

照度情報を用いたセンサネットワークデバイスの グルーピング手法の開発

間部 文彰^{1,a)} 内藤 克浩¹ 森 香津夫¹ 小林 英雄¹

概要: 無線センサネットワークにアクチュエータを組み込む事は、新たな形態に繋がる次のステップである。センサアクチュエータネットワークの実用例の一つが Building and Energy Management System (BEMS) である。BEMS は電力、気温、湿度、照度、赤外線などのセンサと照明、エアコン、換気扇などのビル設備から構成される。これらのビル設備は近隣センサから環境情報を収集し、目標とされる環境を達成するために自身を制御する。このような目的では、近隣センサとビル設備を相互にグルーピングする手法が必要となる。本研究では、照明動作を検知する照度センサを採用する自律的なグルーピング手法の提案を行う。提案方式では、各デバイスは照明動作を定期的に観測し、照明の状態が変化した場合、状態変化の情報を相互に交換する。結果として、各デバイスは類似した照明の変化パターンを観測した近隣デバイスを推定可能となる。実証実験より、提案方式を用いる事で、照明に応じた自律的なグルーピングが実現可能であることを示す。

キーワード: センサアクチュエータネットワーク, グルーピング, 照度, BEMS

Development of grouping scheme for sensor network devices based on illuminance information

FUMIAKI MABE^{1,a)} KATSUHIRO NAITO¹ KAZUO MORI¹ HIDEO KOBAYASHI¹

Abstract: Integrating actuators into wireless sensor networks is a next step innovation. Building and Energy Management System (BEMS) is one of the practical examples of such sensor and actuator networks. BEMS consists of various sensors such as electrical power, temperature, humidity, illuminance, infrared radiation etc. and various building facilities such as illumination lamps, air conditioners, exhaust fans etc. These facilities gather environmental information from neighbor sensors and operate themselves in order to achieve target condition. Therefore, grouping mechanisms are required to find neighbor sensors and facilities each other. In this paper, we propose a new autonomous grouping mechanism employing illuminance sensors that sense illumination lamps. In the proposed mechanisms, each device senses a status of illumination lamps periodically, and exchanges status change information between neighbor device when the status of illumination lamps changes. As the results, each device can estimate the neighbor devices that find a similar status change pattern of illumination lamps. From the demonstration experiment, we can show that the proposed mechanisms can make groups autonomously according to the illumination lamps.

Keywords: Sensor actuator networks, Grouping, Illuminance, BEMS

1. はじめに

近年、制御機器とセンサ機器を包括して接続するセンサ

アクチュエータネットワークが注目されている。また、センサアクチュエータネットワークの実用例として、Building and Energy Management System (BEMS) が注目されている [1], [2]。既存の BEMS の多くでは、省エネルギー化を実現するために、電力需要などに応じたエアコン・照明

¹ 三重大学大学院 工学研究科 三重県津市栗真町屋町 1577

^{a)} fumiaki.mabe@com.elec.mie-u.ac.jp

などの制御が実現されている。また、オフィスなどの空間では、場所により所望環境などが異なる事から、場所に依りてより適切な環境を実現するシステムが望まれている。このようなシステムでは、屋内に温度・照度センサなどを搭載した環境モニタリング用のセンサ機器を適時設置し、エアコン・照明などの制御機器は近隣に存在するセンサ機器からの環境情報を用いて、自身の制御を行う必要がある。そのため、制御機器と近隣に存在するセンサ機器を、何らかの手法で紐づける機構が必要となるが、現状のシステムでは主に手作業で行われている。機器間の紐付けを行う場合、新規機器を設置するたびに、該当する機器の設定を再度行う必要がある。また、オフィスでは業務上の都合から什器類の移動が行われる事もあり、このような場合にも機器の再設定が必要となる。このように、手動による機器間の紐付けは、長期間のBEMS運用時には運用上の手間が大きく現実的ではない。そこで、BEMSをより現実的なものとするためには、自律的にネットワークを構成し、制御機器と近隣センサ機器が互いの位置関係を認識し、近隣機器同士でグループを形成する必要がある。

