

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560440

研究課題名（和文）：センサネットワークにおける動的位置計測の高精度化と
高度利用に関する研究研究課題名（英文）：A Study on Precise Dynamic Localization and
its Advanced Application for Wireless Sensor Networks

研究代表者

大山 真司 (OHYAMA SHINJI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00242272

研究成果の概要（和文）：本研究では、無線センサネットワークにおけるセンサ端末の動的位置計測を念頭に、無線センサ端末間の電波飛行時間計測について、端末の動作クロック信号に対してバーニヤ効果を応用した新たな高分解能飛行時間計測原理を提案した。さらにその一般化を図るとともに、実験的評価をとおしてその有効性を確認するに至った。また、同じバーニヤ効果の原理に基づきつつ、よりセンサネットワークの枠組みに適した相互通信に基づく飛行時間計測方式を考案すると同時に、飛行時間計測の非同時間問題についても検討を加えた。最後に、無線端末位置と物理量の計測情報の同時獲得するための無線センサ端末を設計・製作を試みた。

研究成果の概要（英文）：In this study, for dynamic position measurement of sensor nodes in wireless sensor networks, novel high resolution RF Time-of-Flight (ToF) measurement principle between the sensor nodes is proposed, which applies 'vernier effect' to operation clock of the nodes. While the proposed ToF measurement principle has been generalized, its validities are confirmed through several experimental conditions. In addition, advanced ToF measurement method on which non-synchronized mutual communications are operated is also proposed, which is more suitable for the wireless sensor network schemes regardless the same 'vernier effect' is applied. Furthermore, asynchrony problem of ToF measurement has been discussed, and finally, prototype sensor node boards are fabricated for simultaneous acquisition of node position and physical measured quantities.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：センサネットワーク, ToF計測, バーニヤ効果, 非同時間問題

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワークにおける位置

計測分野の研究について見渡すと、無線センサ端末の移動を伴わない、いわゆる静的

位置計測に関しては、これまでにいくつかの成果が報告されてきた。しかしながら端末の移動を伴う、動的な位置計測法に目を向けてみると、新たなハードウェアを付加することなく十分な位置計測精度を達成した例は無く、決定的手法は提案されていないのが現状であった。一方、無線センサ端末に限定すること無く、移動体の動的な位置計測法という視点であっても、モバイルロボットのためのデッドレコニング以外に有用な方法の提案は無く、有用な計測法が望まれていた。

このような背景の下、我々は無線センサ端末の静的な位置計測実現法として、無線センサネットワークの限られた枠組みの中で利用可能なリソースのひとつである無線通信情報に着目した、「受信電波強度の大小関係に着目した位置計測法」を提案してきた。本研究は、提案してきた位置計測方法を、動きを伴う無線センサ端末の位置計測へ拡張的・発展的に応用することによって高精度・リアルタイムに動的な位置計測が実現できるのではないか？との着想が原点にある。すなわち、位置推定の基本的な考え方は従来研究より継承しつつ、端末の移動に伴って生じる種々の影響を考慮に入れることで、動的な位置計測法の構築を目指すものであった。

2. 研究の目的

本研究では、小型・軽量・小電力・安価な端末などに代表される無線センサネットワークの特徴的な枠組みの中で、無線センサ端末の位置計測を高精度かつリアルタイムに実現する動的な位置計測方法について検討すること、さらには、それら位置情報とセンサ端末で獲得される計測情報とを融合した高度利用につき俯瞰することを最終的な目標に据えている。

本研究の範囲では、静的な位置計測方法を拡張的に応用すること、すなわち複数端末間距離情報に基づいた距離方程式(不等式)を解くという静的な位置計測のための基本原理は継承しつつ、動きをともなった無線端末の位置計測＝動的な位置計測に際して、時々刻々の位置推定を実現するために顕在化してくる種々の影響を考慮に入れていくことで、センサネットワークの枠組みを逸することのない簡便な構成を基本とした動的な位置計測技術の構築を目指す。具体的には、位置計測の高精度化という視点から「正確な距離情報収集に関する問題」を、またその動的な位置計測への拡張に際しては「端末移動に伴う距離情報収集の非同時問題」に焦点を定め、検討を進めていく。

