

ディジタル・スマートピクセル

武内 喜則*,**, 川合 英雄*・若林 信一*

Digital Smart Pixel Array

Yoshinori TAKEUCHI*,**, Hideo KAWAI* and Shin-ichi WAKABAYASHI*

We have developed 8×8 and 16×16 Digital Smart Pixel Arrays (DSPAs). Each pixel of the DSPA has a processing element, a photo-detector, an LED and diffractive optical elements. We have also implemented some image-processing algorithms on the DSPA. The maximum processing speed in our experiments was 0.1 ms/frame. We have also developed a high-speed machine control system with an image parallel processing system, in which the DSPA's are optically connected. This system is the first actual working system that uses optical parallel processing.

Key words: smart pixel array, vision chip, optical computing, parallel processing, image processing

一般的な画像処理システムでは、CCD (charge-coupled device) でとらえた並列データを、パラレルシリアル変換してからフレームメモリーに送る。この変換は、高速画像処理のボトルネックであり、従来型画像処理技術では、数十 ms/frame 程度に処理速度が制限されてしまう。この程度の処理速度では、フレーム間差異が大きく、実世界現象を捕捉するには不十分である。このため、対象の動きに合わせて機器を制御するビジュアル・フィードバックの実行が困難で、1 ms/frame 以上の処理速度の実現が求められる。

筆者らは、このボトルネック解消のために、1 ms/frame 以下で動作する高速視覚センサーのディジタル・スマートピクセル (DSPA)^{1,2)} と、これをカスケード接続した光並列処理システムを開発した。石川らは、全画素に処理機能を配置することで、ディジタル分散処理を実行する S³PE アーキテクチャーを提案している^{3,4)}。DSPA は、S³PE をベースとして、光並列データ出力機能を付加したデバイスであり、処理結果の並列伝送が可能となることで、S³PE の機能拡張が実現されている。試作した 8×8 画素素子は、高速機器制御デモシステムに組み込まれ、フィードバック信号の送出間隔 1.5 ms が達成された。

1. ディジタル・スマートピクセルの構造

DSPA は、光入出力機能と演算処理機能が集積されたデ

バイスである。デバイス構造とカスケード接続の概念図を、図 1 に示す。ベースとなるのは、汎用並列ディジタル演算チップの DPE アレイ (digital processing element array) で、画素ごとに ALU (arithmetic logic unit), レジスター, PD (photo-detector), LED 駆動回路, 近傍画素間通信機能を有し、外部から入力されたプログラムに従って SIMD (single instruction and multi data flow) 型の並列処理を実行する。DPE アレイの各画素には、LED チップが直接実装されており、素子上部には、レンズ機能と偏向機能を有する回折光学エレメントアレイ (DOE アレイ) を形成した石英基板が実装される。

図 2 は DOE アレイを実装した DSPA と、実装していない素子の 8×8 画素分の、出射光の距離 4, 8, 16 mm における空間的な強度分布である。DOE がない場合、出射光は同心円状の空間分布をもち、距離の増大に伴い強度が急激に低下している。一方、DOE 実装素子では、出射光が図中上方に偏向されており、また素子から離れても強度低下が少ない。偏向 DOE アレイの周辺部 DOE の偏向方向は、アレイ中心に傾けてあり、全体としてレンズ機能をもたせてある。この偏向アレイとレンズアレイによって、出射光の発散角が抑制されている。

LED の実装によって、処理結果を各画素から一斉に光出力する機能が、DSPA に付与される。この光並列データ伝

*松下電器産業(株)先端技術研究所 (〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3-4)

**現所属: (株)キノテック (〒212-0054 川崎市幸区小倉 308-10 かわさき新産業創造センター 211) E-mail: takeuchi@kinotech.jp

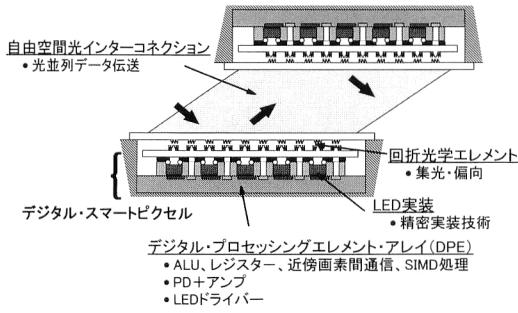


図1 ディジタル・スマートピクセルの構造とカスケード接続。

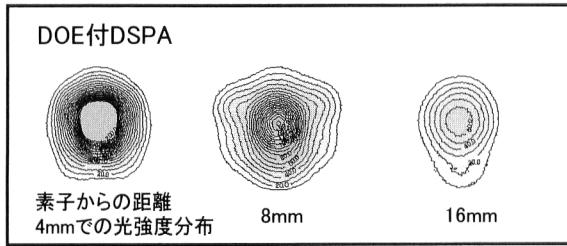


図2 8×8画素 DSPA の遠視野像。

送機能を使えば、DSPA を多段接続することができ、その処理能力を拡張できる。自由空間光インターフェクションを用いて、DSPA をカスケード接続したシステムは、パラレル-シリアル変換ボトルネックのない実時間処理システムである。

