

DTN と自律移動ロボットを用いた環境情報収集システムの提案

Proposal of Environment Information Gathering System Using DTN and Autonomous Mobile Robot

田端 央† 谷口 義明‡ 井口 信和‡
Hiro TABATA Yoshiaki TANIGUCHI Nobukazu IGUCHI

1. はじめに

農業ハウスなどの施設園芸において、生産効率の向上や施設内の精密農業を目的に、温度や湿度などの環境情報を収集し活用することは有用である。このため、無線センサネットワークを活用し、施設内の環境情報を収集する取り組みが行われている。特に施設園芸では、施設内の温度・湿度に異常が発生した場合、作物の品質低下や病害虫発生を防ぐため、管理者は半日以内に対策を行う必要がある。そのため、施設内の温度・湿度に異常が発生した場合、管理者に通知することで施設内の確認を促すシステムも存在する[1]。

しかし、施設内では作物の成長や農業機械の配置および農業機械が発するノイズなどの環境の変化により、無線通信環境が中長期的に悪化し、収集する環境情報に欠損が生じる場合がある。また、施設内では無線通信環境の変化により通信障害が発生する場所が不定期に変わる。ここで、設置するノード数を増やしリンクの冗長性を確保することにより通信環境が悪化した場合でも情報を収集できる場合がある。しかし、設置するノード数が増えると、ノードの管理コストが増大する。また、施設内のうちノードを設置可能な場所は限られる。

我々は通信障害の許容を可能とするため、DTN (Delay / Disruption Tolerant Networking) [2] 技術を用いて環境情報を収集するシステムを開発してきた[3]。本システムでは、DTN ルーティング技術を用いることにより、中継ノードにおいて環境情報が保持される。また、通信障害の影響下にあるノードを移動させることで環境情報をサーバまで欠損なく収集する。しかし、このシステムを用いる場合は、通信障害が発生する度に通信障害の影響下にあるノードを移動させなければならない。また、無線通信障害が改善されるまで環境情報はサーバに収集されない。そのため、施設内の実際の温度・湿度にかかわらず、管理者は環境情報の確認のため施設に赴く必要がある。

そこで本研究では、これまでに我々が開発してきたシステムに自律移動ロボットを組み合わせるにより、通信障害が発生した場合でも自動的に環境情報を収集可能なシステムを提案する。提案システムでは、平時はこれまでに我々が開発したシステムと同様に、DTN ルーティング技術を用いて定期的に環境情報を収集する。DTN ルーティング

技術を用いることで、一時的な通信障害が発生した場合においても、通信障害の影響を受けているノードにおいて環境情報が保持される。一方、一定時間ノードから環境情報を取得できなかった場合、復旧困難な通信障害が発生していると判断し、自律移動ロボットは通信障害の影響を受けているノードまで移動し環境情報を回収する。このことにより、施設園芸において無線通信環境が不安定となり通信障害が発生する場合においても、環境情報を欠損なく一定時間内に収集でき、通信障害を復旧するために管理者が施設に赴くコストも削減できる。本稿では自律移動ロボットの試作機を開発、評価する。

本稿の以降の構成を述べる。まず 2 章で関連研究について述べる。3 章で提案システムについて述べ、4 章で動作実験について述べる。5 章でまとめを述べる。

2. 関連研究

構造計画研究所の開発した MS4A は、収集した温度・湿度に異常が発生した場合に管理者に通知するシステムである [1]。このシステムにより、環境情報の可視化や遠隔地からの監視・操作が可能となる。しかし通信障害により環境情報の収集ができない場合、実際の温度・湿度に異常が発生していなくても管理者は確認のため施設に赴く必要がある。

高田らは、災害時を想定し DTN のルーティング方式のひとつであるメッセージフェリー[4]を用いた情報共有システムを提案、エミュレーションにより評価している[5]。評価の結果、災害が発生し本来の通信インフラの性能が低下、あるいは機能が停止するような劣悪な環境においても、フェリーノードを用いるデータ共有が有効であることを示している。

井林らは、施設園芸における環境情報を無線通信により収集するとともに、施設内の温度を調整可能なシステムを提案している[6]。また、実際の温室内での 2.4 GHz 帯の無線を用いた実験により、植物に含まれる水分などが原因でパケットの損失が発生することを示している。さらに、回折性の高い 429 MHz 帯の無線を使用することでパケット損失が抑えられることを示している。しかし、このシステムも MS4A と同様に、通信障害により環境情報の収集ができない場合、実際の温度・湿度に異常が発生していなくても管理者は確認のため施設に赴く必要がある。

