

SACLA-BL1 加速器 (SCSS+) およびニュースバル新入射器のスクリーン モニタへの GigE カメラ制御システムの適用

APPLICATION OF GIGE VISION CAMERA CONTROL SYSTEM FOR SCREEN MONITORS OF SACLA-BL1 (SCSS+) AND NEWSUBARU INJECTOR LINAC

清道明男^{#, A)}, 出羽英紀^{A)}, 松原伸一^{A)}, 柳田謙一^{A)}, 福井達^{B)}, 丸山俊之^{B)}, 石井健一^{C)}, 住友博史^{C)}

Akio Kiyomichi^{#, A)}, Hideki Dewa^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Kenichi Yanagida^{A)},

Toru Fukui^{B)}, Toshiyuki Maruyama^{B)}, Kenichi Ishii^{C)}, Hiroshi Sumitomo^{C)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} SPring-8 Service

Abstract

In a part of the SPring-8 upgrade project, the SACLA linac is used as the injector for the storage ring. For the screen monitor (SCM) system in the beam transport from SACLA to SPring-8 (XSBT), we adopted GigE Vision standard that supports PoE power supply for the camera and developed camera control software using the open source library^[1]. SACLA and SACLA-BL1 (SCSS+) screen monitor cameras used the Camera Link standard, but because of the complicated system that combines the extender and selector to one server, there is a problem that it takes time to identify the cause of trouble. Then, we decided to change the GigE camera control system which introduced in XSBT. We also introduced the GigE camera to the screen monitor camera of the New SUBARU injector linac. In this presentation, as progress after introducing the GigE camera control system to XSBT, we report screen monitor control with each accelerator, development of image acquisition system using DB, GUI development using Qt, power supply control board development for newly adopted PoE Ethernet card, and improvement plan for high reliability by switching cameras for high-frequency camera selection operations from machine learning software.

1. はじめに

SPring-8 サイトではスクリーンモニタ(SCM)用カメラに Camera Link 規格のカメラを採用していたが、20 台を超えるカメラを 1 台のカメラ用計算機に接続して制御する複雑なシステムのためトラブル時の原因特定が手間取るといった問題を抱えていた。そこでシステム構成が単純な GigE カメラ制御システムへ移行することとした。

GigE カメラ制御システムは GigE Vision 規格のカメラを採用し PoE(Power-over-Ethernet)給電対応の Ethernet ボードを用いたサーバ型計算機からなるコンパクトで一体的なカメラ制御システム[1]である。その制御システムはオープンソースライブラリ Aravis[2]を使用したカメラ制御ソフトウェアと DB を活用した画像収集システム MDAQ_IMG からなる。新たに Qt を採用した GUI を開発した。また、採用していた PoE 給電対応 Ethernet ボードが新しいチップセットの計算機において給電制御が出来なくなるという問題が発生したため、新たに給電制御ボードを開発した。

最初に SACLA Linac を SPring-8 Storage Ring の入射器とするアップグレードのタイミングで SACLA から SR へのビーム輸送系 (XFEL-SPring-8 Beam Transport, XSBT) のスクリーンモニタ用カメラを導入し、2020 年の年会において報告した[1]。その後、

SACLA-BL1 加速器(SCSS+)のスクリーンモニタ更新と NewSUBARU に建設した新入射器のスクリーンモニタにも GigE カメラ制御システムを導入した。それぞれの加速器での導入や運用状況について報告する。

2. SACLA-BL1 SCM カメラ更新

2.1 GigE カメラの導入

SACLA 加速器と SACLA-BL1 加速器(SCSS+)では蛍光版と OTR スクリーンを使用しており、撮像用カメラは Camera Link 規格の CCD カメラを採用して 10 年ほど運用してきた[3-5]。SACLA では 68 台、SCSS+では 22 台の Camera Link カメラを設置しており、それぞれ加速器棟制御室に設置した 1 台のカメラ用計算機に接続している。カメラと計算機の間には 8ch カメラ切替器を SACLA では 19 台、SCSS+では 4 台使用して、2 段または 3 段接続して多数のカメラを 1 台の計算機に集約している。制御室からスクリーンモニタまで最大 400m あるが、Camera Link 規格の伝送距離は約 10m と短いため光変換による延長器を適宜使用して遠距離伝送を実現している。構成を Fig. 1(a) に示す。

