108 発光尾による火花追跡法に対する DP 法の精度検証*

二宮 尚 (宇都宮大学), 秋山 光庸 (宇都宮大学)
杉山 均 (宇都宮大学), 片上 晶博[○] (宇都宮大院)

Validation of the DP Matching on the Spark Tracing Method by the Radiant Trail

Nao NINOMIYA, Mitsunobu AKIYAMA, Hitoshi SUGIYAMA and Akihiro KATAKAMI

ABSTRACT

Dynamic programming matching technique, which is used for the voice recognition, has been adapted to the time line images obtained by the spark tracing method for the high speed air flow. As the high voltage sparks between two electrodes trace the air flow very well, we can measure the two or three-dimensional air velocities, if we can quantify the displacement and the time interval between sparks. With the dynamic programming matching technique, the characteristics of the two consecutive spark lines are nicely corresponded and thus the three-dimensional displacement between sparks are quantified. In order to prove that the segments of the sparks are correctly corresponded, presently the radiant trail of the metal powder which is introduced into the sparks are used. As the radiant trail demonstrates the path line of the flow, it is useful to check the flow direction. Furthermore, the appropriate function for the "distance" of the DP matching is proposed.

Keywords: Spark Tracing Method, Dynamic Programming, Radiant Trail

1. 緒 論

流れの可視化は複雑な流れ場の理解を助け、流体機械や流体要素の設計における有用な知見を与えるものであり、火花追跡法を用いて気流を可視化する実験は多数行われている。これは気流のタイムラインを可視化するものであり、定性的には流れの様子を良く表わすものである。得られたタイムラインの間隔をもとに、一次元の流速測定を行った例はあるが、その精度は低く、流速測定法として確立した手法とは言いにくい。近年種々の分野で大きな成果を上げている画像処理の手法を利用して、時間間隔の既知なタイムラインの二次元の画像データに対し、画像データの局所的な特徴の対応付けを行うことができれば、二次元の速度ベクトル分布を求めることが可能であると考えられる。本研究では、得られたベクトルが信頼できるものであるかどうかを検証するため、気流中に金属粉を混入し、炎色反応による発光を流跡として捉え、速度ベクトルとの比較、検討を行う。

2. 目 的

火花追跡法¹⁾を用いて気流を可視化し、連続する火花線間で特徴の類似する部分の対応付けを行うことで、その変位から気流の瞬時の二次元速度ベクトル分布を計測することが可能である²⁾。この際、連続する火花線の対応付けには、音声認識の分野で用いられている動的計画法の原理に基づいたパターンマッチン

グ法 (以下、DP マッチング法と呼ぶ) を用いる。また気流中にトレーサとして微小金属粉を混入することで、火花放電による金属粉の炎色反応の発光尾から、気流の流跡を求めることが可能である。この流跡と、DP マッチングの結果を比較することにより、マッチング精度の検証を行い、本測定手法の妥当性を示すことを目的とする。

Fig.1 Experimental Setup

Table 1 Particle Diameter and Luminous Colors

	粒子径	発光色
卵殻(<i>Ca</i>)	0.2 μm ~1.0mm	橙赤
銅粉(<i>Cu</i>)	40 μm	青緑
アルミナ粉(Al_2O_3)	0.3 μm	青, 紫, 赤紫

Fig.2 Time Lines by Spark Tracing Method

3. 火花追跡法による可視化

3.1 火花追跡法

Fig.1 上部に示す様に、気流中に配置した二本の電極間に高電圧高周波パルス発生装置から高電圧パルスが印加されると、最も間隔の狭い電極先端間で放電が起き、経路上の空気は瞬時にイオン化され下流に流される。この経路は電気抵抗が極めて小さいため、二番目のパルス放電は電極先端間ではなく、この経路に沿って行われる。以後パルスが繰り返される毎に放電が行われ、最終的に Fig.2 の様に、気流のタイムラインを可視化する事が出来る。

3.2 流跡の可視化

従来の火花追跡法では流れ方向の変位しか可視化できなかった。従って、流れの向きを決定するにはタフト法やトレーサー法などを併用する必要がある。しかし、実際には火花追跡法とこれらの手法を同時に行うことは難しい。この欠点を補うため、流れに微小な金属粉を混入して火花によって炎色反応を生じさせ、その発光軌跡から流れの方向を決定できる方法が考え出された³⁾。具体的には、窒化アルミニウムの粒子(1.5~6.0 μm)を気流に混入し、そこに火花を生じさせ、窒化アルミの発光尾から流れの方向が可視化できるというものである。

しかし、この方法では窒化アルミの発光色と火花線の発光色が同じであるため、発光尾を得たとしてもタイムラインと分離することが出来ない。そこで炎色反応を呈する微小金属粉を気流に混入させ、タイムラインと発光尾を明確に区別化することを試みた。これによりさらに明瞭な流跡を得ることができる。また、マッチングを行う場合は、火花列のみの画像が好ましく、それと同時に発光尾のみの画像も得る必要があるので、Fig.1 に示す様に Beam Splitter, Band Pass Filter, shortwave Pass Filter を用いることにより、2 台の CCD カメラの各々に同時に別々の画像を得ることに成功した。

