

平成21年 5月 9日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006年度～2008年度
 課題番号：18500060
 研究課題名（和文） 自己機能変更が可能なセンサノードを用いたノンストップ・センサネットワークの研究
 研究課題名（英文） Non-stop sensor network constructed with sensor nodes having autonomous function-alternation mechanism
 研究代表者
 宮崎 敏明（MIYAZAKI TOSHIAKI）
 会津大学・コンピュータ理工学部・教授
 研究者番号：70404895

研究成果の概要：

ネットワークトポロジの動的変更に加え、ダメージを受けたセンサノードの機能を近傍のセンサノード（以下ノード）が肩代わりし、ネットワーク全体として、当初の目的を達成するように自律的に機能保全を行う機能を有する無線センサネットワークのための要素技術を開発した。具体的には、(1)各ノードが受け持つセンシング機能の割り当てと、パケット衝突を回避するように各ノードがパケットを送出する時刻の割り当てを同時に最適化する自律分散アルゴリズム、(2)各ノードの位置推定アルゴリズム、(3)死滅したノードの隣接ノードが機能を肩代わりするための方式、を考案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	660,000	4,260,000

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：センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

センサネットワーク技術は、昨今ユビキタスコンピューティングを実現する重要技術としても注目され、研究開発が盛んに行われている。特に無線センサネットワーク技術は、設置の容易さから屋外や移動物体を対象とした環境センシングに適し、災害・防犯・環境保護などへの幅広い応用が期待できる。現在、本分野で行われている研究は、ネットワーク構成法やマルチホップルーティングな

ど、センシング情報を如何に効率よく収集するかに焦点が当てられている。しかし、土砂崩れなどの災害監視用センサネットワークでは、設置したセンサの一部が使用不能になる場合もあり、ネットワークトポロジの動的な構成や変更だけでは、システムとして所望の情報を取得できなくなる可能性がある。本研究のねらいは、上記状況にも対処可能とするために、ネットワークトポロジの動的変更に加え、ダメージを受けたセンサノードの機

能を近傍のセンサノードが肩代わりし、センサネットワーク全体として、当初の目的を達成するように自律的に機能保全 (self-healing、 self-repairing) を行う機能を実現することにある。

2. 研究の目的

観測者が欲するセンシング情報を取得するために、センサネットワークを構成する各センサノードが周囲の状況を勘案して自律的に自らの機能を変更すると共に、複数のセンサノード群が協調動作し、センサノードの一部が故障しても、他のセンサノードがその故障した機能を代替し、全体の機能が停止することなく与えられたミッションを達成する機構を実現する。

3. 研究の方法

前述した機構を実現するために、下記の3項目に関して取り組んだ。

(1) センシング機能割り当てとタイムスロット割り当て

環境にばらまいた多数のセンサノードを用いて、環境情報を偏りなく取得するには、各センサノードのセンシング機能をできるだけ均等に分散させることが望ましい。また、取得した情報をユーザに転送させるためには、各ノードが送信するパケット同士の衝突を回避する必要がある。パケット衝突の回避手法として TDMA (Time Division Multiple Access) が有名である。TDMA は、時間を細かくタイムスロットに切り、各タイムスロットでは、決まったノードしかパケットを送出しないように制御する。よって、各タイムスロットに適切なノードを割り当てれば、パケット衝突が決して起きない通信が可能となる。上述した2つの割り当て問題は、グラフの彩色問題として定式化可能である。本研究では、分散型のグラフ彩色アルゴリズムを考案し、それを用いて、上記の割り当て問題を解く手法を検討した。

(2) センサノードの位置推定

投入した各センサノードの位置を知ることには、センサネットワークの応用範囲を拡大する意味で重要である。センサノードは屋内で使用されることもあり、GPS などの直接的な測位法は使用できない。ここでは、マルチホップ数に基づいた位置推定法を検討した。

(3) 機能代替

各センサノードが自律的に近隣センサノードの生死を判断とし、死滅したセンサノードが担っていた機能を代替するために、予め保持している複数の機能から1つを自動選択して起動する手法を提案した。

