

波の影響を考慮した水位画像計測

綱島宣浩 塩原守人 佐々木繁 棚橋純一
(株)富士通研究所 パーソナル&サービス研究所

水路やダムなどにおいて水位計測を行うことは、洪水や渇水の監視のために非常に重要である。水圧式やフロート式といった従来の水位計測手法は、水路に計測器を直接設置する接触型の計測手段であったため、藻やゴミによる誤動作や景観を損ねるといった問題があった。このような接触型の従来手法の問題を解決するために、本研究では水路側壁において壁と水面の境界を求めることで水位の検出ができることに着目し、水路側壁を撮影した画像から画像処理によって水位を計測する非接触型の水位計測手法を開発した。画像処理によって水位を計測するために、波の影響を受けて不定形な曲線形状をしている水面境界の検出手法、および、検出した水面境界から波の影響を除去して水位を計測する手法を開発した。開発手法の有効性を検証するために、実際の河川で取得した画像に本手法を適用したところ、波のある水面に対して±1cm精度で水位を計測できることを確認した。

Water Level Measurement using Image Processing

Nobuhiro TSUNASHIMA, Morito SHIOHARA, Shigeru SASAKI, and Jyuniti TANAHASHI
Fujitsu Laboratories, Personal & Service System Laboratories

It is very important to measure a water level for surveying a flood or a water shortage at a dam, a canal, a waterway and so on. In this paper we described a new technique for measuring a water level using image processing. The water level can be measured to detect a borderline between the water and sidewall of the waterway. The borderline becomes indefinite under the influence of a wave. Therefore we developed two algorithms for detection of the infinite borderline and calculation of the water level from it. Verifying our method, we apply it to the images taken from Tama River. As a result we can measure the water level with ±1cm accuracy.

1 はじめに

水路やダムにおける水位計測は、水の流入量、流出量のコントロールのために非常に重要である[1][2]。そのため、水圧式（投げ入れ式）、フロート式など様々な水位計測手法が開発されてきた[3]。水圧式は水中に圧力センサを配置し、センサにかかる圧力から水位を検出する手法である。フロート式は水面に物体を浮かせ、その位置を電気的あるいは機械的に計測することによって水位を計測する手法である。これらは、水路に直接計測器を設置する接触型の計測手法であるため、藻やゴミなどによる動作不良、景観を損ねるという問題があった。

このような接触型の計測器の問題を解決するために、水路に対して非接触に水位を計測する手法が開発されてきた。その中の1つに画像処理による水位計測手法がある。この手法は、水路側壁を撮影した画像から壁と水面の境界を検出することにより水位が計測できることに着目したものである。しかしながら、従来の画像処理による手法[4]は、水路側面に計量板を貼付け、水面と計量板の接点を検出することで水位を検出しているため、水路に物体を設置するという接触型の計測器の問題点は改善されていない。

そこで、本研究では側壁に計量板などを取り付けていない側壁だけを撮影した画像から水位を計測するための手法を開発した。以下、本論文では、画像処理による水位計測手法および開発手法の性能評価のために行った実験結果について報告する。

2 画像処理による水位計測の課題

本研究では、水路側壁の画像を撮影した画像から画像中の側壁と水面の境界線（以下、水面境界と呼ぶ）を検出することで水位を計測する。画像処理によって水位を計測するには2つの課題がある。1つは、波の影響を受けた水面境界の検出、もう1つは、検出した水面境界から波の影響を除去して水位を計測することである。以下に各々の課題に対する解決の方針について述べる。

まず、波の影響を受けた水面境界の検出手法に

ついて述べる。水路やダムでは水の流れや風の影響などにより、その水面は常に揺らいでいる。また、波の発生要因は不規則かつ複合的なので、その形状は不定形である。従って、画像中の水面境界に1本の直線や高次関数による曲線を当てはめることは困難である。

本手法では、どのような曲線であっても局所的には直線近似が可能なことから、水面境界を短い直線の集合として検出することにした。まず、画像を横に短い短冊状の領域に分割する。各短冊内では水面境界は直線近似が可能となるので、短冊内の水平線を検出することで不定形な水面境界を検出する。この処理を以後、“短冊処理”と呼ぶことにする。

次に、検出した水面境界から波の影響を除去し、水位を計測する手法について述べる。波の影響を受けている水面境界から水位を求めるには、水面境界が水位（直流成分）に波の成分（周波数成分）が付加されたものとして捉え、水面境界から周波数成分を除去し、直流成分のみを取り出す必要がある。

