

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19500060
 研究課題名 (和文) 自律分散型センサネットワークのディペンダビリティに関する研究
 研究課題名 (英文) Study on the dependability of sensor networks based on autonomous control
 研究代表者
 菅野 正嗣 (SUGANO MASASHI)
 大阪府立大学・総合リハビリテーション学部・准教授
 研究者番号：80290386

研究成果の概要：自律分散的な制御手法によるセンサネットワークは、集中制御によるものよりも、データ損失やネットワーク障害に対するロバスト性が高い。それは、制御情報に対する依存性の強さに拠るものであることを示した。また、自律分散的な方法で、ノード間の時刻の同期や逆相同期を行なう手法を提案し、その特性を明らかにした。さらに、メッシュ構造を持つ実システムを対象として、省電力化のための適応的な制御方式を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

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：自己組織性、センサネットワーク、アドホックネットワーク、ロバスト性、時刻同期、パルス結合振動子、メッシュネットワーク

1. 研究開始当初の背景

多数のセンサノードで構成される大規模なセンサネットワークにおいて、ルーティングやスリープ制御などを、ネットワーク全体の状況に応じた集中的な制御方式で実現することは困難である。すなわち、無線通信に起因するパケット損失や、ノードの故障や追加に伴うネットワーク構成の変化が頻繁に発生するため、ネットワーク全体の正確な情報を収集することが難しいためである。そこで、何らかの自律分散的な制御を導入することで、各ノードは局所的な情報のみに基づい

て動作し、ネットワークとしての機能を実現することが望ましい。このような自律分散あるいは自己組織的な手法のうち、自然界に存在する生物の行動に知見を得た手法が注目を浴びてきている。

2. 研究の目的

このような自律分散的あるいは自己組織的なセンサネットワークが、集中制御の場合と比較してどのような特性を持つのか、定量的な比較を行なう。また、その結果に基づき、自律分散システムの持つロバスト性が、何に

起因するのかを明らかにする。さらに、具体的なアプリケーションとしてセンサネットワークにおける時刻同期を取り上げ、自己組織的な手法と集中制御の比較を行なう。

また、実利用を目指して開発されているアドホック・メッシュネットワークを対象として、消費電力を抑制してネットワーク寿命を延ばすための方式を提案し、その効果を検証する。

3. 研究の方法

(1) 観測領域内に複数のシンクノードを持つセンサネットワークを対象として、ネットワークに対する外乱（パケット損失、ノードや回線の障害、ノードの削除や追加によるトポロジの変更など）に対するロバスト性を、シミュレーションによって、評価する。

(2)

①自己組織的な時刻同期手法として、パルス結合振動子モデルによるものを採用し、集中制御的な時刻同期方式であるRBS (Reference Based Synchronization)方式との比較をシミュレーションによって行い、特性の比較を行なう。

②センサネットワークにおける逆相同期を実現させるための手法として、カエルの発進行動に着想を得た自己組織的な手法を提案し、その有効性をシミュレーションによって確認する。

(3) 受信側が間欠的に自身のIDを送信することで通信が開始されるIRDT (Intermittent Receiver Driven Transmission)方式を採用したアドホック・メッシュネットワークを対象として、消費電力に影響を与えるシステムパラメータをシミュレーションによって明らかにする。また、各ノードの状況に応じた制御パラメータ値を適応的に割り当てることで、消費電力の抑制を試みる。

4. 研究成果

(1) 図1に本研究テーマで用いたシミュレーションモデルを示す。これは矩形領域に300台のノードをランダムに配置し、それらがセンシングした情報を、4箇所のシンクノードで収集するためにマルチホップ伝送を行なうものである。集中制御は理想的な環境下では遅延などの経路制御のメトリックにおいて優れた予測可能性を持つものの、自己組織型制御は伝送誤りやノード故障、リンクの切断などの様々な摂動に対して、データ収集機能を保持できることを示した。例えば、図2はシミュレーション時間300秒から700秒までの間、ネットワーク内の一定割合(1, 5,

