

I-3 ビデオカメラを用いた海表面流計測システムの研究開発

Research and Development of System for Measuring Ocean Surface Currents Using Video Camera

北川悦司¹・樫山武浩²・村木広和³・田中成典⁴・福島佑樹⁵

Etsuji KITAGAWA, Takehiro KASHIYAMA, Hirokazu MURAKI, Shigenori TANAKA and Yuki FUKUSHIMA

抄録: 海岸における海流の速度や方向は、埋め立てや海岸堤防の設置を検討する際に非常に重要な要素となる。海面における流速の計測にはドップラー効果を用いたレーダ装置などが一般的に用いられている。しかし、導入コストが高く、複数台の設置が難しいため、広範囲の海流を計測できない問題がある。

そこで、本研究では、一般的なデジタルビデオカメラで撮影した海面の動画の各フレームに対して、特徴箇所の抽出を行い、面積相関を用いて特徴箇所のフレーム間移動量を算出する。そして、ビデオカメラの位置情報を用いて画像上の移動量を実速度に変換し、移動方向と共に表示することで、海岸における海面の流速および流方向を把握できるシステムの研究開発を行う。

Abstract: The speed and direction of coastal ocean surface currents are very important elements in examining land reclamation or establishment of coastal levees. Measuring the speed of sea surface currents generally employs a radar system using Doppler effect. However, there is a problem that it is unable to measure the current in a wide area because the system is so costly to introduce that it is difficult to install two or more systems. Thus, this study extracts characteristic spots from each of the frames of moving images of the sea surface shot using a common digital video camera, and calculates movement of the characteristic spots between the frames by means of image correlation. Using the positional information from the video camera, this study also converts the movement on the image into actual speed, and shows it together with the direction of movement. By doing so, we perform research and development of a system capable of grasping the speed and direction of the surface currents of the coastal ocean.

キーワード: 海表面流計測, デジタル動画, フーリエ変換, 空間周波数, 面積相関法

Keywords: *Measuring Ocean Surface Currents, Digital Animation, Fourier Transform, Spatial Frequency, Image Correlation*

1. はじめに

近年、湾の埋め立て、防波堤や堤防設置などにより海流が変動し、周辺環境が変化した例が数多く報告されている^{1)~3)}。そのため、湾の埋め立て工事などは、生物の多様性確保の努力を義務づけた生物多様性基本法⁴⁾や環境影響評価法の改正案⁵⁾などの対象事業に含まれている。つまり、湾の埋め立てを行う場合は、事業前の海流調査や事業後の海流変化予測などを行う必要がある。また、海における他の環境問題として、海洋汚染が挙げられる。海上保安庁によると、日本周辺海域における海洋汚染の7割以上が油類によるものであると報告されている⁶⁾。海上での油類の流出は、油類が海流によって拡散し、被害が拡大する恐れがある。そのため、事前の海流調査や油類流出後に海流を正確

に把握することが、早期解決の重要な手がかりとなる。このように、海における環境問題を取り扱うには、海流計測システムが必要不可欠である。

現在の海流計測システムは、陸上に設置した専用のレーダ装置とドップラー効果を用いて計測する手法⁷⁾、Xバンドレーダなどの船舶用レーダ画像を解析して計測する手法⁷⁾や流速計を設置した海流計測ブイを用いる手法が一般的に用いられている。しかし、これらの手法は、装置が高額なため、事業者の負担が大きい。そのため、安価かつ容易に海流を計測できるシステムが切望されている。

専門機器を利用せずに海流を計測する手法の1つとして、海表面温度分布を観測した時系列衛星画像群を用いた研究⁸⁾が挙げられる。しかし、衛星画像が対象となっているため、分解能などの制約により、局所的

-
- 1 : 正会員 博士 (情報学) 阪南大学 准教授 経営情報学部
(〒580-8502 大阪府松原市天美東五丁目四番三三三, Tel :072-332-1224, E-mail : kitagawa@hannan-u.ac.jp)
 - 2 : 正会員 博士 (情報学) 関西大学 ポスト・ドクトラル・フェロー 総合情報学部
(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町二丁目一番一号)
 - 3 : 非会員 博士 (情報学) (株) イメージワン GEO 事業部 技術部
(〒163-0712 東京都新宿区西新宿二丁目七番一号 小田急第一生命ビル 12F)
 - 4 : 正会員 工学博士 関西大学 教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町二丁目一番一号)
 - 5 : 学生会員 関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町二丁目一番一号)

な海流速度を測定できないことや、雲などの大気の影響により計測できないといった問題がある。さらに、温度の変化を解析の対象としているため、温度差がない海流では適用することができないといった問題がある。

海流ではなく、河川における流速を計測する手法として、粒子追跡流速計測法（PTV：Particle Tracking Velocimetry）を用いた研究⁹⁾が挙げられる。PTVは、トレーサー粒子と呼ばれる追跡用の目標を河川に投入し、トレーサー粒子一つひとつを追跡する手法である。河川は、上流から下流に流れるため、上流でトレーサー粒子を投入することで、トレーサー粒子が流れている限り、下流における任意の地点で計測が行える。しかし、海流は、一方向のみの流れとは限らないため、大量のトレーサー粒子が必要となる。また、河川では、トレーサー粒子の回収が可能であるが、海流では、トレーサー粒子の回収が行えないといった問題がある。

トレーサー粒子一つひとつを追跡する PTV に対して、一定領域内の粒子の平均的な速度を求める手法を PIV（Particle Image Velocimetry）という。PIVを用いた研究として、トレーサー粒子を用いずに流速を計測する研究¹⁰⁾がある。しかし、トレーサー粒子を用いない PIV の研究は、流方向が一方向のみに限定される河川での適用が多い。また、流れの緩やかな平水時などで画像中の輝度分布がほぼ一定の場合は、正確に計測できない問題があり、精度の面でも実用的な結果を得ることができない。

そこで、本研究では、一般的に入手できるビデオカメラで撮影した海面の起伏模様の特徴を強調し、その特徴をトレーサー粒子と見なして PIV を行うことで、流方向が一定でない海面上における海流の速度と方向の計測を行うシステムを開発する。本システムは、輝度分布がほぼ一定である動画であっても特徴を強調することで、海流の計測を実現する。

