

可視光通信の利得制御方法に関する一考察

About gain controll in in Visible Light Communication.

○端山 稜人, 植村 渉

Takato HAYAMA and Wataru UEMURA

龍谷大学

Ryukoku University

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

Abstract

目に見える無線通信として注目されている可視光通信をロボットのコントローラに使うことが検討されている。このとき、外乱光等のノイズに対応するためにフィルタを使うことが多いが、パルスを用いた通信の場合、フィルタを通すと波形が変化するため、情報が失われる危険性がある。

本研究では、パルスを用いた可視光通信において、ハイパスフィルタの特性を考慮して、フィルタ通過後の波形から元波形を復元する方法を検討する。受光素子の感度調整抵抗が受信波形に与える影響を考慮し、自動調整する方法を提案する。

1 はじめに

スマートファクトリーに代表されるように工場内でのロボットによる自動化が注目されている。複数のロボットが独立して動いているときに、それらを無線通信でリモートコントロールする方法として、目に見える無線通信である可視光通信の利用が提案されている[2]。

可視光通信の送信機では、発光素子として Light Emitting Diode (LED) を使用する。LED は応答速度が速いため、高速点滅が可能であり、その点滅パターンを変えることで情報を重畳できる。また、LED の制御はマイコンの出力ピンで簡単に扱えるため、可視光通信では矩形波通信を用いることが多い。矩形波のパルスの位置や長さを変えて情報を送るが、この場合、ノイズ除去のためにハイパスフィルタを通すと、パルスの形が変化し、情報を失う。一方、元の波形がパルスであることが分かっているため、波形の立ち上がりや立ち下がり点さえわかれば、パルスを復元することができる。このとき、受信信号の利得を適切

に制御しないと、立ち上がりや立ち下がり点が変わる。そこで本研究では、受光素子感度の自動調整を検討し、受信信号の利得制御方法を提案する。

2 可視光通信

可視光通信は無線通信の一種であり、光の点滅パターンを変えることで、情報を送信する (Figure 1) [3]。送信用の発光素子として LED を用いることが多い。LED は、白熱電球や蛍光灯の照明などと比較して省電力、長寿命、高速応答、小型といった特徴を持っている。

一方、受光用の受光素子に使う可視光センサとして、フォトダイオードやフォトトランジスタがある。これらは明るさに応じて素子を流れる電流が変化し、抵抗の変化や電圧の変化として取得できる。電圧の変化を読み取るためには、抵抗を介して分圧することが一般的である。この抵抗の抵抗値で受光素子の光に対する感度および応答速度が決定する。

抵抗の抵抗値が大きいと電圧変化の範囲が広くなり、感度が良くなる。それゆえ、送受信機間距離が離れても信号を受信できるが、送受信機間距離が短いと HIGH から LOW への電圧変化に時間がかかり、応答速度が遅くなる。一方、抵抗値が小さいと応答速度は速いが、送受信機間距離が離れると受信信号が弱くなり信号を正しく復号できなくなる (Figure 2)。

可視光通信では、照明としての利用も考えると送信光として白色を使うことが多い。隣接周波数への影響を考慮しなくて良いため、送信波形の帯域は自由に扱える。それゆえ、正弦波ではなく矩形波のまま情報を送信することが可能であり、パルスを用いた変調が主流である。その際に、ちらつきを考慮する必要がある。単位時間あたりの点滅のデューティ比が変化すると明るさに変化が生じるため、人の目から見てちらつきを感じやすい。Pulse Position Modulation (PPM) 変調はパルスの位置の変化で情報を送るため、1 シンボルあたりの点灯と消灯時間は



Figure 1: 可視光通信の一例

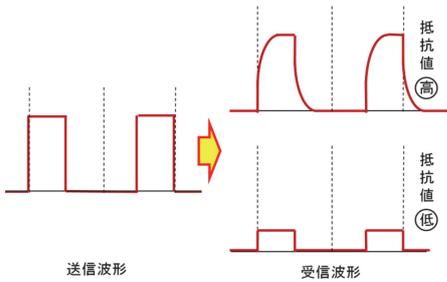


Figure 2: 抵抗値の変化による波形の変化

変化せず、人の目から見てちらつきを感じにくい (Figure 3). 本研究では、2 値 PPM 変調に対して説明を行うが、4 値 PPM や 4 値 I-PPM など他の PPM でも同様である。

