132 自然対流場の3次元画像温度計測

○篠木政利(関大院) 小澤守(関大工)
木村一郎(大阪電通大) 梅川尚嗣(関大工)

3-D Temperature Measurement by Image Processing Technique

Masatoshi SHINOKI*, Mamoru OZAWA*, Ichiro KIMURA** and Hisashi UMEKAWA*

This paper presents a new measurement system for three-dimensional temperature distribution in a rotating Rayleigh-Benard convection based on color image processing. This system is an extension of two-dimensional temperature measurement system in which thermo-sensitive liquid-crystal suspension method is adopted for flow visualization and neural network is used for correlating between color and temperature. Interpolating two-dimensional temperature distributions in vertical plain by B-spline function, three-dimensional temperature distribution in the fluid layer was obtained.

1. はじめに

現在、感温液晶懸濁法を用いた可視化実験が、様々な熱流動現象の温度場の定性的な把握に用いられ、その研究成果も数多く報告されているが、最近では、この可視化画像にカラー画像処理技術を用いて、定量的に温度場の情報を得ようとする研究も進んでおり⁽¹⁾⁻⁽³⁾、熱流動現象の解明や数値実験の確証などという点で、その有用性が注目されている。

本研究では、回転水槽内の自然対流現象の可視化画像にカラー画像処理技術を用いて、その3次元温度計測を試みた。その際、非線形性の強い可視化画像の色情報(R,G,B値)と温度の関係をニューラルネットワークを用いて定式化し、色/温度変換を行うことにした。その結果、回転系の自然対流の3次元的な温度分布を得ることができたので、ここにその具体的方法と結果を述べる。

2. 可視化実験装置とカラー画像処理システム

Fig.1に可視化実験装置の概要を示す。流体層①のアスペクト比(半径:高さ)は50mm:50mmで、上面に2mm厚の亚克力板②、下面に25mm厚の銅板③を伝熱面とする水槽が設置されており、一定温度の水を循環させることで上下面温度が設定されている。この流体層を感温液晶を懸濁したシリコンオイルで満たし、上下壁面温度と回転数を一定に保ち、対流が十分に発達した後、スリット光が通過する断面の可視化画像を撮影した。

Fig.2に画像処理システムの構成を示す。画像は1/30秒間隔で撮影され光ディ

---

* Faculty of Engineering, Kansai University, Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka

** Osaka Electro-Communication University, Hatsu-cho 18-8, Neyagawa, Osaka

スクレコーダに記録される。さらに、その画像は光ディスクレコーダ内の色復調回路でRGBの3原色信号に色分解され、イメージプロセッサに記憶される。この画像データはコンピュータによって処理され、結果はグラフィックディスプレイに出力される。

3. 色／温度変換特性

まず、感温液晶の色と温度の関係を調べるために、校正実験を行った。ここでは式(1)によって表される正規化された r, g, b 値と温度との関係をFig.3に示す。

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B} \\ g &= \frac{G}{R+G+B} \\ b &= \frac{B}{R+G+B} \end{aligned} \quad (1)$$

この図に示されているような、この非線形性の強い関係を、次に示すニューラルネットワークによって定式化することにした。

4. ニューラルネットワークによる

色／温度変換

ここで用いたニューラルネットワークは、 r, g, b 値を入力とし、温度 T_N を出力とする4層構造の階層型ニューラルネットワークで、各層のユニット数はFig.4に示すとおりである。学習は、ある r, g, b 値に対するニューラルネットワークの出力 T_N が校正実験によって得られた温度 T_R と一致するように、バックプロパゲーション法を用いて行った。また、学習データとしては14.7℃から18.3℃まで0.25K間隔の14パターンを用い、学習回数は50000回とした。Fig.5に校正実験によって得られた温度 T_R と、それに対応する r, g, b 値を学習後のニューラルネットワーク

Fig.1 Experimental setup for flow visualization

Fig.2 Schematic diagram of image processing

Fig.3 r, g, b versus temperature T_R

に入力し得られた出力の温度 T_N の関係を示す。ネットワークからの出力温度 T_N はほぼ T_R と等しくなっており、ニューラルネットワークによる色/温度変換の有効性がわかる。実際に感温液晶によって可視化された温度成層の画像(Photo.1)を色/温度変換した結果を疑似カラー表示したものをPhoto.2に示しておく。

Fig.4 Neural network structure

5. 回転系自然対流への適用

本研究では、この色/温度変換システムを回転数10rpm、上面壁温15.6℃、下面壁温17.9℃の回転水槽内の自然対流の温度分布計測に用いた。水槽が回転することで、スリット光が通過する断面の可視化画像を1回転あたり188枚得ることができる。この断面の可視化画像をそれぞれ上述の手法を用いて温度情報に変換し、画像間の温度をB-スプライン関数によって補間することで、テスト空間内の任意の位置の温度情報を得ることができた。この手法の有効性を確かめるため、 $z=25\text{mm}$ での実験によって得られた水平断面の可視化画像と同地点での水平断面の温度分布の疑似カラー表示したものをPhoto.3とPhoto.4に示す。両写真の特徴がほぼ一致しており、本手法を用いて空間的な温度分布を知ることが可能であることがわかる。さらに、このシステムを用いて温度分布の3次元的な構造を把握しやすくするため、7枚の水平断面の温度分布を表示したものをPhoto.5に示す。加熱された流体が下面から容器中央部分を通して上昇し、上面で冷却され、側面で下降している様子がわか

Fig.5 Relationship between measured temperature T_R and network output temperature T_N (50000 times for learning)

Photo.1 Visualized image of thermal stratification using thermo-sensitive liquid crystal

Photo.2 Isothermal contours

Photo.3 Visualized image

Photo.4 Sectional image interpolated by B-spline

る。このように本計測システムは3次元的な温度分布構造を理解する上で、非常に有用な手法であるといえる。

6.終わりに

感温液晶によって可視化した画像に、カラー画像処理を用いて温度情報を定量的に求める手法を応用し、回転水槽内の自然対流に適用した結果、その空間的な温度分布を得ることができた。このシステムは、流れの時定数が観測時間に対して非常に大きい場合の3次元温度分布を把握する上で非常に有効な手段であるが、より、非定常性の強い現象に対しては別途検討する必要がある。

Photo.5 Sectional images

参考文献

- (1) 秋野, 功刀ら: 液晶サーモカメラの開発(回帰式法), 日本機械学会論文集(B編), 54-505, 2661/2669 (1988)
- (2) 木村, 小澤ら: 感温液晶を用いた温度場と速度場の同時計測, 計測自動制御学会論文集, 27-8, 870/877 (1991)
- (3) Kimure, Kuroe, Ozawa: Application of neural networks to quantitative flow visualization, JFV, (1994)