

IIII 特集：小型惑星・実験装置 その2 IIII  
(解説)

## 民生部品を活用した低コスト宇宙用監視カメラの開発

木村 真一

### Low Cost Monitoring System for Space Applications using Commercial-Off-The-Shelf Devices

Shinichi KIMURA

#### Abstract

While recent advances in space system design have led to increasingly complex spacecraft and mission objectives, importance of the monitoring system to acquire visual images of spacecraft is rapidly increasing. Visual images are effective for checking the deploying process in normal situations, and are also quite important in the case of anomalies wherein we cannot cover the whole system with sensors and predict where the unexpected anomalies may occur. Addition to the situation monitoring, new type applications including amusement such as Google earth, are emerging rapidly. If we can get visual images in orbit in very low cost, we can expect that more applications will be emerged over our current common sense. The resources of monitoring system, such as size and cost, expected to be reduced as much as possible, when we consider it is a part of support or maintenance system. We developed a very small, high-performance image acquiring and processing unit based on COTS (Commercial Off The Shelf) technologies. It has a 500 MIPS calculation capability in a single 46 mm × 46 mm printed circuit board, and it incorporates various types of interfaces using field-programmable gate array (FPGA) technology. The high-performance image acquiring and processing unit is utilized in various kind of missions, such as IKAROS, Hayabusa2, and RiseSat. In this paper, the outline of the high-performance image acquiring and processing unit and examples of its applications.

**Keyword(s):** Camera, Commercial-Off-The-Shelf, FPGA, Image processing

#### 1. はじめに

宇宙において見ることは本質的に重要である。ミッションが複雑になるに従って、監視画像の必要性はいつそう高まりつつある。展開構造物<sup>1)~3)</sup>や遠隔操作<sup>4)~9)</sup>など、高度で複雑なミッションでは、特に運用の信頼度を高め、確実な運用を行う上で、画像による確認が欠かせない。さらに、これらのミッションにおいて取得された画像は端的にそのミッションの状況を反映しており、訴求力も極めて高いので、広報やあるいは教育目的など、画像そのものが様々な形で活用される事が多い<sup>10)~11)</sup>。

このような監視画像を取得するシステムは、その補佐的な役割から、必然的に伝送帯域が非常に限られている場合が非常に多く、画像の取得もさることながら、取得した画像をいかに処理・あるいはいかに保存するかが非常に重要になる。小型衛星等では衛星搭載計算機がこれ

らの役割を受け持つ場合も多いが、性能的にも信頼度の上でも、監視カメラ系で独立していることが望ましく、非常にリソースも限られていることから、画像取得処理機能を限られたサイズで実現する必要がある。またその一方でその補佐的な役割から、コスト的にも非常に圧縮することが同時に求められる。低コストで高機能なコンポーネントを実現する上では、民生技術の活用が欠かせない。

我々はこれまで、民生デバイスに対する放射線の影響について調査を行い、軌道上で民生技術を活用する実績を蓄積してきた<sup>12)~14)</sup>。これらの実績を活用して、民生デバイス、特にソフトウェア的に実現できるFPGA(Field-Programmable Gate Array)を効果的に活用した画像取得処理システム(HP-IMAP)を開発し、様々なシステムに応用してきた<sup>14)~18)</sup>。ここでは画像取得処理システムの概要と、その活用事例について紹介する。

---

東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641  
Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 2641 Yamasaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan  
(E-mail: skimura@rs.noda.tus.ac.jp)

## 2. 画像取得処理システム

### 2.1 ハードウェア

#### 2.1.1 CPU ボード

画像取得処理システムの中核をなすのが、CPU ボードであり、Xilinx 社製 FPGA Vertex2Pro を中心として構成 (Fig. 1) されている。Vertex2Pro は SRAM 型の FPGA であり、目的に合わせて、内蔵されている PowerPC CPU コアと周辺機器との間のインターフェースを自由に構成することができる。カメラを構成するイメージャー等との間のインターフェースを仕様に合わせて柔軟に対応することが可能である。CPU は MHz の発信器を源振としそれを 4 通倍することで 420MHz により動作する。

