פיתוח מערכות תוכנה מבוססות Java

מקביליות

אוהד ברזילי

אוניברסיטת תל אביב

היום בשיעור

- נושא המקביליות נלמד כבר בקורס מערכות הפעלה, ובו דנתם בהבטים האלגוריתמים והטכנולוגים

- בשיעור זה, נבחן מספר הבטים של הנדסת תוכנה בהתמודדות עם שיקולי מקביליות:
  - ברמת שפת התכנות
  - ברמת הספרייה
  - ברמת ההפשטה
  - וברמת מסגרת העבודה

מקביליות

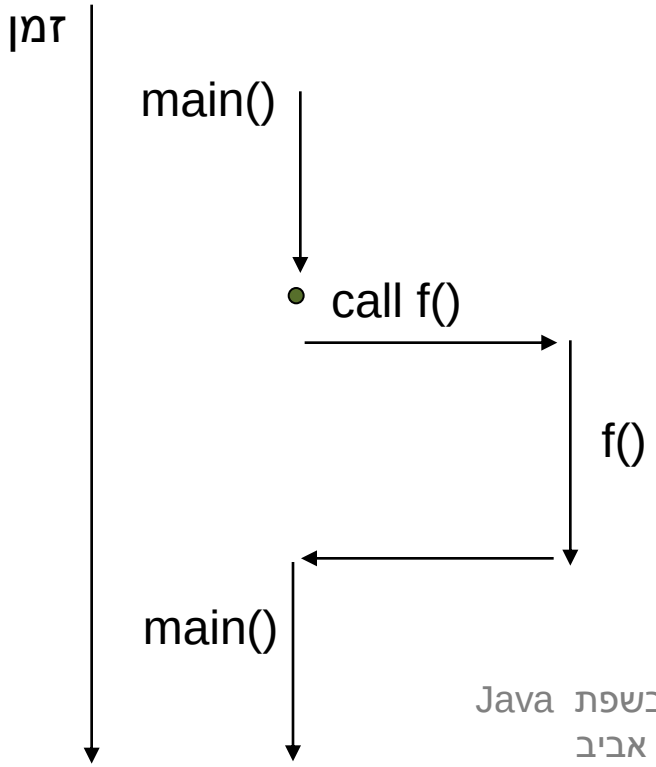
- רמת התהליך (multithreading) לעומת רמת מערכת ההפעלה (multi processes)
- ריבוי מעבדים (multi processors) לעומת חלוקת זמן עיבוד (time slicing)

חוטים

- תהליך (process) הוא הפשטה של מחשב וירטואלי
- חוט (execution thread, execution context) – הוא הפשטה מעבד וירטואלי
- אנו מבדילים בין: CPU, Code, Data

חוטים

- עד עכשיו ראינו כי שני שרותים אינם רצים ביחד
- כאשר שרות קורא לשרות אחר, מצביע התוכנית "קופץ" לשרות האחר וכאשר הוא מסיים הוא חוזר לשרות הקורא

