エリアアレイ・イメージセンサを用いた高速画像処理 による乱流測定法[†]

上和野満雄・齋藤文良・倉田幸信^{*}・瀧野日出雄

横浜国立大学工学部 化学工学科^{††}

本研究はひとつの新しい流速測定法として、エリアアレイ・イメージセンサ（以下、エリアセンサと称する）を用いた高速画像処理による乱流測定法の開発に関して検討したものである。すなわち、本測定装置は乱流計測を行うためのプローブと並列駆動方式エリアセンサならびにその出力信号を処理する回路から構成されている。プローブはイメージファイバとマイクロレンズを組み合わせたもので、微小な観測空間内を通過する微細なトレーサー粒子の影像中心を正確にとらえ、その影像中心をエリアセンサに伝達できるものとした。

本測定法の適用例として、攪拌槽内の液流の速度および乱れ速度を測定し、そのパワースペクトル等を求めた。

本報に示す測定法を応用することにより種々の流動場における乱流計測が精度よく行いうるものと期待される。

緒 言

従来より種々の乱流測定法が使用されているが、その中でも特に優れているものとしてレーザー・ドップラー流速測定法¹⁾が挙げられる。最近では、光ファイバを利用した光ファイバ・レーザー流速計が市販され、比較的複雑な形態をなす測定対象の流れ場に広く適用されている。しかしながら、同装置は流速を検出するプローブの部分若干大型であり、また、装置が極めて高価である点で容易に使用できないきらいがある。一方、著者らは10数年来、従来の測定原理とは異なる新たな流速測定法のひとつとして、種々の流動場における流速測定に柔軟に対応できる流速測定用プローブと高い測定精度を維持したまま比較的安価で操作性が容易なイメージセンサとを組み合わせた乱流測定法について種々検討を行ってきた。イメージセンサを用いてEuler 観測の立場から乱流計測を行う場合には、1)流体とともに移動するトレーサー粒子の大きさを微小とすると、2)トレーサー粒子を連続的に観測空間に流入させること、3)観測空間をできるだけ微小にすること、の3つの条件を満足させる必要がある。本報で提案する測定法は、これらの条件をある程度満足するものであり、測定装置はプローブ、並列駆動

方式エリアアレイ・イメージセンサ（以下、単にエリアセンサと称する）ならびに高速信号処理回路から構成されている。本測定法は流体中に直接挿入したプローブによりトレーサー粒子の影像をエリアセンサ受光部に正確に伝達し、センサから得られる粒子影像（形状）を表す信号を特徴抽出する高速信号処理回路を通して粒子の影像中心を求め、液流速を極めて短い時間間隔で計測および表示しようとするものである。

以下には本乱流測定法の要点を示すとともに、本測定法を攪拌槽内における液の乱れ速度の測定に適用した例について述べる。

1. 流速測定法

1.1 測定原理

イメージセンサにより乱流計測を行う場合、微小なトレーサー粒子を観測空間内に連続的に流入させる必要がある。実際には観測空間にトレーサー粒子が同時に複数個、連続的に流入する状況となるが、この場合の個々のトレーサー粒子の識別はエリアセンサを用いる以下の方法によって達成される。Fig. 1 には光透過方式による並列駆動方式エリアセンサの出力信号波形を模式的に示した。ここで、並列方式エリアセンサとは、独立したライン出力を有するリニアアレイ・イメージセンサが複数並列に並び、それらが任意の周波数で同時に走査できるものである。同図(a)にはトレーサー粒子2個が観測空間

[†] 1986年12月6日受理

^{††} 〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156

^{*} ソニー㈱

Fig. 1 Schematic signal patterns obtained by the area type image sensor in the transmitted light system

