

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22700069

研究課題名（和文）

ネットワークコーディングを用いた高信頼無線ネットワーク

研究課題名（英文）

Reliable Wireless Networking Based on Network Coding

研究代表者

松田 崇弘 (Matsuda Takahiro)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50314381

研究成果の概要（和文）：制御システムの構成要素を無線ネットワークで接続する無線ネットワーク化制御システムでは、制御システムを安定に動作させるために高信頼な無線ネットワークを構築することが不可欠である。本研究では、高信頼無線ネットワークをネットワークコーディングにより構築し、性能評価を行うことによりその有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：In wireless networked control systems, where sensors, actuators and controllers are connected through wireless multihop networks, it is necessary to design a highly reliable wireless networks. In this research project, we proposed a reliable wireless network with network coding and evaluated its performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：情報通信ネットワーク

科研費の分科・細目：情報学・計算システム・ネットワーク

キーワード：高信頼無線ネットワーク，ネットワークコーディング，ネットワークトモグラフィ

1. 研究開始当初の背景

音声通話や映像，Web等の情報を伝送するために構築されてきた通信システムは，人が利用する情報を転送するためのものであったが，近年では機械同士の通信等，新しい形態の通信システムが必要とされてきている。

この機械対機械で情報転送される通信システムはM2M (Machine-to-Machine) 通信と呼ばれる。本研究では，構成要素を無線伝送路で接続することにより工場内産業機器等の制御システムを構成する無線ネットワーク化制御システム (Wireless Networked Control Systems: WNCS) について検討する。

WNCSの研究では、与えられた無線ネットワーク上で安定動作可能な制御システムを構築するための制御工学的な研究と、想定する制御システムが安定動作可能な通信環境を提供する通信工学的な研究が存在する。本研究は、後者の立場をとる。WNCSはM2M通信システムの一つと考えることができるが、制御システムを安定に動作させるため、従来で必要とされてきた通信品質よりも遙かに高い高信頼性が不可欠である。

2. 研究の目的

WNCSが対象とするアプリケーションは様々であるが、例えば工場の制御システムを対象とする場合、工場内では様々な遮蔽物が存在する場合があるので多くの場合見通し内の通信を実現することが困難である。そこで本研究では、複数の中継器を用いたマルチホップ伝送によりネットワークを構成するマルチホップ無線ネットワークを対象とし、高信頼マルチホップ無線ネットワークを実現するための経路制御手法を提案する。提案手法では、ネットワークトモグラフィ技術を用いてネットワークを構成する各通信リンクの通信品質を推定し、推定結果に基づいて低パケットロス率でのパケット転送を可能とする経路選択を行う。ネットワークトモグラフィ技術および経路選択後のパケット転送方式としてはネットワークコーディングを用いた方式について検討する。提案手法を計算機上に実装し、その性能評価を行うことにより、提案手法の有効性を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で提案する経路制御手法は、(1) 通信リンクの通信品質を推定するためのネットワークトモグラフィ手法、(2) 推定した通信品質に基づく経路選択手法の2つにより構成される。

(1) ネットワークトモグラフィ

ネットワークトモグラフィ技術として、ネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィと圧縮センシングを用いたネットワークトモグラフィの2つの手法について検討した。両手法とも任意の有効非循環グラフで表現されるネットワーク上のリンク品質を推定することが可能である。

① ネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィ

図1を用いてネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィについて述べる。図でノード S_1, S_2 は送信ノード、 R_1, R_2 は受信ノード、A, Bは中継ノードを表している。 S_1, S_2 から送出されたパケット x_1, x_2 は、ノードAで $x_1 + x_2$ へと符号化されて R_1, R_2 へ転送される。ここで例としてリンク S_1 -Aでパケットロスが発生した場合を考える。この場合、ノードAで符号化されないため、 R_1, R_2 ではパケット x_2 が受信される。同様に考えると、ネットワーク上で単一のパケットロスが発生すると仮定した場合の受信パケットは表1のように表される。ただし、パケットが受信されない場合は0と表している。表より、パケットロスが起こったリンクにより受信パケットが異なることが分かる。従って、受信パケットの符号化情報からどのリンクでパケットロスが発生したかを知ることができ、その結果リンク毎のパケットロス率を推定することが可能となる。

