

# 風を見る

深尾 圭貴<sup>1,a)</sup> 延原 章平<sup>1,b)</sup> 西野 恒<sup>1,c)</sup>

**概要:** 本研究では、実体のない風の動きを、水面を観測することで推定する。水上に風が吹くとき波が立ち、水面の見え方が変化する。一般的に、屈折率の異なる物質間の界面に光が入射すると、光の一部は反射し一部は透過するが、このとき光の入射角の大きさによって反射率が変わるという現象によって、風の強さと水面の見え方に関係が生まれる。本研究ではこの関係を定式化し、ウィンドサーフィンのマストに設置された全天球カメラ映像から水上における風の強弱を推定することでその有効性を検証した。

## 1. はじめに

人間の知覚は、視覚、嗅覚、聴覚、触覚、味覚の5つによって成っている。我々は建物や動物など、実体のあるものを主に視覚によって認識する。一方で、実体のないものは視覚によって直接認識することはできないため、視覚以外の知覚によって認識することがほとんどである。しかしながら、実体のないものが実体のあるものに対して変化を及ぼすとき、その視覚情報によってそれを認識することができる。実体のないものをカメラの観測によって間接的に見えるようにすることは、コンピュータビジョンの貢献の一つである。実体のないものの例として、風がある。風は無色透明な空気の流れであるため視覚によって直接観測することができないが、日常生活において木の葉の揺れや煙の流れといった視覚情報から間接的に認識することができる。風の動きを視覚から認識する他の例の一つとして、セーリング競技がある。セーリング競技とは、帆の表面を流れる風によって発生する揚力を用いて水上を進む競技のことであり、ヨットやウィンドサーフィン（ボードセーリング）が挙げられる。このとき競技者は水面を見て風の動きを推定し、最適な進路を取る。

水面の見え方は風の強さによって異なる。一般的に、屈折率の異なる物質間の界面に光が入射すると、入射した光の一部は反射し一部は透過する。このとき光の入射角の大きさによって光の反射率が変わるという現象によって、風の強さと水面の見え方に関係が生まれる。

無風や微風の状況下では水面にさざ波が観測されず、な

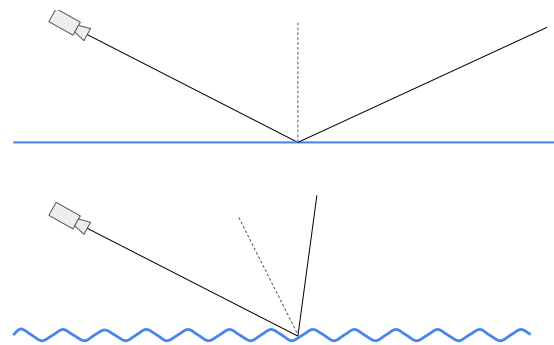


図 1 水面における空気中の光の反射. 上から、波がない水面における光の反射 (1), さざ波がある水面における光の反射 (2)

めらかでつるつるとした見え方となる。このとき、図 1(1)より、遠方の水面と視線のなす角は平均的に小さく、反射する光の水面に対する入射角が大きくなり、反射率が大きくなるため、水面は鏡のように空気中の光を反射する。水中の光と比較すると光源のある空気中の光は明るいので、風が弱い状況では、水面は明るく見える。

一方で風が強く吹く状況では、風が水面にさざ波を立てるため、水面がざらざらした見え方となる。このとき、図 1(2)より、遠方の水面と視線のなす角が平均的に大きくなり、反射する光の水面に対する入射角が小さくなるため、平均的に反射率が小さくなる。そのため、水面の光は空気中から反射する光の割合が小さくなり、水中から透過してくる光の割合が大きくなる。よって風が強い状況では、水面は暗く見える。

本研究では、実体のない風を、水面を見ることで推定するというのを、コンピュータビジョンの技術を用いて行う。具体的には、ウィンドサーフィンのマストに設置された全天球カメラ映像から水上における風の強弱を推定する。水面を観測して風の強い部分を見つけ出すことができ

<sup>1</sup> 京都大学大学院情報学研究科  
Graduate School of Informatics, Kyoto University

a) fukao@vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp

b) nob@i.kyoto-u.ac.jp

c) kon@i.kyoto-u.ac.jp

れば、競技者の風の読みと、実際の風の流れの正誤を確認することができ、セーリング競技の戦術の技能向上に貢献できる。また、遠くから水上の風速を推定することが可能になれば、陸から沖に向かって強風が吹いている状況において帆走能力不足により沖へ流されるといった水難事故の防止にも貢献できる。

## 2. 関連研究

人間の目に見えないものを見る研究として、一人称視点の映像から、その視点の人物の速度および位置の他に、重力などの受動的な力や、自転車のペダルを漕ぐといった能動的な力を見る試み [1] がある。また、Torralba[2] は、窓などの環境物中の小さな隙間から入る光が像をつくるという、偶発的に発生するピンホールカメラから、外の景色を再現する手法や、人物が落とす環境光のかすかな影から周囲の環境物を推定する手法を提案している。

通常のカメラよりも広い範囲を撮影できる利点を生かして、全天球パノラマ画像を用いた研究が盛んに行われている。3次元空間上における直線は単位球上では大円として投影されることから、Seonら [3] は equirectangular 画像で大円を検出するアルゴリズムを述べている。全天球カメラの姿勢推定に関して、後藤ら [4] は人工物環境に多数存在する直線の分布を用いて、カメラの6自由度の位置姿勢を求める手法を提案している。

## 3. 提案手法

第3章では、風を観測するための具体的な手法について述べる。まず、3.1節で本研究で用いる全天球カメラおよびその全天球画像の概要と処理の方法について述べる。次に、3.2節で提案手法の大まかな流れを説明する。3.3節では全天球画像の歪みの補正によって水面領域と空領域の分割を行う手法について説明する。最後に、3.4節で補正した画像からさざ波の顕著さの推定と、風の強弱を可視化する手法について述べる。

### 3.1 全天球カメラおよび全天球画像

本節では、equirectangular 画像の任意の点を球面座標系に変換する手法を述べる。全天球カメラとは、カメラの前後に設置されている2つの広角レンズを用いてそれぞれ半球のシーンを撮影し、その2つのシーンの端をつなぎ合わせることで上下左右360°のシーンを一度に表現できるようにされたものである。全天球カメラを用いることで広範囲の水面を撮影することができるため、カメラの向きにかかわらず広範囲の水面の様子を調べることができる。全天球の像は正距円筒図法(equirectangular方式)で長方形の平面に変換された画像として保存される。本研究では正距円筒図法で保存された全天球画像をequirectangular 画像と呼ぶ。

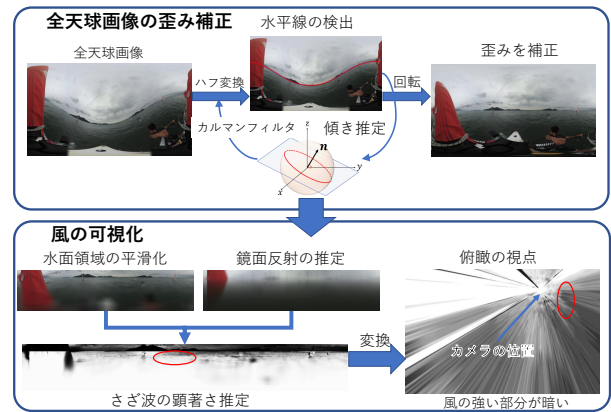


図2 本研究の全体像。全天球画像の歪み補正を行ったのちに、風の強さの可視化を行う。

Equirectangular 画像上の高さを  $h$ 、幅を  $w$  とすると、画像上の点  $(u, v)$  に投影されるカメラの中央に向かう光線の緯度  $\theta$ 、経度  $\phi$  は、

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (u - \frac{h}{2}) \frac{\pi}{h} \\ (v - \frac{w}{2}) \frac{2\pi}{w} \end{pmatrix} \quad (1)$$

となり、その逆変換は、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta \cdot \frac{h}{\pi} + \frac{h}{2} \\ \phi \cdot \frac{w}{2\pi} + \frac{w}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。画像の緯度  $\theta$ 、経度  $\phi$  から、3次元球面上の座標  $(x, y, z)$  は、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

となり、その逆変換は、

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^{-1}(z) \\ \cos^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \cdot \text{sgn}(y) \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。式(1)、(3)より、equirectangular 画像の任意の点  $(u, v)$  を球面座標系の座標  $(x, y, z)$  に変換することができる。

### 3.2 提案手法の概要

本研究における課題は、水面領域と空領域の分割・風の可視化の2つの小問題に分割される。なお、本研究で提案する手法の全体像を図2に示す。

**水面領域と空領域の分割** 全天球カメラで撮影された equirectangular 画像はカメラの傾きによって歪んだ見え方となる。水上の風の強さを推定するためには、水面全体に対してカメラからの距離と方向が計算できる必要がある。そのために、equirectangular 画像上に映る特徴点を用いてカメラの傾きを検出し、カメラの傾きによる画像の歪みの補正を行い、空領域と水

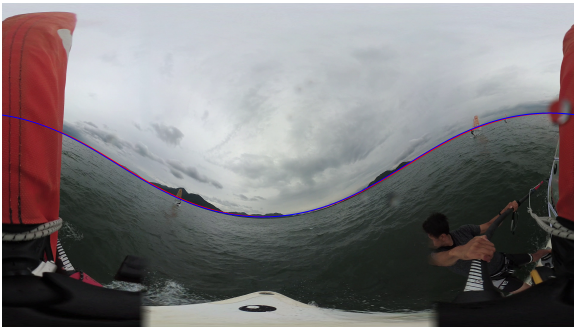


図 3 検出, 推定した水平線. ハーフ変換によって検出された水平線を赤線, カルマンフィルタによって推定された水平線を青線で可視化している. どちらの水平線も画像上の実際の水平線付近に描かれている.

面領域が水平線によってが中央で分割された画像を生成する.

