

25 眼カメラアレイシステム ProFUSION 25 の設計と開発

関口大陸^{†‡}, 松山方大[†], 桑島茂純[†]

[†] 株式会社ビュープラス

[‡] 電気通信大学

ProFUSION 25 は 25 眼分の VGA 解像度の動画データを実タイムに PC へ取り込み可能な 25 眼カメラアレイシステムである。ProFUSION 25 の大きな特徴の一つは、25 個の撮像素子を 5x5 のアレイ状に 12mm ピッチで配置し、これまでになく撮像素子が密に配置された非常に小型化されたカメラアレイシステムとなっている点である。また、画像転送帯域を確保するために、PCI Express をケーブルで延長しカメラ本体に直接接続するインタフェースを採用したことも技術上の特徴となっている。本稿では、以上のような特徴を持つ 25 眼カメラアレイシステム ProFUSION 25 の設計と開発について述べる。

Development of ProFUSION 25

Dairoku Sekiguchi^{†‡}, Masahiro Matsuyama[†], Shigesumi Kuwashima[†]

[†] ViewPLUS Inc.

[‡] The University of Electro-Communications

ProFUSION 25 is a 5x5 camera array system. The system has 25 VGA resolution cameras inside a very compact body with 12mm spacing. ProFUSION 25 also employs a PCI Express External Cable. This PCI Express connection provides more than 200MByte/Sec effective bandwidth and transfers all 25 images at 25 FPS to the PC. In this article, we will describe the development of ProFUSION 25.

1. はじめに

これまで CCD などの撮像素子を利用したカメラの性能を向上させる試みとしては、光学系や撮像素子、後段の処理回路などの性能を向上させるアプローチがもっとも一般的な方法であった。しかし、カメラ内部の回路および伝送路のデジタル化による画像転送の広帯域化や CPU 等の処理性能向上に伴い、一台のカメラに一つの撮像素子ではなく、複数の撮像素子を組み合わせることで一台のカメラとして機能させ性能向上を計るアプローチの素地が整いつつあると考えられる。また、複数の撮像素子を組み合わせることにより単なる性能向上だけでなく、例えば単眼のカメラでは難しかった光線群の情報を取得できるようになるなど、まったく新しい機能を付加できる可能性も秘めている[1~11]。そこで、我々は複数の撮像素子により構成されたカメラの可能性を探るために、25 眼カメラアレイシステム ProFUSION 25 の開発を試みた。同様の試みは大学などの研究機関を中心として行われてきているが、単体のカメラを多数並べた大規模かつ複雑なシステムとなっている例が多い[1~5]。一方、今回新たに開発した ProFUSION 25 では、高速インタフェースの採用や独自の回路・筐体設計により、25 眼のカメラアレイでありながら手のひらの上の

程度までに小型化を図っている。

本稿では、我々が開発を行った ProFUSION 25 の設計について解説を行う。

2. ハードウェア設計

多眼カメラアレイシステムの構成方法として、単眼のカメラを多数並べる手法がこれまでに多く提案されている[1~5]。このような手法の場合、カメラ部に関しては既存のカメラユニットを使うことも可能であるため、開発にかかる様々なコストを下げられる可能性がある。しかし、単体のカメラを組み合わせる手法をとった場合、例えば、一台の PC へ同時に接続可能なカメラの台数に上限があり PC を複数台用意しなければいけないなど、システム全体が大型化する傾向が見られる。また、カメラの配置に関して自由度は高いものの、配置の間隔に関しては、各カメラの筐体のサイズによって最小配置幅が決定されてしまい、配置間隔の狭いカメラアレイを構築しようとする場合は不利であると言える。一方、カメラを複数台並べる方法とは異なる方法で光線群の情報を取得する手法も提案されている。例えば、撮像素子の前にマイクロレンズアレイを配置