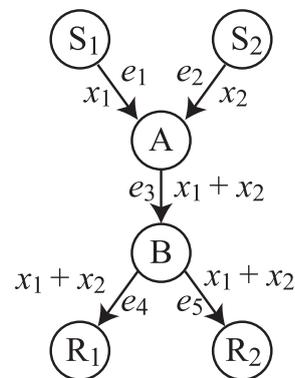


図1 ネットワークコーディング

表 1 パケットロスと受信パケットの関係

パケットロス	R_1 での受信パケット	R_2 での受信パケット
S_1-A	x_2	x_2
S_2-B	x_1	x_1
A-B	0	0
B- R_1	0	x_1+x_2
B- R_2	x_1+x_2	0

② 圧縮センシングを用いたネットワークトモグラフィ

リンクの通信品質を推定するための試験パケットが転送される経路の通信品質をベクトル $\mathbf{y} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_M)^T$ とする。ただし、 y_m ($m = 1, 2, \dots, M$) は m 番目の経路の通信品質であり、 M は経路数である。一方、リンクの通信品質を $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_L)^T$ とする。ただし、 y_l ($l = 1, 2, \dots, L$) は l 番目のリンクの通信品質であり、 L はリンク数である。このとき、 \mathbf{y} と \mathbf{x} の関係は行列 \mathbf{A} を用いて、 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ と表される。従って、ネットワークトモグラフィの問題は観測された \mathbf{y} より \mathbf{x} を推定する問題と考えることができるが、一般には $M < L$ であるため、 \mathbf{x} を一意に求めることは困難である。しかし、圧縮センシングでは、 \mathbf{x} を大部分の要素が 0 値であるスパースベクトルと見なすことにより \mathbf{x} を推定することを可能とする。

本研究では、圧縮センシングを用いたネットワークトモグラフィを提案する。圧縮センシングを用いた場合、通信品質が良好なリンクに対応する要素が 0 値となるように定式化することで、劣悪なリンクのみを抽出するためのネットワークトモグラフィを実現することができる。

(2) 経路選択手法

ネットワークトモグラフィにより推定されたリンクの通信品質より、パケットを転送するための経路を選択し、パケットを転送する。具体的な手順は以下の通りである。

① ネットワーク内のノードを用いてメッシュ状のネットワークトポロジを構築する。

② メッシュトポロジ上で (1) で検討したネットワークトモグラフィを用いてリンク毎のパケットロス率を推定する。

③ ②で得られた結果より、エンド-エンドのパケットロス率が小さくない経路を選択してパケットを転送する。

③では、複数の経路を選択することにより、送信ノードで消失訂正符号化されたパケットを複数の経路で並列転送する手法と中継ノードでネットワークコーディングを用いる手法について検討する。

4. 研究成果

(1) ネットワークトモグラフィ

① ネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィ

ネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィ自体は、既にいくつかの研究で検討されている技術ではあるが、本研究では、これを計算負荷の小さい符号化方式により実現する方法を提案した。提案手法では、試験パケットは符号化パケットが流れる経路数分のビット長の情報から構成され、各中継ノードのネットワークコーディングは、既存のネットワーク符号とは異なる簡易なビット演算により実現する。本手法により、既存のネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィよりも性能を劣化させることなくリンクの通信品質を推定することが可能であることを確認した。

② 圧縮センシングを用いたネットワークトモグラフィ

圧縮センシングを L1 最適化手法および L1 ノルムと L2 ノルムの両者を用いた L1-L2 最適化手法により実装し、圧縮センシングを用いたネットワークトモグラフィの性能評価を行った。シミュレーション実験による性能評価の結果、本方式により通信品質の悪いリンクのみを効率的に抽出可能であることを明らかにした。また、L1-L2 最適化を用い

