

映像における流水域検出のための時空間フィルタの最適設計

Optimum Design of Temporal-Spatial Filter for Detection of Running Water Region in Video

菊池博 和田祐一 齋藤淳史 岩橋政宏
 長岡技術科学大学電気系

Hiroshi KIKUCHI Yuichi WADA Atsushi SAITO Masahiro IWAHASHI
 Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology

1. はじめに

近年, 集中豪雨等による水害が毎年各地で頻発しており, テレメータによる河川の水位観測が水防活動上重要となっている[1,2]. 一方, ネットワークの普及と映像圧縮技術の発展に伴い, ウェブカメラを利用した映像監視システムが実用化されている. 最近では, カメラの筐体内に DSP 等の回路を組み込むことで種々の機能を実現できるスマートカメラが開発されているが, その多くは移動体の有無を検出するなど単純な処理に限定されており, 河川の水位検出処理は普及していない. ビデオセンサ網の構築によるユビキタスな水位観測を支援するため, 本報告では映像から水位を自動的に認識する方法について検討する.

水位の画像認識に関する従来法としては, 傾斜線が描かれた量水板を河川に設置し, 傾斜線の屈曲点あるいは消失点を水位として識別する方法がある[3,4]. 水面反射や水面下模様の透過に対して堅牢であるが, 量水板の汚れが水位検出を不安定にしたり, 量水板の水中への設置は河川法により厳しく管理されているなどの問題がある.

量水板を設置せずに水位を検出する方法としては, 水面が常に動いていることを前提として, 垂直方向のエッジ検出とフレーム間差分により水平方向に広がる水面輪郭を抽出する方法が提案されている[5]. しかし, 差分処理のために水面の乱反射や降雨雪粒子等の動く外乱の影響を受けやすい.

これに対し我々は, フレームの同期加算と水平方向のエッジ検出に基づく, 降雨雪時にも水位を検出可能な方法を提案した[6,7]. 本報告では, 個々の映像に対してエッジ検出フィルタを最適化することで, 撮影場所や日照条件の変化に追従できる安定した水位検出方法を提案する. また, Prewitt や Sobel といった従来のエッジ検出オペレータとの比較検討を行う.

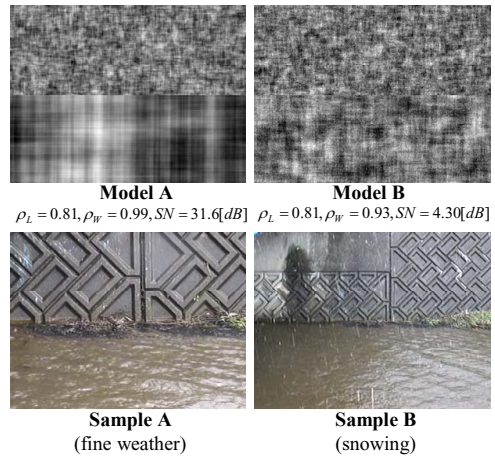


図1 実験に用いた映像信号.
 Model は自己相関が陸領域で ρ_L , 流水領域で ρ_W の AR(1) に雑音を重畳. Sample は晴天時と降雪時. 320x240 画素. 毎秒 30 フレーム.

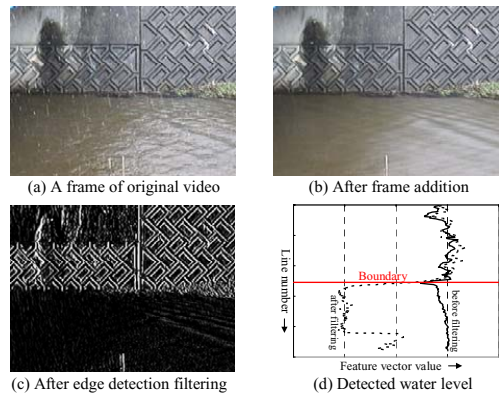


図2 水位検出の手順
 (a) は撮像映像の 1 フレーム. (b) は 30 枚のフレームを同期加算.
 (c) は更にエッジ検出フィルタを適用. (d) では各行の分散を特徴量
 に用い, 陸領域と流水領域の境界を水位として検出.