4. 研究成果

各研究項目で得た結果を示す。

(1) センシング機能割り当てとタイムスロット割り当て

各センサノードが持つべきセンシング機能を面的に平均化するように動的に割り当てる問題をグラフの彩色問題として定式化し、それを自律分散型のアルゴリズムを用いて解く方法を提案した。また、稠密にセンサノードを配置した時、本手法の導入効果が特に大きいことを実験により確認した。提案手法を、シミュレーション実験により評価した。実験で用いたネットワーク (以後、グラフ) は、100 m × 100 m の監視領域に対して、50 個のノードをランダムに配置し、ノード間の電波到達半径 R を 10、20、30、40m とした。各グラフの次数 (近隣ノード数) は 1.38、5.12、10.52、16.71 であった。平均次数と比較して、少ない場合、同じ場合、多い場合の3つのケースを検証できるように、ノードに搭載されているセンシング機能の数を5種類とした。実験では、200 回、十分な時間試行し、その平均値を評価値として使用した。はじめに、センシング機能ごとのエリアカバー率を評価した。ここで、エリアカバー率とは、センシング機能を中心に半径 R の円が、そのセンシング機能のカバー範囲であるとし、監視領域に対するセンシング機能のカバー範囲の和の割合であると定義する。すなわち、(円弧で囲まれた面積) / (監視領域全体の面積) がエリアカバー率である。今回の実験では、各センシング機能のカバー範囲はパケットの到達距離と等しいものとした。さらに、提案手法では、センシング機能が動的に変化するため、センシング機能ごとに、各時刻領域のエリアカバー率を求め、それらの平均値を評価値として用いた。図1に実験結果を示す。図中、X 軸はセンシング機能を、Y 軸はエリアカバー率を示している。また、各線は、異なるセンシング機能のカバー半径 R を用いた時の評価結果を表している。図1より、提案手法は、センシング機能によらず高いエリアカバー率を実現していることが分かる。特に、 $R=40m$ では、88% 以上のエリアカバー率を達成している。次に、各ノードのセンシング期間に実際にセンシングを行なう時間の割合を評価した。図2に、実験結果を示す。図2より、ノードの密度に応じてセンシングの割合が変化しているのが分かる。また、近隣ノード数よりセンシング機能の数が少ない場合に相当する $R=40m$ では、ノードはセンシング期間全体のうち、約 58% の期間では、実際のセンシングを必要としないことが分かる。この事実は、省電力貢献するだけでなく、パケットの送出頻度も減少するので、トラフィ

ックの削減にも効果がある。

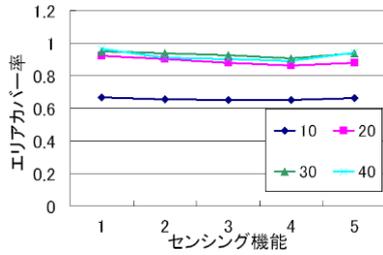


図 1: 監視領域のエリアカバー率

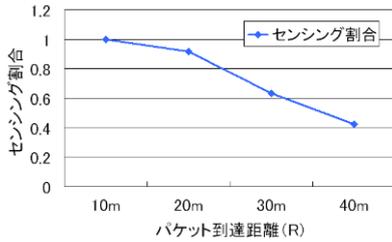


図 2: ノードの平均センシング時間割合

また、考案したグラフ彩色アルゴリズムを適用し、TDMA の動的タイムスロット割り当てを実現した。図 3 に示すように、各タイムスロットを色として、2 ホップ以内に同一色を割り当てないように、色割り当てを実現すれば、同一色のノードが同時にパケットを送出しても、その到達範囲は重なることがないので、パケット衝突を避けることができる。本手法のシミュレーションによる評価結果を図 4 に示す。横軸は経過時間、縦軸はパケット衝突の数を表している。図には、同一の観測対象領域に、ノードを 200 個から 1000 個まで異なる個数のノードを投入した場合の評価結果を異なる線で重ねて示している。図から分かるように、投入したノードの個数によらず、本提案手法によるタイムスロット割り当てが動的に行われた結果、時間経過とともに、急激にパケット衝突数が減少し、最終的には、ほぼ解消できていることが分かる。

