

照明制御を用いた無線センサノードの時刻同期手法の提案

長光 翔一^{1,a)} 間 博人^{2,b)} 奥西 亮賀^{1,c)} 本谷 陽^{1,d)} 三木 光範^{2,e)}

概要：無線装置を内蔵した多数のセンサが相互に連携することで、照度、気温、湿度、加速度などのセンサデータを収集することを可能とする無線センサネットワークは、様々な分野での利用が期待されている。センサネットワークにおける実世界のアプリケーションでは、高いセンシング精度への要求から各センサノード間で時刻同期を取ることが求められており、様々な時刻同期プロトコルが提案されている。しかしながら、これまで提案されてきたセンサネットワークにおける時刻同期プロトコルはパケットの送受信が伴うためエネルギー消費やネットワーク負荷の観点から利用には制約がある。一方、オフィスにおける照明環境を改善することで、知的生産性の向上や快適性の向上が期待されている。我々の研究室で研究・開発を行っている知的照明システムでは、各照明の明るさを照度センサから得ることで、執務者にとって最適な光環境を提供する。本研究では、照明制御を行い照度センサから得られた値を用いて時刻同期を行うことで、執務者の快適性を維持しつつ、パケットの送受信を行わないセンサノード間の時刻同期の実現を検証した。また、提案手法を用いた場合における時刻同期の精度誤差を検証した。

1. はじめに

無線センサネットワークは、無線装置を内蔵した多数のセンサが相互に連携することで、実空間の情報の収集を可能とする技術である。無線センサネットワークによって、これまでの有線系によって実現したシステムを大幅に低コスト化し、従来では計測が不可能であった事象を細かく観測することが可能となる。

無線センサネットワークでは、データの時間的整合性を取るためや、省電力プロトコルの実現のためなどに時刻同期が必要である。無線センサネットワークにおける実空間のアプリケーションでは、高いセンシング精度への要求から無線センサノード間で時間的整合性を取ることが重要な課題であり、様々な時刻同期プロトコルが提案されている [1]。これまでも、衛星を利用した GPS (Global Positioning System) を用いた時刻同期手法や、インターネットでの時刻同期を目的とした NTP (Network Time Protocol) [2] など、時刻同期に関する研究は数多く行われ

てきた。しかしながら、電源の制約やノードの多様性を持つ無線センサネットワークにおいては、必ずしも最適なプロトコルとは限らない。そこで、伝搬遅延が小さい無線センサネットワークの特徴を利用した、TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) [3], RBS (Reference Broadcast Synchronization) [4], および FTSP (Fooding Time Synchronization Protocol) [5] などのプロトコルが提案されている。しかしながら、それらのプロトコルではパケットの送受信を伴うため、エネルギー消費やネットワーク負荷の観点から利用には制約がある。

一方、近年、東日本大震災などの影響により、消費電力量を削減することに注目が集まっている。特に、オフィスビルの消費エネルギーは年々増加傾向にあり、オフィスビルにおける省エネルギー化が望まれている。オフィスビルでは、照明による電力コストがビル全体の約 40% を占めており [7], 照明に対する省エネルギー化は重要な課題である。この課題を解決する照明制御システムとして、著者らが研究開発を行っている知的照明システムが挙げられる [8], [9]。知的照明システムはマイクロプロセッサが組み込まれた複数の調光可能な照明器具、複数の無線照度センサおよび電力計を同一ネットワークに接続し構成される。各照明が自律的に明るさを変更することで、任意の場所に各執務者が要求する明るさを個別に提供する。この知的照明システムの導入により、光環境を改善し、オフィスにおける照明の消費電力の削減が可能となる。

現在、知的照明システムでは、各無線センサノードが照

¹ 同志社大学大学院理工学研究科, 京都府
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ, 1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi Kyoto, 610-0394 Japan

² 同志社大学理工学部, 京都府
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ.

a) snagamitsu@mikilab.doshisha.ac.jp

b) haida@mail.doshisha.ac.jp

c) rokunishi@mikilab.doshisha.ac.jp

d) ymotoya@mikilab.doshisha.ac.jp

e) mmiki@mail.doshisha.ac.jp

度センサを持ち、照度センサから一定間隔で照度を取得する [13]. 得られた照度データは知的照明システムの制御に用いられるだけでなく、位置情報の推定や外乱の推定などに利用される [10]. しかしながら、無線センサノード間で時刻同期を行っていないため、無線センサノード間で時間的誤差が生じる。よって、知的照明システムにおいても無線センサノードの時間的整合性を取る必要がある。

また、オフィスにおける無線センサノードの利用の課題点として、無線センサノードのバッテリー交換のコストの問題、人や遮蔽物の影響によって無線通信環境が不安定になる問題などが挙げられる。特に、無線通信環境の悪化によってネットワーク負荷が大きくなりパケットロスが連続的に発生した場合には、従来の時刻同期手法では時刻同期が実現できないだけでなく、パケットの送信回数が増加し、さらにネットワーク負荷が大きくなる可能性が考えられる。従って、パケットの送受信を行わない時刻同期の実現が重要な課題である。

本研究では、調光可能な照明と無線センサノードに搭載された照度センサを利用して、パケットの送受信を行わない時刻同期手法 TPLC (Timing-sync Protocol based Lighting Control) を提案する。外光などの照明以外の外的要因による光の影響を考慮しない場合における、TPLC を用いた無線センサノード間の時刻同期の実現や時刻同期誤差を検証した。

