

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300058

研究課題名(和文)複合次元多視点幾何と車両間異種センサ情報統合

研究課題名(英文)Mixed Dimensional Multiple View Geometry and Integration of Different On-Vehicle Sensors

研究代表者

佐藤 淳(Sato, Jun)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20303688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の自動車安全システムでは、互いの車両において得られるセンサ情報を車両間において如何に協調するかが大きな鍵となる。本研究では、それぞれの車両に搭載されたカメラやレーザレーダなどの異なる種類のセンサ同士を互いに協調することで、お互いの車両の位置や姿勢を計測するセンサ協調技術を開発した。特に、一方の車両のレーザレーダから照射したレーザ照射点をもう一方の車両のカメラで観測したときに、これらの観測情報から互いの車両の3次元的な位置関係を計測する技術を開発した。この技術を応用することで、互いの車両が見えない交差点での互いの車両の接近状況をドライバーに通知することなどが可能となる。

研究成果の概要(英文)：In advanced vehicular safety systems, cooperation of sensing information obtained in multiple vehicles is very important. In this research, we studied multiple view geometry among different sensors, and developed a method for computing 3D position and orientation of multiple vehicles from sensing information obtained by different types of sensors, such as cameras and laser radars, mounted on multiple vehicles. In particular, we showed that by observing laser points projected by a laser radar on one vehicle using a camera on the other vehicle, we can compute relative position and orientation between these vehicles. By using our method, we can report approaching vehicles to drivers at around blind intersections.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン 画像認識 高度道路交通システム

1. 研究開始当初の背景

次世代の自動車安全システムでは、互いの車両の位置関係を如何に高精度に計測するかがシステム実現の大きな鍵となっている。GPSなどの大域センシングの技術が進展しつつあるが、車両制御をするほどの高精度な位置や姿勢の情報を得ることはできない。このため、互いの車両の位置関係を高精度に計測することのできる新たなセンシング手段の実現が望まれている。

一方、近年の車両には、カメラやレーザレーダやミリ波レーダなど様々な外界センシング手段が搭載されつつある。これまでは、これらのセンサ情報は、搭載された車両のみで用いられていた。しかし、車両が情報通信ネットワークによって繋がりつつある今日では、これらのセンサ情報を車両間で共有することにより、互いの車両間の位置関係などを計測できる可能性が出てきた。コンピュータビジョンの研究分野においては、複数のカメラから得られた画像情報を基に互いのカメラの位置関係を計算する技術が開発されている。これに対して、レーザレーダやミリ波レーダなどを車載カメラと組み合わせるなど、異なるセンサ同士を互いに協調する技術は開発されておらず、様々な車載センサの情報は有効に活用されていない。このため、より高度な自動車安全システム実現のためには、互いの車両において得られる様々なセンサ情報を車両間において協調する技術の開発が是非とも必要である。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景に鑑みて、車両に搭載されている様々な種類のセンサ間での情報変換や情報協調を可能にし、これを基に車両間の位置姿勢を高精度に計測する技術を開発する。

このため、本研究ではまず、様々な種類のセンサ間において情報の変換や情報の統合を行うための基本理論を構築することを目指す。次に、この基本理論を車両に搭載された様々な種類のセンサに応用し、車載センサ同士を協調することで、互いの車両の位置関係を計測する技術を開発する。

例えば、図1に示すように車両Aにレンジセンサ(レーザレーダ)が搭載されているとすると、その発信光は物体で反射し、通常は車両Aがその反射光を受光して距離計測する。一方、この反射光は車両Aとは異なる位置にある車両Bの赤外カメラなどでも観測することが可能である。この場合、車両Aの3次元センサ(レーザレーダ)と車両Bの2次元センサ(赤外カメラ)とが、3次元空間中の同一点に関して異なる次元の情報(3次元情報と2次元情報)を得ていることになる。本研究では、このようにして得られた複数の車両における異なる種類のセンサ情報を協調することで、互いのセンサ間の相対的な位置や姿勢、すなわち互いの車両間の位置や姿

勢を求める技術を開発する。

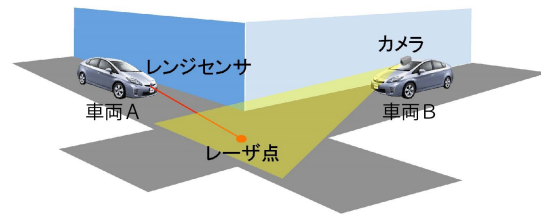


図1 異なる種類のセンサ情報の協調

3. 研究の方法

本研究では、近年コンピュータビジョンで研究が進んでいる多視点幾何理論をカメラのみでなくあらゆるセンサ間で成り立つ一般理論に拡張し、この一般多視点幾何理論を用いることで、車両に搭載されている様々な種類のセンサ間での情報変換や情報協調を可能にし、車両間の位置姿勢を高精度に計測する技術を開発する。

