

研 究**並列デジタル光演算システム用2次元仮想記憶機構**

岩田 昌也・谷田 純・一岡 芳樹

大阪大学工学部応用物理学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1992年8月29日受付, 1993年1月21日受理)

**Two Dimensional Virtual Storage Mechanism for
Optical Parallel Digital Computing Systems**

Masaya IWATA, Jun TANIDA and Yoshiki ICHIOKA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

(Received August 29, 1992; Accepted January 21, 1993)

Two dimensional (2-D) virtual storage mechanism is proposed as a method to bridge gap between hardware specification and software requirement on parallelism in optical computing systems. A discrete correlation model is introduced in order to generalize processing procedures of optical parallel digital computing techniques based on discrete correlation such as optical array logic and symbolic substitution. Using the model, a 2-D virtual storage mechanism on an optical parallel digital computing system is studied, and an architecture of 2-D virtual storage mechanism using pipelined page transfer is presented.

1. はじめに

光の並列性・高速性・非干渉性を利用した並列光演算システムは、新世代の大容量情報処理システムとして注目され、各種の研究が行われている¹⁾。並列光機能デバイスやシステムアーキテクチャに関するハードウェア面からの研究は言うまでもなく、光の並列性を有効に利用しうる並列光演算技術などのソフトウェア面の研究も重要性を増している。例えば、光アレイロジック²⁾、記号置換³⁾、2値画像代数⁴⁾、画像論理代数⁵⁾などの並列光演算技術が提案され、種々の問題に対する解決方法が発表されている。

しかし、これらのソフトウェア面の研究が進むにつれて、現実のハードウェアとソフトウェアが要求する仕様とのギャップが次第に明確になってきた^{6,7)}。すなわち、並列光機能デバイスの並列度がシステム全体の並列度を決定するが、デバイス製造技術がいくら進歩しても、実世界に存在する問題を完全並列に処理しうるシステムの実現は不可能であるという認識である。理想的には、すべてのデータを同時に処理することにより並列システム

は最大の性能を発揮するが、現実的には、問題をシステムが扱える規模に分割し、複雑なスケジューリングを組んでやらなければならない。

並列光演算システムが実験段階にある間は、このハードウェア/ソフトウェア間ギャップに対して対症的な解決法でも対応ができる。しかし、実用に近い汎用システムの開発を目的とする場合には、より系統的な解決方法が要求される。そこで、本論文では、並列光演算システムの中でも最も実現が近いと考えられる離散相関による並列デジタル光演算技術を基礎とする並列光演算システムを対象として取り上げ、そのシステム上で利用可能な2次元仮想記憶機構を提案する。

以下、2節では、2次元仮想記憶機構の概念について説明し、3節では、離散相関による並列デジタル光演算技術をモデル化し、そのモデルを2次元仮想記憶機構へ適用する。4節では、2次元仮想記憶機構における処理手順を説明し、5節では、パイプラインページ転送機構を導入した2次元仮想記憶機構の一例を示す。

2. 2次元仮想記憶機構の概念

仮想記憶機構⁹⁾とは、コンピュータにおける処理の自由度を拡張する手法の一つで、プログラマに対し、コンピュータ内に実装されているメモリ(主記憶)より十分大きなメモリ空間を提供する技術である。Fig. 1に示すように、仮想記憶機構では、1次元の仮想メモリ空間をページと呼ばれる小単位に区切り、ページ単位でデータの参照を行う。プログラマからは、Fig. 1(a)のような大きなメモリ空間があるように見えるが、実際には、Fig. 1(b)のように、2次記憶装置上にメモリの内容が保存され、必要に応じてページごとに主記憶上へ呼び出される。主記憶と2次記憶装置間のデータ転送は自動的に行われ、結果として、非常に大きなメモリ空間を得ることができる。

われわれは、並列デジタル光演算システムに対し、処理画像を2次元のページ単位で処理する2次元仮想記憶機構を検討した。Fig. 2にその概念図を示す。2次元仮想記憶機構は、Fig. 2(a)に示すように、非常に大きな2次元画像空間を提供し、それに対する並列演算を可能にする技術である。実際には、Fig. 2(b)に示すように、ページメモリから少数ページが逐次的に読み