CPU が動作する上で必要な SDRAM, Flash Memory 等の周辺機器はやはり放射線評価した民生部品を配置している。CPU とのインターフェースは FPGA 上に PLB (Processor Local Bus) と呼ばれるバスアーキテクチャを構築することで実現している。また、調歩同調式シリアルインターフェース (UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter) やカメラの撮像パラメータをコントロールする I2C や SPI といった同期式シリアルインターフェースなど、必要なインターフェースを自在に

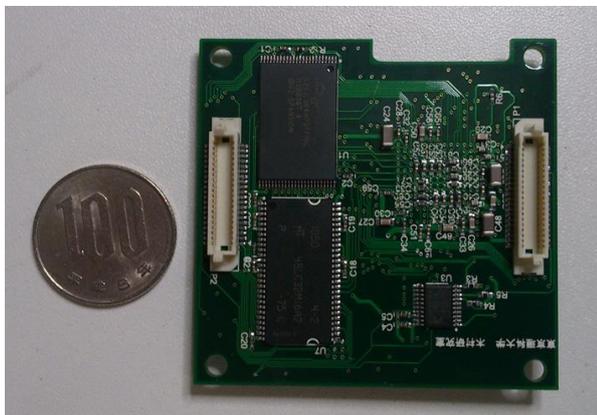
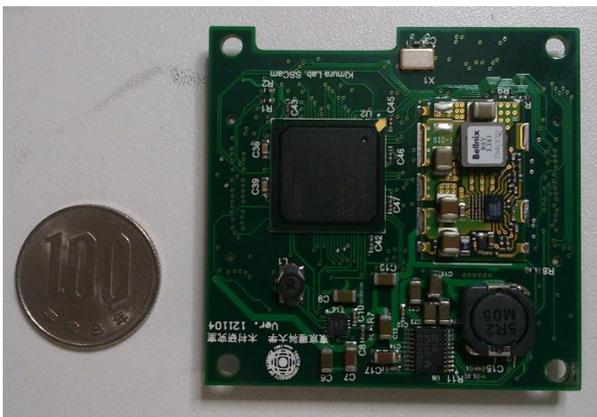


Fig. 1 CPU Board

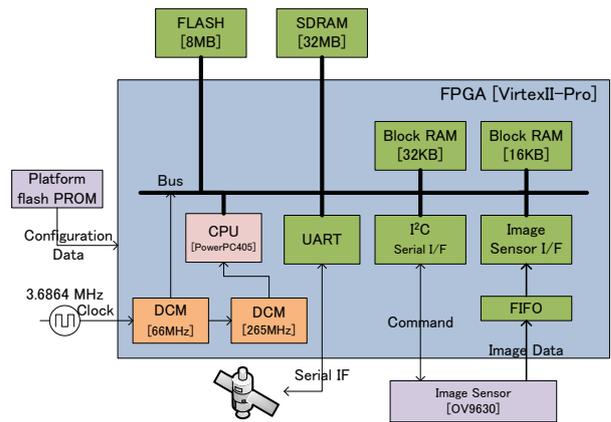


Fig. 2 Block Diagram of CPU Board Architecture

FPGA 上に構築することができる。CPU ボードの構成について Fig. 2 にまとめる。

電源については、ボード内に 3 台の DCDC コンバータを配置しており、外部から 5V の単一電源を供給するだけで、FPGA 並びに周辺機器が必要とする、3.3V, 2.5V, 1.8V の 3 種類の電源を、ボードの中で生成することができる。これらの電源のうち、3.3V と 2.5V については、十分余裕を持った設計になっているので、インターフェースボード側に供給することも可能である。