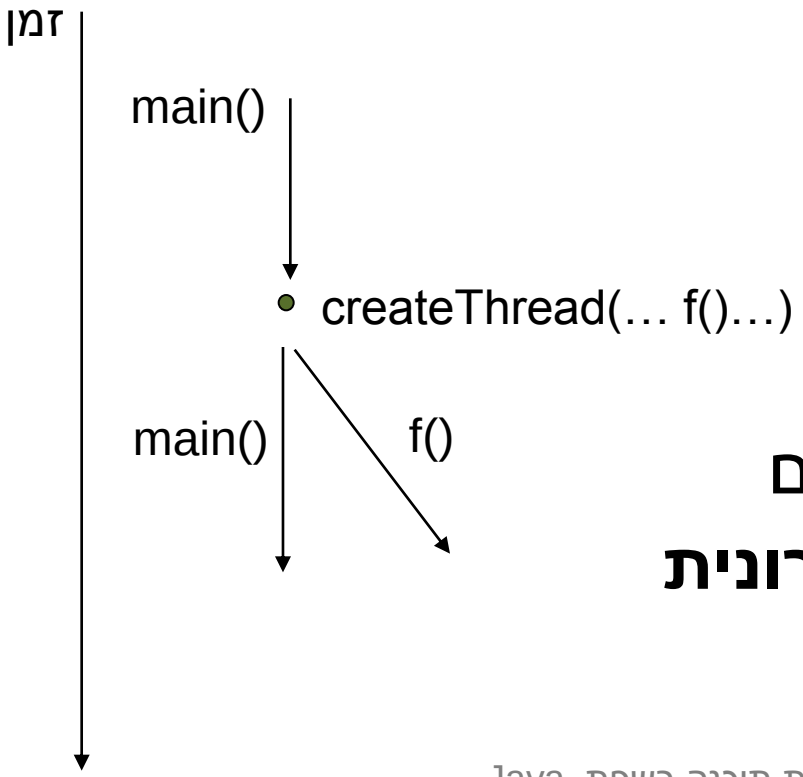


- למשל אם ב main מופיעה קריאה ל f() ביצוע main נעצר והוא ממשיך רק אחרי סיום f()

חוטים

- לעומת זאת אם main יריץ את f() בחוט נפרד – ריצות main ו- f() ימשיכו במקביל (!)

- בשפת C:



בהקשרים מסוימים אומרים כי `f()` מתבצעת **א-סינכרונית** לפונקציה `main()`

למה חוטים?

- הנדסת תוכנה: מודלריות, הכמסה
- שימוש יעיל במשאבים
- חישוב מבוזר

- משימות אופיניות:
  - Non blocking I/O
  - Timers
  - משימות בלתי תלויות
  - אלגוריתמים מקביליים ומבוזרים
  - דברים ש"רצים ברקע" (Garbage Collection)

חשוב לזכור

- לשימוש בחוטים יש תקורה והוא **אינו בהכרח משפר** את ריצת התוכנית!
- מעבד אחד יכול לבצע לכל היותר פעולה אחת בו זמנית
- כאשר בתוכנית יש מרכיב I/O דומיננטי השימוש בחוטים עשוי להשתלם

Performance Issues

- **Synchronization is expensive!**
- Comparison table (in time units):

	Non-synchronized method	Synchronized method
Single thread accessing the methods	**1**	**~3**
n threads accessing simultaneously	**1**	**~3*n**

Performance Issues

- **Thread creation and start are expensive!**
- Comparison table (in time units):

Creating a String	**1**
Creating a Thread	**~10**
Creating a Thread and starting it	**~200 (!)**

חוטים בשפת C

- יצירת חוט (thread):

int **pthread_create**(pthread_t *thread, const pthread_attr_t *attr,
void *(*start_routine)(void*), void *arg);

- מנעול (mutexs):

pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex)
pthread_mutex_trylock(pthread_mutex_t *mutex)
pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex)

- ארועים (conditional varialbles):

pthread_cond_wait(condition, mutex)
pthread_cond_signal(condition)

חוטים ב- Java

- כמו כל דבר ב- Java, גם חוט ב Java הוא עצם
  - מופע של המחלקה **`Thread`**
- חוט תמיד מריץ מתודה עם חתימה קבועה:
  - **`public void run()`**
  - חוץ מהחוט הראשי שמריץ את **`main()`**
- מחלקה שממשת את **`run()`** בעצם ממשת את המנשק **`Runnable`**
- כלומר, חוט ב Java הוא מופע של המחלקה **`Thread`** שהועבר לו כארגומט (למשל בבנאי) עצם ממחלקה שהיא **`implements Runnable`**

עבודה עם חוטים

- שאילתות:
  - `isAlive()`
  - `interrupted()` , `isInterrupted()`
- עדיפות ריצה:
  - `getPriority()`
  - `setPriority()`
- חסימת חוט
  - `Thread.sleep()` (static)
  - `join()`
  - `Thread.yield()` (static)

שימוש ב join

```
public static void main(String[] args) {
   Thread t = new Thread(new Runner());
   t.start();
   //...
   // Do stuff in parallel with the other thread for a while
   //...
   // Wait here for the other thread to finish
   try {
      t.join();
   } catch (InterruptedException e) {
      // the other thread came back early
   }
   // Now continue in this thread
   //...
}
```

