v 1.0-20211115

PROGRAMMAZIONE MULTITHREAD IN JAVA - SECONDA PARTE -

Alessandro Ricci
a.ricci@unibo.it

SOMMARIO DEL MODULO

- Interazione e coordinazione fra thread
  - intro | richiami da sistemi operativi
  - supporto di base in Java
    - meccanismo/attributo synchronized
      - applicazione
        - » sezioni critiche e mutua esclusione
        - » classi thread-safe
    - metodi wait/notify/notifyAll
      - applicazione
        - » sincronizzazione e coordinazione
  - supporti forniti a livello di libreria (cenni)
    - collezioni concorrenti e synchronizers
- Oltre la programmazione multithread (cenni)
  - verso la Magistrale…

INTERAZIONE E COORDINAZIONE FRA THREAD IN JAVA

INTERAZIONE E COMUNICAZIONE

- Nel precedente modulo: introduzione alla programmazione concorrente in Java
  - in particolare: programmazione multithread
  - metodologia task-oriented
- Qualsiasi programma (sistema) non banale => più thread che devono interagire/comunicare/cooperare per fornire le funzionalità dell'applicazione nel suo complesso
  - interazione e coordinazione come aspetti fondamentali nella progettazione di un sistema
- Quali modelli?

RICHIAMI DA S.O.: MODELLI DI INTERAZIONE

- Due modelli di riferimento
  - **a memoria comune**
    - c'è condivisione di memoria per i flussi di controllo nel sistema
    - comunicazione e interazione basata su accesso regolato a memoria condivisa e meccanismi di sincronizzazione
    - modello di riferimento per la programmazione multithread
  - **a memoria locale**
    - non c'è condivisione di memoria
    - comunicazione basata su *scambio di messaggi*
      - è il modello di processi senza shared memory, che comunicano unicamente via segnali o scambio di messaggi
    - modello di riferimento per i sistemi distribuiti / di rete

TIPI DI INTERAZIONE NEL MODELLO A MEMORIA COMUNE

- **Cooperazione**
  - interazioni volute e necessarie per realizzare il corretto funzionamento dell'insieme dei processi (o thread) interagenti
    - **comunicazione**
      - scambio di informazioni
    - **sincronizzazione**
      - meccanismi per forzare un ordine temporale fra le azioni dei processi
- **Competizione**
  - interazioni non volute ma necessarie per realizzare il corretto funzionamento dell'insieme dei processi (o thread)
    - **mutua esclusione**
      - accesso mutuamente esclusivo a risorse
    - **sezioni critiche**
      - esecuzione mutuamente esclusiva di blocchi di azioni da parte dei processi
- **Interferenze**
  - interazioni non volute e non necessarie ai fini del corretto funzionamento del sistema, anzi tipicamente dannose
    - corse critiche

IN PARTICOLARE: *SINCRONIZZAZIONE*

- Meccanismi e tecniche per realizzare **un ordine temporale** fra le azioni dei processi
  - ad esempio
    - fare in modo che l'azione o attività di un processo possa essere eseguita solo dopo che l'azione o attività di un altro processo si sia conclusa
  - la comunicazione può essere usata come meccanismo per avere sincronizzazione
- Forme di sincronizzazione
  - diretta o esplicita
    - sincronizzazione in caso di cooperazione
  - indiretta o implicita
    - sincronizzazione in caso di competizione

MUTUA ESCLUSIONE E SINCRONIZZAZIONE IN JAVA: MECCANISMI DI BASE

- Mutua esclusione *(sincronizzazione implicita)*
  - blocchi e metodi synchronized
  - realizzare classi thread-safe
- *Sincronizzazione esplicita* e coordinazione
  - primitive wait, notify, notifyAll

JAVA MEMORY MODEL

- Il modello di memoria adottato in Java fornisce un insieme molto ristretto di garanzie in merito alla semantica dell'accesso concorrente in lettura/scrittura o solo in scrittura a variabili (e.g. campi di un oggetto) condivise
  - l'accesso puramente in lettura non crea ovviamente problemi
- In particolare:
  - accesso a campi di tipo boolean, char, int e a campi che contengono il riferimento ad un oggetto è garantito essere atomico
  - accesso a campi di tipo long, double non è garantito essere atomico
- Nel prosieguo di questo modulo si considerano tuttavia idiomi e pattern che evitano il più possibile l'accesso concorrente R/W ai medesimi campi

METODI/BLOCCHI synchronized

- Dichiarando un metodo synchronized si vincola l'esecuzione del metodo ad un solo thread per volta.
- I thread che ne richiedono l'esecuzione mentre già uno sta eseguendo vengono automaticamente sospesi dalla JVM
  - in attesa che il thread in esecuzione esca dal metodo
- Dichiarando più metodi synchronized il vincolo viene esteso a tutti i metodi in questione
  - se un thread sta eseguendo un metodo synchronized, ogni thread che richiede l'esecuzione di un qualsiasi altro metodo synchronized viene sospeso e messo in attesa.
  - i metodi synchronized sono dunque mutuamente esclusivi
- Tale vincolo non vale nei confronti dei metodi non synchronized
  - il fatto che un thread sta eseguendo un metodo synchronized, non vieta ad altri thread di eseguire concorrentemente eventuali metodi non synchronized dell'oggetto stesso

PRIMO ESEMPIO

```
public class ResourceUser extends Thread {
  private Resource res;

  public ResourceUser(String name, Resource res) {
    super(name);
    this.res = res;
  }

  public void run() {
    log("before invoking op");
    res.op();
    log("after invoking op");
  }

  private void log(String msg) {
    System.out.println("[" + Thread.currentThread() + "] " + msg);
  }
}
```

```
public class Resource {
 public synchronized void op() {
    System.out.println("[Resource] Thread " + Thread.currentThread() + " entered.");
    try {
      Thread.sleep(5000);
    } catch (Exception ex) {}
    System.out.println("[Resource] - Thread " + Thread.currentThread() + " exited.");
  }
}
```

TEST

- Nel test creiamo due thread (di classe ResourceUser) accedono concorrentemente ad un oggetto condiviso di classe Resource, invocando il metodo synchonized op

```
package oop.concur;

public class TestResourceUsers {
  public static void main(String[] args) {
    Resource res = new Resource();
    ResourceUser userA = new ResourceUser("pippo", res);
    ResourceUser userB = new ResourceUser("pluto", res);
    userA.start();
    try {
      Thread.sleep(500);
    } catch (Exception ex) {
    }
    userB.start();
  }
}
```

```
[Thread[pippo,5,main]] before invoking op
[Resource] Thread Thread[pippo,5,main] entered.
[Thread[pluto,5,main]] before invoking op
[Resource] - Thread Thread[pippo,5,main] exited.
[Thread[pippo,5,main]] after invoking op
[Resource] Thread Thread[pluto,5,main] entered.
[Resource] - Thread Thread[pluto,5,main] exited.
[Thread[pluto,5,main]] after invoking op
```

- Eseguendo il test è possibile verificare come che userB riesce ad entrare nel metodo op solo quando userA è uscito

CLASSI NON THREAD SAFE

- L'accesso concorrente ad oggetti passivi da parte di più thread può essere causa di **corse critiche** e quindi malfunzionamenti del programma
  - una classe potrebbe avere un comportamento corretto se usata in contesti sequenziali, mentre dare origine a problemi se usata in contesti MULTITHREAD
    - classe **non thread safe**
- Esempio semplice nel materiale: contatore condiviso
  - classico contatore, usato concorrentemente da 2 thread (CounterUser) che lo incrementano N volte ciascuno
  - nel caso in cui il contatore non sia thread-safe (UnsafeCounter), al termine della computazione da parte dei due thread il contatore può non avere il valore corretto che ci si aspetta (ovvero 2N)
    - non-determinismo

ESEMPIO DEL CONTATORE

```
package oop.concur;

public class CounterUser extends Thread {
     private long ntimes;
     private Counter counter;

     public CounterUser(Strina name, Counter c, long n) {
          super(name);
          ntimes = n;
          counter = c;
     }

     public void run() {
          log("starting - counter value is " + counter.getValue());
          for (long i = 0; i < ntimes; i++) {
               counter.inc();
          }
          log("completed - counter value is " + counter.getValue());
     }

     private void log(String msg) {
          System.out.println("[COUNTER USER " + getName() + "] " + msg);
     }
}
```