する手法[10]やレンズと撮像素子の間に特殊なマスクを配置する手法[6]、通常のレンズの前にさらに特殊なレンズを配置する手法[7][11]などがあげられる。これらの提案は、一台のカメラで光線群の情報が取得可能になることや光線群を取得する位置を密に配置できることが大きな特徴になるが、最終的に情報を取得する撮像素子の解像度は元のカメラの時と変わらないため、通常の画像の情報に加えて光線群の情報の解像度が犠牲となる。撮像素子自体の解像度を上げることにより取得される情報の解像度を上げることは可能であるが、単体の撮像素子では解像度上限があること、多くの撮像素子は解像度と撮影のフレームレートがトレードオフの関係にあるなどの理由から、特に解像度を確保しつつ動画の処理を行おうとするとあまり有利ではないアプローチであると考えられる。実際、これまでに提案された一台のカメラで光線群の情報を取得しようとする試みの多くは、撮影のフレームレートに限られた高解像度の撮像素子を用い静止画を対象としている[6][7][10]。

そこで、ProFUSION 25 では、動画の処理をターゲットとするために単眼のカメラを 25 個並べるような構成を取りつつも、これまでの多眼カメラアレイのアプローチでは実現が難しかった狭い間隔でカメラを配置し、通常のカメラと同程度の筐体サイズまで小型化を図ることを目標とした。多眼カメラアレイでありながらカメラを密に配置するという、相反する要求に応えるために、ProFUSION 25 では、既存のカメラモジュールを使用するのではなく、25 個の撮像素子からなるカメラを新規に開発し、一枚の基板上に 25 個の撮像素子をできる限り密に配置することで実現した。このような手法をとる場合、カメラ配置の限界値は表 1 に示される要素によって規定される。

表 1 カメラ配置の限界値を決める要素

要素	ProFUSION 25 での値
撮像素子の大きさ	9.0 x 9.0mm
撮像素子間に必要な距離	3.0mm
レンズの大きさ	φ 9.0mm

図 1 に ProFUSION 25 の撮像素子基板の外観とセンサ部の拡大図を示す。

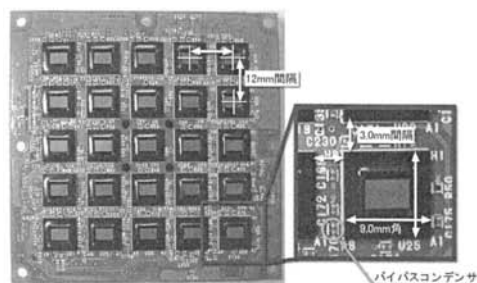


図 1 撮像素子基板

図 1 に示されているように、撮像素子は 12mm 間隔で配置され、各撮像素子のパッケージ間の間隔は 3.0mm となっている。ProFUSION 25 の場合、表 1 に示した要素の中で撮像素子間に最低限必要な距離がカメラ配置の限界値を規定している。この撮像素子間に必要な距離を短くすることができれば、撮像素子の配置間隔をさらに密にすることができる。しかし、撮像素子の近くに必ず配置しなければいけないバイパスコンデンサの存在や、基板への部品実装時の作業性等の問題より、各撮像素子の間にはどうしても 3.0mm 以上の間隔を確保する必要があり、9.0mm 角の撮像素子の大きさと合わせて、12mm の配置間隔が決定された。

図 2 に ProFUSION 25 の外観を示す。

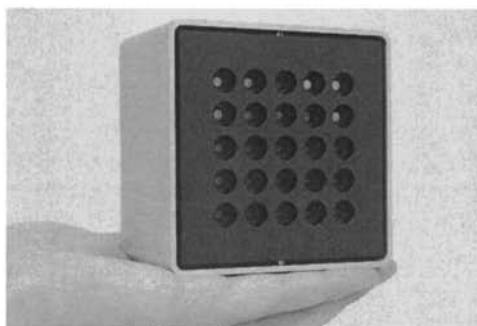


図 2 ProFUSION 25 外観

ProFUSION 25 の諸元を表 2 に示す。

表 2 ProFUSION 25 諸元

撮像素子	1/3 インチ(有効領域 1/4 インチ相当)
解像度	640 x 480 ピクセル (VGA) 25 枚
フレームレート	実効 25fps (25 眼分転送時)
出力フォーマット	8 ビット
焦点距離	5.34mm (F/2.8)
画角	水平 36.8° 垂直 28° 対角 45°
サイズ	90 x 90 x 60 mm
重量	500g

