Überblick

Fehlertoleranz

- Motivation
- Fernaufrufsemantiken
- Implementierung
- Ausfallbehandlung
- Transparenz

Motivation

- Fehlerszenarien in verteilten Systemen (Beispiele)
  - Unabhängige Ausfälle von Knoten
  - Netzwerkfehler (z. B. Nachrichtenverlust, Netzwerkpartitionierung)
  - Überlast (Knoten oder Netzwerk)

→ Zuverlässige Fehlererkennung ist im Allgemeinen nicht möglich

→ Fehlertoleranzansätze sollten keine perfekte Fehlererkennung bedingen

- Herausforderungen
  - Wie kann ein Fernaufrufsystem temporäre Netzwerkfehler tolerieren?
  - Wie lassen sich zwischenzeitliche Knotenausfälle behandeln?
    - Wiederherstellung von Servern
    - Ausfall und Neustart von Clients

- Literatur

Peter Bailis and Kyle Kingsbury
The network is reliable
ACM Queue, 12(7):20–32, 2014.

Fernaufrufsemantiken

- Ideale Semantik im lokalen, fehlerfreien Fall: *Exactly-Once*
  - Einmaliger Aufruf
  - Einmalige Ausführung der aufgerufenen Prozedur / Methode
  - Einmalige Rückgabe des Ergebnisses

  → **Problem: Semantik ist im (verteilten) Fehlerfall nicht erreichbar**

- Grundlegende Techniken zur Tolerierung von Fehlern bei Fernaufrufen
  - Überwachung von Timeouts
  - Wiederholtes Senden von Nachrichten
  - Filterung von Duplikaten

- Verschiedene Aufrufsemantiken durch Kombination der Techniken
  - *Maybe*
  - *At-Most-Once*
  - *At-Least-Once*
  - *Last-of-Many*

Fernaufrufsemantiken

- *Maybe*
  - Einmaliges Senden der Anfrage
  - Abbruch nach Timeout bei Ausbleiben einer Antwort
- *At-Most-Once*
  - Wiederholtes Senden der Anfrage nach Timeout, falls Antwort ausbleibt
  - Ausführung der ersten Anfrage, die den Server erreicht
  - Senden der ursprünglichen Antwort, falls weitere Anfragen eintreffen
- *At-Least-Once*
  - Wiederholtes Senden der Anfrage nach Timeout, falls Antwort ausbleibt
  - Ausführung jeder Anfrage, die den Server erreicht
  - Senden der jeweils zur aktuellen Ausführung gehörigen Antwort
- *Last-of-Many*
  - Erweiterung von *At-Least-Once*
  - Client akzeptiert nur die Antwort, die zu seiner neuesten Anfrage gehört

Vergleich der Fernaufrufsemantiken

- Charakteristika

	Maybe	At-Most-Once	At-Least-Once	Last-of-Many
Timeouts	Ja	Ja	Ja	Ja
Wiederholtes Senden	Nein	Ja	Ja	Ja
Duplikatunterdrückung	Nein	Ja	Nein	Nein
Mehrfache Ausführung	Nein	Nein	Möglich	Möglich
Antwortselektion	Nein	Nein	Nein	Ja

- Client-Wissen über die Ausführungsanzahl in verschiedenen Szenarien

	Maybe	At-Most-Once	At-Least-Once	Last-of-Many
Erfolgsfall nach einmaliger Anfrage	1	1	1	1
Erfolgsfall nach mehrmaliger Anfrage	–	1	≥ 1	≥ 1
Ausbleiben einer Antwort trotz mehrmaliger Anfrage	≤ 1	≤ 1	≥ 0	≥ 0

[Während *At-Least-Once* nach der Semantik im Erfolgsfall benannt ist, verweist *At-Most-Once* auf den Fehlerfall.]

Implementierung

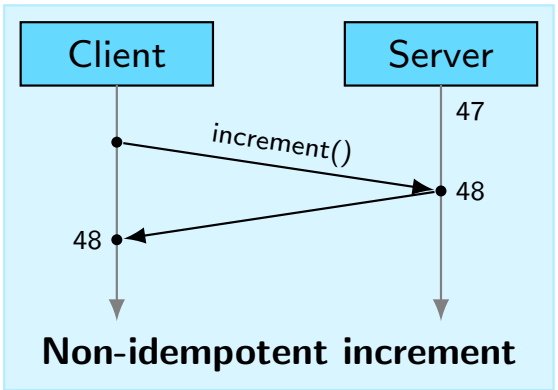
- *At-Most-Once*
  - Duplikaterkennung erfordert eindeutige Identifizierung eines Aufrufs
    - Aufrufer
    - Prozedur- / Methodenaufruf
  - Speicherung von Antworten
  - Strategien zur Garbage-Collection des Antwortspeichers
    - Löschen der alten Antwort bei einer neuen Anfrage desselben Aufrufers
    - Verwerfen einer Antwort nach Timeout
- *At-Least-Once*
  - Zuordnung von Antwort zu Anfrage nötig → Identifizierung von Aufrufen
  - Kein dauerhaftes Wissen über Fernaufrufe auf Server-Seite erforderlich
- *Last-of-Many*
  - Unterscheidung von Anfragen desselben Aufrufs → Sequenznummern
  - Server-seitiges Wissen abhängig von Interpretation der Semantik
    - Akzeptierte Antwort gehört zu neuester Anfrage → Kein zusätzliches Wissen
    - Akzeptierte Antwort gehört zu letzter Ausführung → Speicher für Anfrage-IDs