位置関係を推定する方法としては、GPS (Global Positioning System) を用いる手法が提案されている [3]。これらの手法では衛星から信号を受信することにより、端末位置を得る事が可能である。ビル内にGPS信号を引き込む手法 [4] も存在するが、現実の多くのビルではGPS信号を室内で受信することは困難であり、GPSを用いる手法はBEMSには向いていないと思われる。そこで、室内向けの位置推定方法として、RSS (Received Signal Strength) を用いる手法が提案されている [5], [6], [7], [8], [9]。これらの手法では、位置が既知である基地局などから、参照信号を送信し、端末は各参照信号のRSSを用いる事で、自身の位置を推定する。一方、RSSは周囲の電波環境の影響を受けやすく、特に金属などが周囲にあると値が大きく変化する。そのため、位置精度を上げるためには、多数の参照信号などが必要となる。また、予め室内のRSS分布を測定することにより、室内環境に最適化された位置推定を行う方式も提案されている [10], [11] が、業務上の都合から什器類の位置を定期的に変更するオフィスビルでは、位置変更後に必ずRSS分布を再測定する必要があり、実用上を考えると運用上の手間が多いと考えられる。

本研究では、オフィスビル内には多数の照明が設置されている上、ビル内は直射日光の影響を受けるエリアが少ない点に着目する。また、各機器が照度センサを用いる事により、機器の電源を入れるだけで自律的にネットワークを構築し、近隣機器を認識し、グループを構成する方式を提案する。提案方式では、照明機器が一定グループ毎にON/OFFされることを活用しており、照明機器が独立して状態変化する単位でのグループ化が可能である。また、提案方式をマイコンボードであるArduino FioとDigi

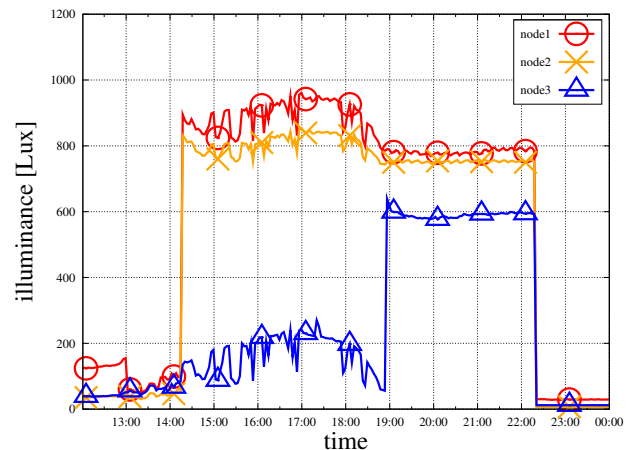


図 1 同室内に存在する端末の照度

Fig. 1 Illuminance of three nodes located in the same room

International社の無線通信モジュールであるXBeeを用いて実装する。実証実験では、屋内に設置された照明機器を用いる事で、開発したセンサ機器が自律的にグループを構成可能であることを示す。

2. 照度情報を用いたグルーピング手法

本研究では、照明・エアコンなどの制御機器が、屋内に設置されている近隣センサ機器の情報を取得する事で、自身を制御するセンサアクチュエータネットワークに着目する。開発するネットワークでは、機器の電源を入れる事で、周辺機器との間でネットワークを自律的に構築する。また、オフィスビル内に多数設置されている既存照明に着目することで、各機器が推定した照明の状態変化に基づいた機器のグループ化を実現することを目的とする。

本研究では、屋内に多数設置されている照明は、一定個数単位で制御されており、多くの場合は一定エリア毎に照明のON/OFFが行われる点に着目する。また、センサ機器だけではなく、エアコンなどの制御機器にも照度センサが設置されている状況を想定しており、各機器が照度センサを用いて近隣照明の状態を推定することにより、ON/OFFの状態変化が同じタイミングで発生する機器間でグループを構成する。

