C116 感圧塗料のためのデータ処理の全自動化への試み

藤松 信義[○](宇宙科学研究所,現・青山学院大学), 田村 善昭(東洋大学),

藤井 孝藏(宇宙科学研究所)

On Post Image Processing for Pressure Sensitive Paint

Nobuyoshi FUJIMATSU(ISAS, presently with AGU), Yoshiaki TAMURA(Toyo Univ.)
and Kozo Fujii(ISAS)

ABSTRACT

Image processing procedure to automatically carry out the image registration in the PSP experiments is investigated. A few algorithms to detect the marker location are proposed and tested. The marker location can be successfully captured using these algorithms. Two types of algorithms based on the algebraic and optimization method are proposed for the decision of the pair of markers for the image registration. These methods can correctly find a pair of the markers. The results indicate that the image registration can be automated using the method developed in this paper.

Keywords: Image Processing, Pressure Sensitive Paint, Wavelet transform

1. 結 論

近年、感圧塗料(Pressure Sensitive Paint: PSP)を用いた表面圧力計測法の研究が盛んである^(1,2)。PSPは光学系装置により得た画像から圧力分布を得るため、画像処理が不可欠である。感圧塗料を用いた風洞実験では、次のような手順で画像処理が行われる(Fig. 1)。初めに、無風画像と通風画像を取得する。画像にはCCDカメラに起因するショットノイズなどのノイズ成分が含まれるため、適当なフィルタを用いて各画像に対してノイズ除去を行う。通風中は模型が移動する場合があるので、アフィン変換⁽³⁾によって模型移動の位置補正を行う。位置補正した通風画像と無風画像との割算画像を算出し、In-situ 又は a-priori 校正により圧力画像を取得する。圧力画像を模型表面データにマッピングして空気力データを算出する。以上が、通常行われるデータ処理手順である。筆者らはこれまでショットノイズの除去に適当なフィルタや位置補正の精度向上のための方法について検討してきた。

大型風洞実験⁽⁴⁾で得られた画像データから空気力データ算出するまで、最も作業のウェイトが掛かる部分を検討してみると位置補正であることが判った。これは基本的に手作業に頼る部分が多い為であり、特に、マーカの座標位置を読み出し、位置補正の為に無風画像と通風画像のマーカ位置がそれぞれのどの位置に対応するかを調べることに時間がかかっている。我々の実験ではマーカを模型の上面下面で50点利用した。例えば20ケースの実験をす

れば合計2000点もの座標を眼で読み取る必要がある。また位置補正のためには無風画像と通風画像において同一のマーカ点を指定する必要がある。それ以外のフィルタ処理、及び、割算画像算出後の空気力データ取得までの作業は既に自動化出来ており、位置補正の自動化によって効率的にデータ処理を行うことが出来る。

これまで感圧塗料を用いた空気力計測が多数行われているが、上記のような画像処理上の問題点を論じた文献は見られず、作業の自動化が成されていないのが現状である。このような背景から、筆者らは風洞試験の一連の流れを想定して、マーカ位置の自動検出方法、及び画像位置補正のマーカ点対応付けの方法について検討を行った。

2. マーカ位置の自動検出

位置補正は模型に設置したマーカを利用して行われる。昨年度の発表でマーカ重心座標を知るためのアルゴリズム⁽⁵⁾を提案したが、マーカの初期位置は手作業で入力していた。この手作業を省く手法としてマーカ位置の自動検出法を検討した。

2.1 マーカ位置の自動検出法

マーカの存在を知るためには、画像からマーカを識別できて、位置を特定する必要がある。一般的にマーカは実験模型に黒塗りで円形の印を付け、その位置で塗料の発光が起きないようにして利用する(Fig. 2-(a))。画像の二値化を行えば、発光しない場所では0の値を取るためマーカの識別が可能となる(Fig. 2-(b))。また、マーカは画像中で有限