長年の運転で、主に放射線による影響により CCD カメラや光延長器の素子が故障や停止するという事象が散見されるようになった。しかし、伝送経路が光延長器と切替器を多段に組み合わせた複雑なシステムのためにトラブル時の原因特定が困難となり復旧に手間取るといった問題が生じ、安定運用に支障

[#]kiyomichi@spring8.or.jp

をきたしてきた。

そこでXSBTで成功したGigEカメラ制御システムに切り替えることとした。交換した撮像用カメラはGigE Vision規格で、画像素子は画像サイズ1/1.2”、ピクセル数1936 x 1216、ピクセルサイズ5.86 μm x 5.86 μmのモノクロCMOS (SONY IMX174) である。伝送距離は最大100mである。GigEカメラ制御システムは1台の計算機で最大8台のPoE給電対応GigEカメラとトリガを制御する構成[1]であるが、スクリーンモニタに近い保守通路や電源室に制御用計算機を設置しシンプルな伝送システムを構築した。新システムの接続構成をFig. 1(b) に示す。

SCSS+では2020年度に4台、2021年度には18台のカメラを交換し、全22台のカメラがGigE Vision規格へ更新し3台のGigEカメラ制御用計算機で制御する構成となった。SACLAでは2023年からGigEカメラへの交換を順次進める予定である。

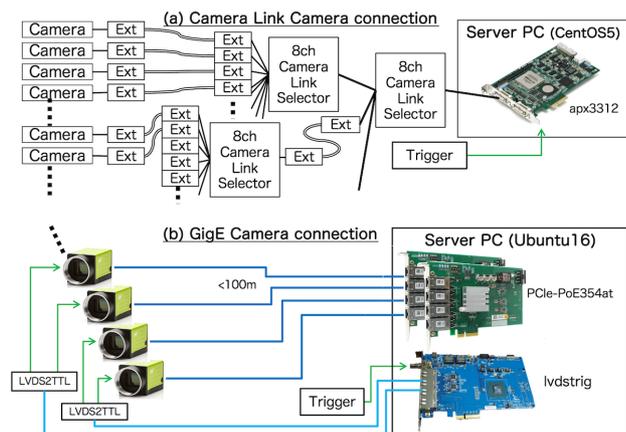


Figure 1: Schematic view of camera connection.

2.2 ソフトウェア

カメラ制御ソフトウェアとDBを活用した画像収集システムMDAQ_IMGはXSBTで開発したもの[1]をそのまま踏襲し、EM構成ファイルを作成するだけで新たなコード開発の必要無くカメラ制御が実現している。画像データはビームトリガに同期して収集し、画像ファイルはNFSディスク上に保存し、その場所情報やゲイン・露光時間といったメタ情報をオンラインデータベースに記録する。SCSS+の調整ではプロファイルを見ながらビーム調整を行う為、一時的に大量の画像データを取得し、後で主要データを残しそれ以外を消すという運用を行っている。そこで、データを消す際にはDB上にdelete flagを付けメタ情報を残して画像ファイルのみを消すようDB関数を整備した。

GUIの開発環境は長らくX-Mate [6] を使用しており、XSBTではX-MateでGUIを作成した。しかしタブ表示が無い、二次元画像表示が遅いなど機能的に時代遅れ感が強くなってきたため、オープンソース版のQt5 [7]へ乗り換えを進めている。SPring-8ではGUI開発に必要なメッセージングやDBアクセス用のQtプラグインおよびライブラリを開発[8]して

いるので、これを利用してSCSS+のスクリーンモニタ用GUIはQtで開発した。

SCSS+では3台のカメラ制御計算機を使用しており、それぞれEMとMDAQ_IMGが動作している。中央制御室にある運転端末から、運転GUIで一括してスクリーン操作やカメラ制御、取得画像のプロファイル解析を行う。また、ビーム調整後に不要となった画像データの削除機能もある。運転GUIをFig. 2 に示す。

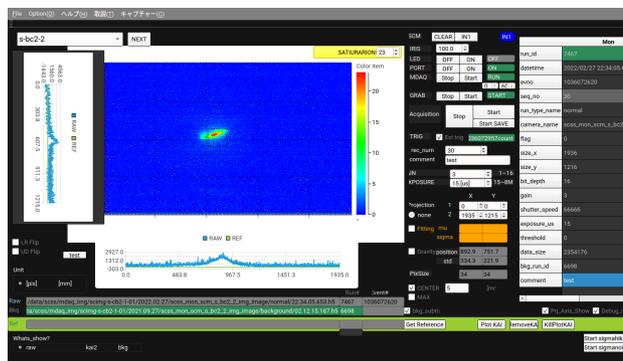


Figure 2: Operation GUI for SCSS+ screen monitor.

