

フリッカレス可視光通信に関する研究

183426005 川村雅也

旭研究室

1. はじめに

低消費電力や長寿命といった特徴から LED 照明が急速に普及している。また、LED の高速応答性を利用した可視光通信の研究が盛んに行われている[1]。可視光通信の受信機器として、スマートフォン等のカメラに用いられるイメージセンサの利用が考えられ、車々間通信や照明とスマートフォンとの通信といった IoT 技術への適用が期待できる。イメージセンサを用いた可視光通信は空間的分離や波長分離が可能などの特徴を有する一方で、フォトダイオードを用いた場合と比較して、LED の輝度を低速に変調する必要があるため、フリッカによる不快感や目の疲労、吐き気といった悪影響を及ぼす恐れがある。本研究では、照明光源を想定し、フリッカを抑制しつつ可視光通信を実現する手法を検討する。

2. 視覚の時間周波数特性

時間的に強度が変化する光刺激により、人間の視覚系にはフリッカ感覚が生じる。光変化の周波数を上昇させると、フリッカ感覚が消失し、定常光として知覚される。これを視覚の時間周波数特性といい、フリッカ感覚が消失する臨界の周波数を臨界融合周波数(Critical Fusion Frequency: CFF)という[2]。

3. フリッカの評価方法

フリッカを知覚するかは、時間的に輝度が変化する照明光を被験者に提示し、ちらついているかいないかの二択を被験者に回答させる主観評価実験により求められる。本研究では、暗室下において、LED 照明で照らされた 150mm³の空間を 500mm 離れた位置から被験者に観察してもらい、フリッカの有無を回答させることでフリッカ評価を行う。

4. 提案手法

フリッカレス可視光通信を行うためには2節で述べた視覚の時間周波数特性に基づいた変調方式が必要となる。イメージセンサ可視光通信の変調方式として、発光強度により変調を行う Amplitude Shift Keying (ASK) が主に用いられており、フリッカレス条件下で通信を行う研究が検討されている[3]。しかし ASK では、通信に使用可能な Percent Flicker (PF) の値が小さく、通信は非常に困難である。ここで PF の定義を式(1)に示す。 I_{max} とは光の最高強度、 I_{min} は光の最低強度である。そこで本研究では、光強度を等しく設定した異なる色状態により変調を行う Color Shift Keying (CSK) を提案する。人間の視覚は、光刺激の強度変化に対しては敏感に反応するが、色相の変化に対しては感度が鈍い。これは視覚系の強度に対する時間分解能が色に対する時間分解能より高いためである[4]。そのため、原理上、光強度の変化を抑制し色を変化させる CSK は ASK と比較し、フリッカレス可視光通信に適していると考えられる。

$$PF[\%] = \frac{100(I_{max} - I_{min})}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

5. 送信 LED の構成

本節では、ASK と CSK の LED の構成について述べる。ASK では、ハイパワー白色 LED を PWM で制御し、Duty 比 100% における電流を定格電流の 600mA に設定する。一方、CSK では赤色、緑色、青色の 3 個の LED で 1 つの光源を構成している RGB-LED を用いる。RGB-LED は赤色、緑色、青色の各強度 I_R, I_G, I_B の比を調整することで様々な色相を表現出来る。本研究では、ASK と CSK の光源の条件を近づけるために以下の式を満たすように RGBLED の電流値、構成を調整する。ここで I_R, I_G, I_B はそれぞれ Duty 比 100% 時の赤色、緑色、青色の LED の強度を、 I_W は Duty 比 100% 時に 600mA 流れる白色 LED の強度である。強度の測定は分光器を用いた。表 1 に白色 LED と等しい強度となる、赤色、緑色、青色の各 LED の電流値を示す。

$$\begin{aligned} I_R : I_G : I_B &= 1 : 1 : 1 \\ I_R + I_G + I_B &= I_W \end{aligned}$$

表 1 送信 LED の構成

LED の種類	ASK 用の 白色 LED × 1	CSK 用の RGB-LED × 3		
駆動電流 [mA]	600	R	G	B
		140	300	140

6. 視覚の時間周波数特性の測定

本研究の光環境での視覚の時間周波数特性を主観評価実験により測定する。ASK の評価実験では、3 節で述べた光環境で、初めに被験者に対し Duty 比 50% 一定で照らされた空間を提示する。ここから PF を上昇させて、Duty 比が $(50+PF/2)[\%]$ の高強度状態と $(50-PF/2)[\%]$ の低強度状態を発生させる。高強度状態と低強度状態は、測定したい周波数で周期的に変化させる。被験者がフリッカ感覚を”感じる”と回答した PF を記録し、その周波数でのフリッカがある PF とする。周波数を 10Hz から 10Hz 刻みで上昇させながらフリッカを感じる PF の測定を行い、PF が 100% の時にフリッカ感覚を”感じない”と回答された周波数をその被験者の CFF とする。被験者 8 名で測定した ASK の時間周波数特性を図 1 に示す。CSK の評価実験では、赤色と青色を変調に使用し、色 (Color) の PF (CPF) を以下の(2)式のように定義する。ここで I_{Rmax}, I_{Rmin} は赤色の最大強度と最低強度、 I_{Bmax}, I_{Bmin} は青色の最大強度と最低強度である。

$$CPF[\%] = \frac{100(I_{Rmax} - I_{Rmin})}{I_{Rmax} + I_{Rmin}} = \frac{100(I_{Bmax} - I_{Bmin})}{I_{Bmax} + I_{Bmin}} \quad (2)$$

