

近畿大学理工学部 正会員○ 竹原 幸生
近畿大学理工学部 正会員 江藤 剛治
東海土建株式会社 阪本 淳
株式会社吉川組 小沢 仁博

1. 目的

近畿大学工学研究室では、これまで流れ場の計測法として PTV (Particle Tracking Velocimetry, 粒子追跡速度計測法)を開発してきた^{1)~5)}。流れ場の PTV 計測とは、微小粒子をトレーサー粒子として流れを可視化し、撮影した粒子画像から個々の微小粒子を自動追跡することで流速計測するものである。PTV の利点として流れを乱すことなく、流速のある瞬間の空間分布を計測できることにある。

本研究では、PTV を流れ場解析だけでなく、様々な変形現象にも適用できるようにするための基礎的研究を行う。PTV による物体の変形計測では、まず物体の特徴点を抽出し、その点を自動追跡し、時々刻々の各測定点のベクトル(移動量と方向)を求める。これまで構造物のたわみやひずみを求めるには、センサーなどを物体に直接張り付け、測定を行わなければならなかった。PTV を用いることによって、画像による計測を行うことができ、測定が比較的容易になり、多点同時計測が可能となる。

本報告では、PTV 解析が流れ場の解析だけでなく、物体の変形計測にも適用できることを検証するとともに、その問題点を明らかにすることを目的とする。

2. PTV アルゴリズムの概要

PTV は画像解析による速度場計測法の 1 つで、撮影された連続画像より個々の粒子を追跡する手法である。流れ場の PTV 計測として、まず流れ場に流れを乱さない多数の微小粒子を入れ、微小粒子の動きを水の動きとして流れ場を可視化し、計測を行う。その流れをビデオカメラで撮影し、撮影した画像を粒子マスク相関法(PMC 法)に用い粒子の座標を得る。得られた粒子情報を KC 法により時々刻々と移動する個々の粒子を自動的に追跡する。粒子マスク相関法から KC 法へ粒子情報(高精度な粒子中心座標)を付与する段階で、粒子マスク適合法(PMF 法)を適用すれば、より高精度な粒子追跡を行うことができる。

【PMC (Particle Mask Correlation, 粒子マスク相関) 法】撮影された画像上より粒子を抽出し、その座標位置を求める手法である。粒子マスクを撮影された画像上の各ピクセル座標(粒子マスクとは粒子画像の輝度分布のテンプレートである。一般的に粒子画像は中心の輝度が高く、中心から離れるにつれて輝度は減少していく。今回の粒子マスクの輝度分布としてガウシアン分布を仮定している。)を中心に輝度の相関を計算し、相関値画像を作る。計算された相関画像に対して、ある閾値(これまでの経験により r : 相関値=0.7 で最適に抽出することができる)を持って 2 値化し、粒子画像を抽出する。粒子マスク法の利点として、①ピンボケ画像のような中心輝度の小さい粒子でもガウシアン分布に近いものは抽出できる。②水槽端のような線状要素を自動的に消去できる。③粒子直径程度の近接した粒子でも抽出可能である。等が挙げられる。

【KC (Kalman filter and the Chi-square test) 法】現在の粒子情報(粒子位置、移動量等)をもとに次時刻の状態をカルマンフィルターにより予測する。粒子マスク相関法により抽出された実測の粒子との同一粒子の対応付けを χ^2 検定により判断する手法である。カルマンフィルターでは、粒子の座標、サイズ、ピーク輝度等の粒子情報を状態方程式として、取り入れることが可能である。予測粒子と実測粒子が対応する確率は χ^2 検定を用いて客観的に評価することができる。

3. 研究方法

物体に生じている変形は、物体の特徴点を追跡し、追跡した点の移動量から計測できるかを検証するため

Kohsei TAKEHARA, Takeharu ETOH, Atushi SAKAMOTO and Tomohiro OZAWA

に、まずは白いボールに明瞭な点を打ち、変形させるという基本的な実験を行った。今回の実験では白いボールに黒い点をつけ実験を行ったため、点の輝度が周囲よりも低い値となっている。PMC 法では粒子像の輝度が周囲よりも高いケースを想定しているため、今回は得られた画像の輝度を反転した画像を原画像として用いた。

