

## 微小空間の超スローモーション立体観察カメラの開発

報告者 機械工学科 教授 青山 邑里  
 共同研究者 社会環境工学科 教授 江藤剛治  
 電気電子工学科 教授 神戸尚志  
 社会環境工学科 助教授 竹原幸生  
 社会環境工学科 講師 沖中知雄  
 シニアサイエンティスト 西藤昭夫  
 村田機械株式会社 竹内秀年

### 1. 背景

本研究では、紡績機械のような微小領域内で高速運動もしくは高速流が生じているような状況を近畿大学で開発された 100 万枚/秒の高速ビデオカメラにより撮影、計測する技術の開発を行っている。特に、実機を対象にする場合は複雑な形状をしている場合が多く、3 次元的な計測が必要となる。

PIV などの画像計測技術は、近年幅広く計測に使われるようになり、様々な分野の様々な流れ場の計測に適用され始めてきた。表-1 に画像計測スケールの分類表を示す。実験室スケール（ヒューマンスケール）の計測から始められた画像計測技術も、最近では衛星データを用いた地球・宇宙スケールから、顕微鏡下のマイクロスケール（光学顕微鏡、電子顕微鏡スケール）の流れ場計測までのダイナミックレンジの広い計測装置として用いられ始め、精力的に計測手法の開発が進められている。しかし、機械加工や界面現象といった工学分野に密接に関連する

mm オーダーの画像計測技術が現状として遅れている点是否めない。

撮影装置であるビデオカメラも通常の 1 秒間 30 コマのビデオレートでは流れ場の解析には不十分である場合が多く、より高速なビデオカメ

表-1 画像計測の空間スケールに関する分類

スケール	空間	例
地球・宇宙スケール	大スケール	雷、台風、太陽フレア
ヒューマンスケール	m オーダー	水、空気、コンクリート
	mm オーダー	機械加工、界面現象
光学顕微鏡スケール	・m オーダー	細胞、細菌
電子顕微鏡スケール	nm オーダー	原子、分子

ラが PIV 計測等にも用いられるようになってきた。著者らは、2001 年に世界最高速の 1 秒間に 100 万コマのビデオカメラ開発し、種々の流れ場の計測に適用し、新たな知見を得てきた。

本研究では、紡績機械内の亜音速領域の流れ場計測を目的として、双頭ファイバースコープと 100 コマ/秒の高速ビデオカメラを組み合わせ、mm オーダーの流れ場を 3 次元に計測できるような画像計測装置の基礎技術の開発を行っている。

## 2. 目的

本研究の最終的な目標は、数センチから数ミリの領域を 3 次元的に高速撮影する技術を開発することである。

まず、近畿大学では 1 秒間に 100 枚/秒の撮影速度で撮影が可能な世界最高速のビデオカメラを 2001 年に開発した。この超超高速ビデオカメラを用いて、実際の紡績機械内部の微小領域を高速撮影するための光学系を開発した。超高速ビデオカメラの解像度に対応した極細のファイバースコープを試作し、紡績機械の撚糸加工部極近傍までファイバーを導入できるように紡績機械を改良した。さらに、3 次元可視化のためにステレオ画像法のための双頭ファイバースコープを開発した。超高速ビデオカメラ用撮像素子 ISIS (*In-situ Storage Image Sensor*) に、2 本のファイバークラスの一端を機械的、もしくは光学的に拡大したものを直接接合する。他端を機械系の内部の微細な観察領域に挿入する。したがって各 1 枚の画面中に、同期が完全に取れた 2 つの画像が記録される。

2 つの光学系の光軸を、ポストデジタル処理により再生画面上で擬似的に一致させる技術を開発し、撮影後、直ちに立体動画観察できるシステムを開発する。

## 3. 研究組織

### [近畿大学]

研究代表者	機 械 工 学 科・教 授・青山 邑里	研究総括
共同研究者	社会環境工学科・教 授・江藤 剛治	高速ビデオカメラの開発
共同研究者	電気電子工学科・教 授・神戸 尚志	画像処理ソフトのハード化
共同研究者	社会環境工学科・助 教授・竹原 幸生	ファイバースコープの開発
共同研究者	社会環境工学科・講 師・沖中 知雄	画像処理アルゴリズムの開発
共同研究者	シニアサイエンティスト・西藤 昭夫	双頭ファイバースコープによる立体 視技術の開発

### [学外]

共同研究者	村田機械株式会社 竹内 秀年	可視化実験, 数値シミュレーション
-------	----------------	-------------------

