Java PathFinder

2010.06.14

田辺

資料

- 本日の講義資料 (スライド，ソース) は，
  http://cent.xii.jp/
  tanabe.yoshinori/10/06/jpflect/
  から，ダウンロードできます．

Java PathFinder (JPF)

- モデル検査器
  - 対象: Java のバイトコード
  - マルチスレッドプログラムの検証
  - 独自のJava Virtual Machine
  - 状態を明示的に生成
  - 拡張可能
- オープンソース
  - sourceforge.net で公開
  - 当初は NASA Ames Research Centerで W.Visserらが開発
  - http://babelfish.arc.nasa.gov/trac/jpf/wiki

本日の内容

- Java 同期機構の復習
- モデル検査
- Java PathFinder概要
- デッドロックの検出
- アサーションの検証

Java同期機構の復習

Threadクラス

- スレッドを作りたい時，Threadクラスのサブクラスを作成する.
- run メソッドを再定義
- start メソッドによって，runメソッドの内容を実行するスレッドが開始される.
- サンプルコード: MyThread1.java
  (フォルダjavaRev)
  - 2つのスレッドth1とth2が並行して実行される.
  - 実行順序は，毎回異なる.

synchronized文

- obj を任意のオブジェクトとして,
  `synchronized(obj) { ... }`
  という文が作れる. 同一のobjに対する複数のsynchronized文が, 複数のスレッドによって同時に実行されることはない.
  - サンプルコード MyThread2.java
- 異なるobjに対するsynchronized文は同時に実行されうる.
  - サンプルコード MyThread3.java
- synchronized(obj)ブロック
  → objに関する排他的ロック.

synchronizedメソッド

- メソッドにsynchronized修飾子をつけることができる.

  synchronized method() { ... }

  は,

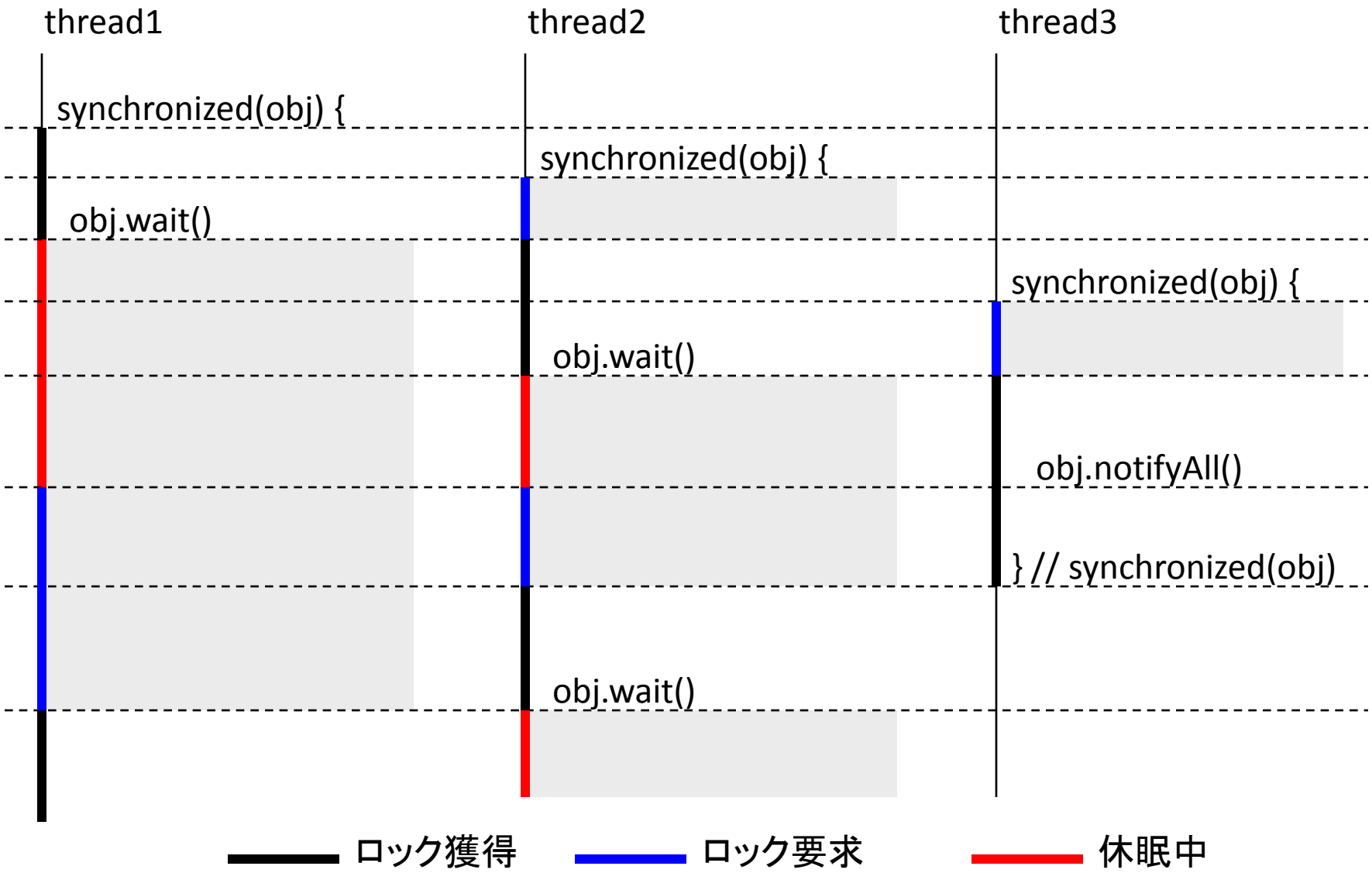
  method() { synchronized(this) { ... } }

  と同じ.

(参考) wait() と notifyAll()

- synchronized(obj) {...} ブロック内では，obj.wait() と obj.notifyAll() を呼ぶことができる.
- obj.wait() が呼ばれると，objに関するロックを放棄して，休眠をはじめる.
- obj.notifyAll()が呼ばれると，そのobjで待っているスレッドすべてが休眠から復帰する.
  (しかし，ロックを取得するまでは実際には動作できない．)
- 注意: wait() は，InterruptedExceptionを投げる.

(参考) wait()とnotifyAll()



練習

- 配布ファイル中の，prodConsフォルダ
- Producer-Consumerモデル
- ソースファイル:
  Main.java, Consumer.java, Producer.java, Queue.java
- overflow, underflow エラーが発生する.