の領域を持つので、サイズを指定することで特定が可能となる。

二値化画像ではマーカ点がパルス波形の様に見える。Wavelet 変換はパルス波形の検出に適しており⁽⁶⁾、この性質を利用すればマーカ位置の特定が可能になると思われる。Fig. 2-(b) の画像に対して Wavelet 変換した結果を Fig. 3 に示す。元波形についてレベル 3 まで Wavelet 変換してある。マーカサイズは半径 5 ピクセル程度が適当であることを考慮すれば、レベル 3 の Wavelet 成分は 8 ピクセルの波長に相当するので、十分検出可能である。図からマーカが存在する位置で Wavelet 成分が振動している。上記の特性を利用したマーカの自動検出法を次のように考えた。

(1) 画像を二値化する。

(2) 二値化画像に対して Wavelet 変換を縦横のピクセル成分に行う。

(3) Wavelet 成分で非 0 値を持つ点についてマーカ重心検出アルゴリズムを適用する。

(4) 同一の候補点が存在する場合や、半径が適当な大きさをでなければ除外する。

マーカとして適当なサイズは半径 5 ピクセル程度であることが判っている^(6,7)。ここでは半径 3 ピクセル以上、7 ピクセル以内の点をマーカとして残した。上記手法でマーカ点を検出した結果が Fig. 4 である。マーカ点を全て認識出来ているが、マーカ点以外のものも検出していることが判る。この原因を詳細に調べてみた結果、次のような理由であることがわかった。一つ目は通風時に塗料が剥離した部分をマーカ点として認識すること。二つ目はマーカ点を記したサインペンの塗料が原因で P S P が溶融し、マーカ点が二つに分かれて見えたこと (Fig. 5)。三つ目は (2) の操作において Wavelet 変換成分が非 0 値となる位置が縦と横で異なるためである。この問題点を解決するために次の 3 つの操作を加える。塗料の剥離の様にマーカとして適当な形で無い場合、マーカの AR を調べて、真円に近くなければ ($AR > 2$) 除外する。二つのマーカ直径の和を半径とした円内にマーカが含まれれば同一のマーカとして、2 領域で中心を定める。最後は縦横の各方向の Wavelet 成分をフラグ値として、その積算でマーカ位置を定めることである。

上記の操作を加えて修正したマーカ位置自動検出法は以下の様に整理される。

(1) 画像を 2 値化する

(2) 2 値化画像に対して Wavelet 変換を縦横のピクセル成分に行う。

(3) 縦横の Wavelet 成分を掛け合わせて非 0 要素点をマーカ候補とする。

(4) マーカ重心座標を定める。

(5) $AR > 2$ のマーカを模型表面の傷として除外する。

(6) 二つのマーカの直径和を半径に持つ円をマーカ中心から描き、いずれのマーカ中心も含まれれば同一のマー

カとする。

(7) 以上、得られたマーカ候補をマーカとする。

修正した手法を用いてマーカ点を検出した結果が Fig. 6 である。マーカ点として検出されていたノイズ成分が除去され、正しいマーカ位置のみが検出されていることがわかる。

3. 最適化手法を用いたマーカ位置の対応付け

マーカ位置の検出が可能になったので、今度は無風画像と通風画像を用いて位置補正に必要なマーカ位置のペアを決定する方法を検討する。

仮に、通風時の模型移動が剛体的であり、模型の移動量が小さい場合であれば、無風画像のマーカ位置を基準にして通風画像との相関を取る方法や代数的な方法を用いることで、それぞれの画像における同一のマーカ点を見つけ出すことは容易である。しかし、移動量が大きければ探索の保障は出来ないで、これらの方法が P S P 実験の画像処理に対して有効であるとはいえない。そこで、上記のような制限を与えず、マーカ点のペアを決定できるロバストな方法を考える。

マーカ点は模型表面上に複数個配置されている。これらの点を結ぶと一つのパターンを描くことが出来る。このパターンを識別することで、対応点のペアを見つけ出せないか考えてみる。ここではマーカ点を結ぶ最短経路探索問題に置き換えて検出することを試みる。しかし、 n 個のマーカ点を結ぶ経路パターンは $n!$ 個存在する。例えば、マーカ数が 20 個のとき経路は 1.2×10^{18} 個存在し、30 個では 10^{32} のオーダーとなる。その全てを調べることは困難であるため、最適化手法により各点を結ぶ長さの分散値の最小化を目的とした最短経路探索を行う。

