

油膜画像検出用 TV カメラ（スリックカメラ）の設計

滝沢 國治^{*1}, 米倉 和也^{*2}, 金 蓮花^{*3}

Design considerations of a slick camera for detection of images of oil slicks floating on the ocean surface

Kuniharu TAKIZAWA, Kazuya YONEKURA, Lianhua JIN

ABSTRACT : This paper describes a TV camera system that automatically picks out exclusive images of oil slicks floating on the surface of the sea. The slick camera includes two band-pass filters (BPFs), two charge coupled device (CCD) arrays and a differential image circuit that produces an absolute value of a difference signal between two output images from CCDs. The operating principle is based on the fact that, due to the multiple-beam interference from the oil film, there is a marked difference of intensity between light reflected from the surface of the sea and that from an oil film. Two types of BPF, i.e., a space-invariant BPF and a space-variant BPF, were investigated and it was found that the space-variant BPF was far superior to the space-invariant BPF.

Keywords : Oil slick, Sensor, Television camera, Interference, Wavelength filter

(Received March 26, 2007)

1. まえがき

国際化の進展とともに空や海の交通は過密化し、航空機や船舶同士の衝突や荒天による遭難など様々な事故が増加している。これらの海難事故における遭難者の救助には、遭難現場の迅速で正確な発見が不可欠である。現在は、空や海上から救援者が目視で遭難現場を探索しているため、発見までに多くの時間を費やすことが多い。遭難現場の特定には、遭難者、燃料や貨物の油および遭難に関連した様々な浮遊物などの発見が大きな手になりになるが、広い公海での目視探索ではこれらを見落としてしまうという危険を常に抱えている。また、探査域を限なく調べるということは非常に困難である。

この問題を解決するため、我々は、中心波長の異なる2つのバンドパスフィルタ（BPF）、TVカメラおよびフレームメモリからなる撮像システムを用いて、静かな海水面に浮かぶ油膜（オイルスリックあるいはスリック）の画像だけを抽出する論文を報告した。¹⁾ この論文では、

入射光のスペクトル分布が一様であり、スリックの厚さや屈折率が分かっているという仮定の下に初歩的な解析と実験を行い、静止した海水面に浮かぶスリックの画像だけを正確に抽出できることを明らかにした。

しかし、実際の海難事故ではスリックの厚さや屈折率は不明である。また、海上は波やうねりがあり、太陽光のスペクトル分布も複雑である。この論文では、これらの現実的な状況においても遭難現場を迅速に発見できる新しいテレビカメラ—スリックカメラ—を提案する。はじめに、静止した海面におけるスリックと海面の反射特性を計算する。つぎに、波やうねりの影響を考慮した場合のスリックの反射特性を求め、海面が荒れていてもスリック画像を検出できることを示す。さらに、2種類の波長フィルタ（スペースインバリエントフィルタおよびスペースバリエントフィルタ）を用いたときのスリック検出確率を計算する。これらの結果は、提案するスリックカメラが高いポテンシャルを有していることを示している。

スリックカメラは海難事故だけでなく、タンカー事故に伴う油流出²⁾⁻⁵⁾にも応用可能である。この分野には、合成開口レーダシステム⁶⁾、航空機搭載型可視光線/赤

*1 物質生命理工学科教授 (takizawa@st.seikei.ac.jp)

*2 物理情報工学専攻大学院生

*3 物質生命理工学科助手

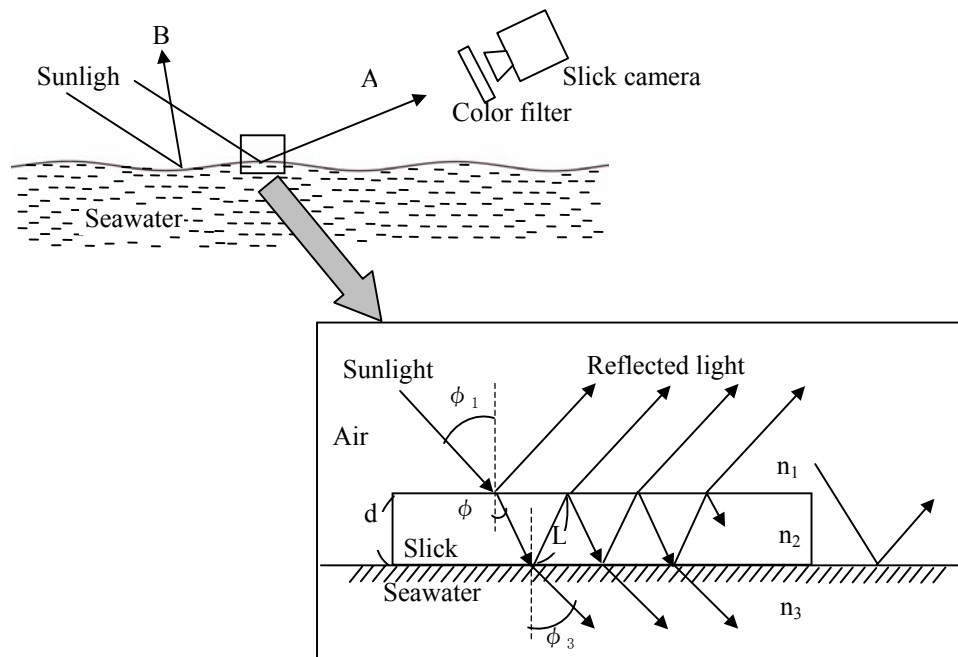


図1 穏やかな海面に浮かぶ油膜を自動的に認識するスリックカメラの原理

外線画像分光システム⁷⁾、ハイパワーレーザスキャンシステム⁸⁾、など様々な観測方式が提案されている。これらのシステムは数 $100\mu\text{m}$ 以上の厚さを有するスリックの発見を対象とする技術である。しかし、1990年代に東京湾で発生したナフサ流出事故が示すように、薄いスリックが広範囲に流出する事故も発生しており、厚いスリック検出技術のみならず、薄膜検出技術の早期開発が望まれているのが現状である。スリックカメラは、 $100\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ の範囲のスリック検出に適しており、従来のスリック検出システムの苦手な領域をカバーすることができる。

さらに、このカメラは河川、湖沼、ダム、貯水池などの油汚染の監視に適している。2002年におけるわが国の1級河川の汚染事故は683件に上るが、その約80%は油汚染によるものである。⁹⁾ 淡水の油汚染を監視する装置は幾つか実用化されており、それぞれ優れた検出能力を有している。^{10),11)} しかし、監視範囲が狭い、実時間検出が困難、静かな水面が必要などいくつかの問題を抱えている。スリックカメラはこれらの問題を解決できる可能性を有しており、河川や湖沼だけでなく、水道水や工業用水の汚染監視、廃棄油の海洋への不法投棄の監視など様々な分野への応用が考えられる。

本論文はこの章を含み、7章から構成される。まず第2章および2章で、穏やかな海面とうねりや波立ちのある海面におけるスリック画像検出の原理を明らかにする。

第4章では、スリック画像を自動検出する2種類のスリックカメラの基本システムを述べる。つぎに第5章では、光の強度や受光素子の

光電変換特性が波長依存性をもたない理想的な条件のもとで、光の反射角度やスリックの厚さなどを変えたとき、スリック画像を検出できる確率を解析的に求める。この検出確率を飛躍的に向上させるため、第6章では、スペースバリエーション型BPFを提案し、そのスリック検出確率を求める。第7章は結論である。

2. 穏やかな海面に浮かぶスリックを検出する原理

この章では、穏やかな海面に浮かぶスリックの反射率と波長の関係を解析し、スリック画像認識の原理を明らかにする。穏やかでも海面は常に揺らいでいるため、全ての反射光をスリックカメラに取り込むことは出来ない。図1の上図に示すように、カメラは光線Aをキャッチできるが、光線Bを見ることは出来ない。勿論、カメラの代わりに人が見ても光線Bを見ることは出来ない。カメラは人と同じように被写体を見るだけである。波やうねりにさざぎられた部分は人もカメラも見ることはいから、この論文ではカメラに到達しない反射光については議論しない。このカメラの新規性は、人と同じように海面を探索し、その海面にスリックがあるとき、人の指示なしに（教師なしで）スリックの存在を認識する機

能をもつことである。この論文では、このカメラがスリックを見たとき、それを認識する確率を明らかにし、その認識率をどのようにしたら向上できるかを議論する。

風のように穏やかな海面を 1 mm 程度の狭い範囲に限定すれば、図 1 の下図に示すように、空気、スリックおよび海面からなる平坦な 3 層構造と見なせる。このスリック層に太陽光が入射すると多重反射を繰り返しながら、空気中への反射光と海中への透過光に分かれる。海中では 480 nm 以下の青色光がよく透過する。青色光は海中で強く散乱され、海上にいる我々の目に入る。一方、波長 650 nm 以上の赤色光は海面から数 10cm も進むと半分程度吸収されてしまう。¹²⁾ レーリーの散乱法則に従えば赤色光の散乱強度は青色光のその約 1/6 である。¹³⁾ したがって、海上からは散乱した長波長光を殆ど見ることができない。この特性は海水が青緑色に見える原因の 1 つにもなっている。このような海水の波長特性に基づき、本論文では、600 nm より波長の長い領域について解析する。

