

通信遅延変動が Geographical SMR に与える影響の解析

竹林 豊[†]
豊橋技術科学大学[†]中村 純哉[‡]
豊橋技術科学大学[‡]

1 はじめに

State Machine Replication (SMR) [1] はシステム状態を複数のレプリカに複製し、SMR プロトコルを用いてレプリカ間で一貫した状態を維持することで、システムの耐故障性を実現するレプリケーション技術である。なかでも Geographical SMR は、レプリカを地理的に分散させることで、地震などの大規模災害に対する耐故障性を向上できる。

Geographical SMR の応答性能は、選択する SMR プロトコルによって大きく変化する。塩崎らは SMR プロトコルの通信パターンをモデル化し、様々なユースケースの応答性能を調査することで、Geographical SMR における応答時間最適なプロトコルの選定方法を考案した [3]。しかし、SMR プロトコルの応答時間は、通信遅延 (Round Trip Time; RTT) の変動にも影響を受ける [2]。Geographical SMR ではレプリカ間の距離が長く、RTT が不安定になる傾向があるため、通信の順序が変化しやすい。そのため、SMR プロトコルの応答時間が安定せず、システムの安定性が低下する。適切な SMR プロトコルを選択するには、応答時間だけでなく、変動も考慮する必要がある。

本研究では RTT の変動が SMR プロトコルの性能に与える影響を詳細に解析し、変動を考



図1 SMR プロトコルの概要

慮した SMR プロトコルの選択に関する指針を提案する。

2 研究手法

本論文では、塩崎らの SMR プロトコル応答性能モデル [3] と、AWS (Amazon Web Services) にて日次で計測したリージョン間の RTT を用いて、各プロトコルの日ごとの応答時間を計算する。その後、計算した応答時間の変動を分析することで、Geographical SMR において、通信遅延変動が SMR プロトコルの応答時間に与える影響を明らかにする。比較する SMR プロトコルは、塩崎らのモデルで考慮されている 5 種の SMR プロトコル (MultiPaxos, Mencius, EPaxos, FastPaxos, Domino) とする。AWS の RTT は、CloudPing (<https://www.cloudping.co/grid>) を使用して、2022 年 10 月 24 日から 235 日間収集した。

多くの SMR プロトコルでは、図 1 に示すように、レプリカの中から選ばれたリーダーが代表となって、SMR プロトコルの処理を進める。このようにすることで、クライアントとレプリカ間の通信を減らすことができ、効率的にレプリカ間の状態の一貫性を保つことができる。一方で、RTT はこの通信に影響を与えるため、SMR プロトコルの性能に影響を与える。

Analysis of the Impact of Communication Delay Variation on Geographical SMR

[†] Yutaka Takebayashi, Toyohashi University of Technology

[‡] Junya Nakamura, Toyohashi University of Technology

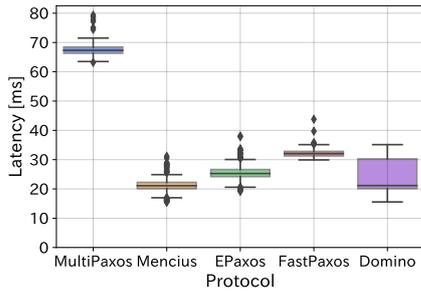


図2 各プロトコルの応答時間

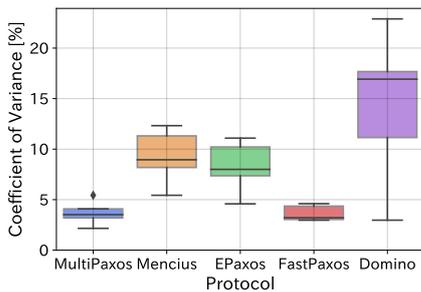


図3 各プロトコルの変動係数

3 評価実験

各プロトコルと応答時間の関係を分析するために、クライアントを Milan, リーダーを Stockholm とした場合の応答時間を図2に示す。Mencius と Domino の応答時間が小さく、一方で FastPaxos と MultiPaxos は大きい。

次に、各プロトコルと変動の関係を分析するために、リーダーを Stockholm とした各リージョンでのプロトコルの応答時間を測定した。プロトコルの応答時間から算出した変動係数を、図3に示す。図2で応答時間が小さい Mencius, Domino の変動係数が大きく、一方で応答時間が大きかった FastPaxos と MultiPaxos の変動係数は小さい。

最後に、リーダーレプリカの変更がプロトコルの変動に与える影響を分析するために、リーダーレプリカを変更して各プロトコルの応答時間を測定し、変動係数を算出した。リーダーレプリカを変更した場合に影響を受けるプロトコルは MultiPaxos, FastPaxos, Domino である。クライアントを Milan としたときの結果を図4

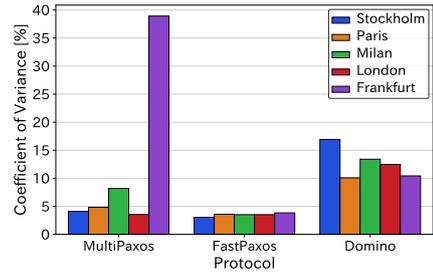


図4 リーダーレプリカを変更した場合の変動係数

に示す。FastPaxos と Domino はリーダーレプリカの変更による影響が小さく、MultiPaxos は影響が大きい。

図2と図3より、応答時間と変動はトレードオフの関係にあることが分かる。従って、具体的な最適化目標に基づいて、プロトコルを選択する必要がある。応答時間を最小化したい場合、Mencius や Domino が適切である。変動を最小化したい場合は FastPaxos が、応答時間と変動を両立したい場合には EPaxos が適している。MultiPaxos はリーダーによって性能が大きく変化するため、変動を最小化する目的で利用するのは難しい。

4 おわりに

本論文では、先行研究で提案された SMR プロトコルの応答性能モデルを用いて、通信遅延の変動が SMR プロトコルの応答性能に与える影響を分析した。プロトコルの応答時間と変動にはトレードオフの関係であることを明らかにし、この関係性を考慮した SMR プロトコルの選定指針を考案した。

参考文献

- [1] T. Distler. Byzantine fault-tolerant state-machine replication from a systems perspective. *ACM Comput. Surv.*, 54(1):1–38, 2021.
- [2] X. Yan, L. Yang, and B. Wong. Domino: using network measurements to reduce state machine replication latency in WANs. In *Proc. CoNEXT '20*, pp. 351–363, 2020.
- [3] 塩崎, 中村. 通信パターンに基づいた応答時間モデルによる Geographical SMR プロトコルの選定指針の提案. *情処研報*, 第 2023-ARC-254 巻, pp. 1–6, 2023.