

令和 6 年度
修士学位論文

メッセージ優先度を考慮した配送を実現する Pub/Sub 機構

Pub/Sub Mechanism for Realizing Message Delivery
With Consideration for Priority

1275100 北 雄太

指導教員 横山 和俊

2025 年 2 月 28 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要旨

メッセージ優先度を考慮した配送を実現する Pub/Sub 機構

北 雄太

本研究では、災害発生時における IoT センサから発生するメッセージの優先度を考慮した配送制御を実現する Publish/Subscribe モデル（以降、Pub/Sub モデルと呼ぶ）を提案する。特に土砂災害などの突発的な災害において、重要度の高いメッセージをリアルタイムで優先的に配送することを目的としている。従来の Pub/Sub モデルでは、負荷分散や低遅延性を重視していたが、メッセージの優先度を考慮した配送制御が行われていなかった。本研究では、Skip Graph を用いた分散型トピックベース Pub/Sub 手法に、メッセージの優先度に応じた探索手法を用いることにより、重要度の高いメッセージの配送を優先し、リアルタイム性を向上させることを実現した。シミュレーション結果から、提案手法は、災害発生時における情報伝達の迅速性を向上させ、システムの負荷を効率的に分散させることが確認された。

キーワード IoT, Pub/Sub, Skip Graph, メッセージ優先度, 災害

Abstract

Pub/Sub Mechanism for Realizing Message Delivery With Consideration for Priority

Yuta KITA

In this research, we propose a Publish/Subscribe (Pub/Sub) model that enables message delivery control considering priority levels for messages generated by IoT sensors during disaster events. Our primary focus is on real-time prioritization of critical messages, particularly in sudden disasters such as landslides. Traditional Pub/Sub models have mainly emphasized load balancing and low latency but have not incorporated priority-based message delivery control.

To address this issue, we enhance a distributed topic-based Pub/Sub approach using Skip Graph by introducing a search method that prioritizes messages based on their importance. This method improves real-time message delivery by ensuring that high-priority messages are transmitted first. Simulation results demonstrate that the proposed method enhances the speed of information transmission during disaster events while efficiently distributing system load.

key words IoT, Pub/Sub, Skip Graph, Message Priority, Disaster, Landslides

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	Pub/Sub モデルによる IoT システム	3
2.1	Pub/Sub モデル	3
2.2	トピックベース Pub/Sub モデル	4
2.3	Pub/Sub モデルを大規模システムで運用した場合の問題点	4
第 3 章	関連研究	6
3.1	Skip Graph を用いたトピックベース Pub/Sub モデル	6
3.2	FRT 経路表構築を用いたトピックベース Pub/Sub モデル	6
第 4 章	分散型トピックベース Pub/Sub 手法	8
4.1	Skip Graph の基本方式	8
4.2	SG-TBPS の基本方式	9
4.3	ATM-TBPS の基本方式	11
第 5 章	メッセージ優先度を考慮したメッセージ配信手法	14
5.1	従来手法の問題点	14
5.2	メッセージ優先度を考慮したトピックベース Pub/Sub モデル	14
5.3	PSG-TBPS	15
5.3.1	サポートノードの決定方法	16
5.3.2	サポートノードの決定例	17
5.3.3	見込まれる効果	19
5.4	PATM-TBPS	20
第 6 章	評価	22

目次

6.1	評価方法	22
6.2	評価指標	23
6.3	結果と考察	23
6.3.1	FRT を用いない PSG-TBPS での平均配信経路長	23
6.3.2	FRT を用いない PSG-TBPS での転送メッセージ数の推移	27
6.3.3	FRT を用いない PSG-TBPS での推定配送遅延時間の推移	28
6.3.4	FRT を用いる PATM-TBPS での平均配信経路長	29
6.3.5	FRT を用いる PATM-TBPS での転送メッセージ数の推移	29
第7章	おわりに	32
	謝辞	33
	参考文献	34

目次

2.1	Pub/Sub モデルを用いたデータ配信	4
2.2	トピックベース Pub/Sub モデルを用いたデータ配信	5
4.1	Skip Graph の例	10
4.2	SG-TBPS のイメージ	11
4.3	ATM-TBPS のイメージ	13
5.1	土砂災害警戒レベル	15
5.2	PSG-TBPS のイメージ	16
5.3	PSG-TBPS での配信経路短縮の例	19
6.1	平均配信経路長 (メッセージ優先度 5)	24
6.2	平均配信経路長 (メッセージ優先度 4)	25
6.3	平均配信経路長 (メッセージ優先度 3)	25
6.4	平均配信経路長 (メッセージ優先度 2)	26
6.5	平均配信経路長 (メッセージ優先度 1)	26
6.6	PSG-TBPS での転送メッセージ数	27
6.7	PSG-TBPS での推定配送遅延時間の推移	28
6.8	PATM-TBPS での平均配信経路長 (経路表サイズ 60)	30
6.9	PATM-TBPS での転送メッセージ数	31

表目次

6.1 計測パターンとパラメータ	22
----------------------------	----

第 1 章

はじめに

近年、全国の自治体で災害対策に IoT センサを活用した事例が増加している。香川県高松市の事例では、市の未来のまちづくりに向けたデジタル戦略の取り組みとして、「スマートシティたかまつ」という複数分野でのデータ収集・分析が実施されている [1]。この取り組みの一環に IoT 機器を用いた防災対策がある。高松市では、都市機能が海と近く接しており、悪条件が重なると水害が広範囲に及ぶ危険性がある。そこで、IoT センサを防災計画により選定した河川や水路等に設置し、収集したデータと地図情報を組み合わせたものを活用して、住民への正確な避難に対する発令判断に利用している。このように、災害発生時の状況把握と発信の高速化に IoT 機器の活用が期待されている。

災害の中でも指定警戒区域が多く突発性が高い事前発生の予測が難しい、土砂災害に注目する。土砂災害の災害発生時の状況把握についても、既存の専用センサシステムの代替として IoT 機器の採用検討が進んでいる。従来土砂災害の災害検知には、ワイヤセンサ式土石流検知器システム等 [2] の土砂災害専用の検知システムが現状多く採用されてきた。しかし、日本では土砂災害の発生が考えられる地域が非常に多く、高知県では 2024 年 8 月時点で 20,000 箇所以上が土砂災害危険区域として指定されている [3]。既存の専用システムは、一式あたりの導入コストが非常に高く、設置可能箇所も限られるため、土砂災害危険区域全体への導入が困難である。そのため、専用システムに代わり、「スマくい」などの安価な IoT センサを活用した研究が進められている [4]。また土砂災害は、突発性が高い事前発生の予測が難しい災害である。宮城県丸森町子安 (2019 年) の土砂災害の事例では、土石流平均流速が 10/ms、土石流発生地から宅地までの到達時間は 40 秒間と非常に高速に被害が広がったとされている [11]。このことから、土砂災害の監視区域の拡大には安価な IoT センサを活

用し、災害時には災害発生個所の IoT センサからのリアルタイム性の高いデータ収集が重要であると考えられる。

IoT センサからのデータ収集には、Publish/Subscribe モデル (以降、Pub/Sub モデルと呼ぶ) が広く利用されている。Pub/Sub モデルは、送受信者が中継サーバ (以降、Broker と呼ぶ) を介してデータのやり取りを行う通信モデルである。データを生成・発行する Publisher とデータの受信を行う Subscriber は、通信相手を直接意識する必要が無く、データの生成・消費に専念できることが特徴である [5]。多数の IoT デバイスからなる大規模システムでは、Broker に負荷が集中するため、負荷分散を行う必要がある。

これまで、Pub/Sub モデルにおける負荷分散手法として、様々な手法が提案されてきた。文献 [6] は、Skip Graph[7] をベースとした分散型トピックベース Pub/Sub 手法 (以降、SG-TBPS と呼ぶ) である。広域ネットワークのエッジに配置した多数の Broker がオーバーレイネットワークを形成することで、Subscriber 不在時のメッセージ発行の停止と Publisher から Subscriber へのメッセージ配信経路長の削減が行われている。文献 [8] は、SG-TBPS における各ノードに経路表を保持させ、経路表の更新の際、優良な経路表を選択していく手法 (以降、ATM-TBPS と呼ぶ) である。低負荷時にはシングルホップによるメッセージ配信、高負荷時にはマルチホップ転送によるメッセージ配信を行うことができ、負荷分散性と低遅延性を両立が行われている。しかし、文献では Publisher から重要度の高いメッセージが発行されたときに、メッセージの優先度を考慮し、重要度の高いメッセージを優先的に配送する制御が行われていない。

そこで、本研究では、災害発生区域に設置された IoT センサから発生するメッセージを重要度の高いメッセージと位置づけ、優先度を考慮した配送制御を行う。提案手法では、Publisher から発行されるメッセージ優先度によって、探索手法を変えることで、重要度の高いメッセージのリアルタイム性を向上させる。

第 2 章

Pub/Sub モデルによる IoT システム

2.1 Pub/Sub モデル

高度に情報化された社会の実現のために、様々な場面で IoT デバイスの活用が注目されている。2023 年には、世界の IoT デバイス数が 378 億台を突破し、2027 年には 572 億台を超えると予測されている。このように、IoT デバイスの急速な普及に伴い、膨大なデータを収集・処理・活用するための効率的な仕組みが求められている。膨大な数の IoT デバイスから生成される情報について、その情報を必要とする媒体へ個別に宛先を設定し、通信を行うのは非常に効率が悪い。この課題を解決するために、昨今 IoT デバイスからのデータ配信には、Publish/Subscribe モデル (Pub/Sub モデル) が広く利用されている。図 2.1 に Pub/Sub モデルを用いたデータ配信のイメージを示す。Pub/Sub モデルでは、送受信されるデータをメッセージと呼び、メッセージを送信する送信側のクライアントを Publisher、メッセージを受信する側を Subscriber と呼ぶ。Publisher から送信されたメッセージは、中継サーバとして機能する Broker に集約され、データを受信する Subscriber へと配信される。Publisher と Subscriber は、メッセージのやり取りにおいて相手を直接意識する必要がないため、効率よくデータの生成・消費に専念することができる。

