

PIVへのニューラルネットワークの適用

— 誤対応ベクトルの消去 —

太田淳一* 山本富士夫* 幸川光雄* 清水尚典** 青山哲生***

An Application of Neural Network to Particle Imaging Velocimetry - Deleting Erroneous Vectors -

Junichi OHTA, Fujio YAMAMOTO, Mitsuo KOUKAWA,
Naonori SHIMIZU, and Tetsuo AOYAMA

(Received Feb. 28, 1995)

The binary image cross-correlation method (one of Particle Imaging Velocimetry) has been used to measure unsteady whole field velocity. However, there is a possibility to involve erroneous vectors in the velocity measurement results. To improve this problem, several methods have been proposed. Neural network had been applied to find and delete erroneous vectors for improving accuracy of the binary image cross-correlation method. The neural network method, however, seems to be not enough to study what kind of erroneous vectors can be deleted. This study showed that erroneous vectors can be deleted under the conditions of their absolute deviation angles greater than 39 degrees for an uniform flow using the neural network and that this algorithm is useful for spatially high number of velocity vectors.

1. 緒言

流れ場の可視化画像計測方法の一つに相関法があるが、計算速度の向上、安価な装置の利用、メモリサイズの減少の観点から、2値化相関法が開発された⁽¹⁾。この方法では、2時刻の流れ場に対して2値化されたトレーサー粒子分布の類似性が相関係数で判断され、2時刻間で対応するトレーサー粒子が見つけられ、速度場が測定される。流れ場全体の画像が時間に対して連続的に得られ、それぞれの連続する画像にこの方法を適用して画像処理できるので、2値化相関法は流れ場全体を非定常に計測できるという利点を有している。しかし、既に述べたように2時刻間の粒子の対応づ

* 機械工学科 ** 大学院機械工学専攻 *** 機械工学科 (学生)

けに、相関係数という確率が使用されているために、2時刻間の粒子の誤対応という問題の生じることがある。この問題に対して、信頼性指標を用いたダブルチェック法⁽²⁾、また簡易ダブルチェック法⁽³⁾が提案されている。また、ニューラルネットワークを利用する方法⁽⁴⁾、遺伝的アルゴリズム⁽⁵⁾を用いる方法も発表されている。しかし、ニューラルネットワークを使用する方法は、どのような誤対応ベクトルが消去できるか十分に明らかにされていない。本研究では、一様流中に特定の条件をつけた誤対応ベクトルの含まれる流れに木村らのニューラルネットワーク⁽⁴⁾が適用され、そのアルゴリズムがどのような誤対応ベクトルの消去に有効かが明らかにされる。さらに、より複雑な流れとして一様流中に湧きだしのある流れ場を例にとり、ニューラルネットワークの誤対応ベクトル消去に適用できる条件が検討される。

2. 誤対応ベクトル判定へのニューラルネットワークの適用

2.1 ホップフィールドネットワーク

相互結合型のホップフィールドネットワークにおいて、ユニット*i*が他のユニットから受け取る信号の総和を u_i とすると、 u_i は式(1)のように表される。

$$u_i = \sum_{j \neq i} w_{ij} x_j + \theta_i \quad (1)$$

ここで、 w_{ij} はユニット*i, j*間の結合係数、 θ_i はユニットのしきい値、 x_j はユニット*j*の出力値である。 x_j は、0か1のどちらかの値をとる。次の時刻でユニット*i*の出力値 x_i は入力 u_i が正ならば1、負（または0）ならば0に更新される。これを時間発展規則という。ネットワークのエネルギーは、式(2)で表される。そのエネルギーは、ネットワークを動作させると時間発展的に単調減少し、極小値になることが証明されている⁽⁶⁾。

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} w_{ij} x_i x_j + \sum_i \theta_i x_i \quad (2)$$

2.2 誤対応ベクトルの判定

誤対応ベクトルの判定を行うために、次のように、 w_{ij} や θ_i のパラメータが決定される。

- 1) 制約条件を満たしていないとエネルギーが増加するような数式を導入する。
 - 2) 1) で導入した式と式(2)の係数の比較により各パラメータを決定する。
- 粒子速度ベクトルの誤対応判定のために、次のような簡単な制約条件を用いる。

