

# モデル予測制御を用いたポテンシャルルーティングの ロバスト性に関する検討

久世 尚美<sup>†</sup> 小南 大智<sup>††</sup> 加嶋 健司<sup>†††</sup> 橋本 智昭<sup>††††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪大学大学院経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

<sup>†††</sup> 京都大学大学院情報学研究科 〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

<sup>††††</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-3

E-mail: †{n-kuze,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,

†††kashima@bode.amp.i.kyoto-u.ac.jp, ††††info@thashi.net

あらまし 自己組織型システムは、高い拡張性、適応性、耐故障性を有する一方で、システム全体の最適性が保障されない、機能の創発に時間を要する傾向がある、といった問題がある。本稿では、無線センサネットワークを対象とした自己組織型経路制御手法であるポテンシャルルーティングを題材とし、システムの振る舞いを観測・予測することでシステムを望ましい方向へと誘導するよう制御を行うモデル予測制御を導入した手法の、実現性を考慮した上でそのロバスト性向上を検討する。

キーワード 自己組織化; ポテンシャルルーティング; 無線センサネットワーク; モデル予測制御 (MPC); ロバスト性

## Robustness of Potential-based Routing with Model Predictive Control

Naomi KUZE<sup>†</sup>, Daichi KOMINAMI<sup>††</sup>, Kenji KASHIMA<sup>†††</sup>, Tomoaki HASHIMOTO<sup>††††</sup>, and

Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University 1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

<sup>††††</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

E-mail: †{n-kuze,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,

†††kashima@bode.amp.i.kyoto-u.ac.jp, ††††info@thashi.net

**Abstract** Self-organizing systems have high scalability, adaptability, and robustness, but fall into local optima or converge slowly under some environmental conditions. To adapt to dynamically changing conditions, systems should be controlled moderately in accordance with future states of systems predicted by observing system behavior. In this paper, we take potential-based routing, a self-organizing routing mechanism for wireless sensor networks, as an example and consider a mechanism to enhance adaptability and robustness by introducing model predictive control.

**Key words** self-organization; potential-based routing; wireless sensor network; model predictive control (MPC); robustness

### 1. はじめに

情報ネットワークの大規模化、多様化に伴い、集中管理型制御や大域情報に依存した分散制御、あるいはそれらの階層化制御などに基づく従来のネットワークシステムやネットワーク

制御の限界が指摘されている。従来のネットワークシステムやネットワーク制御においては、ネットワーク全体の情報を収集、管理し、ネットワーク全体の最適化を行っていたが、ネットワークの規模や複雑性の増加により、情報の収集、管理、あるいは最適化のためのコストが爆発的に増大してしまう。その

ため、高い拡張性、適応性、耐故障性を有し、さらなる発展に対して持続的に耐えうる新たなネットワークアーキテクチャが求められている。NSF FIA [1] (米国)、FP7 [2] (欧州)、新世代 NW プロジェクト [3] (日本) などの国家プロジェクトにおいて新しいネットワークアーキテクチャの研究開発が推進される中で、自己組織化原理に基づく局所情報を利用した完全自律分散型の制御技術が注目を集めている。

自己組織型システムでは、集中制御を行うことなく、システムの個々の構成要素が局所情報に基づいて簡単な規則の下に自律分散的に動作し、さらに、構成要素が直接的または間接的に相互作用することによって、システム全体として所望の機能、動作を創発する。このようなシステムでは、従来の集中管理型制御のようにシステム全体にかかわる大域情報を収集、管理する必要がないため、ネットワーク規模拡大に伴う情報管理コストの増大を抑えることができる。また、局所的な障害や変動に対しては、その近傍の構成要素による局所的で即応的な適応制御によって対処されるため、ネットワーク全体に影響を与えにくく、障害や環境の変動によって性能が低下した場合にも自律的に修復、適応していくことができる。

