

動きと屈折を利用した 透明非剛体物体の形状復元

Shape Recovery of Unrigid Transparent Object
using Refraction and Motion

村瀬 洋

Hiroshi MURASE

NTT 基礎研究所

NTT Basic Research Laboratories.

Abstract:

This paper describes an algorithm to recover the surface shape of a moving unrigid transparent object such as water. The pattern behind the object is apparently distorted by the refraction at the moving object surface. The algorithm is based on the optical and statistical analysis of the distortion. It consists of following parts. (1) Extraction of optical flow, (2) averaging of optical flow sequence of each point. (3) calculation of the surface slant using optical characteristics, (4) recovery of the surface. The algorithm is applied to synthetic and real images to demonstrate its performance.

1. まえがき

池や川などで水面を通して水中や水底の物体像を観察すると、波によってその像は揺らいで見えることが知られている。人間はこれらの揺らぐ連続映像を見て物体像を推定したり、その揺らぎから水の表面形状をおおまかに類推することができる。これは、人間が自然環境での体験によって水面で物体像は歪むという物理法則やその統計的な性質を知っているためである。本研究ではこの現象に着目して、水面を通して見た揺らぎ動画像から物理的・統計的な性質を利用して水面の表面形状を復元し、同時に水底の画像をも推定する手法を提案する。

二次元画像データから画像中の物体の三次元構造や表面形状を復元する問題はCV (Computer Vision)の基本テーマ(1), (2), (3)である。従来報告されている研究の一例を以下に示す。静止画像を対象としたものとして、Horn, B. K. (4)らは物体の反射特性を、Witkin, A. P. (5), Aloimonos, J. (6)らは面積や長さの変化や変形を利用して三次表面形状を復元する手法を報告している。また時系列画像を対象としてSugihara (7), Kanatani (8), Ullman (9)らは剛体仮定を利用して三次元構造を復元する手法を報告している。

本報告は水等の透明非剛体物体の表面形状を時系列画像を利用して復元する手法について述べたもので

ある。新規性としては透明体を対象とし光学(屈折)現象を利用した点と時間に関する統計的な性質を利用した点にある。物体の剛体性仮定は用いていない。

一方、関連する研究として画像生成の立場からレイトレーシング等(10), (11)を用いて海等の波の画像を表現する手法がある。本研究では、これらとは逆に光学的現象を利用して画像から3次元形状を復元しようとするものである。また、自然観測の立場から波を対象とした画像計測(12), (13)は着目されている。しかし、それらは画像から得られる大局的な統計情報、例えば波の平均的な波数や波長を得る程度である。

本研究には、波の形状の復元と水底の画像の推定という2つの問題が含まれている。このうち一方が既知ならば他方を実現することは比較的容易である。しかし、実際にはこの両者、つまり波の形状も水底の画像も同時に未知である場合が通常である。ここではこの両者を同時に解決することを狙う。

本手法には以下の工学的な応用がある。

- ①受動的に観測した時系列画像から波の形状が復元できる。これは物理現象の計測という意味で価値がある。
- ②波により揺らぐ湖や川の底の映像を見やすい画像に変換することができる。



図1 (a) オリジナルパターン (girl) (b) 観測画像の例

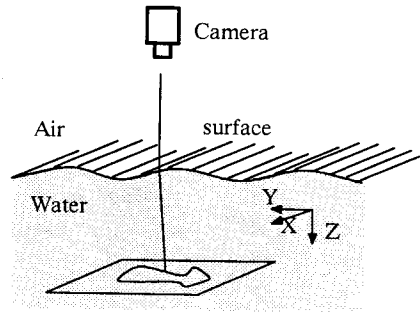


図2 水底パターンの観測系

2. 対象

図1(a)は画像データベースSIDBAの中の「girl」のパターンである。この絵を水槽の底に沈め、図2のように波立つ水面の上から見ることを想定する。今仮に波の形状が横方向に進行する正弦波とすると観測されるパターンの1つは図1(b)のように歪を生じる。本研究の目的は、時系列として得られるこの揺らぎ画像から図1(a)のパターンを推定したり波の形状を推定したりすることにある。

