

計算機科学第一（講義）

プログラム・コンパイラ・実行

脇田建

2014.10.7

講義のサポートサイト

❖ **<https://github.com/titech-is-cs115/lecture>**

プログラムの実行方式

プログラムの実行方式

- ❖ 直接実行方式（気合いで頑張る）
- ❖ コンパイラを用いた直接実行方式 (C, C++ など)
- ❖ インタプリタを用いた解釈実行方式 (JavaScript, Ruby, Python など)
- ❖ 仮想命令コンパイラと仮想機械を用いた解釈実行方式 (Java, Scala など)

直接実行方式

プログラム	機械命令の列
実行の主体	ハードウェア（中央演算装置; CPU）が機械語で用意されたプログラムを直接実行
計算	命令の読み込み、解釈、実行、プログラムカウンタの更新

簡単なプログラム例 (C)

```
int simple(int a, int n) {  
    for (int i = 1; i <= n; i++) {  
        a = a + i;  
    }  
    return a;  
}
```


機械命令

	変数
rbx[-4]	i
rbx[-8]	n
rbp[-12]	a

ラベル	命令	命令の引数	簡単な解説
LBB0_1	movl	-12(%rbp), %eax	eax := rbp[-12]
	cmpl	-8(%rbp), %eax	rbp[-8] の値と eax の値を比較
	jg	LBB0_4	比較結果が > なら LBB0_4 から実行
BB#2	movl	-12(%rbp), %eax	eax := rbp[-12]
	addl	-4(%rbp), %eax	eax := eax + rbp[-4]
	movl	%eax, -4(%rbp)	rbp[-4] = %eax
BB#3	movl	-12(%rbp), %eax	eax := rbp[-12]
	addl	\$1, %eax	eax := eax + 1
	movl	%eax, -12(%rbp)	rbp[-12] := eax
	jmp	LBB0_1	次はLBB0_1 から実行
LBB0_4	

機械命令と変数の対応

変数	
rbx[-4]	a
rbx[-8]	n
rbp[-12]	i

ラベル	命令	命令の引数	簡単な解説
LBB0_1	movl	-12(%rbp), %eax	$A := a$
	cmpl	-8(%rbp), %eax	a の値と A の値を比較
	jg	LBB0_4	比較結果が $>$ なら LBB0_4 から実行
BB#2	movl	-12(%rbp), %eax	$A := a$
	addl	-4(%rbp), %eax	$A := \text{つまり、} a = a + i$
	movl	%eax, -4(%rbp)	$a = A$
BB#3	movl	-12(%rbp), %eax	$A := i$
	addl	\$1, %eax	$A := \text{つまり、} i = i + 1$
	movl	%eax, -12(%rbp)	$i := A$
	jmp	LBB0_1	次はLBB0_1 から実行
LBB0_4	

機械命令でのループ

	変数
-4(%rbp)	a
-8(%rbp)	n
-12(%rbp)	i

ラベル	命令	命令の引数	簡単な解説
LBB0_1	movl	-12(%rbp), %eax	$A := a$
	cmpl	-8(%rbp), %eax	a の値と A の値を比較
	jg	LBB0_4	比較結果が $>$ なら LBB0_4 から実行
BB#2	movl	-12(%rbp), %eax	つまり、 $a = i + a$
	addl	-4(%rbp), %eax	
	movl	%eax, -4(%rbp)	
BB#3	movl	-12(%rbp), %eax	つまり、 $i = i + 1$
	addl	\$1, %eax	
	movl	%eax, -12(%rbp)	
	jmp	LBB0_1	次はLBB0_1 から実行
LBB0_4	

機械命令の直接実行

- ❖ CPUの性能の限界を引き出せる.
- ❖ コンパクトなコードを生成できる可能性がある.
- ❖ 猟奇的なプログラミングもやりやすい
- ❖ ↓ 機械命令は, 難しい. デバッグが大変.

