

## 調光可能な可視光通信に関する一考察

About lighting level of the visible light communication.

北沢 堯宏, 清水 謙汰, 福森 康洋, 植村 渉

Takahiro KITAZAWA, Kenta SHIMIZU, Yasuhiro FUKUMORI and Wataru UEMURA  
龍谷大学

Ryukoku University

kitazawa@vega.elec.ryukoku.ac.jp, wataru@rins.ryukoku.ac.jp

### Abstract

光に情報を重畳して通信を行う可視光通信では、通信範囲が目に見える特徴がある。一方、人間の目で見ると、情報に応じて明るさが変化する変調を使うと、ちらつきとして視認され、望ましくない。それゆえ、一般に赤外線リモコンで使われるパルス幅変調を使うことが難しく、パルスの位置で情報を送るパルス位置変調を使うことが多い。パルス位置変調では、例えば4スロットで1シンボルを送る場合、その4スロットの中の1スロットだけをONにし、他の3スロットをOFFにすることで、2値の情報を送ることができる。この方法では、常時ONにする場合と比べ、明るさが1/4になり、暗く感じる。一方、このONとOFFを反転した反転パルス位置変調を使うと、1スロットがOFFで3スロットがONになるため、明るさは3/4となり、さほど暗くならない。本研究では、これらパルス位置変調と反転パルス位置変調を組み合わせることで、1/4や3/4以外の明るさを可変できる変調方式を提案する。人間の目視によるちらつきの評価をするとともに、通信性能の確認を行う。

### 1 はじめに

可視光通信とは、可視光帯域の電磁波を通信媒体とし、可視光線の点滅に応じて情報を符号化する無線通信である。一般家庭や公共施設の照明がLight Emitting Diode (LED) 化しているが、LEDは応答速度が速く高速点滅が可能であり、それら照明機器を可視光通信の送信機として利用できる。通信範囲が目に見える特徴がある一方、明るさの急激な変化等でちらつきが発生するため、情報によって明るさが変化しない変調方式が必要とされる。人間の目で知覚する明るさは、残像の関係もあり、発光強度だけ

でなく発光時間も関係する。例えば、蛍光灯は交流で点滅しているが、人間の目でその点滅を見ることはできず、常時点灯しているように見える。一方、壊れかけの蛍光灯は、単位時間で累積した発光強度が変化するため、ちらつきを感じる。そのため、単位時間当たりの累積発光強度が一定である変調方式として、パルス位置変調 (Pulse Position Modulation: PPM) 方式と反転パルス位置変調 (Inversed PPM: i-PPM) 方式が一般的に使われている。

照明機器には、明るさを自由に変更することが必要である。これを調光という。LEDの明るさは、流れる電流の大きさによって変化するが、一般に電圧で制御するため、明るさの調整が難しい。そのため、擬似的なアナログ出力として、パルスの幅を調整することで、調光を行う。一般に調光制御方式として、ONとOFFの時間比率を変更するパルス幅変調 (Pulse Width Modulation: PWM) 方式を用いる。PWM方式は、サーボモータの角度指定などにも使われているアナログ変調方式であるが、ここではアナログ情報を載せるのではなく、明るさがアナログ値と対応する使い方である。

ここで、可視光通信を照明機器に適用する場合、PWM方式を用いて情報を送ると、情報に応じて明るさが変化し、ちらつきが発生する。一方で、PPM方式やi-PPM方式を用いると、ちらつきは生じないが、明るさを変えることができない。

本研究では、可視光通信の調光可能な変調方式を検討する。

以下、2章ではパルスを用いたちらつきのない可視光通信の変調方式について紹介し、3章にて調光可能な変調方式を提案する。その変調方式の性能を4章にて確認し、5章で本論文をまとめる。

