

# 視覚センサによるダム水位計測技術の研究

## Research on Dam Water Level Measurement Technology by Means of a Visual Sensor

高木陽市\*, 米丘孝幸\*, 森英雄\*\*, 辻川秋雄\*\*\*, 斎藤健\*\*\*\*, 軽部勝敏\*\*\*\*\*

\* 日立プロセスコンピュータエンジニアリング(株) / 〒319-1293 茨城県日立市大みか町 5-2-1

\*\* 山梨大学 電気電子システム工学科/〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

\*\*\* (株) 日立製作所情報制御システム事業部/ 〒319-1293 茨城県日立市大みか町 5-2-1

\*\*\*\* (株) 日立製作所社会システム事業部/ 〒101-8010 東京都千代田区神田駿河台四丁目 6 番

\*\*\*\*\* (株) 拓和/ 〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-4-15

Yoichi Takagi\*, Takayuki Yoneoka\*, Hideo Mori\*\*, Akio Tujikawa\*\*\*,  
Takeshi Saito\*\*\*\*, Katutoshi Karube\*\*\*\*\*

\*Hitachi Process Computer Engineering, Inc., / 5-2-1, Omika-cho, Hitachi-shi, 319-1293, Japan

\*\*Sciences, Univ. of Yamanashi /4-3-11, Takeda, Kofu-shi, Yamanashi, 400-8511, Japan

\*\*\*Hitachi, Ltd. / 5-2-1, Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1293, Japan

\*\*\*\*Hitachi, Ltd. / 6, Kanda Surugadai 4-chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8010, Japan

\*\*\*\*\*Takuwa, Ltd. /6, Uchikanda, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0047, Japan

### Abstract

Conventionally, a water level of a dam has been measured by a float-, pressure-, or sound wave-type water level gauge. We have devised a method of measuring a water level by analyzing images of a row of slant plate, and we applied the method to dam water level measurement for the first time. Dam water level measurement is characterized by significant changes in the water level. The range of water level measurement is 25 m this time. To securely detect the water surface throughout the range, we set a number of slant plates in a row on a concrete wall upstream from the dam. To secure the measurement accuracy of 1 cm, we decided on the size of camera scenes (scene height) to be 4 m. We employed a method of controlling a camera direction so that, in accordance with change of water levels, images around the water surface should always be captured by the camera. The camera that we used was a dam monitoring camera for the purpose of measuring a water level in a non-emergency situation and monitoring in case of emergency.

**Key Words** : Water Level Measurement, Image Processing, Dam, Slant Plate

## 1 はじめに

筆者等は、傾斜板画像を解析して水位計測する方法を考案<sup>1)~5)</sup>したが、今回、はじめて、ダムの水位計測に適用した。画像による水位計測方式は非接触式であり精密機器はすべて陸上に設置するので機器の維持管理が容易であり、また計測状況をモニター画面により容易に確認でき定期的な校正作業(キャ

リブレーション)を必要としない等の点で優れた特性を持っている。本研究の目的は監視用カメラを流用し、ダムの上流側の水位25mの範囲を1台のカメラで、昼夜連続計測する技術の実用化を目的としている。今回の実験で、既設の圧力式水位計と同等の計測精度が得られることが確認できた。夜間計測は、蓄積型高感度カメラを使用したので、簡易な照明(100W白熱灯1台)の追加のみで可能であった。

今回の設備は、カメラを通常時水位計測に使用し、緊急時には監視カメラとして使用する。最近、監視用カメラの設置が盛んに行われるようになってきたため、画像による水位計測技術は、監視用カメラの有効活用という面でも注目されるようになってきた。

## 2 実験装置と方法

### 2.1 実験装置の概要

本実験装置は被写体部・映像入力部・画像処理装置・全体制御部・データ管理表示部等から構成されており、その概要を Fig.1 に示す。被写体部は垂直式量水標と傾斜板等である。水面付近のカメラ画像を取り込み画像処理装置にて水位を計測する。計測結果を LAN 経由にてサーバに転送する。サーバでは計測データを時系列な水位データファイルに格納する。水位計測ファイルの内容は LAN に接続したすべてのパソコンから参照できる。カメラを監視作業と水位計測に共用するので全体制御部でモード管理を行う。本実験装置の概略仕様は以下のとおりである。