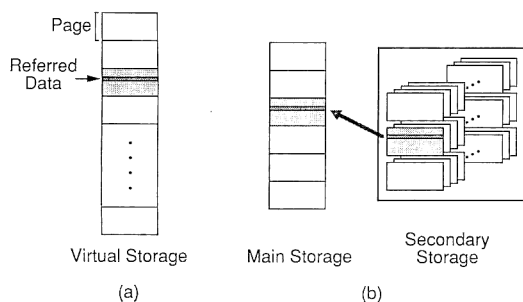


Fig. 1 Virtual storage mechanism; (a) virtual storage with referred data and (b) implementation method of referring the data on secondary storage.

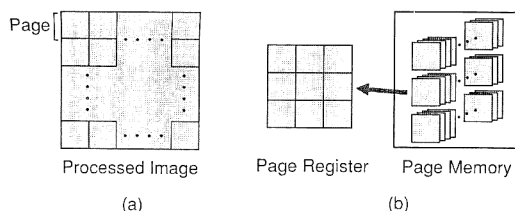


Fig. 2 Two dimensional virtual storage mechanism; (a) processed image and (b) implementation method of parallel operation for the processed image.

出され、それらに対する並列演算が行われる。従来の仮想記憶機構における仮想記憶、主記憶、2次記憶が、2次元仮想記憶機構における処理画像、ページレジスタ、ページメモリにそれぞれ対応する。

この仮想記憶機構の2次元化は概念的には容易に理解されるが、詳細な部分では、処理方式に起因するメモリアクセス方式の違い、メモリ空間自体の役割の相違など種々の問題が存在する。1次元仮想記憶機構が利用されるフォンノイマン型コンピュータでは、メモリ空間内のデータはそれぞれ別個の意味を持ち、異なったプログラムシーンで処理される。配列データなどは同時に処理され得るが、全メモリ空間から見れば一部分にすぎない。一方、2次元仮想記憶機構が対象とする並列デジタル光演算システムでは、画像空間内の全データは原則として一つのプログラムシーンで処理される。すなわち、どのプログラムステップにおいても全画像空間が同一の演算で同時に処理される。その結果、毎回の処理ごとに全ページ内のデータをアクセスしなければならない。そこで、1次元仮想記憶機構とは異なった操作手順を考える必要が生じてくる。

3. 離散相関演算モデルと2次元仮想記憶機構への適用

本研究では、実現性の容易さの点から、離散相関による並列デジタル光演算技術を基礎とする並列光演算システム²⁻⁵⁾を対象として取り上げる。この方式の並列デジタル光演算技術は、離散画像に対する離散相関演算を基本とし、画像の符号化・復号などの処理を付加することにより、任意の近傍要素間論理演算を実現する。個々の手順は異なるものの、これらの並列デジタル光演算技術は離散相関演算モデルとして記述できる。すなわち、Fig. 3に示すように、処理データを含む入力データと処理内容を決定するカーネルとの間の離散相関演算を考えれば、各並列デジタル光演算技術を一般化することができる。

離散相関演算モデルでは、カーネルは入力画像の画素

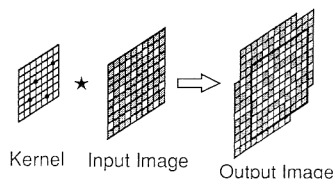


Fig. 3 Discrete correlation model for generalization of parallel optical computing techniques.

間隔に等しい格子上に位置するデルタ関数群として定義される。相関演算の結果、カーネル内のデルタ関数の位置に対応して入力画像がシフトされ、出力面上で重なり合う。Table 1 に示すように、このカーネルに対する解釈により各種の並列デジタル光演算技術に対応できる。出力画像は、相関画像において、カーネル原点と入力画像との相関像が出力される領域のみを抽出し、2値化した離散画像である。入力画像と出力画像はともに等しい画素数を持つ2値画像である。

2次元仮想記憶機構では、画像空間をページに分割して処理を行う。2節で述べたように、2次元仮想記憶機構が対象とする並列デジタル光演算システムでは、画像空間内のすべてのデータに対して同一の演算が実行されると仮定している。そこで、離散相関演算モデルの場合、画像空間を構成する全ページに対して、単一のカーネルとの間で相関演算を行えばよい。以下の考察を単純化するために、処理対象の画像は $M \times M$ ページ、各ページは $N \times N$ 画素により構成されているものとする。また、カーネルは原点を中心に四方向へ等しく広がっていると仮定する。カーネルの原点から端までの長さは、相関演算により入力画像がシフトされる最大値に等しいため最大シフト量と呼ぶ。シフト量がページ画素数以上の場合、出力画像領域に入力画像の情報が入らないため、最大シフト量はページ画素数より小さいと仮定する。画像およびカーネルに関する諸量の関係を Fig. 4

Table 1 Optical parallel computing techniques and their concepts corresponding to kernel.

Optical parallel computing technique	Concept corresponding to kernel
Optical array logic	Operation kernel
Symbolic substitution	Search and substitution pattern
Binary image algebra	Reference image
Image logic algebra	Neighborhood configuration pattern

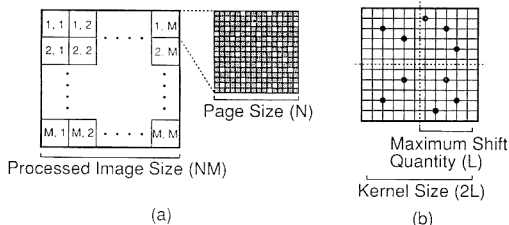


Fig. 4 An example of (a) processed image segmented into pages and (b) kernel.

に示す。最大シフト量 L のカーネルのカーネルサイズは $2L \times 2L$ となる。

4. 2次元仮想記憶機構の処理手順

画像空間をページ分割して処理する場合、各ページの境界部分の連続性が問題となる。一般に、相関演算を行うと Fig. 5 に示すように、あるページの相関演算結果は隣接するページにはみ出してしまう。入力画像が処理画像全体であるならば、境界部分のデータは無視してもよいが、ページ分割の場合、これらは無視することはできない。そこで、この境界部分の処理が2次元仮想記憶機構において重要になる。ここでは、最大シフト量 L がページ画素数 N より小さい場合とそれ以上の場合に分けて、その処理手順を説明する。

4.1 $0 < L < N$ の場合

最大シフト量 L が画像サイズ N より小さい場合 ($0 < L < N$) には、1ページの相関演算出力は 3×3 ページより小さい領域におさまる。そこで、入力として1ページを提示し、出力面で 3×3 ページを同時に取り込む方法が考えられる (Fig. 6(a))。しかし、この方法では各ページの演算結果を1回の相関演算で得ることができず、9回の相関演算の総和を求める必要がある。そこで、入力面と出力面を入れ替えて、 3×3 ページを入力面に置き、その中心の1ページの領域のみを出力ページとする方法を考案した (Fig. 6(b))。この方法では、隣接ページからの情報が光学的に加算され、効率的に相

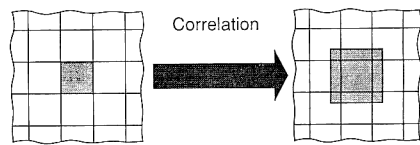


Fig. 5 Problem in segmentation of 2-D virtual space. The result of parallel procedure overlaps on the adjacent pages on 2-D virtual storage.

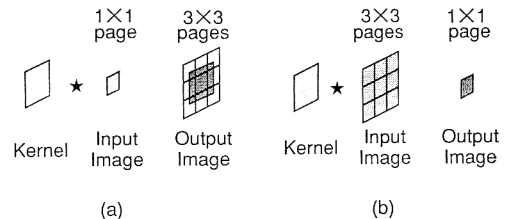


Fig. 6 Two methods for processing on segmented pages; (a) output extended and (b) input extended methods.

