

# Raspberry Pi Compute Module ベースの オープンソース 360 度パノラマカメラ「PicamVRC」の開発

平山 巧馬<sup>†</sup> 孟 林<sup>‡</sup> 小柳 滋<sup>§</sup>

**概要:** 360度パノラマカメラの製品が幅広く応用されつつある。WEB 上でも Youtube や Facebook が 360度パノラマ動画に対応したことで、より一層注目されている。また、急増しているオープンソースハードウェアは、ものづくりのイノベーションの加速化に貢献している。しかし、現在はこれらのオープンソースプロジェクトによる 360度パノラマカメラの製品の開発にはまとまった動きが見られない。そこで本稿では、Raspberry Pi Compute Module をベースとしたオープンソースの 360度パノラマカメラである「Picam360」\*の開発を行ったので、その方法と結果を述べる。

**キーワード:** Raspberry Pi Compute Module, 360度パノラマ, オープンソース

## The Development of Raspberry Pi Compute Module based Open Source 360 degree panorama camera [PicamVRC]

TAKUMA HIRAYAMA<sup>†1</sup> Lin Meng<sup>‡</sup> Shigeru Oyanagi<sup>§</sup>

**Abstract:** Recently, 360-degree panorama cameras are widely used. And, the support of panorama movies by Youtube and Facebook are increasing the interest for panorama cameras. The increase of open source hardware gives a large contribution for innovation of manufacturing. However, few open source projects are developing for the 360 degree panorama camera which is based on the open source hardware, even if the open source is increasing. This manuscript is a guide to develop open sourced 360 degree panorama camera (Picam360) which is based on a Raspberry Pi Compute Module, and shows the method and results.

**Keywords:** Raspberry Pi Compute Module, 360 degree panorama camera, Open Source

### 1. はじめに

昨今、RICOH THETA をはじめ、KODAK SP360 や GYLOPTIC 360cam など 360度パノラマカメラの製品が登場し、その利用にも広がりを見せている。WEB 上でも Youtube や Facebook が 360度パノラマ動画に対応し、パノラマカメラがより一層注目されている。

また、「モノがプログラムされる時代」と言われるように、ソフトウェアプログラミングによる産業革命がハードウェア製品に及び、ものづくりのイノベーションが加速している。さらに、これらのプログラムのオープンソース化により、ものづくりのイノベーションが更に加速すると予測されている。しかし、360度パノラマカメラの製品の注目度の高まりにも関わらず、オープンソースプロジェクトによる開発にはまとまった動きが見られない。

我々は、Raspberry Pi Compute Module をベースとしたオープンソースの 360度パノラマカメラである「Picam360」の開発を行った。本稿では、その方法と結果を述べる。本

研究により、オープンソースハードウェアがより一層進展し、イノベーションの加速に寄与していくものと期待する。

### 2. 研究背景

#### 2.1 360度パノラマカメラ

360度パノラマカメラとは、従来の世界をある一定の大きさを持ったフレームに切り取るカメラではなく、世界をそのままひと続きに撮影することができるカメラを言う。種類としては、水平型と半球型、全天球型に分けられる。水平型では、垂直方向である上下の情報が無い物を指し、半球型では上下のどちらか一方の情報が無く、全天球型では世界のすべての情報があるものを言う。

その利用としては、VR によるバーチャルツアーや、不動産物件の紹介など WEB 上での新しい情報発信ツールとして広がりを見せており、中でも Youtube や Facebook が対応したことで、加速度的に普及していくと期待されている。

すでに市場に登場している製品としては、RICOH THETA、KODAK SP360、GYLOPTIC 360cam と挙げられる。

- RICOH THETA[1]は、全天球パノラマカメラで、上下左右全方位の 360 度パノラマ写真が撮れる撮影装置である。全天球パノラマカメラは、全視野を取るために、複数台のカメラを合体する構造となっている。

<sup>†</sup>(株)近江デジタルファブリケーションズ

<sup>‡</sup>立命館大学 理工学部

<sup>§</sup>立命館大学 情報理工学部

\*製品名は OpenVRC から Picam360 に変更したため、論文中には製品が Picam360 にする。

RICOH THETA の場合は、魚眼レンズを前後 2 つ装備している。

- KODAK SP360[2]は、半球パノラマカメラで、周囲 360 度、上下角 214 度、パノラマ写真が撮れる撮影装置である。
- GYLOPTIC 360cam は、半球パノラマカメラの 1 つで、死角が非常に小さい。