שימוש ב synchronized

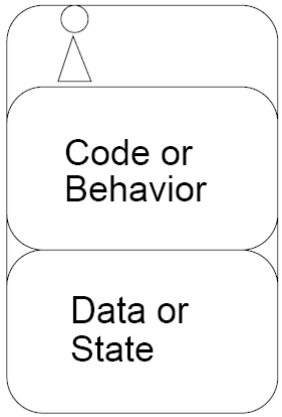
```
public class MyStack {

   int idx = 0;

   char[] data = new char[6];

   public void push(char c) {
      data[idx] = c;
      idx++;
   }

   public char pop() {
      idx--;
      return data[idx];
   }
}
```

- ננסה לתאר תרחישים שבהם עבודה עם המחלקה לא תצליח בתוכנית מרובת חוטים
- הפעולות push ו- pop צריכות להתבצע ללא הפרעה
- יש לבצע אותן כפעולות *אטומיות* כדי לשמור על *עקביות מבנה הנתונים*

מנעול לעצמים

- Java מספקת לכל עצם (במחלקה Object) מנעול פרטי
  - אנלוגיה: מפתח יחיד לשימוש בשרותים ציבוריים
- כאשר מספר חוטים רצים על אותו העצם יכול אחד מהם לקחת את המפתח לעצמו ובכך לחסום את ריצת האחרים

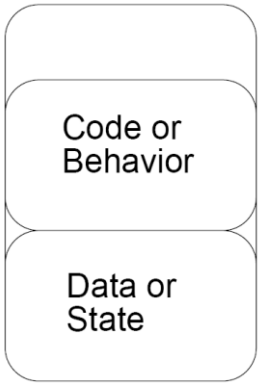
```
public void push(char c) {
  synchronized (this) {
    data[idx] = c;
    idx++;
  }
}
```



מנעול לעצמים

- Java מספקת לכל עצם (במחלקה Object) מנעול פרטי
  - אנלוגיה: מפתח יחיד לשימוש בשרותים ציבוריים
- כאשר מספר חוטים רצים <u>על אותו העצם</u> יכול אחד מהם לקחת את המפתח לעצמו ובכך לחסום את ריצת האחרים

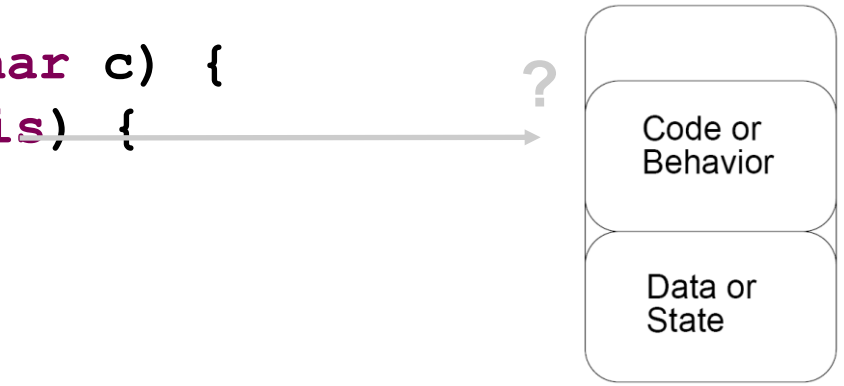
```
public void push(char c) {
  synchronized (this) {
    data[idx] = c;
    idx++;
  }
}
```



מנעול לעצמים

- כאשר מגיע חוט אחר לאותו קטע קוד, המנעול חסר, והחוט מחכה לחזרתו

```
public void push(char c) {
   synchronized (this) {
      data[idx] = c;
      idx++;
   }
}
```



- שחרור המנעול מתבצע אוטומטית ביציאה מבלוק synchronized:
  - אחרי סיום הבלוק
  - אחרי break, return, throw מתוך הבלוק

תקשורת בין חוטים (wait & notify)

