

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06620

研究課題名(和文)高精度ステレオビジョンを中核としたインテリジェント海上交通システム

研究課題名(英文) Intelligent sea transportation system based on high accuracy stereo vision

研究代表者

山本 茂広 (YAMAMOTO, Shigehiro)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：60294261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：船舶の航行の安全性を高めて海難事故を減らすと同時に船員の疲労軽減を図ることを目的とし、海上交通の世界にも高度な情報処理技術を取り込むことを目指して研究を行った。その結果、ステレオビジョンによる3次元画像計測の高精度化、深層学習による海上画像からの船舶の検出、画像上での船舶の追跡とパン・チルトカメラによる船舶への追従制御、広域海域監視のためカメラ配置、自動着岸に向けた港湾での船舶位置姿勢計測について検討を行い、それぞれ基礎技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to increase safety of navigation of ships and decrease sea disasters as well as to reduce fatigue of navigational officers, using advanced information technology for sea transportation system was proposed. The following issues were investigated and their basic technologies were developed; high-precision three-dimensional image measurement by a stereo vision, detection of ships from sea images with deep learning, tracking of ships on the image and tracking control of a pan-tilt camera, an automatic camera placement method for wide sea area monitoring, and measurement of ship's location and orientation for automatic berthing and leaving control using stereo vision.

研究分野：画像計測工学

キーワード：海上交通 船舶 海難事故 安全 視覚情報 ステレオビジョン 三次元計測 自動着岸

1. 研究開始当初の背景

船舶が安全に航行するために様々な電子装置が使用されている。例えば、他船や他の障害物を発見するための最も有力な装置はレーダであろう。しかし、レーダも海面反射等の影響を受けることもあり、完全とはいえない。もちろん、船舶自動識別装置（AIS）のように互いの情報を交換する高度な装置も存在するが、AIS搭載が義務付けられているのは大型の船舶に限られ、小型船舶や船舶以外の障害物等に対しては無力である。結局、最終的な安全確認は、航海士の目視に頼ることになるが、人間である以上、見落としなどのミスを犯すこともあり、時として海難事故につながっているのが当初の状況であった。

2. 研究の目的

前述のような背景を受け、船舶の航行の安全性を高めて海難事故を減らすと同時に船員の疲労軽減を図ることを目的とし、海上交通の世界にも高度な情報処理技術を取り込むことを目指した。具体的には、高精度な3次元計測が可能なステレオビジョンシステムを導入し、既存のレーダ等から得られる情報も融合することで、港湾あるいは海峡等の沿岸域を航行する船舶の総合的な交通管制や自動操船・自動着岸システムにも応用できる技術基盤を確立することを目指した。

3. 研究の方法

研究目的を達成するため、以下の事項を検討した。

(1) 3次元画像計測の高精度化

航行船舶を監視するような場合、その船舶の位置情報は基本的で重要な情報である。カメラを使用する場合は、ステレオ画像計測技術を使えば3次元位置を取得できるが、その精度が問題となる。特に船舶にカメラを搭載する場合は、カメラ間の距離をあまり長くすることができないのに対して、遠方の対象物でも検出できることが望まれる。このような状況では、各カメラからの視線が極めて鋭角に交わることになり、視線方向のわずかな検出誤差が計測結果に大きく影響を及ぼしてしまう。そこで、カメラを通常の2台ではなく、3台にして計測を行い、高精度化を試みた。

(2) 深層学習による船舶の検出

海上を写した画像上から船舶を検出することも重要な課題であり、難しい問題である。ここでは、深層学習と呼ばれる機械学習を取り入れて、船舶を認識・検出することを試した。

(3) パーティクルフィルタによる船舶の追跡

船舶を検出した後、画像上で同一の船舶を追いかける必要がある。そこで、パーティクルフィルタと呼ばれる技術を使って船舶を追跡することを試みた。

(4) パンチルトカメラによる船舶の追跡

前項で述べた追跡では1つの画面内で同一船舶を時系列内で特定することを意味していた。しかし、カメラの向きが固定されていると、対象船舶の移動に伴いやがて視野から外れることになる。そこで、カメラの向きを自動的に船舶に追従させ、常に画面の中央に船舶を写すシステムを試作した。