2.2 トピックベース Pub/Sub モデル

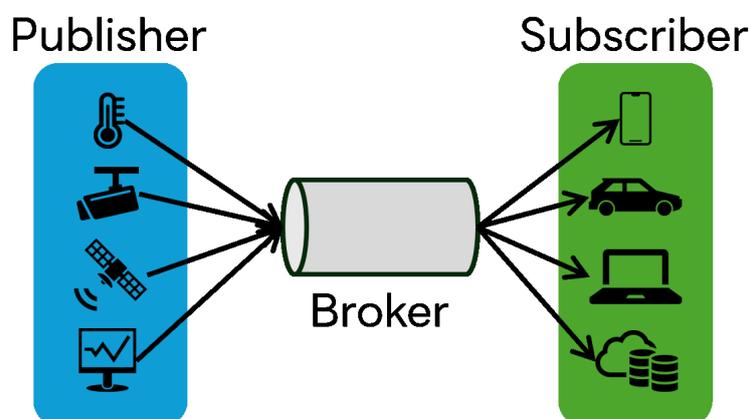


図 2.1 Pub/Sub モデルを用いたデータ配信

2.2 トピックベース Pub/Sub モデル

トピックベース Pub/Sub モデルは、Topic と呼ばれる論理的なチャンネルを用いてメッセージのやり取りを行う Pub/Sub モデルである。図 2.2 にトピックベース Pub/Sub モデルを用いたデータ配信のイメージを示す。Subscriber は Broker に対して、関心のある Topic を事前申告する。Publisher が該当 Topic にメッセージを発行すると、Subscriber はメッセージを受信することができる。Topic ごとに、Publisher と Subscriber の組み合わせを管理することができるため、メッセージ配信の宛先管理が容易となる。

2.3 Pub/Sub モデルを大規模システムで運用した場合の問題点

IoT デバイスを災害予測のためのセンサとして用いる場合等、IoT デバイスの数が多いシステムの場合、Broker への負荷集中により、サービスが停止したり、品質の低下につながりかねない。そのため、大規模システムで運用する場合には、単一 Broker での運用ではなく、複数 Broker へのスケールアウトにより負荷分散を実現する Scribe 等 [9] の手法が提案されている。しかしながら、複数 Broker へのスケールアウトする手法では、スケールアウト

2.3 Pub/Sub モデルを大規模システムで運用した場合の問題点

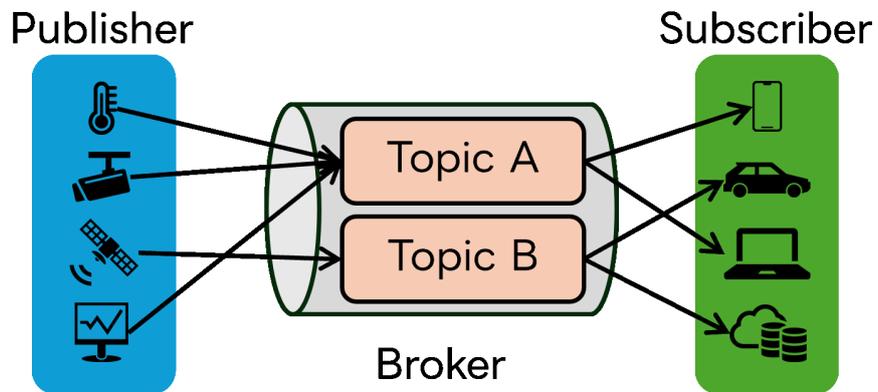


図 2.2 トピックベース Pub/Sub モデルを用いたデータ配信

トにより高いスループットが得られる一方で、分散処理のオーバーヘッドとして配送遅延が増大するという問題があることが分かっている [6].

第 3 章

関連研究

3.1 Skip Graph を用いたトピックベース Pub/Sub モデル

文献 [6] の手法 SG-TBPS(Skip Graph Topic-Based Publish/Subscribe) は, Skip Graph[7] を用いた分散型トピックベース Pub/Sub 手法である. これまで提案されてきた Pub/Sub モデルにおける負荷分散手法では, 配信経路長が全体のノード数に影響されることがと, Publisher からの無駄なメッセージ配送が行われていることが課題であった. 無駄なメッセージ配送とは, トピック内の Subscriber が不在時に Publisher から Broker へメッセージが配送されるものである. 本手法では, 広域ネットワークのエッジに配置した多数の Broker が Skip Graph を用いて, オーバレイネットワークを形成する. Skip Graph において Publisher が隣接する Subscriber の有無を監視することで, Subscriber 不在時のメッセージ発行の停止が実現されている. また, Publisher から Subscriber へのメッセージ配信経路長の削減が行われている. また, Skip Graph を用いていることにより, メッセージの配信経路長がトピックへの参加ノード数 N に対し, $O(\log N)$ と効率的な配信が実現されている.

3.2 FRT 経路表構築を用いたトピックベース Pub/Sub モデル

文献 [8] の手法 ATM-TBPS(Adaptive Topology Management for Topic-Based Publish/Subscribe) は, SG-TBPS へ FRT の概念を組み合わせたものである. 各ノードに経

3.2 FRT 経路表構築を用いたトピックベース Pub/Sub モデル

経路表を保持させ、経路表の更新の際、FRT による経路表構築の手法を用いる。これにより、Subscriber 数が経路表サイズ L よりも少ない場合である、低負荷時にはシングルホップによるメッセージ配信が実現されている。Subscriber 数が経路表サイズ L よりも多い場合である、高負荷時には従来の SG-TBPS を用いたマルチホップ転送によるメッセージ配信を行うことができる。本手法では、経路表サイズ L へのエントリ数により、シングルホップによるメッセージ配信とマルチホップ転送によるメッセージ配信が自律的に切り替わることにより、負荷分散性と低遅延性を両立が実現されている。

第 4 章

分散型トピックベース Pub/Sub 手法

本研究では、メッセージ優先度を考慮したトピックベース Pub/Sub モデルを第 5 章で提案する。本章では、要素技術となる Skip Graph, SG-TBPS, ATM-TBPS の概念を解説する。

4.1 Skip Graph の基本方式

Skip Graph[7] は、構造化オーバーレイネットワークの一種であり、範囲探索が可能なデータ構造である。Skip Graph の例を図 4.1 に示す。各ノードは Key と 0,1 からなるメンバーシップベクタを保持し、メンバーシップベクタを用いて Skip List を多重化した階層的なトポロジを形成する。ノードは同じビット位置で一致するメンバーシップベクトルを持つ他のノードとリンクを形成する。これにより、ノード数が増加しても効率的な経路探索が可能となり、探索の経路長は $O(\log N)$ に抑えられる。

図 4.1 での探索例を解説する。各ノードはユニークな Key (9, 21, 33, 48, 75, 99) と、0 と 1 からなるメンバーシップベクトルを保持している。メンバーシップベクトルの各ビット位置が、ノードが属する「レベル」を示している。メンバーシップベクトルの一致する部分に応じてリンクを形成し、以下のようなレベル構造を構築する。

4.2 SG-TBPS の基本方式

(Level 2) メンバーシップベクトルの最初の 2 ビットが一致するノードがリンクされる。

- Key 9 (00) と Key 48 (00)
- Key 75 (11) と Key 99 (11)
- Key 21 (10) と Key 33 (01) は他のノードと一致せずリンクが形成されない

(Level 1) メンバーシップベクトルの最初の 1 ビットが一致するノードがリンクされる。

- Key 9 (00), Key 33 (01), Key 48 (00) がリンク (1 ビット目が「0」で一致)
- Key 21 (10), Key 75 (11), Key 99 (11) がリンク (1 ビット目が「1」で一致)

(Level 0) 全ノードが隣接するノードと直接リンクされる。

Skip Graph の探索は、高次レベルから開始し、下位レベルに降りて目的のノードを探す。たとえば、Key 99 から Key 21 を探索する場合、以下の手順でリンクをたどる。

ステップ 1 レベル 2 の Key 99 から探索を開始

Key 99 は Key 75 とリンクしているが、Key 21 はこのグループに含まれないため、探索は進展せず、次のレベル (Level 1) に降りる。

ステップ 2 レベル 1 での探索

Key 99 は、Key 75 と Key 21 に直接到達するリンクが存在する。Key 99 から Key 21 に到達する。

ステップ 3 レベル 1 で目的ノード (Key 21) に到達したため、レベル 0 の探索は不要である。

4.2 SG-TBPS の基本方式

SG-TBPS[6] は、トピックベースの Pub/Sub メッセージングにおいて、Skip Graph を用いた手法である。Skip Graph を用い広域ネットワークのエッジに配置した多数の Broker がオーバーレイネットワークを形成する。各ノードはトピックおよびノード識別子 (Publisher/Subscriber) を Key とし、Multi-key Skip Graph を用いたトポロジを形成す