第一段階として問題を簡単にする為に幾つかの条件を仮定した。以下に本研究で置いた仮定をまとめる。例えば、水底のパターンと観測画像の間で各点が1対1に対応する程度に波の振幅は緩やかであるとす。但し、図1(b)で示した図は縮退を含む例であり現段階では扱わない。

仮定：

- ・ 緩やかな波 (画像に縮退が発生しない、
また水深に比較して波の振幅は無視できる)
- ・ 波の傾きの長時間的な恒常性
(波の表面の傾きの平均はゼロ (水平) である)
- ・ 平行投影 (十分遠方にカメラがある)
- ・ 焦点のぼけはない (ピンホールカメラ)
- ・ 水底のパターンは動かない

既知の条件：

- ・ 水面から水底までの距離 h 、
- ・ 水の屈折率 n
- ・ 水底を水上から捉えた画像の時系列 $f(i, j, t)$
(時刻 t の (x, y) 座標の値)、

3. 基本方針

基本方針として、水は特定の屈折率を持つ透明物体であることと波の傾きの長時間的な恒常性以外の物理的な性質は用いないことにする。静かな水面に石を投込んだり水の表面に風が吹いたりすると表面に複雑な波ができる。一般的に液体に発生するこのような波は流体の動きの問題であり種々の物理的な性質がわかっ

ている⁽¹⁴⁾。例えばナビヤーストックスの方程式によって波のダイナミクスが記述されることが知られている。しかし、その境界条件を明らかにすることは実際には困難である。つまり、ここではこれら適用領域を制限するような知識は用いない。

一方、光学的に利用可能な知識としては屈折、反射、偏光、色分散等が考えられるが、まずここでは屈折の法則を利用する。これはスネルの法則として一般に知られている。

本手法の原理を図3に示す。平行投影を仮定している場合には、図3に示すように観測画面中で本来P点に位置する画像小領域が水面の勾配により屈折現象によりQ点で観測されることになる。ここで、 n を屈折率、 \vec{N} を表面の法線ベクトル、 \vec{r} を空気中の視線方向の単位ベクトル、 \vec{s} を水中の視線の単位ベクトル、 α を入射角、 β を屈折角、 $\vec{\Delta}$ をQ点からP点に向かうベクトルとすると、スネルの法則は次のベクトル方程式、

$$n \cdot \vec{r} - \vec{s} = \vec{N} (n \cdot \cos(\beta) - \cos(\alpha)) \quad (1)$$

で表現される。一方、 $\vec{\Delta}$ は、

$$\vec{\Delta} = h \cdot \vec{r} / (\vec{z}, \vec{r}) - h \cdot \vec{z} \quad (2)$$

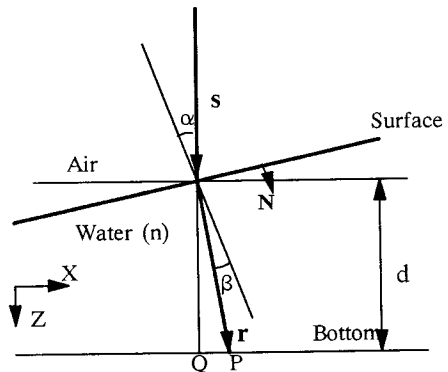


図3 屈折の光学法則

で表現される。ここで、式(1),(2)から構成される連立ベクトル方程式を解けば良い。具体的には、各ベクトル変数の値を以下のように置いて各未知数を求める。

$$\vec{s} = (0, 0, 1) \quad (3)$$

$$\vec{r} = (r_x, r_y, r_z) \quad (4)$$

$$\text{但し } r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 = 1 \quad (5)$$

$$\vec{z} = (0, 0, 1) \quad (6)$$

$$\vec{N} = (p, q, 1) / K \quad (7)$$

$$\text{但し } K^2 = p^2 + q^2 + 1 \quad (8)$$

$$\vec{\Delta} = (d_x, d_y, 0) \quad (9)$$

d_x, d_y を計算すると以下ようになる。

$$d_x = r_p \frac{\sqrt{n^2 - k^2 + 1} - 1}{\sqrt{n^2 - k^2 + 1} - 1 + k^2} \quad (10)$$

$$d_y = r_q \frac{\sqrt{n^2 - k^2 + 1} - 1}{\sqrt{n^2 - k^2 + 1} - 1 + k^2} \quad (11)$$

