

脳生理情報のクラウド解析プラットフォーム実現に向けた 通信手法の検討

近堂 徹¹ 町澤 まろ²

概要: 筆者らは現在, 膨大な脳情報をリアルタイムに遠隔可視化可能な脳波 (EEG: electroencephalogram) をはじめとする脳生理情報を対象に, ヒトの感情価, 活力度, 認知状態などの定量評価に必要なデータの収集・解析・可視化プラットフォームの構築を進めている。屋内や屋外での日常生活場面においても簡便に大容量脳生理情報を計測, 安定的に可視化するためには, 脳波センサや生体センサ, 環境センサなどの複数のエンドデバイスからクラウド側までの通信路においてセキュアかつ効率的なシステム基盤の検討が必要となるが, 安定的・継続的かつセキュアなデータ収集が求められる。本研究では, 既存の広域通信インフラを利用しつつ, 効率的なデータ転送・収集を可能にするための脳生理情報のデータ収集プラットフォームの実現に向けた通信手法の検討について報告する。

Evaluation of Communication methods for the Cloud-Computing Platform for the Neurophysiological Information

TOHRU KONDO¹ MARO G. MACHIZAWA²

1. はじめに

近年, IoT/ビッグデータ/AI などに代表される情報通信技術および数理統計技術の進歩により, 生体情報のビッグデータ化に対する社会実装が世界規模で進んでいる。そのなかでも, ウェアラブルでかつ高い時間解像度で脳情報を直接センシングすることができ, 社会実装に適した, 脳波情報の活用に多くの関心が集まっている。

筆者らは現在, 多チャンネル脳波情報 (EEG: electroencephalogram) による脳情報のリアルタイム可視化技術 [1] をもとに, 感情価, 活力度, 認知状態などを解析するために必要なデータ収集・可視化プラットフォームの構築を進めている。これまでの多くの認知神経科学においては, 実験室内環境において環境ノイズや姿勢, 実験条件などを精密に統制した環境状態において計測・分析を行うことで, 脳生理指標の研究がなされてきている。そのような精密な計測が必要とされる一方で, 実社会の生活場面における高いセンシティブリティが必要な脳波指標などの実証検証がい

まだなされていないことも事実である。屋内や屋外での日常生活場面で簡便かつ安定的に脳生理データを計測, 可視化するためには, 脳波センサや生体センサ, 環境センサなどの複数のエンドデバイスからクラウド側までの通信路においてセキュアかつ効率的なシステム基盤の検討が必要となるが, 実環境における基盤検討や実証までには至っていない。そのためには, 収集の過程で通信品質の劣化等による影響の回避や時系列データのメタデータ化などのデータフローに応じた処理が必要になるとともに, リアルタイム解析に必要な解析アルゴリズムの簡素化, 収集されたデータの解析結果の活用における倫理リスクなども見据えたプラットフォームが将来的に必要となる。その中でも本稿では, 既存の広域通信インフラを利用しつつ, 効率的なデータ転送・収集を可能にするための「脳生理情報のデータ収集プラットフォーム」の実現に向けた通信手法の検討に焦点を当て, 実装およびその評価について報告する。

本稿の構成は以下の通りである。まず, 2 章ではこれまでの脳生理情報の活用に関する取り組みについて紹介し, 3 章でクラウド解析プラットフォームの検討について述べる。特にデータ収集部分に着目した要素技術として SINET

¹ 広島大学情報メディア教育研究センター

² 広島大学脳・こころ・感性科学研究センター

網を利用したモバイル通信と Pub/Sub アーキテクチャによる収集プラットフォームについて紹介する。4 章では、実際に構築した環境におけるプラットフォームでの通信性能に関する基礎実験について述べ、最後に 5 章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 脳生理情報の活用に関する取り組み

広島大学では多くの参画機関と共に、平成 25 年度からスタートした文部科学省革新的イノベーション創出プログラムのひとつとして「精神的価値が成長する感性イノベーション拠点」事業に取り組んでいる。この事業において、ウェアラブルで社会実装に適した脳波計により、ヒトが無意識に表出している脳情報から、感性をリアルタイムに可視化する Brain-Emotion-Interface (感性メーター) [2]-[4]を開発し、環境ノイズや姿勢などを統制した実験室内環境においての計測・分析を経ることで、科学的信頼度を担保した脳生理指標開発を行ってきた。この他、脳活動の可視化技術は世界的にも発展目覚ましく注目されている領域である一方、リアルタイムでの収集・分析・可視化には技術的に多くの課題がある。既存研究の多くは研究室環境あるいは病院内イントラネットの可視化に留まっており [5]、リアルタイムに遠隔地での大容量脳生理反応を処理する試みは少ない [6]。それゆえにリアルタイムでの収集・分析・可視化には多くの課題が存在する。本稿では、特にリアルタイムでのデータ収集に焦点を当てて技術・性能要件をまとめる。

