研究

光並列演算における離散ディジタル相関

福井　将樹*・谷田　純**・北山　研一*・一岡　芳樹**

* NTT 伝送システム研究所　〒238-03 横須賀市武 1-2356

** 大阪大学工学部応用物理学教室　〒565 吹田市山田丘 2-1

(1992年11月5日受付，1992年12月3日受理)

Discrete Digital Correlation in Optical Parallel Processing

Masaki FUKUI,* Jun TANIDA,** Ken-ichi KITAYAMA* and Yoshiki ICHIOKA**

* NTT Transmission Systems Laboratories, 1-2356, Take, Yokosuka, 238-03

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

(Received Nevember 5, 1992; Accepted December 3, 1992)

A basic operation of discrete digital correlation (DDC) that consists of a cross correlation operation between a two-dimensional (2-D) digital image and a 2-D pattern and a thresholding operation is derived. It is shown that optical digital parallel schemes based on processings for spatially coded patterns, such as symbolic substitution, optical array logic, and image logic algebra, can be implemented by the DDC. The DDC can be utilized as a powerful tool to compare the performance of optical parallel processing schemes and to investigate the efficiency of the optical parallel processing algorithms.

1. はじめに

光の並列性を利用すれば二次元画像をデータ配列を保ったまま処理できる可能性がある．二次元離散ディジタル画像を対象とした演算法（または演算体系）としては，記号置換論理[1]，光アレイロジック[2]，二値画像代数[3]，画像論理代数[4]等がある．これらは，画像と二次元パターンとの相関演算を基本演算としている点が共通しているが，異なった方法で記述されており，統一的な取扱いは行われていない．

そこで，これらの演算法・演算体系を統一的に取り扱うために，離散二値画像と点像パターンとの相互相関演算を定義した．われわれは，この離散ディジタル相関演算を discrete digital correlation : DDC と呼ぶ．また，DDC を基本演算に含む演算法や演算体系を「DDC 演算系」と呼ぶ．

この DDC 演算系を用いた並列演算アルゴリズムが，画像処理や数値計算等の応用分野において多数提案されている．ある特定の DDC 演算系のみを対象として記述されているアルゴリズムの多くは若干の修正により，他の DDC 演算系でも実行可能である．画像の細線化[5,6]や加算のアルゴリズム[1,7]等はその例である．したがって DDC 演算系間の関係を明らかにすることにより，DDC 演算系を用いた光並列処理アルゴリズムの比較が容易になり，評価および開発に役立てることができる．

本論文では，まず DDC の定義について述べ，その光学的実現方法について述べる．さらに代表的な DDC 演算系である画像論理代数の基本演算や記号置換論理，光アレイロジック等を共通の DDC を用いて具体的に表現する．その結果は従来行われていなかった DDC 演算系およびそのアルゴリズムの比較，評価に役立つものと期待される．

2. 離散ディジタル相関 (DDC)

2.1 DDC の定義[8]

DDC は，**Fig. 1** に示すように離散ディジタル画像 A と点像パターン B との 2 次元相関演算と，それに続く閾値演算で二値化により構成される．$N\times N$ の画素から構

成される二値画像は次式で表現できる．

$$A(x,y)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\,\mathrm{rect}\left(\frac{x-id}{d},\ \frac{y-jd}{d}\right). \quad (1)$$

ここで，a_{ij} はAの (i,j) の画素値であり，ゼロまたは1を値にとる論理変数である．d は画素間隔である．rect関数は次式で定義される．

$$\mathrm{rect}(x,y)=\begin{cases}1 & -\frac{1}{2}\le x\le\frac{1}{2},\ -\frac{1}{2}\le y\le\frac{1}{2}\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \quad (2)$$

次に，$(2L+1)\times(2L+1)$ の画素を持つ点像パターンBは次式で表記できる．

$$B(x,y)=\sum_{p=-L}^{L}\sum_{q=-L}^{L}b_{pq}\delta(x-pd,\ y-qd). \quad (3)$$

ここで，$\delta(\ )$ はデルタ関数である．b_{pq} は点像パターンBの (p,q) の画素値であり，ゼロまたは1を値にとる論理変数である．$A(x,y)$ と $B(x,y)$ との相互相関画像 $C(x,y)$ は次式で与えられる．

$$C(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}A(u,v)B(u-x,v-y)\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v. \quad (4)$$