2. システム概要

本研究では、ビデオカメラを用いて海面を撮影した動画画像から海面上における水流の速度と方向を自動で計測するシステムを開発する。本システムの概要を図-1に示す。

本システムの入力データとしては、海面を撮影した動画画像、任意数の計測点、カメラパラメータと海面の高さを入力する。出力データとしては、計測点とフレーム毎に海面上における水流の流速と方向を出力する。本システムの処理フローとしては、特徴画像の生成処理、移動成分算出処理と流速算出処理の3つの処理で構成される。まず、特徴画像の生成処理では、入力された動画画像の各フレームに対して、海面の起伏模様を

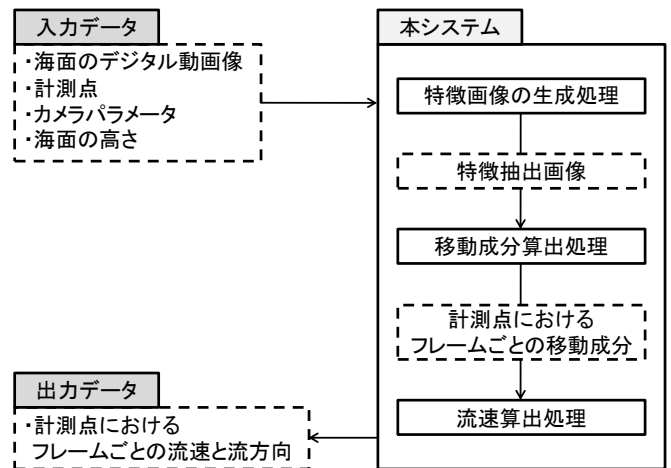


図-1 システムの概要図

強調した特徴画像の生成を行う。次に、移動成分算出処理では、連続する2フレームの特徴画像から計測点の周辺領域における面積相関係数をもとに、移動成分の算出を行う。本処理で算出する移動成分とは、画像上における海流の移動量と移動方向を示す。最後に、流速算出処理では、カメラパラメータと海面の高さの情報をもとに決定した変換式を用いて、移動成分から海面上における海流の速度と方向を算出する。本処理では、ビデオカメラの傾き等の姿勢を考慮した変換式を決定することで、真上からだけでなく、斜め方向から海面を撮影した動画画像からも適切に水流の速度と方向の算出を実現する。

3. 特徴画像の生成処理

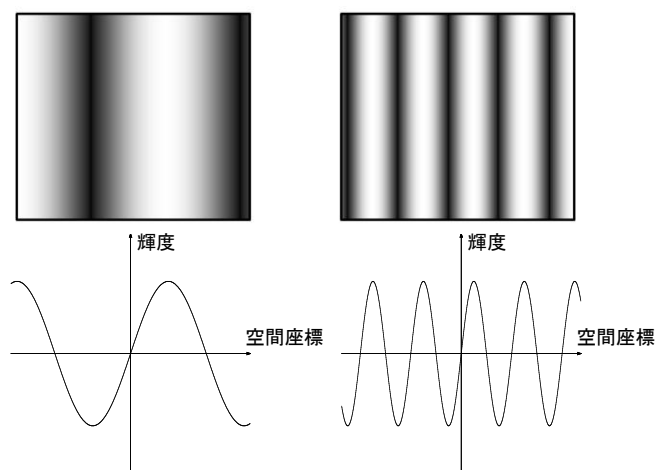
トレーサー粒子を用いることができない海流では、代替となる特徴を発生させる必要がある。そのため、特徴画像の生成処理では、海面に生じる起伏模様を用いて、トレーサー粒子の代わりとなる特徴を発生させる。

（1）空間周波数の概念

空間を撮影した画像は、輝度の波として表現できる。この輝度の波に含まれる単位距離当りの正弦波の個数が空間周波数である。輝度が単調に変化する画像とその画像における空間周波数のモデルを図-2に示す。左の画像は、輝度が緩やかに変化しているため、周期が長く空間周波数は低くなる。しかし、右の画像は、輝度が激しく変化しているため、周期が短く空間周波数は高くなる。

（2）低周波成分の除去

海面画像には、波の起伏に日光が反射することで明るい領域と暗い領域が存在する。また、それらの起伏模様は、波に伴って移動する。そこで、本処理では、海面画像において輝度の差がある領域、すなわち空間



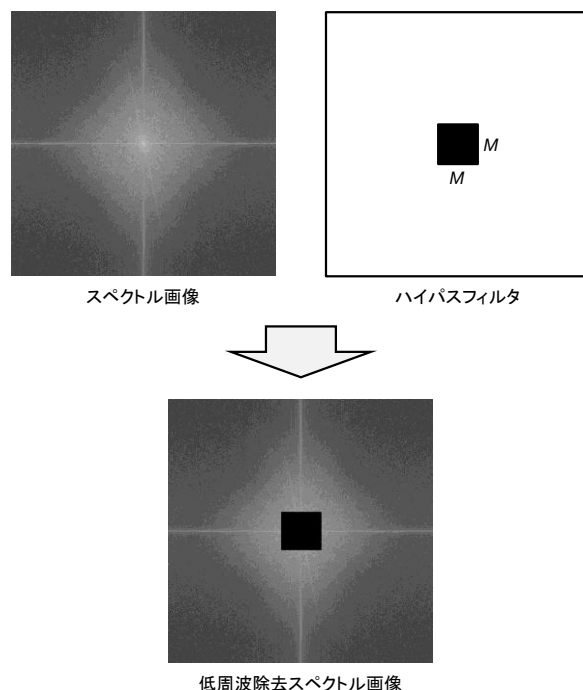
図－２ 空間周波数モデル

周波数が高い領域を波と共に移動する特徴として強調して抽出するため、空間周波数が低い領域を除去する。しかし、海面の画像は、**図－２**に示すような単純な変化だけではなく複雑な変化も含まれるため、空間周波数が低い領域の特定は困難である。そこで、本処理では、グレースケール化した画像に対して正弦波と余弦波の和で表現できるフーリエ変換¹⁾を行い、周波数の振幅を示すスペクトル画像を生成する。生成方法としては、画像における波が縦方向と横方向の両方に存在するため、２次元フーリエ変換を利用する。画像上の点 (x,y) における２次元関数が $f(x,y)$ で表現される時、 $f(x,y)$ の２次元フーリエ変換 $F(u,v)$ は、式（１）で定義される。