関演算を実行できる。なお、全画像空間に対する相関演算にはページ数、すなわち M^2 回の相関演算を反復する必要がある。

4.2 $L \geq N$ の場合

最大シフト量がページサイズ以上の場合、1ページの処理結果は 3×3 ページの領域にはおさまらない。この場合は、カーネルを $2N \times 2N$ のカーネルサイズを持つサブカーネルに分割して処理する。このとき、分割したカーネルが $2N \times 2N$ に満たないときには領域拡張を行い、すべてのサブカーネルが等しいカーネルサイズを持つようにする。

カーネル分割の例として、 $N \leq L < 2N$ の場合を Fig. 7 に示す。この場合、カーネルは 2×2 個のサブカーネルに分割する。各サブカーネルの最大シフト量 L はページサイズ N を越えないため、各サブカーネルによる演算は 4.1 の手順で実行できる。1ページの演算結果は、各サブカーネルに対する演算結果の総和により得られる。したがって、 $N \leq L < 2N$ では、1ページあたり4回の相関演算が必要となり、全相関回数 C は、ページ数 M を用いて、

$$C = 4M^2, \tag{1}$$

となる。

一般には、 $(k-1)N \leq L < kN$ に対してサブカーネル数は k^2 となるので、全相関回数 C は $O(k^2 M^2)$ で与え

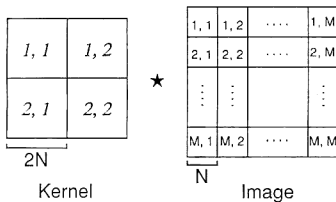


Fig. 7 An example of segmented kernel and image for correlation when maximum shift quantity is larger than page size.

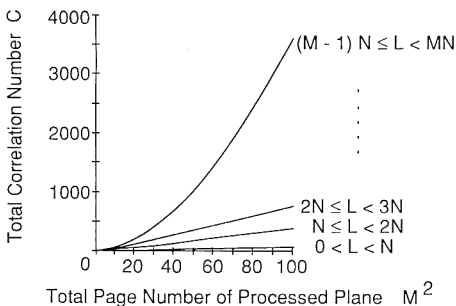


Fig. 8 Total correlation number according to total page number and maximum shift quantity.

Table 2 Required shift size and suggested page size for specific applications.

Application	Required shift size
Binary image processing (Edge detection, thinning)	3
Gray image processing (Digital filtering)	$(M+1)(B+1)/2$
Numerical processing	
Ripple-Carry addition and subtraction	3
Ripple-Carry Multiplication	$2B-1$
MSD addition and subtraction	7
MSD multiplication	$4B-3$
Maze solution	3
Turing machine	5
Systolic array processor	$4B+5$
Inference engine (1000 nodes)	
Template matching method	~ 60
Token propagation method	~ 4000
Expert system	~ 4000
Database management	
Selection	$2N-1$
Projection	$2N-1$
Semijoin	$2N-1$
Sorting	$2B-1$

M : image size, N : data number, B : bit number of data.

られる。 L をパラメータとして M^2 と C の関係を示したものが Fig. 8 である。これより、2次元仮想記憶機構を用いた場合に必要になる相関演算は、最大シフト量 L によって不連続的に変化し、 L が N の整数倍を越えるごとに処理効率が大きく低下することがわかる。したがって、2次元仮想記憶機構設計におけるページサイズ決定の過程では、処理に必要な最大シフト量を下回らない範囲でページ画素数を最小にすることが一つの規範となる。Table 2 は、光アレイロジックにおけるいくつかの処理と最大シフト量をまとめたものである⁹⁻¹⁴。この表より、各応用に対する2次元仮想記憶機構の適切なページ画素数が決定できる。

5. パイプラインページ転送方式を用いた 2次元仮想記憶機構

2次元仮想記憶機構における処理は、逐次的に同一カーネルとの相関演算を実行していくため、ページデータにパイプライン転送方式を導入することにより効率に行える。Fig. 9 は、パイプラインページ転送方式に