(5) 港湾や海峡での広域カメラ配置

港湾や海峡のような航行量の多い海域で陸上にカメラを設置し、船舶を監視するような用途で、カメラの設置位置、向き、画角などを検討するツールを作成した。

(6) 自動着岸に向けた位置姿勢計測

船舶の自動運航のためには船舶自体と周辺の状況認識が極めて重要となる。そのためのセンサとして、レーダ、ジャイロコンパスやGNSSなどが使われる。しかし、それらから単独で得られる情報は限られている。そこで、通行量の多い港湾での自律航行や、自動離着岸システムに応用することを想定して、陸上からステレオビジョンにより船舶の位置姿勢を計測することを試みた。

4. 研究成果

(1) 3次元画像計測の高精度化

カメラを2台から3台に増やして冗長性を持たせて計測を行うことを検討した。その結果、カメラを直線上に並べた場合は効果が低く、主に両端にあるカメラ間の距離で計測精度が決まることが分かった。そのため、計測対象物の方向に対して垂直な面内で正三角形の頂点の位置にカメラを配置すれば、精度を改善できることが分かった。このとき、3台のカメラの視線方向をまとめて最小二乗法を適用して3次元位置を求めるより、カメラ2台を組として3回の計測結果の平均を求めた方が精度がよくなることも分かった。なお、比較的近くにある物体の複数カメラや複数視点からの画像を使った3次元再構成に関する研究は数多くなされているが、遠距離のステレオ画像計測の研究はそれほど多くはなく、精度向上に関する新しい知見が得られたと考えている。

(2) 深層学習による船舶の検出

海上を写した画像上から船舶を検出するうえで問題となるのが波などの海面反射による影響を受けることと、画像上での船舶の見え方が千差万別であることである。そこで、深層学習と呼ばれる機械学習を取り入れて、船舶を認識・検出する方法を検討した。

検出方法は、まず、画像からエッジを検出する。そこから水平線を検出し、その近傍で今度は縦のエッジのみを検出する。それを二値化し膨張収縮処理などをおこない外接長方形を求める。例を図1に示す。図中に白枠と赤枠で示されているのが、そのようにして求められた外接長方形である。図から分かる通り、船舶部分（図中央の右斜め上）は検出されているが、他にも何もない海面で光の反射を捉え、外接長方形（白枠）がいくつか

検出されている。そこで、検出結果の領域をあらかじめ訓練した深層学習の結果を用いて調べ、「船舶」か否かを判定する。この例では「船舶」と判定された部分を赤色で示している（実際には、各フレームの結果にはバラツキがあるので、10フレームの結果を統合して表示している）。このように海面反射による誤検出を検出結果から除くことに成功している。

深層学習による訓練には、海上を撮影した動画（約20本）から、「海」、「空」、「海と空の境界」、「船舶」、「それ以外の背景など」の5種の画像を32×32画素のサイズで、約23000枚抜き出して使用した（全体の画像サイズは720×540画素である）。