多視点幾何とは、複数のカメラ画像間において成り立つカメラ特有の幾何であり、近年のコンピュータビジョンの研究により、3次元から2次元への投影を行う通常のカメラに関しては、その理論体系がほぼ確立された。一方、研究代表者は、4次元空間や5次元空間などの高次元空間において抽象的なカメラ投影モデルを考えることで、従来では不可能であった運動するカメラ間において成り立つ新しい多視点幾何が存在することを示した。

本研究では、これらの研究成果をさらに拡張し一般化することで、カメラのような2次元センサのみでなく、1次元センサや3次元センサなどあらゆる次元のセンサを組み合わせることで情報交換することが可能な全く新たな多視点幾何理論を構築する。さらに、この新たな多視点幾何理論を基に車両間での異なる種類のセンサ間での情報交換や情報協調を実現し、複数の車両間の相対的な位置姿勢を高精度に計測する技術を開発する。

(1) 複合次元多視点幾何拘束の導出

まず、異なる次元のセンサを複数個組み合わせさせた場合に、これらのセンサ間において成り立つ多視点幾何拘束の一般形を導出する。以下では、この新たな多視点幾何を複合次元多視点幾何と呼ぶことにする。従来の多視点幾何が3次元実空間から2次元画像への投影のもとで構築されていたのに対し、複合次元多視点幾何は、一般のN次元空間からM次元空間への投影のもとで定義する。さらに特徴的な点は、各センサによって投影先の次元Mが異なる点である。本研究では、このように投影先の次元が各々異なる場合において、これらの投影像の間に成り立つ拘束を導出する。異なる次元のセンサの組み合わせとして、1次元センサ2個と2次元センサ3個、

1次元センサ4個と2次元センサ2個など様々な組み合わせが考えられることから、あらゆる組み合わせにおける多視点幾何拘束を統一的に導出する。

このため本研究では、多視点幾何拘束をN次元空間中のN+1枚の超平面の交差と考え、全ての拘束を組織的に導出する。この多視点幾何拘束は、高階のテンソルと各センサデータとの積の形式になると考えられるが、このときの高階テンソル(以下ではこれを多焦点テンソルと呼ぶ)は、各センサ間の相対位置、姿勢、相対運動などの情報を含むと予測される。そこで次に、この多焦点テンソルを分解することで、センサ間の相対位置、姿勢、運動情報を取り出す方法を導出する。

(2) 異種センサ間での情報変換・統合

複合次元多視点幾何拘束をベースに、異なる種類のセンサ間において、情報変換を行ったり情報統合を行う技術を開発する。多視点幾何拘束式は、多焦点テンソルと各センサのデータの積の形式を取るため、一方のセンサの情報得られると、他のセンサの情報を生成することができる。これはすなわち、異なる位置にある異なる種類のセンサ間において情報変換が行えることを意味する。その際、組み合わせるセンサの次元の違いや個数の違いによって情報変換の形式が様々に変化することが予想される。例えば一方のセンサで取得した3次元点情報を、多視点幾何拘束により視点や次元の異なるもう一方のセンサに情報変換すると2次元直線情報になるなどの情報変換が発生する。そこで、異なる次元のセンサ間においてどのような情報変換が起こるのか統一的に解析し、異種センサ間でのセンサ情報変換の一般規則を解明する。また、多視点幾何拘束の計算により、それぞれのセンサの相対的な位置、姿勢、運動などが得られるため、これらの異種センサ情報を統合して高次元情報(対象物の形状、運動、反射特性など)を復元する方法を開発する。

(3) 車両間異種センサ協調技術

2台の車両に搭載されたレーザレーダとカメラとの間で情報協調を行うことで、互いの車両の位置姿勢を計測する技術を開発する。車両Aにレーザレーダが、車両Bに赤外カメラがそれぞれ搭載されているとし、車両Aがレーザレーダで物体までの距離を計測する。このとき、もしも車両Bの赤外カメラが同じ物体を観測しているとすると、車両Aのレーザレーダの反射光は車両Bの赤外カメラでも受光することができる。この場合、車両Aの3次元センサと車両Bの2次元センサとの間で、3次元空間中の同一点に関して異なる次元の情報を得ていることになり、複合次元多視点幾何拘束が成り立つ。そこで、多焦点テンソルを計算しこれを分解するこ

とで、これらの車両同士の相対位置、姿勢、速度を計算すると共に、レーザが照射された物体とそれぞれの車両との相対位置関係を復元する。この技術により、例えば交差点付近にいる2台の車両が、ビルなどで隠されて互いに見えない場合でも、照射されたレーザレーダ光により互いの相対位置を正確に知ることができ、事故防止につなげることができる。

4. 研究成果

(1) 複合次元多視点幾何拘束の導出

異なる次元のセンサを複数組み合わせられた場合において成り立つ複合次元多視点幾何拘束を組織的に導出することに成功した。導出した幾何拘束は一般のM次元からN次元への投影において成り立つため、あらゆる種類のセンサを組み合わせるセンサ統合やセンサ協調を行うことが可能となった。また、この複合次元多視点幾何拘束を用いることにより、異なる種類のセンサ間において情報変換を行う技術を開発した。この情報変換技術では、組み合わせるセンサの次元の違いや個数の違いによって用いる多視点幾何拘束が異なる。そこで、具体的にいくつかのセンサの組み合わせにおいて情報変換の実験を行い、異なる種類のセンサ間において情報変換が正しく行えることを確認した。

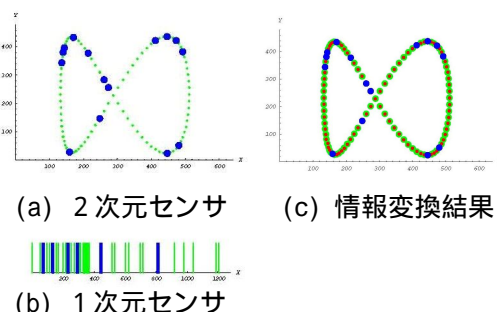


図2 異次元センサにおける情報変換例

図2は、2次元センサと1次元センサとの間で多視点幾何を計算し、これを基に1次元センサの計測結果(b)を変換して2次元センサの計測情報(c)を生成した例である。(c)において、緑の真値に対して赤点で示す情報変換結果が一致していることから、異なる次元のセンサ間での情報変換が正しく行えていることがわかる。

さらに、本研究で導出した複合次元多視点幾何を応用することにより、サンプリングのタイミングが異なるセンサ同士で情報協調する技術や、カメラ画像中の位置情報と輝度情報という異なる性質を持つ情報間において情報協調を行う技術を開発した。一般に、サンプリングのタイミングが異なると、サンプリングされたデータ間には対応関係がなくなり、情報復元を行うことができない。例えば、サンプリングのタイミングが異なる2つのカメラで運動物体をステレオ復元することはできない。これに対し本研究では、サンプリン

グタイミングが異なる複数のセンサを次元が異なるセンサとしてモデル化することで、複合次元多視点幾何により情報復元が可能であることを明らかにした。

また、画像中の位置情報と輝度情報は従来は全く別の理論に基づいて解析が行われてきた。これに対して、複合次元多視点幾何を用いることにより、画像中の座標情報と輝度情報を統合的に扱うことが可能となり、画像情報処理の新しい可能性を示すことができた。

これらの多視点幾何研究は学术界において高く評価され、第15回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2012)においてフロンティア賞を受賞した。

(2) 車両間異種センサ協調技術の開発

導出した複合次元多視点幾何を応用することで、車両間において異なるセンサ情報同士を協調し、互いの車両の位置や姿勢を計測する技術を開発した。

一方の車両からレーザを照射し、他方の車両のカメラでこのレーザ照射点を観測することで多焦点テンソルを計算し、求めた多焦点テンソルから車両同士の相対位置、姿勢、速度などを計測する技術を開発した。この技術により、交差点付近を走行する2台の車両が、ビルなどで隠されて互いに見えない場合においても、照射されたレーザレーダ光により互いの相対位置を正確に知ることが可能となり、事故防止システムの新たな可能性が開けた。開発した手法をシミュレーション実験により定量評価した結果、レーザ照射点の観測時刻が少ない場合には相対位置の推定が不安定となるが、レーザ照射点の観測時刻が増すに連れて推定精度が向上することが明らかになった。

(3) 実機実験

本技術の有効性を実機により確認するため、スキャン型レーザレーダ装置を構築した。本装置では、スキャン装置上にレーザ計測装置を搭載し、スキャン装置とレーザ計測装置との同期を取ることで、空間をスキャンしながら3次元データを計測できるようにした。