一方で、自己組織型制御について工学応用上の問題点が存在することも明らかになってきている [4]。まず、自己組織型システムの機能は自律動作する構成要素の相互作用の結果として創発するため、大規模なシステムでは機能の創発に時間を要する場合がある。特に、環境変動が生じた場合に、その情報が遠方の構成要素に届くまでに時間を要するため、適応速度が遅くなる。また、それぞれの構成要素が用いる情報は局所的なものであるため、大域情報を用いてシステム全体を制御するものと比較して、最適性に劣る傾向がある。さらに、自己組織型システムにおいては、外部から制御を加える必要がないことが特徴の一つではあるものの、同時に創発される機能が必ずしも要求を満たすものではないという問題の原因ともなっている。これらの問題の解決策として、全体に対して緩やかな制御を加えることによって機能の創発を管理する (管理型自己組織化制御 [5], [6]) こと、また、ネットワークの規模や複雑性の増加により、常に変化し続けるネットワークに適応するために、変化に対する応答の結果として追従するだけでなく、システムの振る舞いを観測し、変化に対するシステムの振る舞いを予測することによってシステムを望ましい方向へと誘導するよう制御を行う (予測機構の導入) ことが有効である。

モデル予測制御 (MPC) [7] では、システムの挙動を予測するモデルを用いてシステムの未来の状態を予測し、与えられた要求を満たすように制御を行う。モデル予測制御は、システムの制約条件の考慮やパラメータによるチューニングが容易であるため工学的な応用がしやすく、また計算機の演算処理能力の向上により予測、制御を行うための複雑な処理が実現可能となってきたことから、近年注目を集めている。モデル予測制御を導入することによって、過去の情報から予測を行い、環境変動を早い段階で検知、フィードフォワード的に制御を行うことが可能となるため、適応速度が向上する。さらに、システムの振る舞いを観測・予測し、所望の要件を満たすように制御を加える

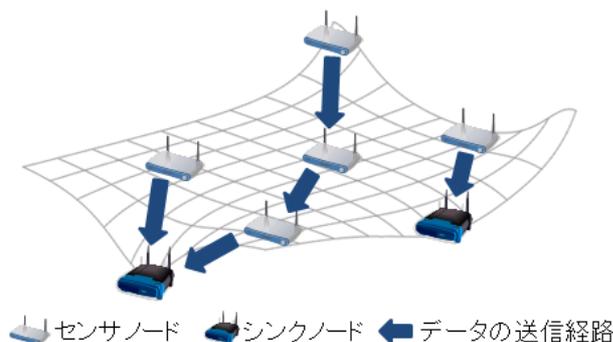


図 1 ポテンシャル場を用いたルーティング

ことにより、自己組織的な制御を管理可能にし、システム全体の最適性が保障される。本稿では、自己組織型の経路制御手法であるポテンシャルルーティング [8] を題材として、自己組織化制御にモデル予測制御の導入を行い、シミュレーション評価により環境変動に対する適応性が向上することを示す。また、通常、現実のシステムの振る舞いは、予測制御機構 (コントローラ) を設計する際に用いられるシステムのモデルとの間に誤差が存在するため、提案手法の実現性を考慮した上で、設計時には未知である誤差に対するロバスト性についても検討を行う。

本稿の構成としては、まず 2 章において本稿で対象とするポテンシャルルーティングについて述べ、3 章でモデル予測制御を用いたポテンシャルルーティングを提案する。さらに、4 章においてシミュレーションにより提案手法の有効性、ロバスト性を示し、最後に 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. ポテンシャルルーティング

ポテンシャルルーティングは、無線センサネットワークを対象とした自己組織型の経路制御手法である。ポテンシャルルーティングでは、各ノードはポテンシャルと呼ばれるスカラー値を保持し、その値の大小に基づいてルーティングを行っており、自身よりポテンシャルが低い隣接ノードへデータを転送していくことで各センサノードが集めたデータをシンクノードへと届けられる (図 1)。各ノードは、自身および隣接ノードのポテンシャルや残余電力、シンクノードまでのホップ数などの局所情報を基にして自身のポテンシャルを決定するため、高い拡張性を有し、また省電力化や負荷分散にも効果がある。

### 2.1 既存のポテンシャル場の構築手法

ポテンシャルは局所情報のみに基づいて決定されるため、ポテンシャルの収束に時間を要するという問題がある。文献 [9] では、収束速度の遅さを克服するために、現時点と一時点前の局所情報を用いて次時点のポテンシャルを決定する手法を提案している。ノード  $n$  は、式 (1) に基づいて次時点の自身のポテンシャル  $\theta_n(t+1)$  を決定する。

$$\theta_n(t+1) = (\alpha + 1)\theta_n(t) - \alpha\theta_n(t-1) + \beta\sigma_n \sum_{k \in Nb(n)} \{\theta_k(t) - \theta_n(t)\} \quad (1)$$

