

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超並列画像処理組み込みミドルウェア開発による  
高度計測システムの実証」

研究開発成果等報告書

平成23年 9月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人埼玉県産業振興公社

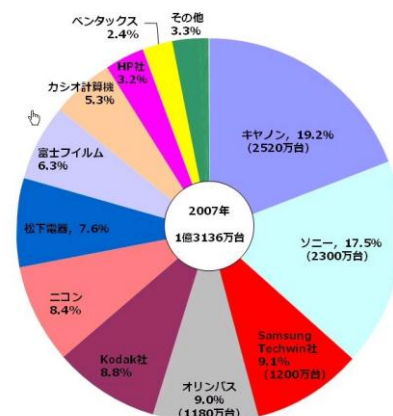
# 目次

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 第1章   | 研究開発の概要                                      |    |
| 1-1   | 研究開発の背景                                      | 1  |
| 1-2   | 研究目的および目標                                    | 2  |
| 1-3   | 実施内容および成果の概要                                 | 3  |
| 1-4   | 研究スケジュール                                     | 5  |
| 1-5   | 研究体制   | 5  |
| 1-6   | 当該プロジェクト連絡窓口                                 | 9  |
| 第2章   | 本論   |    |
| 2-1   | 画像処理ミドルウェアの開発                                |    |
| 2-1-1 | 超並列画像処理用ミドルウェア設計環境の構築                        | 10 |
| 2-1-2 | 焦点補正ミドルウェアの開発                                | 10 |
| 2-1-3 | 画像接続ミドルウェアの開発                                | 12 |
| 2-1-4 | スクラッチ・スポット検出ミドルウェアの開発                        | 12 |
| 2-2   | 光学計測システムにおける実証評価                             |    |
| 2-2-1 | 内視鏡検査装置における焦点補正機能の搭載と実証                      | 15 |
| 2-2-2 | レーザ走査イメージャによる画像接続・スクラッチ検出<br>・スポット検出機能の搭載と実証 | 19 |
| 2-2-3 | 超解像画像処理とナノ構造の評価                              | 23 |
| 第3章   | まとめ  | 26 |

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景

デジタルイメージング機器（デジカメやデジタルビデオ）については、右図に示すように、2007年統計で日本企業がトップブランドを確保しているが、アジア諸国による追い上げが急である。2009年の国別生産台数では、中国50%以上、台湾20%強、韓国10%強となり、国内での生産台数は、20%以下と推定される。日本企業は、先進国を中心とした高機能品を中心に事業展開を行って来たが、新興国の急速に発展する市場を確保することが、今後の重要な課題となりつつあり、海外拠点での生産増強が進みつつある。一方、埼玉県光学部品企業は、積極的な海外展開を行ってきたことから、国際的な主要サプライヤに成長した企業もあり、小型光学部品の国際的なサプライチェーンで大きな役割を果たしている。今後のデジタルイメージング分野の更なる発展には、技術の高度化だけでなく、開発された高度技術を国際的に展開できる国際性が強く求められている。



2007年 1億3136万台

技術的には、画像処理技術の高度化も急速に進んでおり、先端の実証レベルではあるが、ハイビジョンクラスの動画をリアルタイムで処理することが可能となっている。半導体技術の技術進歩と量産によるコストダウンを考えると、数年以内に、高度なリアルタイム画像処理技術が、汎用品として世界市場に普及すると考えてよい。画像処理に関しては、これまでハードウェアによる制約が大きいことから、個別にカスタマイズされた高価な画像処理システムが用いられてきたが、今後は、世界的に共通のプラットフォーム上での、オープンソースによる画像処理の方向になると考えられる。この点、米国インテル社から供給されているOpen CVや、米国スタンフォード大学によるFrankenCamera等のプラットフォームが提供されており、活発な研究開発が行われている。今後の技術開発においては、多数の技術者の連携出来るプラットフォームの構築が必要であるが、知財の取り扱い、ビジネスへの展開による開発費の回収など、事業化に向けた取り組みが必要な状況にある。国内においては、2010年にルネサスエレクトロニクス(株)より、大容量画像データ処理用に搭載したマトリックス型プログラマブルプロセッサ「MXコア」により、高画素化が進む画像データを高速・低消費電力で、かつ柔軟に処理可能となる高度な画像処理集積回路が開発され、ミドルウェアでの各種高度な画像処理の実証が可能となった。今後は、国内で構築された高度な技術プラットフォームのオープン化と、事業への応用展開へと発展することが期待される。

## 1-2 研究目的および目標

研究の目的に関しては、これまで行ってきた FPGA やパソコンで画像処理を行ってきた計測システムを、先端の超並列画像処理を用いて小型化と高速化を実証することにある。具体的には、ライトロン(株)は、内視鏡検査用焦点自動補正用画像処理装置での実証を行い、(株)オプセルは、レーザ走査イメージャでの実証試験を行う。今後の高度な画像処理技術のオープンプラットフォームとしての発展を目的として、(独)産業技術総合研究所と埼玉大学において、ミドルウェア開発に必要な、ライブラリを含めた設計環境の構築を行う。

研究目標と目標値は、以下の通りである。

### 【1】画像処理ミドルウェアの開発

#### 【1-1】超並列画像処理用ミドルウェア設計環境の構築

- (1) 共通設計拠点の構築：ライトロン(株)、(株)オプセル、産総研、埼玉大学
- (2) 超並列演算処理用マイクロコード設計環境のプラットフォーム化
- (3) ミドルウェア処理関数設計環境のプラットフォーム化
- (4) アプリケーション設計環境のプラットフォーム化
- (5) デバッガ設計環境のプラットフォーム化
- (6) メイン CPU 協調デバッガ設計環境のプラットフォーム化

#### 【1-2】焦点補正ミドルウェアの開発

- (1) VGA 画像に対して、焦点補正画像処理時間：200ms 以下
- (2) 平均処理消費電力：200mW 以下

#### 【1-3】画像接続ミドルウェアの開発

- (1) VGA 画像に対して、画像接続時間：100ms 以下
- (2) VGA 画像に対して、ストロボ画像接続時間（5 フレーム）：200ms 以下
- (3) 平均処理消費電力：200mW 以下

#### 【1-4】スクラッチ検出・スポット検出ミドルウェアの開発

- (1) VGA 画像に対してライブラリ方式のスクラッチ・スポット検出時間：100ms 以下
- (2) VGA 画像に対してルール方式のスクラッチ・スポット検出処理時間：200ms 以下
- (3) 平均処理消費電力：200mW 以下

### 【2】光学計測システムにおける実証評価

#### 【2-1】内視鏡検査装置における焦点補正機能の搭載と実証

- (1) イメージインターバル：200ms 以下
- (2) 画像処理ユニット消費電力：200mW 以下
- (3) 画像処理ユニット寸法：15cmx10cmx5cm 以内、200g 以下

**【2-2】レーザ走査イメージャにおける、画像接続・スクラッチ検出・スポット検出機能の搭載と実証**

- (1) ステージ連続移動による画像接続と、ストロボ画像接続機能を有すること
- (2) スクラッチ欠陥検出時間：200ms 以下
- (3) スポット欠陥検出時間：100ms 以下
- (4) 画像処理ユニット消費電力：200mW 以下
- (5) 画像処理ユニット寸法：15cmx10cmx5cm 以内、200g 以下

### 【2-3】超解像画像処理とナノ構造の評価

- (1) 超解像分解能：100nm 以下の構造識別能力を有すること。
- (2) スポット欠陥検出時間：1,000ms 以下
- (3) 画像処理ユニット消費電力：200mW 以下
- (4) 画像処理ユニット寸法：15cmx10cmx5cm 以内、200g 以下

## 1-3 実施内容および成果の概要

【1】画像処理ミドルウェアの開発においては、MX コアを用いたミドルウェア設計環境を構築した。構築された設計環境を図 1-1 に示す。超並列画像処理ボード・CMOS センサカメラ・入出力データ用 SD カードシステム・パーソナルコンピュータから成る。本システムを用いて、各種画像処理のミドルウェアの設計と検証実験を行った。

【2】光学計測システムにおける実証評価においては、

【2-1】内視鏡検査装置における焦点補正機能の搭載と実証を行った。各種アルゴリズムの適用と高速画像処理の実証を行い、目的の性能を達成した。代表的な画像処理の結果を図 1-2 に示す。図 1-2 左に内視鏡の元画像を、右に焦点組成画像を示す。焦点補正により、鮮明な画像が得られた。

【2-2】レーザ走査イメージャにおける、画像接続・スクラッチ検出・スポット検出機能の搭載と実証に関する実証を行った。各種アルゴリズムの適用と高速画像処理の実証を行い、目的の性能を達成した。代表的な画像処理の結果を図 1-3 に示す。図 1-3 左にレーザ走査イメージャにより得られたフィルムの元画像を示す。図 1-3 右に画像処理後の画像を示す。フィルムの微小な凹凸とスクラッチが明確に判別出来る画像が得られた。

【2-3】超解像画像処理とナノ構造の評価

各種アルゴリズムを用いた超解像画像処理の検証を行った。超解像画像処理を行った、代表例として、神経細胞の内部構造を観察した結果を示す。元画像は、解像度の限界から、細胞の輪郭までしか判らないが、超解像の画像処理を施すことにより、細胞の内部構造の観察が可能となる。このことは、生体組織のライブセルの直接観察に結びつくことであり、各種医療・バイオ分野での診断への大きな貢献が期待される。

