148 バネモデル粒子追跡アルゴリズム

東京大学 岡本 孝司

Particle Tracking Algorithm with Spring Model

Koji OKAMOTO*

The cross correlation tracking technique is widely used to analyze image data, in Particle Image Velocimetry (PIV). The technique assumes that the fluid motion, within small regions of the flow field, is parallel over short time intervals. However, actual flow fields may have some distorted motion, such as rotation, shear and expansion. In this study, A new algorithm for particle tracking, called the Spring Model technique, has been proposed. The algorithm can be applied to flow fields which exhibit characteristics such as rotation, shear and expansion.

The algorithm is based on pattern matching of particle clusters between the first and second image. A particle cluster is composed of particles which are assumed to be connected by invisible elastic springs. Depending on the deformation of the cluster pattern, the invisible springs have some forces. The smallest force pattern in the second image is the most probable pattern match to the correspondent original pattern in the first image. The effectiveness of the Spring Model technique was verified with synthetic data. It showed a high degree of accuracy, even for the three-dimensional calculation. The effects of appearing and disappearing particles were treated as a penalty in the spring force calculation, showing the high efficiency of the tracking.

1. はじめに

粒子画像流速測定法 (PIV) では、粒子追跡アルゴリズムとして相関法が良く用いられている。相関法は、2次元画像間の相互相関係数を求め、その大きさによって2次元移動量を算出するものである。このため、相関を算出する2画像間の時間差で、粒子パターンが並行移動を行なう場合に、精度良く流速を算出することができる。

しかしながら、実際の流れ場は渦、剪断などにより、回転などの大きな変形を伴っている。2画像間の時間差が極微小の場合には、回転などによる並行移動からのずれは少ないので相関法の仮定は正しい。しかし、流速勾配が大きい箇所や、画像間の時間差が回転速度に比較して大きい場合には、並行移動からのずれが大きくなり、正しい対応づけが困難となる。さらに、実際の画像には、ノイズや照明手法などによって画像上に出現したり消滅したりする粒子も存在する。これらの影響によって、正しい対応づけが困難となる。

本研究においては、回転や剪断の影響が大きい場合にも粒子クラスタのパターンマッチングを行なうことによって、正しい対応づけを行なう手法を提案した。さらに、画像上に出現、消滅する粒子の影響を少なくするための手法の提案を行う。

2. バネモデル法

変形を考慮したパターンマッチング手法は、様々な手法が考案されている¹⁾。ここでは、画像中の粒子数個で構成される粒子クラスタに注目し、この粒子クラスタのパターンマッチングを行なうことを考える。

図1に連続した画像データの例を示す。剪断及び回転によって粒子クラスタのパターンが変形している。この条件においては、粒子同志の重なりが少ないため、相関法では正しい対応を算出するのは困難である。

* Nuclear Engineering Research Lab., University of Tokyo, Tokai-mura, Ibaraki

Figure 1: Spring model

本モデルでは、この粒子クラスタを構成する粒子同志を、仮想的なバネで接続する（図1）。第1画像に於いては、バネは基底状態にあり、バネ全体の荷重はゼロとする。第2画像では、剪断、回転などにより粒子パターンが変形する。この変形に伴い、それぞれのバネに荷重が掛かる。この荷重は以下の式で表される。

$$E_i = k_i |\vec{s}_i' - \vec{s}_i| \quad (1)$$

ここで $\vec{s}_i, \vec{s}_i'$ は第1,2画像中のバネベクトルである。また k はバネ定数であり、本研究においては、 $k_i = 1/|\vec{s}_i|$ とした。これは、クラスタ中の粒子間距離が遠いものの影響を小さくし、近い粒子同志の影響を大きくする事に対応している。この時、粒子クラスタ内のバネに掛かる荷重の平均値は、

$$E = \frac{1}{N} \sum_i \frac{|\vec{s}_i' - \vec{s}_i|}{|\vec{s}_i|} \quad (2)$$

と与えられる。

粒子パターンが並行移動をした場合を考えると、この平均荷重は0となる。回転や剪断によって、粒子パターンが変形した場合には、平均荷重は正の値をとるが、その大きさはあまり大きくない。これに対して、粒子パターンの対応づけが誤っている場合には、バネの変形が大きくなり、平均荷重は大きくなると考えられる。

