

平成23年 5月30日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560348
 研究課題名（和文）
 新しい同期方式を用いたアドホック・センサネットワークの超長寿命化の研究
 研究課題名（英文）
 Extremely long-lived ad-hoc, sensor networks realized by a new timing synchronization
 研究代表者
 田中 久陽（TANAKA HISAAKI）
 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授
 研究者番号：20334584

研究成果の概要（和文）：

本研究は実験と解析の両面から、以下の三つの項目を達成した。(1) ネットワークの長寿命化を実現する超省電力通信プロトコルの構築とシミュレーション検証, (2) システムの冗長性を利用して、耐故障性を向上し、状態管理を自律的に行なうネットワーク同期方式の実証実験, (3) 受信端末始動プロトコルを用いた多数の無線端末のデータ共有・データ収集方式の構築.

研究成果の概要（英文）：

This research has realized the following three major results, through systematic experiments and analysis. (i) Design and verification of extremely power efficient communication protocols, realizing long-lived adhoc, sensor networks, (ii) Experimental verification of a new network synchronization method, for system robustness and distributed network maintenance by system robustness, and (iii) Design and verification of data broadcast and data gathering method, using receiver-initiated packet transmission protocol.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：無線通信方式

1. 研究開始当初の背景

本研究は、最近の地中・水中無線通信によるモニタリング技術の実用化にドライブされている。このモニタリング技術は放射性廃

棄物の地層処分や埋め立て地における地盤沈下計測等の応用上、特に重要であり、いずれも (i) 10年以上の長期間にわたるモニタリングシステムの運用が必須であり、(ii) 地

中・水中で比較的減衰の少ない数キロヘルツ帯の超低周波数帯域の無線通信を用いるという特徴をもっている。

ところが、これらの現状のモニタリング技術は、少数のセンシングデバイス（すなわち無線端末）を限られた範囲に埋設し、その端末に地上から個別に直接の通信を行いセンシングデータを取得するというレベルである。したがって、地上から直接通信の困難な深層の計測や広範囲の領域での同時計測は非常に重要な価値をもつにもかかわらず、これを実現する技術が現状では存在しない。本研究はこのような現状のモニタリング技術に対し、近年急速に発展しているアドホック・センサネットワークの手法を導入し、この技術的な困難・問題点を解決することが研究開始当初の背景としてある。

2. 研究の目的

ここで対象とするシステムにおいて、その端末の相互の位置関係はそれほど変化しないことが特徴である。これは、地中・水中さらに人体中に埋設するセンサノードはひとたび設置されると大きく移動することではなく、また現時点ではこのようなセンサノードは比較的高価であるためランダムに大量散布することではなく計画的に最適な位置に設置することによる。この特長が従来のアドホック・センサネットと本質的に異なる点である。

したがって本研究対象である地中・水中等のネットワークは、従来のセンサネットとは異なる設計理念が要求される。われわれは予備的な研究を行ってきた結果、このような応用での自律分散ネットワークの構築は従来個別に扱われてきた(a)センサノードの配置方法、(b)センサノードのタイミング同期手法、そして(c)センサノード間のデータ収集手法の3つの要素を互いに相互連携して行なうことが必須であると考えている。これを実現する一つのキーアイデアはタイミング同期のプロセス自体を時分割多重化し、殆どの時間においてセンサノードの送受信回路の電力をオフにするものである。またこれに伴ない、本研究は従来の時分割多重方式(TDMA)を超省電力化し、かつ自己修復的な機能を担うことが出来るように高度化するアルゴリズムを検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は地中・水中等無線環境における分散ネットワーク、すなわちアドホック・センサネットワークの構築と長寿命化を目的とする。そのために、従来手法と異なる新しいシステム設計、シミュレーションによる動作検証、さらに最終的にネットワークの実装実験を計画している。本申請者は、企業と小規

模な地中無線通信に関して共同研究を行ってきた経験から、地中無線通信に関して基本的計測データを得ているので、これを一つの設計のベースとして利用する。

ところが、このような大規模な分散ネットワークの構築は、現時点では単一の地中端末でさえ高価であるため、技術的のみならず予算的にも現実的ではない段階である。そのために、以下のように相互に関連する三つの項目 (i) ネットワークの長寿命化を実現する超省電力通信プロトコルの検討 (ii) システムの冗長性を利用して、耐故障性を向上する通信方式の実現 (iii) 多数の無線端末の状態管理を自律的に行なうネットワーク管理方式の検討に問題を整理し、段階的に基礎研究を進める方法を用いた。