さらに、同様のアーキテクチャでセンシング情報と距離情報を同時に収集するため

の方法についても検討を加え、位置情報へセンシング情報を融合させた高度利用法実現に向けた可能性も探る。

3. 研究の方法

本研究では、主に動的な位置計測技術の構築を中心に検討を進め、それらの技術の構築に一定の目途が立ったところで、センサ端末において獲得される計測情報と位置情報を融合する高度利用法に関する議論を進めることとした。

はじめに、我々が提案してきた静的な位置計測法を応用し、高精度・リアルタイムな位置計測を実現するためには、具体的な項目として以下の2つの課題への着目が必要と考えた。

- A. センサ端末間無線通信時の正確な受信電波強度(RSSI)情報獲得に関する問題
- B. 受信電波強度(RSSI)情報収集の非同時問題

課題Aでは、はじめに、通信経路の干渉・遮蔽によるRSSI情報への影響度を明らかにするとともに、影響を受けたRSSI情報の選別を試みることにした。一方でこれらが難しい場合には、RSSI情報に代え、無線通信時間を基にした距離情報を利用する位置計測法への方針転換を検討する。(「4. 研究成果」にて後述するが)これらの検討を経て、位置推定方法の基本原則を「RF飛行時間(ToF)による絶対距離情報を利用した距離方程式に基づく方法」へと変更することとした後は、「バーニヤ効果に基づく高精度時間計測原理」につき、OWR(One Way Ranging)型の計測方式の原理的な有効性を実証する。並行して、最良の分解能をもたらす2つのクロック周期の最適設計論について整理を済ませ、実験を通してそれらの有効性検証までを実施する。さらには本バーニヤ効果に基づいたToF計測方式の考え方を推し進め、TWR(Two Way Ranging)型の計測方式に基づく無線端末間同期を不要とするToF計測方式に関する検討を加える。

続いて課題Bでは、端末間距離(=ToF)情報の収集が同時に行えない「非同時問題」に加えて、各無線端末同士が非同期であるため、各無線端末に付随する時刻情報がシステム時刻とは一致しないといった「非同期問題」も顕在化する。本研究ではこれら「非同時問題」と「非同期問題」を切り分け、本研究の範囲ではToF計測の「非同時問題」について扱う。具体的には、離散的な位置推定タイミング間における端末の運動をモデル化し、収集時間差を考慮に入れた推定方法についてシミュレーションを中心とした検討を実施する。

以上、2つの課題をクリアした後、課題Cとして、無線端末位置と物理量の計測情報の同時獲得するための無線センサ端末の実験装置を構成する。計測情報の効果的な高度利用法を考えるための基礎的検討として位置計測・情報収集実験を試み、情報を同時収集することの有効性を明らかにするとともに、その高度利用法に関する考察を加える。

4. 研究成果

課題Aについては、先行研究より議論してきた距離不等式に基づく位置推定法において、主として図1に示すようなRSSI減衰特性の信頼性に依存すると考えられる、距離ひいては位置推定精度の悪化が見受けられていた。

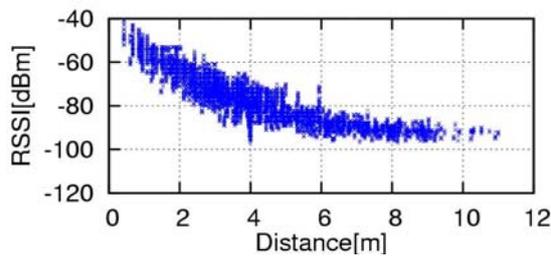
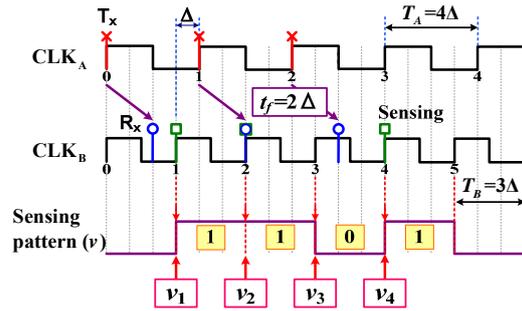


図1: 距離-RSSI 特性(実験値)

そこで、人体等による無線端末の通信経路遮蔽がRSSI情報へ及ぼす影響の実験的調査と、影響を受けたRSSI情報選別法の検討を進めた結果、それらの影響は無視できないことが判明するとともに、信頼性の低下したRSSI情報の除去が位置推定精度向上へ効果的なことを確認した。しかし、遮蔽物の配置が未知な実問題では獲得されたRSSI情報の信頼性評価は困難であったため、本研究での距離不等式の利用を断念し、RF飛行時間(ToF)計測を基にした絶対距離情報を利用する距離方程式に基づいた位置推定を検討することとした。