これら必要な機能は、すべて 46mm 角のボード上に配置されている。FPGA ボードは 2 個の 40 ピンの FX6 コネクタを配置しており、これらを用いて後述のインターフェースボードを、5mm の間隙でスタック結合することができる。60 チャンネルの信号インターフェースと、電源、デバッグインターフェースや FPGA の標準的なテストポートインターフェースである JTAG (Joint Test Action Group) 等利用に必要な全ての配線がこの高密度基板結合コネクタ FX6 をスタックすることで簡単に実現できる。CPU ボードの仕様について Table 1 にまとめる。

Table 1 CPU Board Specifications

CPU Core	Power PC 405
	420-MIPS
Memory	SDRAM : 64-MB
	Flash Memory : 8-MB
Interface	UART: 4ch
	SPI
	I2C
Size	46mm by 46mm
	5V
Power	600mW(Peak)
Operating System	LINUX

## 2.1.2 インターフェースボード

搭載計算機とのインターフェースやイメージャーとのインターフェースなど、ミッションに依存してカスタマイズが必要な部分については、インターフェースボード上に実装している。ミッションに依存したカスタマイズの部分を、全てインターフェースボードで対応することで、CPU ボードの基板パターンの修正という非常に負荷の高い作業を排除し、CPU 側の修正を全て FPGA で吸収することで、様々なミッションへの適応性と開発の効率化を同時に実現している。インターフェースボードは、FX6 コネクタを介して 1 枚もしくは複数枚 CPU ボードとスタックすることで実装する。(Fig. 3)

インターフェースボードの重要な機能として、データの蓄積機能が上げられる。衛星の伝送帯域が狭い場合や衛星搭載計算機のデータ蓄積能力が大きい場合、監視カメラ内で、不揮発メモリによる蓄積が必要とされる場合が多い。インターフェースボードには、大容量不揮発メモリである NAND 型のフラッシュメモリを配置することが可能であり、現在のモデルでは 2GByte のデータを蓄積することが可能である。また、NAND Flash とのデータのやりとりに必要な信号線の余裕がない場合には、NAND 型のフラッシュメモリと MicroChip 社の Programmable IC (PIC) を組み合わせることで、簡易データレコーダーを構成し、利用することが可能である。簡易データレコーダーは UART インターフェースを用い

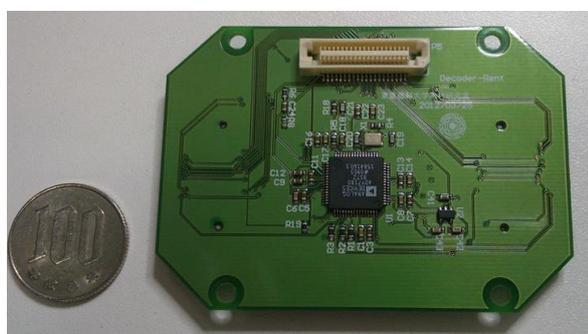


Fig. 3 An Example of Interface Board

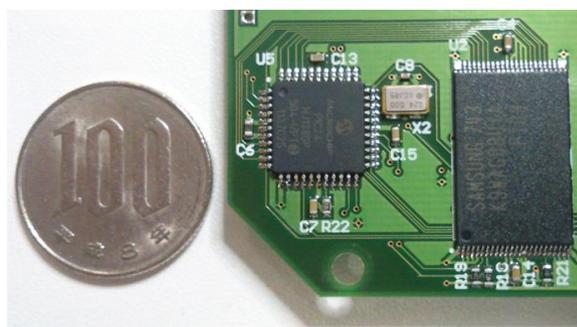


Fig. 4 Small Data Recording Unit

ることで、低速ながら同程度のデータを蓄積することが可能である。(Fig. 4) PIC は機能的には制限があるが、ゲートアレイ密度も比較的低いことから高い放射線耐性を持つことが知られており、小型衛星等で一般的に用いられるプログラマブルデバイスである。