ここで $K \doteq 1$ (水面の傾斜が十分緩やか)とすると、

$$d_x = h \cdot p \cdot (1 - 1/n) \quad (12)$$

$$d_y = h \cdot q \cdot (1 - 1/n) \quad (13)$$

と近似される。平行投影の場合には、このずれ Δ が水底の画像とのずれになる。つまりこの Δ により画像が揺らぐ訳である。

4. 復元アルゴリズム

4. 1 アルゴリズムの概要

水底の画像を推定すると共に水面の形状を復元するアルゴリズムを以下の4ステップから構成した。①オブティカルフローの抽出、②オブティカルフローセンターの決定、③傾きベクトル場の作成、④形状復元。

各ステップの詳細は次節以降の合成画像を用いた実験の中で説明する。

4. 2 合成画像を用いた実験

合成画像を用いた実験を通してアルゴリズムを順次



Frame 1

Frame 2



Frame 3

Frame 4

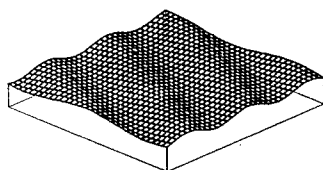
図5 波の屈折により変形した生成画像

説明して行く。画像の合成にはレイトレーシング手法を用いた。対象の一例として以下に示す画像の場合を考える。図4に示すように水の表面に斜め方向から正弦波の形状の波が進行するとする。ここで波の最大傾斜5度、波長16.6cm (50cmに3周期)、波の進行速度を2.1cm/Frame (8frameで1周期になる)、水底のパターンは「Girl」、画像の1辺を50cm、水深50cmの場合を想定する。視点は十分上方であり、平行投影の近似が成立する範囲とする。本手法によって得られた動画像(フレーム1, 2, 3, 4)を図5に示す。

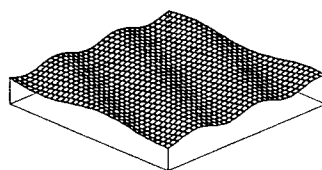
4. 3 オプティカルフローの抽出

オブティカルフローはある時刻の画面上のある1点が次の時刻(一定時間後)にどこに移動しているかを表現した量であり、各点での速度に対応するものである。その計算手法としてはグラージェント法(15)、相関法(16),(17)、トークントラッキング法などが知られている。ここでは対象に応じてこれらの従来手法を改良して利用することにする。

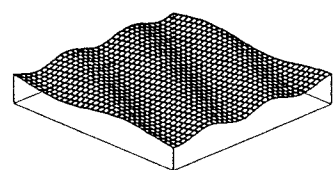
本実験で使用した合成画像の場合には、相関的な特徴が時系列画像の中で比較的保存されているという理



Frame 1



Frame 2



Frame 3

図4 画像合成で用いた波の例

由により手法的に単純な相関法を用いた。具体的には、第tフレームの(i, j)の点の近傍矩形(1辺の長さa)と、第t+1フレームの(i+i', j+j')の近傍矩形との相関値、

$$d(i', j') = \sum_{k, l} \left| f(i+i'+k, j+j'+l, t+1) - f(i+k, j+l, t) \right| \quad (14)$$