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (1)$$

j : 虚数単位
 u : x 成分の周波数
 v : y 成分の周波数

生成したスペクトル画像は、中心に近いほど低い周波数の振幅を示す。そのため、低周波成分の除去は、ハイパスフィルタを適用して中心部分を遮断することで実現する。フーリエ変換によって得られるスペクトル画像とハイパスフィルタおよびハイパスフィルタ適用後のスペクトル画像を**図－３**に示す。ハイパスフィルタのサイズ M は、画像中に特徴が多い場合は、ノイズとなる特徴を除去するために大きく設定する必要がある。また、特徴が少ない場合は、特徴を残すために小さく設定する必要がある。そして、海面に着目した



図－３ スペクトル画像とハイパスフィルタ

場合は、日光が海面に反射して画像全体が白くなるハレーションが多く発生している場合に、特徴が少なくなる。そのため、次の手順で M を決定する。

- ① 画像の全画素における赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の平均値を算出する。R、G、Bは、それぞれ 0～255 の値をとり、255 に近ければその色が強く表現されていることを示す。また、R、G、B 共に 0 の場合は黒を示し、共に 255 の場合は白を示す。
- ② R、G、B の平均値が共に 200 を超える場合は、ハレーションが多く発生していると考えられるため、 M を 64px とする。
- ③ ②以外の場合は、 M を 128px とする。

フーリエ変換で生成したスペクトル画像は、逆フーリエ変換を行うことで元の画像に戻すことができる。前述の手順によって、ハイパスフィルタを適用したスペクトル画像に逆フーリエ変換を行うことで、元の画像から低周波成分が除去され、高周波成分のみの画像を取得することができる。２次元逆フーリエ変換は、式（２）で定義される。

$$f(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u,v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (2)$$

本処理で生成する特徴画像とは、低周波成分を除去

した画像に対して、2 値化を施した白黒画像のことである。特徴画像を 2 値化する理由は、起伏が激しい高周波成分の強調と、移動成分算出時の計算の簡易化である。2 値化の手法としては、R、G、B がそれぞれ 127 を超える画素は R、G、B 共に 255 とし、それ以外の場合は、R、G、B 共に 0 とする。

4. 移動成分算出処理

本処理では、動画画像の連続する 2 フレームの特徴画像を用いて、各計測点における移動成分の算出を行う。移動成分の算出手法としては、計測点の周辺領域（相関窓と呼ぶ）における特徴量をもとに、面積相関法を用いて探索を行う。海面の起伏模様については、日光の反射等の影響により消失する場合がある。そのため、面積相関法を用いて、点ではなく、面的に次フレームにおける計測点の位置を探索することにより、堅固な移動成分の算出を実現する。

（1）パラメータの算出

本システムでは、面積相関法を用いて特徴追跡を行うために、相関窓サイズ N と探索領域である探索窓 S のパラメータを設定する必要がある。面積相関法は、動画画像 D の t フレーム目における画像を $D(t)$ とすると、 $D(t)$ における相関窓の移動先を $D(t+1)$ の S 範囲内で探索する手法である。相関窓サイズ N と探索窓 S の関係を図-4 に示す。相関窓サイズ N は、実験結果より 128px が最適であると考えられるが、海面画像の信号対雑音比や海流の複雑さなど入力データに合わせて適切に設定する必要がある。 N は、サイズが小さいほど誤判定が増え、大きいほど大局的な移動成分が抽出される。

探索窓 S は、速度の高速化を図るため相関窓サイズ N によって値を変更する必要がある。探索窓 S を構成する S_w と S_h は、式（3）を用いて値を設定する。

$$\begin{cases} \frac{(S_w - N)}{2} < \frac{S_w}{3} \\ \frac{(S_h - N)}{2} < \frac{S_h}{3} \end{cases} \quad (3)$$

S_w : 探索窓の幅
 S_h : 探索窓の高さ

（2）面積相関法¹²⁾

面積を比較するための指標として、相互相関係数を用いる。相互相関係数とは、2 組のデータ間の類似度を示す統計学的指標である。相互相関係数は、-1 から 1 の値をとり、1 に近いほど 2 組のデータ間に相関があることを示す。本システムでは、高さ幅共に N である

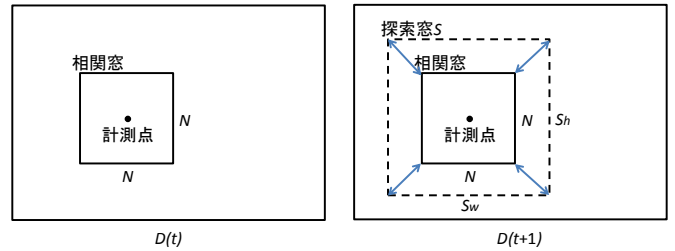


図-4 相関窓と探索窓の関係

画像 g と画像 h の面積相関を算出する。面積相関係数 r は、式（4）で定義される。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_{i,j} - g_m)(h_{i,j} - h_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_{i,j} - g_m)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (h_{i,j} - h_m)^2}} \quad (4)$$

g_m : 画像 g における平均画素値
 h_m : 画像 h における平均画素値
 $g_{i,j}$: 画像 g の点 (i,j) における画素値
 $h_{i,j}$: 画像 h の点 (i,j) における画素値

（3）移動成分の算出

探索窓中には、 $N \times N$ サイズの画像が $N^2 - N(S_w + S_h) + S_w S_h$ 個存在する。本処理では、それらの画像と相関窓とで面積相関を計算し、 r が最大となる位置を計測点の移動先とする。計測点を始点とし、移動先を終点とするベクトルを移動成分とする。

5. 流速算出処理

海流調査では、直下視で撮影出来る現場はほとんど存在しない。そこで、本システムでは、直下視だけでなく、斜め方向から撮影した動画画像も処理対象とする。しかし、斜め方向から撮影された動画画像は、遠方になるにつれ画素間隔が大きくなるため、奥行きによって分解能が異なる。そこで、流速算出処理では、移動成分算出処理で算出された移動量がピクセル単位であるため、奥行きを考慮することで実空間上の寸法の流速に変換する。