4. 研究成果

本研究の成果は以下の通り、三つの項目に整理される。

(1) ネットワークの長寿命化を実現する超省電力通信プロトコルの検討

ネットワークの長寿命化を実現するためには基本的に必要最小限の頻度の通信を行ない、通信時以外は出来るだけパワーオフにして電力の消費を省くメカニズムの確立が必要になる。その際、同じタイミングで端末をオンとするために、地上の基地局（探索装置）や隣接する端末からの電波により、順次起動させる方法もあり得るが、この方法では常時受信するための付加回路や無駄な消費電力が生じ、さらにシステム全体を起動するのに長時間を要する等の短所が多い。したがって、分散ネットワークにおいては、上のメカニズムが全てのノードにおいて一斉に同期して進行する必要があり、これを実現するために、各端末が互いに同期したタイミングを確保することが必須となる。そのために、まず新しい省電力同期手法を確立し、そのうえで上記のパワーオフを行なうスケジューリング手法を新規な TDMA 方式を基に構築した。この段階では、数値シミュレーションによる解析が要求され、これに必要なハイパフォーマンス PC を申請補助金の使途内容に計上している。

(2) システムの冗長性を利用して、耐故障性を向上し、状態管理を自律的に行なうネットワーク同期方式の実証実験

これまでの予備的研究において、地中における無線通信は、現実的な条件下で 20[m] - 30[m]程度まではエラーを殆ど生じないことが確認されている。そのために端末の配位を幾分冗長に配置（たとえば 10[m]間隔）すると、1つの端末がある程度の範囲内で周りの複数端末と直接に相互通信可能となる。上記の提案システムの実装実験を目的として、プロトタイプ的な通信端末 (MicaZ) を用い、

同期の精度と安定性を系統的に調査・実証した。

(3) 受信端末始動プロトコルを用いた多数の無線端末のデータ共有・データ収集方式の構築

以上に構築された方式の副産物として、多数の端末のデータ共有・収集を自律分散的に行なう新規な手法を提案し、系統的な解析を行なった。これは、受信端末からデータの送受信の一連の手続きを始動するものであり、これまでのハンドシェイク型の通信を自律分散化したものである。このアルゴリズムは本申請者により既に特許出願されており、本研究においては、従来手法とフェアな比較検証を目的に数値シミュレーションを行い、その有効性の検証と改良方法を検討した。

以上の三つの成果は、それぞれ数値シミュレーションとプロトタイプ的な通信デバイス (MicaZ) による模擬実験によって進められてきている。以上の結果は、現在国内、国外いずれにおいても得られていない新規なものであるため特許出願を行ない、国際会議および国際的なジャーナルで発表を行なってきた。

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 Takahiro Harada, Hisa-Aki Tanaka, Michael J. Hankins, Istvan Z. Kiss, Optimal Waveform for the Entrainment of a Weakly Forced Oscillator, Phys. Rev. Lett., 105, 088301, 2010, 有
- ② Hisa-Aki Tanaka, Hiroya Nakao, and Kenta Shinohara, Self-organizing timing allocation mechanism in distributed wireless sensor networks, IEICE Electron. Express, Vol. 6, No. 22, 1562--1568, 2009, 有
- ③ 田中久陽, アドホック・センサネットワークにおけるダイナミクスの問題, システム/制御/情報, vol. 53, no. 8, 352--357, 2009年8月, 無

[学会発表] (計23件)

- ① Hisa-Aki Tanaka, Theory and applications of optimal injection-locking oscillators, ICR2011, 2011年2月22日, インドネシア大学
- ② 田中久陽, Design of optimal entrainment of a weakly forced oscillator, 明治大学GCOEプログラムMASセミナー, 2010年12月2日, 明治大学
- ③ Kazu-Aki Akashi, Hisa-Aki Tanaka, Energy Efficient Broadcasting and Data Gathering Method with Collision Avo

iding Mechanism for Ubiquitous Sensor Networks, TriSAI2010, 2010年10月26日, 北京郵電大学

- ④ Naotaka Sagayama, Hisa-Aki Tanaka, Istvan Z. Kiss, Optimal Waveform for the Entrainment of a Weakly Forced Oscillator, IWMST2010, 2010年9月5日, 北見工業大学
- ⑤ Keisuke Higashimine, Kazu-Aki Akashi, Hisa-Aki Tanaka, Efficient Broadcasting Method with Collision Avoiding Mechanism for Ubiquitous Computing Environments, IWMST 2010, 2010年9月5日, 北見工業大学
- ⑥ 田中久陽, アドホック・センサネットワークに関わるダイナミクスの諸問題, 九州力学系セミナー, 2010年8月5日, 九州大学
- ⑦ Yoshitsugu Yamamoto, Kiyotake Tetsuka, Hisa-Aki Tanaka, Experimentally faithful model for synchronous flashing of Southeast Asia fireflies—Rigorous results and numerical observation—, NOLTA2009, 336--339, 2009年10月21日, シャトレーゼ ガトーキングダム& スパ
- ⑧ Kazu-Aki Akashi, Kenta Shinohara, and Hisa-Aki Tanaka, Mutual synchronization over groups of vehicles in intervehicle ad-hoc networks, Proceedings of 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA2009, 328--331, 2009年10月21日, シャトレーゼ ガトーキングダム& スパ
- ⑨ Kazuhiro Yonekura, Hisa-Aki Tanaka, and Kenta Shinohara, Independent Two Slew Estimations Improves Accuracy and Robustness of Synchronization in Wireless Sensor Networks, Proceedings of 2009, International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA2009, 320--323, 2009年10月21日, シャトレーゼ ガトーキングダム& スパ
- ⑩ 田中久陽, 分散無線ネットワークの同期の現状と課題 -- 数理の観点から見た興味 --, 北大電子科学研究所 情報数理研究室NSCセミナー, 2009年5月1日, 北海道大学
- ⑪ 田中久陽, ネットワークと同期の科学と錬金術 -- 田中(久)研紹介 --, 第9回AWCCセミナー, Advanced Wireless Communication reserach Center, 2008年10月1日, 電通大
- ⑫ 米倉一堂, 田中久陽, 篠原健太, 実環境を想定したセンサネットワークにおける時刻同期手法, FTSPの実験検証と改良手法,