3. NewSUBARU 新入射器用スクリーンモニタ

3.1 新入射器建設

SPring-8 サイト内にあるニュースバル放射光施設は兵庫県立大学が運用する1.5GeV電子蓄積リングで軟X線放射光の産業利用に向けた研究開発を行っている。長年にわたりSPring-8の線型加速器から電子ビームを振り分けて供給していたが、SPring-8のSACLA入射に伴い運用停止となったことに伴い、新たな入射器を建設し2021年より運用を開始した。本入射器はCバンド加速管を用いた全長70mのコンパクトかつ低コストの線型加速器で、現在建設中の東北放射光3GeV光源用入射器のプロトタイプでもある。各機器の要素技術や制御系は技術の継承ができるように設計・建設してきた[9, 10]。

3.2 スクリーンモニタとカメラ

新入射器では8台のスクリーンモニタを設置した。スクリーンはCe:YAG、カメラはGigE Vision規格のカメラでSACLA/SCSS+と同等の構成である。GigEカメラ制御システムを適用し、カメラ用計算機1台で8台のカメラを制御する。Figure 3に非分散部スクリーンモニタの光学系を示す。ビーム軌道に厚さ0.1mmのCe:YAGを置き蛍光を発生させる。光は下流側の金属鏡で90°反射された後、熔融石英のビューポートを介して真空中から大気中へ導かれる。結像させるためのレンズは、同一2台のアクロマティックレンズを対称に組み込んだりレーレンズとした。ピント調整用にモーター駆動のステージにカメラを乗せ、ビーム形状を観測しながら遠隔でピント調整を可能とした。

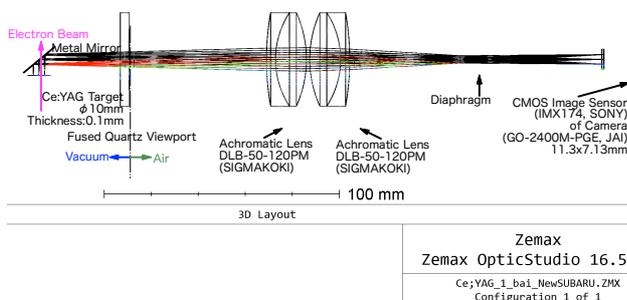


Figure 3: Optical layout of typical screen monitor on New SUBARU injector.

カメラ以外のスクリーンモニタ制御系は EtherCAT[11]で構築した。スクリーン位置の操作および LED 照明制御を EtherCAT プロトコルで行うスクリーンモニタコントローラを製作した。1 台の EtherCAT スクリーンモニタコントローラで 2 台のスクリーンモニタを制御可能となる。またピント調整のモーター制御も EtherCAT プロトコルで行う。これらは EtherCAT マスター通信機能を持つ PCI Express ボード AdEXP1572 を搭載した計算機から制御する。運転 GUI は Qt で構築した。ニュースバル制御室の運転端末からスクリーン操作やカメラ制御、取得画像のプロファイル解析を行う。GigE カメラ制御および EtherCAT 制御からなるスクリーンモニタ制御の構成および GUI を Fig. 4 に示す。

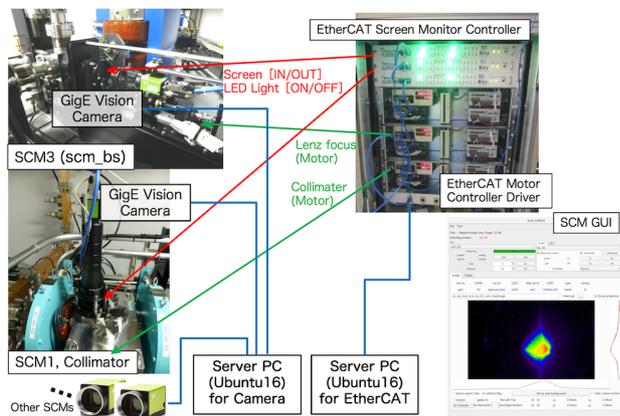


Figure 4: Schematic view of screen monitor control on New SUBARU injector.

