

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	准教授	竹原 幸生
	社会環境工学	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

亜音速の気流によって糸を紡ぐ方法が考案されている。内径が 5 mm のノズルの中で、渦を巻きながら一方向に進む亜音速の気流を発生させる。この中に綿花の繊維を適量ずつ供給すると、互いに繊維が絡まって糸になる。この方法だと、通常の機械による速さの 10 倍で紡ぐことができるが、製品としての糸は、一様な太さではなく所々に太くなったコブができる場合がある。これらの原因を探るため、高速度ビデオカメラによる観察は非常に強力なツールである。しかし、実機の内部を計測するにはノズルの周辺に他の装置が複雑に入り組んでおり、通常の光学系で高速撮影するのは困難である。そのために、ファイバースコープを使用して観察することを計画している。

また、昆虫等の微小な生物の運動を 3 次的に観察する要望もある。例えば、蜘蛛が糸を吐きだす様子の観察がある。蜘蛛の糸は天然、人工にかかわらず全ての糸のうち、単位断面積当りの強度が最大で、防弾チョッキの素材にしようとして検討されている。蜘蛛の糸は吐きだされる瞬間に固まっているが、空気に触れるとそうなるのか、または糸の出口当りで凝固剤が添加されているのかも観察できそうである。蜘蛛が糸を吐きだす瞬間を撮影する際、蜘蛛に気付かれないために、ファイバースコープを使用するのが賢明である。

本研究では、微小領域内の 3 次元計測を目的として、双頭ファイバースコープと 100 コマ/秒の高速度ビデオカメラを組み合わせて、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

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、紡績機械の燃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。

本年度は、2つの光学系の光軸を再生画面上で擬似的に一致させる技術を開発し、撮影後に立体動画観察できるシステムを開発する。さらに、カラー超高速ビデオカメラ用のファイバースコープを試作する。また、運動解析用の自動粒子追跡ソフトのハード化のための設計を行う。

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・准教授・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

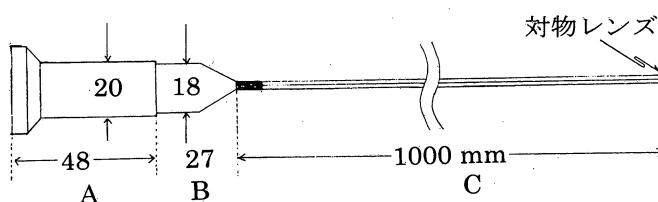
4. 研究方法

(a) 試作した双頭ファイバースコープにより撮影した動画の立体視法の開発

双頭ファイバースコープ (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)) を昨年度試作した。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 $\phi=1.2$ mm, 長さ $l=1.0$ m, 視野角 $=50^\circ$, 観察深度 $=3.0\sim 10$ mm, 画素数 $=3$ 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。

試作した双頭ファイバーにより微小空間内のステレオ画像を1枚の画像中に撮影することができるようになった。昨年度までの研究成果により、それぞれのファイバースコープの

姿勢や光学中心位置等のパラメータを求める手法の開発を行ってきた。これらの情報をもとに撮影した動画を立体視するための装置を試作する。



(b) カラー超高速ビデオカメラ用 4 頭ファイバースコープの試作

カラー超高速ビデオカメラに対応した微小空間 3 次元計測用のファイバースコープを試作する。カラー超高速ビデオカメラは撮像素子として 720×413 画素の CCD を使用している。この撮像素子に対応したファイバースコープの試作を行う。

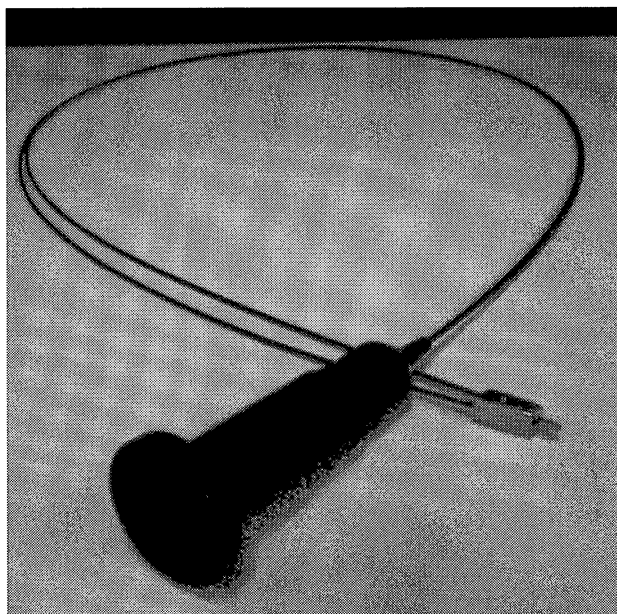


図-1 開発した双頭ファイバースコープ

(c) 粒子追跡ソフトウェアのハード化による高速化

撮影された画像から物体の運動を解析する手法として物体にマーキングした点を追跡する方法がある。3 次元的な速度，加速度を求めることもできる。本研究グループのメンバーが開発した流体運動計測用の自動粒子追跡ソフトを計測に適用できる。このソフトウェアはカルマンフィルター理論と χ^2 検定により画像中の多数の粒子を自動追跡する方法である。そのため、処理に時間がかかるという欠点を有している。本プロジェクトでは自動粒子追跡ソフトウェアのハード化を目指して VHDL による FPGA による高速化を試みた。

5. 研究成果

(a) 3 次元表示法

撮影したステレオ画像を立体視するにはいくつかの方法がある。一般的な方法として、①赤青セロハンを使用した方法(アナグリフ方式)、②偏光フィルタを使用した方法)がある。

①は、左右別々の画像を赤画像と青画像として重ねて表示し、観察者は対応した赤青フィルターの付いためがねを掛けて見る方式である。この方式では基本的に色情報がなくな

る。

②は、スクリーンに左右のファイバースコープで撮影した 2 枚の画像を、それぞれ互いに直交する偏光面を持つ偏光フィルタを通過させた後、スクリーン上に、少しずつらした状態で重ねて投影する。これを偏光めがねで見る。偏光めがねの右側には右の画像と同じ向きの偏光フィルタを、左側には左の画像と同じ向きの偏光フィルタを貼り付ける。よって、偏光の性質から、右の画像は右目でしか、左の画像は左目でしか見ることができず、立体視することができる。また、色彩情報を失うことはない。

本研究では、プロジェクターのレンズの前方に鏡の反射を利用して二つの画像を重ね合わせる装置を製作する。鏡の反射の仕方を図-2 に示す。中心部に 2 つの鏡面が直交するように設置する。したがって、レンズから出た画像を左右に分割することができる。その中心部から対称的な位置に回転する鏡を取り付ける。その鏡は内側の端をヒンジとし、鏡の角度を変更できるようにした。その鏡は左右を連動させ角度を変化させるのが理想的である。しかし、左右の鏡の角度の違いから誤差が生じて左右が対称的に動かない場合に、調整することができない。そこで、ネジを取り付けることによって、左右の鏡の角度を別々に調整できるようにした。試作した立体投影アダプターの全体図を図-3 に示す。

立体投影アダプター内を通り、左右に分けたファイバースコープの映像を偏光フィルタを通過させ、スクリーンに投影する。左右の映像は、プロジェクターのレンズの中心線の左右を通過するのみならず、左側の中に右側の映像の一部が、また右側の中に、左側の映像の一部が入っている。よって図-4 に示すように、余分な映像が映し出されてしまう。立

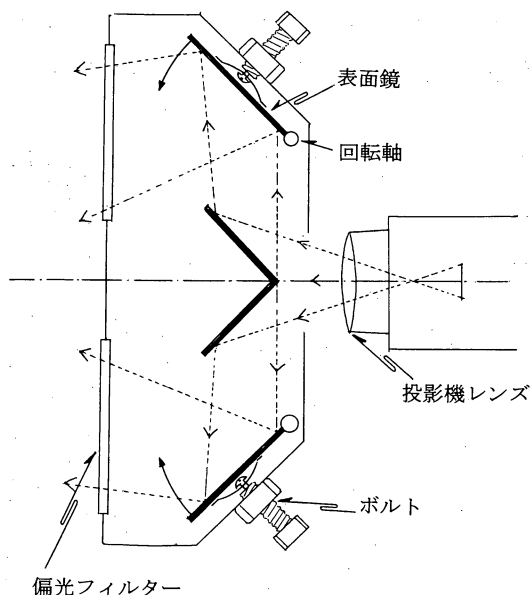


図-2 立体アダプター内部構造

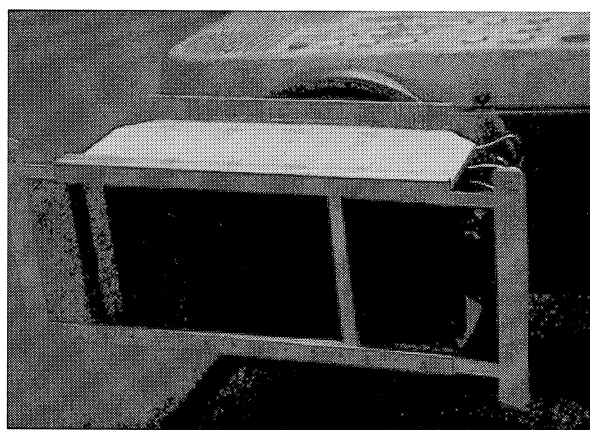


図-3 立体投影アダプターの全体図

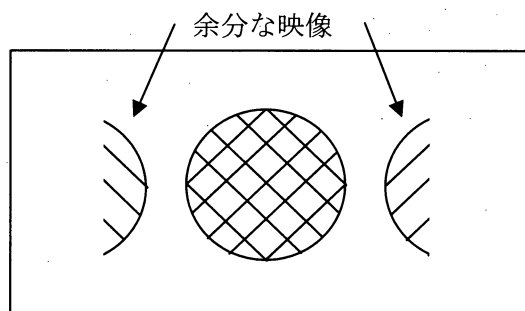


図-4 スクリーン上の映像

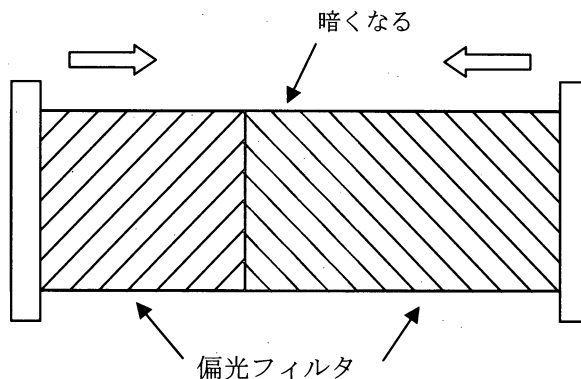


図-5 偏光フィルタ位置

立体投影アダプター内の鏡の反射において、余分な映像を取り除くことは困難である。そこで偏光フィルタに光が通過する際に、映像を取り除くことのできる構造を考えた。

立体投影アダプターに取り付ける偏光フィルタは、図-5 に示すように左右の偏光フィルタを襖のように左右にスライドが可能な構造にした。左側の偏光フィルタの偏光軸方向は 45° 、右側の偏光軸方向は 135° と設置し互いに重なると直交する。よって、左右の偏光フィルタが重なり合う部分は、光を全く通さないため、暗くなる。このように暗くなる部分を調節することにより、余分な映像を除去できるようにする。

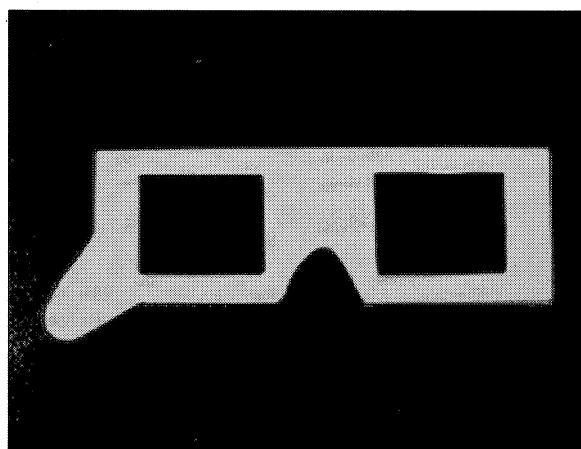


図-6 試作した偏光めがね

プロジェクターから出た映像が、立体投影アダプターを通過しスクリーンに映し出された際に、立体視を行うために偏光めがねを着ける。偏光めがねは立体投影アダプターと同様に、左側の偏光フィルタの偏光軸方向は 45° 、右側の偏光軸方向は 135° となっている。よって、双頭ファイバースコープで撮影された映像は、偏光めがねを着けることにより右目では右の画像、左目では左の画像しか見えないので、立体視することができる。試作した偏光めがねを図-6 に示す。

(b) 4頭ファイバースコープの試作

カラー超高速ビデオカメラの撮像素子は 720×413 画素の解像度をもち、その撮像素子に対応した微小空間 3次元計測用のファイバースコープを開発した。

表-1 カラー超高速ビデオカメラ用の 4頭ファイバースコープの素線の特性

画素数	有効部外径	有効長	最小曲げ半径	対物レンズ	観察深度	接眼レンズ
5 万画素	1.7mm	1m	110mm	SFL・・・ILW	2~25mm	f=15mm

まず、用いるスコープ用のファイバーについては、様々な観察場所へ挿入できるようにできる限り細く、フレキシブルがあり、かつカメラの解像度と同等なもの、という条件で検討した。その結果、表-1 に示すような 5 万画素のファイバースコープを用いることに決定した。