1 点目は通信環境の確保である。脳波計にも様々な電極配置やサンプリングレートが存在するが、高密度の電極数、高頻度のサンプリングレートに比例してデータ量も多くなる。本取り組みでは、これまでの研究から、脳生理指標による感性の定量評価には 30ch, 500Hz の時間解像度を持つ脳波計 (脳波センサー) を利用し、かつ脳波計測中の生体情報や映像や音声などの周辺情報も収集できることが望まれ、これらを総合すると 1 計測あたり数 Mbps 程度の安定した計測が必要となることが分かっている。さらに、これを複数人・多地点で同時にリアルタイムに収集、処理し、可視化できることが本取り組みに求められる性能要件となる。

2 点目にはセキュリティ面での配慮である。屋外でのデータ収集ではインターネットを経由した通信が必要となるケースが多い。エンドデバイスからデータ蓄積場所までの経路の暗号化や認証・認可の仕組みが必要不可欠である。また、リアルタイムの可視化においては認証・暗号化処理にかかるオーバーヘッドも踏まえたプラットフォームを検討する必要がある。

3 点目は展開の容易性である。社会実装を念頭に、屋外等でのフィールド実験の事前準備等に要する人的な作業工数も無視できない要素である。特に、脳波計や生体センサ

など、複数のデバイスを用いた計測を行う場合、機器設定の準備から計測までを簡便かつ迅速に行えなければ、長期的なデータ収集の運用が難しい。さらには、これらを ICT に対するスキルギャップに依存しない形で実現できることが望ましい。

クラウド解析プラットフォームの構築にあたっては、以上のような点を考慮したデータ収集のための通信手法を検討する必要がある。

3. クラウド解析プラットフォームにおける通信手法の検討

3.1 要素技術

データ収集に必要な通信環境とデータ収集フレームワークとして今回採用した、国立情報学研究所が提供する「広域データ収集基盤」と広域データ収集・解析プログラム開発支援ソフトウェアパッケージの「SINETStream」について述べる。

3.1.1 広域データ収集基盤

広域データ収集基盤 (以下、モバイル SINET) [7] は国立情報学研究所が SINET へのアクセス環境としてモバイル網を活用した基盤を提供するものであり、2018 年度より実証実験として運用されている。SINET 接続用の SIM を利用することで、モバイルデバイスから SINET 内に構築された処理環境へ SINET VPN サービス (L2VPN) 等による閉域網接続を行うことが可能になる。例えば、学内の計算機環境や商用クラウド環境に対する閉域網を用意することで、デバイスで生成されるデータをクラウド環境へセキュアに通信することが可能となる。民間のキャリアが提供するモバイル網を利用しているため、広域での展開を行うことが容易であり、学内外を問わず実験フィールドをシームレスに利用することができる。

3.1.2 SINETStream

広域データ収集・解析プログラム開発支援ソフトウェアパッケージ (以下、SINET Stream) [8][9] は、トピックベースの Publish/Subscribe アーキテクチャを採用したメッセージングシステムを構築するためのライブラリを具備しており、データ送信側と受信側が非同期で動作することが可能である。データ転送およびデータ配分 (Broker) を実現するバックエンドには、Apache Kafka[10] (以下、Kafka) もしくは MQTT[11] に対応する。本ライブラリを用いることで、構築するプログラムに対してバックエンドの違いを吸収し統一的な機能を提供することができる。メッセージの送受信においては、データ圧縮や認証・データ暗号化の機能も利用することができる。これらは、SINET Stream 独自で実装された機能と Kafka/MQTT のソフトウェアで実装された機能とがあるが、いずれの機能も SINETStream のライブラリを通して利用することが可能となっている。ソフトウェアは Apache License, Version