ESEMPIO DEL CONTATORE

- Lancio di due thread (istanze della classe CounterUser)

```
package oop.concur;
public class TestConcurrentCounter {
     public static void main(String[] args) throws Exception {
          Counter c = new UnsafeCounter();
          long ntimes = Long.parseLong(args[0]);
          CounterUser agentA = new CounterUser(c, ntimes);
          CounterUser agentB = new CounterUser(c, ntimes);
          agentA.start();
          agentB.start();
          agentA.join();
          agentB.join();
          System.out.println("Count value: " + c.getValue());
     }
}
```

A causa di corse critiche, il valore finale può non essere corretto (non determinismo) - più è grande il valore, più è probabile non sia corretto

```
% java -cp bin oop.concur.MainConcurrentUnsafeCounter 10000
[COUNTER USER agent-B] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-A] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-B] completed - counter value is 10270
[COUNTER USER agent-A] completed - counter value is 11513
Count value: 11513
```

SOLUZIONE: CLASSI THREAD SAFE

- Una classe si dice ***thread-safe*** quando mantiene il proprio comportamento corretto anche se usata in un contesto multithread
- Per rendere thread-safe una classe ed evitare le corse critiche appena viste, è sufficiente fare in modo che l'accesso all'oggetto (mediante l'esecuzione di un qualsiasi metodo pubblico) avvenga in modo *mutuamente esclusivo*
- Un modo semplice per farlo in Java: **dichiarare tutti i metodi pubblici synchronized**

```
package oop.concur;

public class SafeCounter {
  private int cont;

  public Counter (){ cont = 0; }

  public synchronized void inc(){
    cont++;
  }

  public synchronized void dec(){
    cont--;
  }

  public synchronized int getValue(){
    return cont;
  }
}
```

ESEMPIO DEL CONTATORE THREAD-SAFE

- Lancio di due thread (istanze della classe CounterUser)

```
package oop.concur;

public class TestConcurrentCounter {
     public static void main(String[] args) throws Exception {
          Counter c = new SafeCounter();
          long ntimes = Long.parseLong(args[0]);
          CounterUser agentA = new CounterUser(c, ntimes);
          CounterUser agentB = new CounterUser(c, ntimes);
          agentA.start();
          agentB.start();
          agentA.join();
          agentB.join();
          System.out.println("Count value: " + c.getValue());
     }
}
```

In questo caso il valore finale è sempre pari a 2N.

```
% java -cp bin oop.concur.MainConcurrentSafeCounter 100000000
[COUNTER USER agent-B] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-A] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-B] completed - counter value is 199362753
[COUNTER USER agent-A] completed - counter value is 200000000
Count value: 200000000
```

COSTO DELLA THREAD-SAFETY

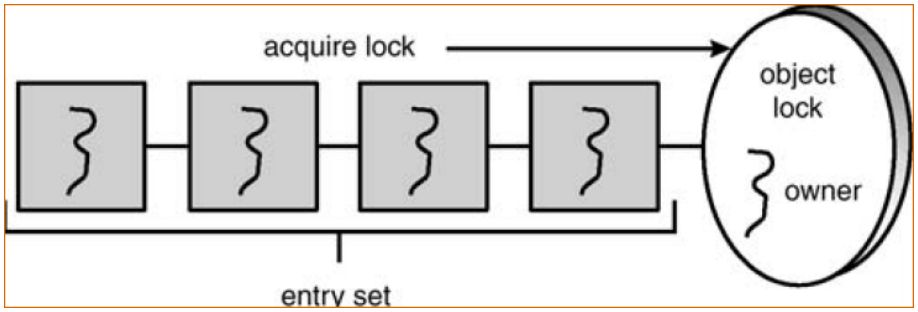
```
% java -cp bin oop.concur.TestConcurrentUnsafeCounterWithTime 100000000
[COUNTER USER agent-B] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-A] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-B] completed - counter value is 100011617
[COUNTER USER agent-A] completed - counter value is 100011617
Count value: 100011617
Time elapsed: 61ms.

% java -cp bin oop.concur.TestConcurrentSafeCounterWithTime 100000000
[COUNTER USER agent-B] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-A] starting - counter value is 0
[COUNTER USER agent-A] completed - counter value is 199783206
[COUNTER USER agent-B] completed - counter value is 200000000
Count value: 200000000
Time elapsed: 4798ms.
```

- E’ in generale il costo relativo alla serializzazione/ sequenzializzazione ottenuta dal meccanismo synchronized