- |                 |          |
|-----------------|----------|
| 1) 水位計測範囲       | 25m      |
| 2) 計測精度 (目標値)   | 1cm      |
| 3) 計測間隔         | 2 秒に 1 回 |
| 4) カメラと傾斜板間水平距離 | 90m      |

### 2.2 機器詳細内容

#### 2.2.1 被写体部

被写体部は、垂直式量水標と多段式傾斜板から構成されている。Fig.2 に被写体部の外観写真を示す。垂直式量水標は既設の目視用の量水標を流用した。垂直式量水標に近接して多段式傾斜板を取り付けた。垂直式量水標は、水位基準点決定に使用し、傾斜板は画像処理での水面位置検知に必要である。多段式傾斜板の概略仕様は以下のとおりである。

- |              |               |
|--------------|---------------|
| 1) 全高さ       | 25m           |
| 2) 幅         | 1m            |
| 3) 傾斜模様部幅    | 0.2m          |
| 4) 傾斜板模様の傾斜角 | 60° (水平面に対して) |
| 5) 塗装色       | 地：黒           |

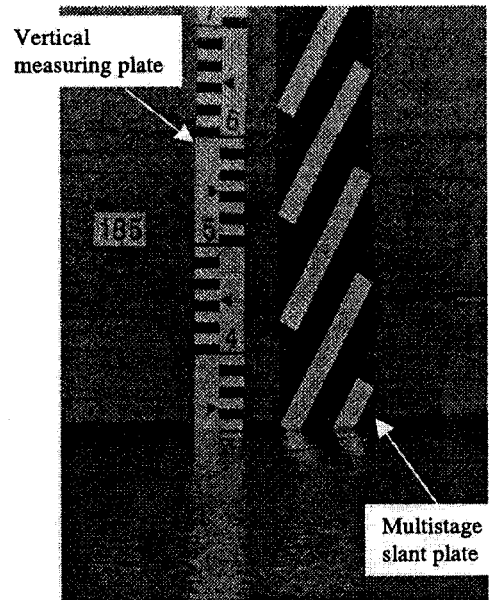


Fig.2 Photo of the object(a multistage slant plate and a measuring plate )

- |       |                       |
|-------|-----------------------|
| 6) 材質 | 傾斜板模様部：白艶消し<br>ステンレス板 |
|-------|-----------------------|

#### 2.2.2 映像入力部

映像入力部は、カメラ、レンズ、雲台、カメラ制御装置等からなる。概略仕様を以下に示す。

- |        |                |
|--------|----------------|
| 1) カメラ | 蓄積型高感度カメラ      |
| 被写体照度  | 蓄積モード時、0.02 lx |
| 撮像素子   | 1/2 型個体撮像素子    |
| 2) レンズ | 電動ズームレンズ       |
| 焦点距離   | 12~240mm       |
| 3) 雲台  | 電動雲台           |

#### 2.2.3 画像処理装置

カメラ画像を入力し画像解析により水位を得るため高速濃淡画像処理装置を使用した。計測結果を LAN 経由にてデータ管理表示部のサーバに伝送する。

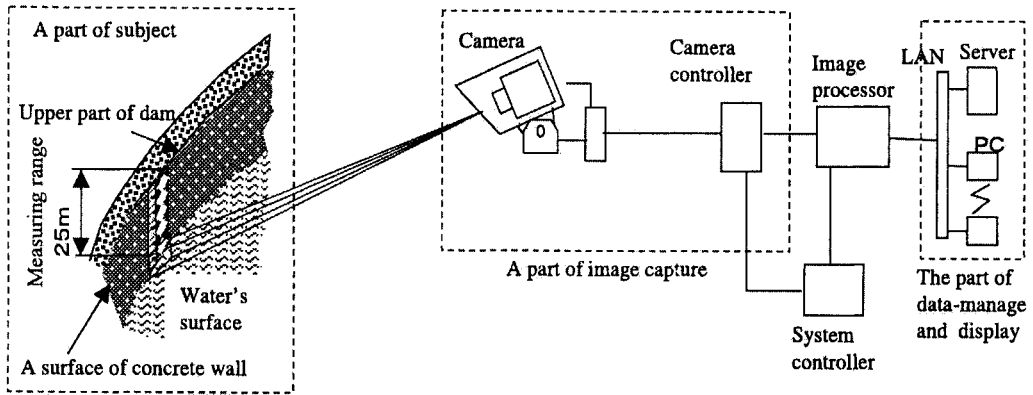


Fig.1 Overview of the experiment equipment

2.2.4 全体制御部

カメラを水位計測と目視監視作業に共用するために、水位計測モードと目視監視モードの管理を行う。画像処理装置よりのカメラ制御情報を受けてカメラ制御装置に対して制御信号を出力する。