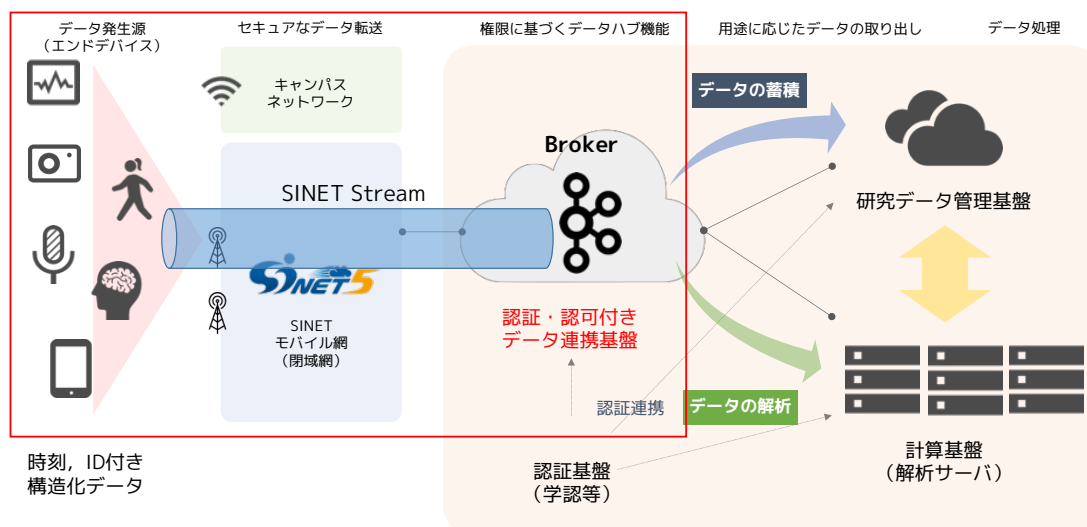


図 1 プラットフォーム構成

2.0 での提供となっている。

3.2 システム構成

現在検討中のシステム構成図を図 1 に示す。通信路にはモバイル SINET、アプリケーションの通信ライブラリとして SINETStream を利用したシステムを構築する。SINETStream の Broker はデータハブとしての機能を有することで、収集したデータを用途や権限に応じてデータ配布することを考えている。データ処理では、計算基盤やデータ管理基盤は学内計算機資源を利用するほか SINET で直結できる商用パブリッククラウド等の計算機資源も活用する。認証基盤を利用した認証・認可付きデータ連携の整備も検討しているが、詳細については 5 章で言及する。

以降、本稿では、赤枠で示すデータ収集における通信部分の実装に焦点を当てて述べる。今回、脳波計には 30 チャンネルドライ電極脳波計の Quick 30 (CGX 社製)*1 を利用した。エッジデバイスには Raspberry Pi (Model 3b) を利用し、SINETStream の Python 版ライブラリを利用したデータ取得・アップロードプログラムを作成した。脳波計に対して専用の USB ドングルを介してハードウェアにアクセスし、加速度計、同期信号などを加えた合計 35 チャンネルに対して、500Hz で出力されるバイナリ形式の脳波データ（サンプリングデータ）を取得する。1 サンプル（800 バイトのデータ）ごとに、図 2 に示す JSON フォーマットに整形し、複数サンプルを 1 つのメッセージにして SINETStream ライブラリ*2 で Broker へ書き込みを行う。今回は、データ転送には Kafka を利用した。1 メッセージに含めるサンプル数は任意に指定可能としており、圧縮方式や認証・認可、暗号化方式、トピック名などと合わせ

```
[{"timestamp" : 1616489866.5798569, "packet_count" : 29, "channels" : [0.768436590830485, 0.6333144505818685, ...], "is_impedance_checked" : true, "battery_voltage" : 3.6328125, "trigger" : 0, ...}]
```

図 2 脳波計のデータフォーマット（例）

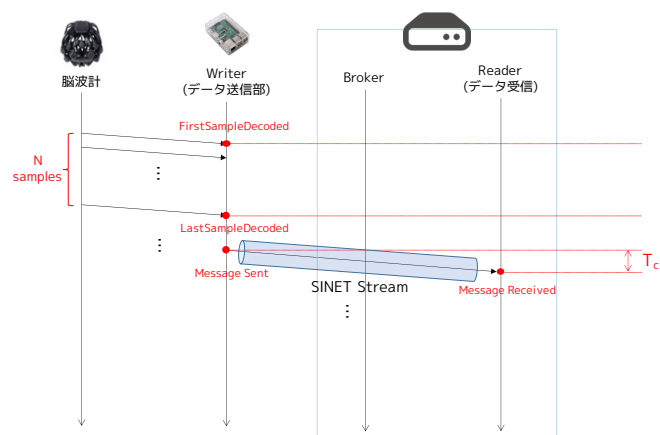


図 3 データの流れ

て起動時の設定ファイルで指定可能である。圧縮方式は、Kafka がサポートする gzip(zlib), lz4, snappy が指定でき、暗号化には Kafka がサポートする TLS による通信暗号化と SINETStream がサポートする AES によるデータ暗号化を指定できる。