2.1 予備実験

本研究では照明の状態変化に基づいた機器のグループ化を行う。そのため照度センサを用いることにより、照明の状態を検出することが出来る必要がある。このことを確認するため予備実験を行った。予備実験では同室内に3台の端末を設置し、照度センサを用いて照度の測定を行った。また端末1と端末2は同じ照明の近隣に配置し、端末3は異なる照明の近隣に設置した。図1に実験時の3台の端末の照度の時間変化を示す。実験時には、以下のような照明の操作が行われた。

- 14:10 頃に端末 1 と端末 2 の近隣照明が OFF から ON
- 18:50 頃に端末 3 の近隣照明が OFF から ON
- 22:10 頃に端末 1 と端末 2 の近隣照明と端末 3 の近隣の照明が同時に ON から OFF

図 1 より 14:10 頃の端末 1 と端末 2 の近隣照明が OFF から ON に切り替わった際、その近隣に位置する端末 1 と端末 2 の照度が同時に大きく変化していることがわかる。この時、同じ部屋に存在するが近隣に位置しない端末 3 の照度は大きく変化しない。18:50 頃の端末 3 の近隣照明が OFF から ON に切り替わった際には、その近隣に位置する端末 3 の照度が大きく変化しているが、近隣に位置しない端末 1 と端末 2 の照度は大きく変化していない。このことから、照明の ON/OFF 状態が切り替わるタイミングで、その照明の近隣に位置する端末の照度は同一タイミングで大きく変化し、その照明の近隣に位置しない端末の照度とは異なるタイミングで変化することがわかる。したがって、各端末の照度の大きく変化するタイミングを比較する、つまり照明の ON/OFF 状態の切り替わるタイミングを比較することによりで端末を照明機器が独立して状態変化する単位にグループ化することが出来ると考えられる。しかし、22:10 頃に端末 1 と端末 2 の近隣照明と端末 3 の近隣照明が同時に ON から OFF に切り替わった際には、別々の照明の近隣に位置する端末 1、端末 2 と端末 3 の照度が同時に大きく変化しているため、22:10 頃の照度の変化のみを用いてグループ化を行う場合、誤ったグループが構築される。しかし、14:10 頃と 18:50 頃の照度の変化を用いる事で、端末 1、端末 2 と端末 3 は別々の照明の近隣に位置する端末であることが推定可能である。このため、照明の ON/OFF 状態の切り替わるタイミングを比較することによりグループを構築するには、複数回のタイミングの比較が必要があると考えられる。

2.2 照明の ON/OFF 状態の推定

提案手法では、各端末が測定した照度の値を用いて照明の ON/OFF 状態を推定し、その切り替わったタイミングを用いて照明ごとに端末をグループ化する。端末の照度の大きな変化に着目して照明の ON/OFF 状態が変化すると推定する場合、照明の ON/OFF 状態変化を判断する基準となる照度の変化量を定める必要がある。図 2 に、照明の ON/OFF 状態の切り替わりによる照度の変化量を示す。この時、端末 1 と端末 2 は同じ照明の近隣に位置する端末である。図 2 から照明と端末まで距離の違いなどにより、端末の測定する照度は端末位置に応じて大きく異なることがわかる。そこで、提案手法では変化量から照明の ON/OFF 状態を推定するのではなく、動的なしきい値を各端末ごとに定めて状態を推定する。図 3 に照明の ON/OFF 状態の推定の手順を示す。