ToFに基づく絶対距離計測方式では、極短い電波のToFを捕らえられる高い時間計測分解能が必要とされる。そこで本研究では、無線センサネットワークの限られた枠組みの中での計測の実現に向け、「バーニヤ効果に基づく高精度時間計測原理」を提案した。これは、送受信を行う無線端末間で異なる処理クロック周波数(周期)を利用することで、それらクロックの周期差に相当する時間計測分解能を実現することが可能な、高分解能な時間計測原理である。本原理では、図2に示すような端末間で送受信を繰り返した際のセンシングパターンに基づき、基となる動作クロック信号の周期を大幅に超えた高精度時間計測システムを実現可能であることが示された。



	v	v_1	v_2	v_3	v_4
$0 < t_f \leq \Delta$		1	1	1	0
$\Delta < t_f \leq 2\Delta$		1	1	0	1
$2\Delta < t_f \leq 3\Delta$		1	0	1	1

図2: センシングパターンに基づくToF計測

本原理の有効性を検証するために、図3のようにRF送受信装置およびRFミラー装置を新たに設計・製作し、OWR型のToF計測方式による実験システムを構築してToF計測を試みた。図4に結果を示すように、設計通りの時間計測分解能をもつToF計測システムが構築可能なことを確認し、無線センサ端末の位置計測精度向上への足掛かりを得るに至った。

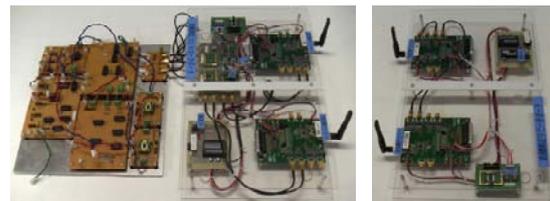
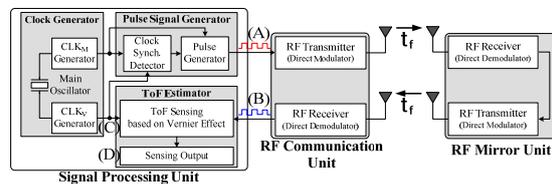


図3: RF-ToF計測装置の構成と写真

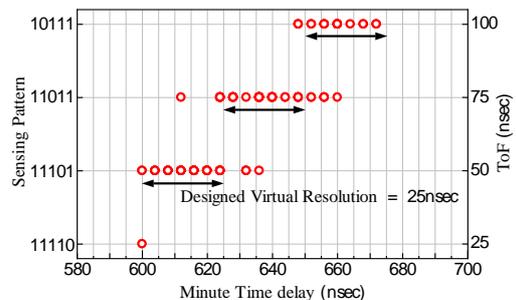
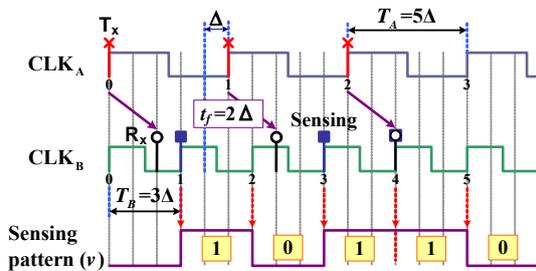


図4: 距離-ToF計測結果(実験値)

なお、本 RF-ToF 計測系の実現には、特殊な位相関係を満たす異周期の動作クロック信号生成回路の電子回路設計も併せて実施した。

一連の実験評価をとおり、基本的なバーニヤ効果に基づく高精度時間計測原理では設計どおりの時間計測分解能が達成できることを確認するに至ったものの、一方で時間計測分解能の向上には、2つの処理クロックの周期差を詰めていく必要があり、市販のクロックデバイスでは賄えなくなるなど、センサネットワークへの適用は現実的で無い。そこで分解能向上の基本原理は変えることなく、必要な計測分解能を実現するためのクロック周期の最適設計論について整理すると同時に、実験を通して有効性の検証を試みた。この結果、 m および n を互いに素な自然数とするとき、送受信機の動作クロック周期を $m:n$ に設計することによって2つのクロック周期比における仮想分割時間 ($=T_A/m = T_B/n$) を分解能とする ToF 計測が実現可能であることを見出し、一般化を図ることに成功した。