周波数成分を除去するには、波の成分を取得した画像幅より短い周期を持つものと長い周期を持つものに分けて考える必要がある。短い周期の波の除去は、1枚の画像から検出した水面境界から直流成分を求めることにより行う。また、長い周期の波の除去は、時間的に連続する複数枚の画像から求めた水面境界を用いることにする。

また、これら2つの課題以外にも、画像処理技術を開発する上では耐環境性性能が非常に重要となる。特に、水位計測のように屋外での24時間の運用が必要な画像処理技術を開発するためには、天候や昼夜変化などの環境変化に対するロバスト性、即ち耐環境性能が非常に重要となってくる。本研究では、上記の2つの課題を解決する際に、耐環境性能も十分に考慮に入れて手法の開発を行った。以下に、開発手法を具体的に説明する。

3 水面境界の検出

本研究では不定形な曲線形状をしている水面

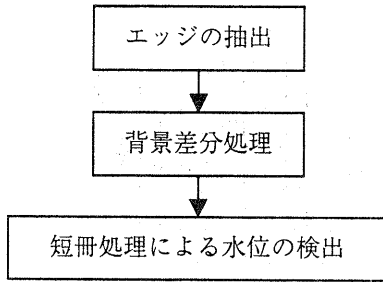


図1 水面境界検出処理の流れ

境界を検出するために、水面境界を短い直線の集合として検出することにした。水面境界を表す短い直線群を検出するために図1に示すような手法を用いた。以下各々の処理について具体的に説明する。

3.1 エッジの検出

本研究では、画像中の水面と壁に明度差があることに着目し、水面境界を画像中のエッジ（明るさ変化の急な点）として検出することにした。通常のエッジ検出では、微分フィルタなどによって算出された各画素でのエッジ強度を基に閾値処理によってエッジを検出している。しかしながら、水路側壁のような屋外にある対象を撮影した画像では天候の変化や時間の経過によって画像全体の明るさは大きく変化する。そのため、閾値の設定次第で不必要なエッジの検出、必要なエッジの検出漏れが発生してしまうことが多い。

本手法では検出対象である水面境界が画像を横断する線（曲線）であることに着目し、局所的なエッジの個数を制限することで、検出過多や検出漏れのないエッジ検出法を開発した。具体的な手法を以下に述べる。

水面境界は、水平成分を多く含んでいると考えられるので、例えば以下のような横に長い2次元オペレータを用いて画像中の各画素の水平エッジ強度を算出する。

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

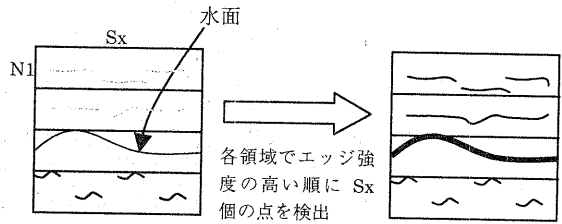


図2 エッジ検出の原理

次に、画像（横： S_x [pixel]、縦： S_y [pixel]）を図2のように縦の長さが N_1 [pixel] となる横長の領域（横： S_x [pixel]、縦： N_1 [pixel]）に分割する。検出対象である水面境界は画像を横断する1本の直線（曲線）であるので、1つの領域の中に存在する水面境界のエッジの個数は最大 S_x 個である。そこで、各領域においてエッジ強度の高い順に S_x 個の点をエッジとして検出すれば、水面境界のエッジを漏れなく検出することができる。この処理を分割した全ての領域に対して行うことにより、エッジ分布を作成する。

3.2 水面境界と壁の模様の区別

画像中のエッジは上側から①側壁のエッジ、②水面境界のエッジ、③水面の乱反射によるエッジに分類することができる。これら3つのエッジから水面境界のエッジのみを検出しなければならない。

本手法では背景差分処理を用いてこれらを区別することにした。側壁のエッジは時間変化がないので背景差分処理によって消去され、水面境界と水面の乱反射のエッジのみが残される。水面境界は水面の乱反射より画像の上側に位置するので、残されたエッジ分布において最も上側にあるエッジが水面境界のエッジとなる。

具体的には、予め背景画像を用意し、そのエッジ分布を作成しておく。背景部分のエッジの位置は、画像全体の明るさの変化に影響されない。従って、入力画像のエッジ分布と背景画像のエッジ分布とでは側壁から発生しているエッジは同じ位置に存在する。一方、水面は絶えず動いているので、水面から発生したエッジは2つの分布間で

