Dynamic Analysis of Concurrent Go-Programs

Bachelorarbeit

Erik Kassubek

Institut für Informatik
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

15.02.2023

Nebenläufigkeit in Go

- Go-Routine
  - leichtgewichtiger Thread
  - ermöglicht Nebenläufigkeit
- Mutexe (Locks)
  - Synchronisationsmechanismus
  - Löst das Problem des gegenseitigen Ausschluss
- Channel
  - Synchronisationsmechanismus
  - Ermöglichen Kommunikation zwischen Routinen

Mutex

```
func main() {
  var m sync.Mutex

  go func() {
    m.Lock()
    a()  // kritischer Abschnitt
    m.Unlock()
  }()

  m.Lock()
  b()  // kritischer Abschnitt
  m.Unlock()
}
```

Mutex

```
func main() {
  var m sync.Mutex

  go func() {
    m.Lock()
    a()  // kritischer Abschnitt
    m.Unlock()
  }()

  m.Lock()
  b()  // kritischer Abschnitt
  m.Unlock()
}
```

```
func main() {
  var m sync.RWMutex

  go func() {
    m.RLock()
    read()
    m.RUnlock()
  }()

  go func() {
    m.RLock()
    read()
    m.RUnlock()
  }()

  m.Lock()
  write()
  m.Unlock()
}
```

Mutex

```
func main() {
  m sync.Mutex
  n sync.Mutex

  go func() {
    m.Lock()      // 1
    n.Lock()      // 2
    n.Unlock()
    m.Unlock()
  }()

  n.Lock()        // 3
  m.Lock()        // 4
  m.Unlock()
  n.Unlock()
}
```

Mutex

```
func main() {
  m sync.Mutex
  n sync.Mutex

  go func() {
    m.Lock()      // 1
    n.Lock()      // 2
    n.Unlock()
    m.Unlock()
  }()

  n.Lock()        // 3
  m.Lock()        // 4
  m.Unlock()
  n.Unlock()
}
```

```
func main() {
  var m sync.Mutex

  m.Lock()   // 1
  m.Lock()   // 2
}
```

Channel - Unbuffered

```
func main() {
  c := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1
  }()

  <- c
}
```

Channel - Unbuffered

```
func main() {
  c := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1
  }()

  <- c
}
```

```
func main() {
  c := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1    // 1
  }()

  go func() {
    <- c      // 2
  }()

  <- c        // 3
}
```

Channel - Buffered

```
func main() {
  c := make(chan int, 2)
  d := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1  // 1
    c <- 1  // 2
    d <- 1  // 3
  }()

  <- d      // 4
  <- c      // 5
  <- c      // 6
}
```

Channel - Buffered

```
func main() {
  c := make(chan int, 2)
  d := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1   // 1
    c <- 1   // 2
    d <- 1   // 3
  }()

  <- d       // 4
  <- c       // 5
  <- c       // 6
}
```

```
func main() {
  c := make(chan int, 2)
  d := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1   // 1
    d <- 1   // 2
  }()

  <- d       // 3
  <- c       // 4
  <- c       // 5
}
```

Channel - Close

- Schließt Channel $\Rightarrow$ keine weiter Kommunikation möglich
- Send auf geschlossenem Channel $\Rightarrow$ Laufzeitfehler

Channel - Close

- Schließt Channel ⇒ keine weiter Kommunikation möglich
- Send auf geschlossenem Channel ⇒ Laufzeitfehler

```
func main() {
  c := make(chan int)

  go func() {
    c <- 1    // 1
  }()
  go func() {
    <- c      // 2
  }()
  close(c)    // 3
}
```

Channel - Select

- Wartet gleichzeitig auf mehrere Channel-Operationen
- Erste ausführbare Funktion wird ausgeführt
- Wenn mehrere gleichzeitig ⇒ Zufälliger Case
- Ohne Default ⇒ blockiert

```
go func() {
  select {
    case c <- 1:
      func1()
    case a := <- d:
      func2(a)
    default:
      func3()
  }
}()
```

Analyse

- Entwicklung und Implementierung eines Detektors zur
  - Erkennung von problematischen Situationen
  - Analyse von problematischen Situationen

Analyse

- Entwicklung und Implementierung eines Detektors zur
  - Erkennung von problematischen Situationen
  - Analyse von problematischen Situationen
- Dynamische Analyse
  - Instrumentierung
  - Programm (mehrfach) ausführen
  - Verhalten aufzeichnen $\Rightarrow$ Trace
  - Trace analysieren

