

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20253

研究課題名（和文）高い即時性を備えた分散pub/subメッセージング技術

研究課題名（英文）Enhancing Timeliness of Distributed Publish/Subscribe Messaging

研究代表者

坂野 遼平（BANNO, Ryohei）

工学院大学・情報学部（情報工学部）・准教授

研究者番号：30832521

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、低遅延な分散型Publish/Subscribeメッセージングの実現に向けて取り組みを行った。Publish/Subscribeメッセージングは、Brokerを介して情報交換を行う通信モデルである。高い即時性が求められる大規模システムへの適用を想定した場合、多数のBrokerを用いて負荷を分散させつつ、そのオーバーヘッドにより生じる遅延を小さく抑える技術が必要となる。Broker間のマルチホップ転送の経路長削減、動的なトポロジの切り替え等の手法を提案し、シミュレーション実験等により、高いスループットを得つつ遅延を抑え得ることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、自律分散システムで用いられる著名なアルゴリズムを対象として転送経路長の短縮等を実現する手法を複数提案している。これらの改良手法は、本研究でターゲットとしたPublish/Subscribeメッセージングに限らず、様々な応用において役に立つ可能性がある。また、研究成果の社会還元の一手段として、研究過程で開発したソフトウェアを無償利用可能な形で一般公開しており、既に国内外において利用事例がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on realizing low-latency distributed Publish/Subscribe messaging. Publish/Subscribe messaging is a communication model in which information is exchanged through a broker. Considering large-scale systems that require real-time communication, it is necessary to distribute the load using a large number of brokers while suppressing the latency caused by the overhead of the load distribution. We have proposed several techniques, such as reducing the path length of multi-hop forwarding among brokers and dynamically switching topologies. Simulation experiments showed that these techniques achieve high throughput while lowering latency.

研究分野：分散システム

キーワード：IoT Publish/Subscribe オーバレイネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

疎結合性に優れた通信モデルとして、Publish/Subscribe モデルが知られている。これは、送受信者の間に配した Broker がデータ内容に応じて受信者を動的に決定し、転送や通知を行う仕組みである (図 1 上)。送受信者は通信相手を直接意識する必要が無いため、通信管理の負担を軽減でき、データの生成・消費に専念できる。そうした特性から、非力なデバイスや送受信関係が流動的な状況に適するため、近年では特に IoT システムへの適用で注目されている。

多数の IoT デバイスから成る大規模システムへの適用を考えた場合、Broker への負荷集中によるサービス停止や QoS 低下が課題となる。このため、研究代表者は複数 Broker を用いた負荷分散技術の研究に取り組んできた (図 1 下)。しかしながら、そうした手法において負荷分散性を得られる一方、送信者 (Publisher) から受信者 (Subscriber) にデータが届くまでの遅延時間が増大する問題があった。その大きな要因のひとつは Broker 間のマルチホップ転送である。負荷分散のためには Broker 間で木構造を形成してデータをマルチホップ転送する必要があるが、各 Broker における処理や I/O 等の遅延の累積によって送受信者間の遅延時間増大が生じてしまう。言わば、スケーラビリティと低遅延性がトレードオフの関係にあり、これが大規模かつリアルタイム性を要するシステムへの Publish/Subscribe 型メッセージング適用を考える上で課題となっていた。

