いことがわかる．また，シンクが取得したすべてのセンサデータは有効，すなわちセンシング対象の観測位置をカバーしたデータであった．どちらの手法においても取得精度が 100 [%] にならないのは，パケット衝突によりジオルーティングが失敗することがあるためである．図 2.8 より，提案方式は比較方式と比べてパケット数が少なく，パケット衝突の発生を抑えている．そのため，提案方式の取得精度は比較方式よりわずかに高い．

図 2.7 より，観測周期は取得待ち時間に影響がないことが分かる．また，提案方式は，比較方式と比べて短い時間でデータを取得できていることがわかる．これ

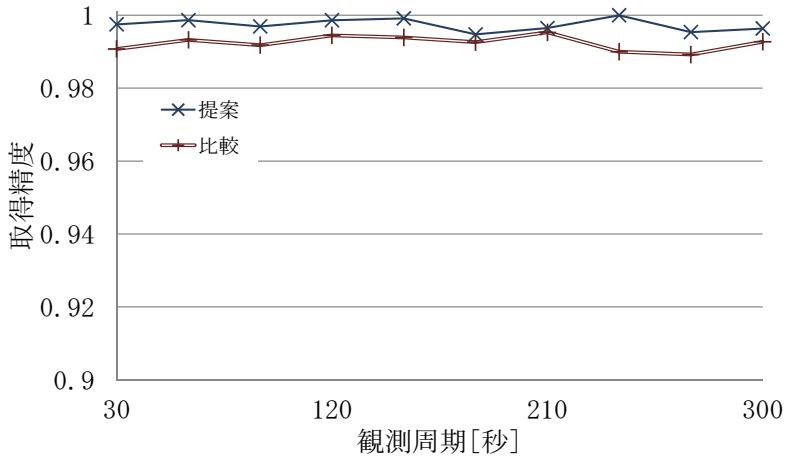

図 2.6: 観測周期の影響：取得精度

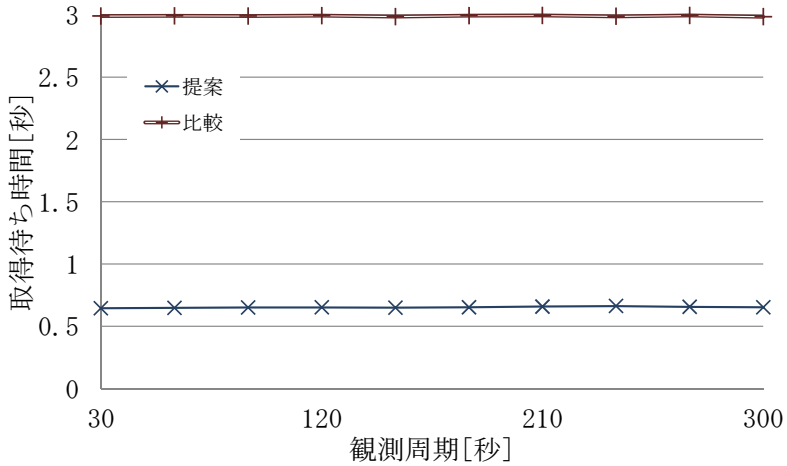

図 2.7: 観測周期の影響：取得待ち時間

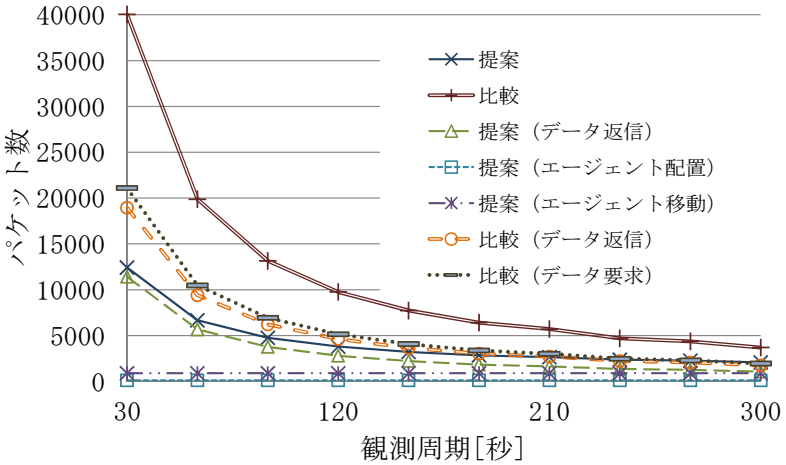

図 2.8: 観測周期の影響：パケット数

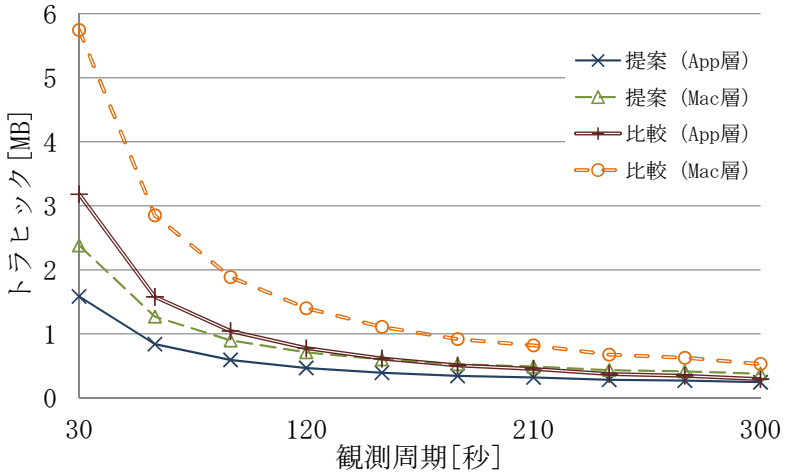

図 2.9: 観測周期の影響：トラヒック

は，提案方式では，転送木を利用して，同時並列的にデータを返信できるが，比較方式ではデータの取得のために往復のメッセージ交換が必要なことに加えて，パケット衝突を回避するために，メッセージを送信する毎に待ち時間（0.1 [秒]）を設けてすべてのサブ領域に要求メッセージを転送しているためである．ここで最大の待ち時間は $0.1 \times (G-1)$ [秒] となる．待ち時間を小さくすることで取得待ち時間を削減できるが，予備実験において，比較方式は 0.1 [秒] より小さい待ち時間において，パケット衝突が頻繁に発生し，取得精度が低下することを確認している．

図 2.8 より，提案方式は比較方式と比べてパケット数が少ないことがわかる．これは，比較方式が観測周期毎にデータ要求メッセージを送信するのに対し，提案方式はエージェントが自律的にデータを返信するので，データ要求メッセージが不要なためである．また，提案方式は，比較方式と比べて，データ返信のパケット数が少ない．これは，提案方式ではエージェントがデータを集約しながら返信するためである．観測周期が長い場合，提案方式では，エージェントの移動によるパケットが占める割合が大きくなるため，提案方式と比較方式のパケット数の差は小さくなる．また，提案方式では，エージェントの配置とエージェントの移動によるパケット数が，それぞれ観測周期に関わらず一定であることがわかる．エージェントの配置で発生するパケット数はサブ領域数，およびエージェントデータを転送する際のホップ数によって決まり，エージェントの移動で発生するパケット数はデータ収集の継続時間，端末の移動速度，および α によって決まる．そのため，これらのパケット数は，観測周期の影響を受けない．

図 2.9 より，提案方式は比較方式よりもトラヒックが小さいことがわかる．これは，提案方式ではエージェントが自律的にデータを返信するため，データ要求の必要がないことと，データを集約しながら返信することでパケット数を削減できるため，ヘッダサイズ分のメッセージサイズを削減できることに起因する．観測周期が長い場合，提案方式では，エージェントの移動によるトラヒックが占める割合が大きくなるため，提案方式と比較方式のトラヒックの差が小さくなる．また，Mac 層ではアプリケーション層に比べて，提案方式と比較方式のトラヒックの差が大きい．Mac 層では，アプリケーション層に比べて，パケットにおけるヘッダの占める割合が大きいため，提案方式のパケット数削減の効果がより大きいた

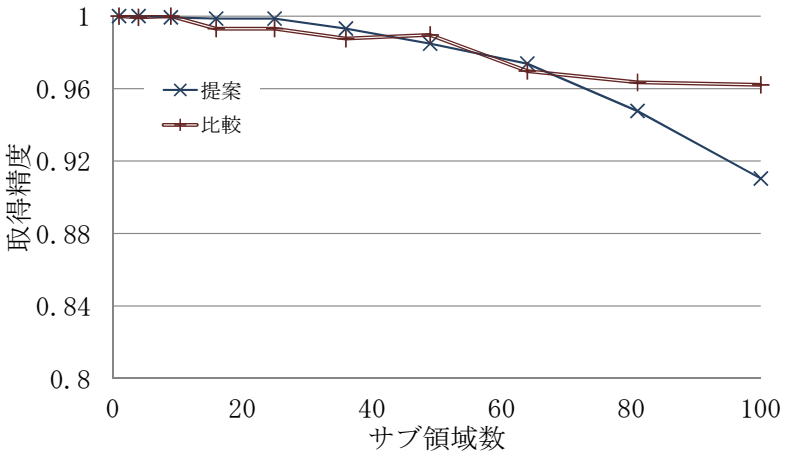

図 2.10: サブ領域数の影響：取得精度

めである．

図 2.9 より，観測周期が 30[秒] のときの提案方式および比較方式のトラヒックはそれぞれ 2.4[MB], 5.8[MB] であり，手法間の差は 3.4[MB] である．ここで，送信トラヒック 1[MB] あたりの送信電力を，消費電力 1.9[W·sec] に換算すると [15]，提案方式は比較方式と比べて，6.46[W·sec] の消費電力を削減できたことになる．これは，3G 回線のダウンロードを 4.6 時間連続して行う際に消費する電力に相当し [48]，提案方式がモバイルセンサネットワークに参加している端末のバッテリ消費の低減に有効であることを示している．

2.5.3　サブ領域数の影響

サブ領域数を変化させたときの実験結果を図 2.10 から図 2.13 に示す．この図において，グラフの横軸は G を表し，縦軸は，図 2.10 では取得精度，図 2.11 では取得待ち時間，図 2.12 ではアプリケーション層でのパケット数およびその内訳，図 2.13 ではアプリケーション層および Mac 層でのトラヒックを表す．

図 2.10 より，提案方式，比較方式ともにサブ領域数が増加すると取得精度が低くなることがわかる．これは，サブ領域数の増加とともにデータ収集に必要なメッセージ交換が増加し，パケット衝突が発生しやすくなるためである．特に，提案方式では同時並列的にデータを収集しているため，サブ領域数が増加すると，隣

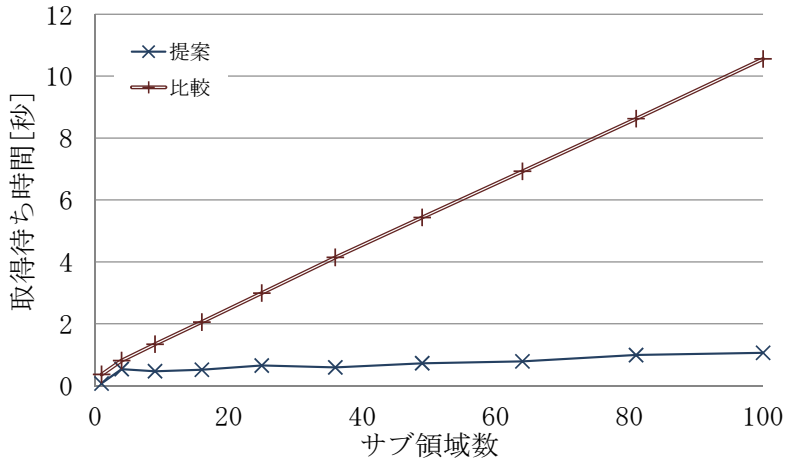

図 2.11: サブ領域数の影響：取得待ち時間

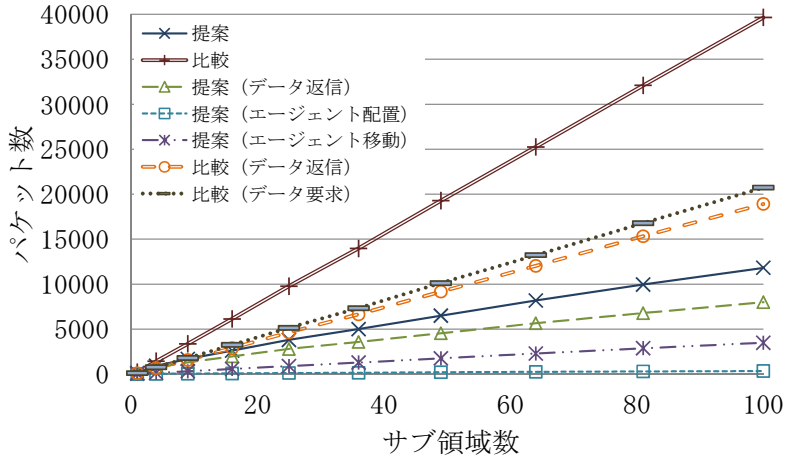

図 2.12: サブ領域数の影響：パケット数

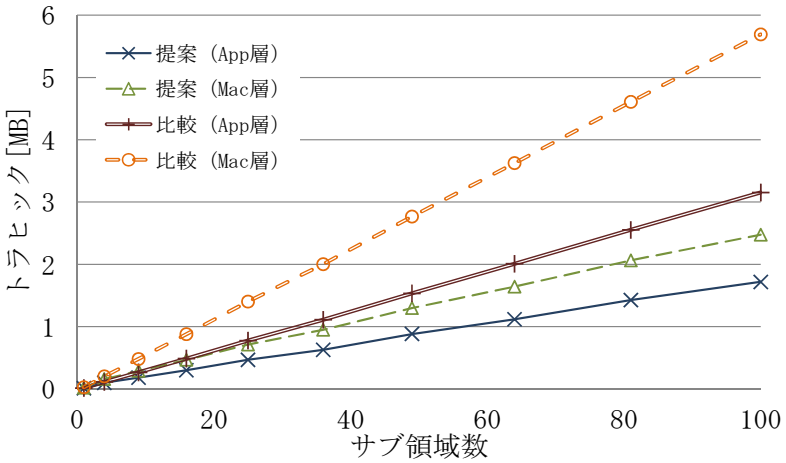

図 2.13: サブ領域数の影響：トラヒック

接する観測位置で送信された返信メッセージ同士が衝突する可能性が大きくなり，比較方式よりも取得精度が低下する．

図 2.11 より，比較方式はサブ領域数が増加すると取得待ち時間が大きくなることがわかる．これは，要求メッセージを送信する毎に設ける待ち時間が必要なためである．一方，提案方式はサブ領域数の影響を強くは受けず，短い時間でデータを取得できていることがわかる．これは，転送木を利用して同時並列的にデータを返信するためである．

図 2.12 より，提案方式，比較方式ともにサブ領域数が増加するとパケット数が増加することがわかる．また，すべてのサブ領域数において，提案方式は比較方式よりパケット数が少ないことがわかる．

図 2.13 より，提案方式，比較方式ともにサブ領域数が増加するとトラヒックが増加することがわかる．また，すべてのサブ領域数において，提案方式は比較方式よりトラヒックが小さいことがわかる．

2.5.4　端末数の影響

端末数 n を変化させたときの実験結果を図 2.14 から図 2.17 に示す．この図において，グラフの横軸は n を表し，縦軸は，図 2.14 では取得精度，図 2.15 では取得待ち時間，図 2.16 ではアプリケーション層でのパケット数およびその内訳，図 2.17

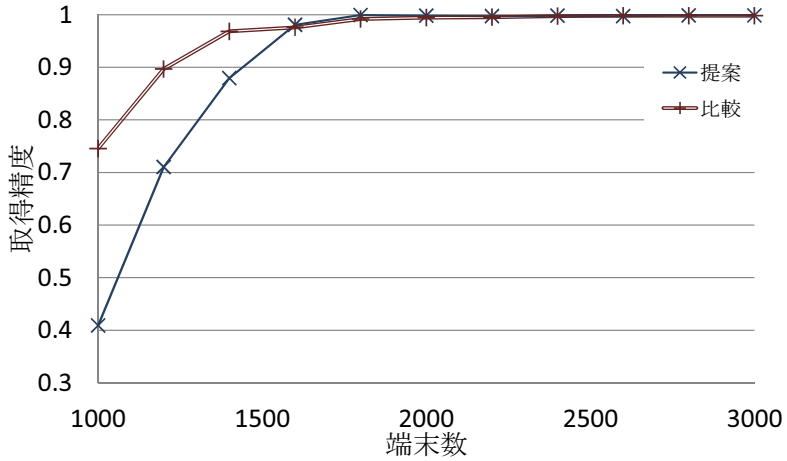

図 2.14: 端末数の影響：取得精度

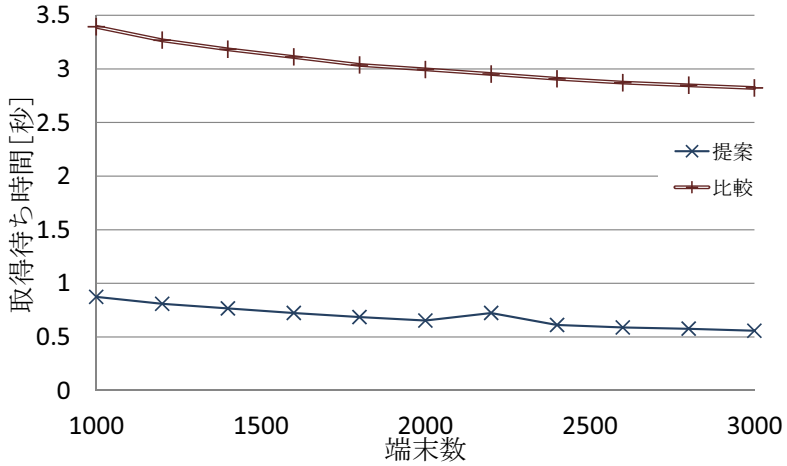

図 2.15: 端末数の影響：取得待ち時間

ではアプリケーション層および Mac 層でのトラヒックを表す．

図 2.14 より，提案方式，比較方式ともに端末数が少ないときに取得精度が低くなることがわかる．これは，端末が疎な環境では，ジオルーティングにおける転送エリアや，観測位置周辺に端末が不在となる可能性が高いためである．また，提案方式では，観測位置を中心とする半径 α の円内に端末が存在しない場合，エージェントが消失してしまう．エージェントが消失した場合，エージェントが再配置されないため，シミュレーション終了時までデータが返信されず，取得精度が大きく低下する．

