

# 実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化

— 微細なものを思いのままに —

大場 光太郎

本論文では、マイクロ環境下での光学的なスケール効果の問題を“実時間”で解決する実時間全焦点顕微鏡の構成にあたり、システムを必要となる構成要素に分解し、その構成要素を製品として構築するためのいくつかの試みを紹介しながら、実時間全焦点顕微鏡のシステム構成方法について論じる。実時間全焦点顕微鏡の構成に際しては、マイクロ環境下での作業を前提とし、理論だけにとどまらず、製品化を見据えた実現を視野に入れながら構成した。

キーワード: 実時間、全焦点、顕微鏡、開発

## Development of real-time all-in-focus microscopes

– WYSIWYG in the micro-world –

Kohtaro Ohba

In this paper, our struggle to realize a high-speed digital processed microscopic observational system for tele-micro-operation with a dynamic focusing system and a high-speed digital-processing system using the “depth from focus” criteria is reported. To realize the system, each functional element and its system configuration had been deeply discussed not only in the academic society but also with several companies, and the final product system had been developed after several trials.

Keywords: Real-time, Microscope, all-in-focus

### 1 実現しようとする技術的課題

近年、マイクロおよびナノテクノロジーへの産業的な興味が高まり、微細な環境を観測する装置や、微細な環境を観測しながら作業をするシステムの需要が高まっている。観測装置として代表的なものは、光学顕微鏡、電子顕微鏡などが挙げられる。中でも、光学的な限界を超えないマイクロサイズの対象物を簡便に観測するためには、光学顕微鏡が広く使われている。マイクロサイズで大きな市場を持つと期待されるものとして、生体用途としては、光学顕微鏡画像を覗きながらの細胞やDNA操作等の需要がある。また、工業用途としては、LSI製品検査における、ワイヤーボンディングされたチップ表面とボンディング面を同時に観測・検査したいという需要等がある。

このような微細作業においては、実際に微細な物体の三次元位置をセンシングしながら作業することが求められる。通常環境と微細環境で大きく異なるのは、後者において(1)物理的なスケール効果により、物体の自重よりもファンデルワールス力などによる粘性が無視できなくなる、と同時に、(2)光学的なスケール効果により、光学顕微鏡で

見える光学的な限界に近づけば近づくほど、対象物の見える奥行き方向の範囲(被写界深度)が非常に浅くなる、という現象が特徴的である。本研究では(2)の光学的なスケール効果の問題を主に取り上げた。

光学的なスケール効果の結果、顕微鏡画像の様に被写体深度が浅い光学系では、図1にみられるように、ある奥行きに物体に焦点を合わせると、異なる奥行きにある物体に焦点が合わない。そのため、焦点距離を動かしながら

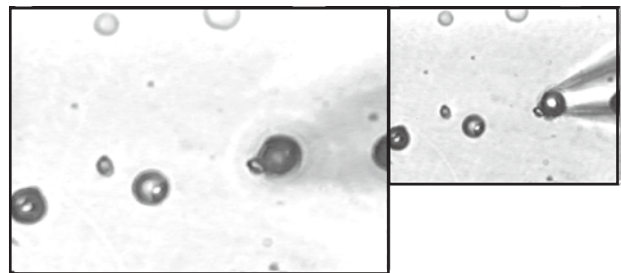


図1 微細作業下での顕微鏡画像(4 μmのガラス玉を操作している画像)

(a) ガラス玉とピンセットが別の高さ、(b) ピンセットとガラス玉が同じ高さ

産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2  
Intelligent System Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: k.ohba@aist.go.jp

Original manuscript received December 5, 2008, Revisions received August 20, 2009, Accepted August 21, 2009

異なる焦点距離で何枚かの画像を取り、画像処理を使って製品検査しているという例が多く見受けられる。そこで我々は、この光学的なスケール効果による問題をバーチャルに軽減することを目的として、光学顕微鏡など倍率の高い光学システムにおける微細作業において、光学的なスケール効果を“実時間”で解決する新しい微細視覚システム「実時間全焦点顕微鏡」の構成を技術的課題とした<sup>[1][4]</sup>。

## 2 紆余曲折の歴史

ここでは、当初科学的な興味からスタートしたアイデアを、幾つかのFS (Feasibility Study) 期を乗り越えて製品化した経緯を、順を追って紹介する。最初の新規性のあるアイデアは通常の論文に、製品となってからは製品紹介記事として幾つか公開してきたが、シンセシオロジーの論文としては、アイデア段階期から幾つかのFS期を乗り越え、製品化に至った過程を紹介したい。このFS期の過程においては、幾つかの構成要素の取捨選択、その構成要素に特化したアルゴリズム開発、さらにはそれを実現するためのパートナーとの出会いなど、構成学として記されている「戦略的深化・選択型構成法」とも言うべき手法に相当するものと、それとは言い難い“幸運な偶然”に大きく左右されてきたことも、敢えて書き加えたい。というのも、暗中模索しながら迷路を彷徨し、ゴールに到達した後で、ここが大きな分岐点であったと後付けで理由はつけられるものの、当の本人は彷徨っている最中は夢中で、恥ずかしなが

ら決して戦略的な決定をしていたとは、当時を回想しても思えないためである。さらには、万が一この紆余曲折を理論づけしたとしても、次の暗中模索の機会では、そのシチュエーションなどが大きく異なり、その経験が生かされたと思うことが少なかったためである。そのため、この紆余曲折の歴史の部分（図2）は、論文の体裁にとらわれない、一つの製品化の過程を記した読み物として紹介させていただき、後述の節では、それぞれの期を技術的に紹介させていただきたい。

### (a) アイデア段階期

人間が目で物を見る時、近い物体も遠い物体もピントが合っているように感じる。これは目の焦点調整によるものである。それに対し、普通、カメラなどにおいてレンズを通して物を見るためには、レンズのピントを合わせる必要がある。オートフォーカス・カメラは自動的にピントを合わせることができるが、あくまで一定の距離だけにピントを合わせることができるのである。

微視的環境下において、倍率が低い場合の一眼レフカメラや実体顕微鏡などでは、絞りを絞ることで被写界深度を深くすることが可能であるが、光学原理から倍率が高くなると、全ての範囲をカバーすることは不可能になる。また、微視的環境の場合、被写界深度の深い画像では、物体の奥行き感は得られないという問題が生じる。そこで我々は被写界深度の浅いことを逆手にとって、微細環境下での作業効率を上げることを考えた。