「隣接する真のベクトルは似ている。」

この条件を数式化するには、似ているベクトル間のベクトル差の絶対値は小さく、似ていないベクトル間のベクトル差の絶対値は大きいことから、ベクトル差の絶対値が適当なしきい値をこえるベクトルの組合せに対しては値が増加し、ベクトル差の絶対値が適当なしきい値より小さいベクトルの組合せに対しては値が減少するような関数 E_1 を考える。これらのことから、式(3)が得られる。

$$E_1 = \frac{1}{2} A \sum_{i \neq j} (R_{ij} - B) x_i x_j \quad (3)$$

ただし、 $R_{ij} = |\overline{v}_i - \overline{v}_j|$ であり、 $\overline{v}_i, \overline{v}_j$ はユニット*i, j*に対応する速度ベクトルであり、 A と B は正

の数である。ここで、式(2)と式(3)より以下の関係が得られる⁽⁴⁾。

$$w_{ij} = A(B - R_{ij}), \quad \theta_i = 0 \quad (4)$$

以上の計算のフローチャートを図1に示す。まず、誤対応ベクトルを含む速度成分が読み込まれ、式(3)にしたがって、ネットワークのエネルギーが計算される。初期状態で全てのユニットの出力値が、1と設定される。次に、式(4)から結合係数が求められる。これらの値から、式(1)より、入力の総和が求められ、時間発展規則に従って、ユニット*i*の出力値 x_i が更新される。出力値の更新操作が、指定した回数だけ繰り返された後で、出力値0のユニットの速度は、誤対応ベクトルとして消去される。繰り返し回数は、エネルギー変化の様子を検討し、ユニット数 9×9 の81個の場合、1000回とした。

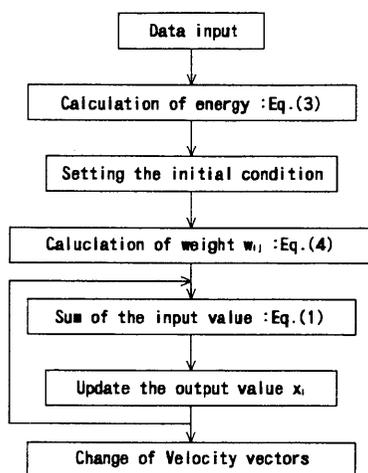


図1 誤対応ベクトル判定のためのフローチャート

2. 3 二次元速度ベクトル分布への適用

このネットワークを用いて実際に誤対応ベクトルの判定が行われる。AおよびBが式(5)のように設定され、各ユニットは隣接する8つのユニットと結合されているものとして計算する。

$$A = 1, \quad B = \frac{1}{3} \cdot (|\vec{v}_i| + |\vec{v}_j|) \quad (5)$$

3. 判定結果と考察

一様な流れの速度ベクトル分布に、次の条件を付けた誤対応ベクトルを故意に混入して、それらを判定できるか検討した。

- (1) 同一方向で大きさが異なる誤対応ベクトルの場合
- (2) 方向が異なり大きさが同じ誤対応ベクトルの場合
- (3) 方向と大きさのどちらも異なる誤対応ベクトルの場合

(1),(2)の場合の正判定の割合を表1,表2に示し,(2)の判定前と判定後の速度ベクトル分布を図2(a)~図3(b)に示す。

同一方向で大きさが異なる誤対応ベクトルを混入した場合

表1より、方向が同じで大きさの異なる誤対応ベクトルは、あまり消去できない。式(4)と式(5)から考察すると一様流中で大きさの0.5倍以下あるいは2倍以上の誤対応ベクトルは、消去できることを付録1で証明した。

表1 一様流中に同一方向で大きさが異なる誤対応ベクトルを混入した場合の正判定割合

Erroneous vectors condition		Ratio of erroneous vectors (Number of erroneous vectors)	
Direction	Size	10% (9)	20% (17)
Same	Larger	93.8%	86.4%
Same	Smaller	92.6%	86.4%

方向が異なり大きさが同じ誤対応ベクトルを混入した場合

正対応に対する誤対応ベクトルの方向のずれ角を $\Delta\theta$ とする。図2と表2から、 $0 < |\Delta\theta| < \pi/2$ の異なる方向の誤対応ベクトルは、あまり消去できていない。しかし、図3と表2から、 $\pi/2 < |\Delta\theta| < \pi$ の異なる方向の誤対応ベクトルは、完全に消去できている。一様流中に1つの誤対応ベクトルがある場合 $|\Delta\theta| < 39.5^\circ$ では消去できることを本研究で証明した。(付録2参照)