2.2.5 データ管理及び表示部

画像処理部から計測結果を受信し、時系列ファイルを作成して水位計測データを保存する。水位計測データはLANに接続された任意のパソコンから参照できる。

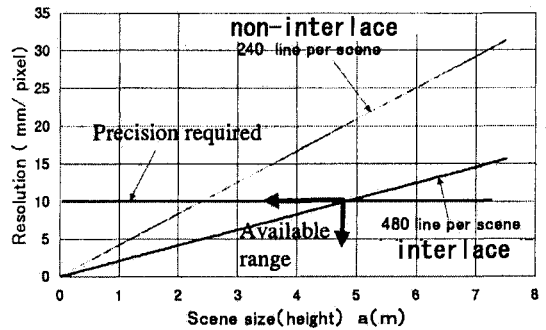


Fig.3 Relation between camera scene size and resolution

3 計測処理の内容

3.1 計測領域を複数のシーンに分割

カメラシーンサイズと解像度の関係をグラフで示すとFig.3のようになる。今回はインターレース仕様で1シーン480ラインとする。要求解像度を10mm/画素とするとシーンサイズ(高さ)は4.8m以下である必要がある4m(高さ)とした。

3.2 水位変動とカメラ向きの制御

水位の計測範囲は25mであり、Fig.4に示すように複数のシーンに分轄した。各シーンに対してカメ

ラのプリセット番号を対応させた。水位変動に対して最適のカメラシーンとなるように常にカメラ向きの制御を行った。

3.3 水面計測

カメラ画像を解析して水面位置を得るための傾斜板の水面境界部の特性については別途論文<sup>6)</sup>がある。論文によると傾斜板の実像部、反射像、屈折像は水面境界部で屈曲するので画像解析により水面境界部を検知することができる。波浪のある場合には、実像部だけが強調されるので、さらに水面検知が容易である。水面境界部の屈曲点を変曲点と称呼する。変曲点を得るための手法は現在各種の方式が開発さ

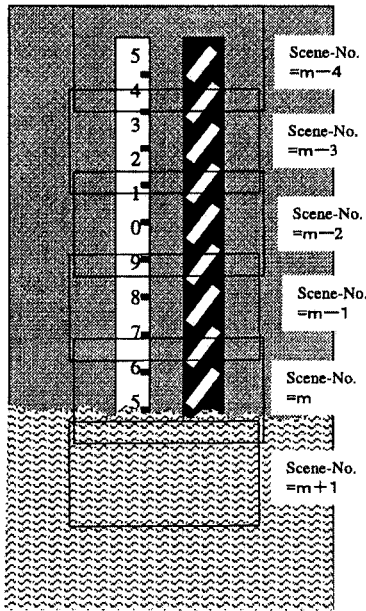


Fig.4 Dividing the scene of the measuring area

れているが本稿では省略する。

### 3.4 量水標の目盛による水位読取

Fig.5にカメラ画像の一例を示す。被写体のある面を真正面からみるような位置にカメラを設置できれば理想的であるが、実際にはカメラ設置位置に対する制約があり斜め方向の位置にカメラを設置することになる。今回もカメラをダムのコンクリート面に対して斜め方向に取り付けた。そのためカメラ軸を垂直方向に一致させると水面境界線は画像上傾斜した線で表せる。画像処理により水面境界の位置として変曲点(点H)の座標  $(x_h, y_h)$  が得られる。水面境界を示す直線を次式で表現できるとする。横軸を  $x$ 、縦軸を  $y$  とする。