## 2.2 オープンソースハードウェア

オープンソースというオープンソースソフトウェアが浸透しているが、昨今ではハードウェアモデリング CAD や電子基板設計 CAD のライセンスがコンシューマーレベルでも容易に導入できる価格のものが普及し、ソフトウェア同様にハードウェア製品の設計データをネット上で公開、共有するオープンソースハードウェアの動きが活発になってきている。また、オープンソースの汎用マイコン基板「Arduino」や後述する低価格の LinuxPC 「Raspberry Pi」といった電子制御プラットフォームの普及もその流れを加速している。

オープンソースハードウェアの中でも特に注目されているのは「3D プリンタ」や「ドローン」分野での動きであり、その普及などはオープンソースプロジェクトによる成果が大きい。他にも、工作機、農機具、電気自動車、木造建築といった幅広い分野で様々なプロジェクトが活発に動いている。

「モノがプログラムされる時代」と言われるように、ソフトウェアプログラミングによる産業革命がハードウェア製品に及び、そのイノベーションが加速することが予測されている。

しかし、そういった活発になってきているオープンソースハードウェアにおいても 360 度パノラマカメラ分野における動きはまとまったプロジェクトが無い。そこで、筆者は Raspberry Pi Compute Module を電子制御プラットフォームとしたオープンソースの 360 度パノラマカメラを開発した。

## 3. Picam360

### 3.1 Raspberry Pi Compute Module

Raspberry Pi Compute Module とは Raspberry Pi 財団が設計する非常に安価な組み込み用の LinuxPC である。Raspberry Pi Computer Module は幅広い分野で活用されており、学術分野においても、Raspberry Pi Computer Module を用いて様々な分野への応用の研究も行われている[4,5,6]。製造販売は RS Components や element14 が行っており価格は \$30 で、700MHz の ARM CPU と 24 GFLOPs の GPU が搭載されている。また、2つの MIPI による高速カメラインターフェースや、46本の GPIO (汎用的に使える IO ピン)

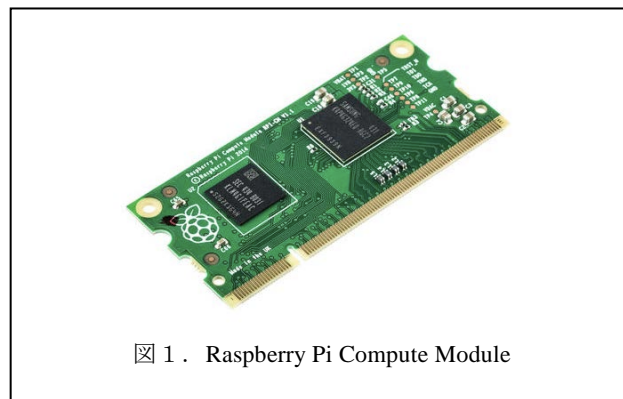


図 1. Raspberry Pi Compute Module

では UART や I2C、SPI など各種センサーとのインターフェース規格に対応している。大きさは 67.6x30mm と非常に小さく、ノート PC のメモリの規格である SODIMM ソケットに差し込む設計になっている。図 1 は Raspberry Pi Compute Module の外観を示す。

### 3.2 Raspberry Pi Camera Module

Raspberry Pi 財団は、さらに専用のカメラモジュールもラインナップしており、画素数は 2592x1944 で 1080p、H264 形式で、1 秒間に 30 フレームの動画を記録することができる。一方、CCD センサーサイズは 1/4 インチと一般のスマホや小型のデジカメが 1/3 インチや 1/2.3 インチであるのに対し、少し物足りなさは否め無いが、Raspberry Pi ファームウェアが正式にサポートするのは 1 つしかなく、選択肢が無いという状況である。そのため、Picam360 でも標準の Raspberry Pi Camera Module を選択した。

### 3.3 魚眼レンズ

魚眼レンズとは、180 度以上といった非常に広角なレンズであり、広い領域を投影するため周辺部が大きく歪むこともその特徴である。一般的に、市販のレンズと言えば高価なものがほとんどであったが、スマホの普及により安価なスマホ用コンバージョンレンズが数多く販売されている。Picam360 プロジェクトでは「Elecom P-SLFBK」を選択した[7]。図 2 は Elecom P-SLFBK の外観を示す。

360 度パノラマを撮像するためには、ある大きさの画



図 2. Elecom P-SLFBK

角を持った複数のカメラユニット全体として360度をカバーできればよい。Picam360ではRICOH THETAと同じ構成である、180度以上の画角を持ったカメラユニットを上下に配置することで全天球パノラマの撮像を行った。

