

無線センサネットワークにおける 照明の光度制御を用いたデータ送信手法の検討

堂面 拓也^{1,a)} 間 博人^{1,b)} 市川 耀^{2,c)} 村上 広記^{2,d)} 三木 光範^{1,e)}

概要：無線センサネットワークの運用例として、工場内の温湿度管理や大規模オフィスの空調制御などがある。センサネットワークを実環境で利用する場合、運用する状況の変化によってセンサノードのリプログラミングが必要になる。センサノードのリプログラミングは、センサネットワーク上の全てのセンサノードへデータ送信する必要があるが、通信負荷や電力消費増大の問題がある。そこで本研究では、既存の調光可能な天井照明を光度制御することによって、室内に設置した全てのセンサノードに対し、データを送信する手法を検討する。データの変調手法として、照明の光度制御による光強度変調手法およびパルス位置変調手法と両変調手法を組み合わせた変調手法の3手法を提案する。また、センサノードでの復調手法として、時間微分および相関係数を用いた復調手法とパルス位置変調のための復調手法の3手法を提案する。提案したそれぞれの変調手法および復調手法を組み合わせて、照明からセンサノードへデータを送信する実験を28灯の天井照明を用いた実環境にて行った。実験結果から、既存の調光可能な照明と照度センサを用いて、提案手法の有効性を確認した。さらに、照度が異なる環境において各変調手法および復調手法を用いたデータ送信精度の比較検証を行い、相関係数による復調手法が異なる照度環境において有効であることを確認した。

1. はじめに

無線センサネットワークは、無線機能を内蔵した多数のセンサが自律的に相互連携することで物理空間の様々な情報をセンシングする技術である。無線センサネットワークの運用例として、工場内の温湿度管理や大規模オフィスの空調制御がある[1][2]。センサネットワークを実環境で利用する場合、運用する状況の変化に応じてセンサノードのプログラムを更新する必要がある。センサネットワークの運用中にプログラムを更新する必要がある場合、PCとセンサノードを物理的に接続して更新を行わなければならない。センサネットワークの運用に支障を来す。そのため、センサノードへ無線波を利用してプログラムを送信するリプログラミングの研究がある[3][4][5]。しかし、大規模な運用環境で全センサノードのプログラムを更新する場合、

ブロードキャストによる送信を行うため、ネットワーク上のトラフィック増加やセンサノードの電力消費増大といった課題がある。

そこで本研究では、既存の調光可能な天井照明を光度制御することによって、室内に設置した全てのセンサノードに対し同時にデータを送信する手法を検討する。照明からのデータ送信を実現するために、既存の調光可能な天井照明を用いたデータ変調手法とセンサノードにおけるデータ復調手法をそれぞれ提案する。既存の調光可能な天井照明を用いたデータ変調手法およびセンサノードにおけるデータ復調を用いてデータ送信実験を行い、それぞれの手法によるデータ送信精度の比較検証を行う。

2. センサノードの照度取得に関する予備実験

2.1 予備実験概要

本研究が提案するデータ送信手法は、照明の光度を変化させることで照度を変化させてデータ変調を行い、センサノードに搭載した照度センサを用いて取得した照度を元にデータ復調を行う。従って、光度制御による照度変化時においてセンサノードが取得する照度値の変化推移を調査する必要がある。照明の光度変化による照度変化量は、現在照度の7%以内であれば、人は感知できないと確認されている[6]。したがって、本研究では人が感じるちらつきを抑

¹ 同志社大学理工学部，京都府
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ,
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi Kyoto, 610-0394
Japan
² 同志社大学大学院，京都府
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ.
a) tdomen@mikilab.doshisha.ac.jp
b) haida@mail.doshisha.ac.jp
c) hichikawa@mikilab.doshisha.ac.jp
d) hmurakami@mikilab.doshisha.ac.jp
e) mmiki@mail.doshisha.ac.jp

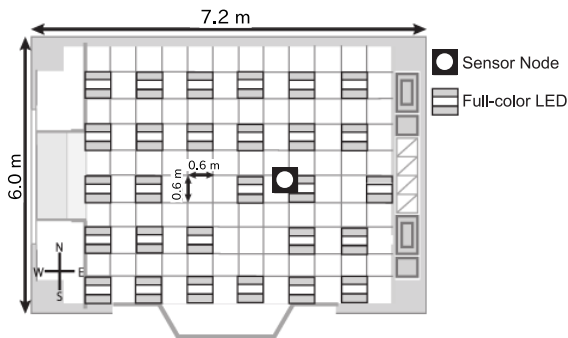


図 1 照度取得実験環境の俯瞰図

Fig. 1 The experimental environment for measuring illuminance



図 2 照度取得実験風景

Fig. 2 The picture of experimental environment for measuring illuminance

えるために、照度変化量は現在照度の 7 %以内とする。

本実験では、無線センサノードとして Crossbow 社の MOTE MICA_z を使用した。MOTE MICA_z に汎用外部基板 MDA088 を使用し、リードタイプの NaPiCa 照度センサを組み込むことで、無線センサノードによる照度取得を実現する。なお、MDA088 と NaPiCa 照度センサの接続抵抗は 430 Ω とした。