- אנלוגיה: נהג המונית והנוסע
- לצורך מימוש הרעיון מספקת Java:
  - את המתודות **`wait`** ו- **`notify`**
  - הגדרת wait pool נוסף על ה - lock pool (הממומשים מאחורי הקלעים)
- השימוש במתודות **`wait`** ו- **`notify`** הוא מתוך synchronized context

נושאים מתקדמים בעבודה עם חוטים

מבוסס על פרק 5.7 ב-

Java in a Nutshell 5th edition

By David Flanagan

תזמון משימות

- בעזרת המחלקות Timer ו- Executor נותן לתזמן בקלות משימות דחויות ומשימות חוזרות

```
// Define the time-display task
TimerTask displayTime = new TimerTask() {
    public void run() {
        System.out.printf("%tr%n", System.currentTimeMillis());
    }
};
// Create a timer object to run the task (and possibly others)
Timer timer = new Timer();

// Now schedule that task to be run every 1,000 milliseconds,
// starting now
timer.schedule(displayTime, 0, 1000);

// To stop the time-display task
displayTime.cancel();
```

Executor

- ב Java5 הוגדרה הספריה `java.util.concurrent` אשר מספקת כלים **להחביא** את האופן שבו מבוצעת הלוגיקה

- למשל:
  - מבני נתונים א-סינכרונים כגון BlockingQueue
  - המנשק Executor העוטף את טיפוס ה Runnable

```
/** Execute a Runnable in the current thread. */
class CurrentThreadExecutor implements Executor {
    public void execute(Runnable r) { r.run(); }
}

/** Execute each Runnable using a newly created thread */
class NewThreadExecutor implements Executor {
    public void execute(Runnable r) { new Thread(r).start(); }
}
```

```
/**
 * Queue up the Runnables and execute them in order using a single thread
 * created for that purpose.
 */
class SingleThreadExecutor extends Thread implements Executor {
    BlockingQueue<Runnable> q = new LinkedBlockingQueue<Runnable>();

    public void execute(Runnable r) {
        // Don't execute the Runnable here; just put it on the queue.
        // Our queue is effectively unbounded, so this should never block.
        // Since it never blocks, it should never throw InterruptedException.
        try { q.put(r); }
        catch(InterruptedException never) { throw new AssertionError(never); }
    }

    // This is the body of the thread that actually executes the Runnables
    public void run() {
        for(;;) {                          // Loop forever
            try {
                Runnable r = q.take();     // Get next Runnable, or wait
                r.run();                   // Run it!
            }
            catch(InterruptedException e) {
                // If interrupted, stop executing queued Runnables.
                return;
            }
        }
    }
}
```

ThreadPoolExecutor

- בפועל אין אפילו צורך לממש בעצמנו **Executors** הספריה **java.util.concurrent** מספקת **ThreadPoolExecutor** חזק וגמיש

- ניתן לעבוד איתו בעזרת מחלקת המפעל Executors:

```
Executor oneThread = Executors.newSingleThreadExecutor(); // pool size of 1
Executor fixedPool = Executors.newFixedThreadPool(10); // 10 threads in pool
Executor unboundedPool = Executors.newCachedThreadPool(); // as many as needed
```

- או ליצור אותו בצורה מפורשת (כדי להגדיר את מאפיניו)

אין שכל – אין דאגות

- היכולת לא לדעת את **אופן הביצוע** של משימה בעת הגדרת המשימה היא רעיון מפתח בהנדסת תוכנה. הדבר:
  - **מפשט** את הקוד
  - **מכליל** את הקוד (ניתן להשתמש באותו הקוד גם עבור משימות סינכרוניות וגם עבור משימות א-סינכרוניות)
  - משפר את **המודולריות** של המערכת

Callable, ExecutorService

- המנשק **`ExecutorService`** יורש מ **`Executor`** ויודע לטפל גם בטיפוס **`Callable`**
- **`Callable` בדומה ל `Runnable`** מכיל מתודה אחת בשם **`call`**
- השרות call של **`Callable`** בשונה מ- **`Runnable`**:
  - יכול להחזיר ערך
  - יכול לזרוק חריג
- מה המשמעות של החזרת ערך משרות שאולי מתבצע א-סינכרונית?
  - קריאה ישירות ל call תבצע אותו בצורה סינכרונית
  - קריאה ל submit תבצע אותו בצורה א-סינכרונית
    - מה יקרה בינתיים למי שקרא ל submit?
    - האם הוא blocked? זה הרי סותר את כל רעיון ה א-סינכרוניות!