スリックに入射する光(波長 λ)の強度を 1 に規格化すると、スリックのパワー反射率 $R_x(\lambda)$ は以下の式で与えられる。¹⁾ ここで添え字 x は p 波あるいは s 波を示す。

$$R_x(\lambda) = \frac{\left\langle \begin{aligned} &r_{1x}^2 + [r_{2x} \exp(-2\alpha L)]^2 \\ &- 2r_{1x}r_{2x} \exp(-2\alpha L) \cos \Psi \end{aligned} \right\rangle}{\left\langle \begin{aligned} &1 + r_{1x}^2 [r_{2x} \exp(-2\alpha L)]^2 \\ &- 2r_{1x}r_{2x} \exp(-2\alpha L) \cos \Psi \end{aligned} \right\rangle} \quad (1)$$

$(x = p, s)$

ただし、 α はスリックの光吸収率である。 r_{1x} は空気とスリックの界面における電界反射率、 r_{2x} はスリックと海水の界面における電界反射率であり、それぞれ以下のフレネルの式で表される。¹⁴⁾

$$r_{1p} = \frac{n_2 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_2}{n_2 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_2} \quad (2)$$

$$r_{1s} = \frac{n_1 \cos \phi_1 - n_2 \cos \phi_2}{n_1 \cos \phi_1 + n_2 \cos \phi_2} \quad (3)$$

$$r_{2p} = \frac{n_2 \cos \phi_3 - n_3 \cos \phi_2}{n_2 \cos \phi_3 + n_3 \cos \phi_2} \quad (4)$$

$$r_{2s} = \frac{n_3 \cos \phi_3 - n_2 \cos \phi_2}{n_3 \cos \phi_3 + n_2 \cos \phi_2} \quad (5)$$

ここで、 n_1 , n_2 , n_3 は空気、スリック、海水の屈折率である。 ϕ_1 は空気からスリックへ光が入る時の入射角度、 ϕ_2 および ϕ_3 は、スリック内あるいは海水内における屈折角度である。 n_1 , n_2 , ϕ_1 , ϕ_2 の間には、次のスネルの法則が成り立つ。

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (6)$$

式(1)の L はスリック内部での光の進む距離であり、 Ψ は隣り合う光ビームの位相差である。 L および Ψ は下式で与えられる。

$$L = \frac{d}{\cos \phi_2} \quad (7)$$

$$\Psi = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d \cos \phi_2 \quad (8)$$

ここで、 λ は光の真空中での波長、 d はスリックの厚さである。

海水の屈折率分散データ¹⁵⁾ および A 重油の屈折率分散データおよび光透過率分散データ¹⁾ を式(1)～式(8)に代入し、無偏光のパワー反射率 $R = R_p + R_s$ と波長 λ の関係を計算した。計算結果の一例を図 2-図 4 に示す。これらの図から以下のことが明らかになる。

- (1) スリックのパワー反射率は波長、入射角度、スリックの厚さに強く依存する。
- (2) 海面のパワー反射率の波長依存性は非常に少ない。

ここで、2 つのバンドパスフィルタ(BPF：中心光波長： λ_1, λ_2)で 2 波長だけを抜き出してそれぞれ別の CCD に入射して 2 つの映像信号を作り、両者の差信号を求めるとしよう。図 2-4 から明らかなように、異なる波長 λ_1 , λ_2 で形成される 2 つのスリック画像信号からは一般に大きな差信号が得られる。一方、同じ波長における海面画像の間の差信号は殆どゼロである。従って、中心波長の異なる 2 つの BPF を通過した画像を引き算し、その絶対値が大きいとき、海面にスリックがあると判断できる。これがスリックカメラの原理である。

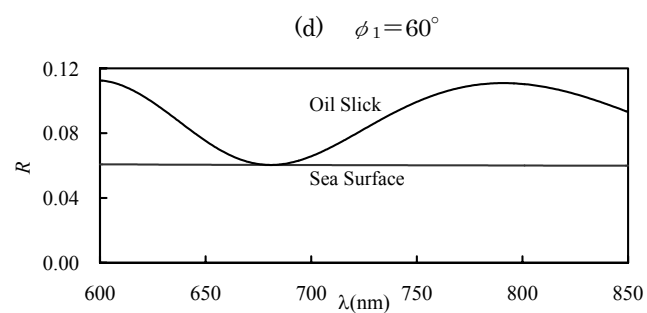
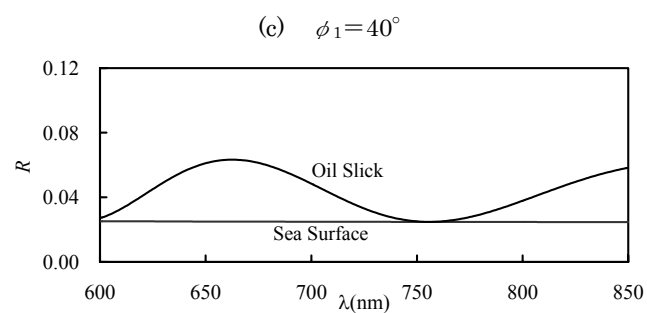
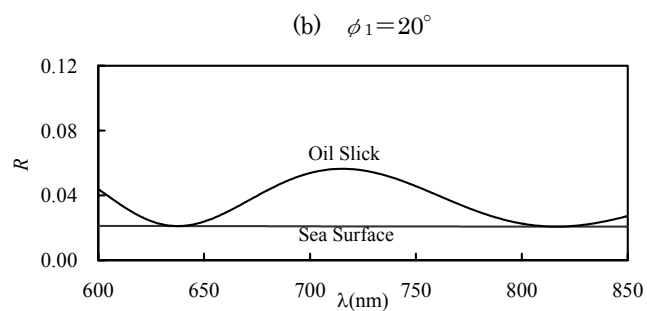
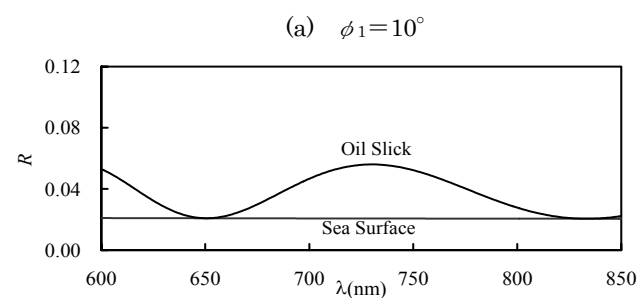


図2 厚さ $d = 1 \mu\text{m}$ のスリックと海水のパワー反射率の波長依存性
曲線はスリックの反射率，直線は海水の反射率.

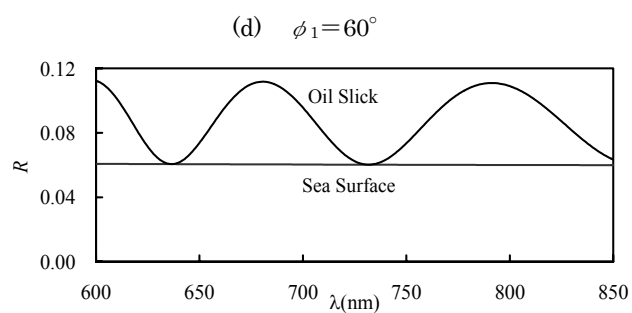
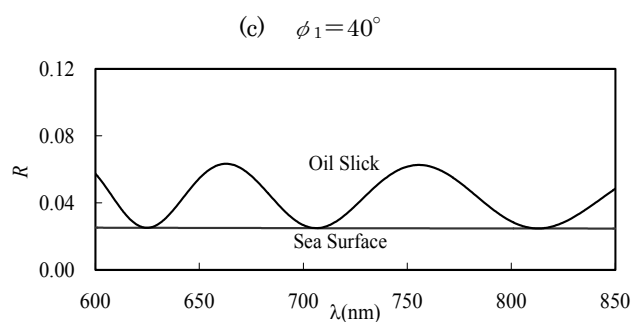
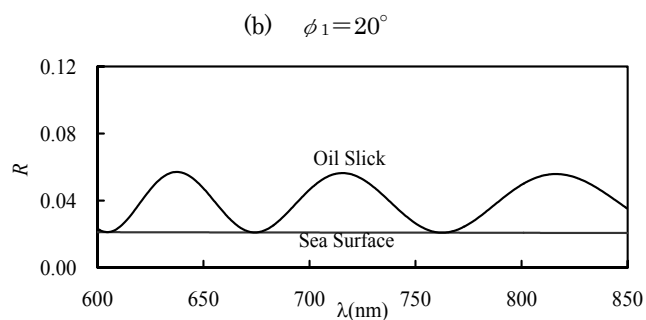
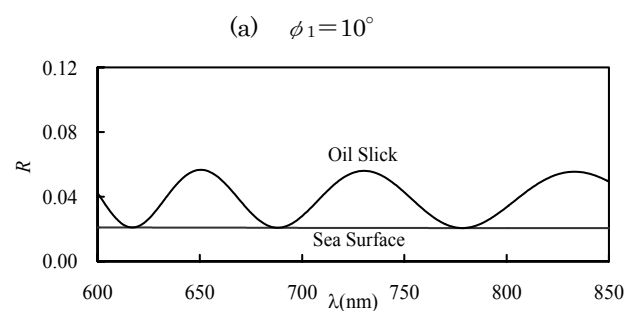