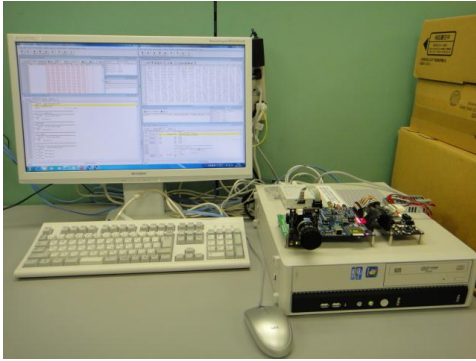


図1-1 ミドルウェア設計プラットフォーム

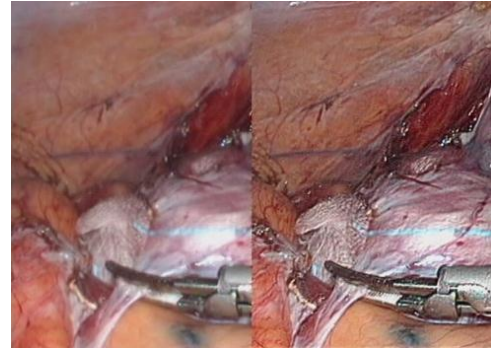


図1-2 内視鏡元画像 焦点補正画像



図1-3 レーザ走査イメージ元画像 画像処理後の表面画像

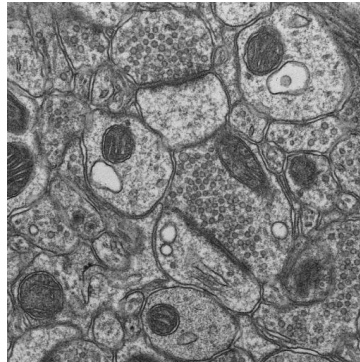


図1-4 超解像画像

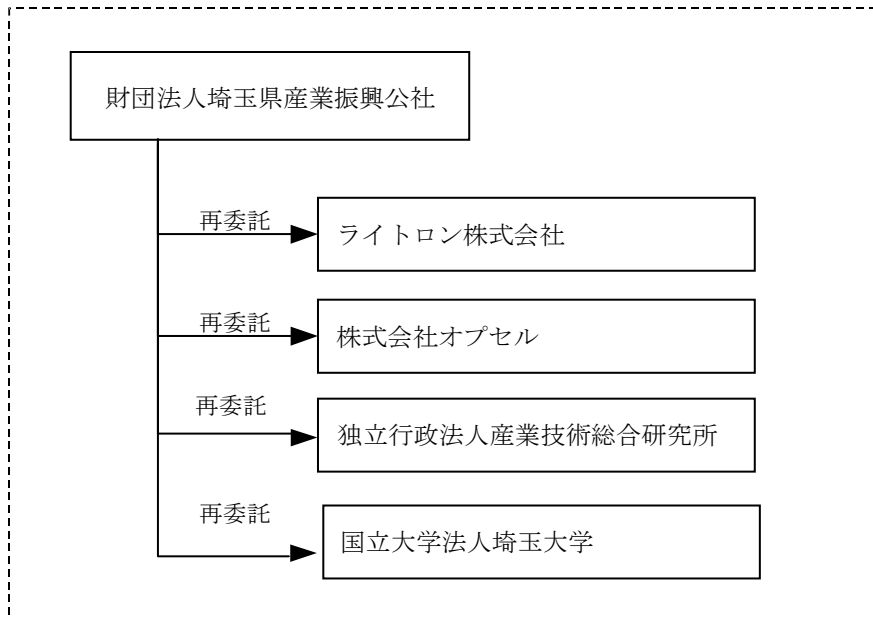
#### 1-4 研究スケジュール

| 実施内容  | 1月 | 2月 | 3月           | 4月  | 5月        | 6月   | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
|---|----|----|--------------|-----|-----------|------|----|----|----|-----|-----|-----|
| ①-1 超並列画像処理用ミドルウェア設計環境の構築                     |    |    | 導入           | 整備  | 基本ライブラリ構築 |      |    |    |    |     |     |     |
| ①-2 焦点補正ミドルウェアの開発                             |    |    | 設計           | 検証  | 内視鏡用設計    | 実証修正 |    |    |    |     |     |     |
| ①-3 画像接続ミドルウェアの開発                             |    |    | 設計           | 検証  | イメージャ用設計  | 実証   |    |    |    |     |     |     |
| ①-4 スクラッチ・スポット検出ミドルウェアの開発                     |    |    | 設計           | 検証  | イメージャ用設計  | 実証   |    |    |    |     |     |     |
| ②-1 内視鏡検査装置における焦点補正機能の搭載と実証                   |    |    | 設計           | 導入  | ソフト搭載     | 検証   | 修正 |    |    |     |     |     |
| ②-2 レーザ走査イメージャによる、画像接続・スクラッチ検出・スポット検出機能の搭載と実証 |    |    | 設計           | 導入  | ソフト搭載     | 検証   | 修正 |    |    |     |     |     |
| ②-3 超解像画像処理とナノ構造の評価                           |    |    | 構造試作         | 最適化 | 評価        | 計測   | 評価 |    |    |     |     |     |
| ③プロジェクトの管理・運営                                 |    |    | プロジェクトの管理・運営 |     |           |      |    |    |    |     |     |     |
| 研究開発推進委員会<br>報告書作成                            |    |    |              |     | ○         | ○    | ○  |    |    |     |     |     |

#### 1-5 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

##### (1) 研究組織・管理体制

##### 1) 研究組織（全体）



総括研究代表者（P L）  
 ライトロン株式会社  
 代表取締役社長 江口 満男

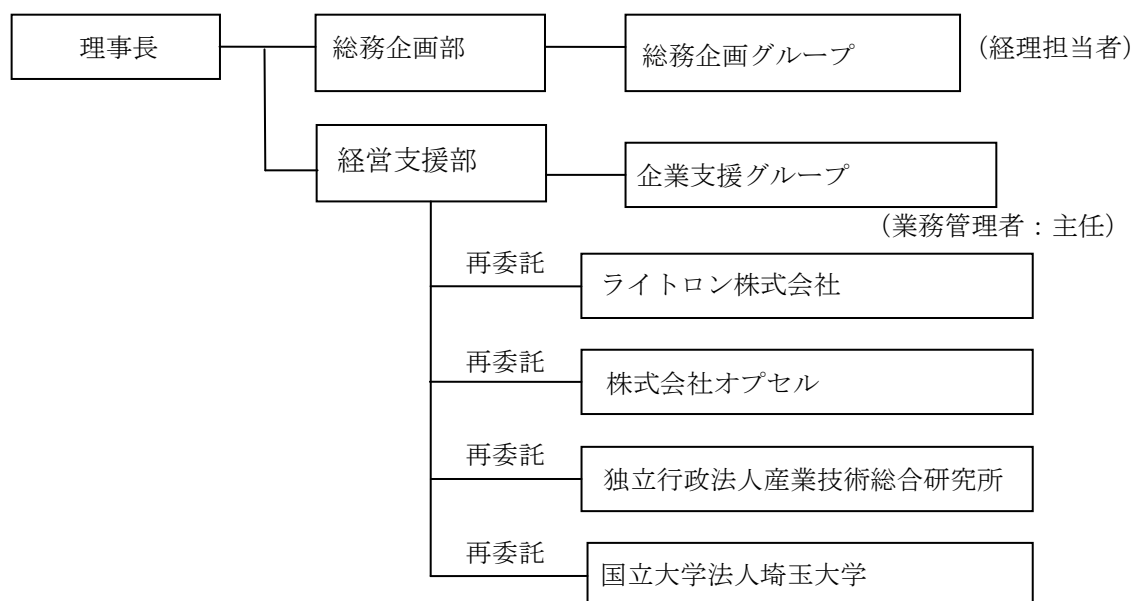
副総括研究代表者（S L）  
 株式会社オプセル  
 代表取締役 小俣 公夫

## 2)管理体制

### ①事業管理機関

[財団法人埼玉県産業振興公社]

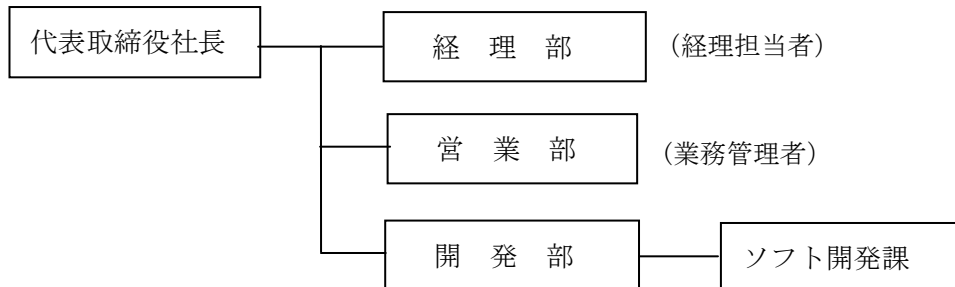
(業務管理者：経営支援部長)