$$y = K \cdot x + C \quad (1)$$

ここに、

$$K = \tan \omega \quad (2)$$

$\omega$  は水面境界線が画像上の水平座標軸に対する傾斜角であり実測値を使用する。

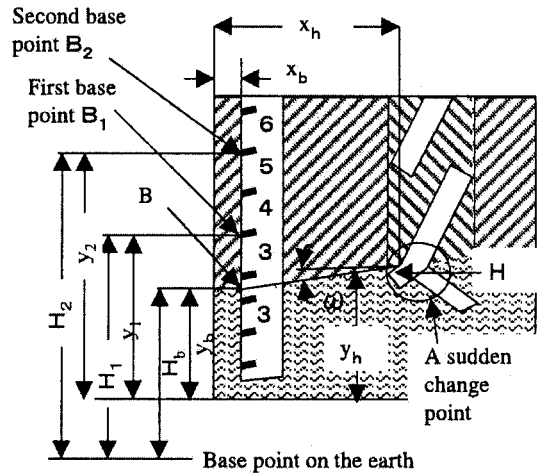


Fig.5 Details of a camera image

C は、水位により変動する。

変曲点(点H)の座標  $(x_h, y_h)$  を式1に代入してCを求める。

$$C = y_h - K \cdot x_h \quad (3)$$

従って、式1は、

$$y = K \cdot x + y_h - K \cdot x_h \quad (4)$$

量水標の目盛のある点(B)での座標を求めるには、(4)式に、

$$x = x_b \quad (5)$$

を代入し、点Bの水面位置  $y_b$  が次式で与えられる。

$$y_b = K \cdot x_b + y_h - K \cdot x_h \quad (6)$$

画像上の水面境界線が画面上水平にならない問題は上述の補正により解決でき、カメラを傾斜板の正面に設置するという制約を軽減することができた。

### 3.5 画像の量水標上の基準点の教示

画像上の量水標の座標系と世界座標系との関係式について以下記述する。両座標間の変換式は基準点を2個設けて関係式を決定する方法が最も簡便である。

基準点  $B_1$ 、 $B_2$  をとり地上での標高値 (世界座標系) の値を入力すると共に、さらに、画像上の対応する2つの基準点の座標を決定する。この2つの基準点情報を使用して基準点以外の点は、線形変換式を用いて変換すると世界座標系での水位  $H_b'$  は、次式で表現できる。

$$H_b' \approx H_1 + \varepsilon(y_b - y_1) \quad (7)$$

ここに、

$y_b$ : 傾斜板の水面検出点座標値 (画像座標系)

$$\varepsilon = (H_2 - H_1)/(y_2 - y_1) \quad (8)$$

: 座標間距離変換係数である。

$H_1$ : 点  $B_1$  の地上水位値 (世界座標系)

$H_2$ : 点  $B_2$  の地上水位値 (世界座標系)

$y_1$ : 点  $B_1$  の画像上の座標値 (画像座標系)

$y_2$ : 点  $B_2$  の画像上の座標値 (画像座標系)

但し、この関係式はカメラの撮像面と対応する壁面が平行なときに正確に成立するが、平行でないときには近似的に成り立つのであって誤差を考えなければならない。誤差の解決方法は後述する。

### 3.6 非線形座標変換による読取誤差の除去

一般には、カメラ撮像面と量水標の表面が平行でないため式7の座標変換では読取誤差を発生する。ここでは、読取誤差の発生しない厳密な変換式を導出し、式7の読取誤差の評価を行う。誤差の発生しない変換式は、非線形でありシステムに組込むのが複雑であり厳密な結果を必要とするときには使用可能であるが、誤差評価を行い精度的に許容できるときには、式7を使用することが簡便である。Fig.6はカメラ画像と被写体部シーン間の幾何学的な関係と解析に必要な各種の座標系の定義を示す。カメラ中心を  $C$ 、量水標の表面とカメラ視線中心線との交点を  $O$  とする。カメラ撮像面に対応する座標系をカメラ前方にとり  $\xi_1$  とし、量水標の表面の座標系を  $\xi_2$  とする。量水標の座標系  $\xi_2$  と点  $O$  を共有し、カメラ座標系  $\xi_1$  に平行な座標系  $\xi_3$  を定義する。2つの座標系  $\xi_1$ 、 $\xi_3$  間では、原点と座標軸を適当に定義することにより

下記の変換式が成立する。

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここに、

$x$  : 座標系  $\xi_1$  上の座標値

$y$  : 座標系  $\xi_1$  上の座標値

$v_x$  : 座標系  $\xi_3$  上の座標値

$v_y$  : 座標系  $\xi_3$  上の座標値

$\varepsilon$  : 距離変換係数。式(7)参照。

上述のように2つの座標系  $\xi_1$ 、 $\xi_3$  間の変換式は、厳密に線形の式で表現できる。一方、2つの座標系  $\xi_2$  と  $\xi_1$  又  $\xi_3$  間の変換は非線形である。以下その関係式を導出する。座標系  $\xi_2$  の主軸  $OU$  と座標系  $\xi_3$  の面の主軸  $OV$  は角度  $\Phi$  で交叉している。

$$\Phi = \tan^{-1}(Y_0/X_0) \quad (10)$$

座標系  $\xi_2$  の主軸  $OU$  上に任意の点  $B$  をとる。点  $B$  とカメラ原点を結ぶ延長線と座標  $\xi_3$  との交点を  $E$  とする。その幾何学的な関係の詳細を Fig.7 に示す。ここで、

