

研究速報

位相限定相関法を用いた路車間可視光通信システムにおける測距精度向上手法

大村 明寛^{†a)} (正員) 山里 敬也[†] (正員)
 荒井伸太郎^{††} (正員) 圓道 知博^{†††} (正員)
 藤井 俊彰[†] (正員) 岡田 啓[†] (正員)

Accuracy Improvement by POC for Distance Estimation Scheme for VLC Using an LED Array and a High-Speed Camera

Akihiro OHMURA^{†a)}, Takaya YAMAZATO[†],
 Shintaro ARAI^{††}, Tomohiro YENDO^{†††}, Toshiaki FUJII[†],
 and Hiraku OKADA[†], *Members*

[†]名古屋大学大学院, 名古屋市
 Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††}香川高等専門学校, 高松市
 Kagawa National College of Technology, Takamatsu-shi,
 761-8058 Japan

^{†††}長岡技術科学大学電気系, 長岡市
 Nagaoka University of Technology, Nagaoka-shi, 940-2188
 Japan

a) E-mail: ohmura@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本論文では、送信機には LED 信号機、受信機には車載高速度カメラを用いた路車間可視光通信システムにおける測距手法について提案する。具体的には位相限定相関法を用いてサブピクセルレベルの推定を行うことで高精度に測距を行う手法を提案する。

キーワード 可視光通信, 距離推定, 高速度カメラ, 位相限定相関法

1. まえがき

LED に照明や表示機能だけでなく、情報伝送デバイスとしても用いるユビキタス通信が注目されている [1]~[5]。我々は、可視光通信の中でも送信機に LED 信号機を例とした LED 光源、受信機に車載高速度カメラを用いた路車間可視光通信を想定した研究を行っている [6]。その中でも本研究では、通信としての性質に加えて、距離を推定する性質を付加することを考える。

従来から、可視光通信技術とカメラを組み合わせた測距手法は存在する [3]~[5]。しかし、文献 [3] の手法は高精度な測距ができるが、受信機が静止状態かつ LED によるマークが複数必要であり、車両での測距には適さない。車両での応用としては文献 [4]、文献 [5] がある。文献 [4] は送信機である LED 光源を三つ使用する手法である。道路上の信号機を想定した 3 点の位置座標と撮影画像から自車位置を推定する。また、文献 [5] は前方の車両の左右のテールランプを使用した手法である。通信情報として二つのテールランプ間の

長さを送信し、撮影画像と組み合わせることで前方車両との距離関係を取得する手法である。本論文の手法はこれらの手法とは異なり、送信機である LED アレイ、受信機である高速度カメラとともに 1 台で測距を行い、目標精度を上記文献と匹敵する cm オーダーとする。

本論文の測距手法は距離により変動する撮影画像上の送信機 (LED アレイ) の大きさから LED アレイと自車までの距離を推定する。ここで、LED アレイとは複数の LED 光源からなり、それぞれが個別に点灯可能な光源である。撮影画像上の LED アレイの大きさを認識するために、元となる LED アレイの大きさがわかるような点灯パターンを付加する。受信機側において、撮影した LED パターンから LED アレイの大きさを取得し、距離推定を行う。本来の LED アレイの大きさは可視光通信による情報として取得する。LED アレイの大きさを推定する際、その大きさをピクセル値 (自然数) で取り扱っていると、距離推定誤差が発生してしまうという問題がある。そこで本論文では位相限定相関法 (POC) [7]~[9] を利用することにより、サブピクセルレベルでの送信機の大きさの推定を行い、距離推定精度の向上を図る。

2. システムモデル

本論文で用いる路車間可視光通信システムは送信機である LED アレイと受信機である車載高速度カメラから構成されている。図 1 にシステムのブロックダイアグラムを示す。送信機は LED が縦 32 個×横 32 個の正方形に並んだ LED アレイである。LED は個別に点滅することができ、高速に LED を点滅させることで情報を送信することができる。この通信機能を生かし、送信機にて送信機位置情報と LED アレイの大きさ情報を送信する。また、LED アレイの点灯パターンの中に測距用パターンを付加する。

受信機では、LED アレイを撮影し画像を取得する。画像処理により点灯パターンを復号することで情報を受信する。また、LED の位置を推定する。送信機位

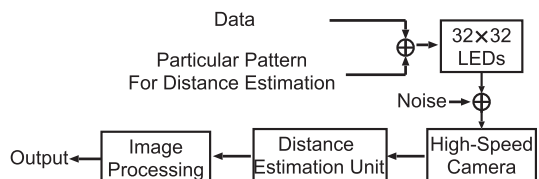


図 1 システムモデル
 Fig.1 System model.