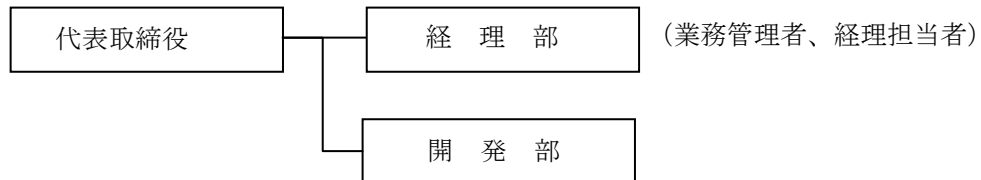


② 再委託先

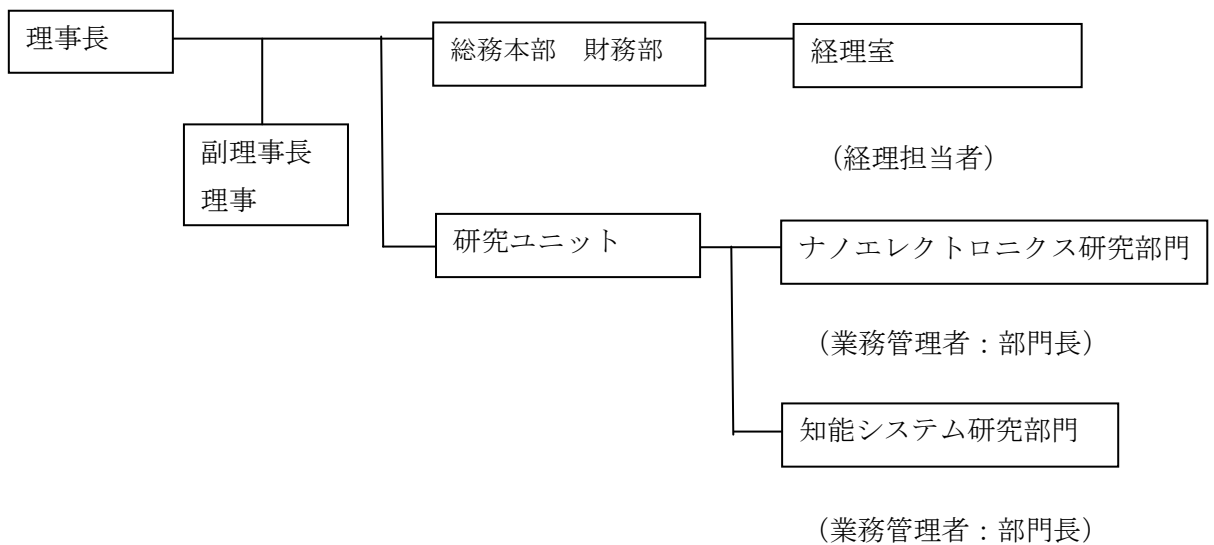
[ライトロン株式会社]



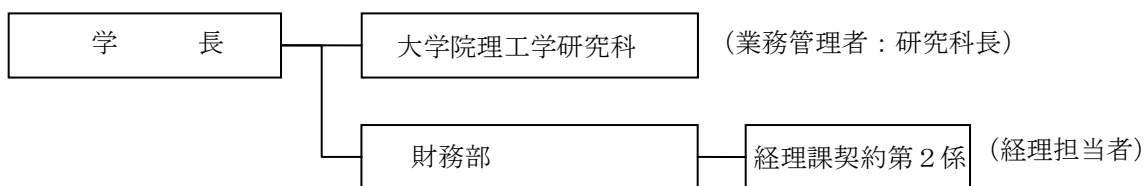
[株式会社オプセル]



[独立行政法人産業技術総合研究所]



[国立大学法人埼玉大学]



### (3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】財団法人埼玉県産業振興公社

管理員

| 氏名    | 所属・役職            |
|-------|------------------|
| 村上 征信 | 経営支援部企業支援グループ 主任 |
| 成松 康  | 総務企画部総務企画グループ 主任 |

【再委託先】

研究員

ライトロン株式会社

| 氏名    | 所属・役職   |
|-------|---------|
| 江口 満男 | 代表取締役社長 |
| 小林 優人 | 開発課長    |
| 濱中 清文 | 開発課 主任  |

株式会社オプセル

| 氏名    | 所属・役職   |
|-------|---------|
| 小俣 公夫 | 代表取締役   |
| 加藤 利徳 | 開発部 研究員 |
| 勝山 幹三 | 開発部 研究員 |

独立行政法人産業技術総合研究所

| 氏名    | 所属・役職                                       |
|-------|---|
| 戸田 賢二 | 知能システム研究部門統合知能研究グループ 主任研究員                  |
| 板谷 太郎 | ナノエレクトロニクス研究部門<br>新材料・機能インテグレーショングループ 主任研究員 |

国立大学法人埼玉大学

| 氏名    | 所属・役職                   |
|-------|-------------------------|
| 綿貫 啓一 | 大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門 教授 |

(4)他からの指導・協力者名及び指導・協力量項

| 氏名     | 所属・役職   | 備考     |
|--------|---|--------|
| 清水 徹   | ルネサスエレクトロニクス株式会社<br>技術開発本部プラットフォームインテグレーション統括部 部長     | アドバイザー |
| 原市 聡   | 独立行政法人産業技術総合研究所<br>エレクトロニクス研究部門 副部門長                  | アドバイザー |
| 久野 美和子 | 国立大学法人埼玉大学<br>地域オープンイノベーションセンター<br>産学官連携コーディネーター・特命教授 | アドバイザー |
| 秋山 喬   | 横河電機株式会社 技術開発本部<br>遺伝子計測研究所 顧問                        | アドバイザー |

1-6 当該研究開発の連絡窓口

(管理法人) 財団法人埼玉県産業振興公社  
経営支援部企業支援グループ 村上征信  
〒330-8669  
埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-7-5 ソニックシティビル10階  
電話048-647-4085 FAX048-645-3286  
E-mail: murakami@saitama-j.or.jp

(統括研究代表者) ライトロン株式会社  
代表取締役社長 江口 満男  
〒330-0803  
埼玉県さいたま市大宮区高鼻町1-80 アコルト大野  
電話048-647-9435 FAX048-657-3153

## 第2章 本論

### 2-1 画像処理ミドルウェアの開発

#### 2-1-1 超並列画像処理用ミドルウェア設計環境の構築

(独)産業技術総合研究所を中心として、ライトロン(株)・(株)オプセル・埼玉大学と連携して、コード開発システムおよびデバッグシステムを搭載した開発用コンピュータ・超並列演算回路(MXコア)を含む超並列プログラマブルデバイス(MX-1)内蔵のシステムLSI(Greco-E)を搭載した超並列画像処理の性能評価用ボード・エミュレータからなる超並列画像処理用ミドルウェア開発システム(図2-1-1、図2-1-2)を導入し、共通設計環境の構築を行った。統合開発環境としては、ルネサステクノロジ製のマイクロコントローラの組み込み用アプリケーションの開発プラットフォームであるHigh-performance Embedded Workshop(HEW)を用いた。MX-1は制御用CPUを内蔵しているため、MX-1向けのソフトウェア開発は、主にマイコン上のC言語環境を中心とした開発環境により構成される。MXコアの超並列演算に対しては、MX用マイクロコード生成ツールの「MXGEN」を使用してマイクロコード化したブロック関数の生成を行うことで、高速動作が可能な中間Cソースを生成している。ただし、HEWでは直接MXGENを制御できないので、バッチ処理によりMXGENを呼び出してマイクロコードを生成している。マイクロコードを生成した後、コンパイルおよび標準ライブラリやMXライブラリをリンクすることでロードモジュールを作成し、評価ボードおよび専用デバッガを用いてデバッグを行う。

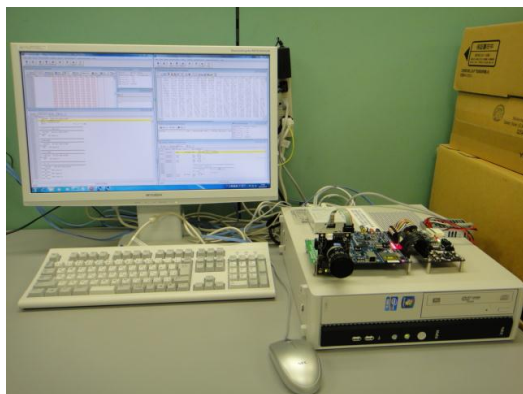


図2-1-1 ミドルウェア設計環境

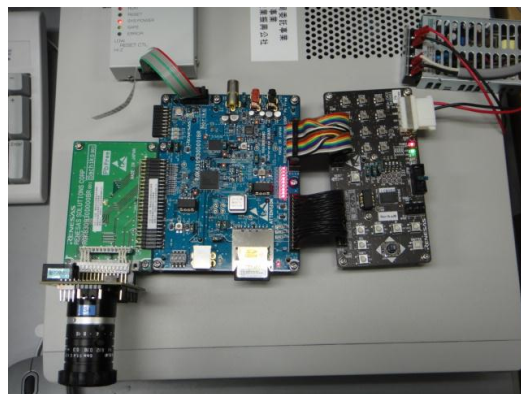


図2-1-2 ミドルウェア設計用評価ボード

デバッグにはJTAGRを用いて、メインCPU用のデバッガとMXコアのリソース情報を表示するMX拡張ウィンドウをアドオンしたサブCPU用デバッガの2つを起動し、協調しながらデバッグを行う。

#### 2-1-2 焦点補正ミドルウェアの開発

##### (1) 基本アルゴリズムの構築

焦点補正アルゴリズムとして Richardson-Lucy アルゴリズム (RL アルゴリズム) をベースに検討を行った。RL アルゴリズムはベイズの定理を用いた確率論的手法である。ただし、この手法では収束性が悪く、また除算が入るためしきい値の最適化などが問題になる。



図 2-1-3 元画像 (左) 画像 (中央) 復元画像 (右)

除算を使用した場合、干渉縞が現れる可能性があり、しきい値調整が難しい。

そこで、ライトロン (株) より提案された、RL アルゴリズムを簡略化し、畳み込み演算を利用したアルゴリズムを採用した。この手法による焦点補正の例を示す。左のかごの縄の目や猫の髭、イスの木目や傷がはっきり見えるようになっている。



図 2-1-4 元画像 (左) と超解像後の画像 (右)

これを高速に計算するには、フーリエ変換と画素毎の積和演算が高速に行えればよい。

## (2) 高速フーリエ変換

MX コアでは 1,024 エントリのビット演算を同時に計算できる。さらに各エントリに 1,024bit 幅があるので、回転子や作業領域をうまく設定することで 2 列分のデータを詰め込むことができ、つまり 2,048 個のデータを同時にバタフライ演算することができる。入力データは 1.15 フォーマット、回転子は 2.14 フォーマット、出力データは 17.15 フォーマットである。

1 回の FFT (2,048 データ、つまり 1,024 データ×2 列) にかかる計算時間は 4.7 $\mu$ 秒であった。1,024×1,024 の 2 次元 FFT にかかる計算時間はおよそ 48m 秒と見積もら

れた。(注：実際には行列の転置操作などを低速な制御 CPU で行っているためもっと時間がかかった。)

次に 1,024 個の各エントリ毎に、各画素においての焦点補正計算を行う。1,024×1,024 の 2 次元配列において漸化式の繰り返し回数を 5 回とした場合、計算時間はおよそ 64.3m 秒かかった。さらにこの結果を画像に変換するために 2 次元逆 FFT を計算するのに先ほどと同じ時間 48m 秒かかった。よって 1,024×1,024 の画像の焦点補正にかかる時間は

$$48\text{m 秒} + 64.3\text{m 秒} + 48\text{m 秒} = \underline{\underline{73.9\text{m 秒}}}$$

と目標値：VGA (1,024×768) 画像に対して 200m 秒以内を十分に達成できた。また、漸化式の演算においては、効率よくデータを詰め込むことでさらに高速化が可能であると考えられる。

### 2-1-3 画像接続ミドルウェアの開発

MX コアを用いて、画像サイズが 1,024×768 の 2 つの画像を単純接続するデモを行った。1 ライン 1,024 個のデータを 1,024 の各エントリに対応させ、さらに MTA の 512bit 幅に対して 2 つの画像からそれぞれから 8bit データ 32 列ずつ、即ち 64 列のデータに対して DMA 転送を行うことで並列処理を行う。そして、ライン毎に接続して、出力アドレスへ DMA 転送を行った。この場合の演算処理時間はおおよそ 11.7m 秒であった。ここで 32×32 画素で比較演算を行ったとしても、目標値である VGA 画像に対して、画像接続時間 100m 秒以下よりも十分速い処理速度が得られた。MTA には bit 幅が余っているので、効率よくデータを詰め込むことでより高速化をすることが期待できる。

### 2-1-4 スクラッチ・スポット検出ミドルウェアの開発

#### (1) 各フィルタ処理での演算時間の評価

以下の 22,000×22,500 画像の Sobel フィルタ、Prewitt フィル、Laplacian フィルタの各フィルタによる計算結果と計算時間を示す。どのフィルタでもおよそ 4,100m 秒程度で、VGA に換算すると、

$$4,100 / (22,000 \times 22,500) * 1,024 \times 768 = \underline{\underline{6.51\text{m 秒}}}$$

と、目標値：100m 秒以下よりも遙かに速く処理でき、さらに統計処理を行っても十分に目標を達成できる処理速度が得られた。

① Sobel フィルタでの処理

PC での処理 3,360,258m 秒, MX-1 での処理 4,100m 秒

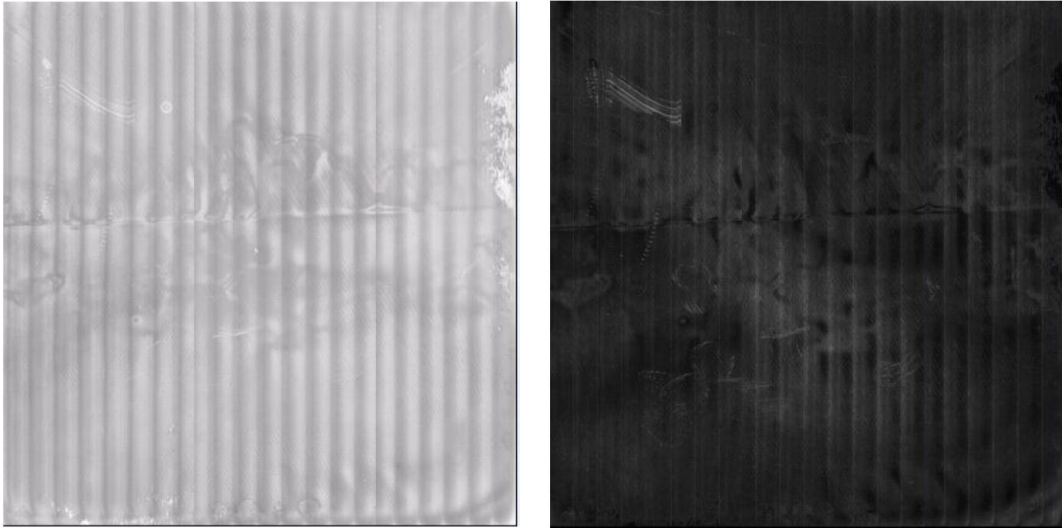


図 2-1-5 エッジ抽出処理前の元画像（左）と Sobel フィルタでの処理結果（右）

② Prewitt ソルバーでのフィルタリング処理

PC での処理 3,816,714m 秒, MX-1 での処理 4,100m 秒

③ Laplacian ソルバーでのフィルタリング処理

PC での処理 2,905,694m 秒, MX-1 での処理 3,678m 秒



図 2-1-6 Prewitt ソルバーでの処理結果（左）と Laplacian ソルバーでの処理結果（右）

また、スクラッチやスポット検出用のデモ画像において、以下のようにはっきりと検出できている。

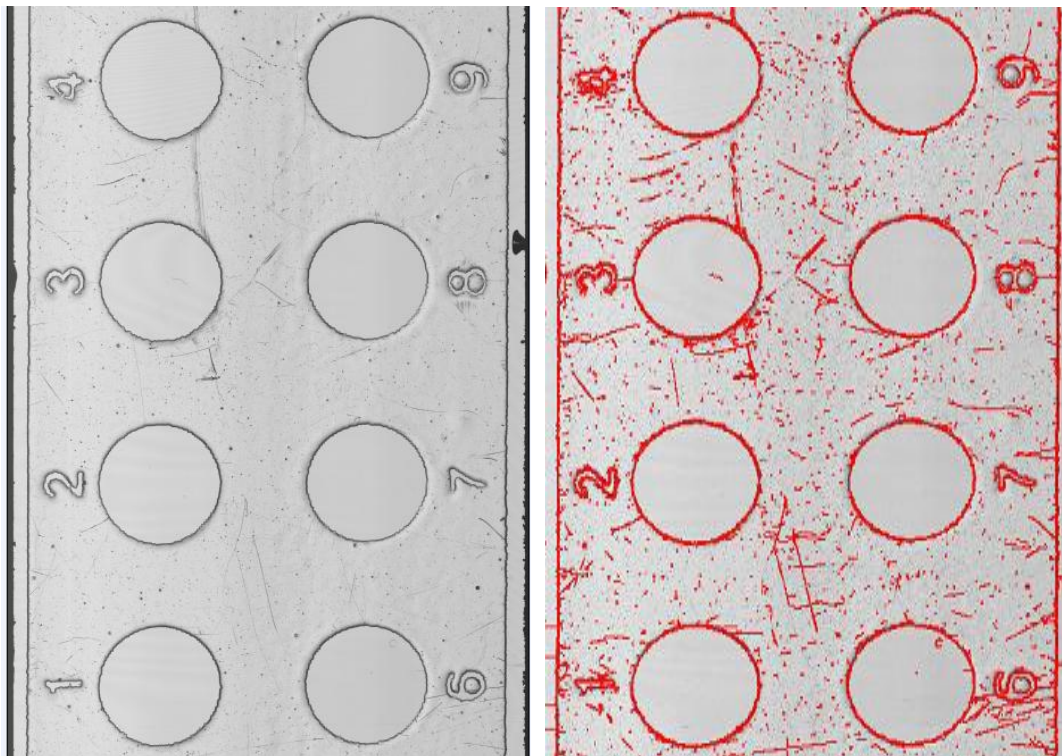


図 2-1-7 フィルタ処理前画像（左）とフィルタ処理済み画像（右）



## 2-2 光学計測システムにおける実証評価

### 2-2-1 内視鏡検査装置における焦点補正機能の搭載と実証

(実施機関：ライトロン(株)、産業技術総合研究所)

#### (1) 超解像の原理とハードウェア

超解像アルゴリズムを一言で言えば、反復計算により結像方程式の逆問題を解いて、劣化した画像から物体を求めるというものである。つまり、光学像形成過程の場合の魔物逆関数を見出し、劣化した画像情報から本来の情報を引き出すことが研究の内容である。実際の手法としては、原画像  $p(V)=F(x)$  が未知である時、これに何らかの初期推定値を与えれば、 $p(V|A)$  は像に基づいて、より原画像に近い画像を与えることになる。更に、これを劣化画像であるとして、繰り返し同じ演算を行うと、ますます原画像に近づく。初期推定値としては、劣化画像そのものを与えて良い。これが Richardson の魔物逆関数  $\Phi$  による復元方法である。これを完全に計算するには複雑で多大な時間を要する。レンズ自体の解像力が高く、画像の劣化が少ない場合は「超解像アルゴリズム」に要する時間が少なくすむが、コストが高くなる。つまり、時間と価格のトレードオフが生じる。そこで、「超解像アルゴリズム」をハードウェアで実行することが望ましい。下図 2-2-2 は「超解像アルゴリズム」を実行する FPGA ハードウェアの写真である。本開発のミドルウェア超解像装置でも全く同じ効果が得られた。



図 2-2-1-1 「超解像アルゴリズム」ハードウェア

#### (2) 実証手術 (以下は実証手術を行った施術者による報告の抜粋である。)

内視鏡下での鼻副鼻腔手術を東京厚生年金病院と聖路加国際病院の2施設で異なる内視鏡システムで行った。東京厚生年金病院では CCD は Stryker 社製 3-CCD ビデオカメラ 882TE、モニターは SONY 社製 トリニトロン PVM-1444 を使用し、聖路加国際病院では Olympus 社製 1-CCD ビデオカメラ Visera Pro OTV-S7、モニターは Olympus 社製 OEV191H を使用した。手術中は2台のモニターを用意し、一台は以前と同じレベル(原画像)で、もう一台は超解像ハードウェアを通した画像を OUTPUT し両者を比較した。

### 症例 1： 69 歳、男性、慢性副鼻腔炎（Stryker 使用）

以前より鼻閉が強く、近医で鼻ポリープを指摘され、東京厚生年金病院に紹介された。鼻内に大きなポリープは認めるが、CT スキャンでの副鼻腔陰影は軽度の症例であった。全身麻酔下に内視鏡下鼻内手術（以下 ESS とする）を施行した。（中略）超解像装置を通した画像は原画像と比較して、焦点が合い、微細血管も十分に確認できた。また、下鼻甲介からポリープ、後鼻孔まで奥行きを持って焦点を合わせる事が可能であった。（中略）超解像画像では篩骨洞天蓋の危険部位にも焦点が十分に合い、安心して手術が施行可能であった。

### 症例 2： 68 歳、男性、慢性副鼻腔炎（Stryker 使用）

詳細は不明であるが、30 年前に鼻内的にポリープを切除した既往がある。最近になり、鼻閉が悪化したため東京ウ厚生年金病院を受診した。（中略）術前の画像診断の通り、前篩骨洞は部分的にせつじょされおり、骨は硬く出血も多く手術操作は困難であった。しかし、特に後部篩骨洞の手術操作では、出血は多いが超解像ハードウェアを使用することで原画像と比べ、出血部位の同定、残存隔壁の状態が理解しやすく、迷う事が少なく手術が施行できた。

### 施術者による考察

超解像ハードウェアは、手術室で使用している内視鏡画像出力とモニターの間に接続するだけで、明らかに画質を向上し、奥行き感（焦点深度の深さ）を改善した。特に Stryker 社製の CCD カメラシステムを使用した場合、明らかな違いを実感する事が出来た。超解像ハードウェアの ESS への導入の利点として、（旧機器）を用いても、（最新機器と比較して）安価な投資で HD に近い画像が得られること、焦点が合わせやすく細部の再現性がよく、焦点深度が深くなる事が挙げられる。そのため、危険部位や乳頭腫などの進展範囲がより理解しやすくなった。（中略）特に篩骨洞天蓋などの危険部位において微細血管、病的粘膜、残存蜂巢が十分に理解でき、乳頭腫においては性状との区別が容易であった。また、好酸球性副鼻腔炎などの出血多い症例においても原画像と比べて手術が容易になった。（中略）今後は耳鼻咽喉科に限らず、全診療科において内視鏡手術や顕微鏡手術がますます増えると考えられ、有用な機器と考えられる。

以下の画像（図 2-2-1、図 2-2-2、図 2-2-3）は昭和医大および九州大学で行った内視鏡下での手術を録画したものの 1 場面である。施術者の感想と考察が画像を見ることによって、より理解できる。

内視鏡手術の画像例（昭和医大）

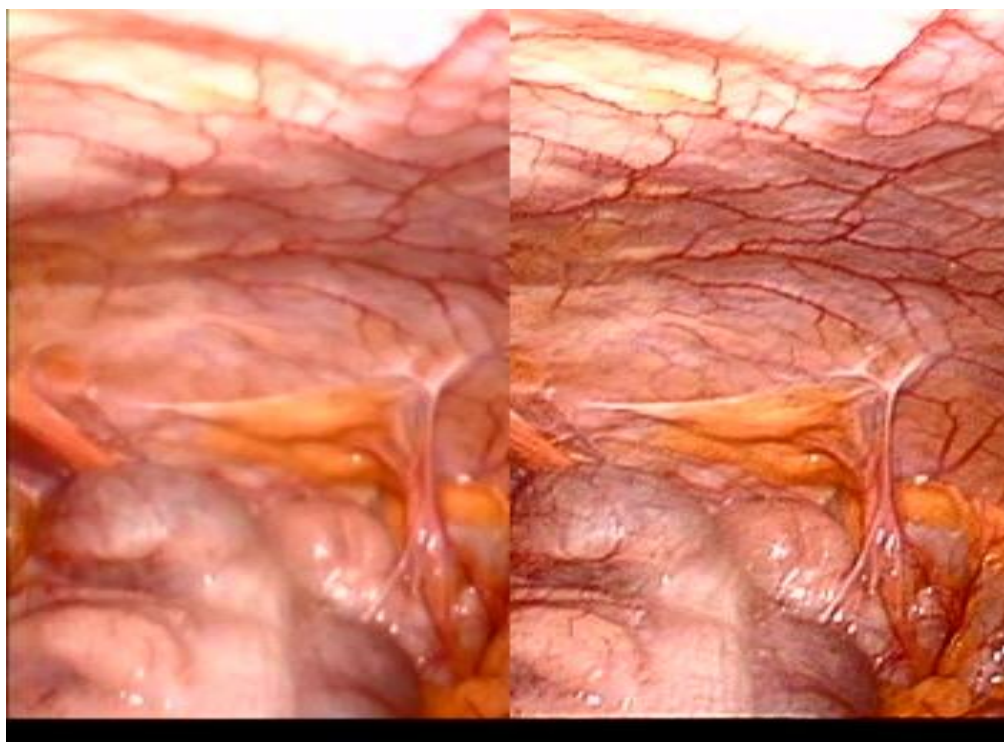


図 2-2-1 内視鏡画像（原画像）

超解像画像

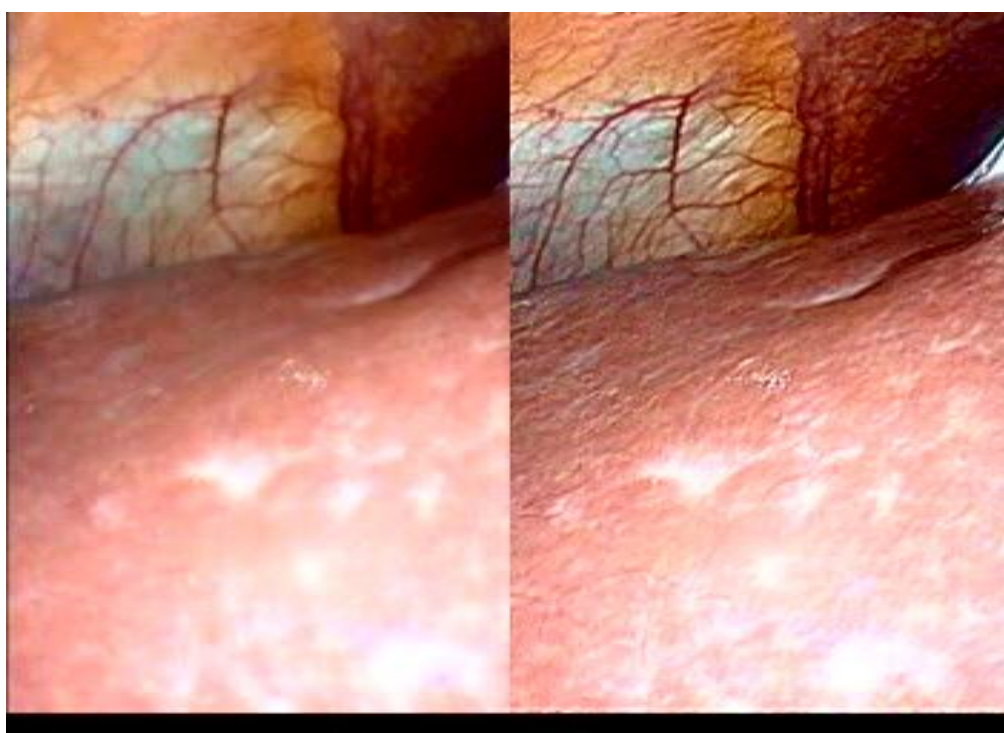


図 2-2-2 内視鏡画像（原画像）

超解像画像

## 内視鏡手術の画像例（九州大学）

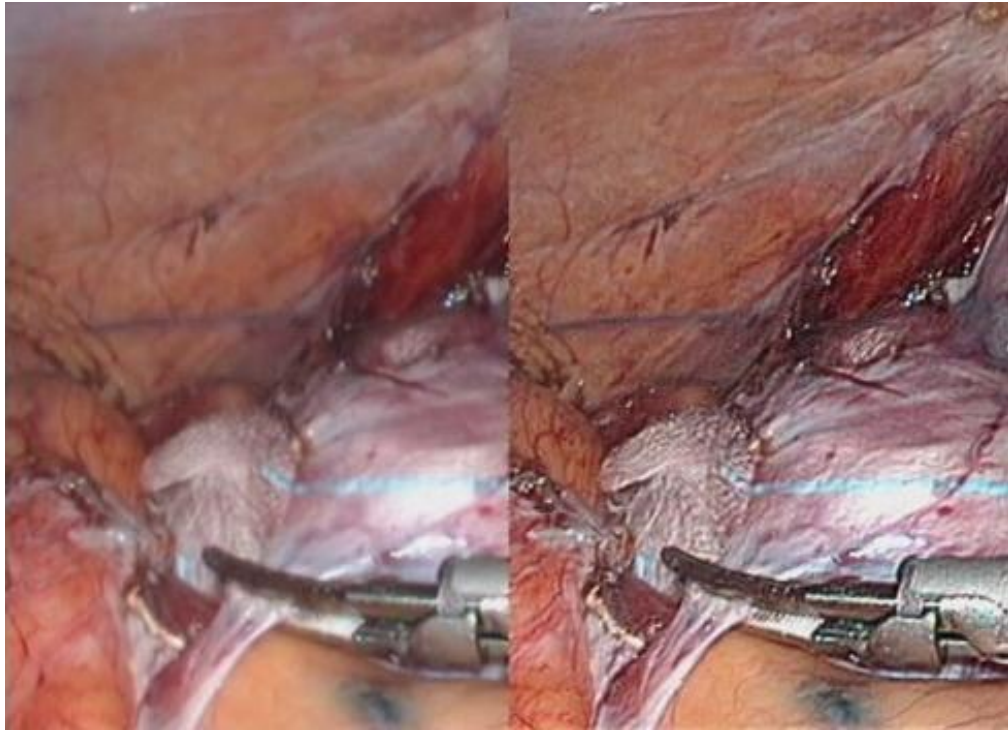


図 2-2-3 内視鏡画像（原画像）

超解像画像

### （2）まとめと今後の展望

実証手術により超解像画像処理による内視鏡手術や顕微鏡下手術の有効性が実証された。この結果、MX コアによるミドルウェア超解像装置を用い内視鏡手術が可能となった。また、画像処理時間は 10ms 以下、消費電力は 100mW 以下であることから、目標値を達成した。今後の展望については、超解像を用いた情報圧縮、通信、画像拡大など、超解像の応用分野は幅広いことから、応用開発に関しては、これからの実用化課題として取り組む。

## 2-2-2 レーザ走査イメージャによる画像接続・スクラッチ検出・スポット検出 機能の搭載と実証

(実施：株式会社オプセル、独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人埼玉大学)

### (1) レーザ走査イメージャ特別仕様機の仕様と構成

以下にレーザ走査イメージャの装置構成と概略仕様を示す。

光学装置部の構成を以下に示す。

光源 : 405nm 半導体レーザ  
走査部 : 8面ポリゴンミラー走査、24000rpm (MAX) 外部同期  
検出部 : レーザ走査共焦点方式+フォトマル  
走査幅 : 2.6mm (高解像度レンズ)、10mm (標準レンズ)、26mm (広域レンズ)  
信号出力 : 原点トリガ信号 5V TTL、フォトマル信号 0~1V DC

ステージ部の構成を以下に示す。

Xステージ (マイクロステップパルスモータ駆動) 移動量: 有効 200mm  
Yステージ (マイクロステップパルスモータ駆動) 移動量: 有効 200mm  
Zステージ (マイクロステップパルスモータ駆動) 移動量±5mm  
チルトステージ T1, T2 (手動) ±2.5度

エアージャックテーブル部を示す。

テーブルサイズ: 260mm (縦) × 260mm (横)  
吸着範囲 : 230mm (縦) × 230mm (横)  
真空ポンプ : ドライ真空ポンプ到達圧力: 26.6kPa、排気速度: 24L/mm

本体構造部

ベース : 石定盤  
装置外寸法 : 600mm × 600mm × 500mm (W × D × H) 重量: 約 60kg

制御BOX部

LD制御、ミラーモータ制御、PM (フォトマル) 制御、電源供給 DC24V、5V (LD、PM、PD、Pモータ)、パルスモータコントローラドライバー (メレック製)

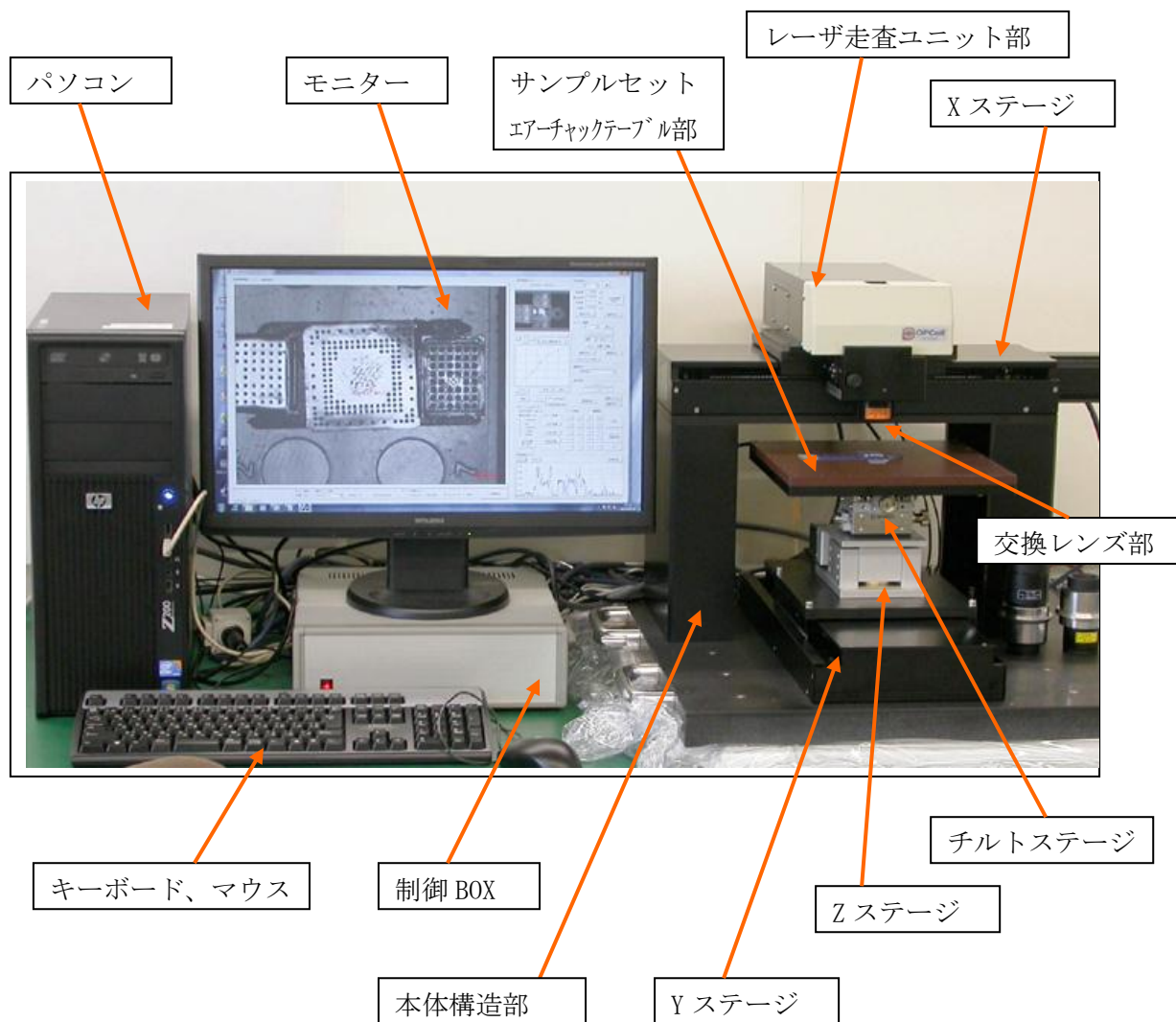
パソコン部

Dell 製パソコン OS: Windows-7  
A/Dボード : アキリス DP310  
PCI 入力ボード: メレック C-VX87 シリーズモーションコントローラ  
光学ユニット基本制御用ソフト、19インチモニター、キーボード、マウス

以下に開発製作された装置外観写真について説明する。

サンプルを Y ステージに取り付けられたサンプルセット台にセットして、サンプル上にレーザ走査ユニット部からレーザ光線を走査投光して、その反射光を光学ユニット内の受

光素子（フォトマル）でセンシングしてその信号をパソコンでデジタル処理してモニターに2次元画像を映し出すことで、高解像度で大きな領域の画像を取得するものである。



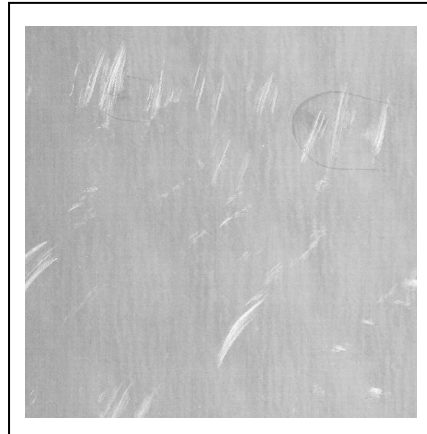
## (2) レーザ走査イメージャ画像の超解像処理結果

元画像に超解像処理を施した画像によるきず検出能力は魅力的で一定の評価が得られた。しかしノイズ成分も実画像として超解像化されてしまうので、今後はノイズ除去を加味して、研究することが必要と思われる。

