



Title	光-デジタルハイブリッド方式による直交変換装置
Author(s)	下野, 哲雄; Shimono, Tetsuo; 北島, 秀夫 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 115, 73-79
Issue Date	1983-07-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41802
Type	departmental bulletin paper
File Information	115_73-80.pdf



光—デジタル ハイブリッド方式による直交変換装置

下野 哲雄 北島 秀夫 小川 吉彦

(昭和58年3月31日受理)

Opto-Digital Hybrid Processor of Orthogonal Transform

Tetsuo SHIMONO, Hideo KITAJIMA and Yoshihiko OGAWA

(Received March 31, 1983)

Abstract

A feasibility study of opto-digital hybrid processor of orthogonal transform is presented. It is well known that orthogonal transform coding of the digital signal is one of the most efficient ways to reduce the redundancy of the signal. The orthogonal transform is accomplished by the multiplication of the transform matrix and the data vector, and realization of high-speed vector-matrix multiplier is needed to implement the orthogonal transform coder.

In this paper, an optical vector-matrix multiplier using incoherent optics is considered. The input data is presented on a linear light emission diodes (LEDs) array. Guiding these data parallelly to a two-dimensional optical transparency which describes the orthogonal transform matrix, and projecting the passing light through the optical transparency on a linear photo-diodes (PDs) array, the vector-matrix multiplication is accomplished. Furthermore, to improve the flexibility of the processor, a digitally controlled system based on microprocessor is considered.

1. ま え が き

画像のようなデータ量の膨大な信号を伝送または格納するとき、信号そのままの形で行なおうとすると、伝送路の帯域が広がったり、大量の記憶媒体が必要となる。一般に信号には多くの冗長性があり、この冗長性を取り除くことでデータ量の圧縮が可能となる。冗長度を低減する方法の中で信号の統計的構造を利用するものを直交変換と呼んでいる。直交変換で最適なものはカーネン・レーブ (Karhunen-Loève) 変換であるが、これは行列の固有値を求めるという困難性があり実用化には向かない。これに漸近する変換として、フーリエ (Fourier) 変換、アダマール (Hadamard) 変換、余弦 (Cosine) 変換などが研究されている^{1)~4)}。直交変換の原理は、原データ領域でデータを処理するのではなく、原データを変換行列によって変換し、変換領域でデータを操作して、原データをあまり劣化させることなくデータ圧縮を図ろうとするものである。直交変換を実用化するためには、データベクトルと変換行列の乗算時間を如何に短縮できるかにかかっている。

ところで、二次元の演算を瞬時に行なえるものとして光による演算がある。古典的には、画像のような二次元データのフーリエ変換が簡単にできるという性質⁵⁾を利用して相関器として注目

されていた。しかし、光源にはコヒーレント光が必要、入出力データを写真フィルムで生成しなければならない、空間整合フィルタをホログラムで作成しなければならない、大がかりな光学系が必要であるなどいろいろな制約が多く手軽に実用化するところまでいっていないのが現状である。一方、行列演算のような離散の信号の処理を光を用いて行なおうという試みも報告されている。用いる光源もコヒーレント光のもの^{6~7)}、インコヒーレント光のものがある^{8~9)}。

本稿では、直交変換の行列・ベクトル演算をインコヒーレント光を用いた並列演算で実行可能か、問題点は、またその解決法などを検討し、更に、データの入出力時間の短縮化、処理系全体をマイクロプロセッサで制御することによって処理装置の柔軟性を向上させることができないかを検討している。

2. 光を用いた行列演算装置

2.1 データおよび変換行列

原データベクトルを \mathbf{x} 、変換ベクトルを \mathbf{y} 、変換行列を \mathbf{T} とすると、直交変換は

$$\mathbf{y} = \mathbf{T} \mathbf{x} \quad (1)$$

で表される。画像のような二次元信号の直交変換は、ある種の条件の下で原データ行列を変換行列 \mathbf{T} で両側からはさんだ演算で実現できるので、基本演算は式(1)の行列・ベクトル演算となる。

ここで、データ \mathbf{x} の要素は 8 ビット程度 of 非負値と仮定する。この仮定は、データが負の値をとったとしても、変換ベクトルから定数を差引くことで対処できるので一般性を失わない。変換としては、行列の要素が実数であるアダマール、余弦変換を考える。フーリエなどの複素数を要素に持つ変換は実現に若干の工夫が必要であるが、下記に述べる行列演算法を拡張することは可能である。入力データが非負値であると、直交変換の性質から、変換データも非負値となるので出力データ \mathbf{y} も 8 ビット程度の値を持つことになる。