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、シャープ株式会社 DLA-016E のフルカラー LED28 灯と NaPiCa 照度センサを取り付けたセンサノード 1 台、センサデータを収集するシンクノード 1 台を用いた。また、外光の影響を遮断するために窓際に白色パーティションを設置した。実験環境の俯瞰図を図 1 に、実験風景を図 2 に示す。

外光などの外的要因のない環境において、机上面照度を 500 lx に設定した。照明の光度制御により照度を 500 lx の 5 %である 25 lx 上昇させ、その 40 ms 後に元の照度 500 lx に戻した場合における照度推移を取得した。センサノードにおける照度取得周期を 100 ms と 20 ms に設定し、それぞれ 1000 ms 間照度取得を行った。

2.2 予備実験結果

照度取得周期 100 ms で取得した照度推移を図 3 に、照度取得周期 20 ms で取得した照度推移を図 4 にそれぞれ

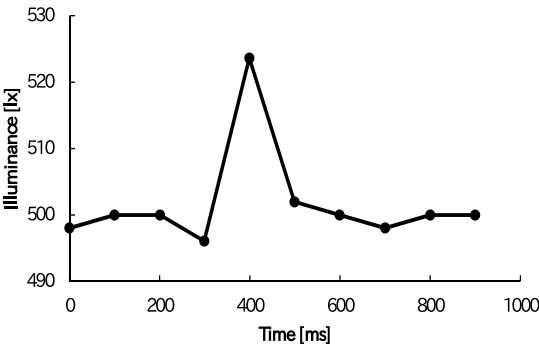


図 3 照度取得周期 100 ms の照度履歴

Fig. 3 The history of measured illuminance in 100 ms intervals

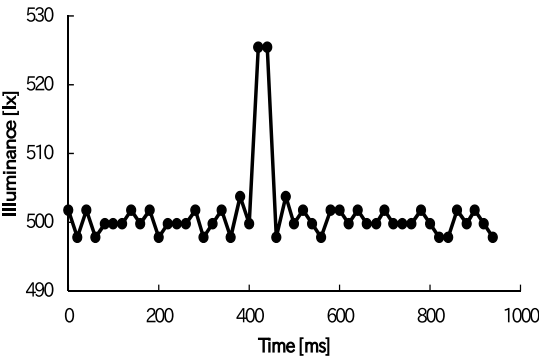


図 4 照度取得周期 20 ms の照度履歴

Fig. 4 The history of measured illuminance in 20 ms intervals

表 1 照度取得周期 100 ms, 20 ms における照度取得回数

Table 1 The number of illuminance acquisitions

Sampling interval [ms]	Acquisitions
100	10
20	48

示す。なお、照度取得時間は 1000 ms であり、それぞれの照度取得周期における照度取得回数を表 1 に示す。

図 3, 図 4 から、照度センサは人が感知できない現在照度の 7 %以内の照度変化も感知していることが分かる。また、図 3, 図 4 に共通して、取得した照度には揺れが生じている。この細かい揺れは照度センサで取得した際の雑音と考えられる。

照度取得時間 1000 ms, 照度取得周期 100 ms の場合、照度取得回数は 10 回となる。また、照度取得時間 1000 ms, 照度取得周期 100 ms の場合、照度取得回数は 50 回となる。しかし、表 1 から分かるように、それぞれの照度取得周期 20 ms における照度取得回数は理論的な回数と異なっている。以上の実験結果から、照明の光度制御を用いたデータ送信手法を検討する。

3. 照明の光度制御を用いたデータ送信手法

3.1 照明の光度制御を用いたデータ送信手法概要

本研究が提案するデータ送信手法では、照明の光度制御

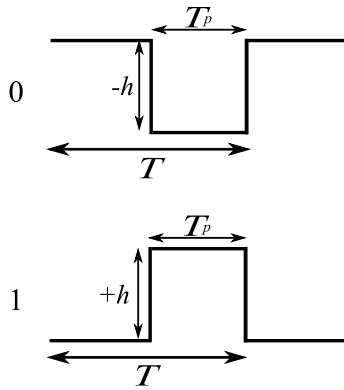


図 5 2LIM によるデータ変調

Fig. 5 Data modulation of LIM

による照度変化を用いてデータ変調を行い，センサノードに搭載した照度センサを用いて取得した照度値によってデータ復調を行う．なお，照明の光度制御によるデータ変調の際の照度変化量 h [lx] は，人が感知できない 7 % 以内とする．また，光度制御による照度変化時の照度波形をパルスと定義する．

