

Algoritmi e Strutture Dati

Tabelle Hash

Alberto Montresor and Davide Rossi

Università di Bologna

19 settembre 2024

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Sommario

- 1 Introduzione
 - Definizioni base
 - Tabelle ad accesso diretto
- 2 Funzioni hash
 - Introduzione
 - Funzioni hash semplici
 - Reality check
- 3 Gestione collisioni
 - Liste/vettori di trabocco
 - Indirizzamento aperto
 - Reality check
- 4 Conclusioni

Introduzione

Ripasso

Un dizionario è una struttura dati utilizzata per memorizzare insiemi dinamici di **coppie** \langle **chiave**, **valore** \rangle

- Le coppie sono indicizzate in base alla chiave
- Il valore è un **dato satellite**

Operazioni:

- $\text{lookup}(key) \rightarrow value$
- $\text{insert}(key, value)$
- $\text{remove}(key)$

Applicazioni:

- Le tabelle dei simboli di un compilatore
- I dizionari di Python
- ...

Possibili implementazioni

	Array non ordinato	Array ordinato	Lista	Alberi RB	Implemen. ideale
<code>insert()</code>					$O(1)$
<code>lookup()</code>					$O(1)$
<code>remove()</code>					$O(1)$
<code>foreach</code>					$O(n)$

Possibili implementazioni

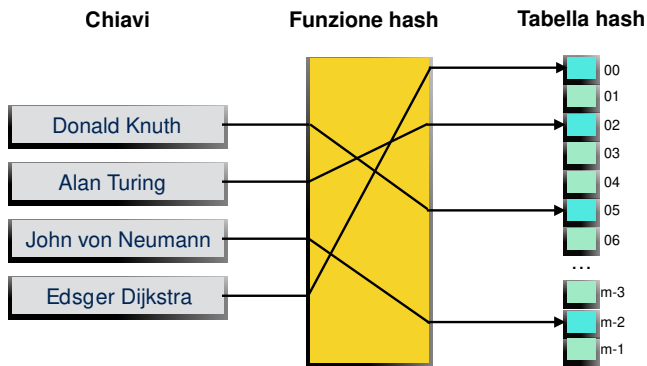
	Array non ordinato	Array ordinato	Lista	Alberi RB	Implemen. ideale
insert()	$O(1), O(n)$	$O(n)$	$O(1), O(n)$	$O(\log n)$	$O(1)$
lookup()	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(1)$
remove()	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(1)$
foreach	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$

Implementazione ideale: **tabelle hash**

- Hash: From French **hacher** (“to chop”), from Old French **hache** (“axe”)
- L’insieme delle possibili chiavi è rappresentato dall’**insieme universo** \mathcal{U} di dimensione u
- Si memorizzano le chiavi in un vettore $T[0 \dots m - 1]$ di dimensione m , detto **tabella hash**

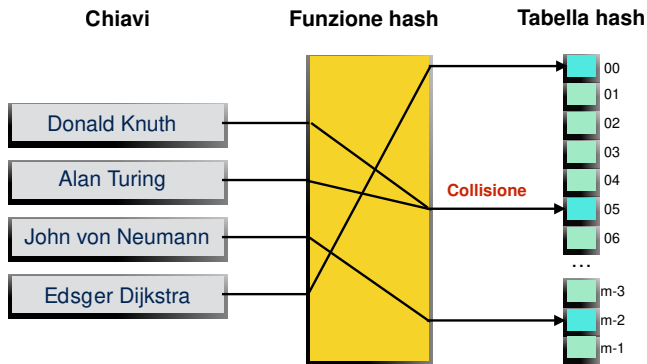
Tabelle hash – Definizioni

- Una **funzione hash** è definita come $h : \mathcal{U} \rightarrow \{0, 1, \dots, m - 1\}$
- La coppia chiave-valore $\langle k, v \rangle$ viene memorizzata in un vettore nella posizione $h(k)$



Collisioni

- Quando due o più chiavi nel dizionario hanno lo stesso valore hash, diciamo che è avvenuta una **collisione**
- Idealmente, vogliamo funzioni hash senza collisioni



Possibili implementazioni

	Array non ordinato	Array ordinato	Lista	Alberi RB	Hash table
insert()	$O(1), O(n)$	$O(n)$	$O(1), O(n)$	$O(\log n)$	$O(1)$
lookup()	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(1)$
remove()	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(1)$
foreach	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(m)$

Tabelle ad accesso diretto

Caso particolare: l'insieme \mathcal{U} è già un sottoinsieme (piccolo) di \mathbb{Z}^+

- L'insieme dei giorni dell'anno, numerati da 1 a 366
- L'insieme dei Pokemon di Kanto, numerati da 1 a 151



Tabella a accesso diretto

- Si utilizza la **funzione hash identità** $h(k) = k$
- Si sceglie un valore m pari a u

Problemi

- Se u è molto grande, l'approccio non è praticabile
- Se u non è grande ma il numero di chiavi effettivamente registrate è molto minore di $u = m$, si spreca memoria

Sommario

- 1 Introduzione
 - Definizioni base
 - Tabelle ad accesso diretto
- 2 Funzioni hash
 - Introduzione
 - Funzioni hash semplici
 - Reality check
- 3 Gestione collisioni
 - Liste/vettori di trabocco
 - Indirizzamento aperto
 - Reality check
- 4 Conclusioni

Funzioni hash perfette

Definizione

Una funzione hash h si dice **perfetta** se è **iniettiva**, ovvero se non dà origine a collisioni:

$$\forall k_1, k_2 \in \mathcal{U} : k_1 \neq k_2 \Rightarrow h(k_1) \neq h(k_2)$$