インターフェースボードのもう一つの重要な機能としてアナログビデオ信号のデコード機能、すなわちビデオキャプチャ機能がある。インターフェースボードの多くには、アナログデバイス社のビデオデコーダ ADV7180 を配置しており、アナログビデオ信号のとりこみを可能にしている。詳しくは後述するが、監視カメラの場合カメラヘッドを極力小さくすることが求められる事が多く、アナログビデオ出力機能を備えたイメージャーを用いて、超小型のカメラヘッドを構成する場合が多い。インターフェースボードのデコード機能を活用することで、このカメラヘッドの出力を、最速で 6 frame/sec でデジタルデータとして取得する事ができる。また CPU ボードの JPEG 圧縮機能と組み合わせることで 3 frame/sec の JPEG 圧縮取り込みも可能である。また、デコード機能は複数のカメラヘッドへの接続が可能であり、最大 6 角カメラヘッドを接続し順次画像を取得することができる。はやぶさ 2<sup>17)</sup>や RiseSat<sup>18)</sup>用のシステムではこうした複数画像の取得が効果的に活用されている。

## 2.2 ソフトウェア

画像取得処理システムでは、オペレーティングシステムとして LINUX を採用している。LINUX は周知のように、フリーソフトウェアとして公開・共有されているオペレーティングシステムであり、研究者等にも広く活用されている。LINUX をオペレーティングシステムとして導入することで、LINUX 上で開発されたソフトウェア資産、jpeg 圧縮や画像処理に広く用いられている OpenCV 等を活用することが可能になる。

FPGA を活用しているので、電源を投入するとまず FPGA の論理合成ファイルと共に初期プログラムとして、ブートローダーが起動し、オペレーティングシステムを読み込むためのセカンドブートローダーをまずメモリ内に展開する。その上で Flash Memory 内にイメージファイルとして格納された LINUX のファイルシステムを、SDRAM 上に展開し、LINUX を起動する。

LINUX はマルチタスクのオペレーティングシステムであり複数のアプリを同時起動することも可能である。また、最終運用形態では自動動作するために、アプリケーションを含めた全てのソフトウェアは Flash Memory 内のイメージファイルに格納されるが、プログラムの開発フェーズでは、LINUX コンソールとして動作するデバッグポートからのコマンド操作が可能であり、ソフトウェア開発を進める上で、作業能率が良い。また、アプリケーションも画像データも LINUX のファイルシステムとして管理することができる。

### 3. 画像取得処理システムを利用した代表的な例

ここでは画像取得処理システムを活用して構成した、低コスト宇宙用監視カメラの実施例についていくつか紹介する。画像取得処理システムを活用する場合、システム構成として大きく分けて、「デジタルイメージャー1体型」と「超小型カメラヘッド分散配置型」の2つに大別することができる。

#### 3.1 デジタルイメージャー1体型

画像を取得する場合、イメージャーから出力される大量のデータを CPU が扱えるように SDRAM 内に転送する必要がある。イメージャーからのデータ出力は、クロック同期式の平行シグナルとして出力されるのが一般的であるが、転送速度が速いので、CPU によるソフトウェア管理での対応は難しく、必然的に FPGA による論理回路により実現する必要がある。そのため、イメージャーの複数の信号ピンを直接 CPU ボードにつなぎこむというのが、最も素直な考え方である。インターフェースボード上にイメージャーを配置して、CPU ボードにスタック接続するか、もしくはイメージャーボードを用意して、インターフェースボード上のコネクタを介して、CPU ボード接続する方法である。この信号インターフェースは平行接続であるので、配線をあまり長くすることができないので、このような方法の場合、イメージャーと画像取得処理システムはカメラ筐体内に配置する必要がある。このような利用形態を「デジタルイメージャー1体型」と呼び、IKAROS CAM-H（固定カメラ）等がこの例に相当する。（Fig. 5）

