

論文の内容の要旨

論文題名： 空間光変調デバイスを用いた光情報処理システムに関する研究

氏 名： 豊田 晴義

光は本質的に、2次元画像情報をそのまま伝送・演算できる特長を持っている。さらに、電気信号と比較した場合、光の持つ非干渉性を利用することにより、処理の超並列化(=多重化)・超高速化が、処理系をそれほど複雑化せずに拡張できることになる。しかしながら、これまでのところ「光コンピュータ(=光情報処理システム)」は幅広い実用システムに至っていない。我々は、この理由として、1) 適応性の不足(プログラムの概念の導入が難しい)、2) 安定性の不足(アーキテクチャとデバイス技術の最適化設計の重要性)、3) 実証実験の不足(実証システム・フィールドテストの不足)、という3つの点に着目し、これらを克服した光情報処理システムの構築を目標とした。

以上のように本論文では、光情報処理システムの実用化を念頭に置き、その基本デバイスである空間光変調器を中心に、種々の光情報処理デバイスおよび光情報処理モジュールの研究開発を行い、この基本デバイスを用いたいくつかの情報処理システムを設計・構築して実証実験を進めた。具体的には、先にあげた3つの課題に対して、(1) 適応性の付与による光情報処理システムの汎用化(プログラム・適応制御概念の導入により適応性を付与することで、光学系の持つ不均一性や不安定性に対してロバストな光情報処理システムが構築できる)、(2) モジュール化による高機能化・汎用化・カスケード化(個々のモジュールを最適化し、組合せによる新しいシステム構成を容易に実現できる)、(3) フィールドテストによる評価・検討・最適設計(システムの完成度を高める)、を基本とした種々の光情報処理システムの設計・構築・実験による検証を通じて、デバイス・モジュール・システムアーキテクチャ・応用システムの多方面から、光情報処理システムを実用化するための設計指針に関するアプローチを試みた。

まず、ここでとりあげる光情報処理を構成するデバイス技術・システム技術について図1にまとめた。ここでは、“光情報処理システム化のためのモジュール技術”という視点に立ち、4つのデバイス技術(O/O 、 E/O 、 O/E 、 E/E 変換デバイス、ここで O は optical information, E は electrical information を示す)に分類した。 O/O 変換デバイスは、光情報を光情報に変換(演算処理)するデバイスであり、光情報処理システムにおけるキーデバイスとすることができる。また、現状での汎用情報処理装置として幅広く利用されているコンピュータ技術は E/E 変換デバイスとすることができる。実用的な光情報処理システムの構築には、 O/O 変換デバイスと E/E 変換デバイスの協調が不可欠となり、そのためには、 E/O 、 O/E 変換デバイスの整合性も重要な要素となる。本論文で研究を進めたデバイスおよびモジュールを図2にまとめた。光情報処理システムの最も基本的なデバイスとなる O/O 変換デバイスとしては、光アドレス型空間光変調器(PAL-SLM; Parallel aligned liquid crystal-spatial light modulator)を用い、その特性評価から解像度・速度などの特性毎に最適なデバイス設計条件・駆動条件を明らかにした。また、この PAL-SLM の持つ特長を活かした E/O 変換デバイスを開発し、理論値に近い位相変調特性を持つことを確認した(図2(a)右上、

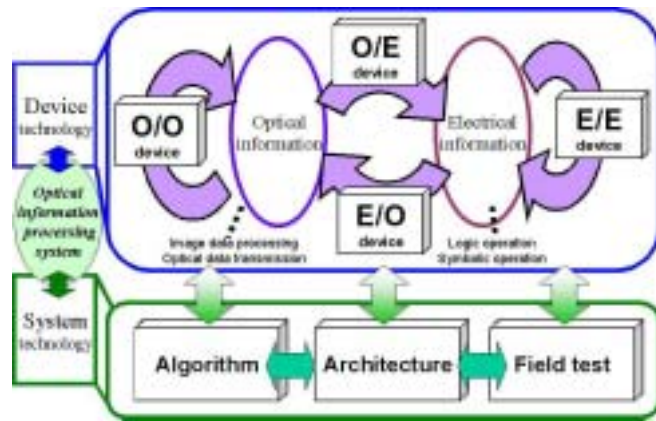


図1 光情報処理システムの基礎となるデバイス技術とシステム化技術



(a)光デバイス

(b)光モジュール

図2 光情報処理システムの要素デバイス

右下)。さらに、図2(b)に示すように、こうした光デバイスをキーとした光モジュール化を進めた。複数のモジュールのカスケード接続などの拡張性を想定し、モジュール毎の専用機能に最適化した設計を行なった。これにより、各モジュール毎に高性能化・安定化・小型化が図られ、これまで光学定盤上での実証実験が多くを占めていた光情報処理システムから、実際のフィールドテストを通じた最適化が可能なシステム・モジュールとすることが可能となった。具体的には、図2(b)のように、PAL-SLMをキーデバイスとした、光相関器 ((b)左上)、光インタコネクション ((b)左下)、多機能空間光変調器である MSLM(Micro-channel spatial light modulator)を用いた光アソシアトロン((b)右上)などをシステムモジュールと捉え、それぞれの機能に特化した最適設計を行ない、その動作を実験的に確認した。

また、*E/O* 変換デバイスとしては、光インタコネクションに不可欠となるアンプ内臓型 8×8 PD アレイ((a)右下)や、光相関器などからの光情報処理結果の高速読出し/判断処理システムとしてのインテリジェントビジョンシステムの研究開発を通じて、光情報処理技術の有効性を活用するための要素デバイス技術とした。

これらの要素技術をキーデバイスとして、いくつかの光情報処理システムとして実際の応用実験を行なった結果を示す。論文では、第3章～第7章に要素技術毎にまとめられているが、ここでは、