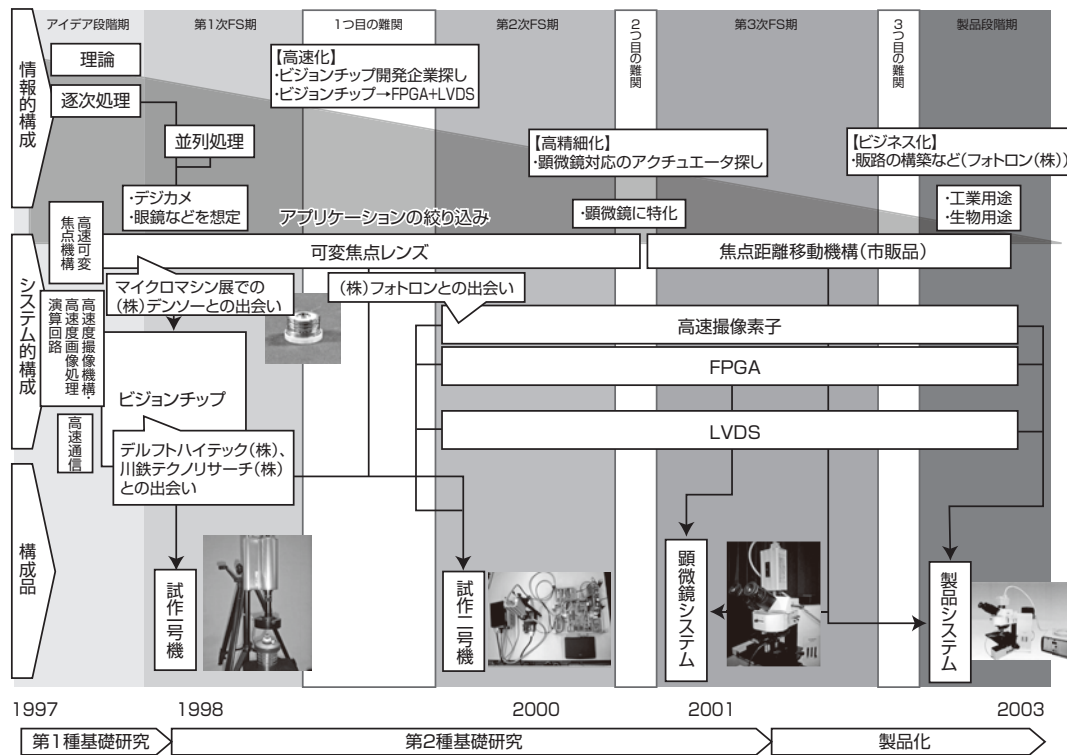


図2 構成の紆余曲折

そこで、ここで求められる仕様としては微細環境下での作業を効率化するために、

1) 被写界深度を理想的には無限大に広げた実体画像の動的観測 (30フレーム毎秒)

2) 対象物の三次元形状の実時間計測 (30フレーム毎秒) の二つの項目を同時に満たすシステムを開発することとし、理論的な検討と処理アルゴリズムなどの検討を行った。この時のアプリケーションとしては、漠然とデジカメや眼鏡に搭載されると面白いのではないかと考えていた程度で、特定の装置のイメージはなかった。

上記の仕様 1) と 2) も最初から仕様として挙がっていたものではなく、後で詳しく述べるが、画像処理技術を用いて 1) の画像を得る方法についての獲得する論文などを調べていくうちに、処理をする過程で物体の三次元位置情報を用いていないことに気付き、この情報を用いないのもったいないという考えに至った。

#### (b) 第1次FS期

アイデアを実際のハードウェアシステムとするためには、システム的な構成として、高速可変焦点機構と、データを取得、通信、処理を実時間で行うための情報処理・通信技術が必要となる。一つ目の高速可変焦点機構については、30 フレーム毎秒での動的観測のためには、30 Hz での応答速度が必要となるが、既製品ではこれを1桁下回ったものしかなかった。しかし、当時株式会社デンソーがマイクロマシプロジェクトで開発していた可変焦点レンズに、マイクロマシ展で出会うことで解決された。情報処理・通信については、1枚の画像構成に必要な画像枚数を  $N$  枚とすると ( $N \times 30$  フレーム毎秒  $\times$  画像デジタルサイズ) が必要とされる。当時、オランダのビジョンチップ MAPP シリーズを輸入していたデルフトハイテック株式会社と、その開発を手掛けていた川鉄テクノロジー株式会社と出会うことで両方の技術課題を解決した試作1号機を開発した。

#### (c) 第2次FS期

しかしながら速度的には 0.5 フレーム毎秒程度にとどまり、当初の目標である 30 フレーム毎秒を満足することができず、さらなる高速化を目指してビジョンチップを開発してくれる企業を探すため、多くの企業への直談判に明け暮れる時期が1年余あった。これが一つ目の難関である。「超高速なビジョンチップを開発し、実装することでこの問題は解決できるはずである」と論文には書き、逃げるのが通常の研究であったのかもしれないが、最後までやり遂げたいという信念から、この一つ目の難関に船出した。しかしながら、実際にはこのような話を多くの企業に持ちかけても、ビジネス的なメリットが見えないこと、開発には数億円を要するなどから、断られ続けた。この難関

を抜けるきっかけとなったのは、フォトロン株式会社を訪ねたことである。同社は高速度カメラメーカーとして、秒速 10,000 枚以上の画像を高速撮像し、メモリ転送する技術を有しており、ビジョンチップで開発しなくても、同社が持つ高速撮像素子と LVDS<sup>用語1</sup> (Low Voltage Differential Signaling) インターフェース、さらには FPGA<sup>用語2</sup> (Field Programmable Gate Array) 処理を使えば実現できるだろう、との心強い助言により試作2号機が1カ月程度で試作された。

#### (d) 第3次FS期

同時に、フォトロン株式会社と、将来のビジネス化を考え始めた時期でもある。多くの展示会などで展示を行うと、全焦点画像が最も求められているのは顕微鏡応用であることが分かったことから、この時期から顕微鏡応用に特化した開発を行い始めた。当初、株式会社デンソーの可変焦点レンズは手作りで作られており、顕微鏡の高精細な位置決めには適していないと同時に量産化が困難であることから、顕微鏡の焦点距離を電動で動かすドイツのPI社のピエゾアクチュエータを探し出し、その制御部分をいじることで希望の精度を得た。この高速に機械的な動きを高精度に実現することが二つ目の難関となり、これを克服した顕微鏡システムを実現したのが第3次FS期である。当初、高速な情報処理だけに頭が行き、高速な機械的な動きはなんとか高をくくっていたが、実際に最後まで悩まされ続けたのは、どうやって高信頼に高速な機械的な動きを実現するかであった。

#### (e) 製品段階期

顕微鏡システムで、幾つかの実証を繰り返していくことで、その顕微鏡応用も工業応用と生物応用に分けながらさらにビジネス化を考えたが、顕微鏡システムは光学メーカーが研究者などを対象に訪問販売し、メンテナンスを行うという特殊な販売ルートであり、門外漢のフォトロン株式会社が入るためには従来の光学メーカーにOEM供給をしながら、ユーザーへの販売を行う販路の確立が重要なカギとなった。これが最後の難関となり、この販路の確立に1年余の歳月を要したが、無事2003年には製品として世の中に出る運びとなった。

### 3 アイデア段階期

前章で紹介したアイデアは、「どこでもピントの合った画像を作りたい」という単純な科学的な興味から発したものである。当初、想定していたアプリケーションとしては、デジカメや眼鏡などを漠然と考えていたが、それを実現するために、焦点距離の異なる幾つかの画像をパソコンによるオフライン処理を行うことで、その有効性を確認することか

ら始めた。

この期では、単純な処理をパソコンの持つメモリ容量と処理能力内で行うために、メモリ効率を上げるための逐次処理アルゴリズムと、処理能力を上げるための並列処理アルゴリズムの開発を行った。

### 3.1 理論的構成 (Depth from Focus 法)

光学顕微鏡画像の場合、被写界深度の浅さ問題は操作性に大きな問題を与えることを前述したが、これは同時に物体の三次元計測手法<sup>[5]</sup>の一つである Depth from Focus 法<sup>[6][7]</sup>を実現するためには大きな利点であると言える。つまり、全焦点カメラは被写界深度の浅さ問題を解決するためのものであると同時に、この問題を逆手に用いることにより、どこでもピントの合った全焦点画像が獲得できるだけでなく、Depth from Focus 法を用いることにより単眼であるにもかかわらず、物体の三次元形状を獲得することが可能となる。

図3に Depth from Focus 法 の概念図を示す。奥行き異なる物体を観測する場合、撮像面までの距離（ピント）を振りながら画像各点で画像の濃淡データの局所周波数を計測しピークを検出する。一度、ピントの合った撮像面までの距離が得られれば、ガウスのレンズ法則を用いることで、物体までの距離が算出できる。