を求めこの値が最小となる(i', j')を時刻 t の (i, j) の点のオプティカルフローとする。本手法によって求めたオプティカルフローの一例を図6に示す。

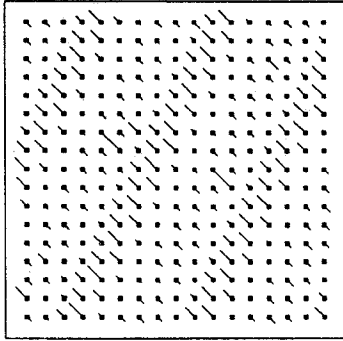


図6 オプティカルフローの抽出例

4.4 オプティカルフローセンター

本節では、本手法の要となるオプティカルフローセンターの定義と、それを用いた水底パターンの復元方法について述べる。

ある時刻tの観測画像中のある点をPtとする。点Ptの軌跡をオプティカルフローを用いて時間と共に追跡し、その座標値系列の平均値を求める。これを点Ptのオプティカルフローセンターと名付けることにする。この点は、時間的に平均した傾きをもつ水面を通して観測される点Ptの位置に対応する。一般的に水面の傾きの時間平均値はゼロ(水平状態)に収束する。例えば、池などの水面に立つ典型的な波の形状は、幾つか異なる波長の正弦進行波が重畳したもので表現できることが知られている。つまり、

$$f(x, y, t) = \sum_i a_i \cdot \sin(u_i \cdot x + v_i \cdot y - \omega_i \cdot t) \quad (15)$$

で表現される。ここで (u_i, v_i) は波数ベクトル、 ω_i は角速度である。ある(x, y)での表面の傾き(p, q)は

$$p = -\frac{\partial f}{\partial x} = -\sum_i a_i \cdot u_i \cdot \cos(u_i \cdot x + v_i \cdot y - \omega_i \cdot t) \quad (16)$$

$$q = -\frac{\partial f}{\partial y} = -\sum_i a_i \cdot v_i \cdot \cos(u_i \cdot x + v_i \cdot y - \omega_i \cdot t) \quad (17)$$

となり、傾きの時間平均値(p', q')は

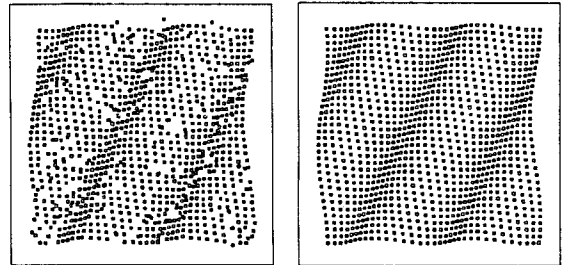
$$p' = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (18)$$

$$q' = \frac{1}{T} \int_0^T q dt \quad (19)$$

となる。ここで、全ての ω_i がゼロでないと仮定すると、Tが大きくなるに従って p', q' は明らかにゼロに収束する。但し、水の連続的なふきだしや、表面上に一方方向に流れる風などの影響により水面にランダムで無い力が加わったような特殊な状態では、式(16), (17)における ω_i がゼロとなる項が存在する。この場合には、 p', q' はゼロに収束しないので、以降の処理である形状復元の精度は悪くなる。

前述のシミュレーション画像を用いてオプティカルフローセンターを求めた例を図7(a)に、理論的に正しいオプティカルフローセンターを図7(b)に示す。若干の違いはオプティカルフローが完全に抽出されていないためである。

オプティカルフローセンターを利用することにより水底のパターンを復元することが可能となる。ある時点tの画像の各点をその点のオプティカルフローセンターにマッピングして得られる画像は取りもなおさず静止した(水平状態の)水面を通して観測される画



(a) (b)

図7(a) オプティカルフローセンターの計算値
(b) その理論値



図8 水底のパターンを復元した画像

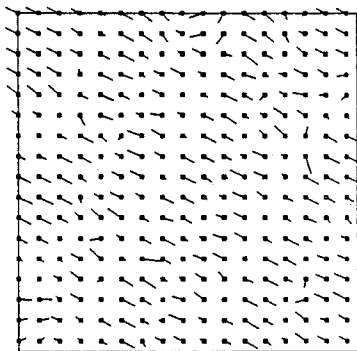


図9 傾きベクトル場

像であり、平行投影の場合には水底の画像である。シミュレーション画像の場合の復元画像を図8に示す。画像の歪はオプティカルフローセンターが正しく抽出されていないために発生した。