練習

1. Queue を次のように改良して，Queue2を作れ．
   - put: booleanを返すようにする．うまくputできたときにはtrueを，そうでないときには(例外を発生させずに)falseを返す．
   - get: getできなかったときには，例外を発生させずにnullを返す．
2. ConsumerX, ProducerX は，改良としてあまり良くない．理由を述べよ．
3. wait/notifyAll を用いて，Consumer, Producerを改良せよ．

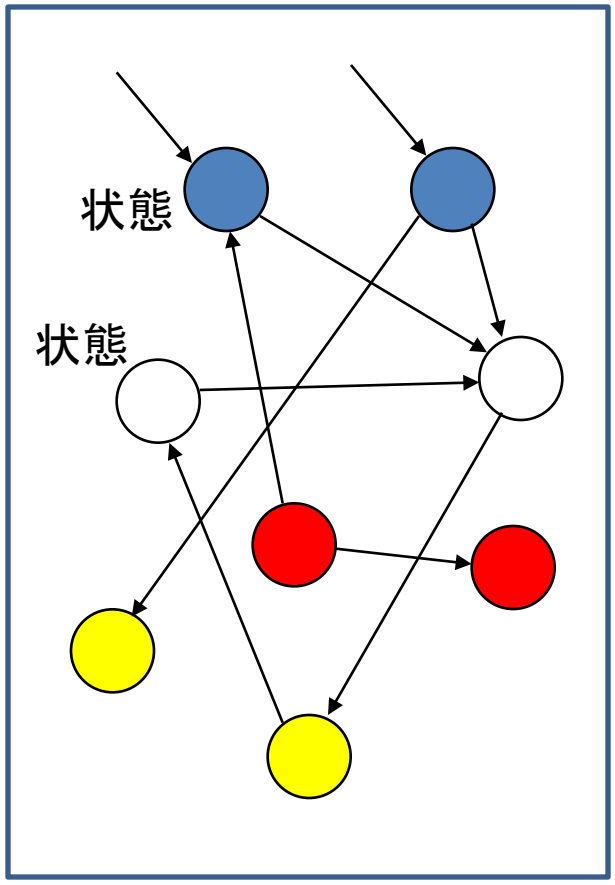
モデル検査

モデル検査

- 状態機械の状態空間を網羅的に探索することにより、与えられた性質が正しいかどうかを判定する検証方法
  - モデル検査
    - 完全な自動化が可能
    - 専門的な知識をあまり必要としない
  - 定理証明の手法を応用した検証方法
    - 数理論理学の知識・経験が必要
- 取り扱える状態数
  - 10^4 から 10^5（初期）
  - 10^{120}（現在）
- 問題点: 探索空間のサイズ（state explosion problem）

状態空間の性質の検証

- 安全性:「常に～～が成立する」
  - 例: 常に赤以外の色である.
- 活性:「(～～がおこると)
  いつかは～～が起こる」
  - 例: 白色になったら, いつかは黄色になる.



状態空間

現代的モデル検査

- 古典的モデル検査
  - 対象: 仕様書，プロトコルなど
  - 設計段階など，「上流工程」でモデル検査を適用.
  - 仕様書などから検査器にかけられるモデルを (ほとんどの場合) 手動で構築.
- 現代的モデル検査
  - 対象: プログラムソースコードなど
  - テスト段階など，「下流工程」でモデル検査を適用. ほとんどデバッグの一種.
  - ソースコードからモデルを自動的に抽出.

Javaプログラムのモデル検査

- 状態は，(おおざっぱにいって)
  以下の要素からなる.
  - 各スレッドの実行位置
  - 変数の値
  - ヒープに存在するオブジェクトの状況

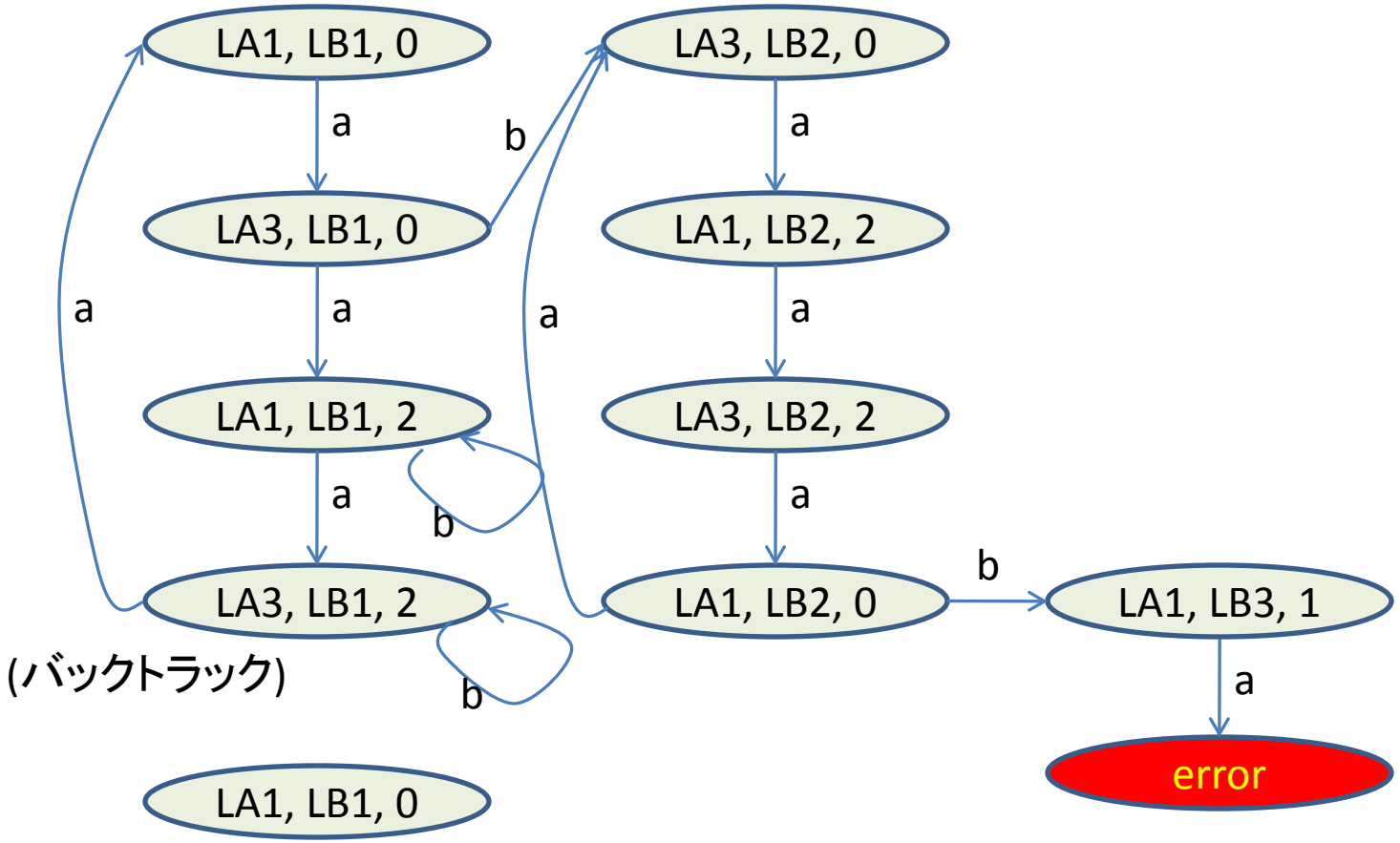
例題

- 例外が投げられることはあるか?

```
public class A extends Thread{

  private static int x = 0;
  private int id;

  public static void main(String[] args) {
    A a = new A(1);
    A b = new A(2);
    a.start();  b.start();
  }

  public A(int id) { this.id = id; }

  public void run() {
    if (id == 1) { ma(); }
    else         { mb(); }
  }
```

```
  public void ma() {
    while (true) {
      LA1: if (x == 1) {
        LA2: throw new
               RuntimeException();
      }else {
        LA3: x = 2 - x;
      }
    }
  }

  public void mb() {
    while (true) {
      LB1: if (x == 0) {
        LB2: x++;
        LB3: x++;
      }
    }
  }
}
```