コンパイラを用いた直接実行方式

- ❖ 動機：機械命令を人間が準備するのはあまりにつらい。助けて！
- ❖ コンパイラ：人間にとって理解し易いプログラミング言語（高級言語）を機械命令に翻訳するソフトウェア
 - ❖ 記述性が飛躍的に高まり，ソフトウェアの生産性が大幅に高まった
 - ❖ 最適化コンパイラの性能は年々向上しており，生成されたコードは十分な実行性能を誇る。
- ❖ 各種のコンパイラ
 - ❖ C: clang や gcc / C++: clang++ や g++ / OCaml: ocamlc

コンパイラを用いた直接実行方式

\$ **cat simple.c**

```
#include <stdio.h>
```

```
int simple(int a, int n) {
```

```
    for (int i = 1; i <= n; i++) { a += i; }
```

```
    return a;
```

```
}
```

```
int main() { printf("1 + 2 + .. + 10 = %d\n", simple(0, 10)); }
```

プログラムを作成して

\$ **clang -o simple simple.c**

コンパイルして

\$ **./simple**

1 + 2 + .. + 10 = 55

実行

コンパイラを用いる利点

```
int simple(int a, int n) {  
    for (int i = 1; i <= n; i++) {  
        a = a + i;  
    }  
    return a;  
}
```

```
movl    %edi, -4(%rbp)  
movl    %esi, -8(%rbp)  
movl    $1, -12(%rbp)  
        LBB0_1:  
movl    -12(%rbp), %eax  
cmpl    -8(%rbp), %eax  
        jg     LBB0_4  
        ## BB#2:  
movl    -12(%rbp), %eax  
addl    -4(%rbp), %eax  
movl    %eax, -4(%rbp)  
        ...
```

- ❖ メモリ配置 ($-4(\%rbp)$) → 変数名 (a)
- ❖ ラベル (LBB0_4) → 制御構造 (**for** や **return**)
- ❖ 最適化コンパイラを利用するとかなりの実行性能が期待できる

インタプリタを用いた実行方式

- ❖ 動機：「プログラム作成，コンパイル，実行」の繰り返しは面倒．すぐに実行したい．
- ❖ インタプリタ：プログラムを読み取り，意味を解釈しながら，その場で実行するプログラム
 - ❖ プログラム断片を徐々に入力し，少しずつ実行できるので，わかりやすい．
- ❖ 各種のインタプリタ
 - ❖ matlab, ocaml, perl, python, R, ruby, scala, Scheme (gauche, rabbit)

インタプリタを用いた実行例

\$ **scala**

Welcome to Scala version 2.11.7 (Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM, Java 1.8.0_25).

Type in expressions to have them evaluated.

Type :help for more information.

```
scala> def simple(a: Int, n: Int): Int = {  
      |   def aux(a: Int, i: Int): Int = {  
      |     if (i > n) a else aux(a + i, i + 1)  
      |   }  
      |     aux(a, 1);  
      | }
```

simple: (a: Int, n: Int)Int

```
scala> simple(0, 10)
```

res1: Int = 55

```
scala> simple(0, 30)
```

res2: Int = 465

参考：Scalaのインタプリタにファイルを読み込む方法

\$ **scala** Scalaのインタプリタの起動

Welcome to Scala version 2.11.7 (Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM, Java 1.8.0_25).

Type in expressions to have them evaluated.

Type :help for more information.

scala> **:load simple.scala**

Loading simple.scala...

defined object Simple

Scalaファイル (simple.scala) の読み込み

scala> **Simple.simple(0, 10)**

res0: Int = 55

simple.scala で定義されている

simple 関数の呼び出し

インタプリタの働き

- ❖ 入力されたプログラムの構文解析

- ❖ 構文エラーの指摘

```
scala> (+ a 1)
<console>:1: error: ')' expected but
integer literal found.
(+ a 1)
    ^
```

- ❖ プログラムの意味の解釈

- ❖ 意味に関するエラーの指摘

```
scala> b + 1
<console>:11: error: not found:
value b
    b + 1
    ^
```

