

主論文の要約

論文題目 高速二眼カメラを用いた可視光通信・車両
前方距離推定統合システム
(Visible Light Communication and
Ranging Integrated System Using
High-speed Stereo Cameras)

氏名 木下 雅之

論文内容の要約

本研究では、送信機に交通信号機や車両ライトなどの道路上に存在する LED 光源、受信機に車載カメラ、特に撮影速度が 1000 fps を超える様な高速度カメラを用いた高度道路交通システム(Intelligent transport system: ITS)のための可視光通信(ITS 可視光通信)について検討を行う。従来のイメージセンサ(カメラ)を用いる ITS 可視光通信に関する研究はいずれも単眼高速度カメラが受信機に想定されてきた。しかしながら、単眼高速度カメラでは距離情報の取得ができず、さらなる高度化が困難である。一方で、距離情報の取得が可能である二眼カメラを受信機に利用することで、可視光通信のさらなる高度化に期待できる。

本研究の目的は、2 台の高速度カメラ(高速二眼カメラ)を用いた受信機構成をとり、可視光通信機能と車両前方の距離推定機能を併せ持つシステムを構築することを主題とする。二眼カメラの注目すべき特徴はステレオ画像から得られる視差から距離の推定が可能な点にあり、実用化・普及が進みつつある車両前方認識システムの中核技術を担っている。そのため、高速二眼カメラを可視光通信の受信機に用いることで、一つのデバイスで車両前方認識と通信の両方の機能を兼ね備えることが可能となる。また、可視光通信の復調処理にステレオ画像を有効活用することで、通信性能の向上にも期待できる。

本研究の目的を遂行するため、本論文では次に掲げる 3 つの点について検討を行う。

1. LED 送信機の正確かつ高速な検出・追跡
2. ステレオ画像を活用した通信性能の向上
3. ステレオ画像と LED 送信機の特徴量を利用した高精度な距離推定

1.に関して、イメージセンサ可視光通信では、撮影画像から送信機を見つけ出し、その輝度値を読み込むことで情報を受信する。そのため、画像上の送信機の検出は情報受信において非常に重要な役割を担う。特に、送受信機が車両と共に移動する ITS 可視光通信では、画像上の送信機位置が時々刻々と変化する。こうした画像上の送信機の移動は受信機にとって情報を持つ正しい画素の選択を困難にし、誤りの原因となる。そのため、取得される撮影画像に対し、毎フレーム送信機の追跡を行う必要がある。ステレオ画像から対応点を探索し、視差を求める必要のある距離推定においても同様に送信機の検出・追跡は重要である。1.では正確かつ高速な送信機検出・追跡を達成するため、走行環境における画像上の送信機の振る舞いをモデル化・解析する。そこで得られた画像上の送信機の振る舞い(つまり通信路)の統計的性質を利用することで、送信機追跡システムの効率化を図る。

2.に関して、単眼カメラ受信機では、ドライバーの走行の仕方や車両振動の影響により、同一区間の通信においても通信性能にばらつきが生じる、これは、チャンネル状態が送受信機の相対的位置関係に依存することや送信機の画素への投影のされ方によって変動することが要因であると考察される。こうした通信性能のばらつきに対し、高速二眼カメラから取得されるステレオ画像を活用し、2つの受信信号を選択または合成することでばらつきを低減し改善を図る。

3.に関して、二眼カメラの最大の特徴は、距離情報が得られる点にある。可視光通信に用いる LED 送信機は高輝度かつ高速点滅の特徴を持っており、こうした特徴量を利用することで画像上における認識を容易に行うことができる。そのため、可視光通信用の LED 送信機をアンカーとして用いることで、二眼カメラにおける対応点探索を高精度に行うことが期待できる。3.では、左右の対応点探索に可視光通信のために提案された LED 送信機の検出手法を利用し、かつ、サブピクセル推定手法として等角直線フィッティングを導入した距離推定の初期検討を行い、従来のステレオ法に対する距離推定精度の向上を目指す。

また、ITS 可視光通信に限らず、従来のイメージセンサ可視光通信の研究はいずれも単眼カメラを用いることを想定している。そのため、二眼カメラを受信機に用いる本研究は可視光通信の新たな枠組みを切り開く役割を担う。

1章では、本研究の背景と目的に加え、可視光通信の研究動向と本研究の位置付けについて述べた。可視光通信は、LED などの光源を人の目には知覚できないほど高速に変調することで情報伝送を行う。このため、光源を単に照明や表示として用いるだけでなく、通信機能を付加することができる。例えば、屋内照明に適用すれば、部屋を照らすと同時に無線 LAN 接続を実現したり、デジタルサイネージの案内板や宣伝広告に多言語情報や付加情報を提供することも可能となる。また、水中では、水質に合わせて適切な光を選択することで、音波や電波に比べ高速かつ大容量な通信が実現可能である。さらに、道路上の信号機や車両ライト、街灯などを用いれば自動車への安全運転支援にも利用することができる。こうした利点から可視光通信の世界的注目は年々高まっている。可視光通信の研究動向に注目し、扱う利用環境(屋内、屋外)と受信デバイス(フォトダイオード、イメージセンサ)で

分類すると、多くの研究は屋内環境を想定しており、受信デバイスにはフォトダイオードが用いられている。一方で、屋外環境を想定し、受信デバイスにイメージセンサを用いた可視光通信に関する研究は少なく、未開拓な領域であると言える。そのため、本研究では、屋外環境、特に ITS 環境を想定したイメージセンサ方式の可視光通信に焦点を当てる。