$\alpha$  は、次時点のポテンシャルを決定する際の現時点のポテン

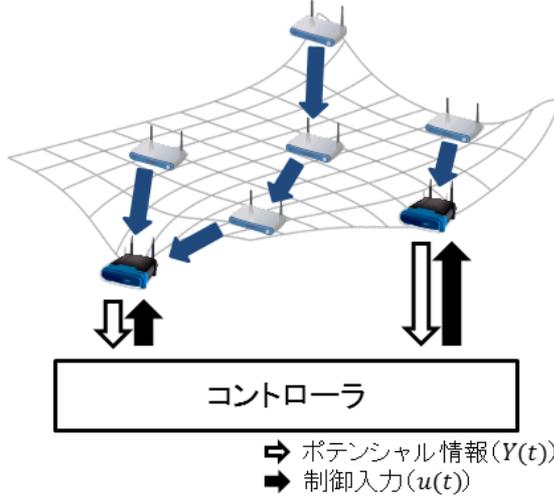


図2 モデル予測制御を用いたポテンシャルルーティング

シャルとそれ以前のポテンシャルの重みを決定するパラメータである。 $\alpha$ の値が大きいくほど、以前のポテンシャルの重みが大きくなり、外乱に強くなる一方で、環境変化への適応が遅くなる。 $\beta$ は隣接ノードの情報からどの程度影響を受けるかを決定するパラメータである。 $\sigma_i$ は $1/|Nb(i)|$ と定義されている。境界条件としてシンクノードのポテンシャルを0で与えている。

しかし、文献[9]のポテンシャル場構築手法では、環境変動にはその影響がシステム上に現れてから対処するため適応速度が遅い。さらに、各ノードのポテンシャルは自身とその隣接ノードの情報のみに基づいて決定されるため、システム全体としての最適性が保障されない、という自己組織型システム特有の問題が残っている。本稿では、モデル予測制御を導入することによって、これらの問題を解決する。

### 3. MPCを用いたポテンシャルルーティング

本稿で提案する手法では、予測制御機構(コントローラ)が一部の直接制御可能なノードを介してネットワークの情報(ポテンシャル、トポロジーなど)を観測し、ポテンシャルの収束を促進、あるいは適切なポテンシャルへと誘導するようにポテンシャルの変化量を決定して制御入力としてフィードバックする(図2)。本章では、まずシステムの振る舞いを予測するためのモデルを決定し、そのモデルを用いて制御目標を達成するよう制御入力を決定するコントローラを設計、提案する。

#### 3.1 モデルの決定

ポテンシャルの変化を予測するため、ポテンシャルのダイナミクスを定式化する。提案手法では、高い収束性を有する文献[9]の手法をベースとして、各ノードにおけるポテンシャルの更新式を次式で与える。

$$\begin{aligned} \theta_n(t+1) = & (\alpha + 1)\theta_n(t) - \alpha\theta_n(t-1) \\ & + \beta\sigma_n \sum_{k \in Nb(n)} \{\theta_k(t) - \theta_n(t)\} + f_n(t) + \eta_n(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$f_n(t)$ は、時刻 $t$ におけるノード $n$ への流入出フロー量を示している。ここで、流入フローはセンサノードがセンサから得

る観測データ、流出フローはシンクノードにおいて収集されるデータを表されており、境界条件として $f_n(t)$ を適切に決定することにより、シンクノードのポテンシャルが極小となるようなポテンシャル場の構築が可能となる。 $\eta_n(t)$ は予測項で、コントローラからの制御入力 $u(t)$ によって決定される。文献[9]では、 $\sigma_i = 1/|Nb(i)|$ と定義されているが、特定の条件下以外ではポテンシャルが発散してしまうという問題がある。そこで、本稿では、 $\sigma_i = \sigma$  ( $0 < \sigma < 1$ )とする。