Trace

- Speichert Ablauf der notwendigen Informationen
- Ein Trace pro Routine
- Ermöglicht Rekonstruktion des Programmablaufs

Instrumentierung

- Veränderung des Programmcodes
- Ersetze Mutexe/Channel durch eigene Objekte
- Funktionen auf Objekten:
  - Ausführung der eigentlichen Operation
  - Aufzeichnung der Operation
- Aufzeichnung von Fork
- Aufzeichnung / Kontrolle über Select

Instrumentierung - Select

```
go func() {
  select {
    case <- c:
      func1(a)
    case d <- 1:
      func2()
  }
}()
```

Instrumentierung - Select

```
switch goChanFetchOrder[1] {
case 0:
  select {
  case  <-c.GetChan():
    func1(a)
  case <-time.After(2 * time.Second):
    ....
  }
case 1:
  select {
  case d <- 1:
    func2()
  case <-time.After(2 * time.Second):
    ....
  }
default:
  ....
}
```

Instrumentierung

- Funktionen in Package implementiert
- Automatisierte Ersetzung im Programmcode
  - Traversierend des AST
  - Veränderung des AST wenn notwendig
- Erzeugung einer neuen Main-Datei zur Ausführung

Programm ausführen

- Mehrfache Ausführung für verschiedene Select-Pfade
- Zufällige Wahl der Pfade (ohne Doppelung)
- Analyse nach jeder Ausführung
- Konsolidierung der Ergebnisse am Ende
- Automatischer Abbruch wenn Laufzeit zu lange

Analyse - Mutexe

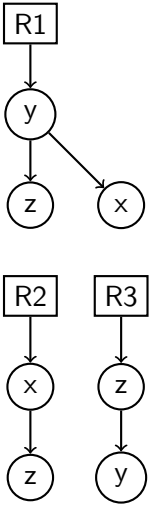
- Suche nach doppeltem Locking
  - Lock-Operation als letztes Element in Trace
  - Traversiere Trace rückwerts
  - Wenn Lock auf selben Mutex vor Unlock auf selben Mutex $\Rightarrow$ doppeltes Locking
  - Kein Deadlock wenn beide RLock

Analyse - Mutexe

- Suche nach zyklischem Locking
  - Aufbau von Lock-Bäumen
  - Suchen nach Zyklen in Lock-Bäumen

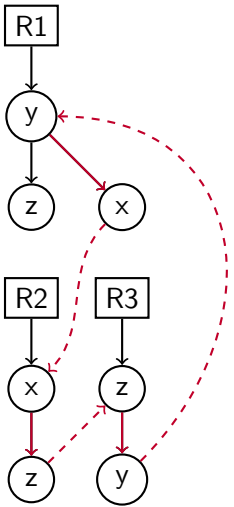
Detektion von Deadlocks: Lock-Bäume

```
func lockTree(){
  var x,y,z sync.Mutex

  // R1
  go func(){
    y.Lock()
    z.Lock()
    z.Unlock()
    x.Lock()
    x.Unlock()
    y.Unlock()
  }

  // R2
  go func(){
    x.Lock()
    z.Lock()
    z.Unlock()
    x.Unlock()
  }

  // R3
  go func(){
    z.Lock()
    y.Lock()
    y.Unlock()
    z.Unlock()
  }
}
```



Detektion von Deadlocks: Lock-Bäume

```
func lockTree(){
  var x,y,z sync.Mutex

  // R1
  go func(){
    y.Lock()
    z.Lock()
    z.Unlock()
    x.Lock()
    x.Unlock()
    y.Unlock()
  }

  // R2
  go func(){
    x.Lock()
    z.Lock()
    z.Unlock()
    x.Unlock()
  }

  // R3
  go func(){
    z.Lock()
    y.Lock()
    y.Unlock()
    z.Unlock()
  }
}
```



Analyse - Mutex

- Zyklus nur gültig wenn:
  - keine zwei R-Lock hintereinander
  - Locks in Zyklus dürfen keine gemeinsamen Vorfahren haben, außer beide Vorfahren sind RLock

Analyse - Channel

- Suche nach potenziellem Ablauf mit
  - Send/Receive ohne Kommunikationspartner
  - potenzielles Send auf geschlossenem Channel