実験の結果、提案手法には改良点は見られるものの、実用化の可能性は十分にあることが分かった。



図1 深層学習を用いた船舶の検出例

(3) パーティクルフィルタによる船舶の追跡

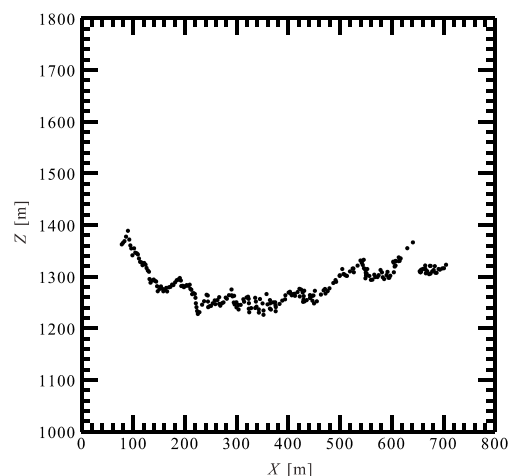
船舶を検出した後、画像上で同一の船舶を追いかける必要がある。そこで、パーティクルフィルタと呼ばれる技術を使って船舶を追跡することを試みた。パーティクルフィルタは、物体の運動を表現した状態方程式を基に確率的に尤も確からしい物体の位置を求めるものである。一般に、画像上での移動物体の追跡にパーティクルフィルタはよく用いられる。これは画像上の2次元座標上での物体の位置を追跡・推定するものであるが、本研究では、ステレオ計測した船舶の3次元空間上での運動を基にパーティクルフィルタを適用する方法を考案した。これにより、船舶を追跡するとともに、ステレオ計測の位置計測誤差についても時系列データを用いて軽減できるようになった。

図2(a)の赤枠の船舶が、右の青枠の位置に達するまで250フレームの間(約83秒間)、追跡する実験を行った。実際にはステレオ計測を行っているが、紙面の都合上、ステレオペアの内、左側の画像のみを示す。追跡時の位置計測結果を図2(b)に示す。この例では、船舶はXの増加する方向へ航行している。計測結果に多少のバラツキがあるものの、ほぼ連続して位置を追跡できていることが分かる。なお、X=650m付近で計測結果が不連続

になっているのは、前景に人物が写り込んでいる影響である。また、パーティクルフィルタを用いないで追跡を行った場合は、位置計測のバラツキがもっと大きくなる。



(a) 計測に用いた画像の例（左画像）



(b) 位置計測結果

図2 パーティクルフィルタを用いた船舶追跡例

(4) パンチルトカメラによる船舶の追跡

画面内に船舶が写っていれば、前述のパーティクルフィルタなどで追跡できるが、カメラの向きが固定であれば、船舶の移動に伴いやがてカメラの視野から外れてしまう。そこで、パンおよびチルト方向にカメラを動かし、監視対象船舶を常に画面中央に写すシステムを試作した。このとき、画像上での船舶の追跡にはKCF (Kernelized Correlation Filter)というトラッキングアルゴリズムを用いた。前述のとおり、パーティクルフィルタを用いることもできるが、パーティクルの尤度を求めるのに対象物が周囲と異なる色を持つなど、対象物がある程度の特徴を持っていないと適用できない場合がある。これに対して、KCFでは対象物が少しずつ変化していくような場合でも、それを学習して追跡するため、大きく移動する船舶の追跡に向いていることが分かった。図3に試作したシステムで船舶を追跡した例を示す。カメラの方向に向かってきていた船舶が、カメラの横を通り過ぎ、カメラから遠ざかって行くまで、安定してカメラで追跡することができた。

また、本システムを既存のレーダシステムなどと連携させることも提案した。図4にそ

のコンセプトを示す。レーダで正体不明の影が映れば、その方向にカメラを向けてモニタにその映像を映す。その他、針路が気になる船舶などがあれば、その船をモニタに映し続けて注意を払うことに利用できる。



