

令和 4 年 10 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18822

研究課題名（和文）構造化光の利用によるPSP計測法の高圧力分解能化

研究課題名（英文）Development of high precision PSP method using structured illumination

研究代表者

松田 佑（Matsuda, Yu）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：20402513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：高い空間分解能で圧力分布計測が実施できる感圧塗料（PSP）計測法が注目を集めている。本研究ではPSP計測法による圧力計測の高精度化を実現することを目指した。本研究では、励起光に空間変調をもたせた構造化光を利用する。すなわち、構造化光に同期したPSP信号を効果的に抽出することで、計測の高精度化を目指した。また、PSP計測画像の位置合わせを簡易に実施するためにARマーカーを用いた手法を提案した。以上のような計測システムを開発し、実験室レベルでの衝突噴流試験を実施し、その有効性を確認した。合わせて近年注目度の高い、PSP計測画像から壁面せん断応力の算出を行う手法の検証も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄道・自動車車体表面での圧力分布の精密計測技術は、空気抵抗や空力騒音をはじめとした空力設計を行う上で非常に大きな貢献を果たす。そのため、高空間分解能で圧力の分布計測が可能なPSP計測法が大きな注目を集めている。しかし現在のPSP計測法では計測制度が不足しておりこれらの分野への適用は困難であった。本研究では、PSP計測法の高精度化を通じ、自動車や鉄道車両の車体形状、家電製品に用いられているファンをはじめとする広範な工業製品の空力設計に活用するための技術開発を行った。本研究によって一定の成果が得られ、今後引き続き研究を精力的に実施することで、これらへの応用が実現できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：The pressure-sensitive paint technique has been received much attention because PSP enable us to measure pressure distribution with high spatial resolution. In this study, we have developed a high precision PSP method using a structured illumination. We also develop an image alignment method using an AR marker. The applicability of this method was investigated. The skin-friction extraction method based on the PSP data was also investigated using the skin-friction field induced by a gaseous jet impingement.

研究分野：流体工学

キーワード：感圧塗料 構造化光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint; PSP) は、酸素消光作用を示す色素分子と、これを計測対象の表面に保持固定するためのバインダー (高分子膜や陽極酸化被膜など) から構成される。PSP に励起光として青色・紫外光を照射すると、PSP 内に混入された感圧性の色素分子が励起され発光する。この色素分子からの発光は、PSP 膜内に浸透している酸素分子によって消光される。すなわち、PSP の発光強度は、PSP 膜内に浸透している酸素濃度に反比例し、これは気体中の酸素分圧や流れの静圧に比例する。PSP による圧力計測ではこの原理を用いて、PSP の発光強度の変化をカメラなどの光検出器を用いて計測し、予め得ておいた較正データを用いることで圧力を算出する。PSP 計測法では、一般的に用いられている圧力孔による多点計測と異なり、PSP を塗布した物体表面での圧力分布を高空間分解能で計測することが可能であるため、基礎科学分野から工業製品の研究開発にわたる広い範囲への適用可能性を秘めている。

以上のような利点と広範な分野への展開の期待を有するものの、PSP にはいくつか課題もある。例えば、一つ目として、PSP は圧力のみならず温度に対しても感度を有し、計測対象表面に温度分布が生じる場合、PSP 計測データには圧力と温度の 2 つのデータが含まれるために、圧力の計測には温度分布の影響を除く必要がある。また、PSP 計測においては一般に流れがない状態で PSP 発光画像を撮影 (無風時画像) し、これと流れがある状態での PSP 発光画像 (通風時画像) の比を計算することで発光強度の変化率を検出し圧力分布を計算するとともに PSP の塗布ムラや励起光のあたりムラの影響を除くことができる。しかし、2 状態での画像間で比を計算する際に、両画像間で計測対象の位置が 1 ピクセルでもずれていると非常に大きな計測誤差が生じてしまうというのが二つ目の問題点である。さらに、PSP は数 Pa ~ 数気圧を計測レンジとする絶対圧センサーであり、大気圧近傍での微小な圧力差の検出にはごく僅かな PSP の発光強度変化を検出する必要がある。そこで三つ目の問題点として、一般的な PSP 計測システムでは、微小な発光強度変化はカメラ撮影時のショットノイズに埋もれてしまい、大気圧近傍では圧力分解能は 100 Pa 程度と低く応用先が限定されているということが挙げられる。

