

異種無線通信方式併用型遅延耐性ネットワークにおける 予測型無線通信方式選択手法の一検討

加藤 新良太¹ 高井 峰生^{2,3} 石原 進⁴

概要：筆者らは、Wi-Fi, Bluetooth, 携帯電話網, LPWA 等の異種無線通信方式を実装した通信端末から成る DTN (異種無線併用型 DTN) により、発災直後から通信インフラ途絶下でも被災状況把握や避難指示等の共有を可能とする災害時情報共有システムの実現を目指している。本システムの実現には、避難する住民や緊急車両の往来によるネットワークトポロジの変動により、通信端末間の通信機会、通信時間、転送レートが異なるため、通信機会毎に共有データのサイズや優先度等を考慮しつつ、それらデータの転送に適した無線通信リンクを選択する方策が必要である。その方策には、転送レートや変調方式等の無線規格ごとに異なる特徴を考慮しつつ、通信可能時間や転送レート等のリンク品質を推定することが求められる。既存研究では、受信強度やパケット受信率等に基づきリンク品質を推定する手法等があるが、それらは単一无線通信方式を用いる場合を想定しており、異種無線通信併用型 DTN への検討が不十分である。本稿では、災害時利用を想定した異種無線併用型 DTN において、各無線通信リンクごとの通信可能時間及び平均転送レートをデータ通信開始前に推定するリンク品質推定方式を設計する。具体的には、災害時利用を想定した異種無線併用型 DTN の実現に向けた必要要件に基づいて既存手法がその必要要件を満たしているかを調査する。その後、その必要要件と調査結果に基づき、パケット受信率等のメトリック、移動局の走行時撮影画像、移動局と固定局の位置や速度等を複合的に評価してリンク品質を予測する手法を検討する。また、その一案として機械学習を応用する方策を提示し、その実現への技術的課題について議論する。

A Study on Link Quality Prediction for Delay Tolerant Networking in Heterogeneous Wireless Communication Systems

ARATA KATO¹ MINEO TAKAI^{2,3} SUSUMU ISHIHARA⁴

1. はじめに

東日本大震災では、避難指示や津波警報等の情報伝達が遅れたことで、津波から逃げ遅れた住民や避難誘導のため外に出ていた行政職員が犠牲になる事案が多数報告されている [1]。大規模災害発生時における情報伝達は、発災後の避難行動、医療救援活動、及び復旧活動等の防災活動にお

ける指揮系統の根幹を成すため、災害対策本部や消防署等の防災活動拠点及び住民間で発災後いかに迅速に情報共有手段を構築できるかが、迅速な避難行動や初期医療体制の構築等の発災直後の防災活動体制構築を左右する。

災害発生時は、携帯電話網や光ファイバ網等の通信インフラや電力網等の損壊により、携帯電話網や光ファイバ網等を介した防災活動拠点及び住民間での情報伝達が困難となることが容易に想像される [1], [2]。既存研究では、災害時の通信・電力インフラ損壊に対応する情報共有手段が複数提案されている。大和田らは、NerveNet と呼ばれる無線 LAN, FWA, 及び 920MHz 帯無線通信を用いた自営無線通信網に構築した無線メッシュネットワークを構築する手法を提案している [3]。しかしながら、無線メッシュネットワーク構築には固定局が必要であることから、発災後に

¹ 静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部
Education Division, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
² 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information and Science, Osaka University
³ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
Samueli School, University of California, Los Angeles
⁴ 静岡大学学術院工学領域
College of Engineering, Shizuoka University

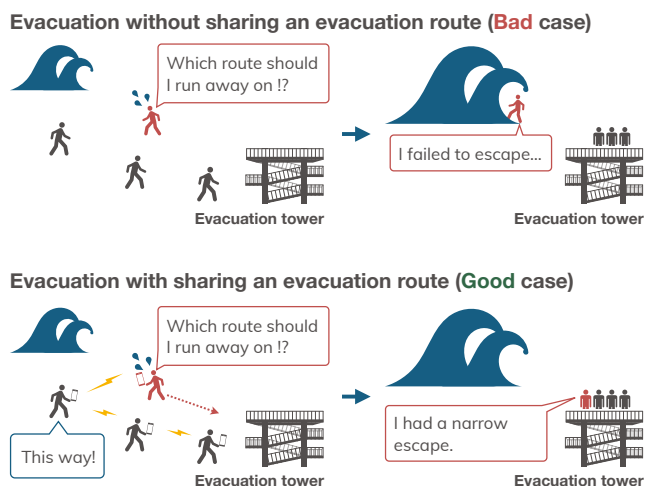


図 1 避難指示の遅れに伴う津波による被害拡大の例

固定局が何らかの原因により損壊して利用できなくなった場合、サービス維持が困難となる。一方で、Nishiyama らは、無線 LAN 及び Bluetooth を用いた短距離無線通信を用いた端末間通信による情報共有手段を提案している [4]。この手法では、固定局の事前設置が必要ないことから固定局損壊等による通信手段喪失がない一方で、端末間通信の可否がその端末を保持するユーザの行動に左右されるため、End-to-End での接続性を確保することが難しい。したがって、Nishiyama らの手法では避難指示伝達等の時間制約に伴う情報を共有することが困難である。

既存手法で共通する課題として、無線 LAN 等の特定の無線通信手段に依存し、端末間の通信リンクを確保できない場合の代替案が示されていないことが挙げられる。災害対策本部と住民間の通信手段が失われれば、避難指示や津波警報等の情報伝達遅延による被害拡大につながる。そこで、特定の通信リンクに依存せず、途絶耐性を備えた災害対策本部と住民間の通信手段を確立する手法が必要となる。

本稿では、災害時の情報共有における必要要件を提示し、その要件に基づいて Wi-Fi, Bluetooth, 携帯電話網, LPWA 等の異種無線通信方式を併用する遅延耐性ネットワーク (DTN) を用いた災害時情報共有システムを提案する。また、そのシステム実現における一課題である無線通信リンク品質推定手法について、その解決方針を議論する。

本稿で提案する災害時情報共有システムは、異種無線通信方式併用型 DTN を用いることで、携帯網の途絶地域や山間部等の遠隔地と防災拠点間の情報伝達、通信インフラ損壊等による一部の無線通信手段喪失に対して、他の通信手段の代替利用による端末間の接続性向上が期待できる。加えて、複数の無線通信手段を同時利用することで、端末間の通信機会やデータ転送量増加が期待される。

以後、第 2 章では、本稿で提案する異種無線通信方式併用型 DTN による災害時情報共有システムについてその概要と本システム実現に向けた必要要件について説明する。

第 3 章は、無線リンク品質推定手法と異種無線通信方式併用時におけるリンク品質推定における課題について述べる。第 4 章で、既存の無線リンク品質推定手法について述べ、異種無線通信方式を併用する本災害時情報共有システムの必要要件と比較し議論する。第 5 章で、本災害時情報共有システムの必要要件を満たす異種無線通信リンクの品質推定手法を設計する。第 6 章にて本稿をまとめる。

2. 異種無線通信方式併用型 DTN を用いた災害時情報共有システム

本章では、筆者らが提案する Wi-Fi や Bluetooth 等の無線 LAN と、LTE や 5G 等の携帯通信網、及び LPWA やデジタル簡易無線 (DCR) 等の長距離無線通信を併用した遅延耐性ネットワークによる災害時情報共有システムについてその概要と必要要件について述べる。

2.1 概要

本災害時情報共有システムは、発災直後から災害対策本部や消防署等の防災活動拠点と避難誘導や救助活動等を担う行政職員及び避難する住民間で、被災状況報告や避難指示等の情報伝達実現を目的とする。図 2 にその概要を示す。

本システムは、災害対策本部、消防署、及び指定避難場所等の防災活動拠点に設置された Wi-Fi, Bluetooth, 携帯電話網, LPWA 等の異種無線通信方式による無線通信能力を持つネットワーク機器 (拠点 Edge server, 以後拠点 ES), 消防車等の緊急車両とその他防災関係諸機関が有する車両に搭載された固定局と同等の機能を有するネットワーク機器 (DTN フェリー), 及び住民が保持するスマートフォンやタブレット端末などの移動端末などの携帯端末で構成される。各端末の役割は次の通りである。

