

Rappresentazione dell' informazione

Cenni, necessari per capire le caratteristiche dei tipi di dato e delle limitazioni dell'aritmetica del computer

Cos'è l'informazione ?

Tutto quello che viene manipolato da un calcolatore:

- Numeri (naturali, interi, reali, . . .)
- Caratteri ('a', 'b',... '0',..., '9', '%',.....)
- Stringhe ("aba", "gatto"....)
- Immagini
- Suoni
- Programmi
-

Cos'è l'informazione ?

Tutta l'informazione presente sul computer deve essere memorizzata in forma **binaria**, come sequenze di 0 ed 1:

- Le unità di memorizzazione sono formate da aggregati di dispositivi fisici elementari con due stati, uno associato a 0 e l'altro associato ad 1
- È molto più semplice da realizzare rispetto a qualcosa che distingue fra tre o più stati

Rappresentazione dei naturali

- Un numero naturale è un oggetto matematico, che può essere rappresentato mediante una sequenza di simboli di un alfabeto fissato
- Il numero 12 può essere rappresentato in molti modi:
 - **XII** numerazione romana (additiva)
 - **12** sequenza dei due caratteri in rappresentazione decimale posizionale
 - **1100** rappresentazione binaria posizionale
 - **dodici** rappresentazione come stringa di caratteri
 -

Rappresentazione dei naturali

- Siamo interessati alle rappresentazioni in cui sia facile manipolare i naturali con le comuni operazioni aritmetiche
- Quindi entreremo in dettaglio sulle caratteristiche della **rappresentazione posizionale** nelle varie basi
- In queste rappresentazioni una cifra contribuisce con un valore diverso al numero a seconda della **posizione** in cui si trova, es:

1100 ← Contribuisce come 4

Rappresentazione dei naturali

- Siamo interessati alle rappresentazioni in cui sia facile manipolare i naturali con le comuni operazioni aritmetiche
- Quindi entreremo in dettaglio sulle caratteristiche della **rappresentazione posizionale** nelle varie basi
- In queste rappresentazioni una cifra contribuisce con un valore diverso al numero a seconda della **posizione** in cui si trova, es:

Contribuisce come 8 1100 Contribuisce come 4

Rappresentazione posizionale

- Un numero è rappresentato da una sequenza finita di cifre di un certo **alfabeto**:

$$c_{n-1}c_{n-2} \dots c_1c_0 = N_b$$

- c_{n-1} è detta cifra più significativa
- c_0 è detta cifra meno significativa
- Il numero b di cifre diverse (dimensione dell'**alfabeto**) è detto **base** del sistema di numerazione posizionale

Rappresentazione posizionale in base b

- Ad ogni cifra è associato un valore compreso tra 0 e $b-1$ ad esempio

| Base | Alfabeto | Sistema |
|------|------------------|-------------|
| 2 | 01 | Binario |
| 8 | 01234567 | Ottale |
| 10 | 0123456789 | Decimale |
| 16 | 0123456789ABCDEF | Esadecimale |

Rappresentazione posizionale in base b

$$c_{n-1}c_{n-2} \cdots c_1c_0 = N_b$$

Il numero N rappresentato da una sequenza di cifre N_b dipende dalla base b

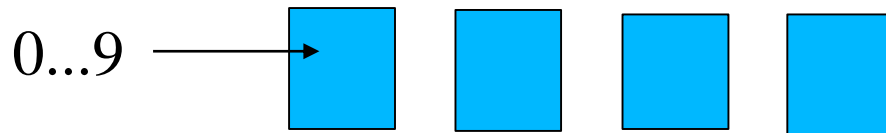
$$b^{n-1} * c_{n-1} + \cdots + b^0 * c_0 = \sum_{i=0}^{n-1} b^i * c_i = N$$

La stessa rappresentazione ha valori diversi in basi diverse

| Sistema | Base | Rappresentazione | Valore (base 10) |
|-------------|------|------------------|------------------|
| Binario | 2 | 101 | 5 |
| Ottale | 8 | 101 | 65 |
| Decimale | 10 | 101 | 101 |
| Esadecimale | 16 | 101 | 257 |

Intervallo di rappresentazione

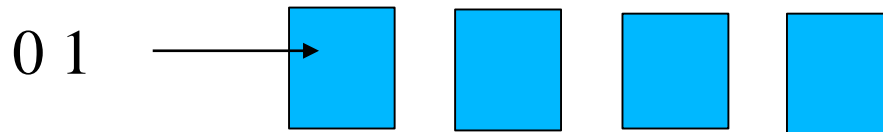
- Fissato il numero di cifre e una base abbiamo solo un numero finito di rappresentazioni
 - Sono tutte le combinazioni possibili di cifre
 - Ad esempio con 4 posizioni e rappresentazione decimale



- si hanno le combinazioni da **0 a 9999**
- Cioè $10000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^4$ combinazioni nell'intervallo **$0 \dots 10^4 - 1$**
- Questo viene detto **intervallo di rappresentazione**

Intervallo di rappresentazione

- Vediamo un esempio con la numerazione binaria:
- Ad esempio con 4 posizioni cifre 0, 1



- si hanno le combinazioni da 0 a 1111
- Cioè $16 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^4$ combinazioni nell'intervallo di rappresentazione $0 \dots 2^4 - 1$
- Questo vale in generale, in base b ed n posizioni si ha la possibilità di rappresentare al più b^n numeri diversi con intervallo di rappresentazione $0 \dots b^n - 1$

Conversioni da base 10 a base b

$$b^{n-1} * c_{n-1} + \dots + b^1 * c_1 + b^0 * c_0 = N$$

Basta osservare che

- c_0 è il resto della divisione di N per b
- $b^{n-2} * c_{n-1} + \dots + b^0 * c_1$ è invece il quoziente della divisione per b
- Quindi effettuando delle divisioni successive per b possiamo ottenere le cifre della rappresentazione in base b (dalla meno significativa alla più significativa)

Conversioni da base 10 a base b

```
/* num numero da convertire  
   b base */
```

```
i = 0;
```

```
while (num != 0) {
```

```
    c[i] = num % b;
```

```
    num = num / b;
```

```
    i++;
```

```
}
```

- Dove abbiamo rappresentato con $\mathbf{c}[\mathbf{i}]$ l' i -esima cifra c_i della rappresentazione
- Lo implementeremo in laboratorio....

Rappresentazione dei numeri nel computer

- Supponiamo ora di avere a disposizione una parola di n bit per rappresentare un numero
- Discutiamo come rappresentare, naturali, interi e reali
- Abbiamo come intervallo di rappresentazione $0 \dots 2^n - 1$

In totale, abbiamo 2^n codifiche e dobbiamo decidere come usarle.....

Rappresentazione dei numeri naturali

- Se abbiamo a disposizione n bit
- Abbiamo come intervallo di rappresentazione di $0 \dots 2^n - 1$
- Possiamo quindi rappresentare questo intervallo dei naturali associando ad ogni rappresentazione il numero corrispondente
- È quello che fanno i tipi **unsigned** del C

Rappresentazione dei numeri naturali

- Prime considerazioni
- In ogni computer, **abbiamo solo un insieme finito di naturali** (si usano parole di lunghezza finita)
- L'insieme **non è più chiuso rispetto agli usuali operatori aritmetici !**
 - Esempio: su 4 cifre decimali $9999+1=10000$ non più rappresentabile ...
 - Avviene ha un fenomeno detto **overflow**
 - Bisogna decidere cosa fare
 - Ragionare in modulo, segnalare una eccezione, dipende dal linguaggio usato

Rappresentazione dei numeri naturali

- .. ulteriori considerazioni
- Le operazioni aritmetiche non sono più associative e commutative ...Ad esempio:
 - $(9999+1)-9000$ da overflow mentre
 - $9999(+1-9000)$ da 1000 che può essere rappresentato correttamente
 - L'ordine in cui si applicano gli operatori **diventa rilevante per la correttezza del calcolo!**

Rappresentazione dei numeri interi

- Abbiamo a disposizione n bit, con intervallo di rappresentazione $0 \dots 2^n - 1$
- Dobbiamo dividerlo fra interi negativi e positivi!
- Considereremo due strategie
 - Rappresentazione in **modulo e segno**
 - Rappresentazione in **complemento alla base** (a 2 nel nostro caso)