内を右上方から左下方へ移動している状態をエリアセンサによって観察している状況を示し。同図(b)にはそのときのエリアセンサのライン5, 7および11からの出力信号波形を模式的に示した。同図(b)に示すようにトレーサ粒子が観測空間に流入すると、透過光の一部が遮断され、その結果、エリアセンサの各ラインからの出力信号波形は粒子の位置に対応した部分のみ低下する。この出力信号を適宜に設定したスレシヨルドレベルを基準に二値化することによって、後に述べる高速信号処理を行うようにした。ここで、観測空間の大きさに対してトレーサ粒子影像の大きさが大きすぎるような場合でも前述したように、トレーサ粒子影像を二値化しているので、トレーサ粒子の中心位置に関しては、これを正確に読み取ることができる。したがって、観測空間内にトレーサ粒子が複数個、同時に流入した場合においても、個々のトレーサ粒子の中心位置の移動とその移動に要した時間から流速を計測し、表示させることが可能となる。すなわち、各ラインからの出力信号より微小時間内に時々刻々と変化するトレーサ粒子の影像中心をとることができる。同図(b)に示した信号を後に述べる信号処理法によって処理した後、コンピュータ・ディスプレイ上に再現させたトレーサ粒子影像を同図(c)に模式的に示した。このようにエリアセンサを用い、その走査時間間隔を極めて短くすることにより観測空間に同時に複数個、連続的に流入するトレーサ粒子を識別しながら、極めて短い時間内で移動する個々のトレーサ

Fig. 2 Variation of two dimensional flow velocity components with time obtained from the locus of the center of an image of tracer particle

粒子の移動距離を求めることができる。Fig. 2にはトレーサ粒子影像から求められる流速値の2次元速度成分の算出法を示した。すなわち、同図(a)において、任意の時刻 t_l ($l=1, 2, 3, \dots$)におけるトレーサ粒子影像 i の中心(一次モーメントの中心) $W_i^{t_l}(\bar{X}_i, \bar{Y}_i)$ の座標 $\bar{X}_i, \bar{Y}_i$ の値は、エリアセンサの各ライン j 上のトレーサ粒子影像の中心の座標 $w_i^{t_l}(\bar{x}_j, \bar{y}_j)$ から次式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_i &= \sum_j (M_{i,j} \cdot \bar{x}_j) / \sum_j M_{i,j} \\ \bar{Y}_i &= \sum_j (M_{i,j} \cdot \bar{y}_j) / \sum_j M_{i,j} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $M_{i,j} = P_i^L - P_j^R + 1$ であり、 P_j^L, P_j^R はそれぞれエリアセンサの各ライン j に現れたトレーサ粒子影像の両端のbit位置である。このようにして求めた t_l 時刻におけるトレーサ粒子影像 i の中心座標 $W_i^{t_l}$ と同一粒子の Δt 秒後の中心座標 $W_i^{t_l+\Delta t}$ から、 Δt 時間における液流の2次元速度成分、ここでは V_{x_i}, V_{y_i} は同時にそれぞれ次式(2), (3)により求められる。

$$V_{x_i} = (\bar{X}_i^{t_l+\Delta t} - \bar{X}_i^{t_l}) / (\Delta t \cdot m) \quad (2)$$

$$V_{y_i} = (\bar{Y}_i^{t_l+\Delta t} - \bar{Y}_i^{t_l}) / (\Delta t \cdot m) \quad (3)$$

ここで、 m は光学系の倍率、 Δt は次式で求められる時間間隔である。

$$\left. \begin{aligned} \Delta t &= (s_i + \bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i) / u_s + \tau n \\ \text{ただし} \\ s_i &= l_b \cdot a_x \\ u_s &= f_s \cdot a_x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 l_b はエリアセンサの1ラインを構成するbit数、 a_x は走査方向のbitピッチ、 f_s はエリアセンサの駆動周波数、 n は走査回数、 τ は走査戻り時間である。残り一次元の速度成分、ここでは V_{z_i} 、は上記2次元速度成分を測定した際の光学系と直交する方向から観測することにより、同様にして次式により求めることができる。

$$V_{z_i} = (\bar{Z}_i^{t_i+\Delta t} - \bar{Z}_i^{t_i}) / (\Delta t \cdot m) \quad (5)$$

ここで $\bar{Z}_i$ は残り一次元方向におけるトレーサ粒子影像 i の中心である。同図(b)には各微小時間間隔内における平均の流速成分、ここでは V_x, V_y 、と経過時間との関係を模式的に示した。このように各流速成分は時間に対して離散的であるが、トレーサ粒子を連続的に観測空間内に流入させることによって連続計測に近い状態とすることができ、乱流計測が可能となる。