2 章では、市場動向の側面と技術的な側面からイメージセンサを ITS 可視光通信に用いる利点について述べた。ITS の発展と共に車載イメージセンサの普及は加速しつつあり、車両 1 台当たりに搭載される数や性能は今後ますます向上することが予想される。現在のイメージセンサの役割は、運転者に代わり、車両の目となり、視覚情報を提供することにあるが、道路上に存在する LED 光源と組み合わせることで通信機能を併せ持つことが可能となる。このことから、ITS 環境におけるイメージセンサ可視光通信の適用可能性が伺える。特に、ステレオカメラを用いることで、可視光通信と距離推定を一つのデバイスで達成することが可能となり、他の距離推定用車載センサに対し優位性を増すことが期待できる。また、イメージセンサ可視光通信の特徴について述べ、その最大の利点となる空間分離を利用することで、太陽光や人工光源などの雑音源が多数存在する屋外環境においても、複数情報源との同時通信を容易に達成し得ることを説明した。

3 章では、本論文で提案する高速二眼カメラを用いた可視光通信・車両前方距離推定統合システムのシステムモデルを示し、提案システムを構成する 3 つの要素、送信機、受信機、チャンネルモデルについて述べると共に、実験に使用する機器の説明をした。

4 章では、1.に関する検討として、車両走行が画像上の送信機位置に与える影響の統計的性質を解析し、その結果を利用した送信機追跡システムの効率化を図った。画像の投影関係を示すピンホールカメラモデルを導入し、車両の移動と振動の影響を考慮することで、画像上における送信機の振る舞いをモデル化した。また、車両振動測定を行い、得られた結果から画像上の送信機位置に影響を与える車両振動成分は路面凹凸を示すガウス確率過程でモデル化できることを示し、その妥当性を評価した。提案した車両振動の簡略化モデルと推定パラメータを用いた数値解析を行ったところ、撮影速度が 1000 fps 以上の高速度カメラを受信機に用いる場合、画像上における送信機の移動量が 1 pixel を超える確率は極めて低い。この結果を用い、送信機の探索範囲を制限することで十分な追跡性能を保ちつつ、計算時間の削減を達成した。

5 章では、2.に関する検討を行った。高速二眼カメラのための受信手法の確立として、ステレオ画像を活用した受信手法について検討を行った。ステレオ画像を利用した受信手法として、画素選択受信及び最大比合成受信の 2 種類の手法を提案した。画素選択受信では、トレーニングシーケンスを用いて推定した各 LED の誤り率を基に左右の受信信号の内、通信状態の良い方を選択して復調する。最大比合成受信では、トレーニングシーケンスを用いて推定した各 LED のチャンネル利得によって重み付けした左右の受信信号を合成し、復調する。提案手法を静止環境及び走行環境の両方で実験により評価したところ、単眼高速度カメラによる従来の受信手法を上回る通信性能を示し、その有効性を確認した。画素選択

受信では、左右のカメラの内、通信状態の良い方を選択して復調するため、送受信機間の位置関係によるシンボル誤り率(Symbol error rate: SER)のばらつきを低減することができるが、両カメラが同時に誤った場合には対処することができない。故に、理想的な選択ができた場合が通信性能の下限に相当し、さらなる向上は見込めない。一方、最大比合成受信は最も良い通信性能を示し、画素選択受信の下限さえも上回った。この結果から、最大比合成受信を高速二眼カメラの受信手法に採用する。

6章では、LED 送信機の高輝度・高速点滅を利用した対応点探索と等角直線フィッティングによるサブピクセル精度視差推定を導入した距離推定手法を提案した。提案手法を実験により評価したところ、距離推定に広く用いられる評価関数に差分絶対値和(Sum of absolute difference: SAD)を用いたブロックマッチング法に比べ、LED 送信機検出手法を対応点探索に利用することで 0.5 pixel の視差推定精度改善を達成した。さらに、等角直線フィッティングによるサブピクセル精度視差推定を用いることで、視差推定誤差が 0.2 pixel から 0.02 pixel まで改善される。これにより、距離推定精度は、LED の飽和の影響がない状況で、誤差 10 cm 以下の推定を達成した。また、提案手法は、従来手法に対し、より短い計算時間での距離推定が可能であることを示した。

7章では、本論文の総括と今後の展望について述べた。今後の展望として、距離推定システムのさらなる高度化が検討課題に挙げられる。本論文では、単一のLED 送信機に対して、誤差 10 cm 以下の距離推定を達成している。しかしながら、イメージセンサ可視光通信では、通信速度を稼ぐために複数 LED による並列伝送が用いられる。こうした複数 LED を用いた送信機に対する距離推定に関しては未検討である。複数 LED 送信機の場合、LED 同士の干渉の影響から、画像上において、本来投影されるべきサイズよりも膨れて投影されることが予想される。こうした干渉光の影響はサブピクセル単位の推定精度を劣化させる要因となり得ることから、こうした影響を除去した視差推定が必要となる。また、データシーケンスを伝送する際、各 LED を個別に変調させ、アレイ全体ではランダムなパターンで点灯する。こうしたランダムな変調パターンに対する適切なサブピクセル推定を行う方法について検討の余地がある。さらに、提案システムの応用として、距離推定によって得られる距離情報と道路上の LED 光源から可視光通信を介して得られる道路交通情報や地図情報を統合することで、車両前方の詳細な 3 次元マップの生成が考えられる。こうして生成される 3 次元マップは、安全運転支援、さらには、自動運転に寄与することが期待できる。