Interi: modulo e segno

- Usiamo il bit più significativo per rappresentare il segno (0 positivo 1 negativo) ed il resto dei bit per il modulo,
- quindi per il modulo abbiamo a disposizione $n-1$ bit, con intervallo di rappresentazione $0 \dots 2^{n-1}-1$
- Esempio con 4 cifre binarie abbiamo

| binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno |
|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 0000 | +0 | 0100 | +4 | 1000 | -0 | 1100 | -4 |
| 0001 | +1 | 0101 | +5 | 1001 | -1 | 1101 | -5 |
| 0010 | +2 | 0110 | +6 | 1010 | -2 | 1110 | -6 |
| 0011 | +3 | 0111 | +7 | 1011 | -3 | 1111 | -7 |

Interi: modulo e segno

Problemi :

- Doppia rappresentazione dello 0
- Gli algoritmi per le operazioni aritmetiche sono complicati (analisi per casi ...)
- Entrambe le cose sono risolte dalla rappresentazione in complemento

| binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno |
|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 0000 | +0 | 0100 | +4 | 1000 | -0 | 1100 | -4 |
| 0001 | +1 | 0101 | +5 | 1001 | -1 | 1101 | -5 |
| 0010 | +2 | 0110 | +6 | 1010 | -2 | 1110 | -6 |
| 0011 | +3 | 0111 | +7 | 1011 | -3 | 1111 | -7 |

Interi: complemento alla base

Un intero x viene rappresentato (b base n cifre) da

- La rappresentazione del suo modulo $|x|$ se $x \geq 0$
 - La rappresentazione di $b^n - |x|$ se $x < 0$
-
- Esempio con 4 cifre binarie abbiamo

| binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno |
|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 0000 | 0 | 0100 | +4 | 1000 | -8 | 1100 | -4 |
| 0001 | +1 | 0101 | +5 | 1001 | -7 | 1101 | -3 |
| 0010 | +2 | 0110 | +6 | 1010 | -6 | 1110 | -2 |
| 0011 | +3 | 0111 | +7 | 1011 | -5 | 1111 | -1 |

Interi: complemento alla base

Bizzarro ma...

- Per i positivi la cifra più significativa è 0, per i negativi 1
- Gli algoritmi sono più semplici
 - $6 - 7 = 0110 + 1001 = 1111 = -1$
 - $-1 - 5 = 1111 + 1011 = 11010 = -6$

| binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno | binario | decimale segno |
|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 0000 | 0 | 0100 | +4 | 1000 | -8 | 1100 | -4 |
| 0001 | +1 | 0101 | +5 | 1001 | -7 | 1101 | -3 |
| 0010 | +2 | 0110 | +6 | 1010 | -6 | 1110 | -2 |
| 0011 | +3 | 0111 | +7 | 1011 | -5 | 1111 | -1 |

Interi: complemento alla base

Bizzarro ma...

- Esempio: l'addizione si ottiene sommando le rappresentazioni e ragionando in modulo
 - $6 - 7 = 0110 + 1001 = 1111 = -1$
 - $-1 - 5 = 1111 + 1011 = 11010 = -6$
- Rende molto più semplice la realizzazione ad hardware (CPU – Unità Aritmetico Logica ALU)
- È la rappresentazione usata dai vari tipi **int** del C e di molti altri linguaggi

Complementazione

In generale come si trova la rappresentazione di $x < 0$ data quella di $|x|$?

- Ad esempio la rappresentazione in complemento a 2 di -2 data quella di 2 (0010) ?
- Per definizione, se utilizzo la base b e n cifre allora
$$-x = b^n - |x|$$
- Quindi basta trovare un algoritmo semplice per trovare le cifre del risultato della sottrazione a partire da quelle di $|x|$
- Vediamo quelle per la rappresentazione in base 2 senza entrare nel dettaglio della dimostrazione formale

Complementazione

Se ho n cifre e rappresentazione in base 2..

$$-x = 2^n - |x|$$

- Ad esempio con 4 cifre: rappresentiamo -6 e -2

| | |
|----------|-------------|
| $2^4=16$ | 10000 |
| 6 | 0110 |
| 10 (-6) | 1010 |

| | |
|----------|-------------|
| $2^4=16$ | 10000 |
| 2 | 0010 |
| 14 (-2) | 1110 |

Quindi basta:

- Ricopiare le cifre meno significative fino al primo 1 (compreso)
- Invertire tutte le altre più significative

Interi: complemento alla base

In generale

- Con n cifre in base b
- Si possono rappresentare gli interi nell'intervallo

$$\left[-\frac{b^n}{2}, \frac{b^n}{2} - 1 \right]$$

- Se consideriamo la base 2 abbiamo come intervallo di rappresentazione:

$$[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$$

- Valgono quindi le stesse considerazioni fatte per gli interi riguardo a **overflow** e **ordine di applicazione degli operatori**

Come si trova l'overflow ?