4.2 SG-TBPS の基本方式

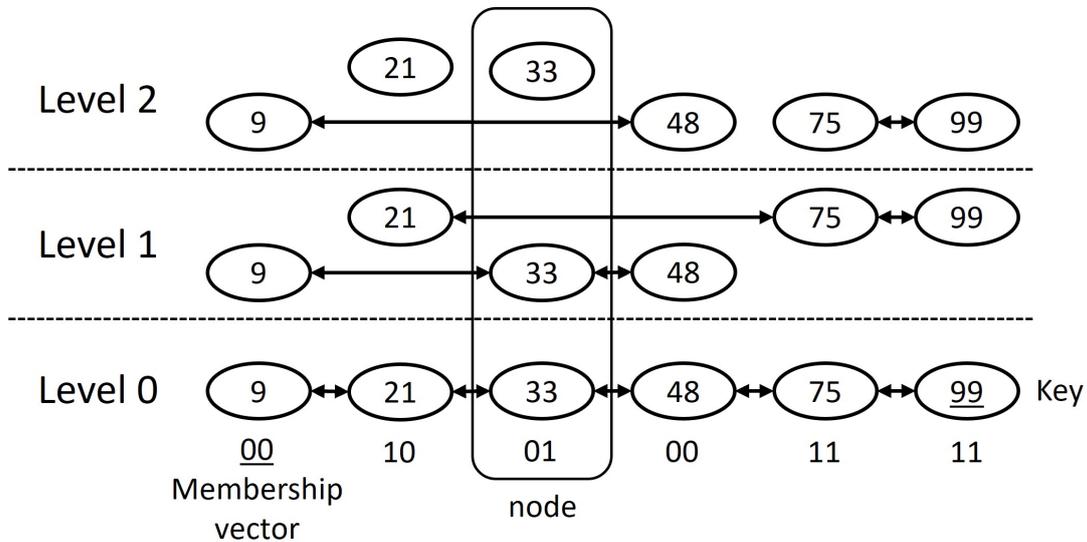


図 4.1 Skip Graph の例

る。ノードは Key 順でソートされているため、同一トピックの Publisher 同士、Subscriber 同士は連結なサブグラフを構成し、サブグラフ同士も連結となる。また、Skip Graph の特性上、Subscriber グラフと Publisher グラフの境界に位置する Publisher が Rendezvous Point として定義できる。Rendezvous Point は、隣接する Subscriber の有無を監視する役割を果たす。隣接する Subscriber が不在の場合は、トピックに Subscriber が存在しないことを示すため、Publisher に対してメッセージ発行の中断を指示し、無駄なネットワークリソースの消費を防ぐことができる。このことから SG-TBPS は以下の特性を持つ。

- Skip Graph による経路探索の特性上、配信経路長が参加ノード数 M に対し、 $O(\log M)$ である。
- Subscriber のサブグラフとレベル 0 において隣接する Publisher が唯一つ定まることから、Subscriber の不在を検知し、Publish を停止可能である。

4.3 ATM-TBPS の基本方式

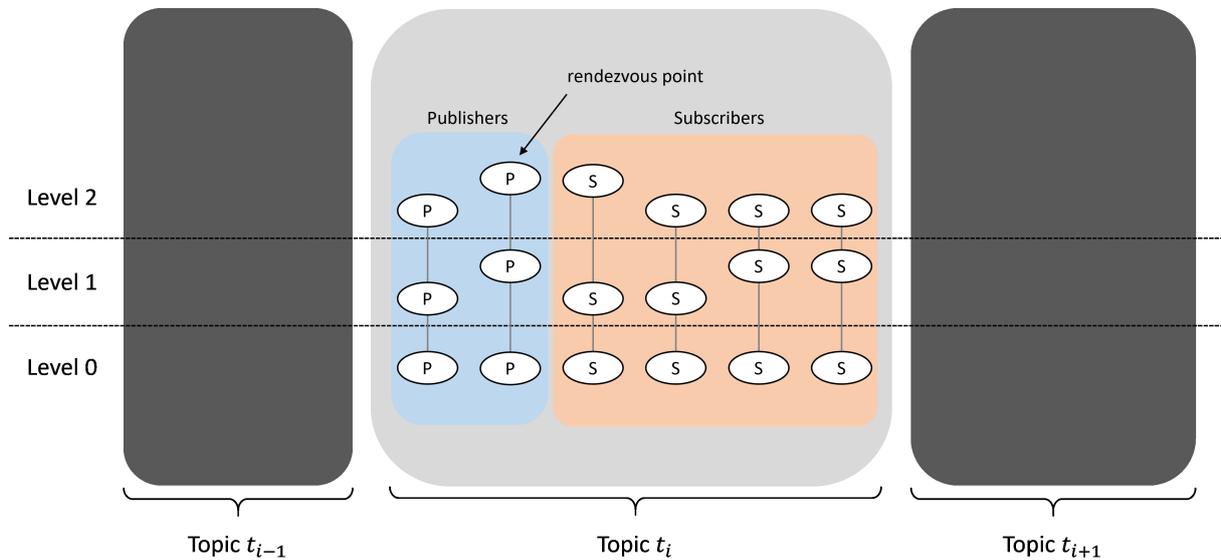


図 4.2 SG-TBPS のイメージ

4.3 ATM-TBPS の基本方式

SG-TBPS の手法を拡張し，経路表構築に FRT の概念を導入することで，負荷分散性と低遅延性を両立する手法 [8] である．図 4.3 に ATM-TBPS のイメージを示す．FRT では，経路表にエンTRIES を無条件に追加する．経路表サイズを超えたとき，経路表からエンTRIES をひとつ選択し削除する．そのため，経路表間の順序関係 \leq_{FRT} を定義し，構成し得るすべての経路表構成から優良な経路表を選択する必要がある．ATM-TBPS では，以下のポリシーの順で，優良な経路表であると判断される．

1. Skip Graph の各レベル隣接ノードに相当するノードをエンTRIES として保持
2. 同一トピックの subscriber ノードをエンTRIES として保持
3. 各レベルで同数のエンTRIES を保持
4. 高レベルのノードをエンTRIES として保持
5. 自ノードに近いキーを持つノードをエンTRIES として保持

4.3 ATM-TBPS の基本方式

上記を満たす，順序関係 \leq_{FRT} の定義は以下のとおりである．まず，順序関係 \leq_{FRT} を定義するにあたり必要となる記法を示す．

$l_{max}(E)$	経路表 E における最大レベル
$EMP(E)$	経路表 E において， $l_{max}(E)$ 個のレベルのうち，エントリ数が 0 であるレベルの集合
$SUB(E)$	経路表 E において，自ノードと同一トピックの Subscriber エントリの集合
$MAX(E)$	経路表 E において，最もエントリ数が多いレベルの集合
$SUCC(E)$	経路表 E のうち，右方向のエントリ集合
$PRED(E)$	経路表 E のうち，左方向のエントリ集合
$KEY(E)$	経路表 E のエントリをキー順にソートしたエントリ列

以上の記法を用いて，命題を定義する．

$$\begin{aligned}
 B_1 &\Leftrightarrow l_{\max}(E) < l_{\max}(F) \\
 &\quad \vee (l_{\max}(E) = l_{\max}(F) \wedge |EMP(E)| > |EMP(F)|) \\
 B_2 &\Leftrightarrow l_{\max}(E) = l_{\max}(F) \wedge |EMP(E)| = |EMP(F)| \\
 B_3 &\Leftrightarrow B_2 \wedge |SUB(E)| < |SUB(F)| \\
 B_4 &\Leftrightarrow B_2 \wedge |SUB(E)| = |SUB(F)| \\
 B_5 &\Leftrightarrow B_4 \wedge |MAX(E)| > |MAX(F)| \\
 B_6 &\Leftrightarrow B_4 \wedge |MAX(E)| = |MAX(F)| \\
 B_7 &\Leftrightarrow B_6 \wedge \min(MAX(E)) < \min(MAX(F)) \\
 B_8 &\Leftrightarrow B_6 \wedge \min(MAX(E)) = \min(MAX(F)) \\
 B_9 &\Leftrightarrow B_8 \wedge KEY(SUCC(E)) >_{dic} KEY(SUCC(F)) \\
 B_{10} &\Leftrightarrow B_8 \wedge KEY(PRED(E)) >_{dic} KEY(PRED(F))
 \end{aligned}$$

4.3 ATM-TBPS の基本方式

定義した命題を用いて定義した, ATM-TBPS における順序関係 $E \leq_{FRT} F$ は以下である.

$$E \leq_{FRT} F \Leftrightarrow B_1 \vee B_3 \vee B_5 \vee B_7 \vee B_9 \vee B_{10}$$

以上の順序関係 $E \leq_{FRT} F$ に基づき, ノードが保持する経路表の更新を行う.

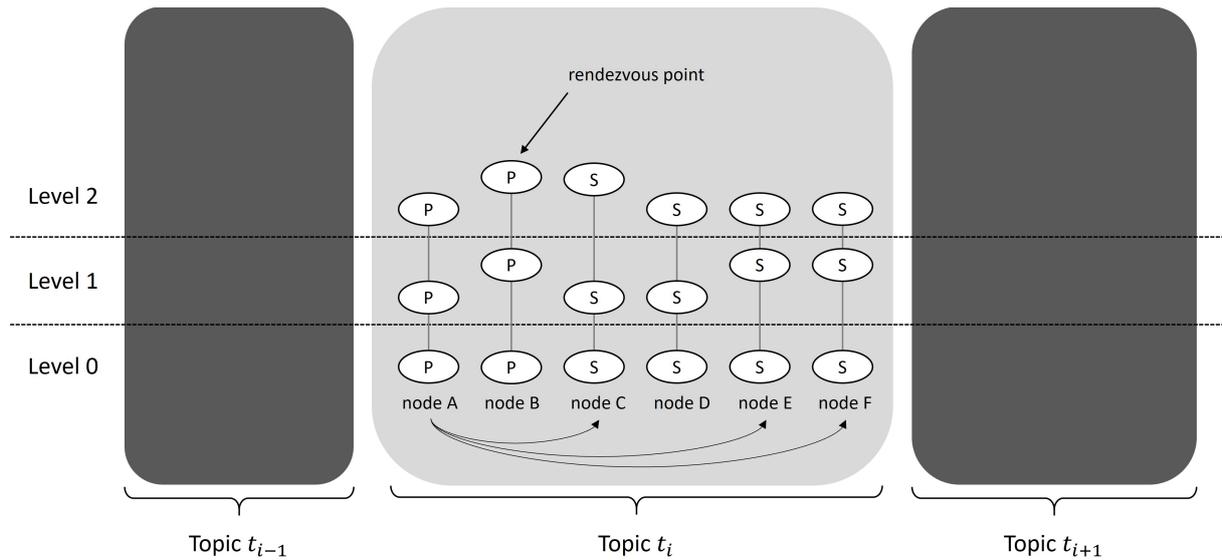


図 4.3 ATM-TBPS のイメージ

第 5 章

メッセージ優先度を考慮したメッセージ配信手法

5.1 従来手法の問題点

IoT デバイスでは絶え間なくデータが生成・送信されている。突発性の高い土砂災害等において、災害発生時の状況把握や被害予測に IoT センサを用いる場合、送信されるメッセージの重要度を考慮し、重要度の高いメッセージについては優先的に処理する必要があると考える。既存手法である SG-TBPS は、Publisher 群が同一トピックに対応する Subscriber の不在を検知し、絶え間なく生成されるデータの中から無駄な配送を削減する仕組みを提供している。しかし、この手法ではメッセージの優先度を考慮した配送制御が行われていない。そのため、IoT デバイスから大量のメッセージが送信される環境下では、重要度の高いメッセージを優先的に配送することができないという課題がある。

