

Lock, Synchronization Orientation

sanghyuck.na@lge.com

1

Race condition

- 두 개 이상 Thread가 한 공유자원을 동시에 접근하고 수정할 있는 상태
 - Thread scheduling algorithm과 그 전략에 따라 미정의순서로 실행될 수 있음
 - 그 최종 결과는 예측될 수 없고, 데이터 무결성도 지켜지지 않음

```
Integer counter = Integer.valueOf(0);

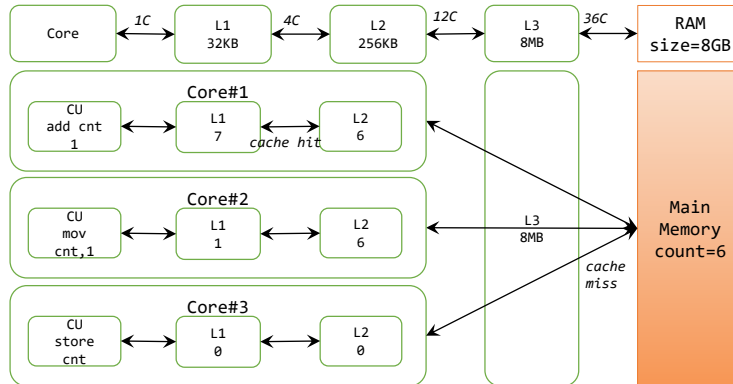
public void run() {
    synchronized(counter) {
        ++counter;
    }

    System.out.println( "p=" + counter );
}
...
p=9552
a=10000
```

2

Modern CPU Model

- "check-and-act"부터 출발
 - 기억장치 간 속도차로 인한 성능지연을 해결하기 위해 CPU와 Storage 사이에 Memory와 Cache L1, L2가 있습니다
 - 현 시점에 그 값이 예상된 값인지 '확인'작업과 그로 인해 발생하는 '동작'은 Multithread환경에서는 필수적입니다



4

JAVA Assembler

- istore_과 iload
 - JAVA Bytecode수준의 Store/Load이지만 JVM실행 시 실제 Register로 바꾸고 기계어 수준으로 Shared Resource의 Consistency와 Integrity를 고려해야 합니다.
- 최적화 배치결과는 실제 코드와 다를수 있습니다
 - Control unit 사용율을 향상시키기 위한 Pipelining 을 위함
 - Fetch > Decode > Execute > write-back

```
main:
.LFB0:
.cfi_startproc
movl b(%rip), %eax
movl $2, b(%rip)
addl $1, %eax
movl %eax, a(%rip)
ret
.cfi_endproc
b:
.zero 4
a:
.zero 4
```

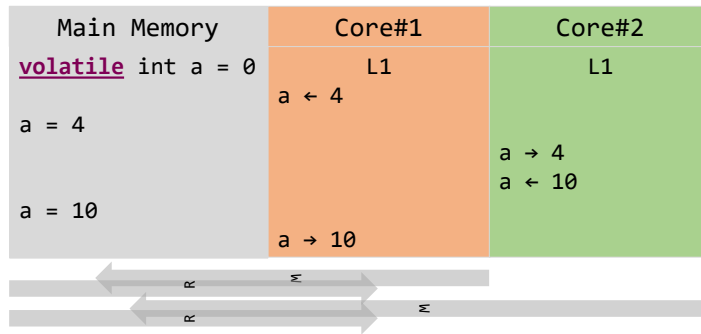
```
Main {
  int a;
  int b;
  void testMain();
  Code:
    0: aload_0
    1: aload_0
    2: getfield      #15 // Field b:I
    5: iconst_1
    6: iadd
    7: putfield      #13 // Field a:I
   10: aload_0
   11: iconst_1
   12: putfield      #15 // Field b:I
   15: return
}
```

```
int a = 0;
int b = 0;
int main(){
  a = b + 1;
  b = 2;
}
```