- Vediamo meglio come avviene l'addizione con rappresentazione in complemento a 2 con n cifre
 - Vengono sommati bit a bit i due numeri a partire dalla cifra meno significativa (posizione 0)
 - Sia r_{n-1} il riporto dalla posizione più significativa (la $n - 1$) e r_{n-2} il penultimo riporto (posizione $n - 2$)
 - È possibile dimostrare che si ha overflow solo se i due riporti sono diversi cioè $r_{n-1} \neq r_{n-2}$
- Vediamo alcuni esempi

Overflow: esempi

Non c'è overflow

| | | | | | | |
|-----|----------|----------|---|---|---|---|
| rip | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| +9 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| +3 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| +12 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

| | | | | | | |
|-----|----------|----------|---|---|---|---|
| rip | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| -9 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| -3 | | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| -12 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |

C'è overflow

| | | | | | | |
|-----|----------|----------|---|---|---|---|
| rip | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| +9 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| +8 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| +17 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | | | |
|-----|----------|----------|---|---|---|---|
| rip | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| -9 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| -8 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| -17 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

5 cifre intervallo di rappresentazione da -16 a +15

Numeri frazionari

- I numeri frazionari fra 0 ed 1 si rappresentano comunemente in base b come:

$$N_b = 0.c_{-1}c_{-2} \cdots c_{-n}$$

- Al solito il peso delle cifre è determinato dalla loro posizione e dalla base b utilizzata

$$b^{-1} * c_{-1} + \cdots + b^{-n} * c_{-n} = \sum_{i=-n}^{-1} b^i * c_i = N_b$$

- Ad esempio, 0.587 in base 10, corrisponde a $10^{-1} * 5 + 10^{-2} * 8 + 10^{-3} * 7$

Numeri frazionari

- Usiamo la definizione per convertire in decimale un numero frazionario binario:

$$N_b = \sum_{i=-n}^{-1} b^i * c_i$$

- Ad esempio, **0.1011** in base 2, corrisponde a $2^{-1} * 1 + 2^{-3} * 1 + 2^{-4} * 1 = 0.6875$

Numeri frazionari

- Anche nel caso dei numeri frazionari dato il numero di cifre n , il numero di configurazioni rappresentabili è finito:
 - Si introducono degli errori di rappresentazione
 - L'errore è sempre minore di b^{-n} dove b è la base di rappresentazione
- Si hanno di nuovo problemi di non rappresentabilità del risultato di una operazione

Conversione da base 10 a base 2

- Il metodo piu semplice consiste nell'effettuare una sequenza di moltiplicazioni per 2 prendendo ad ogni passo la parte intera del risultato come cifra binaria della rappresentazione
- Esempio 1: convertiamo 0.125 da base 10 a base 2

| | | |
|-------------|------|----------|
| $0.125 * 2$ | 0.25 | 0 |
| $0.25 * 2$ | 0.5 | 0 |
| $0.5 * 2$ | 1.0 | 1 |

- Il risultato è **0.001** e la rappresentazione è **esatta** con 3 cifre decimali

Conversione da base 10 a base 2

- Esempio 2: convertiamo 0.587 da base 10 a base 2

| | | |
|-------------|-------|-------------|
| $0.587 * 2$ | 1.174 | 1 |
| $0.174 * 2$ | 0.348 | 0 |
| $0.348 * 2$ | 0.696 | 0 |
| $0.696 * 2$ | 1.392 | 1 |
| $0.392 * 2$ | 0.784 | 0 |
| $0.784 * 2$ | 1.568 | 1 |
| $0.568 * 2$ | | |
| | | |

- In questo caso la rappresentazione fino a 6 cifre è **approssimata**, l'accuratezza dipende dalle cifre disponibili: 0.1001 (4 cifre), 0.100101 (6 cifre)

Rappresentazione dei reali

- L'insieme \mathbb{R} è infinito e dobbiamo fare delle approssimazioni, vedremo due metodi:
 - Virgola fissa
 - Virgola mobile

Reali: virgola fissa

- Dividiamo le cifre disponibili fra la parte intera e la parte frazionaria, es.

