

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18700068
 研究課題名（和文） 免疫系の戦略に学んだアドホックな無線センサネットワークの研究
 研究課題名（英文） Ad-hoc Wireless Sensor Network Based on Strategies of Biological Immune System
 研究代表者
 渡邊 裕司（WATANABE YUJI）
 名古屋市立大学・大学院システム自然科学研究科・准教授
 研究者番号：60314100

研究成果の概要：本研究では、無線センサネットワークにおいて移動型センサノード導入のメリットを探る。そのために移動ノードの割合や移動戦略を変えながら、免疫型相互診断モデルによる異常ノードの検出性能を調べた。その結果、異方向の直線移動戦略が最良の検出率を示し、移動のメリットを確認した。また、この戦略の移動割合にしきい値が存在することが分かった。さらに、複雑ネットワーク上で免疫型診断モデルを実行し、ノード数が増加しても検出率は変わらないことを確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,300,000	0	1,300,000
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	330,000	3,630,000

研究分野：知能情報学、情報ネットワーク

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：免疫型システム、センサネットワーク、アドホックネットワーク、相互診断モデル、移動型センサ、無線センサ、複雑ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

(1) 実世界の様々な物にセンサや無線通信機能を埋め込んだユビキタス社会において、多くのセンサデータの収集・統合を効率的に実現する技術である「センサネットワーク」に関して、センサデバイスの小型化、多機能化（無線化）廉価化に伴い、近年研究が盛んに行われている。その中でも「移動型センサネットワーク」の研究がこの数年注目を集めている。「移動型センサネットワーク」に

関する研究は、2003 年の Pan らによる省電力のためのトポロジ最適化の研究を始めとして、センサネットワークとロボティクスの融合を目指してこの数年に始まったばかりである。そのため研究成果はまだ乏しく、ユビキタス社会の拡大に伴い、本研究課題も含めて活発な研究展開が必要である。

(2) センサネットワークの研究分野とは別に、移動通信分野において「モバイルアドホ

ックネットワーク」の研究が長年行われている。基地局が存在しない環境で、移動ノード同士の無線を用いたマルチホップ通信により場当たりのネットワークを形成し、離れたノード間での通信を可能にする。この分野では膨大な数の経路制御プロトコル等が提案されており、移動型センサ導入の参考になりうる。しかし、センサネットワークでは、アドホックネットワークほど移動の必要性はなく、中継ノードでのセンサデータの融合など新たな枠組みも必要となる。また要求性能としてスループットや遅延の代わりに省電力に重点が置かれる。そのためセンサネットワーク独自の新たな設計手法が必要とされており、免疫的観点の本研究がブレイクスルーを提供すると期待される。

(3) 本研究者はこれまで「免疫型相互診断モデルを用いたセキュリティ」に携わってきた。この研究では有線ネットワーク上でのコンピュータセキュリティの問題に対して、移動するソフトウェアエージェントの導入を試みた。その結果、静止エージェントだけの場合に比べて、移動エージェントを用いた方が異常の検出精度が向上することを確認した。アドホックな無線センサネットワークにおいても「移動のメリットが存在する」という知見が確認されると示唆される。

2. 研究の目的

「移動型センサネットワーク」の研究において、移動による電力消費という大きなデメリットに対して、メリットがどれほどあるかはまだ明確ではない。

一方、生物の免疫系の分類として「体液性免疫系」と「粘膜免疫系」がある。前者ではリンパ球などの免疫細胞が体内を循環しながら異物を排除する。後者では口腔、呼吸器官、消化器官など外界と接する部分に免疫細胞が常駐して生体を防御する。つまり移動系と静止系であり、これらの構成割合は2 : 8であると言われている。また免疫系には種類の異なる細胞間での巧みな相互作用がある。

本研究では、上記の免疫系の戦略に着目し、移動型センサを含むアドホックな無線センサネットワークに対して、移動ノードを導入するメリットを探る。具体的には以下の点を明らかにする。

- 静止ノードと移動ノードの構成割合を変えたとき、システムの性能(検出精度、コスト、耐故障性)はどのように変化するか？
- 性能の改善のために静止ノードと移動ノードをどのように連携させればよいか？
- 性能の改善は、環境の性質(規模や外乱の有無など)、各種センサの特性(検出