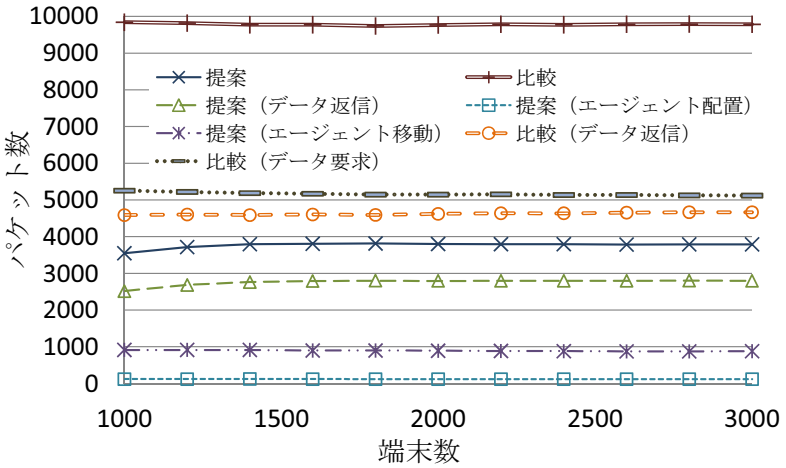

図 2.16: 端末数の影響：パケット数

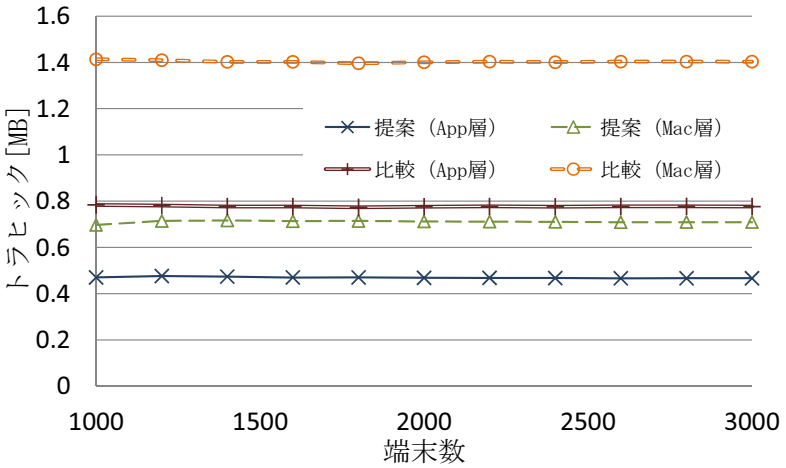

図 2.17: 端末数の影響：トラヒック

図 2.15 より，すべての端末数において，提案方式は比較方式より取得待ち時間が小さいことがわかる．端末数が増加すると，取得待ち時間が若干小さくなるのは，転送エリア内に存在する端末が増加し，より目標位置に近い端末が増えるためである．図 2.16 より，すべての端末数において，提案方式は比較方式よりパケット数が少ないことがわかる．ここで，提案方式において，端末数が 1000 台の時にパケット数が若干少なくなっているのは，エージェントの消失により，データが返信されないためである．また，比較方式において，端末数が増加すると，パケット数が若干少なくなっているのは，メッセージ転送のホップ数が小さくなるためである．

図 2.17 より，提案方式，比較方式ともに端末数に関わらずトラヒックがほぼ一定であることがわかる．これは，どちらの手法もメッセージの送信端末は各サブ領域内で 1 台に限定されるので，領域内に存在する端末数に影響されないためである．手法間の差は，パケット数の結果と同様の傾向である．

2.5.5 センサデータサイズの影響

センサデータサイズ D を変化させたときの実験結果を図 2.18 から図 2.21 に示す．この図において，グラフの横軸は D を表し，縦軸は，図 2.18 では取得精度，図 2.19 では取得待ち時間，図 2.20 ではアプリケーション層でのパケット数およびその内訳，図 2.21 ではアプリケーション層および Mac 層でのトラヒックを表す．

図 2.18 より，提案方式，比較方式ともにセンサデータサイズに関わらず取得精度が高いことがわかる．通常，メッセージサイズが大きくなるとパケットロスが発生するが，センサデータサイズが十分に小さいため，パケットロスには影響せず，取得精度は低下していない．本研究では，温度などのデータサイズが小さいものをセンシングすることを想定している．

図 2.19 より，すべてのセンサデータサイズにおいて，提案方式は比較方式より取得待ち時間が小さいことがわかる．ここで，提案方式の取得待ち時間の増加量が比較方式と比べて若干大きいのは，データを集約することでメッセージサイズが大きくなり，データ転送時間が増加するためである．

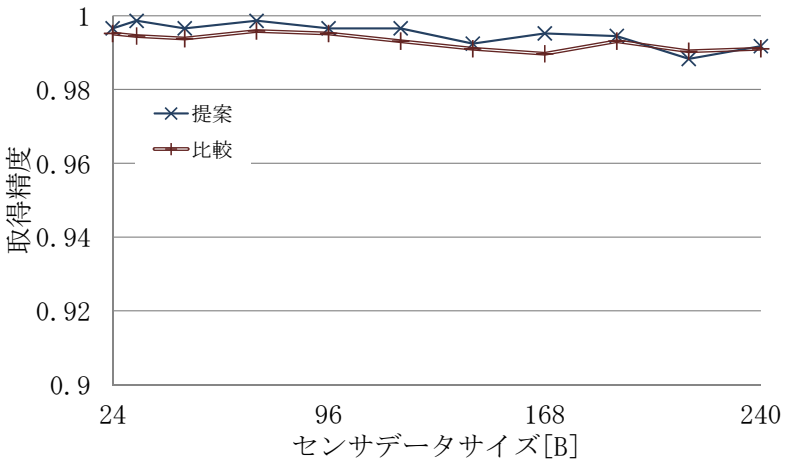

図 2.18: センサデータサイズの影響：取得精度

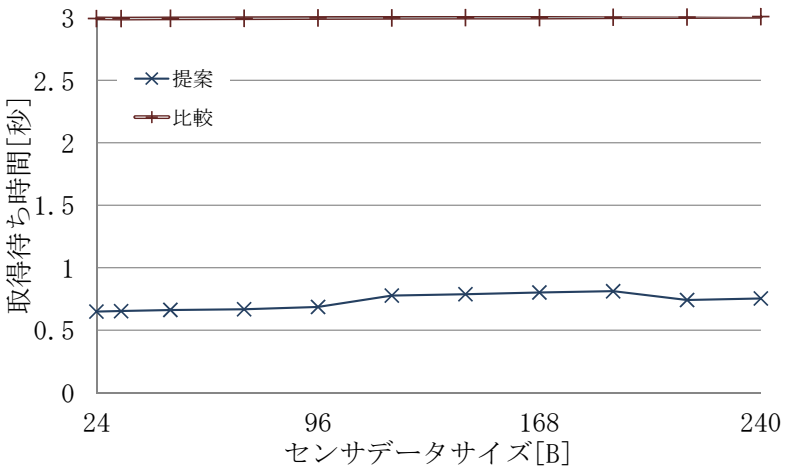

図 2.19: センサデータサイズの影響：取得待ち時間

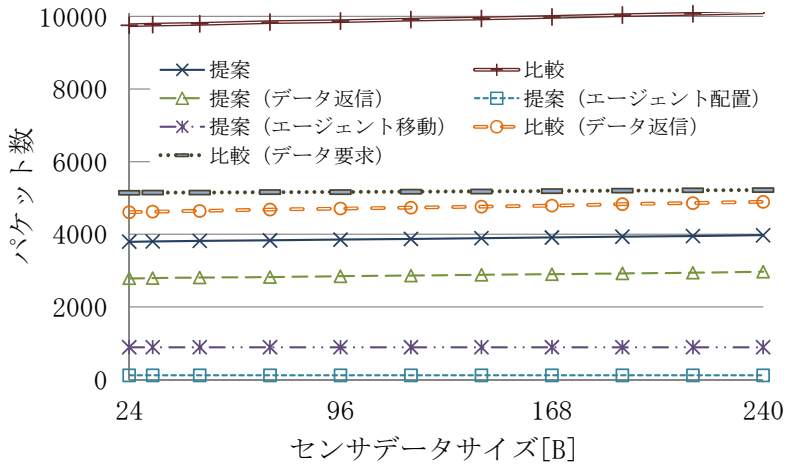

図 2.20: センサデータサイズの影響：パケット数

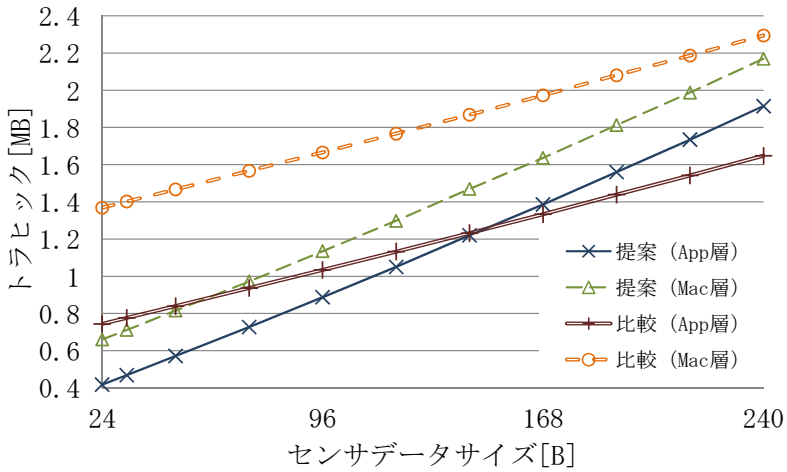

図 2.21: センサデータサイズの影響：トラヒック

図 2.20 より，すべてのセンサデータサイズにおいて，提案方式は比較方式よりパケット数が少ないことがわかる．また，センサデータサイズに関わらずパケット数がほぼ一定であることから，データサイズがパケットロスに影響していないことがわかる．

図 2.21 より，提案方式のトラヒックの増加量が比較方式と比べて大きいことがわかる．これは，比較方式では観測位置からシンクへデータを直接，すなわち最短経路で返信するのに対し，提案方式では，格子状に存在する観測位置を経由しながら，データを返信することから，比較方式よりも転送経路が長くなるためである．提案方式はデータを集約しながら返信することでヘッダサイズ分のトラヒックを削減できるが，センサデータサイズが大きい場合，返信メッセージの総トラヒックが増加する．

2.5.6　性能評価のまとめ

シミュレーション実験により，提案方式は，エージェントがデータを集約しながら返信することでパケット数を削減し，ヘッダサイズ分のトラヒックを削減できることを確認した．このことは，提案方式がデータ集約によるトラヒック削減の効果が大きい環境に適していることを示している．具体的には，サブ領域数が多く，かつセンサデータサイズが小さい環境において，主要なトラヒック要因となるパケットヘッダを削減可能な提案方式は，特にトラヒック削減効果が大きい．

一方，提案方式は，エージェントが端末間を移動することでトラヒックが増加することを確認した．このことは，データ収集頻度の高い環境に適していることを示している．具体的には，観測周期が短い環境において，データ返信のトラヒックを削減可能な提案方式は，特にトラヒック削減効果が大きい．逆に，観測周期が短い環境では，データ返信の頻度が低くなり，エージェントの端末間移動によって増加するトラヒックの影響が大きくなる．

以上の結果から，端末の移動に対して地理的粒度を保証するためのトラヒックを削減する方法は，データ収集頻度が高い環境，センサデータサイズが小さい環境，およびサブ領域が多い環境では，提案方式，その逆の環境では比較方式がそ

れぞれ適していることが明らかになった．

2.6 むすび

本章では，密なモバイルセンサネットワークにおける地理的粒度を考慮したデータ収集のためのエージェント制御方式を提案した．提案方式では，自律的にセンシング，センサデータの転送，および端末間の移動を行うエージェントを用いて，アプリケーションが要求する地理的粒度のセンシングを保証する．エージェントが動作する端末のみから，センサデータを集めることにより，効率的にセンサデータを収集する．

シミュレーション実験の結果から，提案方式では，観測周期毎にデータ要求を行う必要がないことや，転送木を利用して同時並列的にデータを返信することで，短い時間でデータを収集できることを確認した．また，提案方式は，データ転送においてエージェントがセンサデータを集約することよりトラヒックを削減できることを確認した．これにより，モバイルセンサネットワークに参加している端末のバッテリ消費を低減できる．

本研究では，簡単化のため，端末の障害によるエージェントの消失や，センシングの誤り値などが生じないものと想定した．しかし，実環境では，1 章で述べたように，端末を所持するユーザの操作によって，突然エージェントが動作を終了することや，端末のセンサデバイスの不具合によって，誤った値をセンシングするといった場合が考えらえる．そこで，次章では，エージェントが互いに生存を確認し，消失した場合には再配置する方法を検討する．

第3章　取得精度維持のための消失エージェント再配置方式

3.1　まえがき

2章では，密なモバイルセンサネットワーク上のデータ収集におけるトラヒックの削減と取得精度の維持を目的とするエージェント制御方式 [20]（以降，従来方式と呼ぶ) を提案した．ここで，モバイルセンサネットワークを構成する端末は，端末のユーザ操作やバッテリ切れにより，ネットワークへの参入，脱退が頻繁に発生する．そのため，地理的粒度の保証に関わっていた端末が急にいなくなることがある．従来方式では，エージェントの配置をデータ収集の開始時にのみ行っているため，端末のネットワーク離脱などによりエージェントが消失した場合，データの収集が不可能になってしまう．

そこで，本章では，従来方式を拡張し，消失したエージェントの再配置，および，センサデータの再送を効率的に行うエージェント再配置方式を提案する．提案方式では，エージェントは観測周期毎に待ち時間を設定し，待ち時間以内にデータの転送を完了できなかった場合，エージェントの消失が発生したものと判断して，消失したエージェントの再配置およびセンサデータの再送を行う．

以下では，3.2節で関連研究を紹介する．3.3節で本論文の想定環境を示し，3.4節で提案方式について述べる．3.5節でシミュレーション実験の結果を示す．最後に3.6節で本章のまとめと課題について述べる．

3.2 関連研究

無線センサネットワークの分野において，端末のネットワーク離脱に対応したデータ収集の研究が提案されている．

文献 [1,3,5,14,30] では，自身の位置を制御可能な移動端末がネットワーク内に存在する環境を想定し，端末移動によってトポロジを変化させることで端末のネットワーク離脱によって生じたネットワーク分断を解消する，移動端末の制御方式を提案している．文献 [5,14] で提案している方式では，各端末が常に 2 台以上の端末と接続している状態を維持するように移動端末の位置を制御することで，どの端末がネットワークを離脱してもネットワーク分断が生じず，ネットワーク内のすべての端末がシンクへデータ送信可能な状態の維持を保証している．文献 [1,3,30] で提案している方式では，ネットワーク分断が生じた際の移動端末の位置制御を事前に決めておくことで，ネットワーク分断が生じた際に，分断状態の解消に要する時間を短縮している．

文献 [39,40,54,68] では，ネットワーク内の任意の位置に端末を配置可能な環境を想定し，端末の初期配置または配置する端末数を制御することで端末がネットワーク離脱した際にネットワーク分断が生じないようにする端末配置方式を提案している．文献 [39,40,54,68] では，端末の初期配置の際に，どの端末がネットワークを離脱してもネットワーク分断が生じないトポロジとなるように端末を配置することで，端末のネットワーク離脱の影響が小さくなるようにしている．

これらの既存研究では，本研究と同様に端末のネットワーク離脱によって生じる問題の解決に取り組んでいるが，想定環境の違いから端末のネットワーク離脱によって生じる問題が本研究とは異なる．既存研究では，端末のネットワーク離脱によってネットワーク分断が生じる可能性がある環境を想定しているが，本研究が想定する密なモバイルセンサネットワークでは，多数の端末がネットワーク内に存在しているため，端末がネットワークを離脱してもネットワーク分断は生じにくい．一方で，密なモバイルセンサネットワークでは，効率的なデータ収集を実現するために，必要最小限の端末による地理的粒度の保証が望まれるが，地理的粒度を保証している端末がネットワークを離脱してしまうと，地理的粒度が保証できなくなってしまう．提案方式では，端末のネットワーク離脱によって消

失したエージェントの検出および再配置によって地理的粒度を保証している．

3.3 想定環境

基本的に 2 章と同様に，一般ユーザの携帯する無線通信機能を搭載した移動型センサ端末が構成する，密なモバイルセンサネットワークを想定する．

各端末は一定の確率でネットワークを離脱し，ネットワークを離脱している端末は，他の端末と通信できなくなる．簡単化のため，端末がネットワークを離脱する確率は，すべての端末で等しいものとする．

3.4 提案方式

本章の提案方式である，端末のネットワーク離脱に対して取得精度を維持することを目的とした，エージェント再配置方式について述べる．

2 章で述べた方式では，エージェントが消失した場合，エージェントの再配置は行われず，その後，センサデータの収集が不可能になってしまう．そのため，提案方式では，従来方式の動作に加えて，エージェントの再配置およびセンサデータの再送を行う．さらに，2 章で述べた方式では，観測周期が長い場合，観測タイミング間のエージェントの移動回数が多いために，エージェントの移動で生じるトラヒックの影響が大きくなってしまう．そこで，提案方式では，エージェントの移動を観測時刻の直前にのみ行うことで，観測タイミング間のエージェントの移動回数をエージェント 1 台につき 1 回以内に抑え，エージェントの移動で生じるトラヒックの増加を抑止する．

3.4.1 センサデータの再転送およびエージェントの再配置

本章で述べる提案方式では，観測周期から一定時間内に転送木上の子に位置するエージェント（子エージェント）からセンサデータを受信できなかったエージェ

ントおよびシンクは，子エージェントの再配置およびセンサデータの再転送を要求する．以下では，シンクとエージェントの動作について述べる．

1. 観測周期毎に，すべてのエージェントは2.4.2項で述べた手順に基づいてセンサデータの転送を行う．

2. 領域上下端に位置するサブ領域およびシンクが存在するサブ領域を除いた各サブ領域にいるエージェント，およびシンクは，観測時刻からδ秒経過しても子エージェントからセンサデータを受信できなかった場合，2.3.3項のジオルーティングを用いてデータ要求メッセージを子エージェントに送信する．