$\delta = \angle OCE$ 、 $OB$  を  $u$ 、 $OE$  を  $v$  とおく。

点  $B$  より辺  $OC$  及び辺  $OE$  への垂線の足をそれぞれ  $S$ 、 $T$  とする。最初に、 $\delta$  について以下求める。

$$BS = OB \cos \phi = u \cos \phi \quad (11)$$

$$OS = u \sin \phi \quad (12)$$

$$CS = OC - OS = (X_0^2 + Y_0^2)^{1/2} - u \sin \phi \quad (13)$$

$$\tan \delta = BS/CS$$

$$= u \cos \Phi / ((X_0^2 + Y_0^2)^{1/2} - u \sin \Phi) \quad (14)$$

整理して、

$$\begin{aligned} \delta &= \tan^{-1}(u \cos \phi / ((X_0^2 + Y_0^2)^{1/2} - u \sin \phi)) \\ &= \delta(u) \end{aligned} \quad (15)$$

次に、座標系  $\xi_2$  と座標系  $\xi_3$  の座標主軸上の変換式を求める。

$$v = OE = ET + OT \quad (16)$$

$$OT = BO \cos \Phi = u \cos \Phi \quad (17)$$

$$BT = BO \sin \Phi = u \sin \Phi \quad (18)$$

$$ET = BT \tan \delta = u \sin \Phi \tan \delta \quad (19)$$

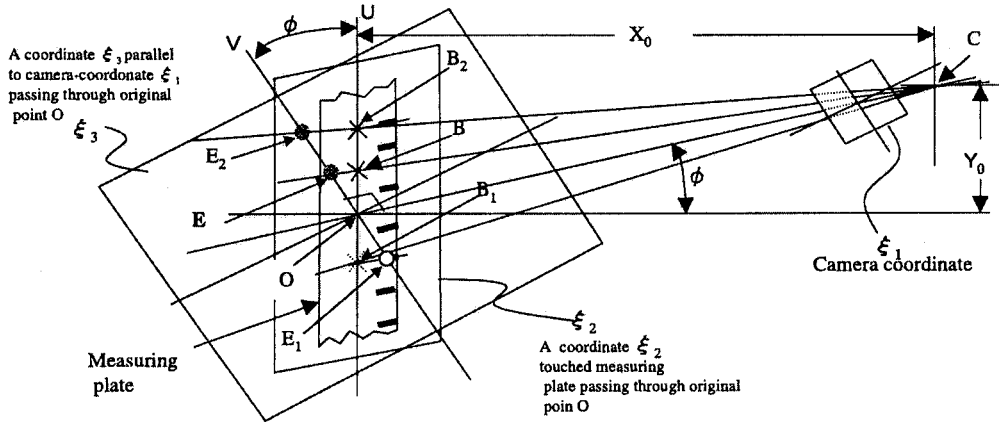


Fig.6 Geometric relation between the subject and the image capturing section

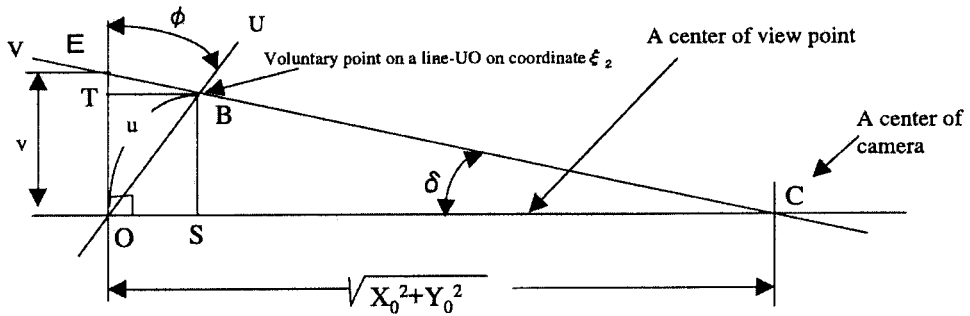


Fig.7 Conversion between coordinate systems  $\xi_2$  and  $\xi_3$

座標系  $\xi_2$  から座標系  $\xi_3$  への変換式は、原点を  $O$  にとれば次式として得られる。

$$v = u(\sin \Phi \tan(\delta(u)) + \cos \Phi) = V(u) \quad (20)$$

逆に、座標系  $\xi_3$  から座標系  $\xi_2$  への変換式は、式 20 を解くと次式として表現できる

$$u = U(v) \quad (21)$$

21 式は非線形で実際には解くことができない。テーブルを使用したり数値計算等で求めることになる。座標系  $\xi_2$  上の 2 つの基準点  $B_1$ 、 $B_2$  点の座標値をそれぞれ  $u_1$ 、 $u_2$  とする。座標系  $\xi_3$  上の対応する 2 つの基準点  $E_1$ 、 $E_2$  点の座標値をそれぞれ  $v_1$ 、 $v_2$  とする。座標系  $\xi_3$  上の任意の点を  $E$  とする。点  $B$  に対応する座標  $\xi_1$  での値を  $y_b$ 、座標  $\xi_3$  での値を  $v_b$  とする。