2. 既存の無線センサネットワークにおける時刻同期手法

2.1 無線センサネットワークにおける時刻同期の必要性

無線センサネットワークでは、データの時間的整合性を取るためや、省電力プロトコルの実現のためなどに時刻同期が必要である。そのため、無線センサネットワークにおける時刻同期については、数多くの研究が行われている。これまで行われてきた研究としては、TPSN や RBS, FTSP などが挙げられる。これらは無線センサネットワークに特化した時刻同期プロトコルで、比較的単純な仕組みで高度な同期が実現可能である。特に FTSP は、無線センサノード間での一方向通信のみで時刻同期を実現しており、その同期精度は平均で約 1.4 us であるといわれている。

2.2 Reference Broadcast Synchronization

RBS はパケットのタイムスタンプを用いず、相対的な時間をやりとりすることで高い精度の時刻同期を達成する手法である [4]. RBS は、パケットの受信側で時刻同期を行う。RBS のサーバは「参照パケット」と呼ぶパケットを定期的にブロードキャスト送信する。ブロードキャストでの送信であるので、参照パケットは通信範囲に存在する複数のクライアントに受信される。クライアントは参照パケットを受信すると、それぞれのローカルタイムで受信時刻を

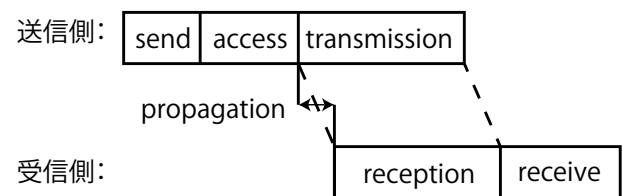


図 1 無線センサノードにおける送受信側でのパケットのタイムスタンプ取得 [5]

記憶する。各受信ノードは、受信ノード同士で受信した時刻の交換を行う。そのため、近傍の無線センサノード同士が時刻同期を行う際に有効な手法である。

このように時刻情報をやりとりすることで、図 1 に示す send, および access で発生する誤差を無視することができる。ネットワーク内の受信ノード間で情報をやりとりするため、ノード数が多いほど時刻同期精度は向上する。しかし、ノード数が多くなればなるほど、やりとりする情報が多くなるため、無線センサノードの消費電力が上昇するという欠点がある。RBS を MICA Mote に実装して実験した結果、平均約 30 us の精度で時刻同期が可能であることが確認されている。

2.3 Fooding Time Synchronization Protocol

FTSP はシングルホップ時に発生する時刻誤差をすべて抽出し、それらを削減することで時刻同期精度の向上を図った手法である [5]. シングルホップで発生する時刻誤差には、伝搬遅延で発生する誤差や計算処理によって発生する誤差などが挙げられる。それらの誤差を削減する方法として、送信側と受信側で MAC 層でタイムスタンプを取る。送信側と受信側のタイムスタンプを transmission, reception 時に取ることで、送信側と受信側のタイムスタンプ取得時間の誤差を削減し、さらに図 1 に示す send, access, および receive 時の時刻誤差を無視することが可能となる。また、片方向のみのパケット通信で実現できる利点を利用し、ネットワーク全体にパケットを送信することで、ネットワーク全体の時刻同期を実現できる。

FTSP を Mica2 に実装した結果、1.4 us, 最大 4.2 us の時刻誤差で時刻同期を実現できることが確認されている。しかしながら、FTSP では、パケットロスなどの無線通信の不安定さを考慮していない。また、パケットの送受信を行うことで、無線センサノードの消費電力の増加が懸念される。

3. Timing-sync Protocol based Lighting Control

3.1 無線センサノードを用いた照度取得

本研究で提案する TPLC では、パケットの送受信を行わない時刻同期プロトコルを用いる。TPLC では照明の明るさ (光度) を変化させることで、照度センサが感知する明

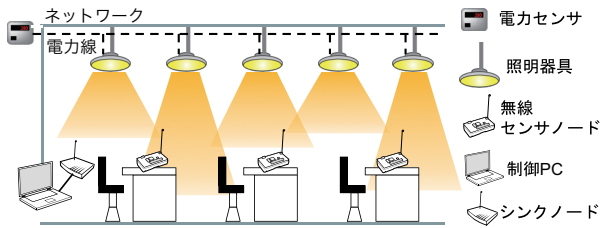


図 2 知的照明システムの構成イメージ

るさ（照度）を変化させ、照度変化量から時刻同期を実現する。従って、TPLC のアルゴリズムを提案するために、光度変化時の照度変化の推移を調査する必要がある。

調光可能な照明と照度センサを用いるシステムとして、知的照明システムなどが挙げられる。知的照明システムは任意の場所に執務者が要求する照度を、照明が自律的に提供するシステムである。図 2 に示すように調光可能な照明器具、無線センサノード、シンクノード、制御 PC、および電力計で知的照明システムが構成されている。知的照明システムでは無線センサノードに搭載された照度センサを用いて現在照度を取得する。得られた照度値を制御 PC に送信し、その照度値と執務者が要求する照度値、および電力値から適切な照明の点灯パターンを決定、その点灯パターンに向かって各照明が自律的に明るさを変更する。その際、執務者が感知できない範囲で徐々に照明の光度を変化させることで、執務者の快適性を維持している。その変化量は、先行研究により、照度変化量が現在照度の 7% 以内であれば、人は感知できないことが確認されている [6]。