これらの欠点のうち、1 つ目の温度分布の影響の補正に関しては、各国で活発に研究がされている。PSP と同様の計測方法で、温度変化によって発光強度が変化する感温塗料 (Temperature-Sensitive Paint; TSP) を用いて PSP と同時に温度分布計測を行い、計測された温度分布結果を利用して圧力分布データを補正する手法が有力な手法となっている。例えば、模型に PSP と TSP を左右対称に塗り分けたり、光化学的な干渉によりセンサー特性は低下してしまうものの PSP と TSP の混合溶液を用いたりすることで圧力・温度同時計測が行われている。本研究代表者らはインクジェットプリンターを用いることで PSP と TSP を微細パターンに塗り分ける手法を提案している。これらのような研究により、一つ目の課題は克服されつつある。二つ目の課題である、無風時・通風時画像間の位置合わせに関しては、現在は計測対象表面に設置した黒丸マーカーを用いた方法が使用されている。しかし、この手法ではユーザーが 2 画像間で対応する黒丸マーカーを逐次指定していく必要があり、実験データの解析に時間がかかってしまうという問題があり、改善の余地が大いに考えられる。また三つ目の課題である PSP 計測の低圧力分解能に関して、圧力分解能を向上させるための研究が精力的に進められており、感圧性の色素の選定 (高感度、高発光効率)、バインダーの選定 (高感度・高酸素透過性、長時間応答性) などに代表される PSP センサーの高性能化に向けた研究が主に取り組まれてきた。PSP センサーの性能はこの 10 年余りで非常に向上したものの現在では同時に限界も見えてきており、この数年ではセンサー性能向上は頭打ちになりつつある。このような観点から PSP センサーの性能向上の他の技術開発が必要とされている。またあわせて、PSP 計測データの新しい利用法として近年注目度の高い、PSP 計測画像から壁面せん断応力の算出を行う手法が Liu et. al., 2015 によって提案され、高い注目を集めており、同手法の検証が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究では、上記の研究背景を受けて、PSP 計測の高精度化を目指した研究を実施した。具体的な研究項目として、簡便でユーザーの介在の必要のない無風時・通風時画像位置合わせ手法の提案と、構造化光を用いることで PSP の圧力分解能の向上を目指した研究を実施した。また、PSP の新しい利用法として壁面せん断応力計測が注目を集めており、同手法の検証を実施することを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 無風時・通風時画像の位置合わせ手法

PSP 計測においては一般に流れがない状態で PSP 発光画像を撮影 (無風時画像) し、これと流れがある状態での PSP 発光画像 (通風時画像) の比を計算することで発光強度の変化率を検出する。この結果に、事前に準備しておいた較正実験データを用いることで、圧力分布を計算することができる。また、無風時・通風時の 2 画像間で比を計算することで PSP の塗布ムラや励起光のあたりムラの影響を除くことができる。しかし、一般に無風時と通風時では、計測対象の変形や移動が生じるために、両者画像の比を計算する前に、画像の位置合わせが必要となる。このとき、互いの画像で 1 ピクセルでもずれていると非常に大きな計測誤差が生じてしまうため

に、サブピクセル精度で画像間の位置合わせを行う必要がある。現在一般的に画像位置合わせのために、計測対象表面上に黒丸マーカを複数個設置し、この黒丸マーカを両画像で一致させる手法が用いられている。この手法では、複数個の同一のマーカを用いるために、両画像間で互いに対応するマーカを自動で検出することが難しく、ユーザーが両画像間で対応するマーカ位置を指定するマニュアル操作が必要であり、非正常流のデータ処理などの場合は解析に非常に多くの時間を費やすこととなる。そこで本研究では、AR マーカを用いた画像位置合わせ手法の提案を行い、従来手法との精度比較を行った。計測対象位置に応じて異なる AR マーカを用いることで、無風時・通風時画像それぞれで対応するマーカ位置を自動検出することが可能となり、処理時間を大幅に削減することができる。

3.2 構造化光を用いることで PSP の圧力分解能の向上

PSP の圧力分解能の向上のためには、微小変化する PSP 発光強度を高精度に検出する必要がある。これを実現するために、本研究では構造化光を利用することを提案している。これによって PSP 発光強度の変化を強調することで、従来よりも高精度に PSP 発光強度変化の検出が可能とする。

3.3 PSP を用いた壁面せん断応力計測

近年注目度の高い、PSP 計測画像から壁面せん断応力の算出を行う手法の検証も行った。本手法では、PSP 計測データからオプティカルフロー法を用いて物質輸送量を通じて壁面せん断応力を推定する。本研究においては、PSP を塗布した平板上に気体噴流を衝突させ、これによって形成される壁面せん断応力場の推定手法の検討を行うとともに、既往論文およびせん断応力センサーとの結果の比較を行った。