6

Volatile – Write through

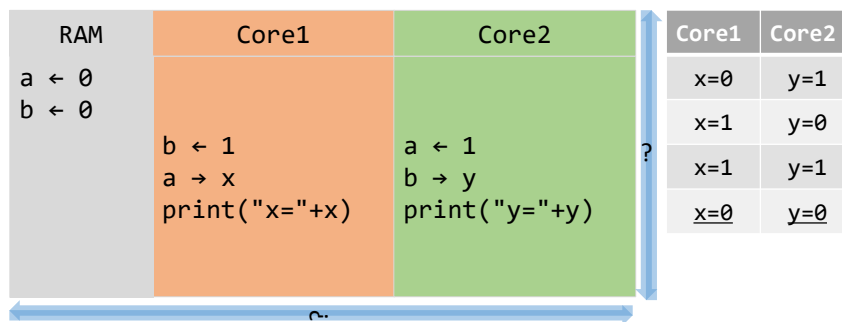
- 한 변수의 데이터를 모든 스레드가 일관되게 바라볼 수 있음
 - Store는 항상 메모리로 바로 작성된다
 - Load는 항상 메모리를 참조한다



7

Opaque(or Relaxed)

- 가장 느슨한 자유로운 모드 `memory_order_relaxed`^{[C++14](#)}
 - 빠른 연산속도를 위한 인스트럭션재배치 모드
 - Store, Load의 명령어 재정렬제약이나 Multithread간 동기화가 없는 자유로운 모드
 - 연산자(s/l)의 원자성만 보장합니다. 아래 왼쪽 코드는 오른쪽결과가 모두 나타날 수 있습니다.
- Opaque mode



8

Data Consistency/Integrity 보장 기법

- Atomic
- Lock, Volatile
- VarHandle: Fine grain instruction 배치를 통한 성능향상 기법
 - Fence in Variable Handle: [JAVA8 JEP 171](#)
 - VarHandle (Memory barrier): in Variable Handle: [JAVA9 JEP 193](#)

9

Atomic type

sanghyuck.na@lge.com

10

Atomic class⁵

- 원자적인 VarHandle⁹ 연산들로 단일 값을 유지하는 class
- Primitive type
 - AtomicBoolean
 - AtomicInteger
 - AtomicIntegerArray
 - AtomicIntegerFieldUpdater: Reflection 기반으로 volatile 동작
 - AtomicLong
 - AtomicLongArray
 - AtomicLongFieldUpdater
- Reference type
 - AtomicMarkableReference: Mark bit를 함께 유지
 - AtomicReference
 - AtomicReferenceArray
 - AtomicReferenceFieldUpdater
 - AtomicStampedReference: "stamp"를 함께 유지

11

Atomic 의미

- 원자적인 Store, Load
- Race condition에서 값의 일관성, 무결성을 유지
 - 데이터 정확성처리
 - 최적의 성능을 위한 내부 동기화, 명령 재정렬같은 세밀한 튜닝 메소드 제공
- Value Wrapper
 - Anonymous instance나 Lambda expression 내부에서 effective final임에도 수정가능

```
AtomicLong()
AtomicLong(long initialValue)
AtomicInteger(int initialValue)
```

```
int pCnt = 0;
AtomicInteger aCnt = new AtomicInteger(0);

IntStream.range(0, 100_000).parallel().forEach(e -> {
    pCnt += 1;
    aCnt.incrementAndGet();
});
```

12

Atomic Integer

- Plus, Minus operators
 - 더 분해 할 수 없는 Read Write으로 실행 성공 또는 실패 상태만 존재
 - 증감, 차감, Sequence number로 주로사용. 단, long 값을 대체할 목적으로 사용 안함

```
int incrementAndGet()
int addAndGet(int delta)
int getAndUpdate(IntUnaryOperator updateFunction)
```

```
AtomicInteger i = new AtomicInteger(0);

i.intValue(); i.floatValue(); i.doubleValue();

i.incrementAndGet(); i.getAndIncrement();
i.decrementAndGet(); i.getAndDecrement();

i.addAndGet(2);
i.getAndAdd(5);

i.getAndUpdate((cur) -> cur + 7);
```

13

Atomic Set

- Memory effect: volatile*
 - 원자적 Reads Writes
 - 모든 스레드는 변수의 값의 현재시점의 최신사항을 동일하게 바라봅니다
- Set호출의 Argument내부에서 표현식 및 추가메소드호출은 피하세요

thread#1	thread#2	
Math.max() ... l.set(20)	l.set(40)	<pre>void set(int newValue) AtomicLong l = new AtomicLong(); l.set(20); l.set(Math.max(l.get(), 30)); // undefined behavior</pre>