図3 パンチルトカメラによる船舶追跡例

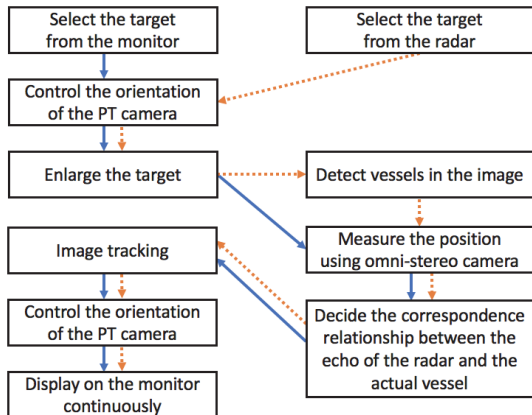


図4 レーダとの連携コンセプト

(5) 港湾や海峡での広域カメラ配置

港湾や海峡のような航行量の多い海域で陸上にカメラを設置し、船舶を監視するような用途を考えると、カメラをどこに、どの向きに設置するかを決めなければならない。それを自動で決定するソフトウェアを製作した。製作したソフトウェアは、監視対象海域を含んだ地図を用意し、海域と監視に使うカメラの画角を指定すると、その海域をできるだけカバーするカメラの台数、それぞれの位置と向きを自動的に決定してくれるものである。このとき、対象船舶を少なくとも1台のカメラで監視する単眼モードと、少なくとも2台のカメラでステレオ計測できるステレオモードで検討できる。図5に明石海峡を監視する場合のカメラ配置を求めた例を示す。図の青線の多角形で囲まれた海域を水平画角25度のカメラでステレオ監視するための配置を求めたものである。この場合、必要なカメラは14台で、対象海域の99%が少なくとも2台のカメラにより監視できる(図の濃いピンクの領域)。なお、単眼でならば対象海域を100%カバーできる(薄いピンクの領域)。このような研究は、屋内での監視カメラの設置場所を決めるような研究は他でされているが、海上の船舶の監視を想定し、かつ、ステレオ計測に対応したものは見当たらなかった。

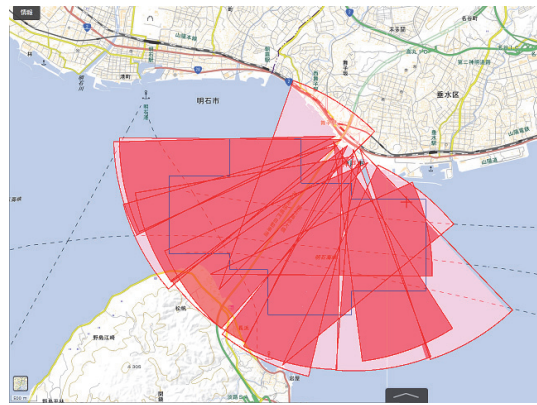


図5 明石海峡でカメラ配置を求めた例

(6) 自動着岸に向けた位置姿勢計測

陸上設置のカメラで停泊中の船舶を岸壁との位置関係を含めて計測する実験を行った。実験は、神戸大学の深江キャンパスの係留池(ポンド)において、海事科学部附属練習船深江丸を対象に行った。まず、あらかじめ内部パラメータを測定しておいたカメラ2台で、画像を取得した。2台のカメラ間隔は約5mで、画像のサイズは5968×3352画素である。カメラの外部パラメータは、現場で三次元座標を測量器により何点か計測し、画像上の座標との対応から求めた。これらのパラメータを用いてステレオ画像の平行化を行う。例を図6に示す。紙面の都合上、左の画像のみであるが、画像の左側および上部が黒くなっているのは平行化処理の結果である。世界座標系は図に示すように岸壁の縁(車止め)に沿ってX軸とZ軸をとり、鉛直上向きにY軸をとった。

平行化した画像から、BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoints)を用いて特徴点を抽出し、両画像で対応がとれた点のみ世界座標を求めた。結果を図7に示す。青丸が図6の+印の位置の三次元座標をステレオビジョンで求めたもので、赤丸は、図6の赤丸の位置を測量器で測定した座標である。結果から、船橋前面部や右舷が正確に検出されていることが分かる。この結果と船体のデータとのフィッティングを行えば、姿勢も分かる。