4. 5 傾きベクトル場

ある時刻 t のある点 P_t (画素上での座標値を (x_t, y_t) とする) と、その点に関するオプティカルフローセンター P' (座標値を (x', y') とする) が得られれば、式(10)、(11)により、その座標値 (x_t, y_t) での水面の傾きベクトル (面に対する法線ベクトルの方向) $(p_t, q_t, 1)$ が計算される。具体的には、時刻 t の点 (x_t, y_t) での傾きは、

$$p_t = (x_t - x') / ((1 - 1/n) \cdot h) \quad (20)$$

$$q_t = (y_t - y') / ((1 - 1/n) \cdot h) \quad (21)$$

である。

実際には全ての画素に対応する点でオプティカルフローやオプティカルフローセンターを求める訳ではない。適当に間引いた点でオプティカルフロー及びオプティカルフローセンターを計算し、各画素の傾きベクトルは、その近傍4点で求めた傾きベクトルの重み付き平均によって求めた。

フレーム1の画像での各点での傾きの方向 (p_1, q_1) を表示した例を図9 (見やすくするために間引いて表示した) に示す。この図は2.5D表現とも呼ばれる。

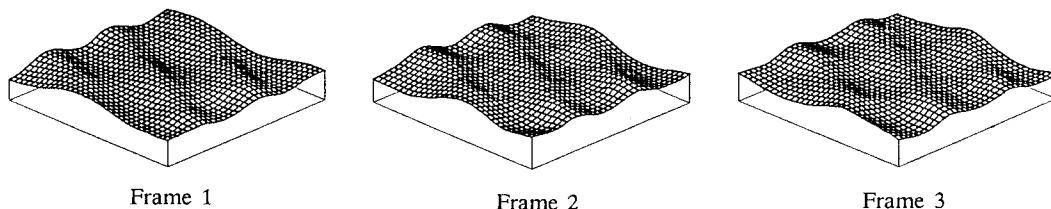


図10 復元された波の形状

4. 6 形状復元

各点での表面の傾きベクトルが与えられれば、これを積分することにより表面の形状が与えられる。ここでは単純に台形公式を用いて積分した。得られた表面形状(フレーム1,2,3)を図10に示す。表示は見やすくするためにZ方向に2倍に拡大してある。

5. 実データによる実験

5. 1 データ収集

実データをTVカメラを用いて採集した。まず、計測機により一辺2mmの黒色の矩形を紙面上にランダムに分布させたパターンを発生させ、これを水槽の底面に張り付ける。水槽に水を注ぎ、水面の深さ (h) を25cmとする。この様子は池の底に黒い石がランダムに分布している状態と同様の状態である。波は水槽の水面を棒でかき回して生成させた。カメラは民生用ビデオカメラを用い、カメラから水面までを1mとした。画面分解能は512x480である。また、画面上の1画素が水底のパターンの0.5mmになるように焦点距離を固定して使用した。毎秒30フレームのレートで3秒間、つまり90フレームの動画を収集した。

5. 2 前処理

実データの場合、カメラの特性や、照明の偏り、照明光の水面による屈折などが原因でシェーディングが発生する。そこで、まず前処理としてシェーディング補正を行う。手順は、各フレーム毎に十分大きなガウシアンフィルターをかけた画像を作成し、これを30フレーム分平均しこれをシェーディング補正画像とした。原画像からシェーディング補正画像を減じたものを補正後の画像とする。図11(a),(b)にシェーディング補正前の画像(フレーム1,2)を、図11(c)にシェーディング画像の例を、図11(d)に補正後の画像(フレーム1)の例を示す。

5. 3 オプティカルフローの抽出

以下の手順でオプティカルフローを求めた。まず、特徴点として黒画素の塊を選び、これを手がかりとして黒い領域の追跡を行う。具体的には、まず2値化を行い、黒の画素数が一定値以上の領域を追跡する。こ