すなわち、第1画像中のある粒子クラスタに注目し、第2画像中でそのクラスタの移動候補を検索する。正しい対応づけであれば、バネの平均荷重は小さくなるので、最も平均荷重が小さくなる候補クラスタが正しい対応づけと考えられる。

なお、実際の流れ場においては、照明などの問題によって、第1画像で存在した粒子が第2画像では記録されなかったり、その逆に第2画像で粒子が突然出現することがありうる。本手法ではこのような場合を、バネの消去、新設と考える。バネの消去新設にはそれぞれ、 $E_i = 0.3$ の付加荷重が掛かると考える。第2画像において、対応するバネがない場合、および、新しいバネが必要になる場合には、これらの付加荷重を考慮し、平均荷重を算出する。この付加荷重は、対応づけ算出の際に一種のペナルティとして働く。

また、本手法は粒子の位置情報のみを用いてバネ荷重を計算するので、3次元空間に対しても同様に適用することができる。

3. 検証

バネモデル法の有効性を確認するため、コンピュータ上で仮想粒子を発生させ、その追跡実験を行なった。図2に示す2次元矩形体系内の流れをFEMコードによって解いて対象流れ場を形成した。この流れ場中に500個の仮想粒子を注入し移動を計算した。大きな循環が存在し、

Figure 2: Reference two-dimensional flow

Figure 3: Example of the synthetic images

Figure 4: Two-dimensional velocity distributions reconstructed by Cross correlation²⁾

Figure 5: Two-dimensional velocity distributions reconstructed by Spring model

大きな剪断を伴う箇所も存在している。図3に、粒子群の例を示す。全領域を 400×400 ピクセルの解像度とし、この条件における平均粒子移動距離は約 27 ピクセルであった。図中領域 B は回転による影響が小さく、相関法でも追跡可能であるが、領域 A は剪断が大きく、従来の手法では困難と予想される。パネモデル法と相関法を用いた解析結果の例を図4,5に示す。図に示すように、相関法に比べてパネモデル法の方が正しい対応づけを行っている。表1に結果をまとめて示すが、相関法に比べて、より正確な対応づけが出来ている。

対象とする2枚の画像時間差を、いろいろ変えて実験を行った。図8に粒子の平均移動距離と、正しい対応づけを行う事が出来た割合を示す。これによれば、2画像間の平均粒子移動距離が 30 ピクセル程度までは比較的精度良く追跡が出来ているが、それ以上となると精度が急激に悪化している事がわかる。なお、同図に相関法の結果も示すが、相関法では高々 10 ピクセル程度の移動距離までの追跡が可能である事がわかる。

画像中の粒子出現、消滅の影響を調べるため、図3のデータ中から 20 個の粒子を消去し、その影響を調べた。結果をそれぞれ図6,7および表1に示す。ここに示すように、相関法では粒子の出現、消滅に非常に敏感であるのに対し、パネモデルでは適切に処理され、誤対応が少なくなっている事がわかる。

Figure 6: Velocity distributions with appear and disappear particles reconstructed by Cross correlation[2]

Figure 7: Velocity distributions with appear and disappear particles reconstructed by Spring model

Table 1. Results of reconstructed vectors

Dimension of flow field	2D		2D with A&D ^{#3}	
	CC ^{#1}	SM ^{#2}	CC ^{#1}	SM ^{#2}
Correct Vectors [A]	309	417	91	376
Erroneous Vectors [B]	89	40	188	38
Particle to be tracked [C]	482		442	
Yield [A/C]	64%	87%	21%	85%
Error ratio [B/(A+B)]	23%	9%	68%	9%

#1: Cross Correlation technique ²⁾

#2: Spring Model technique

#3: Appearing and Disappearing particles

4. 結論

粒子クラスターのパターンマッチングを元にした粒子対応づけの手法を提案した。この手法は、剪断、回転などの影響が比較的大きい場合並びに、3次元流速測定にも適用可能である。数値実験によって、本手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) Tang, Y. Y. and Suen, C. Y., *IEEE, Trans. Image Processing*, 3-4, (1994), 355.
- 2) Hassan Y. A., Seeley Jr., C. H., Henderson J. H. and Schmidl W. D., *Proc. Int. Conf. on New Trends in Nuclear System Thermo-hydraulics*, (1994), 39-48.

Figure 8: Yield