

Optical Camera Communication における光源間干渉モデル

Inter-Light Sources Interference Model in Optical Camera Communication

小野寺 幸仁[†]
Yukito Onodera高野 宏紀[‡]
Hiroki Takano久野 大介[‡]
Daisuke Hisano中山 悠[†]
Yu Nakayama

1. はじめに

Optical Camera Communication(OCC)とは、送信機にLEDなどの光源、受信機にカメラを用いる通信技術である。カメラに搭載されるCMOSイメージセンサはフォトダイオードと異なり、複数光源からの信号を同時に受信可能である。近年、多くのデバイスにカメラが搭載され、セキュリティやコスト面の利点からOCCは将来の通信チャネルとして期待されている[1]。しかし光源の数が増えると、他の光源や障害物による通信の遮蔽やブルーミングエフェクトによる干渉が課題となる。しかし、OCCにおいてこのような光源間干渉についてモデル化した研究はこれまでになかった。そこで本稿では、光源間干渉を回避する一般的なモデルを提案する[2]。具体的には、カメラの座標やイメージセンササイズなどのパラメータを用いて、撮影画像上での光源間干渉モデルを定式化した。また、提案モデルの有効性を実験により確認した。

2. ブルーミングエフェクト

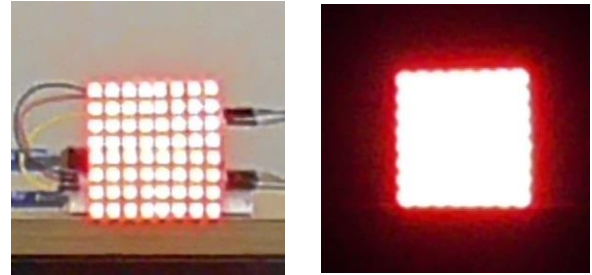
ブルーミングエフェクト(Blooming Effect, 以下BEと書く)とは、撮影画像上で光源を撮影したときに発生する拡散やボケのことである。BEの例を図1に示す。同じ光源を蛍光灯下(図1a)および暗環境下(図1b)において同じカメラで撮影した画像である。暗環境では、光がLEDパネルの周辺まで拡散していることが確認できる。また、周囲の明るさや光源の発光強度によってもBEの大きさは異なる。

BEの発生原理は以下である。すなわち、CMOSイメージセンサは、フォトダイオードで受けた光を電荷に変換するが、電荷の許容量を超える光を受光した際には飽和する。飽和すると、電荷を蓄えることが困難になり、隣接するフォトダイオードに電荷が拡散される。その結果として画像上で発生する白い筋や塊のようなものをBEと呼ぶ。複数の光源が画像上で隣接する場合には相互のBEが通信に影響する[3]が、これまでに詳細な検討は行われてこなかった。

3. 提案手法

3.1. 概要

提案モデルが想定するシステムの概要を図2に示す。提案手法の目的は、OCCにおける他光源や障害物による干渉の回避である。カメラの座標やイメージセンササイズなどのパラメータを用い、画像上での光の減衰を含めた光源間干渉に関する制約条件を定式化する。これを利用して光源を配置することで、BEの影響をも抑制し、複数



(a) 蛍光灯下 (b) 暗環境下
図1. ブルーミングエフェクト

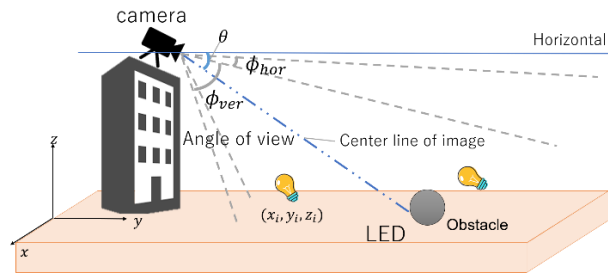


図2. 提案モデルが想定するシステム
光源による一対多通信を実現する。

3.2. 干渉モデル

はじめに、カメラの俯角を θ 、実世界座標を (x_c, y_c, z_c) 、 i 番目の光源の実世界座標を (x_i, y_i, z_i) としたとき、カメラを原点とした座標における i 番目の光源の座標 (X_i, Y_i, Z_i) を次式で表す。

