

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25730055

研究課題名(和文) 飛行体による蓄積運搬型転送を利用した生態及び環境観測システムの研究開発

研究課題名(英文) Ecology/Environmental Observation System utilizing Aerial Vehicle-based Store-Carry-Forward Communication

研究代表者

山本 寛 (Yamamoto, Hiroshi)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：80451201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ネットワークの敷設が困難な生態・環境観測のフィールドを想定し、無線技術をサポートし移動経路を自由にプログラムできる「飛行体」を中継装置として利用するDTN技術を確立する研究を行った。まず、座標間の距離がノード間の遅延を表現する幾何学空間上にノードを配置する「ネットワーク座標系システム」を応用し、移動体による通信品質の予測方式を確立した。また、飛行体に対して、センサーノードと通信するための無線通信機能や、目的地まで自動飛行する機能を拡張し、観測データを収集する通信プロトコルを開発した。さらに、フィールド上の移動体の稼働状態を監視できるように、運用管理システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to establish a practical data retrieval system for the ecology/environmental observation field where it is difficult to deploy a network infrastructure, we have studied a new DTN technology utilizing air vehicles that support wireless communication and are equipped with auto-piloting function. First, based on the network coordinate system that maps communications nodes onto the multi-dimensional geometric space where the Euclidean distance expresses network latency between nodes, the prediction method of unknown communication quality of the moving vehicle has been developed. In addition, we have achieved a new data retrieval system by adding auto-piloting and wireless communication functions to air vehicles so as to obtain observation data from sensor nodes. Furthermore, in order to monitor operating status of moving vehicles on the field, a new operation management system has been developed.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：情報ネットワーク センサネットワーク 遅延耐性ネットワーク 飛行体

1. 研究開始当初の背景

離島や山間地のような広かつ過酷なフィールドに生息する生物や環境の変化をリアルタイムに観測するために、無線 LAN や ZigBee のような無線アクセス技術を利用した、大規模なセンサーネットワークの構築が求められている。これまでは、無線ネットワークのアクセスポイントをフィールド上に多数設置し、センサーノード(様々なセンサーが接続され、収集したセンサーデータを転送する無線アクセス技術を備えた端末)からサーバまでセンサーデータをホップバイホップ転送する、マルチホップ無線ネットワークが構築されていた。しかし、生態/環境観測のフィールドは未開地であり、障害物が多く地形の起伏が激しいため、アクセスポイントのための電源確保が困難であるだけでなく、人の出入りさえ困難な場合もある。

そこで近年では、センサーネットワークを構築するために「DTN(Delay, Disruption, Disconnection Tolerant Network)技術」が研究されている。DTN 技術とは、アクセスポイントを設置できずセンサーノード・サーバ間でエンドツーエンドの通信路を確保できない環境でもデータ通信を実現する枠組みである。DTN 技術の分野では、移動体(例: 車や人に取り付けたデータ中継装置)が情報を「蓄積」し、通信の機会を得ることのできる場所まで情報を「運搬」する「蓄積運搬型転送」に関する研究が多く行われている。

一方、生態/環境観測のフィールドは整備されておらず植生が深く地形の起伏が激しいため、地面を二次元的に移動する移動体ではセンサーノード/サーバの近くまで移動できない。また通信相手と無線通信するための見通しを確保できず、データを効率的に収集することが困難である。

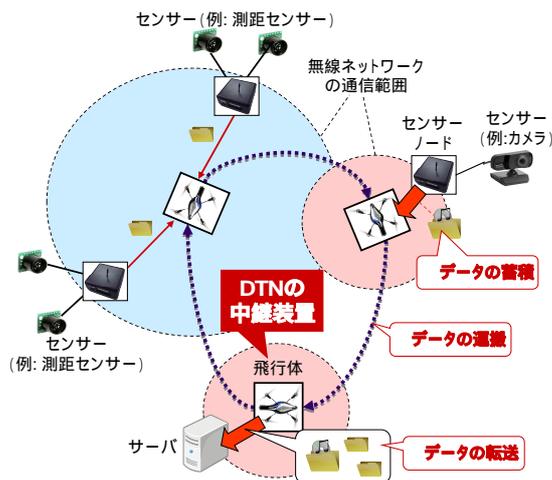


図 1. 飛行体を利用した蓄積運搬型通信

2. 研究の目的

本研究では、無線アクセス技術をサポートし、移動経路を自由にプログラミングできる「自律飛行体」を中継装置として利用する「飛行体 DTN 技術」を確立する研究を行う。飛行体は、フィールドを三次元的に移動する