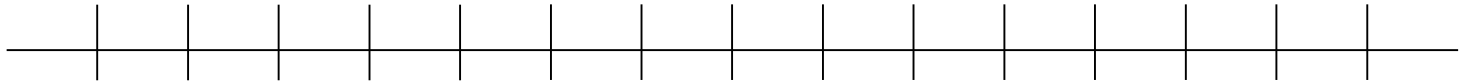
$$N_b = c_{n-1}c_{n-2} \cdots c_0 \cdot c_{-1}c_{-2} \cdots c_{-m}$$

$$b^{n-1} * c_{n-1} + \cdots + b^0 * c_0 + b^{-1} * c_{-1} + \cdots + b^{-n} * c_{-n}$$

- m ed n sono gli stessi per tutti i numeri rappresentati

Reali virgola mobile

0



- Con la virgola fissa la precisione è sempre la stessa per tutti i reali sia in prossimità dello zero che altrove
- Sarebbe più ragionevole usare più precisione per valori più piccoli e meno per valori maggiori, graficamente ...

0



- La virgola mobile realizza questo con una rappresentazione **esponenziale**

Reali: virgola mobile

Nella rappresentazione esponenziale in base b

$$N_b = m * b^e$$

Ad esempio:

- $1150 = 0.115 * 10^4$
- Ma anche $1150 = 11.5 * 10^2$
-

Reali: virgola mobile

- Usa la rappresentazione in **forma normalizzata** in base b

$$N_b = m * b^e$$

Dove

- m è la **mantissa** che deve stare nell'intervallo $\frac{1}{b} \leq m < 1$
- ed e è la **caratteristica**, un intero con segno

Ad esempio la rappresentazione normalizzata di 1150 in base 10 è :

- $1150 = 0.115 * 10^4$

Reali: virgola mobile

Nella **forma normalizzata** in base b la mantissa ha la forma:

$$m = 0.c_{-1} \cdots c_{-k}$$

- Quindi nel caso della base 2 servono k bit
- E il valore della mantissa è limitato da

$$(0.1) \frac{1}{b} \leq m \leq \sum_{i=-k}^{-1} b^i * c_i \quad (0.111 \dots 1)$$

Reali: virgola mobile

- Anche la caratteristica è limitata

$$N_b = m * b^e$$

- Se assumiamo h bit
- E la rappresentazione in complemento a 2
- L'intervallo di rappresentazione della caratteristica è:
$$-2^h \leq e \leq 2^h - 1$$
- Questi due vincoli fissano il minimo e massimo numero rappresentabile
- Tuttavia in questo caso anche internamente a questo intervallo la rappresentazione è approssimata

Reali: virgola mobile

- Analizziamo meglio i problemi della rappresentazione
 - Vengono rappresentati solo numeri razionali
 - I reali sono **approssimati** con il razionale più vicino
 - I numeri rappresentati sono più densi vicino allo 0 e più distanti vicino al massimo e minimo rappresentabile
 - Quindi l'errore che commettiamo non è fisso ma dipende dal numero che stiamo rappresentando
 - L'insieme non è chiuso rispetto a $+$, $*$...

Reali in virgola mobile

Esistono quindi diversi errori

- Errore di *cancellazione* (siamo arrivati troppo vicino a 0, essenzialmente la mantissa si azzera)
- Errore di *overflow* (numero troppo elevato, la caratteristica va in overflow)
- Errore di *arrotondamento* (vengono tralasciate delle cifre significative del numero rappresentato)

Reali: virgola mobile

- Esempio tipico su 32 bit
 - 1 bit per il segno (0 positivo, 1 negativo)
 - 7 per la caratteristica (in complemento)
 - 24 per la mantissa
- IEEE ha standard su 32,64,.... Bit
 - Si usa la rappresentazione in eccesso (es. eccesso 127 su 8 bit) invece che quella in complemento a 2 per e
 - Convenzioni speciali per rappresentare infinito negativo e positivo
 - Convenzioni sul tipo di arrotondamento/troncamento da effettuare nelle operazioni aritmetiche e nelle conversioni