- 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 361, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑬ 菊地正隆, 田中久陽, 省電力ユビキタス・センサネットワークにおける衝突回避型ブロードキャスト手法の提案, 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 362, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑭ 菊地淳弘, 宮崎紀子, 田中久陽, ノイズ耐性のある位相応答曲線推定手法の提案, 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 38, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑮ 明石和陽, 篠原健太, 田中久陽, 車車間通信における車群融合時を想定した時刻同期手法の性能解析, 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 360, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑯ 手塚清豪, 田中久陽, 実験データに忠実なホタルの集団明滅モデル, 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 35, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑰ 篠原健太, 田中久陽, 車車間通信における「モードロック状態」を解消するタイミング同期手法, 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 359, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑱ 近藤悠太, 田中久陽, 真性粘菌の子実体形成前におけるネットワークダイナミクスについての実験検証, 電子情報通信学会2008ソサイエティ大会, 33, 2008年9月16--19日, 明治大学 生田キャンパス
- ⑲ Yuta Kondo and Hisa-Aki Tanaka, Do Amoebae Climb Before Fly?—Environmental Adaptation Ability in the True Slime Mold before Sporulation—, Dynamics Days Asia Pacific 5, DDAP5, The 5th International Conference on Nonlinear Science, 203--204, 2008年9月12日, Nara, Japan
- ⑳ Atsuhiko Kikuchi, Noriko Miyazaki, Hisa-Aki Tanaka, Estimation of phase resetting curves by entrainment to small periodic injections, Dynamics Days Asia Pacific 5, DDAP5, The 5th International Conference on Nonlinear Science, 213, 2008年9月12日, Nara, Japan
- ㉑ Kiyotake Tetsuka and Hisa-Aki Tanaka, An experimentally faithful model for synchrony in the firefly *P. effulgens*, Dynamics Days Asia Pacific 5, DDAP5, The 5th International Conference on Nonlinear Science, 210, 2008年9月12日, Nara, Japan
- ㉒ Kenta Shinohara and Hisa-Aki Tanaka, Mode-Lock Eliminating Timing Synchroni-

zation Algorithm for Intervehicle Ad-hoc Networks, Proceedings of 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA 2008, 720--723, 2008年9月10日

- ㉓ Kenta Shinohara and Hisa-Aki Tanaka, Mode-Lock Eliminating Timing Synchronization Algorithm for Intervehicle Ad-hoc Networks, Proceedings of 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA 2008, 720--723, 2008年9月10日, Budapest, Hungary

[産業財産権]
○出願状況 (計6件)

名称: 通信装置, 及び通信方式
発明者: 田中久陽, 篠原健太
権利者: 同上
種類: 特許出願
番号: 特願 2010-105851
出願年月日: 平成22年4月29日
国内外の別: 国内

名称: 無線通信装置, 及び無線通信システム並びに送信タイミング制御方法
発明者: 田中久陽, 手塚清豪
権利者: 同上
種類: 特許出願
番号: 特願 2010-89238
出願年月日: 平成22年4月8日
国内外の別: 国内

名称: 通信装置、通信システム及びタイミング制御方法
発明者: 田中久陽, 篠原健太
権利者: 同上
種類: 特許出願
番号: 特願 2009-98353
出願年月日: 平成21年4月14日
国内外の別: 国内

名称: 発振器の内部機構の推定方法、推定プログラム及び推定装置制御方法
発明者: 田中久陽, 菊地淳弘, 宮崎紀子
権利者: 同上
種類: 特許出願
番号: 特願 2008-320113
出願年月日: 平成20年12月16日
国内外の別: 国内

名称: 情報処理装置及び方法、プログラム、並びに通信方法
発明者: 田中久陽, 菊地正隆, 木村崇之
権利者: 同上
種類: 特許出願

番号：特願 2008-286881
出願年月日：平成 20 年 11 月 7 日
国内外の別：国内

名称：通信装置、移動体通信システム及び通信方法

発明者：田中久陽，篠原健太

権利者：同上

種類：特許出願

番号：特願 2008-149626

出願年月日：平成 20 年 6 月 6 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 久陽 (TANAKA HISAKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究
科・准教授

研究者番号：20334584

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし