A207 時間差法超音波CTの手法による空気流れの流速分布の可視化

九州工業大学工学部 スタム ティラワタナチャイ

小宮 勲一

佐々本 裕方○

緒方 就昭

VISUALIZING THE VELOCITY PROFILE OF AIR FLOW BY MEANS OF
THE ULTRASONIC TRANSLATION TIME COMPUTED TOMOGRAPHY METHOD

Sutham Teerawatanachai, Kin-ichi Komiya, Hiromichi Sasamoto, Nariaki Ogata
Kyushu Institute of Technology

The technique of computed tomography (CT) was used to estimate the velocity profile of axisymmetric flow of air from the average velocity, obtained from ultrasonic (US) flowmeter, over 4 different paths of propagation of ultrasonic wave. 2 experiments, where motor fan and air compressor were used as the air source, were performed and the results are reported.

1. はじめに

CTは物体内部の状態を投影データから再構成する方法として、医療診断分野でよく知られている。この論文では、CTの工業計測への応用例として、円管内の空気流れの流速分布を求めた。円管断面の4つの方向についての平均流速を求め、その測定値からCTのアルゴリズムを用い流速分布の再構成を行い、熱線流速計で得られた値と比較、検討した。CTのアルゴリズムは、時間差法超音波流速計からの音波の順と逆方向の時間の逆数差より求めた平均流速と、超音波伝播経路の長さの積が、測定経路上での流れの速度の積分値となるので採用することが可能である。

この考え方にもとづいた研究は以前から行われていて、再構成のためのアルゴリズムはSheep, Loganのアルゴリズムと代数的像再構成法(ART)が用いられた。前者は基本的に無制限領域で定義される関数を再構成するのに対し、多くの場合測定対象である流れは制限領域、例えば管内しか存在しないのであまり適切でないと思われる。後者は逐次的な方法なので計算上の安定性、収束時間が主な問題となっている。

ここで用いられるアルゴリズムはMarr, R. Bにより提案されたもので、単位円内で定義される関数を考慮し、直交多項式系で展開していくというものであり、離散化したアルゴリズムは計算に適した形になっている。

2. 原理

2.1 超音波流速計

超音波流速計の原理図を fig.1(a), (b) に示す。順方向の伝播時間を t_d 逆方向の伝播時間を t_u とすると

$$t_d = \frac{L}{C + V \cos \theta}, \quad t_u = \frac{L}{C - V \cos \theta}$$

逆数差をとって整理すると

$$V = \frac{L(t_d - t_u)}{2L \cos \theta t_d t_u} \quad \dots (1)$$

C: 超音波伝播速度 V: 測定流体の流速

L: 振動子間の距離

ここで得られる V は fig.1(a) の伝播経路上の速度の平均となっているので、これに伝播経路の断面上への投影長さ (fig.1(b) の点線) を掛けて速度の積分値とし、CT のアルゴリズムに使用した。

2.2 CT のアルゴリズム

Marr, R. B. は円周上の等間隔に離れた N 点中の任意の 2 つの点につながる $N(N-1)/2$ 線上の関数の積分値から元の関数を再構成する問題を考察した。そのアルゴリズムを式 (2) (3) (4) に示す。再構成された関数 $P^{(M)}(x, y)$ は多項式で $M = N-2$ がその次数である。

但し、 (r, ϕ) は $P^{(M)}$ の極座標で、 g は測定値である。

$Q_{n,k}(t)$ は Shift Jacobi 多項式で式 (2) の漸近式から再生される。

$$1 \leq n \leq N-2; \quad 0 \leq k \leq (N-n-2)/2$$

$$I = 1, \dots, N; \quad J = 1, \dots, N-1$$

$$Q_{0,k+1} = 2t Q_{1,k} - Q_{0,k}$$

$$Q_{n+1,k+1} = Q_{n,k+1} + (k+1)(Q_{n,k+1} - Q_{n+1,k})/(n+k+2)$$

$$Q_{n,0}(t) = 1 \quad \dots (2)$$

$$\alpha_{n,k} = 2(n+2k+1)/N^2 \sum_{I,J} \sin[(n+2k+1)\pi J/N] \{ \begin{matrix} \sin \\ \cos \end{matrix} \} [n\pi(2I+J-2)/N] g(I,J) \quad \dots (3)$$

$$P^{(M)}(r, \phi) = \sum_{n=0}^{M(M-n)/2} \sum_{k=0}^{(M-n-2)/2} [\alpha_{n,k} \sin(n\phi) + \beta_{n,k} \cos(n\phi)] r^2 Q_{n,k}(r^2) \quad \dots (4)$$