3.3 実験条件

本研究で使用した電極は、外径 1.0mm のタングステン線で、先端間隔 9.0mm, 後端間隔 18.0mm, 全長 89.0mm とした。高電圧高周波パルス装置は、印加電圧 40kV, パルス周期 100 μs に設定した。撮影した画像の画素数は 640 × 480 で、画像はデジタルビデオ (SONY DCR-TRV10) に記録した。熱線流速計による電極先端付近流速は、26.5m/s であった。

3.4 実験結果

計測気流中にトレーサーとして微小粒子を混入するにあたって、流れに沿って粒子をプローブ間に流すために、プローブ前方に粒子を供給する管を設けた。本研究ではトレーサーとして卵殻 (カルシウム) と銅粉を用いた、これらは炎色反応時の発光スペクトルが

火花のスペクトルに含まれておらず、また人体に害のないものとして選択した。また、さらに卵殻、銅粉よりも微小なものとして粒径 0.3 μm のアルミナの粉末を用いた。本研究で用いた微粒子の粒子径と発光色を Table 1 に示す。また、各々の粒子を用いて得た画像を Fig.3~7 に示す。トレーサーを用いることにより、流れの向きが発光尾によって明確に確認できる。発光尾が集中している付近では、流れが集中して、流速が速くなっている様子が伺える。卵殻は発光しやすく、容易に目視できた。銅粉は発光色が緑のため、卵殻の場合よりはっきりと確認できたが、発光頻度は卵殻より低く、粒径 1mm 程度のものであると全く発光しなかった。次に卵殻と銅粉を混ぜ合わせたものを用いたが、二色の流跡が得られたため、隣り合う流跡同士の区別も可能となった。アルミナを用いた場合が、最も鮮明な流跡が得られた。これは本研究に用いた金属粉の中で、最も粒径が小さいこと、発光色が複数であることが考えられる。しかしその一方で、発光頻度は高

Fig.3 Radiant Trail by Calcium

Fig.4 Radiant Trail by Copper

Fig.5 Radiant Trail by Calcium and Copper

Fig.6 Radiant Trail by Alumina

Fig.7 Warping Function of DP-Matching

くなかった。これは、粒径が小さすぎたために発光することなく燃えてしまったか、あるいは広範囲に拡散してしまったせいではないかと考えられる。

4. パターンマッチング

連続する火花線の対応付けを行うには、火花線の形状や輝度分布を参考に、局所的な特徴の対応付けを行う必要がある。しかし、PIV 等で用いられる離散的な粒子の画像と違い、火花線の画像は一本に繋がっており、その伸び縮みを無視することは出来ない。そこで、我々は音声認識の分野で用いられている DP マッチングを用いて、対応付けを行った。

4.1 DP マッチング

時刻 t_n と時刻 t_{n+1} の二つのタイムライン A と B において、それぞれを連続する局所のデータの集合として考え、各々の分割されたデータを以下のように表す。

$$A = a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_I \quad (1)$$

$$B = b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_J \quad (2)$$

分割された A, B のデータを Fig. 7 のように、 i 軸と j 軸に順次格納する。そして、 A, B の間で、互いの局所データの特徴を比較し、整合関数 (warping function) によって、両者の対応付けを行う。この時、対応付けされたデータの組を $c(i, j)$ 、また、そのデータの組の集合を、

$$F = c(1), c(2), \dots, c(k), \dots, c(K) \quad (3)$$

但し、

$$c(k) = (i(k), j(k)) \quad (4)$$

と表わす。ここで、両局所データの特徴の差を、

$$d(c) = d(i, j) = \|a_i - b_j\| \quad (5)$$

と表す (以下、距離と呼ぶ)。 (a_i, b_j) から (a_i, b_j) に至る経路は多数存在するが、その中で距離 $d(c)$ の総和が最も小さい経路が最適な経路となる。この最適な経路を求めるには、考えられる全ての経路について、距離 $d(c)$ の総和を求め、それが最小となる経路を見つければ良

い。ここで、重み関数を $w(k)$ で表すと、最適な経路 $D(A, B)$ は、以下の様に表される。

$$D(A, B) = \min \left[\frac{\sum_{k=1}^K d(c(k)) \cdot w(k)}{\sum_{k=1}^K w(k)} \right] \quad (6)$$

4.2 端点の自由化

DP マッチングを行う二つのデータの始点および終点が明確でない場合、端点の影響で全体のマッチングが悪くなることもある。この場合、データの端点に自由度を与えることで、全体のマッチングをスムーズに行うことができる。