15

Atomic Update

- Memory Effects: volatile
 - Atomic read를 보장하기 위해서 항상 main memory에서 읽어와야 함.
 - CPU architecture가 Cache level이 높을 수록, Multithread 개수가 증가할 수록 비용은 커짐

```
long getAndUpdate8(LongUnaryOperator updateFunction)
long updateAndGet8(LongUnaryOperator updateFunction)
long accumulateAndGet8(long x, LongBinaryOperator accumulatorFunction)
long getAndAccumulate8(long x, LongBinaryOperator accumulatorFunction)
```

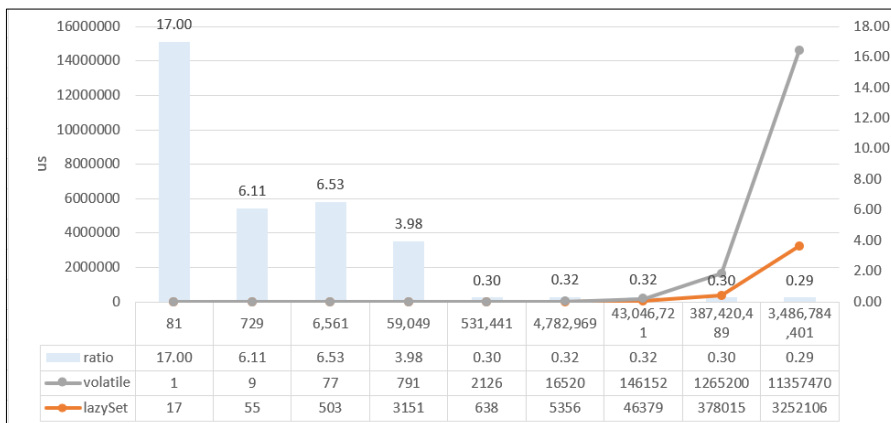
```
AtomicLong l = new AtomicLong(50);
long now = l.updateAndGet((x) -> Math.max(x, 20));

LongBinaryOperator longb = (x, new_) -> Math.max(x, new_);
long new_ = l.accumulateAndGet(20, longb);
long old_ = l.getAndAccumulate(20, longb);
```

16

Performance volatile vs lazySet

- 초기 volatile은 lazySet보다 17배 빠른 성능을 보임¹
- Read and writes는 증가할 수록 약 3배 더 나은 성능이 나타남



17

Atomic CAS

14:45에 시작하겠습니다

- Compare And Set^{JSR133}
 - 현재값이 기대값이 동일한 경우만 새로운값 작성(Atomic Update)
 - 메모리경합 발생 시 경쟁하지 않고 실패하는 Weak메소드 제공

```
boolean compareAndSet5(int expect, int update)

boolean weakCompareAndSetPlain9(int e, int newValue)
boolean weakCompareAndSetVolatile9(int e, int newValue)
boolean weakCompareAndSetRelease9(int e, int newValue)
boolean weakCompareAndSetAcquire9(int e, int newValue)
```

CAS Operations	Memory Effects
compareAndSet	Volatile
weakCompareAndSetPlain	Plain
weakCompareAndSetVolatile	Volatile
weakCompareAndSetRelease Acquire	Release-Acquire

18

Atomic CAS

```
var v = new AtomicLong(0);
IntConsumer action = () -> {
    boolean status = false;
    do {
        long now = v.get();
        long new_ = now + 1;
        status = v.compareAndSet(now, expected);
        status = v.weakCompareAndSetPlain(now, new_);
        if (!status) {
            System.out.println(
                "failed " + Thread.currentThread());
        }
    } while (!status);
};

IntStream.range(0, 100).parallel().unordered()
    .forEach(action);
```