2. ディジタル・スマートピクセルと並列処理

図3は、プロセッシングエレメント（PE）の構成図である。レジスターは8×4 bitで、うち24 bitがRAM、残りはデータ入出力や近傍画素間通信に使用される。ALUは、任意の2つのレジスターに保存されているデータ間の、AND, OR, XOR, ADDの論理演算を実行し、結果を任意のレジスターに保存する。最大クロック周波数は10 MHzで、1命令ステップは0.1 msである。露光時間に対応するPDのゲート時間は、外部入力プログラムによって、自由に設定できる。露光時間は二値化閾値に相当し、これを基準に観測データが二値化される。複数の露光時間で二値化を実行すれば、多ビットデータによるビットシリアル演算も可能である。

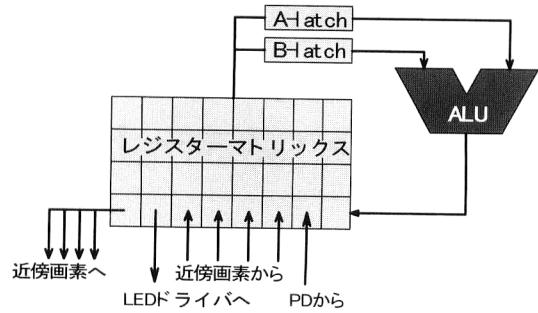


図3 プロセッシングエレメント（PE）の構造模式図。

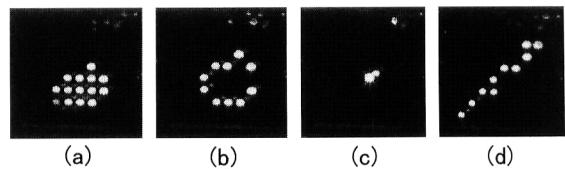


図4 ディジタル・スマートピクセルの処理結果出力。(a) 入力パターンの二値化出力、(b) 輪郭抽出出力、(c) 重心抽出出力、(d) 重心の軌跡記録。

図4は、レーザーpointerの照射スポットを入力パターンとして、8×8画素 DSPA に入力したときの処理結果出力を表している^{5,6)}。図4(a)は、入力パターンを処理せずに出力したもの、(b)は輪郭抽出結果の出力、(c)は重心検出結果の出力である。輪郭抽出パターンは、隣接画素間のXOR演算で簡単に得られる。16×16素子に、同様の輪郭抽出処理を実行させる実験では、0.1 ms/frameまでの処理速度を確認できた。

重心検出には、エロージョン・アルゴリズムを用いている。これは、観測されたパターンの周辺部を順次消していくことで、パターンを縮小し、1画素または2画素になったとき縮小を停止して、これを重心として出力するアルゴリズムである。複数のパターンを入力しても、同一時間で重心検出結果が得られる。図4(d)は、重心検出サイクルごとの検出結果を、レジスターに保持することで、重心の軌跡を記録するプログラムの出力パターンである。

3. エアホッケーコロボット

DSPA が実現する高速処理、多段処理、アクティブセンシングの有効性を具体的に示す目的で、DSPA と光位置検知素子（PSD）を光で結合した高速画像処理システムを中心としたエアホッケーコロボットを試作した⁷⁾。ロボットシステムの概略を、図5に示す。少ない画素数に対応して、観察領域は、おおむねゴール前方 20 cm × 30 cm と狭いが、高速スキャニング・ミラーによって、盤面を観察する視線を左右に移動させることができる。パックを探すときは、視線を広範囲にスキャンし、パック発見後は、パックを常

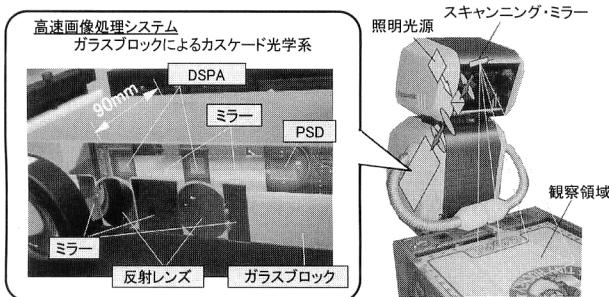


図5 エアホッケーロボットの外観写真と光学系。

に観察領域の中央に置くように、ミラーの指向方向をフィードバック制御する。観測対象と相互作用しながらデータを取得する能動的システムとなっているため、実効的に広範囲の観測ができる。照明には、LEDアレイを使った同軸落射照明光学系を用いている。2個のDSPAとPSDは、図5中に示したように、ガラスブロックに光学素子を接着固定した安定な自由空間インターフェクション光学系で、カスケード接続されている。

