

制御時間スケールに着目した 管理型自己組織化制御に基づくネットワークの設計手法

小南 大智[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科

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

あらまし 大規模複雑化が進む通信ネットワークのために、自己組織化を原理としたネットワーク制御の研究がなされている。自己組織化制御は、システムの構成要素同士の局所的な相互作用に基づく制御方式であるため、高い拡張性、適応性および頑強性を持つ反面、システム全体の管理が非常に困難であるという問題がある。近年この問題を解決するために、自己組織的に動作するシステムの一部を集中型制御を用いて管理することにより、システム全体の管理を実現する、管理型自己組織化制御の研究が進んでいる。しかしながら、様々な応用に関する研究は進んでいるものの、この管理機能の具体的な設計手法については未検討の課題である。本稿では、制御時間スケールに着目して、管理型自己組織化制御に基づくネットワークを設計する方法について提案および評価を行った。計算機によるシミュレーションから、提案した設計指針に従い制御周期を決定することで得られる性能を安定化させられることを明らかにした。
キーワード 大規模ネットワーク、管理型自己組織化制御、制御時間スケール、ネットワーク設計

A Design Approach for Controlled and Self-Organized Networks Focused on Control Timescale

Daichi KOMINAMI[†] and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

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

Abstract Many researches on network control with a design principle of self-organization have been studied for large-scale and complex networks. Since self-organized control is based on local interactions between system elements, it has high scalability, adaptability, and robustness; however, management of the whole system is very difficult. In order to solve this problem, a controlled self-organization scheme has been proposed, which promises desired system behavior by controlling key self-organized nodes. Although there are many practical proposals on the scheme, no design approach for it has ever been investigated. In this paper, we propose and evaluate a design approach for the network based on controlled self-organization, paying attention to the control timescale. Through computer simulations, we show the stability of the proposed design approach.

Key words Large-scale network, controlled self-organization, control timescale, network design

1. ま え が き

今後ますます大規模化、複雑化が考えられる通信ネットワークにおいて、その適切な制御および管理は、非常に重要なが困難な課題となる。ネットワークを構成する端末の種類や数が膨大な数となり、その利用形態や利用環境も様々に変化すると考えられる中で、高い拡張性、適応性、頑強性を有する通信技術として、自己組織化制御に関する研究が注目されている [1]。自己組織化制御では、自身あるいは近接した端末から得られる

局所的な情報に基づいて、個々の端末が局所的に行動決定を行う。この個々の相互作用が組み合わさることで組織化し、システム全体として望ましい機能を発現する。しかしながら、完全に局所情報のみから行動決定を行う自己組織化制御では、そのボトムアップによる設計から以下の問題が生じることが指摘されている [2]。

- ネットワーク全体の管理の困難さ
- 最適な動作保証の困難さ
- 大域的な環境変化への適応速度の遅さ

自己組織化制御を工学の分野に応用するためには、制御によって創発される複雑な機能を管理できることが望ましい。この目的のために、文献 [3] において、Observer/Controller Architecture (OCA) を用いた管理型自己組織化制御 (Controlled self-organization) が提案されている。OCA では、Observer が自己組織化制御に基づくシステムの状態やダイナミクスを観測し、観測した情報を適切な形式に変換して Controller に渡す。Controller は Observer から受け取った情報に基づき、自己組織的に動作しているシステムの動作を制御する。例えば、システムに対する所要要件を達成するために、一部の端末の動作に関わるパラメータを変更したり、動作アルゴリズムを変更する。その変更による結果を再び Observer が観測し、フィードバックを行うことで、システムがより望ましい動作を行うように管理が行われる。

管理型自己組織化制御は大規模かつ複雑なネットワークの実現に向けて非常に重要な考え方であるが、Observer および Controller による管理制御と自己組織的な制御が組み合わされた際にどのような相互作用が生じるかについては検討されていない。特に近年、階層化された通信ネットワークアーキテクチャにおける階層間の相互干渉が問題視されており [4]、このような階層間の相互作用については、十分に調査した上で設計を行う必要がある。大規模複雑なネットワークの安定な設計に関して、文献 [5] では動作時間スケールによって階層化されたネットワークが議論されている。本稿においても制御の時間スケールに着目し、管理型自己組織化制御に基づくネットワークの各階層における制御時間スケールの設計指針を明らかにすることを目的とする。管理型自己組織化制御に基づくシステムの一例として、我々がこれまでに提案してきた、センサーネットワークを対象とした、ポテンシャル場に基づく経路制御手法 [6] を用いることとし、特に各階層における制御周期の時間スケールをどのように決定すべきかを議論する。