5.2 メッセージ優先度を考慮したトピックベース Pub/Sub モデル

本研究では、重要度の高いメッセージのリアルタイム性向上と負荷分散性を両立させるために、提案手法 PSG-TBPS と提案手法 PATM-TBPS を提案する。提案手法 PSG-TBPS では、重要度の高いメッセージのリアルタイム性向上を目的に、ノード探索の手法を Publisher から発行されるメッセージの優先度によって変化させる。

5.3 PSG-TBPS

まず、メッセージに優先度情報領域を確保する。優先度情報領域には、IoT デバイスがメッセージを発行する際に、優先度情報を格納する。国土交通省では、天候の状態に応じて、土砂災害の危険度を示す土砂災害警戒情報 [12] が制定されている。図 5.1 に土砂災害警戒レベルを示す。メッセージ優先度は、土砂災害警戒情報の警戒レベルを参考に、レベル 5 を最も重要度の高いものとし、5 段階の優先度メッセージが存在すると仮定する。

5	緊急安全確保	↑ 高 優先度 低
4	避難指示	
3	高齢者等避難	
2	注意報	
1	早期注意情報	

図 5.1 土砂災害警戒レベル

5.3 PSG-TBPS

重要度の高いメッセージにおける配送のリアルタイム性を向上させる手法を提案する。図 5.2 に本手法の概要を示す。本手法ではメッセージ優先度に応じて、同一トピック内の Publisher から Subscriber への探索手法を変化させる。

重要度の高いメッセージが Publisher から送信された場合は、Publisher からの探索において、自ノードに加えて他ノードを探索開始ノードエントリに追加し、並列探索する。本研

5.3 PSG-TBPS

究では、自ノード以外で探索を依頼されるノードをサポートノードと呼ぶ。重要度の最も低いメッセージでは、メッセージが Publisher から送信されたとき、サポートノードは用いず、自ノードのみで Subscriber への探索を行う。そのため、重要度の最も低いメッセージは、既存研究 SG-TBPS と同等の効果が見込まれる。

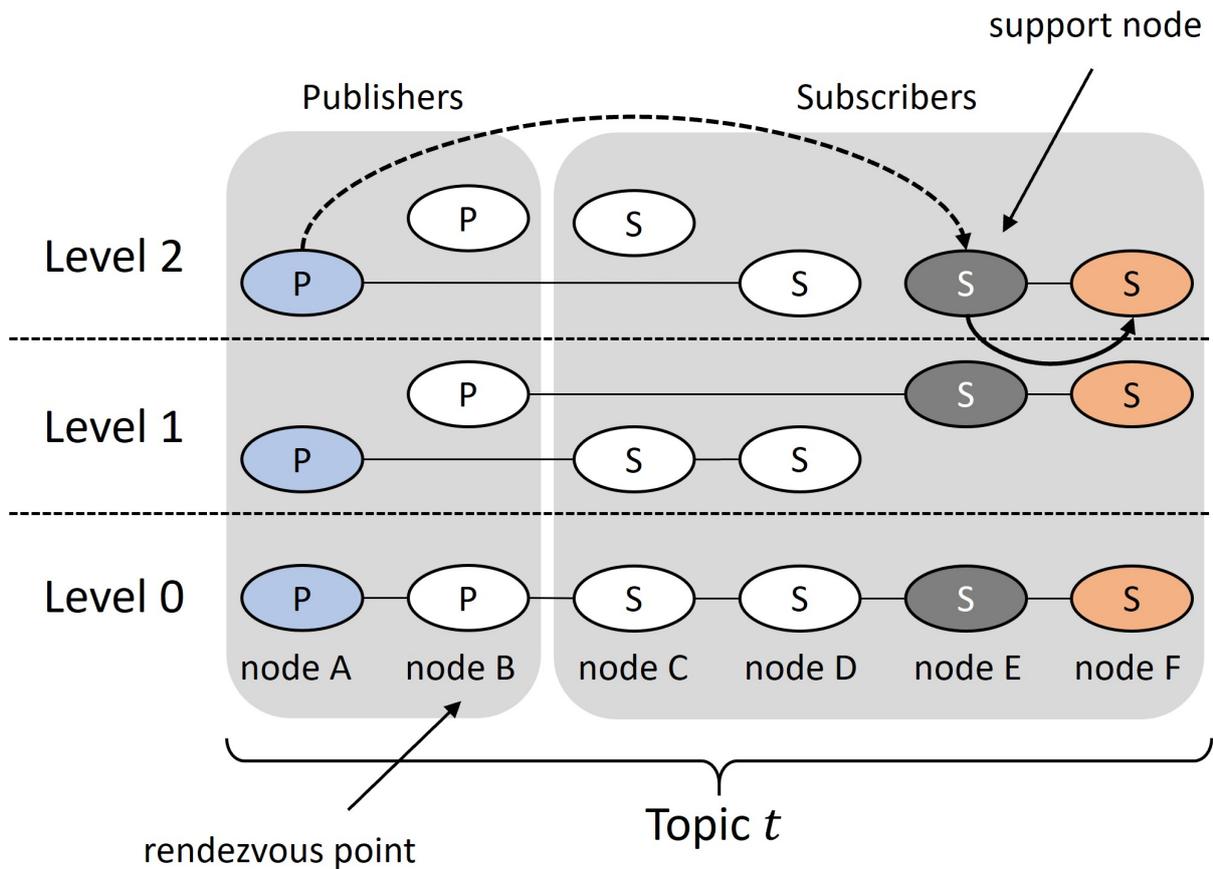


図 5.2 PSG-TBPS のイメージ

5.3.1 サポートノードの決定方法

提案手法 PSG-TBPS での、優先度情報を用いたサポートノードの決定方法について解説する。サポートノードの数は、以下の式を用いて、Skip Graph の最大レベル数とメッセージの優先度によって決定される。

5.3 PSG-TBPS

$$\text{count}(p) = \left\lfloor 1 + \left(\frac{N}{4} - 1 \right) \times \frac{p-1}{4} \right\rfloor \quad (N = 2^{\text{max_level}})$$

- $\text{count}(p)$: メッセージ優先度 p に応じて決定されるサポートノードの数
- N : ノード空間の最大数
- p : メッセージの優先度

本研究では、サポートノードの最大数をノード空間の最大数の 25%までとする。上記の式より、優先度が 5 段階のとき、優先度 5 では参加ノード数の 25%がサポートノードの対象となり、優先度 1 では探索を開始するノード数が自ノードのみの 1 となる。

次に、サポートノードに該当するノードを決定する。メッセージを発行した Publisher ノードのメンバーシップベクトルを基準とし、一定の間隔でノード空間を巡回し、サポートノードを決定する。間隔は以下の式から導かれる。

$$\text{interval} = \left\lfloor \frac{N}{\text{count}(p)} \right\rfloor$$

最後に、求めたノード間隔を用いてメッセージを発行した Publisher ノードを基準にサポートノードを決定する。なお、決定したサポートノードへの Publisher ノードからの転送はホップ数 1 とする。

5.3.2 サポートノードの決定例

最大レベル数 5 の Skip Graph において、あるトピックに属するメンバーシップベクトルが「11100」の Publisher から、最も優先度の高い優先度 5 のメッセージが発行されたときの、サポートノードの決定例を示す。

サポートノードの数を求める式より、サポートノード数が 8 と決定する。また、ノードの間隔は、4 と求められる。

$$\text{count}(5) = \left\lfloor 1 + \left(\frac{N}{4} - 1 \right) \times \frac{p-1}{4} \right\rfloor = \left\lfloor 1 + \left(\frac{32}{4} - 1 \right) \times \frac{5-1}{4} \right\rfloor = 8$$

5.3 PSG-TBPS

$$\text{interval} = \left\lfloor \frac{N}{\text{count}(5)} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{32}{8} \right\rfloor = 4$$

サポートノード数と間隔が決定したので、基準ノードから一定間隔でサポートノードを選定しリストに追加する。以下にサポートノードの選定の手順例を示す。

1. 基準ノード（メッセージを発行した Publisher）：

$$\text{メンバーシップベクトル } (11100)_2 = (28)_{10}$$

2. 次のノード：

$$28 + 4 = 32 \Rightarrow 32 \bmod 32 = 0 \quad (00000)_2$$

3. 次のノード：

$$0 + 4 = 4 \quad (00100)_2$$

4. 次のノード：

$$4 + 4 = 8 \quad (01000)_2$$

5. 次のノード：

$$8 + 4 = 12 \quad (01100)_2$$

6. 次のノード：

$$12 + 4 = 16 \quad (10000)_2$$

7. 次のノード：

$$16 + 4 = 20 \quad (10100)_2$$

8. 次のノード：

$$20 + 4 = 24 \quad (11000)_2$$

9. サポートノード選定の終了：

$$24 + 4 = 28 \Rightarrow 28 \bmod 32 = 28 \quad (11100)_2$$

最初のノードに戻ったため、選定を終了する。

以上の手順によりサポートノードの選定を行う。

5.3 PSG-TBPS

5.3.3 見込まれる効果

図 5.3 に示す、PSG-TBPS における Publisher, Subscriber の構成例を用いて本手法で見込まれる効果を解説する。図 5.3 では、Publisher がメンバーシップベクタ「10110」をもつ Key4 のノード、Subscriber がメンバーシップベクタ「11011」をもつ Key11 のノードである。Publisher から優先度 5 のメッセージが発行され、Subscriber までを探索するとする。従来の SG-TBPS の手法では、Publisher から Subscriber までの配信経路長は、3 となる。提案手法では、Publisher から優先度 5 のメッセージが発行されたとき、サポートノードがメンバーシップベクタ「10000」と「01011」をもつノードと定まる。そのため、探索にはサポートノードを含め 3 つのノードを用い、最も配信経路長が短いノード Key14 から Publisher から発行されたメッセージを受信する。よって提案手法での配信経路長は 2 となり、SG-TBPS と比較し短くなる。