3. 観測領域上下端に位置するサブ領域にいるエージェントがデータ要求メッセージを受信した場合，センサデータを返信する．領域上下端に位置するサブ領域およびシンクが存在するサブ領域を除いたサブ領域にいるエージェントがデータ要求メッセージを受信し，そのエージェントがすべての子エージェントからのセンサデータを受信している場合，センサデータを返信する．すべての子エージェントからのセンサデータを受信していない場合，代わりに生存メッセージを返信する．

4. データ要求メッセージを送信したエージェントは，その後，すべての子エージェントからセンサデータを受信した場合，センサデータの転送を再開する．δ秒経過してもセンサデータまたは生存メッセージを受信できなかった場合，子エージェントが消失したと判断し，エージェントが消失したサブ領域の観測位置へエージェントデータを転送する．

5. エージェントデータが送信されたサブ領域において，観測位置に最も近い端末は，エージェントデータを受信した後，そのサブ領域において実際にエージェントが消失している場合，エージェントを起動する．初期動作として，エージェントは，観測領域上下端に位置するサブ領域にいる場合，センサデータを返信する．領域上下端に位置するサブ領域およびシンクが存在するサブ領域を除いたサブ領域にいる場合，すべての子エージェントにデータ要求メッセージを送信する．手順3へ戻る．

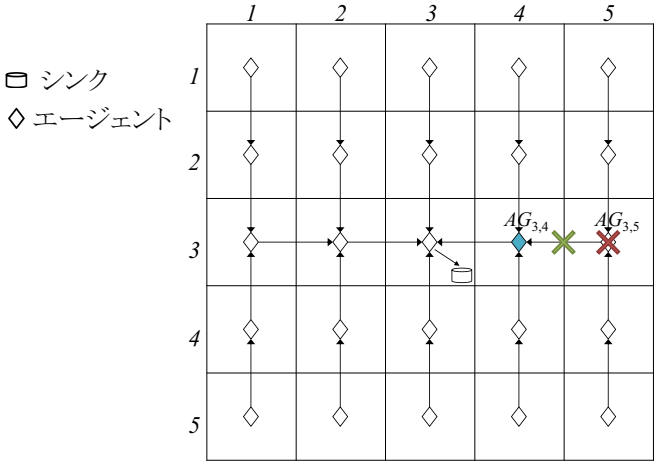

図 3.1: エージェント再配置の例

一方，エージェントが生存しているにもかかわらず，パケットロス等によってセンサデータが届かずエージェントデータが送られてきた場合，エージェントデータを検知した時点で ACK を返信し，データ要求メッセージを受信した場合と同様の処理（手順 3）を実行し，エージェントデータは破棄される．

上記の手順により，エージェントおよびシンクは，観測時刻から δ 秒経過してもセンサデータを受信できない場合のみ子エージェントへデータ要求メッセージを送信し，その後，δ 秒経過しても子エージェントから応答がない場合のみエージェントデータを送信する．これにより，転送木上のセンサデータの転送が成功した箇所，およびエージェントが生存している箇所において，追加のトラヒックを発生させることなく，エージェントの再配置およびセンサデータの再送を行うことができる．

図 3.1 を用いて，エージェント再配置の例を示す．図 3.1 において，3 行 5 列目のサブ領域に位置するエージェント（$AG_{3,5}$）が消失しており，5 列目のサブ領域のセンサデータが転送されなくなっている．3 行 4 列目のサブ領域に位置するエージェント（$AG_{3,4}$）は，観測時刻から δ 秒経過した時点で，センサデータを受信できていない子エージェントである $AG_{3,5}$ へデータ要求メッセージを送信する．$AG_{3,5}$ は消失しているため，データ要求メッセージに対する応答はなく，観測時刻から 2δ 秒経過した時点で，$AG_{3,4}$ は 3 行 5 列目のサブ領域の観測位置へエージェントデー

タを送信する．3 行 5 列目のサブ領域の観測位置から最も近い端末は，エージェントデータを受信し，エージェント（$AG'_{3,5}$）を起動する．$AG'_{3,5}$ は，子エージェントである 2 行 5 列目のサブ領域に位置するエージェント ($AG_{2,5}$) および 4 行 5 列目のサブ領域に位置するエージェント ($AG_{4,5}$) へデータ要求メッセージを送信する．データ要求メッセージを受信した $AG_{2,5}$ は，1 行 5 列目のサブ領域に位置するエージェントから受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，$AG'_{3,5}$ へ返信する．同様に，データ要求メッセージを受信した $AG_{4,5}$ は，5 行 5 列目のサブ領域に位置するエージェントから受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，$AG'_{3,5}$ へ返信する．$AG_{2,5}$ および $AG_{4,5}$ からセンサデータを受信した $AG'_{3,5}$ は受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，$AG_{3,4}$ へ送信し，$AG_{3,4}$ は 5 列目のサブ領域のセンサデータを受信する．$AG_{3,4}$ が子エージェントから受信したセンサデータおよび自身のセンサデータである 4 列目および 5 列目のサブ領域のセンサデータを，転送木上の親に位置する 3 行 4 列目のサブ領域に位置するエージェントへ送信することでセンサデータの転送が再開され，最終的にシンクは自身の位置する 3 行 3 列目のサブ領域に位置するエージェントからすべてのサブ領域のセンサデータを受信する．

3.4.2　エージェントの移動

本章で述べる提案方式では，観測時刻の直前にのみエージェントの移動を行うことで，観測タイミング間のエージェントの移動回数をエージェント 1 台につき 1 回以内に抑え，エージェントの移動で生じるトラヒックの増加を抑止する．ここで，提案方式におけるエージェントは，自身の動作端末が，子エージェントからのセンサデータ，または親エージェントからのデータ要求メッセージを検知できない位置へ移動する可能性がある場合に端末間を移動する．具体的には，エージェントは，観測時刻の τ 秒前に，自身の位置と観測位置の距離が α，または次式で与えられる閾値 β より大きい場合に移動を開始する．

$$\beta = \frac{r}{2} - V \cdot (\tau + d) \tag{3.1}$$

ここで，V はエージェントが動作している端末の最大移動速度であり，d は 3.4.1 項の手続きにおいて，親エージェントの再配置が行われた場合に，観測時刻からデータ要求メッセージが転送されるまでに要する最大時間，すなわち $d = (i+1)\delta$ (i は転送木の最大の深さ) である．

3.5 性能評価

本節では，提案方式の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す．本性能評価は，提案方式に適した環境および適さない環境を明らかすることを目的とする．具体的には，シミュレーション実験により，端末の離脱確率や観測周期等を変化させた時の，提案方式の振る舞いを測定し，その結果を考察する．

本実験では，ネットワークシミュレータ Scenargie 1.4[1] を用いた．

3.5.1 シミュレーション環境

$1,000$[m] $\times$ $1,000$[m] の 2 次元平面上に $2,000$ 台の移動型センサ端末（$node_1, \cdots, node_{2,000}$）および 1 台のシンク（$S_1$）が存在する．シンクは，領域左端および下端から (580 [m], 580 [m]) の座標に静止している．各端末はホームエリアを持ったランダムウェイポイントモデル [7] に従って移動する．具体的には，90 [%] の確率で自身に割り振られたサブ領域，10 [%] の確率で観測領域全体からランダムに目標位置を決定し，1 [m/秒] から 2 [m/秒] の速度で等速移動する．目標位置では 60 [秒] 停止する．また端末は 50 [秒] 毎に離脱確率 F でネットワークを離脱し，離脱した端末は 100 [秒] 後にネットワークに復帰する．シンクおよび各端末は，IEEE 802.11a を使用し，伝送速度 6 [Mbps]，通信伝搬距離が 100 [m] 程度となる送信電力でデータを送信する．各端末は，継続的に領域をセンシングしており，センシングの有効距離を 100 [m] とする．シンクは観測領域を 200 [m] $\times$ 200 [m] の大きさの格子状の G 個のサブ領域に分割し，各サブ領域の中央点を観測位置と定める．センサデータは D [B] とした．

[1] Scenargie 1.4 Base Simulator revision 6808, Space-Time Engineering, http://www.spacetime-eng.com/

上記の評価環境は，基本的に 2.5 節と同様に，テーマパークや交通規制の行われている大規模屋外イベントといった歩行者の通行を阻害するものが極めて少ない環境において，テーマパーク事業者やイベント主催者が会場内の気温分布をモニタリングする状況を想定している．端末のバッテリ切れやユーザ操作に伴う突然の端末のネットワーク離脱が一定確率で起こるものとして，端末の離脱条件を設定した．また，2.5 節よりも端末の移動が激しい環境として，ランダムウェイポイントモデルを端末の移動モデルとして採用した．

シンクがエージェントを配置する時刻，エージェントデータのサイズ，および観測周期は，2.5 節の実験と同様とした．各エージェントおよびシンクは，観測時刻から 2 [秒]（$\delta = 2$）が経過してもセンサデータを受信できない場合，エージェントの再配置およびセンサデータの再送要求を行う．また，エージェントは，観測時刻の 3 [秒]（$\tau = 3$）前の時点で，観測位置から 30 [m]（$\beta = 30$）以上離れている場合，観測位置に最も近い端末へと移動する．

提案方式の比較対象として，2 章で述べた方式（2 章の方式），および，シンクが観測周期毎に各観測位置へデータ要求メッセージを送信し，データを収集する方式（エージェントなしの方式）の性能を調べた．

2 章の方式では，エージェントの配置において提案方式と同様の処理を行うが，センサデータの転送の際，エージェントの再配置およびセンサデータの再送は行わない．また，エージェントは，自身の動作する端末が観測位置から 47 [m]（$\alpha = 47$）以上離れた場合，観測位置に最も近い端末へと移動する．

エージェントなしの方式は，2.5 節の実験で用いたものと同様の動作を行う．ただし，センサデータの再送方式として，すべての観測位置にデータ要求メッセージを送信してから 2 [秒] が経過した時点で，センサデータが未受信の各観測位置へ，0.1 [秒] の送信間隔で再度データ要求メッセージを送信するものとした．

表 3.1 に本実験で用いたパラメータを示す．各パラメータは基本的には定数値をとるが，そのパラメータの影響を調べる際には括弧内の範囲で変化させた．以上のシミュレーション環境において，サブ領域毎の端末数が同数となるように，各端末の初期位置をランダムに決定し，初期位置のあるサブ領域をその端末のホームエリアとした．観測の終了時刻は $4,000$ [秒] であり，取得精度，取得待ち時間，

表 3.1: パラメータ設定

パラメータ	意味	値
T	観測周期 [秒]	120 (30 ∼ 300)
F	端末の離脱確率	0 (0 ∼ 0.01)
G	サブ領域数	25 (4 ∼ 100)
D	センサデータサイズ [B]	32 (24 ∼ 240)

表 3.2: メッセージサイズ

方式	手順	メッセージ名	サイズ [B]
提案	エージェント再配置	配置メッセージ	192
	データ返信	要求メッセージ	72
	データ返信	生存メッセージ	72
	エージェント移動（ジオルーティング）	移動メッセージ	192
	エージェント配置	配置メッセージ	192
	データ返信	返信メッセージ	$64 + D \cdot i$
	エージェント移動	移動メッセージ	160
従来	エージェント配置	配置メッセージ	192
	データ返信	返信メッセージ	$64 + D \cdot i$
	エージェント移動	移動メッセージ	160
比較	データ要求	要求メッセージ	72
	データ返信	返信メッセージ	96
共通	共通	ACK	32

およびトラヒックを調べた．これらの評価値は，2.5 節の実験で調べたものと同様である．トラヒックの測定のために設定したアプリケーション層における各メッセージサイズを表 3.2 に示す．

3.5.2 観測周期の影響

観測周期 T を変化させたときの実験結果を図 3.2 から図 3.5 に示す．この図において，グラフの横軸は T を表し，縦軸は，図 3.2 では取得精度，図 3.3 では取得待

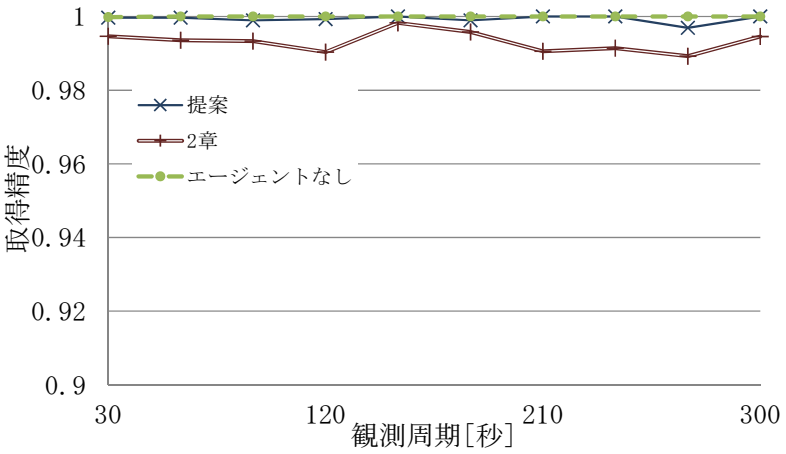

図 3.2: 観測周期の影響：取得精度

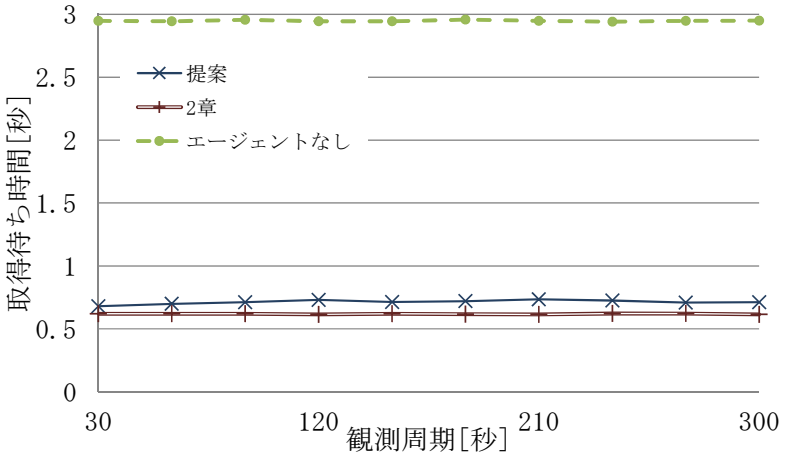

図 3.3: 観測周期の影響：取得待ち時間

ち時間，図 3.4 ではパケット数，図 3.5 ではトラヒックを表す．

図 3.2 より，すべての方式において取得精度が高いことがわかる．取得精度が 100 [%] にならないのは，領域端のサブ領域において，端末密度が疎となり，ジオルーティングが失敗することがあるためである．今回の実験では，再送要求を 1 度しか行っていないが，要求数を増やせば 100 [%] になるものと考えられる．2 章の方式では，再送制御を行わないため，パケット衝突が発生した場合にもジオルーティングが失敗する．その結果，2 章の方式の取得精度は他の方式に比べて若干低くなる．

図 3.3 より，観測周期は取得待ち時間に影響がないことが分かる．また，2 章の

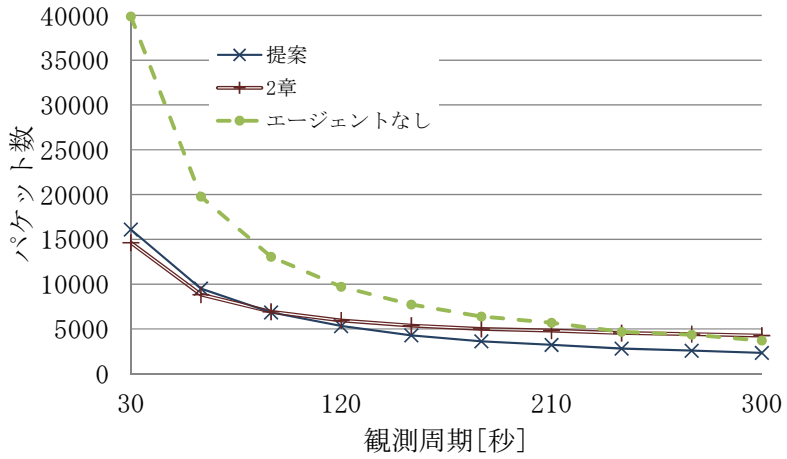

図 3.4: 観測周期の影響：パケット数

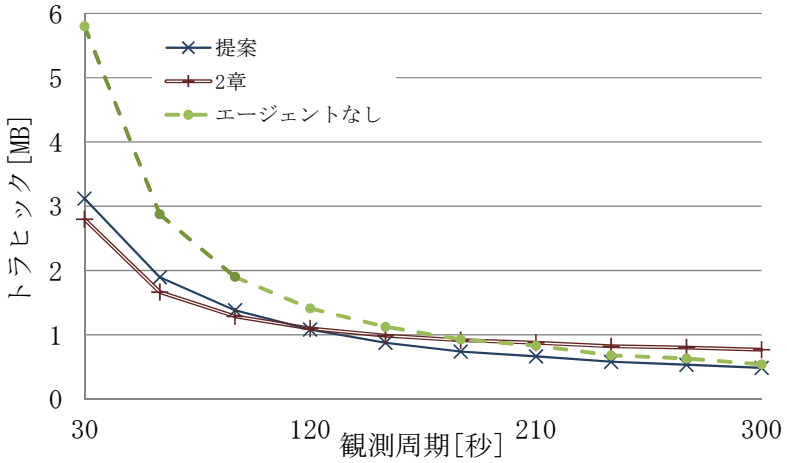

図 3.5: 観測周期の影響：トラヒック

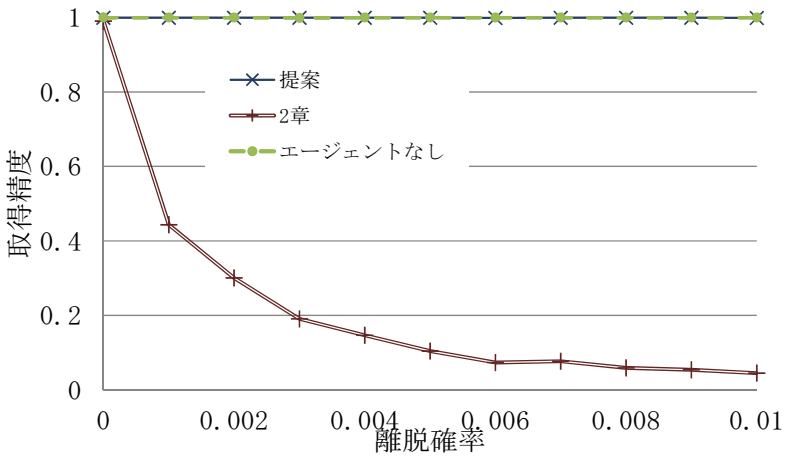

図 3.6: 端末離脱の影響：取得精度

方式および提案方式は，エージェントなしの方式と比べて短い時間でデータを取得できていることがわかる．これは，図 2.7 に対する考察と同様の理由によるものである．

図 3.4 および図 3.5 より，観測周期が短い場合，2 章の方式および提案方式は，エージェントなしの方式よりもパケット数およびトラヒックが小さいことがわかる．これは，図 2.12 および図 2.13 に対する考察と同様の理由によるものである．提案方式では，観測周期毎に，観測位置から β [m] 以上離れている場合に移動を行うが，$\beta < \alpha$ により，提案方式のほうがより頻繁に移動が発生し，その結果，2 章の方式よりもトラヒックが大きくなる．観測周期が長い場合，2 章の方式では，エージェントの移動によるトラヒックが占める割合が大きくなるため，エージェントなしの方式よりトラヒックが大きくなる．一方，提案方式は観測周期が大きくなると移動の発生頻度が小さくなるため，エージェントなしの方式よりもトラヒックが小さい．