TPLC でも、オフィス環境での利用を想定し、執務者の快適性を維持するために、現在照度の 7% 以内の変化量を与え、時刻同期を実現する。

3.2 無線センサノードを用いた照度推移実験

現在照度の約 7% 以内の変化量を与えた場合に、無線センサノードに搭載された照度センサが得る照度値がどのように推移するかを検証する。本実験では、無線センサノードとして Crossbow 社の MOTE MICAz を使用した [11]。MOTE MICAz に汎用外部センサ基盤である MDA088 を設置し、リードタイプの NaPiCa 照度センサ [12] を組み込むことで、照度値を取得可能とする。その際の MDA088 と NaPiCa 照度センサの間における抵抗は 430 Ω とする。本実験では、照度センサの照度取得間隔を 100 ms、および 10 ms に設定した。

本実験は同志社大学香知館の知的システム創造環境実験室にて行い、白色蛍光灯 15 灯と無線センサノード 1 個を用いた。実験環境の俯瞰図を図 3 に示す。また、実験風景を図 4 を示す。なお、照明と無線センサノードの距離は照明の垂直直下に無線センサノードを置いた場合、1.9 m である。無線センサノードは、照明番号 7 番の直下の場所に配置し、照明番号 7 番のみを調光し、光度を変化させた。

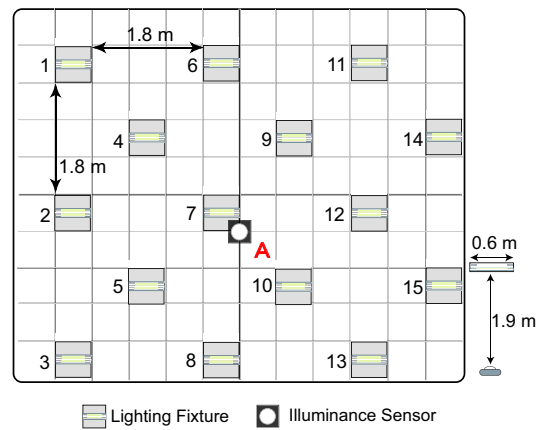


図 3 照度取得実験環境



図 4 照度取得実験風景

なお、NaPiCa 照度センサは分解能が低く、得られた照度値は信頼度の高い値ではない。従って本実験では、高精度で照度が取得可能な ANA-F11 照度センサを用いて NaPiCa 照度センサで得た照度値を補正した。補正式を次の式 (1) に示す。

$$Illana = 2.096 * Illnapica + 17 \quad (1)$$

$Illana$: ANA-F11 で得た照度 [lx]

$Illnapica$: NaPiCa 照度センサで得た照度 [lx]

机上面照度が ANA-F11 で 500 lx となる環境下で、照度を 500 lx の 3% である 15 lx 上昇させ、その 6 秒経過後に元の照度に戻した場合の照度の推移を取得した。なお、外光や PC の光など照明以外の光が照度センサに影響を与えない環境下で行った。

図 5 に照度取得間隔が 100 ms の場合、図 6 に照度取得間隔が 10 ms の場合のある時間における照度推移の履歴を示す。

図 5、図 6 からわかる通り、現在照度の 7% 以内の僅かな照度変化でも、NaPiCa 照度センサが照明の光度変化を感知していることがわかる。また、100 ms では矩形波のように照度が変化しているが、10 ms では緩やかな曲線を描いて照度が変化していることがわかる。この実験結果を用いて、TPLC の時刻同期アルゴリズムを提案する。

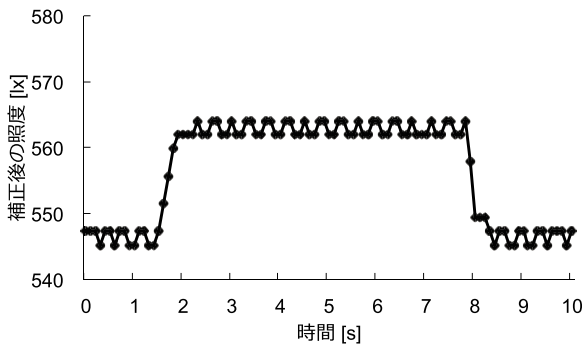


図 5 100 ms 間隔で取得した照度履歴

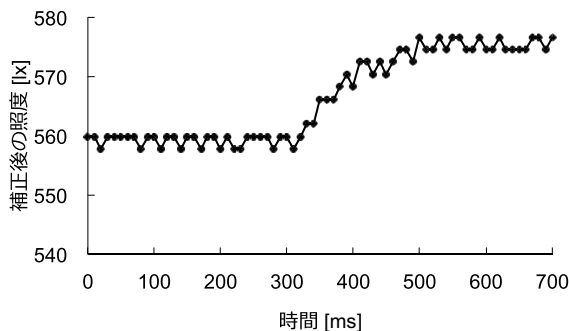


図 6 10 ms 間隔で取得した照度履歴

3.3 時刻同期アルゴリズム

TPLC の時刻同期アルゴリズムについて述べる。なお、本研究では外光などの照明以外の光が照度センサに影響を与えない環境を想定して、時刻同期アルゴリズムを提案する。