図3 厚さ $d = 2 \mu\text{m}$ のスリックと海水のパワー反射率の波長依存性

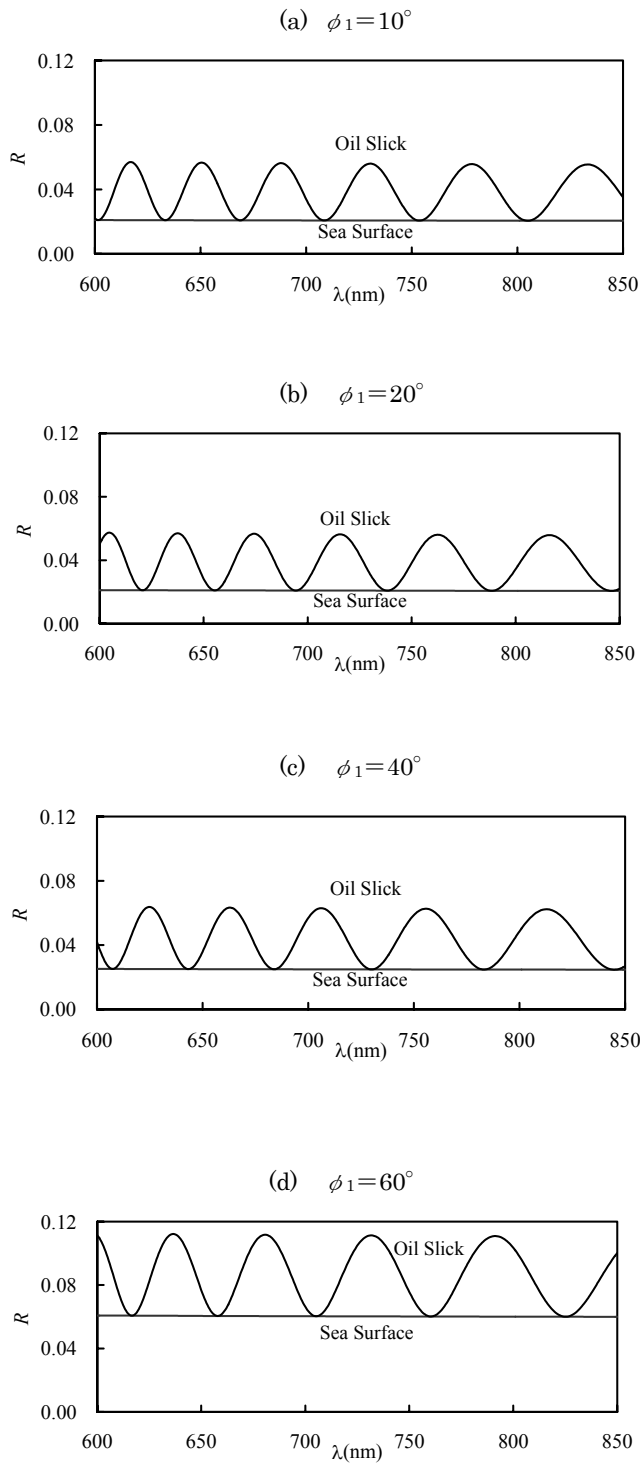


図4 厚さ $d=4\mu\text{m}$ のスリックと海水のパワー反射率の波長依存性

3. 荒れた海面上のスリックを検出する原理

3. 1 小さな曲率半径をもつ波頭における2光束干渉

強風や荒天のとき様々な波やうねりが海面に起こるため、図1の平坦な3層構造でスリックの反射率を計算するのは適当ではない。この節では波を小半球にモデル化し、2つの反射光の干渉を解析する。

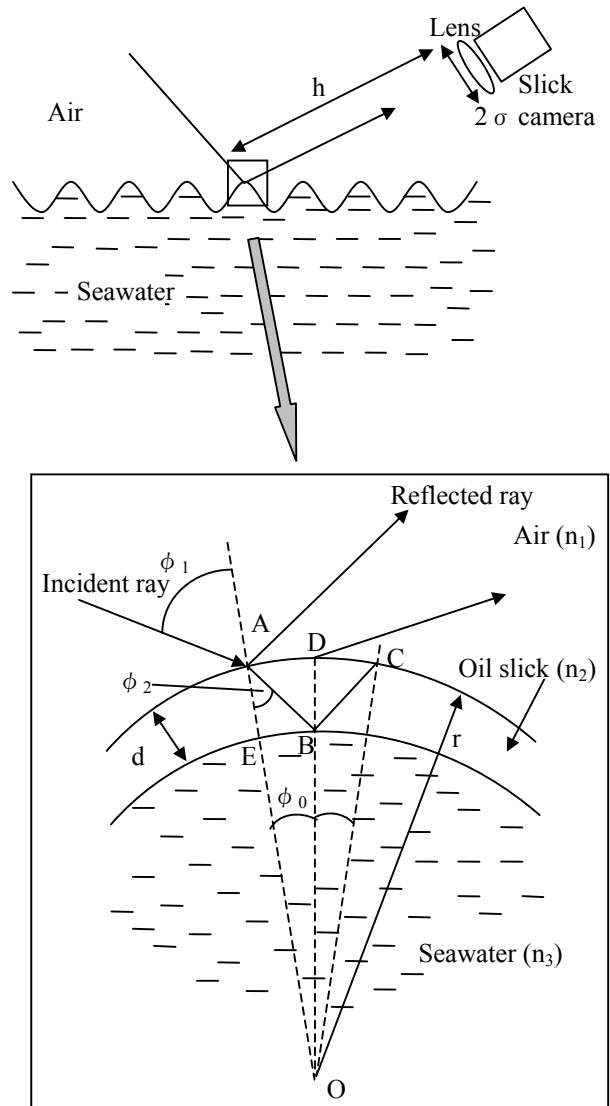


図5 曲率半径 r のスリックにおける2光束干渉

解析を容易にするために、図5の上図に示すように急峻な波面の形を半球状とする。この半球の半径を r とすると、 $\overline{AB}$ および $\overline{BO}$ は次式で与えられる。

$$\overline{AB}^2 = r^2 + (r-d)^2 - 2r(r-d)\cos\phi_0$$

$$\overline{BO}^2 = (r-d)^2 = \overline{AB}^2 + r^2 - 2r\overline{AB}\cos\phi_2 \quad (9)$$

この2つの式と式(6)のスネルの公式を用いると、次の式を得る。

$$\phi_1 = \sin^{-1} \left\{ n_2 \sqrt{1 - \frac{[r - (r-d)\cos\phi_0]^2}{r^2 + (r-d)^2 - 2r(r-d)\cos\phi_0}} \right\} \quad (10)$$

ただし、空気の屈折率 n_1 を 1 とした。

カメラレンズの半径を σ 、カメラと半球状スリックまでの距離 h をとすると、カメラの最大入射半角 ξ は次の式で与えられる。

$$\tan \xi = \sigma/h \quad (11)$$

図3に示すように曲率半径 r のスリックから反射した2つのビームが CCD で干渉するためには2ビームの開き半角 ϕ_0 と ξ の間に次の関係が成立しなければならない。

$$\phi_0 \leq \xi \quad (12)$$

$$\phi_0 = \xi \quad \text{のときは, } \tan \phi_0 = \sigma/h \quad \text{であるから,}$$

式(10)は次の式で表される。

$$\phi_1 = \sin^{-1} \left[n_2 \sqrt{1 - \frac{(r-\kappa)^2}{r^2 + (r-d)^2 - 2\kappa}} \right] \quad (13)$$

$$\kappa = \frac{r-d}{\sqrt{1 + (\sigma/h)^2}}$$

式(13)を用いれば、2つの反射光が CCD で干渉する入射角度 ϕ_1 の最大値と曲率半径 r の関係を計算できる。 $\sigma = 0.1\text{m}$ 、入射光の波長を 650 nm 、スリックの厚さを $1\text{ }\mu\text{m}$ としたときの、 ϕ_1 と r の関係を図6に示す。