基づく2次元仮想記憶機構の概念図を示す。このシステムは、ページ転送光学系と相関光学系により構成され、ページ転送光学系が準備した3×3ページのページデータに対して相関演算をパイプライン的に実行する。ページ転送光学系は、最大9ページのデータを光インターコネクション技術を利用して同時に転送する。入力ページ、出力ページはそれぞれ、特定のスケジュールにしたがってページメモリとの間で転送される。この部分のデータ転送にも光インターコネクションを応用する。

Fig. 10 および Table 3 にシステムの動作手順を示す。図において、中央の3×3ページが相関演算光学系の入力画像として用いられ、周辺の入力ポート(斜線部)がページメモリからのデータバッファの役割をする。表はページメモリからの入力ポート (SIDE, IN. 1, IN. 2, IN. 3), ページ転送光学系内の転送方向 (TRANS. DIR.), 相関演算結果の格納ページアドレス (OUT) のスケジュールの一部分を示す。最大シフト量がページ画素数より小さい場合には、 M^2+1 ステップで全画像空間に対する相関演算を完了できる。カーネル分割が必要となる場合には、各サブカーネルごとに上記の手順で処理を行い、各ページごとに総和を求める。

ページ転送光学系は、Fig. 11 に示すページ転送用 OEIC とレンズアレイによる結像光学系により構成する。Fig. 11(a)はページ転送用 OEIC を概念的に図示したもので、ページ内の各画素ごとの構造を示す。この素子は上面にページ転送用の受光・発光素子、下面に発光素子、内部にDラッチ回路を持つが、空間光変調素子

で代用することもできる。また、OEIC により製作する場合においても、画素単位の独立性により集積化に適している。Fig. 11(b)は、ページ転送光学系を示す。なお、相関光学系には、Fig. 9 に示す多重結像を利用した離散相関光学系¹⁵⁾が利用できる。その他、ホログラムによるコヒーレント相関光学系¹⁶⁾も利用できる。

ページメモリとページ転送光学系の入力ポート間およ

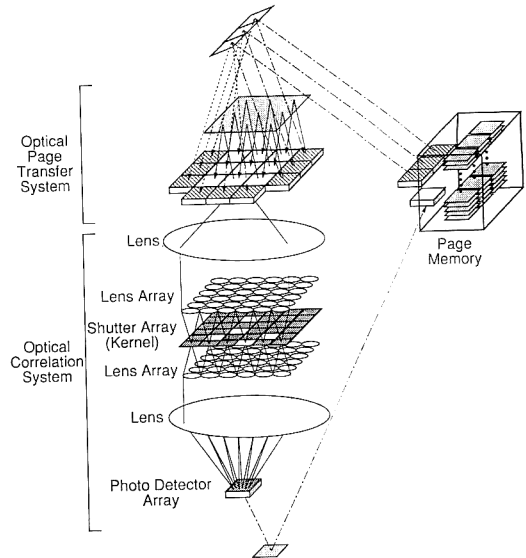


Fig. 9 An example of optical correlation system with 2-D virtual storage. Parallel optical interconnection is used for optical page transfer system.