それらの構築したシステム例を、前述した3つの視点から、概説する。

図3に“光情報処理システムへの汎用性の付与/最適化設計”を行なった例を、図4に“モジュール化・機能融合による光情報処理システムの高機能化”の例をまとめた。

図3左上の光アソシアトロンシステムでは、フィードバック型の直交学習法を光システム上で実行することで、光デバイスの不均一性を補償した適応的な光システムが構築できた。さらに、この光アソシアトロンを *O/O* 変換モジュールとみなし、その前処理として光フーリエ変換を組み合わせることで、限られた連想能力を持つシステムに、手書き文字認識機能を実装することが可能となることを示した(図4左下)。さらに、大規模な光ニューラルネットのシステム化を目指して、高解像度空間光変調器 FLC-SLM(Ferro-electric liquid crystal spatial light modulator)をキーとした2値メモリ相関学習法アルゴリズムを提案した。ここでは、キーデバイスの特性に合わせた相関学習法の3つの改良(スパースコーディング法、トータルアクティビティ一定法、2値メモリ法)により、大幅に記憶能力が向上することを示した。

図3右上の位相コントラストフィルタ(PCF: Phase Contrast Filter)システムでは、100%の光利用

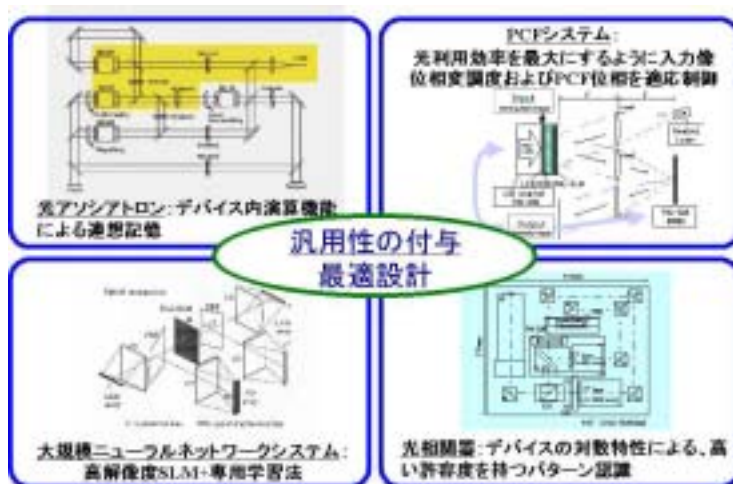


図3 汎用性の付与を実現した光情報処理システムの構築例



図4 モジュール化・機能融合による光情報処理システムの高機能化の例

効率を持つレーザ光表示(ビーム整形)を目的として4f結像光学系を設計した。光の損失のないシステムを実現するには、開口率100%の純粋な位相変調デバイスが不可欠となり、コンピュータからの制御性を兼ね備えた電気アドレス型SLM(図2(a)右下)を位相表示デバイスとして最適化し用いた。また、斜め読出しの光学系において、フーリエ面におけるフィルタリング手法に、PAL-SLMを用いた自己アライメント法を新たに提案することで、大幅なアライメントの軽減化を達成し、振動などにロバストなシステム構成を実現した。

図3右下の光相関器では、PAL-SLMをリアルタイムホログラムデバイスとして用いることによる光相関システムを構築し、指紋認識および速度計測に最適設計し、その有効性を確認した。特に、PAL-SLMの持つ対数的入出力特性を、対象の空間周波数特徴に合わせて設計することで、これまでの光相関器の課題であった、対象画像の輝度やコントラスト、周波数分布などに相関結果が大きく影響される問題を、大幅に改良できることを確認した。高解像度SLMと望遠光学系を用いることで、B5サイズの大きさ(210×170×95mm)にモジュール化することができ、実際のフィールドテストによる評価・改良が可能となった。本システムに指紋入力用ファイバモジュールを組み合わせた指紋認識システムへの応用実験では、500人以上から指紋データの収集、5年以上にわたるフィールド試験などを行い、その性能を分離能力・温度試験・経時変化などの多方面から評価し、有効性を確認した。また、図4右上に示すように、イメージインテンシファイア(I.I.)(超高速二重露光)と光相関器(縞解析)を組み合わせた速度計測システムを構築し、広い計測範囲を持つ変位・速度計測システムが構築できることを示した。こうした光情報処理システムを構成する要素技術をモジュール化することで、それらの組み合わせにより新しい機能システムの構築が容易に構成できることが示された。また、それぞれのモジュール毎に最適設計が行われるため、個々のモジュール技術の機能向上が反映されトータルの光情報処理システムとして、高い機能が期待できる。こうした、各モジュール単位での機能の向上は、これまでの光情報処理の実用化において不足していたと考えられる、環境変化や経時変化に対して、ロバストな光情報処理システムの構築に不可欠なステップとなる。

以上のように、本論文では、これまでの光情報処理の持つ課題を3つのポイントから捉え、いくつかの光情報処理システムを設計・構築・性能評価を通して、光学デバイスの特性を活かした設計を行うことで、有効な光情報システムの構築が可能であることを示した。また、各構成要素のモジュール化・デバイスの特性を基本とした最適設計・フィードバック型のシステムアーキテクチャの採用などにより、これまでの光学系の課題であった安定性・汎用性の問題に対してロバストなシステム構築が可能であることを実験的に確認できた。

これらの技術は、既に、フェムト秒波形整形、光ピンセット、暗号化、位相補償、などの幅広い応用研究分野に活用が始まっている。

このように、光デバイス技術・モジュール化技術をベースに、それぞれの特性を最大限に活用するためのシステム化技術が加えられることで、適応的な光情報処理システムの実現につながっていくものと考えられる。