各々のノードのポテンシャルに対して $\theta_i^t := [\theta_i^t \theta_i^{t+1}]^T$ と定義したものをを用いて、ノード数 $N$ のネットワーク全体のポテンシャルを表す行列 $\Theta^t$ を以下のように定義する。

$$\Theta(t) = [\theta_1(t) \theta_2(t) \cdots \theta_N(t)]^T$$

さらに、 $t = \infty$ でのポテンシャル値、つまりポテンシャルの収束値 $\Theta(\infty)$ と現時点のポテンシャル $\Theta(t)$ の差 $X(t) := \Theta(\infty) - \Theta(t)$ を定義すると、ネットワーク全体のポテンシャルの更新は次式で表すことができる。

$$X(t+1) = AX(t) + Bu(t) \quad (3)$$

ただし、 $A$ 、 $B$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} A &= I_{N \times N} \otimes A_1 - \Gamma \otimes A_0, \quad B = E \otimes C \\ A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha & \alpha + 1 \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \beta\sigma_i \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

このとき、 $\Gamma$ はグラフラプラシアン、 $E$ はコントローラが制御可能なノード、 $I_{n \times n}$ は $n \times n$ の単位行列を表す。提案手法では、式(3)をポテンシャルの挙動を表すモデルとして用いる。

#### 3.2 コントローラの設計

本節では、3.1節で示したモデルを用いて、ポテンシャルの収束を促進、あるいは適切なポテンシャルへと誘導するように制御入力を決定するコントローラを設計する。式(3)を用いて、システム全体の挙動を以下の状態方程式で表す。

$$X(t+1) = AX(t) + B_1d(t) + Bu(t) \quad (4)$$

$$Y(t) = C_2X(t) + D_{21}d(t) + D_{22}u(t) \quad (5)$$

$$Z(t) = C_1X(t) + D_{11}d(t) + D_{12}u(t) \quad (6)$$

ここで、 $Y(t)$ はコントローラが観測する情報、 $Z(t)$ は制御量、 $d(t)$ は設計時に未知である外乱入力を示す。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_{11}$ 、 $D_{12}$ 、 $D_{21}$ 、 $D_{22}$ は以下で表せる。

$$C_1 = I_{N \times N} \otimes [1 \ 0], \quad C_2 = H^T \otimes I_{2 \times 2}$$

$$D_{11} = \mathbf{0}_{2N \times N}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N \times 2ctrl} \\ rE \otimes [0 \ 1] \end{bmatrix}$$

$$D_{21} = I_{N \times N} \otimes [0 \ 1]^T, \quad D_{22} = \mathbf{0}_{2N \times 2ctrl}$$

なお、 $H$ はコントローラが観測可能なノードを表す行列、 $ctrl$

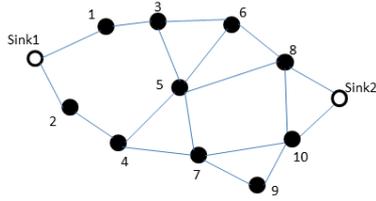


図3 ネットワークポロジ

表1 パラメータ設定

パラメータ	値
$\alpha$	0.4
$\beta$	0.2
$\sigma$	0.1
$r$	0.1, 10

はコントローラが制御可能なノードの数、 $\mathbf{0}_{m \times n}$  は  $m \times n$  の零行列を表す。

以上の式を元に、式 (7) を満たす制御入力  $\mathbf{u}(t)$  を決定する。

$$\text{minimize} : \sum_{t=0}^{\infty} \mathbf{Z}(t)^T \mathbf{Z}(t) \quad (7)$$

このとき、 $\mathbf{Z}^t$  は式 (8) で表すことができ、各ノードにおけるポテンシャルの収束値との差分、および制御入力 が最小となるように制御入力 が決定される。

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \theta_1(t) - \theta_1(\infty) \\ \vdots \\ \theta_N(t) - \theta_N(\infty) \\ r\mathbf{u}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$r$  は制御入力の大きさを決定するパラメータで、 $r$  が大きな値をとる場合には制御入力 が小さくなり、ポテンシャルの急激な変動が抑えられる一方で、収束速度が低下する。

#### 4. シミュレーション評価

本章では、提案手法の環境変動に対する適応性、およびロバスト性を示すため、シミュレーション評価を行った結果を示す。まず 4.1 節で、設計したコントローラに式 (7) を満たすよう制御を行うことを確認するために、MATLAB 上でポテンシャルの収束について評価を行う。次に 4.2 節で、Visual C++ で作成したイベントドリブンモデルのプログラムを用いてシミュレーションを行い、環境変動に対する適応性、ロバスト性の評価を行う。なお、予測制御における制御入力  $\mathbf{u}(t)$  の計算は Visual C++ から MATLAB を呼び出すことで実現している。