2.2 行列・ベクトル演算器

行列・ベクトル演算装置の基本構成を図 1 に示す。原データベクトル \mathbf{x} を発光ダイオード (LED) のアレイ P_1 に表示する。この光を円筒レンズ L_1 で横方向に広げフォトマスク P_2 に照射する。このフォトマスク P_2 は変換行列 \mathbf{T} (実際には \mathbf{T} の置換) の各要素に対応するように透過光に重みを付けるトランスパレレンシである。 P_2 から透過してきた光を円筒レンズ L_2 で縦方向に絞り、フォトダイオード (PD) のアレイ P_3 に集める。変換ベクトル \mathbf{y} は P_3 の出力として得られる。このように、デジタル計算機のように \mathbf{y} の要素 1 個ずつ順番に求めるのではなく、並列演算によって \mathbf{y} の要素全てを同時に求めることができる。

2.3 装置の問題点

次にこの行列・ベクトル演算装置の問題点を列挙する。

(1) $P_1 \sim P_2$ 間および $P_2 \sim P_3$ 間のクロストーク (Cross talk)

LED アレイ P_1 からの出力光がフォトマスク P_2 まで伝搬する間に LED と各々の出力光が混じり合う可能性がある。すなわち入力ベクトル \mathbf{x} の i 番目の要素 x_i はフォトマスク \mathbf{T} の要素 $t_{i1} \sim t_{iN_i}$ にだけ導かなければならないし、また、他の要素を表示している LED の出力光がこの $t_{i1} \sim t_{iN_i}$ に漏れてこないことが必要である。同様に、 P_2 から PD アレイ P_3 間でも光のクロストークが問題になる。すなわち、変換ベクトル \mathbf{y} の j 番目の要素 y_j はフォトマスク \mathbf{T} の要素 $t_{j1} \sim t_{jN}$ を透過してきた光を集めたものでなければならず、また \mathbf{T} の他の要素を透過してきた光が y_j を表す

PD に漏れてこないことが必要である。このような光のクロストークがあると著しく計算精度が落ちる。

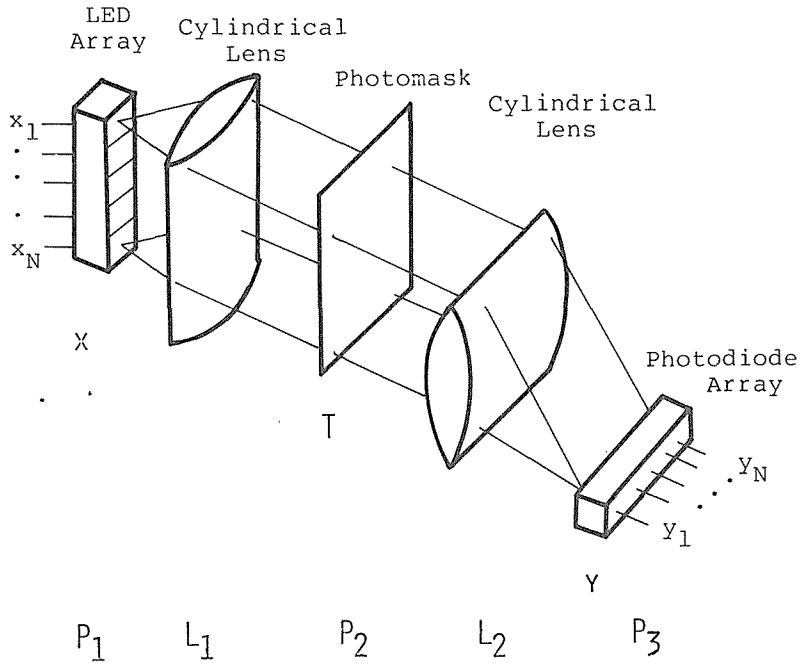


図1 光による行列ベクトル演算器(1)

(2) フォトマスク

まずフォトマスクを何で作成するかが問題となる。一般には写真フィルムで作成するのが常識的であるが、変換行列の要素に対応するような階調がとれるのかどうか。さらに、インコヒーレント光を用いていることから、フォトマスクは非負値しか表せない。したがって、変換行列の負の要素をどのように表現するのか問題となる。また、ある直交変換からもう一つの直交変換に替えたいとき、変換行列の係数を少し変更したいときに、それぞれ別のフォトマスクを作成して、差し替えなければならないので処理装置の柔軟性に欠けるのではないか。