階層的に設計されたアーキテクチャーでは各階層の制御時間スケールは大きく異なり、各階層の制御周期は対応すべき事象の時間スケールによって決まる。例えば MAC 層では一対一の通信手順が定められるが、センサーネットワークの場合、多くは数ミリから数十ミリ秒でデータの送受信は終了する。省電力性が求められるセンサーネットワークにおいては、スリープ制御を行う MAC 層のプロトコルの利用が想定されることが多く、当然、送受信に要する時間よりも長いスリープ周期が設定される。一方で各階層では、環境の変動への対応も要求される。より短い周期で生じる事象、例えば短期的な無線チャネル品質の変動への対応は物理層や MAC 層で必要とされ、逆に、端末の移動や故障のようなより長い周期で生じる事象への対応はネットワーク層やトランスポート層で必要とされる。管理型自己組織化制御に基づくネットワークを考えるためには、まずは対応すべき事象を列挙し、その事象にあわせて制御周期を決定する必要がある。その上で、管理制御と自己組織化制御が互いに満たすべき関係性について議論を行う。

以降は、2. において、本稿で対象とする、管理型自己組織化制御を用いたポテンシャル型経路制御手法について述べ、各階

層における制御の概要を説明する。3. で制御時間スケールの設計に関する議論を行い、4. において評価を行う。最後に 5. で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. 各階層における制御の概要

本稿で対象とするポテンシャル場に基づく経路制御手法では、各端末がポテンシャルと呼ばれるスカラー値を所持しており、通信範囲内に存在する端末の中からデータを転送する次ホップの端末を決定する際に、自身と転送先候補のポテンシャルの大小関係を用いる。各端末は、シンク端末からのホップ数や、自己と周囲の残余電力あるいはポテンシャルといった局所情報を元にして、自身のポテンシャルを決定する。このとき、シンク端末からのホップ数が小さいほどにポテンシャルが高い値になるようにすることで、より高いポテンシャルを持つ端末にデータを転送すれば、いずれシンクにデータが届くことが保証される。

このような自己組織的な経路制御では経路の計算に局所情報のみを用いるため、端末の分布密度の差などから生じる大域的な通信負荷の偏りを防ぐことができない。さらに、システムの監視や管理が困難であるという問題もある。そこで我々は、文献 [6] において、シンク端末に Observer の機能を与え、システムの外部に Controller として管理端末を配置することで、これらの問題を解決する Controlled Potential-Based Routing (CPBR) を提案した。CPBR では複数のシンク端末が存在するセンサーネットワークを想定しており、各シンクが観測した情報は、更に上位に存在する計算能力の高い管理端末に集められる。この情報を元にして、管理端末がシンク端末のポテンシャルを変更することで、ネットワーク全体のポテンシャルを制御し、各端末が望ましいポテンシャルを持つように制御を行う。ネットワーク管理者などがこの管理端末に目的関数を与え、管理端末は各シンクに対して、目的関数を満たすようなポテンシャルの値を設定する。本稿では特に MAC 層、ネットワーク層、管理端末による制御を対象として、それぞれの制御時間スケールを議論する。以降ではまず、それぞれの詳細について説明を行う。

2.1 MAC 層におけるスリープ制御

MAC 層では 2 端末間での一対一の通信が行われ、例えばセンサーネットワークにおいては、数十ミリ秒程度の時間を要する。そのため、数十ミリ秒以下の周期で発生する事象に対しては直接対応することが難しい。また、省電力化が望まれるセンサーネットワークでは、MAC 層にはスリープ制御を行う非同期型プロトコルが想定される。2 端末間で通信を行うためには各端末は周期的に無線機を ON にする必要があり、この周期は数十ミリ秒から数秒程度である [7]。送信端末はスリープ状態から起動状態に遷移した端末を検出した時点でその端末と通信を行うかどうかを判断するため、このスリープ制御の周期は次ホップへのデータ転送の最小単位の時間となる。