Esempi

- Studenti ASD 2005-2016
N. matricola in $[100.090, 183.864]$
 $h(k) = k - 100.090, m = 83.774$
- Studenti immatricolati 2014
N. matricola in $[173.185, 183.864]$
 $h(k) = k - 173.185, m = 10.679$

Problemi

- Spazio delle chiavi
spesso grande, sparso,
non conosciuto
- È spesso impraticabile
ottenere una funzione
hash perfetta

Funzioni hash

Se non possiamo evitare le collisioni

- almeno cerchiamo di minimizzare il loro numero
- vogliamo funzioni che distribuiscano **uniformemente** le chiavi negli indici $[0 \dots m - 1]$ della tabella hash

Uniformità semplice

- Sia $P(k)$ la probabilità che una chiave k sia inserita in tabella
- Sia $Q(i)$ la probabilità che una chiave finisca nella cella i

$$Q(i) = \sum_{k \in \mathcal{U}: h(k)=i} P(k)$$

- Una funzione hash h gode di **uniformità semplice** se:

$$\forall i \in [0, \dots, m - 1] : Q(i) = 1/m$$

Funzioni hash

Per poter ottenere una funzione hash con uniformità semplice, la distribuzione delle probabilità P deve essere nota

Esempio

Se \mathcal{U} è dato dai numeri reali in $[0, 1[$ e ogni chiave ha la stessa probabilità di essere scelta, allora $H(k) = \lfloor km \rfloor$ soddisfa la proprietà di uniformità semplice

Nella realtà

- La distribuzione esatta può non essere (completamente) nota
- Si utilizzano allora tecniche “**euristiche**”

Come realizzare una funzione hash

Assunzione

Le chiavi possono essere tradotte in valori numerici, anche interpretando la loro rappresentazione in memoria come un numero.

Esempio: trasformazione stringhe

- $\text{ord}(c)$: valore ordinale binario del carattere c in qualche codifica
- $\text{bin}(k)$: rappresentazione binaria della chiave k , concatenando i valori binari dei caratteri che lo compongono
- $\text{int}(b)$: valore numerico associato al numero binario b
- $\text{int}(k) = \text{int}(\text{bin}(k))$

Come realizzare una funzione hash

Nei prossimi esempi, utilizziamo codice ASCII a 8 bit

$$\begin{aligned} \text{bin}(\text{"DOG"}) &= \text{ord}(\text{"D"}) & \text{ord}(\text{"O"}) & \text{ord}(\text{"G"}) \\ &= 01000100 & 01001111 & 01000111 \\ \text{int}(\text{"DOG"}) &= 68 \cdot 256^2 + 79 \cdot 256 + 71 \\ &= 4,476,743 \end{aligned}$$

Domanda: come trasformare questa sequenza di bit o questo numero in un valore compreso in $[0, m - 1]$?

Funzione hash - Estrazione

Estrazione

- $m = 2^p$
- $H(k) = \text{int}(b)$, dove b è un sottoinsieme di p bit presi da $\text{bin}(k)$

Problemi

Domanda: Quali possono essere i problemi di questo approccio?

Funzione hash - Estrazione

Estrazione

- $m = 2^p$
- $H(k) = \text{int}(b)$, dove b è un sottoinsieme di p bit presi da $\text{bin}(k)$

Problemi

- Selezionare bit presi dal suffisso della chiave può generare collisioni con alta probabilità
- Tuttavia, anche prendere parti diverse dal suffisso o dal prefisso può generare collisioni.

Funzione hash - Estrazione

Esempio 1

$m = 2^p = 2^{16} = 65536$; 16 bit meno significativi di $\text{bin}(k)$

$\text{bin}(\text{"Alberto"}) = 01000001 \ 01101100 \ 01100010 \ 01100101$
 $01110010 \ 01110100 \ 01101111$

$\text{bin}(\text{"Roberto"}) = 01010010 \ 01101111 \ 01100010 \ 01100101$
 $01110010 \ 01110100 \ 01101111$

$H(\text{"Alberto"}) = \text{int}(0111010001101111) = 29.807$

$H(\text{"Roberto"}) = \text{int}(0111010001101111) = 29.807$

Funzione hash - Estrazione

Esempio 2

$m = 2^p = 2^{16} = 65536$; 16 bit presi all'interno di $\text{bin}(k)$

$\text{bin}(\text{"Alberto"}) = 0100\textcolor{red}{0001} \textcolor{red}{01101100} \textcolor{red}{0110}0010 \ 01100101$
 $01110010 \ 01110100 \ 01101111$

$\text{bin}(\text{"Alessio"}) = 0100\textcolor{red}{0001} \textcolor{red}{01101100} \textcolor{red}{0110}0101 \ 01110011$
 $01110011 \ 01101001 \ 01101111$

$H(\text{"Alberto"}) = \text{int}(\textcolor{red}{0001011011000110}) = 5.830$

$H(\text{"Alessio"}) = \text{int}(\textcolor{red}{0001011011000110}) = 5.830$

Funzione hash - XOR

XOR

- $m = 2^p$
- $H(k) = \text{int}(b)$, dove b è dato dalla somma modulo 2, effettuata bit a bit, di sottoinsiemi di p bit di $\text{bin}(k)$

Problemi

Domanda: Quali possono essere i problemi di questo approccio?

Funzione hash - XOR

XOR

- $m = 2^p$
- $H(k) = \text{int}(b)$, dove b è dato dalla somma modulo 2, effettuata bit a bit, di sottoinsiemi di p bit di $\text{bin}(k)$

Problemi

- Permutazioni (anagrammi) della stessa stringa possono generare lo stesso valore hash
- Mitigazione: eseguire una rotazione dei bit dipendente dalla posizione.