また、可視光通信には自然光や人工光などのノイズへの対策も必要である。一般にノイズ対策として、フィルタの利用があげられる。太陽光などの自然光は、点滅しておらず直流成分として扱える。蛍光灯などの照明は、 $50Hz$ もしくは $60Hz$ で点滅しているが、低い周波数である。一方、可視光通信は高速点滅の波形であるため高周波成分として扱える。それゆえ、自然光や照明光を除去するためには、ハイパスフィルタが有効である。簡単なハイパスフィルタとしてコンデンサと抵抗で構成された CR ハイパスフィルタがある。CR ハイパスフィルタは、入力信号に並列する抵抗と直列するコンデンサから成り立っている。抵抗値と容量値の積は時定数 τ といい、遮断周波数に逆比例する。またこの回路は電圧が変化したときに大きく反応するため、微分回路でもある。それゆえ、矩形波

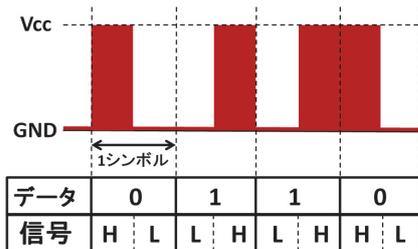


Figure 3: 2 値 PPM 変調による情報の送信方法

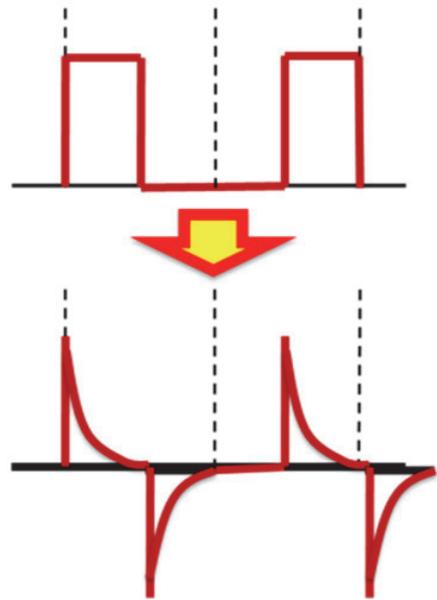


Figure 4: ハイパスフィルタによる波形の変化

を入力すると、立ち上がり立ち下りの部分に対してパルスが生じ、その後電圧が減少する波形となる (Figure 4). 可視光通信においてハイパスフィルタを使用すると、矩形波の形が変化するため、矩形波の長さや位置の情報が失われるため、復号が困難になる。

3 受光素子感度の自動調整方法の提案

電波通信などの無線通信と同様、可視光通信においても送受信機間距離が離れると、受信電圧が下がり、矩形波通信の場合は閾値電圧を下回ると復号できなくなる。その場合、受信機側の受信信号の増幅率を上げたり、受光感度を上げたりして、閾値電圧よりも高くなるように調整する。なお、増幅率を上げることは、相対的に閾値電圧を下げることに等価である。

ここでは、受光感度に注目し、自動調整の方法を提案する。受光感度を可変するために、デジタルポテンシオメータを用いる。デジタルポテンシオメータとはアナログ可変抵抗の抵抗体の上を可動する接点をデジタル信号で制御できる可変抵抗である。フォトトランジスタに使用するプルダウン用の抵抗にデジタルポテンシオメータを使用する。これにより受光素子感度の自動調節を行うことが可能になる。

感度が変わることで応答速度が変化するが、矩形波通信の場合、その波形の立ち上がり立ち下りの開始点は変化しない。そのため、立ち上がり開始時と立ち下り開始時の変化点を適切に扱うことで、元の矩形波を復元することが可能である (Figure 5)。

しかし、感度を強くすると、立ち下りの開始点が遅れることがある。波形のピークが V_{cc} の電圧値を超える時、

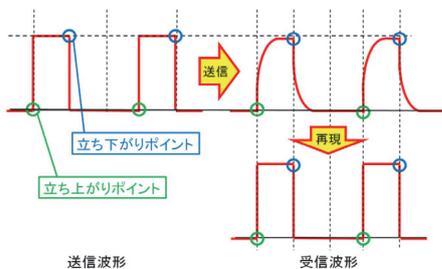


Figure 5: 立ち上がり立ち下がりポイントからの元波形の復元

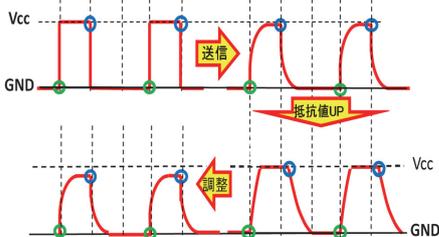


Figure 6: 感度を強くしたときの立ち下がり開始点の遅れ

その間の電圧は V_{cc} となる。このとき、立ち下がりの開始点が遅れ、パルスの位置情報が変化する (Figure 6)。つまり、波形のピークが V_{cc} の電圧値を越えないように、受信感度を調整する必要がある。