ことで障害物を避けることができ、通信相手との見通しを容易に確保できるため、生態/環境観測のフィールドで運用する中継装置として適している。

3. 研究の方法

飛行体を利用した蓄積運搬型転送の核となる、飛行経路の通信品質を予測する技術を検討する。また、生態観測のフィールドで運用するために、飛行体 DTN に必要となる飛行体の自律飛行機能や通信機能、および飛行体の稼働状態を管理するシステムの検討・拡張を行い、実証実験を行う。

(1) 飛行体 DTN における通信品質予測のための方式を研究

研究代表者が先行研究で取り組んできた「ネットワーク座標システム」はアプリ通信時に計測したノード間の遅延を解析し、複数の経路が共有するネットワークの状態を把握した上で、座標間の距離がノード間の遅延を表現する多次元幾何学空間上にノードを配置する。本研究では、ネットワーク座標システムと同様の技術で、飛行体などの移動体の通信品質を表現できるネットワークモデルを構築し、未計測の通信経路の品質を予測する方式を確立する。

(2) 飛行体 DTN を利用した生態観測用センサーネットワークの実装

市販の飛行体 (AR Drone) に対して、センサーノードと直接通信するための無線通信機能や、指定した目的地まで自動的に飛行する機能を拡張する。また、センサーノードに蓄積されたデータを、インターネットに接続しているサーバと同期できる、データ転送プロトコルを設計・実装する。

さらに、動物生態学の研究者でも簡単に利用して、フィールド周辺の情報を収集できるように、飛行体の運用管理システムを設計/実装する。

4. 研究成果

(1) 飛行体 DTN における通信品質予測のための方式を研究

移動体を対象としたネットワーク座標システムを確立するために、まずは世界規模のネットワーク計測サービスから収集した、多数の端末間の通信遅延を長期的に計測したデータセットを解析し、各通信経路におけるネットワーク遅延の時間的変動、および端末間の位置関係(平均的な通信遅延)をモデル化する方法を研究した。

まず、自己回帰和分移動平均 (ARIMA) モデルによる時系列解析を用いて、各通信経路における、各時刻の通信遅延をホワイトノイズの移動平均と、過去のデータからの自己回帰により表現する数学モデルを構築した。この数学モデルを用いることで、過去の通信における計測結果を基に、将来のネットワーク遅

延を推測できることを明らかにした(図2)。

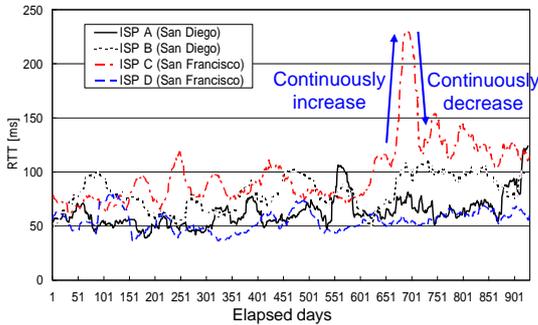


図2. ARIMA モデルによる遅延の予測値と実測値の比較

また、ばねモデルを応用したアルゴリズム(Vivaldi)を用いて、端末間の位置関係を低次元の幾何学空間に写像するモデル化手法を提案した(図3)。通信遅延の時間的変動は幾何学空間上の座標の移動として表現でき、未計測区間のネットワーク遅延が推測できることを明らかにした。