METODI SYNCHRONIZED: FUNZIONAMENTO

- A livello di implementazione il meccanismo di coordinazione synchronized è realizzato mediante un lock associato nativamente ad ogni oggetto.
  - l'esecuzione di un metodo synchronized comporta prima l'acquisizione del lock:
    - se il lock è già posseduto da un altro thread, il richiedente è bloccato / sospeso e inserito nella lista dei thread in attesa, chiamata entry set del lock.
    - se il lock è disponibile invece, il thread diviene proprietario del lock dell'oggetto ed esegue il metodo.
  - quando il proprietario rilascia il lock - o perché ha terminato l'esecuzione del metodo o perché deve esser sospeso, in seguito all'esecuzione di una wait - se l'entry set non è vuota, viene rimosso uno thread e ad esso viene assegnato il lock, ripristinandone l'esecuzione.
- La JVM non specifica alcuna politica di gestione dell'entry set
  - tipicamente viene utilizzata una politica FIFO



BLOCCHI synchronized

- Il meccanismo synchronized può essere utilizzato anche a livello di blocchi di codice, con una granularità quindi più fine rispetto al caso dei metodi

```
AnyClass myLockObject;
...
synchronized (myLockObject){
  <statements>
}
```

- Semantica del costrutto
  - prima di eseguire le istruzioni specificate all'interno dello blocco (statements), viene acquisito il lock sull'oggetto specificato
  - nel caso in cui il lock sia già stato acquisito, il thread corrente viene sospeso nell'entry set dell'oggetto specificato (myLockObject)
  - al termine dell'esecuzione delle istruzioni, in uscita dal blocco synchronized, viene automaticamente rilasciato il lock

SEZIONI CRITICHE CON BLOCCHI SYNCHRONIZED: ESEMPIO

- Nell'esempio, due thread utilizzano un blocco synchronized su un oggetto condiviso per realizzare due sezione critiche

```
class MyWorkerA extends Thread {
  private Object lock;
  public MyWorkerA(Object lock){
    this.lock = lock;
  }
  public void run(){
    while (true){
      System.out.println("a1");
      synchronized(lock){
        System.out.println("a2");
        System.out.println("a3");
      }
    }
  }
}
```

```
class MyWorkerB extends Thread {
  private Object lock;
  public MyWorkerB(Object lock){
    this.lock = lock;
  }
  public void run(){
    while (true){
      synchronized(lock){
        System.out.println("b1");
        System.out.println("b2");
      }
      System.out.println("b3");
    }
  }
}
```

```
public class TestCS {
  public static void main(String[] args) {
    Object lock = new Object();
    new MyWorkerA(lock).start();
    new MyWorkerB(lock).start();
  }
}
```

SINCRONIZZAZIONE ESPLICITA: wait, notify, notifyAll

- *wait, notify, notifyAll*
  - metodi pubblici definiti nella root class java.lang.Object
    - quindi ereditati da qualsiasi nuova classe che scriviamo
- Semantica
  - **wait**
    - l'invocazione della wait provoca la sospensione del thread corrente (con rilascio del lock sull'oggetto), fino a quando un altro thread non esegua una notify o notifyAll sul medesimo oggetto
    - i thread sospesi vengono incluso in un insieme chiamato wait set
  - **notify**
    - provoca il risveglio di uno degli eventuali thread sospesi sul medesimo oggetto con la wait
  - **notifyAll**
    - provoca il risveglio di tutti i thread sospesi con la wait
- **NOTA IMPORTANTE: Per poter chiamare uno qualsiasi di questi metodi è necessario avere prima ottenuto il lock sull'oggetto**
  - tipicamente vengono chiamati all'interno di metodi synchronized

BUONA PRATICA DI UTILIZZO: "MONITOR" PATTERN

- **Monitor pattern**
  - una classe con tutti i metodi pubblici synchronize
    - quindi esecuzione metodi mutuamente esclusiva
  - uso di wait/notify/notifyAll all'interno dei metodi synchronized
    - per sincronizzare i diversi flussi di controllo/thread che hanno chiamato i metodi diversi

UN SEMPLICE “SINCRONIZZATORE”

- Esempio di semplice “sincronizzatore”
  - per sincronizzare azioni di thread distinti
  - costruito come monitor

```
public class SimpleSynchronizer {

    private boolean signalArrived;

    public SimpleSynchronizer() {
        signalArrived = false;
    }

    public synchronized void waitForSignal() throws InterruptedException {
        while (!signalArrived) {
            wait();
        }
        signalArrived = false;
    }

    public synchronized void signal() {
        signalArrived = true;
        notifyAll();
    }
}
```

