

Complessità computazionale



Intermezzo tecnico

Piero A. Bonatti

Università di Napoli Federico II

Laurea Magistrale in Informatica

Tema della lezione

- Normalizzazioni varie, tecnicamente utili
 - funzioni di complessità standard permettono di assumere senza perdita di generalità:
 - consumi esatti di spazio e tempo
 - terminazione delle macchine a spazio limitato
- Classi basate su *famiglie* di funzioni, e
- Complementi di classi nondeterministiche
 - (solo definizioni per il momento)

Funzioni di complessità *proprie*

Motivazioni

- Come devono essere le funzioni $f(|x|)$ che misurano le risorse consumate?
- Senza restrizioni potrebbero essere cose strane
 - tipo “se n è primo allora $f(n)$ è 2^n , altrimenti è il più piccolo numero tale che...”
- E potrebbero succedere cose strane

Gap Theorem (7.3)

C'è una funzione ricorsiva $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ tale che
 $\text{TIME}(f(n)) = \text{TIME}(2^{f(n)})$

Allora è opportuno restringere le f di nostro interesse

Funzioni di complessità *proprie*

Definizione

Una funzione f sugli interi non negativi è una **funzione di complessità propria** se

- f è non decrescente ($f(n+1) \geq f(n)$ per ogni n)
- esiste una MdT a k nastri con input e output M_f tale che per ogni n e ogni input x lungo n

$$(s, \triangleright, x, \triangleright, \epsilon, \dots, \triangleright, \epsilon) \xrightarrow{M_f^t} (h, \triangleright, x, \triangleright, \sqcup^{j_2}, \dots, \triangleright, \sqcup^{j_{k-1}}, \triangleright, \sqcap^{f(n)})$$

- $t = O(n + f(n))$ e $j_i = O(f(n))$ ($i = 2, \dots, k-1$)

Nota: chiamiamo \sqcap *quasi-blank*

Funzioni di complessità *proprie*

Esempi

- le funzioni costanti $f(n) = c$
- la funzione identica $f(n) = n$
 - definite voi le M_f per esercizio
- $f(n) = \lceil \log n \rceil$
 - M_f ha 3 nastri
 - scandisce il 1° nastro
 - ad ogni spostamento incrementa un contatore binario sul secondo nastro
 - quando finisce l'input, scandisce il 2° nastro
 - riscrive ogni simbolo con \sqcup e scrive un \sqcap sul terzo nastro
- inoltre polinomi, combinazioni di polinomi e logaritmi, esponenziali, radici e fattoriali...
 - praticamente tutto quello che ci serve

MdT *precise*

- Restringendoci alle funzioni di complessità proprie riusciamo a standardizzare il comportamento delle MdT

Definizione

Un MdT (di qualunque tipo) è **precisa** se esistono due funzioni f e g tali che, per ogni input x

- ogni computazione di M termina dopo **esattamente** $f(|x|)$ passi
- al termine tutti i suoi nastri sono lunghi **esattamente** $g(|x|)$ (a parte 1° e ultimo, se M ha input e output)

MdT *precise*

- Lavorando con funzioni proprie, possiamo sempre assumere che le MdT siano precise

Teorema (*soluzioni precise*)

Se una MdT (qualsiasi) M decide L in tempo (o spazio) $f(n)$ e f è *propria*, allora

- esiste una MdT *precisa* M'
- che decide L
- in tempo (o spazio, rispettivamente) $O(f(n))$

MdT precise

Prova del Teorema delle soluzioni precise

- M' concatena M_f e una macchina che simula M .
Consideriamo prima il *tempo*
- M' simula M su un insieme di nastri separato
- ad ogni passo sposta anche a destra il cursore sull'ultimo nastro di M_f
- se M termina prima di aver raggiunto la fine del nastro di M_f , M' procede a scandirlo fino alla fine in modo da impiegare esattamente $f(|x|)$ passi
- la somma dei passi di M_f e della simulazione di M
 - dipende solo dalla lunghezza di $x \Rightarrow M'$ è precisa
 - impiega $O(n + 2f(n)) = O(f(n))$ passi

MdT precise

Prova del Teorema delle soluzioni precise (II)

- Consideriamo ora lo *spazio*. M' concatena M_f e una macchina che simula M sui quasi-blank lasciati da M_f
 - se M ha più nastri, bisogna fare più copie dell'ultimo di M_f
- La simulazione tratta i quasi-blank come dei \sqcup
- Al termine, anche se M ha usato meno di $f(|x|)$ celle su qualche nastro, i quasi-blank rimasti portano l'occupazione esattamente a $f(|x|) \Rightarrow M'$ è *precisa*
- La quantità di spazio consumata da M' è $O(f(n))$
 - quella di M_f è $O(f(n))$ per definizione
 - quella successiva è un multiplo che dipende dal numero di nastri di M

MdT *precise*

Prova del Teorema delle soluzioni precise (III)

- Se M è nondeterministica, anche la sua simulazione in M' sarà nondeterministica
- Le considerazioni già fatte valgono per tutte le computazioni

QED

Terminazione delle MdT *space bounded*

Altra standardizzazione permessa dalle funzioni proprie

- Se M lavora in spazio $f(n)$ allora l'insieme delle configurazioni diverse attraverso cui può passare è *finito*, limitato superiormente da:

$$c = |K| \cdot |\Sigma|^{f(n)} \cdot f(n)$$

- Se M compie più di c passi, deve per forza entrare in una configurazione già visitata
 - M è in ciclo
- Quindi se M non termina entro c passi possiamo forzarne la terminazione con un "no"

