



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

“SAPIENZA” UNIVERSITÀ DI ROMA
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE,
INFORMATICA E STATISTICA
DIPARTIMENTO DI INFORMATICA

Automi: Calcolabilità e Complessità

Appunti integrati con il libro “Introduzione alla teoria della computazione”,
Michael Sipser

Author
Alessio Bandiera

21 dicembre 2023

Indice

Informazioni e Contatti	1
1 Linguaggi ed espressioni regolari	2
1.1 Linguaggi	2
1.1.1 Stringhe	2
1.1.2 Linguaggi	3
1.1.3 Funzioni di Hamming	3
1.2 Determinismo	4
1.2.1 Definizioni	4
1.2.2 Linguaggi regolari	6
1.3 Non determinismo	7
1.3.1 Definizioni	7
1.3.2 Equivalenze	9
1.3.3 Unione	10
1.3.4 Intersezione	12
1.3.5 Concatenazione	13
1.3.6 Elevamento a potenza	14
1.3.7 Star	15
1.3.8 Complemento	16
1.4 Espressioni regolari	18
1.4.1 Definizioni	18
1.5 Configurazioni	20
1.5.1 Configurazioni di DFA	20
1.5.2 Configurazioni di NFA	21
1.6 Non determinismo generalizzato	23
1.6.1 Definizioni	23
1.6.2 Equivalenze	24
1.7 Linguaggi non regolari	30
1.7.1 Pumping lemma	30
2 Linguaggi e grammatiche context-free	33
2.1 Grammatiche context-free	33
2.1.1 Definizioni	33
2.1.2 Ambiguità	36
2.1.3 Forma normale di Chomsky	37

2.2	Automi a pila	39
2.2.1	Definizioni	39
2.2.2	Equivalenze	43
2.3	Linguaggi non context-free	49
2.3.1	Pumping lemma	49
2.4	Operazioni context-free	51
2.4.1	Unione	51
2.4.2	Concatenazione	52
2.4.3	Star	52
2.4.4	Intersezione	53
2.4.5	Complemento	53
3	Decidibilità	55
3.1	Macchine di Turing	55
3.1.1	Definizioni	55
3.1.2	Configurazioni di TM	57
3.1.3	Turing-riconoscibilità	58
3.1.4	Turing-decidibilità	59
3.2	Varianti di macchine di Turing	60
3.2.1	Macchine di Turing con testina ferma	60
3.2.2	Macchine di Turing multinastro	61
3.2.3	Macchine di Turing non deterministiche	62
3.2.4	Enumeratori	64
3.3	Linguaggi Turing-riconoscibili e Turing-decidibili	64
3.3.1	Tesi di Church-Turing	64
3.3.2	Linguaggi non Turing-riconoscibili	65
3.3.3	Problema dell'accettazione	68
3.3.4	Problema del vuoto	74
3.3.5	Problema dell'uguaglianza	75
4	Riducibilità	77
4.1	Riduzione	77
4.1.1	Funzioni calcolabili	77
4.2	Turing-decidibilità mediante riduzione	78
4.2.1	Teoremi	78
4.2.2	Problema della terminazione	79
4.2.3	Problema del vuoto	80
4.2.4	Problema della regolarità	81
4.2.5	Problema dell'uguaglianza	82
4.3	Turing-riconoscibilità mediante riduzione	83
4.3.1	Teoremi	83
4.3.2	Problema dell'uguaglianza	84
4.4	Esercizi	86
4.4.1	Indecidibilità	86
4.4.2	Irriconoscibilità	86

5	Complessità di tempo	87
5.1	Analisi asintotica	87
5.1.1	O -grande ed o -piccolo	87
5.1.2	Varianti di macchine di Turing	89
5.2	Classi di complessità di tempo	90
5.2.1	Classe DTIME	90
5.2.2	Classe P	91
5.2.3	Classe coP	93
5.2.4	Classe EXP	93
5.2.5	Classe coEXP	94
5.2.6	Classe NTIME	94
5.2.7	Classe NP	95
5.2.8	Classe NP-Complete	98
5.2.9	Classe coNP	100
5.2.10	Classe coNP-Complete	100
5.2.11	Classe NEXP	101
6	Complessità di spazio	103

Informazioni e Contatti

Prerequisiti consigliati:

- Corso di *Progettazione di Algoritmi*.

Segnalazione errori ed eventuali migliorie:

Per segnalare eventuali errori e/o migliorie possibili, si prega di utilizzare il **sistema di Issues fornito da GitHub** all'interno della pagina della repository stessa contenente questi ed altri appunti (link fornito al di sotto).

Gli appunti sono in continuo aggiornamento, pertanto, previa segnalazione, si prega di controllare se l'errore sia ancora presente nella versione più recente.

Licenza di distribuzione:

These documents are distributed under the [GNU Free Documentation License](#), a form of copyleft intended to be used on manuals, textbooks or other types of document in order to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifications, either commercially or non-commercially.

Contatti dell'autore e ulteriori link:

- Github: <https://github.com/ph04>
- Email: alessio.bandiera02@gmail.com
- LinkedIn: [Alessio Bandiera](#)

1

Linguaggi ed espressioni regolari

1.1 Linguaggi

1.1.1 Stringhe

Definizione 1.1.1.1: Alfabeto

Si definisce **alfabeto** un qualsiasi insieme finito, non vuoto; i suoi elementi sono detti **simboli** o **caratteri**.

Esempio 1.1.1.1 (Alfabeto). $\Sigma = \{0, 1, x, y, z\}$ è un alfabeto, composto da 5 simboli.

Definizione 1.1.1.2: Stringa

Sia Σ un alfabeto; una **stringa su Σ** è una sequenza finita di simboli di Σ ; la **stringa vuota** è denotata con ε ; inoltre

- data una stringa w su Σ , $|w|$ è la lunghezza di w ;
- se w ha lunghezza $n \in \mathbb{N}$, allora è possibile scrivere che $w = w_1w_2 \cdots w_n$ con $w_i \in \Sigma$ e $i \in [1, n]$.

Esempio 1.1.1.2 (Stringa). Sia $\Sigma = \{0, 1, x, y, z\}$ un alfabeto; allora una sua possibile stringa è $w = x1y0z$.

Definizione 1.1.1.3: Stringa inversa

Sia Σ un alfabeto, e $w = w_1w_2 \cdots w_n$ una sua stringa; allora si definisce l'**inversa** di w come segue:

$$w^{\mathcal{R}} := w_nw_{n-1} \cdots w_1$$

Definizione 1.1.1.4: Concatenazione

Sia Σ un alfabeto, e $x = x_1x_2 \cdots x_n, y = y_1y_2 \cdots y_n$ due sue stringhe; allora xy è la stringa ottenuta attraverso la **concatenazione** di x ed y .

Per indicare una stringa concatenata con se stessa k volte, si utilizza la notazione

$$x^k = \underbrace{xx \cdots x}_{k \text{ volte}}$$

Si noti che per ogni stringa x su Σ , si ha che $x^0 = \varepsilon$.

Definizione 1.1.1.5: Prefisso

Sia Σ un alfabeto, ed x, y due sue stringhe; allora x è detto essere un **prefisso** di y se $\exists z \mid xz = y$, con z stringa in Σ .

Esempio 1.1.1.3 (Prefisso). Sia $\Sigma = \{a, b, c\}$ un alfabeto; allora la stringa $x = ab$ è prefisso della stringa $y = abc$, poiché esiste una stringa $z = c$ tale per cui $xz = abc = y$.

1.1.2 Linguaggi**Definizione 1.1.2.1: Linguaggio**

Sia Σ un alfabeto; si definisce **linguaggio** un insieme di stringhe di Σ ; dunque, un linguaggio L su Σ è un elemento $L \in \mathcal{P}(\Sigma)$.

Un linguaggio è detto **prefisso**, se nessun suo elemento è prefisso di un altro. Il linguaggio vuoto si indica con \emptyset .

Esempio 1.1.2.1 (Linguaggio binario). Il linguaggio binario, che verrà utilizzato estensivamente, è il seguente:

$$\Sigma = \{0, 1\}$$

1.1.3 Funzioni di Hamming**Definizione 1.1.3.1: Distanza di Hamming**

Sia Σ un alfabeto, e siano x, y due sue stringhe tali che $|x| = |y|$; si definisce **distanza di Hamming** tra x ed y il numero di caratteri per cui x ed y differiscono. In simboli, date due stringhe $x = x_1 \cdots x_n, y = y_1 \cdots y_n$ con $n \in \mathbb{N}$, si ha che

$$d_H(x, y) := |\{i \in [1, n] \mid x_i \neq y_i\}|$$

Esempio 1.1.3.1 (Distanza di Hamming). Siano $x = 1011101$ ed $y = 1001001$ due stringhe sull'alfabeto $\Sigma = \{0, 1\}$; poiché differiscono per 2 caratteri, si ha che $d_H(x, y) = 2$.

Definizione 1.1.3.2: Peso di Hamming

Sia $\Sigma = \{0, \dots, 9\}$ l'alfabeto composto dalle 10 cifre decimali, e sia x una sua stringa; si definisce **peso di Hamming** di x il numero di elementi di x diversi da 0. In simboli, data una stringa $x = x_1 \cdots x_n$, con $n \in \mathbb{N}$, si ha che

$$w_H(x) := |\{i \in [1, n] \mid x_i \neq 0\}|$$

Osservazione 1.1.3.1: Peso di Hamming di stringhe binarie

Sia $\Sigma = \{0, 1\}$ l'alfabeto binario; allora, il peso di Hamming di una sua stringa è il numero di 1 che la compongono.

1.2 Determinismo

1.2.1 Definizioni

Definizione 1.2.1.1: DFA

Un **DFA** (*Deterministic Finite Automaton*) è una quintupla $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, dove:

- Q è l'**insieme degli stati** dell'automa, un insieme *finito*;
- Σ è l'**alfabeto dell'automa**, un insieme *finito*;
- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ è la **funzione di transizione**, che definisce la relazione tra gli stati;
- $q_0 \in Q$ è lo **stato iniziale**;
- $F \subseteq Q$ è l'**insieme degli stati accettanti**, sui quali le stringhe possono terminare.

Esempio 1.2.1.1 (DFA). Un esempio di DFA è il seguente:



Figura 1.1: Un DFA.

esso può essere descritto secondo la quintupla $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ come segue:

- $Q = \{q_1, q_2, q_3\}$
- $\Sigma = \{0, 1\}$

- δ è la seguente:

	0	1
q_1	q_1	q_2
q_2	q_3	q_2
q_3	q_2	q_2

- q_1 è lo stato iniziale
- $F = \{q_2\} \subseteq Q$

Definizione 1.2.1.2: Stringhe accettate (DFA)

Sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un DFA, e sia $w = w_1 \cdots w_n$ una stringa tale per cui $\forall i \in [1, n] \quad w_i \in \Sigma$; allora, M **accetta** w se esiste una sequenza di stati $r_0, \dots, r_n \in Q$ tali per cui

- $r_0 = q_0$
- $\forall i \in [0, n-1] \quad \delta(r_i, w_{i+1}) = r_{i+1}$
- $r_n \in F$

Definizione 1.2.1.3: Linguaggio di un automa

Sia M un automa; allora il **linguaggio di** M è un insieme, indicato con $L(M)$, contenente tutte le stringhe accettate da M ; simmetricamente, si dice che M **riconosce** $L(M)$.

Esempio 1.2.1.2 (Linguaggio di un automa). Si consideri il seguente automa M_1 :



Figura 1.2: Un automa M_1 .

sapendo che $\Sigma = \{0, 1\}$, che q_1 è lo stato iniziale, e che $F = \{q_2\}$, è facilmente verificabile che

$$L(M_1) = \{w \mid w = w_1 \cdots w_{n-1}1, n \in \mathbb{N}\}$$

ovvero, M_1 accetta tutte e sole le stringhe che terminano per 1.

Definizione 1.2.1.4: Linguaggi riconosciuti da automi

Dato un linguaggio A , ed un automa M , si dice che M **riconosce** A se e solo se

$$A = \{w \mid M \text{ accetta } w\}$$

Definizione 1.2.1.5: Linguaggi di una classe di automi

Sia \mathcal{C} una classe di automi; allora, l'**insieme dei linguaggi** riconosciuti dagli automi della classe \mathcal{C} è definito come segue:

$$\mathcal{L}(\mathcal{C}) := \{L \mid \exists M \in \mathcal{C} : L(M) = L\}$$

dove L è un linguaggio, ed M è un automa della classe \mathcal{C} .

1.2.2 Linguaggi regolari**Definizione 1.2.2.1: Linguaggio regolare**

Un linguaggio è detto **regolare** se e solo se esiste un DFA che lo riconosce. La classe dei linguaggi regolari è denotata con REG. Allora, in simboli, si ha che

$$\text{REG} := \mathcal{L}(\text{DFA})$$

Esempio 1.2.2.1 (Linguaggi regolari). Sia $\Sigma = \{0, 1\}$ l'alfabeto binario, ed L il seguente linguaggio:

$$L := \{w \mid w = 0^n 1, n \in \mathbb{N} - \{0\}\}$$

Tale linguaggio è regolare, poiché esiste il seguente DFA che lo riconosce:

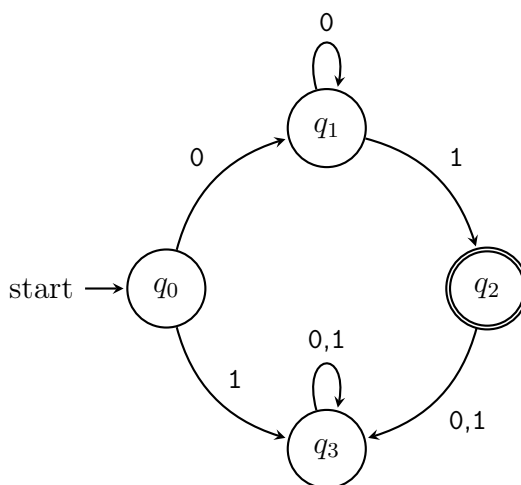


Figura 1.3: Un DFA che riconosce L .

1.3 Non determinismo

1.3.1 Definizioni

Definizione 1.3.1.1: NFA

Un **NFA** (*Nondeterministic Finite Automaton*) è un automa in cui possono esistere varie scelte per lo stato successivo in ogni punto della computazione; infatti, ogni volta che si presenta una scelta, la computazione si *ramifica*, ed ognuno degli automi nei vari rami computa tali scelte indipendentemente.

Formalmente, un NFA è una quintupla $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, dove:

- Q è l'**insieme degli stati**, un insieme *finito*;
- Σ è l'**alfabeto dell'automata**, un insieme *finito*;
- $\delta : Q \times \Sigma_\epsilon \rightarrow \mathcal{P}(Q)$ è la **funzione di transizione**, che definisce la relazione tra gli stati;
- $q_0 \in Q$ è lo **stato iniziale**;
- $F \subseteq Q$ è l'**insieme degli stati accettanti**;

dove $\Sigma_\epsilon := \Sigma \cup \{\epsilon\}$.