2.2 ネットワーク層における経路制御

ネットワーク層では、送信元端末と宛先端末間のマルチホップ通信が行われる。前述のとおり、各端末はポテンシャルと呼ばれる値を所持し、その値の大小を基に次ホップの端末を決定

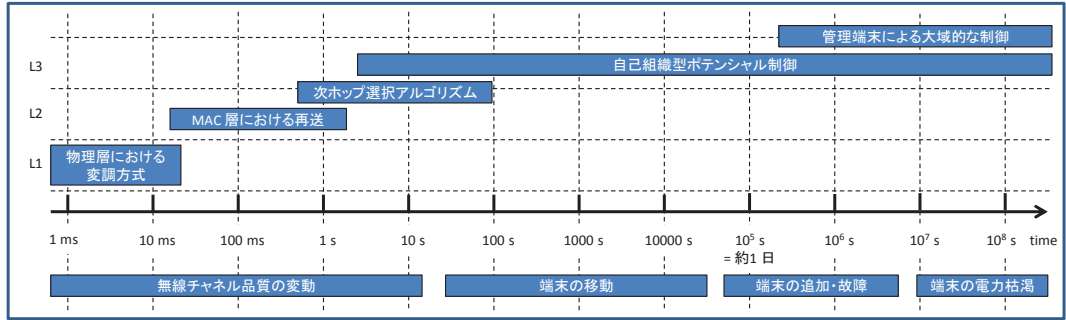


図 1 環境変動の発生周期と制御周期の関係

する。最もポテンシャルが大きい端末を次ホップとすることで最適な経路の選択が行え、また、自身よりもポテンシャルが大きい端末全てを通信候補とすれば、より信頼性の高い通信が行える。この次ホップとの通信が開始されるまでの時間は、MAC層におけるスリープ制御の周期に依存することになる。

$Z(n)$ を端末 n の隣接端末集合とすると、端末 n の時刻 t におけるポテンシャル $\phi(n, t)$ は離散拡散方程式 (1) で決定される。この計算を行うためには周囲の端末の最新のポテンシャルを知る必要があり、各端末は一定の周期ごとに、通信範囲内のすべての端末とポテンシャルの交換を行う。また、正確な経路情報を所持するためには、一定時間以上通信できなくなった端末に関する情報を破棄することも必要である。

$$\phi(n, t+1) = \phi(n, t) + \frac{1}{|Z(n)|} \sum_{k \in Z(n)} \{\phi(k, t) - \phi(n, t)\}. \quad (1)$$

2.3 管理端末による大域制御

管理端末は以下の式で各シンク端末 d の時刻 t でのポテンシャル $\Phi(d, t)$ を決定する。 m は制御の目的となるメトリックであり、 \bar{m} は各シンクから得られた m の平均である。また、 θ は制御による影響の強さを表す定数である。この制御は定期的に行われ、全シンクに一斉に反映される。

$$\Phi(d, t+1) = \Phi(d, t) * \left(1 - \theta \frac{m(d, t) - \bar{m}(t)}{m(t)}\right). \quad (2)$$

3. 制御時間スケールの設計

3.1 環境変動への対応を考慮した制御周期の設計

これまでに述べてきたように、管理型自己組織制御に基づくネットワークの設計を考える際、各階層でどのように環境の変動に対応すべきかを考える必要がある。無線センサーネットワークに生じる環境の変動要因として、無線チャンネル品質の変動、端末の故障や追加、電力枯渇による停止、端末の移動が考えられ、これらが生じる結果、ネットワークトポロジーが変動する。トポロジーの変動の各原因はそれぞれ発生する時間スケールが異なり、どの階層がどの変動に対してどのように適応すべきかを、十分に検討する必要がある。図 1 には、これらの変動の要因が発生するおおよその周期と、それらに対応する各階層の制御をまとめている。