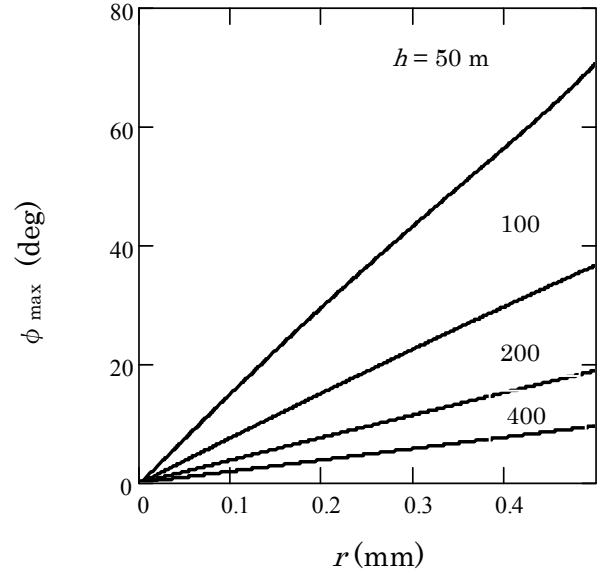


図6 スリックへの入射角度 ϕ_1 とスリックの曲率半径 r の関係

図6より次のことが明らかになる。

- (1) 波頭の曲率半径が大きいほど CCD で干渉可能な最大入射角度 $\phi_{\max}$ が大きくなる。
- (2) 海面と探査機の距離 h が短いほど $\phi_{\max}$ が大きくなる。

例えば、 $h = 400\text{ m}$ で $r = 0.1\text{ mm}$ のときは、 $\phi_{\max} = 2^\circ$ であり、被写体に入射する光は探査機自身に遮られてしまう可能性がある。一方、 $h = 100\text{ m}$ 、 $r = 0.2\text{ mm}$ のときの $\phi_{\max}$ は 15° であり、散乱した太陽光は被写体で反射して容易にカメラに取り込まれる。これより、低空探索ならば $r = \text{数 } 10\text{ }\mu\text{m}$ 、数 100 m の高空探索ならば $r = \text{数 } 100\text{ }\mu\text{m}$ 以上の曲率半径をもつ波頭においても2光束干渉をカメラで撮影できることがわかった。

3. 2 スリックの屈折率と反射特性の関係

この節では、スリックの反射率を変化させて、スリックのパワー反射率 R と入射光波長 λ の関係を計算し、実質的に2光束干渉とみなせる状態でも R と λ の関係は図2と類似の特性を示すことを明らかにする。

図1の下図に示すような簡単な3層構造において、境界面での振幅反射率が十分小さければ、干渉信号のパワーは最初の2つの反射光の干渉だけに依存することが知られている。¹⁶⁾ スリックと空気との電界反射率を r_1 、スリックと海面の電界反射率を r_2 とすると、スリックと海水の界面を1回および2回反射する1次反射光および2次反射光の電界強度比の絶対値は、光吸収率 α を無視すると、p波光では $|r_{1p}r_{2p}|$ で、また、s波光では $|r_{1s}r_{2s}|$ で与えられる。

スリックの屈折率 n_o を 1.46~1.35 まで変化させたときの $|r_{1p}r_{2p}|$ および $|r_{1s}r_{2s}|$ の入射角度依存性を図 7(a),(b)に示す。ここで、スリックの厚さは $1\mu\text{m}$ 、海水の屈折率は 1.33 とした。図 7(a)は p 波光, (b)は s 波光の電界強度比である。これより、 $n_o = 1.35$ のケースは、2 次反射光の電界強度は 1 次反射光の 1.6% 以下であり、2 光束干渉と看做される。

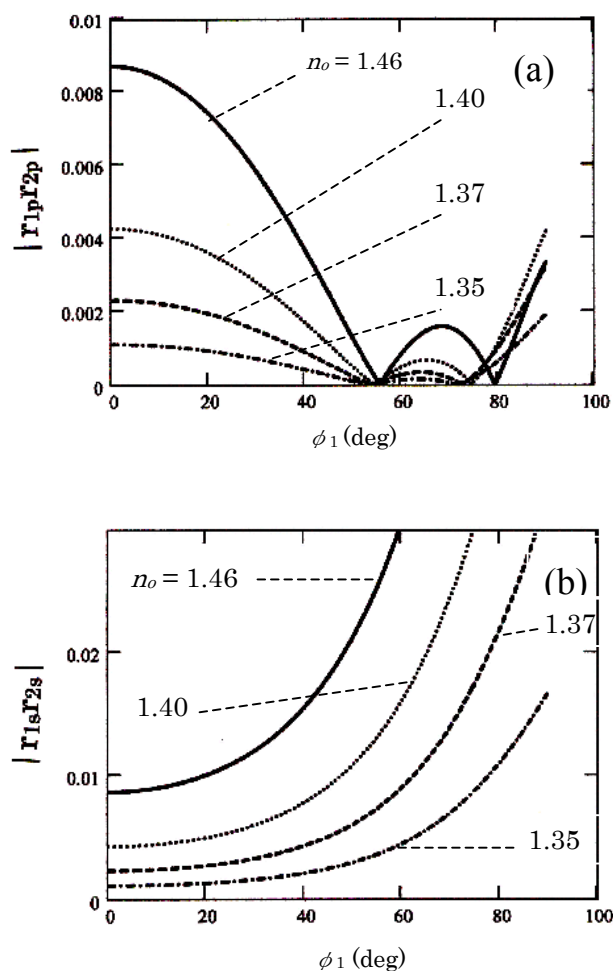


図 7 1 次反射光と 2 次反射光の電界強度の比と入射角度の関係
(a) p 波光 (b) s 波光

図 8 は、スリックの屈折率 n_o をパラメータとする、スリックのパワー反射率の入射波長依存性である。この図は、 $n_o = 1.35$ の場合もスリックの反射率の波長依存性は海水のそれよりも大きいことを示している。図 7 および図 8 の結果より、数 $100\mu\text{m}$ 以下の小さな曲率半径をもつ波頭でも、スリックによって 2 光束干渉が生まれ、多光束干渉とよく似た反射率対波長特性を示すことが明らかになった。これより、スリックカメラは、海上が穏や