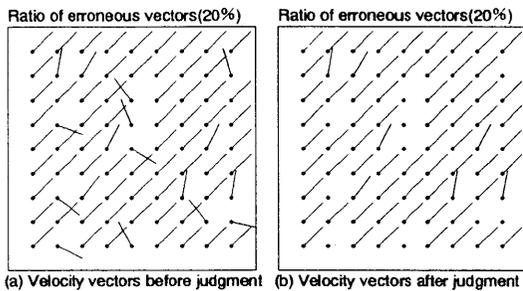


図2 一様流に誤対応ベクトルを含む

速度ベクトル分布

誤対応ベクトルの条件：

$0 < |\Delta\theta| < \pi/2$ の異なる方向で等しい大きさ

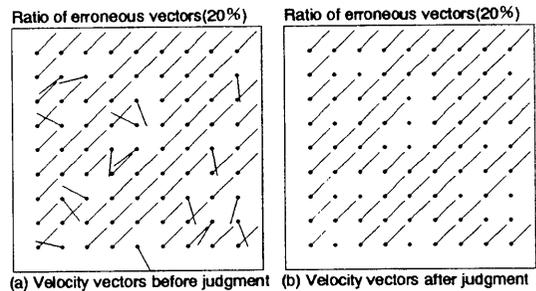


図3 一様流に誤対応ベクトルを含む

速度ベクトル分布

誤対応ベクトルの条件：

$\pi/2 < |\Delta\theta| < \pi$ の異なる方向で等しい大きさ

表2 一様流中に方向が異なり大きさが同じ誤対応ベクトルを混入した場合の正判定割合

Erroneous vectors condition		Ratio of erroneous vectors (Number of erroneous vectors)	
Direction	Size	10% (9)	20% (17)
$0 < \Delta\theta < \pi/2$	Same	95.1%	91.4%
$\pi/2 < \Delta\theta < \pi$	Same	100%	100%

また、流れに変化のある例として図4に示す様な流れにわき出しのある場合に、判定を行った結果を表3のwide areaの欄に示す。図は省略するが、わき出しの影響の小さいところでは、一様流の

場合と同様に、良好な結果が得られたがわき出し付近では、正しく判定されるべき速度ベクトルが、消去されていた。そこで、速度ベクトルの空間に存在する数密度の高い場合として、図4の速度ベクトル分布から、□の部分拡大した速度ベクトル分布に対して判定が行われた。その結果を図5に示す。図5と表3より、速度ベクトルの方向や大きさの違いが極端に大きくなければ、誤判定のなくなるという良好な結果が得られた。以上の結果から、ここで示したニューラルネットワークは、わき出し近傍などの速度変化の大きい流れに対して、速度ベクトルの存在する数密度の低いところで誤対応ベクトルの消去に有効ではないが、速度ベクトルの存在する数密度の高いところでは、それらの消去に有効である。また、規則正しい格子点上の速度ベクトル分布だけでなく、ランダムに存在する速度ベクトル分布に適用できるように、アルゴリズムを改良することによって、ニューラルネットワークを2値化画像相関法に適用することができるであろう。

表3 一様な流れにわき出しがある場合の正判定割合

Velocity vector distribution	Ratio of erroneous vectors (Number of erroneous vectors)	
	10% (33)	20% (66)
Uniform flow + Source Wide area	98.4%	98.2%
Uniform flow + Source Enlarged area	100%	100%

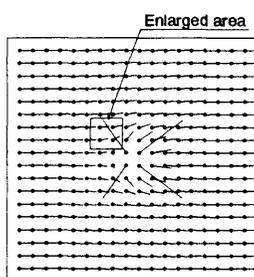


図4 一様な流れにわき出しのある速度ベクトル分布

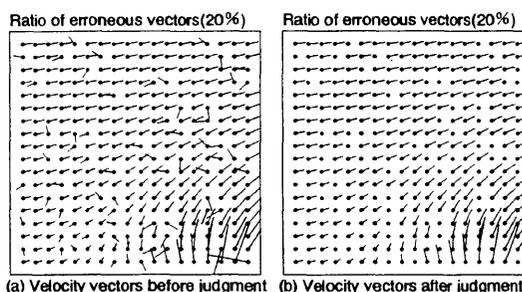


図5 誤対応ベクトルを含む速度ベクトル分布
一様な流れにわき出しのある場合 (Enlarged area)