携帯端末を保持する住民もしくは行政職員は、被災して損壊した道路や家屋等を静止画や動画として撮影したデータから成る被災状況報告を端末に保存する。これを周辺にいる住民及び行政職員の移動端末もしくは消防車等の緊急車両が保持する DTN フェリー間で共有する。また、住民や行政職員が避難場所に到達した場合には、その避難場所の拠点 ES が被災状況報告を受信・蓄積する。

DTN フェリーを保持する緊急車両は、救助活動、補給、連絡のため、災害対策本部、避難場所、及び救助活動場所等を定期的に往来しつつ、移動端末に蓄積されている被災状況報告や災害対策本部から発令された避難指示等を移動端末へ拡散する。ただし、DTN フェリーは、その端末を搭載した車両の防災活動に必要なデータ及び移動端末から収集したデータを一時蓄積するに足るサイズのストレージを持つとする。

拠点 ES は、DTN フェリーもしくは移動端末から被災状況報告や救援要請等を静止画、動画、テキストデータと

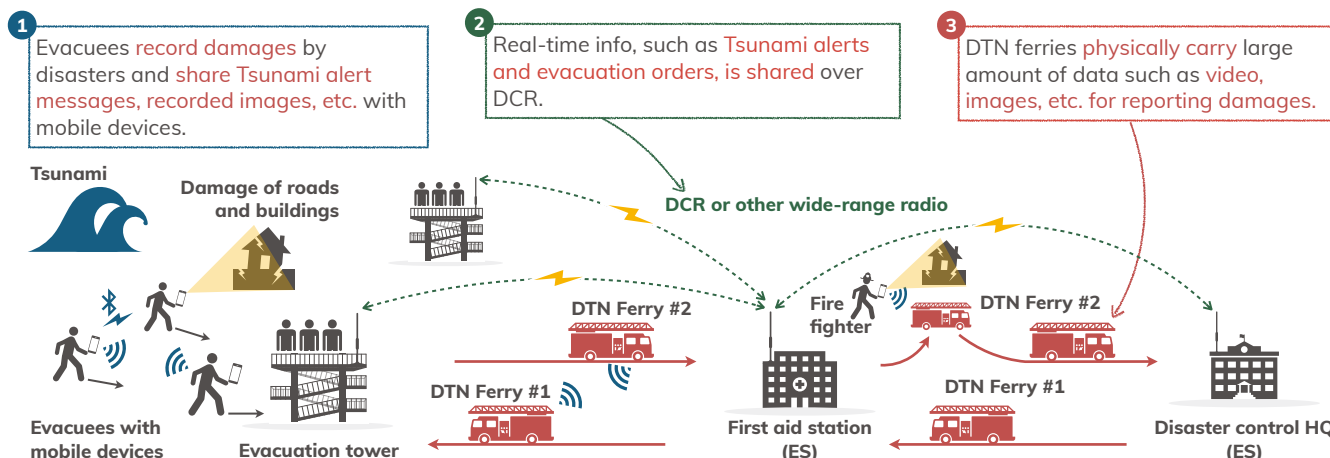


図 2 異種無線通信方式併用型 DTN を用いた災害時情報共有システムの概要

して収集する。また、避難指示や各種要請への応答などを DTN フェリーもしくは移動端末へ送信する。この際に、拠点 ES は、携帯電話網や光ファイバ網等の通信インフラが損壊しておらず拠点間通信ができる場合は、携帯電話網を介して拠点 ES 間で各々が蓄積・保存しているデータを同期する。通信インフラ損壊時には、DTN フェリーあるいは移動端末を介した DTN により間接的な拠点間通信を実施して、拠点 ES 間の接続性を維持する。よって拠点 ES は、他端末から収集したデータ全てを保持するに足るサイズのストレージを持つものと想定する。

拠点 ES と DTN フェリーもしくは移動端末間で交換される情報として、被災状況報告では被災場所を撮影した動画や静止画とそれらを補足するテキストデータを想定する。避難指示・誘導に用いられる情報は、防災活動拠点から住民に対して避難経路を指示するに足る POI (Point to Interest) 情報であると想定する。例えば、橋の崩落や倒壊家屋が道を塞いでいる箇所等の通行できない道路や各自治体が定める避難道路等がこれに相当する。この POI 情報は、地図データのフォーマット等の実装に依存するが、ここでは GPX (GPS eXchange Format) ファイル [5] 等を想定する。その他の要請等も上記に準じたデータフォーマットによって端末間で交換されるとする。また、道路構造等の静的な地図データは、各端末に事前にインストールし、本災害時情報共有システムの運用時には端末間で交換しない。

2.2 本システム実現への課題

本災害時情報共有システム実現への課題は、災害時利用と異種無線通信方式併用の 2 つの条件を考慮しつつ、ネットワーク層以上の上位層の観点から見たときに、次に示す 3 つの課題が挙げられる。

- (1) セキュリティの確保
- (2) 優先制御

(3) 無線リンク品質推定

なお、本稿では、この 3 つの課題を説明したのち、紙面の都合上、以後災害時利用を想定した異種無線併用型 DTN における無線リンク品質推定の課題と解決方策について述べる。

2.2.1 セキュリティの確保

本災害時情報共有システムで扱う情報は防災活動上その重要性が高く、それらの情報共有が悪意の有無を問わず改竄や通信障害により阻害された場合に防災活動に混乱を与えることが必至となる。また、医療救援要請等では個人情報などの機敏な情報も含まれることから、それら情報の第三者への漏洩を防止する手段が必要である。ただし、本災害時情報共有システムの運用環境においては、DTN フェリーは防災関係諸機関が有する車両を想定し、その他一般車両の利用は想定しないため、DTN による物理運搬に伴う第三者への情報漏洩は基本的にないものと想定する。

2.2.2 優先制御

DTN フェリーや移動端末から拠点 ES へデータを送信する場合、端末間で交換される情報は、被災状況報告、必要物資・医療救援要請、端末間でのテキストデータ等多様多様にわたる。また、DTN フェリーを保持する緊急車両や避難する住民間におけるすれ違い通信を考慮すると、端末間での通信機会や通信可能時間は限られる。そのため、限られた通信可能時間の間で、送信データの種別、サイズ、希少性、及び時間制約に応じて送信するデータの優劣をつける優先制御が必要となる。

本災害時情報共有システムが扱うデータは、前節で述べたようにテキストデータと GPX ファイルからなる避難指示や、陥没道路や倒壊家屋等を撮影した画像やテキストからなる被災状況報告等がある。避難指示は、それらが伝達されない場合は避難行動が困難となるため高い優先度で送信する必要がある。

一方で、被災状況報告は、避難指示に比べれば優先度は

低く、画像等が含まれるためデータサイズが大きい。そのため、DCR 等の転送レートが小さい無線通信方式を用いて端末間で共有することが難しい。このため、被災状況報告等のサイズが大きいデータを転送する際は画像等のサイズが大きいデータを圧縮するか、テキストデータ等の比較的サイズが小さいデータのみ抽出した上で、DCR 等の転送レートが小さく拠点間を直接繋ぐ無線通信リンクで先んじて転送しつつ、Wi-Fi や Bluetooth 等の転送レートが大きい無線通信リンクを介して DTN フェリーに画像等を転送し、物理運搬によって宛先まで配送することが考えられる。

また、DTN フェリー等の端末間の通信可能時間が限られることから、一度の通信機会転送可能なデータ量にも制限がある。このため、一度の通信機会に送信するデータを緊急性の高いデータを優先的に送りつつ、そのデータを転送したのちに余った時間で被災状況報告等のサイズの大いデータを送る等の工夫が必要がある。