**風の可視化** 歪みが補正された equirectangular 画像からは, 水面領域全体についてカメラからの距離と方角を得ることができる. 得た距離と方角を用いて, 水面がすべて鏡面反射の見え方をする場合に, 水面で反射してカメラに入る光を空領域から求め, 水面の鏡面反射を推定する. 水面領域の画像と推定された鏡面反射の画像の比較により水面のさざ波の顕著さを求め, 可視化する. さらに, 水面領域のさざ波の顕著さ画像に, 水面を真上から俯瞰したような視点への変換を施しマップにすることで風を可視化する.

### 3.3 水面領域と空領域の分割

本節では, 図 3 のように, カメラ傾きによって生じる equirectangular 画像の歪みを, 水平線の検出によってカメラの傾きを求めることで補正し, 水面領域と空領域を中央で水平線によって分割する手法について述べる.

#### 3.3.1 水面領域と空領域の分割の概要

一般的に 3 次元空間上の平面の方程式および平面の法線ベクトルは, 係数  $a, b, c, d$  を用いて,

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix} \quad (6)$$

と表される. 水面は 3 次元空間上の平面であり, カメラの高さは岸までの距離よりも十分に小さい. そのため, 式 (5) において  $d = 0$  とすると, 水面がつくる平面の方程式は,

$$ax + by + cz = 0 \quad (7)$$

となる. 以下, 水面と陸地の境界線を水平線と呼ぶ.

球面座標系において水平線は式 (7) と単位球面の交線, すなわち単位球面の原点を中心とする大円として表現される. 水平線が球面座標系に作る大円は, ハーフ変換 (3.3.2 節) によって検出できる. さらに, 検出された水平線の大円によって水面の法線ベクトルを求めることができる. この法

線ベクトルをカメラの傾きとする.

ハーフ変換では画像上の特徴点の座標を用いて計算を行うため, その計算量は検出された特徴点の数の 2 乗に比例する. また, 3 次元空間における直線は, カメラの中心が同一直線上に存在しなければ, 球面座標系では大円の円弧として映し出される. そのため画像全体の特徴点を用いてハーフ変換を行うと, 水平線以外の直線がつくる大円も検出する. このことから, 画像全体の特徴点を用いて投票を行うことによって水平線の誤検出にもつながる.

そこで, 状態空間モデルの一つであるカルマンフィルタ (3.3.3 節) を用いて, 1 フレーム前までに検出された水平線から求めたカメラの傾きから, 次フレームのカメラの傾きを推定する. 推定されたカメラの傾きから, 水平線の特徴点が存在すると推定される領域の特徴点のみを用いてハーフ変換の計算を行うことで, 計算量を減少させ, かつロバストに水平線を検出する.

最後に, 検出されたカメラの傾きから画像の歪みを補正を行う. equirectangular 画像を球面座標系に変換して, 球面座標系で画像を回転させることで, 傾きを補正する. その球面座標系の画像を equirectangular 画像に変換すると, 歪みが補正された, 上下で空領域と水面領域に分割された画像になる (3.3.4 節).

#### 3.3.2 ハーフ変換

Equirectangular 画像に写っている水平線を検出するための手法としてランダム化ハーフ変換を用いる. まずはカメラの傾きと equirectangular 画像上における水平線の関係について述べ, 次に, ランダム化ハーフ変換のアルゴリズムについて説明する.

カルマンフィルタ (3.3.3 節) によって推定されたカメラの傾きから, 水面の平面の方程式の法線ベクトル (式 (6)) が得られる. まず, 平面の方程式 (7) に式 (3) を代入すると

$$a \cos \theta \cos \phi + b \cos \theta \sin \phi + c \sin \theta = 0 \quad (8)$$

となる. これを  $\theta$  について解くと,

$$\theta = \tan^{-1} \left( -\frac{a \cos \phi + b \sin \phi}{c} \right) \quad (9)$$

となる. よって, 式 (1), (9) から equirectangular 画像上の水平線の方程式を得られる.

次に, ランダム化ハーフ変換の水平線検出アルゴリズムを以下に示す.

- (1) ノイズの影響を低減させるため, equirectangular 画像をガウシアンフィルタによって平滑化する.
- (2) 平滑化した equirectangular 画像から Canny 法によってエッジを検出する.
- (3) カルマンフィルタによって推定されたカメラの傾きを用いて, 水平線の式から閾値以内のエッジの座標のみ取り出す.

- (4) 取り出したエッジの座標から2点をランダムに選び、その座標を式(1),(3)によって球面座標系に変換する。
- (5) 2点の球面座標の外積を計算し、その大きさを1とする。
- (6) 単位球面座標上に外積を投票する。すでに投票された外積との角度が閾値以内ならばその外積の値を更新した上で投票する。

以上の処理を検出されたエッジの数に応じて繰り返し、最も投票数の多い外積の向きをカメラの傾きとする。

### 3.3.3 カルマンフィルタ

ハフ変換による水平線の検出およびカメラの傾きの推定にはノイズなどの影響により誤差が発生する。ノイズのある時系列の観測値から真の状態と次フレームの状態を推定する方法として、カルマンフィルタという状態空間モデルを利用する。カルマンフィルタを用いて、観測された現フレームまでのノイズのあるカメラの傾きから、次フレームのカメラの傾きを推定する。カルマンフィルタは状態を観測したのち、予測ステップとフィルタリングステップの2つのステップにより真の状態量および次フレームカメラの傾きの推定を行う。すべてのフレームについてフィルタリングの計算が終了すると、平滑化ステップにより、各フレームのカメラの傾きを平滑化し、観測ノイズの影響を減少させる。