3.2 光度制御を用いたデータ変調手法

本研究が提案するデータ変調手法では，照明の光度制御によって，照度を变化させて変調を行う．光度制御による変調手法として，照度変化の大きさを用いる光強度変調手法 (LIM: Light Intensity Modulation)，照度変化の発生タイミングを用いるパルス位置変調手法 (PPM: Pulse Position Modulation) および両手法を組み合わせたハイブリッド変調手法 (LI-PPM: Light Intensity and Pulse Position Modulation) を提案する．これらの 3 変調手法において，データ送信周期を T [ms] とする．また，基準となる照度を Ill_c [lx]，パルスの幅 T_p [ms] をパルス幅と定義する．データ送信周期 T とパルス幅 T_p は，センサノードにおける照度取得周期 f [ms] に依存する．

光強度変調手法 (LIM)

予備実験から，センサノード側の照度取得回数にばらつきがあることが判明した．したがって，送信側の照明と受信側のセンサノード間の同期は容易ではない．そこで LIM は，データごとに変調することによって，送信側と受信側の同期の必要性を除く．LIM の変調を図 5 に示す．図 5 に示すように，照明は T ごとに送信するデータによって光度の上昇または下降を行い，データ変調を行う．また，多階調に光度制御を行うことで一度に複数ビットを送信できる． G 階調の LIM を G -LIM と定義する．ただし， G は 2 のべき乗である．

パルス位置変調手法 (PPM)

図 6 に示すように，PPM は 1 シンボルを L 個のタイムスロットに分割し，その一箇所にパルスを配置することでデータ変調を行う．ここで，1 シンボルはデータ送信周期 T

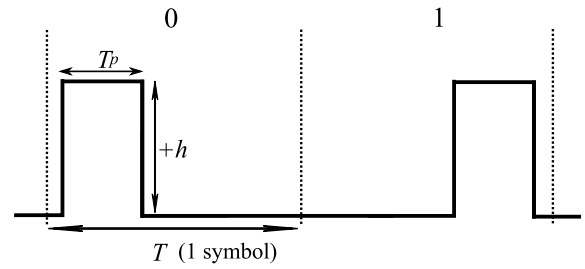


図 6 2PPM によるデータ変調

Fig. 6 Data modulation of 2PPM

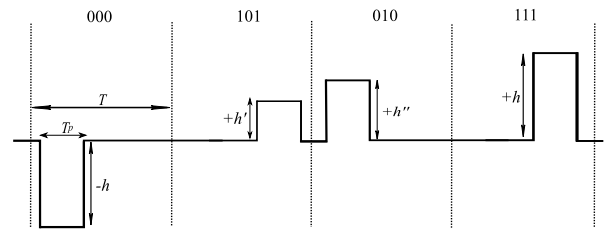


図 7 4LI-2PPM によるデータ変調

Fig. 7 Data modulation of 4LI-2PPM

を示す．すなわち，1 シンボル長のパルス配置位置によって伝送情報が決まる．1 シンボルを L 個のタイムスロットに分割する PPM を L -PPM という [7]．

PPM ではパルスの配置配置によってデータを変調するため，送信側と受信側の同期が必要である．しかし，予備実験から，照度取得回数は理論的な値と差があることが明らかになった．したがって，PPM で変調したデータを復調するには，1 シンボルごとの同期を必要としない手法が必要である．

ハイブリッド変調手法 (LI-PPM)

LIM と PPM を組み合わせることで，一度の照度変化で複数ビットを送信できる．特に，光度制御による照度変化を多階調にする G -LIM と PPM を組み合わせることで，一度の照度変化でより多くのビットを送信することができる． G -LIM と L -PPM のハイブリッド変調手法を G -LI- L -PPM と定義する．4LI-2PPM によるデータ変調を図 7 に示す．図 7 は，照度変化を 4 階調にしている．

3.3 センサノードにおけるデータ復調手法

センサノード側のデータ復調は，照明の光度制御による照度変化を検知することで行う．照度取得時の雑音と光度制御による照度変化を区別するために，時間微分による照度変化検知および復調を行う手法 (SDTD: Signal Detection with Time Derivative) とあらかじめ登録した波形と実際に取得した照度履歴の相関から照度変化検知および復調を行う手法 (SDCC: Signal Detection with Correlation Coefficient) を提案する．なお，両復調手法ともに照度取得周期 f [ms] をパラメータに持つ．また，データ変調に PPM を用いた場合の復調手法 (DPI: Demodulation with Pulse Interval for PPM) を提案する．

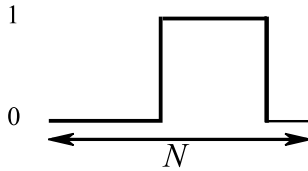


図 8 ビット波形
Fig. 8 Bit waveform

時間微分による照度変化検知およびデータ復調手法 (SDTD)

図 3, 図 4 をみると, 光度制御による照度変化が大きいことが分かる. SDTD は照度変化量を利用する. 取得した現在照度値 Ill_t と前回取得した照度値 Ill_{t-1} を時間微分し, 得られた微分値 I によって照度変化検知および復調を行う.

次に, 具体的なアルゴリズムを述べる. センサノードは照度取得周期 f [ms] ごとに照度を取得する. そして, 取得した現在照度値 Ill_t と前回取得した照度値 Ill_{t-1} から I を算出する. $|I|$ が閾値 α よりも大きければビットが送信されたと検知し, I によってビットを判定する. なお, α の値は基準となる照度に依存する. 変調時の基準となる照度 Ill_c の値によって α が変化するため, Ill_c の値ごとに α を設定する必要がある. 以下に, SDTD のフローを示す.

- (1) センサノードが照度を取得する
- (2) センサノードが時間微分値 I を算出する
- (3) $|I| > \text{閾値 } \alpha$ である場合,
 I の値によってビットを判定する
- (4) (1) に戻る

相関係数による照度変化検知およびデータ復調手法 (SDCC)

SDTD で用いる閾値 α は基準となる照度 Ill_c に依存する. したがって, α を Ill_c の値ごとに用意する必要がある. 一方, SDCC で用いる照度変化検知の閾値 α は Ill_c に依存しない. データ変調時の照度波形をセンサノードにあらかじめ登録し, 実際の照度波形と比較することで照度変化を検知する. あらかじめ登録しておく照度波形をビット波形と定義する. 図 8 にビット波形を示す.

SDCC は, 相関係数を用いてビット波形と実際に取得した照度波形を比較する. 図 8 に示すとおり, ビット波形は 0 または 1 の系列からなる. センサノードは過去 N 回分の照度を保持する. また, ビット波形を形成する系列 x_i の長さを N とする. 時刻 t における相関係数 r を算出する式を式 1 に示す.

$$r = \frac{\sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})(y_{t-i} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^N (y_{t-i} - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

N : 保持する照度数

x_i : ビット波形を形成する系列の値

$\bar{x}$: ビット波形の平均

y_t : 時刻 t において取得した実際の照度 [lx]

$\bar{y}$: 時刻 t から過去 N 点分の平均照度 [lx]

式 1 で算出した相関係数 r を用いて照度変化の検知を行うが, 照度変化量は算出できない. したがって, 照度変化量は相関係数 r を算出する際に用いる共分散を正規化して算出する. 共分散の正規化を行う式を式 2 に示す.

$$C_n = \frac{\sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})(y_{t-i} - \bar{y})}{\bar{y}} \quad (2)$$

式 2 により, Ill_c の値により異なる照度変化量を同一の基準で比較することができる.

次に, SDCC の具体的なアルゴリズムを述べる. センサノードは照度を取得する度に式 1 によって r を算出する. r が閾値 α よりも大きかった場合, 照度変化が発生したと判定する. 次に式 2 から C_n を算出し, ビット判定を行う. 以下に, SDCC のフローを示す.

- (1) センサノードが照度を取得する
- (2) センサノードは式 1 により相関係数 r を算出する
- (3) $r > \text{閾値 } \alpha$ であれば,
 (a) 式 2 から正規化した共分散 C_n を算出する
 (b) C_n の値によりビット判定を行う
- (4) (1) に戻る

データ変調に PPM を用いた場合の復調手法 (DPI)

1 シンボルを複数のタイムスロットに分割する PPM は, 1 シンボルごとに同期が必要である. しかし, 予備実験から, 照度取得回数は理論的な値とは差があることが判明した. したがって, データ変調に PPM を用いた場合の復調には, 同期を必要としない手法が必要となる. そこで DPI は, PPM のパルス間隔がいくつかのパターンに分けられることを用いて復調を行う.

パルス間隔は, シンボル中のあるタイムスロットに配置されたパルスから次のシンボル中のタイムスロットに配置されたパルスにより決まる. すなわち, あるビットから次のビットへの遷移パターンによってパルス間隔は異なる. 2PPM におけるビット遷移パターンとパルス間隔の対応を図 9 に示す. 図 9 をみると, 1 シンボル長を T とした場合, それぞれのビット遷移におけるパルス間隔を T を用いて表現できる. したがって, あるパルス間隔と T の比を算出することで, シンボル長に依存しない閾値の設定が可能となる. また, 2PPM の場合, ビットが 0 から 0, 1 から 1 への遷移におけるパルス間隔は T である. したがって, 遷移前のビットとパルス間隔から次のビットを判定する.

DPI は, 照度変化を検知した際にパルス間隔と 1 シンボル長 T の比を算出し, 算出した比と遷移前のビットから送信されたビットを判定する. DPI における照度変化検知

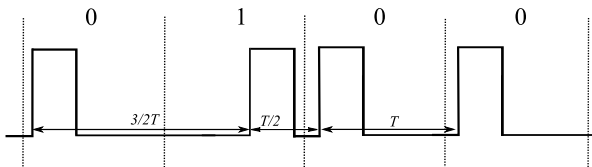


図 9 2PPM におけるビット遷移とパルス間隔の対応

Fig. 9 The correspondence of bit-transition to pulse interval on 2PPM

は SDTD または SDCC を用いて行う．以下に，DPI のフローを示す．

- (1) センサノードが照度を取得し，照度取得回数をカウントする
- (2) SDTD または SDCC によって照度変化の有無を判定する
- (3) 照度変化を検知した場合，
 - (a) 照度取得回数を前回の照度変化からのパルス間隔とする
 - (b) パルス間隔と 1 シンボル長 T との比を算出する
 - (c) 算出した比と遷移前のビット bit_{t-1} から，次のビット bit_t を判定する
 - (d) 照度取得回数を 0 にする
- (4) (1) に戻る

4. 各変調手法および復調手法を用いたデータ送信実験

4.1 実験概要

本研究で提案した LIM，PPM および LI-PPM によるデータ変調と SDTD，SDCC および DPI によるデータ復調を用いて，データ送信精度の検証を行う．本実験は予備実験と同様の環境，機器を用いる．各データ変調手法および復調手法を用いてデータ送信精度を比較検証するために，以下の実験を行った．

1. 変調手法：2LIM，復調手法：SDTD
2. 変調手法：2LIM，復調手法：SDCC
3. 変調手法：2PPM，復調手法：SDTD と DPI
4. 変調手法：2PPM，復調手法：SDCC と DPI
5. 変調手法：4LI-2PPM，復調手法：SDTD と DPI
6. 変調手法：4LI-2PPM，復調手法：SDCC と DPI

以上の 6 種類の実験を行い，データ送信精度の比較検証を行う．データ送信精度の検証するために，ランダムな 800 ビットを 3 回伝送し，送信データと受信データを比較して誤り率を算出する．表 2 に，各実験の照明側のデータ送信周期 T ，1 データ送信周期あたりの送信ビット数 n_T ，データ送信速度をそれぞれ示す．また，パルス幅 T_p を 40 ms，センサノードにおける照度取得周期 f を 20 ms，変調における最大照度変化量を 7 %以内，SDCC におけるビット波形の長さ N を 10 とした．

実験 4 と実験 6 は，データ送信周期 T を 400 ms に設定

表 2 各実験におけるパラメータ

Table 2 Parameters on each experiments

No	Modulation	Demodulation	T [ms]	n_T [bit]	bps
1	2LIM	SDTD	200	1	5.0
2	2LIM	SDCC	200	1	5.0
3	2PPM	SDTD, DPI	200	1	5.0
4	2PPM	SDCC, DPI	400	1	2.5
5	4LI-2PPM	SDTD, DPI	200	3	15.0
6	4LI-2PPM	SDCC, DPI	400	3	7.5

表 3 照度環境 500 lx における各データ送信の誤り率

Table 3 Bit error rate with each modulations and each demodulations

No	Modulation	Demodulation	Error rate [%]
1	2LIM	SDTD	0.00
2	2LIM	SDCC	0.00
3	2PPM	SDTD, DPI	0.00
4	2PPM	SDCC, DPI	0.00
5	4LI-2PPM	SDTD, DPI	1.00
6	4LI-2PPM	SDCC, DPI	3.26

した．PPM は，パルス間隔がビット遷移パターンによって変動する．復調手法に SDCC を用いた場合，ビット波形の長さ N と照度取得周期 f の積よりも最小パルス間隔が小さいと正しく復調できない．したがって，2PPM の最小パルス間隔 $T/2$ が Nf と等しくなるようにデータ送信周期を設定した．

まず，提案した各変調手法および復調手法を用いたデータ送信の誤り率を検証するために，同一環境下におけるデータ送信実験を行う．さらに，異なる照度環境下においてデータ送信実験を行い，各変調手法および復調手法の誤り率も検証する．

4.2 同一照度環境におけるデータ送信実験

本実験では，同一照度環境下において提案した各変調手法および復調手法を用いてデータ送信実験を行い，データ送信の誤り率を検証する．基準となる照度 Ill_c を 500 lx に設定し，各実験の誤り率を算出する．

同一環境下におけるデータ送信実験結果

表 3 に，各実験の誤り率を示す．1 ビットずつ変調する 2LIM，2PPM では誤りなくデータを送信することができた．しかし変調手法に 4LI-2PPM を用いたデータ送信では誤りが発生した．

誤りの原因は多階調の照度変化を正しく検出できないことであった．実験 5 で用いた SDTD は，多階調の照度変化を時間微分値 I によって検知し，ビット判定を行っている．算出した I が雑音の影響によって理論値と異なったため，あるデータ変調による照度変化を，異なるデータとして復調したために誤りが発生した．ビットの誤判定を防ぐ

表 4 照度環境を 300 lx に設定した場合の誤り率

Table 4 Bit error rate in the case of illumination environment 300 lx

No	Modulation	Demodulation	Error rate [%]
1	2LIM	SDTD	16.58
2	2LIM	SDCC	0.00
3	2PPM	SDTD, DPI	10.54
4	2PPM	SDCC, DPI	0.00
5	4LI-2PPM	SDTD, DPI	52.63
6	4LI-2PPM	SDCC, DPI	5.26

表 5 照度環境を 700 lx に設定した場合の誤り率

Table 5 Bit error rate in the case of illumination environment 700 lx

No	Modulation	Demodulation	Error rate [%]
1	2LIM	SDTD	0.00
2	2LIM	SDCC	0.00
3	2PPM	SDTD, DPI	0.00
4	2PPM	SDCC, DPI	0.00
5	4LI-2PPM	SDTD, DPI	0.13
6	4LI-2PPM	SDCC, DPI	0.13

ためには、雑音の影響を小さくする処理が必要である。

表 3 から、最大 3.26 % の誤り率でデータ送信が可能であることを確認した。

4.3 異なる照度環境におけるデータ送信実験

本実験では、異なる照度環境における各変調および復調手法を用いたデータ送信精度の比較検証を行う。6 種類の実験を、基準となる照度 Ill_c [lx] だけを変更して行い、各実験の誤り率を比較する。JIS Z9110 照明基準総則 [8] では、工場やオフィスの推奨照度を作業別に定めている。工場やオフィスの作業別推奨照度は 300 lx ~ 750 lx となっていることから、 Ill_c を 300 lx と 700 lx に設定して実験を行う。異なる照度環境におけるデータ送信実験結果

表 4 に、 Ill_c を 300 lx に設定して各実験を行い算出した誤り率を示す。また、表 5 に Ill_c を 700 lx に設定して各実験を 3 回行い算出した誤り率を示す。

表 3 と表 4 を比較すると、実験 1 は 0.00 % から 16.58 %、実験 3 は 0.00 % から 10.54 %、実験 5 は 1.00 % から 52.63 % となり、各実験の誤り率が 10 % 以上増加した。誤りの原因として、雑音の影響が大きいことがある。300 lx の環境下ではデータ変調による照度変化幅が小さいため、雑音の影響が相対的に大きくなる。特に、変調手法に 4LI-2PPM を用いた場合、小さくなった最大照度変化幅を更に多階調に区切っているため、雑音の影響が顕著にあらわれている。また、300 lx の環境下における各実験結果を比較すると、用いる復調手法によってデータ送信の誤り率が異なることが分かる。復調に SDTD を用いたデータ送信の誤り率は、変調手法が 2LIM の場合 16.58 %、2PPM の場合 10.54

%, 4LI-2PPM の場合 52.63 % である。復調に SDCC を用いたデータ送信の誤り率はそれぞれ変調手法が 2LIM の場合 0.00 %、2PPM の場合 0.00 %、4LI-2PPM の場合 5.26 % である。以上から、復調手法に SDCC を用いた場合よりも SDTD を用いたほうが誤り率が高い。SDTD による復調で用いる照度の時間微分値 I は雑音の影響を受けやすい。一方 SDCC による復調は、雑音による照度変化を式 2 で算出した正規化した共分散 C_n によって棄却できる。したがって、データ変調による照度変化幅が小さくなる低い照度環境下では SDCC による復調が有効であるといえる。

次に、表 3 と表 5 を比較する。実験 5 の誤り率は 1.00 % から 0.13 %、実験 6 の誤り率は 3.26 % から 0.13 % となり、それぞれの実験の誤り率は改善した。700 lx の環境下ではデータ変調による照度変化幅が大きくなるため、雑音の影響が相対的に小さくなる。したがって、照度環境が 500 lx の場合と比べてデータ送信の誤り率が 10 分の 1 ほど改善した。また、700 lx の環境下における各実験の誤り率は最大 0.13 % であることから、高照度環境ではより高速にデータ送信が可能な変調手法および復調手法が有効である。変調手法として、一度の変調で複数ビットを送信できる LI-PPM が有効である。次に、変調手法に LI-PPM を用いると仮定して、SDTD と SDCC をデータ送信の高速化という観点から比較する。SDTD のデータ送信速度はセンサノードの照度取得周期のみに依存する一方、SDCC のデータ送信速度はビット波形の系列の長さ N と照度取得周期 f および最小パルス間隔に依存する。したがって、復調手法に SDTD を用いたデータ送信は SDCC を用いたデータ送信よりも高速化が容易である。したがって、高照度環境の復調は、より高速でデータ送信が可能な SDTD が有効であると言える。

最後に、変調手法の違いによる誤りの分布を考察する。照度環境 300 lx にて行ったデータ送信実験のうち、誤りが発生した実験 1、実験 3、実験 5、実験 6 の正しく受信したビット列をそれぞれ図 10、図 11、図 12、図 13 に示す。図 10、11、12、13 の横軸は各実験の 1 回の送信時間を示し、縦軸は送信したビットの番号を示す。

図 10 をみると、誤りは連続して発生している。誤りの原因は照度変化検知の失敗および照度変化の誤検知であった。照度変化の検知を失敗もしくは誤検知を行うと、以降に受信したデータはすべてずれる。したがって、送信データのビット番号と受信データのビット番号が一致しないため、誤りが連続的に発生した。受信データのずれに起因する誤りを防ぐために、照度変化検知の失敗および照度変化の誤検知を検出する機能を追加する必要がある。

次に、図 11 をみると、誤りが連続的に発生している。誤りの原因は照度変化検知の失敗および照度変化の誤検知だった。図 10 の考察で述べたように、照度変化検知の失敗および照度変化の誤検知によって受信データはずれ

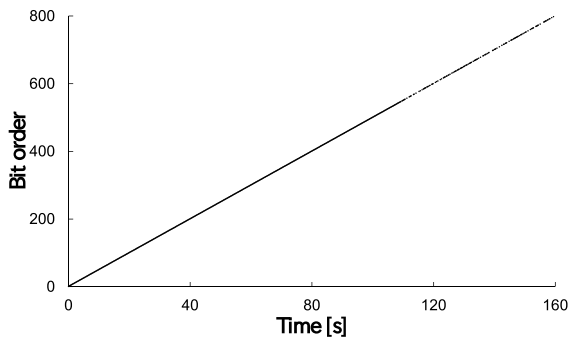


図 10 照度環境 300 lx における実験 1 の
正しく受信したビット

Fig. 10 Correct bit series of experiment 1 on 300 lx

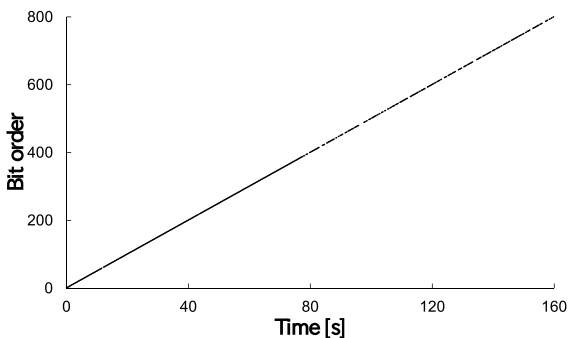


図 11 照度環境 300 lx における実験 3 の
正しく受信したビット

Fig. 11 Correct bit series of experiment 3 on 300 lx

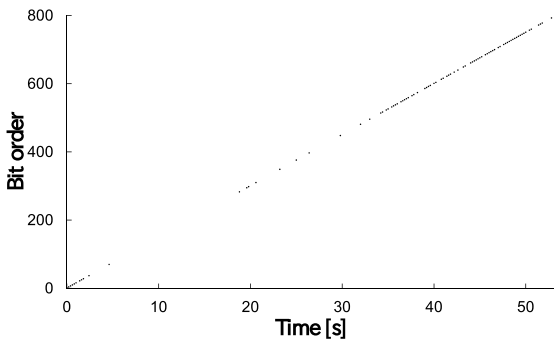


図 12 照度環境 300 lx における実験 5 の
正しく受信したビット

Fig. 12 Correct bit series of experiment 5 on 300 lx

が、PPM の復調に DPI を用いているため、ずれが生じた受信したデータは復調時に誤ったデータになる。DPI はパルス間隔と直前のビットから次のビットを復調するため、パルス間隔と直前のビットどちらかが誤っている場合、次のビット判定も誤って判定する。

図 12 では、一様に誤りが分布していることが分かる。PPM と照度変化検知失敗および誤検知に起因する誤りと、雑音の影響によるビットの誤判定が原因の誤りが複合していた。

最後に、図 13 の誤り分布をみると、誤りが点在していることが分かる。誤りの原因は雑音によるビットの誤判定

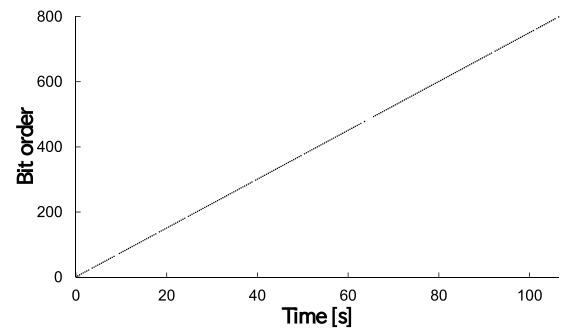


図 13 照度環境 300 lx における実験 6 の
正しく受信したビット

Fig. 13 Correct bit series of experiment 6 on 300 lx

だった。照度変化検知に関する誤りでは受信データのずれが生じて誤りがバースト的に発生する。一方ビットの誤判定は受信データのずれが発生しないため、誤りが点在する。

各照度環境においてデータ送信実験を行い、低照度環境では復調手法として SDCC が有効であることが分かった。また、高照度環境におけるデータ送信では復調手法として SDTD が有効であることが分かった。さらに、各実験における誤りの分布から、誤りの原因によって誤りの分布が異なることを明らかにした。照度変化検知に関する誤りはバースト的に発生するため、照度変化検知の精度を向上する必要があることが分かった。