本グラフ彩色アルゴリズムによるセンシング機能割り当て、およびタイムスロット割り当ては、動的かつ自律分散的に行われる。

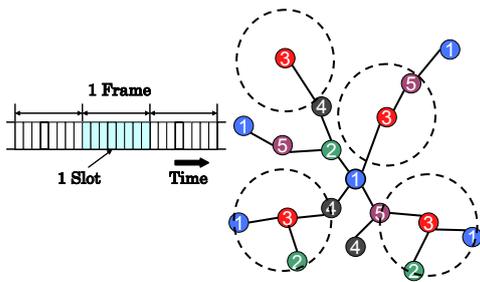


図 3: TDMA のタイムフレーム構造とタイムスロット割り当て例

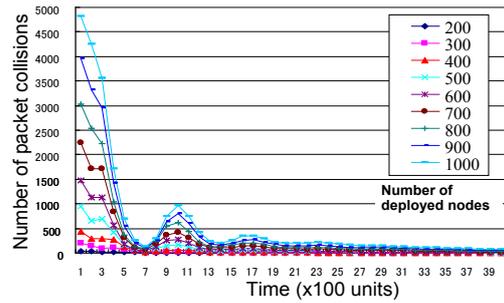


図 4: 動的タイムスロット割り当ての評価結果

したがって、投入された個別ノードの突然の故障や新規に投入するノードが存在した場合でも、特別な操作を必要とせず、頑健性および拡張性の観点から従来手法に比べ優れている。本成果は、国内および国際会議にて発表した。

(2) センサノードの位置推定

センサノードの位置推定法は数多く提案されているが、理想的な環境下でのシミュレーションによる評価に留まっているものが多く、実用性に乏しい。ここでは、位置が既知である複数の基準(anchor)ノードからのホップ数に基づいて各ノードの位置推定を行う既存アルゴリズムに改良し、制度の良い位置推定ができる手法を開発した。具体的には図 5 に示すように、各ノードが基準ノードから自分に至るホップ数を保持する情報表を持つ。情報表には、各基準ノードが定期的を送出したパケットが、自分に届くまでの伝搬経路上のノード数(ホップ数)が時系列上に格納される。当該ノードの位置推定時に用いる各基準ノードからの実際の距離は、上記情報表に時系列上に格納されたホップ数の移動平均値を用いる。これにより、実世界では頻繁に起こり得る電波伝搬特性が時間とともに変化する不安定な環境でも、直近の電波伝搬特性を反映した位置推定が可能となり、その推定誤差を小さくできる。図 6 に評価結果を示す。図 6(a) は、既存アルゴリズムの結果、図 6(b) は本提案手法による結果である。図中四隅の黒丸は基準ノードを示し、白丸は実際のノードの位置、×は対応するノードの

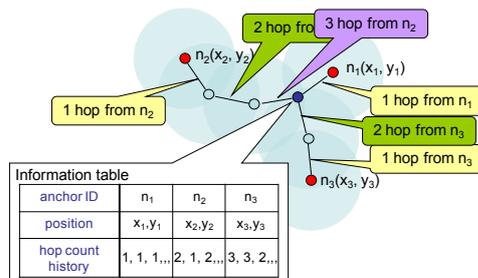


図 5: 各センサノードの位置推定に用いる情報

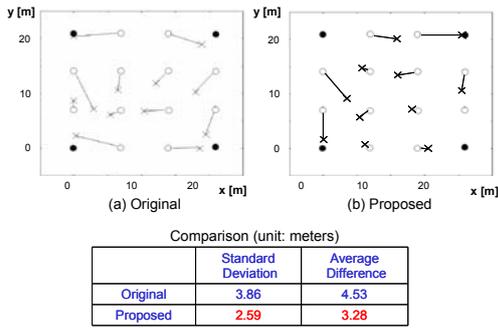


図 6: 位置推定法の評価結果

推定位置である。提案手法がより正確なノード位置を推定している。図 6 に示した誤差の平均値および標準偏差とも提案手法が小さくなっていることから、その効果が分かる。本成果は国内会議にて発表した。