#### 状態空間表現 (観測モデル)

時系列の状態空間はモデルは状態方程式

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}\mathbf{v}_t \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_t = \begin{pmatrix} x_a & x_b & x_c \\ v_a & v_b & v_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_t = \begin{pmatrix} a_a & a_b & a_c \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{(\Delta t)^2}{2} \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad (14)$$

で表現される。ここで、 $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$  はシステムの状態であり、1行目はカメラの傾きを表すベクトル、2行目は各軸方向の速度を表す  $\mathbf{A}$  はシステムの時間推移に関する線形モデルであり、等加速度運動の係数を表す。  $\mathbf{v}_t$  の各要素はシステム雑音と呼ばれる正規性白色雑音であり平均値が0で分散  $\sigma_v^2$  をもつ。  $\Delta t$  はフレーム間の時間である。

時刻  $t$  において状態  $\mathbf{x}_t$  とカメラの3次元の傾きの観測値  $\mathbf{z}_t$  の関係 (観測方程式) は、

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t \quad (15)$$

で表現される。ここで  $\mathbf{C}$  は状態空間を観測空間に線形写像する線形モデルであり、  $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}$  である。  $\mathbf{w}_t$  は観測雑音と呼ばれる正規性白色雑音であり、平均値0で分

散  $\sigma_w^2$  をもつものである。

#### 予測ステップ (事前推定値, 事前誤差共分散)

このステップでは時刻  $t-1$  の状態  $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}^-$  と誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{P}}_{t-1}^-$  から、時刻  $t$  における状態  $\hat{\mathbf{x}}_t^-$  と誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{P}}_t^-$  を推定する。  $\hat{\mathbf{x}}_t^-$  および  $\hat{\mathbf{P}}_t^-$  は、

$$\hat{\mathbf{x}}_t^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{t-1}^- \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{P}}_{t-1}^- \mathbf{A}^T + \mathbf{W} \quad (17)$$

$$\mathbf{W} = \sigma_v^2 \mathbf{B}\mathbf{B}^T \quad (18)$$

で表される。

#### フィルタリングステップ (カルマンゲイン, 事後推定値, 事後誤差共分散)

このステップでは時刻  $t$  における推定された状態  $\hat{\mathbf{x}}_t^-$  と事前誤差行列  $\hat{\mathbf{P}}_t^-$  と観測値  $\mathbf{z}_t$  から真の状態  $\hat{\mathbf{x}}_t$  と、誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{P}}_t$  に更新する。

$$\mathbf{K}_t = \hat{\mathbf{P}}_t^- \mathbf{C}^T (\mathbf{C}\hat{\mathbf{P}}_t^- \mathbf{C}^T + \sigma_w^2)^{-1} \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_t^- + \mathbf{K}_t (\mathbf{z}_t - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_t^-) \quad (20)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{C}) \hat{\mathbf{P}}_t^- \quad (21)$$

ここで  $\mathbf{K}_t$  はカルマンゲインと呼ばれる利得である。

#### 平滑化ステップ

このステップでは雑音による観測誤差を取り除くため、観測された全フレームのカルマンフィルタを計算した後にカルマン平滑化を行う。時刻  $t+1$  における推定された状態  $\hat{\mathbf{x}}_{t+1}^-$ 、平滑化された状態  $\hat{\mathbf{s}}_{t+1}$  および、時刻  $t$  における状態  $\hat{\mathbf{x}}_t^-$  から、時刻  $t$  の状態  $\hat{\mathbf{s}}_t$  へ平滑化する。同時に、時刻  $t+1$  における推定された誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{P}}_{t+1}^-$ 、平滑化された誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{S}}_{t+1}$  および、時刻  $t$  における事後誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{P}}_t$  から、時刻  $t$  の誤差共分散行列  $\hat{\mathbf{S}}_t$  へと平滑化する。

$$\mathbf{D}_t = \hat{\mathbf{P}}_t \mathbf{A} \hat{\mathbf{P}}_{t+1}^{-1} \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{s}}_t = \hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{D}_t (\hat{\mathbf{s}}_{t+1} - \hat{\mathbf{x}}_{t+1}^-) \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_t = \hat{\mathbf{P}}_t + \mathbf{D}_t (\hat{\mathbf{S}}_{t+1} - \hat{\mathbf{P}}_{t+1}^-) \mathbf{D}_t^T \quad (24)$$

### 3.3.4 画像の歪みの補正

ハフ変換とカルマンフィルタおよびカルマン平滑化を用いて得た各フレームのカメラの傾きを用いて、図4のようにカメラの傾きによって生じる画像の歪みを補正する。傾きを補正するための手法として、式(6)で表されるカメラの傾きから  $\mathbf{n} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  への回転を考える。equiarectangular 画像の全画素について式(1),(3)より球面座標系に変換し、それぞれについて式(25)によって回転変換を行う。



図 4 補正後の equirectangular 画像. 水平線が画像を上下で空領域と水面領域に分割している.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \mathbf{R}_x(\alpha_x) \cdot \mathbf{R}_y(\alpha_y) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\alpha_x = \tan^{-1}\left(\frac{c}{b}\right) \quad (26)$$

$$\alpha_y = \tan^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) \quad (27)$$

$$\mathbf{R}_x(\alpha_x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & -\sin \alpha_x \\ 0 & \sin \alpha_x & \cos \alpha_x \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{R}_y(\alpha_y) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y \end{pmatrix} \quad (29)$$

回転変換を行った球面座標上のすべての点について式 (4), (2) を用いて equirectangular 画像に変換する.