（1）入力パラメータ

流速算出処理では、カメラの高さ、海面の高さ、カメラの傾きとカメラの焦点距離の 4 つを入力パラメータとする。流速算出処理の入力パラメータを表-1 に示す。また、カメラの設置状況図を図-5 に示す。

（2）変換手法

海面を撮影した動画画像では、波に伴う高低差が存在し、波の隆起に伴う隠蔽部分が発生する。しかし、その影響は統計的に少ないため、ほとんど考慮する必要はない。そこで、本システムでは、斜めに撮影された

動画画像から、単写真測量技術^{13) 14)}を用いて海面とカメラの位置関係を算出することで実空間上の寸法の流速を算出する。本システムで用いる単写真測量の共線条件式を式(5)に示し、回転変換式を式(6)に示す。

$$\begin{aligned} X &= (Z - Z_0) \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c} + X_0 \\ Y &= (Z - Z_0) \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c} + Y_0 \end{aligned} \quad (5)$$

X, Y, Z : 海面上における実空間座標値 (Z は海面の高さ)

X_0, Y_0, Z_0 : カメラレンズの実空間座標値 (カメラの水平位置を原点とするため, X_0, Y_0 は0, Z_0 はカメラの高さ)

x, y : 画像上でのピクセル座標

c : カメラレンズ焦点距離

$a_{11} \sim a_{33}$: ω, φ, κ を用いた回転行列

$$\omega(i, j), \varphi(i, j), \kappa(i, j) = \begin{bmatrix} a_{11}(i, j) & a_{12}(i, j) & a_{13}(i, j) \\ a_{21}(i, j) & a_{22}(i, j) & a_{23}(i, j) \\ a_{31}(i, j) & a_{32}(i, j) & a_{33}(i, j) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a_{11}(i, j) &= \cos(\varphi(i, j)) \cdot \cos(\kappa(i, j)) \\ a_{21}(i, j) &= \cos(\omega(i, j)) \cdot \sin(\kappa(i, j)) + \sin(\omega(i, j)) \cdot \sin(\varphi(i, j)) \cdot \cos(\kappa(i, j)) \\ a_{31}(i, j) &= \sin(\omega(i, j)) \cdot \sin(\kappa(i, j)) - \cos(\omega(i, j)) \cdot \sin(\varphi(i, j)) \cdot \cos(\kappa(i, j)) \\ a_{12}(i, j) &= -\cos(\varphi(i, j)) \cdot \sin(\kappa(i, j)) \\ a_{22}(i, j) &= \cos(\omega(i, j)) \cdot \cos(\kappa(i, j)) - \sin(\omega(i, j)) \cdot \sin(\varphi(i, j)) \cdot \sin(\kappa(i, j)) \\ a_{32}(i, j) &= \sin(\omega(i, j)) \cdot \cos(\kappa(i, j)) + \cos(\omega(i, j)) \cdot \sin(\varphi(i, j)) \cdot \sin(\kappa(i, j)) \\ a_{13}(i, j) &= \sin(\varphi(i, j)) \\ a_{23}(i, j) &= -\sin(\omega(i, j)) \cdot \cos(\varphi(i, j)) \\ a_{33}(i, j) &= \cos(\omega(i, j)) \cdot \cos(\varphi(i, j)) \\ i &: \text{カラム方向} \\ j &: \text{ライン方向} \end{aligned}$$

6. 実証実験

本実験では、まず、特徴画像の生成処理の有用性を検証するため、海面画像を入力として特徴画像の抽出を行う。次に、移動成分算出処理の有用性を検証するため、特徴画像の生成処理にて作成した特徴画像を入力として、移動成分算出処理を行う。さらに、流速算出処理の有用性を検証するため、画像上の2点間におけるピクセル距離を実空間上の距離に変換する。最後に、本システム全体の有用性を検証するため、海面の

表-1 流速算出処理の入力パラメータ

入力パラメータ名	補足
カメラの高さ (m)	ビデオカメラのレンズ中心までの高さを標高値 (東京湾の平均海面が0m) で入力する。
カメラの傾き (度)	ビデオカメラの水平面との傾き ω を入力する。基本的に、 φ と κ の回転は行わないため水平器等を用いて0となるように設置する。
カメラの焦点距離 (mm)	ビデオカメラの焦点距離。
海面の高さ (m)	干潮や満潮を反映させた海面の高さを標高値で入力する。

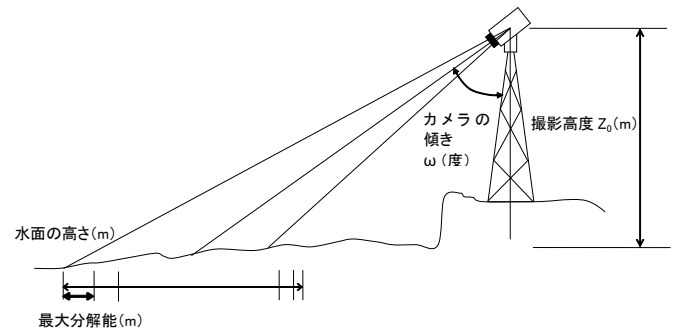


図-5 カメラと海面の位置関係

動画画像を入力として各処理を行い、流速計から得た流速データと海面画像上の特徴物の移動成分を照合する。

(1) 特徴画像の生成処理の検証

本検証では、特徴画像の生成処理において、海面の起伏模様を適切に抽出した特徴画像が生成されていることを確認する。本検証で用いたフレーム画像を図-6に示す。そして、フレーム画像に2値化処理のみを行った結果を図-7に、低周波成分を除去した後に2値化処理を行う特徴画像の生成処理を実行した結果を図-8に示す。図-7の結果は、白色の個所が少なく、2値化処理のみでは細かな特徴が抽出できないことを示している。特徴が少ない場合は、特徴の追跡が上手くいかず、移動成分算出処理の精度劣化につながる。図-8の結果は、ハイパスフィルタを用いて高周波成分を抽出した後に2値化処理による強調を行っているため、図-7に比べ白色の個所が多くなっている。これは、輝度の起伏がある領域を特徴として抽出できていることを示している。したがって、特徴画像の生成処理の検証では、移動成分算出処理を実行する上で、適切な特徴画像を生成できていることが確認できる。