例えば、ある住民が、避難経路等の緊急性の高いデータを 5KB、1 枚 2MB 程度の画像とテキストデータからなる被災状況報告を 5 件分、合計で約 10MB 分のデータを保持しており、他の住民に転送したいとする。端末間の通信可能時間で転送できるデータ量は計 5MB としたとき、緊急性の高さと転送可能データ量を考慮して、避難経路データから優先的に送信を始め、その後被災状況報告を 1 件ずつ送れば、避難経路データ全てと 2 件分の被災状況報告を転送できる。しかし、優先制御を行わず、被災状況報告から送信すると、3 件目の被災状況報告を送信しきる前に端末間の接続が切れてしまうため、3 件目の被災状況報告送信に失敗するばかりか、緊急性の高い避難経路データを他の住民に転送できない。

この例は、優先制御を行わない場合、避難経路等の緊急性の高い情報が住民に行き渡らずに被害拡大を招く恐れがあるばかりか、3 件目の被災状況報告の送信失敗により限られた通信機会を有効に活用できない可能性があることを示唆している。このため、上記例のような避難指示等の緊急性の高いデータを優先的に送信しつつ、限られた通信可能時間を有効的に活用するような送信制御が必要である。

2.2.3 無線リンク品質推定

前節で述べた優先制御を実現するためには、端末間で転送可能なデータ量をデータ送信前に予め把握しておくことが必要である。そのためには、端末間の無線通信リンクの品質をデータ送信前に推定することが求められる。以後、本稿で扱う災害時情報共有システムにおける無線通信リンクの品質として、拠点 ES、DTN フェリー、及び携帯端末間を直接結ぶ無線通信リンク毎の転送可能データ量に着目して議論を進める。

災害時利用を想定した異種無線併用型 DTN における端末間の無線通信リンクごとの転送可能なデータ量は、通信

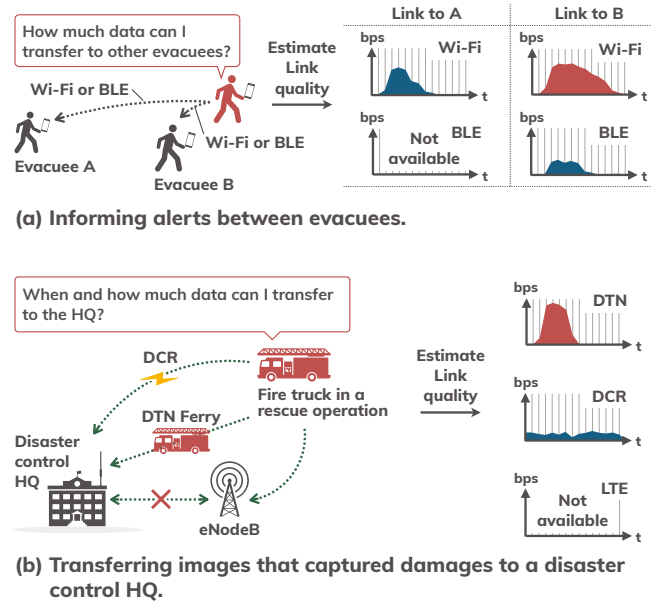


図 3 本災害時情報共有システムにおける異種無線併用型 DTN におけるリンク品質推定の例

規格、端末間の位置や速度、電波の見通しに影響する障害物の有無、電波伝搬等の多様な要因に依存する。加えて、本災害時情報共有システムでは、複数の異種無線通信方式を併用するため、複数の異種無線リンクの品質を評価・比較することが求められる。

図 3 は、本災害時情報共有システムで用いる異種無線併用型 DTN におけるリンク品質推定の例である。ここでは、避難する住民間で避難指示等の情報を複数の近距離無線通信リンクで共有する例と、救助活動中の消防車から、複数の画像やテキストを含む被災状況報告を災害対策本部へ転送する例を示している。

図 3(a) では、赤で示された避難者が、避難者 A、B 双方へ避難指示を転送することに適したリンクを予測する。この例では、避難者 A、B 双方ともに Wi-Fi リンクが利用できるため、Wi-Fi を介して避難者 A、B へ避難指示を転送する。もし、この例においてリンク品質推定が伴わない場合、転送可能なデータ量を正しく把握できず優先制御が正しく行えない可能性がある。例えば、リンク品質推定を行わず、図 3(a) において、赤で示された避難者が避難者 B に BLE を用いてデータを転送しようとする、避難者 A にデータを転送できない、Wi-Fi を用いた場合に比べて少ないデータしか送ることができない。

図 3(b) の例では、救助活動中の消防車の視点からは、災害対策本部と繋がるリンクとして DCR、Wi-Fi、LTE がある。それらの中からテキストデータ等の比較的サイズが小さい救助要請データと画像を含みサイズが大きい被災状況報告データの転送のため、各無線通信リンクで転送可能なデータサイズを推定したいとする。この例では、品質推定によって、LTE が利用できず、DTN の方が DCR よりも

転送可能データサイズが大きいと判断できれば、この場合は、救助要請を DCR で転送しつつ、被災状況報告を DTN で送信すれば、DCR と DTN 双方を有効利用できる。しかし、リンク品質推定を行わず、LTE が利用できないことや、DTN の転送可能データ量が把握できない場合、LTE でデータ送信を試みて失敗し、DTN 等の他の無線通信リンクを活用する機会を失う可能性や、DTN を用いれば送信機会があるにもかかわらず被災状況報告を転送できないままとなる可能性が考えられる。

このため、災害時利用を想定した異種無線通信併用型 DTN におけるリンク品質推定は、本災害時情報共有システム実現に向けた重要な課題である。

3. 災害時利用を考慮した異種無線通信併用時のリンク品質推定の必要要件

本章では、本災害時情報共有システムで用いる異種無線通信方式を併用する遅延耐性ネットワークにおけるリンク品質推定の必要要件とその課題について述べる。

無線通信方式が異なる複数の無線通信リンクを併用する際には、通信範囲、周波数、変調方式、転送レート等の違いから、送信データのサイズや優先度に応じてそのデータ転送に適したリンクを選択することが求められる。加えて、災害時に無線通信リンク品質の推定結果が誤っていた場合に端末間でデータ共有が実施されない事象を可能な限り発生させない仕組みが求められる。例えば、推定された通信可能時間が実際よりも長い場合、推定通信可能時間に基づいて端末間でデータを転送しても、データ転送中に無線通信リンクが切断されてしまう可能性が考えられる。したがって、上記の異種無線規格間の仕様の違いと誤った推定結果への対応を考慮すると、異種無線通信方式を用いる複数の無線通信リンクの品質の推定・評価には、次に示す要件が満たされる必要がある。

A) 異種無線規格間のリンク品質を比較・評価できる (汎用性)

本災害時情報共有システムでは、端末間で無線通信規格が異なる複数の無線通信リンクを同時に利用できる。そこで、それら複数の無線通信リンクの品質を比較・評価可能とする推定手法が求められる。

B) 発災後に即時利用できる（即時利用性）

発災直後は、避難する住民の行動からネットワークトポロジも常に変化することが予想される一方で、避難指示や津波警報等を住民へ可及的迅速に伝達するためには、本災害時情報共有システムが発災後即時に利用できることが必須である。このため、避難警報等の情報共有を円滑にするためには、発災直後からリンク品質推定が利用できることが求められる。

C) 通信端末の移動に伴う端末間の接続性の変動に追従し

て推定結果を更新できる（追従性）

発災直後の住民の避難行動や消防車等の緊急車両の往来を考慮すると、本災害時情報共有システムで用いる DTN の携帯端末及び DTN フェリー間の接続性は常に変わる。そのため、推定結果と実際のリンク品質との解離を防ぐため、携帯端末や DTN フェリーの移動を考慮しつつ推定結果を逐次更新する必要がある。

D) リンク品質推定結果算出に要する時間の短縮（即応性）

避難指示等の迅速に住民へ伝達する必要がある情報を伝達する場合、少なくともテキストデータ及び GPX ファイル等の POI 情報を端末間で共有するに足るデータ転送時間を確保する必要がある。また、住民の位置や行動、及び通信インフラ利用の可否によっては、住民の持つ移動端末間での送信機会が限られることも考えられるため、一度の送信機会内にリンク品質推定とデータ共有を可能とすることが望ましい。そのためには、データ転送が伴わないリンク品質推定にかかる処理時間を可能限り短縮し、データ転送可能時間を確保することが必要である。