4.1、4.2 節では、図 3 で表されるノード数 12 のネットワークポロジを対象として行っており、図において白丸で表されるノードをシンク、それ以外のノードをセンサとしている。コントローラが制御可能なノードはシンクノード 1、2 としている。パラメータの設定は表 1 に示す。比較対象として、予測制御を導入していない文献 [9] の手法を用いる。

##### 4.1 ポテンシャルの収束性

本節では、ポテンシャルの収束について評価を行った結果を

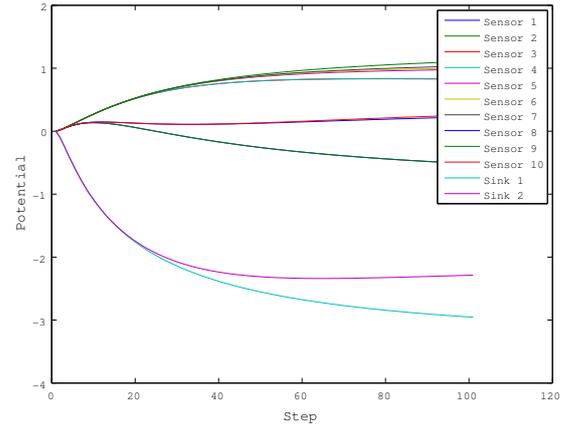


図4 予測無し

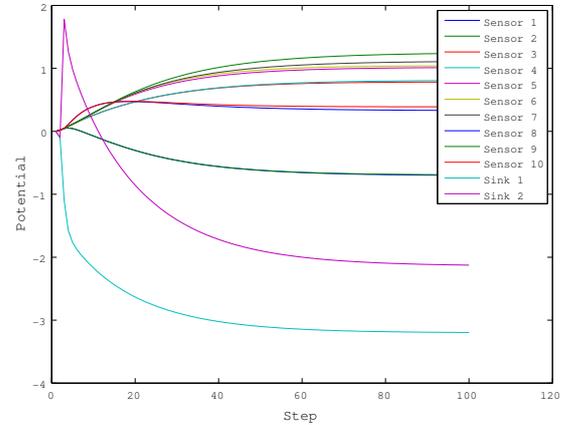


図5 モデル予測制御 ( $r = 0.1$ )

示す。各ノードは隣接ノードのポテンシャルを遅延なしで得ることができ、1 ステップごとに式 (2) に基づいて次時点の自身のポテンシャルを決定する。また、コントローラは遅延なしで全てのノードの情報 (トポロジー、ポテンシャル、フロー量) を得ることができ、1 ステップごとに制御入力  $\mathbf{u}(t)$  を決定してシンクノード 1、2 に対して制御を加える。各センサノードへ流入するフロー量、各シンクノードから流出するフロー量はそれぞれ均等であるものとし、各ノードにおける流入流出量  $f_n(t)$  を並べた行列  $\mathbf{F}^t := [f_1(t) \cdots f_N(t)]^T$  を以下で与える。

$$\mathbf{F}^t = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -5 \ -5]^T$$

図 4、5 に、ポテンシャルの収束について評価した結果を示す。予測を行わない場合、100 ステップ経過した時点でもポテンシャルの収束が見られないのに対し、モデル予測制御を用いた場合にはおよそ 50 ステップで収束しており、提案手法において、ポテンシャルの収束を促進するように予測制御が行われることが確認できた。

##### 4.2 環境変動に対する適応性、ロバスト性

環境変動に対する適応性を評価するため、トラフィック負荷が変化させ、ポテンシャルの収束、シンクノードにおけるデータパケットの到着数について評価を行った。データの転送方式と

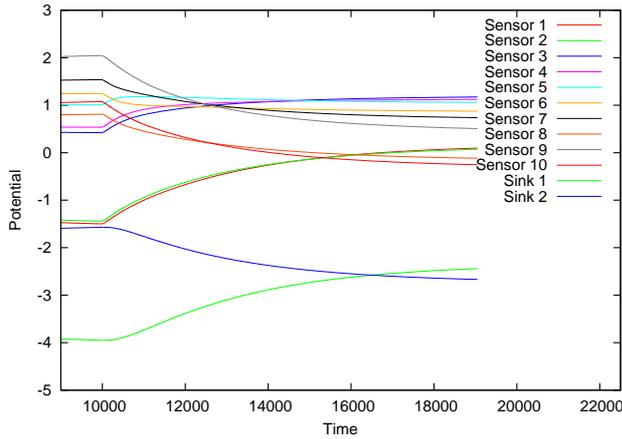


図 6 ポテンシャルの収束 (予測無し)