Terminazione delle MdT *space bounded*

Altra standardizzazione permessa dalle funzioni proprie

Teorema (terminazione space-bounded)

Se M decide L in spazio $f(n)$ allora esiste M' che decide L in spazio $O(f(n))$ e tale che tutte le sue computazioni terminano

- Prova per 1 nastro: concatenare M_f e una simulazione di M
- l'ultimo nastro di M_f viene usato come un contatore
 - le celle conterranno i simboli di Σ
 - rappresenta un intero in base $|\Sigma|$ (stabilito un ordine su Σ)
- il contatore viene esteso con una cella che conterrà $|K|$ simboli diversi (per arrivare fino a c)
- ad ogni transizione di M si incrementa il contatore
- se entro c passi non termina, transizione in "no"

QED



Funzioni proprie
○○○

Normalizzazioni
○○○○○○○

Nuove classi di complessità
●○○○○○○○

Nuove notazioni per le classi di complessità

Classi basate su *famiglie* di funzioni proprie

- Le funzioni possono essere parametrizzate con un intero k , ad esempio

$$\begin{aligned}\text{TIME}(n^k) &= \bigcup_{j>0} \text{TIME}(n^j) = \mathbf{P} \\ \text{NTIME}(n^k) &= \bigcup_{j>0} \text{NTIME}(n^j) = \mathbf{NP} \\ \text{TIME}(2^{n^k}) &= \bigcup_{j>0} \text{TIME}(2^{n^j}) = \mathbf{EXP} \\ \text{SPACE}(n^k) &= \bigcup_{j>0} \text{SPACE}(n^j) = \mathbf{PSPACE} \\ \text{NSPACE}(n^k) &= \bigcup_{j>0} \text{NSPACE}(n^j) = \mathbf{NPSPACE}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{SPACE}(\log n) &= \mathbf{L} \\ \text{NSPACE}(\log n) &= \mathbf{NL}\end{aligned}$$

Classi di complessità complementari

Definizione (complementi di problemi/linguaggi)

Sia $L \subseteq \Sigma^*$. Il **complemento** di L è $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$.

■ Esempi:

- $\overline{\text{PALINDROME}}$ = l'insieme delle stringhe non palindrome
- $\overline{\text{REACHABILITY}} = (G, x, y)$ t.c. y irraggiungibile da x in G
- $\overline{\text{TSP}_{dec}} = (N, B)$ tali che N non ha tour di costo $\leq B$
- $\overline{\text{SAT}}$ = formule proposizionali insoddisfacibili

Classi di complessità complementari

Notazione (**co**)

Per ogni classe di complessità \mathcal{C} , $\text{co}\mathcal{C}$ denota la classe di problemi \bar{L} tali che $L \in \mathcal{C}$

- Esempi
 - **coP, coNP, coNPSPACE ...**
- In realtà **coP, coSPACE, coEXP ...** non sono interessanti perché...

Classi di complessità complementari

Proposizione (chiusura classi deterministiche risp. a complemento)

Se \mathcal{C} è una classe di complessità *deterministica* $\text{TIME}(f(n))$ o $\text{SPACE}(f(n))$, allora $\mathcal{C} = \text{co}\mathcal{C}$

- **Prova:** sia M una MdT deterministica che decide L in tempo/spazio $f(n)$
- La MdT M' ottenuta scambiando "yes" con "no" in δ riconosce \bar{L} in tempo/spazio $f(n)$

QED

Classi di complessità complementari

Perchè con le classi nondeterministiche non funziona

- Se tentassimo la stessa trasformazione con una MdT *nondeterministica* otterremmo una MdT che
 - se $x \in L$ allora ha almeno un run che rigetta
 - se $x \in \bar{L}$ allora tutti i run accettano
- per decidere \bar{L} dovremmo anche cambiare la modalità di accettazione
 - da \exists *run che accetta* a \forall *run accetta*
- Per lo spazio nondeterministico, si può dimostrare la chiusura (vedremo + avanti)
- Per il tempo nondeterministico la chiusura è una questione aperta
 - se valesse avrebbe conseguenze macroscopiche

Capitolo di riferimento

Papadimitriou

- Parte 3, Capitolo 7, paragrafo 1

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?



Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?



Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?



Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

QUESTIONI

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

definizioni

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

definizioni

Esercitazione

- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{TIME}(n^3) \subseteq \text{P}$?
- $\text{EXP} \subseteq \text{P}$?
- $\text{P} \subseteq \text{NTIME}(n^k)$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{P}$?
- $\text{NTIME}(n^k) \subseteq \text{NP}$?
- $\text{TIME}(2^{n^2}) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NTIME}(n^2) \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{SPACE}(n^k)$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{NPSPACE}$?
- $\text{SPACE}(2^n) \subseteq \text{SPACE}(2^{n^2})$?
- $\text{SPACE}(n) \subseteq \text{NSPACE}(n)$?
- $\text{NPSPACE} \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{TIME}(n^k) \subseteq \text{PSPACE}$?
- $\text{PSPACE} \subseteq \text{EXP}$?
- $\text{NP} \subseteq \text{PSPACE}$?

definizioni