(1) 端末は定期的に照度を測定し、測定照度が記録内で最

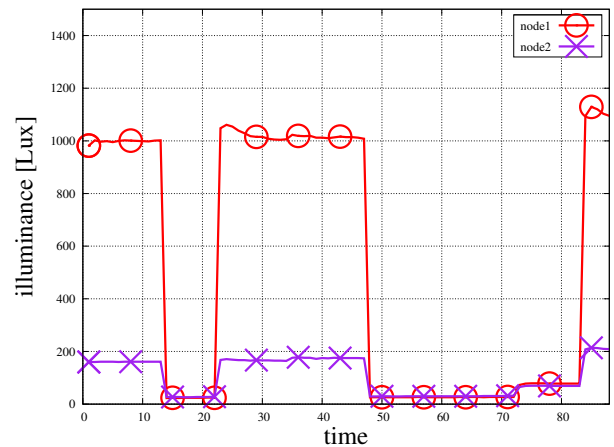


図 2 照度の変化量

Fig. 2 Variation of the illuminance

大照度であるのか確認する。測定照度が最大値の場合には、測定照度の半分の値を照明の ON/OFF 状態推定のしきい値として設定する。また、測定照度が最大値ではない場合、測定照度を用いて照明の ON/OFF 状態推定を行う。なお、予め固定のしきい値を設定しないのは、端末と照明の位置関係により最大照度は大きく異なり、端末の状況に適したしきい値を設定する必要があるためである。

- (2) しきい値が更新された場合、現在のグルーピング情報を破棄して、改めて照明の ON/OFF 状態の推定を行う。これは、端末設置時に照明が OFF 状態の場合、しきい値は極めて低い値に設定されており、適切な端末とグループを構成できないためである。また、端末の設置場所が変更されたり、照明環境が変化した場合にも、適切なグループが変化している可能性があるためである。
- (3) 測定照度としきい値を比較し、測定照度の値がしきい値より大きい場合は、端末周辺の照明は ON 状態であり、測定照度の値がしきい値より小さい場合は、照明は OFF 状態であると推定する。

2.3 近隣機器の推定とグループ化

図 4 に提案手法のグループ構築手順を示す。

- (1) 各端末は一定間隔で照度を測定し、測定照度を用いて近隣照明の ON/OFF 状態の推定を行う。
- (2) 推定した照明の状態が前回の推定状態値と異なる場合、近隣照明の ON/OFF 状態が変化したと考えられるため、照明の状態が変化したことを他端末に通知するメッセージを送信する。なお、推定した照明の状態が前回の推定状態値と同一の場合には、メッセージを送信しない。
- (3) 状態が変化したことを他端末に通知するメッセージを受信した端末は、自身の近隣照明の ON/OFF 状態が

