Azzolini Riccardo 2021-03-01

Paradigmi di programmazione: il paradigma imperativo

1 Paradigmi di programmazione

Nell'ambito della filosofia della scienza, il termine *paradigma* indica "un insieme di teorie, standard e metodi che rappresentano un modo di organizzare la conoscenza, cioè un modo di guardare il mondo" (T. Kunh, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, 1970).

Analogamente, un **paradigma di programmazione** fornisce un metodo per concettualizzare il processo di computazione e per organizzare e strutturare i compiti che il calcolatore deve svolgere. I principali paradigmi di programmazione sono:

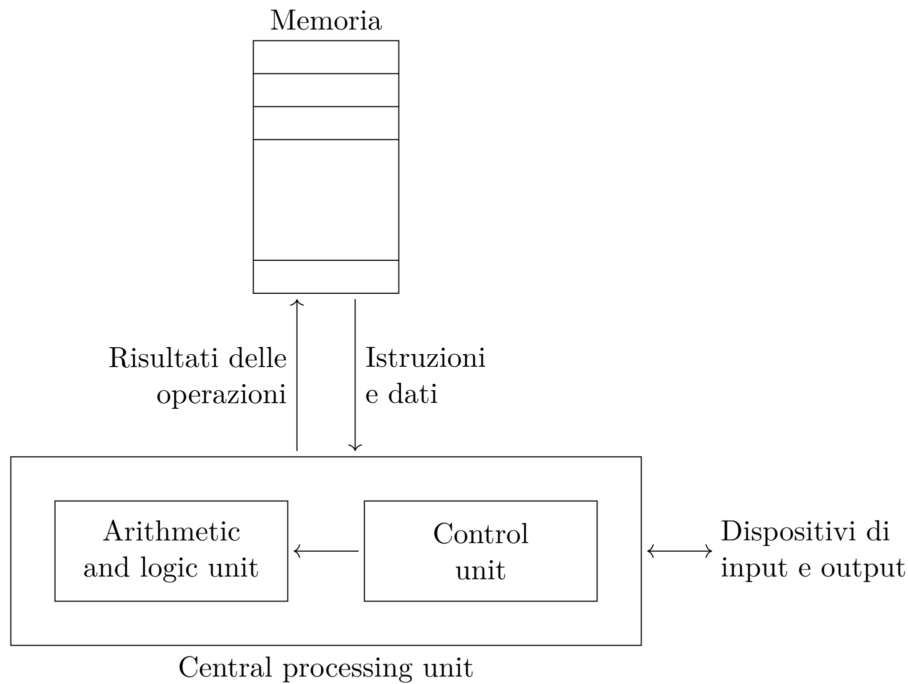
- **imperativo** (linguaggi Pascal, C, ecc.);
- **funzionale** (LISP, FP, …);
- **logico** (Prolog).

L'**object-oriented programming** (OOP) è spesso considerata un paradigma, ma è più corretto definirla come un concetto ortogonale ai principali paradigmi, in quanto più essere combinata con ciascuno di essi: nel caso dei linguaggi ad oggetti più usati (Java, C++, ecc.) si tratta di un'estensione della programmazione imperativa, mentre ad esempio il linguaggio Scala combina l'OOP con la programmazione funzionale.

Il paradigma imperativo è quello finora più usato in ambito industriale, quindi è utile presentarne le caratteristiche, al fine di confrontarlo con il paradigma funzionale (che sarà l'oggetto di questo corso).

2 Macchina di von Neumann

Il paradigma imperativo si basa su elementi derivati dalla struttura dei calcolatori. La struttura concettuale dei calcolatori moderni è la **macchina di von Neumann** (che viene arricchita in vari modi, ma rimane sostanzialmente equivalente). Essa fu introdotta da von Neumann nel 1946, come proposta di un dispositivo realizzabile fisicamente che fosse equivalente alla *macchina di Turing universale*, un modello matematico in grado di calcolare tutto ciò che è calcolabile.



La macchina di von Neumann ha quattro principali componenti.

- La **memoria** contiene sia i dati che le istruzioni.
- La **Central Processing Unit** (**CPU**) è suddivisa in:
  - **Arithmetic and Logic Unit** (**ALU**), che implementa le operazioni di base sui numeri interi;[1]
  - **Control Unit**, che gestisce l'esecuzione delle istruzioni, che consiste in un **ciclo di esecuzione** a tre fasi:
    1. **fetch**: preleva dalla memoria la prossima istruzione da eseguire;
    2. **decode**: interpreta l'istruzione, riconoscendone il significato;
    3. **execute**: esegue le operazioni elementari corrispondenti all'istruzione.
- Dei **dispositivi di input e output** permettono l'interazione con l'utente.