(3) LED および PD

上述の演算装置の構成では、LED および PD がデータベクトルの次元数だけ必要となる。次元数が多くなると LED や PD のアレイを本当に作れるのか、装置全体が大きくなるのではないかと、レンズなどの光学系が構成できるかという問題が生じる。さらに、LED や PD の非線形性の問題もある。すなわち、LED では入力電流と発光強度、PD では受光強度と出力電流の関係が比例していないことに起因する。また、LED や PD のアレイ中の各素子の特性のばらつきなども計算精度に大きく影響しそうだ。

(4) D/A および A/D 変換器

これは(3)と同じ問題点がある。行列・ベクトル演算を並列演算で行なうので、入力データを LED に表示するのに、出力データを PD から受け取るのにもベクトルの次元数だけ D/A および A/D 変換器が必要である。次元数だけの A/D, D/A を並べると回路がかなり大きくな

る。したがって、装置全体がかなり大規模なものになる可能性がある。

2.4 対応策

(1) クロストーク

図1のようなレンズ系を使った演算装置ではどうしても光のクロストークが生じる。そこで、次のようなオプテカルファイバの利用を考える。多芯（ベクトルの次元数）のファイバを片側は一本に束ね、もう一方の側はオプテカルマスク上の各要素に正確に当るように扇状に広げて、 P_1, P_2 間および P_2, P_3 間に挿入する。これによって、レンズが不要になるし、もちろん光のクロストークも無くなる。

(2) フォトマスク

どの直交変換を使うかを一度決めてしまうと、そう頻繁に変更するものではないので、現状では写真フィルムで作成するのが最良と思われる。フィルムの露光特性など十分に調べてからフォトマスクを作成すれば十分な階調が得られる。ただし、変換行列の係数を少々変えるなど、処理の柔軟性を考えると、フォトマスクとして電気信号で簡単に透過量を変えられるものが要求される。この要求に答えるものの一つとしてドットマトリックス表示の液晶ライトバルブ（LCLV）の利用が考えられる。現在、3万ドットを表示できる LCLV が発表されている。さらに技術の進歩によって、ドット数の多い LCLV が出まわると思われるので、この目的に十分利用できる。しかし、液晶の応答速度はかなり遅いので、頻繁にマトリックスの係数を変えたりすると処理速度が低下する。処理速度と処理の柔軟性は二律背反する面がある。

次は、変換行列の負の値の扱いである。所詮、インコヒーレント光を用いているので負の値は直接取り扱えないので次のような方法を考える。フォトマスク上には変換行列の係数の絶対値を表示する。変換行列のどの要素が負値であるかは、前もって分かっているので、負の係数の要素を透過してくる部分と、非負値の係数の要素を透過してくる部分と二系統のオプテカルファイバを作り、それぞれ PD アレイに透過光を集め、それぞれの PD の出力電流の差をとることにより最終結果である変換ベクトル \mathbf{y} を得ることができる。この操作は数学的には次式で表される。

変換行列 \mathbf{T} の非負値の要素はそのまま負値の要素を零に置換した行列を \mathbf{T}^+ 、非負値の要素を零に置換し負値の要素はその絶対値とした行列を \mathbf{T}^- とすると、

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}\mathbf{x} = [\mathbf{T}^+ - \mathbf{T}^-] \mathbf{x} = \mathbf{T}^+ \mathbf{x} - \mathbf{T}^- \mathbf{x} = \mathbf{y}^+ - \mathbf{y}^- \quad (2)$$

二段の PD アレイの一方は \mathbf{y}^+ 、もう一方は \mathbf{y}^- を検出するのに用いる。(1)および(2)の構成概念図を図2に示す。

この方法は複素の係数を持つ変換行列にも拡張できる。ただし、フォトマスクは実部を表す部分と虚部を表す部が必要でサイズが二倍、光ガイド用ファイバも二倍、PD アレイは実数部の正負用で二段、虚数部の正負用で二段必要となる。

(3) LED および PD

入力データベクトル表示用の LED アレイは実現可能である。現在、光エレクトロニクス素子の開発、集積化が盛んで、LED も1チップ上に128個の LED を集積化したものも出まわっている。したがって、次元数が1,000~2,000程度のアレイは簡単に構成できると思われる。

変換データベクトル検出用の PD も集積化が進んでいるので PD アレイの構成も可能であると思われる。また、現在実用中の固体撮像素子、例えば電荷結合素子 (CCD)、などの利用も考えられる。