照度データには、パケットには含まれるタイムスタンプなど、時間情報がない。そのため、照度センサが得た照度値で時刻同期タイミングを図るには、何らかの時間的情報を暗示的に照度センサに与えることが必要である。そこで TPLC では、照明の光度を変化させ照度値に揺らぎを与え、その変化を感知させることで時刻同期タイミングを図る。しかし、図 5 からわかる通り、同じ光度で照明が点灯している場合にも、照度値には誤差が発生し、照度値に揺らぎが発生している。よって、誤差と判断しない程度、なおかつ執務者が不快に感じない程度の照度変化で照度値に変化を与える必要がある。

従って、TPLC では時刻同期を行う際に僅かな光度変化を与え、光度変化前の照度値と光度変化後の照度値が定められた値に変化した際に時刻同期を行う。時刻同期タイミングを図るための照度変化量を式 (2) に示す。

$$Illc = Illn - Illp \quad (2)$$

$Illn$: 現在照度 [lx]

$Illt$: 照度変化が起こる前の照度 [lx]

$Illc$: 照度変化量 [lx]

次に、時刻同期を行うまでのフローを述べる。照明はあ

らかじめ一律で点灯しているとし、無線センサノードを照度取得間隔以内で同時に電源を入れたとする。まず、照度取得間隔で現在照度を取得する。取得した現在照度値と前回取得した照度値から照度変化量を式から求め、その照度変化量があらかじめ定めた値であれば時間同期を行う。なお、下記のフローを 1 ステップとする。

- (1) 照度センサが現在照度を取得する
- (2) 照明が現在光度から $x\%$ (ただし、 $x < 7\%$) だけ光度値を上昇させる
- (3) 照度センサが照度変化を感知した場合、照度変化前後の照度変化量を計算する
- (4) 照度変化量が定めた値であれば、(1) で取得した照度と照度変化後の照度を保持する
- (5) 1 ステップと 2 ステップ目で照度変化前後の照度値が誤差の範囲内で等しい場合、無線センサノードで時刻同期を行う
- (6) 照明が光度値を光度変化前に戻し、(1) へ

上記の動作を行い、TPLC では時刻同期を実現する。なお、上記のフロー (4) を行う理由として、照度変化量が定めた値よりも大きく上昇した場合にも照度変化が発生したとして認識し時刻同期を行ってしまう可能性があるため、1 ステップ前の時刻同期ポイント後の照度値を参照することで、時刻同期ポイントの誤認識を防ぐ目的がある。

本研究に関連のあるシステムとして、可視光通信システムが挙げられる [14]。可視光通信システムとは、照明光や信号機の LED を高速に点滅させて情報伝送を行うシステムである。照明光などを人が認知できない速度で高速に点滅させることで、利用者の快適性を損なうことなく、情報の伝達が可能となっている。また、室内照明の光で情報の伝達を行うため、無線通信に比べ、よりセキュアな通信が可能である。例えば、外部からの盗聴を防止するためにカーテンを閉めるなどの光を遮断するだけで情報を守ることができる。しかしながら、可視光通信システムでは、照明光の点滅を情報として発信、および受信するための専用の機器が必要となる。本研究で提案する TPLC は、専用の受信機など、知的照明システムに必要な照度センサ以外の特殊な外部装置を必要としないため、導入が容易である点が利点として挙げられる。

4. 時刻同期誤差の検証実験

4.1 TPLC における時刻同期誤差の実験概要

TPLC を無線センサノードに実装し、時刻同期誤差の検証を行った。実験環境は同志社大学香知館の知的システム創造環境実験室で行い、白色蛍光灯 15 灯と無線センサノード 2 台、シンクノード 1 台を用いた。また、外光が入らないよう窓際には白色のパーティションを設置した。前章の実験同様、無線センサノードとして Crossbow 社の MOTE MICAz を用い、そこに NaPiCa 照度センサを組み込み、照

度値を取得した。

TPLC で発生する時刻同期誤差の検証および照明の影響を検証するために、無線センサノードを3つのパターンに分けて配置した。その配置方法は次の通りである。

- (1) 1 灯の照明直下に 2 台の無線センサノードを配置
- (2) 離れた位置にある 2 灯の照明直下にそれぞれ 1 台ずつ無線センサノードを配置
- (3) 隣り合った 2 灯の照明の中間地点に 2 台の無線センサノードを配置

(1) では、同一の照明を用いて実験を行うため、無線センサノード間で照明と無線センサノードの距離や近接する照明の光度変化を考慮しない配置方法である。(2) では、離れた位置にある 2 灯の照明直下に無線センサノードをそれぞれ設置する。離れた位置とは、片方の照明の光度を変化させても、もう片方の照度センサの照度が変化しない位置を指す。(3) では、隣り合った 2 灯の照明の水平方向における中間地点に無線センサノードを配置する。この時、片方の照明の光度を変化させた場合に、もう片方の照明直下に配置した照度センサの照度が変化する位置関係にある。

以上の 3 パターンでそれぞれ実験を行い、時刻同期誤差の検証を行った。なお本実験では、照明を 2 秒間隔で照度を 15 lx 程度増減させ、時刻同期を行った。なお、増減は 1000 ステップ行った。また、時刻同期誤差を計測するために、真値として FTSP のグローバルタイムを用いた。TPLC で時刻同期タイミングであると無線センサノードが判断したときのグローバルタイムを比較し、グローバルタイムでの時刻誤差を TPLC の時刻同期誤差とした。なお、FTSP を無線センサノード 2 台に実装し、本実験環境で時刻同期誤差を検証した際に、平均時刻同期誤差が 1 ms 以内であったため、本実験では FTSP で発生する時刻同期誤差は考慮しない。また、FTSP で無線センサノード間の時刻を同期してしまうため、TPLC で正しく時刻同期誤差が計測できない恐れがある。そこで、FTSP で時刻同期した後、照度取得間隔時間以内のランダム時間だけ、照度取得間隔をずらして実験を行った。