かな場合はもとより、荒天のときも十分その機能を発揮できると言えるだろう。

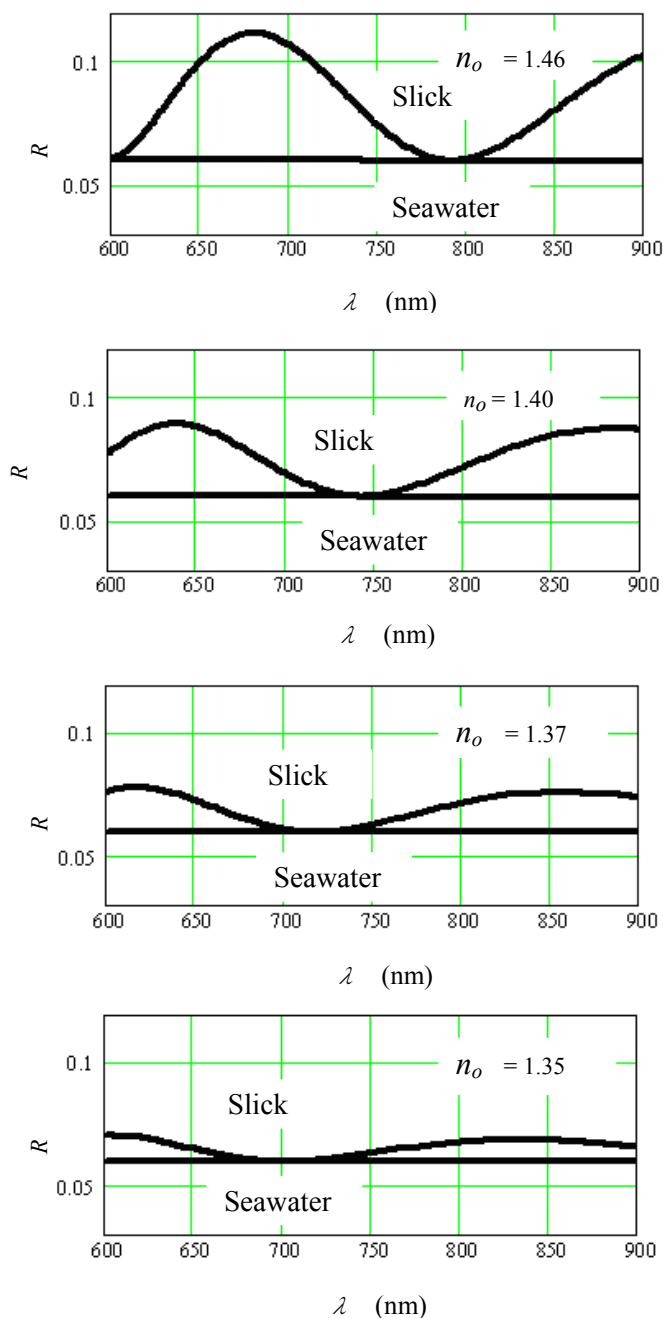


図 8 スリックのパワー反射率 R と波長 λ の関係

スリックの屈折率 n_o が 1.35 以下では多光束干渉は 2 光束干渉と看做される。曲線はスリックの反射率、直線は海水の反射率。

4. スリック画像検出カメラ

スリック画像を自動検出する方法として、並列画像処理方式および時系列画像処理方式の2つの方法を提案する。ここでは、両者の構成とその特徴を述べる。

4. 1 並列画像処理方式

並列画像処理方式は、可視光全域の情報をもつ入力光画像から2つ波長成分からなる光画像を同時に選択し、両者の差分画像を作るシステムである。このシステムは図9に示すように、ハーフミラー、2個のBPF、2個のCCD、2個の映像信号処理回路(VC)および2つの映像信号の差の絶対値をとる差信号形成回路(DIC)および2つの画像のレジストレーションを調整する機構などで構成される。VCは普通のTVカメラと同じ信号処理回路であり、自動利得制御回路(AGC)、A/D変換器、信号処理回路、同期信号発生器などから構成される。この構成は太陽光が均一のスペクトル分布を持つと仮定した理想的な場合に適した基本システムである。CCDに必要な特性は、アナログ映像信号をデジタル映像信号に変換するための量子化ビット数が大きいことである。通常のTVカメラでは8ビットの階調があれば十分であるが、スリックカメラでは8~10ビット程度の分解能を持つことが望ましい。

このシステムは、通常のTVレートあるいはそれ以上の速度で画像処理を行うことができるため、荒天の海面を撮影しても測定誤差が少ないという利点をもつ。ただし、正しい差分画像を得るためには、2つのCCDのすべての画素の配置が一致していることが望まれる。このため、精密なレジストレーション調整が不可欠である。さらに、CCDの量子効率の波長依存性や太陽光の複雑なスペクトル分布の補正も必要である。¹⁷⁾ これらの問題を解決するためには、スペクトル分布に基づく差分信号の誤差を解消する差信号補正を行わなければならない。この問題はつぎの時系列画像処理方式にも当てはまるスリックカメラの基本的課題の1つである。本論文では、照明光やCCDが理想的な均一スペクトル分布をもつと仮定して、以降の解析を進めることとする。スペクトル分布の補正方法については、別の論文で改めて議論する予定である。

4. 2 時系列画像処理方式

1個のCCDで2波長の画像を順次撮像すれば、レジストレーション調整という厄介な作業を省略することができる。これに合致するのが時系列画像処理方式である。

この方式に従うスリックカメラは、図10に示すように、垂直同期信号にシンクロして動作する可変波長フィルタ、CCDやVCを含むTVカメラ、偶数フレームと奇数フレームをそれぞれ1つずつ記録するフレームメモリFM、垂直同期信号に同期してフレームメモリに映像信号を入出力する映像スイッチ回路SWおよび差分画像信号の絶対値を形成するDIC回路などで構成される。

図10を用いて、時系列画像処理方式の動作を簡単に述べる。海面で反射した散乱光がこのカメラに入射すると、VC回路で形成された垂直同期信号をクロックとして、映像は奇数フレームと偶数フレームに分けられる。奇数フレーム画像1は映像スイッチ回路SW₁によりフレームメモリFM₁に記録される。このときSW₂はFM₂に接続されている。33ミリ秒後の次の垂直同期信号でSW₁およびSW₂は、それぞれFM₂およびFM₁に接続される。このときFM₁に記録されていた映像信号1は、別配線から供給される映像信号2とともにDIC回路に供給され、2つの画像の差分絶対値が計算され、出力信号となる。この動作は垂直同期信号にシンクロして連続的に行われる。

このシステムの要は波長可変フィルタである。波長可変フィルタの候補としては、

- ① ホモジニアス配列のネマティック液晶からなる位相変調素子とポラロイド偏光フィルムを多段接続した波長可変液晶フィルタ(LCTF)¹⁸⁾
- ② 二酸化テルル結晶やモリブデン酸鉛結晶からなる音響光学波長可変フィルタ(AOTF)¹⁹⁾
- ③ 回折格子を機械的に駆動するメカニカルなデバイス

などが挙げられる。

①はカメラレンズと同サイズの大きさを有し、カメラとの一体化も容易であるという利点をもつ。欠点は、応答速度が遅いため、水面が穏やかでないとならないことである。②は数マイクロ秒で応答できるため、実時間処理に好適である。欠点は、サイズの上限が1cm²であり、通常のカメラ光学系に馴染まないことである。③は上記2つのデバイスに比べて、選択波長幅を狭くできるという利点をもつ。欠点は、メカニカルな動作機構が必要なことと、光学系が大型になることである。