して、信頼性と省電力性に優れた受信端末駆動型の非同同期欠通信である Intermittent Receiver-driven Data Transmission (IRDT) 方式 [10] を採用している。式 (2) に基づくポテンシャルの更新に必要な隣接ノードの情報については、IRDT が用いる定期的な端末 ID の送信時に自身のポテンシャルを含めて送信することで行う。また、予測制御に必要な情報を収集するため、コントローラは一定時間ごとに情報収集を要求する  $TTL = p$  のパケットを送信し、コントローラが制御可能なノードから  $p$  ホップ以内に存在するノードの情報の収集を行う。各センサノードは、シミュレーション開始から 1,000s の時点でデータパケットの生成を開始し、時刻 10,000s においてトラフィックの負荷が変化する。データパケット生成開始からトラフィック変化直前までの  $F^t$  ( $1,000 \leq t < 10,000$ ) を次式で与える。

$$F^t = [0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ -5 \ -5]^T$$

また、トラフィック変化後の  $F^t$  ( $10,000 \leq t$ ) は次式で与える。

$$F^t = [1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ -5 \ -5]^T$$

センサノード  $n$  ( $n = 1 \sim 10$ ) において、 $f_n(t) = 0.5$  である時点での平均データパケット発生率は  $0.025 \text{ packet/s}$ 、 $f_n(t) = 1.5$  である時点平均データパケット発生率は  $0.075 \text{ packet/s}$  とする。各ノードにおけるポテンシャルの更新間隔、モデル予測制御による制御の間隔はそれぞれ 50s としている。また、情報収集要求パケットはポテンシャル更新に合わせて 50s ごとに送出され、その TTL は  $p = 1$  としている。つまりコントローラは 2 つのシンクノードとその隣接ノードの情報から予測制御を行う。以降では、10 回試行を行った平均を結果として掲載している。

トラフィック負荷の変化前後の各ノードにおけるポテンシャルの時間変化を図 6~8 に示す。この評価では、ポテンシャルの更新タイミングが非同同期で、さらにポテンシャルの更新や制御入力の決定に必要な情報の獲得に通信遅延が生じており、ポテンシャルの挙動は 3.1 節で示したモデルとは完全には一致していない。しかし、得られた結果より、予測制御によってポテンシャルの収束速度が大幅に向上しており、コントローラ設計時には未知の誤差に対してもロバストであることが示された。

図 9~11 に、シンクノード 1、2 それぞれにおける 100s ご

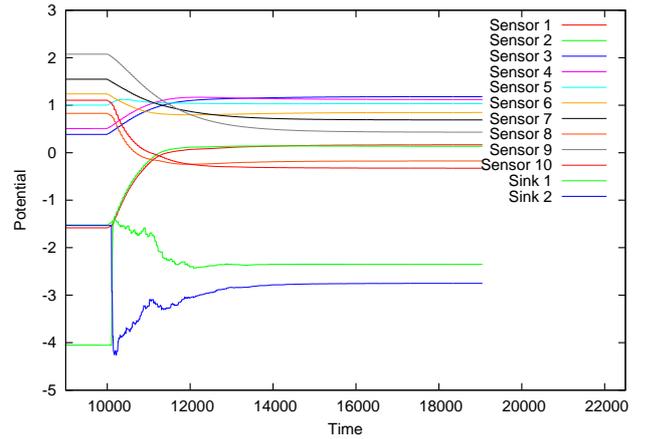


図 7 ポテンシャルの収束 (モデル予測制御、 $r = 0.1$ )

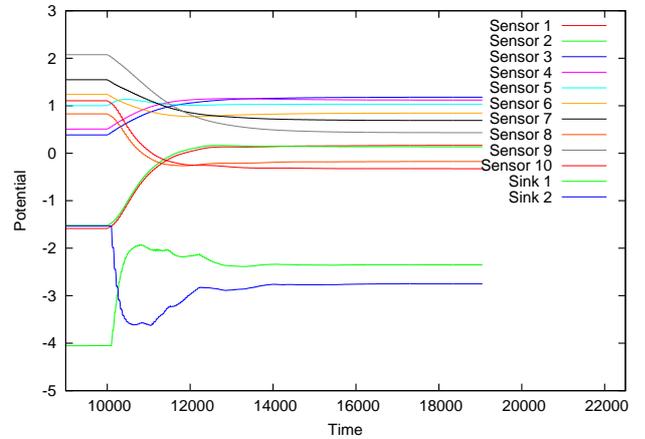


図 8 ポテンシャルの収束 (モデル予測制御、 $r = 10$ )