(2) 移動成分算出処理の検証

本検証では、移動成分算出処理において、入力された動画画像の各フレーム間における相関窓の移動量と移動方向が正しく算出されていることを確認する。本処

理の検証では、まず、画像中に2個の計測点を設定し、1フレーム目から6フレーム目まで特徴画像の生成処理および本処理を適用する。次に、1フレーム目から6フレーム目までの画像に対して、計測点の移動成分を目視で算出する。最後に、本処理より得られた結果と目視で算出した結果とを比較することで検証を行う。

移動成分算出処理の入力パラメータを表-2に示す。また、計測点1における移動成分算出処理の結果を表-3に示し、計測点2における移動成分算出処理の結果を表-4に示す。計測点1の結果をみると、処理結果と目視結果がほぼ一致している。したがって、本処理で抽出した移動成分は、十分な精度を持っていることが確認できる。しかし、計測点2の結果の5フレーム目は、処理結果が左下に移動しているのに対して、目視結果は左上に移動している。この差異は、計測点2の相関窓内が図-9に示すように、4フレーム目から5フレーム目にかけて特徴箇所が大きく変化していることが原因である。この変化は、波の起伏模様の消失や発生が突然特徴として抽出されたため発生したと考えられる。そこで、計測点2について、6フレーム目以降についても検証を行った。その結果、処理結果と目視結果に大きな差異が生じたエラーフレームは、表-5に示すように全52フレーム中で5フレームと1割程度であった。しかし、海流の連続的な移動成分を求める本システムでは、エラーフレーム前後の移動成分が正確に算出されているため、大きな影響はないと考える。したがって、移動成分算出処理の検証では、適切な移動成分が抽出できていることが確認できる。

(3) 流速算出処理の検証

本検証では、流速算出処理において、移動成分算出処理で算出されたピクセル単位の移動量を実空間上の寸法に変換できることを確認する。本処理の検証では、まず、メジャーを斜め上からデジタルカメラで撮影し、メジャー上に100mm間隔で点1～点6のピクセル座標を取得する。次に、取得した座標に本処理を適用し、

実空間上の座標に変換する。最後に、求めた実空間上の座標より2点間距離を求め、精度の検証を行う。

本検証における流速算出処理の入力パラメータを表-6に示し、使用した画像を図-10に示す。また、算出結果を表-7に示す。表-7より、点1と点2間および点5と点6間の実距離は、共に100mmであることが分かる。しかし、図からも分かるように、点1と点2間の画像上のピクセル距離(571.39)は、点5と点6間のピクセル距離(345.24)よりもかなり大きい。そのため、画像上のピクセル距離は、カメラの位置情報を用いて実空間上の寸法に変換する必要があることがわかる。さらに、算出した距離は、誤差が2.85mm～0.5mmとなり、ほぼ実距離に等しい。したがって、流速算出処理の検証では、ピクセル単位の移動量を実空間上の寸法に変換できていることが確認できる。

(4) 総合検証

本検証では、実際に海岸から海面を撮影した動画像を用いて、本システムが海面の流速と方向を算出できていることを確認する。しかし、海表面流速度を正確に計測する手段がないため、本検証では流速計を用いた手法と浮遊物の移動成分を目視で計測する手法の2

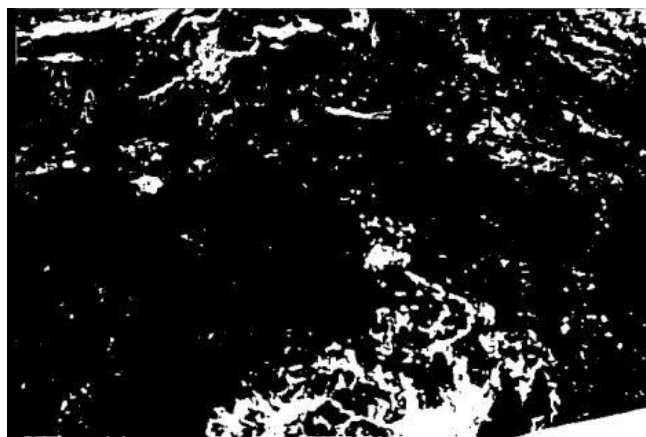


図-7 2値化処理のみを行った結果



図-6 実験に用いたフレーム画像

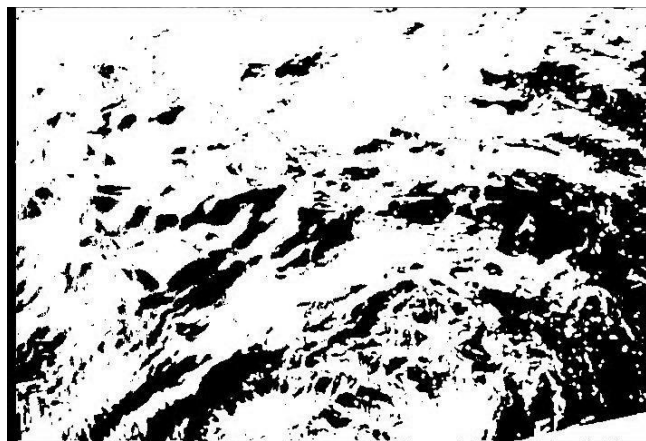
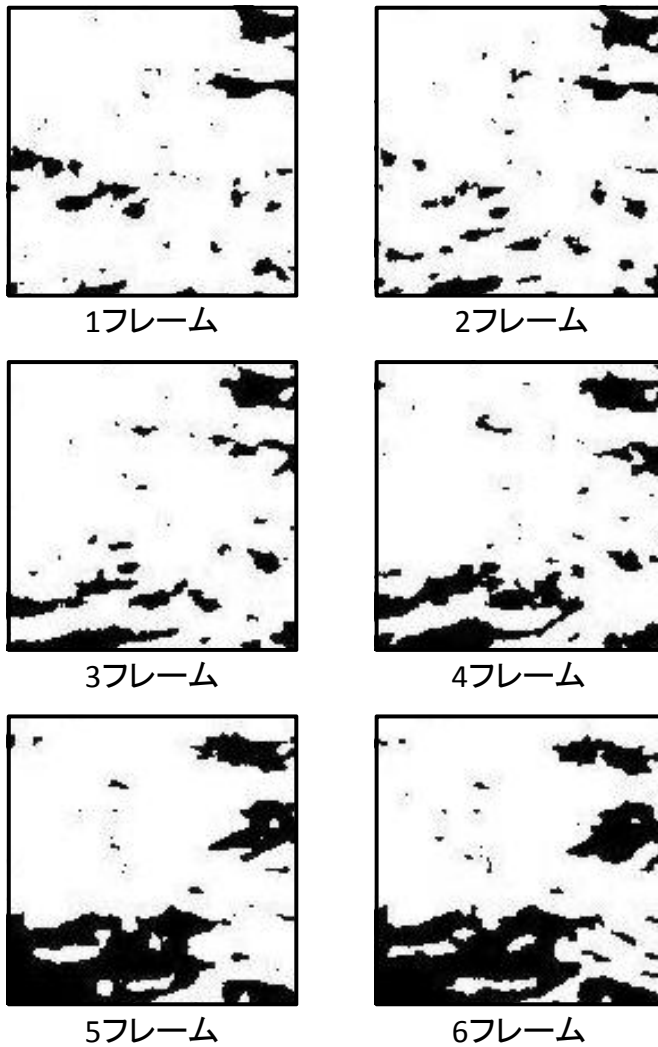