Funzione hash - XOR

Esempio

$m = 2^{16} = 65536$; 5 gruppi di 16 bit ottenuti con 8 zeri di "padding"

$bin(\text{"montresor"}) =$

01101101 01101111 \oplus

01101110 01110100 \oplus

01110010 01100101 \oplus

01110011 01101111 \oplus

01110010 00000000

$H(\text{"montresor"}) =$

$int(01110000 \ 00010001) =$

28.689

$bin(\text{"sontremor"}) =$

01110011 01101111 \oplus

01101110 01110100 \oplus

01110010 01100101 \oplus

01101101 01101111 \oplus

01110010 00000000

$H(\text{"sontremor"}) =$

$int(01110000 \ 00010001) =$

28.689

Funzione hash - Metodo della divisione

Metodo della divisione

- m dispari, meglio se numero primo
- $H(k) = \text{int}(k) \bmod m$

Esempio

$$m = 383$$

$$H(\text{"Alberto"}) = 18.415.043.350.787.183 \bmod 383 = 221$$

$$H(\text{"Alessio"}) = 18.415.056.470.632.815 \bmod 383 = 77$$

$$H(\text{"Cristian"}) = 4.860.062.892.481.405.294 \bmod 383 = 130$$

Funzione hash - Metodo della divisione

Non vanno bene:

- $m = 2^p$: solo i p bit meno significativi vengono considerati (caveat: se la funzione hash perturba uniformemente tutti i bit questo non è un problema)
- $m = 2^p - 1$: permutazione di stringhe con set di caratteri di dimensione 2^p hanno lo stesso valore hash

Vanno bene:

- Numeri primi, distanti da potenze di 2 (e di 10)

Reality check

- Ottenere una “buona” funzione hash non è poi così semplice...
- Test moderni per valutare la bontà delle funzioni hash
 - **Avalanche effect**: Se si cambia un bit nella chiave, deve cambiare almeno la metà dei bit del valore hash
 - Test statistici (**Chi-square**)
- Funzioni crittografiche (SHA-1)
 - Deve essere molto difficile o quasi impossibile risalire al testo che ha portato ad un dato hash;

Funzioni hash moderne

Nome	Note	Link
FNV Hash	Funzione hash non crittografica, creata nel 1991.	[Wikipedia] [Codice]
Murmur Hash	Funzione hash non crittografica, creata nel 2008, il cui uso è ormai sconsigliato perchè debole.	[Wikipedia] [Codice]
City Hash	Una famiglia di funzioni hash non-crittografiche, progettate da Google per essere molto veloci. Ha varianti a 32, 64, 128, 256 bit.	[Wikipedia] [Codice]
Farm Hash	Il successore di City Hash, sempre sviluppato da Google.	[Codice]

Sommario

- 1 Introduzione
 - Definizioni base
 - Tabelle ad accesso diretto
- 2 Funzioni hash
 - Introduzione
 - Funzioni hash semplici
 - Reality check
- 3 Gestione collisioni
 - Liste/vettori di trabocco
 - Indirizzamento aperto
 - Reality check
- 4 Conclusioni

Problema delle collisioni

Come gestire le collisioni?

- Dobbiamo trovare posizioni alternative per le chiavi
- Se una chiave non si trova nella posizione attesa, bisogna cercarla nelle posizioni alternative
- Questa ricerca:
 - dovrebbe costare $O(1)$ nel caso medio
 - può costare $O(n)$ nel caso pessimo

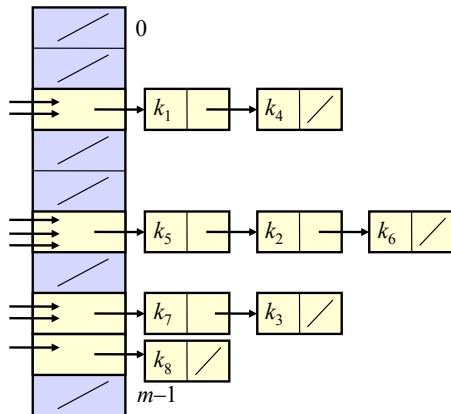
Due possibili tecniche

- **Liste di trabocco** o memorizzazione esterna
- **Indirizzamento aperto** o memorizzazione interna

Liste/vettori di trabocco (Concatenamento o Chaining)

Idea

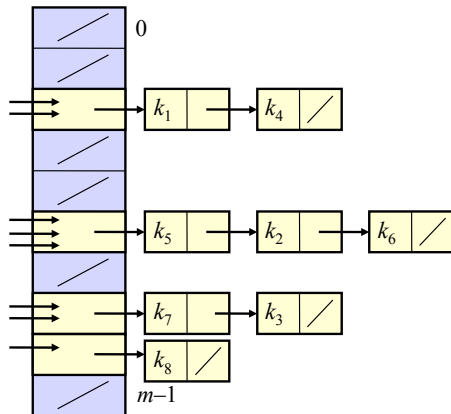
- Le chiavi con lo stesso valore hash h vengono memorizzate in una **lista monodirezionale** / **vettore dinamico**
- Si memorizza un puntatore alla testa della lista / al vettore nello slot $H(k)$ -esimo della tabella hash



Liste/vettori di trabocco (Concatenamento o Chaining)

Operazioni

- **insert()**:
inserimento in testa
- **lookup()**, **remove()**:
scansione della lista per
cercare la chiave



Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

n	Numero di chiavi memorizzati in tabella hash
m	Capacità della tabella hash
$\alpha = n/m$	Fattore di carico
$I(\alpha)$	Numero medio di accessi alla tabella per la ricerca di una chiave non presente nella tabella (ricerca con insuccesso)
$S(\alpha)$	Numero medio di accessi alla tabella per la ricerca di una chiave presente nella tabella (ricerca con successo)

Analisi del caso pessimo?

Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

n	Numero di chiavi memorizzati in tabella hash
m	Capacità della tabella hash
$\alpha = n/m$	Fattore di carico
$I(\alpha)$	Numero medio di accessi alla tabella per la ricerca di una chiave non presente nella tabella (ricerca con insuccesso)
$S(\alpha)$	Numero medio di accessi alla tabella per la ricerca di una chiave presente nella tabella (ricerca con successo)

Analisi del caso pessimo?

- Tutte le chiavi sono collocate in unica lista
- **insert()**: $\Theta(1)$
- **lookup()**, **remove()**: $\Theta(n)$

Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

Analisi del caso medio: assunzioni

- Dipende da come le chiavi vengono distribuite
- Assumiamo hashing uniforme semplice
- Costo calcolo funzione di hashing: $\Theta(1)$

Quanto sono lunghe le liste / i vettori?

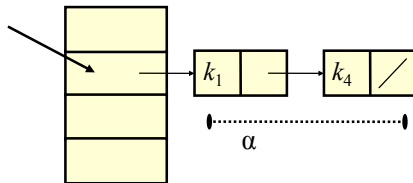
Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

Analisi del caso medio: assunzioni

- Dipende da come le chiavi vengono distribuite
- Assumiamo hashing uniforme semplice
- Costo calcolo funzione di hashing: $\Theta(1)$

Quanto sono lunghe le liste / i vettori?

- Il valore **atteso** della lunghezza di una lista è pari a $\alpha = n/m$



Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

Costo hashing

- Una chiave **presente** o **non presente** in tabella può essere collocata in uno qualsiasi degli m slot
- Costo di hashing: $\Theta(1)$

Ricerca senza successo

- Una ricerca **senza successo** tocca tutte le chiavi nella lista corrispondente

Ricerca con successo

- Una ricerca con **successo** tocca in media metà delle chiavi nella lista corrispondente

Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

Costo hashing

- Una chiave **presente** o **non presente** in tabella può essere collocata in uno qualsiasi degli m slot
- Costo di hashing: $\Theta(1)$

Ricerca senza successo

- Una ricerca **senza successo** tocca tutte le chiavi nella lista corrispondente
- Costo atteso: $\Theta(1) + \alpha$

Ricerca con successo

- Una ricerca con **successo** tocca in media metà delle chiavi nella lista corrispondente
- Costo atteso: $\Theta(1) + \alpha/2$

Liste/vettori di trabocco: analisi complessità

Qual è il significato del fattore di carico?

- Influenza il costo computazionale delle operazioni sulle tabelle hash
- Se $n = O(m)$, $\alpha = O(1)$
- Quindi tutte le operazioni sono $O(1)$

Indirizzamento aperto

Problemi delle liste/vettori di trabocco

- Struttura dati complessa, con liste, puntatori, etc.

Gestione alternativa: indirizzamento aperto

- Idea: memorizzare tutte le chiavi nella tabella stessa
- Ogni slot contiene una chiave oppure **nil**

Inserimento

Se lo slot prescelto è utilizzato, si cerca uno slot "alternativo"

Ricerca

Si cerca nello slot prescelto, e poi negli slot "alternativi" fino a quando non si trova la chiave oppure **nil**

Indirizzamento aperto

Ispezione

Un'**ispezione** è l'esame di uno slot durante la ricerca.

Funzione hash

Estesa nel modo seguente:

$$H : \mathcal{U} \times \overbrace{[0 \dots m - 1]}^{\text{Numero ispezione}} \rightarrow \overbrace{[0 \dots m - 1]}^{\text{Indice vettore}}$$

Indirizzamento aperto

Sequenza di ispezione

Una **sequenza di ispezione** $[H(k, 0), H(k, 1), \dots, H(k, m - 1)]$ è una **permutazione** degli indici $[0, \dots, m - 1]$ corrispondente all'ordine in cui vengono esaminati gli slot.

- Non vogliamo esaminare ogni slot più di una volta
- Potrebbe essere necessario esaminare tutti gli slot nella tabella

	k_1		k_2	k_3	k_4		k_5			
--	-------	--	-------	-------	-------	--	-------	--	--	--

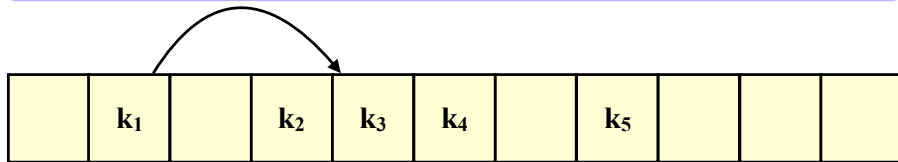
$H(k, 0)$

Indirizzamento aperto

Sequenza di ispezione

Una **sequenza di ispezione** $[H(k, 0), H(k, 1), \dots, H(k, m - 1)]$ è una **permutazione** degli indici $[0, \dots, m - 1]$ corrispondente all'ordine in cui vengono esaminati gli slot.