Se il simbolo di input successivo non compare su alcuno degli archi uscenti dallo stato corrente in una data ramificazione di computazione, tale ramo cessa di proseguire; inoltre, se *una qualunque copia* della macchina è in uno stato accettante, l'**NFA** accetta la stringa di input. Si noti che questa divisione è descritta dall'insieme potenza $\mathcal{P}(Q)$, poiché da ogni stato si può arrivare ad un *insieme* di stati.

Esempio 1.3.1.1 (NFA). Un esempio di NFA è il seguente:

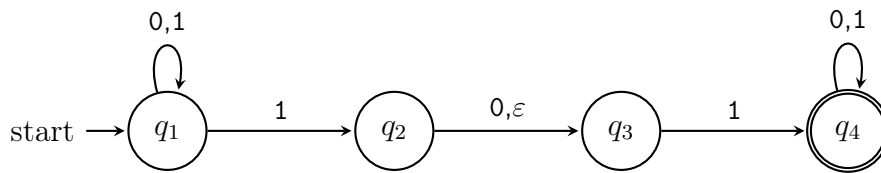


Figura 1.4: L'NFA N .

esso può essere descritto secondo la quintupla $N = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ come segue:

- $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$
- $\Sigma = \{0, 1\}$
- δ è la seguente:

Definizione 1.3.1.2: Stringhe accettate (NFA)

Sia $N = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un NFA, e sia $w = w_1 \cdots w_n$ una stringa tale per cui $\forall i \in [1, n] \quad w_i \in \Sigma$; allora, N **accetta** w se esiste una sequenza di stati $r_0, \dots, r_n \in Q$ tali per cui

- $r_0 = q_0$
- $\forall i \in [0, n-1] \quad r_{i+1} \in \delta(r_i, w_{i+1})$
- $r_n \in F$

1.3.2 Equivalenze**Definizione 1.3.2.1: Equivalenza tra automi**

Due automi si dicono **equivalenti** se e solo se riconoscono lo stesso linguaggio.

Teorema 1.3.2.1: DFA ed NFA

Le classi dei DFA e degli NFA sono equivalenti; in simboli

$$\text{REG} := \mathcal{L}(\text{DFA}) = \mathcal{L}(\text{NFA})$$

Dimostrazione.

Prima implicazione. Per l'Osservazione 1.3.1.1 si ha che

$$\text{DFA} \subseteq \text{NFA} \implies \mathcal{L}(\text{DFA}) \subseteq \mathcal{L}(\text{NFA})$$

Seconda implicazione. Si noti che

$$\mathcal{L}(\text{NFA}) \subseteq \mathcal{L}(\text{DFA}) \iff \forall A \in \mathcal{L}(\text{NFA}) \quad \exists M \in \text{DFA} \mid A = L(M)$$

Allora, sia $A \in \mathcal{L}(\text{NFA})$, e dunque esiste un NFA $N = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ in grado di riconoscerlo. Inoltre, si definisca

$$\forall k \geq 0 \quad E(R) := \bigcup_{r \in R} \delta^k(r, \varepsilon)$$

l'insieme degli stati raggiungibili da stati in R , applicando (anche ripetutamente) un numero arbitrario di ε -archi (si noti che per $k = 0$ si ha che $R \subseteq E(R)$).

Allora, sia $M = (Q', \Sigma, \delta', q'_0, F)$ il DFA definito come segue:

- $Q' := \mathcal{P}(Q)$, scelto tale da rappresentare ogni possibile stato di N ;
- $\forall R \in Q', a \in \Sigma \quad \delta'(R, a) := \bigcup_{r \in R} E(\delta(r, a))$, scelta tale in quanto, per un certo insieme di stati $R \in Q'$ di N , a $\delta'(R, a)$ viene assegnata l'unione degli stati che sarebbero stati raggiunti in N dagli $r \in R$ con a , calcolati dunque attraverso $\delta(r, a)$, aggiungendo infine i possibili ε -archi;

- $q'_0 := E(\{q_0\})$, scelto tale da far iniziare M esattamente dove aveva inizio N , comprendendo anche i possibili ε -archi iniziali;
- $F' := \{R \in Q' \mid R \cap F \neq \emptyset\}$, che corrisponde all'insieme degli insiemi di stati di N contenenti almeno uno stato accettante in N .

Allora M è in grado di riconoscere A per costruzione, poiché il DFA costruito emula l'NFA di partenza, tenendo anche in considerazione gli ε -archi. Dunque, sia N che M riconoscono A , e per definizione sono di conseguenza equivalenti. \square

1.3.3 Unione

Definizione 1.3.3.1: Unione

Siano A e B due linguaggi su un alfabeto Σ ; allora, si definisce l'**unione di A e B** il seguente linguaggio:

$$A \cup B := \{x \mid x \in A \vee x \in B\}$$

Si noti che, per ogni linguaggio L , è vero che $\emptyset \cup L = L \cup \emptyset = L$.

Esempio 1.3.3.1 (Unione). Sia $\Sigma = \{a, \dots, z\}$ l'alfabeto composto da 26 lettere, e siano $A = \{\text{uno}, \text{due}\}$ e $B = \{\text{tre}, \text{quattro}\}$ due linguaggi su Σ . Allora, si ha che

$$A \cup B = \{\text{uno}, \text{due}, \text{tre}, \text{quattro}\}$$

Proposizione 1.3.3.1: Chiusura sull'unione (REG)

Siano A e B due linguaggi regolari su un alfabeto Σ ; allora $A \cup B$ è regolare. In simboli

$$\forall A, B \in \text{REG} \quad A \cup B \in \text{REG}$$

Dimostrazione I. Per definizione, A e B sono linguaggi regolari, dunque esistono due DFA

$$\begin{aligned} M_1 &= (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1) \\ M_2 &= (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_2, F_2) \end{aligned}$$

tali da riconoscere rispettivamente A e B . Allora, sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ il DFA definito come segue:

- $Q := Q_1 \times Q_2 = \{(r_1, r_2) \mid r_1 \in Q_1 \wedge r_2 \in Q_2\}$, scelto tale in quanto permette di avere tutte le possibili combinazioni di stati dei due automi di partenza;
- $\forall (r_1, r_2) \in Q, a \in \Sigma \quad \delta((r_1, r_2), a) := (\delta_1(r_1, a), \delta_2(r_2, a))$, scelta tale in quanto permette di simulare entrambi gli automi di partenza contemporaneamente, mandando ogni stato di M_1 ed M_2 dove sarebbe andato nei rispettivi automi di appartenenza;
- $q_0 := (q_1, q_2)$, scelto tale in quanto deve essere lo stato in cui entrambe gli automi in ipotesi iniziavano;

- $F := (F_1 \times Q_2) \cup (Q_1 \times F_2) = \{(r_1, r_2) \mid r_1 \in F_1 \vee r_2 \in F_2\}$, scelto tale in quanto permette di simulare gli stati accettanti di entrambi gli automi, e vanno prese tutte le coppie che vedono almeno uno dei due stati come accettante, poiché altrimenti non si accetterebbero delle stringhe accettate o da M_1 , o da M_2 .

Allora, poiché M è in grado di simulare M_1 ed M_2 contemporaneamente, per costruzione accetterà ogni stringa di A e di B , dunque riconoscendo $A \cup B$, e di conseguenza $A \cup B$ è regolare per definizione. \square

Dimostrazione II. Per definizione, A e B sono linguaggi regolari, dunque per il [Teorema 1.3.2.1](#) esistono due NFA

$$\begin{aligned} N_1 &= (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1) \\ N_2 &= (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_2, F_2) \end{aligned}$$

tali da riconoscere rispettivamente A e B . Allora, sia $N = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ l'NFA definito come segue:

- $Q := \{q_0\} \cup Q_1 \cup Q_2$, dove q_0 è un nuovo stato — dunque Q è scelto tale da includere gli stati sia di N_1 che di N_2 ;

$$\bullet \forall q \in Q, a \in \Sigma_\varepsilon \quad \delta(q, a) := \begin{cases} \delta_1(q, a) & q \in Q_1 \\ \delta_2(q, a) & q \in Q_2 \\ \{q_1, q_2\} & q = q_0 \wedge a = \varepsilon \\ \emptyset & q = q_0 \wedge a \neq \varepsilon \end{cases}, \text{ scelta tale da poter eseguire}$$

contemporaneamente gli NFA N_1 ed N_2 , definendo per casi la funzione di transizione; infatti, si noti che si è posta $\delta(q_0, \varepsilon) := \{q_1, q_2\}$ in modo da collegare il nuovo stato q_0 a q_1 e q_2 , gli stati iniziali di N_1 ed N_2 rispettivamente;

- q_0 è il nuovo stato, che rappresenta lo stato iniziale di N ;
- $F := F_1 \cup F_2$, scelto tale da costruire N in modo che accetti una stringa se e solo se la accetterebbero N_1 o N_2 .



Figura 1.5: Rappresentazione dell'NFA N descritto.

Allora, l'NFA risultante N è in grado di computare contemporaneamente N_1 ed N_2 , ed è dunque in grado di riconoscere A e B contemporaneamente; di conseguenza, N riconosce $A \cup B$, che risulta dunque essere regolare per il [Teorema 1.3.2.1](#). \square

1.3.4 Intersezione

Definizione 1.3.4.1: Intersezione

Siano A e B due linguaggi su un alfabeto Σ ; allora, si definisce l'**intersezione di A e B** il seguente linguaggio:

$$A \cap B := \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$$

Esempio 1.3.4.1 (Intersezione). Sia $\Sigma = \{\mathbf{a}, \dots, \mathbf{z}\}$ l'alfabeto composto da 26 lettere, e siano $A = \{\mathbf{uno}, \mathbf{due}\}$ e $B = \{\mathbf{uno}, \mathbf{tre}\}$ due linguaggi su Σ . Allora, si ha che

$$A \cap B = \{\mathbf{uno}\}$$

Proposizione 1.3.4.1: Chiusura sull'intersezione (REG)

Siano A e B due linguaggi regolari su un alfabeto Σ ; allora $A \cap B$ è regolare. In simboli

$$\forall A, B \in \text{REG} \quad A \cap B \in \text{REG}$$

Dimostrazione. Per definizione, A e B sono linguaggi regolari, dunque esistono due DFA

$$\begin{aligned} M_1 &= (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1) \\ M_2 &= (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_2, F_2) \end{aligned}$$

tali da riconoscere rispettivamente A e B . Allora, sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ il DFA definito come segue:

- $Q := Q_1 \times Q_2 = \{(r_1, r_2) \mid r_1 \in Q_1 \wedge r_2 \in Q_2\}$, scelto tale in quanto permette di avere tutte le possibili combinazioni di stati dei due automi di partenza;
- $\forall (r_1, r_2) \in Q, a \in \Sigma \quad \delta((r_1, r_2), a) := (\delta_1(r_1, a), \delta_2(r_2, a))$, scelta tale in quanto permette di simulare entrambi gli automi di partenza contemporaneamente, mandando ogni stato di M_1 ed M_2 dove sarebbe andato nei rispettivi automi di appartenenza;
- $q_0 := (q_1, q_2)$, scelto tale in quanto deve essere lo stato in cui entrambe gli automi in ipotesi iniziavano;
- $F := F_1 \times F_2 = \{(r_1, r_2) \mid r_1 \in F_1 \wedge r_2 \in F_2\}$, scelto tale in quanto vanno prese tutte e sole le coppie composte da 2 stati entrambe accettanti negli automi di partenza.

Allora, poiché M è in grado di simulare M_1 ed M_2 contemporaneamente, ma accetta solo quando accettavano entrambe gli automi di partenza, per costruzione accetterà ogni stringa di $A \cap B$, che di conseguenza risulta essere regolare per definizione. \square

1.3.5 Concatenazione

Definizione 1.3.5.1: Concatenazione

Siano A e B due linguaggi su un alfabeto Σ ; allora, si definisce la **concatenazione di A e B** il seguente linguaggio:

$$A \circ B = \{xy \mid x \in A \wedge y \in B\}$$

Si noti che, per ogni linguaggio L , è vero che

- $\emptyset \circ L = L \circ \emptyset = \emptyset$
- $\{\varepsilon\} \circ L = L \circ \{\varepsilon\} = L$.

Inoltre, il simbolo \circ può essere talvolta omissa.

Esempio 1.3.5.1 (Concatenazione). Sia $\Sigma = \{\mathbf{a}, \dots, \mathbf{z}\}$ l'alfabeto composto da 26 lettere, e siano $A = \{\mathbf{uno}, \mathbf{due}\}$ e $B = \{\mathbf{tre}, \mathbf{quattro}\}$ due linguaggi su Σ . Allora, si ha che

$$A \circ B := \{\mathbf{unotre}, \mathbf{unoquattro}, \mathbf{duetre}, \mathbf{duequattro}\}$$

Proposizione 1.3.5.1: Chiusura sulla concatenazione (REG)

Siano A e B due linguaggi regolari su un alfabeto Σ ; allora $A \circ B$ è regolare. In simboli

$$\forall A, B \in \text{REG} \quad A \circ B \in \text{REG}$$

Dimostrazione. Per definizione, A e B sono linguaggi regolari, dunque per il [Teorema 1.3.2.1](#) esistono due NFA

$$\begin{aligned} N_1 &= (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1) \\ N_2 &= (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_2, F_2) \end{aligned}$$

tali da riconoscere rispettivamente A e B . Allora, sia $N = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ l'NFA costruito come segue:

- $Q := Q_1 \cup Q_2$, scelto tale da includere gli stati di entrambe gli automi N_1 ed N_2 di partenza;
- $q_0 := q_1$, scelto tale da far iniziare l'esecuzione dell'automa su N_1 ;
- $F := F_2$, scelto tale da far terminare l'esecuzione dell'automa su N_2 ;
- $\forall q \in Q, a \in \Sigma_\varepsilon \quad \delta(q, a) := \begin{cases} \delta_1(q, a) & q \in Q_1 - F_1 \vee (q \in F_1 \wedge a \neq \varepsilon) \\ \delta_1(q, a) \cup \{q_2\} & q \in F_1 \wedge a = \varepsilon \\ \delta_2(q, a) & q \in Q_2 \end{cases},$

scelta tale da anteporre l'esecuzione di N_1 a quella di N_2 ; infatti, se $q \in Q_1 - F_1$ (è uno stato non accettante di N_1), oppure $q \in F_1$ ma $a \neq \varepsilon$, l'esecuzione di N_1 non viene alterata; diversamente, se invece $q \in F_1$ e $a = \varepsilon$, all'insieme di stati

$\delta_1(q, \varepsilon)$ viene aggiunto q_2 , ovvero lo stato iniziale di N_2 , in modo da effettuare la concatenazione tra i due NFA non deterministicamente.



Figura 1.6: Rappresentazione dell'NFA N descritto.