図-8 特徴画像の生成処理を行った結果



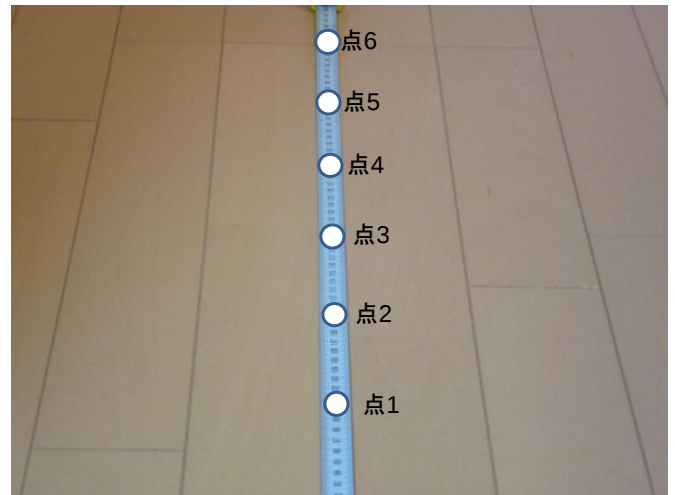
図－9 計測点 2 の相関窓

表－2 移動成分算出処理の入力パラメータ

パラメータ名	内容	入力値 (px)
計測点 1 座標	計測点 1 の座標	(472, 364)
計測点 2 座標	計測点 2 の座標	(486, 134)
N	相関窓サイズ	128
S_w	探查窓の幅	188
S_h	探查窓の高さ	188

表－3 計測点 1 における移動成分算出処理の結果

フレーム番号	処理結果 (px)		目視結果 (px)	
	X 移動量	Y 移動量	X 移動量	Y 移動量
2	-1	-1	-1	-1
3	-1	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1	-1
5	-1	-2	-2	-2
6	-1	-1	-1	-1



図－10 流速算出処理の検証画像

表－4 計測点 2 における移動成分算出処理の結果

フレーム番号	処理結果 (px)		目視結果 (px)	
	X 移動量	Y 移動量	X 移動量	Y 移動量
2	-1	0	-1	-1
3	-2	0	-1	-1
4	-2	0	-1	-1
5	-3	2	-2	-2
6	-2	0	-1	-1

表－5 計測点 2 におけるエラーフレーム

フレーム番号	処理結果 (px)		目視結果 (px)	
	X 移動量	Y 移動量	X 移動量	Y 移動量
5	-3	2	-2	-2
21	-2	2	0	0
29	22	-9	0	-2
30	14	-2	0	-2
44	-4	0	-2	-2

表－6 流速算出処理の入力パラメータ

パラメータ名	入力値
カメラの高さ (m)	0.585
カメラの傾き (度)	70
カメラの焦点距離 (mm)	22.5
海面の高さ (m)	0

表－7 流速算出処理の検証結果

点名	実距離 (mm)	ピクセル距離 (px)	算出した距離 (mm)
点 1—点 2	100	571.39	99.51
点 2—点 3	100	492.37	99.33
点 3—点 4	100	429.23	99.35
点 4—点 5	100	384.26	101.2
点 5—点 6	100	345.24	102.9

種類の検証を行う。流速計は、水中の流速および流方向を長時間正確に計測できる。しかし、水面ではなく水中を計測するため、本システムで計測した海表面流速が正確であるかどうかを確認することができない。そこで、海面の移動速度および移動方向とほぼ等しい動きを考えると考えられる海面上の浮遊物について、移動速度および移動方向を目視で算出し、本システムで計測した結果と照合する。これより、流方向については、長時間のデータを用いた検証が可能な流速計測ブイで主に検証し、流速については、海面の速度と同様の速度であると考えられる浮遊物を用いて主に検証することで本システムが計測する移動速度および移動方向の精度を検証する。

流速計を用いた検証では、本システムの算出結果と、流速計を下部に設置した海流計測ブイの計測データを比較する。ただし、海流計測ブイが計測するデータは、海面ではなく水深 3m のデータであるため、海面のデータとは若干異なる。しかし、海面と海中の流速および流方向は、相関があると考えられるため、本システムの結果と、海流計測ブイの計測データに相関があれば、海面の流速が算出されたと考えることができる。具体的な検証方法としては、まず、海流計測ブイ付近に計測点を設定する。次に、設定した計測点における速度および移動方向を本システムより算出する。最後に、本システムで算出した結果と流速計が計測した結果との相違を比率として算出する。この手順を撮影場所の異なる 2 地点で行い、それぞれの地点における比率を比較することで相関の有無を確認する。流速計測ブイの全体図を図-1-1 に示し、流速計を用いた検証の概要図を図-1-2 に示す。