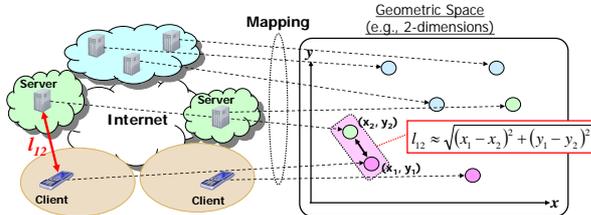


図3. 端末群の座標系へのマッピング

一方、移動体がフィールド上を移動することで周辺の無線ネットワークの敷設状態や利用状況が変化し、その影響で時間とともに長期的な特性(例: 長期平均, 分散)が変化する。このような、現実的な状況を想定した通信品質(特にネットワーク遅延)の変化をモデル化する方法について研究を行った。

まず、モバイル網を経由した移動体・サーバ間のネットワーク遅延を計測するツールを研究開発し、長期的に計測した通信遅延のデータセットを解析して、自己回帰和分移動平均(ARIMA)モデルによる時系列解析を用いて評価モデルを構築した。しかし、ARIMA モデルでは通信品質の長期的な特性が大きく変化する状況表現できず、現実的な通信品質の時間的変動を表現することはできなかった。そこで、この長期的な特性の変動を隠れマルコフモデルにおける状態遷移として表現する、Markov Regime Switching を用いたモデル化手法を提案した。このモデルは、ネットワーク遅延のランダムな変動だけでなく、マルコフモデルにより ARIMA モデルのパラメータを時間的に切り替えることで、平均・分散の長期的な変動まで表現することが可能となる(図4)。これにより、無線ネットワークを使用して通信する飛行体を対象としてネットワーク遅延の変動を見積もり、適

切な通信経路を判断することが可能となる。

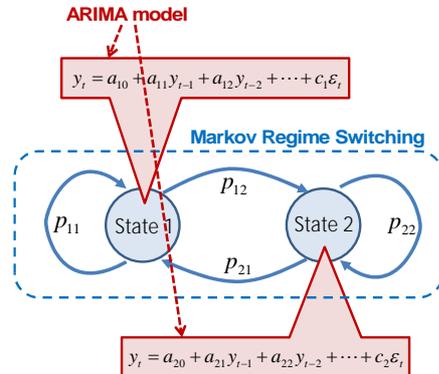


図4. マルコフモデルによる ARIMA モデルの時間変化

最後に、飛行体は地形の影響は受けないものの、局的な災害(強風など)や攻撃者による攻撃により移動が阻害され、蓄積運搬型転送による通信性能が大きく悪化する可能性がある。そこで本研究では、特別なセンサーを用いなくてもフィールド上で発生する攻撃や災害を検知できるように、蓄積運搬型転送の通信性能(ホップ数, 通信遅延など)の時系列データを解析して移動体が正しく稼働しているか検知する方法について、システムの試作とシミュレーション実験の両面で検討を行っている。

まず、小規模なスペースを移動する移動体に小電力の無線通信機能を実装し、移動体間のホップ数や電波強度を計測するシステムを試作した。このシステムでは、計測値の時間的変化を解析し、他の移動体とのホップ数が時間とともに変化する場合、移動体は正しく稼働していると判断する。さらに、DTN による通信性能を評価できるシミュレータを用いて、より広大なフィールドを対象として飛行体の稼働状態を検知する方法も検討している。

(2) 飛行体 DTN を利用した生態観測用センサーネットワークの実装

生態観測に使用できる飛行体を開発するために、まずは市販の飛行体(AR Drone)に GPS モジュールを接続し、自身の現在地を把握する機能を拡張した。また、利用者が設定した目的地の座標までの方向・距離を計算し、目的地まで自律的に飛行する自律飛行方式を研究開発した。さらに、直接通信することができないセンサーノードとサーバの間で、データベース(MySQL)の更新差分を飛行体が蓄積・運搬することで双方のデータベースの内容を同期する、新しいデータベース同期手法(図5)を設計・開発し、実証実験を通して、データベースの内容が正しく同期されることを確認した。



図 5. 飛行体による DB 同期手法

また、飛行体に対して携帯通信(3G)の通信モジュールを増設した。これにより、飛行体が携帯網の通信範囲内を飛行しているならば、インターネット上のどこからでも遠隔で制御することが可能となる。本研究では、グローバル IP アドレスを持つインターネット上のサーバが、利用者と飛行体との間の制御命令を中継する構成としている。これにより、利用者と飛行体が共に NAT(Network Address Translation)の配下で運用されている場合でも、利用者はフィールド上で計測したデータや撮影した画像を飛行体から収集できる、新しい遠隔観測システムを実装した(図 6)。