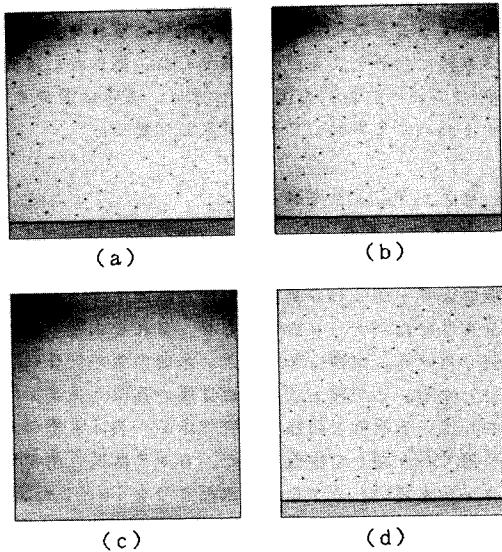


図11 (a),(b) 観測画像(フレーム1、2)、
(c) シェーディング画像、
(d) シェーディング補正後の画像

れにより求めたオプティカルフローを目視によりチェックしたところ誤りは存在しなかった。抽出したオプティカルフローの例(フレーム6)を図12に示す。

5.4 オプティカルフローセンターの抽出

画像上のある点をオプティカルフローを用いて時間的に追跡した結果(20フレーム分)を図13に示す。この図から実際の波の例でも点の軌跡はある一点の周りに変動することが分る。次に、オプティカルフローセンターを4.4で述べた手法により計算する。結果を図14に示す。これは、水底に実際にひろがる黒点のパターン)を表現している。

5.5 傾きベクトル場の計算

オプティカルフローセンターとオプティカルフローを用いて、4.5の手法に従って傾きベクトル場を作成する。生成した例(フレーム6)を図15に示す。

5.6 形状の復元

実際のデータを用いて計算した傾きベクトル場から4.6の手法を用いて表面波の形状復元を行った。図16は波のフレーム5からフレーム7までの表面形状を復元した例である。

実画像に対しても水面の形状が復元されることを確認した。本手法は受動観測系を仮定した波の形状復元に有効である。

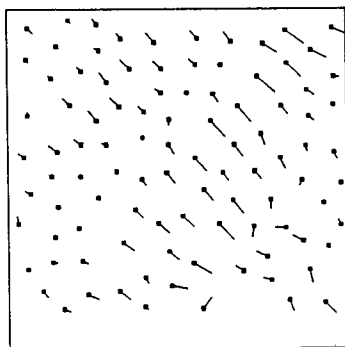


図12 オプティカルフローの例

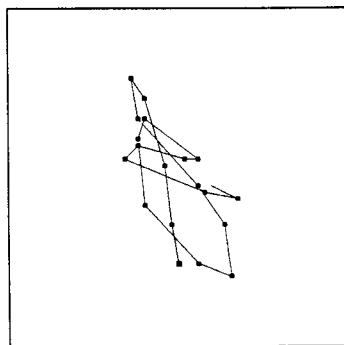


図13 パターン上のある点の軌跡

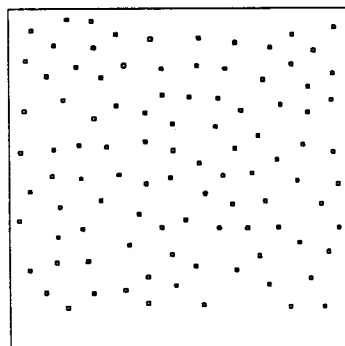


図14 オプティカルフローセンターの例

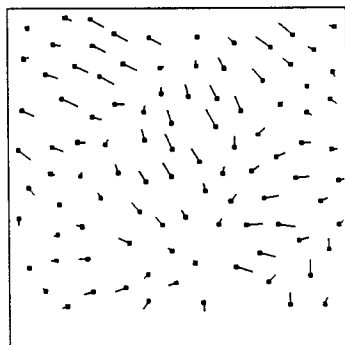


図15 傾きベクトル場

6. 考察

考察として誤差を評価する。誤差の主な原因には、①オプティカルフロー抽出の失敗、②オプティカルフローセンターの計算誤差が考えられる。①の誤差についてはより良い計算アルゴリズムの開発が必要である。

ここでは②のオプティカルフローセンターの計算誤差について評価する。この誤差はオプティカルフローセンターを十分長い時間平均することにより減少させることができる。実データを用いた実験により誤差を実際に評価したのでその結果を以下に示す。