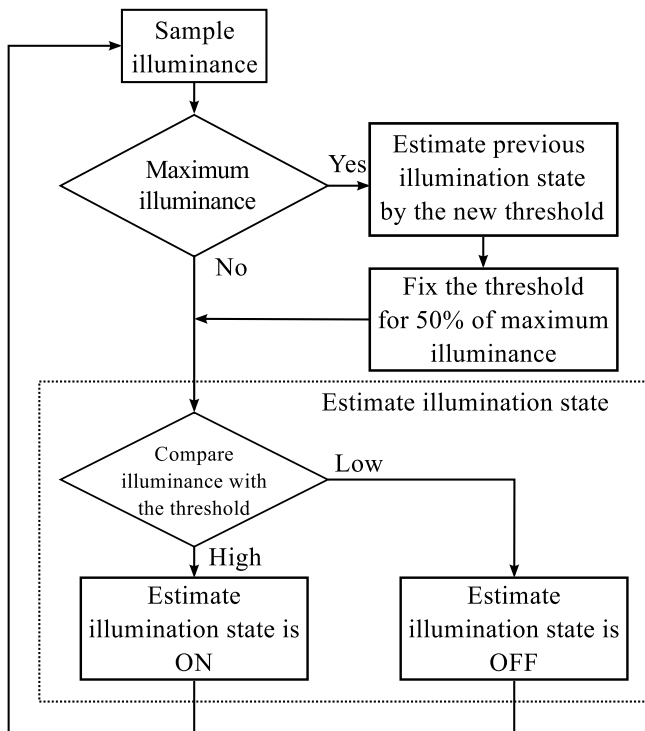


図 3 ON/OFF 状態推定のフローチャート

Fig. 3 Flowchart of ON/OFF state estimation

同じタイミングで変化したのか確認を行う。同じタイミングで照明の ON/OFF 状態が変化している場合には、通知を送信した端末と自身の端末は同一照明の近隣に存在すると推定する。一方、照明の ON/OFF 状態の変化タイミングが異なる場合には、両端末は異なる照明の近隣に存在すると推定する。

- (4) 同一照明の近隣に存在すると推定した場合、該当端末が同一グループに存在すると認識し、グループリストに端末識別子を記録する。

上記手順は各端末を主導として実行されるため、2台の端末間のグルーピングが完了するためには、各端末が上記手順を実行する。なお、同時に複数の照明が操作された場合、本来は異なる回路に接続されている複数の照明の状態が同時に変化する。このような場合、これらの複数の照明の近隣に存在する端末が誤ってグループを構築する可能性がある。そこで、提案手法では上記手順を繰り返す事により、常に同じタイミングで照明の ON/OFF 状態が変化する端末のみとグループを構築することを試みる。この手続きにより、観測期間中で各照明が別々に操作される機会があれば、正しいグルーピングを実現可能である。

3. 動作例

提案手法のグルーピング手順を動作例を用いて述べる。本例では、図 5 の端末配置を想定する。端末 1 と端末 2 は同一照明の近隣に存在する端末であり、端末 3 は別の照明の近隣に存在する端末とする。図 6 にグルーピング手順の

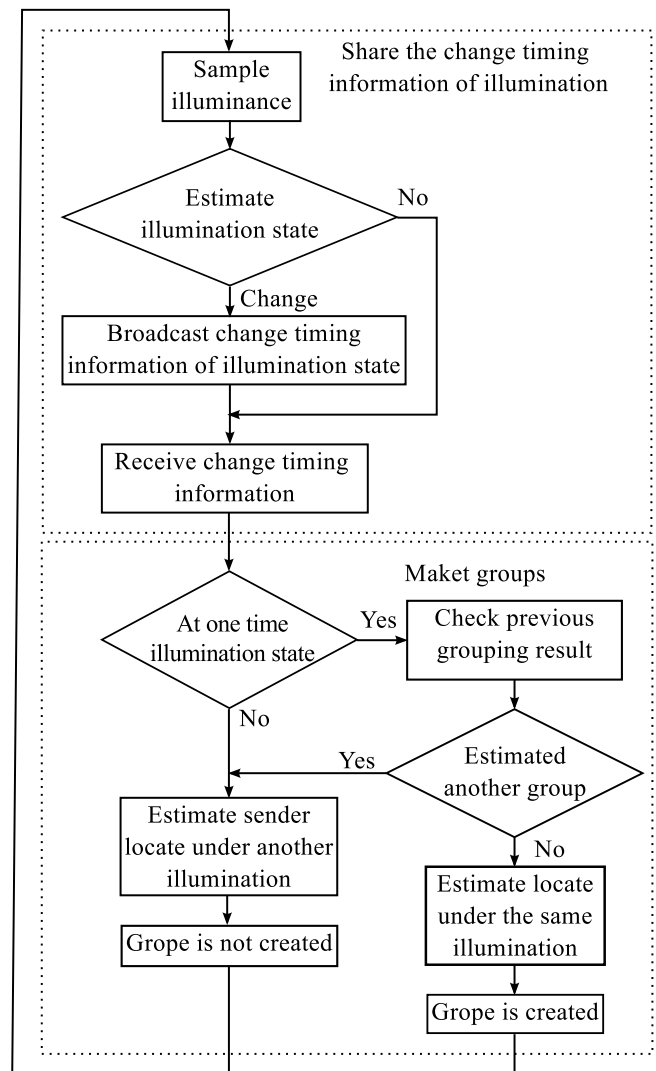


図 4 提案手法のフローチャート

Fig. 4 Flowchart of the propose scheme

例を示す。図での矢印は照明の状態変化したタイミングの通知パケットを示す。提案手法では、各 Term ごとに図 4 で示す処理を行い、サンプリングした照度を用いてグループ構築を行う。