### 2 パルス変調

本章では、パルスを用いた変調方式について紹介する。

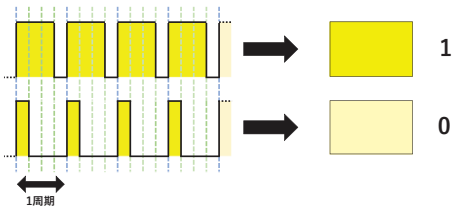


Figure 1: PWM方式での情報の割り当て

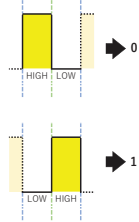


Figure 2: 2値PPM方式での情報の割り当て

### 2.1 パルス幅変調 (PWM) 方式

PWM方式は、搬送パルスの時間軸上でのHIGHの時間が入力信号によって変化する変調方式である (Figure 1)。1周期において、HIGHの時間とLOWの時間の比 (duty比) が、入力信号に合わせて変化することで、情報を割り当てる。例えば、2値のデジタル通信として使う場合には、HIGHの時間が長ければ“1”の情報を、LOWの時間が長ければ“0”の情報を示す。

PWM方式は、主に赤外線を通信媒体としている赤外線通信で使用されている。また、1周期においてHIGHの時間のみ、もしくはLOWの時間のみ確認できれば情報を得ることができるため、簡単な受信回路やプログラムで対応できる。ただし、送信する情報によって、LEDの発光時間が変わるため、消費電力が安定せず、可視光通信の場合はちらつきが発生する。

### 2.2 パルス位置変調 (PPM) 方式

PPM方式は、搬送パルスの時間軸上での位置が、入力信号によって変化する変調方式である。一度に送るビット数によって、スロットの数を変えることができ、そのスロットの中の何番目のスロットにパルスがあるか (=スロットがONになっているか) によって情報を割り当てる。例えば、2値のデジタル通信として使う場合には、2スロット用意し、最初のスロットがHIGHの場合は“0”の情報を、2つ目のスロットがHIGHの場合は“1”の情報を示す (Figure 2)。

スロットを4つ用意した場合は、4値PPMとなり、1シンボルで4通りの情報を送ることができる (Figure 3)。そのため、一度に2bitの情報が送信できる。このとき、シンボルの組み合わせによっては、HIGHとLOWの数に偏りが生じる場合があるが、人間の目で知覚できる範囲の時間軸で見ると、HIGHとLOWの比率が一定であるため、

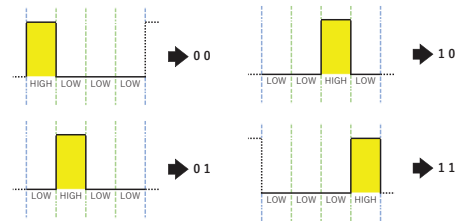


Figure 3: 4値PPM方式での情報の割り当て

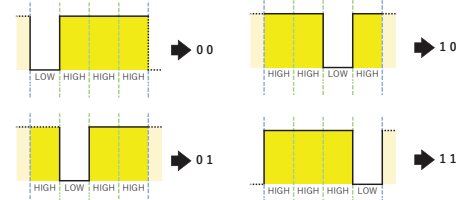


Figure 4: 反転4値PPM方式での情報の割り当て

ちらつきは感じない。そのため、照明との整合性が高い。

### 2.3 反転パルス位置変調 (i-PPM) 方式

i-PPM方式は、PPM方式のHIGHとLOWが反転した変調方式である。ただし、2値PPM方式の場合は、HIGHとLOWの比率が1:1であるため、反転しても本質的には変わらない。4値以上の場合に、明るさが変わる (Figure 4)。

PPM方式の時と同様に、1シンボル内のHIGHとLOWの比率が一定であるため、ちらつきが感じない。また、多値化するほどHIGHの時間が長くなるため、明るくなる。LEDもしくは受光素子の応答速度の関係で、多値化したときに1スロットの時間を変えられない場合、例えば2倍の情報を送る場合、2倍の時間がかかるため、通信速度としては同じになる。しかし、HIGHとLOWの比率が変わるため、明るさが変わる特徴がある。