簡易的な方法では、点  $B$  の世界座標読取値  $H_b'$  は画像座標値  $y_b$  から線形変換して次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} H_b' &\cong H_1 + \varepsilon(y_b - y_1), \\ \varepsilon &= (H_2 - H_1)/(y_2 - y_1) \\ y_1 &= v_1/\varepsilon, y_2 = v_2/\varepsilon, y_b = v_b/\varepsilon \\ &\text{より} \\ H_b' &\cong H_1 + (v_b - v_1) \end{aligned} \quad (22)$$

となる。

教示点以外の目盛は、座標系  $\xi_2$  上で等間隔目盛で計算されるべきであり、 $B$  点の読取値  $H_b$  は、次式で表現できる。

$$H_b = H_1 + u_b - u_1 \quad (23)$$

式 22 と式 23 の差  $\Delta H_b$  が、線形変換の読取誤差を表し、座標系  $\xi_2$  上の座標点  $u$  の関数として次式のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta H_b(u) &= (u_b - u_1) - (v_b - v_1)(u_2 - u_1)/(v_2 - v_1) \\ &= (u_b - u_1) - (V(u_b) - V(u_1))(u_2 - u_1) \\ &\quad / (V(u_2) - V(u_1)) \end{aligned} \quad (24)$$

式 24 に示す誤差値は、カメラ視線傾斜角  $\Phi$  と 2 つの基準点  $u_1, u_2$  が決まると決定される。本実験での最も誤差量の大きなところ ( $Y_0 = 43\text{m}$  付近で、 $\Phi = 25.5^\circ$ ) での誤差値をグラフで示すと Fig.8 のよう

になる。本研究では各種の  $\Phi$  に対するこのようなグラフを予め準備して線形変換結果を補正して使用した。Fig.6 では量水標とカメラの位置関係で水平方向の回転の影響が考慮されていない。量水標とカメラの位置関係で水平方向の回転の影響は、Fig.6 では考慮せず、Fig.5 で考慮した。カメラと対象物間距離 (約 90m) が大きくその他の誤差は無視した。

### 3.7 計測値の移動平均値の計算方法

画像処理装置は、約 2 秒に 1 回画像を取り込み水位を計算することにした。水面の波の影響を除くために次式により移動平均値を計測値とした。

$$\text{移動平均水位} = \sum_{t=t_1}^{t_2} M(t)/n \quad (25)$$

ここに、

$M(t)$ : 時刻  $t$  における計測値

$t_1$ : 移動平均開始時刻

$t_2$ : 移動平均終了時刻

$n$ : 時刻  $t_1 \sim t_2$  間の画像処理回数

計算時刻の範囲  $t_1 \sim t_2$  は、2 分間とした。

### 3.8 カメラのモード管理

通常時は、水位計測に監視カメラを使用し、緊急時にカメラを監視モードに切り替えてカメラによる目視監視に使用する。目視監視中であっても決められた計測時刻 (例えば正時) には、自動的に計測モードに切替わり水位計測結果を出力できるようにした。

