

3次元粒子自動追跡アルゴリズム

近畿大学理工学部 正員 江藤 剛治

近畿大学理工学部 正員○竹原 幸生

1. はじめに 現在まで、画像解析を用いた流速測定法に関するアルゴリズムがいくつか提案されてきた。今後、さらに時間的および空間的に高い分解能での計測が要求されるであろう。この計測には、高速かつ解像度の高い撮影装置の開発および多数の粒子の自動追跡アルゴリズムの開発が必要である。本研究では、多数の粒子の自動追跡法の一つとして、統計学的な考察に基づき、カルマンフィルタと χ^2 検定を用いたアルゴリズムを提案する。

2. 自動追跡アルゴリズム

2. 1 カルマンフィルタによる粒子情報予測 カルマンフィルタにより、ある時点までの粒子情報を用いて次の時刻の粒子情報を予測する。粒子情報としては、粒子の x, y, z 座標や各方向の速度成分、輝度や粒子径（面積）等がある。本研究では座標、移動距離を粒子情報として取り扱っている。輝度情報等が入っても基本的なアルゴリズムは同じである。

離散型の線形システム方程式は、次のような方程式系で表される。

$$\mathbf{h}(t) = \Phi(t+1, t)\mathbf{h}(t) + \xi(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{m}(t) = \mathbf{D}(t)\mathbf{h}(t) + \zeta(t) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{h}(t)$; t ステップでの状態量ベクトル、

$\mathbf{m}(t)$; t ステップでの観測量ベクトル、

$\Phi(t+1, t)$; t ステップの状態量を $(t+1)$ ステップの状態量に遷移させるマトリックス、

$\mathbf{D}(t)$; t ステップの状態量と観測量を結び付けるマトリックス、

$\xi(t), \zeta(t)$; 誤差ベクトル。

(1)式は状態方程式、(2)式は観測方程式と呼ばれる。

状態量ベクトル $\mathbf{h}(t)$ としては粒子位置 $\mathbf{x}(t)$ 、1ステップ間の移動ベクトル $\delta \mathbf{x}_v(t)$ 、および1ステップ間の $\delta \mathbf{x}_v(t)$ の変化量 $\delta \mathbf{x}_a(t)$ を選んだ。状態方程式(1)を次式のように置いた（図-1参照）。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t+1) \\ \delta \mathbf{x}_v(t+1) \\ \delta \mathbf{x}_a(t+1) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \delta \mathbf{x}_v(t) \\ \delta \mathbf{x}_a(t) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

観測量ベクトル $\mathbf{m}(t)$ としては実測の位置、および流速による移動量を選び、状態量ベクトルと区別するため $\mathbf{m}(t) = \{X(t), \delta X_v(t)\}$ と大文字で書く。観測方程式(2)は

$$\begin{Bmatrix} X(t) \\ \delta X_v(t) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \delta \mathbf{x}_v(t) \\ \delta \mathbf{x}_a(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

とした。

3. 2 χ^2 検定による同一粒子の対応付け 予測された個々の粒子情報と実測の粒子情報を用いて、 t 画面上の粒子と、次の $(t+1)$ 画面上の粒子の対応付けを行なう。 t 画面上のある粒子が $(t+1)$ 画面上のどの粒子と対応する確率が最も高いかを表す指標として χ^2 -指標を用いる。また対応する粒子があるかどうかを判断する基準として χ^2 検定を用いる。具体的には以下のような考え方による。

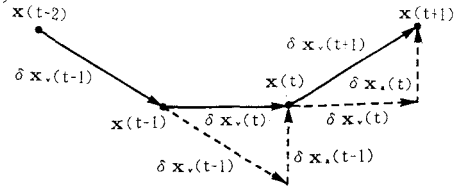


図-1 状態量ベクトルの概念図

($t+1$)画面より得られた粒子情報は、カルマンフィルターにより推定された粒子情報のまわりにガウス分布に従い分布していると仮定する。今回用いられた粒子位置 x, y, z がそれぞれ独立であるとする、正規化されたそれぞれの値の自乗和は χ^2 分布に従う。カルマンフィルターによる推定値を中心としたある領域内にある粒子について χ^2 値を求める。 χ^2 の最小値がある棄却水準以下であれば同一粒子であると確定し、棄却水準以上であれば対応する粒子がないものとする。