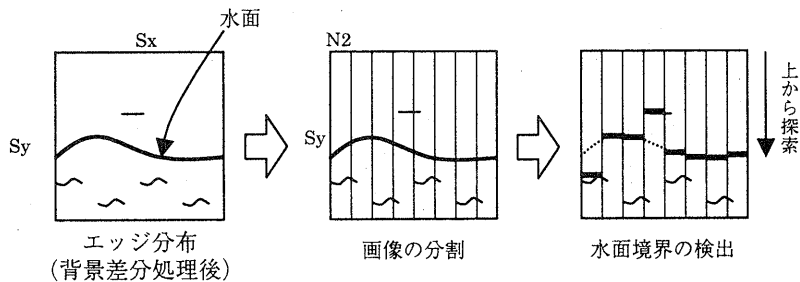


図3 短冊処理

異なっている。そこで、入力画像と背景画像のエッジ分布から同じ位置にあるエッジを除去する。この処理によって背景から発生したエッジが除去され、水面から発生したエッジのみが検出される。

3.3 短冊処理による水面境界の検出

次に、短冊処理によって水面境界の検出法について述べる。水面境界は常に揺らいでいるので、画像全体の水位を最小二乗法やハフ変換などの直線検出法を用いて1本の直線として抽出することはできない。また、水面境界は不定形な曲線であるので、高次関数による曲線あてはめの手法の適用も困難である。そこで、曲線を短い直線の集合として捉え、水面境界を局所的な直線近似によって検出することにする。

具体的には、画像（横： S_x [pixel]、縦 S_y [pixel]）を図3のように横の長さが N_2 [pixel] となる短冊状の領域（横： N_2 [pixel]、縦 S_y [pixel]）に分割する。曲線は短い直線の集合であると考えられるので、分割した各短冊内では水面境界のエッジを直線近似することができる。

背景差分処理によってエッジ分布中に残されたエッジは水面から発生したエッジだけであるので、各短冊内で領域の上から長さ N_2 [pixel] の直線を探索し、初めに検出された直線を水面境界として決定する。

4 水面境界からの水位の計測

波の影響を受けている水面境界から水位を計測するための処理について述べる。本研究では水

面境界が水位（直流成分）＋波（周波数成分）であると仮定し、水面境界から周波数成分を取り除くことで水位を計測する。その際、周波数成分を画像幅より短い周期を持つものと長い周期を持つものに分けて考える必要がある。以下、各々の周波数成分の除去法について述べる。

4.1 短い周期の周波数成分の除去

波による変動成分が画像幅より短い周期の周波数成分を持つ場合、各短冊で求められた水面境界位置を平均することで真の水位を算出することができる。しかしながら、画像処理によって水面境界を検出する際、ノイズや環境変化によって全ての直線が正確に検出されているわけではない。従って、検出された各短冊での水面境界を平均すると検出に失敗した直線の影響を受けてしまう。そこで、本手法では図4のように各短冊で求められた直線の位置ヒストグラムを作成し、ヒストグラムによる多数決処理によって波の影響を除去することにする。作成した位置ヒストグラムの出現頻度が高い位置をその画像における水位として決定することにする。しかしながら、個々での水位は長い周期の周波数成分の影響を受けているので真の意味での水位ではない。従って、このようにして求められる水位を以後“局所水位”と呼ぶことにする。

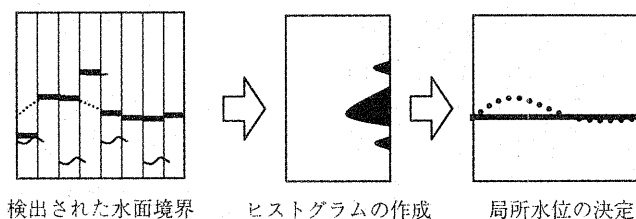


図4 局所水位の検出

4.2 長い周期の周波数成分の除去

前項では波の成分が画像幅より短い周期を持つと仮定していたため、画像幅より長い周期をもつ波の影響を除去しきれていない。そこで、一定時間に計測された N_x 個の局所水位を平均することで、真の水位を決定することにする。

本手法では 1 枚の画像からの局所水位検出の際に水面境界を表す直線群の位置ヒストグラムを用いている。この位置ヒストグラムの頻度が高いほど決定された水位の信頼性は高いといえる。そこで、頻度を重みとした重み付け平均によって決定された値 (S_{ave}) を水位とする。

$$S_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^{N_x} W_i} \quad (2)$$

上式の S_i は各画像で計算された局所水位、 W_i は各画像でのヒストグラムのピーク値である。

5 実験及び検討

開発手法の性能を検証するため実験を行った。本手法を深さ 2 m 程度の小型の用水路での計測に用いることを想定し、目標性能を定めた。用水路などの用いる一般的な河川用の計測器は 1 分毎に $\pm 1\text{cm}$ の精度で水位の計測が可能である。そこで、本手法の目標性能を 2m の範囲を 1 分毎に $\pm 1\text{cm}$ 精度で検出できることとした。

