

[ポスター講演] 車両走行時の振動を模擬した
路車間可視光通信・測距統合システムのための測距法大村 明寛[†] 山里 敬也[†] 岡田 啓[†]
藤井 俊彰[†] 圓道 知博^{††} 荒井伸太郎^{†††}

† 名古屋大学

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町 C3-1(631)

†† 長岡技術科学大学

〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

††† 香川高等専門学校

〒 769-1192 香川県三豊市詫間町香田 551

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

あらまし 道路に設置した LED アレイから走行車両に向かってデータ伝送を行う路車間可視光通信では、受信機に高速度カメラを用いることで走行車両の振動を低減でき、ロバストなデータ受信ができる。この路車間可視光通信において、LED アレイから既知のデータパターンを送信することで通信と同時に測距を行うシステムを提案する。走行時における車両の振動により測距性能が低下する問題について、位相限定相関法を用いた手法により解決を図る。

キーワード 可視光通信, 自車位置推定, 高速度カメラ, 位相限定相関法

Distance Estimation Scheme for Integrated V2I-VLC
Simulating the Vibration of Driving VehicleAkihiro OHMURA[†], Takaya YAMAZATO[†], Hiraku OKADA[†],
Toshiaki FUJII[†], Tomohiro YENDO^{††}, and Shintaro ARAI^{†††}

† Nagoya University

Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-shi, 464-8603, JAPAN

†† Nagaoka University of Technology

††† Kagawa National College of Technology

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

Abstract In road-to-vehicle visible light communication data is transmitted toward moving vehicles from the LED array installed on roads. Robust data reception and fast communication are possible by using a high-speed camera as it can reduce the vibration of vehicles. In this road-to-vehicle visible light communication, we propose an integrated system of communication and distance estimation by sending a known data pattern from the LED array. On issues which is distance estimation performance deterioration by the vibration of the running vehicle, try to resolve them using the technique using the phase-only correlation method.

Key words Visible Light Communication, Car Position Estimation, High-Speed Camera, Phase-Only Correlation

1. ま え が き

LED を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、距離を推定する機能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 によるマーカが複数必要であり、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 3 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 2 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。本稿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をともに 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。

本稿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) で取り扱おうと、距離推定誤差が発生してしまうという問題がある。そこで本稿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ない、距離推定精度の向上を図る。

以前提案した手法 [10] は送信機、受信機が共に静止状態にて実験を行っていた。本稿では、車両走行時に受信機である高速度カメラが受ける振動を考慮した測距手法を提案する。走行時における振動が与える影響は大きく、サブピクセルレベルの LED アレイ幅推定が求められる本稿の測距手法において無視することはできない。そのため、実環境を想定した場合、振動に対応した測距手法が必要である。

2. システムモデル

本稿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図を示す。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、撮影画像の輝度値を読み取り、LED の位置を推定する。送信機位置情報と 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

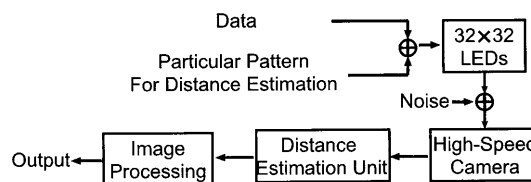


図 1 システムモデル

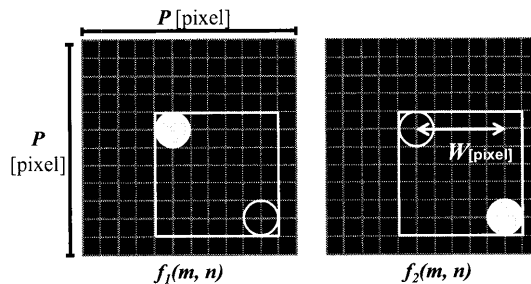


図 2 測距に用いる 2 枚の撮影画像

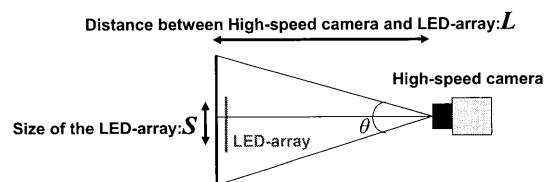


図 3 LED アレイ-高速度カメラ間距離の推定図

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、受信機側において実際の 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。LED アレイの大きさを受信機側で推定するために、LED アレイの端の LED を点灯させるパターンを考える。伝送する測距パターンは後述の位相限定相関法のため、図 2 のように 2 種類のパターンである。以前は正方形 LED アレイの左上、右下を順に点灯させたものを使用していた [10]。今回は対振動パターンとして LED アレイの左上と左上と右下を同時に点灯させた 2 つのパターンを用いる。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 と定義する。今回は正方形 LED アレイを用いるため、ピクセル幅 W は m 方向、 n 方向に依存しないものとする。そこで、LED アレイの大きさは、画像上の LED アレイの縦方向と横方向のピクセル幅 W を平均することで求める。図 3 に LED アレイ-高速度カメラ間距離の推定図を示す。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ピッチサイズ, 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持っている. 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 27.68 ピクセルだが, これは 28 ピクセルまたは 27 ピクセルと誤った場合, 距離推定誤差はそれぞれ 0.68m, 1.51m 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 節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 1 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の検出に用いる.