3. 提案システム

3.1. 概要

本システムのシステム構成を図 1 に示す。本システムは文献[3]で我々が提案・開発したシステムをベースとしている。本システムは大規模かつ事務所が隣接している施設園

†近畿大学大学院 総合理工学研究科,
Graduate School of Science and Engineering Research,
Kindai University

‡近畿大学理工学部情報学科,
Department of Informatics, Faculty of Science and Engineering,
Kindai University

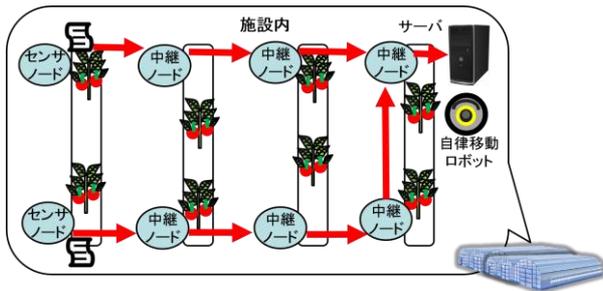


図 1：提案システムの構成図



図 2：自律移動ロボット

芸内での利用を想定する。環境情報の収集先であるサーバは施設に隣接している事務所の電源および外部ネットワークに接続される。一方、施設内に設置するセンサノードおよび中継ノードはバッテリーにより駆動する。文献[3]のシステムではこれらのノードとして Raspberry Pi を用いており本システムでも同じものを用いる。センサノードには温度・湿度センサ、無線通信機を取り付ける。平時は、DTN ルーティング技術を用いて、マルチホップ通信でサーバまで環境情報を転送する。本研究では DTN 通信を実現するために、IBR-DTN [7]を使用する。3.2 節で環境情報収集機能の詳細を説明する。

復旧困難な通信障害が発生した場合は、自律移動ロボットを用いて環境情報を回収する。自律移動ロボットは施設に隣接している事務所の電源よりバッテリーを充電し、移動時はバッテリーにより駆動する。本稿では、環境情報回収用の自律移動ロボットとして Roomba [8] をベースロボットとしたロボットを想定する。ベースロボットは ROS (Robot Operating System) [9] により制御できる。自律移動ロボット試作機の構成図を図 2 に示す。自律移動ロボットは、ベースロボット、自律移動ロボット全体を制御する制御ノードおよび距離センサ (Kinect) から構成される。制御ノードには無線通信機と温度・湿度センサやカメラが取り付けられるものとする。距離センサは自律移動ロボットの移動時に必要となる施設内の地図データを作成、更新するために用いる。なお、本システムでは、施設内の地図データは事前にロボットを移動させることにより作成しておくものとする。ただし、施設園芸では農業機械など事前の地図データにない障害物が設置されている場合もある。距離センサによりこのような障害物を検知した場合は、地図データの更新を行う。自律移動ロボットを用いた環境情報の収集機能の詳細は 3.3 節で説明する。

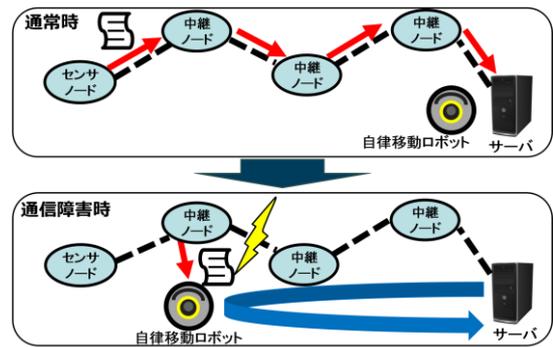


図 3：環境情報回収・運搬機能の流れ

3.2. 環境情報収集機能

センサノードが取得した環境情報は、転送先の選択・抑制が可能となる DTN ルーティング技術のひとつである PRoPHET [10]を用いてサーバまでマルチホップ通信により転送される。ノードは、PRoPHET ルーティングにより次ホップを一意に決定し、決められた経路で環境情報を転送する。施設内の無線通信環境が不安定となり、一時的に環境情報の転送が困難となった場合は、通信障害が発生した直前のノードが環境情報を保持する。その後も、新たに取得された環境情報は通信障害が発生している直前のノードまで転送され、保持される。そして通信障害が回復し、通信が可能になったときには、通信障害の影響を受けていた次ホップノードとコネクションを張り直し、保持した全ての環境情報を転送する。これにより、一時的な通信障害が発生した場合でも欠損なく環境情報をサーバに収集できる。