3. 回路設計

カメラレイシステムにおいて、多眼化や筐体の小型化、システム構成の簡潔さを追求すると、カメラ内部の回路構成もさることながら、カメラと PC の間を結ぶ画像伝送インタフェースをどうするかが一番の技術上の課題となる。多眼カメラレイシステムは複数のカメラで構成されることになるので、特に画像伝送インタフェースの帯域を必要とする。例えば、25 台分のモノクロ VGA カメラ画像を 30fps で PC まで転送しようとする、約 230MByte/sec の帯域が必要となる。この帯域を IEEE 1394 等などの一般的な画像伝送インタフェースで確保しようとする多くの場合、伝送路を複数束ねて使う必要があるため、システムが複雑化するだけではなくカメラとしてのハンドリングも悪くなってしまふ。そこで着目したのが、PC 内の拡張インタフェースとして使用されている PCI Express である。現在のところ PCI Express は PC 筐体内部での拡張インタフェースとして使用するのが一般的である。しかし、PCI Express は従来の PCI バスのようなパラレル伝送ではなくパケットベースのシリアル伝送を採用しているため、ケーブルでの伝送が比較的容易に実現できる。事実、2007 年 1 月には PCI SIG による正式な規格として PCI Express の外部ケーブル仕様 (PCI Express External Cabling Specification Revision 1.0) [12] が公開されている。特に、現在の PC アーキテクチャでは PCI Express が外部から自由にアクセス可能なインタフェースとしては原理的にもっとも高速であり、多眼カメラレイシステムのような帯域確保が重要なカメラには最適なインタフェースであると言える。

ここで、従来のカメラの PC への接続方法を図示すると図 3 のようになる。このような構成の場合、PCI Express スロットに何らかの画像入力ボードを装着し、画像入力ボードとカメラの間を画像伝送インタフェースで結ぶ構成をとるのが一般的である。

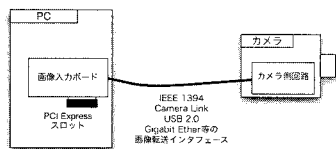


図 3 従来カメラとPCの接続方法

一方、PCI Express を画像伝送インタフェースとして採用した場合は、図 4 に示すように通常 PC 側に装着されている画像入力ボードに相当する回路がカメラ

側に取り込まれ、PC と画像入力ボードの間を PCI Express で延長したような構成となる。

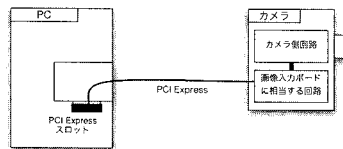


図 4 PCI Express を画像伝送インタフェースとして採用

図 3 で従来、画像伝送インタフェースとして構成されていた部分はカメラの内部にあることになるため、現存する画像伝送インタフェースの規格等に縛られることなく、すべての部分をカメラ毎に最適な設計をとることが出来るのも一つの特徴である。

ProFUSION 25 の内部構成を図 5 に示す。ProFUSION 25 の内部構成は、FPGA に外付け PCI Express x1 PHY と SD-RAM、25 個の CMOS 撮像素子が接続されているのみである。FPGA 内には、PCI Express の IP コアと撮像素子制御回路など 25 個の CMOS 撮像素子を制御しカメラとして機能させるためのロジックが組み込まれている。

ソフトウェア側から見たハードウェア側のインタフェースも単純化されており、PC 側のドライバからはカメラの画像を DMA 転送によって PC の主記憶に転送可能なデバイスとして見える。