チャンネル品質の変動によりバーストエラーが発生する状況は無線通信において無視できない問題であり、このようなバース

トエラーの発生が自己相似的な特徴を持つことが文献 [8] において述べられている。通信プロトコルが環境変動への対応を行わなければ、データ収集の失敗や収集遅延時間の増加、消費電力の増大などの問題が生じてしまう。100 ms ~ 1,000 ms の周期で生じる無線チャンネル品質の変動に対しては、MAC層における再送が重要であり、より確実にデータを届けるためには再送回数を大きく設定することが必要となる。MAC層において、通信相手にデータを送り終えるまで一定時間データを保持する場合、スリープ制御の周期が短いほど、通信相手を検出できる機会が多く得られる。しかしながら、これよりも短い周期で発生する事象に対しては、MAC層における根本的な対応は難しく、物理層において、無線の変動に強い変調方式を適切に選択する必要がある。一方で、1,000 ms 以上の周期で無線チャンネル品質の変動が生じる場合は、さらに上位の層での対応が必要となる。一時的にある端末との通信が困難な状況に陥った場合、適切な次ホップ端末を選択できるアルゴリズムを利用することで、代替経路や迂回経路の選択が可能となる。この周期はスリープ制御の周期に大きく依存するため、数秒から数十秒の周期で発生する変動への対応が可能となる。

端末の移動、追加や故障が発生する場合には、より新しい経路情報が必要となる。よって、経路情報の更新周期、すなわちポテンシャルの通知周期が短いほど適切な経路の選択が可能となる。また、これらの事象によって生じる、長期的かつ大域的なネットワークの変動に関しては、局所性に基づく自己組織化制御では対応できず、システムに所望される性能が得られない可能性がある。例えば、端末の追加や故障により端末の分布に大きな偏りが生じたり、ネットワークの中に障害物が発生したりすることでネットワークの一部が分断されるような事象に対しては、管理端末による大域的な制御が必要となる。

3.2 階層間の相互作用を考慮した制御周期の検討

レイヤ間で相互作用の影響が表れるケースとして、特に自己組織化制御の周期と管理端末による制御の周期に着目する。自己組織化制御の収束は一般に遅く、十分に収束するまでに管理端末による新たな制御が与えられた場合には、管理によって目指す状態に到達するまでに何度も振動を繰り返す可能性がある。

シンク端末から h ホップの端末に、シンク端末のポテンシャルの変化の影響が表れるのは、自己組織化制御の周期を T_i とすると、シンク端末のポテンシャルが変化してから $h \times T_i$ 経過後

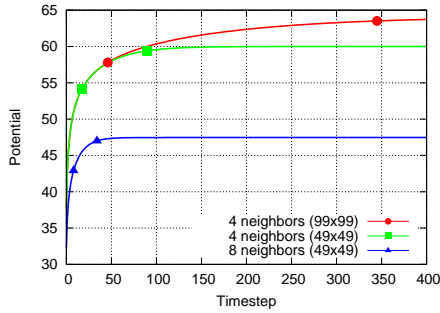


図 2 グリッドネットワークにおけるポテンシャルの収束

である。そこからポテンシャルが $c\%$ 収束するまで S_c 周期必要だとすると、外部からの管理が効果を表すのは、 $(S_c + h) \times T_i$ 経過後である。すなわち、管理制御の周期 T_o に関しては少なくとも、 $T_o \geq (T_c + h) \times T_i$ の関係が必要である。この収束までの時間を議論した上で、 T_o の設定によってシステムの挙動にどのような違いが出るかを調べる。

3.2.1 拡散方程式の解析解

自己組織型のルーティングとして、ポテンシャルルーティングを対象としており、ポテンシャル場の構築については、粒子の拡散する様子を表現した拡散方程式を用いている。位置 x 、時刻 t におけるポテンシャル $\phi(x, t)$ は、拡散速度を表す定数 D を用いた以下の拡散方程式 (3) によって表される。

$$\frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} = D \Delta \phi(x, t), \quad (3)$$

ここで、簡単のために正方領域ではなく円形領域を考えることとする。二次元の直交座標 (x, y) から極座標 (r, θ) に座標変換を行えば、ある点からのポテンシャルの単純な拡散を考える場合には θ への依存がないため r と t の式が得られる。式 (4) が座標変換後の式である。

$$\frac{\partial \phi(r, t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \phi(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi(r, t)}{\partial r} \right) \quad (4)$$