4. 適用例

4. 1 ケース1 (2次元場の場合) ケース1では、2次元の回転円盤上の粒子の実測データを用いて、画像上の座標で粒子を追跡した。用いた画像処理装置としては(株) 柏木研究所製のnexus6510を、ホストコンピュータとしてはNEC 9801VM2を用いた。追跡対象としては回転円盤上に20個の粒子を貼付け約1分間に33回転

させ、その粒子を追跡した。粒子は一旦、市販のCCD8ミリビデオカメラで撮影し、ビデオテープに録画された。録画された画像は1/30秒間隔でADコンバータにより8ビット(256階調)、512(H)×480(V)ドットのデジタル画像に変換され、画像処理装置のイメージメモリーに記憶された。記憶されたデジタル画像は連続10画面である。さらに、記憶されたデジタル画像は画像処理装置により2値化処理され、粒子の画像上での位置座標のみをデータとして取り出した。この画像上の座標で追跡を行なった。図-2に追跡結果を示す。図中の破線はカルマンフィルターにより推定されたベクトル、実線は実測のベクトルを示している。

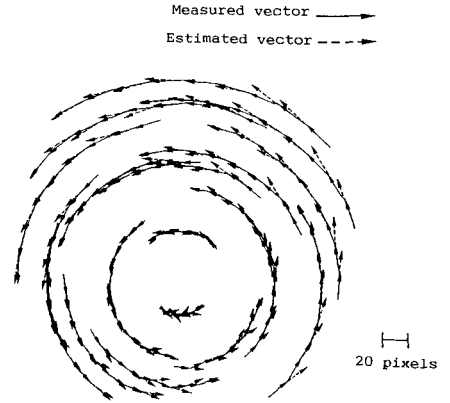


図-2 2次元の追跡結果(ケース2)

4. 2 ケース2 (3次元場の場合) ケース2では、3次元のデータを人為的に作り、追跡を行った。現在、3台のカメラによる3次元ビデオ撮影装置を開発中である。

20個の粒子を1ステップ毎に x 方向に1.0だけ移動させ、 x, y, z それぞれの成分に乱数成分を加えた。その乱数は、平均値0、標準偏差0.1、1ステップ前のそれぞれの乱数との相関係数を0.9とし、10ステップ移動させた。粒子の初期位置は $x=0$ 平面に $1 \leq y \leq 5, 1 \leq z \leq 4$ の範囲に、間隔 $y=1, z=1$ で配置した。

$h(1,0)$ としては次のようにおく。粒子位置 $\mathbf{x}(1,0)$ は初期位置、速度による移動距離 $\delta \mathbf{x}, \langle 1,0 \rangle$ は x 成分のみ1で、 y, z 成分は0とおき、加速度による移動距離 $\delta \mathbf{x}$ 、

(t)は全て0とおいた。追跡結果を図-3に示す。図中の20本の実線は個々の粒子に対して、本アルゴリズムで追跡した結果をステップ毎に連ねたものである。20個全ての粒子に対して、作成したデータに従い追跡することができた。

最後に、本研究は文部省科学研究助成金奨励研究(A)

(課題番号03750442)の補助を受けた。

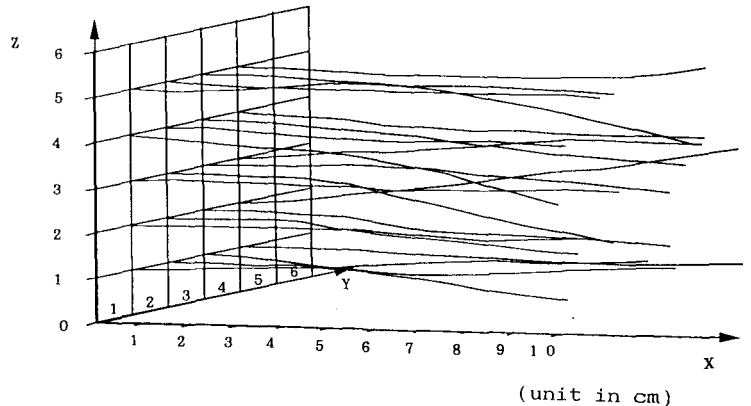


図-3 3次元の追跡結果(ケース3)