Allora, l'NFA N costruito computa inizialmente N_1 , e se vengono raggiunti suoi stati accettanti, l'esecuzione prosegue attraverso N_2 , al fine di realizzare la concatenazione tra le stringhe. Di conseguenza, l'automa è in grado di riconoscere $A \circ B$ per costruzione, e dunque $A \circ B$ è regolare per il [Teorema 1.3.2.1](#). \square

1.3.6 Elevamento a potenza

Definizione 1.3.6.1: Elevamento a potenza

Sia A un linguaggio; allora, si definisce **elevamento a potenza di A** il seguente linguaggio:

$$A^n := \underbrace{A \circ \dots \circ A}_{n \text{ volte}} = \begin{cases} A^0 := \{\varepsilon\} \\ A^n = A^{n-1} \circ A & n \geq 1 \end{cases}$$

Esempio 1.3.6.1 (Elevamento a potenza). Sia $\Sigma = \{\mathbf{a}, \dots, \mathbf{z}\}$ l'alfabeto composto da 26 lettere, e sia $A = \{\mathbf{uno}, \mathbf{due}\}$ un linguaggio su Σ . Allora, si ha che

$$A^2 = \{\varepsilon, \mathbf{uno}, \mathbf{due}, \mathbf{unouno}, \mathbf{unodue}, \mathbf{dueuno}, \mathbf{duedue}\}$$

Proposizione 1.3.6.1: Chiusura sull'elevamento (REG)

Sia A un linguaggio regolare su un alfabeto Σ , ed $n \in \mathbb{N}$; allora A^n è regolare. In simboli

$$\forall A \in \text{REG}, n \in \mathbb{N} \quad A^n \in \text{REG}$$

Dimostrazione. La dimostrazione procede per induzione su $n \in \mathbb{N}$.

Caso base. Per $n = 0$, si ha che $A^0 = \{\varepsilon\}$, il quale è regolare poiché ad esempio il DFA

$$M_\varepsilon = (\{q\}, \Sigma, \delta, q, \{q\})$$

è in grado di riconoscerlo.

Ipotesi induttiva. Per $n \in \mathbb{N}$, si assume che A^n sia regolare.

Passo induttivo. Per il caso $n + 1$, si ha che $A^{n+1} = A^n \circ A$ per definizione dell'elevamento a potenza; inoltre, per ipotesi induttiva A^n è regolare, A è regolare per ipotesi, e poiché REG è chiuso rispetto alla concatenazione per la [Proposizione 1.3.5.1](#), si ha che $A^{n+1} = A^n \circ A$ è regolare.

□

1.3.7 Star

Definizione 1.3.7.1: Star

Sia A un linguaggio; allora, si definisce l'operazione unaria **star** che definisce il seguente linguaggio:

$$A^* := \{x_1 \cdots x_k \mid k \geq 0 \wedge \forall i \in [1, k] \quad x_i \in A\} = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} L^n = \{\varepsilon\} \cup L \cup L^2 \cup \dots$$

Si noti che $k = 0 \implies \varepsilon \in A^*$ per ogni linguaggio A .

Esempio 1.3.7.1 (Star). Sia $\Sigma = \{a, \dots, z\}$ l'alfabeto composto da 26 lettere, e sia $A = \{\text{uno}, \text{due}\}$ un linguaggio su Σ . Allora, si ha che

$$A^* := \{\varepsilon, \text{uno}, \text{due}, \text{unouno}, \text{unodue}, \text{dueuno}, \text{duedue}, \dots\}$$

Esempio 1.3.7.2 (Stringhe binarie). Si noti che nel caso di $\Sigma = \{0, 1\}$, si ha che Σ^* è l'insieme di ogni stringa binaria, di arbitraria lunghezza.

Proposizione 1.3.7.1: Chiusura sull'operazione star (REG)

Sia A un linguaggio regolare su un alfabeto Σ ; allora A^* è regolare. In simboli

$$\forall A \in \text{REG} \quad A^* \in \text{REG}$$

Dimostrazione. Per definizione, A è un linguaggio regolare, dunque per il [Teorema 1.3.2.1](#) esiste un NFA

$$N_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1)$$

tale da riconoscere A . Allora, sia $N = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ l'NFA costruito come segue:

- $Q := \{q_0\} \cup Q_1$, dove q_0 è un nuovo stato, posto prima di N_1 ;
- q_0 è il nuovo stato iniziale;

- $F := \{q_0\} \cup F_1$, poiché q_0 deve essere accettante, in modo tale da accettare ε (si noti che $\varepsilon \in A^*$ per ogni linguaggio A);

$$\bullet \forall q \in Q, a \in \Sigma_\varepsilon \quad \delta(q, a) := \begin{cases} \delta_1(q, a) & q \in Q_1 - F_1 \vee (q \in F_1 \wedge a \neq \varepsilon) \\ \delta_1(q, a) \cup \{q_1\} & q \in F_1 \wedge a = \varepsilon \\ \{q_1\} & q = q_0 \wedge a = \varepsilon \\ \emptyset & q = q_0 \wedge a \neq \varepsilon \end{cases},$$

scelta tale da ricominciare l'esecuzione dell'automa ogni volta che viene raggiunto uno stato accettante in N_1 ; infatti, se $q \in Q_1 - F_1$ (è uno stato non accettante di N_1), oppure q è accettante e $a \neq \varepsilon$, l'esecuzione procede normalmente con $\delta_1(q, a)$; diversamente, se $q \in F_1$ ma $a = \varepsilon$, allora l'esecuzione deve ricominciare da capo per poter effettuare la concatenazione multipla delle stringhe in A che caratterizzano l'operazione star, e dunque a $\delta_1(q, a)$ viene aggiunto q_1 (lo stato iniziale di N_1); infine, ponendo $\delta(q_0, \varepsilon) := \{q_1\}$ si realizza l' ε -arco iniziale che collega q_0 (il nuovo stato) a q_1 .



Figura 1.7: Rappresentazione dell'NFA N descritto.

Allora, poiché l'NFA N è in grado di ricominciare l'esecuzione ogni volta che questa sarebbe terminata in N_1 , è in grado di accettare molteplici copie concatenate delle stringhe in A , in maniera non deterministica, e dunque per definizione N riconosce A^* , il quale risulta allora essere regolare per il [Teorema 1.3.2.1](#). \square

1.3.8 Complemento

Definizione 1.3.8.1: Complemento

Sia A un linguaggio definito su un alfabeto Σ ; allora si definisce il **complemento di A** il seguente linguaggio:

$$\overline{A} := \{x \in \Sigma^* \mid x \notin A\}$$

Esempio 1.3.8.1 (Complemento). Sia $\Sigma = \{0, 1\}$ l'alfabeto binario, e sia $A = \{00, 1\}$ un linguaggio definito su di esso. Allora il suo complemento è il seguente:

$$\overline{A} = \{\varepsilon, 0, 1, 01, 10, 000, \dots\}$$

Proposizione 1.3.8.1: Chiusura sul complemento (REG)

Sia A un linguaggio regolare su un alfabeto Σ ; allora \overline{A} è regolare. In simboli

$$\forall A \in \text{REG} \quad \overline{A} \in \text{REG}$$

Dimostrazione. In ipotesi A è un linguaggio regolare, dunque per definizione esiste un DFA

$$M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$$

che lo riconosce; allora, è sufficiente considerare il DFA

$$M' := (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q - F)$$

per ottenere un DFA tale da riconoscere \overline{A} ; allora, \overline{A} è regolare per definizione. □

Proposizione 1.3.8.2: Leggi di De Morgan

Siano A e B definiti su un alfabeto Σ ; allora, sono vere le seguenti, che prendono il nome di **leggi di De Morgan**:

$$i) \quad \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$$

$$ii) \quad \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

Dimostrazione. Omessa. □

1.4 Espressioni regolari

1.4.1 Definizioni

Definizione 1.4.1.1: Espressione regolare

Sia Σ un alfabeto; allora, R si definisce **espressione regolare** se soddisfa una delle seguenti caratteristiche:

- $R = \emptyset$
- $R = \varepsilon$
- $R \in \Sigma$

Un'espressione regolare, dunque, è un modo compatto di definire un linguaggio. Si noti che le definizioni successive sono in grado di espandere la definizione appena fornita. Dato un alfabeto Σ , la classe delle espressioni regolari definite su di esso è denotata con $\text{re}(\Sigma)$. La classe di tutte le espressioni regolari è denotata con **REX**.

Data un'espressione regolare R , con $L(R)$ si intende il linguaggio che R descrive, ovvero l'insieme di stringhe che R rappresenta. Dunque, sono vere le seguenti:

- $L(\emptyset) = \emptyset$
- $L(\varepsilon) = \{\varepsilon\}$
- $\forall a \in \Sigma \quad L(a) = \{a\}$

Definizione 1.4.1.2: Unione

Siano R_1 ed R_2 due espressioni regolari su un alfabeto Σ ; allora, si definisce l'**unione** di R_1 ed R_2 la seguente espressione regolare:

$$(R_1 \cup R_2)$$

e rappresenta uno qualsiasi dei caratteri di R_1 o di R_2 . Dunque, si ha che

$$\forall R \in \text{re}(\Sigma) \mid \exists R_1, R_2 \in \text{re}(\Sigma) : R = R_1 \cup R_2 \quad L(R) = L(R_1) \cup L(R_2)$$

Si noti che, per ogni espressione regolare R , è vero che $\emptyset \cup R = R \cup \emptyset = \emptyset$.

Esempio 1.4.1.1 (Unione). Sia $\Sigma = \{a, b, c\}$ un alfabeto; un esempio di espressione regolare di unione su Σ è il seguente:

$$R = (a \cup c)$$

ed il valore di questa espressione equivale da **a** oppure **c**, e dunque $L(R) = \{a, c\}$.

Esempio 1.4.1.2 (Espressioni regolari particolari). Sia $\Sigma = \{0, 1\}$ un alfabeto; l'espressione regolare $(0 \cup 1)$ rappresenta il linguaggio che consiste di tutte le stringhe di lunghez-

za 1 sull'alfabeto Σ , e dunque l'espressione regolare descritta si abbrevia talvolta con il simbolo Σ stesso.

Definizione 1.4.1.3: Concatenazione

Siano R_1 ed R_2 due espressioni regolari; allora, si definisce la **concatenazione** di R_1 ed R_2 la seguente espressione regolare:

$$(R_1 \circ R_2)$$

e rappresenta le stringhe che iniziano per R_1 e terminano con R_2 . Dunque, si ha che

$$\forall R \in \text{re}(\Sigma) \mid \exists R_1, R_2 \in \text{re}(\Sigma) : R = R_1 \circ R_2 \quad L(R) = L(R_1) \circ L(R_2)$$

Per indicare la concatenazione di R con sé stessa, si usa la seguente notazione

$$R^k := \underbrace{R \circ \dots \circ R}_{k \text{ volte}}$$

Si noti che, per ogni espressione regolare R , è vero che:

- $\emptyset \circ R = R \circ \emptyset = \emptyset$
- $\varepsilon \circ R = R \circ \varepsilon = R$

Inoltre, il simbolo \circ può essere talvolta omissso.

Esempio 1.4.1.3 (Concatenazione). Sia $\Sigma = \{a, b, c\}$ un alfabeto; un esempio di espressione regolare di concatenazione su Σ è il seguente:

$$R = (a \circ c)$$

che può essere scritto equivalentemente come ac , e dunque $L(R) = \{ac\}$.

Definizione 1.4.1.4: Star

Sia R un'espressione regolare; allora, si definisce l'operazione unaria **star** su R la seguente espressione regolare:

$$(R^*)$$

e tutte rappresenta le stringhe che si possono ottenere concatenando un qualsiasi numero di caratteri di R , e descrive dunque il linguaggio che consiste di tutte le stringhe dell'alfabeto di R . Dunque, si ha che

$$\forall R \in \text{re}(\Sigma) \mid \exists R_1 \in \text{re}(\Sigma) : R = R_1^* \quad L(R) = L(R_1)^*$$

Si noti che R^* comprende ε per qualsiasi espressione regolare R .

Spesso si usa la notazione $R^+ := RR^*$, ovvero le stringhe che si ottengono attraverso la concatenazione di 1 o più stringhe di R . Di conseguenza, si ha che $R^+ \cup \varepsilon = R^*$.

Esempio 1.4.1.4 (Star). Sia $\Sigma = \{a, b, c\}$ un alfabeto; un esempio di espressione regolare di star su Σ è il seguente:

$$R = (\Sigma^*)$$

che descrive il linguaggio che consiste di tutte le stringhe possibili sull'alfabeto, e dunque

$$L(R) = \{\varepsilon, a, b, c, aa, bb, cc, \dots\}$$

Esempio 1.4.1.5 (Espressioni regolari). Sia $\Sigma = \{0, 1\}$ un alfabeto; i seguenti sono esempi di espressioni regolari su Σ :

- $L(0^*10^*) = \{w \mid w \text{ contiene un solo } 1\}$;
- $L(\Sigma^*001\Sigma^*) = \{w \mid w \text{ contiene la stringa } 001 \text{ come sottostringa}\}$;
- $L(0\Sigma^*0 \cup 1\Sigma^*1 \cup 0 \cup 1) = \{w \mid w \text{ inizia e termina con lo stesso carattere}\}$, poiché si noti che l'ordine delle operazioni, a meno di parentesi, è (i) star, (ii) concatenazione, ed infine (iii) unione;
- $L((0 \cup \varepsilon)(1 \cup \varepsilon)) = \{\varepsilon, 0, 1, 01\}$;
- $L(\emptyset^*) = \{\varepsilon\}$, poiché \emptyset rappresenta il linguaggio vuoto, e dunque l'unica stringa che si può ottenere concatenando un qualsiasi numero di volte elementi del linguaggio vuoto, è ε .

Definizione 1.4.1.5: Linguaggi descritti da espressioni regolari

Dato un alfabeto Σ , si definisce **classe dei linguaggi di Σ descritti da espressioni regolari** il seguente insieme:

$$\mathcal{L}(\text{re}(\Sigma)) := \{L \subseteq \Sigma^* \mid \exists R \in \text{re}(\Sigma) : L = L(R)\}$$

1.5 Configurazioni

1.5.1 Configurazioni di DFA

Definizione 1.5.1.1: Estensione di δ (DFA)

Sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un DFA; è possibile estendere la definizione della funzione di transizione δ , utilizzando la notazione dell'operazione star, mediante la seguente definizione ricorsiva:

$$\delta^* : Q \times \Sigma^* \rightarrow Q : (q, x) \mapsto \begin{cases} \delta^*(q, \varepsilon) = \delta(q, \varepsilon) \\ \delta^*(q, by) = \delta^*(\delta(q, b), y) \quad b \in \Sigma, y \in \Sigma^* \mid x = by \end{cases}$$

Si noti che tale funzione prende in input uno stato ed una stringa, e restituisce lo stato in cui il DFA si troverà al termine della lettura dell'intera stringa di input. La notazione δ^* è coerente con la definizione dell'operazione star, poiché viene calcolata la transizione di stati attraverso δ fintanto che l'input non è stato esaurito.

Definizione 1.5.1.2: Configurazione (DFA)

Sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un DFA; una tupla $(q, x) \in Q \times \Sigma^*$ è detta **configurazione** di M se q è pari allo stato attuale della computazione di un certo input, ed x è la porzione di input rimanente da leggere.

Definizione 1.5.1.3: Relazione tra configurazioni (DFA)

Sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un DFA, e siano $(p, x), (q, y) \in Q \times \Sigma^*$ due sue configurazioni durante la computazione di un certo input; allora, tali due configurazioni si dicono essere **in relazione** se e solo se dall'una è possibile passare all'altra. In simboli:

$$(p, x) \vdash_M (q, y) \iff \begin{cases} p, q \in Q \\ x, y \in \Sigma^* \\ \exists a \in \Sigma \mid x = ay \wedge \delta(p, a) = q \end{cases}$$

Osservazione 1.5.1.1: Chiusura transitiva di \vdash

Sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un DFA; si noti che la chiusura transitiva della relazione tra configurazioni \vdash , ovvero \vdash^* , equivale a calcolare gli input attraverso la funzione di transizione estesa δ^* definita nella [Definizione 1.5.1.1](#).