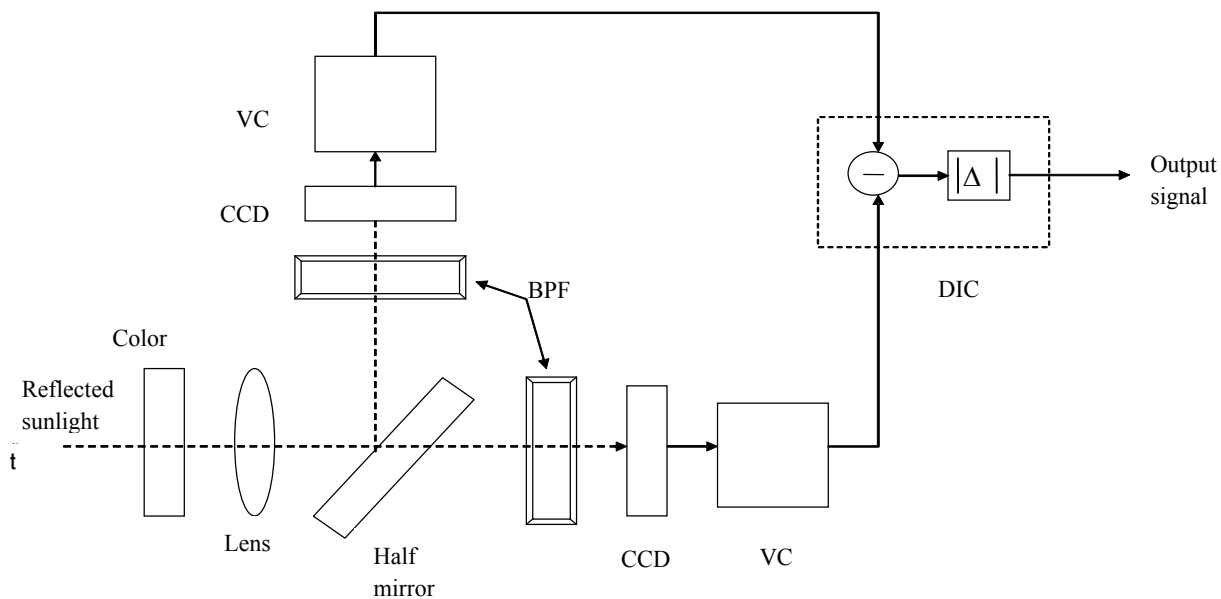


図9 並列画像処理型スリッカメラの基本構成。DICは差信号の絶対値を形成する電子回路。

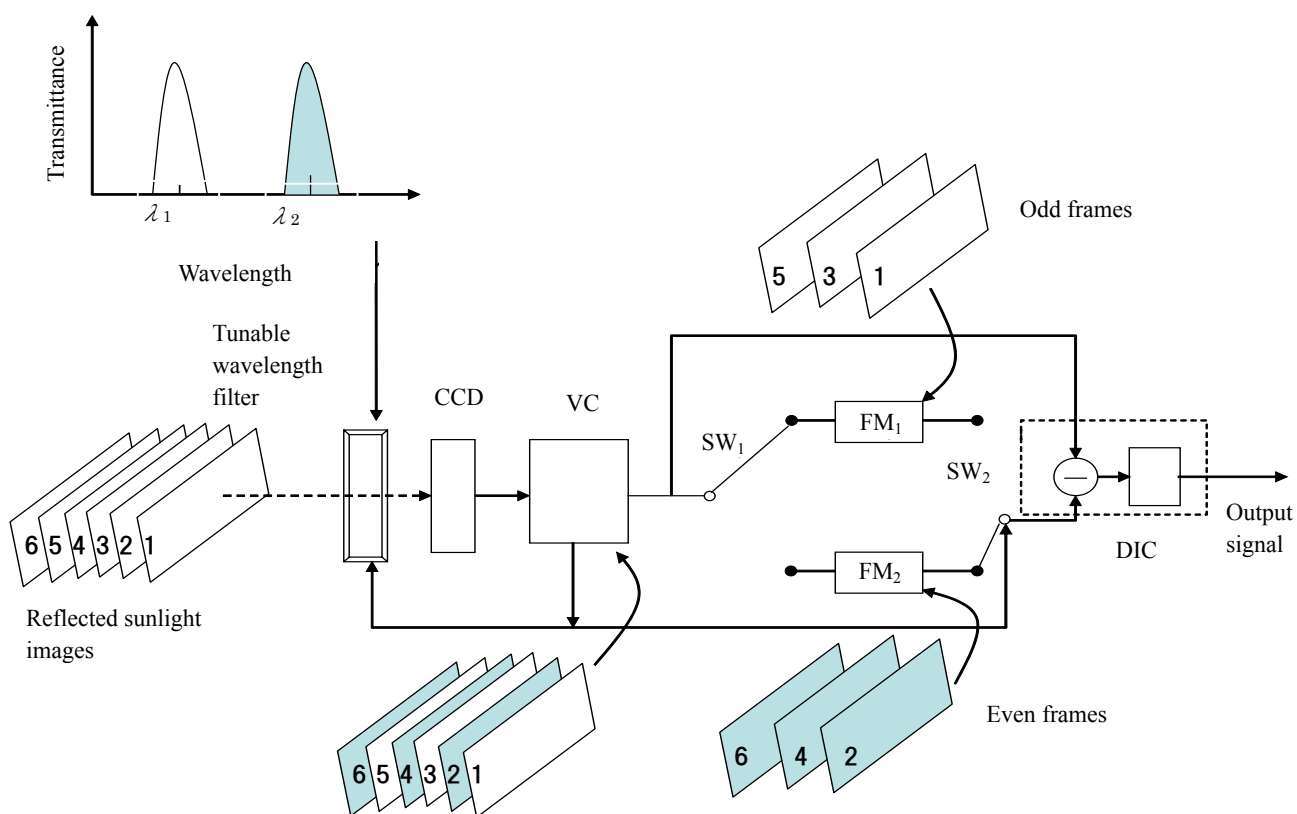


図10 時系列画像処理型スリッカメラの基本構成。波長可変フィルタは垂直同期信号をクロックとして2つの波長 λ_0 と λ_1 を選択する。FMはフレームメモリ、SWは垂直同期信号に同期して動作する映像スイッチ回路。

時系列画像処理方式の機能は、波長可変フィルタに大きく依存しているが、スリックカメラの基本特性を確認するには好都合なシステムである。本論文はスリックカメラの基本的な特性を把握することを目的としているため、これ以降は並列画像処理方式を対象として解析を続ける。

5. スペースインバリエントフィルタを用いたスリックカメラのスリック検出確率

BPF の特性を決めるパラメータは中心波長と通過波長帯域幅である。文献 1)では、図 2・図 4 に示す反射率と波長の関係から、最大反射率と最小反射率に対応する波長を BPF の中心波長と定めた。しかしこれが通用するのは、スリックの屈折率や厚さおよび光の入射角度など全てのパラメータが明らかな場合だけである。海難事故などではこれらのパラメータは何一つ分かっていないため、この方法は適さない。

そこで本論文では、1 つの BPF の中心波長 λ_1 を任意の波長に固定すること、および 2 つの BPF は同じバンド幅を持つことを仮定する。それ以外のパラメータももうひとつの BPF の中心波長 λ_2 、スリックの厚さ、光の入射角度は自由に設定する。BPF は設計者がそのパラメータを自由に設定できるデバイスであり、こう仮定しても不自然ではない。ただし、計算の見通しを良くするため、本論文では太陽の放射エネルギーおよび CCD の受光感度は波長に依存しないと仮定する。

2 つの BPF をバンド幅 W のレクタングル関数で近似し、それらの中心波長を λ_1 および λ_2 とすると、2 つの CCD に入射する無偏波反射光の規格化強度 $R_1(\lambda)$ および $R_2(\lambda)$ は以下の式で与えられる。

$$R_1(\lambda) = \frac{1}{W} \int_{\lambda_1-W/2}^{\lambda_1+W/2} [R_p(\lambda) + R_s(\lambda)] d\lambda \quad (14)$$

$$R_2(\lambda) = \frac{1}{W} \int_{\lambda_2-W/2}^{\lambda_2+W/2} [R_p(\lambda) + R_s(\lambda)] d\lambda \quad (15)$$

この反射光を図 9 のスリックカメラで 2 つの映像信号に変換すると、その映像信号のレベル差 ΔV の絶対値は、

$$\Delta V = a |R_1(\lambda) - R_2(\lambda)| \quad (16)$$

で表される。 a は CCD の量子効率や映像処理回路 VC の利得などを含む定数である。この論文では、CCD を構成するフォトダイオードはすべて同じ受光感度特性を持つと仮定しているから、レジストレーション調整が完全であるならば、 ΔV は 2 つの CCD の同一のアドレスをもつ 2 個のピクセルの差信号と考えてよい。ここで、アナログ映像信号を m ビットのデジタル映像信号に A/D 変換するときは、 ΔV が量子化ステップ以上になる条件は、下式で与えられる。

$$\Delta V = V_{\max} / 2^m \quad (17)$$

ただし、 $V_{\max}$ は映像信号の最大値である。

ΔV や $V_{\max}$ などの映像信号は入射光量および海水面やスリックの反射率に依存するため、天候や海水面の波立ちなどによって大きく変化する。天候が変化すると画面全体の映像信号が変化するため、TV カメラの AGC 回路および自動アイリスにより、その変化をある程度抑えることが出来る。しかし、海水面の波立ちやうねりによる局所的な反射率変化に伴う映像信号の変化は、これらの単純なフィードバック機構では補償することが出来ない。これは、映像信号のローカルな変化が主として海水面とスリックの反射率 R に依存することを意味している。

最大反射率は入射角度 $\phi_1 = 90^\circ$ の反射率である $R_{\max} = 1$ であるから、最大映像信号は $V_{\max} = a$ である。しかし、入射角度 ϕ_1 が 50° 以下では $V_{\max}$ に相当する反射率の最大値は高々 $R_{\max} = 0.07$ に過ぎない。2 つの数値は大きく異なり、多くの場合、信号である ΔV が小さくなり過ぎるため、雑音の影響を受け易くなる。言い換えると、 $R_{\max} = 1$ に相当する $V_{\max}$ を最大映像信号にするのは得策でない。

そこで我々は、光が $\phi_1 = 70^\circ$ の角度で入射するときの海水面の反射率を $R_{\max}(\lambda)$ で表し、最大映像信号を $V_{\max} = a R_{\max}(\lambda)$ と定めた。こう定めると、 $\phi_1 > 70^\circ$ では映像信号は飽和するため、スリックと海水の区別が出来なくなり、エラーの原因になる。本章および第 6 章のスリック発見確率の計算は、このエラーも含んでいる。

$R_{\max}(\lambda)$ を用いると式(13)は、次の式で表される。

$$\frac{|R_1(\lambda) - R_2(\lambda)|}{R_{\max}(\lambda)} \geq \frac{1}{2^m} \quad (18)$$

波長 λ , 入射角度 ϕ_1 , スリットの厚さ d , BPF のバンド幅 W などを変数として(18)式を計算すれば, 各パラメータの変動範囲におけるスリット検出確率を計算することができる。我々は, $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ に固定し, リーズナブルな範囲でパラメータを変化させて確率を求めた。全てのパラメータをきめ細かく変化させると膨大な計算量になるため, ここでは, 人為的に決定できるパラメータは少なめに選び, 制御不能なパラメータを多めに变化させることにした。具体的には, バンド幅 W を $1, 5, 10, \dots, 30 \text{ nm}$ から, また量子化ビット m を $1, 2, \dots, 8$ からそれぞれ選んだ。また, λ_1 を $600 \text{ nm} \sim 900 \text{ nm}$, d を $0.01 \text{ } \mu\text{m} \sim 5 \text{ } \mu\text{m}$, ϕ_1 を $0, 1, 2, 3, \dots, 89^\circ$ まで変化させて, 式(18)を満足するスリット発見確率 P を求めた。

図 11 は, BPF のバンド幅を $W = 30 \text{ nm}$ のスペースインバリエント BPF を用いた発見確率 P とスリット厚さ d の関係である。図 12 は, バンド幅 W とスリット発見確率 P との関係である。両図のパラメータは, 量子化ビット数 m である。これらの図から以下のことが分かる。

- (1) 発見確率 P は m の増加とともに増大する。
- (2) P は d に依存し, m が小さいときはその依存性が高い。
- (3) $m = 8$ の場合でも $P < 90\%$ であり, 一回の観測ではスリットを見落とし易い。
- (4) BPF のバンド幅 W が大きくなると発見確率 P は低下するが, その変化はごく緩やかである。