PRIMO ESEMPIO: SYNCH FRA AZIONI

- TestSynchUsers
  - thread SynchUserA e SynchUserB sincronizzati
    - azione b2 di SynchUserB deve avvenire dopo azione a2 di SynchUserA

```
public class SynchUserA extends Thread {
  private SimpleSynchronizer sync;

  public SynchUserA(SimpleSynchronizer sync) {
    this.sync = sync;
  }

  public void run() {
    a1();
    a2();
    sync.signal();
    a3();
  }
  …
}
```

```
public class SynchUserB extends Thread {
  private SimpleSynchronizer sync;

  public SynchUserB(SimpleSynchronizer sync) {
    this.sync = sync;
  }

  public void run() {
    b1();
    try {
     sync.waitForSignal();
    } catch(Exception ex){}
    b2();
    b3();
  }
  …
}
```

SECONDO ESEMPIO: PING PONG

- TestPingPong
  - due thread (Pinger e Ponger) usano due synch per alternarsi nelle azioni (di ping e pong)

```
public class Pinger extends Thread {
  private SimpleSynchronizer mySync, otherSync;

  public Pinger(SimpleSynchronizer mySync,
                SimpleSynchronizer otherSync) {
     this.mySync = mySync;
     this.otherSync = otherSync;
   }

   public void run() {
     try {
       while (true) {
         mySync.waitForSignal();
         log("ping");
         otherSync.signal();
       }
     } catch (Exception ex) {}
   }
   …
}
```

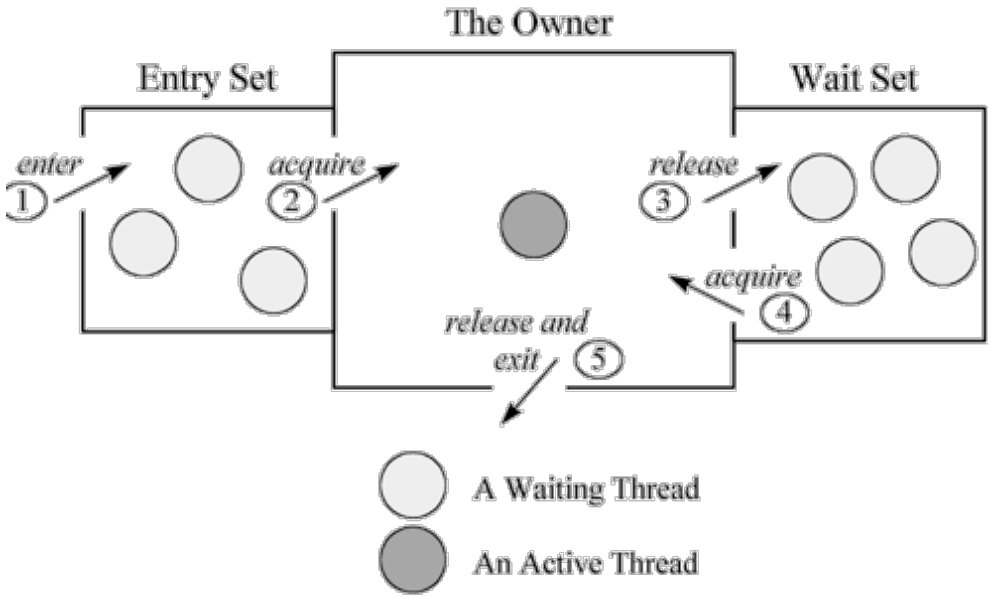
```
public class Ponger extends Thread {
  private SimpleSynchronizer mySync, otherSync;

  public Ponger(SimpleSynchronizer mySync,
                SimpleSynchronizer otherSync) {
     this.mySync = mySync;
     this.otherSync = otherSync;
   }

   public void run() {
     try {
       while (true) {
         mySync.waitForSignal();
         log("pong");
         otherSync.signal();
       }
     } catch (Exception ex) {}
   }
   …
}
```

FUNZIONAMENTO WAIT/NOTIFY: ENTRY SET E WAIT SET

- Step
  - invocazione metodo synchronized
  - si ottiene il lock
  - esecuzione di una wait, con rilascio del lock
  - notifica da parte del thread attivo e ottenimento del lock
  - uscita dal metodo synchronized



LIBRERIA CONCURRENT (CENNI)

LIBRERIA java.util.concurrent

- La libreria java.util.concurrent include un ricco insieme di costrutti di alto livello per semplificare lo sviluppo di applicazioni concorrenti, tra cui:
  - **Concurrent Collections**
    - implementazione efficiente e thread-safe di strutture dati come liste, mappe, code, stack da utilizzare in contesti concorrenti
  - **Synchronizers**
    - implementazione di meccanismi e costrutti classici per la coordinazione di thread (semaphores, latches, barriers,....)