4. 研究成果

4.1 無風時・通風時画像の位置合わせ手法

本研究では、テスト画像上に従来法である黒丸マーカを設置したもの、AR マーカを設置したものをそれぞれ準備し、それぞれ同様の条件となるように平行移動と回転させた 2 枚の画像を撮影する。このようにして得られた画像に対して、それぞれ位置合わせを実施して、位置合わせの精度を比較した。位置合わせ精度は、位置合わせ後に、画像の各位置において 2 画像の輝度値の差を求め、画像全体での平均値を算出しこれにより評価した。すなわち完全に位置が合った時には 0 となる。なお本研究では、実際の PSP 計測に対応させてすべてグレースケール画像を扱っている。まず、データ処理に要する時間に関しては、黒丸マーカの場合は、マニュアル操作で 2 画像間の対応する黒丸マーカを指定していく必要があるのに対し、提案手法である AR マーカではマニュアル操作は不要であるために、この作業に相当する時間が短縮される。マーカを検出した後の処理は両者で同一のアルゴリズムを用いて計算できるために、提案手法がデータ処理時間の観点から優れることが明らかとなった。

次に位置合わせに使用するマーカの数とマーカサイズについて両者の比較を行った。これは、AR マーカの場合は、マーカサイズによって自動検出の可否が決まるために、マーカサイズをパラメータとして検討する必要があるためである。一方で AR マーカでは黒丸マーカとは異なり、向きを検出も可能であることから、黒丸マーカよりも少ないマーカ点数で位置合わせが実現できると期待できる。結果を図 1 に示す。図 1 から、AR マーカでは 2 点のマーカ設置で、黒丸マーカ 5 点設置と同程度の精度で位置合わせが可能であることが分かった。以上から、データ処理に必要な時間、結果の精度の観点から提案手法である AR マーカの有効性を示すことができた。

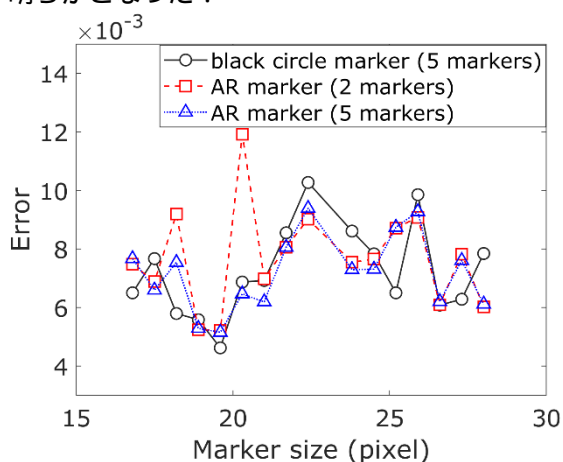


Fig. 1 黒丸マーカと AR マーカによる位置合わせ結果の比較

4.2 構造化光を用いることで PSP の圧力分解能の向上

構造化光を用いた PSP の圧力分解能の向上に関して、本研究では、デジタルミラーデバイス (Digital Mirror Devise; DMD) を用いた励起光システムを開発した。具体的には、ターゲットとする圧力範囲において優れた圧力感度を示すりん光分子を選定し、このりん光分子に合わせ

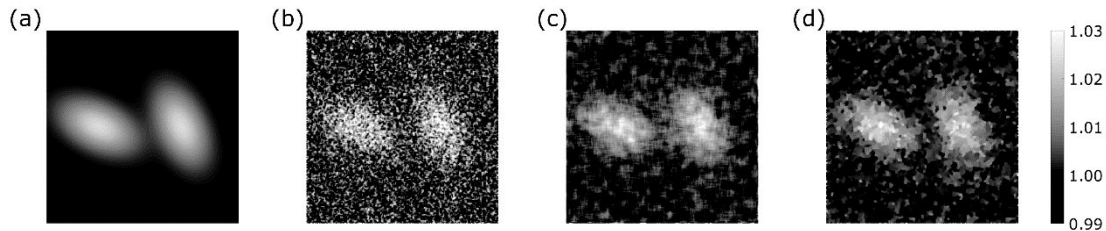


Fig. 2 構造化光を用いた発光強度変化の検出 . (a)真値画像 , (b)従来法による結果 , (c) (b)に 10x10 ピクセルのメディアンフィルター処理 , (d)提案手法による結果