ここで $C(x,y)$ も $N\times N$ の画素をもつ離散画像であることから，これを

$$C(x,y)=\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}c_{kl}\,\mathrm{rect}\left(\frac{x-kd}{d},\ \frac{x-ld}{d}\right), \quad (5)$$

とおく，c_{kl} はCの $(k,\ l)$ の画素値であり，自然数である．(1)，(3)式を(4)式に代入して(5)式と比較することにより画像Aと点像パターンBの離散相関である次式が得られる．

$$c_{kl}=\sum_{p=-L}^{L}\sum_{q=-L}^{L}b_{pq}a_{k+p,\,l+q}. \quad (6)$$

(6)式は，画像Aを点像パターンBで指定されたシフト量だけずらして重ねあわせた結果が画像Cであることを意味する．例えば，Fig. 1では，点像パターンBにしたがって，画像Aをシフトしない画像と左および左下へ一つシフトした画像とが重ねあわされている．

ところで，(6)式を注意深くみると，画像の周辺部において $k+p,\ l+q$ がゼロ以下あるいは N よりも大きくなる領域が存在し，その部分では $a_{k+p,\,l+q}$ が未定義であるため計算値が不定となることがわかる．そこで，$a_{k+p,\,l+q}(k+p,\ l+q\le 0;\ k+p,\ l+q>N)$ に対して明示的に値を割り当てる．すなわちこれらの画素がすべてゼロまたはすべて1であると仮定することにより，(6)式の相関演算をすべての領域において実行できるようにする．ここで，前者を0モードの離散相関，後者を1モードの離散相関と定義する．

$A(x,y)$ および $B(x,y)$ は二値関数であるが，(4)式で得られる $C(x,y)$ は一般には多値となる．そこで，(4)式の $C(x,y)$ すなわち(6)式の c_{kl} を二値化する閾

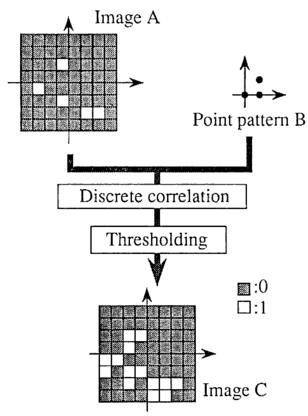

Fig. 1 Procedure of the discrete digital correlation. A, B, C are input image, point pattern, and output image, respectively.

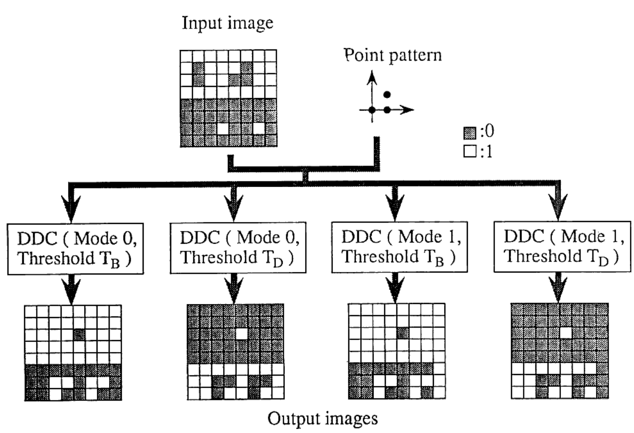

Fig. 2 Four modes of discrete digital correlation.

値関数を二種類定義する．一つは入力値ゼロの時ゼロ，それ以外のとき1となる関数 T_B であり，もう一つは入力値ゼロの時1，それ以外のときゼロとなる関数 T_D である．以下にその定義を示す．

$$T_B(u)=\begin{cases}1 & u>0\\ 0 & u=0,\end{cases} \tag{7}$$

$$T_D(u)=\begin{cases}1 & u=0\\ 0 & u>0.\end{cases} \tag{8}$$

以上より，DDC は(6)式で定義された離散相関と，その相関演算の結果を二値化する(7)式あるいは(8)式で定義される閾値関数を合成したものとして表される．離散相関には二種類のモード（0モード，1モード）があり，閾値関数も二種類（T_B, T_D）あるため，DDC は四種類のモードを持つ．演算例として，同一の入力画像と点像パターンに対する各モードの DDC の演算結果を **Fig. 2** に示す．