- 状態 … (aの実行位置, bの実行位置, xの値)
  (ほんとうは，もっと考慮すべきものあり)

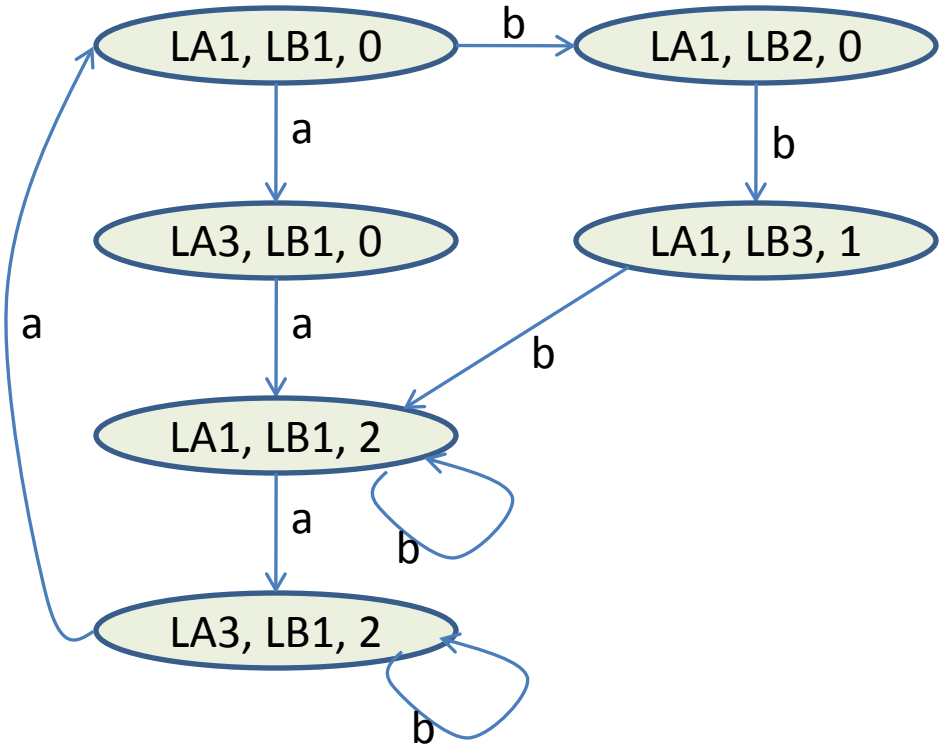


深さ優先方式による状態空間の探索

例題 (改変)

```
public class A extends Thread{

  private static lock = new A(0);
  private static int x = 0;
  private int id;

  public static void main(String[] args) {
    A a = new A(1);
    A b = new A(2);
    a.start();  b.start();
  }

  public A(int id) { this.id = id; }

  public void run() {
    if (id == 1) { ma(); }
    else         { mb(); }
  }
```

```
  public void ma() {
    while (true) {
     LA1: synchronized(lock) {
        if (x == 1) {
        LA2: throw new
                RuntimeException();
      }else {
        LA3: x = 2 - x;
      }
     }
    }
  }

  public void mb() {
    while (true) {
      LB1: synchronized(lock) {
       if (x == 0) {
        LB2: x++;
        LB3: x++;
       }
      }
    }
  }
}
```



実際には,
ロック取得状況も状態の中に入っている.

実際には…

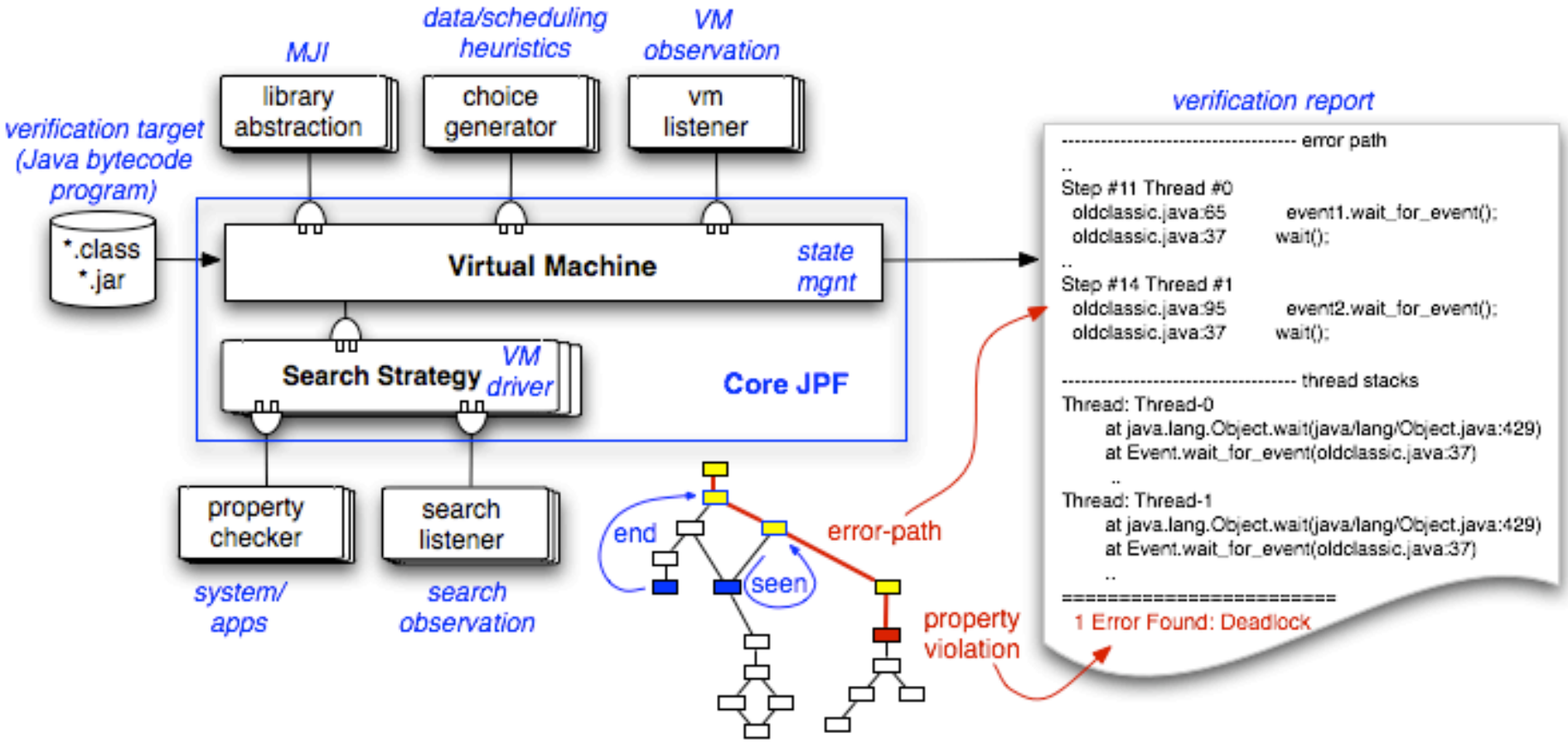
- Java ソースの各ステートメントは，atomic に実行されるわけではない．一つのステートメントの実行中にも，他のスレッドが割り込むことがある．
- 本当にすべてのあり得る状態を生成すると，すぐにメモリ不足になってしまうため，様々な工夫が行われる．
- 安全性検証は，全状態を調べることで行える．活性検証には，もっと複雑なアルゴリズムが必要．