また、水位方向に高い解像度を持たせるために、カメラを 90 度横に回転させて配置した。このカメラ配置で 2m の幅を撮影した場合、計測方向の解像度は 640[pixel] となり、水位の分解能は約 3[pixel/cm] となる。

以下に示す実験結果はこのような設定条件に

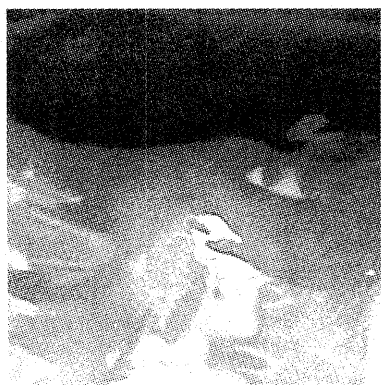


図5 水槽を撮影した画像

基づいて行われたものである。

5.1 水槽を用いたシミュレーション

開発した水面境界検出法および水位の計測手法の性能を検証するために室内環境において水槽を用いたシミュレーションを行った。

水槽に水を入れ、その側壁をカメラで撮影する。取得した画像例を図 5 に示す。取得した画像は 640x240pixel の 256 階調のモノクロ画像であるが、図 5 には水面境界を含まない部分をカットして 240x240[pixel] の画像として表示している。処理パラメータは、エッジ決定のための検索幅 N_1 を 30pixel、短冊の幅 N_2 を 20pixel とした。

水位の計測結果例を図 6 に示す。なお、処理には富士通製ワークステーション S-7/400U (SuperSPARC 250MHz) を用い、処理時間は約 0.7 秒/枚であった。画像中の短い線分が各短冊で検出された水面境界を表し、長い線が水面境界の位置ヒストグラムによって決定された局所水位である。また、画像の右側にヒストグラムを表示している。短冊処理を行うことで、局所的な水面

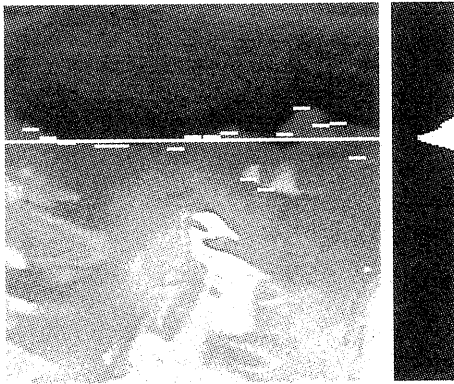


図6 水槽画像の処理結果

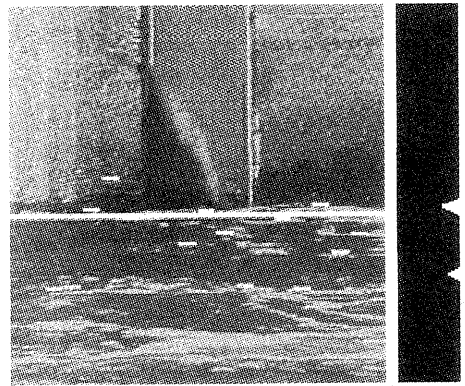


図8 実際の河川画像の処理結果

境界が安定して検出されていることが分かる。

同様の処理を2秒間隔で取得した120枚の画像に対して行った。その結果を図7に示す。図7には、予め計測しておいた設定水位、1枚の画像から計測された局所水位、および局所水位を平均することで算出した計測水位を表示している。なお、水位は直前の1分間(30枚)の画像から計測された局所水位の平均値である。その結果、平均誤差0.48cm 最大誤差1.07cm となり、想定した目標をほぼ達成していることを確認した。

5.2 実画像を用いた実験

室内環境におけるシミュレーションにより、水面境界検出手法および水位計測手法の有効性を検証した。次に、耐環境性の評価を行うために実際の河川(多摩川)で取得した画像に本手法を適

用した。その処理結果例を図8に示す。実画像ではシミュレーション画像より多くの直線の検出もれ、誤検出が発生しているが、直線群の位置ヒストグラムを用いることで、局所水位を安定して検出できることが確認された。

図9に実画像において計測された水位と他手法(水圧式水位計)による水位との比較結果の1例を示す。実験は1分間に30枚(2秒間隔)の画像を取得し、1分毎の水位(局所水位30回の平均値)を1時間計測した。図9を見ると、開発手法と従来手法の水位計測値の変動が同様の挙動を示していることが分かる。また、平均誤差0.69cm 最大誤差1.97cm であった。目標性能より最大誤差が多くなってしまっているが、これは比較対象の計測器自体が持っている $\pm 1\text{cm}$ の計測誤差に起因するものと考えられる。図9において最大誤