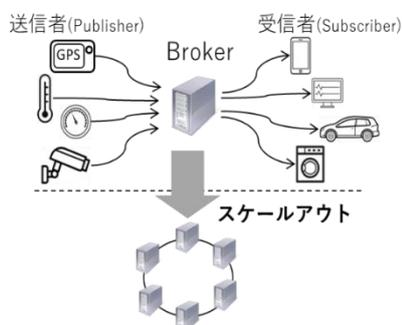


図 1. Publish/Subscribe モデル

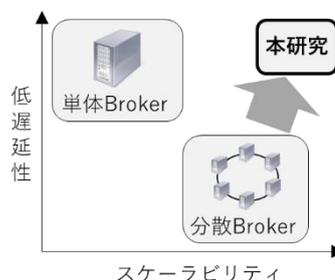


図 2. 研究の位置付け

### 2. 研究の目的

本研究では、Publish/Subscribe 型メッセージングにおいて高いスケーラビリティを確保しつつ遅延をも低減することを目指した (図 2)。

### 3. 研究の方法

主に、以下の①および②の観点から研究を進めた。

- ① 経路長の短い木構造の形成：従来の手法では、Broker 群が論理ネットワークを形成し、この論理ネットワークのサブグラフとして Publisher と Subscriber を仲介する木構造を形成する (図 3)。この際、各ノードはスケーラビリティの観点から全域的な情報を保持していないため、形成される木構造は論理ネットワーク上における最短経路とはならない。本研究では、各ノードが持つ局所情報を活用し、経路長の短い木構造の形成を可能とする手法を設計した。
- ② 適応的なトポロジの組み換え：従来の手法では、Broker 群に対する負荷の多寡に関わらず、前述の木構造を用いた転送を行う。本研究では、低負荷時には低遅延性を重視し、経路長が 1 となるよう、論理ネットワークのトポロジを適応的に組み替える手法を設計した (図 4)。

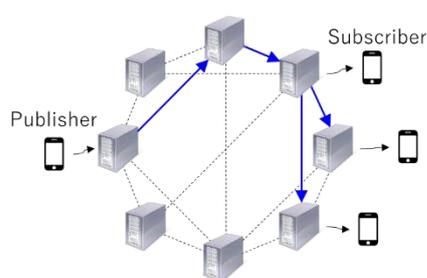


図 3. Broker 間の木構造の形成

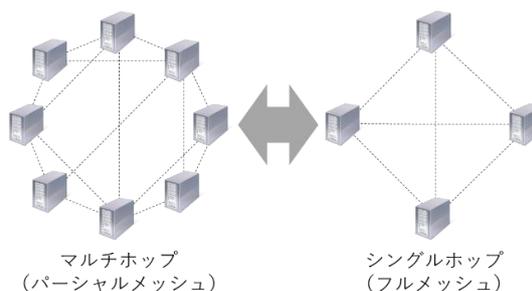


図 4. 適応的なトポロジの切り替え

#### 4. 研究成果

##### 経路長の短い木構造の形成

二項木構造の導入による経路長短縮: 従来の手法においては二分木が形成されていたが、本研究では各ノードが保持する情報に変更を加えることなく、二項木をベースとした木構造を形成する手法を提案した(図5)。これにより、根ノード付近に位置するノード数が多い構造となり、平均経路長の短縮が可能となる。シミュレーションによる実験では、配送対象となるノード数が10,000の場合に平均経路長が約36%短縮される結果が得られた(図6)。

迂回経路の活用による経路長短縮: 従来の手法では、図7に示すように、ノード群を1次元数値空間上に写像し、宛先となるノードに対し単方向に漸近する形で経路が構築されていた。本研究では、単方向に限定しない経路、すなわち迂回経路によって、より短い経路長となるケースが存在することに着目し、新たな経路構築手法を提案した。具体的には、各ノードが保持する局所情報から、迂回による経路短縮の有無を推定し、推定結果に応じて迂回経路を選択する手法を提案した。シミュレーション実験では、平均経路長が20~30%程度短縮される結果が得られた。