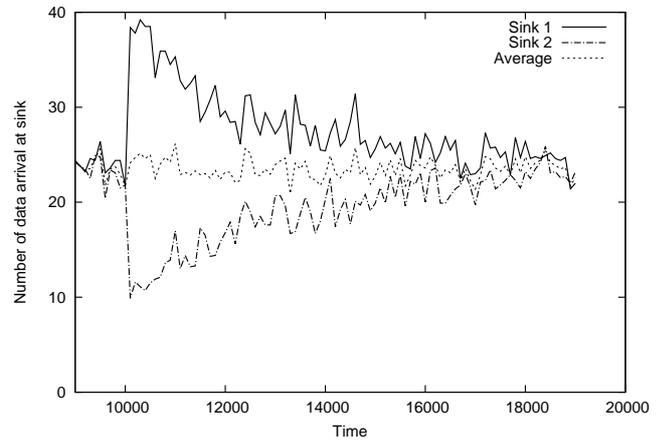


図 9 データパケット到着数 (予測無し)

とのデータ到着数、およびその平均を示している。トラフィック負荷の変化前は各シンクノードにおけるデータパケット到着数がほぼ等しい状態となっており、トラフィック負荷の変化が生じる 10,000s の時点で各シンクノードにおけるデータパケット到着数に偏りが生じ、やがて再び等しい状態へと戻る。トラフィック負荷が変化したあと、各シンクノードにおけるデータパケット到着数が等しい状態へと到達したとき、データパケットの流れがトラフィック負荷の変化に合わせて新しい状態へと収束したと言える。図から、予測制御を行わない場合には、トラフィック

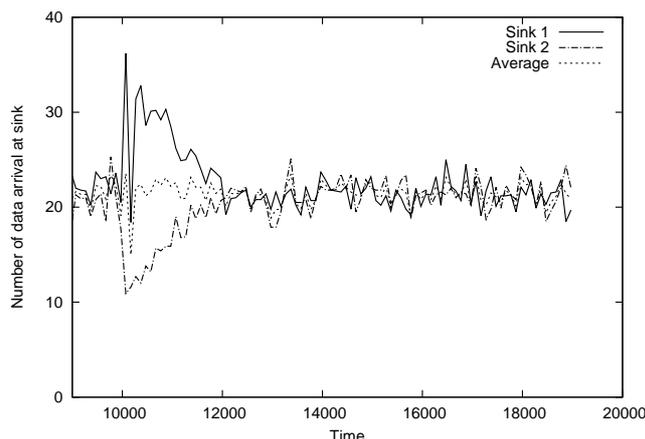


図 10 データパケット到着数 (モデル予測制御、 $r = 0.1$ )

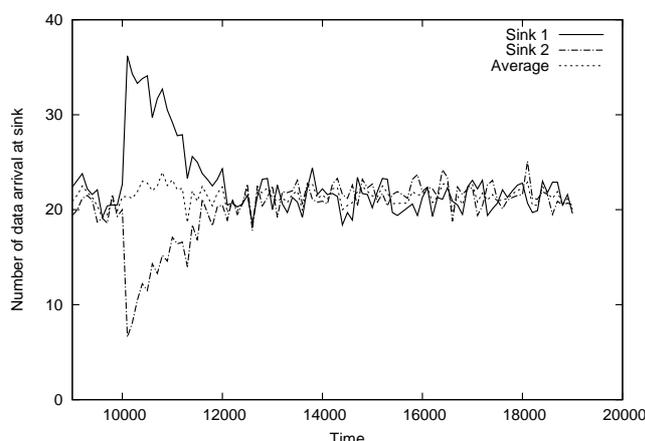


図 11 データパケット到着数 (モデル予測制御、 $r = 10$ )