Esempio 1.5.1.1 (Chiusura transitiva di \vdash). Sia $M = (Q, \sigma, \delta, q_0, F)$ un DFA, e sia $(p, x) \in Q \times \Sigma^*$ una sua configurazione durante la computazione di un certo input; inoltre, siano $a, b, c \in \Sigma$ tali che $x = abc$. Inoltre, siano vere le seguenti:

- $(p, abc) \vdash_M (p_1, bc)$
- $(p_1, bc) \vdash_M (p_2, c)$
- $(p_2, c) \vdash_M (q, \varepsilon)$

per certi $p, p_1, p_2, q \in Q$; allora, si ha che $(p, x) \vdash_M^* (q, \varepsilon)$, poiché è possibile raggiungere lo stato q , partendo da p , attraverso l'input $x = abc$.

Osservazione 1.5.1.2: Determinismo

Dato un DFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, è possibile fornire una definizione di *determinismo* alternativa, attraverso la relazione tra configurazioni definita nella [Definizione 1.5.1.3](#), come segue:

$$\forall q \in Q, a \in \Sigma, x \in \Sigma^* \quad \exists! p \in Q \mid (q, ax) \vdash_M (p, x)$$

1.5.2 Configurazioni di NFA

TODO

Osservazione 1.5.2.1: Linguaggio di un automa

Dato un automa M , la [Definizione 1.2.1.3](#) si può riscrivere in simboli come segue:

$$L(M) := \{x \in \Sigma^* \mid \delta^*(q_0, x) \in F \iff \exists q \in F \mid (q_0, x) \vdash_M^* (q, \varepsilon)\}$$

Si noti che, nella definizione, verrà presa in considerazione la funzione δ^* corrispondente alla classe dell'automata M in questione.

1.6 Non determinismo generalizzato

1.6.1 Definizioni

Definizione 1.6.1.1: GNFA

Un **GNFA** (*Generalized Nondeterministic Finite Automaton*) è una versione generalizzata di un NFA, in cui gli archi delle transizioni sono espressioni regolari sull'alfabeto dato.

Un GNFA legge blocchi di simboli dall'input, e si muove lungo gli archi che sono etichettati da espressioni regolari che possono descrivere il blocco di simboli letto.

Inoltre, essendo una versione generalizzata di un NFA, un GNFA può avere diversi modi di elaborare la stessa stringa di input, e accetta quest'ultima se la sua elaborazione può far sì che il GNFA si trovi in uno stato accettante al suo termine.

Nota: All'interno di questi appunti, a meno di specifica, si assume che ogni GNFA preso in considerazione abbia:

- un solo stato di inizio, privo di archi entranti, connesso con ogni altro stato, ma non con sé stesso;
- un solo stato accettante, privo di archi uscenti, non connesso con altri archi;
- ogni altro stato collegato con ogni altro stato, a meno di quello iniziale, anche con sé stessi.

Formalmente, dato un alfabeto Σ , un GNFA del tipo appena descritto è una quintupla $(Q, \Sigma, \delta, q_{\text{start}}, q_{\text{accept}})$ definita come segue:

- Q è l'**insieme degli stati** dell'automa, un insieme *finito*
- Σ è l'**alfabeto dell'automa**, un insieme *finito*
- $\delta : (Q - \{q_{\text{accept}}\}) \times (Q - \{q_{\text{start}}\}) \rightarrow \text{re}(\Sigma)$ è la **funzione di transizione**, che definisce la relazione tra gli stati; si noti che δ ha come dominio il prodotto cartesiano tra gli stati, e come codominio $\text{re}(\Sigma)$, poiché a differenza di un normale DFA o NFA, un GNFA prende come input 2 stati (che non possono essere né quello iniziale né quello accettante) e restituisce un'espressione regolare; inoltre, il dominio di δ è $(Q - \{q_{\text{accept}}\}) \times (Q - \{q_{\text{start}}\})$ per evitare di includere l'arco $(q_{\text{accept}}, q_{\text{start}})$
- $q_{\text{start}} \in Q$ è lo **stato iniziale**
- $q_{\text{accept}} \in Q$ è lo **stato accettante**

Esempio 1.6.1.1 (GNFA). Il seguente è il digramma di un GNFA sull'alfabeto $\Sigma = \{a, b\}$.



Figura 1.8: Un GNFA.

Definizione 1.6.1.2: Stringhe accettate (GNFA)

Sia $G = (Q, \Sigma, \delta, q_{\text{start}}, q_{\text{accept}})$ un GNFA, e sia $w = w_1 \cdots w_n$ una stringa tale per cui $\forall i \in [1, n] \quad w_i \in \Sigma^*$; allora, G **accetta** w se esiste una sequenza di stati $q_0, \dots, q_n \in Q$ tali per cui

- $q_0 = q_{\text{start}}$
- $\forall i \in [0, n-1] \quad w_i \in L(\delta(q_i, q_{i+1}))$, ovvero, w_i deve far parte del linguaggio rappresentato dall'espressione regolare sull'arco da q_i a q_{i+1}
- $q_n = q_{\text{accept}}$

1.6.2 Equivalenze**Metodo 1.6.2.1: GNFA di DFA**

Sia M un DFA; allora per costruire un GNFA ad esso equivalente, è sufficiente:

- aggiungere un nuovo stato iniziale, con un ε -arco entrante sul vecchio stato iniziale;
- aggiungere un nuovo stato accettante, con ε -archi entranti provenienti dai vecchi stati accettanti;
- sostituire gli archi con etichette multiple, con archi aventi come etichetta l'unione delle etichette;
- aggiungere archi etichettati con \emptyset tra gli stati non collegati (si noti che questa operazione non varia l'automa di partenza, poiché un arco etichettato con \emptyset non potrà mai essere utilizzato)

Esempio 1.6.2.1 (GNFA di DFA). Si consideri il seguente DFA

$$D = (\{b, c\}, \{0, 1, 2\}, \delta, b, \{c\})$$

rappresentato come segue:



Figura 1.9: Il DFA D .

Allora, il suo GNFA equivalente è il seguente:



Figura 1.10: Il GNFA di D .

Algoritmo 1.6.2.1: Espressione regolare di un GNFA

Dato un GNFA $G = (Q, \Sigma, \delta, q_{\text{start}}, q_{\text{accept}})$, l'algoritmo restituisce un'espressione regolare equivalente a G .

```

1: function CONVERTGNFATOREGEX( $G$ )
2:   if  $|Q| == 2$  then
3:     return  $\delta(q_{\text{start}}, q_{\text{accept}})$ 
4:   else if  $|Q| > 2$  then
5:      $q \in Q - \{q_{\text{start}}, q_{\text{accept}}\}$ 
6:      $Q' := Q - \{q\}$ 
7:     for  $q_i \in Q' - \{q_{\text{accept}}\}$  do
8:       for  $q_j \in Q' - \{q_{\text{start}}\}$  do
9:          $\delta'(q_i, q_j) := \delta(q_i, q)\delta(q, q)^*\delta(q, q_j) \cup \delta(q_i, q_j)$ 
10:      end for
11:    end for
12:     $G' := (Q', \Sigma, \delta', q_{\text{start}}, q_{\text{accept}})$ 
13:    return convertGNFatoRegEx( $G'$ )
14:  end if
15: end function

```

Idea. L'algoritmo inizia prendendo in input un GNFA G , ed inizialmente viene controllato il numero di stati di G :

- se $|Q| = 2$, allora sicuramente $Q = \{q_{\text{start}}, q_{\text{accept}}\}$, e poiché si vuole restituire l'espressione regolare equivalente a G , di fatto quest'ultimo è costituito esclusivamente dall'espressione regolare posta sull'arco tra q_{start} e q_{accept} , dunque è sufficiente restituirla in output (riga 3);
- se $|Q| > 2$, allora viene costruito un GNFA G' , avente uno stato in meno, ovvero q (scelto alla riga 5), naturalmente diverso da q_{start} e da q_{accept} ; successivamente, per ogni coppia di stati (q_i, q_j) , viene definita $\delta'(q_i, q_j)$ in modo tale da accorpare tutte le possibili configurazioni di stati; ad esempio, prendendo in esame il seguente GNFA



dove R_1 , R_2 , R_3 ed R_4 sono espressioni regolari, è possibile vedere che il seguente GNFA è ad esso equivalente



poiché l'arco che q ha su sé stesso è stato descritto attraverso $(R_2)^*$, gli archi (q_i, q) e (q, q_j) sono stati inseriti per concatenazione, ed infine è stato unito l'altro possibile cammino verso q_j tramite unione;

- inoltre, si noti che tale espressione regolare — contenuta nella riga 9 — tiene in considerazione tutte le possibili configurazioni di archi tra stati di un GNFA, per come è stato definito il GNFA all'interno della [Definizione 1.6.1.1](#); infatti, per $|Q| > 2$, tra due stati q_i e q_j , oltre ad avere la garanzia che esista l'arco (q_i, q_j) , esiste sicuramente un terzo stato q intermedio tale per cui esistano archi (q_i, q) e (q, q_j) , ed esiste anche l'arco (q, q) ;
- infine, sia per la [Definizione 1.6.1.1](#), sia per come la riga 5 dell'algoritmo opera, per ogni GNFA si ha che $|Q| \geq 2$, dunque non è necessario gestire ulteriori casi.

Allora, l'algoritmo è in grado di restituire l'espressione regolare equivalente a G .

Dimostrazione. La dimostrazione procede per induzione su k , il numero di stati del GNFA.

Caso base. Se $k = 2$, ovvero se G ha solo 2 stati, necessariamente $Q = \{q_{\text{start}}, q_{\text{accept}}\}$, e dunque $\text{convertGNFatoRegEx}(G) = \delta(q_{\text{start}}, q_{\text{accept}})$, come descritto nella riga 3.

Ipotesi induttiva. Se G è un GNFA con $k - 1$ stati, allora $\text{convertGNFatoRegEx}(G)$ è un'espressione regolare equivalente a G .

Passo induttivo. È necessario dimostrare che, se G è un GNFA con k stati, allora $\text{convertGNFatoRegEx}(G)$ è un'espressione regolare equivalente a G . In primo luogo, è necessario dimostrare che G e G' sono equivalenti, e dunque sia w una stringa accettata da G ; allora, in un ramo accettante della computazione, G entra in una sequenza di stati

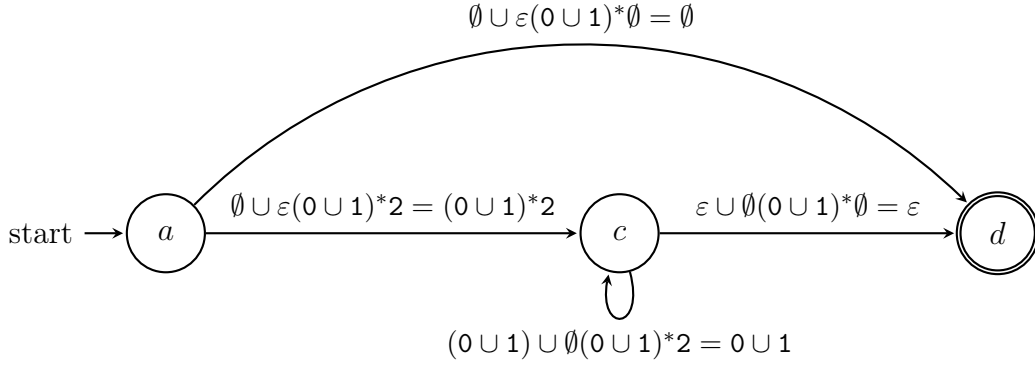
$$q_{\text{start}}, q_1, q_2, \dots, q_{\text{accept}}$$

dunque, se il ramo non contiene lo stato rimosso q , allora sicuramente G' accetta w ; viceversa, se q è contenuto all'interno di tale ramo, allora per quanto discusso all'interno dell'idea di dimostrazione, l'espressione regolare inserita al posto dello stato q rimosso è in grado di tenere in considerazione ogni possibile configurazione di archi, e dunque G' accetta sicuramente w ; infine, è possibile applicare la stessa osservazione per mostrare che una stringa accettata da G' deve essere necessariamente accettata anche da G . Allora, poiché G e G' sono equivalenti, e G ha k stati, allora necessariamente al termine del k -esimo passo dell'algoritmo, G' avrà $k - 1$ stati, e su di esso è possibile applicare l'ipotesi induttiva.

□

Esempio 1.6.2.2 (Espressioni regolari di GNFA). Sia G il GNFA dell'[Esempio 1.6.2.1](#); allora, la sua espressione regolare equivalente è ottenibile attraverso i seguenti passaggi:

- viene inizialmente rimosso lo stato b , ottenendo l'automa G' :

Figura 1.11: G' , ovvero il GNFA G , dopo aver rimosso b .

- successivamente, viene rimosso lo stato c , ottenendo l'automa G'' :

Figura 1.12: G'' , ovvero il GNFA G' , dopo aver rimosso c .

- allora, poiché G'' ha 2 stati, l'espressione regolare cercata — equivalente a G — è posta sull'arco (a, d) , ed è

$$(0 \cup 1)^*2(0 \cup 1)^*$$

Teorema 1.6.2.1: Linguaggi ed espressioni regolari

Un linguaggio è regolare se e solo se esiste un'espressione regolare che lo descrive; dunque, tutti e soli i linguaggi regolari sono descritti da espressioni regolari. In simboli, per un certo alfabeto Σ si ha che

$$\text{REG} = \mathcal{L}(\text{REX})$$

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia A un linguaggio regolare; allora, per definizione, esiste un DFA che lo riconosce, e sia questo M . Utilizzando il [Metodo 1.6.2.1](#), è possibile costruire un GNFA che sia equivalente ad M ; sia quest'ultimo G . Allora, è sufficiente applicare l'[Algoritmo 1.6.2.1](#) su G per ottenere l'espressione regolare ad esso equivalente; dunque, segue la tesi.

Seconda implicazione. Sia A un linguaggio su un alfabeto Σ , descritto da un'espressione regolare R . Allora, la dimostrazione procede costruendo degli NFA, per casi, come segue:

- $R = \emptyset \implies L(R) = \emptyset$; allora, il seguente NFA è in grado di riconoscere $L(R)$:

Figura 1.13: Un NFA in grado di riconoscere $L(\emptyset)$.

L'automa mostrato è descritto dalla quintupla $N = (\{q_0\}, \Sigma, \delta, q_0, \emptyset)$, dove $\forall a \in \Sigma \quad \delta(q_0, a) = \emptyset$.

- $R = \varepsilon \implies L(R) = \{\varepsilon\}$; allora, il seguente NFA è in grado di riconoscere $L(R)$:

Figura 1.14: Un NFA in grado di riconoscere $L(\varepsilon)$.

L'automa mostrato è descritto dalla quintupla $N = (\{q_0\}, \Sigma, \delta, q_0, \{q_0\})$, dove $\forall a \in \Sigma \quad \delta(q_0, a) = \emptyset$.