しかし、Raspberry Pi Camera ModuleとElecom P-SLFBKとの組み合わせが最適な設計となっておらず、画像にケラれと呼ばれる、魚眼レンズの投影画像がCCDにおいて一部、撮像できない問題があり、完全に360度をカバーするまでに至っていない。この問題に関しては現在、レンズの最適設計を検討している最中である。

### 3.4 Raspberry Pi Compute Module 拡張基板設計

Raspberry Pi Compute Module単体では電源回路やソケットなどの外部インターフェースが無いが、拡張基板を設計することで自由に目的に見合った拡張を行うことができる。また、回路図や仕様が詳しく公開されているので比較的容易に拡張基板の設計が行える。Picam360では、「SODIMMソケット」「電源回路」「MIPIカメラインターフェースx2」「UART x2」「USB2.0 x1」「Ethernet100baseT x1」を搭載した基板を設計した。CADソフトはEagleCADを用いた。EagleCADはプロユースの機能性でありながら2層、100mm x 100mmまでの大きさの基板であれば無償ライセンスのもとで設計できるため、オープンソースプロジェクトの基板設計においてデファクトスタンダードの存在となっている。今回は4層基板の設計を行うために有償であるMakeProライセンス(\$299/year)のもとで設計を行った。図3は、Picam360の基板図である。

### 3.5 筐体設計

オープンソースハードウェアによる筐体設計は、3次元CADにより設計を行い、3Dプリンタなどでプロトタイプを出力し、最終的に素材の切削加工か金型による樹脂の射出成型により製造する、もしくは、2次元CADにより設計を行い、板状の素材をレーザーカッターやミリングマシンで加工し、複数のパーツを積層させることで製造する2種類の方法がある。前者の方法にある切削加工か金型による射出成型は、proto labs (<http://www.protolabs.co.jp/>)などの安価なウェブオーダーベースの加工サービスが登場し、以前よりも敷居が非常に下がってきているが、それでも納期とコストはそれ相応にかかってくる。加えて、現状の10万円以下で手に入るような3Dプリンタの性能では精度、強度ともに世間で期待されているほどのプロトタイプの高速度化が見出せる状況ではまだない。もちろん、この分野の進歩は目をみはるものがあるので、数年で実用レベルの試作が行える3Dプリンタが出てくると考えられるので今後に期待したい。上記を踏まえ、Picam360では、後者の方式に基づく、アクリル板の2D加工による積層により筐体の製

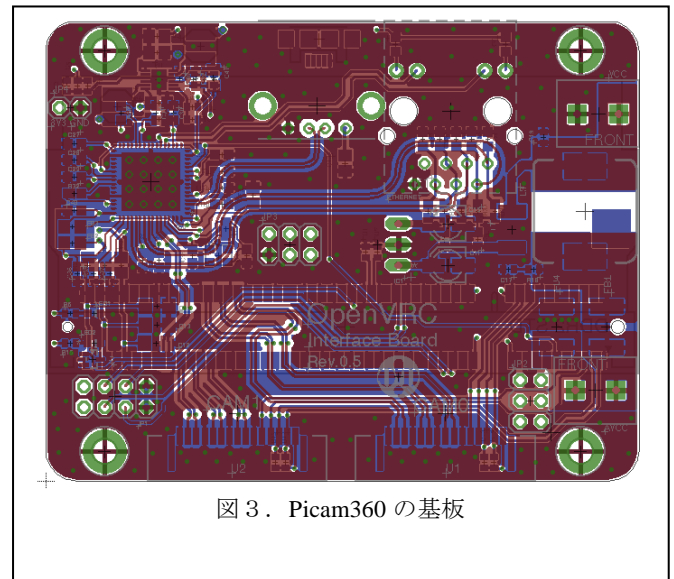


図3. Picam360の基板

造を行った。

使用したCADはOpenSCADという無償のSCAD言語によりテキストで形状をプログラミングできるものを用いた。特にオープンソースハードウェアでは「共有」「他者による変更」が重要なキーワードとなるが、OpenSCADでは設計をテキストで行うため、従来のソフトウェアで培ってきたノウハウをそのまま継承できる利点がある。OpenSCADでは、球体や直方体などの単純な図形の足し算、引き算により3D及び2Dの形状設計を行うことができる。Picam360では、筐体を各層に分け、個々を、上記のPicam360により2D設計を行った。その上で、アクリルをレーザーカッターにより加工を行い、アクリル接着剤により積層した。図4に筐体設計のイメージ図を示す。図5に、実際のアクリル筐体を示す。