4. GigE カメラ制御システムの課題と対策

GigE カメラ制御システムの導入時および運用で生じたトラブルや課題について、幾つか事例と対策を挙げる。とくに大きな対策を行った GigE カメラ用電源制御ボードの開発とカメラ制御ソフトウェアの改良の 2 件は後述する。

SACLA/SCSS+は 60Hz のタイミング信号を配信してイベント番号を割り振り、ビームショットのタグ付けを行っている。ビーム破壊型である SCM の運用では、出射ショットを 1Hz に間引いている。この際、

ビームのあるべきショットタグと撮像タイミングがずれるトラブルが生じていることが判明した。MDAQ の撮像シーケンスの見直しとトリガーボードのカウンタ値調整関数のバグ修正で解決した。

また SCSS+では 1Hz 連続測定を繰り返すことで、当初用意していたディスクパーティションの 256GB では短期間で残容量が切迫することが課題となった。これに対してはまず大容量のファイルサーバを用意して 10TB を専用に確保した。さらに、データベース上のメタ情報を残しつつ画像データを消去する関数を用意し、長期保存の必要の無い画像データはビーム調整後に GUI から容易に選択・削除ができるように運用面の整備を行った。

モーター制御などのカメラ以外のスクリーンモニタ制御系は EtherCAT で構築する方針で、EtherCAT Master ボードを GigE カメラ制御用計算機に装着すれば 1 台でスクリーンモニタ全機能を制御できる。しかし、現行の Neosys tech. 製 Ethernet ボードは EtherCAT Master ボードと同時に使用すると PoE 給電制御ができないことが発覚した。PoE 給電制御は PCI Express のスロットから SMBus 経由で行っているが、これと EtherCAT Master ボードとで競合している。そのためニュースバル新入射器に導入したスクリーンモニタ制御はカメラ制御用と EtherCAT 制御用の 2 台の計算機で構築した。SMBus の課題は計算機の後継機種を選定でも問題となったため、抜本的な対策を講じたので次節で紹介する。

4.1 GigE カメラ用電源制御ボードの開発

GigE カメラ制御用計算機は PCI Express スロットを 5 つ持つ 2U のサーバ型計算機 (Supermicro 5028R-WR, chipset Intel C612) に PoE 給電対応 Ethernet ボード (Neosys tech. PCIe-PoE354at, PCIe-PoE334LP) とトリガボード (ROCKY RCB-LVDS-TRIG8) を実装した構成としていた。Neosys tech. の Ethernet ボードは PCI Express のスロットから SMBus 経由で PoE 給電制御を行っているが、2U サーバ計算機の後継機種 (Supermicro 5029P-WTR, chipset: Intel C622) ではマザーボード上の SMBus を有効化する「SMBus to PCI Slots」のジャンパー設定が削減されており PoE 給電制御が行えないという問題が発生した。また HP など他メーカーのサーバ型計算機の最新機種でも同様に SMBus を有効化できない状況から、チップセットの発展で需要の少ないレガシー機能が削減されたものと思われる。

そこで代替機能として以下の方針で GigE カメラ用電源制御ボードを開発した。

- AVALDATA 製 PoE 対応 Ethernet ボード APX-3404-I350 [12] を採用する。
- 計算機内の補助電源から Ethernet ボードの DC +12V 入力の間をリレー接続する。
- Ethernet ボードへの電源入力をリレー制御で切り入りすることでカメラへの PoE 給電出力を制御する。
- リレー制御は USB 経由で行う。
- カメラ個別に電源制御を行わず、カメラ全数をまとめて制御する。

電源制御ボードは電流容量 6Amax/1ch のリレーを2台接続する構成で、2セットを1枚のボードに実装した。サーバ計算機の補助電源からGPU用もしくはHDD用の電源ケーブルを用いる。Full Height または Low Profile のカードブラケットで固定し、PCI Express用のスロットに装着できるようにした。回路と装着の様子を Fig. 5 に示す。リレー制御はUSBで行う。USB-HID (Human Interface Device) のデバイスアプリを用いて PoE 給電制御を行う EM 関数を開発した。