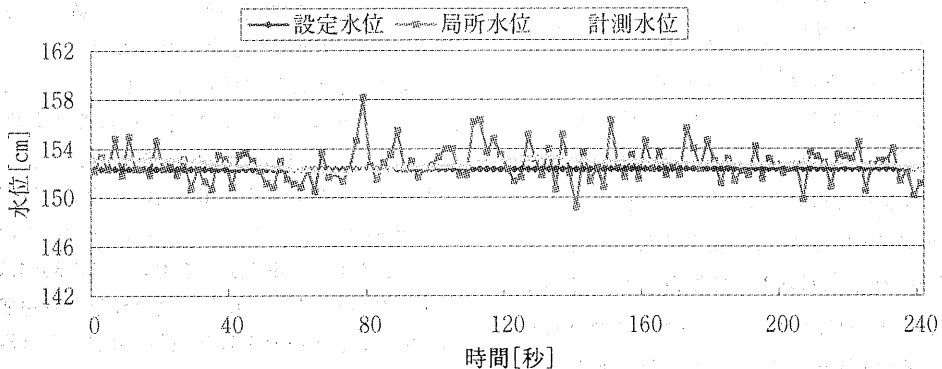


図7 シミュレーション画像における水位の算出

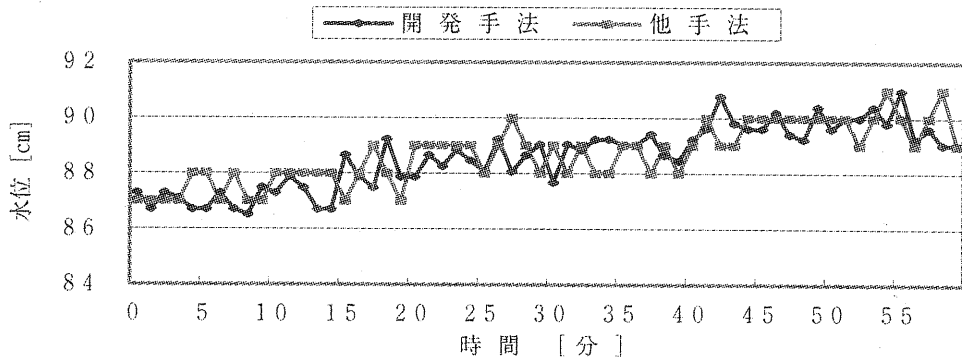


図9 他手法との比較

差が計測されている27分付近の計測値を見ると、開発手法においては一時的に値が低く、他手法では一時的に値が高くなっていることが分かる。このように $\pm 1\text{cm}$ 精度を持つ2つ計測器間には最大 2cm の測定差が生じる可能性がある。平均誤差が 1cm 以内であって最大誤差が 2cm 以内であるので、開発手法は $\pm 1\text{cm}$ 程度の誤差を有していると考えられる。

6 まとめ

水路の側壁を撮影した画像から水位を計測するための画像処理手法を提案した。提案手法の有効性を示すために実際の河川において取得した画像に適用した。短冊処理を用いることで、波の影響を受けて不定形な曲線をしている水面境界が検出できることを確認した。また、検出した水面境界に対して、ヒストグラム処理および時間平均処理をもちいることで、環境変化や画像のノイズに影響を受けることなく水位が計測されていることを確認した。その結果、本手法は目標性能である水位の計測制度 $\pm 1\text{cm}$ を達成した。今後は雨や雪が降った場合など、さらに悪天候での処

理に対する検証が必要である。

参考文献

- [1] 石田享平, 長谷川和義, 鈴木洋之, “多点同時水位計測による貯水池の水面振動解析”, 水工学論文集, 第41巻, pp.1017-1022(1997)
- [2] Hideo Nakamura, Masaya Kondou, Yutaka Kuboki, “Simultaneous measurement of liquid velocity and interface profiles of horizontal duct wavy flow by ultrasonic velocity profile meter” Nucl. Eng. Des. 184 (2-3), p.339-348 (1998)
- [3] 大森豊明, “普及版センサ技術”, (株)富士テクノシス(1999)
- [4] 高木陽市, 米丘孝幸, 小湊康雄, 辻川秋雄, 斉藤健, “カメラ画像を使用した非接触式の河川等の水位計測技術”, 電気学会, 第6回茨城支所研究発表会(1998)