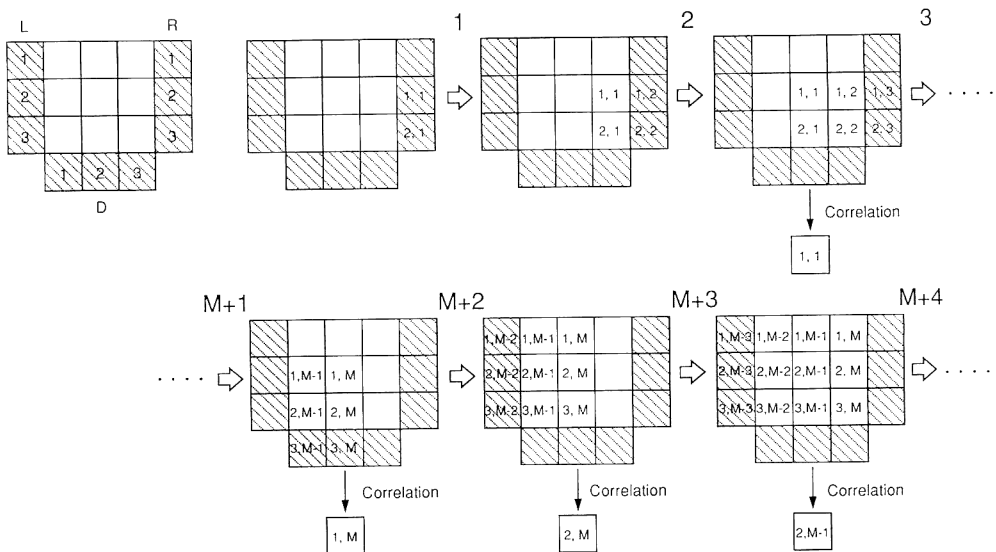


Fig. 10 Processing sequence of pipelined page transfer method.

Table 3 Processing schedule of 2-D visual storage mechanism with pipelined page transfer.

STEP	SIDE	IN. 1	IN. 2	IN. 3	TRANS. DIR	OUT
1	R	—	1, 1	2, 1	LEFT	—
2	R	—	1, 2	2, 2	LEFT	1, 1
:	:	:	:	:	:	:
M	R	—	1, M	2, M	LEFT	1, M-1
M+1	—	—	—	—	LEFT	1, M
M+2	D	3, M-1	3, M	—	UP	2, M
M+3	L	1, M-2	2, M-2	3, M-2	RIGHT	2, M-1
M+4	L	1, M-3	2, M-3	3, M-3	RIGHT	2, M-2
:	:	:	:	:	:	:
2M	L	1, 1	2, 1	3, 1	RIGHT	2, 2
2M+1	—	—	—	—	RIGHT	2, 1
2M+2	D	—	4, 1	4, 2	UP	3, 1
2M+3	R	2, 3	3, 3	4, 3	LEFT	3, 2
2M+4	R	2, 4	3, 4	4, 4	LEFT	3, 3
:	:	:	:	:	:	:
3M	R	2, M	3, M	4, M	LEFT	3, M-1
3M+1	—	—	—	—	LEFT	3, M
3M+2	D	5, M-1	5, M	—	UP	4, M
3M+3	L	3, M-2	4, M-2	5, M-2	RIGHT	4, M-1
3M+4	L	3, M-3	4, M-3	5, M-3	RIGHT	4, M-2
:	:	:	:	:	:	:
4M	L	3, 1	4, 1	5, 1	RIGHT	4, 2
4M+1	—	—	—	—	RIGHT	4, 1
4M+2	D	—	6, 1	6, 2	UP	5, 1
4M+3	R	4, 3	5, 3	6, 3	LEFT	5, 2
4M+4	R	4, 4	5, 4	6, 3	LEFT	5, 3
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
M ² +1						M, M

び相関出力面とページメモリ間のデータ転送にも光インターコネクションが利用できる。ただし、ページメモリはホログラフィックメモリ¹⁷⁾などのように任意のページをランダムアクセスできなければならない。この場合、ページあたりの転送速度はページ転送光学系内部と同等とみなせるため、アクセスによるオーバーヘッドが本システムの動作速度を決定する。光磁気ディスク¹⁸⁾などの逐次読みだし型デバイスを利用することもできるが、ページサイズ100×100画素、システムクロック1MHzと仮定した場合、10¹⁰ bit/sの転送速度が要求される。残念ながら、現在、この条件を満たす適当なメモリシステムは存在しないが、並列光演算システムにおいて不可欠な周辺装置であり、今後の重要な研究課題と考える。

6. ま と め

本論文では、並列光演算システムにおいて将来問題になると予想されるハードウェア/ソフトウェア間ギャップに対する一つの解決策として2次元仮想記憶機構を提案した。離散相関による並列ディジタル光演算技術を基礎とする並列演算システムを対象とするため、離散相関演算モデルを導入し、そのモデルにより2次元仮想記憶機構の処理手順、実行効率について評価した。また、パイプラインページ転送方式による2次元仮想記憶機構を提案し、光インターコネクション技術が有効に利用できることを示した。