4. 結言

PIVの性能向上のために、ニューラルネットワークを利用した誤対応ベクトルを判定するアルゴリズムの適用性を検討した。その主な結論は、次の通りである。

- (1) ニューラルネットワークにおいて式(5)を用いると、一様流中の誤対応ベクトルの方向の異なりが $|\Delta\theta| < 39.5^\circ$ の場合には、誤対応ベクトルを正しく判定して、それらが完全に消去できる。
- (2) わき出し近傍などの速度変化の大きい流れにおいて、速度ベクトルの存在する数密度の低いところでは、誤対応ベクトルを正しく判定できないこともあるが、速度ベクトルの存在する数密度の高いところでは、そのニューラルネットワークがそれらの消去に有効である。

参考文献

- (1) YAMAMOTO, F., UEMURA, T., KOUKAWA, M., ITOH, M. and TERANISHI, A., Proc. of FLUCOM'88, pp.184-188 (1988).
- (2) UEMURA, T., YAMAMOTO, F., and OHMI, K., "Flow Visualization-1989" ASME FED Vol. 85 pp.129-133(1989).
- (3) 山本富士夫, 植村知正, 幸川光雄, 小川邦康, 玉田裕之, 第18回流れの可視化シンポジウム (1990.7)
- (4) 木村一郎, 山下直文, 黒江康明, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.920-68, pp.310-312(1992)
- (5) 木村一郎, 中見至宏, 可視化情報関西講演会講演論文集, 可視化情報学会誌, vol.13, Suppl., No.2, pp.107-110(1993)
- (6) 飯沼: ニューロコンピュータ, 技術評論社, (1989)

付録1

節3の条件(1)について考える。正しいベクトルを \overline{v}_i とし、隣接する誤対応ベクトルは \overline{v}_j とする。条件(1)より、 $\overline{v}_j = n\overline{v}_i$ (ここで $n > 0$)

この関係を結合係数の式(4)(5)に代入すると、 $w_{ij} = \left[\frac{1}{3} + n \right] |\overline{v}_i| - |(1-n)\overline{v}_i|$

$w_{ij} < 0$ の条件を調べる。

$$1) i-n > 0 \text{ の場合 } \quad w_{ij} = \frac{2}{3}(-1+2n)|\overline{v}_i| \leq 0 \text{ とおくと } n \leq \frac{1}{2} \text{ が導かれる。}$$

$$2) i-n < 0 \text{ の場合 } \quad w_{ij} \leq 0 \text{ とおくと同様に } n \geq 2 \text{ が導かれる。}$$

以上から長さが2倍以上あるいは1/2以下の1つの誤対応ベクトルは周囲との w_{ij} が負になり、 $u_i \leq 0$ となって消去される。

付録2

節3の条件(2)について考える。正しいベクトルを \overline{v}_i とし、隣接する誤対応ベクトルは \overline{v}_j とする。条件(2)とベクトル幾何学より

$$0 \leq \Delta\theta \leq 2\pi \text{ で } |\overline{v}_i - \overline{v}_j| = \left| 2\cos\left(\frac{\pi - \Delta\theta}{2}\right) \right| |\overline{v}_i|, \text{ ここで } \cos\left(\frac{\pi - \Delta\theta}{2}\right) \geq 0$$

この関係を式(4)(5)に代入すると、 $w_{ij} = |\overline{v}_i| \left[\frac{2}{3} - 2\cos\left(\frac{\pi - \Delta\theta}{2}\right) \right]$

$w_{ij} < 0$ の条件を調べる。

$$w_{ij} \leq 0 \text{ で解くと, } \frac{2}{3} - 2\cos\left(\frac{\pi - \Delta\theta}{2}\right) \leq 0$$

この解は $38.95 \leq \Delta\theta \leq 321.05$

すなわち $|\Delta\theta| \geq 38.95$ の1つの誤対応ベクトルは周囲との w_{ij} が負になり、 $u_i \leq 0$ となって消去される。条件(1)(2)ともに誤対応ベクトルの混入率が多くなると、誤対応ベクトル同士の $\Delta\theta$ や n を考える場合が出てくるのでこの計算どおりにならない場合もあるだろう。