や通信能力など)、移動戦略(巡回やランダム移動など)にどれほど依存するか？

また本研究の副次的な目的として、生物の免疫系がそのような戦略に至った必然性をシステム論的に解明することも含まれる。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、無線通信と相互診断機能を持つ複数のセンサノードを用意する。そして、移動型ノードの割合や移動戦略を変えながら、免疫型相互診断モデルによる異常ノードの検出性能を調べることにより、移動ノードを導入するメリットを探る。また、実世界のネットワークの特徴をよりうまく説明できる複雑ネットワークモデル上でも免疫型相互診断モデルを実行し、ノード数やリンク数を変えたときの診断性能への影響を調査する。以下では、「センサネットワークシミュレータと移動戦略」「免疫型相互診断モデル」「複雑ネットワークモデル」について説明する。

(2) 本研究で用いたセンサネットワークシミュレータ及び移動型ノードの移動戦略について説明する。

図1に示す単純な無線センサネットワークシミュレータを用いる。この環境は、周期的境界条件を持つ空間サイズ $S \times S$ の2次元格子空間である。この空間内には N 個のセンサノードが存在し、それぞれは静止型正常ノード、移動型正常ノード、静止型異常ノード、移動型異常ノードの4種類に分類される。移動型ノードはある方向に1ステップにつき1移動できるとする。

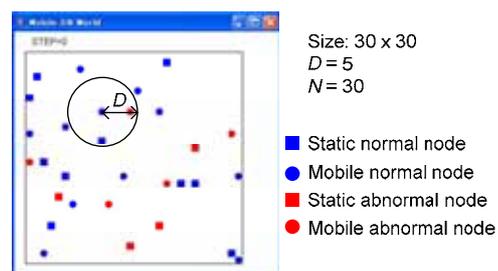


図1 無線センサネットワークシミュレータ

各ノードは「正常」か「異常」のどちらかの状態を持つとする。各ノードは自分自身で自分の「異常」を判別できず、通信半径 D 内の他ノードとの比較を通して検知できるとする。診断モデルの目標は、ノード間の相互作用によってすべての異常ノードを検出することである。シミュレーションでは、従来研究も参考にして異常ノード数は $0.3N$ として、診断モデルによって検出された異常ノード

ドの割合を表す「検出率」を測定する。そして、初期配置の異なる 1000 環境に対して「平均検出率」を求める。

すべてが静止型ノード場合には通信半径 D 内の相互診断する相手ノードが変わらない。一方、移動型ノードを導入すれば診断ノードが変化し、より正確な診断が期待される。しかし、移動ノードにはハードウェアとソフトウェアの両面から新たなメカニズムを必要とする。ハードウェアの観点からは、車輪や脚といった移動装置だけでなく移動のためのエネルギーも必要とする。そのため、移動型ノードの個数はできるだけ少ない方が好ましい。一方、ソフトウェアの観点からは、移動戦略や衝突回避戦略が必要となる。学習や協調行動を実現するより複雑なプログラムを備えることも可能であるが、できるだけ単純な戦略を使って良い検出率を得られることが望まれる。

そこで本研究では、移動型ノードの割合や移動戦略を変えながら検出率を調べる。図 2 に示す単純な移動戦略を用いる。戦略 1 はランダムウォークであり、それ以外は直線運動である。戦略 2 はノードの移動方向 θ がランダムであり、戦略 3 では同方向、戦略 3-1 と 3-2 ではいくつかの方向に割り当てる。

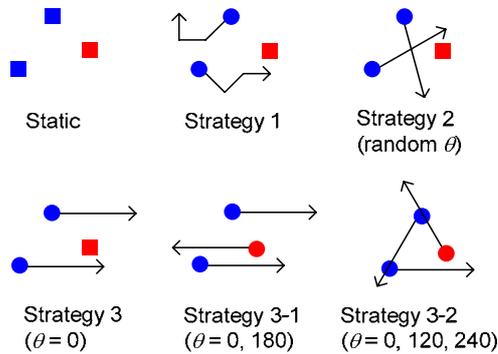


図 2 相互診断センサノードの移動戦略

(3) 免疫型診断モデルは、免疫系の B 細胞間の相互作用を説明した「イディオタイプネットワーク仮説」から着想を得て、石田によって提案された自律分散診断モデルである。この診断モデルでは、相互にテストし合うノードからなるシステムに対して、そのテスト結果ならびにノードの活性・非活性をもとに、ダイナミカルモデルによって各ノードの正常・異常を判定する。