たバインダーを選定した . また , このりん光分子を励起するのに適した波長を有した光源を準備し , 波長に合わせた DMD を用いて構造化光の形成を行い , 実証実験を行った . ただし , 従来手法と提案手法の 2 つの実験で完全に同一の流れ場を形成することが難しく , PSP の圧力分解能の向上を定量的に比較することが難しかったため , ここではシミュレーション画像を用いて両手法の比較を行った . 具体的には , 真値の画像を作成したうえで , PSP の励起過程に合わせて , 従来法と提案手法の 2 種類の PSP 取得画像をシミュレートした . このときに , 画像にのるノイズと真値の強度変化が同程度となるように設定し , 両手法によってどれだけ真値画像に近い画像を復元できるかを比較した . 図 2 に結果を示す . 従来手法では提案手法と同様の枚数の画像取得を行うものとして , これらを単純に加算平均している . なお , ここでは両手法に対して同様に MATLAB の組み込み関数である wiener2 フィルターを施した . また真値からのずれを各ピクセルで計算し , その平方根を比較した . この結果は , 従来手法では 0.44 , 提案手法では 0.19 と提案手法の方が従来手法に比べ 1/2 以下の値となった . 提案手法の結果では , フィルターを強くかけたような結果になっているが , 従来手法に対して例えばメディアンフィルター処理を広いピクセル領域にかけた場合よりも良好な結果を示すことが分かる . この結果 , 提案手法によってより真値に近い画像が復元されることが明らかとなり , その有効性を確認した . ただし空間分解能の改善など課題が残ることが分かった .

4.3 PSP を用いた壁面せん断応力計測

PSP を塗布した平板上に気体噴流を衝突させ , これによって形成される壁面せん断応力場の推定手法の検討を行った . 本研究では , いくつかの推定法をもとに PSP 計測データから壁面せん断応力を推定した . これらの結果は , 既往論文(Liu, et al., 2015)およびせん断応力センサーとの結果の比較を行った . なお , 比較となるデータは Liu 教授より提供いただいた . 推算結果に関しては , 点計測となるせん断応力センサーとの二乗平均平方根 (root mean square; RMS) を算出し , 既存手法との比較を行った . 結果を図 3 に示す . 図の横軸 x/H は流れ方向の距離をノズルと板間距離 H で無次元化したものであり , $x/H = 0$ は噴流が平板と衝突する位置を表している . この結果 , Liu et al., 2015 や Ando 1986 らの手法で計算する場合は , 処理時間が短く , Whitten 1990 や Mukawa 1995 による方法で計算する場合 , 処理時間は Liu et al., 2015 や Ando 1986 らの手法に比べて 10 倍程度の時間を要するものの , RMS は , Liu et al., 2015 の 0.12 から 0.07 と 4 割程度改善することが分かった . 特に Liu et al., 2015 ではハイパーパラメーターをせん断応力センサーの結果と比べながら手動で調整するのに対して , 画像輝度値の標準偏差などを指標にしながら客観的にパラメーター設定するために , せん断応力センサーデータを参照できない未知の流れ場に対して有効である .

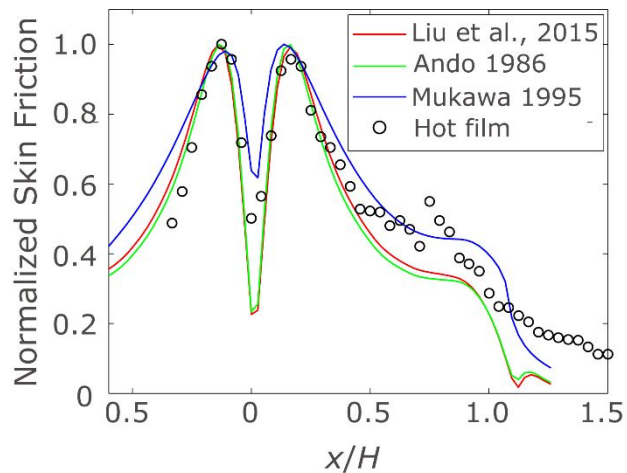


Fig. 3 せん断応力の推定結果の比較

引用文献

1. T. Liu, et al., Global Skin-Friction Diagnostics Based on Surface Mass-Transfer Visualizations, AIAA Journal, 52, 11, 2369-2385(2015).
2. 安藤繁 , 画像の時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム , 計測自動制御学会

論文集, 22, 12, 1330-1336(1986).

3. G. Whitten, A framework for adaptive scale space tracking solutions to problems in computational vision, Proceedings of 3rd International Conference on Computational Vision, 210-220(1990).
4. 武川直樹, 分散による解像度制御を用いたベクトル場再構成とオプティカルフロー推定への応用, 電子情報通信学会論文誌. D-II, 78, 7, 1028-1038(1995).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松田佑
2. 発表標題 蛍光・りん光分子を用いた熱流体可視化計測
3. 学会等名 日本機械学会 IIP2019 情報・知能・精密機器部門講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山哲, 松田佑
2. 発表標題 PSP計測画像における位置合わせ手法の提案
3. 学会等名 第14回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	江上 泰広 (Egami Yasuhiro) (80292283)	愛知工業大学・工学部・教授 (33903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------