2.2　光学的実行法

DDC は光学的に全画素並列に実行可能である．その例としては，記号置換論理の相関系である，干渉計を応用した光学系[1]，ホログラム[9]や回折格子[10]を用いた光学系等がある．また光アレイロジックの相関系である，多重投影光学系[11]，プリズムアレイを用いた光学系[12]，分割鏡を用いた光学系[6]，レンズアレイを用いた多重結像系[13]等も DDC の光学系として用いることができる．これらの光学系は画像を離散的にシフトさせ，重ねあわせることにより離散相関演算を全画素並列に実行している．

これらの中では，レンズアレイを用いた多重結像系による離散相関光学系[13]が，結像系を用いるため高分解能が期待でき，しかもシフト量の制御が容易であるため有望である．

一方，閾値関数 T_B, T_D は，光半導体素子の非線型入出力特性を利用することにより実行することができる[14]．**Fig. 3** に閾値素子として利用可能な光素子の入出力特性を示す．すなわち，閾値関数 T_B は光 OR ゲートで，閾値関数 T_D は光 NOR ゲートで実現できる．Fig. 3 に示す閾値特性を持つ光半導体素子は，種々の素子構造を持つものが提案されている．現状ではまだ大規模な2次元アレイのものは得られていないが，小規模なものはその動作が確認されている．

また，0モードと1モードに関しては **Fig. 4** に示すように入力画像の領域外をそれぞれ暗状態，明状態とすることにより実現できる．

3.　代表的な DDC 演算系の実現

DDC 演算系を用いた光並列処理アルゴリズムの評価においては，DDC と DDC 演算系との関係を明らかにすることが重要である．そこで，代表的な DDC 演算系である記号置換論理，光アレイロジック，画像論理代数を DDC を用いて具体的に表現し，DDC を利用した演算法という視点から各演算系の相違点を明らかにする．

3.1　記号置換論理[1]

記号置換は，**Fig. 5** に示すように，離散画像から特定のパターン（認識パターン）を抽出し，それを別のパターン（置換パターン）に置き換える操作として定義される．この認識パターンと置換パターンの組は置換ルールと呼ばれ，論理演算の内容は置換ルールによって決定

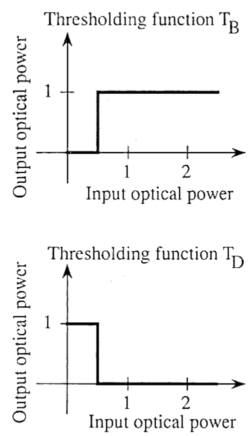

Fig. 3　Thresholding functions.

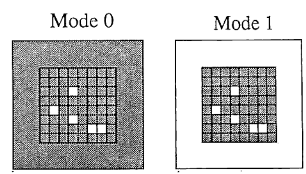

Fig. 4　Two modes (mode 0, mode 1) for input image.

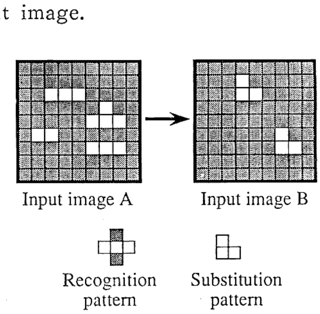

Fig. 5　Symbolic substitution logic.

される．置換ルールを適切に決定することで，さまざまな処理が可能となる．

記号置換を DDC により表現するためには，置換ルールの各パターンを DDC の点像パターンとして表す．まず，認識パターンを二枚の点像パターンの組として表現する．ここで，一枚の点像パターンは認識パターン中の値1の画素の位置を示し，他の一枚は値ゼロの画素の位置を示すものとする．一方，置換パターンは，置換パターンを180度回転させたパターンの値1の画素の位置を示す点像パターンとして表現する．例として，Fig. 5 の認識パターンおよび置換パターンから点像パターンへの変換を **Fig. 6** に示す．ここで，認識パターンの値1，ゼロの画素を表す点像パターンをそれぞれ L_1, L_0 とし，置換パターンを表す点像パターンをRとする．