高速ビデオカメラの解像度が $720 \times 413 = 297,360$ 画素となり、約 30 万画素である。ファイバー 1 本当たりの解像度が 5 万画素となり、撮像素子の解像度が約 6 倍高い。3 次元計測ではより多くの画像を用いれば、より多くの情報を得ることができ、解像度や精度などを上げることができる。今回は 4 本のファイバースコープを用いることとする。ファイバー 1 本当たりの直径 (D) の画素数は約 250 画素となり、撮像素子とほぼ等価の画素数となるような配置にする必要がある。図-7 に示すような配置にした場合の x

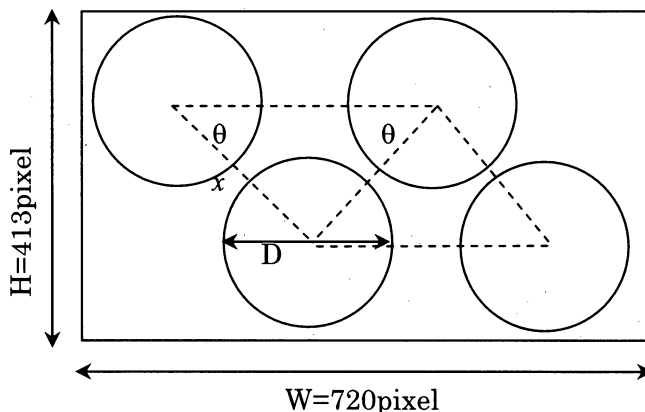


図-7 4 頭ファイバーの配置

と θ を決める必要がある。

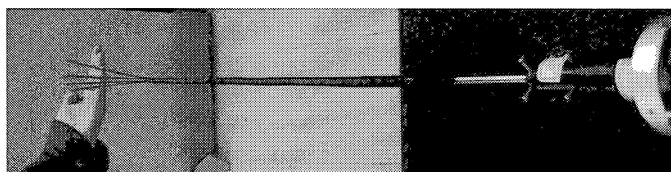
$$\begin{aligned} 3 \times x \cos \theta + D < L \\ x \sin \theta + D < H \end{aligned} \quad \textcircled{1}$$

の条件を満たすようにセットする。ファイバーの周囲には直径の約 1 割程度の石英ガラスのジャケットが付いており、画像が表示される領域を接するように配置することはできない。よって、 $x = 1.1D$ 程度となる。①式より

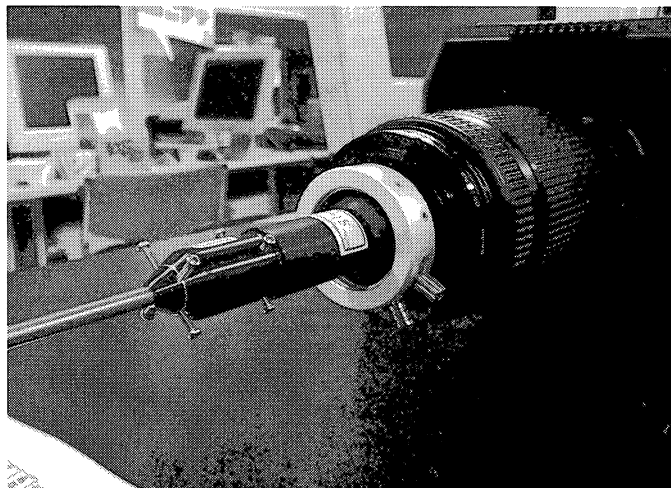
$$\begin{aligned} (3.3 \cos \theta + 1)D &= L \\ (1.1 \sin \theta + 1)D &= \frac{H}{L}L = 0.57L \end{aligned} \quad \text{と}$$

なるような場合を考える。また、 $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$ の条件より、 θ は約 48 度となる。

試作した 4 頭ファイバースコープの写真を図-8 に示す。長さは 1 m であり、



(a) ファイバー先端部



(b) カメラ装着部

図-8 試作した 4 頭ファイバースコープ

先端部で 4 本に分かれている。3 本のファイバーの観察深度は定格どおり 2~25mm とし、残りの 1 本を 10~200mm とした。これにより、観察深度の大きなファイバーにより、全体的

な運動を観察し、残りの 3 本で各方向から撮影することが可能となる。

図-9 にカラー超高速ビデオカメラにより撮影された画像の 1 例を示す。左右の単部でボケが生じている。図-8(b) の写真からもわかるようにファイバースコープの結像面の設定を調整ネジで行う必要があり、この部分の調整により単部のボケは解消できると思われる。

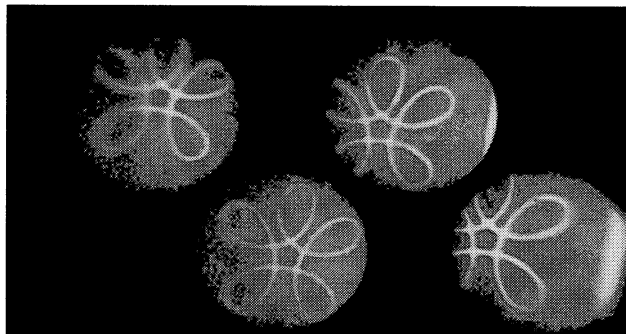


図-9 4 頭ファイバースコープとカラー超高速ビデオカメラで撮影した画像

(b) 粒子追跡ソフトウェアのハード化による高速化

高速撮影における運動解析では、画像中の特徴点を追跡して速度、加速度、モーメント等を求めることが多い。例えば、人物の運動解析では、主要な部位に点をつけてそれを追跡することでどのような力がどの部位に作用しているかなどが求められる。追跡する点が数点であれば人間の手で追跡しても問題ないが、数十点以上を追跡するには相当の労力を費やすことになる。

本研究プロジェクトのメンバーに流体計測を目的とした自動粒子追跡ソフトの開発者がいる。開発した自動粒子追跡プログラムは、大別して①粒子流出部（粒子マスク法）と②自動粒子追跡部からなる。①は画像中に多数映っている粒子を粒子マスクと呼ばれる代表的な輝度分布パターンを設定し、画像全体に粒子マスクをスキャンさせ、関連の高い部分を粒子として抽出する方法である。②は抽出された粒子を各時刻間で同一粒子を自動的に追跡する方法である。主要な部分はカルマンフィルター理論と χ^2 検定からなる。

本自動粒子追跡ソフトで 100 万画素のビデオカメラを用いて計測した場合、1 組の画像から 10,000 個の流速ベクトルを計測することができる。しかし、処理に時間がかかるという欠点がある。本研究では開発された自動粒子追跡ソフトのハード化を目指して、まず、C 言語から VHDL 言語への変換を行い、さらにアルゴリズムの改良を加えることにより高速化を試みた。

表-2 および表-3 にハード化による高速化の結果を示す。入力画像は 1008×1018 画素を使用した。表-2 より、粒子マスク法に関してはハード化により約 460 倍の高速化が達成されている。処理時間は 34msec であり通常のビデオレート 1/30 秒程度であり、一般的に言われるリアルタイムを満足している。表-3 の粒子追跡部では約 46 倍であり、実時間で約 100msec 要している。更なるアルゴリズム改良により高速化が期待できる。

表-2 粒子マスク法のハード化

処理の内容	処理時間 (ms)	回路規模 (ゲート)	速度比 (倍)
相関値計算部ソフトウェア	21,780	-	-
(ア) 相関値計算部逐次処理	39,913	59,097	0.5
(イ) 相関式変形+データ再利用による メモリアクセス数の削減	820	93,456	26.6
(ウ) (イ)+相関値判別式の演算回路化	450	109,667	48.4
(エ) (ウ)+レジスタ追加によるメモリアクセスの削減	228	106,277	95.5
(オ) (エ)+画像分割による並列化 (2 並列)	114	228,528	191.1
(カ) (エ)+画像分割による並列化 (4 並列)	57	461,702	382.1
(キ) (ウ)+画像 4 倍化処理の相関値演算回路への 内装による高速化 +相関値演算回路の複数同時処理化	34	176,226	460.1

表-3 粒子追跡部のハード化

処理の内容	処理時間 (ms)	回路規模 (ゲート)	速度比 (倍)
ソフトウェア	5,000	-	-
(ア) 逐次処理回路	39,913	570,208	0.1
(イ) 処理範囲限定処理	172	596,248	29.1
(ウ) (イ) +カルマンフィルタの 4 並列	159	1,632,455	31.4
(エ) (ウ) +カルマンフィルタと χ^2 二乗検定のパイプライン	107	1,657,515	46.7

6. 今後の展開

微小空間の高速現象を近畿大学で開発された超高速ビデオカメラを用いて超スローモーションで立体観察できるシステムの開発を行った。今年度は、(1)立体観察用の表示システムの開発、(2)カラー超高速ビデオカメラ用の 4 頭ファイバースコープの開発、および(3)r 自動粒子追跡ソフトのハード化による高速化、を行った。これにより基本的に必要な要素の開発は完了している。今後、これらの基礎技術を統合し、現場に供用できるようなシステムに構築する必要がある。