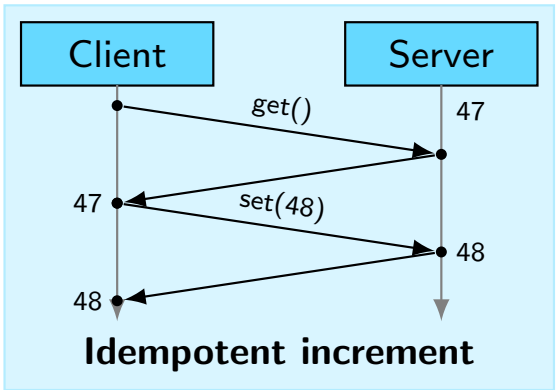
Transportprotokolle

- Wiederholtes Senden von Anfragen
  - UDP
    - Abbruch bei Erreichen einer bestimmten Anzahl von Versuchen
    - Risiken bei ungünstiger Timeout-Wahl
      - Zu kurz: Livelock (*Last-of-Many*) bzw. unnötiges Senden von Nachrichten
      - Zu lang: Erhöhte Antwortzeit bei Nachrichtenverlust
  - TCP
    - TCP übernimmt erneutes Senden von Anfragen
    - Setzen des Wiederholungs-Timeouts ist Aufgabe des Transportprotokolls
- *At-Most-Once*
  - Risiken bei ungünstiger Timeout-Wahl für das Verwerfen von Antworten
    - Zu kurz: Mehrfachausführung einer Anfrage $\rightarrow$ Verletzung der Garantien
    - Zu lang: Verlust der Verfügbarkeit aufgrund eines vollen Antwortspeichers
  - TCP
    - TCP-Garantien beziehen sich auf einzelne Verbindungen
    - Problem: Aufruferkennung über Verbindungsabbruch und -neuaufbau hinweg

Konsistenzwahrung bei Aufrufwiederholungen

- *Idempotenz* [„*idem*“ (lat.): dasselbe.]
  - Wiederholung eines Aufrufs hat denselben Effekt wie einmaliger Aufruf
  - Annahme: Isolierter Aufruf → Keine Überlagerung mit anderen Aufrufen
- Ansätze im Kontext von Fernaufrufen
  - Erkennung und Unterdrückung von Aufrufwiederholungen im Skeleton
  - Umsetzung auf Anwendungsebene bei zustandslosen Skeletons
    - Keine Zustandsinformationen über die Client-Interaktion im Skeleton
    - Mehrfachausführung führt zu identischen Ergebnissen bzw. Zuständen
- Beispiel: Nichtidempotente vs. idempotente Implementierung





Wiederherstellung nach Server-Ausfällen

- Anforderungen bei Ausfall und Neustart eines Servers
  - Zustandsbehaftete Dienste
    - Kein Verlust bestätigten Applikationszustands
    - Beispiel: Vom Dienst beantwortete Schreibaufrufe

    → Sicherstellung durch die Anwendung
  - Fernaufrufsystem
    - Keine Verletzung der Fernaufrufsemantiken
    - Beispiel: Keine Mehrfachausführung bei *At-Most-Once*

    → Mechanismus zur Zustandswiederherstellung erforderlich

- Absicherung durch Protokollierung essentieller Informationen
  - Persistente Speicherung (Beispiele)
    - Log-Datei(en) auf lokaler Festplatte
    - Nutzung eines separaten (fehlertoleranten) Systems
  - Einspielen des Protokolls beim Neustart
  - Garbage-Collection auf Basis von Sicherungspunkten

Protokollierung von Fernaufrufen bei *At-Most-Once*

- Vorgehensweise auf Server-Seite
  1. Erhalt der Anfrage
  2. Protokollierung der eindeutigen Aufrufkennung
  3. Bearbeitung der Anfrage
  4. Protokollierung der Antwort
  5. Senden der Antwort
- Verhalten des Servers bei Erhalt einer Anfrage nach Neustart

Aufruf	Antwort	Szenario	Reaktion
Unbekannt	Unbekannt	Neue Anfrage oder Ausfall vor Schritt 2	Ausführung der Anfrage Senden der Antwort
Bekannt	Unbekannt	Ausfall nach Schritt 2 aber vor Schritt 4	Senden einer Fehlermeldung
Bekannt	Bekannt	Ausfall nach Schritt 4	Senden der Antwort