- $R \in \Sigma \implies L(R) = \{a\}$ per qualche $a \in \Sigma$; allora, il seguente NFA è in grado di riconoscere $L(R)$:

Figura 1.15: Un NFA in grado di riconoscere $L(a)$.

L'automa mostrato è descritto dalla quintupla $N = (\{q_1, q_2\}, \Sigma, \delta, q_1, \{q_2\})$, dove $\forall q \in \{q_1, q_2\}, x \in \Sigma \quad \delta(q, x) = \begin{cases} \{q_2\} & q = q_1 \wedge x = a \\ \emptyset & q \neq q_1 \vee x \neq a \end{cases}$.

- si noti che se esistono due espressioni regolari R_1 ed R_2 tali che $R = R_1 \cup R_2$, oppure $R = R_1 \circ R_2$, o ancora $R = R_1^*$, è sufficiente costruire gli NFA che sono stati costruiti nelle dimostrazioni della [Proposizione 1.3.3.1](#), della [Proposizione 1.3.5.1](#) e della [Proposizione 1.3.7.1](#).

Allora, per qualsiasi espressione regolare R , tale da descrivere un certo linguaggio A , è possibile costruire un NFA che riconosce il linguaggio che R descrive. Allora, per il [Teorema 1.3.2.1](#), A è regolare.

□

Corollario 1.6.2.1: Equivalenze tra classi di automi

Si verifica che

$$\text{REG} := \mathcal{L}(\text{DFA}) = \mathcal{L}(\text{NFA}) = \mathcal{L}(\text{GNFA}) = \mathcal{L}(\text{REX})$$

Dimostrazione. Dal Teorema 1.3.2.1, dal Teorema 1.6.2.1, dall'Algoritmo 1.6.2.1, e dal Metodo 1.6.2.1, si ha che

$$\mathcal{L}(\text{NFA}) = \text{REG} = \mathcal{L}(\text{REX}) \supseteq \mathcal{L}(\text{GNFA}) \supseteq \text{REG}$$

e dunque segue la tesi. \square

1.7 Linguaggi non regolari

1.7.1 Pumping lemma

Principio 1.7.1.1: Principio della piccionaia

Siano A e B due insiemi finiti, tali che $|B| < |A|$; allora, non esiste alcuna funzione iniettiva $f : A \rightarrow B$.

In altri termini, avendo una piccionaia con m caselle, non è possibile inserire più di m piccioni al suo interno: alcuni volatili dovranno necessariamente condividere la propria casella.

Definizione 1.7.1.1: Linguaggio non regolare

Un linguaggio A si definisce **non regolare** se non esiste un DFA in grado di riconoscerlo. In simboli

$$A \notin \text{REG}$$

Lemma 1.7.1.1: Pumping lemma (REG)

Sia A un linguaggio regolare; allora, esiste un $p \in \mathbb{N}$, detto **lunghezza del pumping**, tale che per ogni stringa $s \in A$ tale per cui $|s| \geq p$, esistono 3 stringhe $x, y, z \mid s = xyz$, soddisfacenti le seguenti condizioni:

- $\forall i \geq 0 \quad xy^iz \in A$
- $|y| > 0$ (o, equivalentemente, $y \neq \varepsilon$)
- $|xy| \leq p$

Dimostrazione. Poiché A è un linguaggio regolare in ipotesi, per definizione esiste un DFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_1, F)$ in grado di riconoscerlo. Allora, sia $p := |Q|$, e sia $s \in A \mid s = s_1s_2 \cdots s_n$ tale che $\forall i \in [1, n] \quad s_i \in \Sigma$, e $n \geq p$. Inoltre, sia

$$\forall i \in [1, n] \quad r_{i+1} := \delta(r_i, s_i)$$

la sequenza di stati attraversati da M mentre elabora s ; dunque, si ha che $r_{n+1} \in F$. Si noti che la sequenza di stati ha dunque cardinalità

$$|\{r_1, \dots, r_{n+1}\}| = n + 1$$

in quanto devono essere attraversati n archi, e dunque $n + 1$ stati. Inoltre, $n \geq p \iff n + 1 \geq p + 1$, e dunque per il [Principio 1.7.1.1](#), poiché $p := |Q|$, due dei primi $p + 1$ stati della sequenza devono necessariamente essere lo stesso stato; siano r_j il primo ed r_l il secondo, con $j \neq l$. Allora, sicuramente $l \leq p + 1$, poiché r_l è uno stato tra i primi $p + 1$.

Si pongano dunque

$$\begin{cases} x := s_1 \cdots s_{j-1} \\ y := s_j \cdots s_{l-1} \\ z := s_l \cdots s_n \end{cases}$$

Allora, si ha che:

- x porta M da r_1 ad r_j , y porta M da $r_j = r_l$ ad r_j — dunque y porta M da r_j ad r_j stesso — ed infine z porta M da r_j ad r_{n+1} , e poiché $r_{n+1} \in F$, M accetta sicuramente $xy^i z$ per ogni $i \geq 0$;
- $j \neq l \implies |y| > 0$;
- $l \leq p + 1 \implies |xy| \leq p$, poiché r_l è lo stato che viene dopo aver letto $s_{l-1} \in y$, e dunque nel caso limite si ha che $l = p + 1 \implies |xy| = p$.

Allora, sono soddisfatte tutte le condizioni della tesi. \square

Esempio 1.7.1.1 (Dimostrazione del pumping lemma). La seguente rappresentazione raffigura un automa definito come segue:

$$M = (\{q_1, \dots, q_9, \dots, q_{13}\}, \Sigma, \delta, q_1, \{q_{13}\})$$

dove $|Q| = 13$, e $r_j = r_l = q_9$ è lo stato che si ripete all'interno dei primi $p + 1$ stati della sequenza presa in esame nella dimostrazione del [Lemma 1.7.1.1](#).



Figura 1.16: L'automa M descritto

Esempio 1.7.1.2 (Pumping lemma in REG). Si consideri il linguaggio

$$L := \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

e per assurdo, sia $L \in \text{REG}$, e dunque per esso vale il [Lemma 1.7.1.1](#). Allora, sia $p \in \mathbb{N}$ la lunghezza del pumping di L , e si consideri la seguente stringa

$$s := 0^p 1^p \implies |s| = 2p > p$$

avente lunghezza sicuramente maggiore di p . Siano inoltre x, y, z tali da soddisfare il pumping lemma, ed in particolare $|xy| \leq p$, ma poiché $s := 0^p 1^p = xy^i z$ per ogni $i \in \mathbb{N}$, allora necessariamente la stringa xy è composta da soli 0, ed inoltre $|y| > 0$ implica che y ha almeno uno 0. Siano allora

- $k := |x| \implies x = 0^k$, poiché x è composta solo da 0
- $m := |y| > 0 \implies y = 0^m$, poiché y è composta solo da 0 (ed almeno uno)
- $|xy| \leq p \implies k + m \leq p \implies z = 0^{p-m-k} 1^p$ per gli 0 restanti

e, ponendo ad esempio $i = 2$, si ottiene che

$$xy^2 z = 0^k 0^{2m} 0^{p-m-k} 1^p$$

ma il numero di 1 di questa stringa è pari a p , mentre il numero di 0 è pari a

$$k + 2m + (p - m - k) = m + p$$

e poiché $m > 0$, si ha che $m + p > p$. Dunque $xy^2 z \notin L$ poiché non è una stringa della forma $0^n 1^n$. \nmid

Osservazione 1.7.1.1: Condizioni del pumping lemma (REG)

Si noti che la seconda condizione del [Lemma 1.7.1.1](#) stabilisce che $y \neq \varepsilon$, poiché altrimenti il teorema sarebbe trivialmente verificato; infatti, ammettendo $y = \varepsilon$, dato un linguaggio $A \in \text{REG}$, e presa una sua stringa $s \in A$, ponendo $p := |x|$ esistono sicuramente stringhe $x, z \mid s = xz$ tali da verificare le restanti condizioni del lemma, infatti:

- $\forall i \geq 0 \quad xy^i z = x\varepsilon^i z = xz =: s \in A$
- $|xy| = |x\varepsilon| = |x| \leq p := |x|$

e non sarebbe necessaria l'ipotesi per cui A debba essere regolare; dunque, non sarebbe possibile utilizzare tale lemma per determinare la classe di un dato linguaggio.

Linguaggi e grammatiche context-free

2.1 Grammatiche context-free

2.1.1 Definizioni

Definizione 2.1.1.1: Grammatica

Una grammatica è un insieme di regole di sostituzione di stringhe, in grado di produrre quest'ultime a partire da una variabile iniziale, mediante una sequenza di scambi. Le regole sono scritte nella forma

$$\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$$

Definizione 2.1.1.2: Acontestualità

Si definisce **acontestualità** la condizione per cui il lato sinistro delle regole di una grammatica è composto sempre da un solo simbolo.

Definizione 2.1.1.3: CFG

Una **grammatica context-free** — detta anche **acontestuale** —, o CFG (*Context-Free Grammar*) è una quadrupla (V, Σ, R, S) , dove

- V è l'insieme delle **variabili**, un insieme *finito*
- Σ è l'insieme dei **terminali**, un insieme *finito*, dove $\Sigma \cap V = \emptyset$
- R è l'insieme delle **regole** o **produzioni**, un insieme *finito*
- $S \in V$ è la **variabile iniziale**, ed è generalmente il simbolo alla sinistra della prima regola della grammatica

Le CFG si scrivono nella forma

$$X \rightarrow Y$$

dove $X \in V$ e $X \rightarrow Y \in R$ è una regola della CFG. Due regole $X \rightarrow Y, X \rightarrow Z \in R$ possono essere accorpate con il simbolismo $X \rightarrow Y \mid Z$.

Siano u, v, w stringhe, e $A \rightarrow w \in R$; allora si dice che uAv **produce** uwv , denotato con

$$uAv \Rightarrow uwv$$

Date due stringhe u, v , se $u = v$, oppure esistono stringhe u_1, \dots, u_k con $k \geq 0$ tali che

$$u \Rightarrow u_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow u_k \Rightarrow v$$

si dice che u **deriva** v , ed è denotato con $u \xRightarrow{*} v$.

Esempio 2.1.1.1 (CFG). Un esempio di CFG è il seguente:

$$\begin{aligned} A &\rightarrow 0A1 \\ A &\rightarrow B \\ B &\rightarrow \# \end{aligned}$$

In essa, si hanno:

$$\begin{aligned} V &:= \{A, B\} \\ \Sigma &:= \{0, 1, \#\} \\ S &:= A \in V \end{aligned}$$

Da essa, è possibile ottenere ad esempio la stringa 000#111 attraverso le seguenti sostituzioni:

$$A \Rightarrow 0A1 \Rightarrow 000A111 \Rightarrow 000B111 \Rightarrow 000\#111$$

Definizione 2.1.1.4: Linguaggio di una grammatica

Data una grammatica G , il suo **linguaggio** è l'insieme delle stringhe che la grammatica G è in grado di generare, ed è denotato con $L(G)$. In simboli, data una grammatica G , si ha che

$$L(G) = \{w \in \Sigma^* \mid S \xRightarrow{*} w\}$$

Definizione 2.1.1.5: CFL

Se G è una CFG, allora $L(G)$ è detto **linguaggio context-free**, o CFL (*Context-Free Language*).

Esempio 2.1.1.2 (CFL). Si prenda in esame la CFG dell'[Esempio 2.1.1.1](#), e sia essa G . Allora, in tale grammatica il linguaggio risulta essere

$$L(G) = \{0^n \# 1^n \mid n \geq 0\}$$

Esempio 2.1.1.3 (Grammatiche e linguaggi). I seguenti sono esempi di linguaggi, e corrispondenti grammatiche che li descrivono:

- il linguaggio $L_1 := \{w \in \{0,1\}^* \mid w \text{ contiene almeno tre } 1\}$ è descritto dalla seguente grammatica:

$$\begin{aligned} S_1 &\rightarrow X1X1X \\ X &\rightarrow \varepsilon \mid 0X \mid 1X \end{aligned}$$

- il linguaggio $L_2 := \{w \in \{0,1\}^* \mid w = w^R \wedge |w| \equiv 0 \pmod{2}\}$ è descritto dalla seguente grammatica:

$$S \rightarrow 0S0 \mid 1S1 \mid \varepsilon$$

- il linguaggio $L_3 := \{a^i b^j c^{i+j} \mid i, j \geq 0\}$ è descritto dalla seguente grammatica:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow aSc \mid X \\ X &\rightarrow bSc \mid \varepsilon \end{aligned}$$

Metodo 2.1.1.1: CFG di DFA

Dato un DFA $D = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, per ottenere una grammatica $G = (V, \Sigma, R, S)$ tale che $L(D) = L(G)$, è necessario:

- associare una variabile V_i , per ogni stato $q_i \in Q$, con $i \in [1, n]$ (assumendo $|Q| = n$);
- porre $S = V_0$;
- introdurre una regola $V_i \rightarrow aV_j$ se vale $\delta(q_i, a) = q_j$ per qualche coppia di stati $q_i, q_j \in Q$;
- aggiungere la regola $V_i \rightarrow \varepsilon$ se $q_i \in F$.

Corollario 2.1.1.1: Linguaggi regolari e context-free

Si verifica che

$$\text{REG} \subsetneq \text{CFL}$$

Dimostrazione. Sia $L \in \text{REG}$, e dunque per definizione esiste un DFA M tale che $L(M) = L$; dunque, attraverso il [Metodo 2.1.1.1](#) è possibile convertire M in una CFG G , tale che $L(G) = L(M) = L$; allora, segue la tesi. \square

2.1.2 Ambiguità

Definizione 2.1.2.1: Derivazione a sinistra

Sia G una grammatica; una stringa si dice essere **derivata a sinistra** se è stata ottenuta applicando regole di G sulle variabili più a sinistra disponibili.

Esempio 2.1.2.1 (Derivazione a sinistra). TODO

Definizione 2.1.2.2: Ambiguità

Sia G una grammatica; se esistono due stringhe u, v con $u \neq v$, tali che esiste una terza stringa z *derivata a sinistra* sia da u che da v attraverso le regole di G , si dice che G genera z **ambiguamente**.

Simmetricamente, G si dice essere **ambigua** se genera stringhe ambiguamente.

Esempio 2.1.2.2 (Stringhe generate ambiguamente). Si consideri la seguente grammatica:

$$E \rightarrow E+E \mid E*E \mid a$$

Attraverso essa, è possibile ottenere ad esempio la seguente stringa, applicando la derivazione a sinistra:

$$E \Rightarrow E*E \Rightarrow E+E*E \Rightarrow a+E*E \Rightarrow a+a*E \Rightarrow a+a*a$$

Si noti però che è possibile ottenere questa stringa applicando anche la seguente derivazione a sinistra:

$$E \Rightarrow E+E \Rightarrow a+E \Rightarrow a+E*E \Rightarrow a+a*E \Rightarrow a+a*a$$

Dunque, la grammatica descritta risulta essere ambigua, poiché esistono due derivazioni a sinistra per la stringa $a+a*a$.

Definizione 2.1.2.3: Linguaggi inerentemente ambigui

Un linguaggio si dice essere **inerentemente ambiguo** se non esistono grammatiche non ambigue che lo possano generare.