- ❖ プログラムの意味にしたがって評価・実行

- ❖ 実行結果の出力

```
scala> simple(0, 10)
res7: Int = 55
```


仮想機械を用いた実行方式

- ❖ バイトコードコンパイラ

- ❖ バイトコード（仮想命令） \Leftrightarrow ネイティブコード（機械命令の別名）

- ❖ やや抽象度の高い命令（バイトコード）を準備する。

- ❖ 仮想機械：バイトコード列を解釈・実行する処理系

- ❖ バイトコードのインタプリタ（仮想CPUの真似をするソフトウェアと見做せる．ネイティブコンパイラでの実行より10～20倍遅い）

- ❖ JIT (Just-in-time) コンパイラ：バイトコード断片の仮想命令を解釈・実行しながら，対応するネイティブコードを蓄えておく．次に同じ断片が実行するときには，保存したネイティブコードを実行することで，高速に実行する。

- ❖ バイトコードコンパイラと仮想機械：javac と java, ocamlc と ocamlrun, scalac と scala

仮想機械を用いた実行例

\$ **cat simple.scala**

プログラムを作成

```
object Simple {  
  def simple(a: Int, n: Int): Int = {  
    def aux(a: Int, i: Int): Int = {  
      if (i > n) a else aux(a + i, i + 1)  
    }  
    aux(a, 1);  
  }  
  
  def main(arguments: Array[String]) {  
    println("1 + 2 + ... + 10 = " +  
      simple(0, 10))  
  }  
}
```

\$ **scalac simple.scala**

コンパイル: Simple.class, Simple\$.class

\$ **scala Simple**

1 + 2 + ... + 10 = 55

実行と結果の印字

仮想機械を用いる利点

- ❖ 可搬性 (portability): コンパイルしたプログラムを異なるアーキテクチャの機械で実行できる. OS (Android, iOS, Linux / OS X, UNIX, Windows, zOS) にもアーキテクチャ (ARM, AMD64, x86 / x64, POWER) にも依存しない実行方式.
- ❖ JITを利用すると, 思いの外, 高性能

どうしたことでしょう

Scalaのバイトコードは実は. . .

- ❖ `$ scalac simple.scala`

- ❖ `$ ls`

```
Makefile  Simple.class simple.c  simple.scala
Simple$.class simple          simple.s
```

- ❖ `$ file *.class`

```
Simple$.class: compiled Java class data, version 50.0 (Java 1.6)
```

```
Simple.class: compiled Java class data, version 50.0 (Java 1.6)
```

- ❖ `java -cp /usr/local/opt/scala/libexec/lib/scala-library.jar:. Simple`
`1 + 2 + ... + 10 = 55`

sbt – Scala の開発環境

プログラムの開発ステップ

1. プログラムを書く
2. コンパイル：文法エラーや意味エラーに出会ったらステップ1へ
3. 実行：実行時エラーに出会ったらステップ1へ
4. テスト：テストに失敗したら、頭を冷してからステップ1へ
5. 完成！

Scala開発の風景 – 各ステップでどんな作業をしているか考えて下さい

♣ scalac simple.scala

simple.scala:1: error: expected class or object definition

```
def simple(a: Int, n: Int): Int = {
```

^

simple.scala:8: error: expected class or object definition

```
def main(arguments: Array[String]) {
```

^

two errors found

♣ scalac simple.scala

simple.scala:4: warning: a pure expression does nothing in statement position; you may be omitting necessary parentheses

```
if (i > n) a else aux(a + i, i + 1)
```

^

simple.scala:6: error: type mismatch;
found : Unit

required: Int

```
aux(a, 1);
```

^

one warning found

one error found

♣ scalac simple.scala

♣ scala Simple

1 + 2 + ... + 10 = 14

♣ scalac simple.scala

♣ scala Simple

1 + 2 + ... + 10 = 55

Scala開発の風景 – 各ステップでどんな作業をしているか考えて下さい

- ❁ `scalac simple.scala`
- ❁ `scalac simple.scala`
- ❁ `scalac simple.scala`
- ❁ `scala Simple`
- ❁ `scalac simple.scala`
- ❁ `scala Simple`