1.2 光学構成

イメージセンサを用いて乱流計測を行う場合、前述した3つの条件を満足させる必要がある。したがって、これらの条件を満足させるように光学系構成を工夫することが必要である。そこで本研究ではFig. 3に示すようなプローブを試作した。このプローブはフレキシブルライトガイドファイバ③、フレキシブルイメージファイバ④、微小な円柱形レンズ(セルフロックマイクロレンズ*以下これをSMLと略記する)⑥、スリット⑧およびこれらを支持する堅固な支持パイプ⑦から構成されている。光源①からの光はレンズ②を介してフレキシブルライトガイドファイバ③の端面(図中①)に集光され、プローブの先端部(図中⑩)に導かれる。先端部分から発した光は観測空間⑩を通過するトレーサ粒子⑨を照射すると、トレーサ粒子影像はライトガイドファイバと対向する位置に配置したSMLの端面(図中⑥)に投影される。ここで、SMLにより拡大されたトレーサ粒子影像はスリット⑧を通してフレキシブルイメージファイバ④の端面(図中④)に伝達される。このトレーサ粒子影像はレンズ②を介してエリアセンサ⑤によって受光され、その出力信号は後に示す信号処理回路へ送られる。ここで、SMLの使用はプローブの大きさを微小にしたまま光学系全体の倍率を大とすることができ、その結果、微小な観測空間の設定と測定分解能の向上を計ることができる。

なお、このようなプローブを用いると、材質が不透明

Fig. 3 Schematic diagram of probe for measuring the flow velocity

で比較的大型の流動装置内や複雑な形状の構造物が設置されている装置内などの流動場においても乱流を計測することが可能となる。

1.3 信号処理法

高速駆動可能な並列駆動方式エリアセンサを用いた信号処理システムのブロックダイアグラムをFig. 4に示した。すなわち、エリアセンサからの出力信号は増幅後、適宜なスレシールドレベルに設定した高速コンパレータによって二値化される。この信号は後に述べるような特別な方式によって簡素化され、いったんメモリ(RAM)に蓄えられる。その後、インターフェイスを介してマイクロコンピュータに転送され、フロッピーディスクに記憶される。そのデータを基にしてトレーサ粒子の速度の算出等の計算処理がなされるようになっている。計算処理のフローチャートはFig. 5に示す。

ところで、一定容量のRAMを用いて長時間流速を連続的に測定するためには、RAMへの書き込み効率を向上させる必要がある。そこで本法ではエリアセンサからの出力信号を次のような特別な方式によって簡素化することを試みた。すなわち、エリアセンサからの出力信号から得られるトレーサ粒子影像を再構成する場合に必要な情報を次の3種類に分けて表示することにした。

- 1) 粒子のbit位置に関する情報
- 2) 粒子影像の左右端を区別する情報
- 3) 画面の走査区切りに関する情報

このような情報をRAMに書き込むには次のような方法をとった。すなわち、Fig. 6において、 P_j^R, P_j^L をそれぞれエリアセンサの各ライン j におけるトレーサ粒子影像の右端および左端のbit位置として、それぞれの位置

* 日本板硝子製。種々の口径と焦点距離のものが市販されている。

Fig. 4 Block diagram for processing the output signal from the area type image sensor

をRAM-pの R_1 の領域に書き込んだ。また、各走査区間の各出力ラインにおいて R_1 に書き込んだ情報がトレーサー粒子影像の右端か左端かをRAM-pの R_2 の領域に書き込んだ。さらに画面の走査区切り、すなわち前記 R_1 , R_2 の情報が同一時間の画面かどうかの区別をRAM-pの R_3 の領域に書き込んだ。たとえば、同図(a)のライン j において、 (n) 番目と $(n+1)$ 番目の走査で得られる2画面に着目すると、同図(b)のRAM-p(j)のようにデータがRAM-pに書き込まれた。このようにトレーサー粒子影像が他のラインに存在しているにもかかわらず着目するラインのRAM-pの R_1 の領域には“0”が書き込まれる。同様に同図(a)の $(j+k)$ のラインにおいて得られる2画面に着目すると、同図(b)のRAM-p($j+k$)のようにデータがRAM-pに書き込まれる。なお、観測空間にトレーサー粒子がまったく存在していないときにはRAM-pにはいっさい何も書き込まれないようにした。

