Verteilte Systeme

Georeplikation

Sommersemester 2024

Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Überblick

- Georeplikation
  - Motivation
  - Konsistenzgarantien
  - Pileus
  - Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

Motivation

- Georeplikation
  - Platzierung von Replikaten an **verschiedenen geografischen Standorten**
  - Konsequenzen
    - Minimierung der Fehlerabhängigkeit zwischen Replikaten
    - Reduzierung der Distanz zwischen Client und Replikat
    - Höhere Latenzen zwischen den Replikaten
- Probleme bei der Bereitstellung **starker Konsistenz**
  - Gesteigerte Antwortzeit aufgrund eines mehrphasigen Einigungsprotokolls
  - Erhöhter Kommunikationsaufwand durch Austausch von Bestätigungen
  - Nichtverfügbarkeit von Replikaten, die keinen Kontakt zur Gruppe haben
  - Vergleiche: Uniformer zuverlässiger Multicast
- Herausforderungen
  - Welche **abgeschwächten Konsistenzgarantien** sind praktikabel?
  - Wie kann ein System unterschiedliche Konsistenzgarantien unterstützen?

Überblick

Georeplikation

- Motivation
- Konsistenzgarantien
- Pileus
- Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

Konsistenzgarantien

- Beispiele typischer **Konsistenzgarantien aus der Praxis**

Konsistenzgarantie	Beschreibung
Strong Consistency	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreiboperationen
Eventual Consistency (Letztendliche Konsistenz)	Sichtbarkeit einer Teilmenge der vorherigen Schreiboperationen
Consistent Prefix	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreibaufrufe bis zu einem bestimmten Punkt in der Sequenz
Bounded Staleness	Sichtbarkeit aller Schreiboperationen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt; eventuell beliebige danach
Monotonic Reads	Sichtbarkeit einer monoton wachsenden Teilmenge der vorherigen Schreiboperationen
Read My Writes	Sichtbarkeit aller vorherigen Schreiboperationen desselben Lesers

- Literatur

Doug Terry
Replicated data consistency explained through baseball
Communications of the ACM, 56(12):82–89, 2013.

Konsistenzgarantien im Vergleich

- Beispiel: Entwicklung des Spielstands in einem Baseball-Spiel

Zeitpunkt [min]	0	5	17	37	47	79	163	181
Mannschaft *A*	0	0	1	1	1	2	2	2
Mannschaft *B*	0	1	1	2	3	3	4	5

- Mögliche **Rückgabewerte von Leseaufrufen** zum Zeitpunkt $t = 182$

  [Annahme: Die Punkte jeder Mannschaft werden in separaten Datensätzen verwaltet, aber gemeinsam gelesen.]

Strong Consistency	2:5
Eventual Consistency	0:0, 0:1, 0:2, 0:3, 0:4, 0:5, 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 2:0, 2:1, 2:2, 2:3, 2:4 oder 2:5
Consistent Prefix	0:0, 0:1, 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 2:4 oder 2:5
Bounded Staleness [Beispiel: max. 100 min alte Werte]	2:3, 2:4 oder 2:5
Monotonic Reads [Beispiel: 1. Aufruf bei 1:3]	1:3, 1:4, 1:5, 2:3, 2:4 oder 2:5
Read My Writes	Offizieller Punktezähler: 2:5 Andere Leser: siehe letztendliche Konsistenz

Anwendungsszenarien

- Offizieller Punktezähler bei Aktualisierung des Spielstands

```
public void incrementScore(String team) {
  int oldScore = store.get(team);
  store.put(team, oldScore + 1);
}
```

⇒ **Read My Writes**

- Schiedsrichter nach der regulären Spielzeit: Entscheidung, ob Verlängerung nötig

```
public boolean isDraw() {
  [scoreA, scoreB] = store.getAll("A", "B");
  return (scoreA == scoreB);
}
```

⇒ **Strong Consistency**

- Radioreporter bei periodischer Spielstandsmeldung

```
while(true) {
  [scoreA, scoreB] = store.getAll("A", "B");
  Report scoreA and scoreB;
  Sleep for 30 minutes;
}
```

⇒ **Consistent Prefix** + (**Monotonic Reads** oder **Bounded Staleness**)