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ 0 & \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_c \\ y_i - y_c \\ z_i - z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

カメラの水平、垂直の画角をそれぞれ ϕ_{hor} 、 ϕ_{ver} 、カメラの解像度を l_h, l_w とおく。式(1)で座標変換した (X_i, Y_i, Z_i) を用いて画像上の光源の位置 (u_i, v_i) を

$$(u_i, v_i) = \begin{pmatrix} l_h & 0 \\ 2 \tan\left(\frac{\phi_{hor}}{2}\right) & 0 \\ 0 & \frac{l_w}{2 \tan\left(\frac{\phi_{ver}}{2}\right)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{l_h}{2} \\ \frac{l_x}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

で求める。カメラの焦点距離を f 、光源の半径を r_i と定義し、透視変換を用いることで画像上の i 番目の光源の大きさ r_{if} を求める。

$$r_{if} = \frac{r_i}{Y_i} f \quad (3)$$

このとき、イメージセンササイズを ρ とすると、 i 番目の光源の画像上での画素の大きさは次式で求まる。

$$p_i = \frac{r_{if}}{\rho} \quad (4)$$

さらに、光源の中心からある画素までの距離を δ と定義すると、 i 番目の光源の中心から当該画素までの距離は次式のように表せる。

[†]東京農工大学大学院工学府情報工学専攻
Department of Computer and Information Sciences,
Tokyo University of Agriculture and Technology
[‡]大阪大学工学研究科
Graduate School of Engineering
Osaka University

$$\delta_i = \sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2} \quad (5)$$

光源の画像上での輝度を明るさとする。光源の明るさを b_i と定義したとき、ある距離 δ での明るさを次式の関数で定義する。

$$f_i(\delta_i) = \begin{cases} b_i & (\delta_i \leq p_i) \\ (b_i - \gamma) \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\alpha(\delta_i - p_i - \beta)}}\right) + \gamma & (\delta_i > p_i) \end{cases} \quad (6)$$

α と β は条件によって変わるパラメタであり、以下の式を満たすように決定される。

$$\frac{1}{1 + e^{\alpha\beta}} < C \quad (7)$$

ここで、 C はあらかじめ設定されたしきい値である。

画素を光源と判断する明るさのしきい値を b_{ih} と定義する。ある画素において設定した b_{ih} よりも明るさが大きい場合には、他の光源の信号と干渉すると考える。この干渉を考慮し拡張した光源の大きさを e と定義し、BE を考慮した光源 i の大きさ e_i を次のように定式化する。

$$e_i = \arg \max f_i(\delta_i) \geq b_{ih} \quad (8)$$

最後に i 番目と j 番目の光源 e_i, e_j が画像上で重ならないようにすることで、光源間干渉を回避できる。従って、式(2)で求めた各光源の画像座標と式(8)で求めた光源の大きさをういて制約条件を以下のように設定する。

$$\sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2} > e_i + e_j \quad (9)$$

式(9)を満たす場合には、画像上の2点間の距離が2つの光源の半径の和よりも大きいため、画像上で干渉しないことを保証する。

4. 実験

4.1. 実験条件

はじめに、式(8)で定式化した理論式と実測値との整合性を確認した。パラメタ α, β を最小二乗誤差が最小になるように設定し、実測値との比較を行った。

次に、複数光源を用いて距離ごとにデータ転送を行い Bit Error Rate(BER)を測定して通信品質を確認した。

以上の実験で用いた条件は以下の通りである。カメラの解像度は 1920x1080、イメージセンサは 3 μm 、画角は 67°x47°であり、焦点距離は 5 mm とした。またフレームレートは 60 fps である。用いた LED パネルの半径は 3 cm、LED の数は 64 個であった。データ伝送間隔は 50 ms であり、16-optical spatial modulation と 3-color-division multiplexing を用いて 2.2 kbps の信号伝送を行った。カメラと LED の距離は 0.5 m から 4.5 m まで変化させた。