まず各ノードに状態変数として「信用度 R_i 」を割り当て、ステップ t での信用度を以下の式に従って更新する。

$$\frac{dr_i(t)}{dt} = \sum_j T_{ji} R_j + \sum_j T_{ij} R_j - \frac{1}{2} \sum_{j \in (k: T_{ik} \neq 0)} (T_{ij} + 1) \quad (1)$$

$$R_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(-r_i(t))} \quad (2)$$

ここで、式(2)に示すシグモイド関数により媒介変数 $r_i \in (-\infty, \infty)$ を正規化することで信用度 $R_i \in [0, 1]$ が得られる。また式(1)における T_{ij} は、以下のように検査ノード i から被検査ノード j へのテスト結果を表す。

$$T_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ノード } i \text{ と } j \text{ の状態が同じ} \\ -1 & \text{ノード } i \text{ と } j \text{ の状態が異なる} \\ 0 & \text{ノード } i \text{ と } j \text{ の間で検査がない} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)の右辺の第 1 項は、ノード i が他からの評価を総合している項であり、テスト結果 T_{ji} に相手の信用度 R_j を重みづけする。免疫型診断モデルの特徴の 1 つは、この信用度の重みづけ、つまり信用度できるノードのみが相互診断に関与することにある。言い換えれば、もしノード i が信用度の高い活性化ノード j と同じ状態 ($T_{ji}=1$) であれば、その活性状態が伝播してノード i の信用度も高く維持されることを意味する。一方、右辺第 2、3 項はノード i が他を評価することにより、他から反射的に評価されているものを総合している項である。これは「反射効果」と呼ばれ、免疫型診断モデルの別の特徴である。この効果は、ある人が信用の高い人に対してうそつきだということ、逆にその人自身の信用が低く評価されてしまうことに相当する。

全ノードの信用度の初期値 $R_i(0)$ は 1 として、シミュレーション開始時に診断モデルがすべてのノードを正常とみなすこととする。そして、信用度がしきい値 0.5 未満となったノードを「異常」として検出する。そのため、すべての異常ノードの信用度をしきい値未満まで減らすことが診断モデルの目的となる。従来研究より免疫型診断モデルの信用度は 10 ステップほどで収束することが確認されているため、20 ステップ後の検出率を測定する。

(4) 「スモールワールドネットワーク」や「スケールフリーネットワーク」に代表される複雑ネットワークモデルは、古典的なネットワークモデルと比べて、現実に多数存在するネットワークの特徴をうまく説明できる。免疫型診断モデルをより多くの現実ネットワークの診断に応用するために、複雑ネットワーク上で検出性能を調べる。以下では「スモールワールドネットワーク」と「スケールフリーネットワーク」の構築手順について説明する。

現実の多くのネットワークは、正則グラ

フとランダムグラフの間にあるといわれる。規則さと乱雑さの中間に位置するネットワークを生成する手法として、ランダムなつながり替え処理が Watts と Strogatz によって提案された。このつながり替え処理は、ノード数とリンク数を変更することなく、以下の手順で行われる。

1. N 個のノードをリング状に置き、各ノードを左隣 $k/2$ (k は偶数) 個までと右隣 $k/2$ 個までのノードとリンクする。各ノードのリンク数は k であり、ネットワーク内の総リンク数は $Nk/2$ となる。
2. ノードを1つ選び、その右隣側の $k/2$ 個のリンクをそれぞれ確率 p_r でつながり替える。新しいつながり先のノードは、(1) 自ノード、(2) 左右の近隣 $k/2$ 個以内のノード、(3) すでにリンクが存在するノードを除いて、ネットワーク内からランダムに決められる。
3. 手順2のノードの選択を時計回りで全ノードに対して行う。つまり全リンクに対してつながり替えるかどうかを試みられる。実際につながり替えられるリンクの総数は $p_r Nk/2$ となる。

つながり替え確率 p_r を変更することによって、正則なリング格子 ($p_r = 0$) とランダムネットワーク ($p_r = 1$) の間で異なる乱雑さを持つネットワークを構築できる。Watts らが唱える「スモールワールドネットワーク」もこのつながり替え処理によって現れる。