Java Pathfinder概要

Java PathFinder (JPF)

- モデル検査器
  - 対象: Java のバイトコード
  - マルチスレッドプログラムの検証
  - 独自のJava Virtual Machine
  - 状態を明示的に生成
  - 拡張可能
- オープンソース
  - sourceforge.net で公開
  - 当初は NASA Ames Research Center
  - W.Visserら

JPF概要図

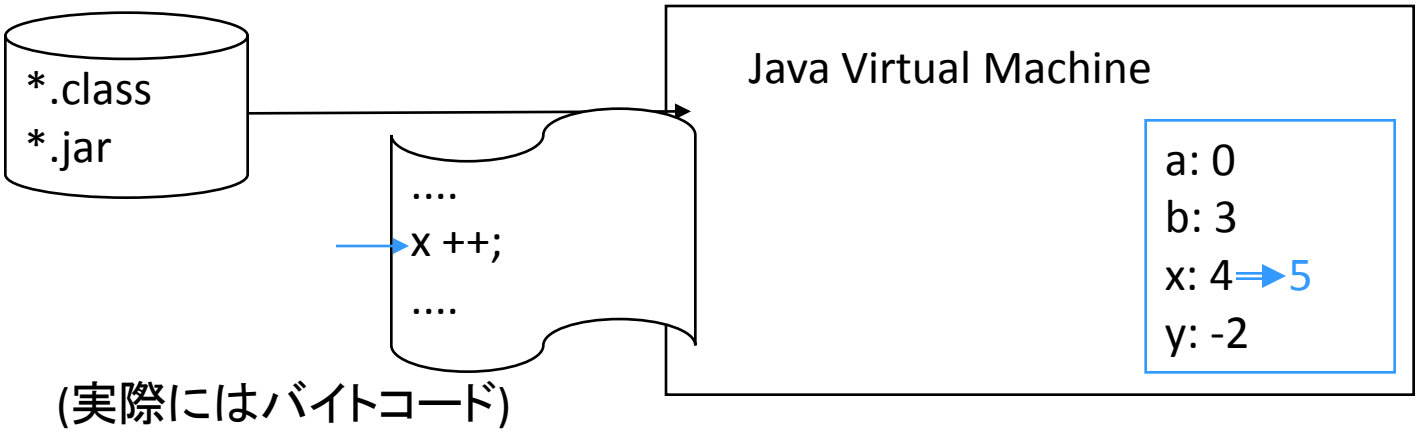


出典: http://javapathfinder.sourceforge.net/

JPFの状態空間

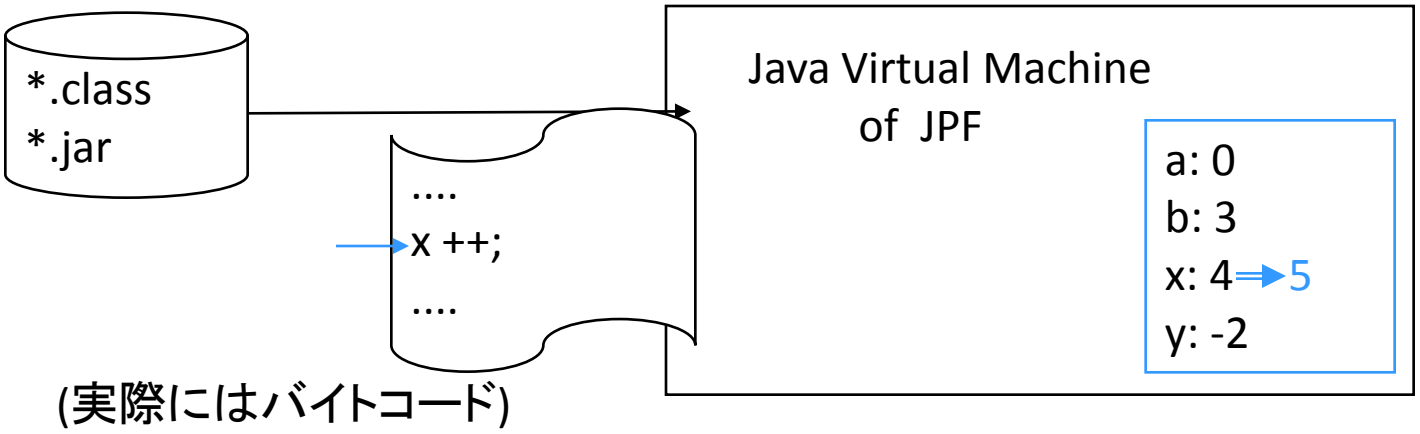
- 状態
  - 各スレッドの実行位置
  - 変数の値
  - ヒープのオブジェクト
- 状態遷移
  - どれか1つのスレッドが,
    現在のバイトコードを実行する.
  - 遷移の非決定性:
    (主に) スレッドスケジューリングによる

JPFの動作原理(1)