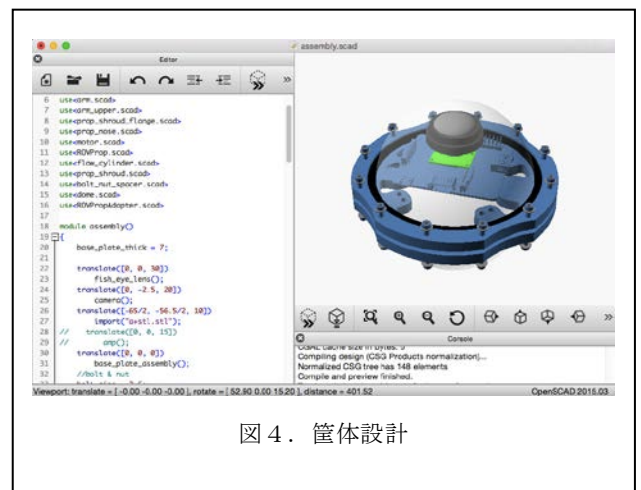


図4. 筐体設計





図5. アクリル管体

### 3.6 組み立て

上記の「アクリル管体」に「Raspberry Pi Compute Module 拡張基板」「Raspberry Pi カメラ魚眼レンズユニット x2」を基板スペーサーネジで固定し、各モジュール間を配線した。図6に Picam360 の完成図を示す。

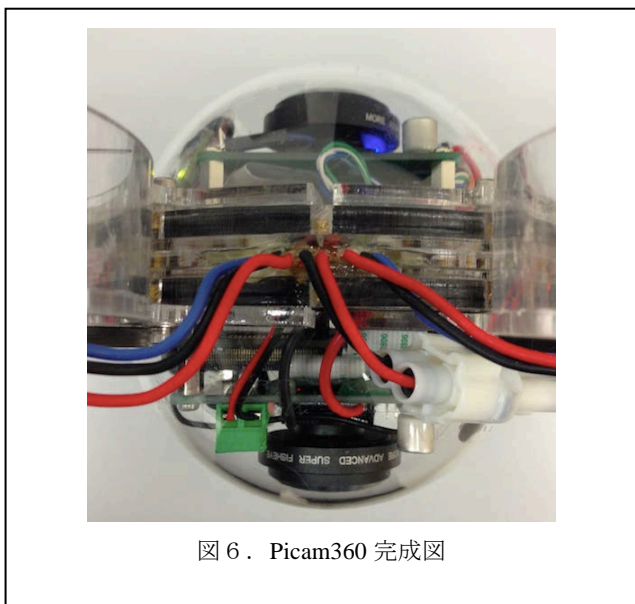


図6. Picam360 完成図

### 3.7 パノラマ画像生成ソフトウェア

パノラマ画像を生成するためには複数のカメラの画像を合成する必要がある。大きく、「魚眼レンズの歪み補正」とスティッチングと呼ばれる「画像のつなぎ目補正」の2つが技術的問題として存在する。これらの補正処理は、画素数の多い画像処理となるため計算量が高く RICOH THETA や KODAK sp360 ではハードウェア側の処理としては実装されておらず、スマホや PC などの後段のソフトウェアの処理として実装する必要がある。そのため、単独でのパノラマ映像の WEB などへの配信ができない。一方、GYLOPTIC 360cam ではハードウェア側で補正を行っていることが大きなアドバンテージとなっている。Picam360 で

は、Raspberry Pi Compute Module に搭載されている GPU を活用して高速に補正処理を可能にし、リアルタイムにハードウェア側で補正を行った。ただし今回は、レンズの制約上の問題もあり、「魚眼レンズの歪み補正」のみの補正をするにとどまった。Raspberry Pi Compute Module において GPU での処理の実装は OpenGL ES2 のカスタムシェーダを利用することで簡素に記述することができ、非常に生産性が高い。パノラマ画像のフォーマットは、デフォルトスタンダードである一般的な地図投影技法である正距円筒投影画像を用いた。図7に画像処理前の魚眼レンズ画像を示し、図8に変換後の正距円筒投影画像を示す。