この式は変数分離法などを用いることで容易に解が得られ、式 (5) で表される、指数関数を重ねあわせた解を持つ。ここで、 A_n, q_n は定数 n によって決定される項、 $J(r, n)$ は距離 (および n) によって決定される項であり、いずれもベッセル関数が関与する。 $C(r)$ は一般的な対数関数の形をもつ項である。

$$\phi(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{-q_n^2 D t} J(r, n) + C(r). \quad (5)$$

ポテンシャルの収束の時間依存性に注目すると、 t は指数部分のみに存在し、ポテンシャルの収束はポテンシャルの拡散源からの距離に依存しないことが分かる。文献 [9] には、式 (3) を中心差分をとることで離散化した式の解析解について言及しており、ここでも、拡散方程式の離散解が時間ステップのみに依存して指数関数的に収束することが示されている。ある点におけるポテンシャルが指数関数の重ねあわせで表現されるとき、収束値との差が元の $\frac{1}{e}$ 倍になるまでの時間を時定数の近似値と考えることができる。

図 2 には、グリッド状に端末を配置した場合の、ポテンシ

ャル拡散源に隣接する端末のポテンシャルを示している。グリッドのサイズは図の判例に示したように 99×99 と 49×49 の二通りとしており、いずれも中央にポテンシャルの拡散源となる端末を配置している。各端末は同じ周期で通信範囲内にある他の端末とポテンシャルの交換を行い、その後式 (1) に従い自身のポテンシャルを更新する。この一周期が横軸のタイムステップに相当し、各端末が非同期的に最も近い 4 端末と通信する場合と、8 端末と通信する場合について図に示している。図における記号 (丸、四角、三角) は、それぞれの結果について、初期値からの 90% および 99% の収束を示している。これらから、ネットワークの規模が小さくなるほど、また、通信相手が多くなるほどに収束速度が速くなることが分かる。初期状態から 90% に収束するまでの時間は、99% に収束するまでの時間のおよそ 5~7 倍程度であり、 $1 - \frac{1}{e^5}$ が 0.993 程度であることから、時定数が得られれば、収束時間の推定に用いることは十分に可能である。しかしながら、実際のネットワークを考える際は、グリッドネットワークのような規則的な配置にはならず、式 (5) のみからでは、時定数が得られない。式 (1) のような、周囲の平均値を自身の次時点でのポテンシャルに設定する単純な手法においても、解析的な収束時間の予測は困難といえ、実際の設計に際しては、計算機によるシミュレーションなどからおよその時定数を求める必要があるといえる。

4. 評価結果

本章では、周期的に発生する環境変動への対応および階層間の相互作用に関する評価を行う。評価には、C++ で作成したイベントドリブン型の計算機シミュレーションを用いる。ネットワークモデルとして 500 m 四方の正方形領域にランダムに配置した 100 個のセンサー端末および、領域の隅に設置された 1 台のシンク端末を考える。各センサー端末からは 500 s ごとに 1 個のデータが発生し、マルチホップでシンク端末に届けられる。また、干渉モデルとしてディスクモデルを用いており、予め定めた通信範囲の内側に存在する端末同士は、メッセージの衝突、チャネル品質の悪化が発生しない限り通信が成功する。チャネル品質の変動については、広く知られているギルバートモデル [10] を、端末の移動に関してはランダムウェイポイントモデルを用いている。

4.1 環境変動を考慮した設計に関する評価

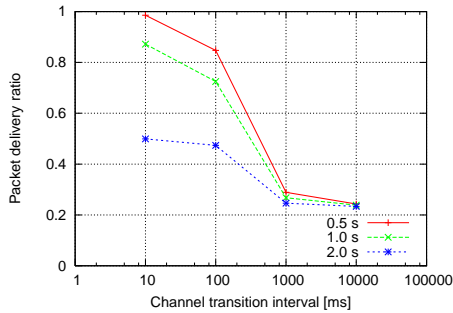
環境変動に対して各層が対応できているかどうかを評価するために、ここではパケット到達率について調べる。シミュレーションにおける主なパラメータは表 1 に示すとおりである。