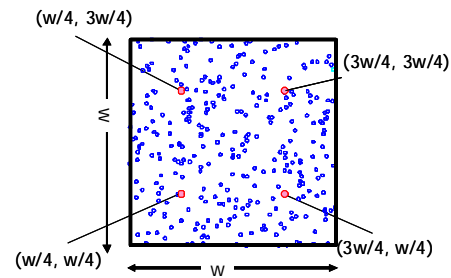


図1: シミュレーションモデル

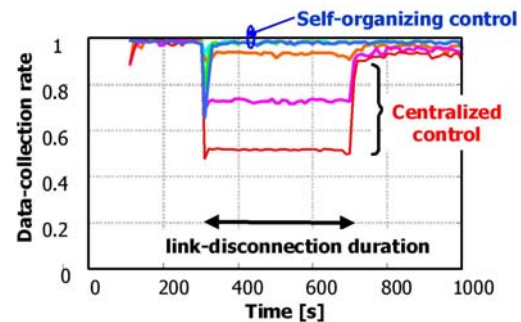


図2: リンク切断に対するロバスト性

10%)のリンクを強制的に切断したときの、データ収集率を示したものである。このように集中制御の場合、リンク切断が起こっている期間はデータ収集率が低下したままであるが、自己組織型制御では、一時的に性能が劣化するものの、ただちに回復していることがわかる。

さらにその評価結果を用いて、両制御手法のロバスト性の違いがネットワークの状態を把握するためにどれだけノードからの情報に依存しているかどうかによるものであることを示した。集中制御における制御局は信頼性の低いノードから集められるネットワークの状態に関する情報に依存しており、特にその情報が誤っていた場合に、集中制御に脆弱性をもたらす。逆に、自己組織型制御におけるノードはそれほど強く他のノードからの情報に依存しておらず、結果として誤った情報の影響も局所化されることが明らかとなった。

図3は、シミュレーション時間160秒の時

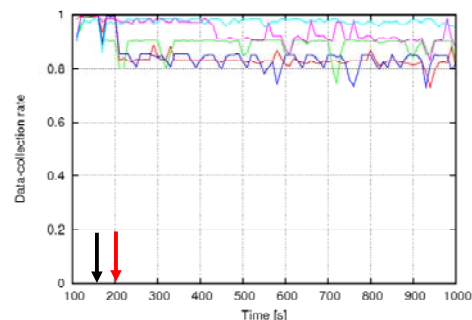


図3: 誤った制御情報の影響

点で、あるシンクノードの近辺のノードに障害が発生し、200秒の時点でそのノードが回復したという誤った情報を注入した場合のシミュレーション結果である。図より、自己組織型制御では、誤った情報の影響は特に見られないが、集中制御の場合はデータ収集率が10~20%低下している。

(2)

①センサネットワークにおいては、効率のよい情報収集や省電力化のためにセンサノード間の時刻同期は重要である。多数のセンサが広範囲に配置される大規模なセンサネットワークにおいては、ネットワーク全体に基準信号を送信することは困難であるため、自律分散型の時刻同期方式が有効であると考えられる。パルス結合振動子モデルは、蛍の発光や心臓のペースメーカー細胞など、生物界における個体間の局所的な相互作用により全体を同期させる仕組みをモデル化した、自律分散型の時刻同期方式である。本研究では、このような自律分散型の時刻同期手法の特性や適用範囲を明らかにすることを目指している。

そこで本研究では、基準ノードからの時刻のずれをマルチホップで伝達することで、ネットワーク全体の時刻同期を得るマルチホップRBS方式との性能比較を行なった。これら二つの方式に関して、MAC層における遅延の揺らぎやパケット損失の影響を考慮し、時刻同期に要する時間や時刻同期の精度などをシミュレーションによって導出した。その結果、パルス結合振動子による時刻同期は無線通信品質によらない安定度の高い時刻同期を広範囲の観測領域にわたって実現することができ、マルチホップRBSは接続性の高い環境において短時間で正確な時刻同期が実現できることを明らかにした。

図4は、パケット損失に対する2つの同期手法のロバスト性を比較したものであり、横軸はパケット損失率を表している。シミュレーションにおいて、この損失率に基づいてランダムにパケット損失が発生するものとしている。図より、PCOによる時刻同期はパケ

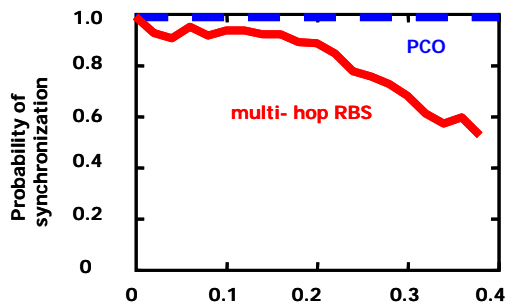


図4: パケット損失に対するロバスト性

ット損失の影響をほとんど受けないことがわかる。PCOはノード同士が互いに刺激を受けることの繰り返しによって同期状態に収束する手法なので、そのプロセスの途中でパケット損失が発生しても影響を受けることはない。しかしながら、マルチホップRBSでは、パケット損失によって時刻情報が失われるので、同期が成功する割合が低下していくことがわかる。