2. 映像からの水位検出方法

2.1 処理の概要

撮像映像としては、図1(下段)に例示されるように、1)画面半分が定在的波を含まない流水領域、2)別の半分がテクスチャを含む陸領域、3)各領域内で特徴量が一樣であることが望ましい。映像の一部を切り取りアフィン変換してもよい[8]。

[STEP 1] 撮像映像をフレーム同期加算して静止画像を生成する。図2(b)。カメラの露光時間を長くしても良い。水面が波立っていれば流水領域の高周波が抑圧される。豪雨による増水時を仮定しており静水、濁水、氷結は想定していない。

[STEP 2] 陸領域と流水領域の特徴量の違いを顕在化させるような空間フィルタを施す。図2(c)にはフィルタ処理後の絶対値を例示。フィルタについては3.にて詳細に検討する。

[STEP 3] 画像の各行（水平ライン）の分散の特徴量とする。特徴量の大きな陸領域と小さな流水領域の境界を水位とする。図2(d)。本報告ではクラス間距離 D_{bc} とクラス内分散 V_{wc} の比、

$$\frac{D_{bc}}{V_{wc}} = \frac{P_L P_W (m_L - m_W)^2}{P_L s_L^2 + P_W s_W^2} \quad (1)$$

が極大となるクラス境界を水位とした。ここで、添字 W と L はそれぞれ流水領域と陸領域といったクラスを表し、 P は生起確率（画素数の割合）、 s と m は各クラスにおける特徴量の標準偏差と平均をそれぞれ表す。

2.2 フレーム加算後の空間フィルタ

空間フィルタの伝達関数とフィルタ係数値を、

$$H(z_1, z_2) = \begin{bmatrix} z_2^{-1} & 1 & z_2 \end{bmatrix} \mathbf{H} \begin{bmatrix} z_1^{-1} & 1 & z_1 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{0,1} & h_{-1,1} \\ h_{1,0} & h_{0,0} & h_{-1,0} \\ h_{1,-1} & h_{0,-1} & h_{-1,-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表記する。本報告の3.では、以下のフィルタを用いて比較実験を行う。

- 1D High Pass Filter (水平)

$$\mathbf{H}_{HPF_2tap} : [-1 \ 1] = [h_{1,0} \ h_{0,0}]$$

- 1D Band Pass Filter (水平)

$$\mathbf{H}_{BPF_3tap} : [1 \ 0 \ -1] = [h_{1,0} \ h_{0,0} \ h_{-1,0}]$$

- 1D Laplacian (水平)

$$\mathbf{H}_{LAP_3tap} : [1 \ -2 \ 1] = [h_{1,0} \ h_{0,0} \ h_{-1,0}]$$

- 2D Band Pass Filter (斜め)

$$\mathbf{H}_{BPF1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{BPF2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- 2D 微分オペレータ (水平方向微分)

$$\mathbf{H}_{Prewitt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{Sobel} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

- 1D Optimized (提案法)

$$\mathbf{H}_{OPT_3tap} = [h_{1,0} \ h_{0,0} \ h_{-1,0}]$$

- 2D Optimized (提案法)

$$\mathbf{H}_{OPT_3x3} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{0,1} & h_{-1,1} \\ h_{1,0} & h_{0,0} & h_{-1,0} \\ h_{1,-1} & h_{0,-1} & h_{-1,-1} \end{bmatrix}$$

2.3 空間フィルタの最適化方法

本報告では、クラス間距離 D_{bc} が最大となるように空間フィルタを最適化する。但し、クラス内分散 V_{wc} は各領域の非一様性や加法性雑音に起因する。前者を最大化することで、後者に対する堅牢性を向上させる。これにより、撮像映像の変化に追従した柔軟な水位検出を目指す。陸領域と流水領域それぞれのフィルタリング後の画素値の分散を σ_L^2 、 σ_W^2 とすると、両者の比、

$$I = \frac{\sigma_W^2}{\sigma_L^2} \quad (3)$$

が最小となるようにフィルタ係数値を決定する。これにより、その対数である、

$$I' = \log I = m_W' - m_L' \quad (4)$$

も極値をとる。画像の第 i 行の分散を σ_i^2 、陸領域 ($i \in L$) と流水領域 ($i \in W$) の行数をそれぞれ N_L 、 N_W とすると、

$$m_W' = \log \sigma_W^2 = \log \sum_{i \in W} \frac{\sigma_i^2}{N_W} \quad (5)$$

$$m_L' = \log \sigma_L^2 = \log \sum_{i \in L} \frac{\sigma_i^2}{N_L}$$

となる。ところでクラス間距離 D_{bc} は、

$$D = (m_W - m_L)^2 \quad (6)$$

但し、

$$m_W = \frac{1}{N_W} \sum_{i \in W} \log \sigma_i^2 = \log \prod_{i \in W} (\sigma_i^2)^{\frac{1}{N_W}} \quad (7)$$

$$m_L = \frac{1}{N_L} \sum_{i \in L} \log \sigma_i^2 = \log \prod_{i \in L} (\sigma_i^2)^{\frac{1}{N_L}}$$