以上のようにトレーサー粒子影像に関する情報を簡素化することにより大幅なメモリの節約が可能となり、観測時間を長くとることができる。

1.4 誤差

Eqs. (2), (3), (5)から求められる流速成分において、それらの相対誤差 $|\Delta V_l / V_l|$ ($l=x, z$)、 $|\Delta V_y / V_y|$ はトレーサー粒子影像の移動時間 t_m と移動距離 L_l , L_y のそれぞれの相対誤差と関係し、次式により求められる³⁾。

$$|\Delta V_l / V_l| = |\Delta u_s / u_s| + |\Delta s_l / s_l| + |\Delta n / n| + |\Delta m / m| + |\Delta L_l / L_l| + |\Delta \tau / \tau|, \quad (l=x, z) \quad (6)$$

$$|\Delta V_y / V_y| = |\Delta u_s / u_s| + |\Delta s_l / s_l| + |\Delta n / n| + |\Delta m / m| + |\Delta L_y / L_y| + |\Delta L_x / L_x| + |\Delta \tau / \tau| \quad (7)$$

Eqs. (6), (7)中の u_s , s_l , n , τ については規定された値であることから Δu_s , Δs_l , Δn , $\Delta \tau$ は、ほとんど無視できる

Fig. 5 Flow chart of calculation for flow velocity and power spectrum
* manual operation

値である。また、 Δm も、実際に流速を測定する前に繰り返し測定することによって非常に小さい値とすることができる。一方、 ΔL は粒子の位置の測定に関する誤差であり、これはイメージファイバとエリアセンサの解像度によって大きく影響される。この誤差を小さくするためには画素数の多い高解像度のイメージファイバとフォトダイオードの大きさが小さい高解像度のエリアセンサを使用することが望ましいが、同一の解像度のイメージファイバとエリアセンサを使用した場合、粒子の移動距離を大きくするように走査周波数を調節することにより($\Delta L/L$)を小さくすることができる。

2. 流速測定

2.1 光学系および測定回路構成

本実験に用いたプローブはフレキシブルイメージファイバ、フレキシブルライトガイドファイバおよびSMLを組み合わせたものであり、投光面と受光面 (Fig. 3中の①と②)の距離は15mm、支持パイプ太さは8mmのものである。このうちフレキシブルイメージファイバは画素数が35000、両端面は2.2mm×2.2mmの正方形であり、長さは2mのものである。またフレキシブルライトガイドファイバもほぼ同様の形状にあり、その寸法は3.0mm×3.0mm×1.5mである。さらに、SMLは円柱形であり、

* 沖電気製。OPA 14×41

Fig. 6 Writing format to the RAM's in the scanning number and the signal information of image of tracer particle

直径×長さ=2.0mm×1.85mm、焦点距離6.13mm、端面-トレーサー粒子間距離7mm、端面-焦点間距離5.53mmのものである。光源からの光の集光用に用いたレンズおよびフレキシブルイメージファイバとエリアセンサとの間に配置したレンズをも含めた光学系全体の倍率 m は18.7倍である。

ところで、光学系を所定の倍率に設定した場合、観測空間の一断面の大きさは用いるエリアセンサの受光面の大きさによって決定される。本実験に用いたエリアセンサ*の写真ならびにその模式図をFig. 7に示した。このエリアセンサを用いた場合の観測空間の一断面の大きさは220 μ m×68 μ m、焦点深度は150 μ m程度である。

Fig. 7に示したエリアセンサは14本の平行なライン出力を有し、各ラインから得られるビデオアナログ信号(出力信号)は1走査で41bitsである。また、一画面の走査に要する時間は最小約0.086ms(11600画面/秒)である。出力信号の記憶には14本のそれぞれのラインに対して8bits-2kwordsのRAMを用いた。さらに、走査回数の記憶用として8bits-2kwordsのRAMを3つ用いた。各種計算処理には16bitsマイクロコンピュータを用いた。

なお、本測定法によってエリアセンサのライン方向(r)とそれに直行する方向(θ)の流速値を測定する際、特に問題となる誤差は前述のとおり、 $|\Delta L_r/L_r|$ 、 $|\Delta L\theta/L\theta|$ である。ここで以下に述べる測定例においては、粒子影像是エリアセンサ受光面で r 、 θ 方向ともに約2~3mm移動するように走査周波数を調整しているが、この場合、 $\Delta L_r=0.09$ mm、 $\Delta L\theta=0.1$ mmであることから $|\Delta L_r/L_r| \approx |\Delta L\theta/L\theta| = 0.03 \sim 0.05$ となる。