(3) 機能代替

提案手法をセンシング機能の代替に適用した場合、長時間、面的に偏りのないセンシングが可能なセンサネットワークを構築できることを、シミュレーションにより確認した。ここでは、5種類の異なるセンシング機能(0~4)を各ノードは保有するが、電力消費を抑えるために、近隣ノードが同一のセンシングを行っている場合は、該当のセンシングは行わないものと仮定し、必要十分な環境センシングを行いながら、個々のノードの消費電力を抑え、ネットワーク全体のライフタイムを長くすることを目標にした。図 7 および図 8 に評価結果を示す。図 7 は、ネットワーク内の各ノードの残電力量をプロットしたものである。図中、X 軸は時間の推移を示し、Y 軸はノードの残電力量を示す。また、図 8 は、機能の分散度合いを示している。X 軸は時間推移、Y 軸は機能番号の“分散の大きさ”を示す。ここで、“分散の大きさ”とはネットワーク内に生存しているノードの機能番号の集合を母集団とした分散の値と機能が均等に分散している状態（以後、理想状態と呼ぶ）での機能番号の分散の値の差分と定義する。理想状態では、各ノードの機能番号は 0~4 のいずれかであり、その確率は全て 1/5 であるため、分散の値は 2.0 を示し、分散の差分は 0.0 となる。ここでは、当該分散値の差分の大きさをネットワーク全体として、どの程度機能が分散しているかを示す指標として用いた。図 7 および図 8 より提案手法はノードが故障しても、機能代替により、ノードの生存数が 70%程度になるまで機能をネットワーク内に分散できていることがわかる。また、図 7 より 600 秒程度ノードの動作可能時間が減少するが、これは、ネットワークのライフタイムを考えた際は、それほど致命的ではないといえる。一方、提案手法を用いない場合、ノードの動作可能時間は若干長

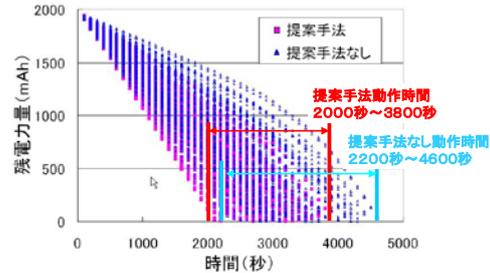


図 7: ネットワーク内に生存する全てのセンサーの残電力量の時間推移

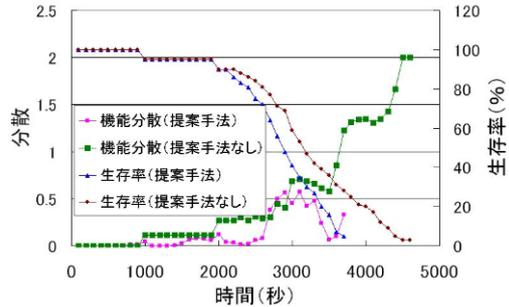


図 8: ネットワーク内に存在するノードが担っている機能の分散度合いの時間推移

くなるものの、故障したセンシング機能は補完されず、特定の機能のセンシングが不可能となる。これは、ネットワーク自体は機能するものの、所望の情報が取得できないことを意味し、センサネットワークとして意味をなさない状態であると言える。これより、提案手法は、故障が多い状況下において所望のセンシングを長く継続することができるという意味で、有効な手法であるといえる。本成果は国内会議にて発表するとともに、国内特許出願した。

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 R. Kawano, and T. Miyazaki, "Effective Sensing Function Allocation Using a Distributed Graph Coloring and a Slot Allocation Algorithm in Wireless Sensor Networks," Proc. The IEEE 23rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-09), Bradford, UK, May 2009 (accepted) 査読有り
- ② T. Miyazaki, R. Kawano, Y. Endo, and D. Shtara, "A Sensor Network for Surveillance of Disaster-hit Region," Proc. IEEE International Symposium on

Wireless and Pervasive Computing (ISWPC2009), pp. 1-6, Melbourne, February 2009. 査読有り