E) 推定結果が誤っていた場合の対応手段を持つ（可用性）

推定結果が誤っており避難指示や津波警報が住民へ伝達できない事態は、被害拡大抑止のために必ず避けなければならない。しかし、推定結果と実際のリンク品質が常に完全に一致することは現実的には考えにくく、特に発災後の通信環境は予測が困難であるため、災害時における推定結果が平時よりも劣る可能性も考慮する必要がある。そこで、推定結果よりも実際に転送できたバイト数が小さかった場合など推定結果が誤っていると考えられる場合に、発災前後の通信環境の変化に応じてその後の推定処理で誤りを補正する仕組みが必要である。

4. 既存無線リンク品質推定手法

本章では、無線通信リンク品質推定の基本過程を説明した上で、前章にて述べた災害時利用を考慮した異種無線通信併用型 DTN におけるリンク品質推定の必要要件に基づき、既存の無線通信リンク品質推定手法を分類・調査する。

4.1 無線リンク品質推定における基本過程

無線リンクの品質を推定には下記 4 つの過程がある [7]。

- (1) 無線リンクの監視
- (2) 品質推定の基準となる評価基準値の収集
- (3) 評価基準値に基づくリンク品質評価
- (4) リンク選択・通信

図 4 に無線リンク品質推定の過程ごとの分類図を示す。以後、各々の過程についてその詳細と要件について説明する。

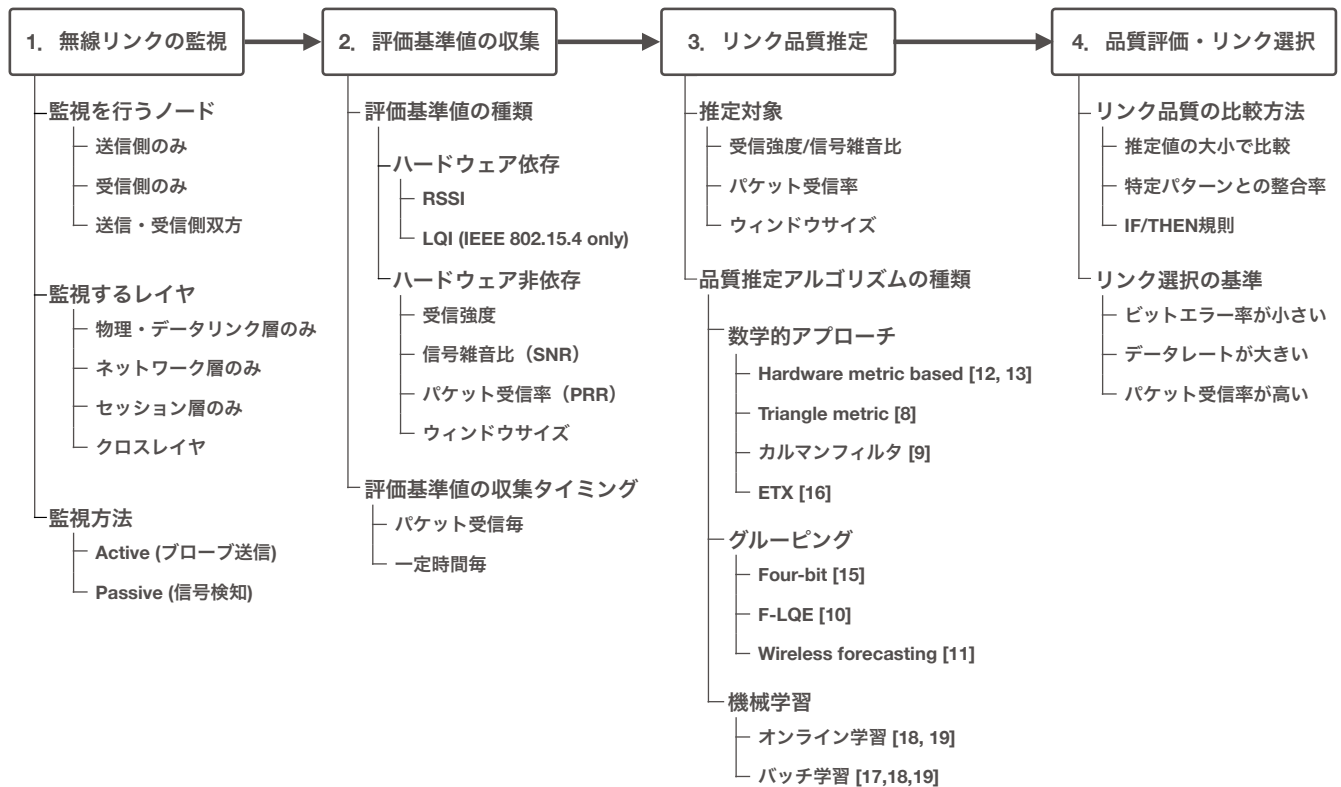


図 4 無線リンク品質推定過程の分類

4.1.1 無線リンクの監視

無線リンクの監視は、端末間における無線リンクの有無を監視する過程を指す。この過程は、通信リンクの監視を片方向あるいは双方向で実行するかによって細分化して考えることができる。具体的には、無線リンクの監視を受信端末あるいは送信・受信端末双方が同時に行うかによって細分化できる。また、物理層からアプリケーション層の内のどの階層の視点から無線リンクを監視するかによってさらに細分化される。

受信端末のみが監視する手法では、送信端末から送信されたフレームもしくはパケットの受信の有無により端末間の無線リンクの有無を判定する。例えば、受信強度や信号雑音比を測定することで電波の受信有無を判断する場合や、IEEE 802.11 の場合はビーコンフレームの受信によって無線リンクの有無を判断する場合がある。

受信・送信端末双方が同時に無線リンクの監視を実行する場合は、送信端末が送信したフレームあるいはパケットに対して、受信端末が何らかの応答を返すことによって無線リンクの有無を判断する場合が該当する。例えば、IEEE 802.11 の場合、送信端末がブロードキャストしたプローブ要求フレームに対して、受信端末が送信したプローブ応答フレームの受信の有無によって、自身と他端末間に IEEE 802.11 の無線リンクの有無を判断する例がある。

監視端末の視点がネットワーク階層モデルのどの階層を基準にするかによって無線リンクの定義が決まる。監視端

末がデータリンク層までの下位レイヤを対象する場合は、Peer-to-Peer のリンクを対象とし、ネットワーク層以上の上位レイヤを対象とする場合は、End-to-End のリンクが監視対象となる。

4.1.2 評価基準値の収集

評価値の収集は、端末間で無線通信リンクが確立された後、その無線通信リンクの特徴及び現在の状態を判定するため、信号強度や信号雑音比 (SNR) 等の測定値を収集する過程を指す。例として、監視端末が下位レイヤを基準として無線リンクを監視する場合は、受信強度、信号雑音比、RSSI (Received Signal Strength Indication)、LQI (Link Quality Indicator) 等のネットワークインターフェースから提供されるハードウェア由来の評価基準値を用いる場合が考えられる。一方で、監視端末が上位レイヤを基準として監視を行う場合は、パケット受信率 (PRR) やウィンドウサイズを評価基準値として用いる場合が考えられる。また、監視端末が上位レイヤを基準として監視する場合は、上位レイヤ及び下位レイヤ双方の評価基準値を測定することも考えられる。

4.1.3 評価基準値に基づくリンク品質評価

この過程では、前過程で得た無線リンクの現在及び一定期間前の過去の状態から未来のリンク品質を評価する過程を指す。本稿では、既存手法が用いているアルゴリズムの方向性の違いに着目して、それらを数学的アプローチ、グルーピング、及び機械学習によるものの3つに分ける。