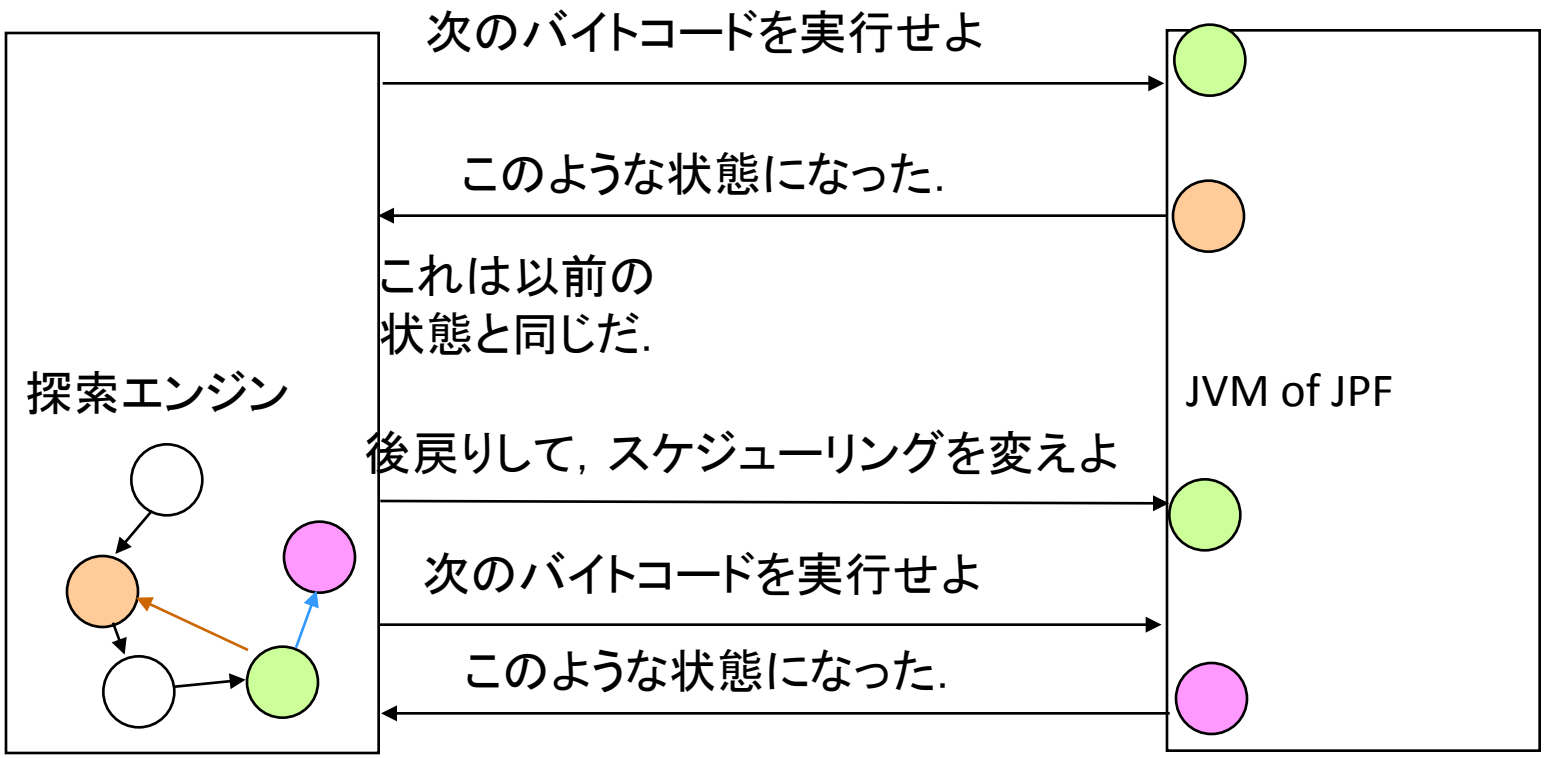
- Javaのクラスファイルは，Java Virtual Machine（JVM） によって解釈され，実行される.

JPFの動作原理(2)



- JPF独自のJVM
  - 通常のJVMと同様に，クラスファイルを解釈
  - バックトラック可能
  - スレッドスケジュールの制御が可能

JPFの動作原理(3)



- 探索エンジン
  - JPFの中心
  - JVM of JPF を駆動する.

効率化

- 半順序簡約
  - スレッド相互間に干渉のない部分は一気に実行
- 状態の表現
  - ハッシュを利用して，コンパクトな表現を実現

検出できる不具合

- デフォルト
  - デッドロック
  - アサーション違反
  - 補足されない例外
- ユーザ定義
  - 基本的には，安全性性質

JPFの入手

- v.4用とv.5用のウェブサイトがある.
- この講義では，v.5 を用いる.
  http://babelfish.arc.nasa.gov/trac/jpf/wiki

セットアップ

- ダウンロードして展開する
  http://babelfish.arc.nasa.gov/trac/jpf/attachment/wiki/projects/jpf-core/jpf-core.zip
  どこで展開しても良いが，ドライブCの中にすること．
- 講義用配布ファイル jpflect.zip を，同じフォルダで展開する．
- binディレクトリにパスを通す
- フォルダ「C:¥Documents and Settings¥ユーザ名」に，「.jpf」というフォルダを作り，そこに site.properties という名前のファイルを作り，次の一行を記述する．
  jpf-core=*/full/path/to*/jpf-core
  /full/path/to の部分は，実際のパス名を書く．ただし，バックスラッシュでなく，スラッシュを用いる．また，ドライブ記号は書かない．

JPFの実行

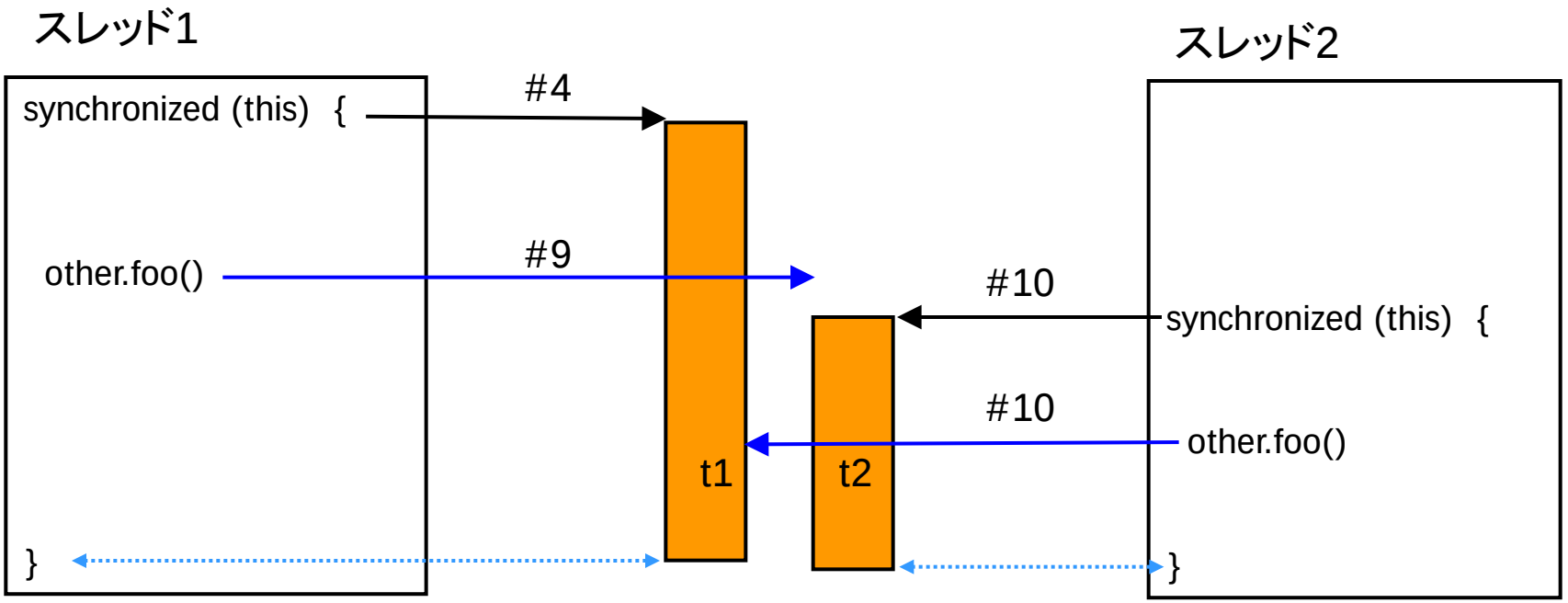
- code フォルダで実行する.
- クラスファイルを作成する.
  > javac */*.java
- *.jpf ファイルを作成する. 配布されているものを参考にする.
- jpf の実行:
  > ../jpf-core/bin/jpf foo.jpf