図5はそのようなひとつの設計例として $m=5, n=3$ の場合を挙げたものであるが、より自由度が高く低周波数の動作クロック信号の組み合わせを用いながらも、基本的なバーニヤ効果に基づく原理と同等以上の時間計測分解能を達成できることを明らかにした例といえる。この成果によって、提案する高精度時間計測原理のセンサネットワークの枠組みへの適用可能性がより広げられることとなった。



v	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
$0 < t_f \leq \Delta$	1	1	0	1	0
$\Delta < t_f \leq 2\Delta$	1	0	1	1	0
$2\Delta < t_f \leq 3\Delta$	1	0	1	0	1

図5: センシングパターンに基づく ToF 計測(一般化)

ここまで議論を進めてきたの OWR 型の ToF 計測方式では、ToF 計測の対象となる無線端末間でのクロック同期、あるいはそれに代わる RF ミラー方式のような何らかの機構が必要となり、センサネットワークの枠組みを逸脱する可能性がある。そこで

OWR 型による時間計測分解能向上の考え方を基本としつつ、現実のセンサネットワークへの適用を念頭において、計測時の RF 端末間同期の必要性を排除することが可能な TWR (Two Way Ranging) 型の ToF 計測方式実現するための検討を進めた。

本研究の範囲では、2つの実現方式を提案すると共に、その実現可能性を、計算機シミュレーションによって評価した。具体的には、図6に模式的に示したような、典型的な TWR 型 ToF 計測方式における時間計測へ「バーニヤ効果に基づく高精度時間計測原理」を融合した方式と、図7に示したような、シングア라운드型 ToF 計測方式に異周期動作クロックを適用することでバーニヤ効果を生成させる方法を提案した。その結果、いずれの方法に基づいても、端末間同期の必要性を排しながらも OWR 型と同等の時間計測分解能を実現できることまでを明らかにした。

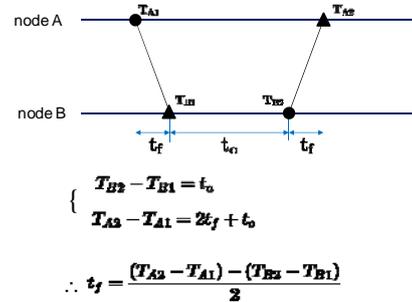


図6: TWR 型 ToF 計測法(1)

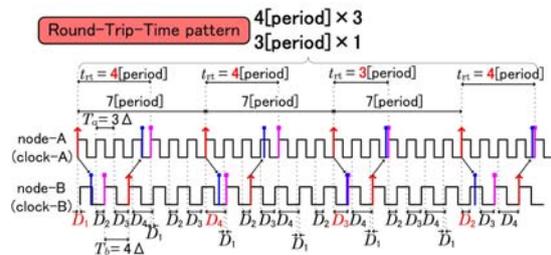


図7: TWR 型 ToF 計測法(2)

一方の課題 B については、距離情報収集の非同時問題については、無線端末間の距離情報獲得タイミングの時差が位置推定結果へと及ぼす影響を評価すべく、その性質に関して解析的な議論を実施した。さらにそれらの影響を低減するための重み付き最小二乗に基づいた位置推定法を提案するとともに、情報獲得周期や獲得時差の条件を変動させたシミュレーション的な検証を行い、図8に示したように、その有効性を確認するに至った。