数学的アプローチをとる評価方法では、機械学習とは異なり学習を伴わず、価値関数を統計的あるいは確率的観点から恣意的に決定する手法を指す。具体的には、評価基準値を変数として、リンク品質を表す離散もしくは連続値を返す価値関数を定義し、その関数から得られた推定値の大小を比較する。目的関数の定義方法によりさらに細分化できる。具体的には、複数の評価基準値の相関に基づいてリンク品質を線形方程式で定義してその大小を比較する方法と [8]、観測した受信信号強度からカルマンフィルタを用いて次時点の受信信号強度を推定する方法 [9] がある。

グルーピングに分類される評価方法は、何らかのルールに当てはまる無線通信リンクを分類してリンク品質の良し悪しを判定する手法である。具体例として、ファジー推論に基づいて評価基準値を IF/THEN 規則によって分類することで品質を推定する手法 [10] や、複数種の評価基準値と実際のリンク品質との相関の強弱からリンク品質推定に最適な評価基準値を選ぶ手法 [11] 等がある。

機械学習を用いる評価手法では、SNR や PRR 等のネットワークデバイスから収集した評価基準値を学習データとしてリンク品質を機械学習で推定する [18], [19]。本稿では、学習データのもととなる評価基準値の種別と学習を実施するタイミングの観点から、推定前に学習させる方法（バッチ学習）と、推定と学習を同時に行う手法（オンライン学習）の 2 つに細分化して議論を進める。

4.1.4 リンク選択

この過程では、推定したリンク品質から送信データの種別やサイズ等に応じてネットワークアプリケーションがリンクを選択し、他端末と通信する過程を指す。本災害時情報共有システムは、避難指示や津波警報等の緊急性の高いデータや、被災状況報告等の情報量が多いデータ、またチャット等のテキストデータなど送信するデータの種別、サイズ、重要度、希少性が異なる様々なデータを扱う。異種無線通信を併用する場合は、無線規格ごとに通信範囲、データレート、通信可能時間等の無線リンクの特徴が異なるため、送信データの特徴を考慮した上でデータ送信に用いる無線通信リンクを選択する必要がある。

4.2 既存無線通信リンク品質推定手法の調査

本節では、3 章で述べた異種無線通信併用型遅延耐性ネットワークを用いた災害時情報共有システム実現に向けた必要要件に基づき、前節の議論に基づいて既存の無線通信リンク品質推定手法を分類・調査する。

4.2.1 Hardware metric based estimation

Hardware metric based estimation は、受信信号強度 (RSSI)、信号雑音比 (SNR)、パケット受信率 (PRR) / パケットロス率 (PLR) 等のネットワークデバイスから直接得られる評価基準値から、それらの時系列変化に基づいて

現在のリンク品質を判断する手法である。しかしながら、ネットワークデバイスから得られる評価基準値には、特定の無線規格でのみ得られるものや、異種無線通信規格間でその評価基準値の意味や算出方法が異なる。また、同種の無線通信規格を用いる無線通信リンクであっても、ネットワークデバイスの種類やソフトウェア実装の違いに応じて、得られる評価基準値に個体差が生じる。そのため、個々の無線通信リンクの品質を推定することには有用であるものの、複数の無線通信リンクの品質を比較することは難しい。

例えば、IEEE 802.11 の場合、無線 LAN デバイスは、データフレームの PLCP ヘッダ受信中の信号強度に基づいて $[40, -100]$ の値域をとる受信信号強度 (RSSI) をオペレーティングシステムへ通知する [12]。このため、オペレーティングシステムは、RSSI の相対的な変化からリンク品質の良し悪しの推移を判断できる。しかしながら、IEEE 802.11 では、RSSI を dBm の単位をとる受信強度、複数のデータフレームを受信した際の受信強度の平均値、もしくはそれらをハードウェアに実装された平滑化関数で丸めることを許容しているため、規格が同じ場合であってもハードウェアが異なると RSSI の意味が変わる。

本災害時情報共有システムでは、住民の持つスマートフォン等の移動端末を用いるため、多種多様の無線 LAN デバイスの混在が予想される。このため、それらデバイスから得られる RSSI 等の評価基準値を元にリンク品質を推定することは困難であると考えられる。

4.2.2 Triangle Metric

Boano らは、信号雑音比と LQI に基づいてリンク品質を推定するリンク品質推定手法を提案している [8]。この手法は、IEEE 802.15.4 [13] を用いる無線 PAN (Personal Area Network) において、その端末間のリンク品質を推定することを目的としている。Triangle Metric は、横軸を LQI の測定値、縦軸を信号雑音比の測定値として 2 次元上にマッピングし、原点からマッピングした点までのユークリッド距離をリンク品質の指標とする。リンク品質の良し悪しは、事前実験によって推定値とパケット受信率の相関から求めた閾値に基づいて、Very good, Good, Average, Bad の 4 つに分類して判断する。

この手法は、信号雑音比と LQI の 2 つの評価基準値を組み合わせることで、単種の評価基準値を用いる場合に比べて、パケット受信率と推定値の相関を高めている。また、ユークリッド距離を算出すれば推定値を得られるため、推定結果算出にかかる計算コストも小さくて済む。しかし、LQI は、IEEE 802.15.4 のみで利用できる指標であり、LQI はハードウェア実装によって得られる値が異なるため異種無線併用時には利用できない。

4.2.3 Four-bit

Fonseca らは、リンク品質を 4bit で表現可能とするリ

表 1 異種無線通信方式併用型 DTN の必要要件に基づいた既存手法の比較

	評価基準値	A) 汎用性	B) 即時利用性	C) 追従性	D) 即応性	E) 可用性
Hardware metric based	SNR, RSSI, etc.	×	○	×	○	×
Triangle metric	SNR, LQI	△	○	△	○	×
Four-bit	SNR, PRR	○	△	×	○	×
F-LQE	SNR, PRR, ASL, SF	○	△	△	○	×
KLE	Signal strength	△	○	○	○	△
ETX	PRR	△	△	△	○	×
MDOP	eNB 負荷情報, 端末の移動軌跡	×	×	○	△	○
Wireless forecasting	SNR, PRR, etc	○	×	×	×	△
Machine learning based	SNR, PRR, etc	○	△	△	×	×

リンク品質推定アルゴリズムを提案している [14]。この手法は、Collection Tree Protocol[15] を用いた経路制御を伴う、Zigbee または無線 LAN を用いた無線センサネットワークにおけるリンク品質推定を目的とする。

Four-bit は、受信パケットの有無とそのビットエラー率、及びルーティングテーブルを入力として、物理層のリンク品質を表す White bit、データリンク層のリンク品質を表す Ack bit、ネットワーク層のリンク品質を表す Pin bit と Compare bit の計 4bit でリンク品質を表現する。White bit は、受信フレームのビットエラー率が一定以下である場合に 1 となるビットである。Ack bit は、送信済みフレームに対する ACK 受信の有無を表すビットである。Pin bit は、パケット送信中か否かを表すビットである。Compare bit は、送信・受信端末間の経路のうち、パケットエラー率が小さい経路がパケット送信に適した経路として、送信・受信端末のどちらがその適した経路を認識しているかを表すビットである。

異種無線通信方式を併用する場合、受信フレームのビットエラー率や ACK の有無等は無線規格に共通して用いることができる一方で、送信データの種別やサイズ等を考慮すると、Four-bit では各無線リンクの転送可能なバイト数を推定できない課題が残る。

4.2.4 F-LQE

Baccour らは、ファジー理論に基づいたリンク品質推定手法を提案している [10]。この手法は、パケット受信率 (PRR)、Up/Down リンクそれぞれのパケット受信率の絶対値である ASL (Asymmetric Level)、パケット受信率の変動係数である SF (Stability Factor)、信号雑音比 (SNR) を評価基準値として、次の条件全てに合致する高品質な無線通信リンクを分類するアルゴリズムである。

- (1) パケット受信率が高い
- (2) 非対称性が低い
- (3) 安定性が高い
- (4) チャネル品質が高い

リンクの高品質さの度合いを表すメンバシップ関数 $\mu(i)$

は次のように表される。

$$\mu(i) = (1 - \beta) \cdot \text{mean}(\mu_{\text{PRR}}(i), \mu_{\text{ASL}}(i), \mu_{\text{SF}}(i), \mu_{\text{SNR}}(i)) + \beta \cdot \min(\mu_{\text{PRR}}(i), \mu_{\text{ASL}}(i), \mu_{\text{SF}}(i), \mu_{\text{SNR}}(i)), \quad (1)$$