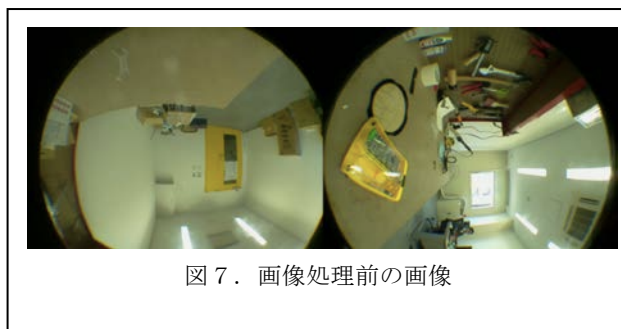


図7. 画像処理前の画像

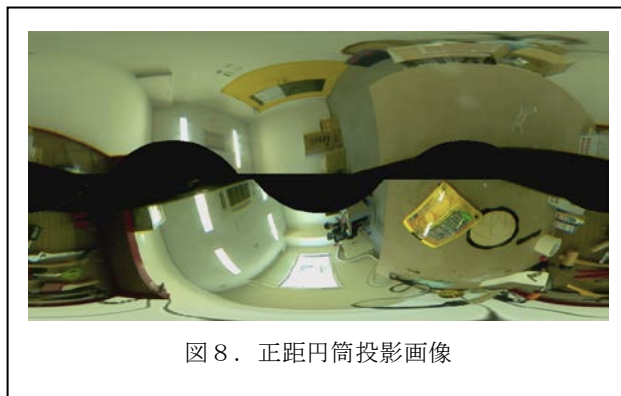


図8. 正距円筒投影画像

## 4. 結果

上記の実装の結果を次に示す。入力画像は魚眼レンズ画像の解像度を RGB24bit 1280x960 を2つとした。GPU による画像処理後の解像度は RGB24bit 2048x1024 とした。その結果、変換処理のみの実行速度は 15fps を達成した。実用性のために MP4 動画のリアルタイムストリーミングも同時に実装した。この時、GPU にて H264 エンコードを同時に行う必要があるが、その場合でも 5fps のフレームレートを実現した。ただし、今後レンズの最適化によって死角が無くなり、つなぎ目補正を実装した場合はさらに計算量が増えることになり、フレームレートが下がる恐れがある。しかし、今後 Raspberry Pi Compute Module ではシングルコアの現バージョンに対しクアッドコアの新バージョンが登場予定であり、つなぎ目補正を実装したとしても現状の 5fps よりもフレームレートを上げることができるものと期

待している。

## 5. おわりに

今後、オープンソースハードウェアはより一層進展し、イノベーションの加速に寄与していくものと期待される。そういった情勢の中で Picam360 は360度パノラマカメラの分野に一石を投じる存在になると確信している。今後、このカメラモジュールを活用して空中や水中の360度パノラマ映像をリアルタイムストリーミングできるドローンやROV（遠隔操作装置）などへの展開を期待したい。それのみならず、今後開発されるオープンソースハードウェアのプロジェクトの礎の1つとして本プロジェクトの成果が活かされることを期待したい。

## 参考文献

- [1] <https://theta360.com/ja/>
- [2] <http://www.maspro.co.jp/products/pixpro/sp360/>
- [3] <http://jp.360.tv/ja/>
- [4] 田中晋太郎, 田川 真樹, 高嶋 健人, 近藤 賢郎, 北口 善明, “Raspberry Pi を利用した無線ネットワーク状態評価システム,” インターネットコンファレンス 2013(IC2013), 2013.
- [5] 橋川 史崇, “移動ロボットを用いた分散センサ群の位置推定に基づく知能化空間の構成支援システムに関する研究,” 明治大学博士学位論文, 2014.
- [6] 矢崎 俊志, 土屋 英亮, “S3R:小型コンピュータと自動走行ロボットによる中小規模サーバ室の自動温度測定,” 学術情報処理研究, No.19, pp.114-121, 2015.
- [7] <http://www2.elecom.co.jp/products/P-SLFBK.html>
- [8] 関 海克, 青木 伸, 江尻 公一, “画像処理による歪曲収差補正とパノラマ画像,” Ricoh Technical Report, No.23, pp.45-52, Sep.1997
- [9] 池田 聖, 佐藤 智和, 横矢 直和, “全方位型マルチカメラシステムによるパノラマ動画の生成,” 信学技報, PRMU2002-154, pp.49-54, 2002.
- [10] Yewng Kwok Ho, “Panorama Interpolation for Novel View Composition,” Master Degree Thesis of the University of Hong Kong, Aug.2000.