車両間異種センサ情報協調技術の評価実験を屋外環境において実施した。本評価実験では、一方の車両からビルの壁面や路面に照射したレーザ光を、もう一方の車両のカメラで撮影し、互いの車両の3次元位置を推定した。図3に、レーザレーダを搭載した車両からカメラを搭載した車両の位置(動き)を推定した結果を示す。図より、時刻(図中の数値)が進むにつれて車両が交差点に近づいてくる様子が正しく計測できていることがわかる。このように、実際の屋外の壁面や路面を対象とした場合においても、レーザレーダとカメラという異なる種類のセンサ間での情報協調が可能であり、この結果、互いの3次元位置や姿勢が推定可能であることが明らかになった。

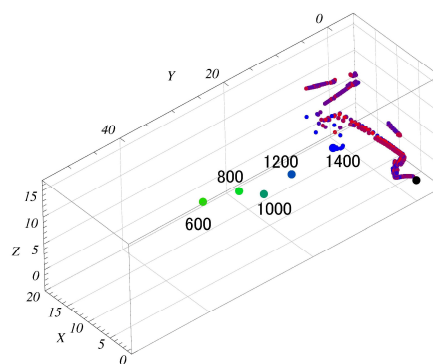


図3 センサ協調による位置推定の例

また、精度評価を実施することで、照射するレーザ点の点数が時刻とともに増加するにつれて、互いの車両の3次元位置推定精度が向上することが明らかになった。次に、レーザ光の射出方向やレーザ光が照射される交差点形状を変化させたときの3次元位置推定精度の変化を評価した。この結果、レーザ光の射出方向のバリエーションが大きくなるほど3次元位置推定精度が向上することが明らかになった。また、交差点形状は十字路よりもT字路の方が推定精度が向上することが定量的に明らかになった。

(4) 新たな車両間位置計測技術への展開

本研究プロジェクトにより、異なるセンサ同士を協調することで互いの3次元情報を計測する技術を開発することができた。一方、本技術では、車両間での情報通信が必要であるため、これを必要としない新たな車両間位置計測技術の開発が望まれる。そこで、一方の車両のヘッドライト光によって照射された路面をもう一方の車両のカメラで撮影し、その時間的な輝度変化より互いの車両間での位置情報を計算する技術を開発した。

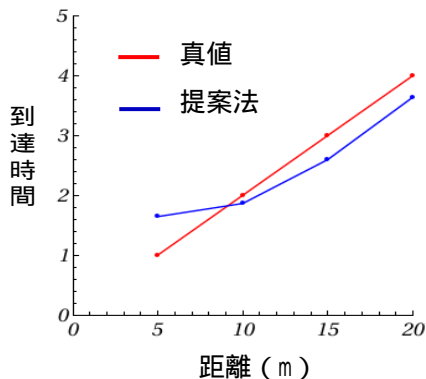


図4 輝度情報からの到達時間の計算

図4は、本手法により、路面の輝度変化から車両の交差点への到達時間を計測した例

である。本技術では、車両間での通信を一切用いずに、路面の輝度変化のみから互いの車両の位置関係を計測できるものであり、本研究プロジェクトによって開発してきた異種センサ協調技術の新たな研究展開の方向性と考えている。今後、本技術に基づく車両間位置計測技術の研究を進展させていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

C. wan, J. Sato, "Computing Spatio-Temporal Multiple View Geometry from Mutual Projections of Multiple Cameras", IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, vol.E93-D, No.9, pp. 2602-2613, 2010.

DOI: 10.1587/transinf.E93.D.2602

H. Matsumoto, F. Sakaue, J. Sato, "Multiview Constraints in Frequency Space and Camera Calibration from Unsynchronized Images", Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, pp. 1601-1608, 2010.

DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539779

K. Kato, F. Sakaue, J. Sato, "Extended Multiple View Geometry for Lights and Cameras from Photometric and Geometric Constraints", Proc. International Conference on Pattern Recognition, 査読有, pp. 2110-2113, 2010.

DOI: 10.1109/ICPR.2010.517

C. WAN, J. SATO, "Multiple View Geometry for Curvilinear Motion Cameras", IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, vol.E94-D, No.7, pp. 1479-1487, 2011.

DOI: 10.1587/transinf.E94.D.1479

K. Noba, F. Sakaue, J. Sato, "Showing Vehicles at Blind Corners from Mixed-Dimensional Multi-View Geometry", Proc. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 査読有, pp. 2064-2069, 2011.

DOI: 10.1109%2FICCVW.2011.6130502

F. Sakaue, J. Sato, "A New Approach of Photometric Stereo from Linear Image Representation under Close Lighting", Proc. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 査読有, pp. 759-766, 2011.