Analyse - Channel

- Berechne Pre- und Post-Vectorclocks
- Bestimme vectorclock-annotated Trace
- Bestimme Operationen mit unvergleichbaren Vectorclocks
- Betrachte potenzielle Abläufe
- Suche nach Send/Receive ohne Kommunikationspartner und Send auf Closed

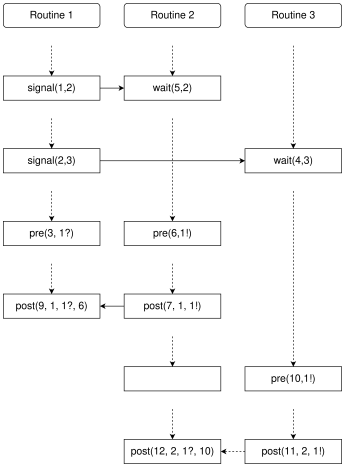
Analyse - Channel

```
func main() {
  x := make(chan int)

  go func() {
    x <- 1   // 1
    <- x     // 2
  }()

  go func() {
    x <- 1   // 3
  }()

  <-x        // 4
}
```

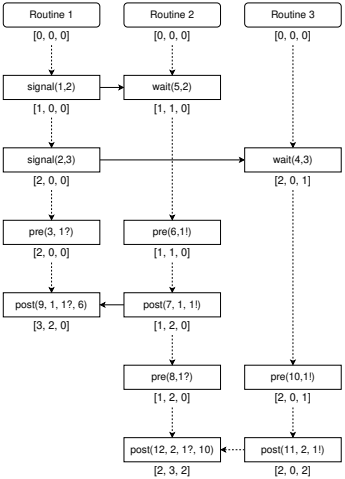
Analyse - Channel

$$[[signal(1,2), signal(2,3), pre(3,1?), post(9,1,1?,6)]$$
$$[wait(5,2), pre(6,1!), post(7,1,1!), pre(8,1?), post(12,2,1?,10)]$$
$$[wait(4,3), pre(10,1!), post(11,2,1!)]]$$

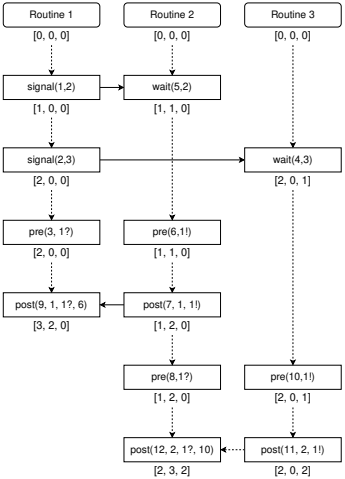
Analyse - Channel



Analyse - Channel

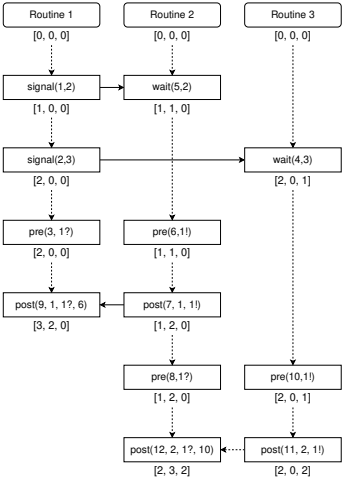


Analyse - Channel



$$\left[\left[^{[2,0,0]}x?^{[3,2,0]}\right]\right.$$
$$\left[^{[1,1,0]}x!^{[1,2,0]},^{[1,2,0]}\,x?^{[2,3,2]}\right]$$
$$\left.\left[^{[2,0,1]}x!^{[2,0,2]}\right]\right]$$

Analyse - Channel



$$\left[\left[^{[2,0,0]}x?^{[3,2,0]}\right]\right.$$
$$\left[^{[1,1,0]}x!^{[1,2,0]}, {}^{[1,2,0]}x?^{[2,3,2]}\right]$$
$$\left.\left[^{[2,0,1]}x!^{[2,0,2]}\right]\right]$$

- Für Operation ohne Post:
  Post-VC: [max, ..., max]