実験手順を以下に示す。

- ①直径 65mm の軟式テニスボールの表面全体にマジックで直径約 3mm の点を打ち、地面より約 50cm の高さからボールを落下させる。
- ②高速ビデオカメラを用い、ボールが地面に衝突する様子をフレームレート 4500pps（画素数 256×256 ピクセル）で撮影し、一旦ビデオテープに録画する。録画された画像は 320×240 画素のデジタル画像に変換した。
- ③ボールが地面に接地し、地面から離れるまでのすべての画像に PMC 法を適用し、ボール上の点を抽出し、その座標とサイズを求める。
- ④求めた 67 枚の座標のデータに KC 法を適用し、それぞれの点を追跡する（KC 後のベクトル座標図は X、Y 座標ともに 2 倍になる）。この際、標準相関 PIV 法を適用し、接地した瞬間の画像とその次の画像から粗い格子点上の速度分布を求める。得られた結果からボール上の点へ移動ベクトルの内挿し、初期値として与える。
- ⑤内挿された初期値をもとに、各時刻の画像から PMC 法により、粒子を抽出し、KC 法により、時々刻々の粒子の動きを自動追跡する。

4. 結果および考察

ボールが接地し、上昇するまでに 67 枚の画像を要した。その間に $66/4500=0.015$ 秒が経過したこととなる。ボール上の目視できる点 119 点のうち、83 点を追跡することができた。追跡できなかった 36 点は全てボールの円周付近の点であった。円周付近の点を追跡できなかった理由として、ボールと背景の輝度の差が大きい部分に粒子像が重なり、PMC 法により粒子が抽出できなかったことがわかった。

解決策の 1 つとして、原画像から背景画像を差し引く方法を検討した。原画像と同時刻での、ボール上に点が写っていない画像を得るのは困難であるため、原画像をぼかすことにより、点の輝度と周囲の輝度との差を小さくした画像を背景画像として用いることにした。画像をぼかす方法として、ガウシアン空間重み付き平均操作を用いた。ガウシアン重み関数のサイズは 2.0 pixel で行った。

この方法により、ボールと背景の輝度差がなくなり、円周付近の点の抽出が可能になる。輝度を差し引いた画像について PMC 法、および KC により点の自動追跡を行ったところ、原画像で行った時と比較して、18 個多くの点（101 点）を追跡することができた。ボールが地面から上昇する瞬間の画像と、点を追跡した移動ベクトルを重ねた図を図-1 に示す。

問題点として、この方法で輝度の差をなくすと、ボールの周辺に写っている点の輝度が平均化した輝度よりも小さくなってしまふ。原画像で目視できた円周付近の点の内 10 点が消えてしまった。目視できる点は 109 点となった。今後、ボール周辺上の点を抽出するための新たな手法が必要である。

また、現場計測への適用を考えた場合、線や角等の物体上の自然な特徴点を用いて物体の変形を計測する手法を開発する必要がある。

[参考文献] 1) 江藤・竹原, 土論, No.533/II-34, pp.9-20, 1996. 2) 江藤他, 土論, No.533/II-34, pp.87-106, 1996. 3) 竹原他, 土論, No.533/II-34, pp.107-126, 1996. 4) 江藤他, 水工学論文集, Vol.40, pp.1051-1508, 1996. 5) K.Takehara, et.al., Exp. in Fluids, Suppl., pp.S34-S41, 2000.

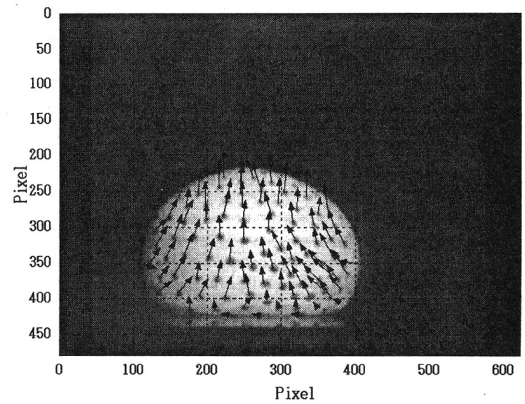


図-1 移動ベクトルと原画像を重ねた画像