44 相関法を用いたリアルタイム多点同時速度ベクトル計測システムの開発

(株)応用計測研究所 清水雅夫^{*}、桑島茂純

A Development of a Real-Time Velocity Vector Measurement System using Correlation Hardware

Masao SHIMIZU ^{*}, Shigesumi KUWASHIMA ^{*}

This report is on a new velocity measurement system which can measure and display velocity vectors in real-time by processing the B/W video signal. Its measuring rate is 1/60 sec for 16 areas. The method of the determination of velocity vector is a 2-dimensional correlation technique of binary video data.

The system is realized by developing a gate-array (LSI) which calculates 1-dimensional correlation coefficients of horizontal 16 points and a hardware which uses the LSI for processing the video signal to calculate correlation coefficients of horizontal/vertical 256 points at the rate of the video field.

This report shows an evaluation of the system by using deviation analysis. And some measurement examples of velocity distribution and transitional velocity are presented.

1. はじめに

本報告は、シャッター付カメラから1/60秒毎に入力される画像を用いて1/60秒の時間間隔で撮影された2枚の画像から、相関法を用いてリアルタイムで速度ベクトルを計測し、カメラ画像に重ね合わせて表示可能な画像計測装置に関するものである。この画像計測装置は、新たに開発した相関処理用のゲートアレイを用いて2次元相関演算をリアルタイムに実行できる専用ハードウェアにより実現されている。

本報告では、この画像計測装置の構成と速度ベクトル算出方法について述べ、また一定速度で移動する2次元パターンの速度ベクトル計測結果の測定値のばらつきについて述べる。さらに、速度ベクトル分布計測例と速度ベクトルの時間変化の計測例について述べる。

2. 画像計測装置の構成

図1にハードウェアの構成を示す。2次元リアルタイム相関モジュールは最大16モジュール組み込み可能で、この時には1/60秒毎に画面内の16ヶ所の速度ベクトルの同時計測が行える。接続可能な画像入力装置は、白黒TVカメラ2台またはカラーTVカメラ1台またはVCRである。白黒TVカメラ2台を接続することにより、観察領域の拡大や領域内の拡大観察などが同時に行える。計測データはGP-IB回線からホストコンピュータに送出可能である。また、ホストコンピュータから計測装置の機能を制御でき、リアルタイム・インテリジェント計測システムが構成できる。画面の有効範囲は水平660垂直415画素（インターレース）である。画素クロックは約14.32MHzである。

図2に2次元リアルタイム相関モジュールのブロック図を示す。装置内の画像データベースから入力されるリアルタイム・デジタル画像信号を2値化し、可変遅延にて適切に遅延させてから遅延量の異なる2つの画像信号について相関処理を行う。ここで設定した遅

^{*} OKK INC., 3-22-3 Kitasenzoku, Ohta-Ku, Tokyo 145 JAPAN

延量とは別に、1ライン遅延を15ライン分持つことにより垂直方向16ライン分相関処理を行う。専用ゲートアレイは、画面水平方向16画素分相関処理を行なう。従って、1/60秒毎に256カ所の相関係数を算出し評価することができる。

fig. 1
 The construction of the new measuring system

fig. 2
 The block diagram of the correlation module

3. 速度ベクトル算出方法

本計測装置は、2枚の画像データ中の2次元領域について相互相関係数を算出し、その最大値を与えるずらし量を移動量とするものである。2枚の画像のうち、古い方の画像に設定される2次元領域を「初期位置」、新しい方ものを「注目範囲」と呼ぶことにする。これら相関領域は任意に設定可能だが計算範囲は極めて限られたものである。そこで本計測装置では速度ベクトルに対する追従（トラッキング）という考え方を採用している。すなわち、次回計測時刻において予測される速度ベクトル位置に「注目範囲」を設定し、その周辺の計算範囲について相互相関係数を算出する。現段階ではこの予測に加速度ベクトルのみを用いている。

また、専用ハードウェアは画素の大きさを単位とするクロックで動作しており、本質的にそれ以上の空間分解能が無い。本計測装置では、相互相関係数値を使用して空間的に2次元関数を使って内挿することにより、画素以上の空間分解能を得ている。

本計測装置で計測される速度ベクトルは次のようになる。

$$\vec{v}_n = \text{int}[\vec{v}_{n-1} + (\vec{v}_{n-1} - \vec{v}_{n-2})] + \vec{c} + \vec{e}$$

ただし、y座標はフィールド走査線における座標で、奇数/偶数フィールドでそれぞれ補正されている。ここに、nはフィールド番号、int[x]はxを四捨五入した整数値、

$\vec{c} = (c_x, c_y)$ は予測位置に対する相関係数のピーク位置による補正項（整数部）、

c_x, c_y は次のFの評価結果を与えるk, l、Nは相関領域に関する和である。

$$F = \max_{l=-8, \dots, 7} [\max_{k=-8, \dots, 7} [R(k, l)]]$$

$$R(k, l) = \sum_{n=1}^N (f_{n-1}(X_{init}, Y_{init}) \text{ EXNOR } f_n(x_n+k, y_n+l))$$