このとき、 $\mu_{\text{PRR}}(i)$, $\mu_{\text{ASL}}(i)$, $\mu_{\text{SF}}(i)$, $\mu_{\text{SNR}}(i)$ は、それぞれパケット受信率の高さ、非対称性の低さ、安定性の高さ、及びチャネル品質の高さの度合いを表すメンバシップ関数であり、 $[0, 1]$ の値域をとる。これら 4 つのメンバシップ関数は予備実験等で決めておく。F-LQE では、さらに $\mu(i)$ を次式で平滑化した値をもとにリンク品質の良し悪しを判定する。

$$FLQE(\alpha, w) = \alpha \cdot FLQE + (1 - \alpha) \cdot 100\mu(i) \quad (2)$$

ここで、 α は、 $[0, 1]$ の実数であり、 w は $FLQE$ を算出する際に必要とする受信パケット数を表す。

F-LQE は、パケット受信率と信号雑音比が入力として得られれば計算できるため、無線規格が異なるリンク品質を推定・比較に用いることができると考えられる。しかしながら、メンバシップ関数を決定する際は、予備実験等でその関数を定める必要がある。

本災害時情報共有システムへの適用を考えた場合、発災後の通信環境の事前予測が難しいため、このメンバシップ関数の決定手法が課題となる。また、SF の計算には、ある程度数のパケットを推定前に受信する必要がある。これは、車両間のすれ違い際に通信する場合など通信時間が限られる状況においては、性能面で不利であると考えられる。

4.2.5 KLE

Senel らは、カルマンフィルタを用いてパケット受信率を予測する推定手法を提案している [9]。Senel らは、Zigbee を用いて通信する 2 台の端末間で複数のパケットを交換した際の平均信号雑音比とパケット受信率の相関が強く LOS/NLOS 環境のどちらにおいても類似し、信号雑音比からパケット受信率を推定できることを指摘している。そこで、この著者らは、Zigbee デバイスから取得した RSSI からカルマンフィルタを用いて受信強度を推定した後、その受信強度から信号雑音比を算出している。カルマンフィ

ルタを用いている理由は、計算コストが小さく、観測値から事後推定値を修正できる特徴から移動端末間の接続性の変化に対応できるためである。

ネットワークポロジの変化に対応できる点は、異種無線併用型 DTN に用いる点で有利であると考えられる。Senel らの手法では、平均信号雑音比とパケット受信率の相関が強いという仮定に基づいたパラメータ推定を行っているが、本災害時情報共有システムに適用する場合は、無線規格が異なる無線通信リンク間でその仮定が成り立つことが保証されない。そのため、同種の事後推定値を異種無線通信リンク間で用いる方法を検討する必要がある。

4.2.6 ETX

Couto らは、直前に測定したフレーム受信率から 1 フレーム送信に必要な電波の送信回数を推定する手法 ETX を提案している [16]。ETX は、プローブフレームを送信した際、受信端末側でのプローブフレームの受信率を d_f 、送信側でその Probe request フレームに対する ACK 受信率を d_r としたとき次式で表される。

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r} \quad (3)$$

ETX は、特定フレームの受信可否を測定できれば計算可能であるため、IEEE 802.11 以外の無線規格においても適用できる。このため、異種無線通信方式併用型 DTN においても利用できると考えられる。しかしながら、ETX は、送信電力が常に一定であり、データレートも一定であることの 2 つの仮定の元で成り立っているため、それらの仮定を満たさない場合はリンク品質を推定できたとしても、異種無線通信リンク間のリンク品質を比較することは難しい。

例えば、ETSI DCC 等の受信信号強度に合わせて送信電力を動的に変更する車車間通信プロトコルを利用する場合や、IEEE 802.11 のフォールバック機能によって信号強度に応じてビットレートが動的に変わる場合には対応できない。ネットワークポロジの変動が大きい災害時 DTN では、ETX の過程が成り立つことは考えにくく、災害時利用を想定した異種無線通信方式併用型 DTN のリンク品質推定には適さないと考えられる。

4.2.7 MDOP

西岡らは、携帯基地局もしくは Wi-Fi のアクセスポイント等の固定局における累積通信量と携帯端末のハンドオーバーの記録から携帯基地局の通信量を予測し、送信レートを動的に変えることで特定の固定局への負荷集中を防ぐ手法 MDOP (Mobile Data Offloading Protocol) を提案している [17]。この手法では、固定局が収集した固定局毎の通信量と携帯端末が送信したビーコンを収集・蓄積し、携帯端末の移動予測を行い、一定時間後の固定局の通信量を予測する。

しかしながら、この手法は、携帯基地局もしくは Wi-Fi のアクセスポイント等の通信インフラの利用を想定してい

ることから、本災害時情報共有システムが用いる異種無線通信方式併用型 DTN では、災害時における通信インフラ損壊により固定局が利用できない場合が考えられるため、特定の固定局に依存する品質推定は難しいと考えられる。

4.2.8 Wireless forecasting

Li らは、RSSI、ビットレート、フレーム再送率、パケットロス率、往復遅延時間 (RTT)、及びスループット等の評価基準値から実際の無線リンク品質との相関が最も強い評価基準値を判定する手法を提案している [11]。上記までに調べた既存手法は、実際のリンク品質と強い相関を持つ評価基準値を実験によって事前に同定し、その特定の評価基準値からリンク品質を推定している。一方で、Li らの手法では、実際のリンク品質と評価基準値の相関が通信環境に応じて変わることとを考慮して、リンク品質推定に最適な評価基準値を随時決定する。

この手法は、先に挙げた複数種の評価基準値を、測定 1 回あたりのサンプル数を 10 個として複数回収集する。以後、この 10 個のサンプル群毎に中央値を算出したのち、その中央値の大小によってサンプル群を Good, Edge (Normal), Bad の 3 つのグループに分類する。このグループは、評価基準値がリンク品質推定の指標として適しているか、つまりリンク品質推定への適性を表す。分類の際の閾値は予め適当な値を決めておく。最後に、評価基準値の種別ごとに測定回数に対する各グループに分類されたサンプル群の数の比を求め、その比が最も大きいグループをその評価基準値の適性度とする。

この手法は、取得する評価基準値の種別に関わらず、その時点で取得可能な評価基準値からリンク品質推定に最適なものを選べるため、リンク品質の推定結果と実際のリンク品質との整合性を高めることができると考えられる。しかしながら、評価基準値の収集からリンク品質推定までの過程がその他の手法よりも多いことから、推定結果を得るまでに時間がかかる。

また、この手法はあくまで最適な評価基準値を決めるだけであり、評価基準値ごとにリンク品質を推定するアルゴリズムを別に定める必要がある。無線通信リンク毎に品質推定に最適な評価基準値が異なり、適用できるリンク品質推定アルゴリズムが異なる場合、アルゴリズムごとに得られる推定結果の種別や値そのものも異なることから、無線通信リンク毎に品質を比較することが難しいと考えられる。

4.2.9 Machine learning based

Wang らは、IEEE 802.15.4 を用いる無線通信リンクの品質を Good, Medium, Bad に分類する教師あり学習を用いたリンク品質推定手法を提案している [18]。学習データとして、RSSI、送信パッファサイズ、パケット送信・受信率とし、決定木もしくは IF/THEN 規則を分類アルゴリズムに用いている。パッチ学習とオンライン学習によりリン

ク品質を推定する2つの場合について推定精度とパフォーマンス評価を実施している。また、Liuらは、分類アルゴリズムに、確率的勾配降下法、ロジスチック回帰モデル、ベイジアンモデル、ニューラルネットワークをそれぞれ用いた場合の packets 受信率とウィンドウサイズを推定した際の推定精度を比較・検証している [19]。