次に、LED や PD の非線形性の問題についての対処法を述べる。簡単には、線形範囲内で動

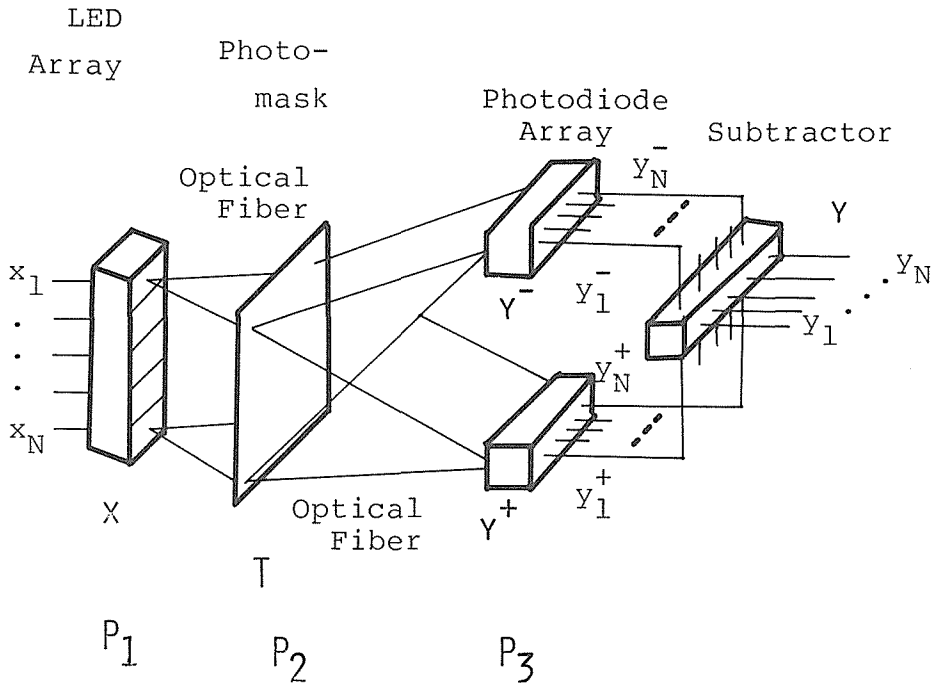


図2 光による行列ベクトル演算器(2)

作するように設計すれば良いのであるが、この方法では十分な解像度がとれない。そこで、前述の振幅変調に変えて、パルス変調で LED を駆動する。PD の出力側に積分器を入れて、積分器の出力が最終的変換ベクトル y となる。このパルス変調方式では、処理時間の点で振幅変調に劣るが、計算精度は著しく向上すると思われる。

(4) D/A および A/D変換器

D/A, A/D 変換器の小形集積化が進んではいるが現時点では、数千個の D/A, A/D をコンパクトな回路に実装するのは非常に困難である。A/D, D/A も現在、高速なものが安価に手に入るので、処理時間を少々犠牲にしても直列処理を考えたほうが得策である。入力は、逐次データを読み出し、D/A 変換し、チャンネルデバイダ回路で各 LED に振り分ける。出力側にはアナログサンプルホールド回路を付けて、出力を逐次読み出し A/D 変換する。制御回路は複雑にはなるが、上述の直列処理をブロック単位で行なう方法も考えられ、処理時間の高速化が期待できる。

また、音響光学 (AO) 素子、回転鏡の利用などで、入力側は一組の D/A と LED、出力側も一組の PD と A/D だけ、さらにオプテカルファイバも不要という行列演算装置も設計可能である。

3. データ入出力とデジタル制御

ここでは、まずデータの入出力について考察する。変換すべきデータが多量にあって、次々と処理を要求される場合、直交変換処理そのものの演算時間がいくら速くても、データの入出力に

時間がかかると全体として処理時間がかかるし、場合によっては、データの入出力時間だけで処理速度が決まってしまうこともある。そこで、入力データはディスクメモリに格納されていて、出力データは符号化器を経由してディスクメモリに格納するか、または伝送路に送られると想定する。一連の処理順序は、入力データ格納のディスクからデータを読み出し、D/A 変換器に送り、D/A の出力を LED アレイに与え、光演算し、出力を PD アレイから取り出し、A/D 変換器に入力し、A/D の出力を符号化器に入れ、その出力をディスクに格納するか伝送路に出力するということになる。一つのデータについて、この一連の動作が完了してから、次のデータの処理を行なうという方法では処理効率が悪い。そこで処理効率を上げるために、一つのデータの直交変換演算中に、入力側では、次の変換すべきデータを読み出しておく、出力側では、一つ前の変換データの符号化を行うという、ベルトコンベヤ方式（パイプライン処理）が考えられる。この方式であると、処理装置のどの部分も常に動作中という形になるので、単位時間当りのデータ処理量が増加する。この方式を実現するためには、ディスクメモリの平均アクセス時間から推定して、データの次元数だけのバッファメモリを二段、入出力それぞれに入れることで可能であると思われる。ただし、バッファメモリ間のデータの転送は並列処理が必要である。

