

分散システムの評価尺度についての一考察 A Note on Evaluation Measures for Distributed Systems

神田 一平[†] 新井 雅之[‡] 福本 聡[§]
Ippei Kanda Masayuki Arai Satoshi Fukumoto

1. はじめに

分散データレプリケーションシステムの主要な設計・評価基準としては、性能 (performance), 拡張性 (scalability), 一貫性 (consistency), 信頼性 (reliability), 安全性 (security) などが知られている。本研究では、そのうちの性能, 信頼性, 一貫性の関係性について考察し、性能と信頼性と一貫性の関係を新たに定量化することを試みる。

具体的には、確率的一貫性の導入によって一貫性のレベルを連続的に扱い、性能, 信頼性, 一貫性をそれぞれ簡潔な連続量の評価尺度で定義する。クォーラムを拡張した簡単なデータレプリケーションのモデルによって、従来考えられている相関関係とは別に、信頼性と一貫性のあいだにトレードオフが成り立つことを示す。

2. システムモデル

本研究では、クォーラムシステムを拡張した簡単なデータレプリケーションのモデルを用いて、信頼性と一貫性の定量的評価について議論する。はじめに、クォーラムの基本事項について述べる。

クォーラムシステムでは、書き込みクォーラムと読み込みクォーラムと呼ばれる二つの論理的なノード集合を規定することで一貫性を維持する。総ノード数を N , 読み込みクォーラムを RQ , 書き込みクォーラムを WQ でそれぞれ表すと、クォーラムシステムでは一貫性を保つために以下の条件をみなさなければならない。

$$|WQ| + |RQ| > N. \quad (1)$$

つぎに、クォーラムを拡張した分散データレプリケーションのモデルを説明する。ここで仮定するシステムは、 n 個のレプリカを分散システムのノード上に保有する。厳密には 1 個のオリジナルデータと $n-1$ 個のレプリカと考えるべきであるが、ここでは特にそれらを区別しないものとする。クライアントが書き込みクエリを発行するとランダムに選ばれた w 個のレプリカに書き込みがおこなわれ、同様に読み込みクエリが発行されるとランダムに選ばれた r 個のレプリカから読み込みがおこなわれる。クライアントから書き込み要求されたレプリカは

最新のそれに更新される。また、クライアントから読み込み要求されたレプリカはその値を返す。クライアントがアクセスするレプリカはランダムに選択される。さらに、各データにはタイムスタンプが付加されているものと仮定し、クライアントはデータの世代を読み取ることができる。ただし、それが最新であるかどうかはクライアントの視点からは判別できない。

本モデルでは、一定の確率で最新のデータが取得できないことを容認する一貫性の考え方、“確率的一貫性”を導入する [3]。すなわち、書き込み操作と読み込み操作で式 (1) を満たさない場合を、ある確率で許容するものとする。

これは、従来の Tanenbaum らのレプリカ同期のタイミングに着目した一貫性モデル [2] や空間的一貫性の不備を観測する一貫性モデル [1] とは異なり、一貫性のためのリソースを性能や信頼性などの他の設計基準へ積極的に移動させる発想に基づいている。これによって一貫性のレベルを連続的に扱うことができ、他の設計基準との関係性を定量的に記述できる可能性が高まる。図 1 に 100% の一貫性を満たさないアクセスの例を示す。こ

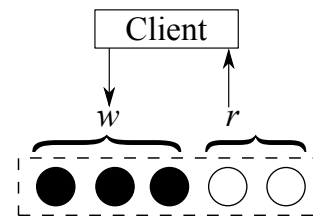


図 1: システムモデル。

れは、 $n = 5, w = 3, r = 2$ の拡張クォーラムシステムにおけるデータ取得を表している。図のように、書き込みを左側 3 個のレプリカに、読み込みを右側 2 個のレプリカから行った場合、直近の更新レプリカから読み込みを行っていないので、最新のデータは取得できない。

さらに本モデルでは n 個の総レプリカのうち n_f 個のレプリカが故障していると考える。故障はクラッシュ故障を仮定し、故障してるレプリカは回復することがなく、読み書きが行えないものとする。また、各ノードにアクセスするまでレプリカが故障しているかどうかはわからないものとする。故障していないレプリカから r 個読み取ることができれば最新データを取得できるが、 $r-1$ 個以下しか読み取ることができなければ最新データの取

[†] 首都大学東京 大学院 システムデザイン研究科, Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

[‡] 日本大学 生産工学部, College of Industrial Technology Nihon University

[§] 首都大学東京 システムデザイン学部, Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University

得は保証されない。故障しているレプリカにアクセスした場合、 r 個の故障していないレプリカを読み込めるまで最大 a 個まで追加して読み込みアクセスが可能であるとする。可能な追加読み込み数が 0 のとなった状態で、故障レプリカにアクセスした場合は、直ちに手続きを終了する。