[1] Tramite opportune codifiche, i numeri interi possono essere utilizzati per rappresentare dati di qualsiasi tipo, quindi un modello di calcolo teorico può limitarsi a trattare i numeri interi.

3 Linguaggio macchina e assembler

Ogni processore ha un proprio **linguaggio macchina**, che comprende un'istruzione per ciascun'operazione implementata nell'hardware. Poiché la tecnologia usata per implementare i calcolatori si presta naturalmente alla rappresentazione di valori binari, le istruzioni sono sequenze di bit che codificano l'operazione da eseguire e gli operandi su cui eseguirla (che possono essere costanti, registri, locazioni di memoria, ecc.). Il formato esatto delle istruzioni dipende dal processore.

Il linguaggio **assembler** di un processore è la versione simbolica del linguaggio macchina, nella quale le istruzioni sono rappresentate da nomi (simboli) significativi anziché da sequenze di bit.

3.1 Esempio di assembler

A scopo illustrativo, si consideri un assembler "giocattolo" con le seguenti caratteristiche:

- Le *celle di memoria* sono individuate da numeri interi e contengono numeri interi.
- I *registri dei processore* sono indicati con `R1`, `R2`, ... e contengono numeri interi.
- Le *istruzioni di trasferimento* sono `LOAD` e `STORE`:
  - `LOAD R, X` trasferisce il contenuto della cella `X` nel registro `R`;
  - `STORE R, X` trasferisce il contenuto del registro `R` nella cella `X`.
- Le *istruzioni aritmetico/logiche* sono `ADD`, `SUB`, `MUL`, `DIV`, `LT`, `GT` ed `EQ`. Ad esempio:
  - `ADD R1, R2` calcola la somma tra i valori contenuti in `R1` e `R2`, e scrive il risultato in `R1`;
  - `LT R1, R2, R3` scrive in `R1` il valore 1 se `R2` < `R3`, altrimenti scrive in `R1` il valore 0.
- Le *istruzioni di salto*, che gestiscono il flusso di esecuzione del programma, sono `JUMP` e `JZERO`:
  - `JUMP alfa` è un salto incondizionato all'istruzione con etichetta `alfa`;

    ```
          JUMP alfa
          ...
    alfa: ...
    ```

  - `JZERO R1, alfa` è un salto condizionato all'istruzione con etichetta `alfa`, che viene eseguito se `R1` contiene il valore 0, altrimenti si prosegue a eseguire l'istruzione successiva a `JZERO`.

```
            JZERO R1, alfa
            ...
      alfa: ...
```

Questo linguaggio può essere usato, ad esempio, per implementare l'algoritmo di Euclide, che calcola il massimo comune divisore (MCD) di due numeri x e y. A parole, quest'algoritmo può essere descritto come la seguente sequenza di operazioni elementari:

1. Si calcola il *resto* della divisione di x per y.
2. Se $resto \neq 0$, si ricomincia dal passo 1 con $x \leftarrow y$ e $y \leftarrow resto$, altrimenti si prosegue con il passo successivo.
3. L'MCD è il valore di y.

Una possibile implementazione nel linguaggio assembler appena presentato è questa (qui si indicano con `//` i commenti, usati per chiarire il significato del codice):

```
// input: la cella 101 contiene x e la cella 102 contiene y
      LOAD  R1, 101   // R1 <- x
      LOAD  R2, 102   // R2 <- y

      // calcola x % y
alfa: DIV   R1, R2    // R1 <- x / y
      MUL   R1, R2    // R1 <- (x / y) * y
      LOAD  R2, 101   // R2 <- x
      SUB   R2, R1    // R2 <- x - ((x / y) * y)  (resto)

      JZERO R2, fine  // se resto = 0 vai a fine
      // altrimenti (resto != 0) continua
      LOAD  R1, 102   // R1 <- y
      STORE R1, 101   // x <- y
      STORE R2, 102   // y <- resto
      JUMP  alfa

fine: LOAD  R1, 102   // R1 <- y  (MCD)
      STORE R1, 103   // 103 <- MCD
// output: la cella 103 contiene l'MCD
```