3.5.3　端末離脱の影響

端末の離脱確率 F を変化させたときの実験結果を図 3.6 から図 3.9 に示す．この図において，グラフの横軸は F を表し，縦軸は，図 3.6 では取得精度，図 3.7 では取得待ち時間，図 3.8 ではパケット数，図 3.9 ではトラヒックを表す．

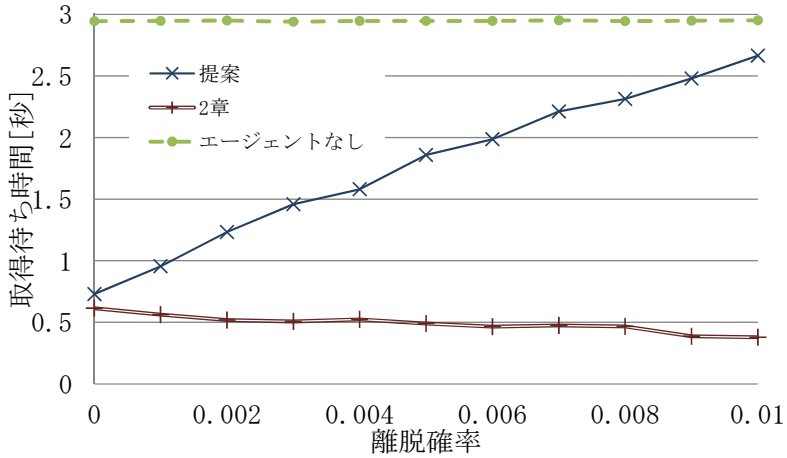

図 3.7: 端末離脱の影響：取得待ち時間

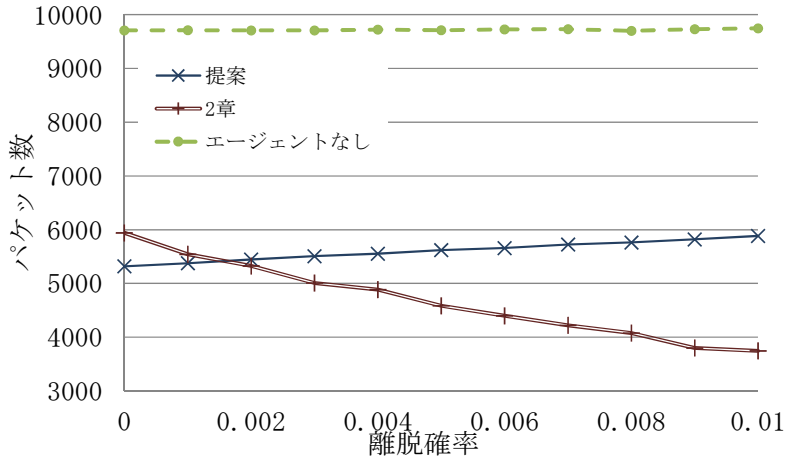

図 3.8: 端末離脱の影響：パケット数

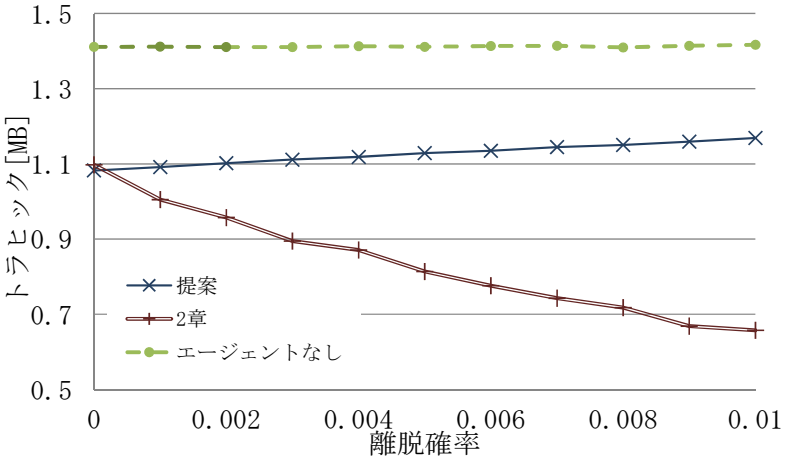

図 3.9: 端末離脱の影響：トラヒック

図 3.6 より，提案方式およびエージェントなしの方式は，取得精度が高いことがわかる．2 章の方式は，エージェントの配置を最初にのみ行い，端末の離脱によりエージェントが消失（エージェントが動作中の端末が離脱）した場合，それ以降のデータ収集を失敗する．そのため，離脱確率が大きくなるほど取得精度が低下する．提案方式では，エージェントが消失した場合，消失したエージェントを再配置した後，センサデータを再送するため，取得精度が低下しない．エージェントなしの方式では，エージェントを用いないため，離脱確率は取得精度に影響しない．

図 3.7 より，提案方式は，離脱確率が大きくなるほど，取得待ち時間が大きくなることがわかる．これは，離脱確率が大きくなるほどエージェントの再配置およびセンサデータの再送する頻度が大きくなり，これらの手続きによりデータを取得するまでの時間が増加するためである．2 章の方式では，センサデータの再送を行わないため，離脱確率は取得待ち時間に影響しない．エージェントなしの方式においても離脱確率が取得待ち時間に影響しないことがわかる．これは，エージェントなしの方式ではエージェントを用いておらず，センサデータの再送頻度が低いためである，

図 3.8 および図 3.9 より，提案方式は，離脱確率が大きくなるほど，トラヒックが大きくなることがわかる．これは，離脱確率が大きくなるほどエージェントの再配置およびセンサデータの再送する頻度が大きくなり，これらの手続きに伴い

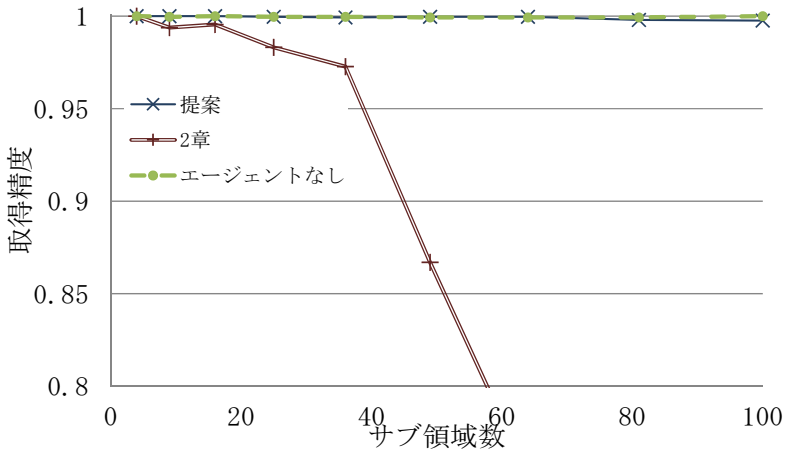

図 3.10: サブ領域数の影響：取得精度

メッセージ数が増加するためである．2 章の方式では，エージェントが消失すると，消失したエージェントおよびその祖先エージェントがセンサデータの転送を行わなくなる．そのため，離脱確率が大きくなるほど，トラヒックが小さくなる．エージェントなしの方式の結果は，取得待ち時間の結果と同様の傾向である．

3.5.4 サブ領域数の影響

サブ領域数 G を変化させたときの実験結果を図 3.10 から図 3.13 に示す．この図において，グラフの横軸は G を表し，縦軸は，図 3.10 では取得精度，図 3.11 では取得待ち時間，図 3.12 ではパケット数，図 3.13 ではトラヒックを表す．

図 3.10 より，提案方式はサブ領域数に関わらず取得精度が高く，2 章の方式はサブ領域数が多いほど取得精度が低いことがわかる．これは，図 3.2 に対する考察と同様の理由によるものである．ジオルーティングが失敗する頻度は，サブ領域数が多いほど高くなるため，2 章の方式はサブ領域数が多いほど取得精度が低い．一方，提案方式はセンサデータの再送を行うため，パケットの送受信失敗による取得精度の低下を防ぐことができ，サブ領域数に関わらず高い取得精度となる．また，エージェントなしの方式はサブ領域数に関わらず取得精度が高いことがわかる．これは，図 2.18 に対する考察と同様の理由によるものである．

図 3.15 より，サブ領域数に関わらず提案方式および 2 章の方式は，エージェン

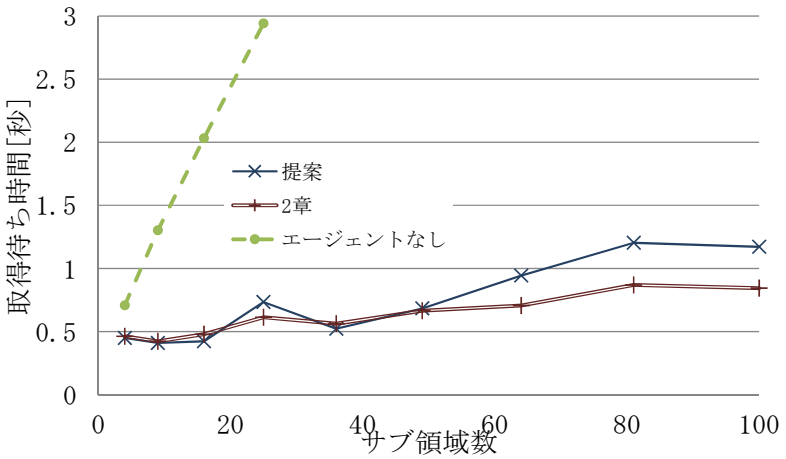

図 3.11: サブ領域数の影響：取得待ち時間

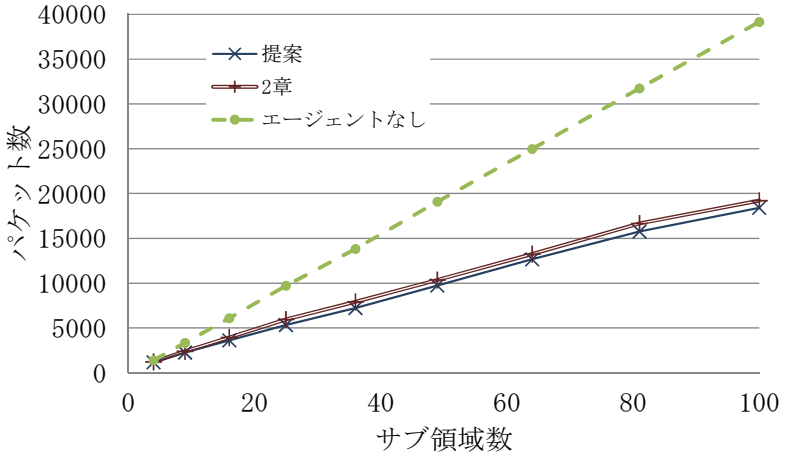

図 3.12: サブ領域数の影響：パケット数

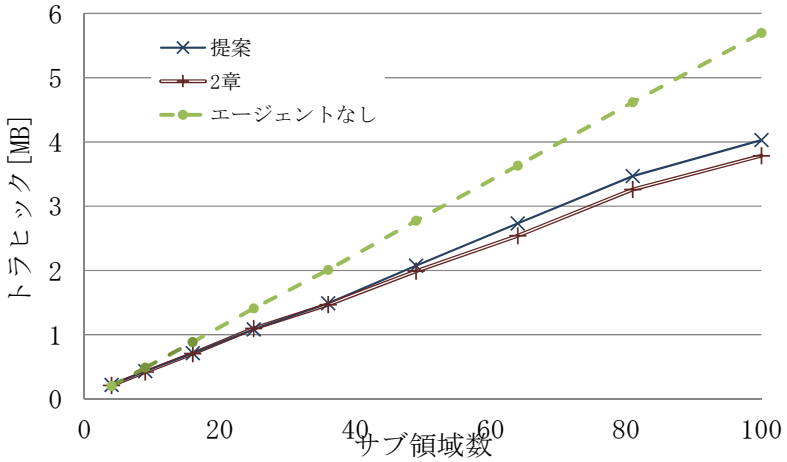

図 3.13: サブ領域数の影響：トラヒック

トなしの方式よりも取得待ち時間が短く，その差はサブ領域数が多いほど大きくなることがわかる．図 3.16 より，提案方式および 2 章の方式のパケット数はエージェントなしの方式よりも少なく，その差はサブ領域数が多いほど大きくなることがわかる．図 3.17 より，提案方式および 2 章の方式のトラヒックはエージェントなしの方式よりも小さく，その差はサブ領域数が多いほど大きくなることがわかる．これらの結果は，図 2.19 から図 2.21 に対する考察と同様の理由によるものである．

3.5.5 センサデータサイズの影響

センサデータサイズ D を変化させたときの実験結果を図 3.14 から図 3.17 に示す．この図において，グラフの横軸は G を表し，縦軸は，図 3.14 では取得精度，図 3.15 では取得待ち時間，図 3.16 ではパケット数，図 3.17 ではトラヒックを表す．

図 3.14 より，センサデータサイズに関わらず提案方式は 2 章の方式よりも取得精度がわずかに高いことがわかる．また，エージェントなしの方式はセンサデータサイズに関わらず取得精度が高いことがわかる．図 3.15 より，センサデータサイズに関わらず提案方式および 2 章の方式は，エージェントなしの方式よりも取得待ち時間が短いことがわかる．図 3.16 より，提案方式および 2 章の方式のパケット数はエージェントなしの方式よりも少ないことがわかる．図 3.17 より，提案方

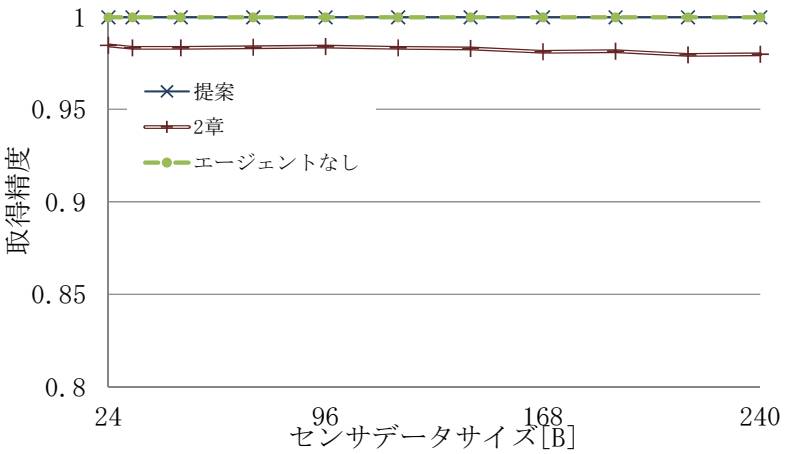

図 3.14: センサデータサイズの影響：取得精度

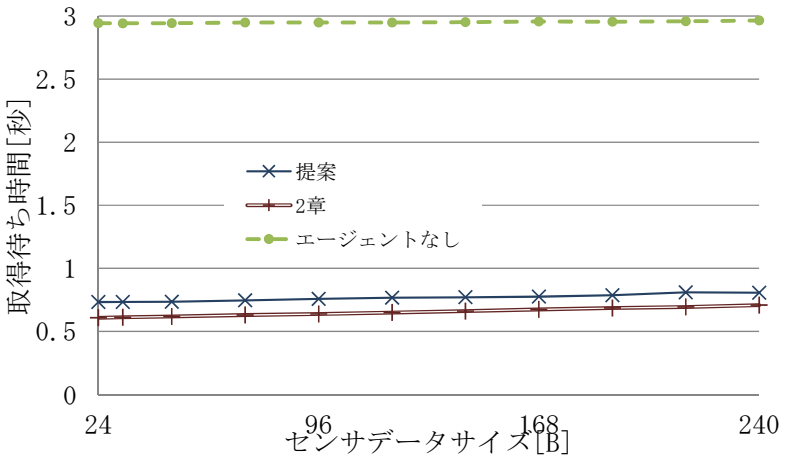

図 3.15: センサデータサイズの影響：取得待ち時間

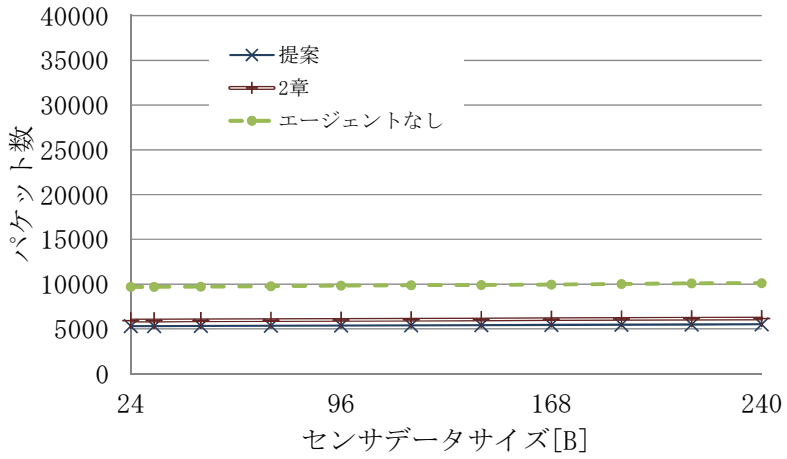

図 3.16: センサデータサイズの影響：パケット数

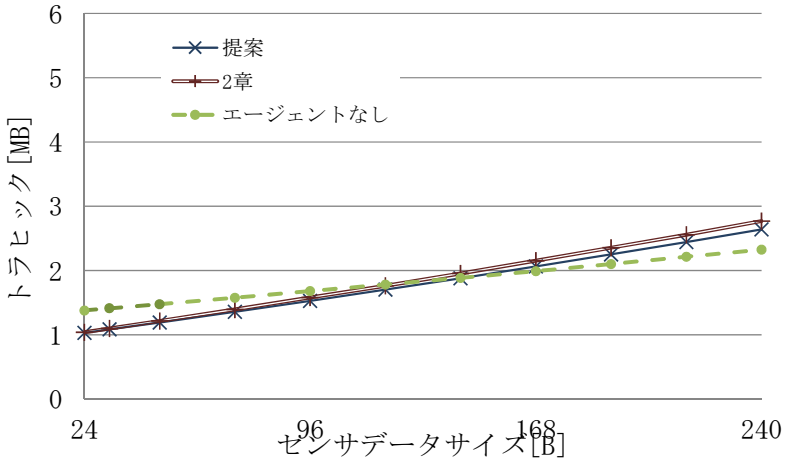

図 3.17: センサデータサイズの影響：トラヒック

式および2章の方式のトラヒックの増加量がエージェントなしの方式と比べて大きいことがわかる．これらの結果は，図2.18から図2.21に対する考察と同様の理由によるものである．