プログラミング作業は、コンパイル、実行、テストの連続（たくさんタイピングしなくてはいけない）

しかも、scalac の実行は時間がかかる

bashの便利な機能

- ❖ コマンド実行履歴機能：↑キー、↓キー
 - ❖ 以前実行したコマンドの再実行
- ❖ コマンド行編集機能：Ctrl-a, Ctrl-b, Ctrl-f, Ctrl-e
 - ❖ コマンド入力中の小さな間違いを素早く修正するのに便利
- ❖ コマンド再実行：!
 - ❖ !! – 直前に実行したコマンドの再実行
 - ❖ !sc – コマンド実行履歴のなかで "sc" で始まるコマンドを探し、それを実行

さらに便利な sbt (Scala build tool)

- ❖ Scala の開発環境（地味だけれど、とてもいい）
 - ❖ Scalaプログラムのビルド（コンパイル & 統合）
 - ❖ 必要な Scala パッケージの自動インストール
 - ❖ 継続的コンパイル、継続的テスト
 - ❖ Scala インタプリタとの統合
 - ❖ Java のサポート
- ❖ 実はみなさんはすでに使っています。

sbtの利用

☛ sbt

Getting org.scala-sbt sbt 0.13.8 ...

:: retrieving :: org.scala-sbt#boot-app

confs: [default]

52 artifacts copied, 0 already retrieved (17674kB / 1412ms)

[info] Set current project to cs1-lx00a (in build file: /Users/wakita/Dropbox%20(smartnova)/doc/classes/cs1/lecture/lx00a/)

> compile

[info] Updating {file:/Users/wakita/Dropbox%20(smartnova)/doc/classes/cs1/lecture/lx00a/}lx00a...

[info] Resolving jline#jline;2.12.1 ...

[info] Done updating.

[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...

[success] Total time: 11 s, completed 2015/10/06 6:01:11

> run

[info] Running StudentInformation

[info] {"family":"あなたの姓に書き換えて下さい","name":"あなたの名に書き換えて下さい", ...}

[success] Total time: 1 s, completed 2015/10/06 6:01:14

> exit



sbtp

sbt の起動

```
[info] Set current project to cs1-lx00a (in  
build file: /Users/wakita/tmp/lx00a/)
```

run コマンドでコンパイル & 実行

```
> run
```

```
[info] Compiling 1 Scala source to /Users/  
wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...  
[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-  
a.scala:2: expected class or object definition  
[error] def simple(a: Int, n: Int): Int = {  
[error] ^  
  
[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-  
a.scala:9: expected class or object definition  
[error] def main(arguments: Array[String]) {  
[error] ^  
[error] two errors found  
[error] (compile:compileIncremental)  
Compilation failed  
[error] Total time: 2 s, completed 2015/10/06  
6:11:54
```

文法エラーだ！

プログラムを修正して、再実行

```
> run
```

```
[info] Running Simple  
[info] 1 + 2 + ... + 10 = 14  
[success] Total time: 0 s, completed  
2015/10/06 6:12:03
```

プログラムを修正して、再実行

```
> run
```

```
[info] Compiling 1 Scala source to /Users/  
wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...  
[info] Running Simple  
[info] 1 + 2 + ... + 10 = 55  
[success] Total time: 3 s, completed  
2015/10/06 6:12:15
```


不精者のための sbt

- ❖ "run" を何度も入力するのが面倒じゃ
- ❖ コマンド履歴（↑と↓）を使って下さい
- ❖ ↑と↓を入力するのも面倒じゃ
- ❖ なんとなくワガママ
- ❖ そういうアンタに
"~run" コマンド

☛ sbt

sbt セッションを通して実行したのは最初の ~run コマンドだけ

[info] Set current project to cs1-lx00a (in build file: /Users/wakita/tmp/lx00a/)

> ~run

[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...

[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-a.scala:2: expected class or object definition

[error] def simple(a: Int, n: Int): Int = {

[error] ^

[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-a.scala:9: expected class or object definition

[error] def main(arguments: Array[String]) {

[error] ^

[error] two errors found

[error] (compile:compileIncremental) Compilation failed

[error] Total time: 2 s, completed 2015/10/06 6:27:08

1. Waiting for source changes... (press enter to interrupt)

[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...