仮想記憶機構はソフトウェア開発における柔軟性を提

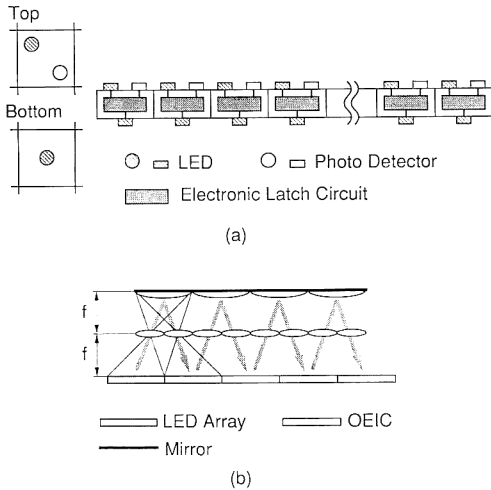


Fig. 11 Optical elements for optical page transfer system; (a) OEIC for one page of transfer and (b) optical page transfer system using optical imaging system.

供するものであり、柔軟性の代償として実行効率の低下をまねく。したがって、十分な並列度を有する並列システムが開発されるならば、不必要な技術と見なされうる。明らかに、並列システムでは並列度が演算能力を決定し、できる限り並列度の高いシステムの開発をめざすべきである。しかし、ソフトウェアの要求する並列度は、ハードウェアが提供する並列度をはるかに越えるものであり、そのギャップを埋めることは重要である。したがって、本研究がこの問題を認識する一つのトリガとなることを期待する。

文 献

- 1) A. D. McAulay: *Optical Computing Architectures: The Application of Optical Concepts to Next Generation Computers* (John Wiley & Sons, New York, 1991).
- 2) J. Tanida and Y. Ichioka: "A paradigm for digital optical computing based on coded pattern processing," *Int. J. Opt. Comput.*, **1** (1990) 113-128.
- 3) K.-H. Brenner, A. Huang and N. Streibl: "Digital optical computing with symbolic substitution," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3054-3060.
- 4) K.-S. Huang, B.K. Jenkins and A.A. Sawchuk: "Image algebra representation of parallel optical binary arithmetic," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1263-1278.
- 5) M. Fukui and K. Kitayama: "Image logic algebra and its optical implementation," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 581-591.
- 6) M. Iwata, J. Tanida and Y. Ichioka: "Inference engine using optical array logic," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L1259-L1261.
- 7) M. Iwata, J. Tanida and Y. Ichioka: "Inference engine for expert system by using optical array logic," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 5604-5613.
- 8) 兩宮真人, 田中 謙: コンピューターアーキテクチャ (オーム社, 東京, 1988) pp. 195-202.
- 9) J. Tanida and Y. Ichioka: "Programming of optical array logic. 1: Image data processing," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 2926-2930.
- 10) J. Tanida, M. Fukui and Y. Ichioka: "Programming of optical array logic. 2: Numerical data processing based on pattern logic," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 2931-2939.
- 11) M. Fukui, J. Tanida and Y. Ichioka: "Flexible-structured computation based on optical array logic," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 1604-1609.
- 12) J. Tanida, J. Nakagawa, E. Yagyū, M. Fukui and Y. Ichioka: "Experimental verification of parallel processing on a hybrid optical parallel array logic system," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 2510-2521.
- 13) S. Kakizaki, J. Tanida and Y. Ichioka: "Gray-image processing using optical array logic," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 1093-1102.
- 14) M. Iwata, J. Tanida and Y. Ichioka: "Database management using optical array logic," *Appl. Opt.* (in press).
- 15) J. Tanida and Y. Ichioka: "Discrete correlators using multiple imaging for digital optical computing," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 599-601.
- 16) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968) Chap. 7.
- 17) P. B. Berra, A. Ghafoor, P. A. Mitkas, S. J. Marcinkowski and M. Guizani: "The impact of optics on data and knowledge base systems," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, **1** (1989) 111-132.
- 18) R. P. Feese: "Optical disks become erasable," *IEEE Spectrum*, **25** (1988) 41-45.