4.3 評価関数

マッチングを行う際に、二つのデータの部分的な特徴の差を評価するにあたって、評価関数を指定する必要がある。これはマッチング精度に大きく関わるものであり、二つの特徴データの持つ情報を余すところなく反映できることが望ましい。本研究では特徴データとして火花の輝度分布に着目した。以下に本研究で導入した評価関数と、それによるマッチング結果について示す。

a) 評価関数 d_1

$$d_1 = 1 - R$$

$$R = \frac{\sum (I_{xy} - \bar{I})(J_{xy} - \bar{J})}{\sqrt{\sum (I_{xy} - \bar{I})^2} \sqrt{\sum (J_{xy} - \bar{J})^2}} \quad (7)$$

ここで用いた値 R は一般的に相関係数として広く用いられているものである。 -1 から 1 までの値をとり、特徴の差が小さくなれば値が大きくなることから評価関数 d_1 を (7) 式のように定義した。

b) 評価関数 d_2

$$d_2 = \sqrt{\sum \left(\frac{I_{xy}}{I_{mask}} - \frac{J_{xy}}{J_{mask}} \right)^2} \quad (8)$$

評価関数 d_1 では火花線全体の平均輝度との差を用いたが、部分的に輝度の欠落が生じると、火花全体の平均に大きな差が生じてしまうため、相関が正当に評価できなくなると考えられる。そこで、火花全体ではなくマスク内の平均を用い、輝度を正規化した評価関数を導入した。これによって部分的に輝度が欠落した火花列でも正当なマッチングができると考えられる。

5. 火花線のマッチング

5.1 画像の獲得

トレーサーの粒径が小さいほど、流線は細部まで可視化されるが、画像を分離するには、発光が1色のみで、より見やすいものが好ましい。そこで、本研究ではトレーサーは卵殻 (Ca) のみとした。カルシウムの炎色反応時の発光スペクトルは 554nm 付近であるので、Band Pass Filter 550 を用いてカルシウムの発光尾のみを得ることができると考えられる。また、火花線は幅広いスペクトルを有するので、カルシウムの発光スペクトルを透過しないフィルターを用いれば、火花線のみ

Fig.8 Spark Tracing Method with the Radiant Trail

(a) d_1 (b) d_2
Fig.9 Matching Results with Different Estimation Function

に火花線だけの画像は得られず、発光尾の像も多少混在したものであった。これは用いた卵殻に若干の不純物が混入していたためと考えられる。火花線間のマッチングを容易にするため、まず火花線の画像を二値化、細線化、チェーン化し、そのチェーン化列に沿って、形状や輝度を比較することでマッチングを行った。但し、電極近傍の像は、流れ場と無関係な形状となるので適宜除去した。マッチングを行う際のマスクサイズの設定は、撮影された火花線の太さを考慮して選定した。

6.2 発光尾とベクトル方向の一例

Fig. 8 に得られた火花の画像を示す。この火花列の最後の 2 本について、 d_1 及び d_2 を用いてマッチングを行った結果を Fig. 9 に示す。Fig. 8 の火花列後方において発光尾は下向きである。従って、DP マッチングによるベクトルも同様に下向きでなければならない。Fig. 9(a) の評価関数 d_1 を用いて得たベクトルは中央付近で上向きであり、発光尾の向きと異なっている。それに対し、Fig. 9(b) の評価関数 d_2 を用いた結果は発光尾方向と同じ向きのベクトルが得られた。 d_1 においては、それぞれの輝度の値から平均値を差し引くことによる火花の平均輝度の差の吸収、及び分母に偏差を置くことによる分散の差の吸収により、個々の特徴の差が失われていると考えられる。よって評価関数 d_2 を用いる方が、より信頼度の高い速度ベクトル分布を得ることができると考えられる。

6. DP マッチングの評価

Fig. 10 に評価関数 d_1 を用いた DP マッチングによる二次元速度ベクトル分布を示す。これとトレーサーによる発光尾のみの画像を合成したものを Fig. 11 に示す。Fig. 11 に示すように、ベクトル分布と発光尾の向きが同方向を示していることが確認できる。

Fig.10 Velocity Vectors

Fig.11 Comparative Result between Radiant Trail and Velocity Vectors

7. 結論

本研究では、炎色反応を伴う微小金属粉を気流に混入することにより、火花追跡法を用いてタイムラインのみならず、流跡の可視化に成功した。用いる金属粉はより細かい方が細部の流れの様子を知ることができることがわかった。また、得られた火花線列に対し、音声認識の分野で用いられている DP マッチング法を適用し、連続する火花線間に二次元速度ベクトル分布を得ることに成功し、その信頼性を証明することができた。さらに火花線に対する評価関数に対して有効な評価式を見つけた。これらのことより、火花追跡法と DP マッチング法を用いることでの気流の可視化、及び流速測定の信頼性、有効性を示すことができた。

謝辞

本研究は、宇都宮大学 SVBL 及び地域共同研究センターにおいて行われた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店 (1986)
- 2) 二宮, 秋山, 杉山, 佐藤: 第 28 回可視化情報シンポジウム講演論文集, Vol.20 (2000) pp. 257-260.
- 3) Y. Nakayama, S. Okitsu, K. Aoki & H. Ohta: Flow Direction Detectable Spark Method, The Int'l Symp. on Flow Visualization, Tokyo (1977-10)