Raspberry Pi にはモバイル SINET の SIM を挿入した USB ドングルを介してモバイル接続し、SINET 網内の L2VPN を経由して広島大学内に設置する Broker へデータ転送される。データの流れを図 3 に示す。なお、通信経路はモバイル通信のほか、有線 LAN 接続や Wi-Fi など、Raspberry Pi がサポートする通信メディアを利用すること

*1 <http://cognionics.com/index.php/54-products/headsets>

*2 バージョンは 1.4.0 を利用

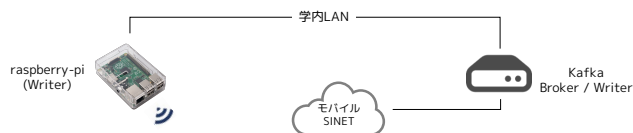


図 4 通信性能実験の環境

表 1 機器諸元

	CPU	メモリ	OS
Writer	ARMv7 (4 vCPUs)	1GB	Raspbian GNU/Linux 10 (buster)
Broker Reader	Xeon(R) E-2136 4 vCPUs	4GB	CentOS Linux 7.9.2009 (Core)

が可能である。

4. 通信性能に関する基礎実験

本章では、データ収集に係る通信性能について実環境を利用した基礎実験について述べる。計測時のシステム構成を図 4、機器諸元を表 1 に示す。

4.1 データ圧縮効果の測定

まず、データ圧縮に係る所要時間について述べる。本計測は、Raspberry Pi 内でメモリ上でデータ圧縮するプログラムを Python で作成し、100 サンプル (80KB) の JSON データに対して本プログラムで指定できるデータ圧縮方式を指定した時の圧縮率と圧縮時間を計測したものである。

計測した結果を表 2 に示す。圧縮率は非圧縮状態を 1 としたときのデータ量を表している。各圧縮方式による圧縮率と圧縮時間は採用する圧縮アルゴリズムに依存するが、本結果も同様の結果になっていることがわかる。JSON によるテキストデータに対する圧縮は zlib が高圧縮である一方、圧縮時間を考慮すると lz4 や snappy が高速に圧縮できていることがわかる。どの圧縮方式を利用するかは対象とするデータ量やリアルタイム性の要否を考慮しつつ決定する必要がある。

4.2 データ送信時間の測定

次に、データ送信に要する時間について述べる。本計測では、3 分間の脳波計測時に送信されるメッセージ (900 メッセージ) の転送に係る時間を測定した。計測区間は図 3 に示した T_c であり、 T_c の中には Kafka による圧縮・展開処理も含まれる。また、本実験では有線 LAN 接続とモバイル SINET の両方で計測した。なお、Raspberry Pi から Broker までの通信遅延 (RTT) を事前に計測した結果を表 3 に示す。

図 5 に有線 LAN 環境における結果、図 6 にモバイル SINET における結果を示す。900 メッセージのこれらの結果から、有線 LAN/モバイル SINET とともに gzip による圧縮を行う場合が通信遅延の平均値が大きくなっている。ま

表 2 圧縮方式の比較

圧縮方式	圧縮率	圧縮時間 (ms)
非圧縮	1	-
gzip (zlib)	0.32	23.2
lz4	0.55	1.42
snappy	0.59	1.36

表 3 通信遅延の特性 (計測日: 2021/4/23)

通信メディア	通信遅延 (ms)			
	最小	平均	最大	標準偏差
有線 LAN	1.88	2.20	23.65	0.03
モバイル SINET	34.42	54.24	216.90	9.71

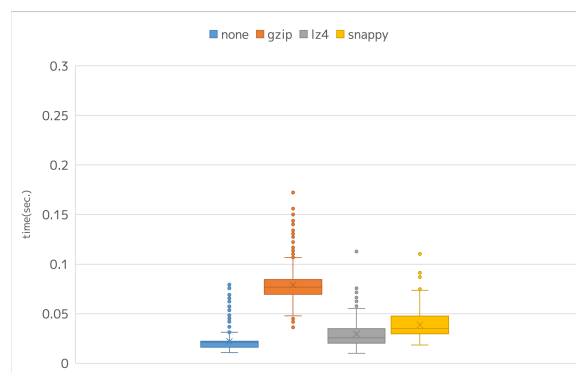


図 5 データ書き込みにおける通信遅延 (有線 LAN の場合)