ピントが合っているかどうかは、焦点距離： $f$ 、物体距離： $l$ 、もしくは画像距離： $l'$ を動かしながら撮像した画像の観測点周りの局所空間周波数分析を行い、空間周波数が最大のところがピントの合ったところであるといえる。この方法は、オートフォーカス機構としても多く使われている手法であり、直感的にボケ部分は周波数が低く、ピントが合った部分は周波数が高いことがわかる。基本的には可変焦点機構でレンズのピントを動かしながら画像を1枚1枚取りこみ、それぞれの画像全ての画素点周辺での局所空間周波数分析を行い、周波数のピークの部分、つまり焦点が合った部分をピクセル単位で各画像からピックアップ

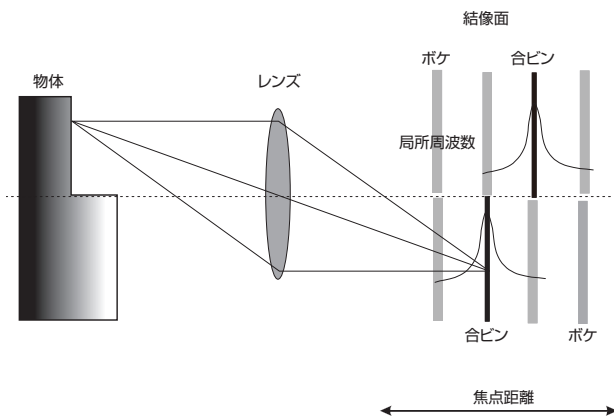


図3 Depth from Focus 法

し、1枚の画像として張り合わせていけば全焦点画像が得られる。また各点での焦点距離と画像距離からその三次元データも得られる。

画像のピントの合い具合の評価手法には、焦点距離を変えながら画像の明るさの変化をみる方法など、さまざまな方法があるが、本論文では、最終的な製品化を視野に入れ、画像処理のアルゴリズムをハードウェア的に実装しやすいなどの理由から、各画素の局所空間周波数分析は画像濃淡値の空間的な分散で評価するものとし、次式の Image Quality Measure (IQM) を定義する。この IQM 値は、本来、画像の鮮明度を示す指標の一つとして定義されているものであり、ピントが合っているか否かを判定するためのものではないが、画像をデジタル化し、その画像をデジタル処理することを前提に、処理アルゴリズムが将来的に高速化することが容易なこの IQM 値をここでは用いることとした。

$$IQM = \frac{1}{D} \sum_{x=x_i}^{x_f} \sum_{y=y_i}^{y_f} \left\{ \sum_{p=-L_c}^{L_c} \sum_{q=-L_r}^{L_r} |I(x, y) - I(x+p, y+q)| \right\}$$

ここで  $(-L_c, -L_r) - (L_c, L_r)$  と  $(x_i, y_i) - (x_f, y_f)$  はそれぞれ、分散評価と平滑化を行うための小領域である。また、D は画素単位で正規化するための評価を行うすべての画素数である。焦点距離を動かしながら IQM の値のそれぞれ画素毎もしくは領域毎に評価し、IQM 値のピークを検出し、その時に焦点距離： $f$  と画像距離： $l'$  から算出した物体距離： $l$  を、それぞれの画素位置に対するマトリクス要素にそれぞれ代入することで、対象物の三次元データを作成する。

### 3.2 逐次処理による構成 (メモリの軽減のため)

前述のように全焦点画像と奥行き画像を理論的に同時に獲得するのは、Depth from Focus 法を使うことで可能であるが、実際に開発を始めた 2000 年当時、前節に述べた IQM 値を計算するアルゴリズムを構築すると、256 画素 × 256 画素、30 枚程度の画像から 1 枚の全焦点画像と奥行き画像をそれぞれ実時間で獲得するためには、2 Mbyte 程度の画像メモリと、1 秒間に 30 枚 × 30 フレーム = 900 枚の画像の獲得と処理能力 (2000 年当時のパソコンで 3 分程度) が必要とされた。

そのためには、まず、全焦点画像および奥行き画像を 30 フレーム毎秒で獲得するために N 枚の異なる奥行き画像を必要とする場合には、30 × N フレーム毎秒での画像を撮像する高いダイナミックレンジの撮像素子が必要とされ、さらにはそれだけの画像データを処理・表示するための高速処理システムが必要とされる。

この IQM 値は、オートフォーカスカメラであれば 1 点もしくは数点だけを計算しその値に応じてピントを駆動すれば良いが、全焦点画像を得るためには各画素点において計算を 33 ms 以内に効率よく行う必要がある。

このハードウェアの限界を克服するために著者らが考えたアルゴリズムにより構成的にメモリを効率化する手法を以下して述べ、次章ではハードウェアの特性を使って処理速度を効率化した構成を紹介する。

この IQM 処理をすべての画素点で行う際に、焦点距離の異なる前画像を一時的に蓄えてから処理を行うのは非効率であることから、以下に示す (1) - (7) ステップの逐次型アルゴリズムにより構成を構築した。図 4、5 にはそれぞれ、代表的なシステム構成図とフローチャートをそれぞれ示す。

この逐次型アルゴリズムを用いて、焦点距離を変えながらこの逐次処理を行い、焦点距離を最後まで動かすことで、最終的に更新されたイメージメモリのそれぞれのマトリックスが全焦点画像 (AIF) と奥行き画像 (DEPTH) になる。IQM の算出式は複雑そうに見えるが、画像処理技術としてはラプラシアンと平滑化を行っているだけである。ラプラシアンは二次微分であり、デジタル画像の世界では微分は隣の画素との差分であり、これを 2 回行えばラプラシアンになる。平滑化はいわば平均である。この二つの処理は四則演算であり、高速化が可能なハードロジック回路に適している。通常は異なる奥行き画像の枚数分  $N$  枚のメモリを持ち、それぞれの IQM 画像を出した上で、同じ画素位置の IQM の値を比較することで、全焦点画像と奥行き画像を獲得していた (合計  $2N + 2$  枚の画像メモリが必要)。これに対し、この逐次アルゴリズムでは得られた画像をその場で逐次比較するため、原画像と IQM 画像、全焦点画像、奥行き画像の 4 枚の画像メモリだけで済み、メモリの容量を軽減できるだけでなく、後述のハードウェアによる構成が容易となった。

(1) 初期化

init (IQM) ;

(2) 焦点距離移動

for (FV=0 to FVMAX) { (FV:焦点距離)

mov (FV) ; 焦点距離移動

(3) 画像入力

IO=input; 画像入力

(4) ラプラシアンフィルタ

IL=lap (IO) ; 前処理

(5) メディアンフィルタ (平均フィルタ)