目視による検証では、環境に影響を与えない軽い浮遊物を海面に浮かべ、その周辺を撮影した動画を用いる。水面における軽い浮遊物の動きは、水面の動きであると考えられるため、浮遊物の移動成分と浮遊物付近の移動成分を比較し、結果が等しければ正確な流速および移動方向が算出されたと考えることができる。具体的な検証方法としては、まず、浮遊物を中心として上下左右斜めに 8 個の計測点を設定する。次に、浮遊物の平均速度および移動方向を目視で算出する。最後に、計測点の平均速度および移動方向の平均を本システムより算出し、目視での結果と比較する。この手順を撮影場所の異なる 6 地点で行い、精度の検証を行う。目視による検証の概要図を図-1-3 に示す。

a) 流速計を用いた検証

本検証において、移動成分算出処理と流速算出処理で用いる入力パラメータを表-8 と表-9 にそれぞれ示す。また、海流計測ブイと本システムによって算出した流速と流方向を表-10 に示す。ただし、流方向については、流速計が北を 0 度とした時計回りの角

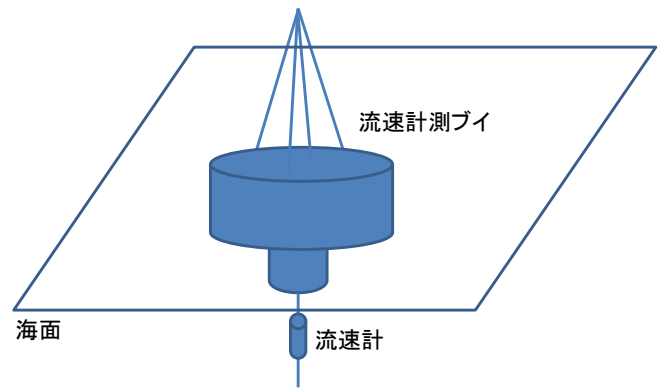


図-1-1 流速計測ブイの全体図

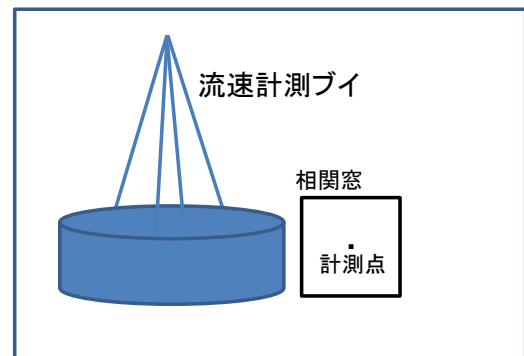
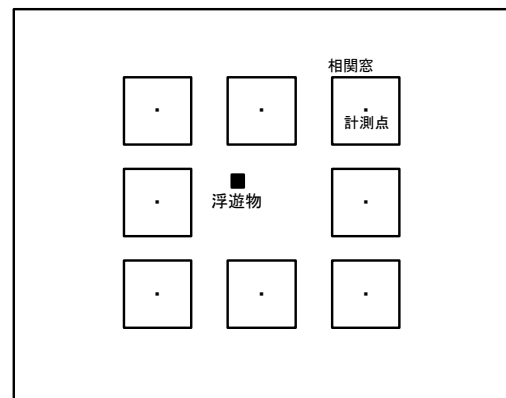
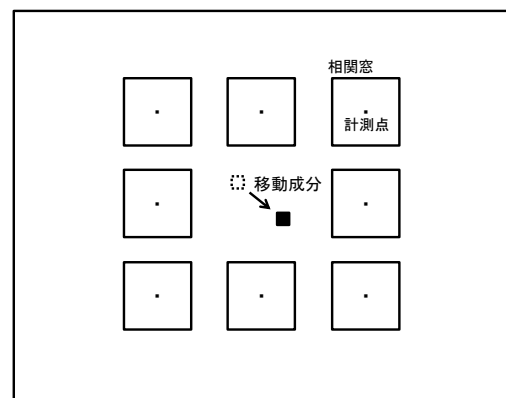


図-1-2 流速計を用いた検証概要図



$D(t)$



$D(t+1)$

図-1-3 目視による検証概要図

度を出力するため、本システムで出力する流方向も同様に北を 0 度とした時計回りの角度に変換している。なお、流速算出処理の入力パラメータにおいて、撮影時に海面からカメラまでの高さを測ったため、カメラの高さを海面からの高さとし、海面の高さを 0m としている。

本検証の結果として、まず、計測した 2 地点において、海流計測ブイと本システムにより算出された流速に違いが生じた。ただし、海流計測ブイと本システムで算出された流速の比率については、2 地点間において、ほぼ同一値をとった。前述したように、海流計測ブイと本システムでは、計測できる水深が異なるため、流速に違いが生じる。しかし、各地点における流速の比率については、ほぼ同一値となっており相関を確認できる。次に、流方向については、流速計の計測結果とほぼ同一値となった。これは、水深 3m の流方向と水面の流方向がほぼ同一であるためと考えられる。これより、算出した流方向に大きな誤差がないことが確認できる。したがって、流速計を用いた検証では、適切に流速および流方向を計測できることが確認できる。

b) 目視による検証

本検証において、それぞれの撮影地点における移動成分算出処理を表-11 に示す。また、目視と本システムによって算出した流速と流方向を表-12 に示す。なお、各計測点における移動成分算出処理の入力パラメータは、 $N = 128$, $S_w = 188$, $S_h = 188$ とした。本検証の結果として、地点 C と地点 D に誤差が生じた。地点 C および地点 D は、図-14 に示すように堤防付近を撮影したものであり、堤防から反射した波が存在している。そのため、複雑な起伏模様が発生し、移動成分算出処理の結果に影響を与えていると考えられる。そこで、複雑な起伏模様に対応するために移動成分算出処理の入力パラメータを $N = 64$, $S_w = 79$, $S_h = 79$ とし検証を行った。検証結果を表-13 に示す。表-13 より、移動成分算出処理のパラメータを変更することで、結果が改善していることが分かる。また、地点 C および地点 D 以外は、10% 以上の大きな誤差がないことを確認できる。したがって、目視による検証においても、適切に流速および流方向を計測できることが確認できる。

7. おわりに

本研究では、一般的に入手できるビデオカメラで撮影した海面の起伏模様をトレーサ粒子と見なして追跡を行うことで、海面上における海流の速度と方向を計測するシステムを開発した。具体的には、まず、入力した動画像の各フレーム画像に対して、フーリエ変換を行い、ハイパスフィルタを用いて低周波成分を除