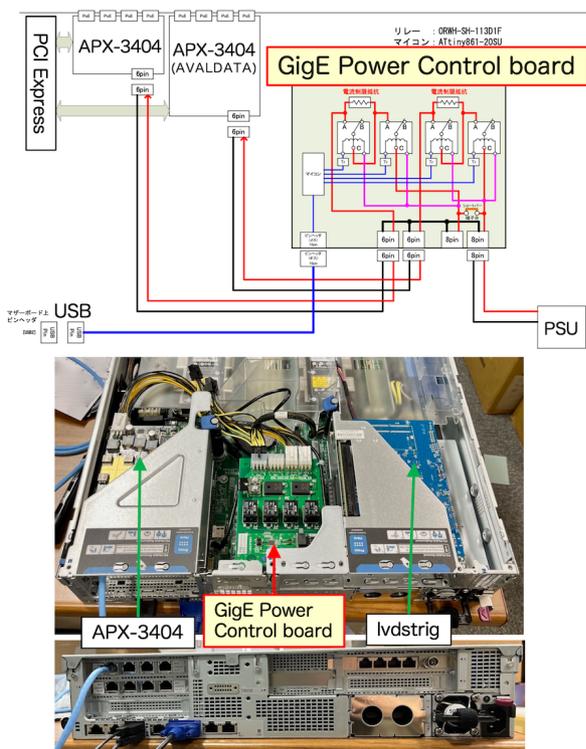


Figure 5: Power control circuit and mounting photo.

AVALDATA 製 PoE 対応 Ethernet ボードと電源制御用ボードの組み合わせでは EtherCAT Master ボードとの共存も可能になる。カメラ個別の電源操作機能は失われるが、GigE カメラ制御と EtherCAT 制御を1台の計算機で担うことが可能となる。東北放射光3GeV加速器のスクリーンモニタ制御では、3列のPCIe スロットを持つ2Uサーバ計算機(HP DL180 Gen10)を採用し Fig. 5 下の写真の構成に EtherCAT Master ボードを追加して使用する。

4.2 カメラ制御ソフトウェアの改良計画

スクリーンモニタ (SCM) は破壊型の測定器であるため同時に使用できるモニタは一つである。よってカメラは同時に1台接続できればよい。SPring-8の制御フレームワーク上ではハードウェアを制御する機器制御レイヤーでは Equipment Manager (EM) と呼ばれるソフトウェアが動作している。カメラ用の EM は GUI からの命令に応じてカメラの設定やステータス情報の取得を行う。また画像データはトリ

ガ入力に応じて撮像を行うため画像データ収集プロセス MDAQ (MDAQ_IMG) が動作している。よって1台のカメラ制御用計算機には EM と MDAQ の2つのプロセスが動作する構成となっている。

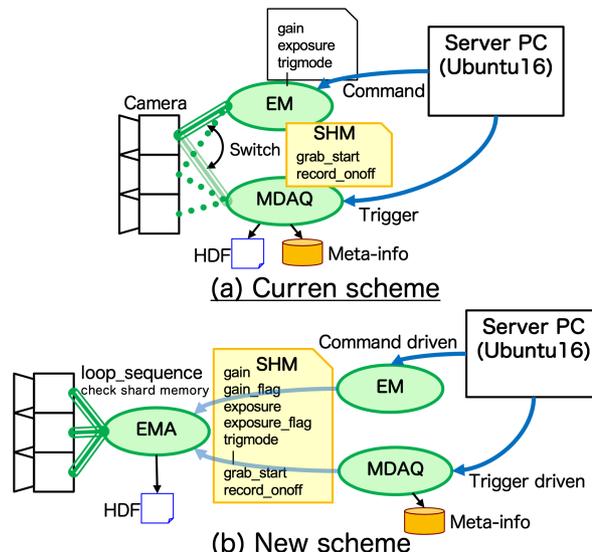


Figure 6: Software scheme of GigE camera control.