Fig. 7 Photograph and outline of the area type image sensor

2.2 実験装置

Fig. 8 には実験に用いた攪拌装置の概略と液流速測定位置を示した。使用した攪拌翼は 8 枚羽根パドル翼であり、これを液深の 1/2、槽中心軸上に設置した。攪拌液には水道水 (293 K) を用い、液深は槽内径 ($D=200$ mm) と等しくした。トレーサ粒子には水道水とほぼ同比重で、代表粒子径 $40 \mu\text{m}^{**}$ のポリスチレン球形粒子 (密度 $\rho_s=1.04 \text{ g/cm}^3$) を用いた。ポリスチレン球形粒子の攪拌液への混入は観測空間にトレーサ粒子が常時流入する形態が得られるような程度 ($6 \times 10^{-2} \text{ wt} \%$) とした。一方、液流速測定位置は同図に示すように $r_0/(D/2)=0.8$ 一定で槽中心軸と 2 枚の邪魔板間の中央とを結ぶ槽縦断面 ($\theta=\pi/6 \text{ rad}$) において $h_0/H_t=0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ の 4 段階に変化させた。また、翼回転速度 N は $N=1.2 \text{ s}^{-1}$ とした。

2.3 測定例

Fig. 9 には翼近傍 ($h_0/H_t=0.5$) と翼より離れた位置 ($h_0/H_t=0.8$) の 2 つの観測位置における翼回転方向 (θ_t 方向) の液流速成分 $V_{\theta t}$ の経時変化を示した。ここで $V_{\theta t}$ の値は翼の回転方向を正とした。同図(a)に示すように、翼近傍では液は激しく乱れている様子がわかる。一方、同図(b)に示す翼より離れた位置では液流の速度変動は小さいように観察される。

Fig. 10 には無次元液平均速度 ($\bar{V}_t/V_t$) および液流の

** 光学系倍率とエリアセンサの 1 bit の大きさから今回はこの粒子径のトレーサ粒子を用いた。

$B=15 \text{ mm}, b=20 \text{ mm}, D(H_t)=200 \text{ mm},$
 $d=100 \text{ mm}, H=250 \text{ mm}, H_b=100 \text{ mm},$
 $h_0=50 \sim 80 \text{ mm}, r_0=80 \text{ mm}, \theta=\pi/6 \text{ rad}$
 $N=1.2 \text{ s}^{-1}$

Fig. 8 Mixing device used for this experiment

Fig. 9 Variation of $V_{\theta t}$ with time (a) $h_0/H_t=0.5$,
 (b) $h_0/H_t=0.8$

乱れ強さ ($\bar{v}_t'/\bar{V}_t$) の槽高さ方向の分布を示した。同図より、設定した観測位置における液流の乱れ強さはほぼ一様であり、その値は液平均流速の 40% 程度となっている。一方、液平均流速は翼より離れ、槽上方へ向かうほど小さくなっていることがわかる。

Fig. 11 には Fig. 9 に示したような結果から、高速フー

Fig.10 Distributions of mean flow velocity and fluctuation velocity of liquid in the mixer to perpendicular direction

リエ変換¹⁾によって求められる乱れの一次元パワースペクトル分布を示した。ここで、乱れ速度 v'_i 、乱れのパワースペクトル $E_i(f)$ およびパワースペクトル関数 $F_i(f)$ との相互関係は次式(8)のとおりである²⁾。

$$\overline{v_i'^2} = \int_0^\infty E_i(f) df \quad (8)$$

$$\int_0^\infty F_i(f) df = 1$$

ただし、 $E_i(f)/\overline{v_i'^2} = F_i(f)$

($I=r, \theta t, z$)

同図には r 方向(槽半径方向)と θt 方向の1次元パワースペクトル分布のみを示したが、いずれの場合にも液流測定位置が翼から離れるに伴い液流の乱れの高周波成分が減衰し、低周波成分が増大していることがわかる。