次に系の制御について述べる。直交変換演算部の D/A、A/D の変換のタイミング、バッファメモリ間の転送のタイミング、データの読み出し、格納などの制御を全てハードで行なうのはかなり複雑な回路を必要とする。しかし、前述したように、処理自体は一連の順序でしか行なわないので、系全体の制御は計算機にて行なえば簡単である。この程度の処理系では、マイクロプロセッサで十分に役割を果たすことができる。さらに、フォトマスクの部分で LCLV を使う場合など、変換行列の係数を ROM に入れたフォトマスク制御専用のマイクロプロセッサを用いるなど、処理系全体にかなり柔軟性をもたせることができる。このようなマイクロプロセッサ制御の直交変換処理装置の構成を図 3 に示す。

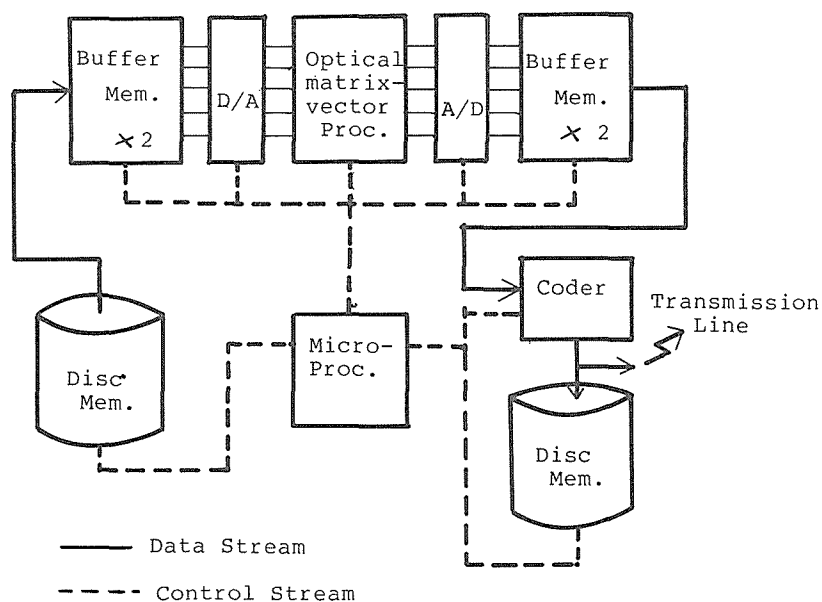


図 3 直交変換装置の基本構成

4. 結 論

本報告は、現在の光エレクトロニクス素子の新製品の開発、性能の向上、集積化の状況およびマイクロプロセッサなどのデジタル機能素子が安価で簡単に手に入る状況に鑑み、直交変換などの信号処理の一部を並列演算能力のある光演算に置きかえることの可能性について研究したものである。信号の直交変換のような行列演算が LED, PD を用いて並列処理できることを示した。さらに、データの入出力も含めた処理装置の基本構成を示した。

今後の課題は、実際に装置を設計・試作し、処理時間、計算精度など詳細に検討すること、さらに、合成開口レーダ画像、LANDSAT などのリモートセンシング画像のような大量のデータを持つ二次元信号の処理への応用などがある。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費 (No. 57750281) の補助によって行なわれた。

参 考 文 献

- 1) Wintz, P. A. : Proc. IEEE, **60** (1972) p. 809
- 2) Kitajima, H. : IEEE Trans, Comput., C-29 (1980) p. 317.
- 3) Kitajima, H., Shimono, T. and Kurobe, T. : Bulletin of Faculty, of Engr., Hokkaido Univ., 101 (1980) p. 39.
- 4) Kitajima, H., Shimono, T. and Kurobe, T. : Bulletin of Faculty of Engr., Hokkaido Univ., 108 (1982) p. 33.
- 5) Goodman, R. P. : Introduction to Fourier Optics, (1968) McGraw-Hill.
- 6) Heinz, R. A., Artman, J. O. and Lee, S. H. : Appl. Opt., **9** (1970) p. 2161.
- 7) Jablonowski, D. P., Heinz, R. A. and Artman, J. O. : Appl. Opt., **11** (1972) p. 174.
- 8) Bocker, R. P. : Appl. Opt., **13** (1974) p. 1670.
- 9) Carlotto, M. and Casasent, D. : Appl. Opt., **21** (1982) p. 147.