なる因子を持つため、式(5)の相乗平均間距離の最大化は式(7)の相乗平均間の距離を離すことになり、式(3)の最小化が式(6)の最大化につながる。

そこで、 $\sigma_L^2=1$ なる条件下で σ_W^2 を Lagrange の未定乗数法により最小化する。これは、

$$L = \sigma_W^2 - \lambda(\sigma_L^2 - 1) \quad (8)$$

の固有値問題に帰着される。例えば 3 タップの水平方向の 1 次元 (1D) フィルタ、

$$H(z_1) = \mathbf{H} \begin{bmatrix} z_1^{-1} & 1 & z_1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

の係数値、

$$\mathbf{H}_{OPT_3tap} = [h_{1,0} \quad h_{0,0} \quad h_{-1,0}] \quad (10)$$

は、陸領域と流水領域それぞれの(平均値を零とする)画素値 $x(n_1, n_2)$ の共分散行列を、

$$\Phi_R = \begin{bmatrix} \theta_{0,R} & \theta_{1,R} & \theta_{2,R} \\ \theta_{1,R} & \theta_{0,R} & \theta_{1,R} \\ \theta_{2,R} & \theta_{1,R} & \theta_{0,R} \end{bmatrix}, \quad R \in \{L, W\} \quad (11)$$

$$\theta_{k,R} = \frac{1}{N_R} \sum_{(n_1, n_2) \in R} x(n_1 + k, n_2) x(n_1, n_2)$$

として、

$$(\Phi_L^{-1} \Phi_W - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{H} = \mathbf{O} \quad (12)$$

により、 $\Phi_L^{-1} \Phi_W$ の最小固有値 λ_{\min} に対応する固有ベクトルとして求められる。垂直方向の 1 次元 (1D) フィルタあるいは 2 次元 (2D) フィルタについても同様に係数値を計算できる。

3. 実験結果

3.1 各行の特徴量

図 3 には、図 1 の Model A に対する空間フィルタ処理後の各行の特徴量を示す。図の右半分が流水領域、左半分が陸領域である。Model A はフレーム加算後の静止画をモデル化したものであり、陸領域では $\rho_L=0.81$ 、流水領域では $\rho_W=0.99$ である AR(1) model に SNR が 31.6[dB] となるように加法性雑音信号を加えた。

図 3(a) は、水平方向に 1D フィルタを適用した場合であり、元の画像(ORG)に比べ、3 タップの最適フィルタ(OPT_3Tap)によりクラス間距離が最大化されていることが分かる。この例では最適フィルタと Laplacian(LAP)が同程度であった。陸領域と流水領域とのスペクトル比が高域で大きく、これを強調することでクラス間距離が最大化されていると考えられる。3.3 参照。

図 3(b) は、垂直方向に 1D フィルタを適用した場合であり、いずれのフィルタを用いても大差はない。水平方向に比べ、フィルタ後の陸領域におけるクラス内分散が大きくなっている。

図 3(c) は、2D フィルタを適用した場合であり、最適化された 2D フィルタ(OPT_3x3Tap)が最良であることが確認できる。クラス間距離を離す点では、Sobel や Prewitt といった従来の微分オペレータよりも良い。

図 3(d) は、水平方向の 1D フィルタにおいて、タップ数を増加させた場合である。タップ数の増加に伴いクラス間距離が離れることが分かる。

3.2 クラス間距離

図 4(a) には、1D フィルタを水平(図中の_H)あるいは垂直(図中の_V)方向に適用した場合のクラス間距離を示す。Sample A,B 共に垂直よりも水平の方が距離が離れている。Model A ではその逆、Model B では大差ない。Model の生成法については今後の検討を要すると思われる。1D の最適化フィルタについては、垂直方向よりも水平方向の方が概ね良い。

図 4(b) には、2D フィルタを適用した場合を示す。いずれの Model および Sample についても、Sobel や Prewitt と比べても、3x3 タップの最適フィルタが最も良い結果となった。