Analyse - Channel

- x ist Ursache von y wenn
  - $x \rightarrow y \Leftrightarrow VC(x) < VC(y) \Leftrightarrow \forall z(VC(x)_z \leq VC(y)_z) \wedge \exists z'(VC(x)_{z'} < VC(y)_{z'})$
- x ist nebenläufig/unvergleichbar mit y wenn
  - $x||y \Leftrightarrow VC(x) \lneqq VC(y) \Leftrightarrow VC(x) \not< VC(y) \wedge VC(y) \not< VC(x)$

Analyse - Channel

- Potenzielle Kommunikationspartner auf ungebufferten Channels:
  - Paar von Send-Receive auf selbem Channel
  - Pre- oder Post-Vectorclock unvergleichbar
  - Keine gemeinsamen gehaltenen Mutexe bei Ausführung

Analyse - Channel

- Potenzielle Kommunikationspartner auf ungebufferten Channels:
  - Paar von Send-Receive auf selbem Channel
  - Pre- oder Post-Vectorclock unvergleichbar
  - Keine gemeinsamen gehaltenen Mutexe bei Ausführung
- Potenzielle Kommunikationspartner auf gebufferten Channels:
  - Paar von Send-Receive auf selbem Channel
  - $\#s_{<} \leq \#r_{<} + \#r_{\not<}$
  - $\#s_{<} + \#s_{\not<} \geq \#r_{<}$

Analyse - Channel

```
func main() {
  c := make(chan int, 5)

  go func() {
    c <- 1      // 1
    c <- 1      // 2
    c <- 1      // 3
  }()

  go func() {
    c <- 1      // 4
  }()

  <- c          // 5
  <- c          // 6
  <- c          // 7
  <- c          // 8
}
```

Analyse - Channel

$$
\begin{aligned}
&[[^{[2,0,0]}x_1?^{[3,2,0]}] \\
&\ [^{[1,1,0]}x_2!^{[1,2,0]}, {}^{[1,2,0]}x_3?^{[2,3,2]}] \\
&\ [^{[2,0,1]}x_4!^{[2,0,2]}]]
\end{aligned}
$$

Analyse - Channel

$$
\begin{aligned}
&[[^{[2,0,0]}x_1?^{[3,2,0]}] \\
&\ [^{[1,1,0]}x_2!^{[1,2,0]}, {}^{[1,2,0]}x_3?^{[2,3,2]}] \\
&\ [^{[2,0,1]}x_4!^{[2,0,2]}]]
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
x_2! &\rightarrow x_1? \\
x_4! &\rightarrow x_1? \\
x_4! &\rightarrow x_3?
\end{aligned}
$$

Analyse - Channel

$$[[^{[2,0,0]}x_1?^{[3,2,0]}]$$
$$[^{[1,1,0]}x_2!^{[1,2,0]},^{[1,2,0]}x_3?^{[2,3,2]}]$$
$$[^{[2,0,1]}x_4!^{[2,0,2]}]]$$

$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

Analyse - Channel

$$[[^{[2,0,0]}x_1?^{[3,2,0]}]$$
$$[^{[1,1,0]}x_2!^{[1,2,0]}, ^{[1,2,0]}x_3?^{[2,3,2]}]$$
$$[^{[2,0,1]}x_4!^{[2,0,2]}]]$$

$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_2! \rightarrow \lightning$$

Analyse - Channel

$$[[^{[2,0,0]}x_1?^{[3,2,0]}]$$
$$[^{[1,1,0]}x_2!^{[1,2,0]}, ^{[1,2,0]}x_3?^{[2,3,2]}]$$
$$[^{[2,0,1]}x_4!^{[2,0,2]}]]$$

$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$x_2! \rightarrow x_1? \qquad x_1? \leftarrow x_2!$$
$$x_4! \rightarrow x_3? \qquad x_3? \leftarrow x_4!$$

$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_2! \rightarrow \lightning$$

Analyse - Channel

$$[[^{[2,0,0]}x_1?^{[3,2,0]}]$$
$$[^{[1,1,0]}x_2!^{[1,2,0]}, ^{[1,2,0]}x_3?^{[2,3,2]}]$$
$$[^{[2,0,1]}x_4!^{[2,0,2]}]]$$

$$x_2! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_1?$$
$$x_4! \rightarrow x_3?$$

$$x_2! \rightarrow x_1? \qquad x_1? \leftarrow x_2!$$
$$x_4! \rightarrow x_3? \qquad x_3? \leftarrow x_4!$$

$$x_4! \rightarrow x_1? \qquad x_1? \leftarrow x_4!$$
$$x_2! \rightarrow \lightning \qquad x_3? \leftarrow \lightning$$