19

Memory Effects

- Reordering
 - Thread1 [1] 과 [2]는 절차적 순서로 실행됩니다. 다만 최적화 옵션과 Architecture에 따라 코드순서는 바뀔 수 있으며 그 실행결과는 실행시점에 따라 다를 수 있습니다.
- Memory Barrier^{[link](#)}
 - Shared resource인 mIsReady로 [1] 과 [3]의 코드순서는 동기화 됩니다. 하지만, Memory Barrier에 따라 동기화 시점을 기준으로 상하코드의 순서는 바뀔 수 있으며 그 실행결과는 실행시점에 따라 다를 수 있습니다.

```
int mInt = 0;
boolean mIsReady = false;

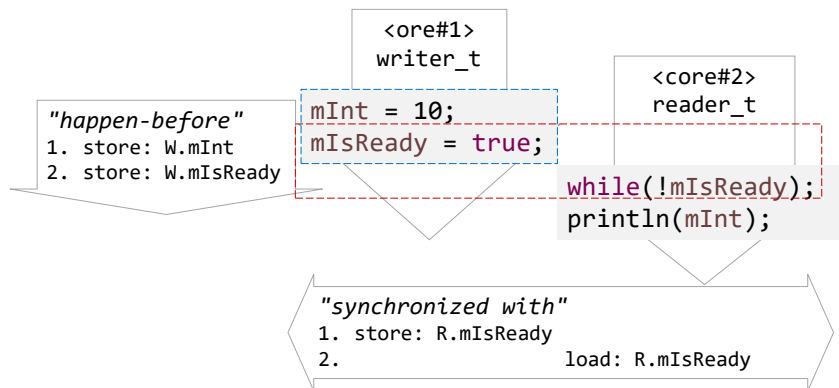
// Thread1
void reader_t() {
    while(!mIsReady); [1]
    System.out.println(mInt);[2]
}
```

```
//Thread2
void writer_t() {
    mInt = 10;
    mIsReady = true; [3]
}
```

20

Memory Effects

- Reordering: Happen-before
 - 한 스레드내 Store, Load의 결정된 순서
- Memory Barrier: Synchronized-with
 - 한 스레드 내 Store, Load는 다른 스레드 Store, Load의 의존해서 순서가 결정



21

Memory Effects^{kernel}

- Atomic: One cycle로 처리되는 연산으로 분할 될 수 없는 연산
- Volatile: 변수를 접근하는 순간 모든 스레드가 바라보는 값은 동일함

Atomic{E}	Atomic	Happen-Before	Synchronized-with	C++14
set(E) E get()	X			volatile
setPlain(E) ⁹ E getPlain() ⁹	△ Reference, 32bit 이하 원시 자료형 값만	X	X	
void setOpaque(E n) ⁹ E getOpaque() ⁹	△ Same variable	X	X	memory_order_relaxed
void setRelease(E n) ⁹	0	0	△ After	memory_order_release
E getAcquire() ⁹	0	0	△ Before	memory_order_acquire

22

Opaque⁹

- 비트단위로 원자적 연산
- 동일한 변수에 대한 접근은 되도록 밀착되어 연산자 정렬배치

```

var executor = Executors.newFixedThreadPool(2);
var a = new AtomicBoolean(false);
var b = new AtomicBoolean(false);
try {
    var lst = executor.<Boolean>invokeAll(List.of(() -> {
        b.setOpaque(true);
        Boolean x = a.getOpaque();
        return x;
    }, () -> {
        a.setOpaque(true);
        Boolean y = b.getOpaque();
        return y;
    }));
    executor.shutdown();
    executor.awaitTermination(51, TimeUnit.SECONDS);
    System.out.println(lst.get(0).get()
        + ", " + lst.get(1).get());
} catch (Exception e) { e.printStackTrace();}

```

E getOpaque()
void setOpaque(E n)

	Core1x	Core2y
	false	true
	true	false
	true	true
	false	false

23

Release-Acquire⁹

- setRelease를 기준으로 이전 명령들은 해당명령 이후영역으로 배치 차단
- getAcquire를 기준으로 이후 명령들은 해당명령 이전영역으로 배치 차단

```
var executor = Executors.newFixedThreadPool(2);
var a = new AtomicBoolean(false);
var b = new AtomicBoolean(false);
try {
    var lst = executor.<Boolean>invokeAll(List.of(() -> {
        b.setRelease(true);
        Boolean x = a.getAcquire();
        return x;
    }, () -> {
        a.setRelease(true);
        Boolean y = b.getAcquire();
        return y;
    }));
    executor.shutdown();
    executor.awaitTermination(51, TimeUnit.SECONDS);
    System.out.println(lst.get(0).get()
        + ", " + lst.get(1).get());
} catch (Exception e) { e.printStackTrace();}
```

```
void setRelease(E n)
E getAcquire()
```