デッドロックの検出

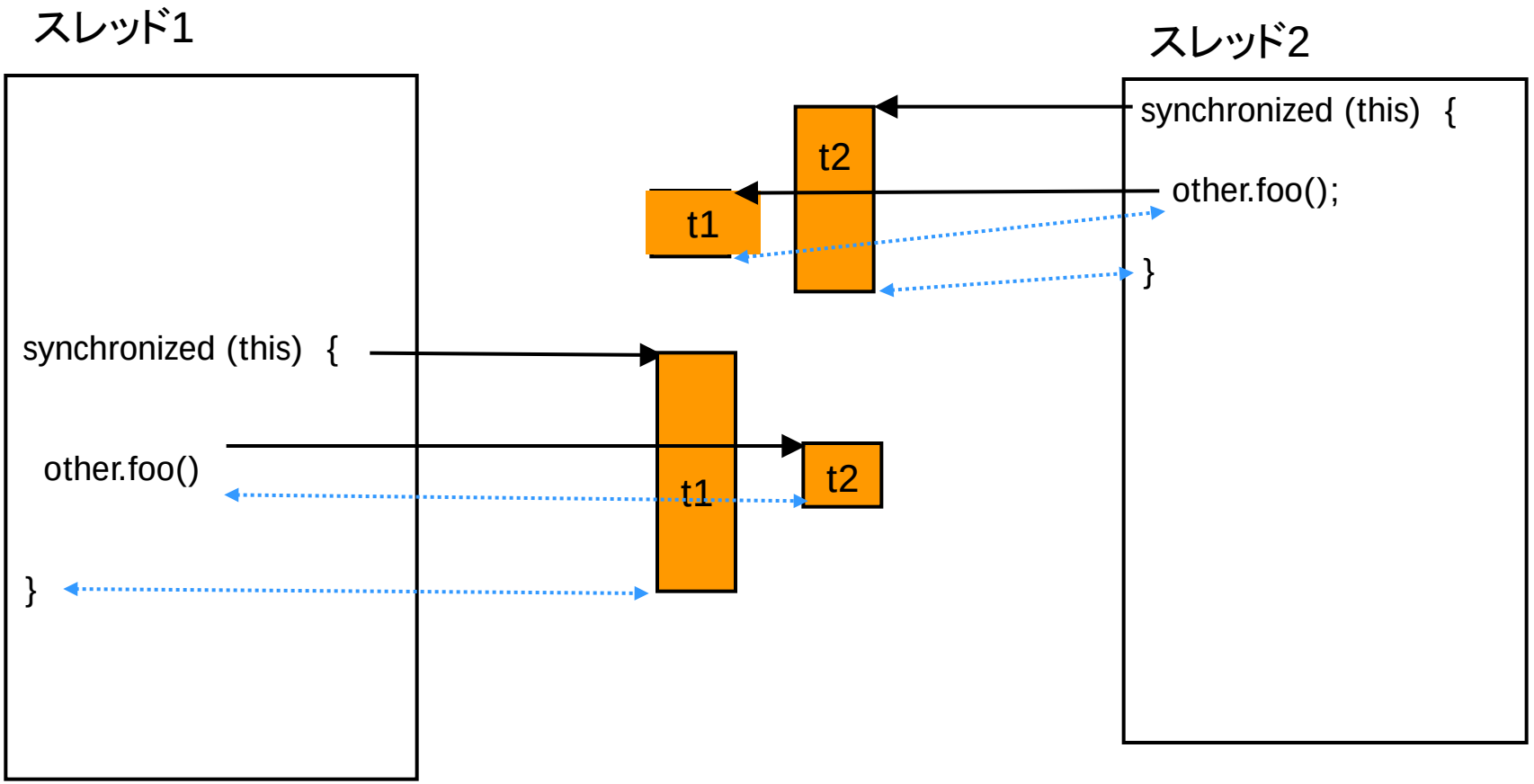
デッドロックの検出

- JPFは，デッドロックを自動的に検出する.
- ソースファイル deadlock/Deadlock.java参照

デッドロックとなる理由



(比較) デッドロックが起こらない場合



練習: デッドロック

ファイル misc/Friendly.java

1. javac で Friendly.java コンパイルし，作成されたクラスを java で実行せよ.
2. Friendly.class を JPF で実行 (jpf friendly.jpf) し，デッドロックが起こりうることを確認せよ.
3. デッドロックが起こりうる理由を説明せよ.
4. デッドロックを起こさなくするようにプログラムを改変せよ．ただし，hug() および hugback() は，他のスレッドに割り込まれずに実行されるように保つこと．JPFを用いて，デッドロックがなくなったことを確認せよ.