本例での端末グルーピング手順を以下に示す。なお、端末 1 と端末 2 の近隣照明と端末 3 の近隣照明が同時に ON になり、その後端末 1 と端末 2 の近隣照明のみが OFF になる状況を想定する。

- (1) Term 1 で 2 つの照明の状態が変化することにより、全ての端末の照度が同時に変化する。
- (2) Term 2 のはじめに全ての端末は近隣照明の状態が Term 1 の時点から変化すると推定する。
- (3) 全ての端末は近隣照明の状態が変化すると推定したため、その変化したタイミングを周りの端末に対して通知する。
- (4) 各端末は受信した照明の変化タイミングの情報と自身の照明の変化タイミングを比較する。この場合は、3 つの端末で同時に照明の状態が変化しているため、3

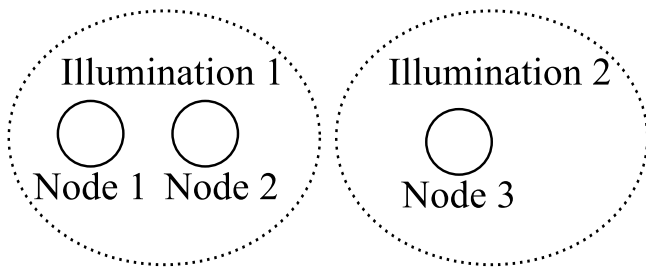


図 5 ノード配置

Fig. 5 Arrangement of node

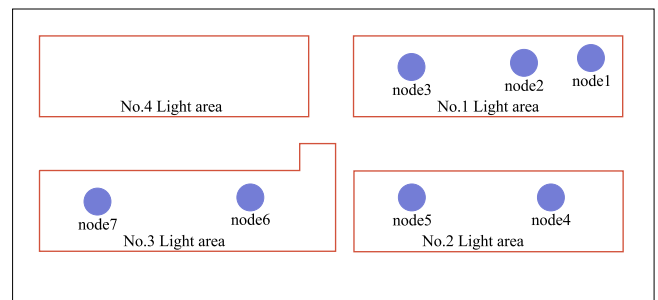


図 7 端末と照明の配置

Fig. 7 Arrangement of devices and illuminations

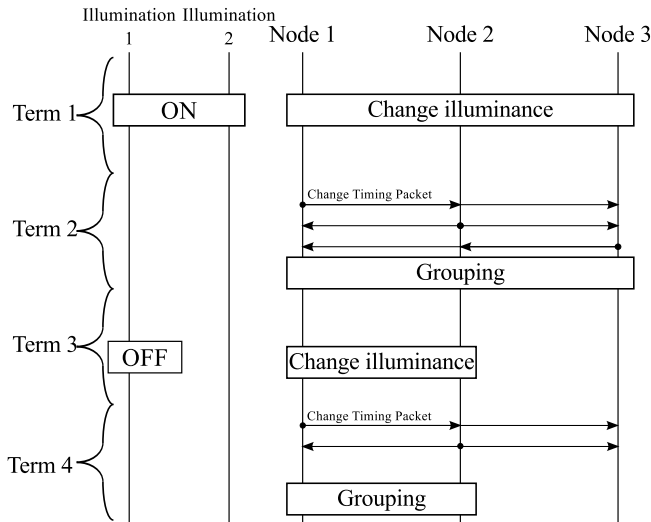


図 6 提案手法の動作例図

Fig. 6 Example sequence of the propose scheme

端末でグループを構築する。

- (5) 次に、Term 3で端末 1 と端末 2 の近隣照明が OFF になる。この時、端末 1 と 2 の照度が同時に変化する。
- (6) Term 4 のはじめに端末 1 と端末 2 は近隣照明の状態が Term 3 の時点から変化したと推定する。
- (7) 端末 1 と端末 2 は近隣照明の状態が変化したと推定したため、その変化したタイミングを周りの端末に対して通知する。
- (8) 各端末は受信した照明の変化タイミングの情報と自身の照明の変化タイミングを比較する。
- (9) 端末 1 と端末 2 の両端末は、両者がそれぞれ通知したメッセージを受信することで、同時に照明の状態が変化していることがわかるため、端末 1 と端末 2 でグループを構築する。また端末 3 からの通知を受信しないため、端末 3 は照明の状態が変化していないと判断し、端末 3 とのグループを解消する。
- (10) 端末 3 は端末 1 と端末 2 から通知を受信することにより、端末 1 と端末 2 とは同じタイミングで照明の状態が変化していないことがわかるため、端末 1 と端末 2 とのグループを解消する。