置情報と LED アレイの大きさ情報を出力し、得られた LED アレイ大きさ情報と撮影画像上の LED の位置を用いて測距を行う。

3. 相対距離推定

3.1 LED アレイのピクセル幅を用いた距離推定

以下に LED アレイ-高速度カメラ間の測距手法を示す。本手法は三角測量をベースにした測距手法である。高速度カメラで撮影した画像に写る LED アレイの大きさは LED アレイと高速度カメラの間の距離によってのみ変化する。また、受信機側において LED アレイの大きさ、伝送する測距パターンは通信により得た情報から測距の時点では既知であるとする。伝送する測距パターンは正方形 LED アレイの左上、右下を順に点灯させたパターンを用いる。図 2 に 2 枚の撮影画像を示す。ここで高速度カメラのフレームレートは十分早いものとし連続した画像は同じ位置から撮影されたものとみなすものとする [6]。このとき撮影画像上の LED 位置を推定し、LED アレイの大きさを推定する。この撮影画像上の LED アレイの m 方向, n 方向の幅をピクセル幅 W_m, W_n と定義する。今回は正方形 LED アレイを用いるため, $W_m = W_n$ となり, ピクセル幅 W は W_m と W_n を平均することで求める。図 3 に測距の想定図を示す。LED アレイと高

速度カメラ間の距離 L は以下の式 (1) より得られる。

$$L = \frac{SP}{2W \tan \frac{\theta}{2}} = \frac{fS}{W\alpha} \quad (1)$$

S は LED アレイの実際の幅, α はカメラのピクセルサイズ, f はレンズの焦点距離を表す。カメラの画角 θ は以下で得られる。

$$\theta = \tan \frac{\theta}{2} = \frac{\alpha P}{2f} \quad (2)$$

ここで, f, S, α は定数である。そのため, ピクセル幅 W の推定精度は距離推定精度に大きく影響する。この W は自然数 (ピクセル) の値しかとらないが実際は小数点以下の値をもっている。LED アレイ-高速度カメラ間距離が長くなると LED アレイの幅 (W) も小さくなり, W の真値とのずれが距離推定精度に与える影響が大きくなる。例えば, 距離 60m の地点では, W は約 16.6 ピクセルだが, これは 16 ピクセルまたは 17 ピクセルと誤った場合, 距離推定誤差はそれぞれ 2.13m, 1.52m となる。距離推定精度向上のためには, サブピクセル精度での W の推定が必要である。そのため 3.2 にて高精度なピクセル幅推定手法について説明する。

3.2 位相限定相関法

LED アレイのピクセル幅の推定には位相限定相関法 (POC) を用いる [7]~[9]。POC はパターンマッチング手法の一つであり, 2 枚の画像に対しフーリエ変換を行い, それぞれ得られた振幅成分と位相成分のうち振幅成分を 1 に置き換え, 位相成分のみ相関を取る手法である。一般的に, 同一物体の位置ずれ検出に用いる。

本論文においては, 入力画像として LED アレイの左上の LED が点灯したパターン, LED アレイの右下の LED が点灯したパターンの二つを撮影した画像を用いる。ここで, 走行中の車両を想定した場合, 使用する 2 枚の画像は同じ位置から撮影することにならないため, 測距精度に影響を与えることが考えられる。この問題は高速度カメラを使用することにより影響が軽減されている。本論文では高速度カメラは秒間 1000 フレームの撮影を行う。2 フレーム間に移動する距離は自動車の時速 30km で走行している場合, 1cm に満たない。この事から, 本手法における走行による車両の位置誤差は無視することができる。

2 枚の入力画像をそれぞれ $f_1(m, n), f_2(m, n)$ とする。フーリエ変換後の画像は $F_1(u, v), F_2(u, v)$, 振幅成

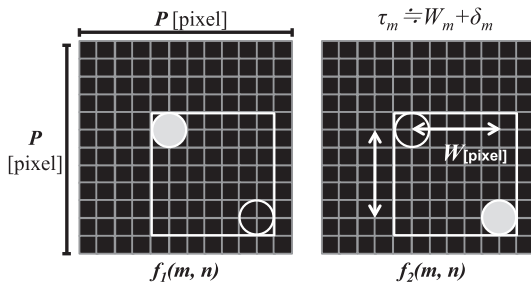


図 2 測距に用いる 2 枚の撮影画像

Fig. 2 Pixel-width W and 2D LED pattern $f_1(m, n)$ and $f_2(m, n)$, transmitted for the distance estimation purpose.

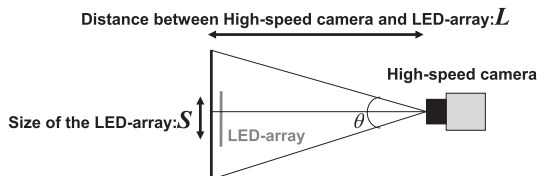


図 3 LED アレイ-高速度カメラ間測距の想定図

Fig. 3 Distance estimation scheme based on using triangulation.