Analyse - Channel

- Potenzielles Send auf Closed Channel:
  - Pre- oder Post-VC von Send unvergleichbar mit VC von Close
  - Wenn Close ist Ursache von Send $\Rightarrow$ Send auf Close tritt während Durchlauf auf $\Rightarrow$ erzeugt Laufzeitfehler

Zusammenfassung

- Dynamischer Detektor zur Erkennung von Concurrency-Bugs
  - Mutex-Bugs mit Lock-Bäumen
  - Channel-Bugs mit Vectorclock
- Implementierung für Instrumenter und Detektor:
  - `https://github.com/ErikKassubek/GoChan`

Sources

[1] M. Sulzmann und K. Stadtmüller, „Two-Phase Dynamic Analysis of Message-Passing Go Programs based on Vector Clocks,“ *CoRR*, Jg. abs/1807.03585, 2018. arXiv: 1807.03585. Adresse: http://arxiv.org/abs/1807.03585.

[2] Z. Liu, S. Zhu, B. Qin, H. Chen und L. Song, „Automatically Detecting and Fixing Concurrency Bugs in Go Software Systems,“ in *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Ser. ASPLOS '21, Virtual, USA: Association for Computing Machinery, 2021, S. 616–629, ISBN: 9781450383172. DOI: 10.1145/3445814.3446756. Adresse: https://doi.org/10.1145/3445814.3446756.

[3] Z. Liu, S. Xia, Y. Liang, L. Song und H. Hu, „Who Goes First? Detecting Go Concurrency Bugs via Message Reordering,“ in *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Ser. ASPLOS '22, Lausanne, Switzerland: Association for Computing Machinery, 2022, S. 888–902, ISBN: 9781450392051. DOI: 10.1145/3503222.3507753. Adresse: https://doi.org/10.1145/3503222.3507753.

[4] S. Taheri und G. Gopalakrishnan, „Automated Dynamic Concurrency Analysis for Go,“ *arXiv e-prints*, arXiv:2105.11064, arXiv:2105.11064, Mai 2021. arXiv: 2105.11064 [cs.DC].

[5] S. Taheri und G. Gopalakrishnan, „GoAT: Automated Concurrency Analysis and Debugging Tool for Go,“ in *2021 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)*, 2021, S. 138–150. DOI: 10.1109/IISWC53511.2021.00023.

[6] The Go Team, *Go Documentation: trace*, https://pkg.go.dev/cmd/trace, 2022.

[7] J. Zhou, S. Silvestro, H. Liu, Y. Cai und T. Liu, „UNDEAD: Detecting and preventing deadlocks in production software,“ in *2017 32nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, Nov. 2017, S. 729–740. DOI: 10.1109/ASE.2017.8115684.

[8] P. Joshi, C.-S. Park, K. Sen und M. Naik, „A Randomized Dynamic Program Analysis Technique for Detecting Real Deadlocks,“ *SIGPLAN Not.*, Jg. 44, Nr. 6, S. 110–120, Juni 2009, ISSN: 0362-1340. Adresse: https://doi.org/10.1145/1543135.1542489.

Sources

[9] C. J. Fidge, „Timestamps in Message-Passing Systems That Preserve the Partial Ordering“, 1988.

[10] The Go Team, *Go*, https://go.dev/, 2022.

[11] R. Agarwal, L. Wang und S. D. Stoller, „Detecting Potential Deadlocks with Static Analysis and Run-Time Monitoring“ in *Hardware and Software, Verification and Testing*, S. Ur, E. Bin und Y. Wolfsthal, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 191–207, ISBN: 978-3-540-32605-2.

[12] T. Yuan, G. Li, J. Lu, C. Liu, L. Li und J. Xue, „GoBench: A Benchmark Suite of Real-World Go Concurrency Bugs“ in *2021 IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO)*, https://github.com/timmyyuan/gobench, 2021, S. 187–199. DOI: 10.1109/CGO51591.2021.9370317.

[13] A. Gerrand, *Share Memory By Communicating*, https://go.dev/blog/codelab-share, 2010.

[14] B. Ray, D. Posnett, V. Filkov und P. Devanbu, „A large scale study of programming languages and code quality in github,“ *Proc. FSE 2014*, S. 155–165, Nov. 2014. DOI: 10.1145/2635868.2635922.