まず初めに勾配法や焼きなまし法を用いてマーカ対応点の探索を試みたが、最適解を得ることが困難であったため、ここでは遺伝的アルゴリズムを用いた。検出したい最小経路パターンを Fig. 7 に示す。この画像で最適解を得るまでにがかった時間は GA で約 1 秒である。本手法の有効性を調べる為に、マーカ点数に対する最短経路探索総時間を調べた。その結果、マーカ数が 100 個の場合でも演算時間は 10 秒前後で最適解が得られており、実用的な演算時間で解が得られることを確認している。本手法を用いれば無風画像と通風画像上にマーカを結んだ同じパターンを描くことができる。同じパターンを見つけ出した後で、各点を結ぶ距離の並びを調べれば位置補正に使用するマーカ点のペアは容易に見つけ出すことが出来る。

本手法で対応点を定めて得られたアフィン変換結果を Fig. 8 に示す。この結果はマーカ対応点を手入力したものと同一である。模型の境界付近でズレが見えるが、これは模型の特徴点も位置補正に利用すれば除去出来る⁽⁷⁾。特徴点も位置補正に利用した結果を Fig. 9 に示す。

本論で提案した画像位置補正の自動化を用いれば、Fig. 1 の作業を全て自動的に行うことが可能となる。最終的に我々が行った実験について画像処理をした場合、約 1 分で

空気力データを取得することが可能であった。本手法はPSP実験における画像データ処理時間の大幅な短縮が期待できる。

説明の一部はカラー画像表示を必要とするので、論文を確認して頂きたい(<http://www.vsj.or.jp/>)。

5. まとめ

- (1) Wavelet 変換によるマーカ検出法を用いれば自動的にマーカ位置を定めることが出来る。
- (2) 最適化手法でマーカ点を結ぶパターンを認識させることで無風画像と通風画像の同一マーカ点を自動的に定めることが出来る。マーカ数が増えても短時間でペーアを見つけることが出来る。
- (3) 本論で提示した手法を用いれば画像位置補正を自動的に行うことが可能となる。PSP 実験におけるデータ処理の自動化に有効である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発 (MOSAIC)」の元におこなわれた。

参考文献

- 1) Aerospace America, February 1994.
- 2) 浅井圭介, 感圧塗料による圧力分布の計測技術、可視化情報, Vol. 18, No. 69 (1998), pp97-103.
- 3) J.H. Bell and B.G. McLachlan, Image Registration for Luminescence Paint Sensors, AIAA Paper 93-0178, 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, Jan 11-14 (1993).
- 4) 藤松信義、中井祐輔、大内弘文、鹽野智、藤井孝蔵、入門朋子、佐藤清：感圧塗料による空気力計測 ～宇宙研大型風洞での試み～、平成 14 年度宇宙航行の力学シンポジウム (2002)。
- 5) Fujimatsu, N., Tamura, Y. and Fujii, K., Improvement of the Noise Filtering and Image Registration Methods for PSP Experiments, ASME/FED & JSME, Honolulu, July (2003).
- 6) 榑原進：ウェーブレット解析入門、可視化情報学会誌、Vol. 21, No. 82, pp. 1-6.
- 7) 藤松信義、田村義昭、藤井孝蔵、感圧塗料のための画像処理に関する一考察、第 30 回可視化情報シンポジウム講演論文集, Vol. 22, Suppl. No. 1 (2002), pp347-350.

Fig. 1 Flowchart for PSP data reduction.

(a) Raw image

(b) Binary image

Fig. 2 Raw and binary image of the test image.

Fig. 3 Power spectrum decomposed using wavelet transform.

Fig. 4 Detected marker cell.

Fig. 7 Optimum solution.

Fig. 5 Marker cracked on the model surface.

Fig. 6 Marker obtained using marker detection algorithm.

Fig. 8 Registration image.

Fig. 9 Registration image obtained using edge enhanced algorithm.