4.1.1 チャネル品質の変動

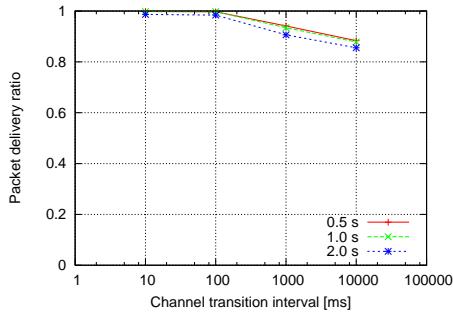
シミュレーションにおいては、チャネル品質の変動により各端末間のリンクにおいてパーストエラーが発生する状況を想定する。このモデルとしてギルバートモデルを採用しており、各リンクはそれぞれ“良”あるいは“不良”を状態として持つ。リンク品質が良状態のときには、メッセージ衝突が起こらない限りメッセージは正常に届けることができ、逆にリンク品質が不良状態のときには、受信メッセージに必ずビットエラーが生じて破棄されることとする。この状態は前述の周期ごとに一定確

表 1 シミュレーションパラメータと設定値

パラメータ	設定値
通信範囲	100 m
最大中継回数	32
MAC 層におけるデータ所持時間	5 s
リンク品質遷移確率(良 不良)	30%
リンク品質遷移確率(不良 良)	70%
端末停止時間	250–350 s
端末移動速度	4–6 km/h
ポテンシャル記憶期間	250 s
ポテンシャル通知周期	50 s



(a) 次ホップ候補が単一の場合



(b) 次ホップ候補が複数の場合

図 3 チャンネル品質の変動に対するパケット到達率

率でいずれかの状態に遷移する。シミュレーションにおける遷移確率は表 1 に示したとおりである。

図 3(a) には、MAC 層におけるスリープ制御の周期を 0.5 s、1.0 s、2.0 s にそれぞれ設定した時の、チャンネル品質の変動周期に対するパケット到達率を示している。10 ms、100 ms の周期でチャンネル品質の変動が生じる場合は、より短いスリープ制御周期が対応のために必要であることが分かる。前述のとおり、スリープ制御周期が短いほど MAC 層での再送機会が増えるため、下位層での対応がなくとも、ある程度は短い周期の変動を吸収することができている。一方で、1,000 ms 以上の周期で変動が発生する場合には、性能が大きく劣化しており、この周期以上では通信相手とのリンクが切断された場合に MAC 層の再送で対応できないことが分かる。

図 3(b) は、次ホップ選択のアルゴリズムを変更し、次ホップの候補を複数用意した場合の結果である。次ホップの候補としては、通信範囲内に存在するノードのうち、自身よりもポテンシャルが大きいノードとしている。複数の通信候補を用意することで、一時的なリンクの切断による影響を抑制できること

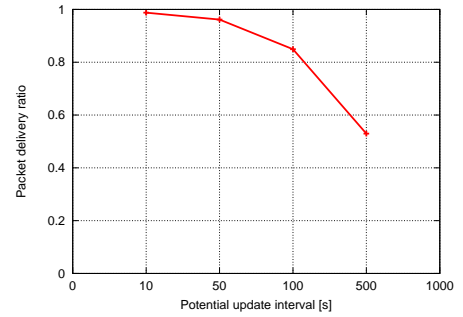


図 4 端末の移動に対するパケット到達率

が分かる。しかしながら、10 s 以上の周期で変動が発生する際にはデータの到達率が低下しており、より上位の層で対応する必要がある。

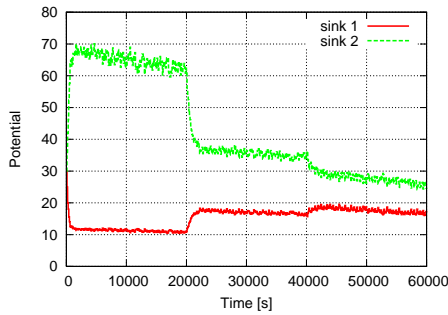
4.1.2 端末の移動

移動モデルとしてランダムウェイポイントを用いるときの、ポテンシャル更新周期に対するデータの到達率について評価を行う。各センサー端末はネットワーク内のランダムな座標を目的地として、ランダムに移動速度を決めた後、目的地まで同じ速度のまま移動する。目的地に到着した後は一定時間その場で待機し、再び新たに目的地を決めて同様の移動を行う。シンク端末の位置はネットワークの中央であり、移動はしないものとしている。シミュレーションにおけるパラメータは表 1 に示すとおりである。ここではポテンシャルの通知周期と更新周期を等しく設定しており、経路情報の更新周期以外の影響を除くため、最大中継回数は超過がないよう十分大きい値としている。