た場合、パラメータを操作することにより検出したリンクの通信品質を変更可能であることを明らかにした。図 2 はパラメータに対する未検出率を表す。 α はリンクのパケットロス率を表す。図より、 $\lambda=0.03$ のときは $\alpha \geq 0.05$ のリンクを推定ことができ、 $\lambda=0.07$ としたときは $\alpha \geq 0.1$ のリンクを推定できることが分かる。

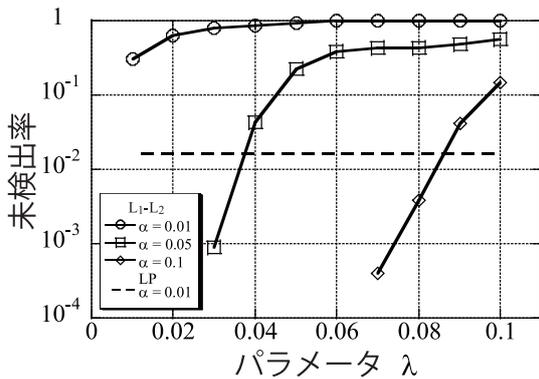


図 2 ネットワークトモグラフィの性能評価結果

(2) 経路選択手法

提案手法では、ネットワークトモグラフィを適用する前にメッシュトポロジを構築するが、空間相関が強い無線伝送路上では空間的に離れたノードを用いてメッシュトポロジを構築する必要がある。本研究では、隣接ノード間の接続関係を用いてメッシュトポロジを構築することにより、これを実現した。複数経路選択によるパケットの並列転送方式およびネットワークコーディングを用いた手法の両者を検討した結果、両者とも低パケットロス率でのデータ転送が可能であることを明らかにした。また、並列転送を行う場合には、経路間の通信品質の相関を考慮して経路選択を行うことによりさらなる性能改善が可能であることを確認した。

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 6 件)

- ① Masaaki Nagahara, Takahiro Matsuda, and Kazunori Hayashi, "Compressive Sampling for Remote Control Systems," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics*, vol. E95-A, no. 4, pp. 713-722, Apr. 2012. (査読有)
- ② Takahiro Matsuda and Tetsuya Takine, "Bitwise Operation-Based In-Network Processing for Loss Tomography," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E96-B, no. 2, pp. 470-478, Feb. 2013. (査読有)
- ③ Keisuke Minami, Takahiro Matsuda, Tetsuya Takine, and Taku Noguchi, "Asynchronous Multiple Source Network Coding for Wireless Broadcasting," *Numerical Algebra, Control and Optimization (NACO)*, vol. 1, no. 4, pp. 577-592, Dec. 2011. (査読有)
- ④ Takahiro Matsuda, Masaaki Nagahara, and Kazunori Hayashi, "Link Quality Classifier with Compressed Sensing Based on ℓ_1 - ℓ_2 Optimization," *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 1117-1119, Oct. 2011. (査読有)
- ⑤ Takahiro Matsuda, Taku Noguchi, and Tetsuya Takine, "Survey of Network Coding and Its Applications," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E94-B, no. 3, pp. 698-717, Mar. 2011. (査読有)

[学会発表] (計 9 件)

- ① Kazushi Takemoto, Takahiro Matsuda, and Tetsuya Takine, "Path Construction for Compressed Sensing-Based Network Tomography,"

The 9th IEEE Vehicular Technology
Society Asia Pacific Wireless
Communications Symposium (APWCS
2012), Aug. 2012. (査読有)

- ② 山本航平, 松田崇弘, 滝根哲哉, ``無線
線伝送路の空間相関を考慮したメッシ
ュ型マルチパスルーチング,`` 信学技
報, vol. 112, no. 463, NS2012-222, pp.
331-336, 2013年3月. (査読無)
- ③ 松田崇弘, ``無線制御のためのネットワ
ークトモグラフィ,`` 電子情報通信学
会ソサイエティ大会, AT-2-5, 2011年9
月. (査読無)

[その他]

ホームページ

<http://www2b.comm.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 崇弘 (Matsuda Takahiro)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 50314381