#### 4. 研究方法

##### (a) 試作したファイバースコープの特性

双頭ファイバースコープは、クロダ・オプトニクス株式会社（神戸市中央区海岸通 4-1-7）に依頼して試作した。双頭ファイバースコープとして使用する 2 本のファイバースコープは、同じものを使用している。その特性は直径  $\phi = 1.2 \text{ mm}$ 、長さ  $l = 1.0 \text{ m}$ 、視野角  $= 50^\circ$ 、観察深度  $= 3.0 \sim 10 \text{ mm}$ 、画素数  $= 3 \text{ 万}$  である。観察深度とは、示された距離内にある被写体は、ファイバースコープのレンズの位置を調節することでピントが合う範囲をいう。双頭ファイバースコープの全体は図-1 のようになっており、接眼レンズを覗くと左右の映像が左右に並んだ 2 つの円形の中に見える。

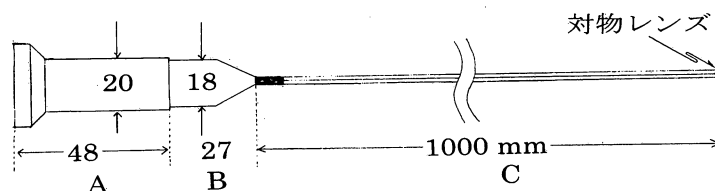


図-1 ファイバースコープの概略図

##### (b) ファイバースコープのレンズのあおり

ファイバースコープの先端に取り付けられているレンズをルーペで拡大すると、通常のレンズのように正常な形に見える。しかしレンズの直径が  $1.2 \text{ mm}$  と極めて小さいために、正確に取り付けられているかを検証する必要がある。この検証方法を①～⑨で順を追って説明する。

- ① 被写体として、基準点となる格子点を一枚の紙面にパソコンで描いたものを使用する。パソコンはアップル社（Power Mac G5）を、プリンターは HP 社（HP Photosmart 2610）のものを用い、用紙は湿度による伸び縮みの少ない Canon 社（SP-101A4）のものを用いた。用紙の湿度

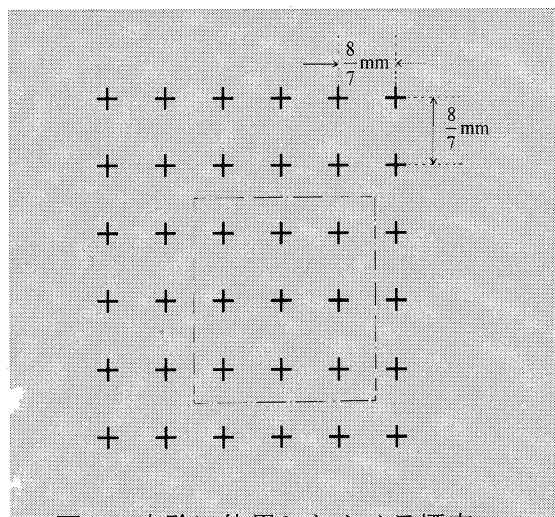


図-2 実験に使用したカメラ標定

による伸び縮みを極力避けるために、使用する直前に格子点を印刷する。格子点はその場所を正確に計測できるようにプラス（+）記号とした。格子点の間隔は、光学顕微鏡を用いて測定し、有効数字 3 桁で  $8/7 \text{ mm}$  である。図-2 のように、格子点はたくさん描いておくが、実際に使用するのは中央の 1 点と、その周りを取り囲む 8 点の、合計 9 点のみである。

- ② 図-3 のように、レンズから格子点の紙面（格子面）までの距離を  $d$  とする。

格子面の後方にモデル座標の原点をとる。モデル座標の X 軸、Y 軸は格子の並んでいる向きにとり、Z 軸は格子面に垂直にとる。次に、ファイバースコープのレンズ中心は、モデル座標の Z 軸上に置き、レンズ中心を原点とする写真座標の x 軸と y 軸を、モデル座標の X 軸と Y 軸にそれぞれ平行とする。レンズ中心をモデル座標で表すと  $(X_0, Y_0, Z_0)$  で、 $X_0$  と  $Y_0$  も僅かではあるが有限の値を持つ。また、x 軸と y 軸と z 軸の周りで“左ネジの法則”で定められた向きに、それぞれ  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  だけ回転しているとする。