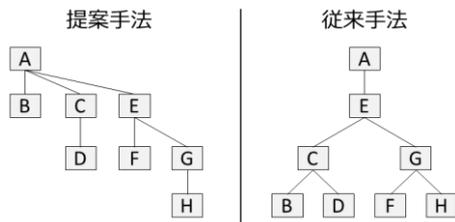


図5. 形成される木構造の違い

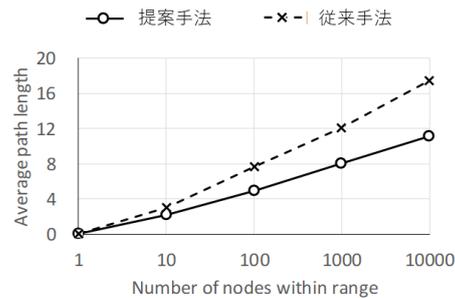


図6. シミュレーションによる平均経路長

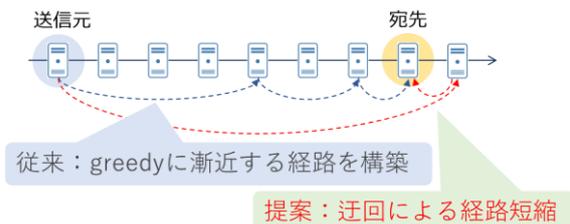


図7. 迂回経路による経路長短縮

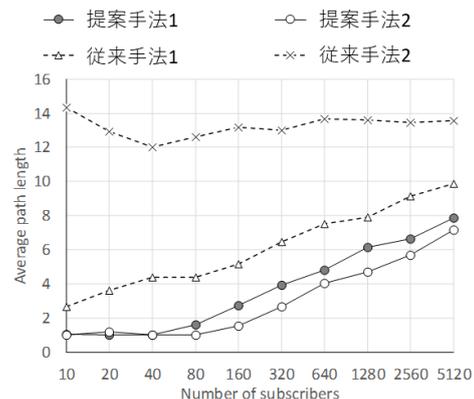


図8. 適応的なトポロジ組み換えのシミュレーション結果

##### 適応的なトポロジの組み換え

本研究では、Broker 群に対する負荷の多寡に応じて適応的なトポロジを形成する手法を提案した。具体的には、以下のように振る舞う手法を設計した。

- 高負荷状況、すなわち Subscriber を収容する Broker が多数の状況下においては、関連する Broker 群でパーシャルメッシュトポロジを構築し、負荷分散を図る。
- 低負荷状況、すなわち Subscriber 収容 Broker が少数の場合には、関連する Broker 群がシングルホップの接続関係となるフルメッシュトポロジを形成し、低遅延の配送を実現する。

図8にシミュレーション実験の結果を示す。横軸はSubscriberを収容するBroker数を表しており、低負荷時には既存手法と比べ約60%以上、高負荷時においても約20%以上、経路長を短縮可能という結果が得られた。

##### その他

以上に述べた成果は各種論文誌や国際会議に採録されている。提案した各手法やその発想は Publish/Subscribe 型メッセージング以外にも適用できる可能性があり、今後さらに検討を進めていく。

また、本研究の過程において、代表的な Publish/Subscribe 型プロトコルである MQTT の性能測定ツールを開発し、オープンソースで公開している<sup>1</sup>。国内外において利用されつつあり、研究に基づく知見の社会還元および社会からのフィードバック獲得の手段として、継続的に更新・発展させていくことを考えている。