Core1x	Core2y
false	true
true	false
true	true

24

Atomic LazySet⁶

- Memory effects "setRelease"[JDK-6275329](#)
 - happens-before, synchronized-with, Atomicity 를 보장
- 주로 Fine tuning code로 사용
 - Non-blocking구조체에서 GC 될 수 있도록 nulling out code에서 사용해서 주요 코드실행 성능에 최대한 영향을 주지 않기 위함

```
void lazySet(E newValue)
```

```
var i = new AtomicInteger(1);
i.lazySet(50);
var normal = i.getAcquire();
```

25

LongAdder⁸

- 닷셈전용 다중스레드 환경기반 Atomic class
 - 정밀 동기화 제어는 불가하고 내부적으로 기본제어를 제공

```
var adder = new LongAdder();

adder.increment(); adder.decrement();

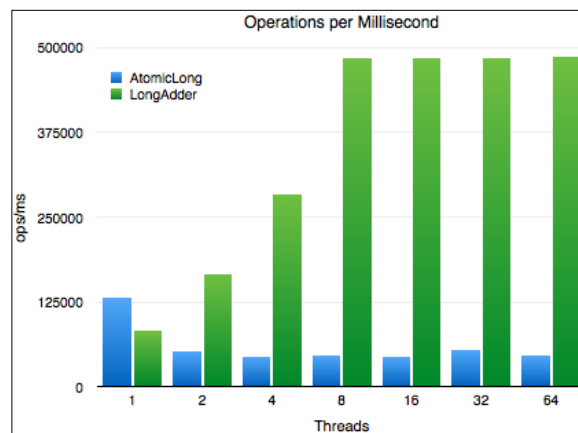
adder.intValue(); adder.longValue();
adder.floatValue(); adder.doubleValue();

adder.add(5);
adder.reset();

adder.sum();
adder.sumThenReset();
```

26

LongAdder



27

LongAccumulator⁸

- Customized 함수가 추가가능한 다중스레드 환경기반 Atomic class
 - AtomicLong과 비교해서 높은 update contention이 있는 환경에서 메모리 공간을 더 소비함으로써 높은 성능으로 동작

```
LongAccumulator(LongBinaryOperator accFunc, long identity)
```

```
var a = new LongAccumulator(Long::sum, 0);
a.get()
a.intValue(); a.longValue();
a.floatValue(); a.doubleValue();

a.accumulate(45);
a.getThenReset();
a.reset();
```

28

정리

- Atomic
- LongAdder
- LongAccumulator

29

15:45에 시작하겠습니다

Stamped Lock

sanghyuck.na@lge.com

+Phaser

```
synchronized (this) {
}

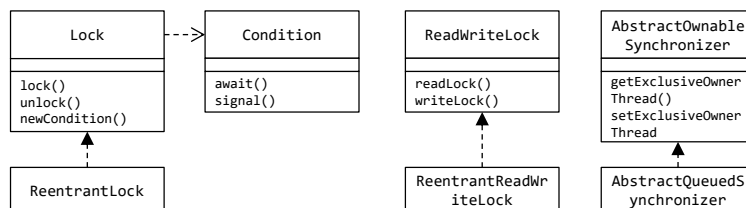
Object obj = new Object();
synchronized (obj) {
}
```

```
private void shutdown(ExecutorService executor) {try
{executor.shutdown(); executor.awaitTermination(60,
TimeUnit.SECONDS); } catch (InterruptedException e)
{ e.printStackTrace(); } finally { if
(!executor.isTerminated()) { System.err.println("killing non-
finished tasks"); } executor.shutdownNow(); } } public void
sleep(long t) { try { Thread.sleep(t); } catch
(InterruptedException e) { e.printStackTrace(); } }
```