### 3.4 風の可視化

本節では, 歪みが補正され水面領域と空領域が分割された equirectangular 画像から, 水面の鏡面反射率を求め, 水面領域の画像と比較することでさざ波の顕著さを推定し, 風を可視化する手法について述べる.

#### 3.4.1 風の可視化の概要

補正された equirectangular 画像上の水面領域において, カメラから遠い部分とカメラに近い部分では水面の単位面積あたりの画素数が異なるため, 1 画素あたりの情報量が異なる. カメラから遠い部分は複数のさざ波がつくる平均的な光が画像の一つの画素に画素値として現れるため, 風の強さの情報を持っているが, カメラに近い部分は一つのさざ波が複数画素に渡って表示されるといった影響により, 一つ一つの画素が持つ風の強さの情報量が少ない. そこでまず, 遠い部分と近い部分で 1 画素あたりの情報量を等しくするために, 水面領域に平滑化の処理を行う (3.4.2 節).

水面のさざ波の顕著さは水面の鏡面反射の度合いによって調べるため, 水面領域の鏡面反射成分を求める必要がある. 水面は実際には平面ではなく, さざ波以外の大きな波がつくる大きな凹凸が存在し, 水面で反射してカメラに入



図 5 水面領域を平滑化した画像. 各画素値が風の強さの情報を持つように水面領域を一定の面積ごとの大きさのカーネルサイズの平均値フィルタによって平滑化した.

る光の入射角にばらつきが生じる. そこで, この入射角のばらつきによる光の出どころの変化を補正する. また, 入射角の大きさによって光の反射率が異なるという現象を考慮して, 水面の距離に応じた光の入射角および反射率を求め, 水面領域の鏡面反射を推定する (3.4.3 節).

次に, 風の強さを表す, さざ波の顕著さを求める. 平滑化した水面領域の画像と鏡面反射画像を比較し, 水面領域の各画素の画素値に対して鏡面反射成分の割合を計算することによって, 水面領域のさざ波の顕著さを求め, 可視化する (3.4.4 節).

最後に, 水面領域を真上から俯瞰したような視点への変換 (3.4.5 節) を, さざ波の顕著さ画像に対して実行する. この変換により, さざ波の顕著さがマップ上に可視化され, 水上の風を推定することが可能になる.

#### 3.4.2 水面領域の平滑化

水面領域の 1 画素あたりの情報量を等しくするために, 水面領域に対して面積が一定となるカーネルサイズの平均値フィルタを用いて, 図 5 のように水面領域の平滑化を行う.

水面において  $l \times l$  の大きさとなるように, equirectangular 画像上で縦横それぞれ対応する大きさを緯度, 経度から計算し, 平滑化に用いる長方形のカーネルを作成する. 補正された equirectangular 画像上の水面領域の座標  $(u, v)$  の  $v > \frac{h}{2}$  の領域におけるカメラの位置からの距離  $r$  は, (1) 式で表される緯度  $\theta$  とカメラを設置した高さ  $H$  を用いて,

$$r = \frac{H}{\tan \theta} \quad (30)$$

となる. また, 式 (30) より, カメラの位置から距離  $r$  の部分の水面領域の緯度  $\theta$  は,

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{r}\right) \quad (31)$$

となる. よって, カメラのある位置から  $r$  の距離の点において, 水面の長さ  $l$  に相当する緯度の差  $\Delta\theta_r$  および経度の差  $\Delta\phi_r$  は,

$$\Delta\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{H}{r-\frac{l}{2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{H}{r+\frac{l}{2}}\right) \quad (32)$$

$$\Delta\phi_r = \frac{l}{r} \quad (33)$$

となる。

### 3.4.3 水面の鏡面反射の推定

水面のさざ波の顕著さを観測するために、水面の鏡面反射を推定し、水面の画像と比較する。水面を平面とみなしたとき、水面領域の緯度  $\theta$  に映る水面で反射してカメラに入る光の入射角は、 $\frac{\pi}{2} - \theta$  となる。また、空領域の光は水面領域よりも十分に遠い地点からカメラに入るため、空領域の緯度  $-\theta$  からカメラに入る光は、水面領域の緯度  $\theta$  の部分で反射してカメラに入るとみなせる。