本稿においては, 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 アレイの左上と右下の LED が同時に点灯したパターンの 2 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. 本稿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. このことから, 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.

$$\tau_m \simeq W_m + \delta_m$$

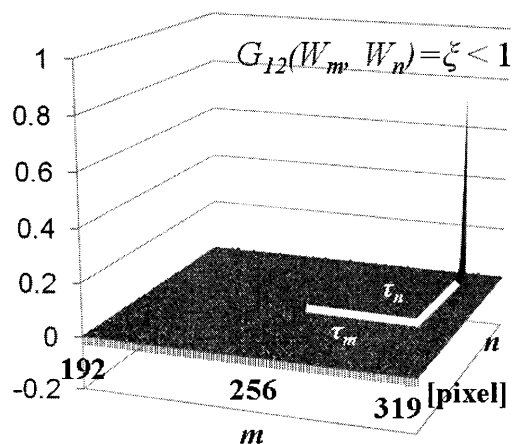


図 4 $f_1(m, n)$ と $f_2(m, n) = f_1(m + \tau_m, n + \tau_n)$ を用いた位相限定相関結果

$$\tau_n \simeq W_n + \delta_n \quad (4)$$

位相限定相関の出力は式 (5) のようになる. 図 4 に位相限定相関結果のうち画像中心を中心とし 128×128 pixel で切り出したものである.

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

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となってしまう. 正確な W を推定するためには, δ_m, δ_n 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) を 1 次元方向で表した図である. sinc 関数上に, 整数値で取り扱った場合, グラフ上のプロットで表す ξ の値が出力される. 式 (7) を用いて小数点以下の値を考慮した場合, sinc 関数の頂点となる位置の座標値が出力される. 2 本のパルスについて, それぞれの頂点の座標値の差を取り, 得られた値を 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. 振動を考慮した測距

本稿は車両走行時に車両に取り付けた高速度カメラを用いて測距を行うことを想定している. 現在, 高速度カメラは 1000fps

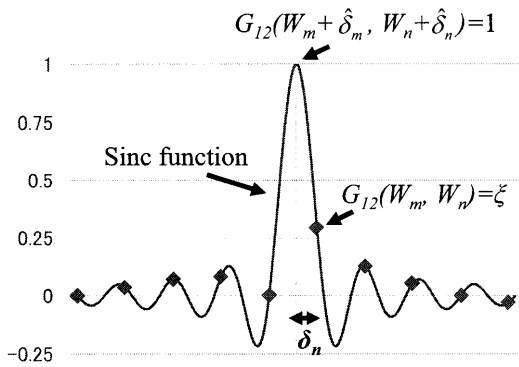


図5 位相限定相関の sinc 関数近似

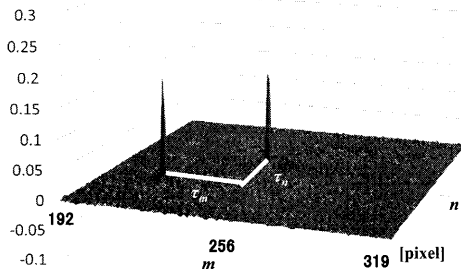


図6 入力画像に振動用パターンを用いた場合の位相限定相関結果

にて撮影を行う。位相限定相関法には2枚の画像を用いるため、連続する2枚の画像の間には1msの時間が存在する。この1msの間に、振動により画像が最大2pixel程度移動してしまうことが分かっている [11]。この振動による画像の位置ずれは一様ではないため、あらゆる振動に対応した手法が求められている。そこで、本節では、車両走行時の振動を考慮した測距手法について考察する。

まず、振動により位置ずれを起こした画像を上記提案手法を用いて行った場合、位相限定相関結果上のパルスの位置も振動による影響を受けてしまう。この影響は振動による位置ずれ量と同じであり、サブピクセル精度のLEDアレイ幅推定を目標とする本稿においては無視することはできない。

振動に対応した手法として、LEDの左上と、左上と右下が同時に点灯したパターンを撮影した画像を使用することを考える。このときの位相限定相関結果は図6ようになる。図6から、LEDアレイの左上に対応するパルスが位相限定相関結果の中心付近に出現する。ここで、このパルスは自己相関結果とは異なり中心には出現しないことに着目する。同じ画像を入力した場合、パルスは中心に出現するが、振動により最大2ピクセルのずれが発生した結果、振動ずれと同量だけ中心からずれた位置に相関パルスが出現する。このLEDアレイの左上に対応するパルスと右下に対応するパルスに対してそれぞれ sinc 関数近似を行い、パルス間の幅を推定することで、LEDアレイ-高速度カメラ間相対距離を推定することができる。