現行のプロセス構成を Fig. 6(a)に示す。GigE カメラは1つのプロセスからしか制御ができないという制約があるため、カメラのゲインや露光時間設定など行う EM と画像収集の MDAQ とでは制御権の移行を行っている。EM はコマンド発行時に毎回カメラの open/close 処理を行っている。MDAQ は1台カメラを選択して撮像開始時 (grab start) するとカメラを open する、この状態で録画 (record on) ができる、カメラを切り替えるか撮像終了 (grab stop) すると MDAQ がカメラを close する、という動作になる。稀に制御権の取り合いで不具合が生じ、撮像ができないというトラブルが発生することがわかってきた。ビーム調整におけるプロファイル測定では、GUI 操作で上流から順に SCM の撮像を行っているが、人の手による操作の頻度ではあまり大きな問題にはならなかった。

SACLA では機械学習手法を用いた XFEL の自動調整[13]の研究にて空間プロファイル最適化を行う計画があり、その際には自動調整で SCM の切り替え・撮像を行いたいという要望がある。複数の SCM を順に切り替えての評価を反復して最適化する、非常に高頻度となるカメラ切り替えでの信頼性向上対策を考えた。カメラに対して open/close を繰り返すと open に失敗することがあるため1つのプロセスで全カメラを open し続ける方針とし、自己ループで処理する仕組みである Equipment Manager Agent (EMA)を用いることとし、以下の様な方針を立てた。

- EMA が一括してカメラを open し続け、全ての処理を EMA が行う。
- カメラ毎に共有メモリ (SHM) を設定し、各プロセス間でカメラ設定パラメータを共有する。EMA は SHM をポーリングして指令を受け取る。

- カメラ設定はEMからSHMを介してEMAが操作する。
- MDAQはトリガ入力に応じて選択したカメラの撮像指令をSHMに書き込む。またDBへ画像のメタデータを書き込む。EMAはSHMをポーリングして撮像指令を受け、画像データをファイル書き出す。

改良したプロセス構成を Fig. 6(b)に示す。カメラ切り替え時のオーバーヘッドを減らす工夫のほか、ゲインや露光時間といったカメラ設定パラメータを計算機側に保持することによりトラブル時のカメラ電源切り入り後の手順も簡素化して復旧も早くする工夫も行った。

今秋～冬にSCSS+のスクリーンモニタでカメラ制御ソフトウェアの入れ替え試験を行う。2023年のSACLAにおけるGigEカメラ移行の際に本導入する計画である。

5. まとめ

SPring-8サイトにおいてGigEカメラ制御システムを順次導入した。XSBTでの成功を受けて、SCSS+、ニュースバル新入射器のスクリーンモニタ用カメラをGigEカメラに更新した。PoE給電制御のトラブルを解決した電源ボードの開発やソフトウェアの改良を経て、1台のサーバ型計算機でスクリーン操作から撮像まで行えるコンパクトで一体的なスクリーンモニタ用カメラ制御システムが完成した。今後、SACLAのカメラ更新および東北次世代放射光施設NanoTerasuでの導入を進める。

参考文献

- [1] A. Kiyomichi *et al.*, “Application of GigE Vision camera to new screen monitor control system for beam transport from SACLA to SPring-8”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2020, pp.731.
- [2] Aravis – A vision library for genicam based cameras; <http://www.github.com/AravisProject/aravis>
- [3] H. Maesaka *et al.*, “Commissioning and performance of the beam monitor system for XFEL/SPring-8 SACLA”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 2011, pp.215.
- [4] T. Matsumoto *et al.*, “Commissioning of beam profile monitoring DAQ system for XFEL/SPring-8 SACLA”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 2011, pp.554.
- [5] T. Inagaki *et al.*, “First lasing and commissioning status of the soft X-ray FEL beamline at SACLA”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp.286.
- [6] X-Mate - Fuji Data System Co., Ltd; <http://www.fdsnet.co.jp/products/x-mate>
- [7] <http://www.qt.io>
- [8] K. Okada *et al.*, “Assembling an user environment of accelerator log database at SPring-8/SACLA”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 2021, pp.526.
- [9] T. Inagaki *et al.*, “Operation status and high-power RF conditioning results of C-band main accelerator at NewSUBARU injector”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 2021, pp.895.
- [10] N. Hosoda *et al.*, “Upgrade of the NewSUBARU control system”, Proceedings of the 18th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System (ICALEPCS2021), Shanghai Online, China, Oct. 2021, pp.143.
doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-MOPV014
- [11] EtherCAT Technology Group; <https://www.ethercat.org>
- [12] <https://www.avaldata.co.jp/products/imaging/item/apx-3404-i350>
- [13] E. Iwai *et al.*, “Application of machine-learning to accelerator operations at SACLA”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 2021, pp.151.