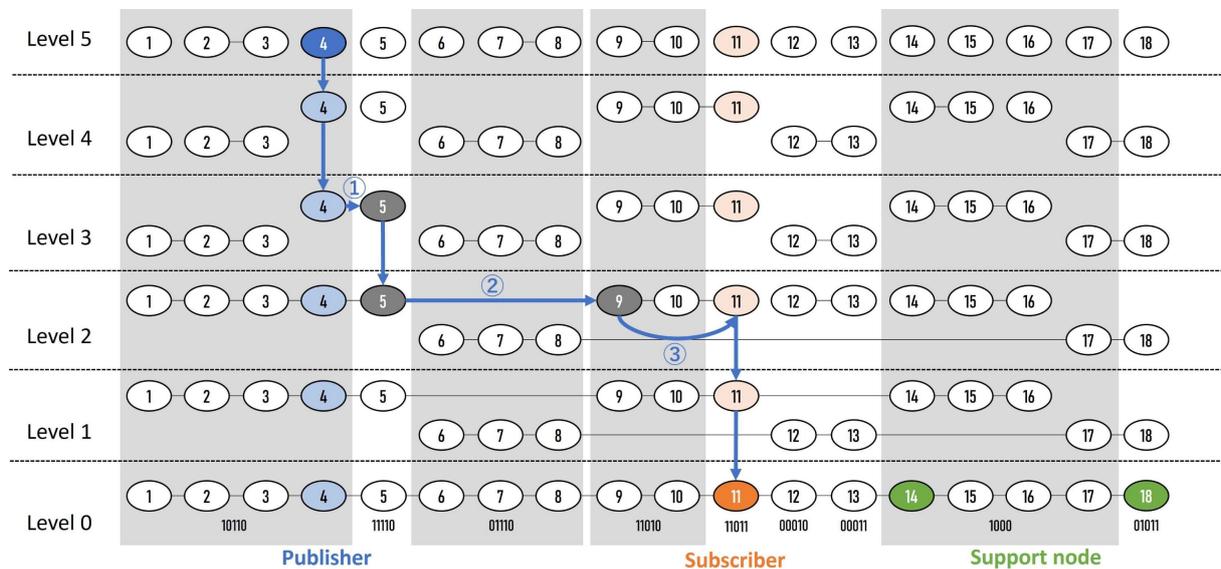


図 5.3 PSG-TBPS での配信経路短縮の例

5.4 PATM-TBPS

システム全体の負荷削減と重要度の高いメッセージのリアルタイム性を両立させる、手法を提案する。提案手法 PSG-TBPS では、優先度の高いメッセージが Publisher から発行されたとき、転送メッセージ数増大により、システムの負荷が高くなる。本手法では、既存手法 ATM-TBPS[8] で用いられる、経路表構築アルゴリズムに優先度情報組み合わせた手法を提案する。順序条件に、高優先度トピックに属する Subscriber を優先的に保持させる条件を追加し、提案手法では以下のポリシー順で優良な経路表を決定する。

1. 高優先度トピックに属する Subscriber ノードをエン트리として保持
2. Skip Graph の各レベル隣接ノードに相当するノードをエン트리として保持
3. 同一トピックの subscriber ノードをエン트리として保持
4. 各レベルで同数のエントリを保持
5. 高レベルのノードをエン트리として保持
6. 自ノードに近いキーを持つノードをエン트리として保持

本手法では、トピックの優先度情報を用いて経路表の更新を行うため、既存の記法に以下を追加する。

$PRIO(t)$ トピック t の優先度

$HPRIO(E)$ 経路表 E における高優先度トピックの Subscriber エントリの集合

ここで、 $P_{threshold}$ を優先度閾値としたとき、 $HPRIO(E)$ は $PRIO(t) \geq P_{threshold}$ を満たす Subscriber エントリの集合である。追加した記法をもとに、既存の命題に以下を追加する。

$$B_0 \Leftrightarrow |HPRIO(E)| > |HPRIO(F)|$$

追加した命題を用いて、本手法における経路表 E と F の順序関係 \leq_{FRT} を以下のように定義する。

5.4 PATM-TBPS

$$E \leq_{FRT} F \Leftrightarrow B_0 \vee B_1 \vee B_3 \vee B_5 \vee B_7 \vee B_9 \vee B_{10}$$

高負荷のトピックでは、優先度の高いメッセージを優先した負荷分散行われ、低負荷トピックについては、シングルホップの低遅延性を優先した配送が実施される。

第 6 章

評価

本章では，提案手法 PSG-TBPS と PATM-TBPS の有効性を評価する．

6.1 評価方法

提案手法の有効性を評価するために，シミュレーションで評価する．まず，提案手法 PSG-TBPS の評価方法について解説する．全体のノード数に影響されず高優先度メッセージが，優先的に配送されているかを確認するため，全体のノード数を変化させながら，表 6.1 に示す Publisher と Subscriber のパターンにてシミュレーションを実施する．メッセージ優先度は 1 から 5 の 5 段階とし，優先度ごとに計測を行う．試行回数は，30 回とし結果には平均値を算出したものを用いる．

次に，提案手法 PATM-TBPS の評価方法について解説する．物理ノード数を 10,000 と

表 6.1 計測パターンとパラメータ

pattern	Publisher	Subscriber	Number of total nodes
α	10	990	1,000 or 10,000 or 100,000
β	500	500	1,000 or 10,000 or 100,000
γ	990	10	1,000 or 10,000 or 100,000
δ	1	9	1,000 or 10,000 or 100,000
ϵ	5	5	1,000 or 10,000 or 100,000
ζ	9	1	1,000 or 10,000 or 100,000

6.2 評価指標

し、各ノードが平均 5 つのトピックに Publisher または Subscriber として参加する。各トピックは Publisher 数を 1 とし、Subscriber 数を 10 から 1280 まで変化させたときの、配信についても測定を行う。なお、本実験では重要度の高いメッセージを優先度 4, 5 と定め、優先度閾値 $P_{threshold} = 4$ とする。

6.2 評価指標

評価指標について述べる。各手法の評価指標には、以下の 3 つを用いる。

- (1) メッセージの平均配信経路長
- (2) メッセージの配送遅延時間
- (3) 転送メッセージ数

メッセージの平均配信経路長は、Publisher がメッセージを発行したときに、対象の Susubscriber までのメッセージ配送における、探索の移動距離を示す。

メッセージの配送遅延時間は、各ノード内での疑似遅延を 1 ミリ秒、ノード間の疑似通信時間を 10 ミリ秒、マルチホップ時の子ノード数を 10、子ノード毎に必要とされる疑似処理遅延を 0.1 ミリ秒とし、メッセージの平均配信経路長から算出を行う。

転送メッセージ数は、Publisher がメッセージを発行したときに、対象の Susubscriber までのメッセージ配送における、ノード間で転送されたメッセージの総数を示す。なお本稿では、転送メッセージ数をシステム全体の負荷状況を示すものとする。

6.3 結果と考察

6.3.1 FRT を用いない PSG-TBPS での平均配信経路長

図 6.1 から図 6.5 に優先度ごとの平均配信経路長を示す。図 6.1 は、最も優先度の高いメッセージでの配信経路長を測定したものである。既存手法と比較し提案手法の平均配信経路長が、最大で 60%程度減少していることが確認できる。しかし、メッセージの優先度に関

6.3 結果と考察

わらず，Publisher 数と Subscriber 数の合計が 10 と少ないパターンにおいては，配信経路長が短縮されていないことが分かる．これは，提案手法において，トピックの参加ノード数が少ないパターンにおいても，サポートノードを構成するためであると考えられる．図 6.5 は，優先度が最も低いメッセージの平均配信経路長を測定したものである．探索手法に既存手法と同等の方法を用いるため，平均配信経路長についても全ての測定パターンで同様の結果が得られることが確認できた．