図 4(c) には、水平方向の 1D フィルタについて、種々のタップ数を用いた場合を示す。タップ数の増加に対して単調増加している。

3.3 スペクトル

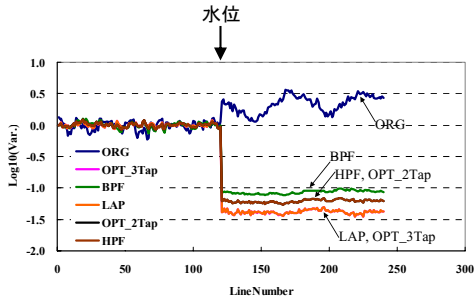
図 5,6 には、Model A, Sample A における各種の周波数振幅特性を対数表示する。

同図(a)は、陸領域と流水領域それぞれの平均であり、フレーム同期加算により流水領域の高周波成分が抑圧されることが確認できる。

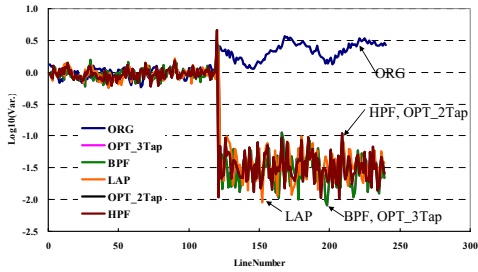
同図(b)は、両者の比(対数では差分)を示す。陸領域と流水領域とのスペクトル比が大きな帯域が明示されており、この成分をフィルタにより強調することで、クラス間距離が最大化されると考えられる。

同図(c)は、最適設計された水平方向 1D フィルタの周波数振幅特性を示す。

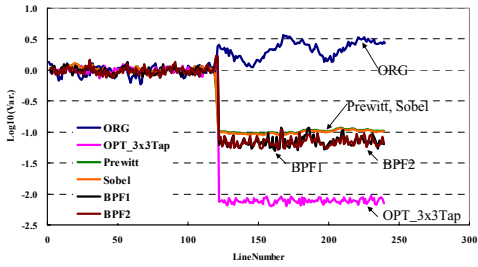
図 7 には、従来の水平方向 1D フィルタの周波数振幅特性を示す。入力映像によっては従来のフィルタで十分な場合もあるが、日照条件など撮像環境の変化に追従させるには、逐次最適化を行うことが有効と考えられる。