- ③ レンズの後方、距離  $c$  の所にネガフィルムがあるが、写真計測ではレンズの前方  $-c$  の所にポジフィルムがあると考える (図-3 参照)。  $c$  はレンズとフィルム間の距離で、カメラを購入したときに内部標定要素として使用説明書に記載されているが、ファイバースコープでは決め方が困難なので未知数とする。いま図-3 のように、格子面上の任意の格子点 P のモデル座標を  $(X, Y, Z)$  とし、この P 点がポジフィルムに p 点として写ったとする。この p 点は写真座標で  $(x, y, -c)$  となる。

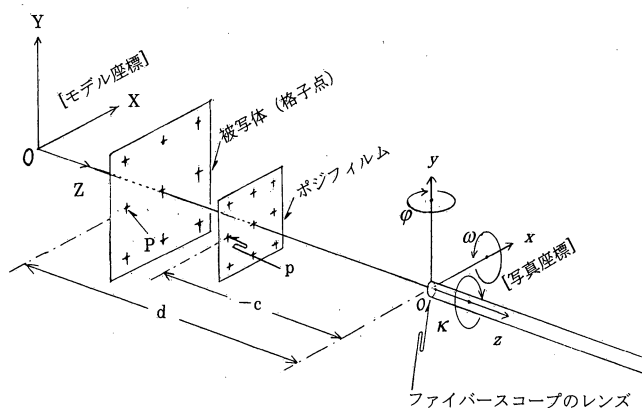


図-3 計測に用いる座標系

- ④ 被写体の任意のある格子点 P を写真に撮ったとき、その格子点のモデル座標  $(X, Y, Z)$  の X と Y と Z は既知数である。これら 5 つの既知数と 7 つの未知数の関係は、次の式によって表される (「解析写真測量」日本写真測量学会編の p. 48 の 4.2 式)。

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \dots \dots \dots (1)$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

ここで、

$$a_{11} = \cos \varphi \cos \kappa, \quad a_{12} = -\cos \varphi \sin \kappa, \quad a_{13} = \sin \varphi$$

$$a_{21} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa, \quad a_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa, \quad a_{23} = -\sin \omega \cos \varphi$$

$$a_{31} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa, \quad a_{32} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa, \quad a_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

である。

- ⑤ レンズから格子面までの距離  $d$  を 7.00 mm にし、カメラで撮影する。カメラは Kodak Professional DCS 760 のデジタルカメラを使用した。このときピントを正確に合わせて撮影する。撮影された画像は円形の中に入っているが、各格子点の位置を読みとる際に、

- この円形の中心の座標が必要なので、格子面を白紙に替え、白い円形も撮影しておく。
- ⑥ できるだけ多くの測量結果を得るために  $d = 3.00, 5.00, 9.00, 11.00$  mm と変化させ、これらの写真も撮影する。ピントはやや甘くなるが、そのつどピントを合わせると  $c$  の値が変わるので、そのままの状態でも撮影する。
- ⑦ 1 枚の画像から 9 つの格子点の写真座標  $x, y$  を pixel 単位で読みとる。レンズから格子面までの距離  $d$  を変化させた 5 枚の画像があるから、全部で  $9 \times 5 = 45$  個の格子点の写真座標を読みとる。
- ⑧ 予め撮影していた白い円形の中心の座標を、使い最小二乗法で求める。円形に見えるが必ずしも円形とは限らないので楕円形として扱った。求めた楕円形の中心の座標を原点  $(0, 0)$  とし、⑦で求めた 45 個の格子点の座標を変換する。パソコンソフト Photoshop では、最初 45 個の格子点の座標は、左の最上部が原点でそこから右向き水平に  $x$  軸、下向き垂直に  $y$  軸が取られている。
- ⑨ 45 個の各格子点のモデル座標  $(X, Y, Z)$  と、これらの写真座標  $(x, y)$  を既知数として (1) 式に代入する。  $45 \times 2 = 90$  個の方程式が成立するが、最小二乗法で 7 つの未知数  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, c$  の最適値を求める。最小二乗法では未知数の初期値が必要なので、予め予想できる値を左右 2 本のファイバースコープ共、次のように設定した。  
 $X_0 = Y_0 = 0, Z_0 = 11$  mm、 $\omega = \varphi = \kappa = 0, c = 858$  pixel。

表-1 標定結果

	左	右
$X_0$ (mm)	-0.124	0.115
$Y_0$ (mm)	-0.00900	0.112
$Z_0$ (mm)	11.5	10.9
$\omega$	$-0.0180$ (rad) = $-1.03^\circ$	$0.0155$ (rad) = $0.889^\circ$
$\varphi$	$-0.0380$ (rad) = $-2.18^\circ$	$0.00360$ (rad) = $0.206^\circ$
$\kappa$	$0.0120$ (rad) = $0.688^\circ$	$0.0100$ (rad) = $0.573^\circ$
$c$ (pixel)	888	876

## 5. 研究成果

### (a) 双頭ファイバースコープの組立

左右 2 本のファイバースコープの最小二乗法による計算結果は、次の表-1 のようになった。表-1 で、左右について  $X_0, Y_0$  が僅かな値であるが有限の値を持つのは、ファイバースコープを設置した際にレンズ中心がモデル座標の  $Z$  軸上になく、 $X$  軸と  $Y$  軸方向にそれぞれこれらの値だけずれていたことを示している。またモデル座標の原点からレンズ中心までの距離は  $Z_0 = 11$  mm ではなく、左右について表-1 の値 11.540 と 10.882 mm であることを示している。また、 $x$  軸と  $y$  軸と  $z$  軸の周りの回転はそれぞれ僅かであり、この値はファイバ

ースコープを設置するときに生じたのか、または最初から回転していたのかは定かでない。しかし、いずれにせよクモの糸が吐きだされる状況を観察するには、支障がない大きさと判断できる。

次に、最小二乗法によって得られた 9 個の格子点の位置を、 $d = 3.00 \text{ mm}$  ~  $11.00 \text{ mm}$  の場合の、それぞれの左右について求める。これらの格子点の位置は、実際にデジタルカメラで撮影された画像の位置と多少のずれが見られる。これはデジタルカメラで撮影された格子点の位置を読み取る際に、読み取り誤差が生じているため最大約 2.2% の誤差があった。

人の両眼の視差はおよそ 7cm で、近くの被写体を長時間見つめる場合、目が疲れないために 30 cm 程度離して見るのが良いとされている。このときの輻輳角は  $13^\circ 19'$  になる。2 本のファイバースコープのレンズを接触させているのでファイバースコープの視差はレンズの直径と同じ  $1.2 \text{ mm}$  になり、輻輳角を  $13^\circ 19'$  に設定すれば 2 枚のレンズの中央から  $5.1 \text{ mm}$  前方の被写体を長時間見つめていても、目が疲れないことになる。 $5.1 \text{ mm}$  はこのファイバースコープの観察深度の範囲内である。

図-5 のように、2 本のファイバースコープの輻輳角を  $13^\circ 19'$  にするため、2 枚のアルミ板 ( $20.5 \times 8.3 \times 2.5 \text{ mm}$ ) の間に挟み、ビスとナットで固定する。

2 枚のアルミ板にはそれぞれハーフパイプの溝が掘られていて、その中にファイバースコープを入れると所定の輻輳角になるよう溝の位置が決められている。観察時に、ファイバースコープの先端を適切な位置に取り付けできるように、アルミ板に 1 つの穴が開けられている。

人の眼は非常に都合よく出来ている。かなり近くの物体を見るときは、両眼の距離（視差）を短くし、すなわち両眼を寄せて輻輳角が大きくなるのを防いでいる。このようなことを双頭ファイバースコープで実現できれば、かなり違和感なく近距離の被写体を観察できると思われる。