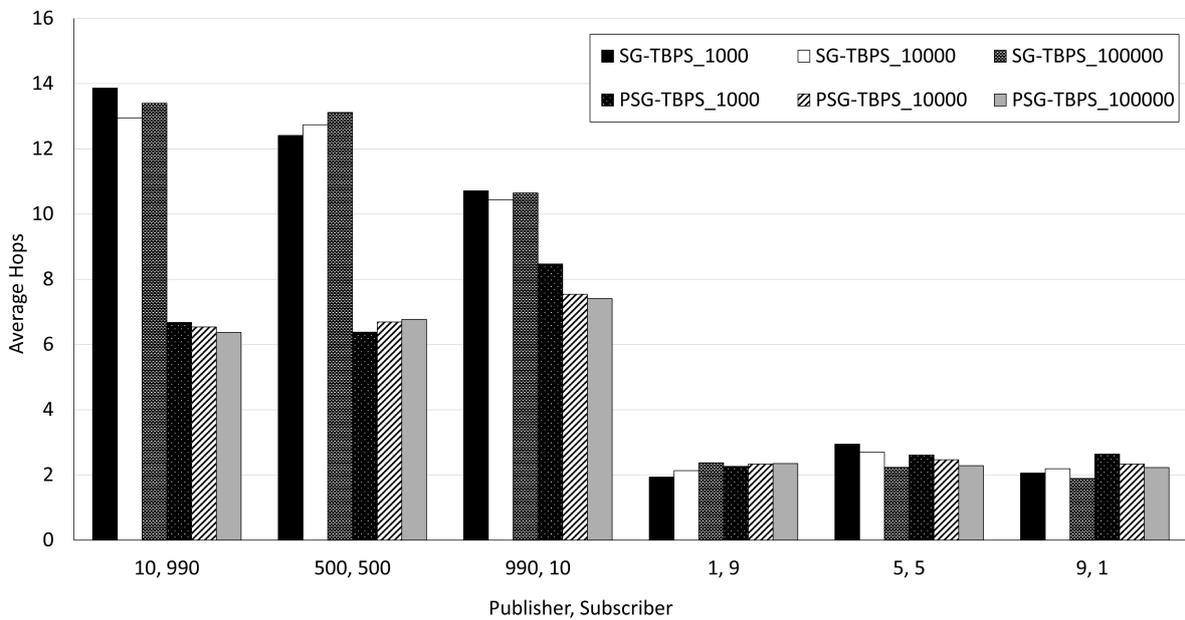


図 6.1 平均配信経路長（メッセージ優先度 5）

6.3 結果と考察

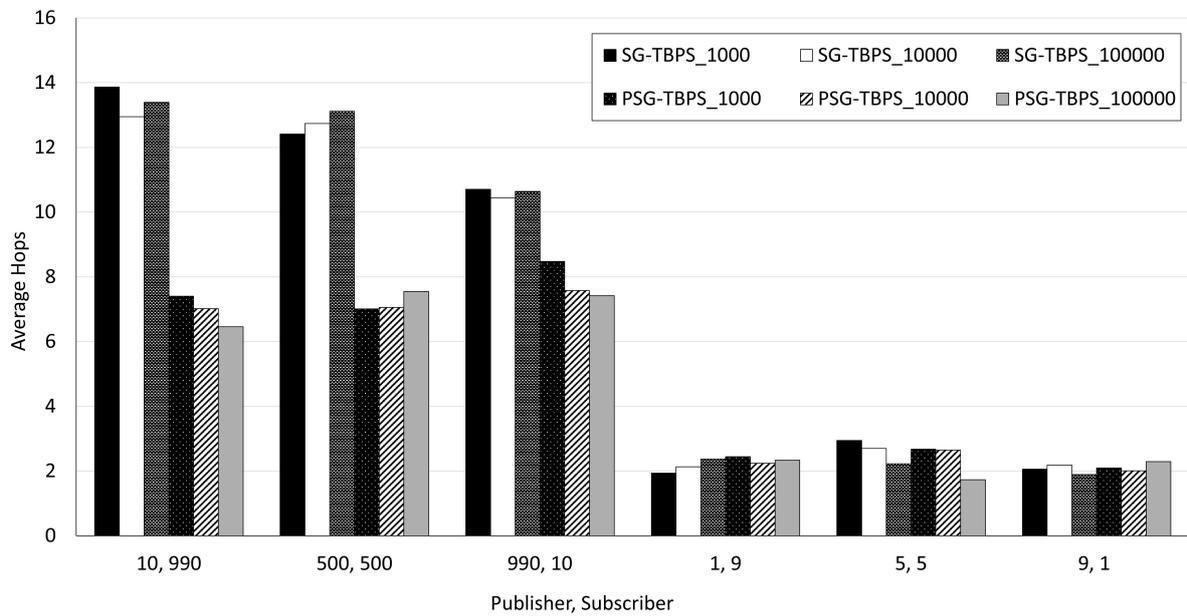


図 6.2 平均配信経路長 (メッセージ優先度 4)

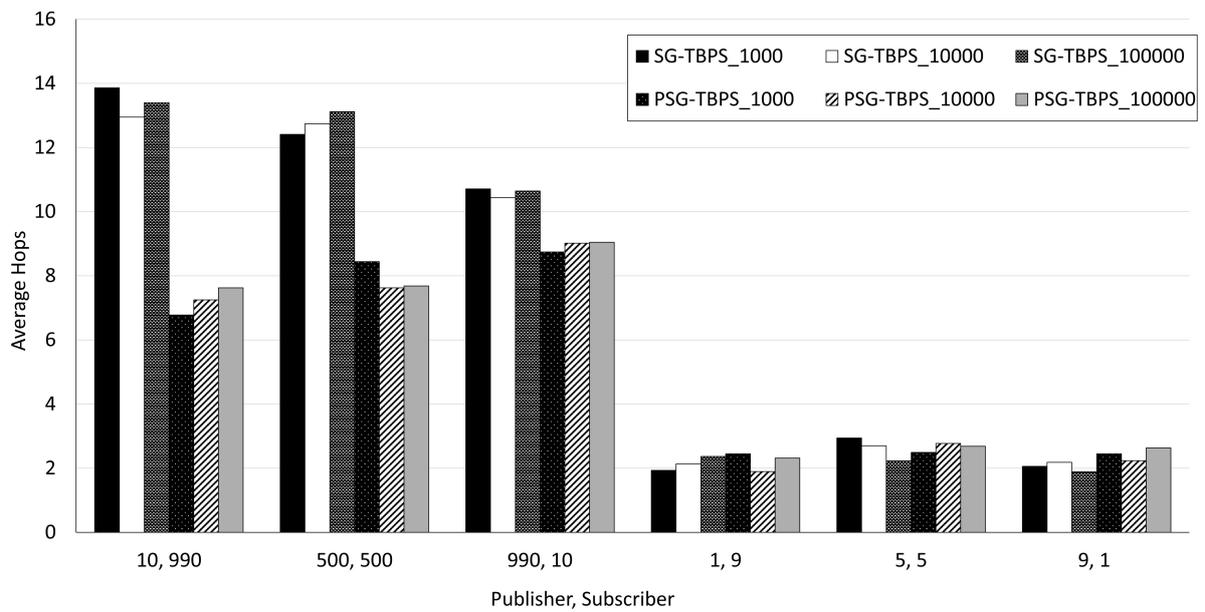


図 6.3 平均配信経路長 (メッセージ優先度 3)

6.3 結果と考察

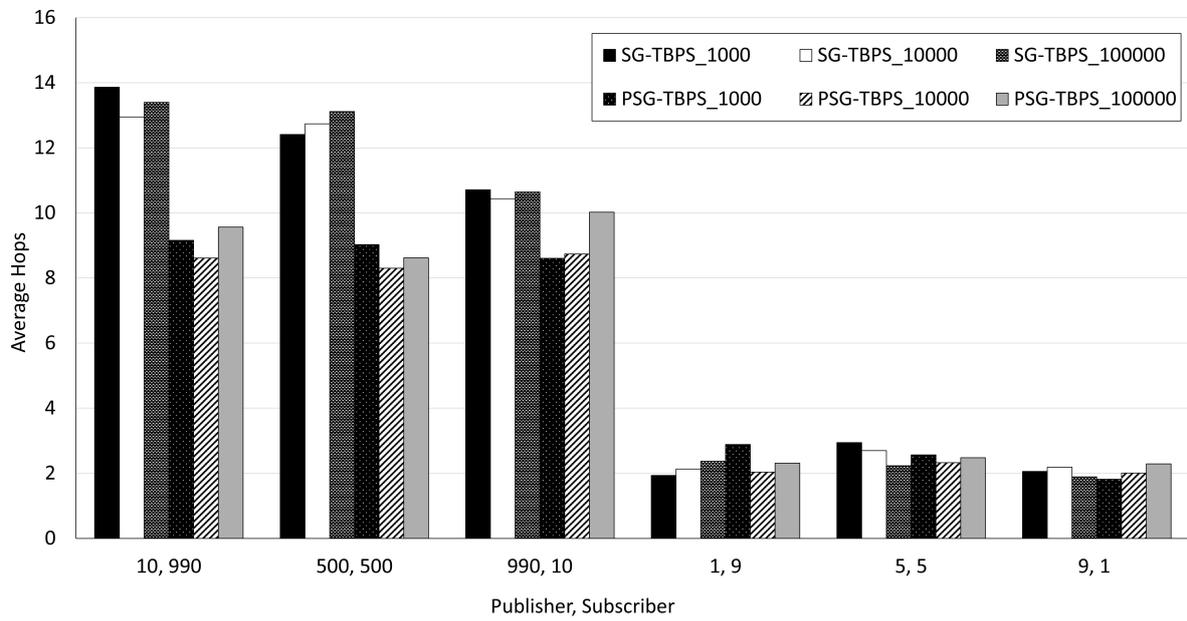


図 6.4 平均配信経路長 (メッセージ優先度 2)

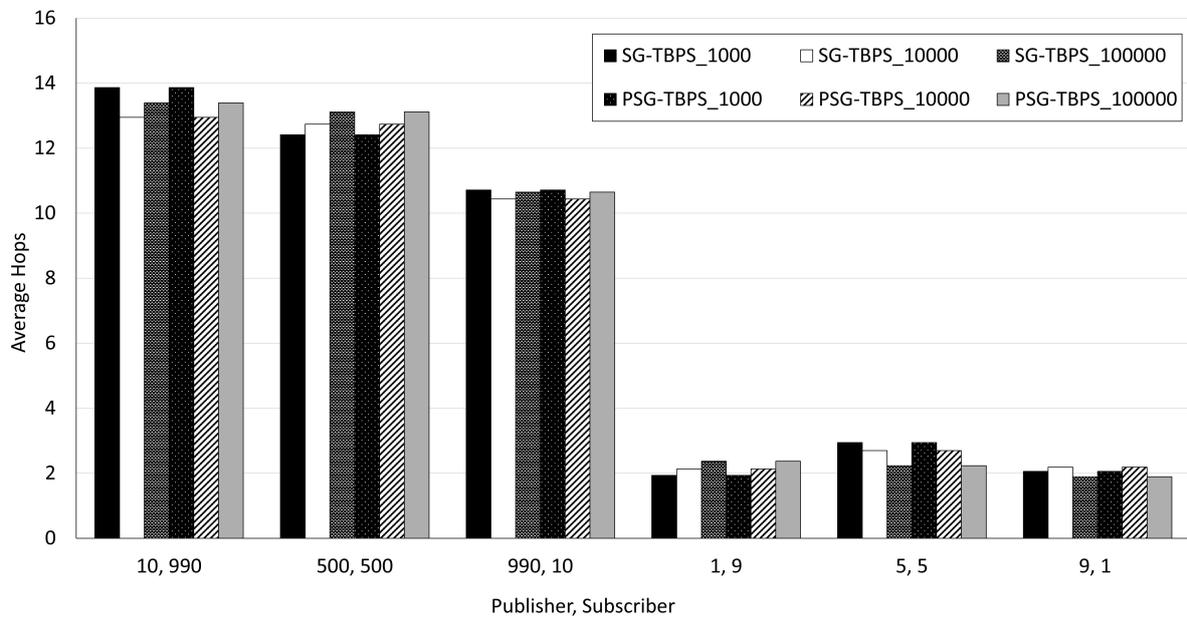


図 6.5 平均配信経路長 (メッセージ優先度 1)