ここに、 $f_{n-1}(x, y)$ 、 $f_n(x, y)$ は位置(x, y)における2値化した画像データ、 (X_{init}, Y_{init}) は「初期位置」、EXNOR は $x \text{ EXNOR } y = 1 (\text{when } x \neq y), 0 (\text{when } x = y)$ 。

$$x_n = X_{init} + \text{int}[\vec{v}_{xn-1} + (\vec{v}_{xn-1} - \vec{v}_{xn-2})]$$

$$y_n = Y_{init} + \text{int}[\vec{v}_{yn-1} + (\vec{v}_{yn-1} - \vec{v}_{yn-2})]$$

$\vec{e} = (e_x, e_y)$ は相関係数のピーク位置周辺で 2 次の内挿による補正項 (小数部) である。

$$e_x = \frac{1}{2} \times \frac{R(c_x-1, c_y) - R(c_x+1, c_y)}{R(c_x+1, c_y) - 2 \times R(c_x, c_y) + R(c_x-1, c_y)}$$

$$e_y = \frac{1}{2} \times \frac{\max_{k=-8, \dots, 7} [R(k, c_y-1)] - \max_{k=-8, \dots, 7} [R(k, c_y+1)]}{\max_{k=-8, \dots, 7} [R(k, c_y+1)] - 2 \times \max_{k=-8, \dots, 7} [R(k, c_y)] + \max_{k=-8, \dots, 7} [R(k, c_y-1)]}$$

4. 測定値のばらつき

本計測装置による測定値がばらつく原因としては、入力画像の量子化誤差、測定パターンの変形による誤差、インターレース画像を使用することによる誤差などが考えられるが、これらがそのまま測定値のばらつきになるわけではない。本報告では解析的な検討は行わず、実測値について標準偏差を評価することにした。

測定対象は一定速度で回転する円筒で、側面に 2 次元パターンを貼付けてある。円筒の直径は約 31cm で、回転したときに半径方向にゆらぎがないように注意した。円筒の最大回転速度は約 60rpm である。2 次元パターンは、撮影したときに直径が 10 画素程度となるように作成した。密度の高いもの (パターン I) と低いもの (パターン II) を用意した。カメラは、ソニー XC-77RR (2/3 インチ 白黒) でシャッター速度は 1/1000 秒に設定した。

図 4 に測定値の直線性と標準偏差を示す。撮影速度 50 [dot/fld] より大きな領域で標準偏差が上昇しているのは、シャッター速度の影響で撮影画像が流れているためと考えられる。垂直方向の標準偏差が水平方向の約 2 倍となっているのは、画像信号の垂直方向の分解能が水平方向に比べて半分しかないためである。パターン II の標準偏差がパターン I に比べて大きくなっているのは、パターン II の方が相互相関係数のピークがなだらかで、2 次関数による内挿の際の極値推定精度が低下したためと考えられる。

fig. 3
The 2-D patterns
(a) pattern I (b) pattern II

fig. 4
The linearity and the deviation
(a) horizontal direction (b) vertical direction

5. 速度ベクトル分布計測

本計測装置をホストコンピュータから制御し計測画面内の速度ベクトル分布を計測した。

図 5 に回転円盤の速度ベクトル分布の計測結果を示す。回転円盤の直径は約 31cm で回転速度は約 31rpm である。表面に 2 次元パターン I を貼付けてある。相関領域は 30 × 30 で、過誤ベクトルの除去は行っていない。図 6 に円形容器内の表面流れの速度ベクトル分布の

計測結果を示す。容器の直径は約15cmで中央付近に直径約3cmの円筒障害物がある。エアノズルで表面に定常流れを発生させた。プラスチック片と面照明によって可視化した。相関領域は 30×30 で、表示倍率は10倍である。過誤ベクトルの除去は行っていない。

fig. 5
The velocity distribution of a rotating disk

fig. 6
The velocity distribution of a surface flow

6. 速度ベクトルの時間変化の計測例

2次元パターンIが貼付けてある回転円盤の起動特性を測定した。図7に計測結果を示す。回転起動時の角加速度が2種類ある点、オーバーシュートがある点などの動特性が確認できる。

流れの速度ベクトルまたは速度ベクトル分布の過渡応答特性については測定例が少ない。本計測装置は、このような分野での応用に、特に有効と考える。

fig. 7
The transitional velocity of start of a rotating disk

7. まとめ

専用ゲートアレイを使用した専用ハードウェアによるリアルタイム画像計測装置を開発した。ここでは、その概要を紹介し計測例を示した。

今後は、(1) 計測装置の動特性 (2) 計測装置のモデル化と不確かさ解析 (3) 非定常流れ場の速度ベクトル計測 (4) マークを付けられない測定対象の変形の可視化などについて報告する予定である。

8. 参考文献

- (1) 植村、山本ほか：「2値化相関法（粒子追跡法の高速画像解析アルゴリズム）」
可視化情報10-38(1990-7) など多数。
- (2) 小林、佐賀ほか：「画像処理による速度場自動計測とトレーサ粒子の追跡法」
流れの可視化8-30(1988-7) など多数。
- (3) 木村、高森ほか：「相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測（円柱後流の変動渦への適用）」
計測自動制御学会論文集23-2(1987-2) など。