### 画像サンプル評価例

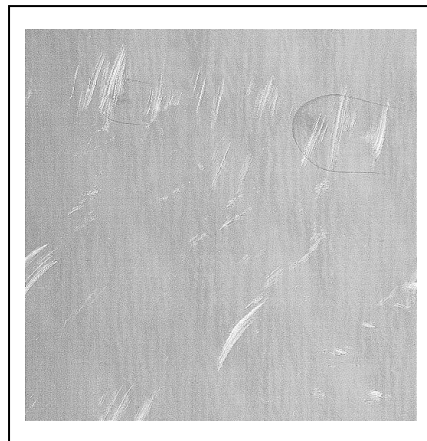
#### ①フィルム上のきず画像の例

レーザ走査イメージャの元画像



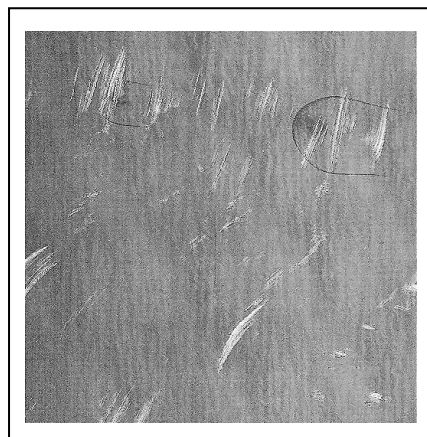
超解像処理をした画像

フィルム表面のキズが強調されて線幅が細くなっているのがわかる。これは、超解像処理の効果である。



超解像処理+エッジ強調をした画像。

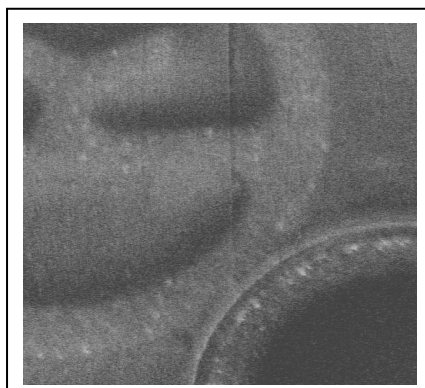
さらにキズが克明に出てきたが、ノイズ成分も増幅している。



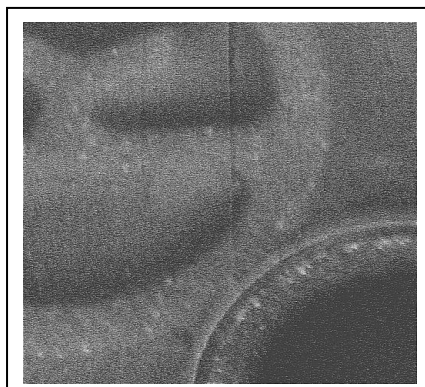
## 画像サンプル評価例

### ②PCB 基板画像の例

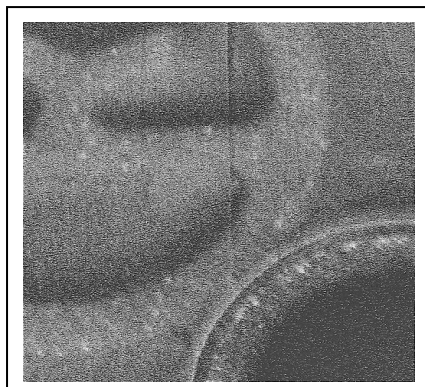
レーザ走査イメージャの元画像  
サンプル画像のフォーカスが悪い例



超解像処理をした画像  
表面の縦キズが強調され、線幅も細く  
なっているのがわかる。  
点キズも強調され、小さくなっている。  
また、コントラストがあがって検出しや  
すくなっている。  
これは、超解像処理の効果である。



超解像処理+エッジ強調をした  
画像。  
さらにキズが克明に出てきたが、  
ノイズ成分も増幅している。



### (3) まとめと今後の展望

今回の事業結果により、レーザ走査イメージャ装置と超解像技術の組合せにより従来の光学装置を超える新しい装置の誕生を迎える状況になったことは良いことであると思われる。考えられる代表的な新しい光学装置は、サブミクロン対応の高速で大きな領域の異物検査装置（LED 基板、有機 EL フィルム検査など）や非接触高速形状測定装置（微小金型、微小レンズなどの形状計測と表面観察が可能）などとなると思われる。また、画像処理時間は 10ms 以下、消費電力は 100mW 以下であることから、目標値を達成した。

今後は、今回の事業成果をより具体的にしていけるものとして、超解像技術を取り入れたレーザ走査共焦点型の光学装置でナノメータオーダーの観察ができる、量産現場での画像分析装置の開発を目指して行きたいと考える。



### 2-2-3 超解像画像処理とナノ構造の評価

(実施：ライトロン(株)、埼玉大学、産業技術総合研究所)

#### (1) 振動によるぶれの復元

検査装置においては、「ぶれ」があってはならないので防振装置が不可欠である。高精細なフォトマスク検査においては、防振装置自体相当高価なものになる。ここにも「超解像アルゴリズム」が適用でき、ぶれ画像自体から、ぶれの無い画像に復元することが出来るのである。これにより、高価な防振装置を省く事が出来る。

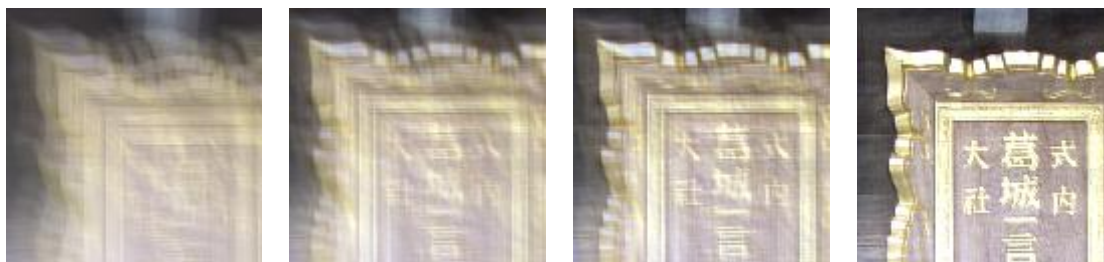


図 2-2-3-2 ぶれ画像 7 回反復後

20 回反復後

255 回反復後

図 2-2-3-2 は通常のデジタルカメラで撮影されたぶれ画像である。「超解像アルゴリズム」を適用すれば、ぶれ画像自体から、ぶれの無い画像に復元することが出来る。

#### (2) ナノ構造の評価例 半導体プロセスの場合

下図 2-2-3-3 の左側の画像は半導体の光学顕微鏡画像である。線幅が一番細いところが 200 ナノメートルであり、観察波長  $\lambda \approx 0.56 \mu\text{m}$ 、 $\text{NA} = 0.9$  の光学顕微鏡では解像限界を超えているため解像されていない。右は超解像した画像で一番細い線まで解像されている。

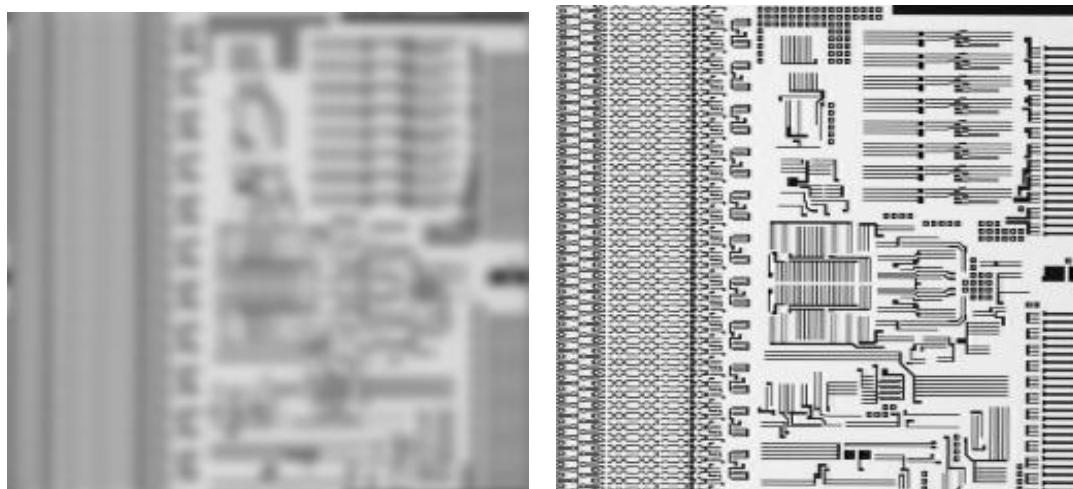


図 2-2-3-3 半導体の光学顕微鏡像 (提供：TSMC) と超解像した画像

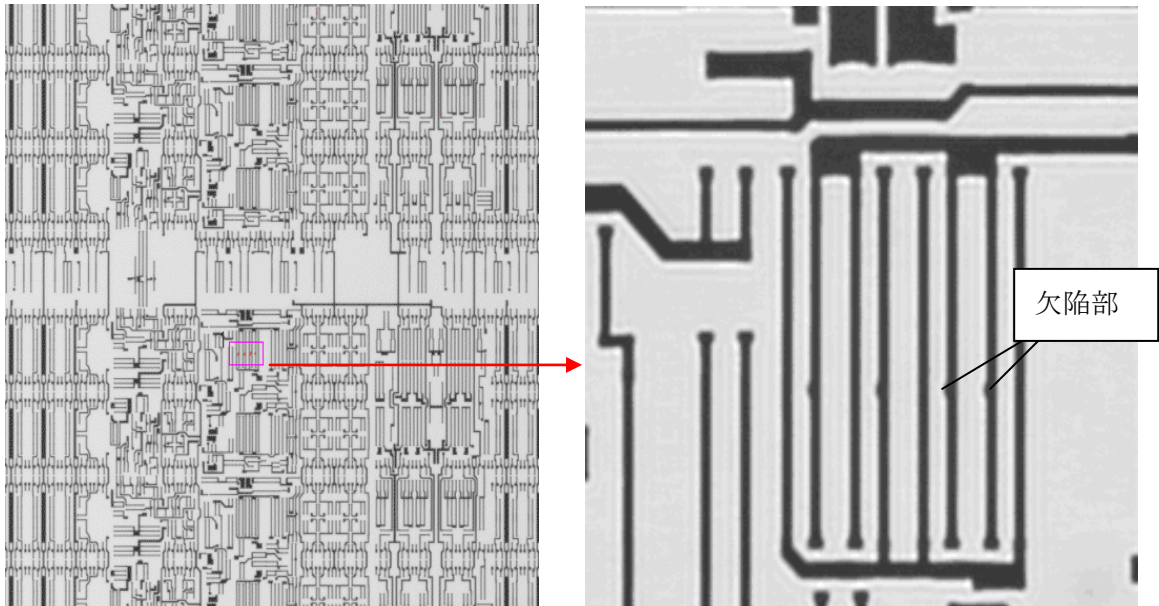


図 2-2-3-4 フォトマスク欠陥（ピンク部分）とその超解像拡大画像

図 2-2-3-4 は欠陥検査装置で発見された欠陥とその超解像拡大可視化画像である。元画像では見えない欠陥が超解像・拡大によって可視化されている。この画像は台湾 TSMC 社の協力の下に作成されたプログラム欠陥内蔵フォトマスクを用いた欠陥検査と欠陥可視化の実例である。

### (3) ナノ構造の評価例 細胞内観察用顕微鏡の場合

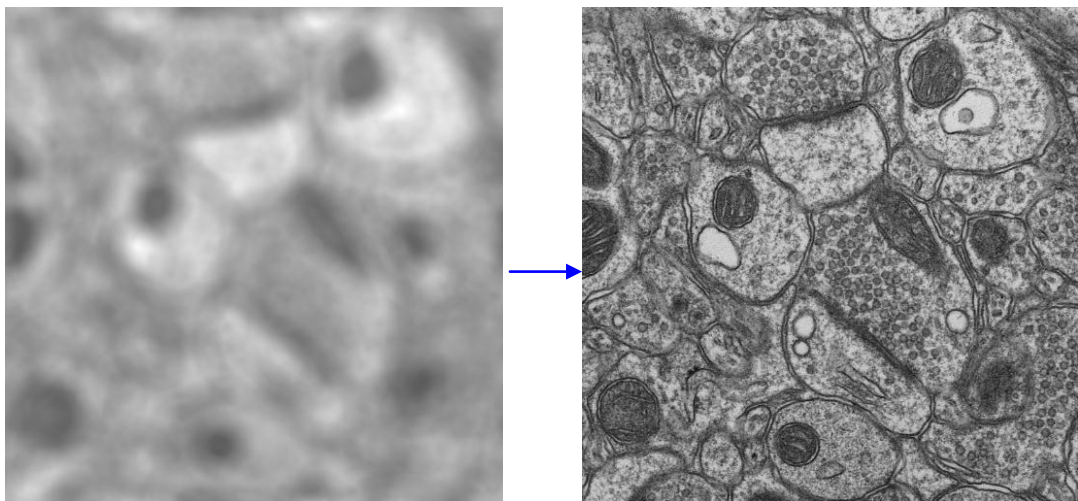


図 2-2-3-5 シナプス光学顕微鏡画像とその超解像画像

図 2-2-3-5 は脳細胞のシナプスの光学顕微鏡画像である。画像は  $512 \times 512$  ピクセルで 1 ピクセルは 5 ナノメートルである。勿論光学顕微鏡の解像限界を超えているため、解像さ

れていない。これを超解像したものが右の画像であり、5nm が完全に解像されている。このように本開発の成果としてナノ構造の可視化ができるとともに、MX コアによるミドルウェア装置を用いてリアルタイム超解像が可能となろう。(資料提供：東京大学医学部)

下図 2-2-3-6 は、細胞顕微鏡の画像である。1画素は 100 ナノメートル (nm) である。原画像は不鮮明であるが、超解像の結果、解像度の向上した鮮明な画像が得られる。(資料提供：東京医科歯科大学)

以上の実証試験により超解像画像処理とナノ構造の評価については目標を達成した。

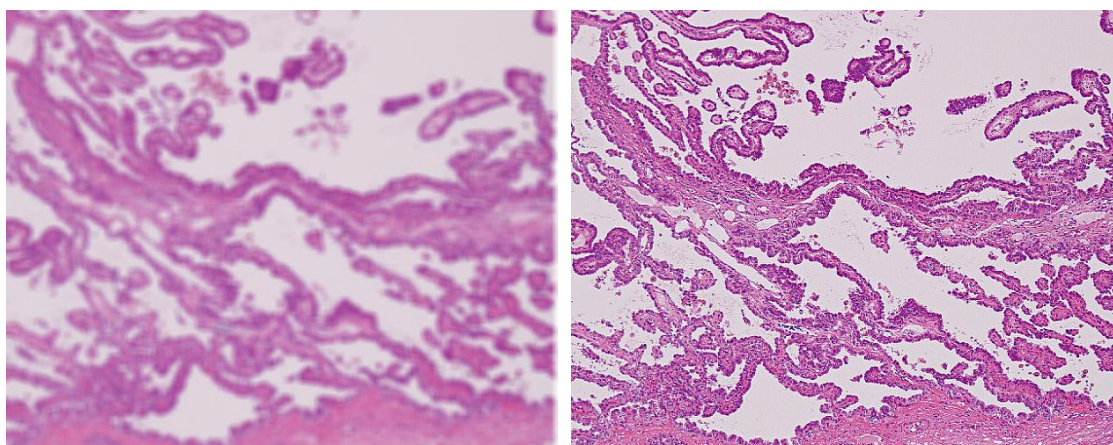


図 2-2-3-6 細胞顕微鏡画像とその超解像画像

#### (4) まとめと今後の展望

実証試験により超解像画像処理とナノ構造の評価については解像度 100 ナノメートル (nm) という目標を達成した。この結果、MX コアによるミドルウェア超解像装置を用いてナノ構造の評価が可能となった。また、画像処理時間は 10ms 以下、消費電力は 100mW 以下であることから、目標値を達成した。

「照明系・光学系の配置を利用した超解像技術による装置」と「超解像アルゴリズム」の組み合わせや、超解像を用いた情報圧縮、通信、画像拡大など、超解像の応用分野は幅広く、今後の実用化開発に関しては、これからの開発項目としたい。

#### 参考文献

- 1) 久保田 広, 「応用光学」, 岩波全書.
- 2) Max Born & Emil Wolf, “Principles of Optics Pergamon Press,”  
草川・横田 訳, 光学の原理 II, 東海大学出版会.
- 3) 江口満男, 特許第 4124747 号.
- 4) 河田 聡 編, 「超解像の光学」, 学会出版センター.
- 5) 早水 良定, 「光機器の光学 II」, JOEM.
- 6) B. Lucy, “An iterative method for the rectification of observed distributions,”  
Astron. J. 79, 745-754 (1974).

### 第3章 まとめ

本技術開発は、最先端の画像処理集積回路を用いて、ミドルウェアプラットフォームを構築し、内視鏡の自動焦点補正システムと、レーザ走査イメージャで実証試験を行うとともに、波長以下の超解像イメージングの検証を目的とした実証開発を行った。

画像処理プラットフォームの構築においては、ルネサスエレクトロニクス株式会社から購入したMXコアと呼ばれる最先端の超並列画像処理集積回路とそれを用いた設計環境の導入を行い、ライブラリの構築とプラットフォームの形成を行った。

プラットフォームの構築では、基本となるフーリエ変換、焦点補正、画像接続の基本ライブラリを整備するとともに、スクラッチ・スポット検出用に、エッジ抽出用の差分フィルタ・ブリューフィットフィルタ・ソーベルフィルタ・ラプラシアンフィルタ・ログフィルタの適用を行った。これらの画像処理時間は10m秒以下であり、目標の100m秒を遥かに上回る高速性が実証され、リアルタイムでの画像処理が可能であることが示された。

内視鏡における自動焦点補正に関しては、ライトロン株式会社が担当し、内視鏡画像の焦点補正について、昭和医大および九州大学で行った内視鏡下での手術画像に適用することにより、実用的な焦点補正画像が得られるとともに、目標値を達成した。内視鏡による高速・高品質な画像処理技術は、耳鼻咽喉科に限らず、今後は全診療科において内視鏡手術や顕微鏡手術がますます増えると考えられることから、今後の大きな発展が期待されると考えられる。

レーザ走査イメージャの画像接続と検査に関しては、株式会社オプセルが担当し、各種基板に対する画像処理評価を行い、その有効性を確認するとともに、目標値を達成した。レーザ走査イメージャは大面積を高精度に検査する装置であることから、解像度と高速計測を両立する必要があることから、高速な画像処理が必要とされる。通常の顕微鏡と比較して、視野領域を100倍以上にした対物レンズの試作を行い、テストチャートを用いて解像力試験を行い、設計どおりの良好な測定結果を得た。試作システムを用いてフィルムとPCB基板の測定評価を行い、従来の性能を超える基板検査システムの実証に成功した。今後は、サブミクロンの超解像性能を活かすことにより、LEDや有機EL用のフィルム等に対する非接触高速形状測定装置等への展開が期待される。

超解像技術に関しては、半導体分野におけるフォトマスクの200nmレベルのパターン欠陥の検出、電子線露光法で形成された100nmレベルの金属配線の形状観察、細胞内の微細構造の検出等、多様な分野で、超解像画像処理技術の実証を行った。半導体の微細加工技術の進展に伴う各種検査機器の高度化、再生医療を含む細胞処理における細胞内組織の直接観察は、今後の大きな市場開拓に貢献すると期待される。

最後に、本技術開発において、目標を達成するとともに、今後の発展に繋がる結果が得られたことは、ライトロン株式会社、株式会社オプセル、国立大学法人埼玉大学、独立行政法人産業技術総合研究所の関係者の多大な努力によるものであり、ここに感謝の意を表します。また、プロジェクトの推進に当たり、多大なご尽力を頂いた財団法人埼玉県産業

振興公社様、ご指導頂いた関東経済産業局様に、感謝の意を表します。本技術開発が埼玉から日本、更には世界に広がる画像処理プラットフォームへと発展することを祈願するとともに、企業活動の発展と、研究開発活動の益々の深化と広がりをもたらすことを祈念致します。