スケールフリーネットワークに関する研究は、Barabasi らによって始められた。まず自然界で観測される多数のネットワークが、その接続分布においてスケールフリーなべき乗則に従うことを明らかにした。そして、そのような特性を生み出すために必要な2つの一般的なメカニズムとして、「成長」と「優先的選択」を提唱している。このメカニズムに基づく様々なスケールフリーネットワークモデルが提案されているが、本研究では Barabasi と Albert によって提示されたオリジナルなスケールフリーネットワーク(BAモデル)を使用する。その構築手順は以下のとおりである。

1. m_0 個のノードが相互結合した小さなサイズの完全グラフを作成する。
2. 各タイムステップで m ($m < m_0$) 個のリンクを持つ新しいノードを追加する。その新しいノードは、以下の確率でノード i と結合する。

$$P(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$$

ここで k_i はノード i がすでに持っているリンク数を表す。

3. 総ノード数が N になるまで手順2を繰り返す。

返す。

4. 研究成果

(1) 全センサノードを静止型ノードとした予備実験では、空間の大きさ S 、通信半径 D 、ノード数 N を変化させて検出率を調べた。その結果、 N と D が増え、 S が減るにつれて検出率は向上した。これは、式(1)に和の計算があり通信領域内のノード数が多くなれば精度が良くなるためであり、予想通りの結果である。

次に、環境パラメータの S 、 D 、 N を固定して、移動型ノードの割合や移動戦略を変えながら検出率を調べた。図3に移動型ノードの割合に対する各戦略の検出率を示す。静止ノードだけの場合の検出率は0.724であり、ノードの移動により検出率の向上がみられる。しかし戦略1のランダムウォークでは検出率があまり向上しない。その理由として、移動ノードが初期位置付近に留まるためである。また戦略3において移動割合が1のときに性能が悪くなるのは、全ノードが同方向に移動することでノード間の関係が変化しないためである。戦略2と戦略3-2の結果より初期方向 θ の割り当てにはランダムさは必要でないことが分かった。

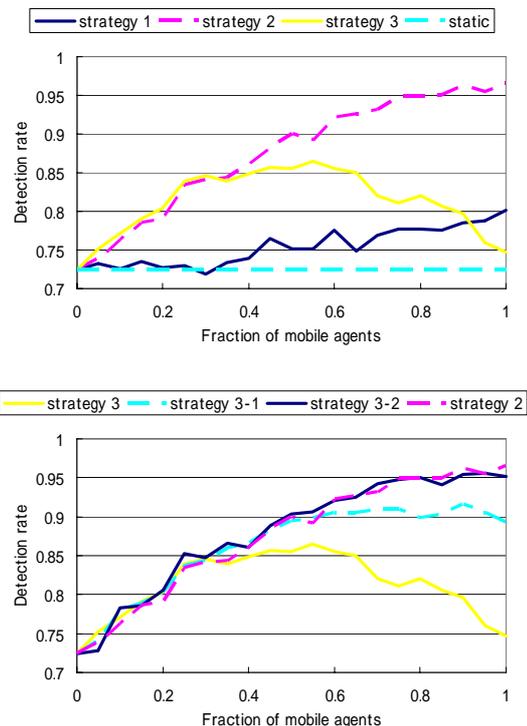


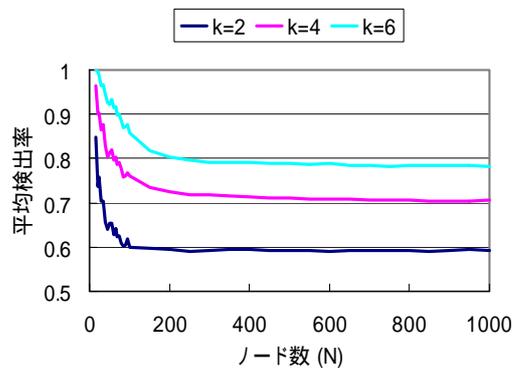
図3 移動型ノードの割合に対する各戦略の検出率 ($S=30$ 、 $D=5$ 、 $N=20$ の場合)