#### (d) 固定式双頭ファイバースコープで蜘蛛の観察

7mm 四方の小さな部屋に、体長 5 mm の蜘蛛を閉じこめ、1 秒間に 50 画像をビデオカメラ

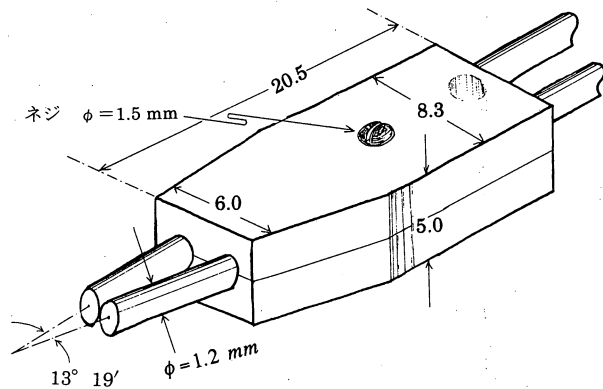


図-5 試作したファイバー

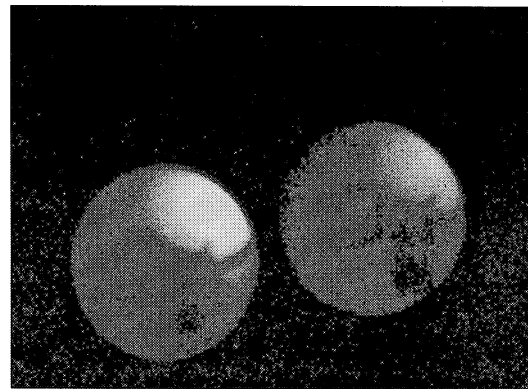


図-6 蜘蛛（約 2mm）の双頭ファ

で撮影した。1 秒間あたりの画像数が少ないので、照明は 3.0 V の懐中電灯で十分である。その中の 1 画像を図-6 に示す。右側の画像を赤に、左側の画像を青に色づけした。この画像を右側が青いセロハン、左側が赤いセロハンの立体めがねで見ると、蜘蛛の動きが立体的に観察できる。このとき左右の画像を、接近させておくと見やすい。この立体視の方法はアナグリフ方式 (Anaglyphs) と呼ばれ、古典的な方式であるが立体めがねを安価に作成できる利点がある。その一方で、色の情報が失われるという欠点がある。

## 6. 今後の展開

紡績機械内部の流れ場計測技術の開発として、双頭ファイバースコープと高速ビデオカメラを用いた mm オーダースケール 3 次元画像計測技術の開発を行った。紡績機械等でもちいられるの流れは亜音速になっており、騒音などに関連する流れ場は数センチから数ミリのオーダーの空間スケールとなる。今回は直径 1.2mm, 3 万本のファイバースコープを 2 本束ねて、1 つの画面上に移し込むことのできる送とファイバースコープと高速ビデオを組み合わせることにより、実機等の微小な領域にファイバーを挿入し、撮影後立体視できるような計測技術を開発した。双頭ファイバースコープの先端は、人間が立体視しやすいように輻輳角が  $13^{\circ} 19'$  に近くなるようにセットした。

今後、約 30 万画素、100 万コマ/秒のカラー高速ビデオカメラを使用する予定としている。この場合、以下のような点の改良が必要である。

### 1. 輻輳角可変型の双頭ファイバースコープ

輻輳角可変型の双頭ファイバースコープとして、将来図-7 のようなものを作る予定である。輻輳角を変化させるのに回転モーターは使用せず、伸縮アクチュエーターを使用する。ここで使用可能な伸縮アクチュエーターが市販されているかを現在調査中である。場合によっては、独自に製品を開発する必要性もでてくる。2 本のファイバースコープの先端にあるレンズから他端に向かって 2 cm 離れた所に、この伸縮アクチュエーターの両端を取り付ける。被写体までの距離を超音波または赤外線で測定し、それに見合う輻輳角になるようマイコンで伸縮アームの長さを制御する。また今後はかなり遠くまで観察できるよう、観察深度が 3.0mm から無限大までのファイバースコープに取りかえる必要がある。オリンパスが市販している工業用ビデオスコープ (1PLX II) は立体視が可能で、観察深度は 5.0 mm ~ $\infty$  である。

### 2. ファイバースコープの解像度を上げる。

現在使用しているファイバースコー

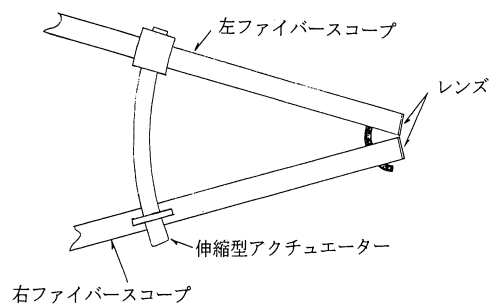


図-7 輻輳角可変型ファイバー固定装置

は 1 本あたり 3 万本のファイバーから成っており、2 本の合計の解像度は 6 万本になる。現在使用している高速カメラの画素数 81, 120 (312×260) 画素であり、ほぼ同等の解像度となっている。

しかし、30 万画素のカラー高速ビデオカメラを使用する場合、1 本あたり約 10 万本程度の解像力を持つファイバースコープを使用することが望ましい。

### 3. 偏光フィルターメガネを用いた立体視

現在、撮影した動画を立体視する場合、アナグリフ方式 (Anaglyphs) と呼ばれる、赤と青のフィルターを左右の別々に貼り付けたメガネを使用する。この場合、原理的に白黒になってしまう。カラー高速ビデオカメラにより撮影された左右のカラー動画を偏光をかけ、偏光フィルターメガネを用いて立体視する技術が必要である。