30

JAVA Lock

- 잠그는 클래스와 인터페이스 모음
 - 다중스레드가 공유하는 자원에 대한 접근(Read,write)을 제어하는 도구
- Interface Lock⁵ [ReentrantLock](#)
 - 기본 Lock 인터페이스로 TASK재정렬 알고리즘이 포함되어 nonblock코드에서 사용
- Interface ReadWriteLock⁵ [ReentrantReadWriteLock](#)
 - Reader간 공유되는 read lock, Writer는 독자적인 점유하는 write lock 제공
- Interface Condition⁵
 - Object class의 모니터메소드(wait, notify, notifyAll)를 객체로 분리한 것으로 객체 당 다중Wait-set을 구현할 경우 사용
- AbstractQueuedSynchronizer⁵
 - 대기큐(FIFO) 방식으로 동작하는 코드의 Lock과 Release 구현에 Code 제공



31

Stamped Lock⁸

- Read, Write제어를 하기 위한 3가지 모드를 timestamp로 제어하는 Lock
 - 상태는 버전과 모드로 구성됩니다. Lock을 성공하면 timestamp를 반환합니다. 만약 try lock으로 시도하여 실패한다면 0값을 반환해서 '실패'를 나타낼 수 있습니다.
 - writeLock, readLock, tryOptimisticRead 3가지 모드, 성공적인 lock 획득은 non-zero반환
- Optimistic readLock
 - Write lock에 의해 언제라도 무효화 될 수 있는 Weak read lock
 - Readlock 가능여부를 확인을 위한 방법으로, validate()를 사용하여 lock유효성검증
 - contention에서 최대한 피해서 처리율 개선

```
long readLock(), void unlockRead(long stamp)
long writeLock(), void unlockWrite(long stamp)
long tryConvertToReadLock(long stamp)
long tryConvertToWriteLock(long stamp)

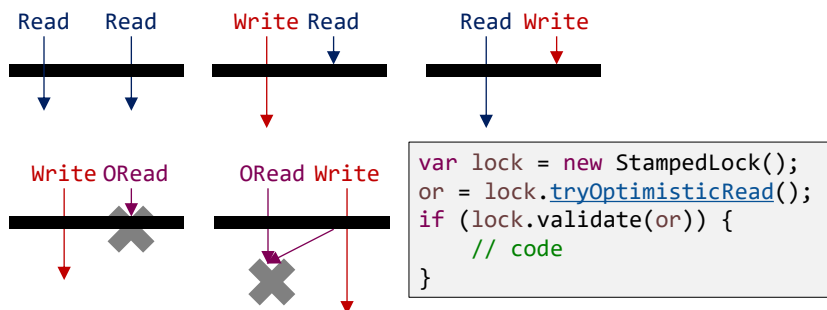
long tryOptimisticRead()
long tryConvertToOptimisticRead(long stamp)

boolean validate(long stamp)
```

32

Stamped Lock⁸

- Memory Synchronization
 - 가장 최근 write mode unlock의 전방코드는 그 뒤에 따라오는 OptimisticRead 획득부
분에서 validate()가 true를 리턴 한 경우 그 코드가 실행 됐고 메모리 동기화도 완료
된 것이 보장됩니다. JAVA는 lock과 unlock시점에 메모리 동기화됨
- validate() false
 - tryOptimisticRead()와 validate()사이에 동일한 snapshot이 아닌 것으로 메모리동기화
가 되지 않을 수 있기 때문에 항상 정확한 읽기는 readlock획득후직업



33

Stamped Lock⁸

- 실제 데이터read접근은 readlock 획득한 다음 접근

```
ExecutorService executor = Executors.newFixedThreadPool(2);
StampedLock lock = new StampedLock();

executor.submit(() -> {
    long stamp = 0L;

    stamp = lock.tryOptimisticRead();

    if (lock.validate(stamp)) {
        stamp = lock.readLock();
        // data access
        unlockRead(stamp);
    }
});
```