図6にシステムダイアグラムを示す。DSPA-1でとらえられたパックの画像に、すぐさま二値化と重心検出が実行され、処理結果がDSPA-2へ並列光伝送される。複数の重心が補捉された場合には、DSPA-2がゴールにより近い重心を抽出し、結果をPSD上に投影する。PSDは、1.5 msごとに、パックの横方向変位情報を、リアルタイムコントローラーに出力する。リアルタイムコントローラーは、この情報をもとに、ミラー指向方向を制御するとともに、ミラー指向方向へとアームを制御する。

エアホッケーロボットは、観察領域が狭く、パックの軌跡予測などをしない単純な戦略にもかかわらず、高速移動パックに対応することができる。これは、DSPAの処理速度が速く、パックを見失うことなく連続的に観察できるからである。高速画像処理能力なしには、このようなシステムの構築は困難である。視覚処理の高速性が、このシステムを成立させるキーポイントである。

このシステムでは、2つのDSPAが、二値化、重心検出、発見、選別処理を分担して実行している。カスケード接続によるDSPAの多段処理は、処理の分担を通して、フィードバック信号送出間隔の短縮や処理に伴うメモリー不足の解消といった効果を生み出すことができる。

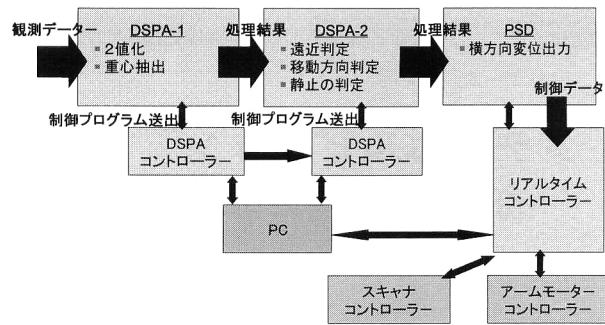


図6 エアホッケーロボットのシステムダイアグラム。

従来の画像処理技術のボトルネックを解消する高速画像処理視覚センサーのDSPAと、これを使った光並列処理システムを開発した。DSPAの高速性と、DPEアレイにマッピングされた二次元データに対する並列処理能力を生かすには、これまでの画像処理とは異なる新たな発想の処理アルゴリズムが求められる。今後、DSPA上で動作する新たな処理アルゴリズムの研究が必要である。

本研究は、技術研究組合新情報処理開発機構(RWC)の下で実施された。DPEの設計試作には、東京大学石川正俊教授と小室孝博士から多大な協力を得た。

文 献

- 1) 川合英雄、馬場彩子、武内喜則、小室 孝、石川正俊：“デジタル・スマートピクセルと光接続”，*Optics Japan '99*, 23pA4 (1999) pp. 127-128.
- 2) H. Kawai, A. Baba, Y. Takeuchi, T. Komuro and M. Ishikawa: “8×8 digital smart pixel array,” *Optics in Computing 2000* (Quebec City, Canada, 2000) pp. 715-720.
- 3) 石川正俊：“超高速・超並列ワンチップビジョンとその応用”，日本ロボット学会誌, **13** (1995) 306-310.
- 4) 石川正俊：“超高速・超並列視覚情報処理システム”，応用物理, **67** (1995) 33-38.
- 5) H. Kawai, A. Baba, M. Shibata, Y. Takeuchi, T. Komuro and M. Ishikawa: “Image processing on a digital smart pixel array,” *The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PR 2001 Makuhari)*, Technical Digest II, Th 1-3 (2001) pp. 680-681.
- 6) H. Kawai, A. Baba, M. Shibata, Y. Takeuchi, T. Komuro and M. Ishikawa: “High-speed image processing on a digital smart pixel array,” *Electron. Lett.*, **38** (2002) 590-591.
- 7) 武内喜則、川合英雄、馬場彩子、柴田元司、藤村英範、小室 孝、石川正俊：“高速視覚センサ「デジタル・スマートピクセル」と高速機器制御”，画像電子学会第190回研究会、画像電子学会研究会予稿 01-05-04 (2001) pp. 23-28.

(2003年2月10日受理)