6.3 結果と考察

6.3.2 FRT を用いない PSG-TBPS での転送メッセージ数の推移

図 6.6 は、PSG-TBPS で重要度の最も高いメッセージが発行されたときの、転送メッセージ数の推移を測定したものである。提案手法 PSG-TBPS では、優先度が高く Publisher 数が多いパターンでは、SG-TBPS と比較し大幅に転送メッセージ数が増加していることが分かる。転送メッセージ数が増加するのは、Publisher から重要度の高いメッセージが発行・送信されたとき、Subscriber への探索においてサポートノードを用いて複数ノードから同時に探索を開始するためである。そのため、重要度の高いメッセージが配送処理されるトピックでは、ノード間のメッセージ転送が増加し、システムの負荷に繋がっていると考えられる。

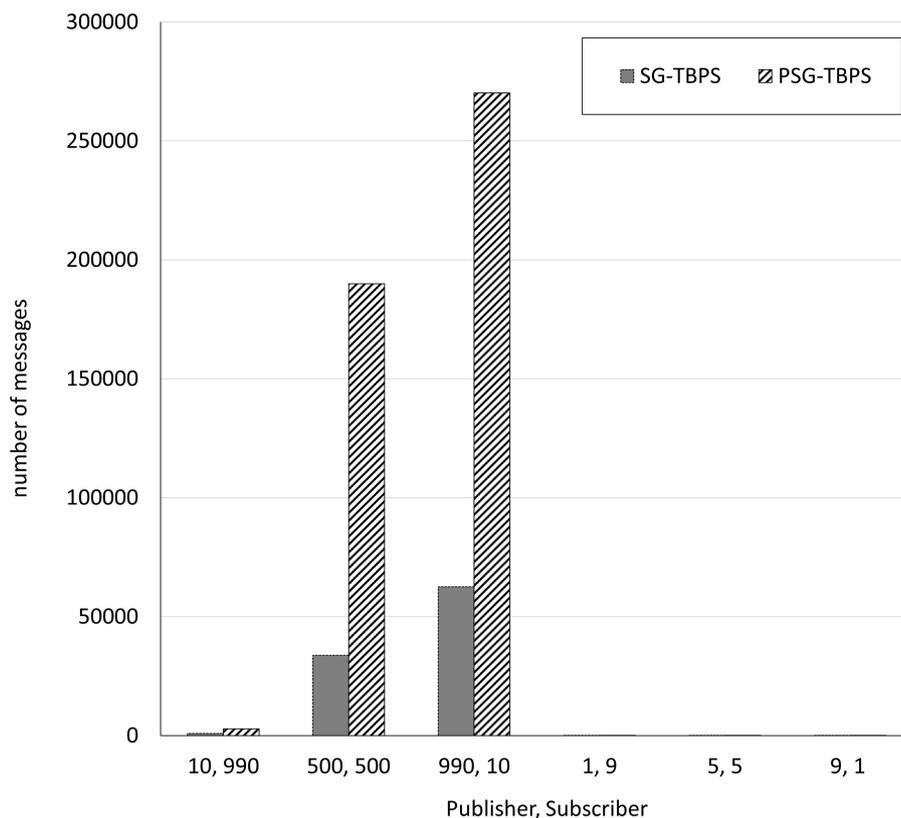


図 6.6 PSG-TBPS での転送メッセージ数

6.3 結果と考察

6.3.3 FRT を用いない PSG-TBPS での推定配送遅延時間の推移

図 6.7 は、PSG-TBPS での推定配送遅延時間の推移を測定したものである。優先度の高いメッセージでは、提案手法 PSG-TBPS が Subscriber が増加した場合でも遅延時間が少ない傾向であると分かる。この結果から、提案手法 PSG-TBPS は、優先度が最も高いメッセージでは、ノード間のメッセージ転送が増加し、システムの負荷が増加するものの、配信のリアルタイム性向上には有用であると考えられる。

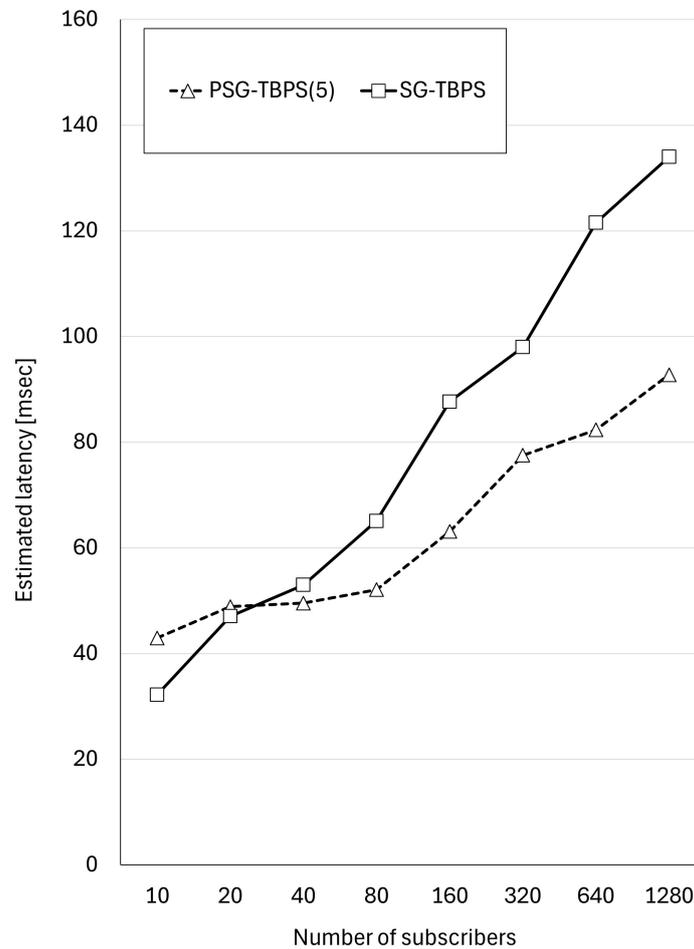


図 6.7 PSG-TBPS での推定配送遅延時間の推移

6.3 結果と考察

6.3.4 FRT を用いる PATM-TBPS での平均配信経路長

図 6.8 は、PATM-TBPS での経路表サイズ 60 のときの平均配信経路長を測定したものである。提案手法 PATM-TBPS でメッセージ優先度が 5 と最も高いときでは、Subscriber 数が 50 の時点までは、おおよそシングルホップで配送が行われていることが分かる。その後は、経路表サイズを Subscriber 数が大きく上回るため、PSG-TBPS でのマルチホップ転送に自律的に切り替わっていることが分かる。しかしながら、提案手法 PATM-TBPS でメッセージ優先度が 5 の場合と、優先度を考慮しない従来手法の ATM-TBPS の平均配信経路長は、全体を通して大きく差が生まれていないことが分かる。これは、経路表の更新アルゴリズムに要因があると考えられる。提案手法では、トピックに設定されたメッセージ優先度をもとに、Subscriber のエントリを経路表を追加する。そのため、高優先度のメッセージを受信するトピックに属する Subscriber のエントリが多く経路表に追加されることとなる。それにより、メッセージ優先度による Subscriber のエントリ数よりも、従来手法の ATM-TBPS と同様に経路表サイズに大きく依存すると考えられる。

6.3.5 FRT を用いる PATM-TBPS での転送メッセージ数の推移

図 6.9 は、PATM-TBPS での経路表サイズ 60 のときの転送メッセージ数の推移を測定したものである。提案手法 PSG-TBPS において優先度が高いメッセージ配信時に課題となっていた転送メッセージ数は、経路表更新に FRT を適用させた提案手法 PATM-TBPS により減少したことが分かる。よって、優先度を考慮したメッセージ配信のシステム負荷増大に、提案手法 PATM-TBPS は有用であると考えられる。