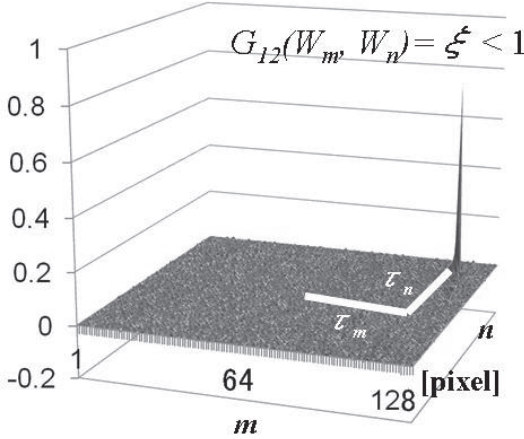


図4 $f_1(m, n)$ と $f_2(m, n) = f_1(m + \tau_m, n + \tau_n)$ を用いた位相限定相関結果

Fig. 4 POC image G_{12} for $f_1(m, n)$ and $f_2(m, n) = f_1(m + \tau_m, n + \tau_n)$.

分は $A(u, v), B(u, v)$, 位相成分は $F'_1(u, v), F'_2(u, v)$, 合成画像は $H_{12}(u, v)$, 出力は $G_{12}(r, s)$ である.

自己相関をとる ($f_2(m, n) = f_1(m, n)$) 場合, 出力は式 (3) のようになる.

$$G_{12}(r, s) \begin{cases} 1 & (r = 0, s = 0) \\ 0 & (r \neq 0, s \neq 0) \end{cases} \quad (3)$$

位置ずれを起こした2枚の画像 ($f_2(m, n) = f_1(m + \tau_m, n + \tau_n)$) を用いた場合を考える. 位置ずれ τ_m, τ_n は実際の位置ずれ (連続値) を表している. ピクセル幅 W は自然数であるため, 離散小数値 δ_m, δ_n を定義すると, τ_m, τ_n は以下のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \tau_m &\simeq W_m + \delta_m \\ \tau_n &\simeq W_n + \delta_n \end{aligned} \quad (4)$$

位相限定相関の出力は式 (5) のようになり, 図4のようになる.

$$G_{12}(r, s) \simeq \begin{cases} 1 & (r = W_m + \delta_m, s = W_n + \delta_n) \\ \xi (< 1) & (r = W_m, s = W_n) \\ \epsilon & (r \neq 0, s \neq 0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで r, s が自然数すなわち $r = W_m, s = W_n$ の場合, 値が $\xi (< 1)$ となり, W の真値とは異なる値になってしまう. 正確な W を推定するためには, δ_m, δ_n

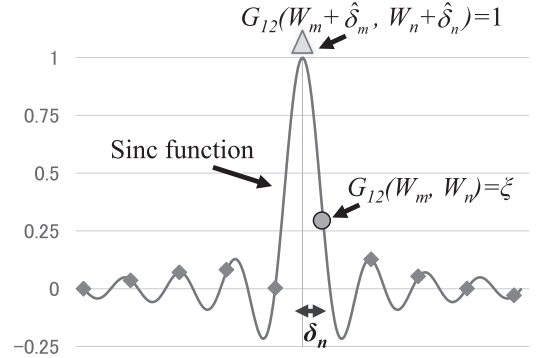


図5 位相限定相関の sinc 関数近似
Fig. 5 Sinc function approximation of POC.

の推定が必要である.

3.3 δ_m, δ_n の推定

δ_m, δ_n を推定するために, 位相限定相関結果 $G_{12}(r, s)$ を sinc 関数に近似することができる性質を用いる [7].

$$G_{12}(r, s) \simeq \text{sinc}(r + \delta_m) \text{sinc}(s + \delta_n) \quad (6)$$

ここで, δ_m, δ_n を変化させ, $G_{12}(r, s)$ が最大となる $\hat{\delta}_m, \hat{\delta}_n$ を探す. W の真値は式 (7) によって推定される.

$$(W_m + \hat{\delta}_m, W_n + \hat{\delta}_n) = \underset{-1 < \delta_m < 1, -1 < \delta_n < 1}{\text{argmax}} G_{12}(r, s) \quad (7)$$

図5は式(6)の一方方向を表した図である. sinc関数上において, 整数値で取り扱った場合, 円形の点で表す ξ の値が出力され, 式(7)を用いて小数点以下の値を考慮した場合, 三角形の点で表す関数の頂点の値が出力される. この関数の頂点の座標が W の真値とすることができる.

以上により, δ_m, δ_n の推定を行う.