בחזרה לעתיד

- השרות call מחזיר ערך מטיפוס Future<T> שעליו ניתן להפעיל את המתודות:
  - **`isDone()`**
  - **`cancel()`**
  - **`isCanceled()`**
  - **`get()`**
    - הקריאה היא blocked
    - השרות עשוי לזרוק חריג ExecutionException

דוגמא

```
import java.util.concurrent.*;
import java.math.BigInteger;
import java.util.Random;
import java.security.SecureRandom;

/** This is a Callable implementation for computing big primes. */
public class RandomPrimeSearch implements Callable<BigInteger> {
    static Random prng = new SecureRandom();  // self-seeding
    int n;
    public RandomPrimeSearch(int bitsize) { n = bitsize; }
    public BigInteger call() {
        return BigInteger.probablePrime(n, prng);
    }
}
...
// Try to compute two primes at the same time
ExecutorService threadpool = Executors.newFixedThreadPool(2);
Future<BigInteger> p = threadpool.submit(new RandomPrimeSearch(512));
Future<BigInteger> q = threadpool.submit(new RandomPrimeSearch(512));
}

BigInteger product = p.get().multiply(q.get());
```

Putting it all together

- הטיפוס ScheduledExecutorService משלב את תכונות ה Timer עם הרצת טיפוסי Runnable ו- Callable
- ניתן להגדיר טיפוסי ScheduledFuture עם מחזוריות ו\או השהייה
- מתודות Factory מתאימות מסופקות במחלקה Executors

עידון מנגנוני הסנכרון

- בגרסאות Java הראשונות (לפני Java5) לא ניתן לגשת ישירות למנעולים, אלא רק דרך בלוק synchronized
- בתחילה היה נראה שהדבר מפשט את מנגנון התזמון
  - כשם ש Java בחרה להפקיע את ניהול הזיכרון מהמשתמש
- אולם התגלה כי יש אלגוריתמי סינכרון שלא ניתן לממש כאשר הנעילה היא block-scoped
- החבילה `java.util.concurrent.locks` מגדירה מבנים המחזירים למתכנתת את הכח שנגזל ממנה

דוגמא

```
import java.util.concurrent.locks.*;  // New in Java 5.0

/**
 * A partial implementation of a linked list of values of type E.
 * It demonstrates hand-over-hand locking with Lock
 */
public class LinkList<E> {
    E value;                    // The value of this node of the list
    LinkList<E> rest;           // The rest of the list
    Lock lock;                  // A lock for this node

    public LinkList(E value) {  // Constructor for a list
        this.value = value;             // Node value
        rest = null;                    // This is the only node in the list
        lock = new ReentrantLock();     // We can lock this node
    }
```

```
    /**
     * Append a node to the end of the list, traversing the list using
     * hand-over-hand locking. This method is threadsafe: multiple threads
     * may traverse different portions of the list at the same time.
     **/
    public void append(E value) {
        LinkList<E> node = this;  // Start at this node
        node.lock.lock();         // Lock it.

        // Loop 'till we find the last node in the list
        while(node.rest != null) {
            LinkList<E> next = node.rest;

            // This is the hand-over-hand part.  Lock the next node and then
            // unlock the current node.  We use a try/finally construct so
            // that the current node is unlocked even if the lock on the
            // next node fails with an exception.
            try { next.lock.lock(); }  // lock the next node
            finally { node.lock.unlock(); } // unlock the current node
            node = next;
        }

        // At this point, node is the final node in the list, and we have
        // a lock on it.  Use a try/finally to ensure that we unlock it.
        try {
            node.rest = new LinkList<E>(value); // Append new node
        }
        finally { node.lock.unlock(); }
    }
}
```