6.3 結果と考察

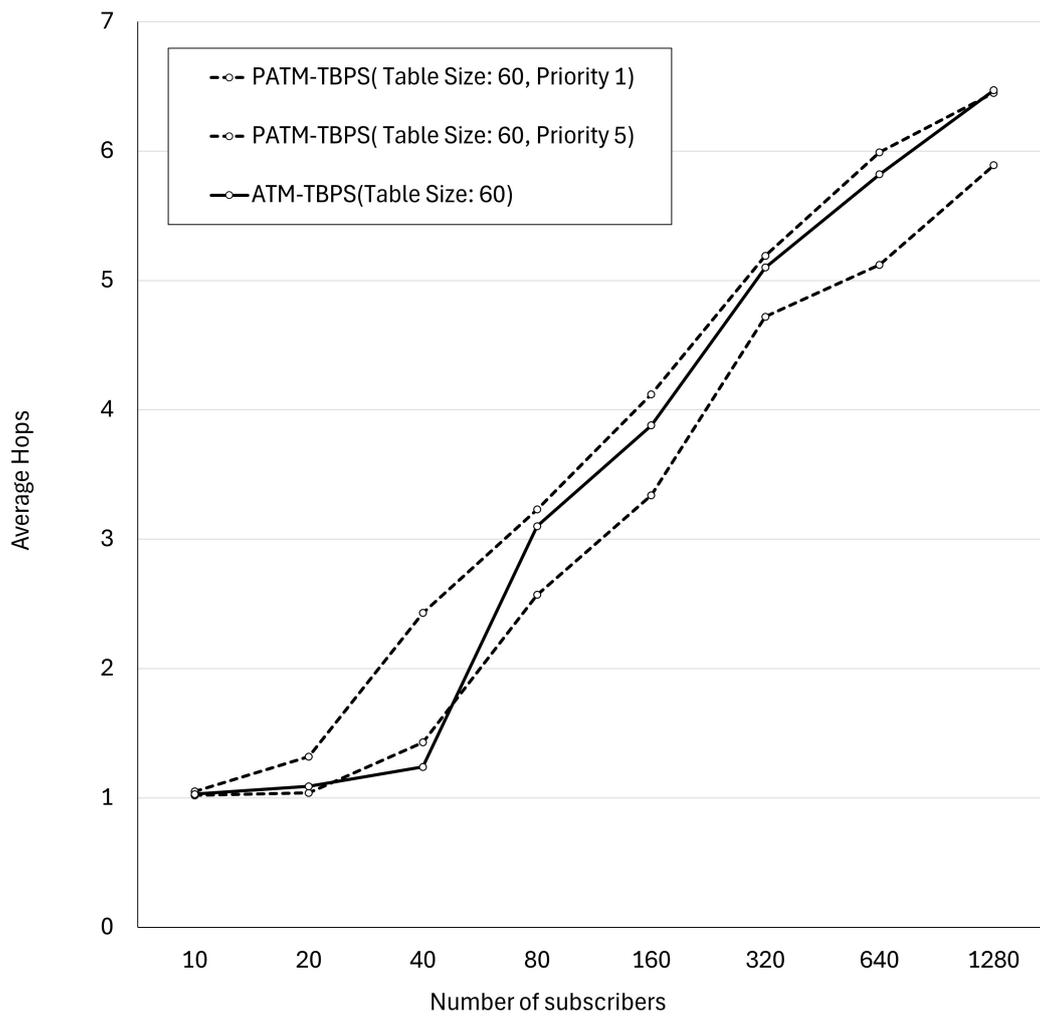


図 6.8 PATM-TBPS での平均配信経路長 (経路表サイズ 60)

6.3 結果と考察

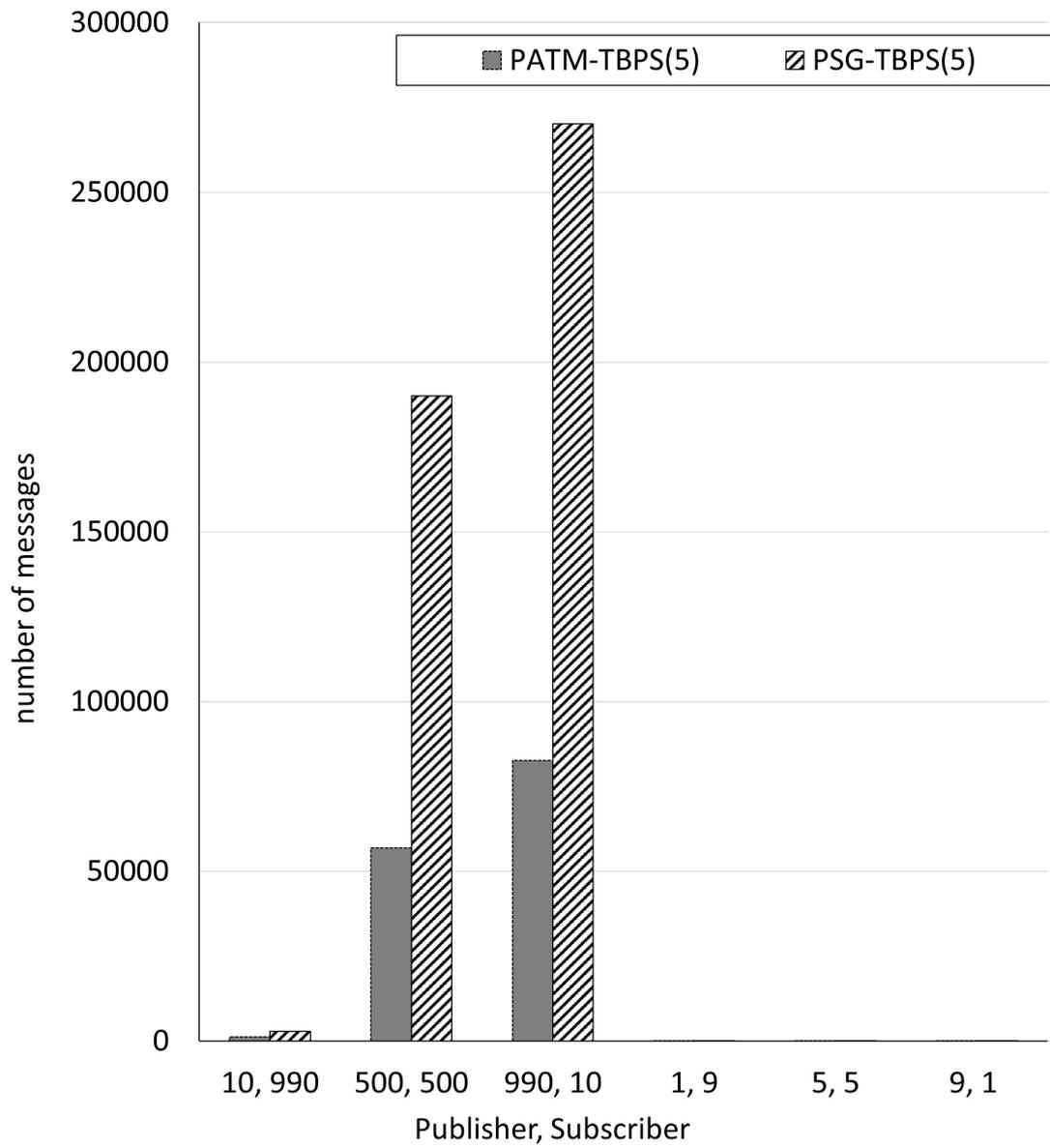


図 6.9 PATM-TBPS での転送メッセージ数

第7章

おわりに

本研究では、災害発生区域に設置された IoT センサから発生するメッセージを重要度の高いメッセージと位置づけ、優先度を考慮した配送制御を行う手法を提案した。特に、突発的な災害に対してリアルタイム性の向上を図るため、メッセージの優先度を考慮した PSG-TBPS と PATM-TBPS を提案した。提案手法 PSG-TBPS では、重要度の高いメッセージをより迅速に配送するために、Skip Graph の探索手法を優先度に応じて動的に変更することで、従来手法よりも短い経路でのメッセージ配信を可能とした。また、提案手法 PATM-TBPS では、優先度の高いメッセージを考慮しつつ、FRT を活用した経路表の適応的管理により、全体的なシステム負荷を抑えながらリアルタイム性の向上を実現した。

評価実験の結果から、提案手法 PSG-TBPS により、従来の SG-TBPS に比べて最大 60% の配信経路の短縮が可能であることを確認した。一方で、優先度の高いメッセージを複数のノードで探索することにより、転送メッセージ数が増加し、システム負荷が高まる傾向が見られた。この課題を解決するために提案した PATM-TBPS では、優先度の高いメッセージを優先する一方で、経路表の更新ポリシーを最適化することにより、不要なメッセージ転送を抑制し、システム負荷の低減を実現した。

本研究の成果は、特に土砂災害のような突発的な災害において、低コストかつ広範囲に設置可能な IoT センサを活用した防災システムの構築に有用であると期待される。

今後の課題として、提案手法を地図データを用いて検証し、その有効性を評価する必要がある。また、多様な災害形態や異なる地形条件における適用可能性を検討することで、提案手法の有効性をより正確に明らかにすることが求められる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、懇切丁寧なご指導をしていただきました指導教員の横山和俊教授に深く感謝申し上げます。誠にありがとうございました。またお忙しい中、本研究の副査をお引き受けいただきました、高田喜朗教授、敷田幹文教授に深く感謝申し上げます。そして、共に研究を行った多田輝さんを始めとする研究室の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 高松市: スマートシティたかまつ, 2024. URL: <https://www.city.takamatsu.kagawa.jp/kurashi/shinotorikumi/machidukuri/smartcity/>, Accessed: 2024-09.
- [2] 株式会社藤井基礎: 土石流警報システム, URL: <https://www.fujii-kiso.co.jp/think/info200712d.htm>, Accessed: 2024-09.
- [3] 高知県: 高知県における市町村別土砂災害警戒区域等の指定状況, 2024. URL: https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/2019041600054/file_contents/file_202410152112332_1.pdf, Accessed: 2024-09.
- [4] 株式会社エイビット: 土砂災害センサー スマくい AL-070, 2024. URL: <https://www.abit.co.jp/products/al070/>, Accessed: 2024-09.
- [5] P.T. Eugster, P.A. Felber, R. Guerraoui, and A.M. Kermarrec, “The Many Faces of Publish/Subscribe,” *ACM Computing Surveys*, vol.35, no.2, pp.114–131, 2003.
- [6] R Banno, S Takeuchi, M Takemoto, T Kawano, T Kambayashi, M Matsuo: Designing Overlay Networks for Handling Exhaust Data in a Distributed Topic-based Pub/Sub Architecture, *Journal of Information Processing*, Vol.23, No.2, 2015.
- [7] J. Aspnes and G. Shah: Skip Graphs, *ACM Transactions on Algorithms (TALG)*, vol.3, no.4, pp.37:1–37:25, November 2007.
- [8] R.Banno, K.Shudo: Adaptive topology for scalability and immediacy in distributed publish/subscribe messaging. In *Proceedings of the 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, Madrid, Spain, 13–17 July 2020.
- [9] M. Castro, P. Druschel, A.M. Kermarrec, and A. Rowstron, “Scribe: A large-scale and decentralized application-level multicast infrastructure,” *IEEE Journal*

参考文献

- on Selected Areas in Communications, vol.20, no.8, pp.1489–1499, December 2002.
- [10] 総務省: 情報通信白書 2024, URL: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/html/datashu.html#f00246>, Accessed: 2024-09.
- [11] 竹林洋史, 藤田正治: 2019年に国内で発生した土石流災害について, 京都大学防災研究年報, 第63号, No.63, pp.91-100(2020).
- [12] 気象庁, “土砂災害警戒情報・土砂キキクル(大雨警報(土砂災害)の危険度分布),” <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/doshakeikai.html>, Accessed: 2024-11.