3.2 Svantaggi

Come si può in parte intuire dall'esempio precedente, la programmazione in linguaggio macchina o assembler ha diversi svantaggi:

- è necessario conoscere il linguaggio e i dettagli dell'architettura dello specifico processore utilizzato;

- è impossibile trasportare i programmi da una macchina a una diversa; e correggerlo in presenza di errori;
- la struttura logica del programma è nascosta, quindi risulta difficile comprendere il programma
- il programmatore si specializza nell'uso di "trucchi" legati alle caratteristiche specifiche della macchina, rendendo ancora più difficili da comprendere e modificare i programmi.

4 Linguaggi ad alto livello

L'obiettivo principale dei **linguaggi ad alto livello** è proprio superare i limiti del linguaggio macchina / assembler — in particolare, rendere la programmazione indipendente dalle caratteristiche peculiari della macchina utilizzata. Essi aggiungono un *livello di astrazione* rispetto all'architettura della macchina, introducendo in particolare due tipi di astrazioni: *astrazioni sui dati* e *astrazioni sulle istruzioni.*

4.1 Semantica e macchine astratte

La **semantica**, cioè il significato, delle istruzioni di un linguaggio viene spesso descritta sotto forma di **semantica operazionale**, cioè in termini delle operazioni elementari corrispondenti a ciascuna istruzione.

La semantica operazionale del linguaggio assembler specifica il significato di ciascun'istruzione in termini di operazioni del processore, indicando il cambiamento dello stato della macchina che l'istruzione provoca.

La semantica operazionale di un linguaggio ad alto livello potrebbe essere descritta associando a ciascun'istruzione del linguaggio una sequenza di istruzioni assembler della macchina sottostante, ma ciò sarebbe contrario all'obiettivo di indipendenza dall'architettura, dunque si fa invece riferimento a una **macchina astratta**, in grado di effettuare operazioni più ad alto livello rispetto alle operazioni elementari dei processori reali. Il programmatore può allora scrivere i programmi in linguaggio ad alto livello facendo riferimento a tale macchina astratta, senza pensare alle operazioni del processore.

4.2 Variabili e assegnamento

Uno dei principali concetti presenti nei linguaggi (imperativi) ad alto livello è quello di **variabile**, che è un contenitore preposto a contenere dei valori, ovvero un'astrazione del concetto di locazione di memoria. Allora, l'**assegnamento** di un valore a una variabile è un'astrazione dell'operazione `STORE`, e il **deferenziamento** di una variabile è un'astrazione dell'operazione `LOAD`.

L'istruzione di assegnamento può essere indicata come[2]

$$\textit{variabile} \leftarrow \textit{espressione}$$

e la sua semantica operazionale (rispetto alla macchina astratta) è la seguente:

1. viene calcolato il valore dell'*espressione*;
2. il risultato ottenuto viene assegnato alla *variabile*.

Ad esempio, per eseguire l'istruzione `x` ← `y + z`:

1. si valuta l'espressione `y + z`, recuperando i valori contenuti in `y` e `z` (cioè deferenziando `y` e `z`) e facendone la somma;
2. si pone il risultato nella variabile `x`.

Dalla descrizione della semantica dell'assegnamento si può individuare uno degli svantaggi dei linguaggi ad alto livello: essi hanno operazioni che sono inevitabilmente più complesse rispetto ai linguaggi a basso livello, quindi la descrizione della semantica risulta più difficile, e richiede l'introduzione di un nuovo lessico: ad esempio, bisogna definire cosa significhi "calcolare il valore di un'espressione". Allora, quando si progetta un linguaggio ad alto livello bisogna prestare attenzione a comunicarne in modo chiaro la semantica, poiché:

- conoscerla bene (anche se non necessariamente a livello formale) è importante per scrivere programmi corretti;
- al fine di evitare che esecutori diversi implementino comportamenti diversi, è fondamentale fornire a chi realizza un esecutore per il linguaggio una descrizione della semantica il più precisa e meno ambigua possibile.

4.3 Tipi

Nella memoria, tutte le variabili sono rappresentate come sequenze di bit, che possono essere interpretate in modi diversi: ad esempio, la sequenza `01000001` potrebbe essere interpretata come il numero intero `10` o come il carattere `'A'`. Le istruzioni del linguaggio macchina fanno su tali sequenze di bit una pura manipolazione simbolica, cioè modificano i bit in base a delle regole prestabilite, senza interpretarli in alcun modo (ma, chiaramente, le regole sono progettate in modo da corrispondere a operazioni sui valori che i bit rappresentano secondo una qualche interpretazione).