34

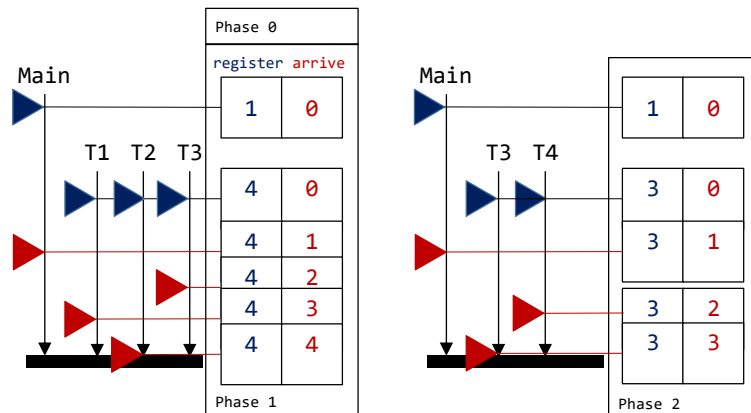
Synchronizer

- Semaphore⁵
 - acquire(), release()로 허용개수 permits 까지만 접근 허용
- CountdownLatch⁵
 - countdown()으로 주어진 count를 0으로 차감하여 await()로 대기중인 스레드 해제
- CyclicBarrier⁵
 - 주어진 조건(barrier)을 만족할 때까지 모든스레드를 대기시키고, 해제하는 기법
- Exchanger⁵
 - 두 스레드가 주어진 지점(exchange())에서 객체교환하는 기법
- Phaser⁷
 - 스레드의 등록갯수(register())와 도착갯수(arrive())가 일치 할 때 까지 대기하고, 개수가 일치하는 순간 그 모두 실행이 된다.
 - 내부적으로 동기화진입 단계 (phase) 유지. 0부터 시작

39

Phaser⁷

- register
 - 동기화 하려는 스레드 개수를 +1 증가시킴. bulkRegister(int)로는 2이상 한번에 등록
- arriveAndAwaitAdvance(= CyclicBarrier.await())
 - 모든 스레드의 도착을 대기하는 지점으로, 대기가 풀리면 phase는 1증가



40

Phaser⁷

16:42에 시작하겠습니다

- parties
 - 생성자의 parties개수는 초기 register 개수
- register
 - 대기스레드에서 호출하여 등록개수 증가
- arrive
 - Non-block메소드로 arriv개수만 증가시키고 바로 다음코드를 실행 합니다.
 - 다른 모든 스레드와 동기화를 위해서는 arriveAndAwaitAdvance()를 호출합니다.
 - 호출 후 register와 arrive개수 리셋은 각 스레드에서 arriveAndDeregister()호출

```

Phaser(int parties)
int register()

void arrive()
void arriveAndAwaitAdvance()
void arriveAndDeregister()

protected boolean onAdvance(int phase, int registeredParties)

```

41

Phaser⁷

```

ExecutorService exe = Executors.newCachedThreadPool();
Phaser ph = new Phaser(1) {
    protected boolean onAdvance(int phase, int parties) {
        System.out.println("phase="
            + phase + ", parties=" + parties);
        return false;
    }
};
assertEquals(0, ph.getPhase());

// when
exe.submit(new LongRunningAction("thread-1", ph));
exe.submit(new LongRunningAction("thread-2", ph));
exe.submit(new LongRunningAction("thread-3", ph));

```

42

Phaser⁷

```

// then
ph.arriveAndAwaitAdvance();
assertEquals(1, ph.getPhase());

// and
exe.submit(new LongRunningAction("thread-4", ph));
exe.submit(new LongRunningAction("thread-5", ph));

ph.arriveAndAwaitAdvance();

assertEquals(2, ph.getPhase());

ph.arriveAndDeregister();

```

43

Phaser⁷

```
class LongRunningAction implements Runnable {
    private String name;
    private Phaser ph;

    LongRunningAction(String threadName, Phaser ph) {
        this.name = threadName;
        this.ph = ph;
    }

    @Override
    public void run() {
        System.out.println("This is phase " + ph.getPhase());
        System.out.println("Thread " + name +
            " before long running action");
        ph.arriveAndAwaitAdvance();
        try {
            Thread.sleep(20);
        } catch (InterruptedException e) {
            e.printStackTrace();
        }
        ph.arriveAndDeregister();
    }
}
```

44

도전하세요!

- Phaser⁷ 실습코드에서 register() 대신 bulkRegister()를 사용하도록 코드를 바꾸세요

45

정리

- StampedLock
- Phaser