3.3. 環境情報回収・運搬機能

施設園芸においては、例えば、作物がノード間の通信経路を塞ぐように成長し、通信障害の復旧が困難となる場合も考えられる。なお、本稿では復旧が困難な通信障害は同時にたかだか 1 か所でしか発生しないものとする。管理者が施設に不在のときに復旧困難な通信障害が発生し、環境情報が収集できない場合、管理者は施設に赴く必要がある。本システムでは、このような場合に、自律移動ロボットが環境情報を自動的に回収しサーバまで運搬する。本機能の概要を図 3 に示す。以下にその詳細について説明する。

サーバは、事前に管理者が設定した時間内に環境情報が収集されない場合、復旧が困難な通信障害が発生していると判断する。このとき、サーバは収集されていない環境情報を基に、どのセンサノードの環境情報が収集されていないかを特定する。具体的には、サーバは環境情報が収集されていないセンサノードに対して `dntracepath` コマンドを発行する。`dntracepath` コマンドを発行すると、経路情報等を把握できる。PRoPHET ルーティングにより通信リンクが一意に決定されているので、通信障害が発生している直前のノードも特定できる。その後、サーバは事前に作成した地図データを基に、通信障害が発生している直前のノードまで自律移動ロボットを移動させ、環境情報の回収に向かう。ここで、センサノード及び中継ノードの位置は既知であるものとする。自律移動ロボットは環境情報を保持しているノードまで移動すると、環境情報を回収する。その後、自律移動ロボットは回収した環境情報をサーバまで運搬する。これにより、無線通信の復旧が困難な場合にお

いても、管理者が設定した時間と自律移動ロボットの往復に要する時間だけ待てば、自動的に環境情報を収集できる。

3.4. 局所地点観測機能

局所地点観測機能は、自律移動ロボットが管理者から指定された位置に移動し、その地点における温度・湿度等の環境情報や、カメラによる撮影画像を収集し、それらの情報をサーバに運搬する機能である。この機能を用いることにより、管理者が施設に赴くことが困難な場合においても、施設内の環境情報を取得、閲覧できる。

4. 実験

本稿では、自律移動ロボットの試作、および、手動で設定した目的地点まで自律移動ロボットを往復させる機能の開発を行った。また、自律移動ロボットが距離センサを使用しない場合と距離センサを使用する場合の自律移動ロボットの移動性能に関する比較実験を行った。実験は近畿大学東大阪キャンパス 38 号館 3 階の廊下で行った。実験環境を図 4 に示す。図 4 中、横線で表わされる部分の床面は固いビニール素材であり、格子状の部分の床面は柔らかいカーペット素材である。図中上の黒丸が目標地点であり、下の黒丸がサーバのあるベース地点である。実験では、自律移動ロボットにこの 2 つの黒丸間を往復させる試行を行った。自律移動ロボットが自身の現在位地を見失い、目的地への到達、あるいはスタート地点への帰還が困難となった場合に実験を終了し、それまでの往復回数を計測した。この計測を 4 回行った。

距離センサを使用しない場合は地図データが作成されないため、事前に外部操作によりロボットを移動させることで操作データを作成した。距離センサを使用する場合は、事前に外部操作によりロボットを移動させることでベースとなる地図データを作成した。なお、地図データは自律移動ロボットの移動中にも更新されるが、施行毎にベースとなる地図データを使用する。距離センサを使用する場合の地図データの例を図 5 に示す。図 5 中、色付けされている四角の領域は距離センサを用いて現在更新中の地図データを表しており、灰色の部分は既に作成された地図データを表している。白い部分は、地図データが作成されていない領域を表している。

実験結果を表 1 に示す。表 1 より距離センサを使用しな

表 1: 自律移動ロボットの往復回数

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 距離センサ不使用時 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 距離センサ使用時 | 4 | 13 | 10 | 6 |