これらの結果から 2 つの BPF を用いただけでは, ビット数を大きくしても 1 回の観測でスリットを確実に発見することは困難であるということが分かった。

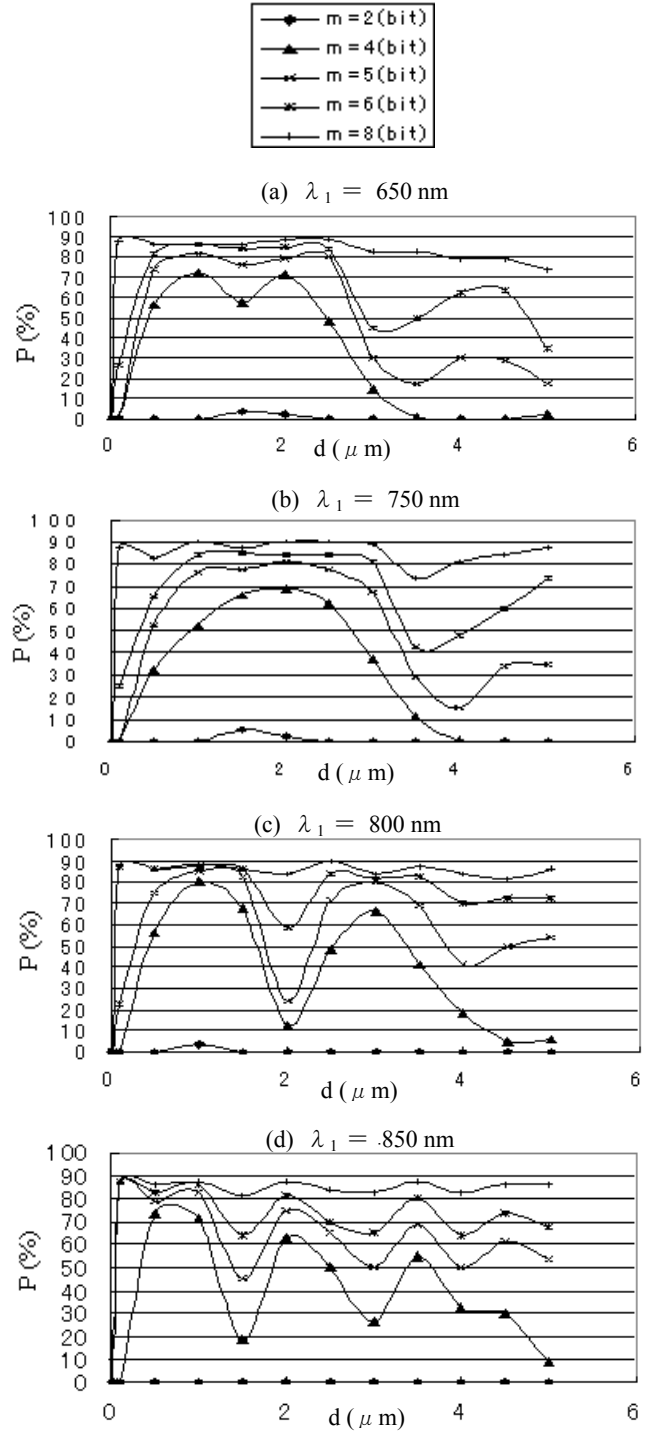


図 11 スペースインバリエントフィルタ ($\lambda_0 = 700 \text{ nm}$) を用いたスリットカメラのスリット検出確率 P とスリット厚さ d の関係。パラメータ m はカメラの量子化ビット数。
 (a) $\lambda_1 = 650 \text{ nm}$ (b) $\lambda_1 = 750 \text{ nm}$
 (c) $\lambda_1 = 800 \text{ nm}$ (d) $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$

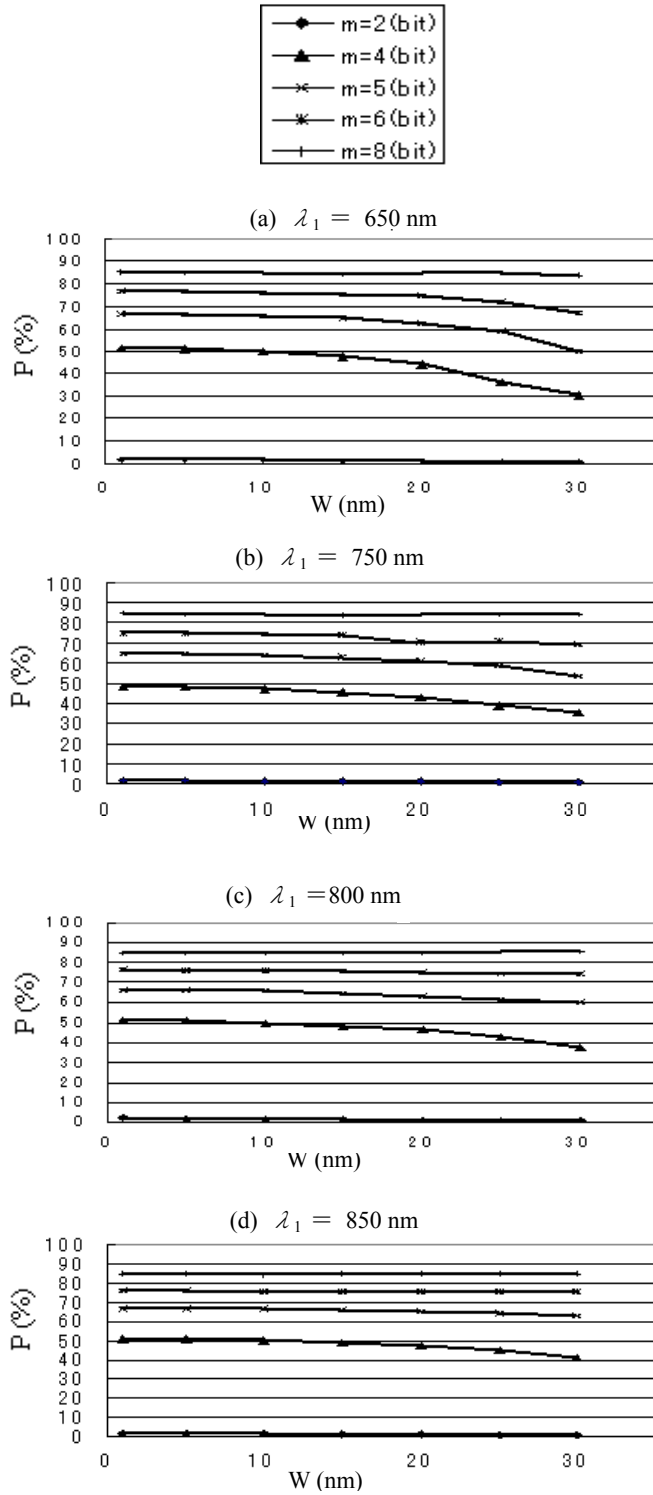


図 12 スペースバリエーションフィルタ ($\lambda_0 = 700 \text{ nm}$) を用いたスリックカメラのスリック検出確率 P とフィルタの通過帯域幅 W の関係。パラメータ m はカメラの量子化ビット数。

(a) $\lambda_1 = 650 \text{ nm}$ (b) $\lambda_1 = 750 \text{ nm}$
(c) $\lambda_1 = 800 \text{ nm}$ (d) $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$

6. スペースバリエーション波長フィルタを用いた場合のスリック発見確率

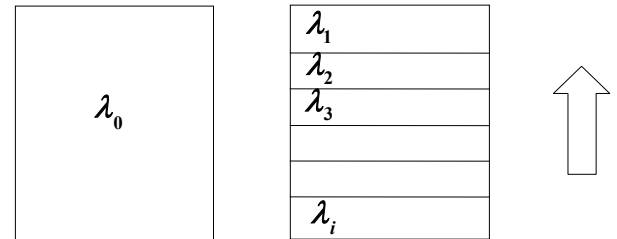
スリック検出確率をさらに向上させるには、中心波長の異なる複数の BPF を同時に用いればよい。ここでは、2 つの BPF の一方を図 13 に示すようなスペースバリエーション波長フィルタ (SBPF) に換えることを提案する。BPF はフィルタの全領域で同じ波長特性を有しているが、SBPF は、1 枚の波長フィルタを中心波長の異なる i 個の BPF に分割した構成をもつ。海上におけるスリックの探索では航空機やヘリコプターが用いられるため、探索航空機の進行方向と直交するように SBPF の領域を設ければ、映像は航空機で i 個の BPF を通過するから、 i 台のスリックカメラを用いたことと等価になり、スリックの検出確率は大幅に向上する。