この構成の場合、カメラ筐体は画像取得処理システムを内蔵する必要があるため、比較的大きくなるが、独立したコンポーネントとして、画像の取得から蓄積、画像処理までを一貫して行えるインテリジェントカメラとして活用することができる。

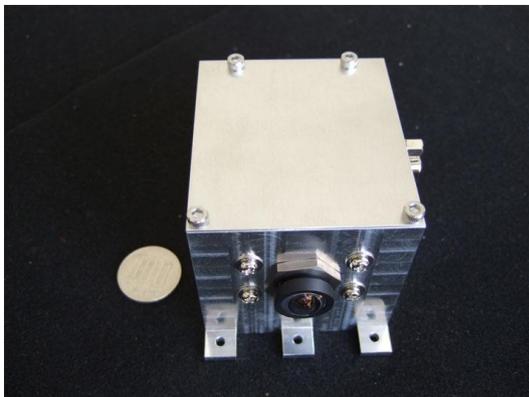


Fig. 5 An Example of Integrated Design of Imager and Processing Board

#### 3.2 超小型カメラヘッド分散配置型

監視カメラとしての利用形態の場合、カメラヘッドを極力小さくしたいという状況はかなり多い。カメラヘッドは監視対象に対する視野を確保する必要性から、搭載場所に対する要求が大きい。こうした要求が他の機器配置と干渉する事は珍しくない。また、IKAROS の DCAM（分離カメラ）が示したように、宇宙機から分離したカメラによって画像を取得するという、画期的な画像取得形態も注目されつつある。このような分離カメラを実現する上では、カメラヘッドは極限まで小さく、また頻度の高い画像の伝送を実現するには、アナログビデオ信号を活用する事が効果的である。

このような、カメラヘッドを極限まで小さくするという要望に応えるために、我々はイメージャー内でアナログビデオ信号へのエンコードまでを実現できる OMNI Vision 社製の CMOS イメージャー OV7950 を活用して、超小型のアナログカメラヘッドを開発してきた。（Fig. 6）現在では撮像条件などのパラメータ変更や LED による投光に対応したものなど、様々なバージョンを用意している。

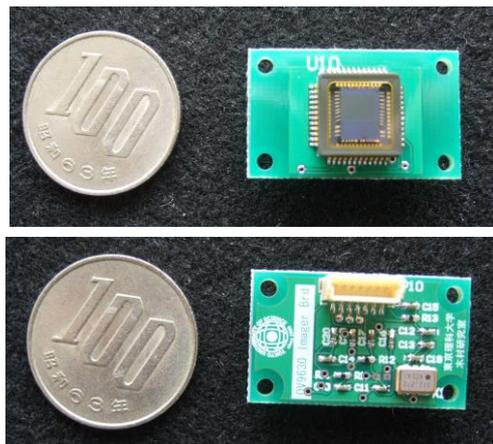


Fig. 6 Small Size Analog Camera Head Board



Fig. 7 Hodoyoshi-3 WACM



Fig. 8 RiseSat MMC Camera Head

このように、アナログカメラヘッドと画像取得処理システムのデコード機能を活用する事で、カメラヘッドを画像取得処理システムから独立させ、必要とする場所に分散配置する利用形態が「超小型カメラヘッド分散配置型」である。IKAROS DCAM やはやぶさ2の監視カメラシステム、Hodoyoshi 衛星のWACM など、様々なミッションで活用されている。(Fig. 7)

この方法の場合、NTSC 信号を用いているので取得される画像の解像度は、インターレースの NTSC 信号を越えることはできないが、カメラヘッドの配置が自由であることと、最大で 6 frame/sec で連続的に画像の取得を行えるところに大きな特徴がある。

画像取得処理システムは最大で 6 チャンネルのアナログビデオ入力を受け取ることができる。RiseSat の Micro Monitoring System ではこの特徴を利用して、広角レンズと組み合わせた、互いに 90 度相対角で配置された 2 方向撮影可能なカメラヘッドを衛星上に 3 カ所配置することで、合計 6 つのカメラヘッドを用いることで衛星の全周囲の画像を取得するユニークなアプリケーションを予定している。(Fig. 8)