(2) スモールワールドネットワークとスケールフリーネットワークそれぞれに対して免疫型診断モデルによる異常ノードの検出

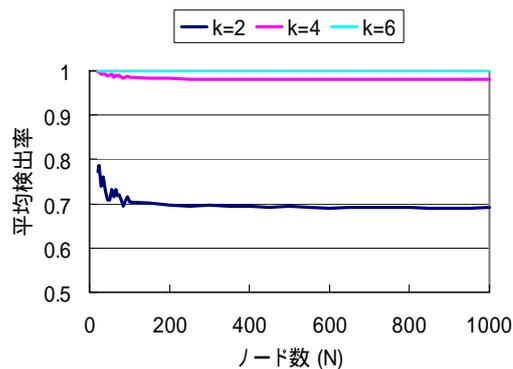
を行った。

スモールワールドネットワークでは、つなぎ替え確率 p_r によって正則なリング格子 ($p_r = 0$) とランダムネットワーク ($p_r = 1$) の間で異なる乱雑さを持つネットワークを構築できる。また、免疫型診断モデルでは式(1)に和の計算がありリンク数 k が多くなれば精度が良くなる。そこで小さな k に対して両極端のネットワークつまり正則格子とランダムネットワークに対して診断を実行した。

その結果、図4に示すように、検出率はノード数 N の増加とともに減少するものの一定値に落ち着くことが分かる。免疫型診断モデルは、局所的な相互作用に基づく分散診断であるため、たとえ大規模なネットワークでノード数が増大したとしても診断性能は悪化しないといえる。言い換えれば、免疫型診断モデルはノード数に依存しない拡張性の高いモデルであるといえる。



(a) 正則リング格子 ($p_r = 0$)



(b) ランダムネットワーク ($p_r = 1$)

図4 正則リング格子とランダムネットワーク上での平均検出率

次に、図4の(a)と(b)を比較してみると、式(1)の総和計算のために、どちらもリンク数 k の増加とともに検出率が改善している。

しかし、図4(a)の正則格子の方は k の増加に対して性能が改善されにくいことが分かる。平均最短経路長 L とクラスタ係数 C の観点では、正則格子の L と C はともに大きく、ランダムネットワークの L と C はともに小さい。免疫型診断モデルの特徴の1つとして活性状態(正しい診断)の伝播があることから、ランダムネットワークのように任意の2ノード間の経路長が小さいほどより正確な診断が可能であるといえる。

免疫型診断モデルでは接続数が重要であるため、小さな m に対してスケールフリーネットワーク(BAモデル)上で診断を試みた。図5に示すように他のネットワークモデルと同様の結果が得られた。特にBAモデル上の診断性能は、図4(B)のランダムネットワーク上の性能と類似していることが分かる。これは、両者の総リンク数がほぼ等しいためであるといえる。また、ネットワーク指標の観点では、BAモデルもランダムネットワークと同様に小さい平均最短経路長 L と小さいクラスタ係数 C を持つ。この事実からも L が小さいほど免疫型診断モデルはより正確な診断が可能であるという示唆を得た。

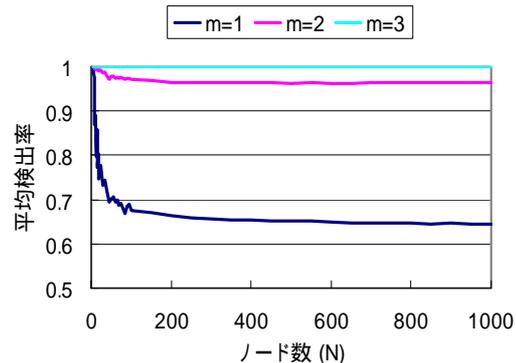


図5 スケールフリーネットワーク(BAモデル)上での平均検出率

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)

Yuji Watanabe and Yoshiteru Ishida, Performance Evaluation of Immunity-based Diagnosis on Complex Networks, Lecture Notes in Computer Science, 4694, pp.846-853, 2007, 査読有

Yuji Watanabe and Yoshiteru Ishida, Migration Strategies of Immunity-based Diagnostic Nodes for Wireless Sensor Network, Lecture Notes in Computer Science, 4252,

pp.131-138, 2006, 査読有

[学会発表](計1件)

渡邊裕司、石田好輝、複雑ネットワーク
上での免疫型診断モデルの性能評価、第
17回インテリジェント・システム・シン
ポジウム講演論文集、2007年8月10日、
名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 裕司 (WATANABE YUJI)
名古屋市立大学・大学院システム自然科学
研究科・准教授
研究者番号：60314100

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし