

## 蛍光灯通信における受信波形特性を考慮した復号方式の研究

小林 卓<sup>†</sup> 牧野 秀夫<sup>‡</sup> 劉 笑寒<sup>†</sup> 工藤 淳平<sup>†</sup> 前田 義信<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科 〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐二の町 8050

<sup>‡</sup> 新潟大学工学部情報工学科 〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐二の町 8050

<sup>††</sup> 新潟大学工学部福祉人間工学科 〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐二の町 8050

E-mail: <sup>†</sup> suguru@gis.ie.niigata-u.ac.jp, <sup>‡</sup> makino@ie.niigata-u.ac.jp

**あらまし** 屋外と同様に屋内における位置情報は歩行者誘導などの面から有用である。そこで、我々は屋内位置情報の提供を蛍光灯通信により実現する方法を検討している。今回は、基線変動を含む蛍光灯の光から位置情報のみをデジタル信号処理により分離する方法について述べる。まず、処理に必要なサンプリング周波数を算出し、次にフォトセンサにより光信号を受信しその波形の特徴を解析する。その後、受信波形の特性を考慮した復号方式を提案し実験によりその動作を確認する。実験では、通信で使用する 8 bit 信号の全パターンについて受信実験を行い、サンプリング周波数 2MHz、蛍光灯とフォトセンサ間の距離 1.5m の条件下で、1bit 誤り率  $10^{-4}$  以下の結果を得た。

**キーワード** 蛍光灯通信, デジタル信号処理, 復号方式, 位置情報, 屋内位置案内

## Fluorescent light communication: a study of waveform characteristics and decoding methods

Suguru KOBAYASHI<sup>†</sup> Hideo MAKINO<sup>‡</sup> Xiaohan LIU<sup>†</sup>

Jumpei KUDO<sup>†</sup> and Yoshinobu MAEDA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Niigata University

8050 Ikarashi-ninotyo, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

<sup>‡</sup> Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University

8050 Ikarashi-ninotyo, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

<sup>††</sup> Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University

8050 Ikarashi-ninotyo, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

**Abstract** Indoor pedestrian navigation systems using a location based service will be as useful as the better known 'GPS' outdoor systems. We have been studying a position based system using fluorescent light communication. In this paper we describe how to extract location signals from fluorescent light using digital signal processing. The first step is to calculate the optimal sampling frequency for the signal processing. This is followed by an analysis of the characteristics of the received waveform from the fluorescent light. Based on the analyses of the waveform characteristics we used a decoding method with a sampling frequency of 2MHz at the 1.5 m distance between a photo sensor and the fluorescent. Our experiments confirmed the suitability of the method and the error rate of each decoded bit was less than  $10^{-4}$  in all combinations of 8 bit length transmission signal patterns.

**Keyword** Fluorescent lights communication, Digital signal processing, Decoding method, Location information, Indoor positional guidance

## 1. はじめに

近年、GPS 付き携帯電話やカーナビゲーションシステムの普及に伴い、位置案内サービスが多くの人々に利用されるようになった。これらの位置案内サービスは、屋外の位置の絶対測位が可能な GPS (Global Positioning System) を用いて必要な現在位置情報を取得している[1],[2]。一方、建物構造が複雑化した現在において、屋外のみならず、広い建物内や地下街での位置情報に基づいた情報提供は有用である。しかし、GPS は衛星電波を用いて現在の位置情報を取得するため、衛星からの電波が十分に届かない地下や屋内において使用することはできない。

この問題を解決するため、筆者らは一般照明装置として普及している蛍光灯に着目した。蛍光灯は、地下街や建物内において設置場所や供給電源が確保されており、照度基準に基づいた明るさを満たすように屋内の至るところに設置されている[3],[4]。そこで、これらの蛍光灯を用いた可視光通信[5],[6](以下、蛍光灯通信)により位置情報を伝送して音声による屋内位置案内の研究[7],[8]を進めている。蛍光灯通信は、誤差 1m 以下の高精度な現在位置の特定が可能であり、その情報を取得可能な光の受光範囲を容易に特定できるという利点がある。これまで、筆者らは分散処理を用いた位置情報の管理方法[9],[10]やデータベースの構築法[11]、そして移動速度と取得可能な情報量[12]についての研究を行ってきた。ここでは、蛍光灯から発信された光信号から送信信号を復号する際、独自に作成したアナログ復号回路[13]を使用している。しかし、使用する周波数に対する専用の復号回路が必要であり、その復号精度を高めるためには各蛍光灯の仕様に対応したフィルタの調節が必要となる。そこで、ソフトウェアによるデジタル信号処理を用いた復号方式を新たに考案した[14]。

本稿では、まずこの復号方式を用いてデジタル信号処理を実施する際の最適なサンプリング周波数決定方法について述べる。次に、復号方式を実際に使用する蛍光灯からの受信波形の特性に適合したものに改善し、その信頼性を検証する。具体的には、1 文字分の送信情報量である 8bit の全パターンについて復号実験を行い、本復号方式のビット誤り率を検証する。

## 2. 蛍光灯通信

### 2.1. 情報送信

図 1 に 32W インバータ式蛍光灯を用いた情報送信側のブロック図を示す。

パーソナルコンピュータ 1(以下、PC1)において蛍光灯通信の送信速度を設定し、入力した送信情報を RS-232C(Recommended Standard 232 version C)を通して制御装置へ送信する[10]。RS-232C 通信では、スタート、ストップビットを用いた非同期方式である調歩同期方式により情報をその下位 bit から送信する[15]。

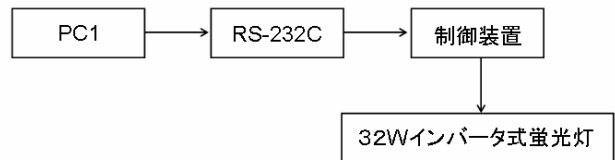


図1 情報送信側のブロック図

例として、文字“a”を送信した場合、その ASCII コード  $97(=(61)_{16})$  は、“0110 0001”として扱われる。そして RS-232C 通信より出力される情報は、この LSB(Least Significant Bit)から順次出力される。ここにスタートビット“0”，ストップビット“1”が情報送信時に付加される。このため、文字“a”に対して、“0100001101”の符号列が蛍光灯への 1 文字分の入力シリアル信号となる。

PC1 からの送信情報は、FSK(Frequency Shift Keying)方式を用いて蛍光灯から発信される。この FSK 方式とは、デジタル符号に応じて搬送波の瞬時周波数を離散的に変化させる変調方式であり、振幅を一定に保ちながら信号を変調する[16],[17]。

制御装置では、PC1 からの入力シリアル信号に対し信号“1”の部分を基本周波数 50kHz、信号“0”の部分を信号周波数 70kHz へとそれぞれ変調する。50kHz と 70kHz の各周波数成分は、蛍光灯から光として出力される際に両波整流波形となるため、それぞれ 2 倍の 100kHz と 140kHz の周波数として出力される。この入力信号と出力波形の関係を図 2 に示す。上段が蛍光灯への入力シリアル信号、下段がそれに応じて蛍光灯から発信される出力波形である。

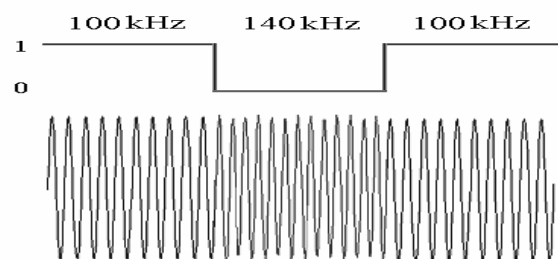


図2 発振周波数の変調  
入力シリアル信号(上段)、出力波形(下段)

## 2.2. 情報受信

図3にフォトセンサを用いた光信号受信側のブロック図を示す。

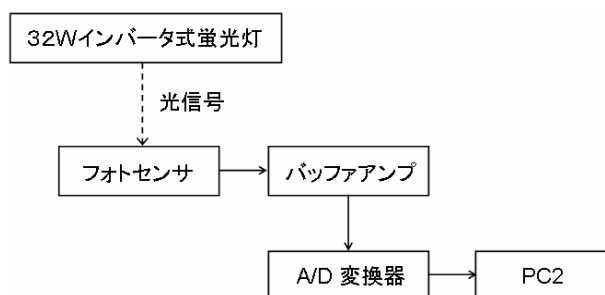


図3 情報受信側のブロック図

まず、蛍光灯からの光信号はフォトセンサ(東芝製:TPS601A)で受信される。そして、この受信された波形はバッファアンプ(MAX450,40dB)において増幅され、A/D変換器(大井電子製AD7161-PCIボード, 120MHz, 2MByte)によりA/D変換される(±1.0V, 12bit)。ここでは、送信情報を発信している光信号を正確にA/D変換する必要がある。そこで、蛍光灯への入力シリアル信号をA/D変換器の外部トリガ端子にも同時に入力し、この信号の立ち下りからA/D変換を開始する。

A/D変換して得たデータをパーソナルコンピュータ2(PC2)に保存し、その時系列データに対して後述する復号方式を用いて情報を抽出する。

## 2.3. サンプルング周波数

本復号方式では、まず最初に波形の周波数を求める。具体的には、零交差計数方式[16]の考え方を応用し、半周期単位の信号抽出(以下 半周期抽出)を行なう。このため、各半周期をサンプルデータ数(以下、データ数)から正確に判別しなくてはならない。

この蛍光灯通信は、制御装置における電圧制御型発信回路によりFSK方式を実現している[13]。このため、基本周波数と信号周波数の周波数差は40kHzと一定であるが、蛍光灯の点灯周波数に関して、すべての蛍光灯が一定の基本周波数で点灯しているとは限らず、各蛍光灯は点灯周波数に数%の誤差を持っており、その周波数は点灯時間で推移する(図4)。このため、基本周波数と信号周波数の2つの半周期を区別するためには、各周波数の半周期を弁別するために必要なデータ数に最低±1の幅を持たせる必要がある。

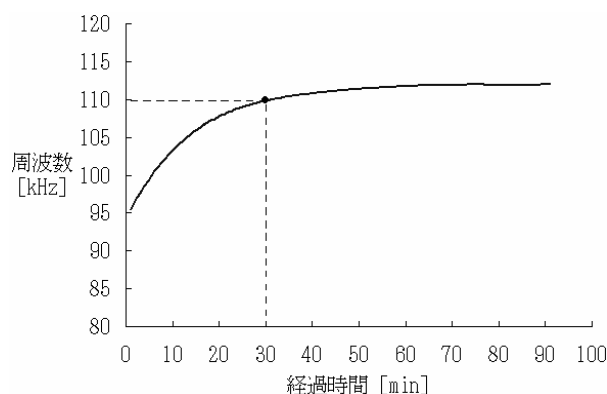


図4 受信周波数の時間推移

具体的には、基本周波数と信号周波数の各半周期に必要なデータ数を理論値として求め、その小数点以下を切り下げてデータ数差が3以上となるサンプルング周波数がA/D変換時には必要となる。

使用すべきサンプルング周波数 $f_s$ は、基本周波数 $f_1$ 、信号周波数 $f_2$ のとき、各半周期内のデータ数 $n_{f1}$ 、 $n_{f2}$ に対して、(1)式を満たす必要がある。

$$\lfloor n_{f1} \rfloor - \lfloor n_{f2} \rfloor \geq 3 \quad (1)$$

$$n_{f1} = \frac{1}{2f_1} \div \frac{1}{f_s} = \frac{f_s}{2f_1} \quad (2)$$

$$n_{f2} = \frac{1}{2f_2} \div \frac{1}{f_s} = \frac{f_s}{2f_2} \quad (3)$$

基本周波数100kHz、信号周波数140kHzを使用した場合、サンプルング周波数 $f_s$ と各半周期の抽出に必要な理論値のデータ数、そして各サンプルング周波数における(1)式の判定結果を表1に示す。

表1 サンプルング周波数と条件

$f_s$ [MHz]	$n_{f1}$	$n_{f2}$	条件
2	10.0	7.14	○
1.9	9.50	6.78	○
1.8	9.00	6.42	○
1.7	8.50	6.07	×
1.6	8.00	5.71	○
1.5	7.50	5.35	×
1.4	7.00	5.00	×
1.3	6.50	4.60	×

## 2.4. 受信波形特性

送信速度 9600bps を用いた場合の入力シリアル信号とフォトセンサでの受信波形の様子を図 5 に示す。

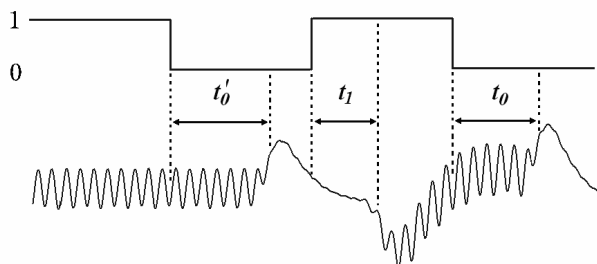


図5 入力シリアル信号(上段)と受信波形(下段)

蛍光灯の光を 2 つの異なる周波数で構成するため、点灯周波数切替え時に蛍光灯の輝度に変化がある。このため、受信器であるフォトセンサの受信波形では、蛍光灯の点灯周波数が切り替わる際に波形が変動する(以下、波形変動)。そして、この波形に見られる波形変動は、約 60kHz 以下の低い周波数成分で構成されている。

蛍光灯への入力切り替わり信号周波数の周波数が増えるまでの時間(以下、応答時間)は、信号“0”への変化と信号“1”への変化で異なる。信号“0”に対する応答時間を  $t_0$ 、信号“1”に対する応答時間を  $t_1$  とし、送信間隔をあけて送信された情報の一文字目のスタートビット“0”(以下、第 1 スタートビット)に対する応答時間を  $t'_0$  とすると、各応答時間には以下の関係がある。

$$t_1 < t_0 < t'_0 \quad (4)$$

信号“0”の応答時間と信号“1”の応答時間の差(以下、応答時間差)より、送信信号の隣接する信号“0”と“1”では、送信速度から得られる 1bit の送信時間(以下、1bit 送信時間)と実際に周波数を変化させている時間が異なる。この信号“0”と“1”の応答時間差を  $t_d$ 、隣接した信号“0”の発信される時間を  $T_0$ 、信号“1”の発信される時間を  $T_1$ 、1bit 送信時間を  $T$  とすると、各時間は以下の式で表される。

$$T_0 = T - t_d \quad (5)$$

$$T_1 = T + t_d \quad (6)$$

また、第 1 スタートビットの応答時間と、他の信号“0”の応答時間との差を  $t'_d$  とすると、第 1 スタートビットの発信される時間  $T'_0$  は、以下の式で表される。

$$T'_0 = T_0 - t'_d \quad (7)$$

今回、実験に用いた装置の応答時間差  $t_d$  は平均で約 20 $\mu$  秒あり、第 1 スタートビットと信号“0”の応答時間の差  $t'_d$  は、100m 秒以上の送信間隔をあけた際、平均約 13 $\mu$  秒あることを確認した。

$$t_d = t_0 - t_1 \approx 20 \quad [\mu \text{ 秒}] \quad (8)$$

$$t'_d = t'_0 - t_0 \approx 13 \quad [\mu \text{ 秒}] \quad (9)$$

## 3. 復号方式

### 3.1. ノイズ除去

フォトセンサにおける受信波形は、ノイズ成分を含んでいる。このため、蛍光灯の基本周波数と信号周波数の各周波数成分以外のノイズ成分を除去することで、正確に信号抽出処理を行なうことができる。そこで、デジタルフィルタを用いてノイズ除去を行なう。

ここで除去する周波数成分として、前述の点灯周波数の切り替え時に生じる波形変動部分を構成する成分が挙げられる。この変動部分は、約 60kHz 以下の周波数成分で構成されている。

また、必要な信号成分以上の高い周波数成分も除去する必要があるため、表 2 に示すバンドパス特性のデジタルフィルタを用いてノイズ除去を行う。その様子を図 6 に示す。上段が受信波形、下段がノイズ除去波形である。

表2 デジタルフィルタ特性

種類	FIR デジタルフィルタ		
次数	150		
減衰量	40 dB		
	遮断域 1	通過域	遮断域 2
周波数	0kHz ~60kHz	90kHz ~150kHz	180kHz ~

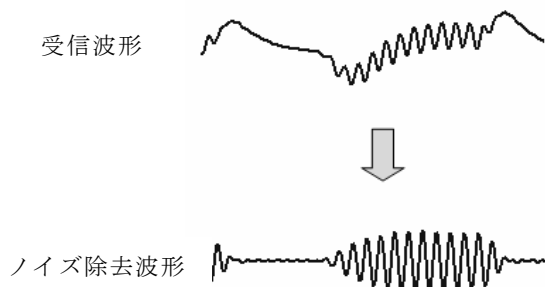


図6 ノイズ除去処理

### 3.2. 半周期抽出

今回使用する 9600bps の送信速度では、送信情報の 1bit 送信時間が約 100 $\mu$  秒と短いため、信号抽出は細かく行なう必要がある。そこで、半周期を抽出単位とし信号を抽出する。しかし、波形データの中心が零線を通らないため、零点交差計数方式のように零交差点間を半周期とすると正確に半周期を抽出することはできない。そこで、本復号方式では波形データと一定の値との交差点間を半周期とせず、波形データの振幅ピーク値の midpoint を半周期として扱うことで、各データ波形に沿った信号抽出を行なうこととする。

信号抽出は、半周期に含まれているデータ数と閾値を比較することにより、基本周波数か信号周波数かを判定する。閾値として、基本周波数  $f_1$  と信号周波数  $f_2$  の各半周期に必要なデータ数の平均値を用いる。

閾値と各半周期のデータ数との関係を図 7 に示す。半周期のデータ数  $n_i$  が閾値より多ければ基本周波数として認識し、閾値より少なければ信号周波数として認識する。

$$\text{閾値} = \frac{n_{f1} + n_{f2}}{2} \quad (10)$$

$$\text{半周期} = \begin{cases} \text{基本周波数の半周期} & (n_i > \text{閾値}) \\ \text{信号周波数の半周期} & (n_i < \text{閾値}) \end{cases} \quad (11)$$

例として、サンプリング周波数 2MHz を用いた場合、基本周波数 100kHz 成分の半周期には 10 個、信号周波数 140kHz 成分の半周期には 7.14 個のデータ数が必要となる。そこで、閾値にはこの平均値 8.57 を設定する。

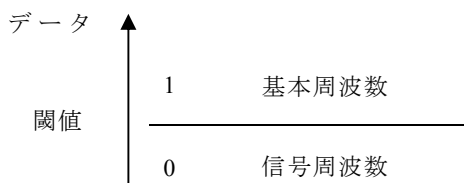


図7 データ数と閾値

半周期抽出の様子を図 8 に示す。上段がノイズ除去波形、下段が信号を抽出した波形である。

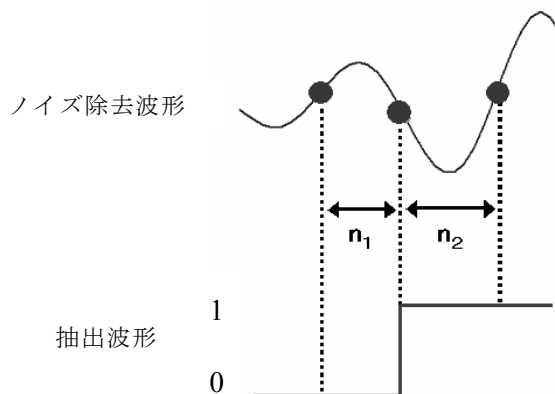


図8 半周期抽出処理

### 3.3. 信号弁別

信号抽出処理で得られた波形は、蛍光灯の応答時間差により、隣接した“0”と“1”とのパルス幅が異なる。このため、1bit 送信時間でデータを区切り、各区間を信号“0”もしくは“1”に再度弁別する方式で波形整形を行なう。その結果、蛍光灯へ入力されたシリアル信号と同一の復号符号列を得ることができる。

具体的には以下の手順により弁別を行う。

- 1) 信号抽出処理により得られた波形を送信速度に対応した 1bit 送信時間  $T$  単位で区切る
- 2) 信号“0”として抽出されたデータ数の合計を閾値と比較して各区間を“0”，あるいは“1”に弁別する

受信波形特性のため、処理 2 では 1bit 送信時間から蛍光灯応答時間差を減算した時間を対象に信号“0”のデータ数を調べる。第 1 スタートビットの応答時間差が他の応答時間差  $t_d$  と異なるため、送信間隔  $t_s$  が補正を加える必要のある送信間隔  $T_s$  以上のとき、そのスタートビットに対する弁別処理の対象区間に時間差  $t'_d$  の補正を加える。

$$\text{対象区間の長さ} = \begin{cases} T - t_d & (t_s < T_s) \\ T - t_d - t'_d & (t_s \geq T_s) \end{cases} \quad (12)$$

この対象区間内に含まれる信号“0”のデータ数が、閾値以上のとき信号“0”として弁別し、閾値未満のとき信号“1”として弁別する。このとき、閾値として対象区間の 50% のデータ数を用いる。

1bit 送信時間  $T$ , 応答時間差  $t_d$ , 第 1 スタートビット応答時間差  $t'_d$ , 送信間隔  $t_s$ , 補正が必要な間隔  $T_s$ , サンプル周波数  $f_s$  のとき, 閾値  $N$  は次式により得られる.

$$N = \begin{cases} \frac{f_s(T-t_d)}{2} & (t_s < T_s) \\ \frac{f_s(T-t_d-t'_d)}{2} & (t_s \geq T_s) \end{cases} \quad (13)$$

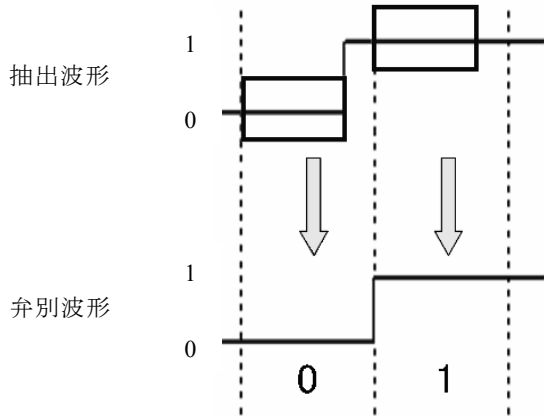


図9 信号弁別処理

### 3.4. 情報抽出

信号弁別により得られた符号列を復号する. 図 10 に 8bit 情報の抽出方法を示す.

調歩同期方式を用いた RS-232C 通信では, スタートビット“0”からストップビット“1”の間の 8bit が情報 bit であり, その送信情報は符号列の LSB から送信されている[13]. そこで, この LSB から MSB までの情報を取得する.

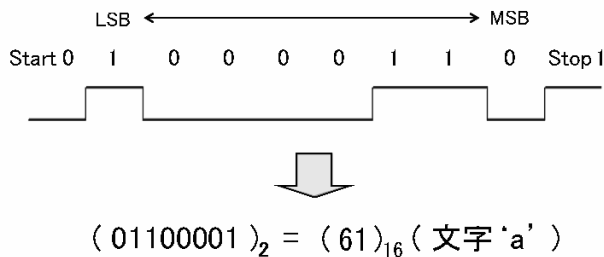


図10 情報抽出処理

## 4. 復号実験

### 4.1. 実験方法

実験データを以下の条件で取得し, その復号成功数とビット誤り率を調べる.

- ・ 32W インバータ式蛍光灯を使用
- ・ 基本周波数  $f_1$  は 100kHz
- ・ 信号周波数  $f_2$  は 140kHz
- ・ フォトセンサは蛍光灯直下に固定
- ・ 蛍光灯までの高さは 1m と 1.5m に設定
- ・ 送信情報は 8bit データ (0~255) を使用
- ・ 送信速度は 9600bps
- ・ サンプル周波数  $f_s$  は 2MHz
- ・ 実験は各高さで全データを 50 回ずつ実施
- ・ 周囲は自然光のみ, 他の蛍光灯はなし
- ・ 実験開始は蛍光灯点灯 30 分後

復号方式の信頼性を調べるために, 送信情報として, 0 から 255 までのバイナリコードを用いる. この蛍光灯への入力シリアル信号が復号符号列と完全に同一の場合, 復号成功とみなす.

時系列データの取得に際し, A/D 変換ボードの外部トリガ機能を用いて A/D 変換の同期をとっているが, この復号実験では, トリガ点を復号処理の開始点とせず, 内部処理により抽出した半周期が基本周波数から信号周波数へ切り替わる点を復号処理の開始点とする.

実験データの取得間隔は 100m 秒以上であるため, 信号弁別処理では常にスタートビットに対して補正処理を加える.

### 4.2. 実験結果

復号実験の復号成功数とビット誤り率を表 3 に示す. フォトセンサから蛍光灯までの高さ 1m において復号成功率は 100%であった. また, 高さ 1.5m で取得したデータにおいて, 復号失敗数は 3 例ありその原因は 1bit の復号エラーであった. 全体の成功率は 99.9%以上であり, 全復号信号に対するビット誤り率は  $10^{-4}$  以下となった.

本方式を送信情報 97 (= (61)<sub>16</sub>, 文字“a”)に適用した結果を図 11,12,13 にそれぞれ示す. 図 11 はノイズ除去処理, 図 12 は信号抽出処理, 図 13 は信号弁別処理を行なった結果である. いずれも当初の動作条件を満足していることが確認できた.

表3 復号成功数とビット誤り率

高さ	実験数	成功数	ビット誤り率
1m	12800	12800	—
1.5m	12800	12797	$2.34 \times 10^{-5}$

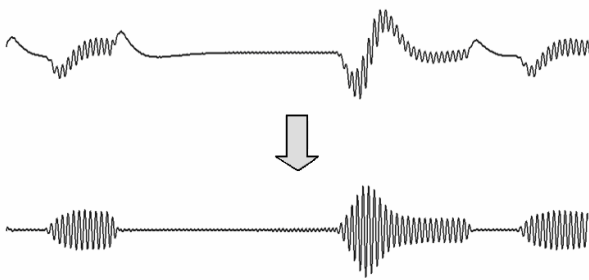


図11 ノイズ除去処理  
受信波形(上段), ノイズ除去波形(下段)

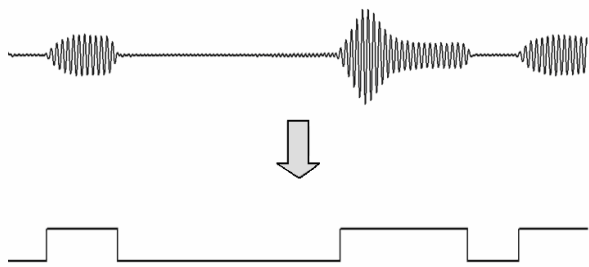


図12 信号抽出処理  
ノイズ除去波形(上段), 抽出波形(下段)

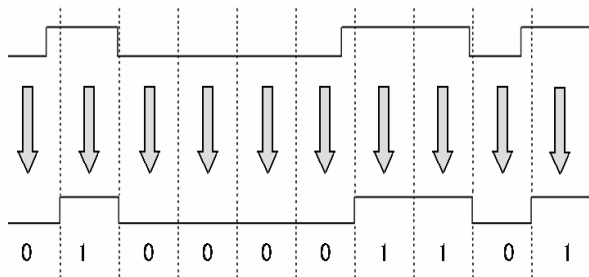


図13 信号弁別処理  
抽出波形(上段), 弁別波形(下段)

## 5. 考察

実験結果より、フォトセンサから蛍光灯までの高さ 1m のデータに対する成功率は 100%、高さ 1.5m のデータに対しても 99.9%以上の成功率が得られた。このことから、本復号方式は、受信波形の特性に対し変動除去動作を正確に実現可能なことを確認した。また、8bit の組み合わせの全パターンに対し、その復号成否を検証して高い成功率を得たことから、8bit のパターンの一部を使用している文字コードや暗号化処理を施

したデータに対しても、本復号方式は問題なく対応可能である。

今回の実験では、復号方式自体の信頼性を検証するため 1 文字分の情報量を用いてすべての組み合わせパターンに対する復号実験を行なった。その結果、本復号方式は 1 文字単位の復号に正確に対応可能であることを確認した。実際に、蛍光灯から発信される情報は連続した文字列であるが、蛍光灯通信では送信情報を RS-232C を通して蛍光灯へ入力するため、連続情報は 1 文字単位で発信される。そのため、復号処理において 1 文字分の処理を繰り返す形となる。このことから 1 文字単位で信頼性を確保した本方式は有効である。

高さ 1.5m からのデータ送信においては、復号誤りが 3 例あった。この原因としては、信号周波数 140kHz を用いたことによる蛍光灯の輝度低下が考えられる。インバータ式蛍光灯は、点灯周波数として基本周波数を用いた時に最も発光効率が良くなるよう設計されているため、変調をかけた信号周波数時では、その輝度が小さくなる。このことは、ノイズ除去時の信号波形において信号周波数の振幅が基本周波数の振幅に対して非常に小さいことから確認された。さらに、輝度が低下したため、信号周波数成分がノイズの影響を受けやすくなり、今回の 3 例では一部の半周期が抽出できなかったと推測される。この点について、蛍光灯通信に用いる信号周波数の変更や蛍光灯の装置自体を改良し光の輝度を向上させる方法も考えられるが、本質的に外部ノイズの影響により信号を誤抽出する可能性をなくすことは不可能である。また、本復号方式自体のビット誤り率は  $10^{-4}$  以下であり、3 例の失敗例ではどれも 1bit の誤りであったことから、蛍光灯通信の送信情報として誤り訂正機能を有した符号を用いることで、この点を補うことは可能であると考えられる。

## 6. まとめ

蛍光灯通信における新たな復号方式を用いたデジタル信号処理について検討した。ここでは、復号処理に必要なサンプリング周波数について述べ、さらに蛍光灯から送信された情報をデジタル信号処理により復号するための受信波形特性を考慮した復号方式を示し、復号実験を行なった。実験では、復号方式自体の検証を行なうため、1 文字分の情報量である 8bit のすべての組み合わせのパターンを用いた検証を行い、フォトセンサを固定した場合において、蛍光灯までの高さ 1.5m の条件下で信号受信が可能であることを確認した。

## 7. 今後の展望

今回は、フォトセンサを蛍光灯直下に固定した条件で実験を行なった。今後は移動時等の条件において検証を行なう予定である。また、今回は復号方式の信頼性を検証するため1文字分の復号実験を行った。実際に蛍光灯からは位置情報等の連続した文字列が送信されるため、本復号方式を応用し対応可能であることを検証する予定である。

本復号方式には、信号弁別処理において蛍光灯応答時間差、第1スタートビットの応答時間差が生じる送信間隔とその補正時間という使用する装置に依存した値を用いている。そのため、異なる装置間でその値を設定する必要がある。これは内部の仕様において対応する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の研究助成を受けた。

## 参考文献

- [1] P. Misra and P. Enge, “精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機”, 日本航海学会 GPS 研究会 (訳), 正陽文庫, 2004
- [2] 土屋淳, 辻弘道, “やさしい GPS 測量”, 日本測量協会, 1994
- [3] 河野匡志他, “新・照明教室 照明の基礎知識 (中級編)”, (社) 照明学会, 2005
- [4] 片山就志他, “新・照明教室 光源”, (社) 照明学会, 2005
- [5] “公開特許広報 S260-32443 光によるデータ伝送方式”, キヤノン株式会社
- [6] Steven Leeb, ”Talking Lights”, <http://www.talking-lights.com>, 2001, US patent
- [7] 牧野秀夫他, “一般照明器具を用いた新しい位置情報伝送方式”, 生体医工学第 41 巻特別号, p.490, 2003
- [8] 牧野秀夫他, “視覚障害者用位置案内システムの開発 -屋内・屋外の連続的な情報提供-”, 生体医工学シンポジウム 2004 発表論文抄録, pp.314-317, 2004
- [9] 山内弘章他, “分散処理を用いた屋内位置情報管理システムの基礎研究”, 第 13 回電気学会東京支部新潟支所研究発表大会予稿集, pp.58, 2003
- [10] 山内弘章他, “分散処理を用いた屋内位置案内システム-蛍光灯ネットワークを利用した案内方法-”, 電子情報通信学会 2005 年総合大会講演論文集 CD-ROM, pp.340, 2005
- [11] 鷹見亮他, “音声位置案内装置における屋内屋外統合型情報作成ソフトウェアの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告 MBE2005-56, pp.31-34, 2005
- [12] X. Liu, H. Makino, S. Kobayashi, and Y. Maeda, “An Indoor Guidance System for the Blind Using Fluorescent Lights -Relationship between Receiving Signal and Walking Speed-”, 28<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society CD-ROM, pp.5960-5963, 2006
- [13] 松坂典広他, “照明機器を用いた視覚障害者用屋内位置案内システム -受光特性の改善方法について-”, 電子情報通信学会技術研究報告 MBE2004-71, pp.17-20, 2004
- [14] 小林卓他, “蛍光灯を用いた可視光通信における情報検出の基礎研究”, 第 15 回電気学会東京支部新潟支所大会 予稿集, pp.127, 2005
- [15] 池田克夫, “データ通信”昭晃社, 1993
- [16] 村野和雄, 海上重之, “情報・通信におけるデジタル信号処理”, 昭晃堂, 1987
- [17] 関清三, “わかりやすいデジタル変復調の基礎”, オーム社, 2002
- [18] 三上直樹, “C 言語によるデジタル信号処理入門”, CQ 出版社, 2003
- [19] 三谷正昭, “デジタルフィルタデザイン”, 昭晃堂, 1988
- [20] 岩田利王, “実践デジタル・フィルタ設計入門”, CQ 出版社, 2004