4.2. 実験結果：提案モデルの有効性

撮影画像上における LED の大きさの実測値と式(8)で定式化した理論値を比較した結果を図 3 に示す。ここでは、蛍光灯下 (図 3a) と暗環境下 (図 3b) での結果を示している。 α と β の値を適切に設定することで理論式と実測値が環境に関わらず一致していることがわかる。以上の結果から提案したモデルの有効性を確認した。

4.3. 実験結果：BER

異なる2つのカメラを用いて蛍光灯下と暗闇の環境で通信し、BER の測定を行った結果を図 4 に示す。距離が 1.5m 未満の点については BER が 0 であったため省略した。BER のしきい値は 7%HD-FEC を想定し 10^{-3} とした。図 4 から、本条件での有効伝送距離は 2.5 m であるが、これは距離が遠くなると撮影画像上での LED パネルが小さくな

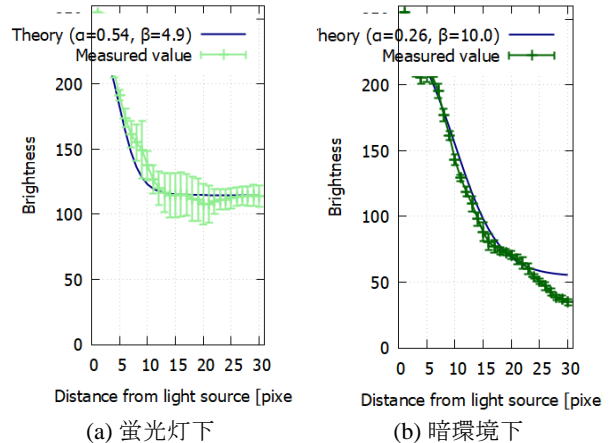


図 3. 画像上の LED の明るさ

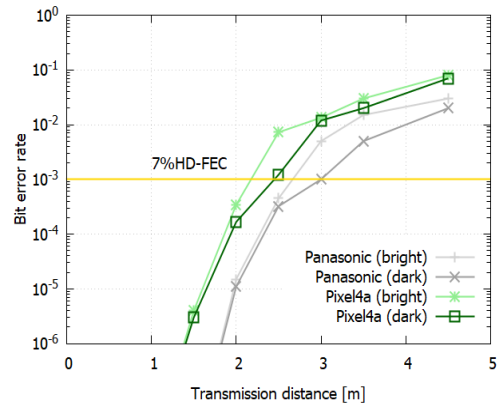


図 4. 各距離における BER

るからである。有効伝送距離を伸ばすためには、光源の拡大やカメラの光学ズーム機能、また高解像度化などが考えられる。以上の結果から、光源の数によらず高精度な通信を実現できることを確認した。

5. 結論

本稿では、OCC における光源間干渉を回避するための一般的なモデルを提案した。提案モデルの目的は、通信を遮断する障害物と BE を考慮して光源間干渉を回避することである。提案モデルは、イメージセンサやカメラのパラメタを用いて、透視変換を伴う複数光源の干渉を定式化する。実験の結果、提案モデルにより光源間干渉が回避され、カメラと複数の光源の高精度な通信ができることを確認した。今後はより包括的な評価を行うため、様々なカメラや環境で実験していきたい。

謝辞

本研究の一部は、JST ACT-I(JPMJPR18UL), さきがけ (JPMJPR2137), および GMO 財団の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] N. T. Le, et al., Signal Processing: Image Communication, 2017.
- [2] Y. Onodera, et al., IEEE GLOBECOM, 2021
- [3] D. Vuong et al., IEEE Access, 2018.