2.1.3 Forma normale di Chomsky

Definizione 2.1.3.1: Forma normale di Chomsky

Una CFG (V, Σ, R, S) è in **forma normale di Chomsky**, o CNF (*Chomsky Normal Form*), se ogni regola è della forma

$$\begin{aligned} A &\rightarrow BC \\ A &\rightarrow a \end{aligned}$$

dove $A, B, C \in V$, $a \in \Sigma$, $S := A$, e la regola $S \rightarrow \varepsilon \in R$ è sempre ammessa, la quale prende il nome di **ε -regola**.

Dunque, la CNF non permette di

- i) avere **regole unitarie**, ovvero regole della forma $X \rightarrow B \in R$, con $X, B \in V$;
- ii) avere regole della forma $X \rightarrow u \in R$, con $u \in (V \cup \Sigma)^* - \Sigma$;
- iii) avere regole della forma $X \rightarrow S \in R$, con $X \in V$.

Metodo 2.1.3.1: CNF di CFG

Sia $G = (V, \Sigma, R, S)$ una CFG; allora, è possibile rendere G in CNF attraverso i seguenti passaggi:

- vengono aggiunte la variabile $S_0 \in V$, e la regola $S_0 \rightarrow S \in R$, in modo da non avere S alla destra di nessuna regola in R ;
- ogni regola $A \rightarrow \varepsilon \in R$ — con $A \in V - \{S\}$ — viene rimossa da R , e successivamente per ogni regola della forma $X \rightarrow uAv \in R$ — per qualche $X \in V$ e $u, v \in (V \cup \Sigma)^*$ — viene aggiunta $X \rightarrow uv \in R$; inoltre, se $X \rightarrow A \in R$, allora viene aggiunta $X \rightarrow \varepsilon \in R$, solo se quest'ultima non era stata precedentemente rimossa;
- ogni regola unitaria $A \rightarrow B \in R$ viene rimossa, e per ogni regola $B \rightarrow u \in R$ — con $u \in (V \cup \Sigma)^*$ — viene aggiunta $A \rightarrow u \in R$, solo se questa non era una regola unitaria precedentemente rimossa;
- ogni regola restante $A \rightarrow u_1 \dots u_k$ con $k \geq 3$ — dove $u_1, \dots, u_k \in (V \cup \Sigma)^*$ — viene rimpiazzata con le regole

$$\begin{aligned} A &\rightarrow u_1 A_1 \\ A_1 &\rightarrow u_2 A_2 \\ A_2 &\rightarrow u_3 A_3 \\ &\vdots \\ A_{k-2} &\rightarrow u_{k-1} u_k \end{aligned}$$

dove $A_1, \dots, A_{k-2} \in V$, creando dunque una *catena di sostituzioni*, al fine di avere al più 2 variabili o terminali alla destra delle regole;

- infine, ogni $u_i \in \Sigma$ (dunque terminale) — per ogni $i \in [1, k]$ — viene rimpiazzato con una nuova variabile $U_i \in V$, e viene aggiunta la regola $U_i \rightarrow u_i \in R$.

Lemma 2.1.3.1: CFL generati da CFG in CNF

Ogni CFL è generato da una CFG in forma normale di Chomsky.

Dimostrazione. Sia L un CFL generato da una CFG G ; allora, attraverso il [Metodo 2.1.3.1](#), è possibile rendere G in forma normale di Chomsky, e dunque segue la tesi. \square

Esempio 2.1.3.1 (Convertire CFG in CNF). TODO

2.2 Automi a pila

2.2.1 Definizioni

Definizione 2.2.1.1: PDA

Un **PDA** (*Pushdown Automaton*) è un NFA dotato di uno **stack** illimitato, che gli consente di riconoscere alcuni linguaggi non regolari, poiché in esso è in grado di porre i simboli che legge dalla stringa di input, di fatto implementando un sistema di *memoria*.

Formalmente, un PDA è una sestupla $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F)$, dove

- Q è l'insieme degli stati, un insieme *finito*
- Σ è l'alfabeto dell'automa, un insieme *finito*
- Γ è l'alfabeto dello stack (o *pila*), un insieme *finito*
- $\delta : Q \times \Sigma_\varepsilon \times \Gamma_\varepsilon \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma_\varepsilon)$ è la **funzione di transizione**, che definisce la relazione tra gli stati
- $q_0 \in Q$ è lo **stato iniziale**
- $F \subseteq Q$ è l'insieme degli stati accettanti

dove $\Gamma_\varepsilon := \Gamma \cup \{\varepsilon\}$.

Si noti che la macchina può usare differenti alfabeti per il suo input e la sua pila, infatti la definizione formale vede due alfabeti distinti, Σ e Γ rispettivamente. Inoltre, Γ_ε compare nel prodotto cartesiano del dominio di δ , poiché il simbolo in cima allo stack del PDA è in grado di determinare anch'esso la mossa seguente dell'automa; a tal proposito, $\varepsilon \in \Gamma$ permette di ignorare il primo elemento della pila. In aggiunta, Γ_ε compare anche all'interno dell'insieme potenza (si noti che un PDA è non deterministico) del codominio di δ , al fine di decidere se salvare il simbolo letto all'interno dello stack (tramite $\varepsilon \in \Gamma$ stesso). Dunque, un'operazione di un PDA sul suo stack può essere un *push*, un *pop*, o entrambe — ottenendo l'effetto di rimpiazzare l'elemento in cima allo stack.

Esempio 2.2.1.1 (PDA). Un esempio di PDA $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_1, F)$ è il seguente:

- $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$
- $\Sigma = \{0, 1\}$
- $\Gamma = \{0, \$\}$
- $F = \{q_1, q_4\}$

e δ è data dalla seguente tabella di transizione:

Input:	0			1			ϵ		
Stack:	0	\$	ϵ	0	\$	ϵ	0	\$	ϵ
q_1									$\{(q_2, \$)\}$
q_2	$\{(q_2, 0)\}$			$\{(q_3, \epsilon)\}$					
q_3				$\{(q_3, \epsilon)\}$			$\{(q_4, \epsilon)\}$		
q_4									

Dunque, il suo diagramma di stato è il seguente:



Figura 2.1: Il PDA P .

La notazione $a; b \rightarrow c$ presente sugli archi di questo diagramma sta ad indicare che se viene letto il simbolo a dall'input, M può sostituire b , se in cima al suo stack (attraverso un'operazione di *pop*) con c (mediante un'operazione di *push*). Si noti inoltre che ognuno dei simboli può essere ϵ , e dunque

- $\epsilon; b \rightarrow c$ indica che il ramo viene eseguito senza attendere alcun simbolo di input (si noti l'Esempio 1.3.1.1 per il non determinismo)
- $a; \epsilon \rightarrow c$ indica che, alla lettura di a , viene effettuato solamente il *push* di c nello stack
- $a; b \rightarrow \epsilon$ indica che, alla lettura di a , viene effettuato solamente il *pop* di b dallo stack

Definizione 2.2.1.2: Stringhe accettate (PDA)

Sia $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F)$ un PDA, e sia $w = w_1 \cdots w_n$ una stringa tale per cui $\forall i \in [1, n] \quad w_i \in \Sigma_\varepsilon$; allora, P **accetta** w se esistono una sequenza di stati $r_0, \dots, r_n \in Q$ e una sequenza di stringhe $s_0, \dots, s_n \in \Gamma^*$ tali per cui

- $r_0 = q_0$
- $s_0 = \varepsilon$, ovvero, lo stack è inizialmente vuoto
- $\forall i \in [0, n-1] \quad \exists a, b \in \Gamma_\varepsilon, t \in \Gamma^* \mid (r_{i+1}, b) \in \delta(r_i, w_{i+1}, a) \wedge \begin{cases} s_i = at \\ s_{i+1} = bt \end{cases}$,
ovvero, M si muove correttamente in base allo stato, al simbolo nello stack, ed al prossimo simbolo di input; si noti che le stringhe s_0, \dots, s_n rappresentano di fatto il contenuto dello stack che M ha su un ramo accettante della computazione, infatti $s_i = at$ diventa $s_{i+1} = bt$ con l'iterazione successiva, dunque a è stato sostituito con b in cima alla pila
- $r_n \in F$

Osservazione 2.2.1.1: Stack vuoto

Un PDA non è in grado di controllare se il suo stack è vuoto, ma è possibile ottenere questo effetto come segue: si prenda in esame il PDA M dell'[Esempio 2.2.1.1](#); è importante notare che esso utilizza il simbolo $\$$ per capire se lo stack è vuoto o meno, poiché viene inserito sin dall'inizio (si osservi l'etichetta $\varepsilon; \varepsilon \rightarrow \$$ sull'arco (q_1, q_2)), e dunque se viene letto $\$$ in cima allo stack, M sa che quello è l'unico elemento contenuto al suo interno, e lo stack è di fatto vuoto.

Osservazione 2.2.1.2: Fine dell'input

Un PDA non è in grado di controllare se è stata raggiunta la fine della stringa di input, ma è possibile ottenere questo effetto come segue: si prenda in esame il PDA M dell'[Esempio 2.2.1.1](#); è importante notare che esso può sapere se è stata raggiunta la fine della stringa di input, poiché lo stato accettante q_4 può essere eventualmente raggiunto solamente alla lettura di ε e nel momento in cui è possibile rimuovere $\$$ dallo stack (si noti l'[Osservazione 2.2.1.1](#)).

Osservazione 2.2.1.3: Linguaggi non regolari e PDA

Si consideri il PDA dell'Esempio 2.2.1.1; esso opera come segue:

- viene posto \$ all'interno dello stack;
- fintanto che viene letto 0, viene *pushato* 0 nello stack;
- non appena viene letto 1, e fintanto che viene letto 1, viene rimosso 0 dallo stack;
- se all'interno dello stack è presente \$, allora l'automa accetta.

Dunque, di fatto, il PDA sta *contando* il numero di 0 e di 1 presenti all'interno della stringa, poiché la computazione avanza solamente se, per ognuno degli 1 letti, è possibile rimuovere uno 0 dallo stack. Infine, lo stato q_1 è accettante per poter riconoscere la stringa ε . Allora, l'automa riconosce il linguaggio

$$L = \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

il quale non è regolare per l'Esempio 1.7.1.2. In simboli, si ha che

$$\text{REG} \subsetneq \mathcal{L}(\text{PDA})$$

Esempio 2.2.1.2 (PDA). Si consideri il seguente PDA:

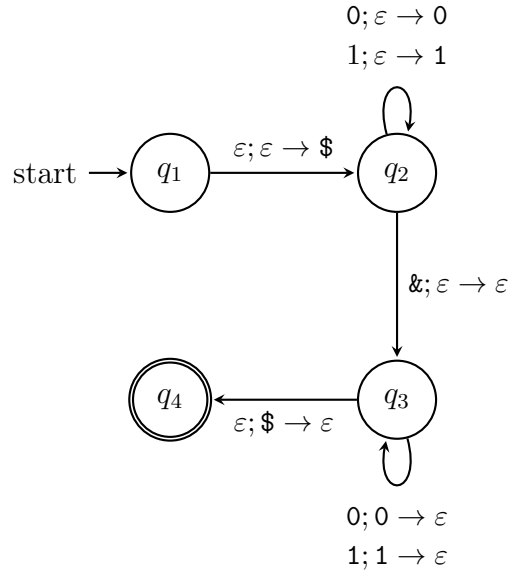


Figura 2.2: Un PDA.

Esso è in grado di riconoscere il linguaggio

$$L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w \& w^{\mathcal{R}}\}$$

poiché:

- pone \$ all'interno dello stack, per sapere quando quest'ultimo diventa vuoto;
- pone all'interno dello stack qualsiasi simbolo diverso da &;
- una volta letto il simbolo &, l'automa cambia stato lasciando lo stack intatto, ed inizia a rimuovere da questo ogni simbolo che viene letto, *solo se coincide con il simbolo posto sulla sua cima*; di fatto, questa tecnica controlla che i simboli che vengono letti dopo & siano l'opposto di come sono stati letti inizialmente;
- se trova \$ nello stack — e dunque quest'ultimo è vuoto — accetta.

2.2.2 Equivalenze

Definizione 2.2.2.1: Inserimento di stringhe nello stack

Sia $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F)$ un PDA; è possibile introdurre una notazione per effettuare l'**inserimento di una stringa nello stack** di P , come segue: dati due stati $p, q \in Q$, per inserire una stringa $u_1 \cdots u_k \in \Gamma^*$ all'interno dello stack di P , devono esistere stati $r_1, \dots, r_{k-1} \in Q$ tali per cui

$$\begin{aligned} \delta(p, a, u_1 \cdots u_k) &\ni (r_1, u_k) \\ \delta(r_1, \varepsilon, \varepsilon) &= \{(r_2, u_{k-1})\} \\ &\vdots \\ \delta(r_{k-1}, \varepsilon, \varepsilon) &= \{(q, u_1)\} \end{aligned}$$

In simboli, per indicare l'inserimento di una stringa all'interno dello stack di un PDA verrà utilizzato il seguente simbolismo

$$a; s \rightarrow xyz$$

per certi $a \in \Sigma_\varepsilon, s \in \Gamma, xyz \in \Gamma^*$.

Esempio 2.2.2.1 (Inserimenti di stringhe nello stack). Si consideri il seguente PDA:



Figura 2.3: Un PDA che inserisce una stringa nello stack.

per certi $a \in \Sigma_\varepsilon, s \in \Gamma, xyz \in \Gamma^*$; dunque, con la notazione presente sull'arco (p, q) verrà sottointesa la seguente successione di stati — per certi stati $r_1, r_2 \in Q$:



Figura 2.4: La formalizzazione del PDA precedente.

Metodo 2.2.2.1: PDA di CFG

Sia $G = (V, \Sigma, R, S)$ una CFG, e sia E l'insieme di stati tale da permettere di utilizzare la notazione descritta nella [Definizione 2.2.2.1](#); per costruire un PDA in grado di riconoscere $L(G)$, che avrà la forma

$$P := (\{q_0, q', q\} \cup E, \Sigma, V \cup \Sigma, \delta, q_0, \{q\})$$

si definiscono i seguenti:

- $\delta(q_0, \varepsilon, \varepsilon) := \{(q', S\$)\}$, ovvero, viene inserito $\$$ come marcatore nello stack di P (si noti l'[Osservazione 2.2.1.1](#)), e successivamente la stringa iniziale S di G ;
- $\forall A \in V \quad \delta(q', \varepsilon, A) := \{(q', w) \mid A \rightarrow w \in R, w \in (V \cup \Sigma)^*\}$ poiché, se viene incontrata una variabile A sulla cima dello stack di P , viene scelta una delle regole di G in grado di sostituire A (si noti che la sostituzione verrà effettuata non deterministicamente);
- $\forall a \in \Sigma \quad \delta(q', a, a) := \{(q', \varepsilon)\}$ per rimuovere i terminali dallo stack, evitando che possano essere ulteriormente rimpiazzati;
- $\delta(q', \varepsilon, \$) := \{(q, \varepsilon)\}$ per sfruttare il marcatore $\$$.

Il seguente è un diagramma che raffigura P (a meno degli stati in E):



Figura 2.5: Il PDA P appena costruito.