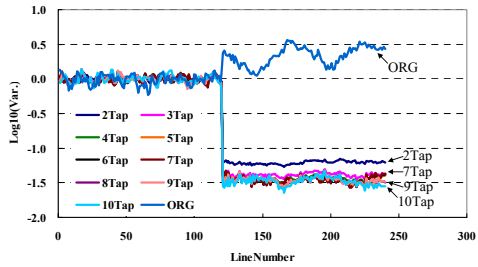
(a) Horizontal 1D filter



(b) Vertical 1D filter

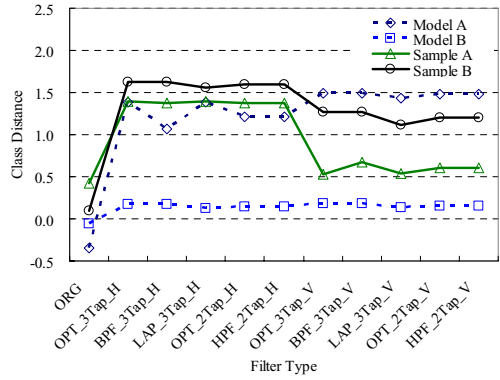


(c) 2D filter

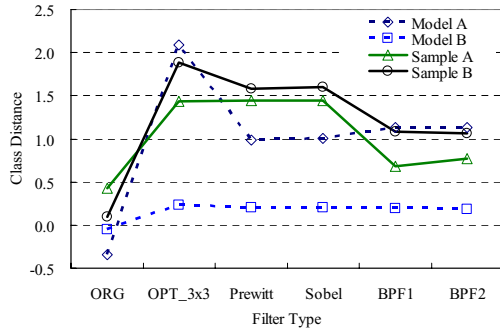


(d) Optimized horizontal 1D filter

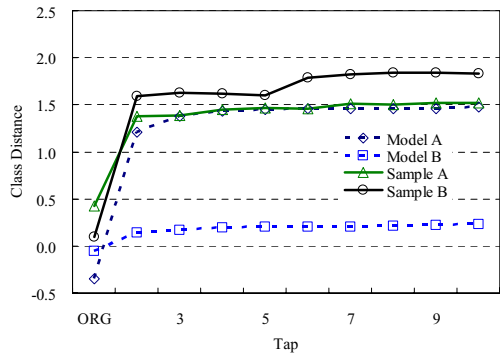
図3 Model A の各行の特徴量



(a) 水平あるいは垂直方向の 1D フィルタ

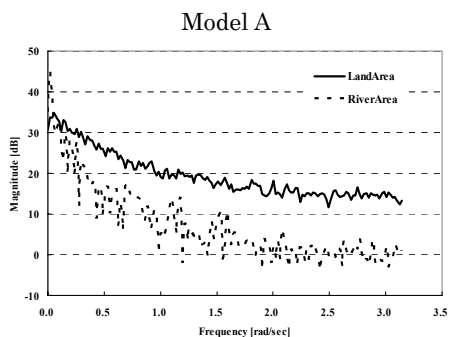


(b) 2D フィルタ

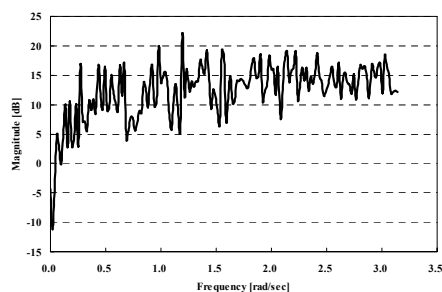


(c) 水平方向の 1D フィルタ(種々のタップ数)

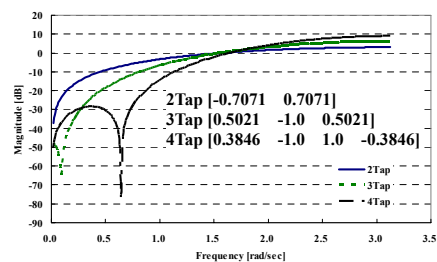
図4 各種フィルタによるクラス間距離の最大化



(a)陸領域と流水領域の振幅特性
(フレーム同期加算後)



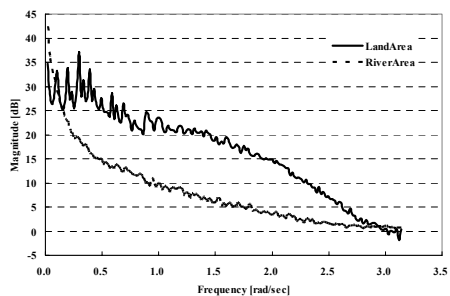
(b)陸領域と流水領域のスペクトル差



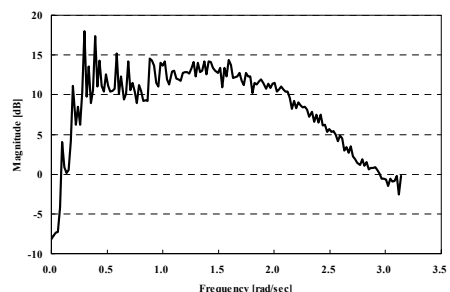
(c)最適フィルタの振幅特性

図 5 Model A に対する実験結果

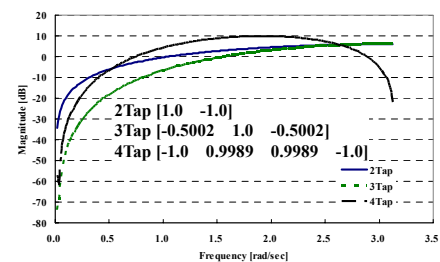
Sample A



(a)陸領域と流水領域の振幅特性
(フレーム同期加算後)



(b)陸領域と流水領域のスペクトル差



(c)最適フィルタの振幅特性

図 6 Sample A に対する実験結果

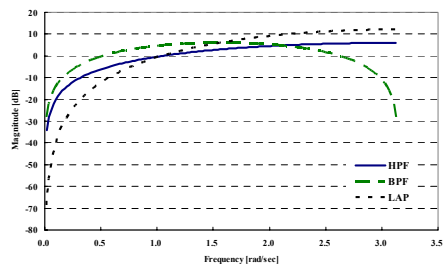


図 7 従来のフィルタの振幅特性

3.4 水位の検出誤差

図8には、15種類のサンプル映像について水位の検出誤差(単位:画素)を測定した結果をまとめる。縦軸は検出誤差の絶対値の全撮像映像に対する標準偏差(SD)である。同図(a)より、1Dフィルタについては垂直方向よりも水平方向に適用する方が、誤差が少ないことが確認できる。また、BPF_3tap に比べて最適化された OPT_3tapの方が優れている。同図(b)からは、フィルタを2Dに拡張することで、Prewitt や Sobel といったオペレータに比べ、最適化された OPT_3x3の方が、誤差が少ないことがわかる。