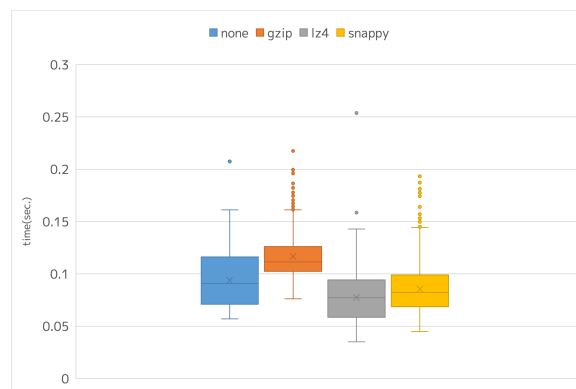


図 6 データ書き込みにおける通信遅延 (モバイル SINET の場合)

た、有線 LAN の場合は非圧縮、モバイル SINET の場合は lz4 が最も遅延の平均値が小さくなっていることがわかる。これは表 2 でも示した圧縮・展開処理に要する時間が効いており、通信容量に対するデータ転送レートよりも圧縮・展開にかかる時間の方が遅延に与える影響が大きい証左であるともいえる。

4.3 データ暗号化による処理オーバーヘッド

本節では、データ暗号化におけるオーバーヘッドを調べるために SINETStream の暗号化機能を利用した場合のスループットの変化について述べる。本計測を行うために、SINETStream ライブラリを利用してメッセージを 1000 回 Write するプログラムを作成した。メッセージサイズを

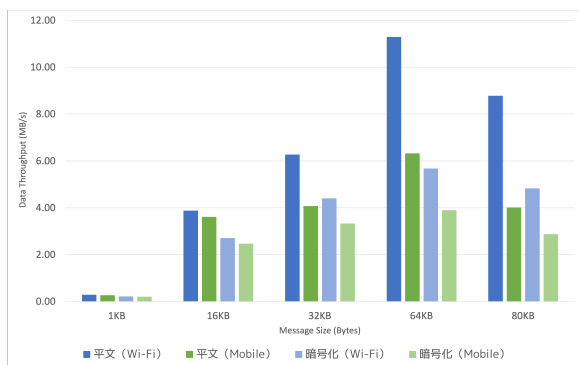


図 7 データ暗号化におけるスループットの変化

1KB から 80KB まで変化させ、それぞれのケースで書き込みに要した時間を図ることで、書き込みスループットを算出した。計測は 4.1 節と同様の環境および機器で行った。

図 7 に計測結果を示す。結果は、各メッセージサイズで 3 回計測した平均値を図示しており、縦軸は秒間での書き込みデータ量となっている。本結果から、64KB の場合が有線 LAN、モバイル SINET とともに書き込みスループットが高くなっていることがわかる。これは秒間のメッセージ書き込み数と 1 メッセージあたりのデータサイズで決まるものであり、今回の環境では 64KB（今回利用した 30ch, 500Hz の脳波データでは 160ms 分に相当）付近でバランスが取れた結果となった。また、データ暗号化によりスループットの低下が見られるが、LAN 環境と比較するとモバイル SINET の場合は暗号化の有無による差は小さくなっている。これは、モバイルネットワークの性能が影響しているものと考えられる。

5. 考察

前章まででモバイル SINET および SINETStream (Kafka) による実測データによるデータ書き込み性能についてまとめた。ここでは、これらの結果を踏まえて脳生理情報のクラウド解析プラットフォームの実現に向けた課題等について整理する。

4.1 節の結果から、今回利用した 30 チャンネルドライ電極脳波計の解像度程度であれば、データレートは 3.2Mbps 程度であり、LTE モバイル網であっても非圧縮でリアルタイム伝送が可能であることを示すことができた。また速度重視型の圧縮方式を併用することで、リアルタイム性を損なわず圧縮方式を併用できることもわかった。今回の評価実験ではデータ圧縮と暗号化処理の併用は行っていないが、データ暗号化と組み合わせにより圧縮効率は下がるものの、リアルタイム性を損なわない形で伝送可能であると考えられる。今後、この点についても検証を進めていく。