⇒ **Konsistenzanforderungen sind abhängig vom Anwendungsfall**

Überblick

Georeplikation

- Motivation
- Konsistenzgarantien
- Pileus
- Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

Pileus

- Problem
  - Schwach konsistente Leseanfragen liefern oft stark konsistente Daten
  - **Mehraufwand durch fehlendes Wissen** über die Aktualität von Daten

```
Data data = weaklyConsistentGet([Schlüssel]);
Display data;
Data latestData = stronglyConsistentGet([Schlüssel]);
if(latestData != data) Display latestData;
```

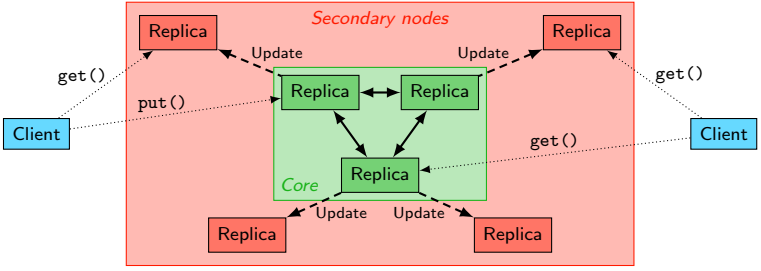
- Pileus
  - Ansatz zur georeplizierten Speicherung von Schlüssel-Wert-Paaren
  - Spezifizierung **konsistenzbasierter Dienstgütekriterien** durch den Client
  - Anfrageabhängige Auswahl des Kontaktreplikats für Leseoperationen

- Literatur

Douglas B. Terry, Vijayan Prabhakaran, Ramakrishna Kotla, Mahesh Balakrishnan et al.
Consistency-based service level agreements for cloud storage
Proc. of the 24th Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '13), S. 309–324, 2013.

Architektur

- Systemkern
  - **Synchrone Replikation**
  - Bearbeitung von
    - Schreibanfragen
    - Leseanfragen mit starken Konsistenzanforderungen
- Sekundärknoten
  - **Asynchrone Übernahme der Daten** aus dem Systemkern
  - Bearbeitung von Leseanfragen mit schwachen Konsistenzanforderungen



Konsistenzbasierte Dienstgütekriterien (SLAs)

- Spezifizierung durch die **Client-Anwendung** [Aufruf: `get(String key, SLA sla)`]
  - Festlegung der gewünschten Konsistenz und einer oberen Latenzschranke
  - Gewichtung der Kriterien nach „Nützlichkeit“ (*Utility*)

Nr.	Konsistenzgarantie	Latenz	Nützlichkeit
1.	*Strong Consistency*	150 ms	1.0
2.	*Eventual Consistency*	150 ms	0.5
3.	*Strong Consistency*	1000 ms	0.2

- Auswertung durch die **Client-Bibliothek**
  - Analyse des Verhaltens verschiedener Replikate
  - Abschätzung von replikatspezifischen Wahrscheinlichkeiten
    - P_C Wahrscheinlichkeit für Einhaltung der Konsistenzgarantie
    - P_L Wahrscheinlichkeit für Bereitstellung der Latenz
    - $P_s = P_C \times P_L$ Wahrscheinlichkeit für Einhaltung des Dienstgütekriteriums s
  - **Auswahl des Kontaktreplikats**
    - Ziel: Maximierung von $P_s \times s_{Utility}$ über alle s
    - Bei Gleichstand: Wahl des Replikats mit der vermeintlich geringsten Latenz

Implementierung

- Einsatz von **Modifikationszeitstempeln für Datensätze**
  - Systemkern
    - Erzeugung von Zeitstempeln bei der Ausführung von Schreibanfragen
    - Weiterleitung von Änderungen in aufsteigender Reihenfolge ihrer Zeitstempel
  - Alle Replikate
    - Pro Datensatz: Verwaltung eines Zeitstempels T_D der letzten Änderung
    - T_{max}: Zeitstempel der neuesten Aktualisierung
    - Antworten enthalten T_D und T_{max} [→ Abschätzung des Aktualitätsgrads der Daten möglich.]
- **Analyse des Replikatverhaltens** durch den Client
  - Messung der individuellen Umlaufzeiten zu einzelnen Replikaten
  - Verwaltung der neuesten bekannten T_{max} verschiedener Replikate
- Abschätzung von Konsistenzwahrscheinlichkeiten
  - Bestimmung eines erforderlichen **Mindestzeitstempels** T_{min} (Beispiele)
    - *Read My Writes* Zeitstempel der letzten Änderung des Clients
    - *Monotonic Reads* Zeitstempel der neuesten vom Client gelesenen Version
  - Vergleich von T_{min} und T_{max}