IM=ave (IL) ; 前処理

(6) 画像の各画素の輝度値の比較と、それに応じた画像データのコピー

if (IM (x, y) > IQM (x, y) ) {

    IQM (x, y) =IM (x, y) ; 評価値更新

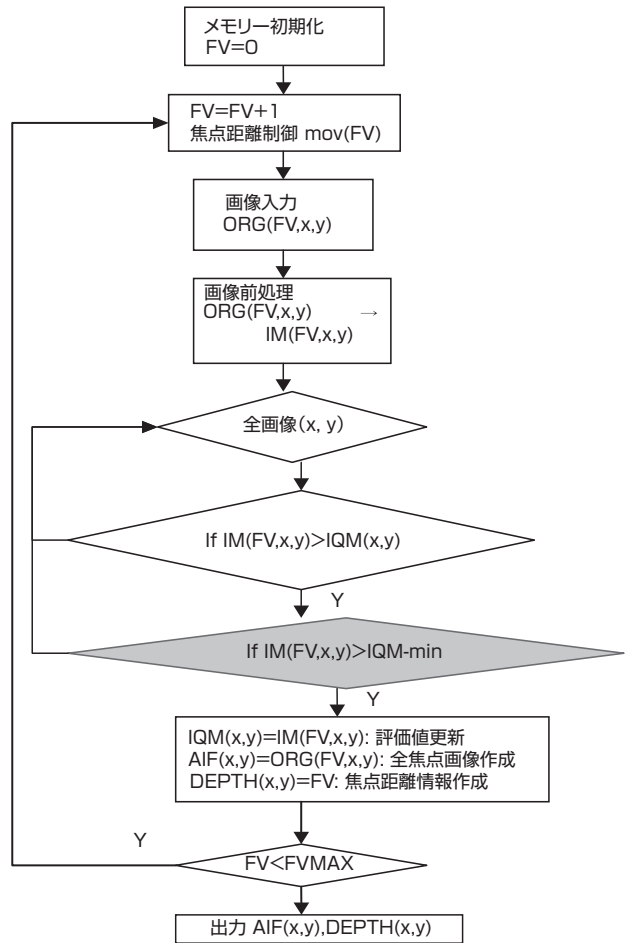


図 5 逐次アルゴリズムのフローチャート

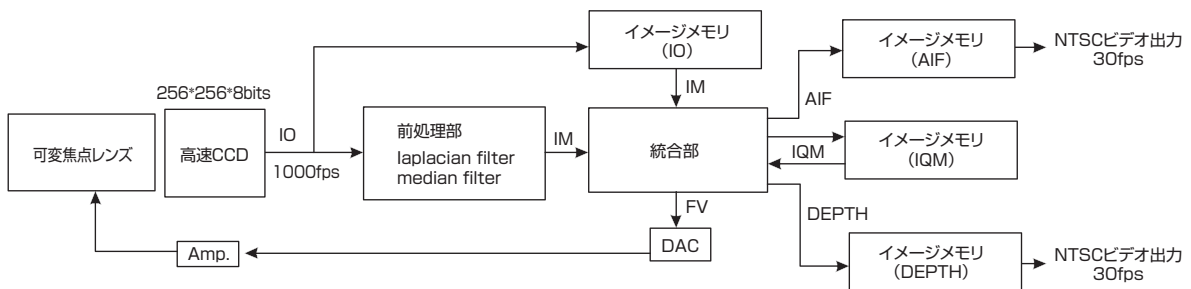


図 4 逐次アルゴリズムのためのシステム構成

AIF (x, y) = IO (x, y); 全焦点画像作成  
 DEPTH (x, y) = FV; 焦点距離情報作成

(7) 画像データ出力

output (AIF, DEPTH); 画像データ出力

#### 4 第1次FS期

上記の手法と情報処理を実時間で実現するためには、焦点深度を高速に移動させながら、同時に高速に画像を撮像し処理することが求められる。そこで、基本システム構成要素は次の三つであると分析した。

(a) 高速可変焦点機構

(b) 高速度撮像機構・高速度画像処理演算回路

(c) 高速通信

例えば、8段階の焦点距離で処理を行う場合、人間が観測するのに十分な滑らかさである30枚毎秒の実時間でその出力を得るためには、30 Hzでの焦点距離の高速移動と、それに同期しながら30×8で240コマ/秒の画像の取り込みと処理のスピードが要求される(図6)。モノクロ512×512画素で240コマの場合、ピクセルレートは100 MHzに近い周波数になる。同時に30 Hzでカメラの焦点

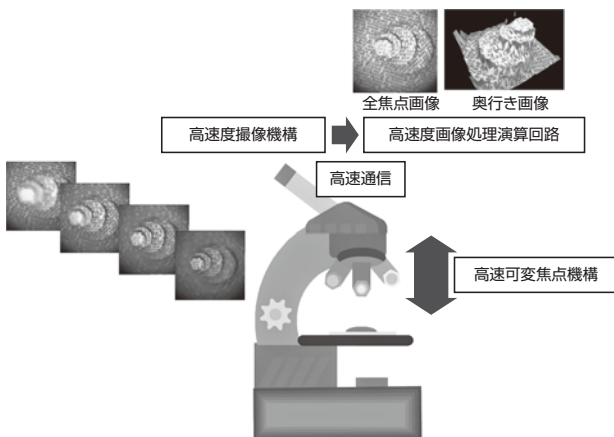


図6 全焦点顕微鏡のシステム構成



図7 可変焦点レンズ概観

距離、対物距離、もしくは画像距離を動かす必要がある。

(a) 高速可変焦点機構

後述の試作1号機、試作2号機では、高速可変焦点機構としては、株式会社デンソーで開発された可変焦点レンズを用いた<sup>[8]</sup>。駆動は piezoelectric 素子で、これにかける電圧を変えると焦点距離が変わる。構造は単純でモータ類は一切ない。構造はバイモルフアクチュエータでガラスダイアフラムを駆動させ、焦点距離を変える。PZT バイモルフに印加する電圧を変えることにより、このレンズは凸レンズから凹レンズに変化することも可能である。150 Hz 程度まで位相が遅れずにこの周波数に応答することが検証されている。図7が可変焦点レンズの写真、図8がその構造、図9がレンズ駆動機構の詳細である。このレンズは電圧を加えない場合は平板のガラスである。この可変焦点レンズの最大の特徴はその高速性である。piezoelectric 素子によりガラスダイアフラムを直接駆動させるので高速な焦点距離の移動が可能になった。

(b) 高速度撮像機構・高速度画像処理演算回路

3.1の試作1号機での高速度撮像機構と高速度画像処理演算回路については、撮像素子、ADC、処理システムが内包しているビジョンチップを用いた。ビジョンチップを用いることで、処理はビジョンチップの内部で完結し、高速

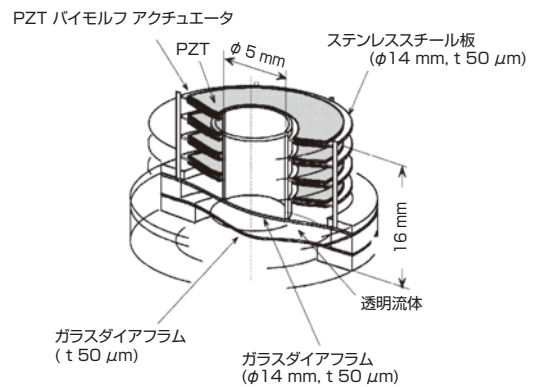


図8 可変焦点レンズ構造

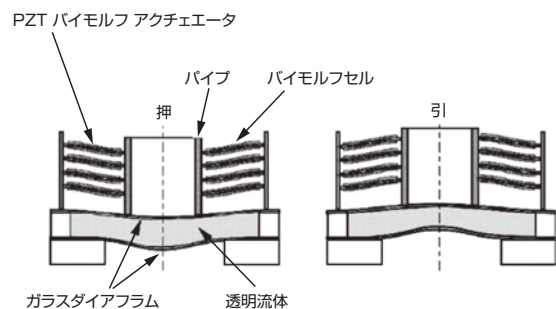


図9 可変焦点レンズ動作原理

通信は不要となる。ここでは単位時間あたりの画像データ量と画像処理能力の多さから、コラムパラレル型のビジョンチップである、スウェーデンのIVP社のMAPP2200を用いた。基本構成としては、256×256画素のCMOSイメージセンサと、256個のADC、256個のパラレルプロセッサからなる。前章で述べたように、SIMD<sup>用語3</sup>（Single instruction Multiple data）処理が可能な画像処理アルゴリズムにより、画像の取り込みと処理が高速に行える。

(c) 並列処理による構成

開発を始めた2000年当時は、通常のフレームレートでのデジタル画像処理技術が当たり前のように実用化されてはいたものの、フレームレートを1桁近く上げた画像の撮像と処理は、特殊なビジョンチップを開発しなければ実現しないというのが現状であった。もちろんビジョンチップの開発には1億円程度の開発費用がかかるといわれ、複数の企業を当たってみたものの、快い回答をいただいた企業はなく、試作1号機ではスウェーデンで開発された汎用ビジョンチップMAPP2200を用い、後述する並列処理アルゴリズムを実装することで実現した。処理速度としては2秒程度で実現されたが、目的であるフレームレートでの実時間処理には程遠いものであった。

本手法に必要とされる、画像前処理部分のラプラシアンフィルタと平滑化フィルタは、高い処理能力を要する。この処理をハードウェア化したものとして、この章の後で紹介する試作1号機においてビジョンチップで実装した例を

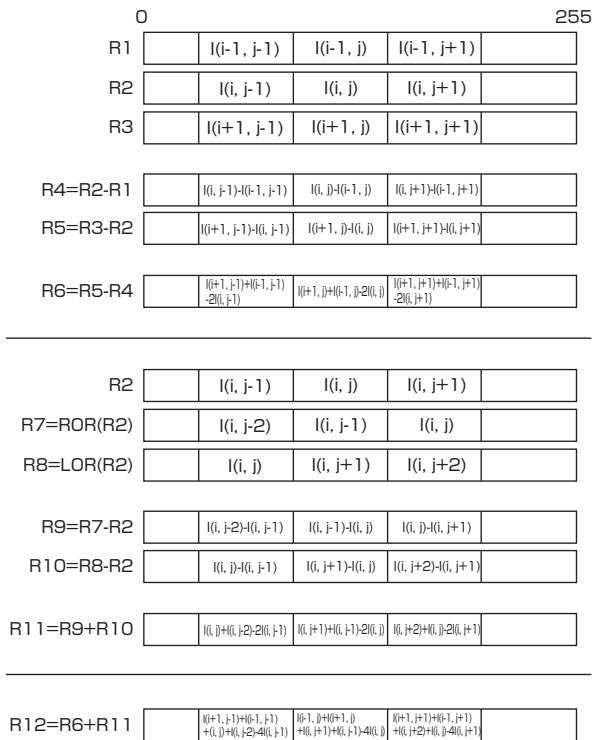


図10 SIMD処理によるラプラシアンフィルタ処理演算

図10、11に示す。用いたハードウェアはSIMD処理が容易なチップであることから、上記のIQM値を演算するためには、各画素点で各画素点周辺の画素値を用いた処理として、ラプラシアンフィルタと平滑化を並列計算することが求められる。それぞれの処理について、SIMD処理した例を示す。それぞれの演算結果を見ると、最終的に各画素点でラプラシアンフィルタ（図10のR12）と平滑化（図11のR5）の結果が得られていることが分かる。

また、最終的に製品化した際にはこの処理手法を参考にしながら、FPGAを用いてIQM値を算出するシステムを構成した。

1999年に試作した試作1号機システムの概観を図12に

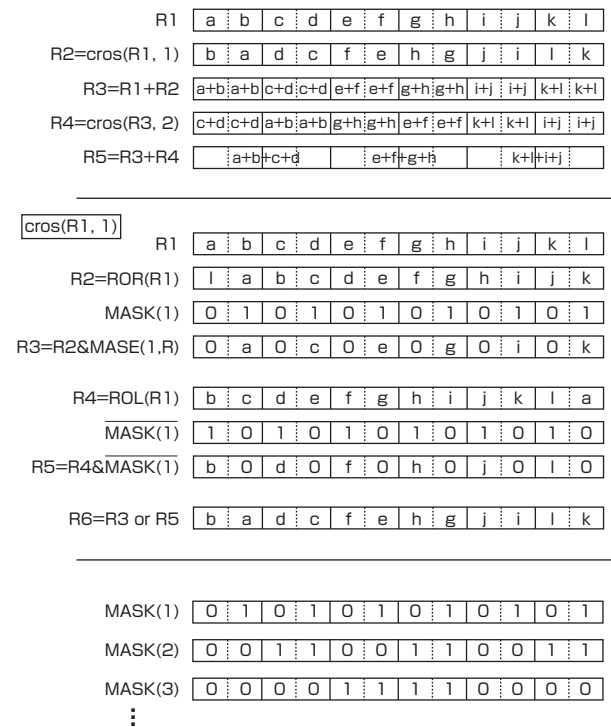


図11 SIMD処理による加算演算処理演算



図12 試作1号機

示す。

評価実験として、可変焦点レンズから 160 mm の場所に 35 mm の奥行きを持つ物体を置いて処理を行った。焦点距離を 35 mm の高さの物体をカバーする程度に移動するのに 21 枚の画像を取り込み処理していることから、奥行き解像度は 1.67 mm である。システムの空間解像度は光学機器の設定に依存するが、今回の場合、16 mm × 16 mm を画像解像度 256 × 256 で処理することから、62.5 μm/pixel の解像度を持つ。

ここで用いた対象物としては、高さ 35 mm の 4 段の人工的なピラミッド形状のもので、1 段目がφ 10 mm 高さ 10 mm、2 段目がφ 7 mm 高さ 10 mm、3 段目がφ 4 mm 高さ 10 mm、4 段目がφ 3 mm 高さ 5 mm である。

この時、焦点距離を動かしながら撮られた 21 枚の画像の一部を図 13 左に示す。前述のような処理を施すことにより、全焦点画像：図 13 右と VR 表示：図 14 がそれぞれ得られている。全焦点画像自体は適当であるものの、奥行き画像は平滑化する領域が小さいこと、奥行き方向の解像度が少ないことなどから、大きな分散した結果が得られた。

試作 1 号機の性能としては、領域の大きさの設定や取り込み画像枚数に依存するものの、処理時間は 2 秒間に 1 枚程度の出力しか得られていない、MAPP2200 での二値画像の取り込み・処理は 1 秒間に 2,000 枚から 3,000 枚をこなす能力を持つことから、処理時間の遅さの原因としては、1) コラム型 A/D が各画素で独立した参照電圧を与

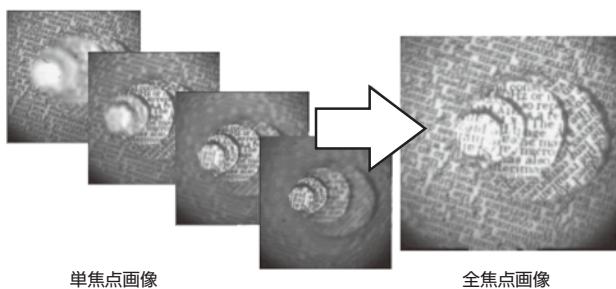


図 13 全焦点画像の生成概念図

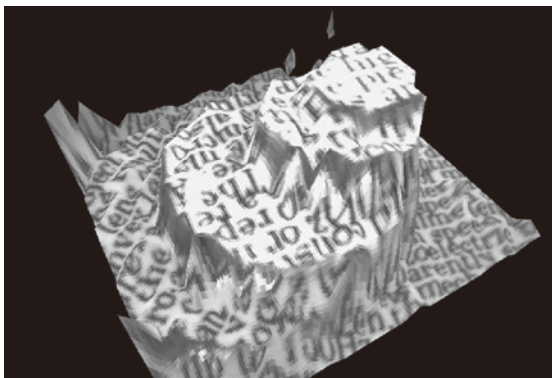


図 14 VR 表示例

えられないため、8 ビットの解像度で画像を取り込む際、256 回参照電圧を与え逐次比較する必要があること、2) SIMD プロセッサのアーキテクチャが二値画像に特化したものであること、などが挙げられる。

## 5 第2次FS期

ここでは、30 フレーム毎秒の実時間観測を可能とする全焦点カメラの試作 2 号機を実現するための第 2 次 FS 期について解説する。

後述の顕微鏡システムでは、高速撮像においては多くの実績を有する株式会社フォトロンとの協力を得ることができた。このシステムでは、高速度ビデオカメラのカメラヘッドを用い、撮像機構と画像処理演算回路とのインターフェースには高速画像転送を可能とする LVDS を用いることで、撮像機構と画像処理演算回路を分離することを可能とした。それぞれに市販の高速度撮像機構（高速ビデオカメラ）と画像処理演算回路（FPGA）を用いた。このように既存の製品をベースとして開発したことにより、製品化への道が大きく開けたと言える。

ここで開発した試作 2 号機の構成を図 15、概観を図 16 に示す。高速センサーの出力は CDS (Correlated Double Sampling)、ADC を経て高速デジタルインターフェースの LVDS に変換され、画像処理部分に転送される。ここま

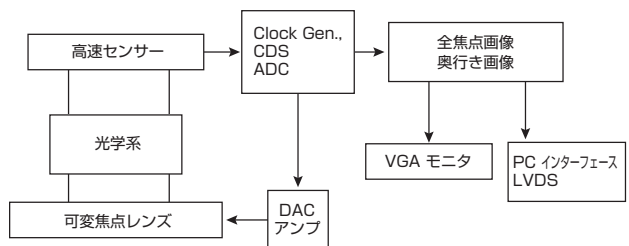


図 15 試作 2 号機ブロックダイアグラム

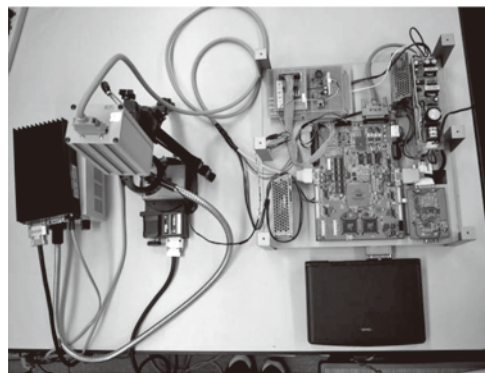


図 16 試作 2 号機概観



ディスプレイに使われている規格である。可変焦点レンズ用のノコギリ波発生回路は高速度カメラ部分のクロックジェネレータから同期信号を得て、30 Hzのノコギリ波を発生させ、レンズ駆動アンプでレンズを駆動する。画像処理部では入力デジタル映像信号でIQM演算、画像合成を行い、VGA (Video Graphics Array) 信号として出力する。三次元データはLVDS信号でPCに転送する。PCではPCIバスのLVDSキャプチャーボードでデータを受ける。

機械的に焦点距離移動は、試作1号機と同じものを使ったので問題なかったが、アルゴリズムの方は第1次FS期では特殊なビジョンチップに実装したことから、そのままFPGAには移植が不可能で、FPGA専用でアルゴリズムを修正する必要があったのと、FPGA処理を高速にするために内部メモリを使う必要があったため、メモリ容量を考慮した実装が必要となった。ここでは先に示した逐次処理を実装することでメモリ容量が抑えられ、結果的にFPGAの内部メモリだけで処理ができたため、目的仕様の30フレーム毎秒が可能となった。

図17には、試作2号機による出力画像例を示す。前述の試作1号機で示したものと同等の表示結果となっているが、実際には左の列に示した全焦点画像と右の列に示した奥行き画像が動画で観測されている。つまり、各フレームに対して8焦点での記録がなされ、試作1号機が0.5フレーム毎秒であったのに対し、試作2号機は30フレーム毎秒であることから、60倍の処理速度を得ていることになる。

## 6 第3次FS期

ここまでの開発で以下のことが明らかになった。

- ・既存の高速度カメラのカメラヘッドとLVDSを使うこと

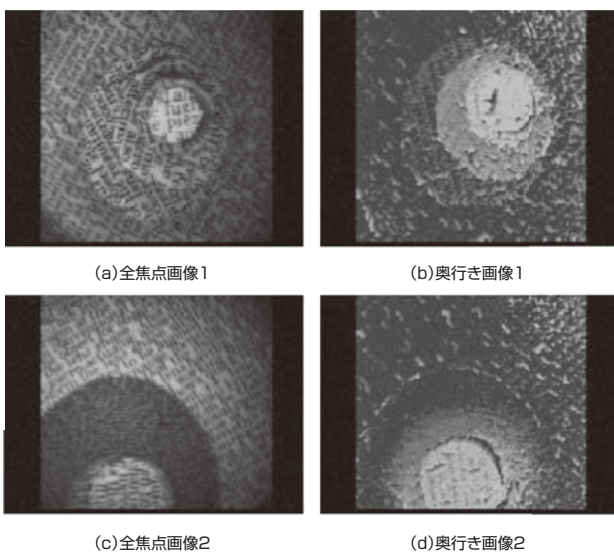


図17 試作2号機出力例

で、撮像、通信と処理の分離が可能となり、処理部には一般のFPGAを用いた高速並列処理が可能である。

- ・機械的な焦点距離移動には、可変焦点レンズで可能である。

企業との話し合いの中から、それらを高速処理部分はそのまま活かして、ビジネス的な応用が最も可能性のある顕微鏡用途に特化した開発をすることになった。しかし、上述の二つ目の機械的な焦点距離移動については、その精度などの問題から可変焦点レンズを使うことが出来なかった。ここでは第3次FS期において、顕微鏡用途に特化した顕微鏡システム開発について述べる。

顕微鏡システムにおいて焦点距離を動かすのに使ったのは、市販の焦点距離移動機構 PI Polytech 社製のPZTアクチュエータP-721、20とドライバE-612、C0で、顕微鏡の対物レンズの間に取り付けることにより対物レンズを平行に0-100  $\mu$ m動かすことを可能としている。ここで、4章、5章の試作機で用いていた可変焦点レンズを使わなかった理由としては、可変焦点レンズではレンズの厚みを変化させレンズのf値そのものを変化させているため、厳密には異なる倍率の画像を合成していることになり、高精度の全焦点画像を生成するには不相当であること等が上げられる。

図18には試作2号機をベースに、顕微鏡に実装した顕微鏡システムの概観図、図19には通常の光学顕微鏡画像例を、図20には顕微鏡システムで得られた画像をそれぞれ示す。

ここで測定対象としては、直径2  $\mu$ mのガラスファイバーを用い、三次元的に交差している画像である。10  $\mu$ m毎の画像を図に示す。1本目のガラスファイバーには30-40  $\mu$ mでピントが合い、2本目のガラスファイバーには60  $\mu$ mでピントが合っていることが見てとれる。

提案した全焦点顕微鏡カメラを用いることにより、図20に示すような全焦点顕微鏡画像が得られている。ちなみに

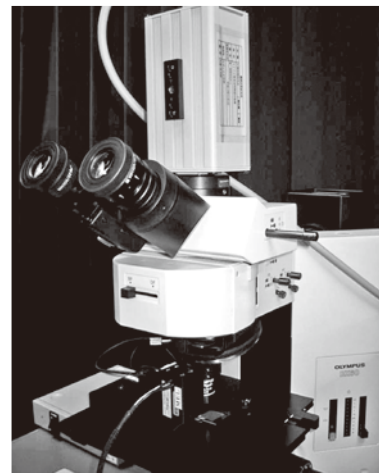


図18 顕微鏡システム概観図

この映像は動画であるので、測定対象物体が動いても全焦点画像は逐次更新される。さらに、奥行き画像も得られている。

### 7 製品段階期

今回ここで開発してきたシステムは、株式会社フォトロンから2003年度に製品化された。このシステムの概観を図21に示す。基本的な構成は試作機と変わらないが、カラー画像に対応したこと、システムの大きさを極力コンパクトに抑えるなど、実用に耐える工夫がなされている。

また、この製品システムで得られた全焦点画像の例を通

常の画像と比較して図22に示す。図22上にはICチップのワイヤーボンディング部分、図22下には透過光による珪藻と微生物をそれぞれ示している。どちらも対物レンズは50倍のものを用いている。実績としては、対物レンズの重さなどの関係から、100倍程度の対物レンズまでは稼働可能である。1mmから0.1mm程度の低倍率に関しては実体顕微鏡が、サブミクロンの高倍率になると電子顕微鏡が広く用いられており、光学顕微鏡の光学限界などから、生物などのバイオ系や、半導体検査などでは倍率がさほど高いものは必要とされないことから。そこで、程度の倍率で実用上問題がないことを確認した。

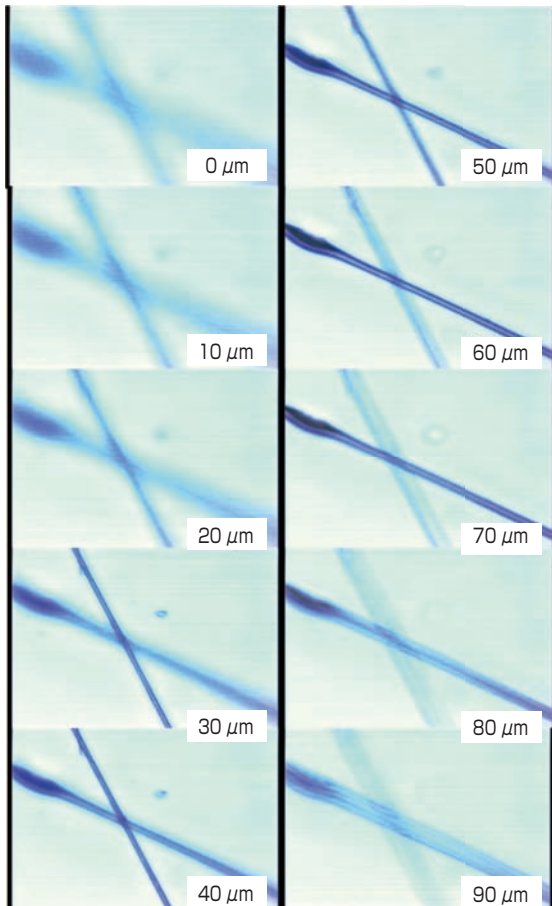


図19 典型的な顕微鏡画像例

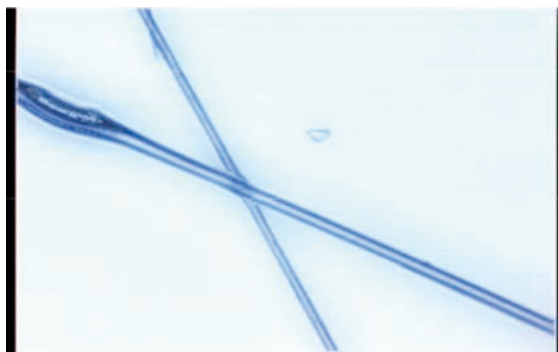


図20 全焦点顕微鏡画像例（動画）

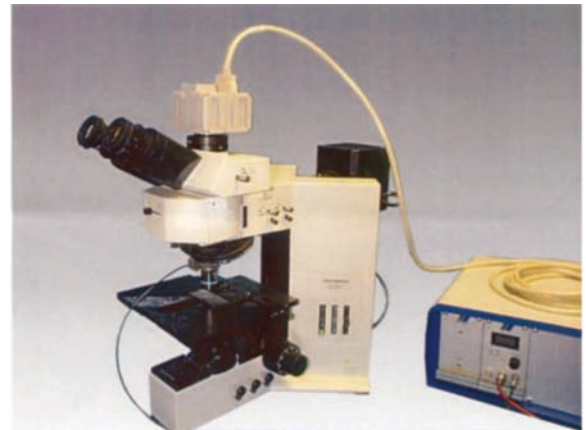
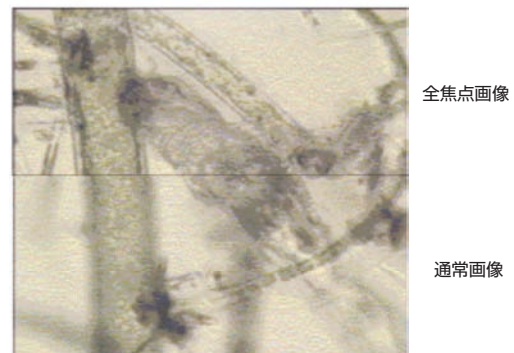


図21 製品版システム概観図



ICチップ検査



微生物観測

図22 製品版画像出力例

## 8 将来への課題

ここで開発した全焦点顕微鏡カメラは、通常の顕微鏡画像の問題である被写界深度の浅さの問題と奥行き情報が得られないという問題を同時に解決するため、どこでもピントの合った画像（全焦点画像）と、対象物体の三次元的構成を実時間で生成・表示することを目的としたシステムである。

全焦点画像と三次元構成を同時に獲得することにより、対象物体を詳細に観測することが可能となった。しかしながら、それと同時に通常の顕微鏡が得ている一方方向からの対象物体の異なる複数の焦点距離の映像から、ピントの合っている映像と、その時の一方方向からの奥行きデータだけを抽出することを特化的に行うことで、多くの情報を捨てるを得なかったのも事実である。例えば、半透明な物体に対して垂直方向に焦点距離を操作した際、ピントの合う部分が高さ方向に複数ある対象物体も存在するが、この手法では1か所だけを選択することで、無条件に他の部位の観測は不可能となる。

光学的なスケール効果をなくすもう一つの方法としては、図23に示すように多数の焦点距離の画像から、そのままボリュームレンダリング<sup>用語4</sup>する技術についても発案している。これについても特許化している<sup>9)</sup>。

将来は、ハード的な制約を考えずに全ての奥行き画像をボリュームレンダリングすることで、どの方向からの画像スライスも生成できるような、ハイパー顕微鏡の開発も必要とされるものと期待する。

## 謝辞

この研究は、通商産業省工業技術院機械技術研究所（現

在の産業技術総合研究所）と、デルフトハイテック株式会社、川鉄テクノロジー株式会社、株式会社デンソーの共同研究により行なわれたものを元に産業技術総合研究所と株式会社フォトロンが実用化共同研究を行ったものである。また、本研究の可変焦点レンズの一部は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）から委託を受けた（財）マイクロマシンセンターの再委託業務として、株式会社デンソーが実施したものである。

## 用語説明

用語1:LVDS (Low Voltage Differential Signaling) インターフェース:ツイストペアケーブルを使って非常に高速に動作することができる電気信号の規格。高速カメラなどでは以前より、そのデータ量の多さなどから使われていた。パソコンでも液晶パネルとのインターフェースに使われている。

用語2:FPGA (Field Programmable Gate Array) 処理:利用者が独自の論理回路を書き込むことの出来るゲートアレイ(PGA)の一種で、ゲートアレイが二次元格子状に並んでいるもの。並列処理演算などに向く。

用語3:SIMD (Single instruction Multiple data) 処理:演算装置において1回の命令で複数データに対する処理を一つの命令で同時に行うもの。

用語4:ボリュームレンダリング:三次元の物体を二次元画像として表現する際に、物体の表面に陰影をつけてあらかず手法に比べ、物体内部の透過率、色などの情報を持たせることで三次元の物体を三次元的に見せる手法。