$\Rightarrow$ Wiederherstellung kann zu nichttolerierbaren Situationen führen

Umgang mit Client-Ausfällen

- Problemszenario: Verwaiste Fernaufrufe (*Orphans*)
  - Start einer (zeit)aufwändigen Operation per Fernaufruf
  - Ausfall des aufrufenden Clients vor Erhalt der Antwort

  → Ziel: Abbruch des Fernaufrufs
- Annahme: Abbruch einer Operation führt nicht zu Inkonsistenzen
  - Geordnete Rückgabe von Locks
  - Rückgängigmachung von Zustandsänderungen
  - ...
- Erhöhte Komplexität bei Fernaufrufketten
  - Bearbeitung eines Fernaufrufs erfordert selbst wiederum Fernaufrufe
  - Beispiel: Aufspaltung großer Aufgaben in Teilaufgaben
- Literatur

Bruce Jay Nelson
Remote procedure call
Dissertation, Carnegie-Mellon University, CMU-CS-81-119, 1981.

Behandlung verwaister Fernaufrufe

- Explizite Terminierung durch den Client (*Extermination*)
  - Protokollierung von Fernaufrufen durch den Stub
  - Abbruchanfragen für nicht mehr benötigte Fernaufrufe nach Neustart
  - Nachteil: Persistente Schreibaufrufe vor und nach jedem Fernaufruf
- Einsatz systemweiter *Epochen* (*Reincarnation*)
  - Nachrichten tragen Epochenkennung (= Zählerwert)
  - Beginn und Bekanntgabe (Broadcast) einer neuen Epoche bei Neustart
  - Wechsel in neue Epoche: Abbruch aller Operationen früherer Epochen
  - Variante: *Gentle Reincarnation*
    - Nachfrage beim Client
    - Abbruch einer Operation, falls kein Widerspruch des Clients vorliegt
- Absicherung durch Timeouts (*Expiration*)
  - Setzen von Fristen für Fernaufrufe
  - Bei Bedarf: Schrittweise Fristverlängerung durch den Client
  - Beendigung eines Aufrufs bei Ablauf der Frist

Leases

- Generelles Problem: Angleichung der Sichten verschiedener Knoten
  - Globale Entscheidungen erfordern konsistente lokale Sichten (Beispiele)
    - Soll ein Fernaufruf abgebrochen werden?
    - *At-Most-Once*: Kann eine Antwort verworfen werden?
    - Welcher Knoten übernimmt aktuell die Anführerrolle im System?
  - Abstimmung lokaler Sichten durch Interaktion ist nicht immer möglich
- *Lease*
  - Zeitliche Begrenzung für von Knoten getätigte Aussagen
  - Lease-Verlängerung benötigt erfolgreiche aktive Handlung
  - Ablauf eines Lease: Setzen der lokalen Sicht auf einen vordefinierten Wert
  - Voraussetzung: Hinreichend genaue und ähnlich schnelle Uhren
- Literatur

Cary G. Gray and David R. Cheriton
Leases: An efficient fault-tolerant mechanism for distributed file cache consistency
Proceedings of the 12nd Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '89), S. 202–210, 1989.

Signalisierung von Fehlern

- Problem
  - Nicht alle Fehlersituationen lassen sich im Fernaufrufsystem tolerieren
  - Beispiele
    - Permanente Netzwerkfehler
    - Knotenausfälle
    - Inkompatible Stubs und Skeletons

  → Abbruch des Fernaufrufs erforderlich

- *Remote-Exception*
  - Signalisierung im Fernaufruf begründeter Ausnahmesituationen
  - Vorgehensweise abhängig vom Ort des Auftretens
    - Stub: Rückkehr aus dem Fernaufruf mittels Exception
    - Skeleton: Weiterleitung der Exception zum Stub, danach an die Anwendung

- Reaktion der Anwendung (Beispiele)
  - Rückgriff auf weiterführende Fehlertoleranzmechanismen
  - Benachrichtigung des Nutzers bzw. Administrators

Transparenz von Fernaufrufen

- Überblick über bisher behandelte Maßnahmen
  - Stub und Skeleton
    - Stellvertreter für Server bzw. Client
    - Abfangen lokaler Methodenaufrufe
    - Abbildung auf Nachrichtenaustausch
    - Bereitstellung von Ortstransparenz
  - Automatisierte Generierung von Stubs und Skeletons
  - Tolerierung von Nachrichtenverlusten mittels Fernaufrufsemantiken

- Problem
  - Existenz im Fernaufruf bedingter Fehler, die eine Signalisierung erfordern
  - Anwendung muss auf solche Ausnahmesituationen vorbereitet sein

$\Rightarrow$ Erkenntnis

Das komplexe Fehlermodell verteilter Systeme macht es unmöglich, Fernaufrufe in jedem Fall vollständig transparent zu realisieren