WangらとLiuら双方ともに既存の数学的アプローチやグルーピングを採用した手法と比較して、分類アルゴリズムの違い関わらず機械学習で得た推定結果は高いことを示している。一方で、Wangらは、複数の評価基準値を元にオンライン学習ベースでリンク品質を推定する場合、計算機資源が多量に消費されることを明らかにしている。

しかしながら、オンライン学習はノイズの影響を強く受ける。そのため、被災後の通信環境の変化や避難する住民の移動によってネットワークトポロジが大きく変動する災害時 DTN では発災後のリンク品質推定にオンライン学習を用いると推定結果の精度が低下する可能性がある。

一方、バッチ学習は、事前に SNR や PRR 等の評価基準値が得られる平時におけるリンク品質推定に用いることは可能と考えられる。発災後の住民の避難行動をシミュレーションベースで計算することで RSSI の推移を事前予測する手法も考えられるが、住民の移動、家屋の損壊等による障害物の有無、通信・電力インフラ損壊等、発災後の通信環境を左右する要因は多数あり、それらを考慮したシミュレーションパラメータの同定は難しいと考えられる。

4.3 既存のリンク品質推定手法の課題

これまでの調査結果を異種無線通信方式併用型 DTN における必要要件に基づいて整理した表を 1 に示す。既存手法に共通する課題は、送信機会毎のデータ転送可能量の推定が難しいことと、障害物の有無等の通信端末周囲にある電波伝搬に影響する外的要因への検討が不十分であること、誤った推定結果を補正する手段がないことの3つである。

既存手法の多くは、パケット受信率やウィンドウサイズ等をリンク品質の指標として用いている。一方で、リンク切断のタイミングを推定できないため、送信機会毎のスループット及び通信可能時間の推定が困難である。つまり、送信機会毎のデータ転送可能量を推定できない。これは、送信データのサイズを考慮した優先制御を困難にする。

従来手法では、SNR や RSSI 等の信号強度等のフレーム/パケットの受信に伴いネットワークデバイスから得られる評価基準値を基にリンク品質を推定している。しかしながら、SNR や RSSI 等は他端末との電波干渉等の有無や端末間の障害物の有無等の外的要因に左右されるため、それら評価基準値を用いてリンク品質を推定する場合は、その外的要因を推定結果に反映する仕組みが必要である。

また、既存手法で共通する課題として、推定結果が誤っ

ていたと判断される場合の対応策がない。Wireless forecasting や機械学習では、推定に最適な評価基準値を逐次選択するかオンライン学習によって推定精度を向上させる仕組みがある。しかしながら、それら双方ともに、計算コストが高く推定結果算出に伴うオーバーヘッドが大きいことが課題である。

5. 災害時利用を想定した異種無線通信併用型 DTN におけるリンク品質推定手法

本章では、前章の既存の無線通信リンク品質推定手法の調査結果から、3章で示した災害時利用を想定した異種無線通信方式併用型 DTN のリンク品質推定における必要要件(汎用性、即時利用性、追従性、即応性、可用性)を満たすリンク品質推定手法を設計する。

5.1 概要

本災害時情報共有システムで用いる異種無線通信方式併用型 DTN 向けの無線通信リンク品質推定手法の概要を図 5、利用例を図 6 に示す。ここでは、無線通信リンクの品質をその無線通信リンクが確立されてから切断されるまでの時間(以後、リンク接続時間)内に特定ノードへ転送可能なバイト数として評価する。

本手法では、発災前の平時において、防災訓練や避難場所の巡回等を通じて拠点 ES、DTN フェリー、携帯端末で測定した信号強度、パケット受信率、及びそれら通信端末周囲を撮影した画像もしくは点群データを事前学習させ、リンク接続時間内に自端末との間に無線通信リンクが存在する他端末へ転送可能なデータ量を算出する推定器を生成する。

発災後は、平時事前学習により得た推定器を用いて、発災前と同種の評価基準値を用いて他端末へ転送可能なバイト数を推定する。ただし、発災後の避難する住民の移動等により端末間の接続性は常に変わり、平時でのリンク品質との誤差が生じると考えられる。そこで、DTN フェリー及び携帯端末が他端末へ実際に転送したバイト数を観測値として、カルマンフィルタにより推定結果を補正する。

5.2 無線通信リンクの監視及び評価基準値の収集方法

無線通信リンクの監視方法は、受信端末側が信号もしくはパケットを受信するパッシブ型とする。一方で、プローブ送信によるアクティブ型の監視は行わない。プローブ送信を行わない理由として、電力確保が困難な発災後ではプローブ送信に伴う電力の浪費を防ぐ必要があることと、住民が避難場所等の特定の場所に集中することからプローブ送信によって電波干渉が頻発することが考えられるためである。ただし、通信端末同士がお互いの存在を把握するために必要なビーコン等は、無線通信リンクが従う通信規格

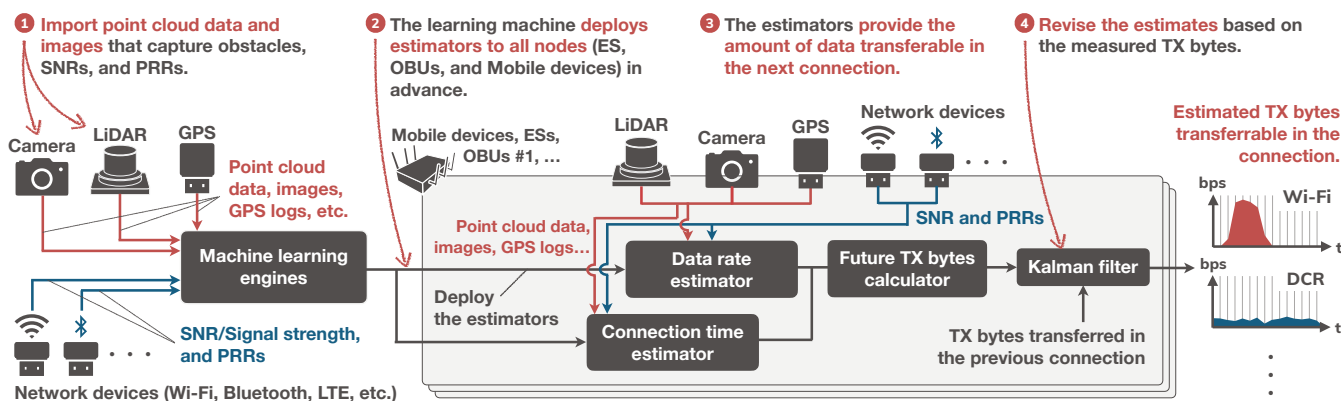


図 5 異種無線通信方式併用型 DTN 向けのリンク品質推定手法の概要

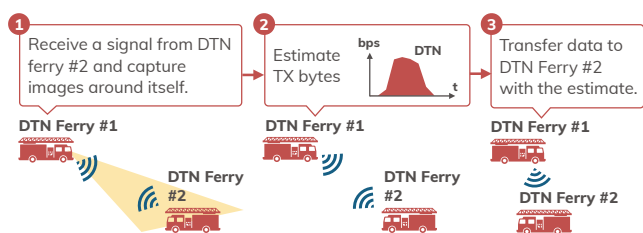


図 6 提案手法の利用例

に則ってブロードキャストされるものと想定する。

リンク品質推定の評価基準値には、受信強度もしくは信号雑音比とパケット受信率を用いる。受信強度とパケット受信率は無線通信規格の違いに関わらず測定でき、RSSI や LQI 等のハードウェア実装もしくは特定の無線通信規格に依存することがない。このため、それらを評価基準値として用いることで異種無線通信間のリンク品質推定における汎用性を確保する。

一方で、上記の評価基準値のみでは、端末間の障害物の有無や他端末からの電波干渉、及び端末間の相対速度等の外的要因が十分には考慮できない。本災害時情報共有システムが用いる異種無線併用型 DTN では、避難する住民の動き、DTN フェリーの移動、家屋倒壊等による電波の見通しの変化によって通信環境が変わる。しかし、肯定的に捉えれば、それら住民等の移動や家屋倒壊による見通しの変化を把握できれば、端末間の無線通信リンクの品質をより正確に把握できる可能性がある。そのため、信号やパケット受信の有無に加えてそれら通信環境の変化を多角的に把握してリンク品質推定に反映することが望ましい。