- Non vogliamo esaminare ogni slot più di una volta
- Potrebbe essere necessario esaminare tutti gli slot nella tabella

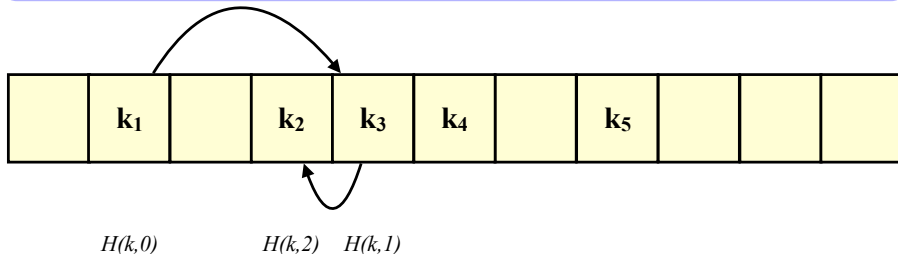
 $H(k, 0)$ $H(k, 1)$

Indirizzamento aperto

Sequenza di ispezione

Una **sequenza di ispezione** $[H(k, 0), H(k, 1), \dots, H(k, m-1)]$ è una **permutazione** degli indici $[0, \dots, m-1]$ corrispondente all'ordine in cui vengono esaminati gli slot.

- Non vogliamo esaminare ogni slot più di una volta
- Potrebbe essere necessario esaminare tutti gli slot nella tabella

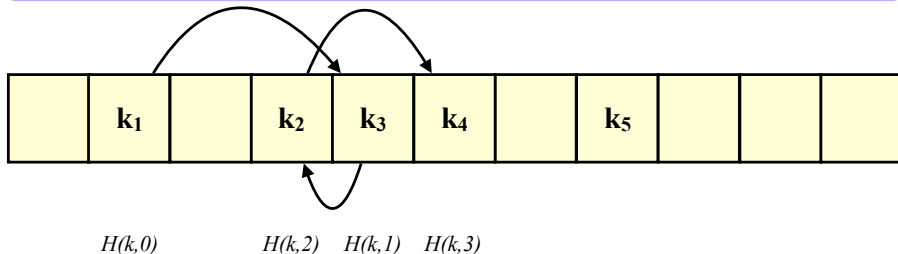


Indirizzamento aperto

Sequenza di ispezione

Una **sequenza di ispezione** $[H(k, 0), H(k, 1), \dots, H(k, m-1)]$ è una **permutazione** degli indici $[0, \dots, m-1]$ corrispondente all'ordine in cui vengono esaminati gli slot.

- Non vogliamo esaminare ogni slot più di una volta
- Potrebbe essere necessario esaminare tutti gli slot nella tabella

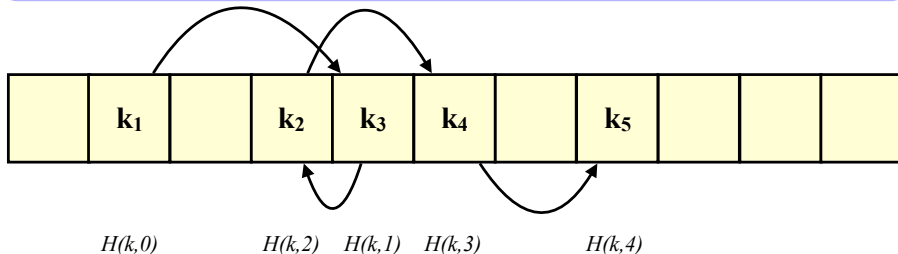


Indirizzamento aperto

Sequenza di ispezione

Una **sequenza di ispezione** $[H(k, 0), H(k, 1), \dots, H(k, m - 1)]$ è una **permutazione** degli indici $[0, \dots, m - 1]$ corrispondente all'ordine in cui vengono esaminati gli slot.

- Non vogliamo esaminare ogni slot più di una volta
- Potrebbe essere necessario esaminare tutti gli slot nella tabella

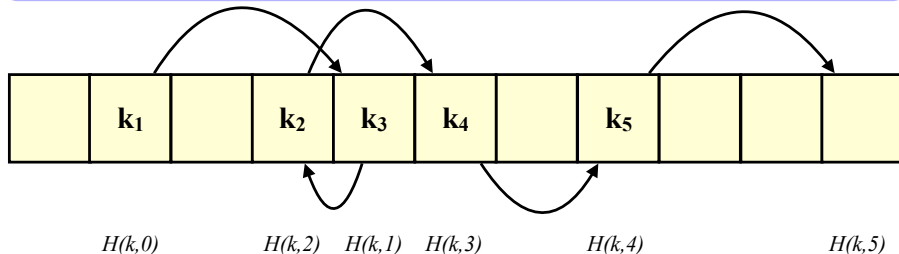


Indirizzamento aperto

Sequenza di ispezione

Una **sequenza di ispezione** $[H(k, 0), H(k, 1), \dots, H(k, m-1)]$ è una **permutazione** degli indici $[0, \dots, m-1]$ corrispondente all'ordine in cui vengono esaminati gli slot.

- Non vogliamo esaminare ogni slot più di una volta
- Potrebbe essere necessario esaminare tutti gli slot nella tabella



Fattore di carico

Cosa succede al fattore di carico α ?

- Compreso fra 0 e 1
- La tabella può andare in overflow

Tecniche di ispezione

Hashing uniforme

La situazione ideale prende il nome di **hashing uniforme**, in cui ogni chiave ha la stessa probabilità di avere come sequenza di ispezione una qualsiasi delle $m!$ permutazioni di $[0, \dots, m - 1]$.