実際の水面は平面ではなく、さざ波によって生じる微小な凹凸と、大きな波によって生じる大きな凹凸が存在する。水面領域のある緯度  $\theta$  の部分における大きな凹凸の反射を考慮すると、入射角が  $\frac{\pi}{2} - \theta$  よりも小さくなるが多くなる。そこで図6のように、空領域について、度が  $-\theta_1$  の部分の画素値その画素から緯度が  $-\theta_1 - \frac{\pi}{18}$  の画素の間の全ての画素の平均値として平滑化することで、水面の大きな凹凸による入射角のばらつきを表現している。

また、異なる物質間の海面における光のふるまいはフレネルの式を用いて記述することができる。入射側の媒質の屈折率を  $n_1$ 、透過側の媒質の屈折率を  $n_2$ 、入射角を  $\beta_1$ 、屈折角を  $\beta_2$  として、電場の垂直偏波である  $p$  波と水平偏波である  $s$  波について、 $p$  波の反射率を  $r_p$ 、 $s$  波の反射率を  $r_s$  とすると、

$$r_p = \frac{n_2 \cos \beta_1 - n_1 \cos \beta_2}{n_2 \cos \beta_1 + n_1 \cos \beta_2} = \frac{\tan(\beta_1 - \beta_2)}{\tan(\beta_1 + \beta_2)} \quad (34)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \beta_1 - n_2 \cos \beta_2}{n_1 \cos \beta_1 + n_2 \cos \beta_2} = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \quad (35)$$

となる。光のエネルギーは電場の振幅の2乗に比例するので、光のエネルギー反射率  $R$  は、

$$R = \frac{r_p^2 + r_s^2}{2} \quad (36)$$

となる。

水面領域の緯度  $\theta$  の部分について、平滑化された空領域の緯度  $-\theta$  の画素値に対してフレネルの式 (36) を用いて、図6のように水面領域の鏡面反射を推定する。

### 3.4.4 さざ波の顕著さの推定

平滑化した水面領域は各画素の画素値に鏡面反射の要素を含んでいる。水面において風が強くなりさざ波が立つところは水面の微小な凹凸により、鏡面反射の要素が小さくなり、逆に風が弱い部分はさざ波が立ちづらいため、鏡面反射の要素が小さくなる。そこで、平滑化した水面領域の画像と鏡面反射画像の各画素について輝度値の比を計算することで、図7に示すように水面領域のさざ波の顕著さを求める。



図6 空領域の平滑化および水面領域の鏡面反射画像。水面の大きな波によって生じる入射角の変化に対応する空領域の位置の変化を、空領域を平滑化することで表現した。水面領域では距離に応じた反射率の変化を考慮して、空領域の鏡面反射を推定し、さざ波がない場合の水面の画素値を可視化している。

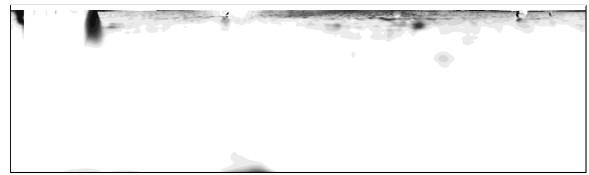


図7 水面領域のさざ波の顕著さ画像。水面領域の画素値と鏡面反射画像の画素値を比較することでさざ波の顕著さを色の暗さで可視化した。

水面領域の画像と鏡面反射画像をグレースケールに変換したのちに、平滑化した水面領域の画像の画素値を  $I_{\text{blur}}$ 、鏡面反射画像の画素値を  $I_{\text{spec}}$  とすると、さざ波の顕著さ画像の画素値  $I_{\text{diff}}$  は、

$$I_{\text{diff}} = \frac{I_{\text{blur}}}{I_{\text{spec}}} \quad (37)$$

となる。

水面に吹く風には強弱があるが、一定以上の風速があるため水面には一定以上のさざ波が存在する。そこで、さざ波の顕著さを強調するために、シングモイド関数を用いてヒストグラムを変換する。

ヒストグラム変換処理を行ったさざ波の顕著さ画像はノイズなどの影響により近傍の画素間で輝度の値が大きく変化するため、俯瞰した視点への変換 (3.4.5 節) を行うと風の強い領域のまとまりが見づらくなる。そこで、風の強い領域のまとまりの形を保存しつつ、その中のノイズを除去するためにモルフォロジー変換を行う。モルフォロジー変換の手法を以下に示す。

- (1) ヒストグラム変換処理後のさざ波の顕著さ画像を一定の画素値ごとに二値化する。
- (2) 二値化画像にオープニング処理、クロージング処理を行う。
- (3) 処理後の画像の黒い画素の画素値を二値化の閾値の画素値にする。
- (4) 各閾値の処理後の画像を重ね合わせる。

### 3.4.5 風の可視化

さざ波の顕著さ画像は equirectangular 形式であるため、直感的に風の強い領域の実際の場所を判断するのは困難である。そこで、補正された equirectangular 画像の水面領域を真上から俯瞰したような画像に変換する。以下、真上から俯瞰したような画像のことをマップと呼ぶ。まず、カメラの GPS 信号が観測された点のフレームについて、画像に写る山の特徴点の座標を入手する。山の特徴点の経度を  $\phi_{img}$  とし、GPS 信号の位置と実際の山の位置を用いて計算されたカメラからの山への方角を  $\phi_{real}$  とすると、その差  $\phi_{img} - \phi_{real}$  を用いて equirectangular 画像の経度と実際の方角を合わせることができる。