そこで、GPS センサで取得した GPS の位置情報から把握した自端末の位置と速度と、端末周囲をカメラや LiDAR 等のセンサ機器で測定して撮影した建造物や障害物の画像や点群データをリンク品質推定に活用する。点群データは、3 次元空間上にマッピングされた点の集合からなるデータである。GPS の位置情報や撮影画像を用いることで、受信強度やパケット受信率の測定ではわからない、端末間の位置や相対速度、障害物の有無等の電波の見通しを判断す

る。それら受信強度や点群データ等は、防災訓練や巡回業務の際に測定・収集する。測定した信号強度、パケット受信率、画像及び点群データは、次節で説明するように、それら評価基準値を学習データとして、評価基準値を測定した時点からリンク接続時間内に転送したバイト数を機械学習させる。ただし、カメラや LiDAR を用いた画像や点群データの収集は、DTN フェリーである緊急車両や消防士等が主体となって撮影・測定するものと想定する。

発災後は、学習時と同様に、受信強度とパケット受信率とともに、DTN フェリーや携帯端末が持つ GPS、カメラ、LiDAR 等のセンサ機器で取得した画像・点群データを入力として、バッチ学習によって得られた推定器を用いて無線通信リンク毎にリンク接続時間内に転送可能なバイト数を推定する。ただし、携帯端末に関しては、LiDAR 非搭載端末の存在や、津波からの避難中で撮影が困難である場合、撮影によるバッテリー浪費の可能性が考えられるため、カメラや LiDAR 等はいわずに GPS センサ等の一部のセンサのみを活用することも許容する。

5.3 リンク品質推定手段及びリンク選択方法

前章の議論で機械学習を用いたリンク品質推定手法は、その他の既存手法よりも高い精度でリンク品質を推定できることが示されていることから、本災害時情報共有システムにおける異種無線併用型 DTN のリンク品質の算出には機械学習を用いる。具体的には、前節で示した受信強度や点群データ等の評価基準値を学習データとし、自端末と無線通信リンクを持つ他端末へリンク接続時間内に転送可能なバイト数をバッチ学習させる。発災後のリンク品質推定は、バッチ学習で得た推定器を事前にインストールした拠点 ES、DTN フェリー、及び携帯端末が、個々に観測した信号強度や点群データ等の評価基準値を用いて行う。

発災後は、平時に生成した推定器によって得たリンク接続時間内に転送可能なバイト数一方で、被災状況や避難行動等によって DTN フェリーと移動端末間の接続性が平時とは異なりリンク品質推定結果にも誤差が生じるため、

バッチ学習によるリンク品質推定のみでは追従性・可用性に劣る。そこで、事前のバッチ学習で得た推定器から得た推定結果を発災後に実際に転送したバイト数を元にカルマンフィルタを用いて補正することで、発災後の通信端末の移動性を考慮しつつ、追従性及び冗長性を確保する。

前章の議論から、推定結果のずれを補正する方法は、カルマンフィルタとオンライン学習がある。本リンク品質推定手法がカルマンフィルタを用いる理由は、オンライン学習はノイズへの耐性がないことから発災後のトポロジの大きな変動に対応できず追従性を低下させる可能性があることが挙げられる。また、発災後にオンライン学習を用いてリンク品質を推定する場合、拠点 ES、DTN フェリー、及び携帯端末全てがオンライン学習をするに足る計算機能力を持つ必要がある。しかしながら、携帯端末は多種多様であることから、それら全てが十分な計算機能力を持つことを想定することは困難である。

6. まとめ

本稿では、異種無線方式併用型遅延耐性ネットワークを用いた災害時情報共有システムを提案及びその実現に向けた課題を提示した。それら課題のうち、異種無線通信方式を併用する複数の無線通信リンクの品質推定手法についてその必要要件を示し、それら要件を満たす推定手法として、強化学習を用いるリンク品質推定手法を設計した。

今後、本稿で提案したリンク品質推定手法をネットワークシミュレータ Scenargie を用いてシミュレーションモデルに実装し、その推定精度と有効性を評価する予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 19H04092 の助成によるものである。

参考文献

- [1] 総務省: 災害に強い情報通信ネットワーク導入ガイドライン 第2版, 2018.
- [2] 内閣府(防災担当): 参考資料2 被害に関するデータ等 - 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会(第1回)議事録, 入手先 (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/1/index.html>), (参照 2020-05-13).
- [3] 井上真杉, 大西真晶, 李睿棟, 大和田泰伯: NerveNet - マルチホップ無線と分散情報処理の融合ネットワーク, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 110, No. 434, pp. 67-74, IEICE, 2011.
- [4] H. Nishiyama, M. Ito, and N. Kato: "Relay-by-Smartphone: Realizing Multihop Device-to-Device Communications," IEEE Communications, Vol. 52, No. 4, pp. 56-65, IEEE, 2014.
- [5] GPX Developers: GPX: the GPS Exchange Format, 入手先 (<https://www.topografix.com/gpx.asp>), (参照 2020-05-13).
- [6] 内閣府(防災担当): 避難所の運営等に関する実態調査(市区町村アンケート調査)調査報告書, 2015 年.

- 入手先 (http://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/pdf/hinanjo.kekkahoukoku_150331.pdf), (参照 2020-05-13).
- [7] N. Baccour, A. Koubâa, L. Mottola, M. Antonio Z. Nigã, H. Youssef, C. A. Boano, and M. Alves: "Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey". ACM Transaction Sensor Networks Vol. 8, No. 4, Article 34 2012.
- [8] C. A. Boano, M. A. Zúñiga, T. Voigt, A. Willig and K. Römer, "The Triangle Metric: Fast Link Quality Estimation for Mobile Wireless Sensor Networks," 2010 Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks, pp. 1-7, Zurich, IEEE, 2010.
- [9] M. Senel, K. Chintalapudi, D. Lal, A. Keshavarzian and E. J. Coyle, "A Kalman Filter Based Link Quality Estimation Scheme for Wireless Sensor Networks," IEEE GLOBECOM 2007 - IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 875-880, IEEE, 2007.
- [10] N. Baccour, A. Koubâa, H. Youssef, M. B. Jamâa, D. do Rosário, M. Alves, L. B. Becker: "F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks," Wireless Sensor Networks. EWSN 2010, Vol. 5970, pp. 240-250, Springer, 2010.
- [11] M. Li, F. Li, M. Claypool, and R. Kinicki: "Weather forecasting: predicting performance for streaming video over wireless LANs," In Proceedings of the international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video (NOSSDAV' 05). pp. 33-38, ACM, 2005.
- [12] IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, in IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), IEEE, 2016.
- [13] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, in IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011), IEEE, 2016.
- [14] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, and P. Levis: "Four bit wireless link estimation." In Proceedings of the 6th International Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets VI), ACM, 2007.
- [15] O. Gnawali, R. Fonseca, K. Jamieson, M. Kazandjieva, D. Moss, and P. Levis: "CTP: An efficient, robust, and reliable collection tree protocol for wireless sensor networks." ACM Transaction on Sensor Networks, Vol. 10, Issue. 1, No. 16, pp. 1-49, ACM, 2013.
- [16] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris: "A highthroughput path metric for multi-hop wireless routing." In Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, ACM, 2003
- [17] 西岡哲朗, 町田樹, 荒井大輔, 大岸智彦, 峰野博史: "モバイルデータトラフィックの時間的局所性を解消するモバイルデータオフローディングプロトコルの提案," 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 1, pp. 13-23, 2017.
- [18] Y. Wang, M. Martonosi, and L. Peh: "Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks." SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review, Vol. 11, Issue. 3, pp. 71-83, ACM, 2007.
- [19] T. Liu and A. E. Cerpa: "Temporal Adaptive Link Quality Prediction with Online Learning." ACM Transaction on Sensor Networks, Vol. 10, Issue. 3, Article 46, pp. 1-41, ACM, 2014.