Esempio 2.2.2.2 (PDA di CFG). Si consideri la seguente CFG:

$$G: \begin{array}{l} S \rightarrow aTb \mid b \\ T \rightarrow Ta \mid \varepsilon \end{array}$$

Attraverso il [Metodo 2.2.2.1](#), si ottiene il seguente PDA, in grado di riconoscere $L(G)$:

Figura 2.6: Un PDA in grado di riconoscere $L(G)$.**Teorema 2.2.2.1: CFL e PDA**

Un linguaggio è context-free se e solo se esiste un PDA che lo riconosce; in simboli

$$\text{CFL} = \mathcal{L}(\text{PDA})$$

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia L un CFL, e dunque per definizione esiste una CFG G tale che $L(G) = L$; allora, utilizzando il [Metodo 2.2.2.1](#), è possibile trasformare G in un PDA ad essa equivalente — ovvero, tale da riconoscere $L(G)$ — dunque segue la tesi.

Seconda implicazione. Sia L un linguaggio riconosciuto da un PDA definito come $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F)$ — dunque $L = L(P)$ — e si consideri il seguente PDA

$$P' := (Q', \Sigma, \Gamma, \delta', q_0, F')$$

tale che:

- ogni transizione di stati possa effettuare solamente un'operazione di *push* o *pop*, *non simultaneamente*, dunque avente δ' definita come segue:

$$\forall p, q \in Q, a \in \Sigma, b, c \in \Gamma^* \quad (q, c) \in \delta(p, a, b) \implies \exists r \in Q' \mid \begin{cases} (r, \varepsilon) \in \delta'(p, a, b) \\ (q, c) \in \delta'(r, \varepsilon, \varepsilon) \end{cases}$$

al fine di trasformare la seguente transizione



come segue:



e sia $Q_{\delta'}$ l'insieme di stati tali da permettere la non simultaneità appena descritta

- $Q' := Q \cup Q_{\delta'} \cup \{q_{\text{accept}}\}$
- $F' := \{q_{\text{accept}}\}$ sia costituito da un solo stato accettante, e dunque

$$\forall q \in F' \quad (q_{\text{accept}}, \varepsilon) \in \delta'(q, \varepsilon, \varepsilon)$$

in modo da far terminare la computazione di ogni stringa accettata in q_{accept}

- venga svuotato lo stack prima di accettare qualsiasi stringa, di conseguenza

$$\forall q \in F, a \in \Sigma \quad (q, \varepsilon) \in \delta'(q, \varepsilon, a)$$

Si noti che, per costruzione di P' , si ha che $L(P) = L(P')$, poiché P' è una versione di P in cui le transizioni possono effettuare solamente un'operazione per volta sullo stack, è presente un solo stato accettante e viene svuotato lo stack prima di accettare le stringhe.

Si consideri ora la CFG $G = (V, \Sigma, R, S)$ definita come segue:

- $V := \{A_{p,q} \mid p, q \in Q'\}$
- $S := A_{q_0, q_{\text{accept}}}$
- l'insieme di regole R è composto dall'unione dei seguenti:

$$\begin{aligned} R := & \{A_{p,p} \rightarrow \varepsilon \mid p \in Q'\} \cup \\ & \cup \{A_{p,q} \rightarrow aA_{r,s}b \mid p, q, r, s \in Q', a, b \in \Sigma_\varepsilon, \exists u \in \Gamma : (r, u) \in \delta'(p, a, \varepsilon), (q, \varepsilon) \in \delta(s, b, u)\} \cup \\ & \cup \{A_{p,q} \rightarrow A_{p,r}A_{r,q} \in R \mid p, q, r \in Q'\} \end{aligned}$$

Dunque, il linguaggio di G è il seguente:

$$L(G) = \{w \in \Sigma^* \mid A_{q_0, q_{\text{accept}}} \xRightarrow{*} w\}$$

La dimostrazione procederà ora provando che $L(G) = L(P')$. A tal scopo, sarebbe dunque sufficiente dimostrare che una stringa è accettata da P' se e solo se è derivabile, attraverso le regole di G , a partire da $A_{q_0, q_{\text{accept}}}$, ma è possibile generalizzare questa proposizione dimostrando che, per ogni coppia di stati $p, q \in Q'$, $A_{p,q}$ è in grado di derivare una stringa w se e solo se w porta P' dallo stato p — avendo lo stack vuoto — allo stato q — avendo ancora lo stack vuoto.

Prima implicazione. La dimostrazione procede per induzione sul numero di passaggi nella derivazione di w , a partire da $A_{p,q}$, attraverso le regole in R .

Caso base. Se la derivazione è composta solamente da 1 passaggio, allora è stata utilizzata una regola della forma $A_{p,q} \rightarrow u_1 \dots u_k$ dove $u_1, \dots, u_k \in \Sigma^*$, dunque esclusivamente terminali. Si noti però che le uniche regole della grammatica che vedono solamente terminali sulla loro destra sono le regole del primo insieme di definizione di R , ovvero forma $A_{p,p} \rightarrow \varepsilon$ dunque, se P' si trova nello stato p , avendo lo stack vuoto, sicuramente ε è in grado di portare P' in p stesso, mantenendo vuoto lo stack.

Ipotesi induttiva forte. Dati due stati $p, q \in Q'$, se $A_{p,q}$ è in grado di derivare una stringa w , applicando al più k passaggi (con $k \geq 1$) allora w porta P' dallo stato p — avendo lo stack vuoto — allo stato q — avendo ancora lo stack vuoto.

Passo induttivo. È necessario dimostrare che l'ipotesi induttiva sia ancora verificata per derivazioni costituite da $k + 1$ passaggi. Si consideri dunque una stringa w tale che $A_{p,q} \xRightarrow{*} w$ con $k + 1$ passaggi; per costruzione di R , il primo passaggio può essere $A_{p,q} \Rightarrow aA_{r,s}b \xRightarrow{*} x$ per certi stati $r, s \in Q'$ e terminali $a, b \in \Sigma_\varepsilon$, oppure $A_{p,q} \Rightarrow A_{p,r}A_{r,q} \xRightarrow{*} x$ per un qualche stato $r \in Q'$, e dunque:

- nel primo caso, sia y la sottostringa di w generata da $A_{r,s}$, dunque $A_{r,s} \xRightarrow{*} y \implies w = ayb$, e si noti che y è stata derivata con k passaggi; allora, per ipotesi induttiva forte, y porta P' dallo stato r — avendo lo stack vuoto — allo stato s — avendo ancora lo stack vuoto; inoltre, per costruzione di R , si ha che

$$A_{p,q} \rightarrow aA_{r,s}b \in R \iff \exists u \in \Gamma \mid \begin{cases} (r, u) \in \delta'(p, a, \varepsilon) \\ (q, \varepsilon) \in \delta'(s, b, u) \end{cases}$$

e dunque, assumendo che P' abbia lo stack vuoto:

- se si trova nello stato p , leggendo a , P' può andare nello stato r , inserendo u nello stack;
- se si trova nello stato r , leggendo y , P' può andare nello stato s , lasciando lo stack invariato — per ipotesi induttiva forte;
- se si trova nello stato s , leggendo b , P' può andare nello stato q , rimuovendo u dallo stack.

allora w è in grado di portare P' dallo stato p allo stato q , lasciando invariato lo stack.

- differentemente, nel secondo caso, siano y e z sottostringhe di w generate rispettivamente da $A_{p,r}$ ed $A_{r,q}$ dunque $\begin{cases} A_{p,r} \xRightarrow{*} y \\ A_{r,q} \xRightarrow{*} z \end{cases} \implies w = yz$, e si noti che y e z sono state derivate con $k + 1$ passaggi; allora, per ipotesi induttiva forte, y e z portano, rispettivamente, P' dagli stati p

ed r — avendo lo stack vuoto — agli stati r e q — avendo ancora lo stack vuoto; allora, w è in grado di portare P' dallo stato p allo stato q , lasciando invariato lo stack;

Seconda implicazione. La dimostrazione procede per induzione sul numero di passaggi della computazione di w , da parte di P' , tra gli stati p e q .

Caso base. Se la computazione è composta da 0 passaggi, allora inizia e finisce nello stesso stato, dunque inizia e termina in p stesso; inoltre, in 0 passaggi P' non può leggere nessun carattere, dunque $w = \varepsilon$; allora, per costruzione di R , si ha che $A_{p,p} \rightarrow \varepsilon \in R \implies A_{p,p} \xRightarrow{*} w$.

Ipoesi induttiva forte. Dati due stati $p, q \in Q'$, se una stringa w porta P' dallo stato p — avendo lo stack vuoto — allo stato q — avendo ancora lo stack vuoto — attraverso al più k passaggi (con $k \geq 0$), allora $A_{p,q}$ è in grado di derivare w .

Passo induttivo. È necessario dimostrare che l'ipotesi induttiva sia ancora verificata per computazioni costituite da $k + 1$ passaggi. Se lo stack deve essere vuoto sia all'inizio della computazione (dunque su p) sia al termine (dunque su q), allora o lo stack non si è mai svuotato durante l'intera computazione, oppure esistono alcuni passaggi in cui lo stack si svuota e riempie nuovamente, e dunque:

- nel primo caso, il primo simbolo che viene inserito all'interno dello stack deve necessariamente coincidere con l'ultimo che viene rimosso, e sia questo $u \in \Gamma$; siano inoltre:
 - $a \in \Sigma_\varepsilon$ il primo input letto, partendo da p ;
 - $r \in Q'$ lo stato del secondo passaggio;
 - $s \in Q'$ lo stato del penultimo passaggio;
 - $b \in \Sigma_\varepsilon$ l'ultimo input letto, terminando in q ;

allora, segue che $(r, u) \in \delta'(p, a, \varepsilon)$ e $(q, \varepsilon) \in \delta'(s, b, u)$; si consideri ora la regola $A_{p,q} \rightarrow aA_{r,s}b \in R$ presente tra le regole di G , e sia y la sottostringa di w tale che $w = ayb$ (e dunque $A_{r,s} \xRightarrow{*} y$); si noti che, se $w = ayb$, allora y non ha necessità di rimuovere u dallo stack, ed è dunque in grado di portare P' dallo stato r allo stato s lasciando lo stack invariato; allora, poiché la porzione di computazione di y è composta da $(k + 1) - 2 = k - 1$ passaggi, è possibile applicare su essa l'ipotesi induttiva forte, per la quale $A_{r,s} \xRightarrow{*} y$; allora si ha che

$$A_{p,q} \Rightarrow aA_{r,s}b \xRightarrow{*} ayb = w \implies A_{p,q} \xRightarrow{*} w$$

- differentemente, nel secondo caso si assuma esista uno stato $r \in Q'$ tale per cui la computazione veda vuoto lo stack di P' in r ; allora, poiché la computazione da p a q è composta da $k + 1$ passaggi, le computazioni da p ad r , e da r a q possono entrambe contenere al massimo k passaggi;

allora, chiamate rispettivamente $y, z \in \Sigma_\varepsilon^*$ gli input letti durante le due porzioni di computazione (si noti allora che $w = yz$), si ha che per ipotesi induttiva forte $A_{p,r} \xRightarrow{*} y$ e $A_{r,q} \xRightarrow{*} z$; dunque, poiché la regola $A_{p,q} \rightarrow A_{p,r}A_{r,q} \in R$ è presente tra le regole di G , si ha che

$$A_{p,q} \Rightarrow A_{p,r}A_{r,q} \xRightarrow{*} yz = w$$

In particolare, $A_{q_0, q_{\text{accept}}}$ è in grado di derivare una stringa w se e solo se w porta P' dallo stato q_0 — avendo lo stack vuoto — allo stato q_{accept} — avendo ancora lo stack vuoto — o equivalentemente, P' accetta w . Allora, segue che

$$A_{q_0, q_{\text{accept}}} \xRightarrow{*} w \iff w \in L(G) \iff w \in L(P')$$

e dunque, poiché $L(G) = L(P') = L(P) = L$, segue la tesi. □

2.3 Linguaggi non context-free

2.3.1 Pumping lemma

Proposizione 2.3.1.1: Altezza di derivazioni su CFG in CNF

Sia $G = (V, \Sigma, R, S)$ una CFG in CNF, e $x \in L(G)$ una sua stringa; allora, se h è l'altezza all'albero di derivazione di x , si ha che

$$|x| \leq 2^{h-1}$$

Dimostrazione. La dimostrazione procede per induzione sull'altezza h dell'albero di derivazione di x .

Caso base. Se $h = 1$, e dunque la derivazione è costituita da un solo passaggio, poiché G è in CNF in ipotesi, allora la regola applicata deve necessariamente essere della forma $S \rightarrow a \in R$ con $a \in \Sigma$, e dunque x è costituita esclusivamente da un singolo simbolo (terminale); allora, poiché

$$|x| \leq 2^{h-1} = 2^{1-1} = 2^0 = 1$$

la tesi è verificata.

Ipotesi induttiva forte. Data una stringa $x \in L(G)$ il cui albero di derivazione abbia altezza al più h , è vero che $|x| \leq 2^{h-1}$

Passo induttivo. È necessario dimostrare che la tesi è verificata per ogni stringa $x \in L(G)$ il cui albero di derivazione abbia altezza $h + 1$. Si noti che, poiché G è in CNF, il primo passaggio dell'albero di derivazione di x deve necessariamente essere stato ottenuto attraverso una regola della forma $S \rightarrow AB$ per qualche $A, B \in V$, e dunque devono esistere y, z sottostringhe di $x = yz$ — e dunque $|x| = |y| + |z|$ —

tali che $A \xRightarrow{*} y$ e $B \xRightarrow{*} z$. Poiché la derivazione $S \xRightarrow{*} x$ ha altezza $h + 1$, allora le derivazioni di y e di z devono avere altezza h , e dunque per essi è possibile applicare l'ipotesi induttiva forte, e dunque si verifica che

$$\begin{cases} |y| \leq 2^{h-1} \\ |z| \leq 2^{h-1} \end{cases} \implies |x| = |y| + |z| \leq 2^{h-1} + 2^{h-1} = 2^h = 2^{(h+1)-1}$$

allora segue la tesi. □

Lemma 2.3.1.1: Pumping lemma (CFL)

Sia A un CFL; allora, esiste un $p \in \mathbb{N}$, detto **lunghezza del pumping**, tale che per ogni stringa $s \in A$ tale per cui $|s| \geq p$, esistono 5 stringhe $u, v, x, y, z \mid s = uvxyz$ soddisfacenti le seguenti condizioni:

- $\forall i \geq 0 \quad uv^i xy^i z \in A$
- $|vy| > 0$ (o, equivalentemente, $v \neq \varepsilon \vee y \neq \varepsilon$)
- $|vxy| \leq p$

Dimostrazione. Poiché A è un CFL, per definizione esiste una CFG $G = (V, \Sigma, R, S)$ che lo genera, e si assuma — senza perdita di generalità, per il [Metodo 2.1.3.1](#) — che G sia in CNF; sia allora $p := 2^{|V|}$. Inoltre, sia $s \in A \mid |s| \geq p$, e dunque per la [Proposizione 2.3.1.1](#), poiché G è in CNF, si ha che

$$p := 2^{|V|} \leq |s| \leq 2^{h-1} \implies 2^{|V|} \leq 2^{h-1} \iff |V| + 1 \leq h$$

dove h è l'altezza dell'albero di derivazione di s .