図6 取得画像(左)と世界座標系

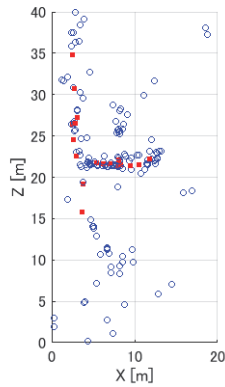


図7 計測結果（上から見た図）

以上のように、船舶の安全航行に向けて、高精度ステレオビジョンを中心に視覚情報を利用することを多角的に検討し、それぞれに対する基礎技術を開発した。今後は、今回開発した技術の実用化研究、さらに、それぞれの手法の連携を検討していくことが望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① Kotaro Yoshihara, Shigehiro Yamamoto and Takeshi Hashimoto, Real-Time Tracking of Offshore Vessel Using Pan-Tilt Camera for Keeping a Lookout, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 第53巻, 第3号, 2018, 156-161
DOI: 10.5988/jime.53.429
- ② Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto and Takeshi Hashimoto, A Proposal of Automatic Camera Placement Method for Wide Sea Area Monitoring, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 第53巻, 第3号, 2018, 162-167
DOI: 10.5988/jime.53.435
- ③ Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto, Kotaro Yoshihara and Takeshi Hashimoto, A Feasibility Study of Accurate 3D Measurement of Ships Using Dense Stereo Vision System, Proc. of Techno-Ocean 2016, 査読無, 2016, 562-565
DOI:10.1109/Techno-Ocean.2016.7890718
- ④ Naoya Kaido, Shigehiro Yamamoto and Takeshi Hashimoto, Examination of Automatic Detection and Tracking of Ships on Camera Image in Marine Environment, Proc. of Techno-Ocean 2016, 査読無, 2016, 58-63
DOI:10.1109/Techno-Ocean.2016.7890748

〔学会発表〕（計12件）

- ① 橋本 岳, 山本茂広, 遠距離計測における計測対象の特徴点抽出に関する実験的検討, 日本リモートセンシング学会第64回学術講演会, 2018
- ② 橋本 岳, 山本茂広, パッシブステレオ画像計測における量子化誤差低減法の実験結果, 日本リモートセンシング学会第64回学術講演会, 2018
- ③ 山本茂広, 吉原蓮汰, 橋本 岳, 自動離着岸に向けたステレオビジョンによる船舶の位置姿勢計測の試み, 平成30年電気学会全国大会, 2018
- ④ Kotaro Yoshihara, Shigehiro Yamamoto, Takeshi Hashimoto, Real-Time Tracking of Offshore Vessel Using Pan-Tilt Camera for Keeping a Lookout, International Symposium on Marine Engineering (ISME 2017), 2017
- ⑤ Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto, Takeshi Hashimoto, A Proposal of Automatic Camera Placement Method for Wide Sea Area Monitoring, International Symposium on Marine Engineering (ISME 2017), 2017
- ⑥ 山本茂広, 野村康紘, 橋本 岳, 深層学習を用いた海上航行船舶検出の試み, 平成29年電気学会全国大会, 2017
- ⑦ 吉原広太郎, 山本茂広, 橋本 岳, 多眼カメラを用いた遠距離三次元位置計測時に発生する誤差に関する考察, 平成28年電気関係学会関西連合大会, 2016
- ⑧ 吉原広太郎, 山本茂広, 橋本 岳, 多眼カメラを用いた船舶の位置計測精度向上に関する実験的検討, 第86回（平成28年）マリンエンジニアリング学術講演会, 2016
- ⑨ 吉原広太郎, 山本茂広, 野村康紘, 島田賢二, 橋本 岳, 多眼ステレオカメラを利用した遠距離三次元位置計測に関する基礎検討, 平成27年電気関係学会関西連合大会, 2015
- ⑩ 島田賢二, 山本茂広, 橋本 岳, 複数の海上航行船舶のステレオ画像同時計測と追跡, 平成27年電気関係学会関西連合大会, 2015
- ⑪ 吉原広太郎, 山本茂広, 橋本 岳, 多眼ステレオカメラを用いた船舶の位置計測に関する基礎的検討, 第85回（平成27年）マリンエンジニアリング学術講演会, 2015

- ⑫ 島田賢二, 吉原広太郎, 山本茂広, 橋本岳, 海上航行船舶のステレオ画像計測とパーティクルフィルタによる追跡, 平成 27 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 茂広 (YAMAMOTO, Shigehiro)
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授
研究者番号：60294261

(2) 研究分担者

橋本 岳 (HASHIMOTO, Takeshi)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号：60228418