これを確かめるため、中心波長 $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ の BPF と中心波長 $\lambda_1 = 600 \sim 850 \text{ nm}$ の i 個 ($i = 2 \sim 8$) の BPF からなる SBPF を用いた場合の発見確率 $P(d)$ とスリック厚さ d の関係を計算し、次の式を用いて SBPF を用いた場合の発見確率 P_s を計算した。

$$P_s = 1 - [1 - P_1(d)] \cdot [1 - P_2(d)] \cdots [1 - P_i(d)] \quad (19)$$

計算結果の一例を図 14 に示す。この図より、以下の結論を導くことが出来る。

- (1) $m \geq 4$ では、SBPF の分割数 i が増加すると、発見確率 P_s は急激に増大する。
- (2) $m \leq 3$ では、 $P(d)$ が小さいため、 i が増加しても P_s はそれほど改善されない。



Wavelength
filter

Space-variant
Wavelength
filter

図 13 スペースバリエーションフィルタの一例。 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ はバンドパスフィルタの中心波長。矢印はカメラの移動方向。

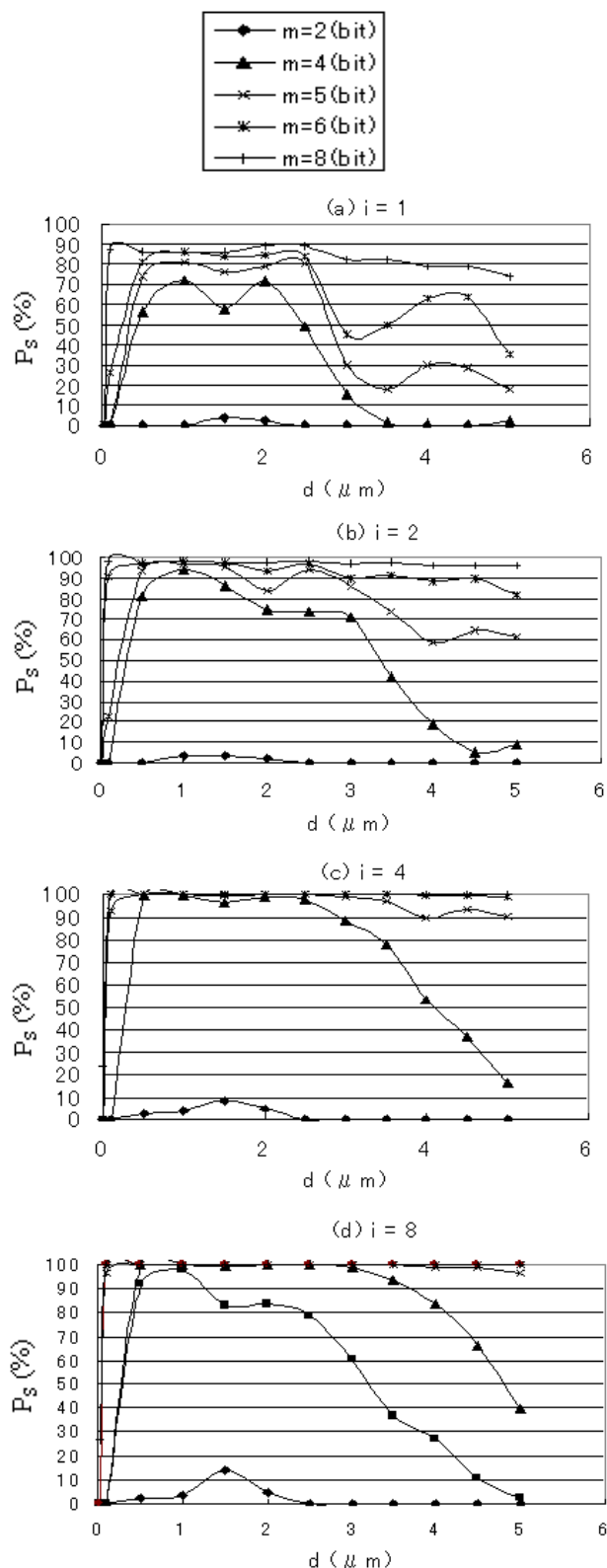


図 14 スペースバリエーションフィルタ (中心周波数 λ_i) を用いたスリックカメラのスリック発見確率 P_s とスリック厚さ d の関係。パラメータ m はカメラの量子化ビット数。(a) $i=1$ ($\lambda_1=650$ nm), (b) $i=2$ ($\lambda_1=650$ nm, $\lambda_2=800$ nm), (c) $i=4$ ($\lambda_1=600$ nm, $\lambda_2=650$ nm, $\lambda_3=750$ nm, $\lambda_4=800$ nm), (d) $i=8$ ($\lambda_1=600$ nm, $\lambda_2=625$ nm, $\lambda_3=650$ nm, $\lambda_4=725$ nm, $\lambda_5=750$ nm, $\lambda_6=800$ nm, $\lambda_7=825$ nm, $\lambda_8=850$ nm)。

7. 結 論

海面に浮かぶスリックの映像を自動的に抽出するスリックカメラを提案した。スリックカメラは波長の異なる 2 つの光画像を同時に処理する並列画像処理方式と 2 画像を時間順に処理する時系列画像処理方式に分類される。この論文では、動画画像処理に適した並列画像処理方式について検討した。時系列画像処理方式は、スリックカメラの基本性能を確認する基礎実験に適している。本論文ではさらに、2 つの BPF がそれぞれ 1 つの中心波長しか持たないスペースインバリエーションフィルタ方式と、一方の BPF が複数の中心波長を持つスペースバリエーション方式の 2 種類について検討した。それぞれのスリック画像検出確率 P の計算から、スペースバリエーション方式が格段に優れていることが明らかになった。 P の増大を図るには、量子化ビット数 m を少なくとも 4 より大きくすることが非常に有効であることも分かった。

このカメラの応用は海難救助だけに留まらない。例えば、飲料水の安全確保、工業排水の汚染観測、ダムや湖水の汚染の監視、タンカーからの重油の流出や船舶からの廃液の不法投棄の監視など様々な環境問題の改善に役立つであろう。

今後は、時系列画像処理方式によるスリックカメラの基本性能の確認実験、並列画像処理方式のスリックカメラの試作および動画画像処理の基礎実験、海あるいは湖沼などにおけるフィールド実験の順に研究・開発を進める予定である。

参考文献

- 1) N. Saito, K. Takizawa and T. Kurokawa, (Interference-enhanced imaging for detecting oil layer floating on the water", Sensors and Actuators A, 109, p.195-201 (2004).
- 2) T. Budd, "Observer report-response to the oil spill resulting from the sinking of the prestige", 10th Int. Oil Spill Conf., Brisbane, Australia, 23-25 (2004).
- 3) 19 Nov. 2002, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/2491537.stm>.
- 4) 25 Nov. 2004, http://www.cbc.ca/story/canada/national/2004/11/24/oil_spill-041124.html.
- 5) <http://www.geo.utexas.edu/courses/302p/ThisWeeksNews/SecondSlick.tm>.
- 6) M. Crosetto, E. Biescas, S. Charron, G. Peigne and D. Tarchi, "Development of an airborne multisensor system for oil spill detection and control", Int. Archives of

Photogrammetry and Remote Sensing, Commission II,
Xi'an, 34, Part2, p.20 (2002).

- 7) F. Salem and M. Kafatos, "Hyperspectral image analysis for oil spill mitigation", Proc. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, Vol. 1, p. 748 (2001).
- 8) C. E. Brown, R. Marois and M. F. Fingas, "Airbone oil spill sensor testing: progress and recent developments", Proc. 2001 Int. Oil Spill Conf. Tampa, Florida USA, p. 917-921 (2001).
- 9) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/05/050708_html.
- 10) 青木 隆, 平岡睦久, 菊池智文, 「環境水質(湖沼・河川・上水)を見守るセンサ技術」, 富士時報, 74, 8, p.444-448 (2001).
- 11) 加藤孝夫, 金子雅雄, 居安巨太郎, 「上下水道分野における制御・計測技術」, 東芝レビュー, 56, 10, p.18-22 (2001).
- 12) 宇田道隆, 「海」, 岩波新書, p.80 (1969).
- 13) F. A. Jenkins and H. E. White, Fundamentals of Optics, (McGraw-Hill Kougakusha, LTD. Tokyo) 4th ed., p.514, 1976.
- 14) M. Born and E. Wolf: Principle of Optics, (Cambridge Univ. press, 1999) 7th ed., p. 42.
- 15) V. M. Zolotarov, V. H. Morozov and E. V. Smirnova: Optical Constants of Natural and Artificial Media, (Ximia, Leningrad, 1984) p. 21.
- 16) E. Hecht: Optics, (Addison-Wesley Longman, Inc., 1998) 3rd ed., p. 393.
- 17) K. Takizawa and Y. Yoshida: Proc. 33rd Meet. Lightwave Sensing Technology, LST33-1, , [in Japanese] p.69. 2004
- 18) <http://www.phototechnica.co.jp/pdf/cr/varispec.pdf/>.
- 19) <http://www.sciner.com/Acousto-Optics/AOTF.htm>.