各検証パターンの実験環境を示した図を図 7、図 8、および図 9 を示す。

図 7、図 8、および図 9 には、蛍光灯および無線センサノードの位置関係を示しており、図中の蛍光灯横の番号は蛍光灯番号を、無線センサノード横のアルファベットは照度センサの識別名を表す。また、照明と無線センサノードの距離は照明の垂直直下に無線センサノードを置いた場合、1.9 m である。

図 7 は、検証パターン (1) での無線センサノードの配置パターンであり、照明番号 7 番の直下に無線センサノード A、および B を設置した。なお、照明番号 7 番のみを調光し、その照明のみ光度を変化させた。図 8 は、検証パターン (2) での無線センサノードの配置パターンであり、照明

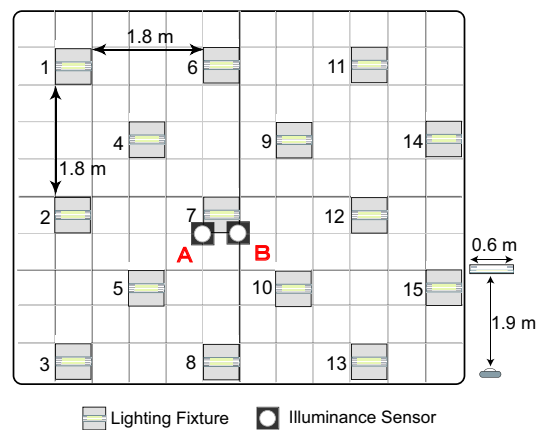


図 7 検証パターン (1) の実験環境

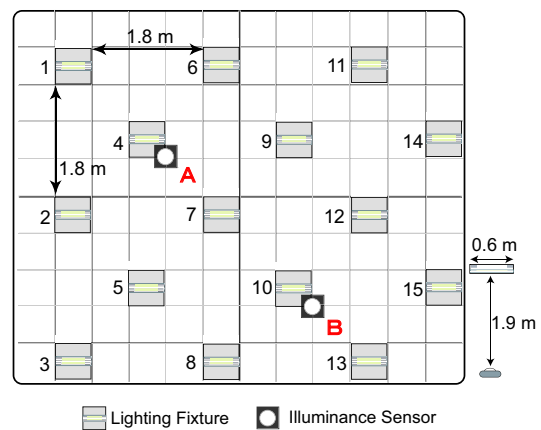


図 8 検証パターン (2) の実験環境

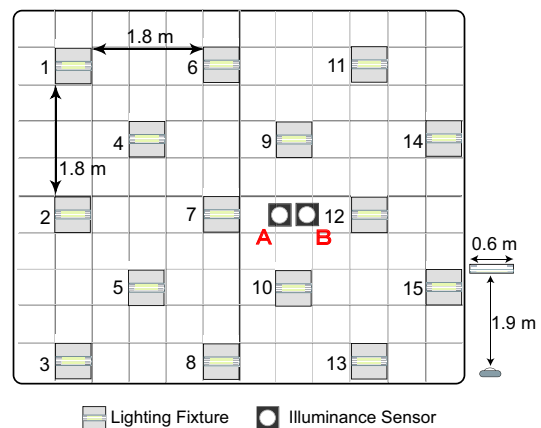


図 9 検証パターン (3) の実験環境

番号 4 番の直下に無線センサノード A、照明番号 10 番の直下に無線センサノード B を設置した。なお、照明番号 4 番および 10 番のみ調光し、その照明のみ光度を変化させた。図 9 は、検証パターン (3) での無線センサノードの配置パターンであり、照明番号 7 番と照明番号 12 番の水平方向における中間地点に無線センサノード A、および B を設置した。なお、照明番号 7 番および 12 番のみ調光し、その照明のみ光度を変化させた。