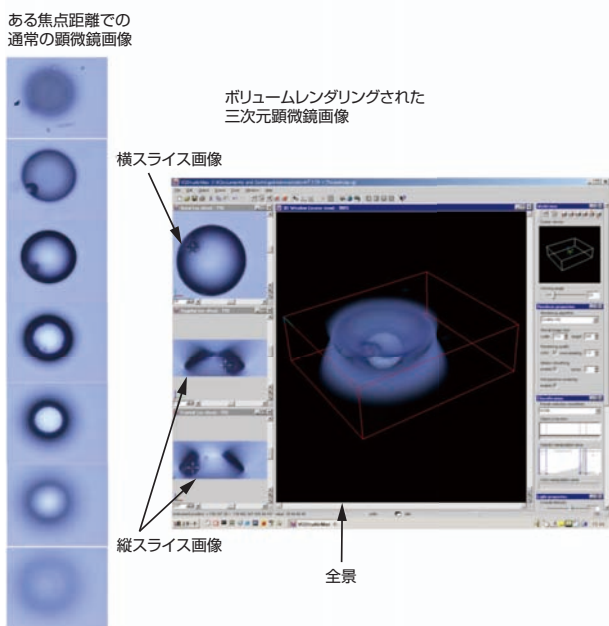


図23 ボリュームレンダリング手法の概要

## 参考文献

- [1] 大場光太郎, J.C.P Ortega, 谷江和雄, 林学明, 段木亮一, 武井由智, 金子 卓, 川原伸章:実時間マイクロVRカメラの試作, *電気学会論文誌E*, 120-E (6), 264-271 (2000).
- [2] K. Ohba, J. C. P. Ortega, K. Tanie, G. Rin, R. Dangi, Y. Takei, T. Kaneko and N.Kawahara: Micro-observation technique for tele-micro-operation, *Advanced Robotics*, 15 (8), 781-789 (2001).
- [3] 大場光太郎:実時間全焦点顕微鏡カメラシステム, *日本ロボット学会誌*, 21 (1), 43-44 (2003).
- [4] 特許3737483, 実時間全焦点顕微鏡カメラ
- [5] 石原満宏, 吉澤 徹:最近の光表面形状計測技術, *O plus E*, 20 (11), 1251-1258 (1998).
- [6] S. K. Nayer and Y. Nakagawa: Shape from focus, *IEEE Trans. on PAMI*, 16 (8), 824-831 (1994).
- [7] 児玉和也, 大西隆之, 相澤清晴, 羽鳥光俊:反復法に基づく複数画像からの任意焦点画像の生成, *映像情報メディア学会誌*, 51 (12), 2072-2081 (1997).
- [8] 金子 卓, 多矢信之, 川原伸章, 秋田成行, 服部 正:可変焦点レンズを用いた長焦点深度視覚機構, *電気学会マイクロマシン研究会* (1997).
- [9] 特許3627020, 三次元透過型顕微鏡システムおよび画像表示方法

**執筆者略歴**

大場 光太郎 (おおば こうたろう)

1991年東北大学大学院博士課程修了。博士(工学)、2009年より独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門 副研究部門長、兼 デイベンダブル・システム研究グループ長。最近は人間生活環境下で実際に使えるロボットを目指し、ユビキタス・ロボット、デイベンダブル・システムなどの研究に従事。IEEE、日本機械学会会員。現在、筑波大学 連携大学院 教授、芝浦工業大学 連携大学院 教授、東京大学大学院情報学環 客員准教授も兼務。



**査読者との議論**

**議論1 構成方法**

質問・コメント (小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

本論文で著者は、最初の部分の「実時間全焦点画像の構成」という、オリジナルな考えに基づいて情報的構成を行い、これをベースに「実時間全焦点画像の構成」を実現するためにハードウェアを含めたシステムの構成を行い、逐次目標を明確に向上することにより、最終的に実時間全焦点顕微鏡の製品化に持っていきましました。これは極めて貴重なことであり、ここでは①第1種基礎研究から製品化までの一貫性、②戦略目標の逐次的深化・明確化、③それに伴うシステム構成の向上、④以上を踏まえた実際の製品化とその後の商品としての維持、という他には無い極めてユニークな研究開発を、紆余曲折がありながらも継続して行い完遂したことが示されています。その意味でシンセシオロジーの論文に相応しいと考えられました。

一方、シンセシオロジーでは構成的手法の独自性が課題の一つです。本論文にあっては、技術の進展、あるいは構成の進展に伴って戦略が明確になり、それにつれてシナリオも明らかになってきたと推察されます。すなわち、最初から「実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化」という戦略目標があったわけではなく、実態は要素技術を構成している間に、戦略目標が深化し、そのために次のステップで行う課題が明確になり、要素技術の選択とシステム化の実現を経て、その次の戦略目標が深化するというサイクルを描くことになったと理解しました。すなわち、次のステップに進むたびに技術要素を選択していき、そのたび毎に戦略が明確にされ進化したと推察されます。したがって結果的には、要素技術の「戦略的深化・選択型構成法」とも呼ぶべき手法がとられたと推察されます。(下図参照) (シンセシオロジー、1巻2号 p.141の図に追加修正)。この認識は正しいでしょうか？

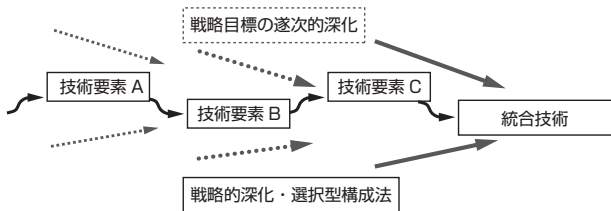


図 シンセシスの構造

回答 (大場 光太郎)

おそらく、製品化の過程でとってきた手法は、「戦略的深化」であったり、「選択型構成法」であるのかと思いますが、それらはいずれも個人の経験と周りの人脈に依存し、ロジックとしてきれいに書き下して共有化するの是非常に難しいと感じています。FS 期の過程においては、幾つかの構成要素の取捨選択、その構成要素に特化したアルゴリズム開発、さらにはそれを実現するためのパートナーとの出会いなど、上記の「戦略的深化・選択型構成法」ともいべき手法に相当するものと、それとは言い難い“幸運な偶然”に大きく左右されてきたことがあり、それらを敢えて書き加えました。というのも、暗中模索しながら迷路を彷徨し、ゴールに到達した後で、ここが大きな分岐点であったと後付けで理由はつけられるものの、当の本人は彷徨っている最中は夢中で、恥ずかしながら決して理論的な決定をしていたとは、当時を回想しても思えないためです。以上のようなことを、「第2章、紆余曲折の歴史」で述べておきます。

**議論2 「死の谷」**

コメント (中島 秀之:はこだて未来大学)

「死の谷」という記述が随所に見られますが、死の谷というのは技術的な見通しはあるが、製品化のための他の要件(主にコスト)が満たされない部分を言うのだと思います。原理的に解決しているので基礎研究としては面白くないし、企業としては開発コストがかかりすぎるため、誰もが手を出さない研究開発の狭間です。

回答 (大場 光太郎)

死の谷についてですが、若干、言葉の認識が私の意図しているところと違っているようです。査読委員は「死の谷というのは技術的な見通しはあるが、製品化のための他の要件(主にコスト)が満たされない部分を言うのだと思います。」と書かれているのですが、見通しがついたらそれは死の谷ではないような気がしています。ここでは、「死の谷は、青木が原の樹海のように、彷徨いこんだらゴールの方向が分からなくなり、まさに紆余曲折して出口に達するもの」という意識で死の谷を使っています。

コメント (中島 秀之)

研究の見通しが立たない部分(ブレイクスルーを必要とする場面)は「関門」「難関」とか「ボトルネック」という表現が良いと思います。「死の谷」については Wikipedia「デスバレー (研究開発)」の項目を参照されると良いと思います。

**議論3 構成的記述**

コメント (中島 秀之)

我々が通常の研究論文を書くとき、それは研究が完成した時点から振り返って、ある意味後付けの道筋を示すものです。つまり、いくつもの選択肢のうち1本を選んでやっとうり着いた結論が、あたかも最初からそうであったように、そこへの道筋を何の迷いもなく選択して辿り着いたように記述します。最終的に選ばれなかった選択肢や失敗の積み重ねは論文には記述されません。最初原稿は、そのような意味で通常論文のように記述されていたと思います。

通常の理論的・分析的論文はそのような構成が良いと考えます。何故なら、理解すべき現象がすでに存在しており、その理解の道筋を示すのが論文の目的ですから。しかしながらシンセシオロジーは構成の学問体系です。解は一つとは限りません。多くの可能な道筋の中から、特定のものを選ぶという選択それ自体が構成学における重要な要素であり、その記述が必須です。2章「紆余曲折の歴史」の冒頭に述べられている内容が重要であると考えています。