4. 実験

表1の諸元に従い, 提案手法の評価実験を行った. 式(7)において δ_m, δ_n の値を0.1ずつ変化させた. 結果を図6に示す.

図6は平均距離推定結果を表したものである. 横軸はLEDアレイ-高速度カメラ間距離を表し, 縦軸は距離推定誤差を表す. “Pixel level estimation” は3.1で説明した撮影画像のピクセル幅を用いた手法による結果の誤差を表した曲線である. また, “Subpixel level estimation” は3.1-3.3で説明した手法を用いて距離

表 1 実験諸元

Table 1 Parameters of the experimental instruments.

撮影環境	LED アレイ, 高速度カメラ共に静止状態
レンズの焦点距離 f	35mm
高速度カメラのピクセルサイズ α	17 μ m
レンズの絞り	S
解像度 P	128 \times 128 ピクセル
通信距離 L	20m-60m(5m 間隔)
LED アレイ-高速度カメラ横ずれ σ	5m
LED アレイ	32 \times 32, 縦 46.5cm 横 46.5cm

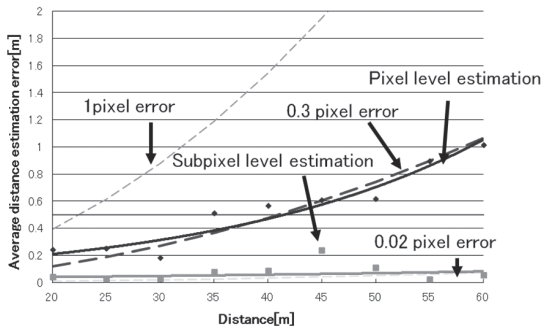


図 6 距離推定誤差

Fig. 6 Average distance estimation error performance versus distance.

推定をした結果の誤差を表している。“Subpixel level estimation”では、距離 20-60m において誤差は 0.3m 未満となった。そのときのピクセル推定誤差は 0.02 ピクセルであった。一方、“pixel level estimation”では 60m 地点において誤差が 1m となった。このときのピクセル推定誤差は 0.3 ピクセルであった。実験結果より、式 (7) において δ_m, δ_n を推定することによる距離推定誤差の減少が確認できた。

5. むすび

車載高速度カメラと LED アレイを用いた距離推定手法について提案をした。始めに、撮影画像上の LED アレイ幅を用いた距離推定手法について紹介し、高精度距離推定のために位相限定相関法を用いたサブピクセルレベル LED アレイ幅推定を紹介した。実験を行い、20m-60m 区間において距離推定誤差が 0.3m 未満、ピクセル推定誤差が 0.02 ピクセルとなることを

確認した。

謝辞 日頃熱心にご指導頂く、名古屋大学エコトピア科学研究所教授片山正昭先生、助教授小林健太郎先生に深く感謝する。また、本論文の一部は科研基盤(23560449)の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.2, pp.351–359, Feb. 2005.
- [2] S. Kitano, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “Inter vehicle communication and ranging system using LED headlamp,” IEICE Technical Report, ITS2004-65, IN2004-199, Feb. 2005.
- [3] 内山英昭, 吉野昌樹, 春山真一郎, 斎藤英雄, 中川正雄, 掛橋孝夫, 永元直樹, “光源マーカを用いた可視光通信に基づく写真測量システム,” 画像電子学会誌, vol.38, no.5, pp.703–711, Sept. 2009.
- [4] 吉野昌樹, 春山真一郎, 中川正雄, “可視光 LED とイメージセンサを用いた高精度測位システム,” IEICE Technical Report, WBS2007-36, Oct. 2007.
- [5] 高井 勇, 原田知育, 安藤道則, 川人祥二, “空間光通信イメージセンサによる車車間通信システムの開発,” 信学技報, ITS 111(441), pp.135–140, Feb. 2012.
- [6] 白木康建, et al, “走行車両が高速度カメラを用いて情報を受信するユビキタス可視光通信のための複数情報源認識手法,” 信学論 (B), vol.J95-B, no.11, pp.1517–1528, Nov. 2012.
- [7] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, “High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E86-A, no.8 pp.1925–1933, Aug. 2003.
- [8] K. Kobayashi, H. Nakajima, T. Aoki, M. Kawamata, and T. Higuchi, “Principles of phase only correlation and its applications,” ITE Technical Report, vol.20, no.41, p.16, MIP’96-53, NIM’96-75, July 1996.
- [9] H. Foroosh, J.B. Zerubia, and M. Berthod, “Extension of phase correlation to subpixel registration,” IEEE Trans. Image Process., vol.11, no.3, pp.188–200, March 2002.

(平成 25 年 3 月 4 日受付, 7 月 9 日再受付)