マップ生成にあたり、1メートルをあたりの画素数を  $k$  として、GPS の信号から得られるマップ上の自己位置を  $(y_o, x_o)$  とすると、マップ上の  $(y_w, x_w)$  の点の距離  $r_w$  と方角  $\phi_w$  は、

$$r_w = k\sqrt{(y_w - y_o)^2 + (x_w - x_o)^2} \quad (38)$$

$$\phi_w = \text{sgn}(y_w - y_o) \cdot \cos^{-1}\left(\frac{k(x_w - x_o)}{r_w}\right) \quad (39)$$

となる。 $r_w$  から、式 (31) を用いて画像上の緯度  $\theta$  を計算できる。また、経度  $\phi$  も計算でき、

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{k\sqrt{(y_w - y_o)^2 + (x_w - x_o)^2}}\right) \quad (40)$$

$$\phi = \phi_w + \phi_{img} - \phi_{real} \quad (41)$$

となる。式 (40), (41) を用いて equirectangular 画像の水面領域をマップに変換する。

## 4. 評価実験

前章で述べた手法をもとに、実際に風の強さマップを生成し、その評価を行う。実験では、滋賀県近江八幡市佐波江町の佐波江浜の沖合にて、全天球カメラの Garmin Virb 360 を用いて撮影を行った。実施した実験は以下のとおりである。

**カルマンフィルタの有効性の検証** 各フレームで検出、推定されたカメラの傾きおよび、カルマンフィルタによって平滑化されたカメラの傾きを観測することで、カルマンフィルタによるカメラの傾きの推定および、平滑化した傾きの有効性を検証する。

**風の可視化** 水面領域におけるさざ波の顕著さ画像を作成し、推定されたさざ波の顕著さ画像を上空から俯瞰した視点へ変換することで得られる風の強さのマップの画像を生成することで、風を可視化できているか検証する。

**さざ波の顕著さを求めることの有効性の検証** 水面領域を平滑化した画像と、水面領域のさざ波の顕著さの画像をそれぞれ俯瞰した画像に変換したマップを比較することで、さざ波の顕著さを求めることの有効性を検証

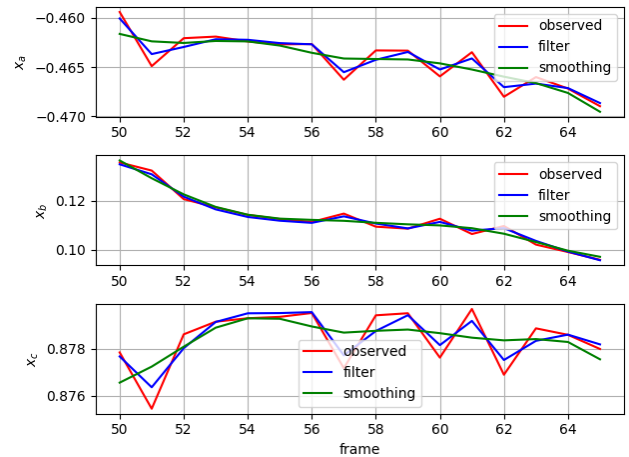


図 8 検出、推定、平滑化したカメラの傾きの推移。ハフ変換によって検出されたカメラの傾き (赤線) はカルマンフィルタによって推定されたカメラの傾き (青線) に近い値が得られている。カルマン平滑化 (緑線) によって 1 フレームごとの極端なカメラの傾きをなめらかにしている。

する。

### 4.1 カルマンフィルタの有効性の検証

3.3.3 節で述べたカルマンフィルタによるカメラの傾きの推定、平滑化について、各フレームにおける検出、推定、平滑化されたカメラの傾きの値の推移を観察することによって評価する。カルマンフィルタの各種パラメータはそれぞれ、 $\Delta t = \frac{1}{30}$ ,  $\sigma_w = 0.01$ ,  $\sigma_v = 1$  としている。

ハフ変換およびカルマンフィルタを用いて検出、推定、平滑化した時系列のカメラの傾き  $x_a, x_b, x_c$  の一部を図 8 に示す。検出、推定されたカメラの傾きはどのフレームも大きな差が無いので、水平線の検出、推定の手法はフレームによらずロバストに行われているといえる。検出されたカメラの傾きは観測雑音を含み、ジグザグの折れ線を描いているが、カルマン平滑化によって 1 フレームごとの極端なカメラの傾きの変化を滑らかにしており、観測雑音を補正していることがわかる。よってカメラの傾きによる equirectangular 画像の歪みを補正するために、平滑化した値を用いることが良いと考えられる。

### 4.2 風の可視化

まず、さざ波の顕著さを求めるために、カメラの傾きによる画像の歪みが補正された equirectangular 画像 (図 4) に対して、水面領域を水面が実際に  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の大きさのカーネルサイズの平均値フィルタによって平滑化し (図 5)、式 (36) より、空領域の平滑化および、鏡面反射の推定 (図 6) を行った。