②アマガエルは、他の個体の鳴くリズムに合わせて周期的かつ交互に鳴くことによって、自分の存在を目立たせる発生行動をとることが知られている。また、周辺に多くの個体の存在を確認した個体は鳴くことを止め、体力を温存するサテライトという行動をとる。本研究では、これらの行動に着想を得て、パルス結合振動子による逆相同期、およびスリープ制御を導入することによって、確実なデータ送信と電力消費の削減を目的とした自己組織型スケジューリング手法を提案する。提案手法は、データ送信のスケジュールを調整することにより送信失敗を回避し、スリープスケジューリングによりネットワークを長寿命化させることを示した。図5に逆相同期によって送信タイミングを適切に制御するイメージを示す。逆相同期が実現できていない状態ではパケットの衝突が発生するが、逆相同期によって衝突を回避できることがわかる。図6は提案手法によって10ノードの逆相同期を行なったシミュレーション結果である。横軸にシミュレーション時間、縦軸は相対的な位相を表している。

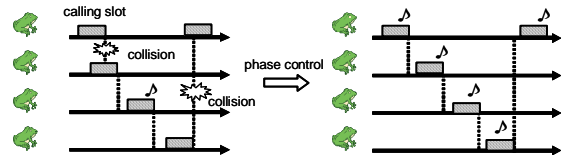


図5: 逆相同期による送信タイミング制御

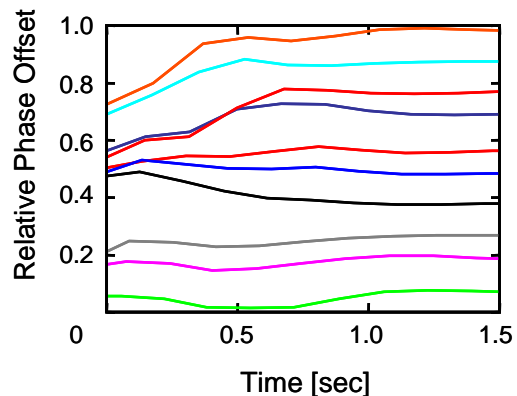


図6: 10ノードによる逆相同期の実現

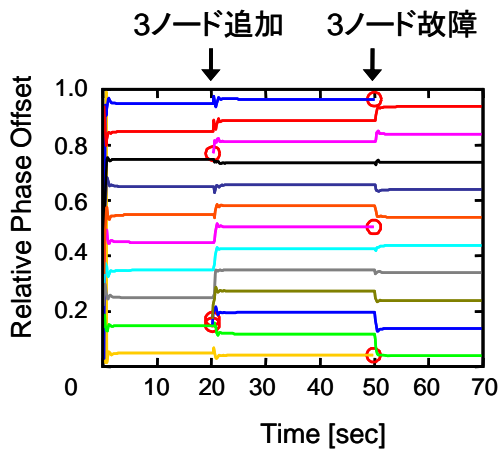


図 7: トポロジーの変化に対する適応性

また図 7 は、ネットワークのトポロジーが変化した場合の、提案手法の振る舞いを示したものである。10 ノードのネットワークにおいて、時刻 20 秒でノードが 3 つ追加され、50 秒で 3 つが削除されている。このようにトポロジーの変化が起こっても、提案手法により逆相同期が適切に実現されていることが明らかとなった。

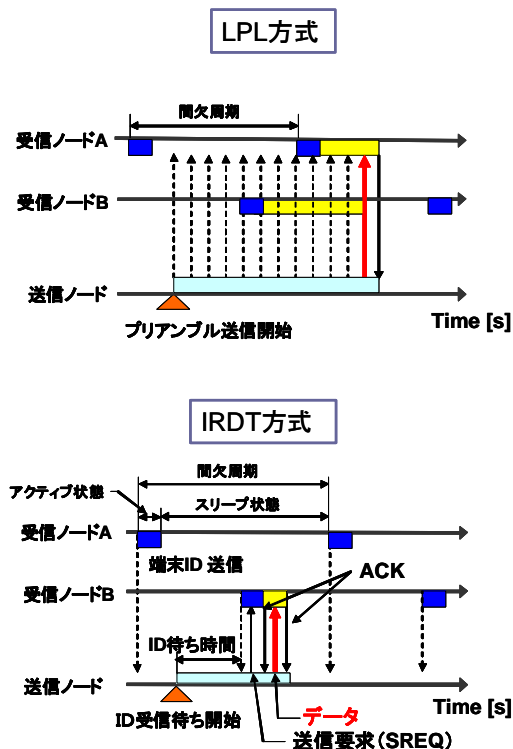


図 8: LPL 方式と IRDT 方式

(3) アドホック・メッシュネットワークは、複数経路による信頼性の高いネットワークを構成できる反面、一般に消費電力が大きく、それを抑制することが重要な課題である。消費電力の削減を目的とした通信方式としては、各ノードを間欠的に動作させる方式が有効である。本研究で対象とする IRDT