表-8 移動成分算出処理の入力パラメータ

撮影地点	パラメータ名	内容	入力値 (px)
地点 1	計測点座標	計測点の座標	(295, 255)
	N	相関窓サイズ	128
	S_w	探査窓の幅	188
	S_h	探査窓の高さ	188
地点 2	計測点座標	計測点の座標	(329, 267)
	N	相関窓サイズ	128
	S_w	探査窓の幅	188
	S_h	探査窓の高さ	188

表-9 流速算出処理の入力パラメータ

パラメータ名	入力値
カメラの高さ (m)	5
カメラの傾き (度)	85.2
カメラの焦点距離 (mm)	47
海面の高さ (m)	0

表-10 流速計測結果

撮影地点	本システム		流速計		比率	
	速度 (kn)	方向 (度)	速度 (kn)	方向 (度)	速度 (%)	方向 (%)
地点 1	2.85	221	3.93	230	72.52	96.09
地点 2	3.04	223	4.11	228	73.97	97.81

表-11 流速算出処理の入力パラメータ

撮影地点	カメラの高さ (m)	カメラの傾き (度)	カメラの焦点距離 (mm)	海面の高さ (m)
地点 A	4.53	73.5	48.1	0
地点 B	3.73	60.5	48.1	0
地点 C	3.87	67.5	48.1	0
地点 D	3.87	49.0	48.1	0
地点 E	2.90	56.0	48.1	0
地点 F	4.04	57.0	48.1	0

表-12 流速計測結果

撮影地点	本システム		目視		誤差	
	速度 (kn)	方向 (度)	速度 (kn)	方向 (度)	速度 (%)	方向 (%)
地点 A	0.345	271.4	0.321	273.6	7.477	0.804
地点 B	1.455	89.98	1.326	94.51	9.729	4.793
地点 C	1.245	88.70	0.893	70.34	39.42	26.10
地点 D	0.585	192.2	0.491	147.1	19.14	30.66
地点 E	0.829	247.1	0.782	273.3	6.010	9.587
地点 F	0.938	191.7	0.878	184.1	6.834	4.128

表－１３ パラメータ変更後の流速計測結果

撮影地点	本システム		目視		誤差	
	速度 (kn)	方向 (度)	速度 (kn)	方向 (度)	速度 (%)	方向 (%)
地点 C	1.084	82.49	0.893	70.34	21.39	17.27
地点 D	0.559	172.3	0.491	147.1	13.85	17.13



図－１４ 地点 C の海表面流画像

去することで、海面の起伏模様を強調した特徴画像の生成技術を構築した。次に、生成した特徴画像における各特徴点をトレーサ粒子とみなし、面積相関法を使用することで、画像上での計測点の移動量と方向を移動成分として算出する技術を構築した。最後に、算出した移動成分をカメラパラメータと海面の高さの情報を用いてピクセル単位の移動量を実空間上の寸法に変換し、海面上における海流の速度と方向を算出する技術を開発した。

そして、本研究で開発した海流計測システムを用いて実証実験を行った結果、専門機器を使用せず海流の速度と方向を計測できることを確認するとともに、本システムの有用性を証明した。そのため、海岸工事や港湾工事の施工前、施行後における影響基礎調査等での作業コストの縮減や作業効率の向上に貢献できるものと考えられる。

しかし、本システムでは、探索窓と相関窓間の全探索を行っているためリアルタイム処理が行えない。そのため、今後は、本研究で開発した海流計測システムを拡張することで、リアルタイム処理の実現とさらなる精度の向上を目指す予定である。

参考文献

- 1) 宇野木早苗, 小西達男: 埋め立てに伴う潮汐・潮流の減少とそれが物質分布に及ぼす影響, 海の研究, 日本海洋学会, Vol.7, No.1, pp.1-9, 1998年2月.
- 2) 山北剛久, 仲岡雅裕, 近藤昭彦, 石井光広, 庄司泰雅: 東京湾富津干潟における海草藻場の長期空間動態, 保全生態学研究, 日本生態学会, Vol.10, No.2, pp.129-138,

2005年12月.

- 3) 宇多高明, 芹沢真澄, 三波俊郎, 古池鋼: ポケットビーチ内での防波堤建設に起因する海浜変形とその予測, 日本地形学連合機関誌「地形」, 日本地形学連合, Vol.23, No.3, pp.395-413, 2002年7月.
- 4) 環境省: 生物多様性基本法, <<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/initiatives/index.html>>, (入手 2010.5.27).
- 5) 環境省: 環境影響評価法の一部を改正する法律案の閣議決定について (お知らせ), <<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=12295>>, (入手 2010.5.27).
- 6) 海上保安庁: 平成 21 年の海洋汚染の現状について, <<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/tokei/env/2009con.pdf>>, (入手 2010.8.19).
- 7) (社) 土木学会海岸工学委員会, 研究現況レビュー小委員会編集: 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 2001年3月.
- 8) 金平祐介, 金子俊一, 齊藤誠一, 前野克尚: 弛緩テンプレート照合による海表面流速場の推定, 電子情報通信学会論文誌, 電子情報通信学会, Vol.J86-D-2, No.6, pp.846-855, 2003年6月.
- 9) 江藤剛治, 竹原幸生, 高野保英, 奥野訓史, 藤田一郎, 酒井信行: ローカル・リモートセンシングによる河川表面流の PTV 計測の試み, 土木学会論文集, 土木学会, No.796, pp.39-52, 2005年8月.
- 10) 藤田一郎, 河村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, 土木学会, No.38, pp.733-738, 1994年2月.
- 11) Cooley, J.W. and Tukey, J.W.: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, *Mathematics of Computation*, Vol.19, pp.297-301, 1965.
- 12) Chu, T.C., Ranson, W.F, Sutton, M.A. and Peters, W.H.: Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics, *Experimental Mechanics*, Vol.25, No.3, pp.232-244, 1985.
- 13) 日本写真測量学会: 解析写真測量 (改訂版), 日本写真測量学会, 1997年4月.
- 14) カール・クラウス: 写真測量, 技術書院, 1993年7月.

(2010. 5. 28 受付)