またカメラヘッドの出力するアナログビデオ画像を特定省電力の無線機と組み合わせることで、IKAROS DCAM のように、宇宙機から分離した位置での画像を取得することも可能である。

#### 4. まとめ

ここでは低コスト宇宙用監視カメラシステムを実現する上で最も重要となる画像取得処理システムの概要と、その活用事例について代表的な例について紹介してきた。宇宙での画像取得は、複雑なミッションの監視に加えて、広報やアミューズメントなど、様々な利用形態があり、今後ますます需要が広がっていくことが予想される。低コストでこうした画像取得を可能にするシステムは、宇宙利用の幅を広げる可能性があり、今後もより高機能で利用しやすいシステムを目指して開発を進めてゆきたい。

#### 謝辞

本研究は、内閣府/日本学術振興会・最先端研究開発支援プログラムの支援を受けています。

#### 参考文献

- 1) S. Kimura, M. Takeuchi, K. Harima, Y. Fukase, H. Sato, T. Yoshida, A. Miyasaka, H. Noda, K. Sunakawa and M. Homma: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, **40** (2004) 247.
- 2) O. Mori, et. al.: 21st International Symposium on Space Flight Dynamics, Sao Jose dos Campos, 2011.
- 3) D. Tsujita, T. Kasai, H. Uematsu, M. Harada, T. Fukatssu and H.Sasaki: 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, 2013.
- 4) S. Kimura, T. Okuyama, N. Yoshioka and Y. Wakabayashi: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, **36** (2000) 1290.
- 5) M. Oda: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, U.S.A. 1999, p1390.
- 6) Y. Suzuki, S. Tsuchiya, T. Okuyama, T. Takahashi Y. Nagai and S. Kimura: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, **37** (2001) 254.
- 7) S. Kimura, H. Mineno, H. Yamamoto, Y. Nagai, H. Kamimura, S. Kawamoto, F. Terui, S. Nishida, S. Nakasuka, S. Ukawa, H. Hashimoto, N. Takahashi and K. Yoshihara: Advanced Robotics, **18** (2004) 117
- 8) S. Kimura, Y. Nagai, H. Yamamoto, K. Masuda and N. Abe: 2005 IEEE Aerospace Conference Big Sky MT U.S.A., 2001.
- 9) M. Oda: Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, **8**, 2010.
- 10) S. Kimura: Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, **51** (2012) 466 (in Japanese).
- 11) H. Yamamoto, S. Kimura, Y. Nagai, K. Suzuki, H. Hashimoto, N. Takahashi, M. Kato, S. Takayama and H. Kawahara: Koku-uchu-gijyutsu, **5** (2006) 19 ( in Japanese).
- 12) S. Kimura, H. Yamamoto, Y. Nagai, M. Akioka H. Hashimoto, N. Takahashi, M. Kato and K. Yoshihara: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, **41** (2005) 599.
- 13) S. Kimura and A. Miyasaka: Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, **9** (2011) 15.
- 14) S. Kimura, A. Miyasaka, R. Funase, H. Sawada, N. Sakamoto and N. Miyashita: IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, **26** (2011) 19.
- 15) S. Kimura, M. Terakura, A. Miyasaka, N. Sakamoto, N. Miyashita, R. Funase and H. Sawada: Advances in The Astronautical Sciences, **138** (2010) 407.
- 16) S. Kimura, M. Terakura, H. Sawada: Advances in Microelectronic Engineering, **1** (2013) 57.
- 17) Y. Hiromori, H. Sawada, N. Sakamoto and S. Kimura: The 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, 2012.
- 18) K. Ohya, S. Kimura, T. Kuwahara: 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, 2013.

(2013年8月29日受理, 2013年9月18日採録)