オプティカルフローセンターの計算に第1フレーム($t=1$)から現在のフレーム(形状を復元しようとするフレーム)までの情報しか利用できない場合を仮定する。この場合に、5. で用いたデータを用いて表面形状を復元した例を図17に示す。図17からも分るように、第1フレームではある点のオプティカルフローセンターがその点に一致するため傾きは検出されずに水平形状しか得られない。しかし、第3フレーム、第5フレームとフレーム数が増えるに従って、徐々に形状がはっきりしてくる。つまり、誤差が減少してくる。

実例をもとに各フレーム毎の誤差を計算した。第 t フレームの誤差 S_t は、時刻 t 、座標値 (i, j) の標準表面形状の Z 値を Z_{tij} 、本手法により求められた表面形状の Z 値を Z'_{tij} とすると、

$$S_t = \frac{1}{M} \sum_{ij} |Z_{tij} - Z'_{tij}| \quad (22)$$

但し M は i, j の総数

で評価した。但し、標準の表面形状とは十分長い時間

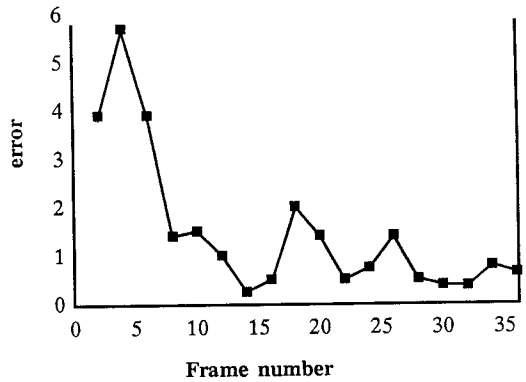


Figure 18: Shape restoration error

図18 形状復元誤差

をかけてオプティカルフローセンターを計算して、それから表面形状を復元した場合を言うことにする。その結果を図18に示す。振動を繰り返しながら誤差が低下していくのがわかる。最初に一旦誤差が増加した原因は以下のとおりである。オプティカルフローは基本的には振動を繰り返しているが、オプティカルフローセンターが最終的な値より一旦最初に逆方向に評価されるような点がある。このような点が多数存在したためである。

本手法によれば水底パターンの推定にもオプティカルフローセンターを利用している。そのため初期段階では底面のパターンの推定誤差が大きくなっているが、時間とともに次第に誤差は低下していくことになる。

7. むすび

波の立つ水面を通して水中や底面の物体像を見ると

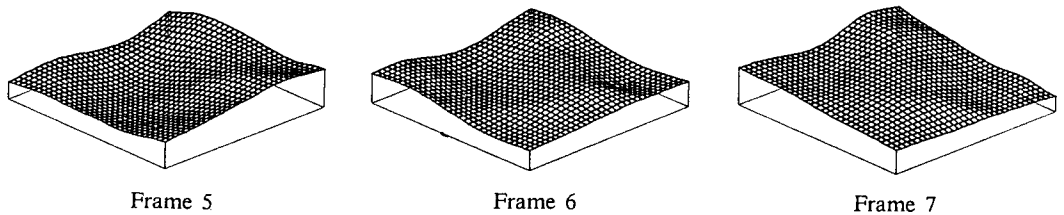


Figure 16: Example of wave shape restoration

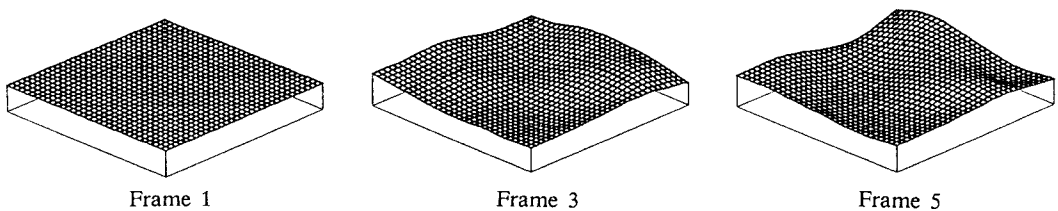


Figure 17: Wave shape restoration using only the first N frames

それらの像は揺らいで見える。本報告では、この揺らいだ画像時系列から物理的・統計的な性質を利用して水面の形状を復元し、同時に水底のパターンを推定する手法を示した。2次元に投影された画像データから物体の三次元構造や表面形状を復元する問題はCVの基本テーマであるが、本研究は特に時系列画像からの透明非剛体物体の表面の形状復元を扱ったものである。