3.5.6　性能評価のまとめ

シミュレーション実験により，提案方式は，エージェントが消失した場合のみエージェントの再配置によりトラヒックが増加し，取得精度を維持できることを確認した．このことは，提案方式が低頻度でエージェントが消失する環境に適していることを示している．具体的には，観測周期あたりのエージェント消失の発生確率が低い環境において，エージェントが消失していない場合には2章の方式と同様に効率的にデータを収集でき，さらにエージェントの消失時にも，消失したエージェントを再配置することで取得精度を維持できる．逆に，ネットワークへの参加端末が頻繁に変化する環境では，観測周期あたりのエージェント消失の発生確率が高くなり，エージェントの再配置によるトラヒック増加の影響が支配的になってしまう．

以上の結果から，端末のネットワーク離脱に対して取得精度を維持するための方法は，低頻度でエージェントが消失する環境では提案方式，その逆の環境ではエージェントなしの方式がそれぞれ適していることが明らかになった．

3.6　むすび

本章では，著者らがこれまでに提案した，密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式を拡張し，消失したエージェントの再配置，およびセンサデータの再送を効率的に行う方式を提案した．提案方式では，センサデータの送受信に失敗した場合にセンサデータの再送処理，エージェントが消失した場合に，再配置を行うことにより，センサデータ収集が不可能になることを防ぎ，取得精度を向上できる．さらに，エージェントの移動を観測時

刻（の少し前の時刻）毎にすることにより，エージェント移動に伴うトラヒックを削減できる．

シミュレーション実験の結果から，提案方式は，離脱確率が大きい環境であっても，取得精度が低下しないこと，サブ領域数が多くジオルーティングが失敗しやすい環境であっても，取得精度が低下しないことを確認した．また，提案方式は，観測周期が大きくなると移動の発生頻度が小さくなるため，エージェントなしの方式よりもトラヒックが小さいことを確認した．

本章では，簡単化のため単一のアプリケーション要求を想定した．しかし，実環境では，1 章で述べたように，密なモバイルセンサネットワークを利用してデータを収集するユーザが同時に複数存在することが考えられる．そこで，次章では，異なるシンクによって配置されたエージェント間で協調動作を行うことで，エージェントや転送する際のセンサデータを共通化し，さらなるデータ収集の効率化について検討する必要がある．

第4章　複数シンクのデータ収集効率化のためのエージェント共通化方式

4.1　まえがき

これまでに2章および3章では，端末のセンサデータ転送を制御するエージェントを用いて効率的にセンサデータを集めるデータ収集方式を提案した．エージェントはシンクによって生成され，それぞれの観測位置に最も近い端末上に配置される．エージェントによってセンサデータをシンクへ送る端末の数を最小にし，データ収集のトラヒックを削減する．しかし，これらの方式は，1台のシンクのみが存在する環境を想定しているため，複数のシンクが存在する環境に適用した場合，各シンクがそれぞれエージェントを配置して，独立してセンサデータを収集してしまう．したがって，同一のセンサデータであっても複数の端末および転送経路から集めてしまい，無駄なトラヒックが発生する．そのため，観測周期や地理的粒度といったデータ収集の条件が異なる複数のシンクがセンサデータを収集する環境において，効率的にトラヒックを削減できない．

そこで，本章では，同種のデータを収集する複数シンクの観測範囲を保証し，効率的にセンサデータを収集するデータ収集方式を提案する．提案方式では，まず，エージェント数が増加することを防ぐために，複数の観測位置をセンシングできる端末上にエージェントを共通化する．さらに，観測時刻が重複した場合，複数のシンクに同時にセンサデータを集約して送信する．本章ではさらに，シミュレーション実験により，提案方式が効率的にセンサデータを収集できることを確認した．

以下では，4.2節で関連研究を紹介する．4.3節で本論文の想定環境を示し，4.4

節で提案方式について述べる．4.5 節でシミュレーション実験の結果を示す．最後に 4.6 節で本章のまとめと今後の課題について述べる．

4.2　関連研究

無線センサネットワークの分野において，複数シンクが存在する環境を想定した既存研究がある [34, 35, 38, 49, 53, 58, 59, 62]．文献 [34, 49, 53] では，任意の位置にシンクを配置可能なネットワークにおいて，ネットワーク寿命の最大化およびデータ収集遅延の最小化を目的とする複数シンクの配置の最適化に取り組んでいる．文献 [34] の提案方式では，端末からシンクまでの最大ホップ数を最小化することで，端末の負荷を分散し，ネットワーク寿命を長くしている．文献 [49,53] では，データ転送の最大遅延を最小化する手法を提案しており，シンクの位置決めには，文献 [49] の手法では遺伝的アルゴリズム [16]，文献 [53] の手法では，Particle Swarm Optimition [32] をそれぞれ使用している．

文献 [35, 38, 58, 59, 62] では，配置済みの複数シンクへのデータ転送経路の最適化に取り組んでいる．文献 [35, 38, 58, 59] では各端末がそれぞれ地理的にもっとも近いシンクへデータを送信することで，ネットワーク全体で発生するトラヒックを削減する手法を提案している．文献 [62] では，データ転送の中継端末をラウンドロビン方式で選択することにより端末の負荷を分散する手法を提案している．

これらの既存研究では，本研究と同様に複数シンクが存在する環境におけるデータ収集の効率化に取り組んでいる．一方で，本研究が想定する密なモバイルセンサネットワークでは，アプリケーションごとにセンサデータを要求するシンクが異なっており，シンク間のデータ共有が行われない．そのため，既存研究で提案されている，センサデータをいずれかのシンクにのみ送信する手法では，センサデータを受信していないシンクについて，アプリケーション要求を満たすことができない．ここで，提案方式では，地理的粒度を保証したセンサデータをそれぞれのシンクに送信することでシンクごとに異なるアプリケーション要求を満たしている．

表 4.1: S_i の観測条件

観測領域	A_i
地理的粒度	${k_i}^2 \cdot M_i \cdot N_i$
センサデータ	サブ領域の中心点から距離 s_i 以内の端末の観測値
開始時刻	P_i
収集回数	L_i
収集周期	T_i

4.3 想定環境

基本的に 2 章と同様に，一般ユーザの携帯する無線通信機能を搭載した移動型センサ端末が構成する，密なモバイルセンサネットワークを想定する．

領域内には，複数のシンクが存在し，それぞれ異なるアプリケーションの要求に基づいて，領域全体のある一部分の領域を観測領域と定め，定期的に，観測領域をある一定の地理的粒度を保証するように観測する．具体的には，観測のタイミングで，観測領域および地理的粒度から決定される観測位置付近に位置する端末からセンサデータを収集する．

ネットワークが構築されている領域全体を二次元平面とし，シンク $(S_1, \cdots, S_p)$ は，自身の観測条件（表 4.1）を定める．観測領域 A_i は縦横の比が $M_i : N_i$(M_i と N_i は正数) の矩形領域，センシングの地理的粒度は ${k_i}^2 \cdot M_i \cdot N_i$ の整数とする．S_i は，観測領域を $k_i \cdot M_i \times k_i \cdot N_i$ の格子状のサブ領域に分割し，各サブ領域の中心点をデータ収集の対象である観測位置とする（図 4.1）．それぞれの観測位置から距離 s_i 以内に存在する端末から $P_i + l_i T_i (l_i = 0, \cdots, L_i)$ の時刻に観測したデータを収集する．

4.4 提案方式

本章の提案方式である，複数シンクのデータ収集に対して地理的粒度の保証およびデータ転送のトラヒックを削減することを目的とした，エージェント共通化方式について述べる．

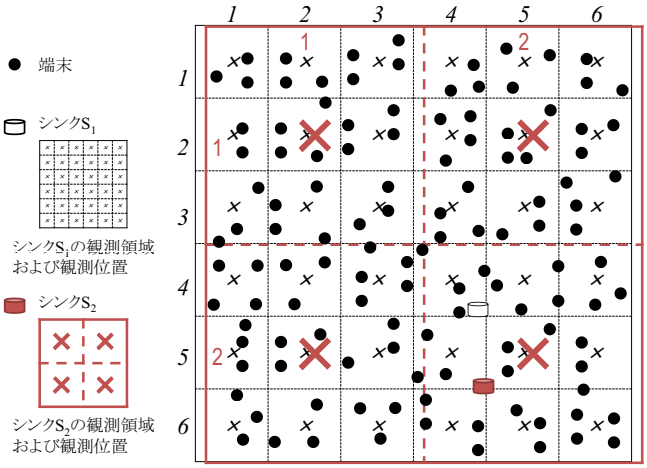

図 4.1: 観測領域と観測位置のイメージ

2 章で述べた方式では，複数のシンクがセンサデータを収集する場合，各シンクがそれぞれエージェントを配置して，独立してセンサデータを収集してしまい，無駄なトラヒックが発生する．そのため，提案方式では，まず，エージェント数が増加することを防ぐために，複数の観測位置をセンシングできる端末上にエージェントを共通化する．さらに，観測時刻が重複した場合，複数のシンクに同時にセンサデータを集約して送信する．具体的には，シンク S_i は，4.4.1 項で述べる方法に従って，$k_i \cdot M_i \times k_i \cdot N_i$ 個の観測位置へエージェントを配置する．エージェントは自身が動作している端末が観測位置から離れた場合，4.4.2 項で述べる方法に従って観測位置に最も近い端末へ移動する．各観測時刻に，エージェントは 4.4.3 項で述べる方法に従って端末が生成したセンサデータをシンクへ送信する．

4.4.1　エージェント配置

提案方式は，同じ観測位置を重複して担当するエージェントを共通化することで，エージェント移動とセンサデータ転送のトラヒックを削減する．

まず，アプリケーションの要求を受信したシンクは，端末がエージェントを起動する際に必要となるエージェントデータを作成する．そして，2.3.3 項で説明したジオルーティングを用いて，エージェントデータを自身に最も近いサブ領域の観測位置へ送信する．観測位置付近で起動中のエージェントが存在しない場合，観

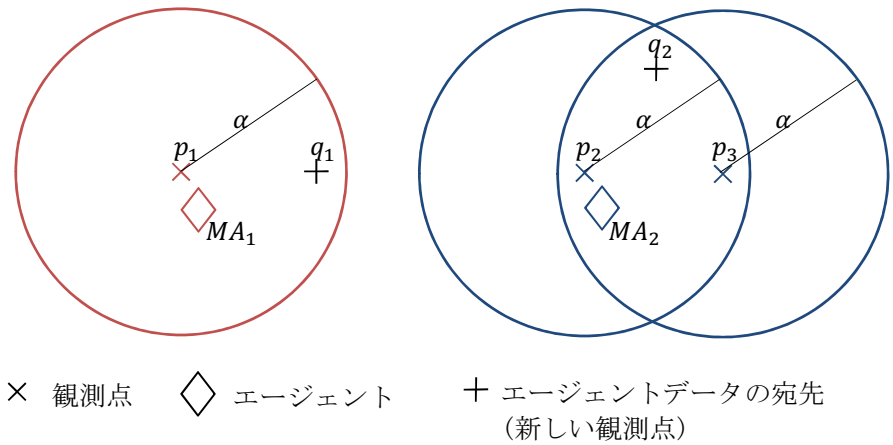

図 4.2: エージェントが観測位置を共通化する例

測位置に最も近い端末はエージェントデータを受信し，エージェントを起動する．観測位置付近で起動中のエージェントが存在する場合，そのエージェントは観測位置に最も近い端末の代わりにエージェントデータを受信する．ここで，エージェントと各観測位置の距離は，エージェントが動作している端末の移動によって変化する．そのため，エージェントは自身の動作端末の現在位置ではなく，観測位置間の距離に基づいてエージェントデータを受信するかどうかを決定する．具体的には，観測位置間の距離が $\alpha(< r)$ より小さい場合，エージェントはそれらの観測位置を担当する．

この方法で共通化されたエージェントは，複数のエージェントデータを保持し，データ収集処理が完了するごとに，その場で自身の担当を変更する．図 4.2 にエージェントが観測位置を共通化する例を示す．図 4.2 では，2 つのエージェント MA_1, MA_2，3 つの観測位置 p_1, p_2, p_3，およびエージェントデータの宛先 q_1, q_2（新しい観測位置）が存在する．MA_1 は p_1 を担当しており，p_1 との距離が α 未満である q_1 のエージェントデータを受信する．同様に MA_2 は p_2, p_3 (p_2 と p_3 の距離は α 未満) を担当し，q_2 とそれらの距離が共に α 未満なので，宛先が q_2 のエージェントデータを受信する．

しかしながら，上記の起動中のエージェントが新たに観測位置を担当するルールには問題点がある．新しい観測位置とその他の観測位置の距離が α 以内の場合，複数のエージェントが新しい観測位置を共通化し，その結果，転送されるセンサ

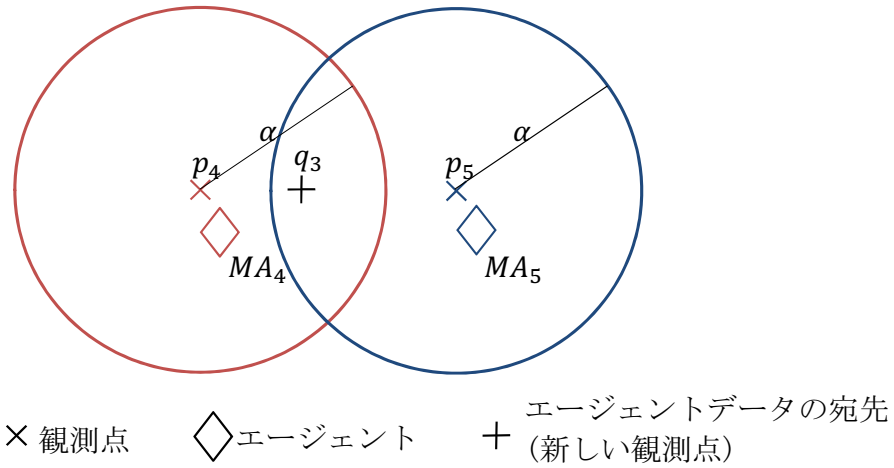

図 4.3: 複数のエージェントが新しい観測位置を共通化可能な例

データの量が増加する可能性がある．図 4.3 に複数のエージェントが新しい観測位置を共通化可能な例を示す．図 4.3 では，エージェント MA_4 および MA_5, 観測位置 p_4 および p_5, およびエージェントデータの宛先 q_3 が存在する．MA_4 と MA_5 はそれぞれ p_4 と p_5 を担当しており，p_4, p_5 と q_3 の距離が α 以下であることから，前述のルールに従った場合，MA_4 と MA_5 は共に q_3 を共通化してしまう．

この問題を回避するため，エージェントは隣接するエージェント間と通信して，互いの担当領域を決める．具体的には，新しく起動したもしくはエージェントデータを受信したエージェントは，新しい観測位置と自身の保持する各観測位置の距離の最大値を隣接端末へブロードキャストする．もし，2 つ以上のエージェントがエージェントデータを受信している場合，それらは互いのメッセージを受信する．ここで，上記の距離が小さいほど，観測位置を共通化可能な領域が大きく，エージェントが領域内に留まるための端末間の移動頻度および移動で生じるトラヒックが小さい．したがって，自身が送信した値が最小のエージェントのみがエージェントデータを保持し，その他のエージェントはエージェントデータを破棄する．

図 4.3 では，MA_4 は p_4 と q_3 の距離，MA_5 は p_5 と q_3 の距離をそれぞれブロードキャストする．互いにメッセージを受信し，p_4 と q_3 の距離が最小であることから，MA_4 はエージェントデータを保持し，MA_5 はエージェントデータを破棄する．結果として，MA_4 のみが q_3 を共通化する．

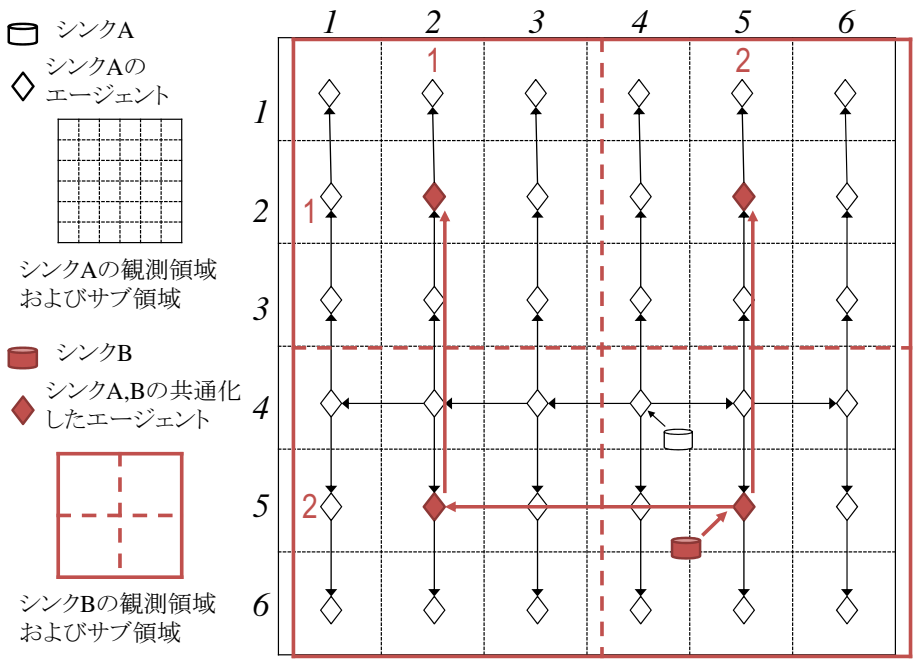

図 4.4: エージェント配置の例

新しく起動した，もしくはエージェントデータを受信したエージェントは，自身が位置するサブ領域に基づいて，隣接するサブ領域の観測位置へエージェントデータを再転送する．エージェントデータの再転送は，縦方向，続いて横方向へと伝搬する．これらの手順を繰り返すことで，シンクはすべての観測位置へエージェントを配置する．この手順において，シンクとエージェントはエージェントデータ転送における互いの親子関係（送信端末-受信端末は親-子に対応する）を構築する．