注意: 良く出る警告

- 以下の警告が現れることがある.

```
sync-detection assumed to be protected by: ....
found to be protected by: {....}
>>> re-run without '-sync-detection' <<<
```

- 警告の意味: jpf の最適化ルーチンのうちの一つが仮定しているプログラムの性質が満たされていない.
  → 結果が正しくないかもしれない.
- 対処: ほとんどの場合, プログラムにバグがある. 報告された変数が正しく同期制御されているかどうか確認.
- 本当に問題がなかったら, 以下の内容のファイルをカレントディレクトリに作り, jpfのコマンドラインスイッチ -c でファイル名を指定する.

```
vm.por.sync_detection = false
```

アサーションの検証

Javaのアサーション

- 形式: **`assert p : m`**
  - p : チェック対象のboolean型の式
  - m : エラーメッセージ
    「: m」の部分は省略可能.
- 指定したboolean式の値がtrueになるべきであるという表明.
- 実行時に式の値がfalseになると，実行時エラー(java.lang.AssertionError)になる.
- 実行時オプション: **`java -ea`**

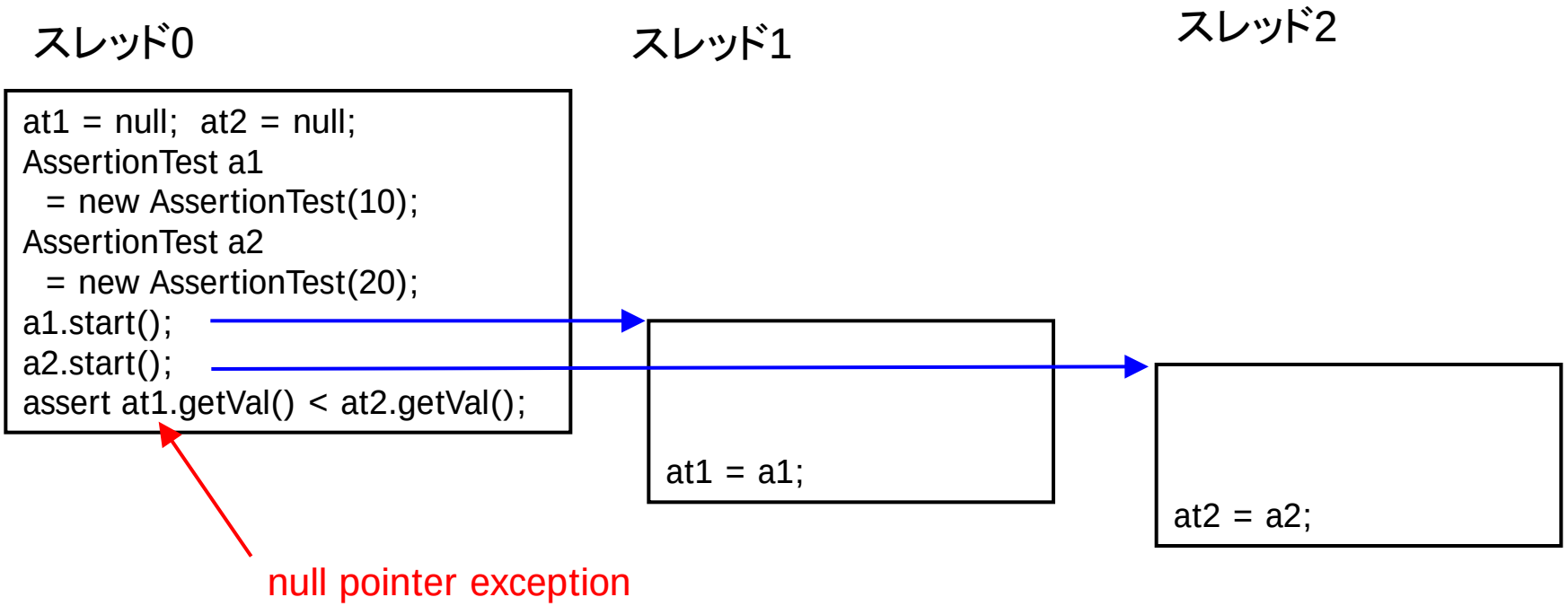
JPFとアサーション

- 通常の実行時には，アサーションの位置に制御が渡ったときに，チェックが行われる．
  → その実行によって通らないパスでは，チェックが行われない．
- JPFによる実行時には，すべてのパスでチェックが行われる．

AssertionTest1

- ソース参照 (AssertionTest1.java)
  (フォルダ misc)
- 2つのスレッド a1 と a2
- a1 が先に start. a2が後から start
- run の内容: 自分自身を「登録する」
- 登録の内容: at1 が空いていたら at1 に，そうでなかったらat2に代入.
- 両方登録が終わったとき，a1 == at1 になるか?

AssertionTest1



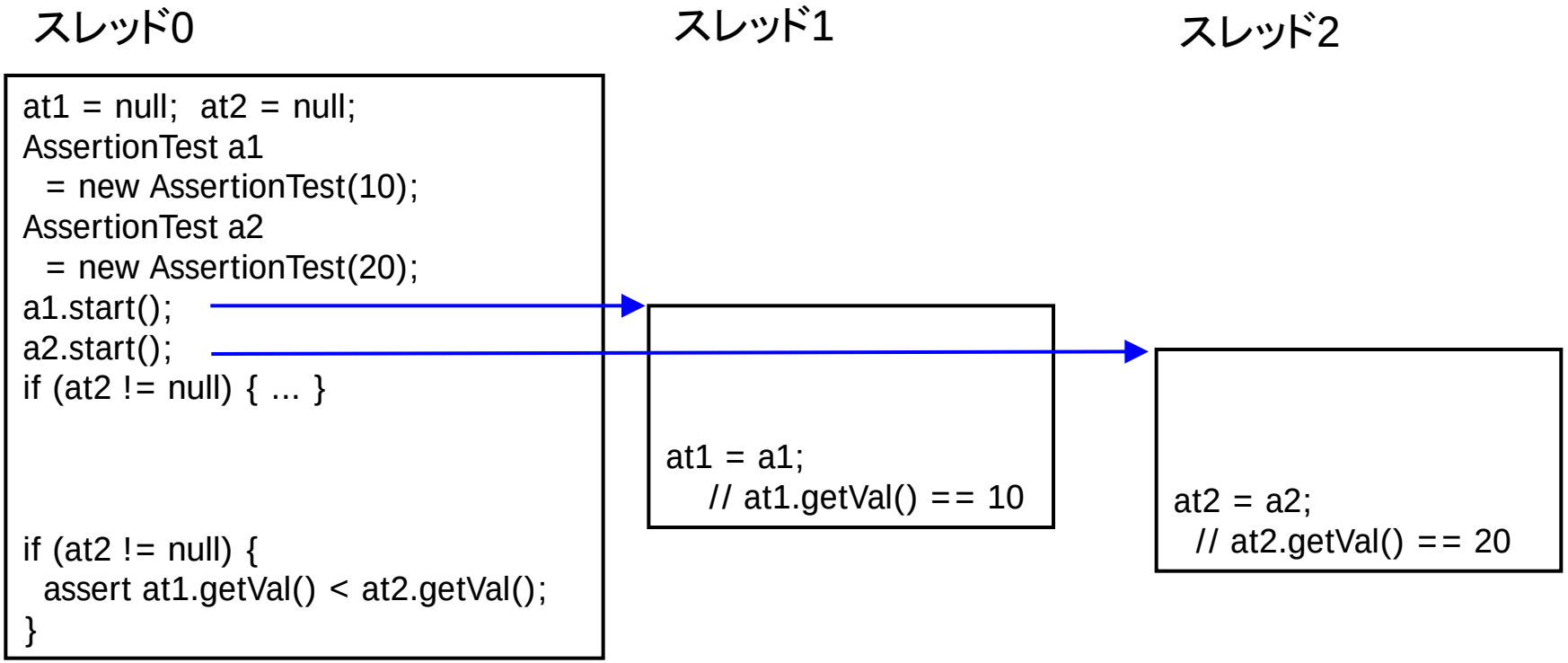
テストで検出できる.