データ転送以外の部分についての今後の課題について述べる。1 つ目に複数データの取り扱いがある。今回は単一デバイスのみの転送実験を行なったが、後は生体センサ、

環境センサなどの複数のセンサデバイスのデータ収集を想定した評価が必要となる。デバイスによってデータアップロードの間隔やデータサイズが異なるため、それぞれの特性を踏まえた、パラメータの調整や中間ノードでの追加処理が必要となる。2 つ目には SINETStream で利用するトピック/キューの構造・データベース構造の検討である。複数センサで同時計測を行う際、データの識別子としてのトピックをどのように管理し、プラットフォーム上で共有するかを検討する必要がある。また、トピック名から内容が推測されないようにトピック名の秘匿化や適切な権限に応じたリスト取得等も検討する必要がある。3 つ目はデータ収集後の活用についてである。すでに文献 [4] で示す通り解析アルゴリズムについては実用段階にあり、SINETStream からのデータ読み込みに対応することで、本稿で示したデータ収集方法により集めたデータを可視化できることを確認している。今後は、トピックベースの Pub/Sub アーキテクチャの特徴を生かし、データ蓄積や異なる解析アルゴリズムへのデータ配布など、必要な認証・認可を経たデータ連携の仕組みを考えていく必要がある。

6. まとめ

本稿では、脳生理情報を対象に、ヒトの感情価、活力度、認知状態などの定量評価に必要なデータの収集・解析・可視化プラットフォームの実現に向けた、脳波データのリアルタイム収集手法について焦点を当てて報告を行った。国立情報学研究所が提供する広域データ収集基盤と Pub/Sub アーキテクチャを採用したソフトウェアライブラリ SINETStream を活用した収集アプリケーションを開発し、基本性能評価を行い、リアルタイムでのデータアップロードが可能であることを示した。本稿の範囲には含まれていないが、現在サーバーサイドの解析・可視化部分も別途開発を行っており、これらを結合したプラットフォームの構築に向けた作業を進めている。

今後は、脳波データ以外の複数センサーデバイスのデータアップロードやそれらの収集過程においてエッジノードでの処理機構 [12] の組み込みなどを検討していく。

謝辞 本発表に関する取り組みにご尽力頂いた広島大学 BMK センター町澤研究室各位および広島大学工学部菅原政行氏に深くお礼申し上げます。本研究は 2021 年度国立情報学研究所公募型共同研究（21S0603）および JSPS 科研費 21K118460A の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Machizawa, et al., Quantification of anticipation of excitement with a three-axial model of emotion with EEG, Journal of Neural Engineering, 2020.
- [2] 精神的価値が成長する感性イノベーション拠点, 入手先 <<https://bmk.hiroshima-u.ac.jp/facility/kanseimeter/>>.

(参照 2021-04-30).

- [3] 特許第 6590411 号, 感性評価方法、広島大学.
- [4] 商願 2020-108112 「感性メーター」.
- [5] Ke, H., Chen, D., Shah, T., Liu, X., Zhang, X., Zhang, L., Li, X., "Cloud - aided online EEG classification system for brain healthcare: A case study of depression evaluation with a lightweight CNN. Software: Practice and Experience", 50(5), pp.596-610, <https://doi.org/10.1002/spe.2668>, 2020.
- [6] Gutierrez, L., Husain, M. "Design and Development of a Mobile EEG Data Analytics Framework". 2019 IEEE Fifth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), pp.333-339, 2019.
- [7] SINET 広域データ収集基盤実証実験, 入手先 (<https://www.sinet.ad.jp/wadci>) (参照 2021-04-30).
- [8] SINET Stream, 入手先 (<https://www.sinetstream.net/>) (参照 2021-04-30).
- [9] 竹房 あつ子, 孫 静涛, 藤原 一毅, 長久 勝, 吉田 浩, 政谷 好伸, 合田 憲人, "SINET 広域データ収集基盤を用いたオンラインビデオ処理実証実験", 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス, pp.45-57, 2020.
- [10] Apache Kafka, 入手先 (<https://kafka.apache.org/>) (参照 2021-04-30).
- [11] MQTT Version 3.1.1., 入手先 (<http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>) (参照 2021-04-30).
- [12] Tohru Kondo, Hidenobu Watanabe, Kai Kobayashi, Hayato Kimura, Toshihiro Ohigashi, "Development of the Edge Computing Platform with Dynamic Modular Configuration for an IoT Platform", Proceedings of the 2019 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, pp.1-6, 2019.