CONCURRENT COLLECTIONS

- Implementazione delle collections di Java appositamente pensata per essere efficace nel caso di accessi concorrenti da più thread
  - thread-safe
  - ottimizzata in modo da minimizzare le parti sequenziali
- Fra le classi principali:
  - **ConcurrentHashMap**
    - versione concorrente delle hash map
  - **Queue and BlockingQueue**
    - interfacce che rappresentano code, con diverse implementazioni
    - alcune sono utili per implementare direttamente dei bounded-buffer
  - **CopyOnWriteArrayList**
    - versione concorrente di ArrayList

SYNCHRONIZERS

- Nel terminologia adottata dalla libreria, un synchronizer è un qualsiasi oggetto passivo che serve per coordinare il flusso di controllo dei thread che vi interagiscono
- Sono i componenti di base che incapsulano funzionalità di coordinazione classiche, utili in tutte le applicazioni
- Tipi principali inclusi nella libreria:
  - **Locks**
  - **Semaphores**
  - **Latches**
  - **Barriers**
- Proprietà generali synchronizer:
  - incapsulano uno stato che determina quando il thread che li invoca può proseguire oppure essere bloccato
  - forniscono metodi per manipolare tale stato
  - forniscono metodi che permettono di attendere in modo efficiente il verificarsi di tale stato - eventualmente bloccando il flusso di controllo del thread chiamante

OLTRE LA PROGRAMMAZIONE MULTITHREAD (CENNI)

OLTRE LA PROGRAMMAZIONE MULTITHREAD

- In letteratura e nella pratica esistono vari approcci oltre la programmazione multithread
  - studiati alla magistrale
- Fra i principali esempi
  - **Programmazione task-oriented**
    - task come livello di astrazione
    - Java: Framework Executors
  - **Programmazione asincrona**
    - modelli ad eventi / event-loop
    - Java: Framework Vert.x, Javascript: node.js
  - **Programmazione reattiva**
    - modelli funzionali, data-driven e reattivi
    - Framework Reactive X - in Java: RxJava
  - **Programmazione ad attori**
    - oggetti + concorrenza
    - scambio asincrono di messaggi