本研究では、設計・評価基準としての性能を“1 アクセス当たり完了するクエリ数”で定義する。また、信頼性を“読み込みクエリに対してなんらかのデータを返すことができる確率”，一貫性を“読み込みクエリに対して最新のデータを返すことができる確率”で定義するものとする。

3. シミュレーション評価

性能を固定したときの信頼性と一貫性の関係について評価する。ここでは、 $a = 0$ とすることで通信にかかるアクセスコスト、ひいては性能のレベルである 1 アクセス当たり完了するクエリ数を固定し、性能には関係しない総ノード数 n を変化させた場合の例を示す。図 2 は $w = 4, r = 3, a = 0$ の場合の $n_f = 0, 1, 3, 5, 10$ についての総レプリカ数 n と信頼性 R の関係を示している。総レプリカ数の増加とともに信頼性が上がり、 $R = 1$ に近づいていることがわかる。

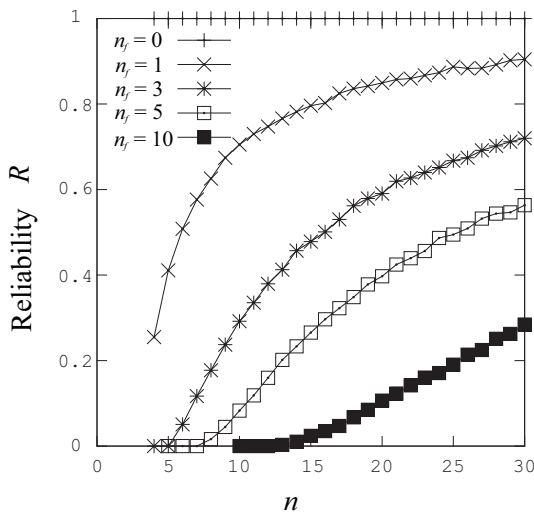


図 2: 性能のレベルを固定したときの総レプリカ数と信頼性. ($w = 4, r = 3, a = 0$)

図 3 は、同じく $w = 4, r = 3$ の場合の $n_f = 0, 1, 3, 5, 10$ についての総レプリカ数 n と一貫性 C の関係を示している。全体に十分大きな総レプリカ数の範囲では C が単調減少していることが解る。例えば故障レプリカ数が $n_f = 1$ の場合なら、 $n \geq 10$ では、信頼性と一貫性のあいだにトレードオフの関係があることが

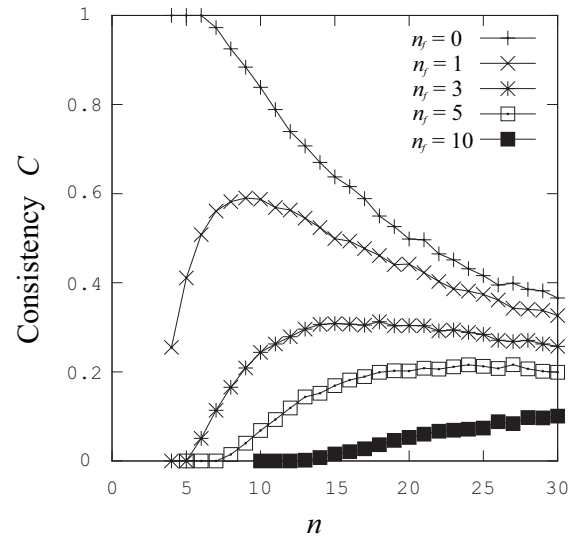


図 3: 性能のレベルを固定したときの総レプリカ数と一貫性. ($w = 4, r = 3, a = 0$)

解る。

4. むすび

本論文では、クォーラムを拡張した簡単なデータレプリケーションのモデルによって、性能と信頼性と一貫性のあいだの関係を新たに定量化した。確率的な一貫性を導入することで一貫性のレベルを連続的に扱うことを可能にした。また、信頼性と一貫性を明確に個別の基準として扱い、信頼性、一貫性の二つについて評価するときは性能レベルを固定するという方針をとった。その結果、信頼性と一貫性のあいだにもトレードオフが成り立つことが示された。今後の課題として、本研究で扱った性能、信頼性、一貫性に加え、拡張性や安全性も含めた考察の展開などが挙げられる。

参考文献

- [1] T. Hara et. al. “Consistency management strategies for data replication in mobile ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.8, no.7, pp.950-967, 2009
- [2] A.S. タネンバウム, 他 (水野他訳), 分散システム - 原理とパラダイム, ピアソン・エデュケーション出版, 2003.
- [3] Wenzhong Li, Edward Chan, Daoxu Chen and Sanglu Lu, “Maintaining Probabilistic Consistency for Frequently Offline Devices in Mobile Ad Hoc Networks,” *IEEE 2009 ICDCS*, pp 215-222.