3. 実験装置および方法

fig.2(a) に実験装置の概略を示す。

助走部分は塩化ビニール製で内径490mm 長さ2000mm 管の一部分に流れを整えるために内径20mm 長さ150mm の紙製の管をしきつめた。計測部分はアクリル製で内径490mm 長さ1100mm、熱線流速計を挿入するための穴を等間隔で8個あけた。振動子はfig.2(b)のように取り付けた。風流源はコンプレッサーとモーターファンを用い、助走管の断面の中心に設置した。

流速分布の再構成の実験は、次の2つの仮定の上行われた。

1. 流れは軸対象である。
2. 送信器と受信器の断面間の流速分布は一定かつ定常である。

仮定1より流速分布の再構成に必要な測定データは $N(N-1)/2$ から N が偶数の時は $N/2$ に、 N が奇数の時は $(N-1)/2$ に減ることになる。 N は8とし、各経路の平均流速は40回の測定から平均した値をとった。

熱線流速計による測定は、fig.2(c)に示すように中心を通る4本の線上の7つの点について行われた。また、流速計の測定時間精度は $0.25 \mu\text{sec}$ である。

4. 実験結果および考察

4.1 コンプレッサーを使った場合

超音波流速計により得られた測定値は、0.6462, 0.6376, 0.7722, 0.8860 m/sec であり、このデータより再構成した流速分布を三次元的に表示するとfig.3のようになる。fig.4(a)(b)(c)(d)に再構成結果と熱線流速計による測定値を表示する。実線は再構成結果、○は熱線流速計による測定値を表す。fig.4(a)はfig.2(c)

fig.2 (a)

fig.2(b)

fig.2(c)

fig.2 experimental arrangement

fig.3 compressor

fig.4(a)

fig.4(b)

fig.4(c)

fig.4(d)

fig.4 compressor

の a の経路についての流速分布であり、fig.4(b)(c)(d)についても同様である。

コンプレッサーによる流速分布は、中心付近が最も流れが速いと予想されるが再構成結果もそのような分布となった。この再構成結果と熱線流速計で得られた測定値と比較すると、いずれの図も熱線流量計の測定値はピークがずれている。この原因としては、コンプレッサーの管の取り付けがうまくいかなかったり整流管の向きが多少ずれていたなどの理由から流れが軸対象になっていなかったことなどが考えられる。

4.2 モーターファンを使った場合

超音波流速計により得られた測定値は 0.8550, 0.5915, 0.7391, 0.7560 m/sec であり、再構成結果と熱線流速計の測定値を fig.5, fig.6に示す。流速分布は、モーターファンが中心付近では風を起こさない構造となっているので中心の流速がその周りの流速より遅くなることが予想されるが、再構成結果は fig.6に示すようにそのような分布となった。再構成結果と熱線流速計で得られた値を比較すると、絶対値は多少違うが概形は似ていることがわかる。4.1 と同様に、再構成は 4 つのデータから行われるので、1 つのデータの誤差が再構成結果に大きく影響をあたえるものと考えられる。

5. まとめ

CTの手法により再構成を行うことにより軸対称空気流れの流速分布の概形は知ることができるとわかった。しかし、まだ改良しなければならない問題があり、今後の課題として研究を進めてゆく予定である。

fig.5 motor fan

fig.6(a)

fig.6(b)

fig.6(c)

fig.6(d)

fig.6 motor fan

6. 謝辞

測定装置の製作においてご協力いただいた大山光夫氏に感謝の意を表します。

7. 引用文献

1.) R.B.Marr, " On the Reconstruction of a Function on a Circular domain from a Sampling of its Line Integrals, " J.Math.Ana.Appl., 45, 357/374 (1974).

2.) 勝山仁之 山本彰夫 新井紀男 架谷昌信, " 超音波CTによる円管内噴流の温度分布測定 " IEICE Technical Report Vol.89 No.480, US89-45(1989)

3.) 岩井喜典 斎藤雄督 今里悠一 医用画像診断装置, コロナ社 (1988)