なお、今回試作した測定装置を用いて、上記攪拌槽内の液流の変動を測定した結果、2Hz程度の低周波成分から1kHzの高周波成分までの液流の変動が観測された。

結 言

本研究では並列駆動方式によるエリアセンサを用いた乱流測定法を確立した。この測定法は流動場に直接挿入できるプローブを用い、微小な観測空間に連続して流入する微小なトレーサ粒子の影像を並列駆動方式エリアセンサに正確に伝達し、その出力信号を独自の信号処理方式により高速処理してトレーサ粒子影像の中心を求め、これを基にして液流速の経時変化を計測し、かつ表示しようとするものである。本測定法の適用例として、本報では攪拌槽内の液流速成分の測定を行い、乱れ速度ならびにそのパワースペクトル分布を示した。

〔謝 辞〕 本研究の遂行にあたり、熱心にご協力いただいた並木和彦氏(現在、ソニー^(株))に感謝の意を表します。

Fig.11 One dimensional power spectrum function of turbulence of liquid in the mixer ($r_0 = 80$ mm)

Nomeclature

a_x	= bit pitch in scanning direction	[m]
B	= width of baffle	[mm]
D	= inner diameter of vessel	[mm]
d	= diameter of impeller	[mm]
E_i	= one dimensional power spectrum	[m ² /s ³]
F_i	= one dimensional power spectrum function	[1/s]
f	= frequency	[1/s]
f_s	= scanning frequency	[s ⁻¹]
H	= height of stirred vessel	[mm]
H_l	= liquid depth	[mm]
H_p	= height of impeller from bottom of stirred vessel	[mm]
h_0	= height of measuring point from bottom of stirred vessel	[mm]
L	= distance	[mm]
l_b	= number of bit composing a sensor line	[-]
M	= number of bit perceived on each line of area type image sensor	[-]
m	= optical magnification	[-]
N	= rotational speed of impeller	[1/s]
p	= bit position	[-]
r	= radius	[mm]
r_0	= radius from center axis of stirred vessel to measuring point	[mm]
s_l	= length of sensor line in scanning direction	[m]
t	= time	[s]

t_m = time required to move	[s]	<Subscripts>
u_s = scanning velocity defined by (f_s, a_x)	[m/s]	$I = r, \theta_t, z$ or x, y, z
V = flow velocity	[m/s]	i = identification number of tracer particle
V_t = tip velocity of impeller	[m/s]	j = line of area type image sensor
v' = fluctuation velocity	[m/s]	l = number in order
v_e = voltage of output signal	[v]	r, θ_t, z = axes of cylindrical coordinate
W = center of image of tracer particle on two dimensional coordinate		<Superscripts>
w = center of particle image of tracer particle on j -line of area type image sensor		L = left end
X = x -component of W	[m]	R = right end
x = x -component of w	[m]	"-" = mean
Y = y -component of W	[m]	
y = y -component of w	[m]	
dt = time interval	[s]	
θ = angle	[rad]	
τ = time required to transfer from one scan to next	[s]	

Literature cited

- 1) Bedat, J.S. and A.G. Piesol: "Random Data-Analysis and Measurement Procedures-", p.296, John Wiley & Sons, Inc., New York (1971)
- 2) Hinze, J.O.: "Turbulence", p. 165, McGraw Hill Co., New York (1959)
- 3) Kamiwano, M., R. Saito and N. Ohshima: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 4, 588 (1978)
- 4) Yeh, Y. and H.Z. Cummins: *Appl. Phys. Letters*, 4, 176 (1964)

Method for Measuring Turbulence by a High Speed Image Procession Using an Area Type Image Sensor

Mitsuo Kamiwano, Fumio Saito, Yukinobu Kurata*
and Hideo Takino

Dept. of Chem. Eng., Yokohama Natl. Univ., Yokohama 240

Key Words : Measuring, Turbulence, Flow Velocity, Image Sensor, Signal Procession, Mixing

A method for measuring fluid turbulence with an aid of an area-type image sensor is developed in this work. The equipment consists of a probe, an area-type image sensor having a parallel scanning mode and a circuit for high-speed processing of signals from the image sensor. The role of the probe, consisting of an image fiber, a light guide fiber and a micro lens, is mainly to transfer accurately the images of tracer particles flowing into a small observing space set in a unit toward the image sensor. The roles of the circuit are to digitize the analog signals from the sensor to let the processed signals under a particular mode be memorized by the RAM.

The flow velocity of liquid in a stirred vessel was measured by using this proposed method, as a demonstration. The power spectra of turbulence in two flow directions are shown in this paper.

It may be possible to measure not only mean flow velocity but also liquid turbulence in any unit by applying this method.

* SONY Corporation