### 2.4 明るさ

一般に、「明るさ」と言うときには、照度、輝度、光度、光束など異なる意味を持つ場合がある。例えば、輝度は、光源を見た時にどれだけ明るく見えるかを示す。光度であれば、ある方向に向けての単位立体角あたりの光束の量を示す。前者は光を見ている人 (受信機) にとっての明るさであり、後者は発光体 (送信機) が発している明るさである。ここでは、調光の観点での明るさと、可視光通信の観点での明るさの違いについて説明する。

光束は、光源から放射されるエネルギーのうち、人の目に入った際に光と感じるエネルギー量を表す。単位は  $Lm$  (ルーメン) である。LEDのデータシート等では、発光効率の単位として  $Lm/W$  を用いることが多い。光束の値が大きければ光は遠くまで届き、逆に小さければ届く距離は短くなる。可視光通信では、光束の値が通信距離に比例

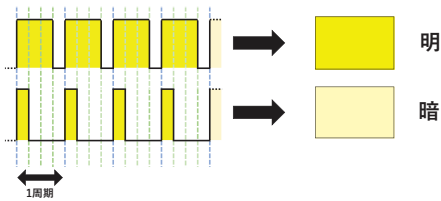


Figure 5: PWM 調光方式

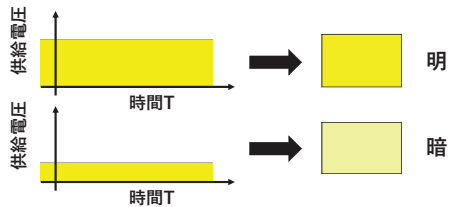


Figure 6: アナログ調光方式

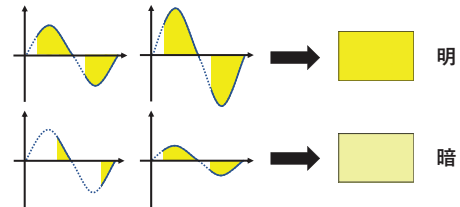


Figure 7: 位相制御方式

4PPM : i-4PPM	調光率	8 Bit				
		1 Symbol	1 Symbol	1 Symbol	1 Symbol	
4 : 0	25.0 %	4PPM	4PPM	4PPM	4PPM	明
3 : 1	37.5 %	4PPM	4PPM	4PPM	i-4PPM	明
2 : 2	50.0 %	4PPM	4PPM	i-4PPM	i-4PPM	明
1 : 3	62.5 %	4PPM	i-4PPM	i-4PPM	i-4PPM	明
0 : 4	75.0 %	i-4PPM	i-4PPM	i-4PPM	i-4PPM	暗

Figure 8: Mixed-PPM

し、また同じ距離であれば光束の値が大きいほど受光強度が強くなるためノイズの影響が小さくなる。そのため、光束の値は、通信の性能に大きく関係する。

照度は、単位面積あたりに照射する光束の量を示す。単位は  $Lx = Lm/m^2$  (ルクス) である。照明機器の仕様書には、発光体の性能であるため光束の値が載っていることが多い。しかし、人間が感じる明るさは受信感度であるため、照度である。そのため実際に照明機器として使う際には、照度の値が重要となる。

調光システムは、一般にスタンド型照明機器やフロアスタンド等の身近なところに使用されている。本節では、一般的に使用されている調光制御方式をまとめる。

PWM 方式を使用している調光制御方式について説明する (Figure 5)。この方式では、1 周期内の duty 比を制御することで、調光を行う。HIGH の比率が大きければ明るく、LOW の比率が大きければ暗くなる。0%から100%までの調光を実現できる。