水位誤差は、式(1)のクラスの分離度が悪くても偶然的にゼロとなることがある。クラスの分離度は、水位誤差よりもむしろ、得られた水位の信頼性を評価する尺度となるのではないと思われる。なお、今回の最適化により式(1)の分子であるクラス間距離(分散) D_{bc} が最大化されているが、一方の分母であるクラス内分散 V_{wc} については何ら制御されていない。

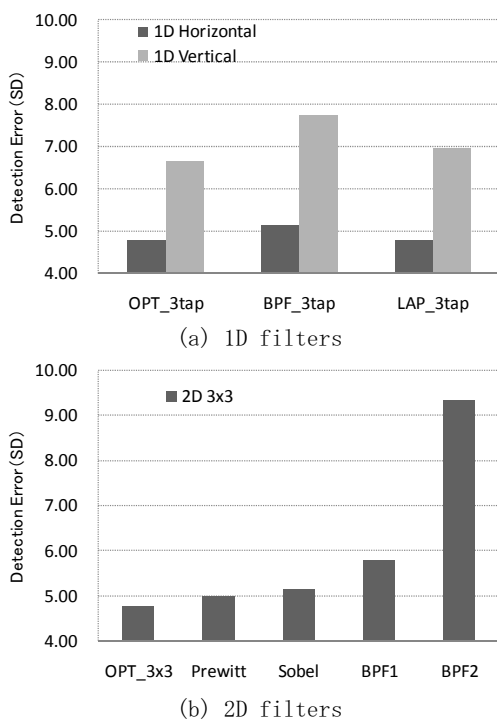


図8 15種類の映像に対する水位検出誤差

4. まとめ

本報告では、同期加算とフィルタリングに基づく河川の水位検出法において、空間フィルタの最適設計に関する実験的考察を行った。提案された最適化手法が、クラス間距離を離すことに効果的であることが確認された。最適化された2Dフィルタは Sober や Prewitt に比べ優れており、1Dフィルタについてはタップ数増加により効果が増大することが分かった。今回はクラス間距離の最大化を課題としたが、今後はクラス内分散を最小化する方法を探る必要がある。また、クラス間距離と水位検出結果の信頼度との関係についても検討を要する。

謝辞 本研究の一部は総務省 SCOPE-C の助成により実施された。

参考文献

- [1] 総務省消防庁, “消防白書”, 平成17年版.
- [2] 国土交通省, “川の防災情報(テレメータ), 全国のリアルタイム雨量・水位などの情報を提供”, <http://www.river.go.jp/>.
- [3] 高木陽市, 辻川秋雄, 齋藤健, 米丘孝幸, “カメラ画像解析による非接触式の水位計測技術の開発”, 土木学会第55回年次学術講演会, 共通セッション SC-232, PP.464-465, 2001.
- [4] 高木陽市, 米丘孝幸, 辻川秋雄, “カメラ画像解析を用いた非接触式水位計測技術”, 検査技術, vol.6, no.7, pp.40-42, 2001.
- [5] 網島宣浩, 塩原守人, 佐々木繁, 棚橋純一, “波の影響を考慮した水位画像計測”, 情報処理学会研究報告, vol.2000, no.33, pp.111-117, 2000.3.
- [6] 齋藤淳史, 岩橋政宏, “フレーム同期加算とフィルタリングによる河川水位検出アルゴリズム”, 電子情報通信学会, 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp.525-530, 2006.4.
- [7] 岩橋政宏, 齋藤淳史, 和田祐一, “河川水位検出における空間フィルタリングとフレーム間処理の誤差評価”, 信号処理シンポジウム(SIP), B3-2, pp.138-143, 2006.11.
- [8] 平島義嗣, 齋藤淳史, 岩橋政宏, “映像の一部を用いた水位検出に関する一考察”, 信学会信越支部大会, pp.113, Sept. 2006.