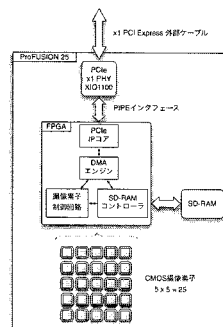


図 5 ProFUSION 25 の内部構成

4. ソフトウェア設計

ProFUSION 25 のソフトウェアを設計するにあたって次のような目標を立てた。

- 簡単に使えること
- スケーラビリティを有すること

多眼カメラレイの筐体を小型化するなど、せっかくハードウェア構成が簡素化されていても、ソフトウェアが複雑では本末転倒である。そこで、ソフトウェアの

設計においても簡単に使えることを第一の目標に上げ設計を行った。具体的には、カメラアレイが基本的に全体として一台のカメラであるかのように扱えるようにし、ユーザ側から見た初期化等の処理の簡便化を図っている。また、カメラアレイから取得した画像には、配列として25枚のVGA画像が含まれており、その後の処理にすぐに使用することができる。図6にProFUSION 25を使用したアプリケーション例として、Synthetic Aperture Photographyの手法[3][8][9]を適用し電子的な処理で後から任意の距離に焦点を合わせるReal-time Digital Refocusingの処理をリアルタイムに行っている様子を示す。



図6 Real-time Digital Refocusing 処理

また、スケーラビリティに関しては、一台のPCに4台のProFUSION 25を接続し、全体として100眼のシステムを構成し試験を行った。一台のPCに4台のProFUSION 25を接続した構成においても、カメラ100台分のモノクロVGA画像を25fpsで取り込み可能なことを確認している。図7に100眼カメラアレイシステムが動作している様子を示す。

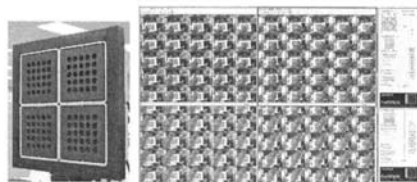


図7 100眼カメラアレイシステム

5. おわりに

本稿では、25眼分のVGA解像度の動画像データをリアルタイムにPCへ取り込み可能な25眼カメラアレイシステムであるProFUSION 25の主に設計についてハードウェア面および回路面、ソフトウェア面から解説を行った。

参考文献

- [1] 谷本 正幸: "自由視点テレビ FTV", 映像情報メディア学会, vol. 58, no. 7, pp. 898-901 (2004.7)
- [2] 苗村 健, 原島 博, 多眼ビデオ入力を用いた実時間 IBR システム - Video-Based Rendering -, VR学会論文誌, Vol.4, No.4, pp. 639 - 646 (1999.12)
- [3] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Levoy, M. Horowitz., High Performance Imaging Using Large Camera Arrays. In Proc. SIGGRAPH, 2005, 765-776.
- [4] J. Yang, M. Everett, C. Buehler, L. McMillan, A real-time distributed light field camera, Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering, pp.77-86, 2002
- [5] C. Zhang and T. Chen, A Self-Reconfigurable Camera Array, 2004 Eurographics Symposium on Rendering 2004
- [6] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, J. Tumblin, Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing, ACM Transactions on Graphics, Vol. 26, Issue 3, Article No. 69, 2007
- [7] Georgiev, T., Zheng, C., Nayar, S., Curless, B., Salasin, D., Intwala, C., Spatio-angular Resolution Trade-offs in Integral Photography, EGSR 2006
- [8] Marc Levoy, Light Fields and Computational Imaging, IEEE Computer, Vol.39, No.8, pp.46-55, 2006
- [9] V. Vaish, R. Szeliski, C.L. Zitnick, S. B. Kang, M. Levoy, Reconstructing Occluded Surfaces using Synthetic Apertures: Stereo, Focus and Robust Measures, Proc. CVPR 2006
- [10] Ren Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, P. Hanrahan, Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera, Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02, April 2005
- [11] 河 宗玄, 小島 将, 高橋 桂太, 苗村 健: レンズアレイを用いた実時間全焦点自由視点画像合成システム, 映像学誌, 59, 10, pp. 1483 -1487, 2005.10
- [12] PCI-SIG, PCI Express External Cabling Specification Revision 1.0, <http://www.pci-sig.org>, Jan. 2007