5. 関連研究

本研究と同様、可視光を用いてデータ送信を行うシステムに可視光通信がある [9][10][11][12]。照明機器を送信源とした可視光通信は、通信の開始や終了を視認でき、信号の到達範囲を容易に制御できる。また、照明機能と通信機能を同時に実現できることや、電波の使用が禁止されている病院などでも通信を行えるなどの利点がある。現在主流の可視光通信では、LED の高速点滅によってデータを送信するため、送信機に専用のデバイスを組み込む必要がある。また、受信機器にイメージセンサや分解能の高いフォトダイオードといった専用の受光器が必要である。本研究では、送受信機に既存の調光可能な照明と一般的な照度センサを用いており、すでに調光可能な照明を導入している環境で容易に適用できる。

6. 結論と今後の展望

本研究では、照明の光度制御を用いたセンサノードに対するデータ送信実現のために、照明の光度制御によるデータ変調手法およびセンサノードにおける復調手法を提案した。照明の光度制御によるデータ変調手法では、照度変化の大きさを用いる LIM、照度変化の発生タイミングを用いる PPM および LIM と PPM を組み合わせた LI-PPM を提案した。センサノードにおける復調手法では、センサノードに搭載した照度センサを用いて照度取得を行い、時

間微分を用いて照度変化検知および復調を行う SDTD, 相関係数を用いて照度変化検知および復調を行う SDCC をそれぞれ提案した. また, PPM の復調に同期を必要としない DPI を提案した. さらに, 各手法を組み合わせたデータ送信実験を実環境にて行い, 提案した各手法を組み合わせてデータ送信が可能であることを確認した. また, 照度が異なる環境においてデータ送信実験を行った. 実験結果から, データ送信を行う環境の照度によって, 用いるべき変調手法および復調手法があることを明らかにした. さらに, 各実験の誤りの分布を解析し, 誤りの原因によって誤りの分布が異なることを明らかにした.

今後の課題として, 様々な雑音の影響を考慮にいたれたデータ送信手法を考案することが挙げられる. 本研究では, 既存の調光可能な照明と一般的な照度センサを用いたデータ送信可能性の検討と, 提案した各手法の比較検証を行うために, 可能な限り雑音を排除した理想的な環境において実験を行った. しかしながら, 今後は太陽光などの外光や人影などの外乱のような雑音がある環境でも, 高精度でデータ送信が可能な手法を考案する必要がある. 外光を考慮したデータ送信手法として, 室内の外光分布から外光を推定し, 照度センサが取得する値から外光を取り除く手法が有効である. また, 人影などの外乱による照度変化は急激であると考えられるため, 照明の光度制御による照度変化と区別することは容易である. したがって, センサノードにおける復調時に照度変化量を算出し, 照明による照度変化以上の変化があった場合は, 外乱として取り除くことでデータ送信が可能であると考えられる.

参考文献

- [1] 今仲行一, 佐々木昌: 無線センサネットワークの開発動向, 電気学会論文誌 E, Vol. 131, No. 3, pp. 97–101 (2011).
- [2] 井家上哲史: センサネットワーク概観, 電気学会論文誌 C, Vol. 128, No. 10, pp. 1498–1503 (2008).
- [3] Hui, J. W. and Culler, D.: The dynamic behavior of a data dissemination protocol for network programming at scale, *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM, pp. 81–94 (2004).
- [4] Levis, P. and Culler, D.: Maté: A tiny virtual machine for sensor networks, *ACM Sigplan Notices*, Vol. 37, No. 10, ACM, pp. 85–95 (2002).
- [5] Fok, C., Roman, G. and Lu, C.: Rapid development and flexible deployment of adaptive wireless sensor network applications, *Distributed Computing Systems, 2005. ICDCS 2005. Proceedings. 25th IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 653–662 (2005).
- [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, No. 5, pp. 346–351 (2001).
- [7] Rajagopal, S., Roberts, R. D. and Lim, S.: IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support, *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 50, No. 3, pp. 72–82 (2012).
- [8] 日本規格協会: JIS Z9110-2010 照明基準総則 (2010).
- [9] Komine, T. and Nakagawa, M.: Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights, *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 1, pp. 100–107 (2004).
- [10] Elgala, H., Mesleh, R. and Haas, H.: Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM, *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 55, No. 3.
- [11] Jovicic, A., Li, J. and Richardson, T.: Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market, *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 51, No. 12, pp. 26–32 (2013).
- [12] Grobe, L., Paraskevopoulos, A., Hilt, J., Schulz, D., Lassak, F., Hartlieb, F., Kottke, C., Jungnickel, V. and Langer, K.: High-speed visible light communication systems, *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 51, No. 12, pp. 60–66 (2013).