記号置換を DDC と画像間の論理演算を用いて実行する場合の処理手順を **Fig. 7** に示す．画像Aとパターン L_0 とに DDC 演算（1モード，閾値関数 T_D）を施すことにより，画像Aから画素値ゼロのパターンが一致する部分が抽出される．また，画像Aの論理否定とパターン L_1 とに DDC 演算（1モード，閾値関数 T_D）を施すことにより，画像Aから画素値1のパターンが一致する部分が抽出される．この DDC の二枚の出力画像の論理積をとることにより認識パターンが抽出される．次に，得られた画像とパターンRとに DDC 演算（0モード，閾値関数 T_B）を施すことにより，置換パターンへの置換が行われる．

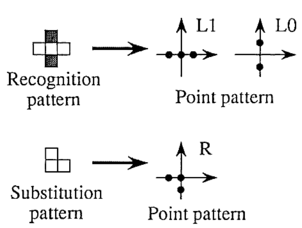

Fig. 6 Transformation from recognition and substitution pattern to point patterns.

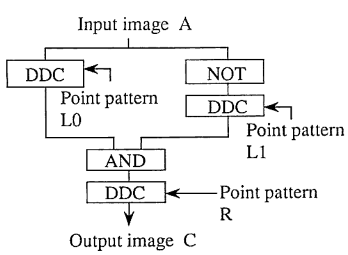

Fig. 7 Procedure of the symbolic substitution logic.

3.2 光アレイロジック[2)]

光アレイロジックは，二枚の離散ディジタル画像に対して任意の近傍画素間論理演算を光学的に並列に実行する演算法である．**Fig. 8** に光アレイロジックの処理手順を示す．二枚の画像から Fig. 8 に示す符号化ルールにしたがって対応画素ごとに空間符号化し，符号化像を得る．この符号化像と演算カーネルと呼ばれる点像パターンとの間で，閾値関数 T_D で DDC を実行する．得られた相関画像を上下，左右方向について一画素おきにサンプリングし，復号画像を得る．同様の処理を他の演算カーネルについても実行し，得られた復号画像の論理和を取ることにより出力画像を得る．上記の手順は目的の近傍画素間論理関数を一種の積和形式に展開して実行することと等価である．光アレイロジックでは演算カーネルを設計することによりさまざまな処理が可能となる．

上記の処理手順からわかるように，符号置換では入力画像をそのまま DDC の入力画像とするが，光アレイロジックでは二値画像を空間的に符号化し DDC の入力画像とするという相違がある．すなわち，光アレイロジックは入力画像をいったん符号化画像に変換し，DDC を実行した後，復号して出力画像を得る演算法であるということができる．このように，二枚の画像を空間符号化し一枚の符号化画像として処理を行うことにより，画像間論理演算が DDC のみを用いて実現できる．また，光アレイロジックの演算カーネルは，符号置換における置換ルールから点像パターンへの変換のような手続きは必要なく，そのまま DDC における点像パターンと考えることができる．

3.3 画像論理代数[4)]

画像論理代数は，離散ディジタル画像に対する7種類

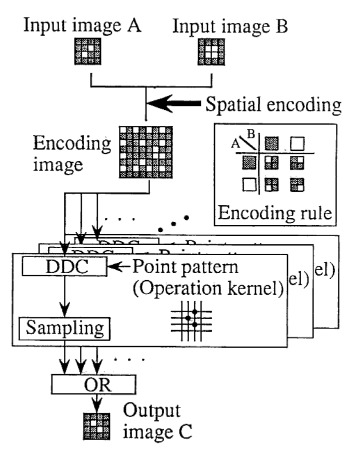

Fig. 8 Procedure of the optical array logic.