CSKでもASKと同様にCPFと色(Color)のCFF(以下CFFFという)の測定を行い、色に関する視覚の時間周波数特性を測定する。被験者8名で測定したCSKの時間周波数特性を図2に示す。図1と図2よりASKとCSKの時間周波数特性を比較した場合、CSKの方がフリッカ感覚を感じる周波数域が狭いことが分かる。

7. ASKとCSKの通信性能の比較

ASKとCSKの通信性能の比較を行う。本研究での通信は1200fpsの高速カメラを使用することを想定し、1つのパルス波形を2回撮像するために、変調速度を600pulse/sとする。伝送方式としては、フリッカを抑制可能な伝送方式のPulse-Position-Modulation(PPM)の内、最も単純な、2PPMを用いる。2PPMでは2つのパルス波形により情報を表現するため、搬送波の周波数は300Hzとなる。

7.1 フリッカレスとなるPFとCPFの測定

600pulse/sで変調されたASKとCSKをランダム生成された2PPMで伝送する場合のフリッカレスなPFとCPFを被験者8名の主観評価実験により測定した。結果を表2に示す。PFは、IEEE Std. 1789-2015でLED照明の安全レベルとして、最も厳しい値、Maximum-Percent-Flicker(MPF)が定義されており、MPFを式(3)に示す[5]。ここで f は搬送波の周波数であり、本研究においては300Hzである。そのため、理論上のMPFの値は99%となる。表2より、測定されたASKのPFは最小値、平均値ともにMPFを下回っている。これは、本研究の光環境での測定が従来想定される照明環境より厳しい条件で行っていることが原因だと考えられる。

$$\text{MPF}[\%] = f \times 0.0333 \quad (90\text{Hz} \leq f \leq 3000\text{Hz}) \quad (3)$$

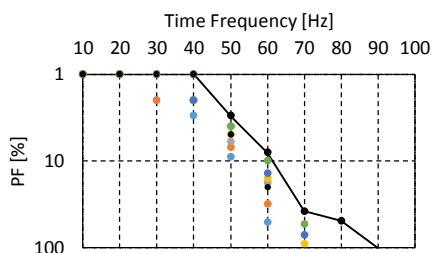


図1 視覚の時間周波数特性(ASK)

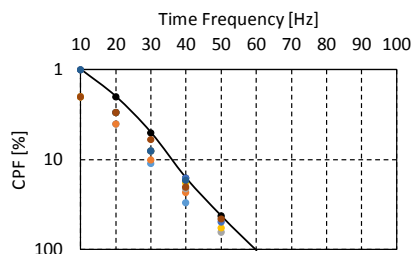


図2 視覚の時間周波数特性(CSK)

表2 PFとCPFの測定結果

	平均[%]	最小値[%]
PF(ASK)	7.25	3
CPF(CSK)	49	31

7.2 通信性能の比較実験

測定されたPFとCPFの最小値を用いて、ASKとCSKの通信性能の比較実験を行う。測定は1m~5mの距離で行い、各距離で10000pulse撮像し、BERを測定する。結果を図3に示す。BERは参考のためにフリッカを考慮していない、PF、CPFが100%のASK、CSKの測定も行い、1~5mの距離ほぼすべてでエラーフリーとなることを確認した。図3より、フリッカレス条件下のASKはほぼ全ての距離で通信を行うことができず、フリッカを考慮していないASKと比較し通信性能が著しく劣化している。一方でフリッカレス条件下のCSKは1m~5mの距離すべてでエラーフリーを達成しており、フリッカを考慮していないCSKと比較した際に1m~5mの距離では通信性能の劣化は起こらなかった。このことからフリッカレス可視光通信において、CSKとASKではCSKが優位といえる。

8. まとめ

光強度と色変化に対する視覚特性に着目し、フリッカレス可視光通信に必要な条件を実験的に明らかにした。またフリッカレス条件下における通信性能を測定する実験からCSKの優位性を示した。

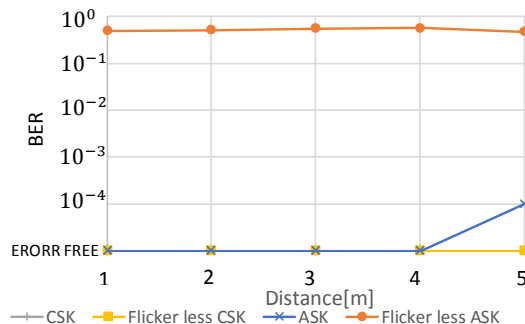


図3 ASKとCSKのBER

参考文献

- [1] 春山:可視光通信, 電子情報通信学会誌, Vol. 91, No. 12, pp.1055-1059, 2011.
- [2] D. H. Kelly :Visual response to time-dependent stimuli, I, JOSA, Vol, 51, Issue 4, pp. 422-429, 1961.
- [3] 北岡: 最大パーセントフリッカ条件下でのイメージセンサ可視光通信のちらつき防止変調, 信学技報, vol. 116, no. 463, ITS2016-76, pp.416-420, 2017.
- [4] 古川: 視覚における色のちらつき融合特性, テレビジョン26(12), 1053-1059, 1972.
- [5] IEEE Std. 1789-2015, 2015.