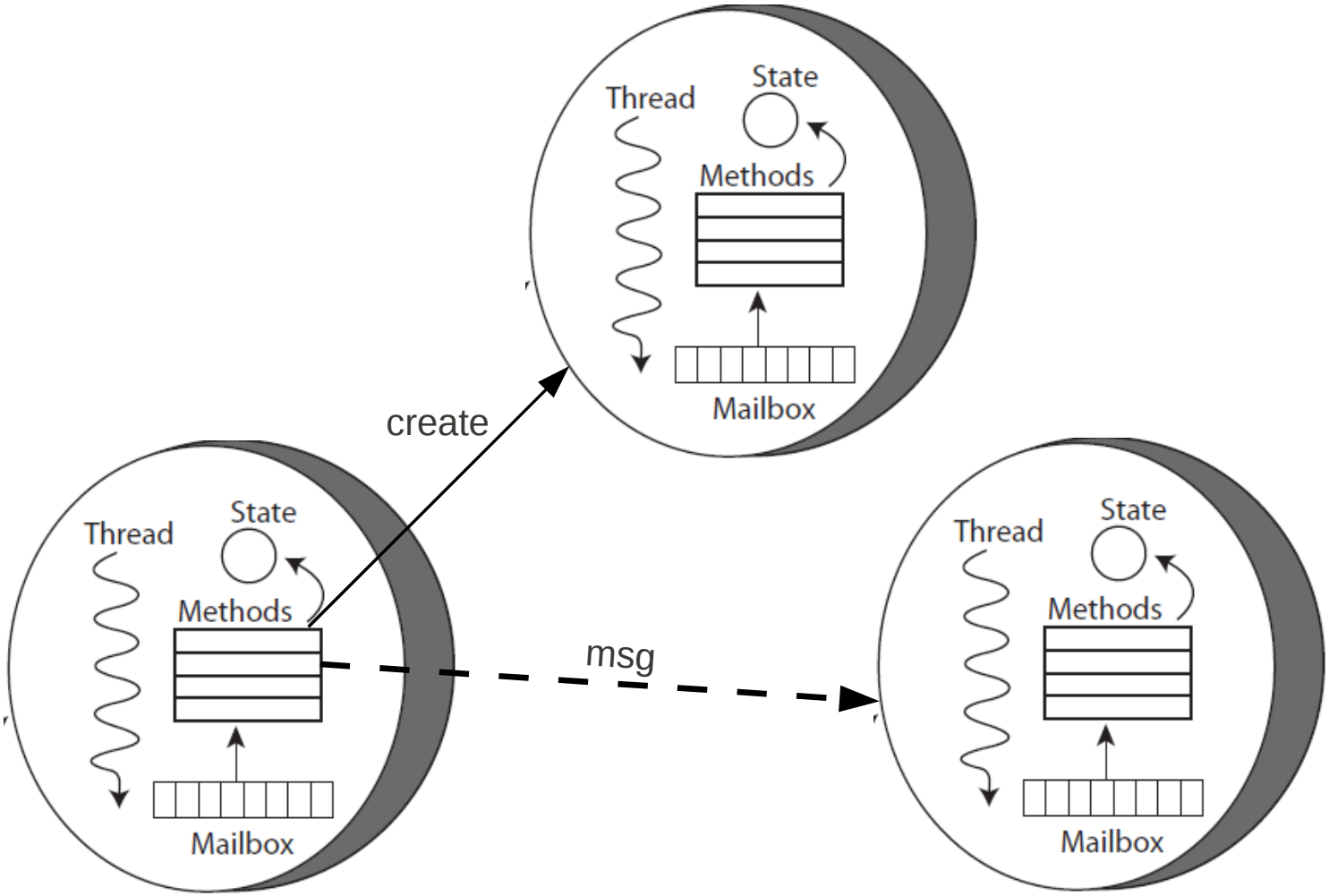
PROGRAMMAZIONE AD ATTORI

- Punto chiave del modello ad attori: interazione esclusivamente basata su **scambio asincrono di messaggi**
  - no memoria condivisa, no operazioni bloccanti
- Concetto/astrazione di **attore**
  - entità attiva o autonoma
    - *dotata di un proprio flusso di controllo logico*
  - reattiva
    - computa quando riceve un messaggio, mandando in esecuzione l'handler associato
    - esecuzione degli handler atomica
- Concettualmente:

ATTORI = OGGETTI + CONCORRENZA

- Vari framework e linguaggi ad attori disponibili
  - es: Framework Akka (akka.io), ActorFoundry (academics)

PROGRAMMAZIONE AD ATTORI



ESEMPIO IN ACTORFOUNDRY

```
public class PingActor extends Actor {
  ActorName otherPinger;
  @message
  public void start(ActorName other) {
    otherPinger = other;
    send(otherPinger, "ping", self(), Id.stamp()+"called from " + self());
  }
  @message
  public void ping(ActorName caller, String msg) {
    send(stdout, "println", Id.stamp()+"Received ping (" + msg +") from " + caller + "...");
    send(caller, "alive", Id.stamp()+self().toString() + " is alive");
  }
  @message
  public void alive(String reply) {
    send(stdout, "println", Id.stamp()+"Received " + reply + " from pinged actor");
  }
}
```

```
public class PingBoot extends Actor {

  @message
  public void boot()  throws RemoteCodeException {
    ActorName pinger1 = null;
    ActorName pinger2 = null;

    pinger1 = create(osl.examples.ping.PingActor.class);
    pinger2 = create(osl.examples.ping.PingActor.class);

    send(pinger1, "start", pinger2);
  }
}
```

BIBLIOGRAFIA PER APPROFONDIMENTI

- Concurrent Programming in Java: Design Principles and Pattern, 2/E - Doug Lea - Addison-Wesley Professional
  - testo di riferimento per la programmazione concorrente in Java
- Java Concurrency in Practice - Brian Goetz et al - Addison Wesley
- Corso “Programmazione Concorrente e Distribuita” - Laurea Magistrale in Ingegneria e Scienze Informatiche - UNIBO, Campus di Cesena