図 4.4 に提案方式によるエージェント配置の例を示す．図 4.4 において，シンク A およびシンク B が存在しており，それぞれがエージェントを配置している．シンク A とシンク B の観測領域はほぼ重なっているが，シンク A のサブ領域数は 36，シンク B のサブ領域数は 4 と大きくことなる．ここで，シンク B の各サブ領域の観測位置の付近には，シンク A のいずれかのサブ領域の観測位置が存在している．例えば，シンク B の 2 行 2 列目のサブ領域の観測位置に近くには，シンク A の 5 行 5 列目のサブ領域の観測位置が存在している．そのため，シンク B が配置するすべてのエージェントはシンク A のエージェントと共通化される．

4.4.2　エージェント移動

提案方式では，2章および3章で述べた方式と同様に，各エージェントが現在の端末から観測位置に最も近い端末へ移動することで，アプリケーションが要求する地理的粒度を保証する．

基本的には2.4.3項と同様の手順で，エージェントは端末間を移動する．一方，エージェントが複数のデータ収集を担っている（複数の観測位置を持つ）場合，端末は各観測位置から s 以内にいなければならない．エージェントはいずれかの観測位置と自身の距離が α 以上になった時，移動を開始する．エージェントは端末との距離が β 以内である各観測位置を宛先とする複数エージェントデータを含むメッセージを発行する．エージェントはそれらの観測位置の中心へ移動する．しかしながら，この複数エージェントデータを受信した端末は，いくつかの観測位置から α 以上離れている可能性がある．その場合，端末はそれらの観測位置へ向けて対応するエージェントデータをそれぞれ送信し，移動を行う．つまり，エージェントの共通化を解除する．

4.4.3　センサデータ転送

配置されたエージェントは，自身が動作する端末が持つセンサデータを各観測時刻にシンクへ送信する．提案方式はエージェントが各転送木上でセンサデータを集約して複数シンクへ送ることで，センサデータ転送のトラヒックを削減できる．各観測時刻に，転送木上の葉に位置するエージェントは，センサデータを自身の親が担当している各観測位置へ送信する．センサデータはジオルーティングを用いて他の端末を経由して親に転送される．すべての子からセンサデータを受信した親は，受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを集約し，転送木上の親へ送信する．これらの手順を繰り返して，シンクは自身が位置するサブ領域の観測位置を担当するエージェントからすべてのセンサデータを受信できる．

複数シンクがデータを収集する時，提案方式は複数シンク間で共有可能なセンサデータを集約することでさらなるトラヒックを削減する．複数のデータ収集処理を担っているエージェントは，それらのセンシングタイミングが重なった時，複

数のシンクへセンサデータを集約して送信する．このとき，データ集約は，センサデータの転送方向に基づいて行う．エージェントは集約したセンサデータを転送木上の同一方向に位置する親の内の 1 つにのみ送信する．集約されたデータは，宛先となった親に対するセンサデータとそれ以外の親に対する追加データで構成される．追加データは他の親について，親の位置情報，親へのみ送信するセンサデータ，および，すでに集約されたデータ内に存在しかつその親へ送信するセンサデータのインデックスで構成される．インデックスを用いることで同一センサデータの重複がなくなり，集約後のデータサイズを小さくできる．集約されたデータを受信した親は，追加データを参照することで他の親の位置とその親へ送るべきセンサデータがわかり，それらへセンサデータを送信する．上記の手続きにより，複数の親に送るセンサデータを一部の区間で集約して転送されるため，子がそれらの親へ直接センサデータを送った場合と比べて，転送トラヒックを削減できる．

ここで，複数のデータ収集処理を担っているエージェントは，ある転送木上の葉であり他の転送木上では葉ではないという場合がある．このような場合，いずれかの方向について全ての転送木上で葉であるエージェントのみが観測時刻に即座にセンサデータを送信する（それらのエージェントはすべての観測領域上で上端または下端のサブ領域に存在する）．このようにすることで，領域全体で上下端に位置する観測位置から順番にセンサデータが転送され，効果的にセンサデータを集約できる．

図 4.5 に，観測時刻が重複したエージェントがセンサデータを送信する例を示す．図 4.5 において，4 つのエージェント MA_1, MA_2, MA_3 および MA_4 が存在し，MA_1 の親は MA_2 および MA_3, MA_2 の親は MA_4 である．MA_1 は，MA_2 と MA_3 が同一方向に存在していることから，自身のセンサデータ SD_1 と追加データを MA_2 へのみ送信する．ここで，SD_1 に付加された追加データは，MA_3 の位置情報と送信データ内の SD_1 へのインデックスである．MA_2 は MA_1 から SD_1 を受信し，受信したセンサデータ SD_1 と自身のセンサデータ SD_2 を MA_4 へ送信する．また，MA_2 は MA_1 から受信した追加データを参照し，SD_1 を MA_3 へ送信する．

図 4.6 に，センサデータ転送の全体イメージを示す．図 4.6 では，シンク A およ

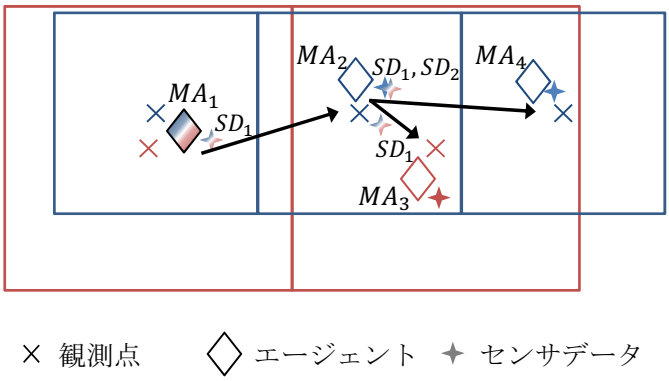

図 4.5: 複数のデータ収集におけるセンサデータ転送例

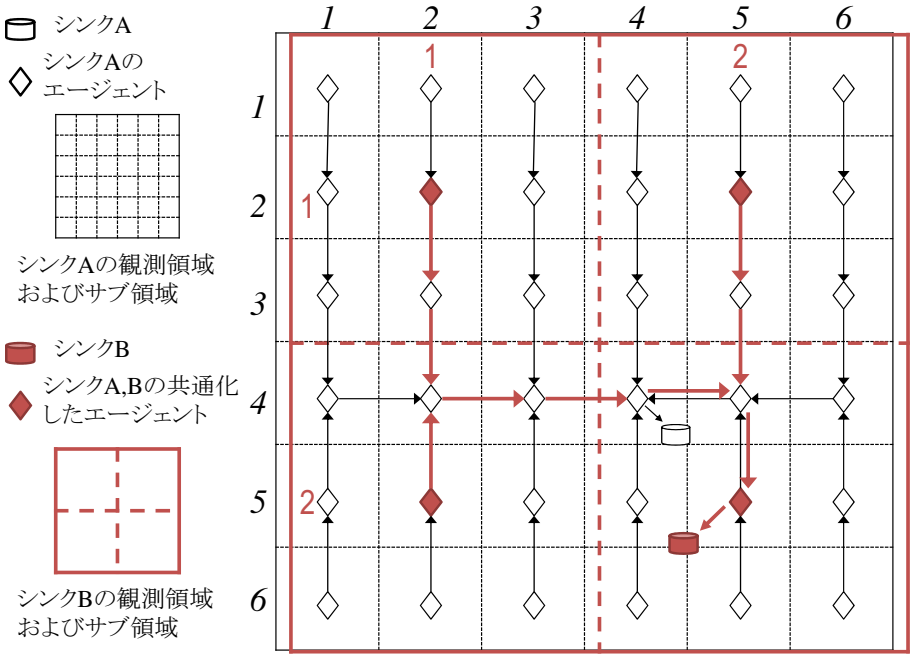

図 4.6: センサデータ転送の全体イメージ

びシンク B が存在しており，それぞれが配置したエージェントがセンサデータを転送している．ここで，シンク B の各エージェントはシンク A エージェントと共通化されており，さらに，共通化されたエージェントのうち，シンク B の 2 行 2 列目のサブ領域に配置されているエージェント以外の各エージェントのセンサデータの転送方向がシンク A, シンク B で一致している．例えば，シンク B の 1 行 1 列目のサブ領域の観測位置およびシンク A の 2 行 2 列目のサブ領域の観測位置を担

当するエージェントのセンサデータの転送方向は，どちらも下である．

センサデータの転送方向が一致している共通化されたエージェントは，シンク B のセンサデータ転送における親（親 B）へセンサデータを送信する代わりに，シンク A のセンサデータ転送における親（親 A）へ送信するセンサデータに，親 B の位置情報および親 B へ送信するセンサデータへのインデックス（追加データ B）を付加する．追加データ B が付加されたセンサデータを受信したシンク A のエージェントが，シンク A の転送木を経由して親 B へセンサデータを転送することで，親 B がセンサデータを受信するまでに生じるトラヒックを削減できる．例えば，シンク B の 1 行 2 列目のサブ領域に配置されているエージェントから，その親であるシンク B の 2 行 2 列目のサブ領域に配置されているエージェントへのセンサデータの転送は，シンク A の 2 行 5 列目のサブ領域，3 行 5 列目のサブ領域および 4 行 5 列目のサブ領域に配置されているエージェントによって行われる．同様にして，シンク B の 1 行 1 列目のサブ領域およびシンク B の 1 行 1 列目のサブ領域に配置されているエージェントから，その親であるシンク B の 2 行 2 列目のサブ領域に配置されているエージェントへのセンサデータ転送も，シンク A が配置したエージェントによって行われることで，シンク B へのセンサデータ転送で生じるトラヒックを削減できる．

4.5 性能評価

本節では，提案方式の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す．本性能評価は，提案方式に適した環境および適さない環境を明らかすることを目的とする．具体的には，シミュレーション実験により，シンクの台数やシンク間の距離等を変化させた時の，提案方式の振る舞いを測定し，その結果を考察する．

本実験では，ネットワークシミュレータ Scenargie 1.6 [1] を用いた．

[1] Scenargie 1.6 Base Simulator revision 10864, Space-Time Engineering, http://www.spacetime-eng.com/

4.5.1　シミュレーション環境

1000 [m]× 1000 [m] の二次元平面上に 2000 台の移動型センサ端末 $(M_1, \cdots, M_{2000})$ と p 台のシンク $(S_1, \cdots, S_p)$ が存在する．$S_i(i = 1, \cdots, p)$ は領域の左下端から (PX_i [m], PY_i [m]) の地点に固定されている．各端末はホームエリア付ランダムウェイポイントモビリティモデル [7] に従って移動する．移動先の地点（目標点）は 0.9 の確率で 200[m]×200[m] の矩形領域のホームエリア，0.1 の確率で領域全体からランダムに決定し，目標点までの移動速度は 0.5 [m/sec] から 1.0 [m/sec] の間でランダムに決定する．目標点では 60 [sec] 停止する．シンクと端末は IEEE 802.11a で通信を行い，通信速度は 6 [Mbps], 通信距離 r は 100 [m] 程度とする．各端末は継続してセンシング行う．P_i, k_i および $s_i(i = 1, \cdots, p)$ を 4400 [sec], 4, 50 [m] とし，$S_1, S_3 \cdots$ は，それぞれ L_i および T_i を 240 および 30[sec] とし, $S_2, S_4 \cdots$ は，それぞれ L_i および T_i を 120 および 60[sec] とする．A_i はそれぞれ左下端が (PL_i [m], PB_i [m]), 右上端が ($PL_i + 800$ [m], $PB_i + 800$ [m]) の矩形領域とする．このとき，各シンクは自身の観測領域を 200 [m] × 200 [m] の 16 個の格子状のサブ領域に分割し，各サブ領域の中心点を観測位置と定める．

上記の評価環境は，基本的に 2.5 節と同様に，テーマパークや交通規制の行われている大規模屋外イベントといった歩行者の通行を阻害するものが極めて少ない環境を想定する．テーマパーク事業者やイベント主催者に加えて，会場に来場している参加者のうち数名が，それぞれが関心のある会場内の一部分の領域の気温分布を，所望の地理的粒度でモニタリングするものとして，複数のシンクおよびアプリケーション要求を設定した．また，3.5.1 節と同様に，端末の移動が激しい環境を想定し，ランダムウェイポイントモデルを端末の移動モデルとして採用した．

すべてのシンクは，4380 [sec] 経過した時に自身の各観測位置にエージェントを配置する．端末が生成するセンサデータのサイズは 24 [B]，シンクが生成するエージェントデータのサイズは 128 [B] とし，各端末は事前にエージェントのソースコードを保持しているものとする．追加データにおける親の位置情報は 16[B], センサデータのインデックスは 1[B] とする．提案方式のパラメータは $\alpha = 49$ [m], $\beta = 48$ [m] にそれぞれ設定した．これらの値は事前に行った予備実験の結果に基づいて決定した．

表 4.2: メッセージサイズ

目的	メッセージ名	サイズ [B]
エージェント配置	配置	256
エージェント移動	移動 (観測位置間の距離)	$128 + 128 \cdot i$ 96
センサデータ転送	センサデータ (追加データ)	$64 + 32 \cdot j$ $24 + 32 \cdot k + 1 \cdot l$
共通	ACK	96

比較方式として，シンクが異なるセンサデータを集約せず，観測位置が重複するエージェントの共通化のみを行う方式（提案方式（非集約）），および個々のシンクがそれぞれエージェントを配置して独立してセンサデータを収集する 3 章の提案方式（3 章の方式）の性能を評価した．

上記の環境において，領域全体を格子状にホームエリアへ分割，各ホームエリアに割り当てる端末数を同数に設定し，端末の初期位置を領域内にランダムに決定して実験を行った．評価基準は次の 3 項目である．

1. トラヒック: シミュレーション中にすべてのシンクおよび端末が送信した各メッセージの MAC 層におけるサイズの合計．表 4.2 に提案方式および 3 章の方式が用いるメッセージサイズを示す．表 4.2 において，i は移動メッセージ中のエージェントデータの数，および j, k および l はそれぞれセンサデータメッセージ中のセンサデータの数，追加データに添付されたセンサデータの数，追加データに添付されたセンサデータのインデックスの数である．

2. 取得精度: シミュレーション中の全観測時刻におけるシンクが収集すべきセンサデータ数に対する実際に収集できたセンサデータ数の割合．

3. 取得待ち時間: シンクが全センサデータの収集に成功した各観測時刻においてデータ収集が完了するまでの経過時間の平均値．

表 4.3: 4.5.2 項のシンクの座標と観測領域

ID	座標 (PX_i [m], PY_i [m])	観測領域左下端の座標 (PL_i [m], PB_i [m])
S_1	$(140, 140)$	$(100, 100)$
S_2	$(180, 140)$	$(110, 100)$
S_3	$(220, 140)$	$(120, 100)$
S_4	$(260, 140)$	$(130, 100)$
S_5	$(140, 220)$	$(100, 120)$
S_6	$(180, 220)$	$(110, 120)$
S_7	$(220, 220)$	$(120, 120)$
S_8	$(260, 220)$	$(130, 120)$

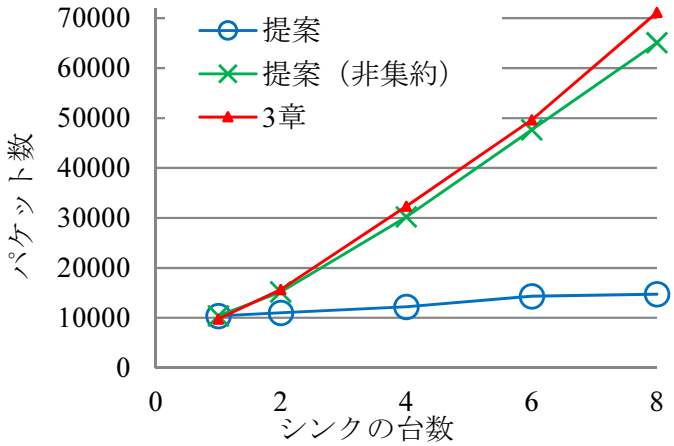

図 4.7: シンクの台数の影響：パケット数

4.5.2　シンクの台数の影響

まず，シンクの台数 p を変化させてその影響を調べた．表 4.3 にシンクの座標と観測領域を示す．図 4.7 から図 4.10 にシミュレーション結果を示す．これらのグラフにおいて，横軸は p, 縦軸はそれぞれ，図 4.7 はパケット数，図 4.8 はトラヒック，図 4.9 は取得精度，図 4.10 は取得待ち時間を示す．

図 4.7 より，提案方式のパケット数は，提案方式（非集約）および 3 章の方式よりも少ないことがわかる．これは，提案方式では，エージェントの共通化によってエージェント移動の機会が減ったこと，およびセンサデータを集約して同一方