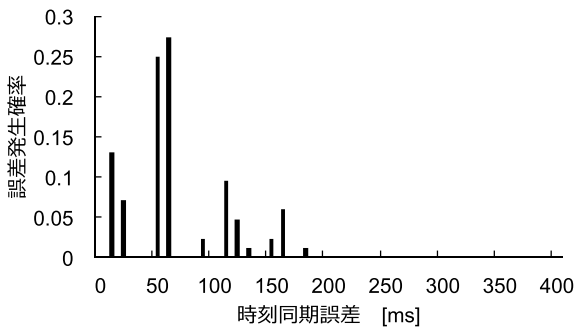


図 10 同一の照明を用いた場合の TPLC の時刻同期誤差

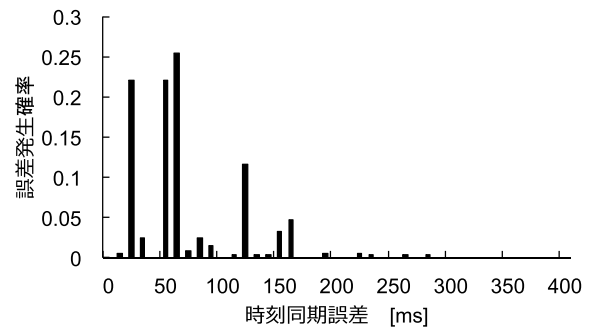


図 12 照明が遠距離にある場合の TPLC の時刻同期誤差

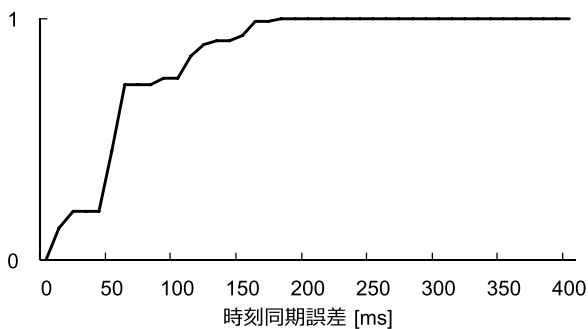


図 11 同一の照明を用いた場合の TPLC の累積時刻同期誤差

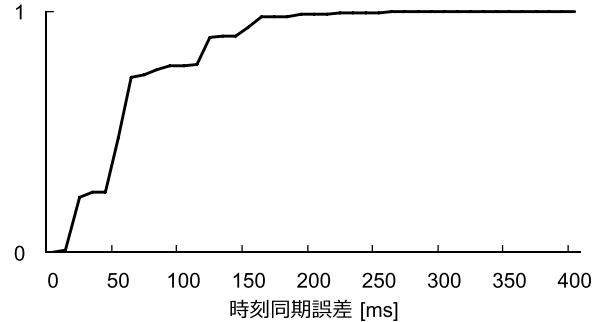


図 13 照明が遠距離にある場合の TPLC の累積時刻同期誤差

表 1 同一の照明を用いた場合の時刻同期誤差

平均精度誤差	62 ms
最大精度誤差	172 ms
最小精度誤差	4 ms

4.2 1 灯の照明直下に 2 台のセンサを配置した場合における TPLC の時刻同期誤差評価

1 灯の照明直下に 2 台の無線センサノードを配置した場合における TPLC の時刻同期誤差評価を行う。時刻同期誤差の発生確率を示したグラフを図 10 に、累積分布を示したグラフを図 11 に示す。なお、横軸が時刻同期誤差時間 [ms]、縦軸がその誤差が発生する確率である。また、グラフ中の平均時刻同期誤差、最大時刻同期誤差、および最小時刻同期誤差を以下の表 1 に示す。

図 10, 図 11, および表 1 から、TPLC を実装した 2 台の無線センサノードで時刻同期が行われたため、時刻同期誤差が発生したことがわかる。よって、TPLC を用いて無線センサノード間の時刻同期を実現できた。

表 1 からわかる通り、平均 62 ms, 最大 172 ms, および最小 4 ms の誤差で時刻同期を行うことができた。また、図 11 から約 60 ms 以内の時刻同期誤差が全試行の約 70% であり、時刻同期誤差 60 ms 付近の密度が高いことから、平均時刻同期誤差以内で時刻同期を実現できた場合が多くを占めていたことがわかる。平均時刻同期誤差 62 ms は FTSP などの従来手法に比べ大きい誤差ではあるが、今後、この時刻同期誤差を小さくしていく手法を検討する

必要がある。まず、時刻同期誤差が発生する原因として、時刻同期が発生するタイミングが照度取得間隔の大きさに依存することが挙げられる。TPLC では、照度変化が起こったタイミングで時刻同期が発生する。照度センサが照度変化を感知するタイミングは照度取得間隔に依存する。照度取得間隔が大きければ大きいほど、無線センサノード間で照度取得タイミングのずれは大きくなる。その照度取得タイミングのずれが照度変化を感知するタイミングの誤差になり、その誤差が時刻同期誤差となる。よって、時刻同期誤差を小さくするために照度取得間隔を短くすることで、TPLC の時刻同期精度を向上させることができる。しかしながら、照度取得間隔を短くすると、無線センサノードの消費電力が上がる。よって、単純に照度取得間隔を短くする以外の時刻同期誤差の精度向上させる方法を今後検討する必要がある。

4.3 2 灯の照明直下に 2 台のセンサを配置した場合における TPLC の時刻同期誤差評価

2 灯の照明直下に 2 台の無線センサノードをそれぞれ配置した場合における TPLC の時刻同期誤差評価を行う。時刻同期誤差の発生確率を示したグラフを図 12 に、累積分布を示したグラフを図 13 に示す。なお、横軸が時刻同期誤差時間 [ms]、縦軸がその誤差が発生する確率である。また、グラフ中の平均時刻同期誤差、最大時刻同期誤差、および最小時刻同期誤差を以下の表 2 に示す。

表 2 からわかる通り、平均 63 ms, 最大 242 ms, および

表 2 照明が遠距離にある場合の時刻同期誤差

平均精度誤差	63 ms
最大精度誤差	242 ms
最小精度誤差	0 ms

最小 0 ms の誤差で時刻同期を行うことができた。同一の照明直下に無線センサノードを並べて配置した場合に比べて、平均誤差はほとんど変わらない結果となった。また、図 13 から 60 ms 以内の時刻同期誤差が全試行の約 70% であり、平均時刻同期誤差以内で時刻同期を実現できていた場合が多くを占めていたことがわかる。最大時刻同期誤差が同一の照明直下での実験より大きくなっているが、平均時刻同期誤差はほとんど変化がなく、誤差分布もほとんど等しいという結果が見てとれる。従って、同一の照明直下に無線センサノードを並べて配置した場合に比べて、ほとんど変わらない結果となった。