## 4 実験結果と検討

本実験装置により 1998 年 4 月から 1999 年 8 月は昼間のみ計測を実施、1999 年 9 月に照明 (100W 白熱灯 1 台) を追加し、その後昼夜連続計測を行っている。この間、貯水位で 184m から 205m (約 21m の範囲) においてカメラプリセットの再現性の問題や気象の影響等もなく良好な結果を示している (画像処理結果画像の目視確認では概ね 1cm の精度に入っている)。Fig.9 は計測結果を表示した画面である。計測結果の一例を Table1 及び Fig.10 に示す。貯水位は取水口部に設置の既設圧力式水位計の計測

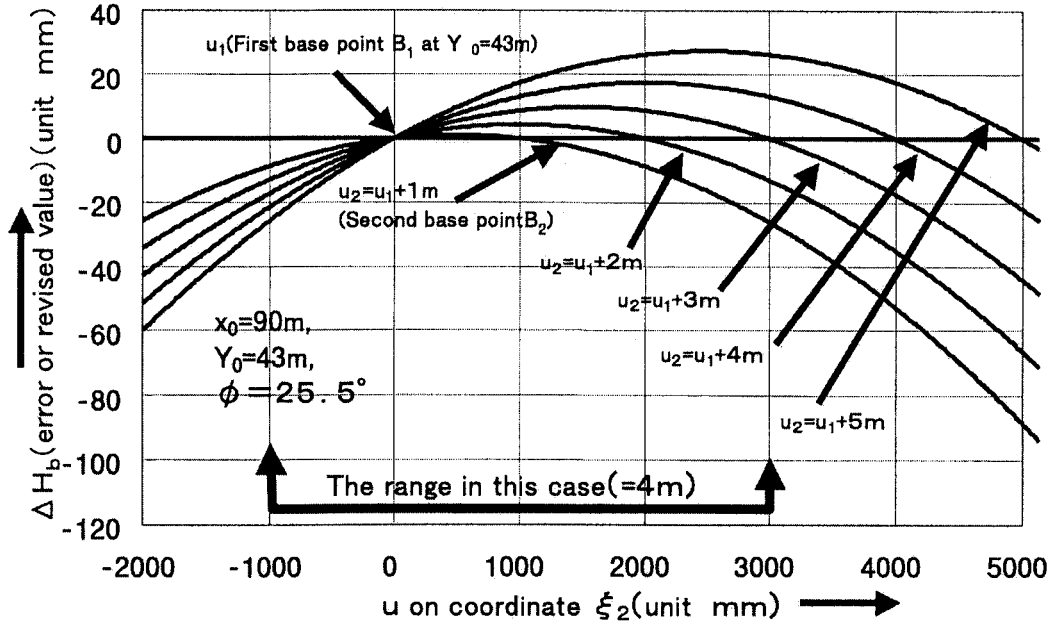


Fig.8 Amount of error correction

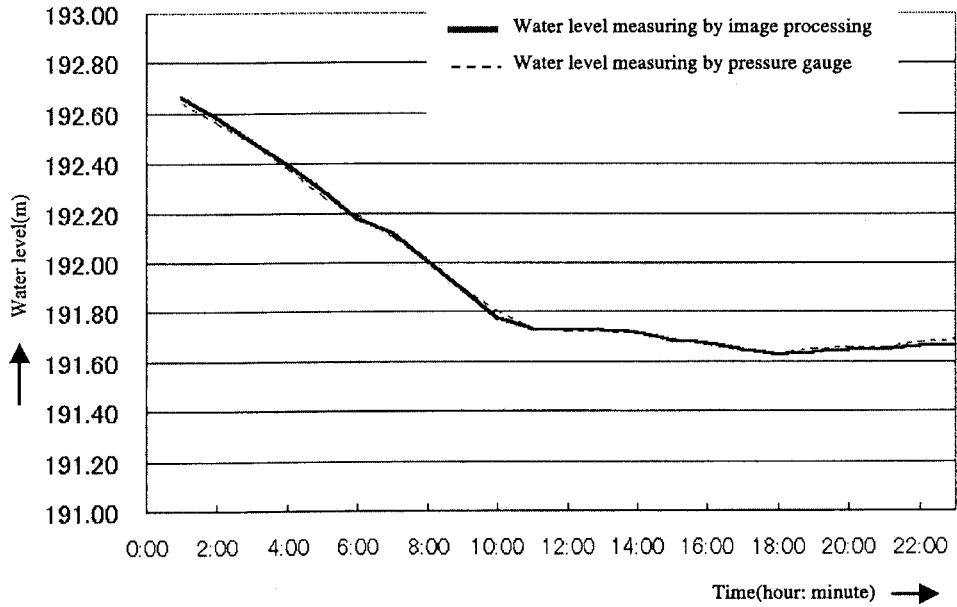


Fig.10 Results of water level measurement experiment



Table 1. Results of water level measurement (September 16, 1999)