可変抵抗等を用いることで LED の供給電流を制御する調光制御方式について説明する (Figure 6)。抵抗値の変化により流れる電流値を制御する。LED は電流値に応じて明るさが変わるため、調光ができる。電圧が一定であれば、抵抗値と電流値は反比例の関係にあるため、明るさの調整が難しい。交流波形の 1 周期において、発光素子に流れる電流波形を切り取る調光制御方式である (Figure 7)。ランプ電流が多い、または波形切断時間が短いほど明るく、ランプ電流が少ない、または波形切断時間が長いほど暗くなる。明るさが、流れる電力の実効値で決まる白熱電球との整合性高いことが特徴である。

### 3 混合パルス位置変調方式の提案

本章では、調光を行うための変調方式として、duty 比が一定であるため、ちらつきが起こりにくい 4PPM 方式

と i-4PPM 方式に注目する。送信情報に割り当てる変調方式を、数シンボル単位で割合を変化する方法を提案する。例えば、8 シンボルの送信情報に対して、前半 4 シンボルは 4PPM 方式で送り、後半 4 シンボルは i-4PPM 方式で送る。受信機側では、混在した異なる変調方式の信号を受信するが、1 シンボル毎に HIGH と LOW の数を数えることで、どちらの方式で送っているのかが判定できる。これにより、ちらつきが起こらず、かつ調光ができる可視光通信が可能になる。この変調方式を混合パルス位置変調 (Mixed PPM) 方式と呼ぶことにする。

### 4 実験と評価

本章では、Mixed PPM 方式を通信の観点と調光の観点から評価する。そのため 1) 可視光通信としての通信特性、2) ちらつきの認知、の 2 点を評価する。1), 2) の評価を行うため、各調光時の通信可能距離と BER の測定と、各調光時におけるちらつきに関するアンケートを行う。今回は 8Bit の情報送信を想定し、Mixed PPM 方式を適用した (Figure 8)。1) の測定方法として、各調光率に対して 272bit の情報を 25,000 回測定した。結果を Figure 9 にまとめる。2) の測定として、20 代の被験者 10 人に対し、通信時のちらつきの聞き取りを行った。Mixed PPM 方式を適用した場合にちらつきを感じるか、また、比較対象として、PWM 方式の場合にちらつきを感じるかをアンケートにより調査した。結果を Figure 10 にまとめる。

### 5 まとめ

本研究では、可視光通信に対し、調光を可能にする変調方式を検討した。通信性能の実験により、従来法である

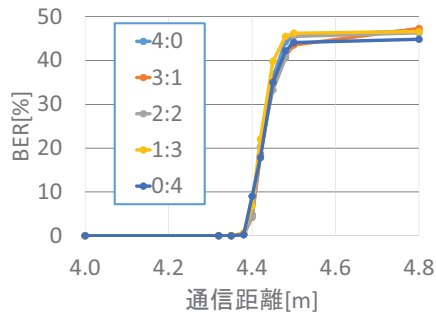


Figure 9: 調光率における距離に対する誤り率

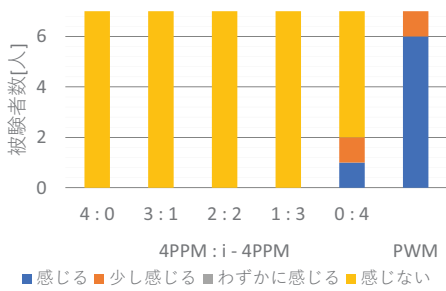


Figure 10: 各調光方法に対するちらつきの感じ方

PPM方式とi-PPM方式と比較して、Mixed PPM方式はほぼ同じBERを示すことが確認できた。また、ちらつきに関する評価アンケートでは、PWM方式に対して提案法はちらつきを感じないという声が多かった。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 15K16313 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 中川 正雄, 可視光通信コンソーシアム, “可視光通信の世界 LEDで拓く「あかりコミュニケーション」”, 工業調査会, 2006.
- [2] 山岸 誠仁, “高輝度/パワーLEDの活用テクニック”, CQ出版株式会社, (2008年)
- [3] 明るさ計算, <http://tomari.org/main/java/hikari.html>, (最終確認日: 2018/01/22)