4. 実証実験

提案手法の現実環境での有効性を検討するために、提案方式をマイコンボード上に実装して実証実験を行った。実証実験では、Digi International 社の無線通信モジュールである XBee とマイコンボードである Arduino Fio を用いたセンサ端末に提案手法を実装した。実証実験では、センサ端末 7 台を図 7 に示すように配置した。

4.1 実験結果

図 8 に実証実験の結果を示す。また、実証実験中の提案手法の動作結果について説明する。

- 4:05 頃に端末 1 から 7 まで全ての端末の照度が大きく変化している。この時、全ての端末は照明が ON 状態から OFF 状態に変化したと推定を行い、照明状態が変化したタイミング情報をブロードキャストして通知する。全ての端末は他の端末からの通知を受け取り、自身の状態変化タイミングと比較を行う。その結果、同じタイミングで照明の状態が変化しているため、全ての端末でグループを形成している。
- 5:05 頃に端末 1, 端末 2, 端末 3 の照度が大きく変化している。この時、端末 1, 端末 2, 端末 3 は照明の状態が OFF 状態から ON 状態へ変化したと推定し、照明状態が変化したタイミング情報をブロードキャストして通知する。端末 1, 端末 2, 端末 3 は各端末からの通知を受け取り、自身の照明状態変化タイミングと比較し、同じタイミングで照明状態が変化していることから、端末 1, 端末 2, 端末 3 でグループを形成している。なお、照度が変化していないにもかかわらず端末 4, 端末 5, 端末 6, 端末 7 でグループが形成されている。これは、端末 4, 端末 5, 端末 6, 端末 7 は端末 1, 端末 2, 端末 3 からの照明状態の変化を通知されていないため、照明状態が変化していない端末 4, 端末 5, 端末 6, 端末 7 は、端末 1, 端末 2, 端末 3 とは別照明の配下に存在するということが判断できないためである。

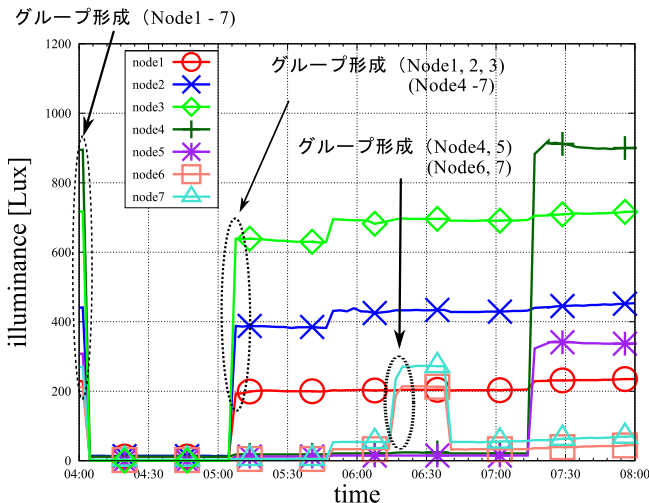


図 8 照度の変化

Fig. 8 Change of illuminance

- 6:10 頃も同様に照度に変化している端末 6, 端末 7 が照明の状態変化を推定・通知を行いグループを形成し, 照度に変化していない端末 4, 端末 5 は端末 6, 端末 7 とは別の照明の配下に存在すると判明したため端末 6, 端末 7 でグループを形成する.