本研究で得られた内容を以下にまとめる。

(1) 水面の表面形状の変化によって水底のパターンの観測画像に歪が生じる。観測時系列画像からオプティカルフローを正確に計算し、各点近傍の画像をその平均値(オプティカルフローセンター)へ歪の逆変換を加えることにより、水底のパターンを復元できることを示した。シミュレーションデータを用いた実験により水底のパターンの復元例を実際に示した。

(2) オプティカルフローとオプティカルフローセンターから、幾何光学を用いることにより水面上の各点での傾きが計算できることを示した。これは2.5D表現に対応する量で、これを積分操作することにより水面での形状が復元できる。合成画像および水槽を用いた実データで形状復元した例を示した。

(3) 本手法の誤差要因の1つはオプティカルフローセンターの推定誤差によるものであるが、これは時間と共に減少してゆくことを評価実験により示した。

今後の課題としては、対象の性質を有効に利用したオプティカルフローの精度向上、中心投影の場合への発展、縮退の発生するような画像への適用、多種多様な実画像への適用等がある。

謝辞 日頃ご討論頂く加藤基礎研所長、橋本情報科学研究部長、内藤研究グループリーダー萩田主幹研究員有村研究主任に感謝致します。

参考文献

(1) Ballard, H. and Brown, C. M.: Computer Vision, Prentice-Hall (1982) (福村晃夫、他(訳): コンピュータビジョン、日本コンピュータ協会(1987)).
(2) Marr, D.: Vision, Freeman (1982) (乾・安藤(訳): ビジョン、産業図書(1988)).
(3) 杉原厚吉、金谷健一: 数理的手法による三次元情報抽出、人工知能学会誌、vol14 No. 1 pp13-20 (1988).

(4) Horn, B. K.: Robot Vision, MIT Press (1986)
(5) Witkin, A. P.: Recovering surface shape and orientation from texture, Artif. Intell., Vol. 17, pp. 17-45 (1981).
(6) Aloimonos, J.: Shape from texture, Biol. Cybern., Vol. 58, pp. 345-360 (1988).
(7) Sugihara, K. and Sugie, N.: Recovery of rigid structure from orthographically projected optical flow, Comp. Vision. Graphics Image Proc., Vol. 27, pp309-320 (1984).
(8) Kanatani, K.: Structure and motion from optical flow under perspective projection, Comp. Vision. Graphics Image Proc., Vol. 38, pp. 122-146 (1987).
(9) Ullman, S.: The interpretation of visual motion, MIT Press (1979).
(10) Ts'o, P. Y. and Brasky, B. A.: Modeling and rendering waves: wave-tracing using beta-splines and reflective and refractive texture mapping, ACM Trans. on Graphics, Vol. 6, No. 3, July pp. 191-214 (1987).
(11) 新谷幹夫、高橋時市郎: 反射屈折物体の付影処理、電子情報通信学会全国大会、D-521、(1988).
(12) Gotwols, B. L. and Irani, G. B.: Charge-coupled device camera system for remotely measuring the dynamics of ocean waves, Applied optics Vol. 21, No. 5 March pp851-860 (1982).
(13) Jahne, B.: Image sequence analysis of complex physical objects: Nonlinear small water surface waves, IEEE ICCV (1987).
(14) 小谷正雄: "物理学概説 上巻" 裳華房(1959).
(15) Horn, B. K. P.: Determining optical flow, Artif. Intell. Vol. 17, pp. 185-203 (1981).
(16) 古賀和利、三池秀敏: 動画像からのオプティカルフローの検出、信学論(D)、J70-D, No. 8, pp1508-1515 (1987).
(17) Prager, J. M., Arbib, M. A.: Computing the optic flow: the MATCH algorithm and prediction, CVGIP, Vol. 24, pp. 213-237 (1984).