(Unit:m)

Time	Water level		Differ- -ence	Square difference	time	Water level		Differ- -ence	Square difference
	By pressure gauge	By image processing				By pressure gauge	By image processing		
1:00	192.67	192.64	0.03	0.000635917	13:00	191.73	191.72	0.01	0.000002722
2:00	192.59	192.56	0.03	0.000635917	14:00	191.72	191.71	0.01	0.000002722
3:00	192.49	192.48	0.01	0.000002722	15:00	191.69	191.69	0	0.000002287
4:00	192.40	192.38	0.02	0.000231569	16:00	191.68	191.67	0.01	0.000002722
5:00	192.30	192.27	0.03	0.000635917	17:00	191.65	191.64	0.01	0.000002722
6:00	192.18	192.19	-0.01	0.000218526	18:00	191.63	191.63	0	0.00002287
7:00	192.12	192.10	0.02	0.000231569	19:00	191.64	191.65	-0.01	0.00021852
8:00	192.01	192.01	0	0.000002287	20:00	191.65	191.66	-0.01	0.000218526
9:00	191.90	191.90	0	0.000002287	21:00	191.65	191.66	-0.01	0.000218526
10:00	191.78	191.80	-0.02	0.000614178	22:00	191.67	191.68	-0.01	0.000218526
11:00	191.74	191.73	0.01	0.000002722	23:00	191.67	191.69	0.02	0.000614178
12:00	191.73	191.72	0.01	0.000002722	Calculation(m, $\sigma$ )			m=0	$\sigma=0.01$

値を使用した。計測結果の差が部分的に目標精度である1cmを越えるのは、取水時、取水口部の水位が一時的にダムの平均水位に対して変動するためと思われる。

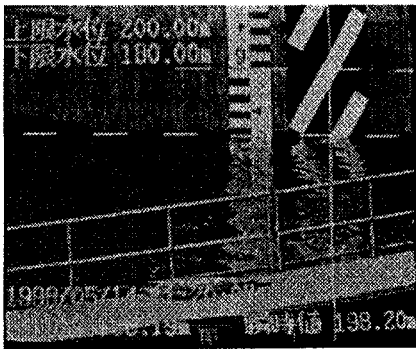


Fig.9 Measurement results display screen

## 5 まとめ

傾斜板画像を解析して水位を計測する方法を今回ダムの水位計測に適用した。今回の実験装置ではダムの水位計測範囲が25mという広い範囲を一台のカメラで計測できる構造とし、多段式の傾斜板をダム上流のコンクリート壁面に取り付ける方法をとった。実験期間中のダム水位変化約21mの範囲にわたって良好な計測結果を得た。カメラは監視カメラを流用し、蓄積型の高感度カメラを用いた。夜間計測用として100Wの白熱照明を1台追加し夜間の計測も行えるようになった。約2年間の計測実験により本方式の有効性を確認できた。今後、気象の計測への影響と河川での長期計測結果について別途報告したい。

謝辞：本研究に対して、現地データの使用を許可していただいた和歌山県二川ダム管理事務所殿の関係者に感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 高木, 他 : 画像処理を用いた非接触式の液面高さ計測装置の開発、学会誌 EICA、第 1 巻第 2 号、190-193 (1996)
- 2) Takagi, etc : Development of a noncontact liquid level measuring system using image processing, Wat. Sci. Tech. Vol.37, No.12, pp.381-387 (1998)
- 3) Takagi, etc : Development of a noncontact liquid level measuring system using image processing, 7th international workshop(IAWQ specialist group on instrumentation, control and automation), Brighton, UK, Session 8 Mathmodeling (1997)
- 4) 日立製作所特許 第 2933158 号
- 5) 日立製作所特許 第 2964872 号
- 6) 高木, 他 : 水位計測に使用される傾斜板水面境界部特徴の幾何学的・光学的理論解析、学会誌 EICA、第 4 巻第 4 号、9-18 (2000)

(受付 2000. 6. 6)

(受理 2000. 7. 11)