DOI: 10.1109%2FICCVW.2011.6130329

F. Sakaue, J. Sato, "Surface Depth Computation and Representation from Multiple Coded Projector Light", IEEE International Workshop on Projector-

Camera Systems, 査読有, pp.75-80, 2011.

DOI: 10.1109/CVPRW.2011.5981787

K. Saruwatari, F. Sakaue, J. Sato, "Detection of Abnormal Driving Using Multiple View Geometry in Space-Time", Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 査読有, pp.1102-1107, 2012.

DOI: 10.1109/IVS.2012.6232189

坂上文彦, 加藤一樹, 佐藤 淳, "幾何情報と光学情報に基づく複合多視点幾何", 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol.J95-D, No.12, pp.2102-2112, 2012.

S. Miyan, J. Sato, "Reconstructing Sequential Patterns without knowing Image Correspondences", Proc. Asian Conference on Computer Vision, 査読有, LNCS 7727, pp.484-496, 2013.

DOI: 10.1007/978-3-642-37447-0_37

Y. Kakumu, F. Sakaue, J. Sato, K. Ishimaru, M. Imanishi, "High Frequency 3D Reconstruction from Unsynchronized Multiple Cameras", Proc. British Machine Vision Conference, 査読有, pp. 43.1-10, 2013.

<http://dx.doi.org/10.5244/C.27.43>

C. Wan, Y. Wu, J. Sato, Multiple View Geometry in Dynamic Environment, Proc. Asian Conference on Pattern Recognition, 査読有, pp. 532-536, 2013.

DOI: 10.1109/ACPR.2013.133

T. Kobayashi, R. Naito, F. Sakaue, J. Sato, "Space-Time Coded Imaging for Robust Depth and Motion Deblurring", ITE Transactions on Media Technology and Applications, 査読有, Vol.2, No.2, pp. 192-198, 2014.

DOI: 10.1007/978-3-642-37447-0_37

Y. Watanabe, F. Sakaue, J. Sato, Time-to-Contact from Photometric Information, IPSJ Transaction on Computer Vision and Applications, 査読有, Vol.6, pp. (未定), 2014.

[学会発表](計11件)

佐藤 淳, テンソルと多視点幾何~2視点から多視点へ~, 画像センシングシンポジウム(招待講演), 2010.

加藤一樹, 坂上文彦, 佐藤淳, GeometryとPhotometryに基づく複合多視点幾何, 画像の認識・理解シンポジウム, 2010.

松本広基, 坂上文彦, 佐藤淳, 周波数領域における多視点幾何と非同期カメラ画像からのカメラ校正, 画像の認識・理解シンポジウム, 2010.

野場啓吾, 坂上文彦, 佐藤淳, 複合次元多視点幾何を用いた死角車両の位置提示, ITSシンポジウム, 2011.

猿渡恒太, 坂上文彦, 佐藤淳, 時空間多視点幾何を用いた異常運転検出, ITSシンポジ

ウム, 2011.

坂上文彦, 佐藤淳, 複数プロジェクタを利用した情報の計測・提示システムとその応用, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2012.

各務友美, 坂上文彦, 佐藤淳, 非同期マルチカメラを用いた高密度3次元復元, 画像の認識・理解シンポジウム, 2012.

高田翔平, 坂上文彦, 佐藤淳, マルチプロジェクタによる3次元形状強調, 画像の認識・理解シンポジウム, 2012.

佐藤淳, 非同期3次元復元, 光学的コンピュータビジョンに関する研究会(招待講演), 2013.

佐藤淳, コンピュータビジョンにおけるテンソル解析, 画像の認識理解シンポジウム(招待講演), 2013.

佐藤淳, デジタル画像処理の基礎と応用, 色材アドバンスセミナー(招待講演), 2013.

〔図書〕(計1件)

共著, 知識ベース 知識の森, 電子情報通信学会, 2013.

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称: 位置検出装置、および位置検出プログラム

発明者: 佐藤淳, 石丸和寿, 今西勝

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2012-157972

出願年月日: 2012年7月13日

国内外の別: 国内

名称: 反射光計測を用いた移動体の到達時間予測装置

発明者: 坂上文彦, 佐藤淳

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2014-71698

出願年月日: 2014年3月31日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cv.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 淳 (SATO JUN)

名古屋工業大学・情報工学専攻・教授

研究者番号: 20303688

(2) 研究分担者

坂上文彦 (SAKAUE FUMIHIKO)

名古屋工業大学・情報工学専攻・助教

研究者番号: 00432287