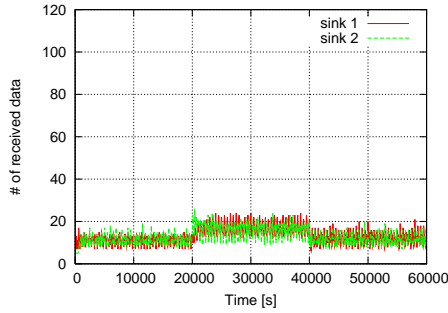
図 4 より、ポテンシャル更新周期が大きくなるほど、データの到達率が減少していることが分かる。ポテンシャルの更新周期が大きいほどに、データ送信時に端末が持つポテンシャル情報が不正確になる可能性が高くなり、その結果、送信先が存在せずにデータを破棄する、あるいはシンク端末からより遠ざかる端末に送信するためである。ポテンシャル更新周期が T_i [s] の場合に、ある時点で端末にデータが発生したとすると、最終更新からの経過時間は平均で $\frac{1}{2}T_i$ となる。時速 4–6 km の移動を想定しているため、ポテンシャル更新時点より $0.55T_i - 0.83T_i$ [m] 移動していることになる。端末数が 100、500 m 四方の領域を想定しているため、最も近い端末との平均距離はおおよそ 50 m となるから、10 s オーダーの周期で接続関係が切り替わることになる。そのため更新周期はそれよりも短い値が望ましいと考えられ、シミュレーションの結果からも 10 s に設定した場合には 95%以上の到達率が得られている。

4.2 階層間の相互作用を考慮した設計に関する評価

図 5 および 6 では、2 台のシンク端末を設置したネットワークに、100 個のセンサー端末をランダムに配置した際の、シンク端末のポテンシャル(図 5(a)、6(a)) および管理周期ごとに受信したデータ個数(図 5(b)、6(b)) の変化を示している。シミュレーションにおいて、時刻 20,000 s に、50 個のセンサー端末がランダムな位置に追加され、時刻 40,000 s には、ランダムに選ばれた 50 個のセンサーが故障する。ポテンシャルの通知周期は表 1 に示した通り 50 s であり、予備実験より 500 s 経

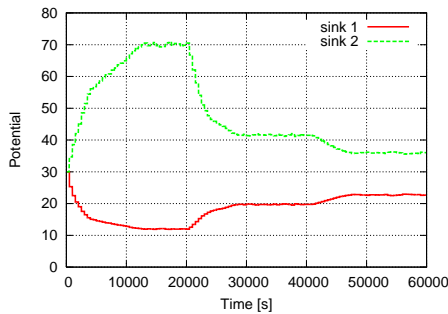


(a) シンク端末のポテンシャルの変化

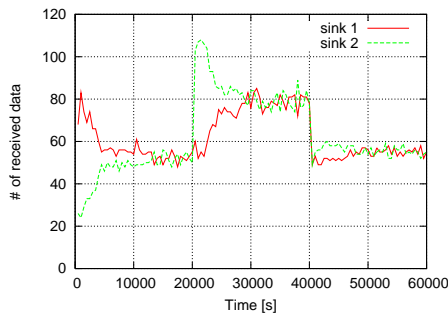


(b) シンク端末の受信データ個数

図 5 2 シンクの場合のポテンシャル制御 (管理周期 100 s)



(a) シンク端末のポテンシャルの変化



(b) シンク端末の受信データ個数

図 6 2 シンクの場合のポテンシャル制御 (管理周期 500 s)