本実験では、2 台の照明を用いた。本実験での 2 灯の照明の位置関係は、片方の照明光度を変化させたときに、もう片方の照明直下に配置した照度センサにその照明の光度変化の影響を与えない位置関係である。よって、2 台の照度センサは互いに異なる照明から得た照度変化で時刻同期を行う。同一照明直下に配置した場合と比較して、実験の条件の変化として、異なる照明を用いて実験を行ったという点が挙げられる。時刻同期に用いる照明が無線センサノード間で異なることによって、前節での実験では考慮しなかった誤差が発生する。照明を調光するために、照明 1 灯 1 灯に制御 PC から光度情報を送信している。その情報は電気信号であるため、僅かながら各照明に到達するまでに誤差が生じている。従って、その信号が各照明に伝達するまでの伝搬誤差が、本実験では時刻同期誤差の要因となる。しかし、伝搬誤差は非常に小さいため、本実験で用いた実験室程度の大きさでは、考慮しないことが多い。また、伝搬誤差が照度取得間隔より非常に小さい場合、その誤差は時刻同期誤差にほとんど影響しないと考えられる。よって、本実験結果では同一の照明直下に照度センサを配置した場合とほぼ同等の時刻同期誤差となったと考えられる。

4.4 近接する 2 灯の照明における中間地点にセンサを配置した場合における TPLC の時刻同期誤差評価

近接する 2 灯の照明間に 2 台の無線センサノードを配置した場合における TPLC の時刻同期誤差評価を行う。時刻同期誤差の発生確率を示したグラフを図 14 に、累積分布を示したグラフを図 15 に示す。なお、横軸が時刻同期誤差時間 [ms]、縦軸がその誤差が発生する確率である。また、グラフ中の平均時刻同期誤差、最大時刻同期誤差、および最小時刻同期誤差を以下の表 3 に示す。

表 3 からわかる通り、平均 88 ms、最大 277 ms、および最小 1 ms の誤差で時刻同期を行うことができた。また、

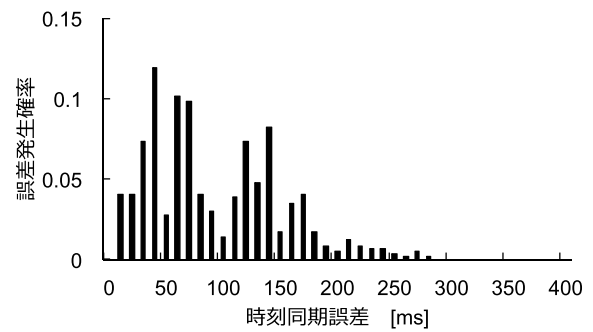


図 14 照明が近接する場合の TPLC の時刻同期誤差

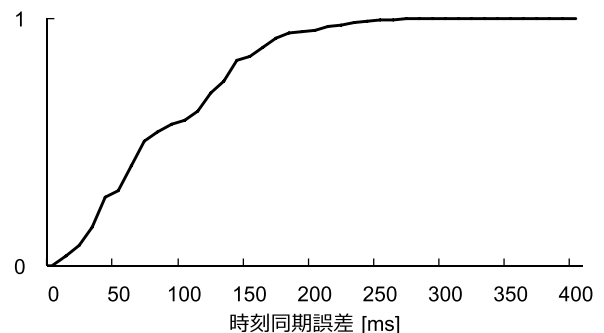


図 15 照明が近接する場合の TPLC の累積時刻同期誤差

表 3 照明が近接する場合の時刻同期誤差

平均精度誤差	88 ms
最大精度誤差	277 ms
最小精度誤差	1 ms

図 15 から 100 ms 以内の時刻同期誤差が全試行の約 60% であり、他の実験結果と比較すると、照度取得間隔である 100 ms 以内で時刻同期できていないことがわかる。

本実験では、近接する 2 灯の照明における中間地点に照度センサを配置した。よって、片方の照明の光度変化はもう片方の照明直下に配置した照度センサに影響を与える。本実験では照明を同時に変化させたため、隣の照明の影響を受けにくい。照明の光度変化に誤差があった場合に、片方の照明の光度変化を感知した後に、もう片方の照明の光度変化を感知してしまう。2 灯が離れている場合には、光度変化に時間的誤差が発生しても、照度取得間隔より光度変化の時間的誤差が極めて短時間であるために、光度変化誤差を無視した。しかし、本実験では両照明の光度変化が照度変化に影響を与えてしまうため、光度変化タイミングによっては 1 ステップ前と異なる照度上昇が起きる可能性が考えられる。ある時間における照度値の推移を図 16 に示す。

図 16 を見てもわかる通り、1 ステップ目と 2 ステップ目の照度値の推移が異なる。特に、補正前の照度値が 259~260 になるまでの時間が異なる。この時間誤差は時刻同期誤差に密接に関係している。例えば、1 ステップ前に 260