- ③ R. Kawano and T. Miyazaki, "Distributed Data Aggregation in Multi-sink Sensor Networks using a Graph Coloring Algorithm," Proc. The Fourth IEEE International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE2008) in AINA2008, Japan, March 2008. 査読有り
- ④ K. Onodera and T. Miyazaki, "An Autonomous Algorithm for Construction of Energy-conscious Communication Tree in Wireless Sensor Networks," Proc. The Fourth IEEE International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE2008) in AINA2008, Japan, March 2008. 査読有り
- ⑤ R. Kawano and T. Miyazaki, "Distributed Coloring Algorithm for Wireless Sensor Networks and Its Applications," Proc. IEEE 7th International Conference on Computer and Information Technology (CIT2007), pp. 997-1002, Fukushima, Japan, Oct. 2007. 査読有り
- ⑥ T. Miyazaki, "Boolean Formulation for Sensor Allocation Problem and Its Effective Solver," Proc. ACM/IFIP/USENIX MidSens'06 (International Workshop on Middleware for Sensor Networks), pp. 46-54, Melbourne Australia, Nov. 2006. 査読有り

[学会発表] (計 9 件)

- ① 川野亮平, 宮崎敏明, "無線センサネットワークにおけるセンシング機能割り当てと TDMA タイムスロット割り当ての同時最適化法の提案," 情報処理学会第 71 回全国大会 2U-2, March 2009.
- ② 川野亮平, 宮崎敏明, "分散型グラフ彩色アルゴリズムを用いたセンサネットワークのための機能割り当て法の提案," 計測自動制御学会 第 18 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN2008), Oct. 2008.
- ③ 設楽大記, 宮崎敏明, "Over-The-Air Programming を用いた複数センサノードに対する機能変更手法," 2008 年電子情報通学会ソサイエティ大会 B-20-9, September 2008.
- ④ T. Miyazaki, "Die-hard Sensor Network: Its Concept and Applications," (Invited Special Talk) IEEE 8th International Conference on

Computer and Information Technology (CIT2008), Sydney Australia, July 2008. 招待講演

- ⑤ 遠藤雄士, 川野亮平, 小野寺克美, 宮崎敏明, "ワイヤレスセンサネットワークにおける実環境を考慮したノード位置推定法の検討," 情報処理学会第 70 回全国大会, 2ZA-6, March 2008.
- ⑥ 小野寺克美, 川野亮平, 宮崎敏明, "省電力化を意識したツリー状センサネットワークトポロジの構築手法," 情報処理学会第 70 回全国大会, 2Z-8, March 2008.
- ⑦ 川野亮平, 小野寺克美, 宮崎敏明, "彩色アルゴリズムを用いたマルチシンクセンサネットワークにおけるデータ収集法," 情報処理学会第 70 回全国大会, 5Z-7, March 2008.
- ⑧ 川野亮平, 小野寺克美, 宮崎敏明, "無線センサネットワークにおけるセンサ機能割り当てに対する自律分散アルゴリズム," 情報処理学会第 69 回全国大会, 4V-8, March 2007.
- ⑨ 小野寺克美, 川野亮平, 宮崎敏明, "センサネットワークにおける自律分散時刻同期手法," 情報処理学会第 69 回全国大会, 4V-9, March 2007.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: センサ装置、センシング情報収集システム、センシング機能代替方法およびセンシング機能代替プログラム

発明者: 宮崎敏明

権利者: 会津大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-230593

出願年月日: 2008 年 9 月 9 日

国内外の別: 国内

[その他]

取材

- ① HHK 福島 2008 年 5 月 21 日
2008 年 5 月 28 日 「フォーカスふくしま」にて福島県内に放映

展示会への出展

- ① ふくしまデジタル情報化フェア (福島市 コラッセふくしま、2008 年 10 月 23 日)
- ② 産学化連携フェア 2008 みやぎ (仙台国際センター、2008 年 9 月 30 日)
- ③ イノベーションジャパン 2008 大学見本市 (東京国際フォーラム、2008 年 9 月 16-18 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 敏明 (MIYAZAKI TOSHIAKI)
会津大学・コンピュータ理工学部・教授
研究者番号：70404895

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし