

薄型光・電子融合情報システムの研究開発

薄型光・電子情報システム研究Gリーダー

谷田 純(大阪大学)

1. 研究の目的

本研究は、本事業での研究テーマの一つである光・電子融合情報システムの研究開発における具体的アーキテクチャとして、複眼光学系と光・電子融合技術に基づく薄型画像入力システム TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics)の開発を目的とする。本研究では、TOMBO アーキテクチャの原理確認、評価プロトタイプの試作、画像再構成アルゴリズムの開発により、提案システムの有効性を評価し、実用化への問題点を明らかにする。

2. 研究テーマの内容の概要説明(含 研究目標、数値目標等)

研究目標・数値目標

フェーズ 1 :

ダイオードアレイ(画素数 16×16 , 画素サイズ $1\text{mm} \times 1\text{mm}$)と平面型光学素子アレイの集積化を行い、実証モジュールの試作を行う。

フェーズ 2 :

信号数の高密度化を進め、イメージセンサと平面型光学素子アレイの集積化を行う。さらに、電子処理系との融合を行い、携帯型情報システムのプロトタイプ(画素数 500×500 , モノクロ)の試作をめざす。

研究概要

図1に TOMBO アーキテクチャの概念図を示す。昆虫等に見られる複眼光学系を利用して光学系の作動距離を短縮させる。ここでは、一つのレンズに対応する光学系をユニットと呼び、そこで得られる画像をユニット画像と称する。それと同時に、複数のユニット画像の情報をデジタル処理により統合して、画像情報の再生を図る。図2に示すように、マイクロレンズアレイと固体撮像素子の一体化によりコンパクトな実装形態が得られる。また、デジタル処理の柔軟性により取得画像の高画質化が可能となる。

また、TOMBO の発展形として、複数の固体撮像素子により構成される TOMBO II アーキテクチャを検討する。TOMBO II アーキテクチャは、固体撮像素子における画素のクラスタ化、固体撮像素子のマルチチップ化、マルチチップ基板のフレキシブル化を特徴とする。

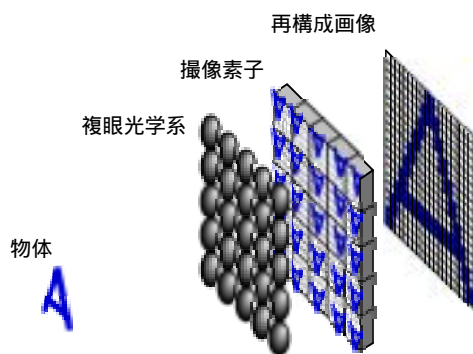


図 1 TOMBO 概念図

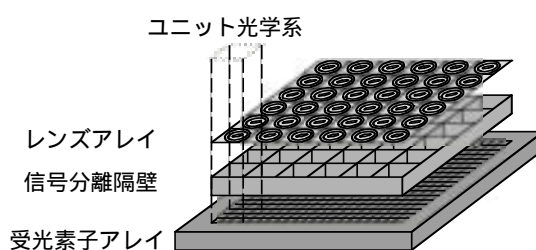


図 2 TOMBO 実装形態

周辺技術動向

コンパクトな画像入力装置は、デジタルカメラやカメラ付き携帯電話の急速な普及に伴い、各方面で研究が進められている。常時携帯するためには装置の小型化は必須であり、多くの技術が存在する。最も簡単な方法は、撮像素子・結像レンズの小型化によるもので、1/4～1/9 インチ型の撮像素子を用いて、厚さ 5～7mm の撮像モジュールが開発されている。しかし、厚さに関しては物理限界に近づいており、さらなる薄型化には新しい方式が必要な状況にある。

一方、複眼光学系を用いた画像入力システムのアイデアは、微小マイクロレンズ製造技術の発展とともに生まれ、いくつかのデモンストレーションシステムが試作されている。ただし、基本的には昆虫における連立眼光学系の模倣であり、ハードウェアの提示はされるものの、良好な画質の画像取得を実現した例は見られない。

特許マップ・技術マップ

複眼構造を用いた画像入力装置を中心に、技術動向を調査した。複眼構造に関する研究は比較的古くから研究開発が行われており、様々なシステム・構成が提案されているが、隔壁構造をもったものは存在しない。TOMBO 周辺の技術マップ・特許マップ図を最後に添付する。

3. 5 年間での研究成果報告

フェーズ：

TOMBO アーキテクチャによる画像取得の原理を確認するため、CCD カメラにマイクロレンズアレイを装着した評価システムを試作した。システム仕様は画素数 739×575、ユニット当りの画素数 16×16、ユニット数 46×35 とした。

TOMBO では、イメージセンサ・隔壁・レンズアレイの位置合わせを精密に行う必要がある。そこで図 3 に示すように TOMBO 用イメージセンサ及び市販 CCD カメラのいずれにも対応できる 6 軸精密位置合わせ治具を設計・製作した。マイクロレンズアレイとして、電子ビーム描画による回折レンズ、光硬化性樹脂による屈折型レンズを検討したが、いずれも優れた結像は得られなかった。そこで、イオ

ン交換技術による平板マイクロレンズアレイ（口径 $250\mu\text{m}$ ，焦点距離 $650\mu\text{m}$ ，屈折率分布型，日本板硝子製）が白色光照明下でも良好な結像特性を示すため，評価システムに採用することとした．

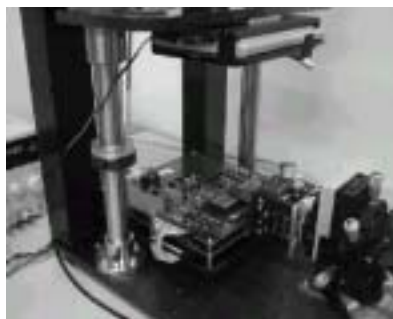


図3 位置合わせ治具

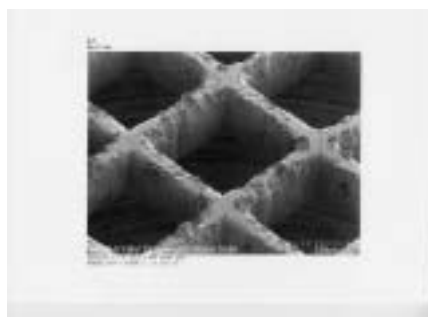


図4 隔壁(レーザー加工)

画像取得時における隣接ユニット間の混信対策として，ユニットの境界に信号分離隔壁を導入した．通常の光学系では開口絞りがその目的で用いられるが，薄型化のためには挿入箇所がない．モジュールの構造隔壁としての役割も果たす信号分離隔壁の導入は本モジュールの大きな特徴といえる．隔壁は，YAG レーザーによる加工でピッチ $250\mu\text{m}$ ，高さ $250\mu\text{m}$ と $500\mu\text{m}$ ，厚さ 30 から $60\mu\text{m}$ を試作した(図4)．隔壁表面は反射率透過率を極力抑えるように，黒化处理した．

撮像素子として， 320×240 画素 CMOS イメージセンサを試作した．画素ピッチ $12.5\mu\text{m}$ のセンサを $0.6\mu\text{m}$ 標準 CMOS プロセスで試作した．試作は2回行い，2回目の試作では出力インピーダンスを1回目の試作品の30%に低減し，センサ周辺回路の影響による出力信号波形劣化を防止した．このセンサによって，TOMBO の良好な撮像が可能となった．

画像再構成アルゴリズムとして，サンプリング法，相加平均法，システム行列法を考案し，評価システムで得られた複眼画像信号から画像再構成が実現できることを確認した．サンプリング法では，サンプリング位置の変更により，正立像だけでなく回転像・拡大像などを得ることができる．相加平均法では画質改善は見られなかった．システム行列法ではコントラストが向上できたが，格子状の雑音が顕著であった．

また，TOMBO の発展型として，TOMBO II アーキテクチャを検討し，シミュレーション実験により，情報欠落画素の減少，視野の拡大において有効であることを確認した．また，専用イメージセンサ（画素ピッチ $60\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}$ ， 8×8 画素 / クラスタ， 4×4 クラスタ / チップ）を設計し， $0.6\mu\text{m}$ CMOS プロセスにより試作した．さらに，他の光・電子融合情報システム例として，並列マッチングアーキテクチャを考案し，プロトタイプを試作して，その基本特性を評価した．マルチプロセスシステムにおける機能性インターコネクションの実施例として位置づけられ，光と電子の協調による情報システムの可能性を示すことができた．

フェーズ :

【TOMBO】

フェーズ I の検討をもとに，CMOS イメージセンサの高精細・高解像度化，画像再構成アルゴリズムの改良および隔壁の改良を行いシステム性能の向上を図った。

画像再構成アルゴリズムとして，画素再配置法を考案した（図 5）。画素再配置法では，TOMBO の光学系配置に基づいて各ユニット画像内の画素を仮想平面上に再配置する。各画素の位置情報は，ユニット画像間の相関演算を用いて算出する。このとき画素サイズのスケーリングを行わず，画素情報が得られない画素は補間処理により情報を補い，エッジ強調などの画像処理により最終出力を得る。取得した画像信号に対する加工が含まれないため，雑音成分が増幅されず，優れた画質を得ることができる。

平板マイクロレンズアレイ（焦点距離 $650\ \mu\text{m}$ ，レンズピッチ $250\ \mu\text{m}$ ），LIGA プロセスを用いた隔壁（ピッチ $250\ \mu\text{m}$ ，高さ $500\ \mu\text{m}$ ，厚さ $20\ \mu\text{m}$ ：図 6）および試作した CMOS イメージセンサ（画素数 320×240 ，ユニット数 8×8 ，ユニット画素数 25×25 ，ユニット幅 $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ ，画素間隔 $10\ \mu\text{m}$ ：図 7）によるプロトタイプシステムで取得された複眼画像に画素再配置法を適用し，比較的良好な再構成画像が得られることを確認した。

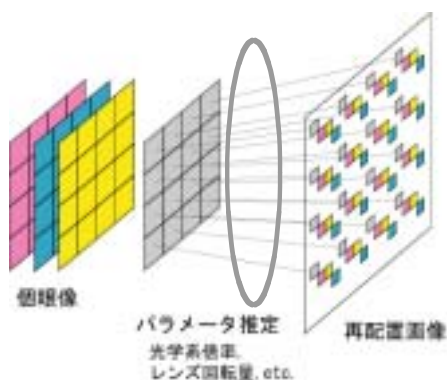


図5 画素再配置法

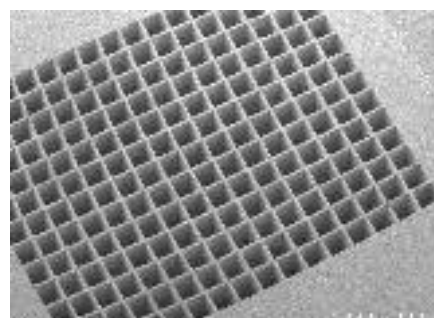


図6 隔壁(LIGA プロセス)

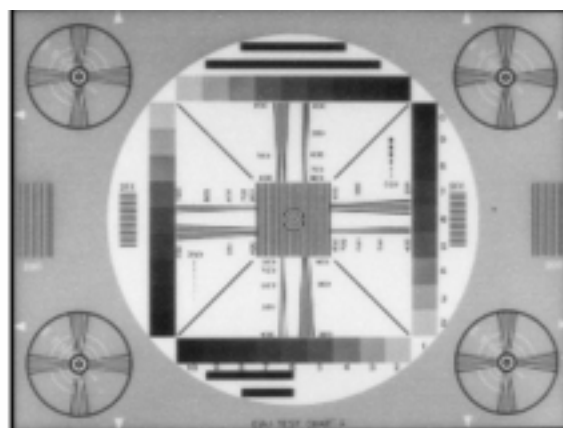
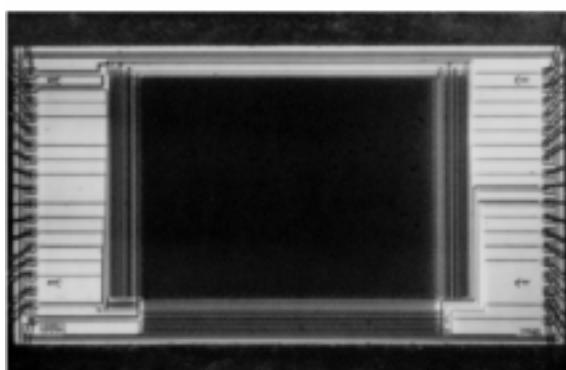


図7 試作 CMOS イメージセンサと解像度チャート

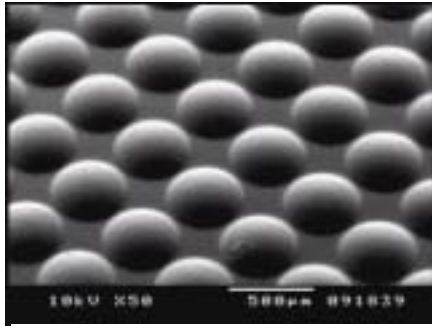


図8 マイクロレンズアレイ

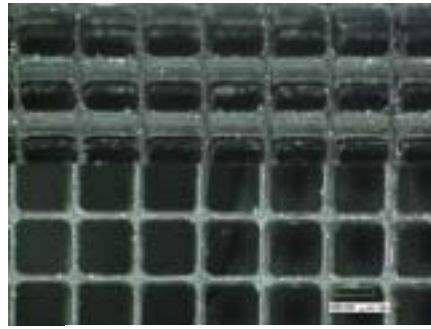


図9 隔壁（熱圧着法）

試作システムによる実験結果およびシミュレーション結果を参考に、TOMBOアーキテクチャにおけるユニット数とユニット画素数が再構成画像の解像度を与える影響を検討し、ユニット数が少ないほど、良好な解像度が得られることを確認した。しかし、実際には、受光素子の開口サイズと光学系の解像度や収差特性とのバランスが保たれる範囲であれば、複数ユニット構成であっても解像度低下の補償は可能であると考えられる。ユニット数に関する検討から、ユニットサイズ $500\ \mu\text{m}$ の新しい実験システムを試作した。試作システムでは、新規に焦点距離 $1.3\ \mu\text{m}$ 、口径 $500\ \mu\text{m}$ を用いた(図8)。また、隔壁には SUS の薄板をエッチングにより加工したものを熱圧着により複数枚重ね合わせたものを用いた(図9)。

試作システムとして、上記構成部品を一体化したモジュールを作製した。マイクロレンズアレイとイメージセンサの位置合わせを精密に行うため、再配置画像を観測しながら位置合わせを行う方法を用い、ウォームギアの追加によって回転精度を向上させた位置合わせ治具と、(有)画像システム開発製作の駆動および画面再配置処理回路を用いて位置合わせを行った後、貼り合わせを行った。図10に試作した一体型の概観写真を示す。セラミックパッケージの厚み含んだ状態で、厚さ4ミリのモジュールが実現できた。

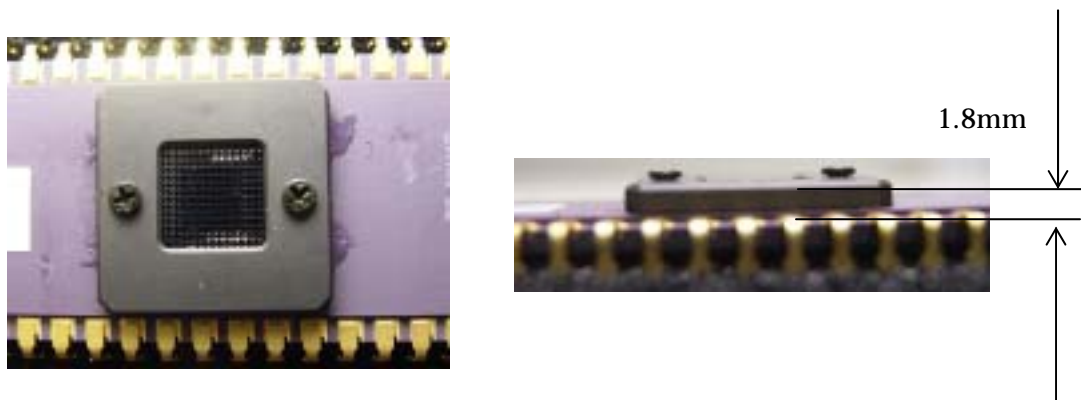


図10 一体型 TOMBO モジュール

更なる画質の改善方法として、ユニット画像間の相関演算方式の変更、隣接画素値の平滑度規範による反復アルゴリズムの開発、ユニット画像レベルにおけるシェ

ーディング補正の導入を行い、それらの有効性を確認した。実験システムでは、マイクロレンズアレイとイメージセンサのアライメントずれや、個々のマイクロレンズの光軸や焦点距離のばらつきなどの影響により、単純な相関演算による処理だけでは格子状雑音が残留する。この場合、レンズアレイの平行移動、回転を考慮した反復アルゴリズムが画質改善に極めて有効であることを明らかにした。

カラー画像の取得では、画素ごとにカラーフィルタが配置される場合（既存のカラーCCDの方式）と、ユニットごとにカラーフィルタが配置される場合（ミノルタ考案の方式：図11）とを比較した。画素再配置法を適用する場合、後者では問題なく画像再構成が行えるのに対し、前者では再配置面上で色チャンネル情報がクラスタ化することを明らかにした（図12）。さらに、この解決法として、従来の半分の距離で物体を撮影する方式を考案し、その条件において、空間の一点の情報を複数の受光素子で観察できるマルチチャンネル情報の取得ができることを見いだした。

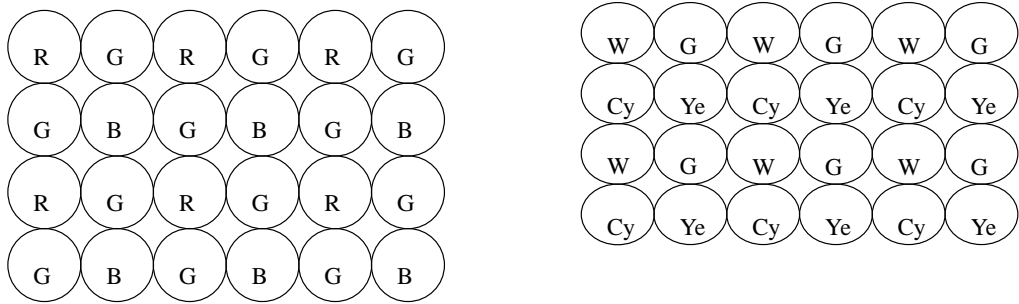


図11 TOMBOカラー化におけるフィルタ配置図

カラーCCD（画素数 2384×1734 ，ユニット数 10×10 ，ユニット画素数 160×160 ，画素ピッチ $3.125 \mu\text{m}$ ）を用いたプロトタイプシステムで得られた複眼画像に対して、画素再配置法を適用し、高品位のカラー画像が再構成できることを確認した（図13）。