[info] Running Simple

[info] 1 + 2 + ... + 10 = 14

[success] Total time: 3 s, completed 2015/10/06 6:27:19

2. Waiting for source changes... (press enter to interrupt)

[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...

[info] Running Simple

[info] 1 + 2 + ... + 10 = 55

[success] Total time: 1 s, completed 2015/10/06 6:27:30

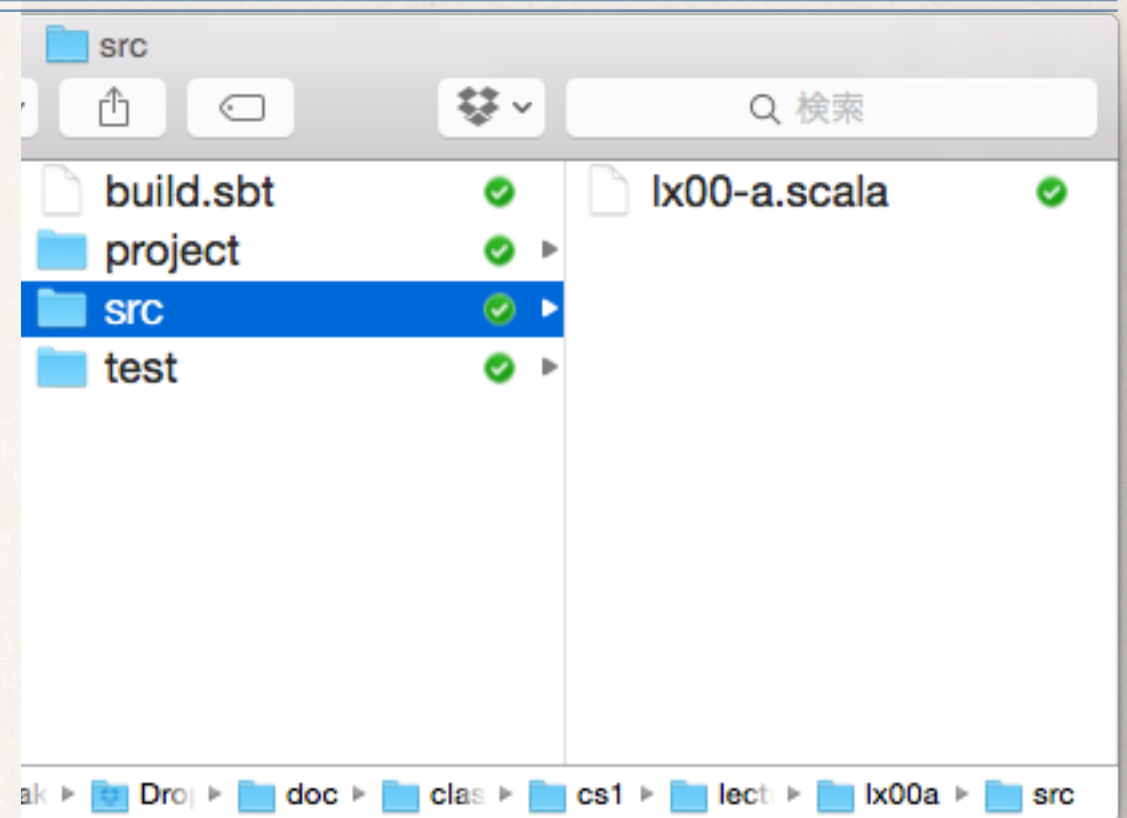
3. Waiting for source changes... (press enter to interrupt)

プログラムを修正すると
自動的にコンパイル&実行

継続的実行をやめるときは
enter

sbt の利用方法

- ❖ 作業用のフォルダを準備する
 - ❖ **build.sbt**
プロジェクトの設定
 - ❖ **src**
プログラムを保存するディレクトリ
 - ❖ **test**
テストを保存するディレクトリ
 - ❖ **project**
sbtが勝手に作る



次回，小テスト

本日の前半の内容について復習して下さい