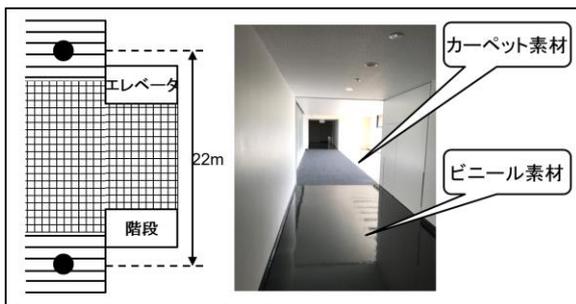


図 4: 実験環境

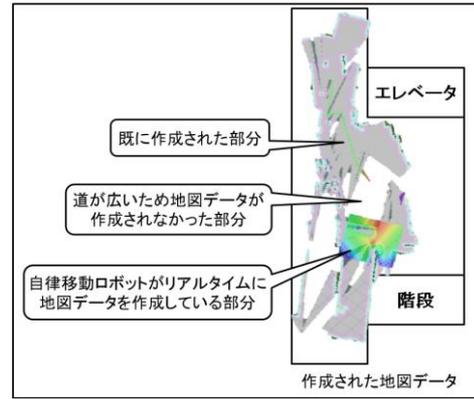


図 5: 作成された地図データ

い場合と比べて距離センサを使用する場合の方が、往復回数が大きいことがわかる。距離センサを用いないと自律移動ロボットが正しく移動を行えない理由は、床面の素材や自律移動ロボット自身の重量バランスの偏りによって、外部操作による初期地図データ作成時の入力値と実際の車輪の動きにズレが発生するためであると考えられる。一方、距離センサを組み合わせていることにより、地図データと現在の差異を補正できるとともに、床面の素材や重量バランスの偏りなどによるズレを修正できる。そのため、距離センサを使用する場合は、距離センサを使用しない場合と比べて往復回数が増える。以上より距離センサを用いることの有効性が確認できる。

実際の施設においては、路上に農業機械等の障害物が設置される場合がある。距離センサを使用しない場合、地図データを作成した後に障害物が新たに設置された場合、対処することができない。このことから、障害物を避けながら自律移動できるように、距離センサを用いることが有効であるといえる。

また、作成された地図データの一部が不完全なため、往復を行えない場合が存在した。これは実験を行った環境の一部の壁がガラス素材であり距離センサで使用する赤外線吸収率の違いから位置の認識のズレが発生したことや、距離センサの検知範囲以上の広さの通路を使用したためであると考えられる。実験において、自律移動ロボットが現在地を見失った地点は全て地図データの不完全な箇所であり、それは通路で幅の広い区間であった。地図データが正しく作成されている地点では自律移動ロボットは現在地を見失うことがなかった。このことから、栽培用の棚が狭い間隔で存在する施設園芸などで利用する場合は、より正確に巡回が行えると考えられる。

5. おわりに

本稿では、施設園芸における環境情報を無線センサネットワークにより、欠損なく自動で収集可能なシステムを提案した。本システムは、DTN 技術を用いて環境情報を転送するが、通信障害が発生しその通信が復旧しないと判断したときは自律移動ロボットが環境情報の回収に向かうことで欠損なく自動的な収集を可能とする。本稿では、ビニールおよびカーペット素材からなる廊下における自律移動ロボットの往復回数を計測し、距離センサを用いることでより正確に走行できることを確認した。この動作実験より、地面がビニールシートで覆われているような農業施設にお

いても自律移動ロボットが目的のノードまで移動できると考えられる。

今後は、自律移動ロボットが通信障害の影響を受けているノードの近くまで移動し、環境情報を回収する機能、および、指定された地点の環境情報を計測する機能を実装、評価する。また、実際の施設園芸を想定し、環境情報を欠損なく、許容時間内に収集できるかを、NS3 を用いたシミュレーションにより評価する予定である。

参考文献

- [1] “MS4A”, <http://www4.kke.co.jp/ms4a/>, (参照 2017-06-30)
- [2] K. Fall. “A Delay-tolerant Network Architecture for Challenged Internets,” Proceedings of SIGCOMM 2003, pp.27-34 (2003)
- [3] 田端央, 井口信和, “一時的な通信障害の許容を可能とする環境情報収集システムの開発,” 第21回電子情報通信学会関西支部学生会講演論文集, p.68 (2016)
- [4] W. Zhao and M. H. Ammar, “Message Ferrying: Proactive Routing in Highly-partitioned Wireless Ad Hoc Networks,” Proceedings of IEEE FTDCS 2003 (2003).
- [5] 高田千暁, 他, “災害時における DTN を用いた情報共有システムのエミュレーション評価,” DEIM Forum (2017)
- [6] 井林宏文, 他 “高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークシステムの評価,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム, pp.358-365 (2014)
- [7] IBR-DTN , (<https://www.ibr.cs.tu-bs.de/projects/ibr-dtn/>) (参照 2017-07-24)
- [8] “iRobot Corporation,” <http://www.irobot-jp.com/>. (参照 2017-06-30)
- [9] S. Cousins, B. Gerkey, K. Conley and W. Garage, “Sharing Software with ROS,” IEEE Robotics Automation Magazine, Volume 17, Issue 2, pp.12-14 (2010)
- [10] P. Sok and K. Kim, “Distance-based PRoPHET routing protocol in disruption tolerant network,” Proceedings of International Conference on ICT Convergence-2013, pp. 159–164(2013)