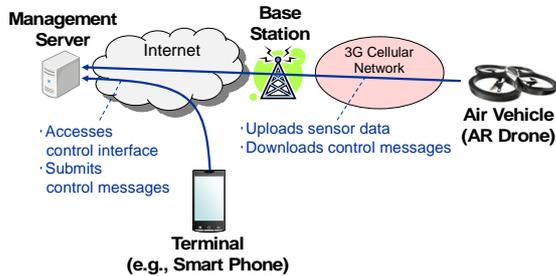


図 6. 飛行体と携帯通信を活用した遠隔観測システム

さらに、前述の携帯通信モジュールに加えて、消費電力が少ないながら長距離の無線通信が可能となる小電力無線通信モジュールを、市販の飛行体に増設した(図 7)。また、飛行体との通信内容(制御メッセージ、カメラ画像など)に応じて、無線モジュール間の変調速度の設定を切り替える方法を検討した。これにより、飛行体同士および飛行体と基地局の間の長距離通信が可能となり、少数の飛行体により大規模なフィールドを対象とした飛行体 DTN システムを実現できる。さらに、消費電力を可能な限り低く抑える必要のあるセンサーノードのような端末との通信を想定して、通信距離は短いながら消費電力が非常に少ない、Bluetooth Low Energy による通信に対応した DTN システムの検討・試作も行った。

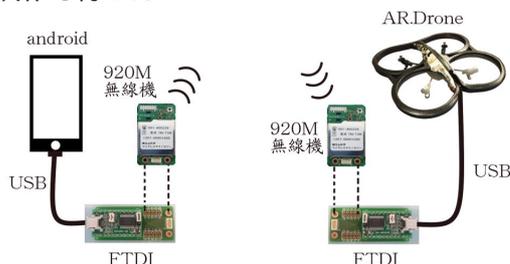


図 7. 小電力無線通信モジュールの拡張

加えて、GPS モジュールを搭載した飛行体を対象として、目的地の緯度・経度だけでなく高さも指定でき、センサーノードからのデータ回収に加えて、目的地周辺の風景を飛行体に搭載されているカメラで撮影する、生態観測のための自律飛行システムを研究開発した。本システムでは、飛行体が自律的に飛行し、カメラ画像を蓄積・運搬する。そのため、飛行体がインターネットに接続されていなくても、準リアルタイムにフィールドの情報を収集することが可能となる。

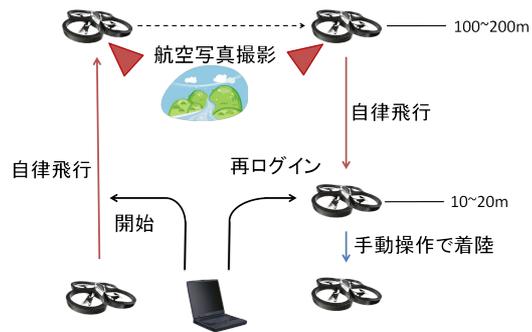


図 8. 生態観測のための自律飛行・撮影システム

最後に、小電力無線(ZigBee)の通信装置を移動体に取り付け、ZigBee のトポロジ自動構成機能を活用した移動体の運用管理システムを研究開発した。このシステムでは、各移動体は、フィールド上に存在する他の移動体との間で、継続的に ZigBee トポロジのホップ数と、隣接する移動体との電波強度を計測する。移動体が稼働しており他の移動体との相対距離が変化すると、移動体間のホップ数や電波強度は変化する。そこで、計測したホップ数・電波強度を時系列解析することで、移動体の稼働状態を推定する。開発したシステムを屋内で運用されている複数台の移動体に取り付けて実証実験を行い、移動体の稼働状態を特定できることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

H. Yamamoto, S. Ano, K. Yamazaki, "Modeling of Dynamic Latency Variations Using Auto-Regressive Model and Markov Regime Switching for Mobile Network Access on Trains," IPSJ Journal of Information Processing, Vol.23, No.4, pp.420-429, July 2015. (査読有) DOI 10.2197/ipsjip.23.420