La nozione di **tipo** fornisce un'astrazione rispetto alla rappresentazione dei dati, permettendo al programmatore di usare variabili di vari tipi senza bisogno di conoscerne l'effettiva rappresentazione. In particolare, il tipo di una variabile specifica:

[2] L'uso di una freccia (invece che dell'uguale) per rappresentare l'assegnamento rende più esplicito il flusso delle informazioni.

- l'insieme dei valori che possono essere memorizzati nella variabile;
- l'insieme delle operazioni che possono essere effettuate sulla variabile.

4.4 Astrazioni sulle istruzioni

Le principali astrazioni sulle istruzioni fornite dai linguaggi ad alto livello sono le varie **strutture di controllo**, come ad esempio quelle fondamentali della programmazione strutturata: *sequenza*, *selezione* e *iterazione*. Si è dimostrato che questi tre costrutti sono sufficienti a implementare tutti i possibili programmi (cioè danno luogo a un modello di calcolo di potenza equivalente alle macchine di Turing), ma per convenienza molti linguaggi forniscono anche altre astrazioni sulle istruzioni, tra cui ad esempio:

- `break`, `continue` e `return` (che tecnicamente costituiscono una violazione delle regole originali della programmazione strutturata);
- **funzioni** e/o **procedure**, che consentono di assegnare dei nomi a delle sequenze di istruzioni, arricchendo così il linguaggio con nuove istruzioni definite dal programmatore.

5 Compilatori e interpreti

Per poter eseguire un programma scritto in un linguaggio ad alto livello L, è necessario disporre di un esecutore per tale linguaggio, ovvero di un'implementazione della macchina astratta sulla macchina reale M. Tale implementazione è costituita da un opportuno strumento di *traduzione*, che può essere un compilatore o un interprete.

- Un **compilatore** è un programma che traduce un programma del linguaggio L in un programma *equivalente* del linguaggio macchina di M.
- Un **interprete** è un programma che simula direttamente la macchina astratta:
  1. legge un'istruzione di un programma del linguaggio L;
  2. effettua le operazioni del linguaggio macchina corrispondenti al significato di tale istruzione;
  3. passa a considerare l'istruzione successiva.

6 Linguaggi a oggetti

I **linguaggi a oggetti** forniscono un'ulteriore astrazione, che combina le astrazioni sui dati e sulle istruzioni: le *classi* modellano un nuovo tipo di dato, i cui valori sono *oggetti* caratterizzati da uno *stato* (astrazione sui dati) e da un *comportamento* (astrazione sulle istruzioni).

7 Riassunto del paradigma imperativo

Riassumendo, la programmazione imperativa consiste nel modificare variabili utilizzando gli assegnamenti e controllando il flusso di esecuzione mediante le istruzioni di controllo.

Ciascuno dei concetti di un linguaggio imperativo ad alto livello può essere mappato più o meno direttamente su un concetto presente nella macchina di von Neumann:

- una variabile corrisponde a una o più celle di memoria;
- la deferenziazione di una variabile corrisponde all'istruzione `LOAD`;
- l'assegnamento corrisponde all'istruzione `STORE`;
- le strutture di controllo corrispondono alle istruzioni di salto.

La conseguenza di questa stretta corrispondenza è che si attribuisce un significato ai programmi imperativi *interpretandoli come sequenze di assegnamenti* della macchina di von Neumann, e *concettualizzando le strutture dati* (astrazioni sui dati) *come composizione delle loro componenti di base*.

Ad esempio, si consideri il problema di calcolare il prodotto scalare di due vettori di dimensione n. In Java, come in molti altri linguaggi imperativi, i vettori di dimensione n possono essere definiti "impacchettando" n variabili di tipo numerico:

```
int[] a = new int[n];
int[] b = new int[n];
```

Il prodotto scalare di `a` e `b` viene allora calcolato "a word at a time", considerando una componente alla volta tramite la ripetizione di un assegnamento all'interno di un ciclo:

```
int c = 0;
int i = 0;
while (i < n) {
    c = c + a[i] * b[i];
    i = i + 1;
}
```