- Generalizzazione dell'hashing uniforme semplice
- Nella realtà:
 - È difficile implementare il vero hashing uniforme
 - Ci si accontenta di ottenere almeno una permutazione
- Tecniche diffuse:
 - **Ispezione lineare**
 - **Ispezione quadratica**
 - **Doppio hashing**

Ispezione lineare

Funzione: $H(k, i) = (H_1(k) + h \cdot i) \bmod m$

- La sequenza $H_1(k)$, $H_1(k) + h$, $H_1(k) + 2 \cdot h$, ..., $H_1(k) + (m - 1) \cdot h$ (modulo m) è determinata dal primo elemento
- Al massimo m sequenze di ispezione distinte sono possibili

Agglomerazione primaria (primary clustering)

- Lunghe sotto-sequenze occupate...
- ... che tendono a diventare più lunghe: uno slot vuoto preceduto da i slot pieni viene riempito con probabilità $(i + 1)/m$
- I tempi medi di inserimento e cancellazione crescono

Agglomerazione primaria

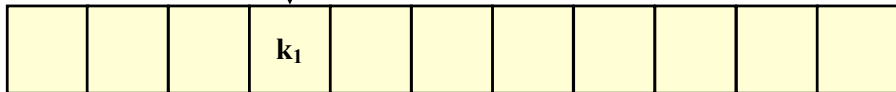
Agglomerazione primaria (primary clustering)

- Lunghe sotto-sequenze occupate...
- ... che tendono a diventare più lunghe: uno slot vuoto preceduto da i slot pieni viene riempito con probabilità $(i + 1)/m$
- I tempi medi di inserimento e cancellazione crescono

k_1



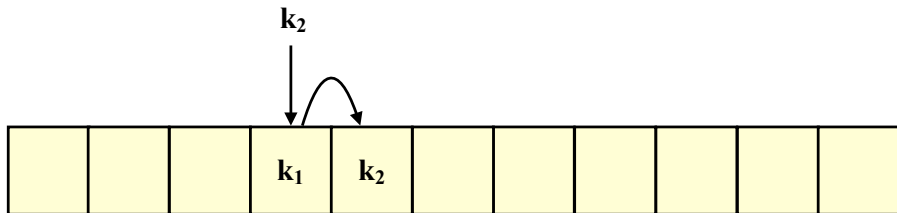
k_1



Agglomerazione primaria

Agglomerazione primaria (primary clustering)

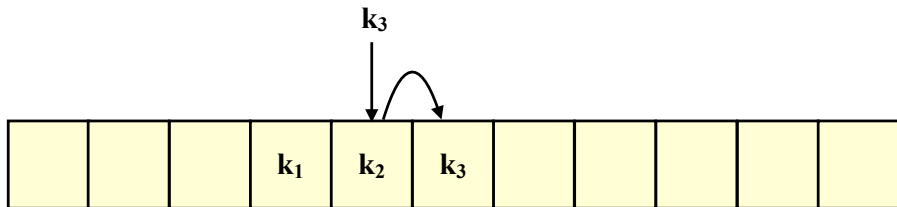
- Lunghe sotto-sequenze occupate...
- ... che tendono a diventare più lunghe: uno slot vuoto preceduto da i slot pieni viene riempito con probabilità $(i + 1)/m$
- I tempi medi di inserimento e cancellazione crescono



Agglomerazione primaria

Agglomerazione primaria (primary clustering)

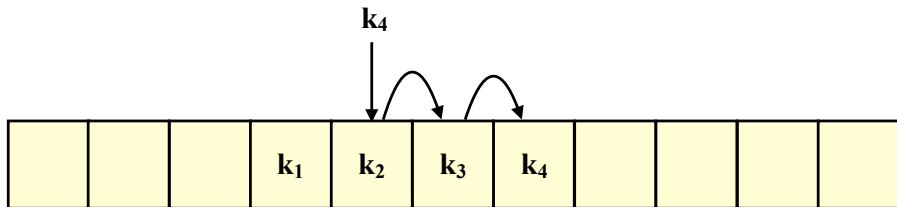
- Lunghe sotto-sequenze occupate...
- ... che tendono a diventare più lunghe: uno slot vuoto preceduto da i slot pieni viene riempito con probabilità $(i + 1)/m$
- I tempi medi di inserimento e cancellazione crescono



Agglomerazione primaria

Agglomerazione primaria (primary clustering)

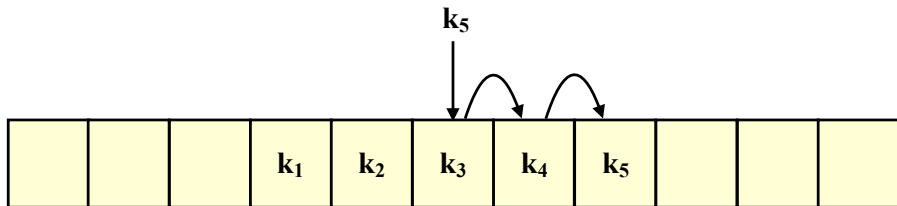
- Lunghe sotto-sequenze occupate...
- ... che tendono a diventare più lunghe: uno slot vuoto preceduto da i slot pieni viene riempito con probabilità $(i + 1)/m$
- I tempi medi di inserimento e cancellazione crescono



Agglomerazione primaria

Agglomerazione primaria (primary clustering)

- Lunghe sotto-sequenze occupate...
- ... che tendono a diventare più lunghe: uno slot vuoto preceduto da i slot pieni viene riempito con probabilità $(i + 1)/m$
- I tempi medi di inserimento e cancellazione crescono



Ispezione quadratica

Funzione: $H(k, i) = (H_1(k) + h \cdot i^2) \bmod m$

- Dopo il primo elemento $H_1(k, 0)$, le ispezioni successive hanno un offset che dipende da una funzione quadratica nel numero di ispezione i
- La sequenza risultante **non è una permutazione!**
- Al massimo m sequenze di ispezione distinte sono possibili