מנגנוני תזמון נוספים

- **Semaphore**
  - **acquire()**
  - **release()**
  - **tryAquire()**
- **CountDownLatch**
  - **await()**
  - **countDown()**
- **Exchanger**
  - **exchange()**
- **CyclicBarrier**
  - **await()**
- **(Reentrant) ReadWriteLock**
  - **read()**
  - **write()**

מבני נתונים מסונכרנים

- **מימושי Set, List, and Map ב java.util אינם synchronized (פרט ל Hashtable, Vector)**

- **כאשר עובדים עם כמה חוטים ניתן לעטוף אותם בטיפוסים מסונכרנים:**

```
List synclist = Collections.synchronizedList(list);
Map syncmap = Collections.synchronizedMap(map);
```

- **ב Java5 התווספו 5 מימושים למנשק Queue (עם הפעולות put() ו- take()):**
  - **ArrayBlockingQueue**
  - **LinkedBlockingQueue**
  - **PriorityBlockingQueue**
  - **DelayQueue**
  - **SynchronousQueue**

פעולות אטומיות

- Java מספקת בחבילה `java.util.concurrent.atomic` טיפוסים בעלי פעולות אטומיות מובנות
  - כגון `compareAndSet` ו- `getAndIncrement`

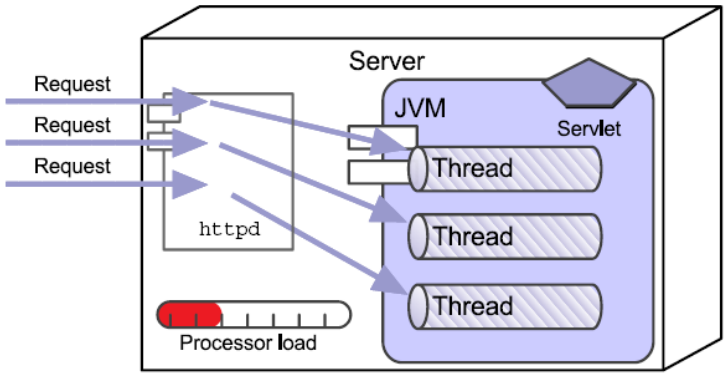
```
import java.util.concurrent.atomic.AtomicInteger;

// The count1(), count2() and count3() methods are all threadsafe.  Two
// threads can call these methods at the same time, and they will never
// see the same return value.
public class Counters {
    // A counter using a synchronized method and locking
    int count1 = 0;

    public synchronized int count1() {
        return count1++;
    }
```

AtomicInteger

```
    // A counter using an atomic increment on an AtomicInteger
    AtomicInteger count2 = new AtomicInteger(0);

    public int count2() {
        return count2.getAndIncrement();
    }

    // An optimistic counter using compareAndSet()
    AtomicInteger count3 = new AtomicInteger(0);

    public int count3() {
        // Get the counter value with get() and set it with compareAndSet().
        // If compareAndSet() returns false, try again until we get
        // through the loop without interference.
        int result;
        do {
            result = count3.get();
        } while (!count3.compareAndSet(result, result + 1));
        return result;
    }
}
```

ניהול המקביליות ע"י סביבת העבודה

- קיימים מקרים שבהם לא נרצה להתעסק בסוגית המקביליות כלל (אילו מקרים?)
- ספריות ומסגרות עבודה מנהלות את ענייני המקבילות "מאחורי הקלעים"
- דוגמאות:
  - ספריית המנשק הגרפי Swing
  - שרתי אינטרנט (כדגומת Tomcat)



- בחלק מהמקרים המקבילות "דולפת" לאפליקציה בעקבות באגים או בעקבות שימוש במחלקות שאינן בטוחות לשימוש בסביבות מרובות חוטים

עבודה עם מחלקות בטוחות

- קיימות כמה מחלקות אשר ידועות כ thread safe
- מחלקות אלו אוכפות בעזרת מבני synchronize ואחרים את שלמות המידע
- לבטיחות זו יש מחיר בביצועים ולכן הוגדרו לאותן מחלקות גם גרסאות קלילות יותר לשימוש בישומי single thread
- לדוגמא:
  - **`StringBuffer`** ומקבילתה **`StringBuilder`**
  - **`Vector`** ומקבילתה **`ArrayList`**