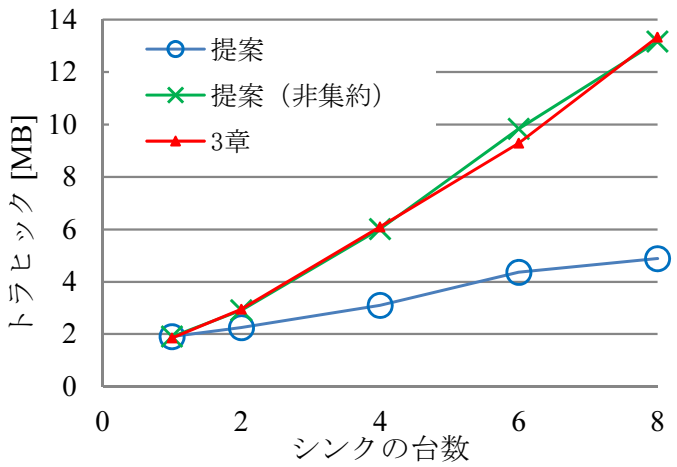

図 4.8: シンクの台数の影響：トラヒック

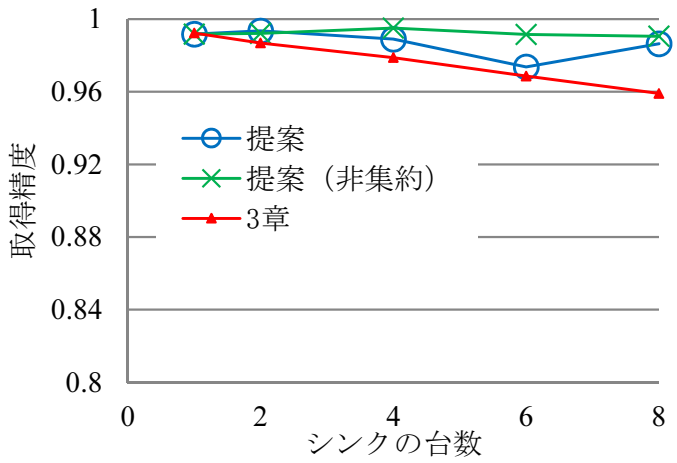

図 4.9: シンクの台数の影響：取得精度

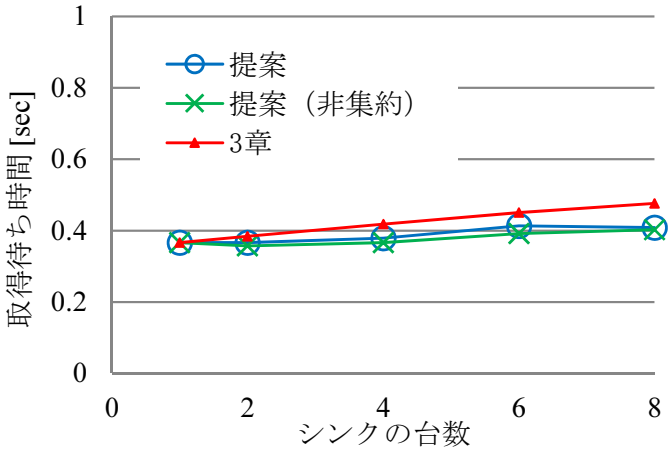

図 4.10: シンクの台数の影響：取得待ち時間

向の複数シンクへ送信していることに起因する．この傾向はシンクの台数が多いほど顕著となっている．

図 4.8 より，提案方式のトラヒックは，提案方式（非集約）および 3 章の方式よりも小さいことがわかる．これは，図 4.7 に対する考察と同様の理由によるものである．

図 4.9 より，すべての方式で取得精度が高いことがわかる．さらに，シンクが受信したすべてのセンサデータは有効であった．これはエージェントが常にセンシングが有効な距離内に留まっているためである．しかしながら，3 章の方式ではシンクの台数が増加すると取得精度が低下することがわかる．これはトラヒックの増加により，パケットが衝突し，センサデータの転送に失敗するためである．提案方式（非集約）の取得精度が低下しないのは，エージェントを共通化していることで同じセンサデータを重複して転送しており，パケットロスへの耐性が高いためである．

図 4.10 より，すべての方式において取得待ち時間が短いことがわかる．これは，図 2.7 に対する考察と同様の理由によるものである．

表 4.4: 4.5.3 項のシンクの座標と観測領域

ID	座標 (PX$_i$ [m], PY$_i$ [m])	観測領域左下端の座標 (PL$_i$ [m], PB$_i$ [m])
S_1	$(140, 140)$	$(0, 100)$
S_2	$(180, 140)$	$(d, 100)$
S_3	$(220, 140)$	$(2d, 100)$
S_4	$(260, 140)$	$(3d, 100)$

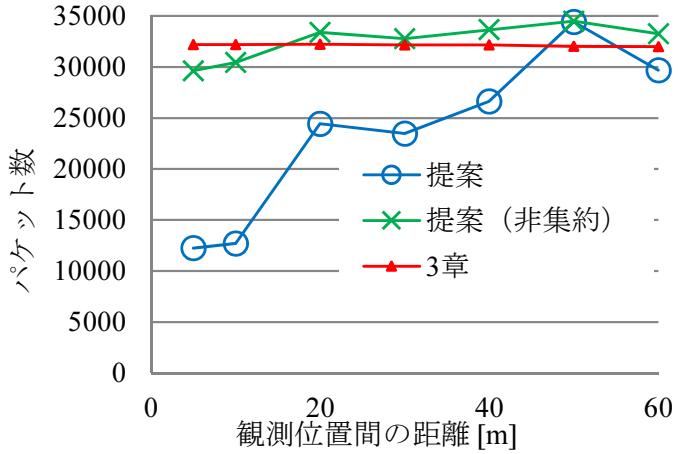

図 4.11: 観測位置間の距離の影響：パケット数

4.5.3 観測位置間の距離の影響

次に，4 台のシンクが存在する環境において，観測位置間の距離を変化させてその影響を調べた．表 4.4 にシンクの座標と観測領域を示す．図 4.11 から図 4.14 にシミュレーション結果を示す．これらのグラフにおいて，横軸は d, 縦軸はそれぞれ，図 4.11 はパケット数，図 4.12 はトラヒック，図 4.13 は取得精度，図 4.14 は取得待ち時間を示す．

図 4.11 より，$d = 50$ 以外の時，提案方式のパケット数は，提案方式（非集約）および 3 章の方式よりも小さいことがわかる．これは，図 4.7 に対する考察と同様の理由によるものである．d が増加すると，提案方式のパケット数が増加する傾向がある．これは，シンクが異なる観測位置間の距離が増加するつれて，エージェントの共通化およびセンサデータの集約が行われる割合が低下するためである．ま

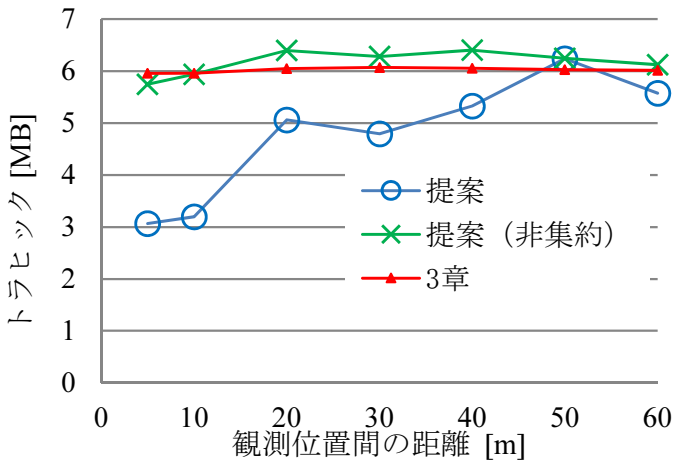

図 4.12: 観測位置間の距離の影響：トラヒック

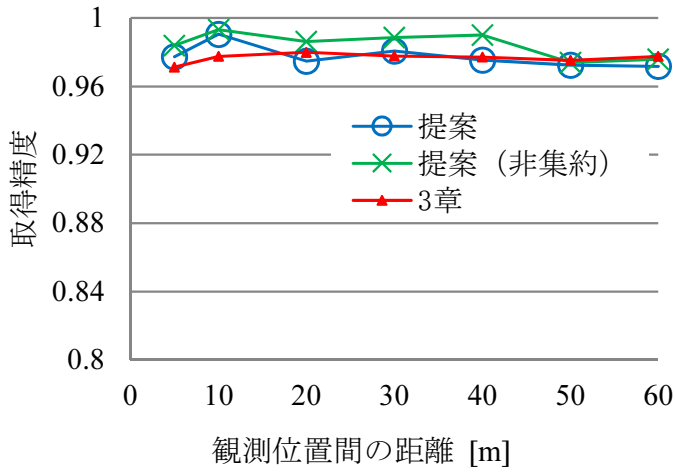

図 4.13: 観測位置間の距離の影響：取得精度

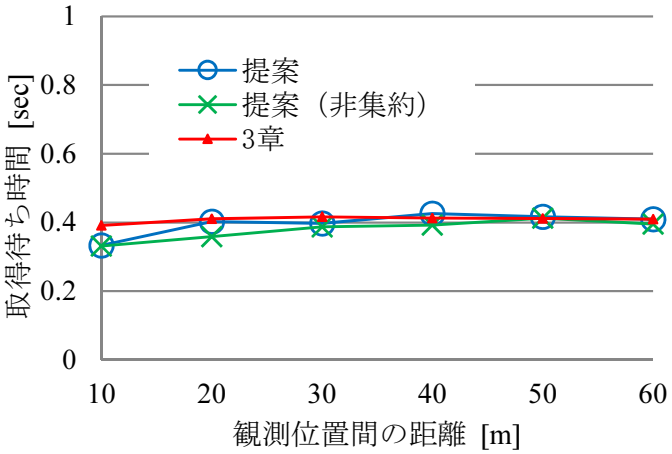

図 4.14: 観測位置間の距離の影響：取得待ち時間

た，共通化の閾値は $\alpha = 48$ であり，$d = 50$ において，すべての観測位置において共通化が行われなくなる．結果として，エージェント移動時の担当領域のメッセージだけのパケット数が 3 章の方式より多く発生する．$d = 60$ では，S_1 と S_4 の一部の観測位置の距離が α を下回り，それらの観測位置においてエージェントの共通化が行われるため，$d = 50$ と比べてパケット数が減少している．

図 4.12 より，$d = 50$ 以外の時，提案方式のトラヒックは，提案方式（非集約）および 3 章の方式よりも小さいことがわかる．図 4.13 より，観測位置間の距離に関わらず，すべての方式において取得精度が高いことがわかる．さらに，シンクが受信したすべてのセンサデータは有効であった．図 4.14 より，すべての方式において取得待ち時間が短いことがわかる．これらは，図 4.11，図 4.9，および図 2.7 に対する考察と同様の理由によるものである．

4.5.4 シンク間の距離の影響

次に，4 台のシンクが存在する環境において，シンク間の距離を変化させてその影響を調べた．表 4.5 にシンクの座標と観測領域を示す．図 4.15 から図 4.18 にシミュレーション結果を示す．これらのグラフにおいて，横軸は q, 縦軸はそれぞれ，図 4.15 はパケット数，図 4.16 はトラヒック，図 4.17 は取得精度，図 4.18 は取得待ち時間を示す．

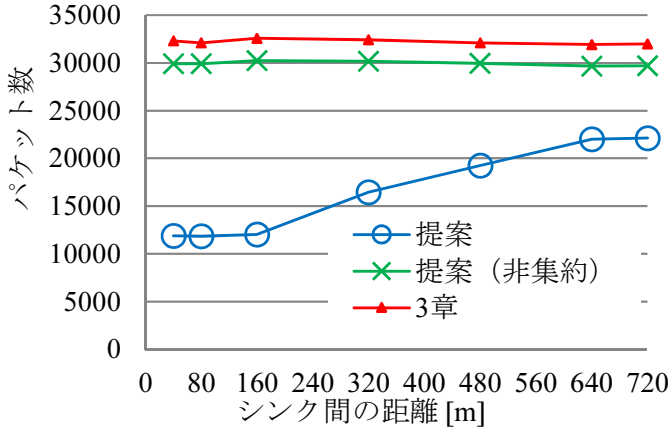

図 4.15: シンク間の距離の影響：パケット数

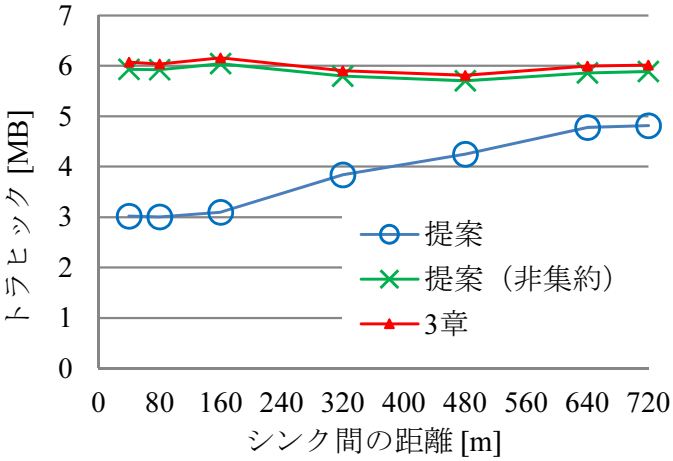

図 4.16: シンク間の距離の影響：トラヒック

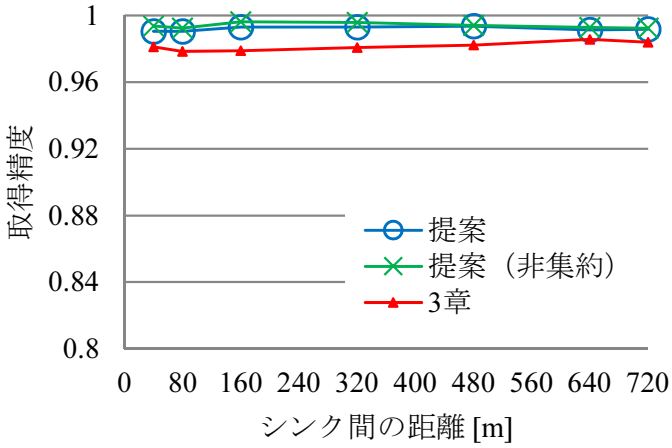

図 4.17: シンク間の距離の影響：取得精度

表 4.5: 4.5.4 項のシンクの座標と観測領域

ID	座標 (PX_i [m], PY_i [m])	観測領域左下端の座標 (PL_i [m], PB_i [m])
S_1	$(140, 140)$	$(100, 100)$
S_2	$(140 + q, 140)$	$(110, 100)$
S_3	$(140, 140 + q)$	$(100, 110)$
S_4	$(140 + q, 140 + q)$	$(110, 110)$

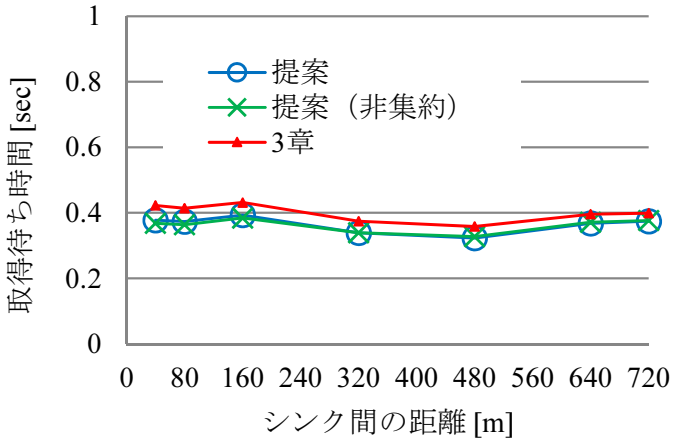

図 4.18: シンク間の距離の影響：取得待ち時間

図 4.15 より，提案方式のパケット数は，提案方式（非集約）および 3 章の方式よりも小さく，その差はシンク間の距離が短いほど大きいことがわかる．これは，シンク間の距離が近いほど，共通化されたエージェントが担当する複数のデータ収集におけるセンサデータの転送方向が一致しやすくなり，センサデータの集約効果がセンサデータの集約が行われる割合が大きくなるためである．

図 4.16 より，提案方式のトラヒックは，提案方式（非集約）および 3 章の方式よりも小さく，その差はシンク間の距離が短いほど大きいことがわかる．図 4.17 より，観測位置間の距離に関わらず，すべての方式において取得精度が高いことがわかる．さらに，シンクが受信したすべてのセンサデータは有効であった．図 4.18 より，すべての方式において取得待ち時間が短いことがわかる．これらは，図 4.15，図 4.9，および図 2.7 に対する考察と同様の理由によるものである．

4.5.5　性能評価のまとめ

シミュレーション実験により，提案方式は，複数シンクのエージェントを共通化および収集センサデータの共通化によってトラヒックを削減できることを確認した．このことは，提案方式がシンクの位置や観測位置がそれぞれ地理的に集中している環境に適していることを示している．具体的には，複数シンクの観測位置間の距離が近い場合，多数のエージェントを共通化でき，さらに，シンク間の距離が近い場合，共通化されたエージェントが担当する複数のデータ収集におけるセンサデータの転送方向が一致しやすくなる．結果として，センサデータの集約効果がセンサデータの集約が行われる割合が大きくなるため，特にトラヒック削減効果が大きい．

逆に，シンクの位置や観測位置が地理的に遠い環境では，エージェントあるいはセンサデータの共通化ができないために，3章の方式と同程度のトラヒックが発生してしまう．

以上の結果から，複数シンクのデータ収集に対して地理的粒度の保証およびデータ転送のトラヒックを削減するための方法は，シンクの位置や観測位置がそれぞれ地理的に近い環境では提案方式が適していることが明らかになった．一方で，シンクの位置や観測位置が地理的に遠い環境では，提案方式と3章の方式の差がなくなることが明らかになった．

4.6　むすび

本章では，密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式（従来方式）を拡張し，複数シンクの観測範囲を保証し，効率的にセンサデータを収集するデータ収集方式を提案した．提案方式では，センシング可能な領域が重複している観測位置を1つのエージェントで担当し，同一方向に存在する親へセンサデータを集約して送信することで，データ収集のトラヒックを削減する．

シミュレーション実験の結果から，提案方式は，シンクが複数存在する環境において，エージェントの共通化によってエージェント移動の機会が減ったこと，およ

びセンサデータを集約して同一方向の複数シンクへ送信していることにより，少ないトラヒックでデータを収集できることを確認した．また，シンクが異なる観測位置間の距離が短いほど，シンク間の距離が短いほどトラヒック削減効果が大きくなることが明らかになった．一方で，シンクの位置や観測位置が地理的に遠い環境では，エージェントの共通化およびセンサデータの集約が行われる割合が低下するため，提案方式は適さないことが明らかになった．そのため，今後は，エージェントが共通化できない場合にも，経路のみを共通化することでトラヒックを削減する方法について検討する必要がある．

提案方式は，簡単化のためアプリケーションが要求するセンサデータは同種のものであることを想定した．しかし，実環境では，あるアプリケーションは気温のデータを要求し，別のアプリケーションは気圧のデータを要求するといった，アプリケーションごとに異なる種類のセンサデータを要求することが考えられる．シンク間で収集するデータの種類が異なる場合，提案方式におけるセンサデータの集約が十分に行えず，トラヒックが増加してしまう．そこで，今後は，異種のセンサデータの集約に適したデータ圧縮方式および転送経路の構築方式について検討する必要がある．