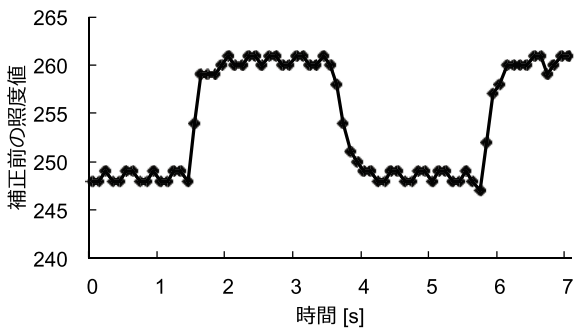


図 16 ある時間における照度値の推移

という値を参照した場合、2ステップ目ではその値付近に変化した時に時刻同期判定を行う。光度変化が開始してから照度値が260という値に変化するまでの時間が異なれば、時刻同期を行う時間が異なるのは明らかである。従って、時刻同期誤差が他の実験より大きくなったのではないかと考えられる。

5. 結論と今後の展望

本研究では、無線センサネットワーク MOTE MICAz と NaPiCa 照度センサ、調光可能な照明を用いたパケットの送受信を行わない時刻同期手法の提案を行った。はじめに、照明の光度変化によって執務者の快適性を損なわないために、人が認知できない照度変化量でも時刻同期タイミングを図ることが可能か検証した。その結果、人が認知できない照度変化量でも照度センサで照度値の変化を検知することができた。よって、照明制御を用いた無線センサノード間の時刻同期手法 TPLC を提案した。TPLC では、照明の光度変化をさせ、照度値に変化を与え、その照度値の変化量から時刻同期タイミングを図る。TPLC を MOTE MICAz に実装し、時刻同期誤差を検証した結果、同一照明の直下に2台の無線センサノードを配置した場合に、平均誤差 62 ms、最大誤差 172 ms、および最小誤差 4 ms で時刻同期を行うことができた。従って、パケットの送受信なしで無線センサネットワーク内で時刻同期を行うことは可能である。また、異なる照明の直下や、近接する2灯の照明の中間地点に無線センサノードを配置した場合での実験も行った。それらの実験結果から、同一の照明直下に無線センサノードを配置した場合と比較して時刻同期誤差は大きくなったものの、時刻同期を行うことができた。また TPLC の応用手法として、TPLC では光度変化量と光度が上昇してから次の光度上昇までの時間が固定である場合には、光度上昇から次の光度上昇まで無線センサノードを休止させることが可能となり、無線センサノードの消費電力を削減することができると考えられる。

今後の課題として、時刻同期精度の向上が挙げられる。照度取得間隔を短くすることによって、時刻同期精度が向上できることは明らかである。しかし、照度取得間隔を短

くすることで、無線センサノードの消費電力が大きくなる。よって、時刻同期タイミング付近では照度取得間隔を短く、それ以外では長くするなどの処理を行い、光度変化が終了するタイミングを探索する取得間隔可変型探索アルゴリズムを検討する必要があると考えられる。また、照度取得間隔を短くすることで、本実験では僅かな誤差であった照明の光度が変化する誤差などを考慮する必要がある。今後は無線センサノードで発生する誤差以外の照明が調光する際に発生する誤差などを計測し、それらを補正する手法も検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 鈴木誠, 猿渡俊介, 南正輝, 森川博之: 無線センサネットワークにおける時刻同期技術の研究動向, signal, Vol.1, pp.t2(2008)
- [2] D. L. Mills: Internet time synchronization : The network time protocol, IEEE Trans. Commun., Vol.39, pp.1482-1493(1991)
- [3] S. Ganeriwal, R. Kumar and M. B. Srivastava: Timing-sync Protocol for Sensor Networks, pp.1482-1493(1991)Proceedings of the ACM Symposium on Networked Embedded Systems (SenSys) (2003)
- [4] ELSON, J.: Fine-grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts, Proceedings of the ACM Symposium on Networked Embedded Systems (SenSys) (2003)
- [5] MAROTI, M.: The flooding time synchronization protocol, Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, USA, Nov., pp.39-49(2004)
- [6] 鹿倉智明, 森川宏之, 中村芳樹: オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究, 照明学会誌, Vol.85, pp.346-351(2001)
- [7] 財団法人省エネルギーセンター:
入手先 <http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html>
- [8] M.Miki and T.Hiroyasu and K.Imazato: Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness, Proc IEEE CIS, pp.520-525(2004)
- [9] 三木光範: 知的照明システムと知的オフィス環境コンソーシアム, 人工知能学会誌, Vol.22, pp.399-410(2007)
- [10] 三木光範, 吉井拓郎, 小野景子, 東陽平: 知的照明システムにおける照度センサの位置推定を用いた消費電力の削減, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol.95, pp.1839-1847(2012)
- [11] Crossbow: Crossbow MOTE - Wireless Sensor Networks MTS/MDA Sensor Board User's Manual, 入手先 <<http://www.xbow.jp/mtsmtdaj.pdf>>
- [12] Panasonic: 照度センサ NaPiCa,
入手先 <http://www3.panasonic.biz/ac/download/control/sensor/illuminance/catalog/bltn_jpn_ams.pdf>
- [13] S.Inoue, Mitsubishi Estate Company Ltd.:
Towards the of city of the future,
入手先 <http://www.jetro.org/documents/green_innov/Shigeru.Inoue.Presentation.pdf>(2012)
- [14] 春山真一郎: 可視光通信, 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, Vol.86, pp.1284-1291(2003)