立ち上がり立ち下がりの開始点は、それぞれ GND と VCC からの電圧変化点である。受信波形の復元にマイコンを使っているとき、通常は HIGH と LOW の信号が判別できれば良いため、デジタル入力ピンで対応できる。しかし、立ち上がり立ち下がりの開始点を見つけるには、アナログ値の変化を確認する必要があるため、マイコンでは動作速度の低下が起こる。立ち上がり開始点に対しては、外部のコンパレータを利用し、比較電圧として GND より少し高い電圧を与えれば、判別が可能である。一方、立ち下がり開始点に対しては、その時の矩形波の電圧値からの変動となり、その電圧値は送受信機間距離に依存するため、設定が難しい。

ここでハイパスフィルタに注目する。ハイパスフィルタには微分の働きがあり、立ち上がり開始点と立ち下がり開始点の変化を抽出することができる。また、ハイパスフィルタを通して波形が変化しても、立ち上がり立ち下がり開始点は変化しない (Figure 7)。そして、それら立ち上がり開始点と立ち下がり開始点の電圧を基準電圧 (GND) として扱うことができ、そこからの正の方向に変化する点が立ち上がり開始点であり、負の方向に変化する点が立ち下がり開始点となる。

立ち上がり開始点は、コンパレータで抽出できるが、立ち下がり開始点は負電圧のため、抽出回路が複雑になる。そこで、抵抗を用いた電圧を印加することで、基準電圧を

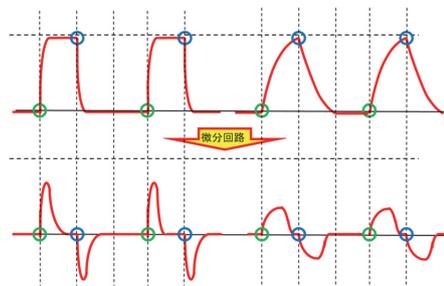


Figure 7: ハイパスフィルタを通した時の立ち上がり開始点と立ち下がり開始点の変化

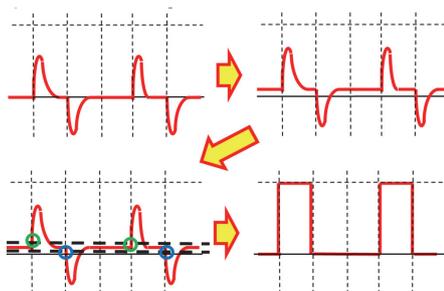


Figure 8: 立ち上がり開始点と立ち下がり開始点の抽出方法

少し高くすることで、立ち下がり開始点も正電圧として扱う。これにより、立ち下がり開始点からの電圧変化もコンパレータで抽出できるようになる (Figure 8)。

ただし、ハイパスフィルタを通った波形は、パルスの時間幅が短くなるため、立ち上がり開始点や立ち下がり開始点から基準電圧に戻るまでの時間が短くなる。この時間がマイコンの処理速度よりも短い場合、パルスを抽出できない場合が生じる。このパルス時間幅は、ハイパスフィルタの性能に依存し、フィルタの抵抗値およびコンデンサの容量に比例して長くなる。そこで、CRハイパスフィルタのカットオフ周波数 ($= 1/2\pi CR$) との関係の時定数と比較し Figure 9 に示す。使用するマイコンの処理速度に応じて、ハイパスフィルタのカットオフ周波数を決定する必要がある。

この方法により、立ち上がり開始点と立ち下がり開始点を適切に抽出することで、送信波形を復元でき、矩形波通信の復調が可能となる。

4 実験と考察

提案する受光感度の自動調整の効果を確認するために、受光感度を固定した方法との比較実験を行う。受光素子の感度調整抵抗値が 0Ω から $27k\Omega$ まで 128 段階で設定できるデジタルポテンショメータを用いる。一方、比較対象として抵抗値を $10k\Omega$ と $27k\Omega$ に固定した受信機を用いる。比較対象の回路は、コンパレータの閾値を、無信号時のノイズ電圧の少し上に設定し、遠距離の通信に適した状態に