表1 実験諸元

撮影環境	LEDアレイ:静止状態 高速度カメラ:静止状態または振動状態
レンズの焦点距離 f	35mm
高速度カメラのピクセルピッチサイズ α	10 μ m
レンズの絞り	8
解像度 P	512x512 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	32x32, 縦 46.5cm 横 46.5cm

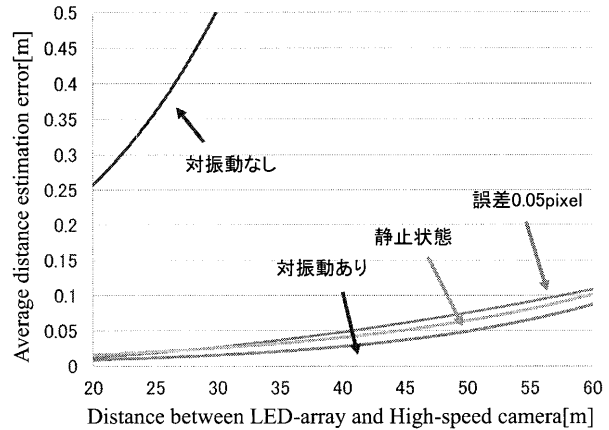


図7 入力画像に振動用パターンを用いた場合の位相限定相関結果

5. 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。また、受信機の振動は、手で揺らすことにより車両走行時の振動を再現した。実験結果を図7に示す。

図7において、曲線は上から順番に「対振動なし」、「誤差0.05pixel」、「静止状態」、「対振動あり」のラベルをつけた。「対振動なし」、「対振動あり」、「静止状態」は5m毎に撮影した画像から得られた推定距離と真値との差を導出し、その結果に対して近似曲線を引いたものである。また、「誤差0.05pixel」は各距離において本来のLEDアレイの大きさ(サブピクセル)に対し0.05ピクセルの誤差が発生した場合の距離推定結果を示している。

各曲線に対して用いた手法を示す。「対振動なし」は3節までの手法を用いて測距を行った結果、「対振動あり」は対振動パターンを用いて測距を行った結果、「静止状態」は受信機が静止状態にて撮影した画像を用いて測距を行った結果を示している。

「対振動なし」においては距離推定誤差が大きく、LEDアレイ-高速度カメラ間距離が30mの地点で0.5mの誤差が発生し、60m地点においては3.65mの誤差が発生してしまった。この結果に対し、「対振動あり」では「静止状態」とほぼ同等の精度を得られ、LEDアレイ幅推定誤差で表すと、およそ0.05ピクセルの誤差と同等の結果が得られた。以上より、提案手法において、受信機である高速度カメラが振動状態であっても静止状態と変わらない精度で距離を推定することができることを確認した。

6. ま と め

車両走行時の振動を模擬した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。次に、車両走行時における振動が与える影響とその解決策について提案した。実験を行い、20m-60m 区間において振動状態においても静止状態と同等の精度となる、ピクセル推定誤差が 0.05 ピクセルとなることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研基盤 (C)(23560449) および豊田中央研究所の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表す。また、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。

文 献

- [1] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” 電子情報通信学会 B, 通信, Bol.J88-B, No.2, pp.351-359, May 2005
- [2] Shogo Kitano, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa, “Inter vehicle Communication and Ranging System using LED Headlamp,” IEICE Technical Report ITS 2004-65, IN2004-199, February 2005
- [3] 内山英昭, 吉野昌樹, 春山真一郎, 斎藤秀雄, 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, September 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, pp.23-26, October 2007
- [5] 高井勇, et al, “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,” 電子情報通信学会技術研究報告 IE, 画像工学 111(442), 135-140, February 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,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J95-B, no.11, pp.1517-1528, November 2012
- [7] Kenji Takita, Takafumi Aoki, et al, “High-Accuracy Sub-pixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation,” IEICE Transaction, Fundamentals, Vol.E86-A, No.8 pp.1925-1933, August 2003.
- [8] Koji Kobayashi, Hiroshi Nakajima, Takafumi Aoki, Masayuki Kawamata, and Tatsuo Higushi, “Principles of Phase Only Correlation and Its Applications,” ITE Technical Report, Vol.20, No.41, PP.16, MIP'96-53, NIM'96-75, July 1996
- [9] Hassan Foroosh, Josaine B.Zerubia, and Marc Berthod, “Extension of Phase Correlation to Subpixel Registration,” IEEE Transactions on Image Processing, vol11, No3, March 2002
- [10] 大村明寛, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎, “可視光通信を用いた路車間通信・測距統合システム,” 電子情報通信学会技術研究報告, USN2012-9, pp.63-68, May 2012
- [11] 白木康建, “高度道路交通システムのための可視光通信における複数情報源の同時認識手法,” 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム修士論文, March 2011