Agglomerazione secondaria (secondary clustering)

- Se due chiavi hanno la stessa ispezione iniziale, le loro sequenze sono identiche

Doppio hashing

Funzione: $H(k, i) = (H_1(k) + i \cdot H_2(k)) \bmod m$

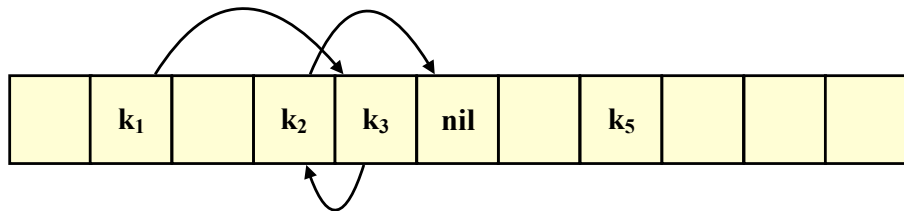
- Due funzioni ausiliarie:
 - H_1 fornisce la prima ispezione
 - H_2 fornisce l'offset delle successive ispezioni
- Al massimo m^2 sequenze di ispezione distinte sono possibili
- Per garantire una permutazione completa, $H_2(k)$ deve essere relativamente primo con m
 - Scegliere $m = 2^p$ e $H_2(k)$ deve restituire numeri dispari
 - Scegliere m primo, e $H_2(k)$ deve restituire numeri minori di m

Cancellazione

Domanda: Non possiamo semplicemente sostituire la chiave che vogliamo cancellare con un **nil**. Perché?

Cancellazione

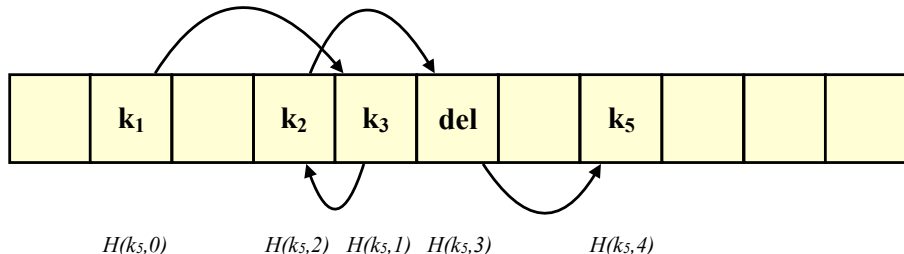
Domanda: Non possiamo semplicemente sostituire la chiave che vogliamo cancellare con un **nil**. Perché?

 $H(k_5, 0)$ $H(k_5, 2) \quad H(k_5, 1) \quad H(k_5, 3)$

Cancellazione

Approccio

- Utilizziamo un speciale valore **deleted** al posto di **nil** per marcare uno slot come vuoto dopo la cancellazione
 - Ricerca: **deleted** trattati come slot pieni
 - Inserimento: **deleted** trattati come slot vuoti
- Svantaggio: il tempo di ricerca non dipende più da α
- Concatenamento più comune se si ammettono cancellazioni



Implementazione - Hashing doppio

HASH

ITEM[] K

% Tabella delle chiavi

ITEM[] V

% Tabella dei valori

int m

% Dimensione della tabella

HASH Hash(**int** dim)

HASH $t = \text{new HASH}$

$t.m = dim$

$t.keys = \text{new ITEM}[0 \dots dim - 1]$

$t.values = \text{new ITEM}[0 \dots dim - 1]$

for $i = 0$ **to** $dim - 1$ **do**

$t.keys[i] = \text{nil}$

return t

Implementazione - Hashing doppio

```
int scan(ITEM  $k$ , boolean  $insert$ )  
┌   int  $delpos = m$                                 % Prima posizione deleted  
┌   int  $i = 0$                                        % Numero di ispezione  
┌   int  $j = H(k)$                                     % Posizione attuale  
┌   while  $keys[j] \neq k$  and  $keys[j] \neq \text{nil}$  and  $i < m$  do  
┌       if  $keys[j] == \text{deleted}$  and  $delpos == m$  then  
┌           └  $delpos = j$   
┌            $j = (j + H'(k)) \bmod m$   
┌            $i = i + 1$   
┌   if  $insert$  and  $keys[j] \neq k$  and  $delpos < m$  then  
┌       └ return  $delpos$   
┌   else  
┌       └ return  $j$   
└
```

Implementazione - Hashing doppio

ITEM lookup(ITEM *k*)

int *i* = scan(*k*, **false**)

if *keys*[*i*] == *k* **then**

 | **return** *values*[*i*]

else

 | **return** nil

insert(ITEM *k*, ITEM *v*)

int *i* = scan(*k*, **true**)

if *keys*[*i*] == nil **or** *keys*[*i*] == **deleted** **or** *keys*[*i*] == *k* **then**