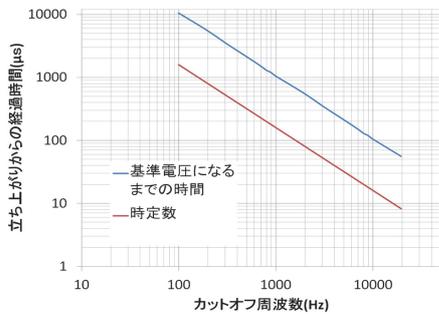


Figure 9: ハイパスフィルタのカットオフ周波数とパルスの時間幅の関係

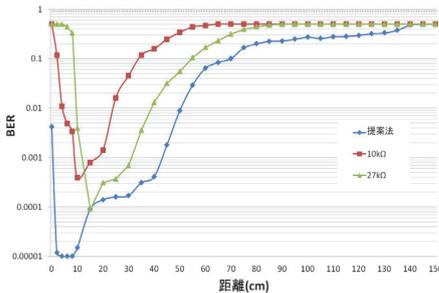


Figure 10: 通信速度 6.25kbps での実験結果

する。送受信機間距離を 0cm から 150cm まで変えながら、100万ビットの通信によるビット・エラー・レート (BER) を測定する。なお測定点として、送受信機間距離が 0cm から 10cm の間は 2cm ごとに、 10cm 以上は 5cm ごととする。また、通信速度の影響を確認するために 6.25kbps 、 8.30kbps 、 12.50kbps の3つの速度で情報を送信して、違いを測定する。

通信速度が 8.30kbps と 6.25kbps の場合、提案法では近距離と遠距離のいずれの距離でも抵抗値を適切に調整できており、さらに立ち下がり開始点の抽出の効果も加わり、抵抗値を固定した場合よりも良い性能になっている (Figure 10, 11)。一方、通信速度が 12.5kbps のときは、送受信機間距離が 20cm 以上になると、提案法の方が悪くなった (Figure 12)。これは、パルスの時間幅が約 $100\mu\text{s}$ と短く、マイコンが立ち上がり開始点や立ち下がり開始点

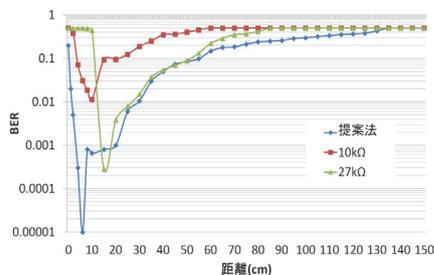


Figure 11: 通信速度 8.30kbps での実験結果

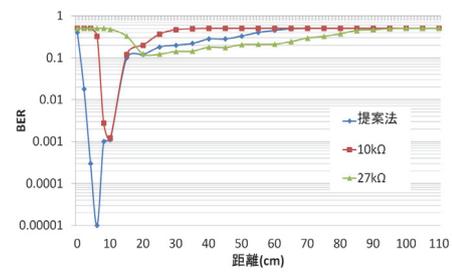


Figure 12: 通信速度 12.5kbps での実験結果

を取りこぼしているためである。今回は、 16MHz で動作するマイコンを用いたが、このマイコンの性能の限界であり、これを用いた場合の通信速度の上限であると考えられる。

5 おわりに

目に見える無線通信として注目されている可視光通信をロボットのコントローラに使うことが検討されている。本研究では、パルスを用いた可視光通信において、受光素子の感度を調整する方法について検討した。ハイパスフィルタの特性を考慮して、フィルタ通過後の波形から元波形を復元する方法を提案した。波形の立ち上がり開始点と立ち下がり開始点を抽出することで、元波形を復元した。近距離と遠距離のいずれにおいても、感度を固定した時より良い結果となった。今後は、この受信機をロボットの可視光通信の受信機として用いる必要がある。

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] 清水 謙汰, 端山 稜人, 福森 康洋, 植村 涉, “可視光通信を用いたロボット制御のための信号強度取得に関する一考察”, 人工知能学会第 47 回 SIG-Challenge 研究会, (印刷中), 2017.
- [3] 小田翔平, 植村涉, “可視光通信における信号定位に関する一考察”, 第 19 回創発システムシンポジウム, p. 34, 2013.