H. Yamamoto, K. Yamazaki, "Modeling of Dynamic Latency Variations for Simulation Study of Large-scale Distributed Network Systems," IPSJ Journal of Information Processing,

Vol.22, No.3, pp.435-444, July 2014.
(査読有) DOI 10.2197/ipsjjip.22.435

〔学会発表〕(計 13 件)

広瀬悠牙, 山本寛, “組込みシステムを利用した車両の盗難対策ネットワークシステム,” 電子情報通信学会 総合大会 ISS 特別企画学生ポスターセッション, No.ISS-SP-185, 九州大学(福岡県福岡市), 2016年3月16日. (査読無)

T. Kobayashi, H. Yamamoto, K. Yamazaki, “ZigBee Network System for Observing Operating Activities of Work Vehicles,” Proc. ICNC2016, Kauai, Hawaii, USA, pp.49-53, Feb. 15th 2016. (査読有)

佐藤愛夏, 山本寛, 山崎克之, “920MHz帯を利用するAR.Droneの遠隔操作システムの検討,” 電子情報通信学会 信越支部大会, No.P-19, 新潟工科大学(新潟県柏崎市), 2015年10月3日. (査読無)

小林樹矢, 山本寛, 山崎克之, “作業車の稼働状況を観測するZigBeeネットワークシステム,” 電子情報通信学会 総合大会 ISS 特別企画学生ポスターセッション, No.ISS-SP-178, 立命館大学(滋賀県草津市), 2015年3月12日. (査読無)

小林樹矢, 山本寛, 山崎克之, “ZigBeeセンサネットワークを用いた位置関係推定手法,” 電子情報通信学会 信越支部大会, No.P-15, 信州大学(長野県長野市), 2014年10月4日. (査読無)

新井敬太, 山本寛, 山崎克之, “自律飛行するAR.Droneを活用した上空写真撮影システム,” 電子情報通信学会 信越支部大会, No.P-13, 信州大学(長野県長野市), 2014年10月4日. (査読無)

H. Yamamoto, C. Hidano, S. Ano, K. Yamazaki, “Modeling of Dynamic Trend of Latency Variations on Mobile Network using Markov Regime Switching,” Proc. IEEE COMPSAC2014, pp.55-60, Vasteras, Sweden, Jul. 21st 2014. (査読有)

H. Yamamoto, T. Fujii, P. Tran Thi Ha, K. Yamazaki, “New Development of Remote Control System for Air Vehicle using 3G Cellular Network,” Proc. IEEE ICACT2014, pp.456-461, Phoenix Park, Pyeongchang, Korea Feb. 18th 2014. (査読有)

P. Tran Thi Ha, H. Yamamoto, K. Yamazaki, “Data Synchronization Method in DTN Sensor Network,” Proc. IEEE ICACT2014, pp.382-387, Phoenix Park, Pyeongchang, Korea Feb. 17th 2014. (査読有)

Tran Thi Ha Phuong, 山本寛, 山崎克之, “自律飛行体とDTNによるセンサーデー

タ収集システムの開発と評価,” 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ研究会, IA2013-81, 機械振興会館(東京都), 2014年1月31日.(査読無)
P. Tran Thi Ha, H. Yamamoto, K. Yamazaki, “Database Replication for DTN Sensor Network System,” 電子情報通信学会 信越支部大会 IEEE Shinetsu Session, No.11A-4, 長岡技術科学大学(新潟県長岡市), 2013年10月5日. (査読無)

藤井拓也, 山本寛, 山崎克之, “携帯通信によるAR.Droneの遠隔操作方式の検討,” 電子情報通信学会 信越支部大会, No.P-10, 長岡技術科学大学(新潟県長岡市), 2013年10月5日. (査読無)

P. Tran Thi Ha, H. Yamamoto, K. Yamazaki, “Using Autonomous Air Vehicle in DTN Sensor Network for Environmental Observation,” Proc. IEEE COMPSAC2013, pp.447-450, Kyoto, Japan, Jul. 24th 2013. (査読有)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 寛 (YAMAMOTO, Hiroshi)

立命館大学情報理工学部・准教授

研究者番号：80451201