 | *keys*[*i*] = *k*

 | *values*[*i*] = *v*

else

 | % Errore: tabella hash piena

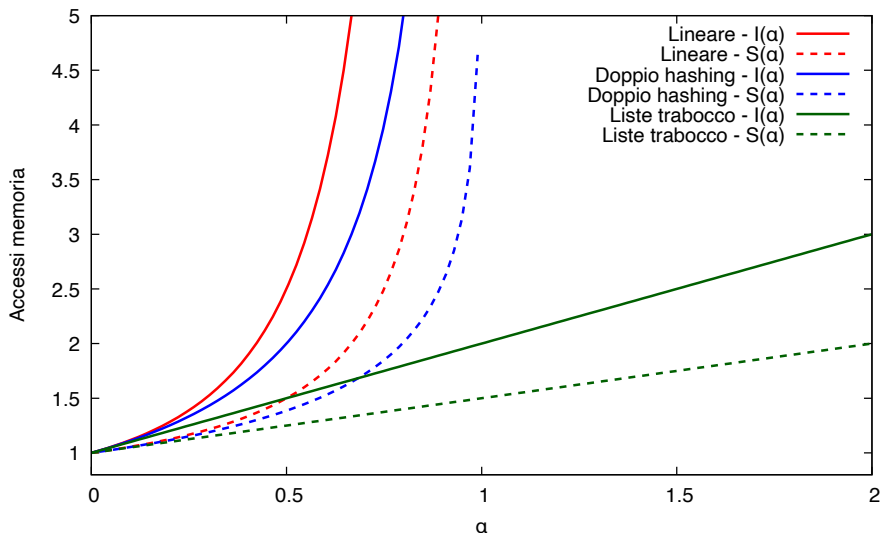
Implementazione - Hashing doppio

```
remove(ITEM  $k$ )  
┌   int  $i$  = scan( $k$ , false)  
┌   if  $keys[i] == k$  then  
┌        $keys[i] = \text{deleted}$   
┌        $values[i] = \text{nil}$   
└  
└
```

Complessità

Metodo	α	$I(\alpha)$	$S(\alpha)$
Lineare	$0 \leq \alpha < 1$	$\frac{(1 - \alpha)^2 + 1}{2(1 - \alpha)^2}$	$\frac{1 - \alpha/2}{1 - \alpha}$
Hashing doppio	$0 \leq \alpha < 1$	$\frac{1}{1 - \alpha}$	$-\frac{1}{\alpha} \ln(1 - \alpha)$
Liste di trabocco	$\alpha \geq 0$	$1 + \alpha$	$1 + \alpha/2$

Complessità



Java hashCode()

Dalla documentazione di java.lang.Object

The general contract of `hashCode()` is:

- 1 Whenever it is invoked on the same object more than once during an execution of a Java application, *the `hashCode()` method must consistently return the same integer, provided no information used in equals comparisons on the object is modified*. This integer need not remain consistent from one execution of an application to another execution of the same application.
- 2 *If two objects are equal according to the `equals(Object)` method, then calling the `hashCode()` method on each of the two objects must produce the same integer result.*
- 3 It is not required that if two objects are unequal according to the `equals(Object)` method, then calling the `hashCode()` method on each of the two objects must produce distinct integer results. However, *the programmer should be aware that producing distinct integer results for unequal objects may improve the performance of hash tables.*

Java hashCode()

Se una classe non fa override di `equals()`:

- Eredita i metodi `equals()` e `hashCode()` così come definiti da `java.lang.Object`:
 - `x.equals(y)` ritorna **true** se e solo se `x == y`
 - `x.hashCode()` converte l'indirizzo di memoria di `x` in un intero

Se una classe fa override di `equals()`:

- "Always override hashCode when you override equals", in Bloch, Joshua (2008), Effective Java (2nd ed.)
- Se non fate override, oggetti uguali finiscono in posizioni diverse nella tabella hash

Java hashCode()

Esempio: `java.lang.String`

- Override di `equals()` per controllare l'uguaglianza di stringhe
- `hashCode()` in Java 1.0, Java 1.1
 - Utilizzati 16 caratteri della stringa per calcolare l'`hashCode()`
 - Problemi con la regola (3) - cattiva performance nelle tabelle
- `hashCode()` in Java 1.2 e seguenti:

$$h(s) = \sum_{i=0}^{n-1} s[i] \cdot 31^{n-1-i}$$

(utilizzando aritmetica `int`)

Il numero *magico*

Perché 31???

- 31 è un numero primo di Mersenne ($M_p = 2^p - 1$)
- Esprimiamo il prodotto generico come una somma di prodotti per potenze di 2, quale influenza ha la rappresentazione binaria del moltiplicatore?

Java hashCode()

Cosa non fare!

```
public int hashCode()  
{  
    return 0;  
}
```

Come si fa

```
public int hashCode()  
{  
    return Objects.hash(this.foo, this.bar, ...);  
}
```

Reality check

Linguaggio	Tecnica	t_α	Note
Java 7 HashMap	Liste di trabocco basate su <code>LinkedList</code>	0.75	$O(n)$ nel caso pessimo Overhead: $16n + 4m$ byte
Java 8 HashMap	Liste di trabocco basate su RB Tree	0.75	$O(\log n)$ nel caso pessimo Overhead: $48n + 4m$ byte
C++ <code>sparse_hash</code>	Ind. aperto, scansione quadratica	?	Overhead: $2n$ bit
C++ <code>dense_hash</code>	Ind. aperto, scansione quadratica	0.5	X byte per chiave-valore $\Rightarrow 2-3X$ overhead
C++ STL <code>unordered_map</code>	Liste di trabocco basate su liste	1.00	MurmurHash
Python	Indirizzam. aperto, scansione quadratica	0.66	

Sommario

- 1 Introduzione
 - Definizioni base
 - Tabelle ad accesso diretto
- 2 Funzioni hash
 - Introduzione
 - Funzioni hash semplici
 - Reality check
- 3 Gestione collisioni
 - Liste/vettori di trabocco
 - Indirizzamento aperto
 - Reality check
- 4 Conclusioni

Considerazioni finali

Problemi con hashing

- Scarsa "locality of reference" (cache miss)
- Non è possibile ottenere le chiavi in ordine

Hashing utilizzato in altre strutture dati

- Distributed Hash Table (DHT)
- Bloom filters

Oltre le tabelle hash

- Data deduplication
- Protezioni dati con hash crittografici (MD5)