JPFも，エラーを報告する.

エラートレース

- (エラートレース参照)

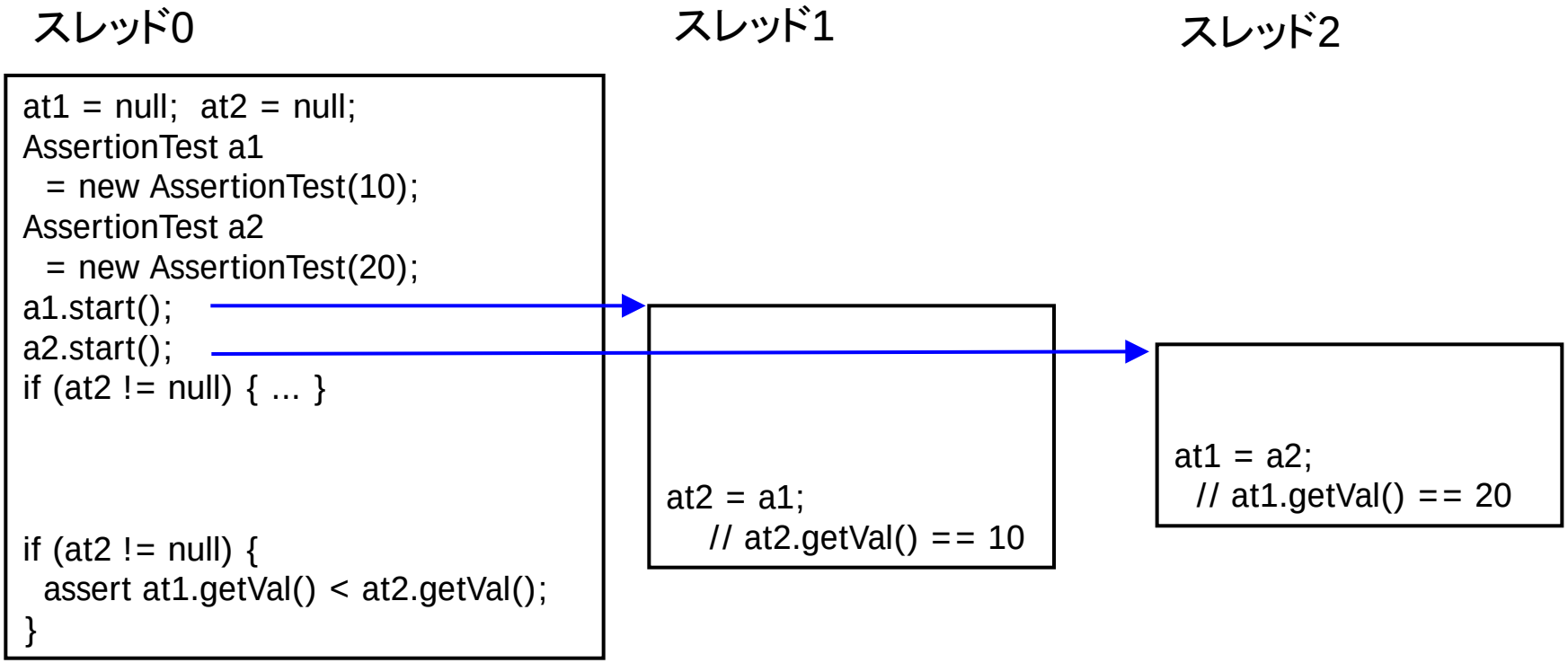
AssertionTest2 (1)



assertion は成功

1CPUマシンでは，こうなることが多い(?)
しかし，状況によっては…..

AssertionTest2 (1)



assertion は失敗

テストでは検出できるとは限らない.

JPFでは，検出できる.

エラートレース

- (エラートレース参照)

練習

- misc/AllNum.java は，スレッドスケジューリングにより，計算結果がさまざまになり得ることを示すソースである.
- n = 3 を jpf で実行せよ．エラートレースを読んで，x = 3 となる計算過程を示せ.
- x = 11 となる計算過程はないことを確かめよ.
- x = 10 となる計算過程を示せ.

練習

1. misc/Saving.java をコンパイルし，(通常のJVMで)実行せよ．アサーション失敗が報告されるか．
2. JPFで検証せよ．アサーション失敗が報告されるか．アサーションを

   ```
   saving <= th1.amount + th2.amount
   ```

   に変更するとどうか．
3. アサーションが失敗する理由を説明せよ．(わかりにくい場合にはSaving2.javaを使用してみよ．)
4. アサーションが常に成功するようにプログラムを改変せよ．また，JPFの実行により常に成功することを確認せよ．

レポート課題

提出期限，提出先，形式などは，後ほど確認して，

http://cent.xii.jp/
tanabe.yoshinori/10/06/jpflect/

に記述します．

レポート課題

- フォルダ rwlock
- クラス MyObj0, MyObj1
  - メソッド refer()　... 参照
  - メソッド update() ... 更新
- クラス App1　(main)
  - 2つのスレッド th1, th2 を起動する.
  - th1: refer(), refer(), refer(), update() の順に呼ぶ.
  - th2: refer(), update(), refer(), refer() の順に呼ぶ.
- クラスTime
  - 実行時間を制御する. 経過時間を表示する.
  - Time.enabled=falseとすると，無効になる.

レポート課題

- 1: App1+MyObj0, App1+MyObj1について，Time.enabled = true にして，表示される実行時間を記録せよ．ただし，App1+MyObj? とは，App1.java の，8-10行目の該当する行を選んだもののこととする．

  以下，JPF を用いるときには Time.enabled = falseにした方が良い．

- 2: App1+MyObj0 について，update の実行中に，他のスレッドでupdateまたはreferが実行されることがあることを確認せよ．
- 3: App1+MyObj1について，updateやrefer の実行中には，他のスレッドでupdateもreferも実行されないことを，JPF を用いて確認せよ．

レポート課題

- 4: MyObj2.java を適切に作成して，App1+MyObj2について，以下の条件a,bが満たされるようにせよ.
  a. update の実行中には，他のスレッドでupdateもreferも実行されない.
  b. 2つのスレッドで同時にreferが実行されることはありうる.

  これらの条件が満たされることを，JPFを用いて確認せよ.
  App1+MyObj2の実行時間が，App1+MyObj1よりは相当に短くなることを確認せよ.
  (Time.enabled=trueとして実験せよ．)

- 練習問題，レポート課題などに関して質問のある方は，
  y-tanabe _atmark_ nii _dot_ ac _dot_ jp
  あてにどうぞ．