第5章　結論

5.1　本論文のまとめ

本論文では，研究背景として，近年のモバイルセンサネットワークへの注目と，その応用例の一つであるユーザ参加型センシングにおいて，多数の端末がネットワークに参加した場合に，過剰なセンサデータの収集によって通信帯域や端末のバッテリを浪費してしまう問題を取り上げた．また，領域内の任意の位置に対して，センシングした場合にその位置と同じ結果が得られる地理的範囲内に常に複数の端末が存在するモバイルセンサネットワークを密なモバイルセンサネットワークと呼び，密なモバイルセンサネットワークにおけるトラヒックの削減および取得精度の維持を本論文全体で取り組む課題として定めた．

続いて，研究内容として，三つの研究課題に取り組んだ．

一つ目の研究課題は，端末の移動への対応であり，端末の移動に対して地理的粒度を保証するためのトラヒックを削減することを目的として，エージェントを用いたデータ収集方式を提案した．提案方式は，配置された各エージェントが，自身の担当する観測位置をセンシング可能なように端末間の移動を繰り返すことで，アプリケーションが要求する地理的粒度を継続的に保証する．また，提案方式の有効性を検証するためにシミュレーション実験による性能評価を行い，その結果，提案方式は，データ収集頻度が高い環境およびサブ領域が多い環境に適しており，一方で，データ収集頻度が低い環境およびサブ領域が少ない環境では，端末間の移動で増加するトラヒックの影響が大きいために適さないことが明らかになった．

二つ目の研究課題は，端末のネットワーク離脱への対応であり，端末の予期しないネットワーク離脱が発生する環境において，端末のネットワーク離脱に対して取得精度を維持することを目的として，端末のネットワーク離脱により消失し

たエージェントの再配置方式を提案した．提案方式は，観測タイミングから一定時間以内にセンサデータの転送を完了できなかった場合のみ，エージェントの消失が発生したものと判断して，消失したエージェントの検出と再配置を行うことで，エージェントが消失していない場合における効率的なデータ収集と，エージェント消失時の取得精度の維持を実現する．また，提案方式の有効性を検証するためにシミュレーション実験による性能評価を行い，その結果，提案方式は，低頻度でエージェントが消失する環境に適しており，一方で，高頻度でエージェントが消失する環境およびデータ収集頻度が低い環境では，消失したエージェントの再配置によって生じるトラヒックの影響が大きいために適さないことが明らかになった．

三つ目の研究課題は，複数シンクへの対応であり，複数のシンクが存在する環境において，複数シンクのデータ収集に対して地理的粒度の保証およびデータ転送のトラヒックを削減することを目的として，複数シンクのエージェントを共通化する方式を提案した．複数の観測位置をセンシングできる端末上でエージェントを共通化することで，エージェント数の増加を抑止すると共に，共通化されたエージェントが，複数の観測位置のデータとして有効なセンサデータ 1 つを送信することで，データ収集で生じるトラヒックを削減する．また，提案方式の有効性を検証するためにシミュレーション実験による性能評価を行い，その結果，提案方式は，シンクの位置や観測位置がそれぞれ地理的に近い環境に適しており，一方で，シンクの位置や観測位置が地理的に遠い環境では，エージェントやセンサデータの共通化が行われにくくなるために適さないことが明らかになった．

5.2　検討課題

本節では，モバイルセンサネットワークにおける効率的なデータ収集に関する今後の研究課題について述べる．

本研究におけるエージェント制御方式では，端末が密に存在する環境において効率的にセンサデータを収集することを目的とした．センサ端末数が少ない環境や，データ収集の対象となる観測領域内で端末が疎な領域を含む場合，エージェ

ントの配置や移動が失敗し，データ収集に失敗する可能性がある．そこで，今後は，エージェントが不在となった観測位置のセンシング方法について検討する予定である．さらに，端末に搭載されているセンサの不具合や測定環境が原因としたノイズの影響によって，実際の値とは異なる値をセンシングすることが考えられる．そこで，エージェントが動作する端末のセンシング値を，周囲の端末のセンシング値と比較し，センシングが成功したことを確認して返信するなど，提案方式の拡張を検討している．

謝辞

本研究を推進するにあたり，懇切なる御指導と惜しみない御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 原 隆浩教授に謹んで御礼申し上げます.

本論文をまとめるにあたり，大変有益な御指導と御助言を多数賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 下條真司教授，藤原 融教授に心より感謝申し上げます.

講義，学生生活を通じて，学問に取り組む姿勢をご教授頂きました大阪大学大学院情報科学研究科 マルチメディア工学専攻 鬼塚 真教授，松下康之教授，萩田紀博教授に厚く感謝申し上げます.

本研究において，ともに研究を進め，直接の御助言，御協力，御討論を頂いた大阪大学西尾章治郎総長，名古屋大学大学院情報科学研究科 佐々木勇和研究員に深く御礼申し上げます.

本研究において，多大なる御助言，御協力，御支援を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 寺西裕一准教授，大阪大学大学院工学研究科 春本要准教授，大阪大学サイバーメディアセンター 義久智樹准教授，島根大学総合理工学部数理・情報システム学科 神崎映光准教授，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 前川卓也准教授，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 天方大地助教，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 白川真澄特任助教に深謝致します.

本研究において，ともに研究を進め，多大なる御協力を頂いた大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 駒井友香氏，松尾和哉氏，Kamalas Udomlamlert 氏に深く御礼申し上げます.

本研究を進めるにあたり，多くの御討論や御助言を頂きました大阪大学大学院情

報科学研究科マルチメディア工学専攻 原研究室の諸氏に心より感謝申し上げます.

古野電気での会社生活，そして研究生活を送る上で，格別の御厚情を賜りました古野電気株式会社西森 靖取締役，大矢智資取締役，技術研究所研究部の皆様，人事総務部人材開発課の皆様に厚く御礼申し上げます.

最後に，私のこれまでの人生，そして研究生活を送る上で，暖かい支援と理解を頂いた両親をはじめとする家族に心から感謝致します.

参考文献

[1] Abbasi, A., Akkaya, K., and Younis, M.: A distributed connectivity restoration algorithm in wireless sensor and actor networks, in *Proceedings of IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 496–503 (2007).

[2] Abolhasan, M., Wysocki, T., and Dutkiewicz, E.: A review of routing protocols for mobile ad hoc networks, *Ad Hoc Networks*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–22 (2004).

[3] Akkaya, K., Thimmapuram, A., Senel, F., and Uludag, S.: Distributed recovery of actor failures in wireless sensor and actor networks, in *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008)*, pp. 2480–2485 (2008).

[4] Anastasi, G., Contib, M., Francesco, M. D., and Passarella, A.: Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, No. 3, pp. 537–568 (2009).

[5] Basu, P., and Redi, J.: Movement control algorithms for realization of fault-tolerant ad hoc robot networks, *IEEE Networks*, Vol. 18, No. 4, pp. 36–44 (2004).

[6] Bellavista, P., Montanari, R., and Das, S. K.: Mobile social networking middleware: A survey, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 437–453 (2013).

[7] Camp, T., Boleng, J., and Davies, V.: A survey of mobility models for ad hoc network research, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2, No. 5, pp. 483–502 (2002).

[8] Campbell, A. T., College, D., Eisenman, S. B., Lane, N. D., Miluzzo, E., Peterson, R. A., Lu, H., Zheng, X., Musolesi, M., Fodor, K., and Ahn, G.-S.: The rise of people-centric sensing, *IEEE Internet Computing*, Vol. 12, No. 4, pp. 12–21 (2008).

[9] Carle, J., and Ryl, D. S.: Energy-efficient area monitoring for sensor networks, *IEEE Computer*, Vol. 37, No. 2, pp. 40–46 (2004).

[10] Casari, P., Marcucci, A., Nati, M., Petrioli, C., and Zorzi, M.: A detailed simulation study of geographic random forwarding (GeRaF) in wireless sensor networks, in *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2005)*, pp. 59–68 (2005).

[11] Cha, S., Talipov, E., and Cha, H.: Data delivery scheme for intermittently connected mobile sensor networks, *Computer Communications*, Vol. 36, No. 5, pp. 504–519 (2013).

[12] Chen, M., Kwon, T., Yuan, Y., and Leung, V. C. M.: Mobile agent based wireless sensor networks, *Journal of Computers*, Vol. 1, No. 1, pp. 14–21 (2006).

[13] Conti, M., and Giordano, S.: Mobile ad hoc networking: Milestones, challenges, and new research directions, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 1, pp. 85–96 (2014).

[14] Das, S., Liu, H., Kamath, A., Nayak, A., and Stojmenovic, I.: Localized movement control for fault tolerance of mobile robot networks, in *Proceedings of IFIP International Conference on WSANs*, pp. 1–12 (2007).

[15] Feeney, L. M., and Nilsson, M.: Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment, in *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2001)*, pp. 1548–1557 (2001).

[16] Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers (1989).

[17] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原隆浩, 西尾章治郎 : 密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式, 平成 22 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, CD-ROM (2010).

[18] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原隆浩, 西尾章治郎 : 密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集のためのエージェント再配置方式について, 電子情報通信学会研究報告 (データ工学研究会 DE2011-8), Vol. 111, No. 173, pp. 7–12 (2011).

[19] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原隆浩, 西尾章治郎 : 密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式の性能評価, データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2011) (2011).

[20] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原隆浩, 西尾章治郎 : 密なモバイルセンサネットワークにおける地理的粒度を考慮したデータ収集のためのエージェント制御方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 2, pp. 741–753 (2012).

[21] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原隆浩, 西尾章治郎 : 密なモバイルセンサネットワークにおける複数シンクのデータ収集条件を考慮したエージェント制御方式, データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2012) (2012).

[22] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原隆浩, 西尾章治郎 : 密なモバイルセンサネットワークにおける複数シンクを考慮したデータ収集方式について, 電子情報通信学会研究報告 (データ工学研究会 DE2013-7), Vol. 113, No. 150, 第 113 巻, pp. 19–24 (2013).

[23] Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T., and Nishio, S.: Data gathering using mobile agents in dense mobile wireless sensor networks, in *Proceedings of International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2011)*, pp. 58–65 (2011).

[24] Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T., and Nishio, S.: Data gathering using mobile agents for reducing traffic in dense mobile wireless sensor networks, *Mobile Information Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 295–314 (2013).

[25] Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T., and Nishio, S.: A mobile agents control scheme for multiple sinks in dense mobile wireless sensor networks, in *Proceedings of EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2013)*, pp. 52–65 (2013).

[26] Haillot, J., and Guidec, F.: A protocol for content-based communication in disconnected mobile ad hoc networks, *Mobile Information Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 123–154 (2010).

[27] Hanashi, A. M., Awan, I., and Woodward, M. E.: Performance evaluation with different mobility models for dynamic probabilistic flooding in MANETs, *Mobile Information Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 65–80 (2009).

[28] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and H. Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, in *Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000)*, pp. 1–10 (2000).

[29] Heissenbüttel, M., Braun, T., Bernoulli, T., and Wälchli, M.: BLR: Beaconless routing algorithm for mobile ad hoc networks, *Computer Communications*, Vol. 27, No. 11, pp. 1076–1086 (2004).

[30] Imran, M., Younis, M., Said, A. M., and Hasbullah, H.: Partitioning detection and connectivity restoration algorithm for wireless sensor actor networks, in *Proceedings of IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC 2010)*, pp. 200–207 (2010).

[31] Jabeur, N., Zeadally, S., and Sayed, B.: Mobile social networking applications, *Communications of the ACM*, Vol. 56, No. 3, pp. 71–79 (2013).

[32] Kennedy, J., and Eberhart, R. C.: *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers (2001).

[33] Kiess, W., and Mauve, M.: A survey on real-world implementations of mobile ad-hoc networks, *Ad Hoc Networks*, Vol. 5, No. 3, pp. 324–339 (2007).

[34] Kim, H., Seok, Y., Choi, N., Choi, Y., and Kwon, T.: Optimal multi-sink positioning and energy-efficient routing in wireless sensor networks, *Information Networking*, Vol. 3391, pp. 264–274 (2005).

[35] Kiri, Y., Sugano, M., and Murata, M.: Self-organized data-gathering scheme for multi-sink sensor networks inspired by swarm intelligence, in *Proceedings of IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2007)*, pp. 161–172 (2007).

[36] Landsiedel, O., Götz, S., and Wehrle, K.: Towards scalable mobility in distributed hash tables, in *Proceedings of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (IEEE P2P 2006)*, pp. 203–209 (2006).

[37] Lane, N. D., Miluzzo, E., Lu, H., Peebles, D., Choudhury, T., and Campbell, A. T.: A survey of mobile phone sensing, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, No. 9, pp. 140–150 (2010).

[38] Lee, H., Lee, K., and Lin, L.: Energy efficient data management for wireless sensor networks with data sink failure, in *Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, onilne* (2005).

[39] Lee, S., and Younis, M.: QoS-aware relay node placement in a segmented wireless sensor network, in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2009)*, pp. 1–5 (2009).

[40] Lee, S., and Younis, M.: Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum Steiner tree, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 70, No. 5, pp. 525–536 (2010).

[41] Lee, Y. S., Park, J. W., and Barolli, L.: A localization algorithm based on AOA for ad-hoc sensor networks, *Mobile Information Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 61–72 (2012).

[42] Lindemann, C., and Waldhorst, O. P.: A distributed search service for peer-to-peer file sharing in mobile applications, in *Proceedings of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (IEEE P2P 2002)*, pp. 73–80 (2002).

[43] Lindsey, S., and Raghavendra, C.: PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems, in *Proceedings of International IEEE Aerospace Conference*, pp. 1125–1130 (2002).

[44] Maihofer, C., Leinmuller, T., and Schoch, E.: Abiding geocast: Time-stable geocast for ad hoc networks, in *Proceedings of ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2005)*, pp. 20–29 (2005).

[45] Manjeshwar, A., and Agrawal, D.: TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, in *Proceedings of International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, pp. 2009–2015 (2001).

[46] Papadopouli, M., and Schulzrinne, H.: Effects of power conservation, wireless coverage and cooperation on data dissemination among mobile devices, in *Proceedings of ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2001)*, pp. 117–127 (2001).

[47] Park, U., and Heidemann, J. S.: Data muling with mobile phones for sensornets, in *Proceedings of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2011)*, pp. 162–175 (2011).

[48] Perrucci, G. P., Fitzek, F. H. P., and Widmer, J.: Survey on energy consumption entities on the smartphone platform, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 437–453 (2013).

[49] Poe, W. Y., and Schmitt, J. B.: Placing multiple sinks in timesensitive wireless sensor networks using a Genetic Algorithm, in *Proceedings of GI/ITG conference on measurement, modeling, and evaluation of computer and communication systems (MMB 2008)*, pp. 253–268 (2008).

[50] Qi, H., Xu, Y., and Wang, X.: Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 8, pp. 1172–1183 (2003).

[51] Reddy, S., Estrin, D., Hansen, M. H., and Srivastava, M. B.: Examining micropayments for participatory sensing data collections, in *Proceedings of ACM International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2010)*, pp. 33–36 (2010).

[52] Reddy, S., Samanta, V., Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., and Srivastava, M.: MobiSense - Mobile network services for coordinated participatory sensing, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 2009)*, pp. 231–236 (2009).

[53] Safa, H., El-Hajj, W., and Zoubian, H.: Particle swarm optimization based approach to solve the multiple sink placement problem in WSNs, in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2012)*, pp. 10–15 (2012).

[54] Senel, F., Younis, M., and Akkaya, K.: Bio-inspired relay node placement heuristics for repairing damaged wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 4, pp. 1835–1848 (2011).

[55] Shah, R. C., Roy, S., Jain, S., and Brunette, W.: Data MULEs: Modeling and analysis of a threetier architecture for sparse sensor networks, *Ad Hoc Networks*, Vol. 1, No. 2–3, pp. 215–233 (2003).

[56] Shi, J., Zhang, R., Liu, Y., and Zhang, Y.: PriSense: Privacy-preserving data aggregation in people-centric urban sensing systems, in *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2010)*, pp. 758–766 (2010).

[57] Small, T., and Haas, Z. J.: The shared wireless infostation model: A new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way), in *Proceedings of ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2003)*, pp. 233–244 (2003).

[58] Suzuki, T., Bandai, M., and Watanabe, T.: DispersiveCast: Dispersive packets transmission to multiple sinks for energy saving in sensor networks, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2006)*, pp. 1–5 (2006).

[59] Tas, N. C., Sastry, C., and Mesrob, V.: Noise-aware energyefficient sensor binding, in *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications and networks (ICCCN 2008)*, pp. 1–6 (2008).

[60] Tsuchida, G., and Ishihara, S.: Replica arrangement for location dependent data in consideration of network partition in ad hoc networks, *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems (IJCNDS)*, Vol. 2, No. 4, pp. 401–423 (2009).

[61] Wang, B.: Coverage problems in sensor networks: A survey, *ACM Computing Surveys*, Vol. 43, No. 4, pp. 32:1–32:53 (2011).

[62] Wang, C., and Wu, W.: A load-balance routing algorithm for multi-sink wireless sensor networks, in *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications and networks (ICCCN 2009)*, pp. 380–384 (2009).

[63] Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., and Gill, C.: Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks, in *Proceedings*

of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2003), pp. 28–39 (2003).

[64] Xu, Y., and H. Qi, H.: Distributed computing paradigms for collaborative signal and information processing in sensor networks, *Parallel and Distributed Computing*, Vol. 64, No. 48, pp. 945–959 (2004).

[65] Yan, T., He, T., and Stankovic, J.: Differentiated surveillance for sensor networks, in *Proceedings of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2013)*, pp. 51–62 (2003).

[66] Yashiro, T.: A new paradigm of V2V communication services using nomadic agent, in *Proceedings of EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, pp. 1–6 (2006).

[67] Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D.: Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, Vol. 52, No. 12, pp. 2292–2330 (2008).

[68] Zhang, W., Xue, G., and Misra, S.: Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: Problems and algorithms, in *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp. 1649–1657 (2007).

[69] Zhao, W., Ammar, M. H., and Zegura, E.: The shared wireless infostation model: A new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way), in *Proceedings of ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2004)*, pp. 187–198 (2004).

[70] Zorzi, M., and Rao, R. R.: Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Energy and latency performance, *IEEE Transaction on Mobile Computing*, Vol. 2, No. 4, pp. 349–365 (2003).