過後には、各端末のポテンシャルは 99%程度まで収束することが分かっている。

2 台のシンク端末のポテンシャルは、一定周期ごとに、互いに受信するデータの個数が等しくなるように式 (2) によって制御される。シミュレーション開始時点においては、シンク 1 に届くデータの数が多いため、管理端末はシンク 1 のポテンシャルを低下させてデータを届きにくくする。図 5 ではシミュ

レーション開始直後に、図 6 ではシミュレーション開始から 12,000 s 経過後に、受信したデータ個数の均等化の動きが収束している。管理周期が 500 s の場合のほうが収束までに要する時間が長い、収束後は各シンク端末に届くデータの数は大きく変化していない。一方で、管理周期が 100 s の場合は、受信データ個数が振動を続けている。

端末の追加が行われる時刻 20,000 s の直後は、各シンク端末に届くデータの個数に大きく変化が起こるが、その後はシミュレーション開始直後同様にポテンシャルが収束していることが分かる。時刻 40,000 s に端末の故障が発生した直後、一時的に両方のシンク端末に届くデータの個数が減少する。すべての端末において、自身の隣接端末のポテンシャルを記憶したテーブルから故障した端末のポテンシャルが削除されるまでに、表 1 に示したポテンシャル記憶期間に依存した時間が必要となるためである。故障後も追加後と同様に収束していることがわかる。

以上の結果より、管理制御が端末の追加および故障後も正常に動作することを確認した。制御の安定性に関しては、十分に収束した後に管理制御を行うように設計することで、管理周期ごとの結果が安定する。一方で、図 5(b) の結果も、500 s ごとに受信したデータの個数を考えれば、図 6(b) と同様のものとなり、管理周期ごとの安定性よりも、より早い適応性が望まれる場合には有効であるといえる。

5. まとめ

本稿では、大規模複雑化が進むネットワークのために、管理型自己組織化制御に基づくネットワークの設計指針について議論を行った。センサーネットワークを対象とした、ポテンシャル場に基づく経路制御手法を一例として、ネットワークに影響を与える環境変動を、発生する時間スケールに着目して列挙し、それぞれに対してシステムのどの層が対応すべきかを整理した。その上で、各層の制御時間スケールを適切に定めることで、変動への対応が可能となることを示した。また、自己組織的に経路情報の制御を行う周期と、管理端末による自己組織化の管理を行う周期との相互作用についても解析的に議論を行い、より安定した管理端末による制御を行うための指針を提案し、評価した。今後の課題としては、管理端末による制御時間スケールの動的な変更、管理制御の収束速度の向上がある。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員奨励金によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] F. Dressler, Self-Organization in Sensor and Actor Networks, Wiley, 2007.
- [2] C. Müller-Schloer, H. Schmeck, and T. Ungerer, Organic Computing—A Paradigm Shift for Complex Systems, Birkhäuser, 2011.
- [3] J. Branke, M. Mnif, C. Müller-Schloer, H. Prothmann, U. Richter, F. Rochner, and H. Schmeck, “Organic Computing—Addressing Complexity by Controlled Self-Organization,” Second International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation (ISoLA), pp.185–191, 2006.
- [4] AKARI Project, “New generation network architecture AKARI conceptual design (ver2.0 in Japanese and ver1.1

- in English)". <http://akari-project.nict.go.jp/eng/overview.htm>.
- [5] 会田雅樹, 高野知佐, 作元雄輔, “動作時間スケールの階層構造を基盤とするネットワークアーキテクチャ” 電子情報通信学会誌, vol.94, no.5, pp.401–406, 2011.
- [6] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, “Controlled Potential-based Routing for Large-Scale Wireless Sensor Networks,” Proceedings of The 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), pp.187–195, Oct. 2011.
- [7] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), pp.95–107, Nov. 2004.
- [8] T. Rusak and P. Levis, “Burstiness and Scaling in the Structure of Low-Power Wireless Links,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol.13, no.1, pp.60–64, June 2009.
- [9] A. Cunha, R. Teixeira, and L. Velho, “Discrete Scale Spaces via Heat Equation,” Proceedings of XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing IEEE, pp.68–75 Oct. 2001.
- [10] E.N. Gilbert and et al, “Capacity of a Burst-Noise Channel,” Bell. System Technical Journal, vol.39, no.9, pp.1253–1265, Sept. 1960.