次に、平滑化された水面領域の画像と鏡面反射の画像を用いて、式 (37) により、さざ波の顕著さを可視化した。シグモイド関数によるヒストグラム変換や、モルフォロジー



図 9 風の強さマップ．さざ波の顕著さ画像に，水面を真上から俯瞰して見たような変換を施し，マップ上に風の強さを可視化した．

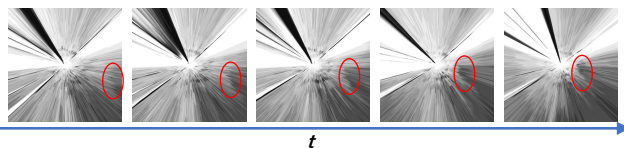


図 10 時系列の観測者付近の風の強さマップ．画像の中央が観測者．色が暗い部分が風の強い部分．暗い部分が画像の右から左へ流れており，風の強い部分が流れていることが観測される．

変換を施したさざ波の顕著さ画像を図 7 に示す．

3.4.5 節で述べた上空から俯瞰したような視点への変換の手法によってさざ波の顕著さをマップとして表現し (図 9)，風の強い場所の推定を行った．なお，画像の上，右，下，左の順に実際の方位で，北，東，南，西となっており，放射状の線の中心の白く明るい点が観測者の位置である．

時系列の観測者付近のマップの画像を図 10 に示す．色が暗い部分が画像の右から中央に向かって動く様子を観測できる．よって風の強い部分が右から左へ流れている観測でき，風の可視化ができているといえる．

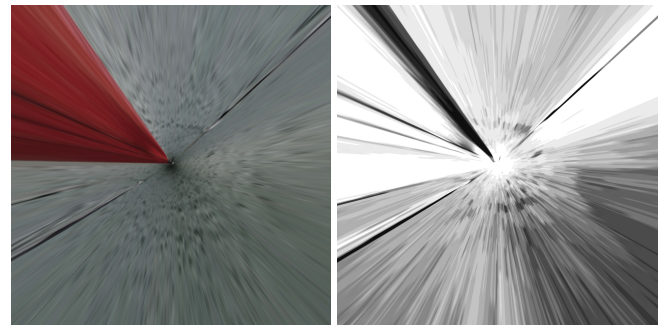
### 4.3 さざ波の顕著さを求めることの有効性の検証

さざ波の顕著さを求めることの実効性を確かめるために，水面を平滑化した画像である図 5 に対して 3.4.5 節の俯瞰した視点への変換の処理を施し，観測者付近のマップとして表した画像と，観測者付近の風の強さマップの画像の比較を行った (図 11)．水面を平滑化した画像 (図 11[1]) からでは色の濃淡のはっきりとした形を見つけることはできないため，風の強い場所を推定できない．よってさざ波の顕著さを推定することが必要であると考えられる．

## 5. 結論

本研究では全天球カメラで撮影した画像から水上の風の強弱を推定する手法について述べ，その定性的・定量的評価を行った．

ハフ変換とカルマンフィルタによって，歪んだ equirectangular 画像に写る水平線を検出，推定することでカメラの傾きによる画像の歪みを補正することができた．また，水面領域の画像と，鏡面反射画像の比較によってさざ波の



[1] 平滑化した水面領域のマップ [2] 風の強さマップ  
 図 11 観測者付近の水面を平滑化した画像のマップと風の強さマップの比較画像

顕著さを可視化して，真上から俯瞰したような視点への画像に変換することで，風を推定することができた．そのため，本研究の手法は，セーリング競技の戦術の技能の向上に役に立つと考えられる．

今後解決すべき課題としては，全天球カメラのレンズの歪みによる画像の歪み，カメラに映る水面以外の物体によって全方位の風速を推定できないこと，大きな波による入射角の変化で生じる反射率の変化を補正できないことなどがある．今後の展望としては，レンズの歪みを補正してより正確な風の強さマップを作成すること，拡散反射の度合いから風速を推定することなどが挙げられる．同時に，GPS 信号が入手できない時刻の自己位置推定の手法についても進めていきたい．

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17K20143 の助成を受けたものです．

## 参考文献

- [1] Soo Park, H., Hwang, j.-J. and Shi, J.: Force From Motion: Decoding Physical Sensation in a First Person Video, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3834–3842 (2016).
- [2] Torralba, A. and Freeman, W. T.: Accidental pin-hole and pinspeak cameras: Revealing the scene outside the picture, *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (online), DOI: 10.1109/CVPR.2012.6247698 (2012).
- [3] Oh, S. H. and Jung, S. K.: A GREAT CIRCLE ARC DETECTOR IN EQUIRECTANGULAR IMAGES, *International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2012)*, pp. 346–351 (online), DOI: 10.5220/0003856303460351 (2012).
- [4] 後藤 翼, Pathak, S., 池 勇勲, 藤井浩光, 山下 淳, 浅間 一: 人工物環境における全天球カメラの位置姿勢推定のための直線特徴に基づく 3D-2D マッチング, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 12, pp. 1209–1215 (オンライン), DOI: 10.2493/jjspe.83.1209 (2017).