実験結果より, 同一照明配下の端末測定照度は各端末で異なるが, 変化のタイミングはほぼ同時であることが確認できる. また, 提案手法を用いることにより, 各端末の照明の ON/OFF 状態を推定することができ, 照明の ON/OFF 状態に応じてグループを形成可能であることを確認した.

5. まとめ

本研究では, ビル内などに多数設置されている照明に着目することで, 照明の制御単位で端末をグルーピングする手法を提案した. 提案方式では, 各端末の環境に適した照度しきい値を動的に設定することにより, 近隣照明の ON/OFF 状態の推定を実現した. また, 近隣照明の ON/OFF 状態の変化タイミングを端末間で交換することにより, 近隣照明が同時に変化する端末同士のグループ形成を実現した. 実証実験では, XBee と Arduino Fio に提案方式を実装することにより, 実環境を用いて提案方式が適切に動作し, 端末間のグループを適切に形成可能であることを確認した.

参考文献

- [1] Branch, J.W., Davis, J.S.II, Sow, D.M. and Bisdikian, C.: Sentire: A Framework for Building Middleware for Sensor and Actuator Networks, PerCom 2005, pp.396-400 (2005).
- [2] Linda, O., Wijayasekara, D., Manic, M. and Rieger, C.: Computational intelligence based anomaly detection for Building Energy Management Systems, ISRCS 2012, pp.77-82 (2012).
- [3] Ouyang, R.W. Wong, A.K.-S. and Woo, T. K.: GPS Lo-

- calization Accuracy Improvement by Fusing Terrestrial TOA Measurements, ICC 2010, pp.1-5 (2010)
- [4] 片山友幸: GPS リピータシステムによる地下街測位と経路案内の実験, 電子情報通信学会誌, Vol.92, No.9, pp.276-280 (2009).
- [5] Sugano, M., Kawazoe, T., Ohta, Y., and Murata, M.: Indoor Localization System using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network based on ZigBee Standard, *International Conference on Wireless Sensor Networks (WSN 2006)*, pp. 1-6 (2006).
- [6] Krishnakumar, A.S., Ju, W.-H., Mallows, C. and Gamt, S.N.: A System for LEASE: Location Estimation Assisted by Stationary Emitters for Indoor RF Wireless Networks, INFOCOM 2004, pp.1001-1011 (2004)
- [7] Nawaz, S, and Jha, S.: COLLABORATIVE LOCALIZATION FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS, *The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC' 07)*, (2007)
- [8] Attoungble, J.M.K. and Okada, K. : Localization with Ratio-Distance (LRD) for Distributed and Accurate Localization in Wireless Sensor Networks, *IEICE TRANSACTIONS on Communications Vol.E94-B No.7*, pp.1944-1951 (2011)
- [9] Dian Zhang, Yanyan Yang, Dachao Cheng, Siyuan Liu and Lionel M. Ni.: COCKTAIL: An RF-Based Hybrid Approach for Indoor Localization IEEE ICC, pp.1-5 (2000).
- [10] 藤田迪, 梶克彦, 河口信夫: Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法情報処理学会論文誌, Vol.52, No. 3, pp.1069-1081 (2011)
- [11] Koweerawong, C., Wipusitwarakun, K. and Kaemarungsi, K Indoor Localization Improvement via Adaptive RSS Fingerprinting Database, ICOIN 2013, pp412-416 (2013)