の演算，点像パターンの記述を目的とした NCP (neighborhood configuration pattern) に対する3種類の演算および画像と NCP に対する2種類の演算から構成される．その演算のうち，NCP に対する演算である論理積，論理和，論理否定は点像パターンの記述および設計を簡便かつ容易にするために考案されたものである．すなわち，NCP は点像パターンを拡張したパターンの概念である．

Extended erosion および dilation は離散ディジタル画像と NCP との相関演算であるが，NCP が NCP 間の論理和および論理否定を含まない場合には，それぞれ記号置換論理のパターン認識処理および置換処理と同一となる．すなわち，extended erosion は1モード，閾値関数 T_D の DDC，dilation は0モード，閾値関数 T_B の DDC を用いて実行できる．また，NCP が NCP 間の論理演算および論理否定を含む場合は，NCP を積和展開し各積項について DDC を行った後，その各出力像について論理和をとればよい．したがって，画像論理代数における extended erosion および dilation は DDC および画像間論理和を組み合せて実行可能である．

3.4 考　　察

上記の結果から明らかなように，各 DDC 演算系は DDC を用いて表現できる．記号置換論理では1ステップの演算に3回の DDC と2回の論理演算が必要であり，光アレイロジックでは，1回の DDC，空間符号化演算，復号演算が必要である．また，画像論理代数の extended erosion および dilation は記号置換論理の認識処理および置換処理を拡張したものである．したがって，各 DDC 演算系のアルゴリズムを DDC を用いて記述することにより，DDC や符号化演算等の実行回数を求めることができ，客観的な比較が可能である．その結果，基本演算の実行時間をパラメータとして比較検討することにより，従来全く行われていなかった，具体的な応用ごとの DDC 演算系の比較，評価が可能になる．

4. ま　と　め

二次元離散ディジタル画像と点像パターンとの相関演算である離散ディジタル相関（DDC：discrete digital correlation）演算を定義し，その光学的実現方法について述べた．次に DDC 演算により画像論理代数の基本演算や記号置換論理，光アレイロジック等が実行可能であることを，その手順を示すことにより明らかにした．なお，現在 DDC 演算系の記述を目的とした光並列演算記述言語を開発し，それを基に実際の DDC 演算系のアルゴリズムの評価を行っている．

最後に，本研究を遂行するにあたりご支援をいただいた三木哲也伝送システム研究所長，石尾秀樹光通信研究部長に感謝いたします．

文　　献

1) K-H. Brenner, A. Huang and N. Streibl: "Digital optical computing with symbolic substitution," Appl. Opt., **25** (1986) 3054–3060.

2) J. Tanida and Y. Ichioka: "Optical-logic-array processor using shadowgrams. III. Parallel neighborhood operations and an architecture of an optical digital-computing system," J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 1245–1253.

3) K-S. Huang, B.K. Jenkins and A.A. Sawchuk: "Image algebra representation of parallel optical binary arithmetic," Appl. Opt., **28** (1989) 1263–1278.

4) M. Fukui and K. Kitayama: "Image logic algebra and its optical implementations," Appl. Opt., **31** (1992) 581–591.

5) G. Eichmann, J. Zhu and Y. Li: "Optical parallel image skeletonization using content-addressable memory-based symbolic substitution," Appl. Opt., **27** (1988) 2905–2911.

6) J. Tanida, J. Nakagawa, E. Yagyu, M. Fukui and Y. Ichioka: "Experimental verification of parallel processing on a hybrid optical parallel array logic system," Appl. Opt., **29** (1990) 2510–2521.

7) 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.

8) J. Tanida: Ph. D. dissertation (Osaka University, Osaka) (1985) 20–22.

9) J.N. Mait and K.-H. Brenner: "Optical symbolic substitution: system design using phase-only holograms," Appl. Opt., **27** (1988) 1692–1700.

10) R. Thalmann, G. Pedrini and K.J. Weible: "Optical symbolic substitution using diffraction gratings," Appl. Opt., **29** (1990) 2126–2134.

11) J. Tanida and Y. Ichioka: "Optical logic array processor using shadowgrams," J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 800–809.

12) J. Tanida and Y. Ichioka: "OPALS: optical parallel array logic system," Appl. Opt., **25** (1986) 1565–1569.

13) J. Tanida and Y. Ichioka: "Discrete correlators using multiple imaging for digital optical computing," Opt. Lett., **16** (1991) 599–601.

14) A.A. Sawchuk and T.C. Strand: "Digital optical computing," Proc. IEEE, **72** (1984) 758–779.