Überblick

Georeplikation

- Motivation
- Konsistenzgarantien
- Pileus
- Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

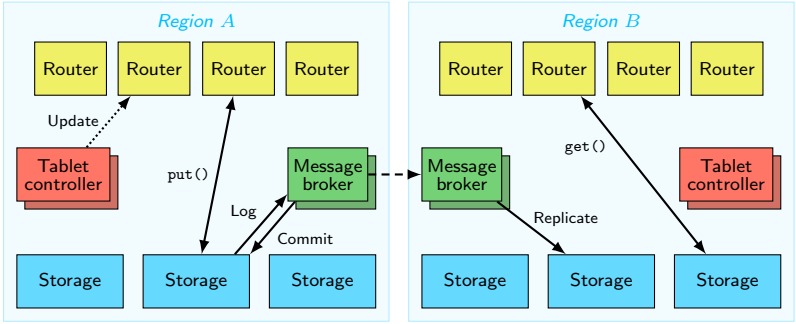
Platform for Nimble Universal Table Storage (PNUTS)

- Einsatzszenarien bei Yahoo (Beispiele)
  - Verwaltung von **Nutzerinformationen** (Profildaten, Zugriffsstatistiken,...)
  - Speicherung von Metadaten für Videos, Fotos und Email-Anhänge
- Verwaltung von **Schlüssel-Wert-Paaren in Tabellen**
  - Sortierung von Datensätzen
    - Aufsteigend nach Schlüssel oder Schlüssel-Hashwert
    - `scan( )`: Zusätzliche Operation zum Iterieren über mehrere Datensätze
  - Speicherung von Tabellen aufgeteilt nach Abschnitten (*Tablets*)
- **Charakteristika**
  - Datensatzspezifische Primärreplikate
  - Alle Operationen mit hohen Latenzen werden asynchron ausgeführt
- Literatur

Brian F. Cooper, Raghu Ramakrishnan, Utkarsh Srivastava, Adam Silberstein et al.
PNUTS: Yahoo!'s hosted data serving platform
Proceedings of the VLDB Endowment, 1(2):1277–1288, 2008.

Architektur

- Replikation über **mehrere geografisch verteilte Regionen**
- Komponenten pro Region
  - Speicherknoten — Bearbeitung von Anfragen
  - Tablet-Controller — Zuordnung von Tablets zu Speicherknoten
  - Router — Weiterleitung von Anfragen an Speicherknoten
  - Message-Broker — Übermittlung von Nachrichten an **andere Regionen**



Bearbeitung von Anfragen

- Identifizierung des **zuständigen Speicherknotens** durch den Router
  - Router hält Kopie des Tablet-Controller-Zustands im Hauptspeicher
    - Information über Tablet-Grenzen
    - Abbildung von Tablets auf Speicherknoten
  - Überprüfung der Router-Entscheidung durch betroffenen Speicherknoten
  - Aktualisierung des Router-Zustands bei Fehlentscheidungen
- Identifizierung der **zuständigen Region** durch den Speicherknoten
  - Jeder Datensatz enthält Referenz auf die Region seiner Primärkopie
  - Weiterleitung von Schreibanfragen an entsprechende Region
  - Häufige Schreibanfragen von anderem Ort $\rightarrow$ Wechsel der Primärregion
  - Behandlung von Einfügeoperationen durch eine Default-Region
- **Ausführung einer Schreibanfrage** auf dem Speicherknoten
  - Übermittlung der Anfrage an den Message-Broker
  - Nach Message-Broker-Bestätigung: Lokale Bearbeitung der Anfrage