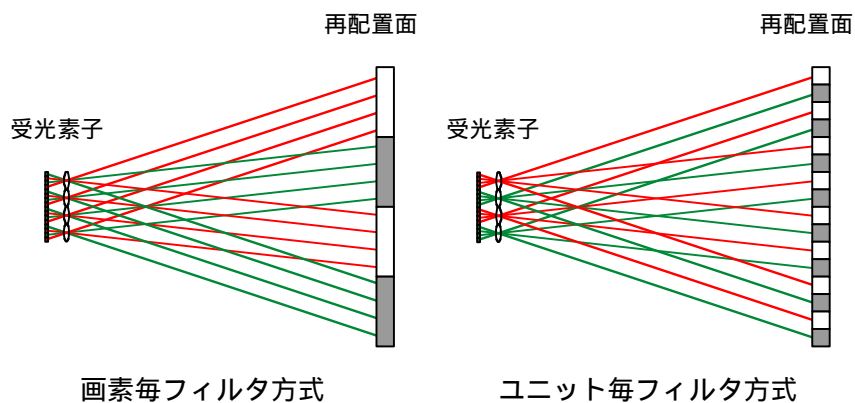


図12 カラーフィルタによる影響の違い



図 12 カラー再構成画像 . (左)ユニット画像 , (右)再構成画像

【TOMBOII】

フェーズ I に引き続き , 実証システムの試作を行った . マイクロレンズアレイは , 本プロジェクトで製作可能な回折型のレンズを使用した . また , 受光素子として東京大学の VDEC を利用して , CMOS イメージセンサーを製作した . ユニットあたりの受光セル数は 32×32 , ユニット数は 2×2 とした . チップ数は 4 個とした . 図 13 に試作したセンサーおよび駆動回路を示す . 画像再構成は , 基本的に TOMBO で使用した画素再配置法を使用し , 4 つのチップが変化する角度に応じてパラメータを調整して画像再構成を行った . 図 14 に示すように , 若干の縞が発生する . これは CMOS イメージセンサーの画素からの信号が欠落しているために , 生じていると考えられる .



図 13 TOMBOII 試作システム

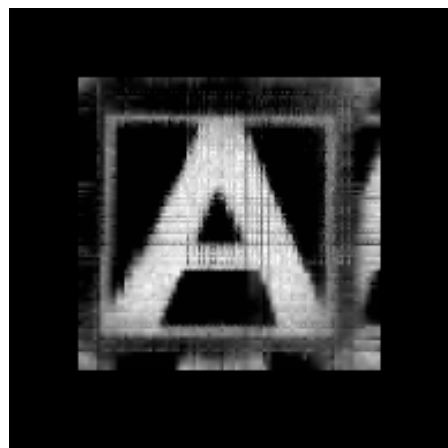


図 14 4 チップによる再構成図

4. 研究目標に対する達成度

フェーズ については、ダイオードアレイ等の個別部品による実証システムの試作を計画していたが、CCD カメラによる方式に変更し、その結果、数値目標(画素数 16×16)を大幅に上回る仕様(画素数 739×575)を達成することができた。TOMBO アーキテクチャの原理確認についても良好な結果が得られ、システムに関する十分な情報が得られた。

フェーズ については、信号数の高密度化を進め、こちらも数値目標(画素数 500×500 , モノクロ)を大きく上回る仕様(画素数 1600×1600 , カラー)のプロトタイプシステムによる高品位画像の取得を実現できた。画像再構成アルゴリズムに関しても、拡張性の高い方式の開発ができた。また、TOMBO システムの応用としてフレキシブル基板上に TOMBO を複数配置した TOMBOII を試作し、曲げ角などの基本的な情報を取得することができた。

なお、当初計画では電子系との融合を掲げていたが、この点については、本方式の特徴である画像取得技術に集中して研究を進めた方がよいとの判断から、研究期間内での実施を見送った。

5. 成果活用に関する報告

TOMBO の基本原理に関する特許出願(特開 2001-61109, 画像入力装置)は現在審査請求中である。周辺特許は、電気的な再構成処理(特願 2001-337227, 画像再構成法及び画像再構成装置)、カラー化方式(特願 2001-363117, 画像入力装置)、TOMBO II アーキテクチャ(特願 2002-83714, 複眼画像入力装置)の審査については未請求である。

6. フェーズ (5年終了後以降)の取り組みの予定

平成 14 年 1 月より、科学技術振興事業団重点地域研究促進事業における研究成果活用プラザ大阪の研究課題として「超薄型画像入力モジュール」が採択され、平成 16 年 9 月までの研究期間で、ミノルタ(株)および大日本スクリーン製造(株)とともに、実用化に向けた研究を進めている。高解像化とカラー化の手法を確立するとともに、本システムの特徴を発揮しうる応用について探索する。

さらに、ソニーセミコンダクター、ミノルタ、大阪大、OSTEC 等で実用化にむけた共同研究体制が取られる予定である。

7. まとめ

光・電子融合情報システムのアーキテクチャとして、複眼光学系と光・電子融合技術に基づく薄型画像入力システム TOMBO に関する一連の研究についての成果報告をまとめた。最終的に得られた再構成画像は、TOMBO アーキテクチャの潜在能力を示すとともに、実用化への課題も提示している。今後のさらなる研究により、光と電子の特徴を有効に活かした実用的な光・電子融合情報システムの実施例となることが期待される。