負荷が変化してからデータパケットの流れが収束するまでにおよそ 8,000s 要しているのに対し、予測制御を導入することで 2,000s 程度に抑えられている。特に、 $r$  の値が小さいほどデータパケットの流れの収束が早くなっている。 $r$  の値が小さいときには式 (8) で表される制御量  $Z(t)$  に含まれる  $ru(t)$  が小さくなり、大きな制御入力が必要となる。その結果、一度のポテンシャル更新におけるポテンシャルの変化量が大きくなり、ポテンシャルが収束値に到達するまでの時間が短縮される。一方で、図 10 より、 $r$  が小さい場合に、トラフィック負荷変化直後にデータパケットの到着数が減少している。これは、ポテンシャルの変化が急激になることにより、一時的にシンクノード以外のノードでポテンシャルが極小となってデータパケットがシンクノードに到達できなくなるためである。 $r$  の値を大きくすることによって、ポテンシャルの急激な変化が抑えられるとともに、データパケットの流れが収束するまでの時間も短縮されており、データ到着数の減少を抑えつつ、環境変化への適応性の向上が達成できることが示された。

一方で、図 9~11 より、予測制御を導入した場合に各シンクノードに到達したデータパケットの平均がわずかに減少していることが確認できる。これは、コントローラが予測制御に必要な情報を収集するために制御パケットを送信しているため、シンクノード付近で輻輳が生じ、データパケットがドロップして

いるためだと考えられる。この問題に対しては、情報収集のための制御パケット送信の頻度を抑える (ポテンシャルの更新回数に対して一度だけ情報を収集する)、予測制御の分散化を行うなどの解決方法が考えられるが、いずれの場合も環境変動に対する適応性とトレードオフが問題となると考えられ、さらなる検討が必要となる。

## 5. おわりに

自己組織型システムでは、個々の構成要素が現在の局所的な情報のみに基づいて自身の行動を決定するため、環境変動に即座に適応していくことができない。そのため、システムの振る舞いを観測・予測し、システムを望ましい方向へ誘導するように制御を加える必要がある。本稿では、無線センサネットワークを対象とした自己組織的な経路制御手法であるポテンシャルを題材として、モデル予測制御を導入した手法を提案した。シミュレーション結果より、モデル予測制御を導入することによって環境変動に対する適応速度が向上することを示した。また、実際の無線センサネットワークを想定した環境下でもポテンシャルの収束性の向上が見られることから、予測制御に用いるモデルと実際のシステムの挙動との相違から生まれる誤差に対してもロバストである。

今後の課題として、情報収集パケット送信の頻度を抑える、あるいは予測制御の分散化を行うことにより、情報収集のためのオーバーヘッドを抑えつつ、どの程度環境変動に対する適応性の向上が達成できるかについて検討を行っていきたいと考えている。

## 文 献

- [1] National Science Foundation (NSF), "NSF future internet architecture project," <http://www.nets-fia.net/> [retrieved: February, 2014], 2010.
- [2] European Commission, "Seventh Framework Programme (FP7)," <http://cordis.europa.eu/fp7/home.en.html> [retrieved: February, 2014], 2006.
- [3] National Institute of Information and Communications Technology (NICT), "New-generation network (NWGN) project," <http://www.nict.go.jp/en/nrh/nwgn/> [retrieved: February, 2014], 2008.
- [4] F. Dressler, Self-organization in sensor and actor networks, Wiley, Jan. 2008.
- [5] C. Müller-Schloer, H. Schmeck, and T. Ungerer, Organic Computing-A Paradigm Shift for Complex Systems, Birkhauser Verlag AG, May 2011.
- [6] M. Prokopenko, "Guided self-organization," HFSP Journal, vol.3, pp.287-289, Oct. 2009.
- [7] D.Q. Mayne, J.B. Rawlings, C.V. Rao, and P.O. Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," Automatica, vol.36, no.6, pp.789-814, Apr. 2000.
- [8] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, "Controlled and self-organized routing for large-scale wireless sensor networks," ACM Transactions on Sensor Networks, vol.10, no.1, pp.13:1-13:27, Nov. 2013.
- [9] A. Sheikhattar and M. Kalantari, "Fast convergence scheme for potential-based routing in wireless sensor networks," Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) IEEE, pp.1980-1985 Apr. 2013.
- [10] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, "Energy-efficient receiver-driven wireless mesh sensor networks," Sensors, vol.11, no.1, pp.111-137, Dec. 2010.