<sup>1</sup> “MQTTLoader”, <https://github.com/dist-sys/mqttloader> (2023年6月5日参照)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Makoto Fukushiro, Yusuke Kitagawa, Ryohei Banno	4. 巻 Vol. 11, No. 12
2. 論文標題 A drone-based movable smart remote control for household appliances	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 778-783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2022COL0033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takumu Takada, Ryohei Banno	4. 巻 Vol. 8, No. 28
2. 論文標題 Managing Trade-off Between Subscription Load and Latency in Vehicular Edge Platform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EAI Endorsed Transactions on Internet of Things	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4108/eetiot.v8i28.708	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takeshi Kaneko, Ryohei Banno, Kazuyuki Shudo, Kota Abe, Yuuichi Teranishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Detouring Skip Graph: Efficient Routing via Detour Routes on Skip Graph Topology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of the Communications Society	6. 最初と最後の頁 1658-1673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJCOMS.2020.3028871	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ryohei Banno, Yusuke Kitagawa, Kazuyuki Shudo	4. 巻 Vol. 10, No. 8
2. 論文標題 Exploiting semi-structured overlay networks in blockchain systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 447-450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021ETL0011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryohei Banno, Kazuyuki Shudo	4. 巻 Vol. E103-D, No. 03
2. 論文標題 An Efficient Routing Method for Range Queries in Skip Graph	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 516-525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2019FCP0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 盛房亮輔, 坂野遼平, 安倍広多, 寺西裕一, 石原真太郎, 秋山豊和	4. 巻 Vol. 61, No. 2
2. 論文標題 SDNを活用するPub/Sub基盤におけるオーバーレイネットワーク管理方式の改善手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 326-338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Ryohei Banno, Koki Osawa
2. 発表標題 Acceleration of MQTT-SN protocol using P4
3. 学会等名 IEEE Global Internet Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井大輝, 坂野遼平
2. 発表標題 ジェスチャを用いたドローンによる家電操作システムの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉村佳祐, 坂野遼平
2. 発表標題 Server redirectionを利用したMQTTブローカへのクライアント振り分け手法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryohei Banno, Toshinori Yoshizawa
2. 発表標題 A scalable IoT data collection method by shared-subscription with distributed MQTT brokers
3. 学会等名 EAI International Conference on Mobile Networks and Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福代誠, 北川雄介, 坂野遼平
2. 発表標題 ドローンとスマートリモコンを用いた家電制御の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上輝泰, 坂野遼平
2. 発表標題 MQTTと分散KVSを用いたスケーラブルなIoTデータ収集基盤
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野遼平, 芳澤俊成
2. 発表標題 MQTTブローカと共有サブスクリプションを用いたスケーラブルなIoTデータ収集方式の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会インターネットアーキテクチャ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Banno, Koki Ohsawa, Yusuke Kitagawa, Takumu Takada, Toshinori Yoshizawa
2. 発表標題 Measuring Performance of MQTT v5.0 Brokers with MQTTLoader
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications & Networking Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Banno, Kazuyuki Shudo
2. 発表標題 Adaptive Topology for Scalability and Immediacy in Distributed Publish/Subscribe Messaging
3. 学会等名 IEEE Annual International Computers, Software & Applications Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryohei Banno
2. 発表標題 Various Tradeoffs in IoT Systems and Edge Computing
3. 学会等名 EAI International Conference on Mobile Networks and Management (MONAMI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂野遼平
2. 発表標題 IoTを支えるMQTTプロトコルとその技術動向
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大澤昂生, 日比智也, 坂野遼平
2. 発表標題 P4を用いたMQTT-SNアクセラレーションの実装
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田拓夢, 坂野遼平
2. 発表標題 エッジコンピューティングを用いたダイナミックマップにおける通信遅延と負荷のトレードオフ分析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芳澤俊成, 坂野遼平
2. 発表標題 MQTT v5.0を用いたスケーラブルな情報収集基盤の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大澤昂生, 日比智也, 坂野遼平
2. 発表標題 P4を用いたMQTT-SNアクセラレーション
3. 学会等名 電子情報通信学会インターネットアーキテクチャ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Banno, Yusuke Kitagawa, Kazuyuki Shudo
2. 発表標題 A Study of Blockchain Systems Exploiting Semi-Structured Overlay Networks with FRT
3. 学会等名 IEICE International Conference on Emerging Technologies for Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryohei Banno, Kazuyuki Shudo
2. 発表標題 Adaptive Topology for Scalability and Immediacy in Distributed Publish/Subscribe Messaging
3. 学会等名 IEEE Annual International Computer Software & Applications Conference (COMPSAC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Kaneko, Ryohei Banno, Kazuyuki Shudo, Yusuke Aoki, Kota Abe, Yuuichi Teranishi
2. 発表標題 Detouring Skip Graph: A Structured Overlay Utilizing Detour Routes
3. 学会等名 Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryohei Banno, Kazuyuki Shudo
2. 発表標題 Skip Suffix Array: A Partial Match Retrieval Method on Structured Overlay Networks
3. 学会等名 International Conference on Information Networking (ICOIN) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂野遼平, 首藤一幸
2. 発表標題 pub/subメッセージングにおける負荷分散性と低遅延性の適応的制御
3. 学会等名 第18回情報科学技術フォーラム (FIT2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子孟司, 坂野遼平, 青木優介, 首藤一幸
2. 発表標題 Detouring Skip Graph: 迂回経路を活用する構造化オーバーレイ
3. 学会等名 電子情報通信学会インターネットアーキテクチャ研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------