(Intermittent Receiver-driven Data Transmission)方式は、低頻度でパケットが発生するネットワークにおいて長期間の運用を目指して設計されており、各無線機が間欠的に自身の ID を周囲に送信し、送信側ノードがそれを受信することで通信を開始することによって消費電力を削減している。本研究では、IRDT 方式における間欠周期を動的に変化させることで、消費電力を抑制することを目指した。図 8 に IRDT 方式と比較対象である送信端末始動型の制御である LPL (Low Power Listening) 方式の動作シーケンスを示す。

シミュレーションを行った結果、データ発生頻度の低い環境において高いパケット収集率を実現する条件の下では、本方式の消費電力が LPL 方式の 25% まで削減可能であることが示された。

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 3 件)

- ① Yuichi Kiri, Masashi Sugano, Masayuki Murata, Robustness in sensor networks: Difference between self-organized control and centralized control, International Journal on Advances in Networks and Services, 2009, 掲載決定済, 査読有り
- ② Akira Mutazono, Masashi Sugano, Masayuki Murata, Comparison of the robustness of bio-inspired time synchronization mechanisms for sensor networks, International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems, 2009, 掲載決定済, 査読有り
- ③ Masashi Sugano, Ryo Fukushima, Masayuki Murata, Takaaki Hatauchi, Low-energy-consumption ad hoc mesh network based on intermittent receiver-driven transmission, Journal of Computer Networks and Internet Research, vol. 9, issue 1, 2009, 掲載決定済, 査読有り

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 牟田園明、菅野正嗣、村田正幸、蛙の発声行動に着想を得た自己組織型スケジューリング手法の提案、電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会、2009 年 3 月 4 日、沖縄県読谷村
- ② 小南大智、菅野正嗣、村田正幸、島内孝明、福山良和、四蔵達之、受信端末始動型間欠動作データ転送方式の性能評価、電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会、2009 年 3 月 3 日、沖縄県読谷村
- ③ Masashi Sugano, Yuichi Kiri, Masayuki Murata, Differences in robustness of self-organized control and centralized control in sensor networks caused by differences in control dependence, The 3rd International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC 2008), 2008 年 10 月 29 日、スリーマ・マルタ共和国
- ④ Masashi Sugano, Ryo Fukushima, Masayuki Murata, Takayoshi Hayashi, Takaaki Hatauchi, Performance evaluation of a low-energy-consumption ad hoc mesh network based on intermittent operation, The 3rd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh 2008), 2008 年 6 月 16 日、サンフランシスコ・米国
- ⑤ Yuichi Kiri, Masashi Sugano, Masayuki Murata, Robustness differences between centralized control and bio-inspired control of sensor networks, Biological Approaches for Engineering Conference (BAEC 2008), 2008 年 3 月 18 日、サウサンプトン・英国
- ⑥ 木利友一、菅野正嗣、村田正幸、センサネットワークにおける制御依存性の違いがもたらす自己組織型制御のロバスト性と集中制御の脆弱性、電子情報通信学会 通信方式研究会、2008 年 3 月 7 日、山口県宇部市
- ⑦ 譜久島亮、菅野正嗣、村田正幸、林隆好、四蔵達之、間欠動作に基づく低消費電力アドホック・メッシュネットワークの性能評価、電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会、2008 年 3 月 7 日、沖縄県名護市
- ⑧ Akira Mutazono, Masashi Sugano, Masayuki Murata, Evaluation of robustness in time synchronization for sensor networks, The 2nd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2007), 2007 年 12 月 10 日、ブダペスト・ハンガリー
- ⑨ 木利友一、菅野正嗣、村田正幸、センサネットワークのロバスト性に見る集中制御と自己組織型制御の違い、電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会、2007 年 7 月 19 日、北海道北見市
- ⑩ Yuichi Kiri, Masashi Sugano, Masayuki Murata, Self-organized data-gathering scheme for multi-sink sensor networks inspired by swarm intelligence, The 1st IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2007), 2007 年 7 月 10 日、ボストン・米国
- ⑪ 牟田園明、菅野正嗣、村田正幸、センサネットワークの時刻同期手法におけるロバスト性の評価、電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会、2007 年 6 月 22 日、北海道函館市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 正嗣 (SUGANO MASASHI)

大阪府立大学・総合リハビリテーション学部・教授

研究者番号：80290386