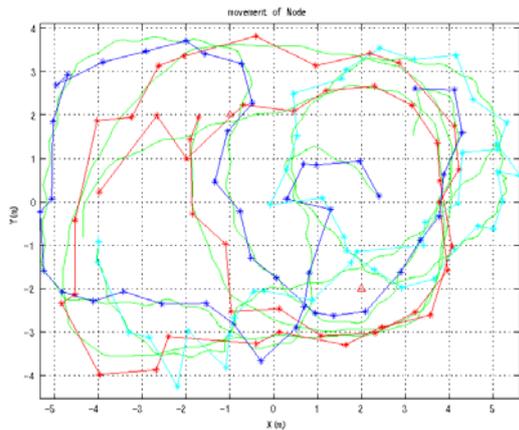


図 8: 距離情報収集に時差がある場合の位置推定結果例

最後に課題 C では、図 9 に示したような無線端末位置とセンシング情報の同時獲得も可能な、新たな RF 波形解析装置を設計・製作した。本装置は温度や加速度などの各種物理情報獲得のためのセンサを搭載可能であるほか、選択的にではあるもの、これまでは図 3 に示したプロトタイプ RF 実験装置を利用して ToF 計測分解能向上効果を実証してきた OWR(RF ミラー)型の ToF 計測システムとしてだけでなく、RF 端末間のクロック同期が不要な TWR 型の ToF 計測システムとしても動作させることが可能である。すなわち、今後の研究進展に際した様々な実験条件への柔軟な対応が可能で多機能性を有したプラットフォームとして設計されたことが特徴といえる。動作確認として OWR 型の時間計測を試みたところ所望の動作をすることが確認でき、将来のセンシング情報と位置情報を融合させた高度利用に関する実験へ運用可能であることを示した。



図 9: RF 波形解析装置の構成と写真

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 5 件)

- (1) Sang Il Ko and Shinji Ohyama: A Novel RF Time-of-Flight Measurement with Fine Resolution based on Vernier Effect for Wireless Sensor Network Localization, Chinese Journal of Scientific Instrument, (accepted) (査読有),2012 (掲載確定)
- (2) M. Amin Rahimian and Shinji Ohyama: Data Acquisition Latency in Dynamic Localization: A Weighted Least Squares Approach, Sensors & Transducers, (accepted) (査読有),2012
- (3) Sang-Il Ko, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: Proposal of Generalized Vernier Effect and Its Practical Advantage for RF Time-of-Flight Ranging between Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks, Sensors & Actuators A, Vol.167, No.2, pp. 537/547 (査読有),2011
- (4) Sang-Il Ko, Go Aikawa, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: A High-Precision RF Time-of-Flight Measurement Method based on Vernier Effect for Localization of Wireless Sensor Networks, Sensors & Transducers, Vol.135, No.12, pp. 27/41 (査読有),2011
- (5) 高山潤也, Ko Sang-Il, 大山真司: 一般化バーニア効果と RF 伝播時間計測への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.47, No.12, pp. 597/605 (2011) (査読有)

[学会発表] (計 9 件)

- (1) Jun-ya Takayama, Hong-Phuoc Thanh, Sang-Il Ko and Shinji Ohyama: Development of Prototype Sensor Nodes with High-accuracy Ranging for Localization on Wireless Sensor Networks, Proc. of IEEE International Conference on Sensors 2011, , 2011/10/31,Limerick(Ireland)
- (2) 西郷雄祐, Ko Sang-Il, 高山潤也, 大山真司: 異なる動作周波数を用いた TWR に基づく RF 距離計測, 第 28 回センシングフォーラム, 2011/10/14,横浜市
- (3) Sang-Il Ko, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: Generalized Vernier Effect and its Application to Precise RF Time-of-Flight Measurement for Wireless Sensor Networks, Proc. of IEEE International Conference on Sensors 2010, 2010/11/03,Waikoloa (USA)
- (4) Ko Sang-Il, 相川剛, 高山潤也, 大山真司: 一般化したバーニア効果による高精度伝播時間計測と無線センサネットワークへの応用, 第 27 回センシングフォーラム, , 2010/09/27,群馬大学

- (5) Sang-Il Ko, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: Synchron-Free RF Time-of-Flight Measurement System for Wireless Sensor Networks Based on Vernier Effect, Proc. of SICE Annual Conference 2010, 2010/08/19, Taipei (Taiwan)
- (6) Sang-Il Ko, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: RF time of flight measurement based on vernier effect for short distance ranging, Proc. of IEEE International Conference on Sensors 2009, 2009/10/27, Christchurch (New Zealand)
- (7) Sang-Il Ko, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: Experimental Study on Time of Flight Measurement System Based on Vernier Effect, Proc. of 26th Sensor Symposium, 2009/10/15, Tokyo
- (8) Ko Sang-Il, 高山潤也, 大山真司: バーニア効果に基づく RF 飛行時間計測のための基礎的研究, 第26回センシングフォーラム, 2009/09/29 (査読無), Tokyo
- (9) Sang-Il Ko, Jun-ya Takayama and Shinji Ohyama: Short range measurement using RF signal propagation time based on vernier effect, Proc. of ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009/08/19, Fukuoka

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大山 真司 (OHYAMA SHINJI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00242272

(2) 研究分担者

高山 潤也 (TAKAYAMA JUN-YA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：50323796

(3) 連携研究者 該当なし