TODO DA FINIRE □

Esempio 2.3.1.1 (Pumping lemma in CFL). Si consideri il linguaggio

$$L := \{0^n 1^n 2^n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

e per assurdo, sia $L \in \text{CFL}$, e dunque per esso vale il [Lemma 2.3.1.1](#). Allora, sia $p \in \mathbb{N}$ la lunghezza del pumping di L , e si consideri la seguente stringa

$$w := 0^p 1^p 2^p \implies |w| = 3p > p$$

avente lunghezza sicuramente maggiore di p . Siano inoltre u, v, x, y, z tali da soddisfare il pumping lemma, ed in particolare $|vxy| \leq p$, ma poiché $w := 0^p 1^p 2^p = uv^i xy^i z$ per ogni $i \in \mathbb{N}$, allora si può verificare solo uno dei seguenti:

- vxy contiene solamente 0, dunque $v^0 xy^0$ contiene solamente 0
- vxy contiene solamente 1, dunque $v^0 xy^0$ contiene solamente 1
- vxy contiene solamente 2, dunque $v^0 xy^0$ contiene solamente 2

- vxy contiene soltanto 0 e 1, dunque v^0xy^0 può contenere solo 0, solo 1, o sia 0 che 1
- vxy contiene soltanto 1 e 2, dunque v^0xy^0 può contenere solo 1, solo 2, o sia 1 che 2

e dunque, indipendentemente dalla scelta di v, x, y TODO DA FINIRE IL FINALE NON HA SENSO

Esempio 2.3.1.2 (Pumping lemma in CFL). Si consideri il linguaggio

$$L := \{ww \mid w \in \{0, 1\}^*\}$$

e per assurdo, sia $L \in \text{CFL}$, e dunque per esso vale il [Lemma 2.3.1.1](#). Allora, sia $p \in \mathbb{N}$ la lunghezza del pumping di L , e si consideri la seguente stringa

$$w := 0^p 1^p 0^p 1^p \implies |w| = 4p > p$$

avente sicuramente lunghezza maggiore di p . Siano inoltre u, v, x, y, z tali da soddisfare il pumping lemma, ed in particolare $|vxy| \leq p$, ma poiché $w := 0^p 1^p 0^p 1^p = uv^i xy^i z$ per ogni $i \in \mathbb{N}$, allora si può verificare solo uno dei seguenti:

- vxy contiene solamente 0 o solamente 1, e dunque assumendo che ad esempio si trovi nella prima porzione di 0 di w , per ogni $i > 1$ si ha che la stringa diventa della forma

$$w := 0^{p+k} 101$$

per qualche k , e dunque non può essere della forma $w'w'$ con $w' \in \{0, 1\}^*$;

- vxy contiene sia 0 che 1, e dunque vxy si trova a cavallo tra due sequenze di 0 ed 1; allora, assumendo che ad esempio si trovi nella prima regione di w che comprende sia 0 che 1, per ogni $i > 1$, si ha che la stringa diventa della forma

$$w := 0^{p+j} 1^{p+h} 0^p 1^p$$

per qualche j ed h , e dunque non può essere della forma $w'w'$ con $w' \in \{0, 1\}^*$.

Allora, in nessuno dei casi possibili $w := uv^i xy^i z \in L \nmid$.

Osservazione 2.3.1.1: Condizioni del pumping lemma (CFL)

TODO

2.4 Operazioni context-free

2.4.1 Unione

Proposizione 2.4.1.1: Chiusura sull'unione (CFL)

Siano L_1, \dots, L_n dei CFL; allora $\bigcup_{i=1}^n L_i$ è un CFL.

Dimostrazione. Poiché L_1, \dots, L_n sono CFL, allora esistono delle CFG G_1, \dots, G_n tali da generare rispettivamente ogni linguaggio in ipotesi; siano queste grammatiche definite come

$$\forall i \in [1, n] \quad G_i = (V_i, \Sigma_i, R_i, S_i)$$

Per dimostrare la tesi, è necessario dimostrare che esiste una CFG G tale che

$$L(G) = \bigcup_{i=1}^n L(G_i)$$

poiché $L(G) \in \text{CFL}$ per definizione; allora, si consideri la seguente CFG:

$$G = \left(\bigcup_{i=1}^n V_i \cup \{S\}, \bigcup_{i=1}^n \Sigma_i, \bigcup_{i=1}^n R_i \cup \{S \rightarrow S_1 \mid \dots \mid S_n\}, S \right)$$

e si noti che

$$w \in \bigcup_{i=1}^n L(G_i) \iff \exists j \in [1, n] \mid \begin{cases} w \in L(G_j) \iff S_j \xRightarrow{*} w \\ S \rightarrow S_j \in R \end{cases} \iff S \xRightarrow{*} w \iff w \in L(G)$$

Allora, segue la tesi. □

Esempio 2.4.1.1 (Unione di CFL). Siano L_1 ed L_2 due CFL generati rispettivamente dalle seguenti CFG G_1 e G_2 :

$$\begin{aligned} G_1 : S_1 &\rightarrow 0S_11 \mid \varepsilon \\ G_2 : S_2 &\rightarrow 1S_20 \mid \varepsilon \end{aligned}$$

Allora, la seguente CFG G :

$$\begin{aligned} &S \rightarrow S_1 \mid S_2 \\ G : S_1 &\rightarrow 0S_11 \mid \varepsilon \\ &S_2 \rightarrow 1S_20 \mid \varepsilon \end{aligned}$$

è in grado di generare $L_1 \cup L_2$.

2.4.2 Concatenazione

Proposizione 2.4.2.1: Chiusura sulla concatenazione (CFL)

TODO

Dimostrazione. Omessa. □

2.4.3 Star

Proposizione 2.4.3.1: Chiusura sull'operazione star (CFL)

TODO.

Dimostrazione. Omessa. □

2.4.4 Intersezione

Proposizione 2.4.4.1: CFL non è chiuso sull'intersezione

Siano L_1 ed L_2 due CFL; allora $L_1 \cap L_2$ non è necessariamente un CFL.

Dimostrazione. Siano G_1 e G_2 le due seguenti CFG:

$$\begin{array}{ll} S \rightarrow TU & S \rightarrow UT \\ G_1 : T \rightarrow 0T1 \mid \varepsilon & G_2 : T \rightarrow 1T2 \mid \varepsilon \\ U \rightarrow 2U \mid \varepsilon & U \rightarrow 0U \mid \varepsilon \end{array}$$

Si noti che la prima grammatica, partendo da S , compone stringhe costituite da TU , dove T è solo in grado di diventare una combinazione di $0T1$ o terminare — e dunque produce stringhe della forma $0^n 1^n$ — mentre U è solo in grado di diventare una combinazione di $2U$ o terminare — e dunque produce stringhe della forma 2^k ; allora, il suo linguaggio è

$$L(G_1) = \{0^n 1^n 2^k \mid n, k \in \mathbb{N}\}$$

Per ragionamento analogo, è possibile verificare che le stringhe che genera G_2 appartengono al linguaggio

$$L(G_2) = \{0^k 1^n 2^n \mid n, k \in \mathbb{N}\}$$

Infine, si noti che

$$L(G_1) \cap L(G_2) = \{0^n 1^n 2^n\}$$

poiché il primo linguaggio contiene le stringhe aventi stesso numero di 0 e di 1, ma arbitrario numero di 2, mentre il secondo contiene le stringhe aventi stesso numero di 1 e 2, ma arbitrario numero di 0, dunque la loro intersezione deve necessariamente essere il linguaggio composto da stringhe aventi stesso numero di 0, 1 e 2. Si noti però che, come dimostrato nell'Esempio 2.3.1.1, $\{0^n 1^n 2^n\} \notin \text{CFL}$. Allora, poiché $L(G_1), L(G_2) \in \text{CFL}$ per loro stessa definizione, segue la tesi. \square

2.4.5 Complemento

Proposizione 2.4.5.1: CFL non è chiuso sul complemento

Sia L un CFL; allora \bar{L} non è necessariamente un CFL.

Dimostrazione. Sia L il linguaggio del Esempio 2.3.1.2, e si consideri il suo complemento

$$L := \{ww \mid w \in \{0, 1\}^*\} \iff \bar{L} = \{0, 1\}^* - \{ww \mid w \in \{0, 1\}^*\}$$

e si consideri la seguente grammatica G :

$$\begin{array}{l} S \rightarrow A \mid B \mid AB \mid BA \\ G : A \rightarrow 0 \mid 0A0 \mid 0A1 \mid 1A0 \mid 1A1 \\ B \rightarrow 1 \mid 0B0 \mid 0B1 \mid 1B0 \mid 1B1 \end{array}$$

e si noti che le stringhe derivate da A sono tutte le stringhe aventi lunghezza dispari ed uno 0 al centro, mentre le stringhe derivate da B sono tutte le stringhe aventi lunghezza dispari ed un 1 al centro.

Dunque, si ha che:

- presa una stringa $x \in \bar{L}$, e ponendo $n := |x|$, se n è dispari allora
 - se x ha 0 al centro, allora $A \xRightarrow{*} x$
 - se x ha un 1 al centro, allora $B \xRightarrow{*} x$

diversamente, se n è pari, allora sia i tale che $x_i \neq x_{\frac{n}{2}+i}$ — si noti che i deve necessariamente esistere, poiché se non esistesse allora vorrebbe dire che $\forall i \in [1, n] \quad x_i = x_{\frac{n}{2}+i} \iff \exists w \in \{0, 1\}^* \mid x = ww \iff x \in L$; siano inoltre

$$\begin{aligned} u &:= x_1 \dots x_{2i-1} \implies |u| = 2i - 1 - 1 + 1 \\ v &:= x_{2i} \dots x_n \implies |v| = n - 2i + 1 \end{aligned}$$

due sottostringhe di $x = uv$ di lunghezza dispari — si noti che $n - 2i + 1$ è dispari poiché n è pari in ipotesi; allora, i due caratteri centrali di u e v saranno rispettivamente

$$\begin{aligned} m(u) &= x_{\frac{2i-1+1}{2}} = x_i \\ m(v) &= x_{\frac{n+2i}{2}} = x_{\frac{n}{2}+1} \end{aligned}$$

allora, poiché $x_i \neq x_{\frac{n}{2}+1}$, e questi sono proprio i centri di due sottostringhe di x , aventi lunghezza dispari, si ha che x può essere generata attraverso le regole di G , poiché in essa sono presenti le regole $S \rightarrow AB \mid BA$; questo dimostra che $x \in \bar{L} \implies S \xRightarrow{*} x$;

- presa una stringa x tale che $S \xRightarrow{*} x$, e ponendo $n := |x|$, se n è dispari allora sicuramente $x \notin L \iff x \in \bar{L}$; diversamente, se n è pari, allora la stringa è stata generata attraverso una delle regole $S \rightarrow AB \mid BA$ necessariamente, e dunque — senza perdita di generalità — assumendo che x sia stata ottenuta attraverso la regola $S \rightarrow AB$, devono esistere $u, v \in \{0, 1\}^* \mid x = uv \wedge A \xRightarrow{*} u \wedge B \xRightarrow{*} v$, dove u e v sono due stringhe aventi lunghezza dispari; siano allora $l := |u| \implies |v| = n - l$, ottenendo che

$$m(u) = x_{\frac{l+1}{2}} = u_{\frac{l+1}{2}} = 0 \neq 1 = v_{\frac{n-l+1}{2}} = x_{\frac{n-l+1}{2}+l} = x_{\frac{n+l+1}{2}} = m(v)$$

allora, poiché $m(u)$ ed $m(v)$ devono necessariamente trovarsi l'uno nella prima metà di x , l'altro nella seconda metà (indipendentemente dalla scelta di u e v) si ha che la stringa x è necessariamente costituita da due stringhe $w, w' \in \{0, 1\}^* \mid w \neq w'$, poiché differiscono per almeno un carattere, ovvero $m(u) \neq m(v)$, di conseguenza $x \notin L \iff x \in \bar{L}$; questo dimostra che $S \xRightarrow{*} x \implies x \in \bar{L}$.

Dunque, poiché $S \xRightarrow{*} x \iff x \in \bar{L}$, si ha che

$$L(G) := \{w \in \{0, 1\}^* \mid S \xRightarrow{*} w\} = \bar{L} \implies \bar{L} \in \text{CFL}$$

e dunque segue la tesi. □

3

Decidibilità

3.1 Macchine di Turing

3.1.1 Definizioni

Definizione 3.1.1.1: TM

Una **TM** (*Turing Machine*) è un automa fornito di un nastro (o *tape*) illimitato costituito da celle sovrascrivibili — sul quale viene posto anche l'input stesso — e di una testina che punta alla cella corrente della computazione, dove quest'ultima è in grado di muoversi liberamente sia verso destra che verso sinistra; inoltre, l'automa è caratterizzato da un solo stato di accettazione, ed un solo stato di rifiuto, che hanno *effetto immediato* (dunque la computazione termina non appena viene raggiunto lo stato di accettazione o di rifiuto; si noti che le macchine di Turing sono in grado di sovrascrivere ogni cella, anche quelle dell'input fornito, dunque questa caratteristica degli stati di accettazione e rifiuto ha significato).

Formalmente, una TM è una 7-tupla $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ dove

- Q è l'**insieme degli stati**, un insieme *finito*
- Σ è l'**alfabeto dell'automa**, un insieme *finito*, tale che $\sqcup \notin \Sigma$
- Γ è l'**alfabeto del nastro**, un insieme *finito* tale che $\Sigma \subseteq \Gamma$ e $\sqcup \in \Gamma$
- $\delta : (Q - \{q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$ è la **funzione di transizione**, che definisce la relazione tra gli stati
- $q_0 \in Q$ è lo **stato iniziale**
- $q_{\text{accept}} \in Q$ è lo **stato di accettazione**
- $q_{\text{reject}} \in Q$ è lo **stato di rifiuto**, tale che $q_{\text{accept}} \neq q_{\text{reject}}$

Si noti che il nastro di una TM può essere limitato a destra, limitato a sinistra, o illimitato da entrambe le estremità, poiché è possibile dimostrare l'equivalenza delle 3 tipologie di nastri descritti; dunque, all'interno di questi appunti, a meno di specifica, si assume che la TM in questione è costituita da un nastro limitato a sinistra.

Inizialmente, il nastro di una macchina di Turing contiene solamente la stringa di input, e tutto il resto è vuoto, dunque la TM riceve una stringa di input $w = w_1 \dots w_n \in \Sigma^*$ sulle n celle più a sinistra del nastro, e le celle restanti contengono il simbolo \sqcup (letto “blank”).

Per la computazione delle TM, si noti la segnatura della funzione di transizione δ : essa considera lo stato corrente ed il carattere che si trova sulla cella puntata dalla testina, e restituisce il prossimo stato, il carattere con cui sovrascrivere la cella corrente, e una direzione da prendere, indicata con L (*left*, e dunque la testina si sposterà a sinistra) o R (*right*, e dunque la testina si sposterà a destra). Se la testina si trova sulla prima cella — quella più a sinistra, nell'assunzione considerata — e prova a spostarsi a sinistra, essa non effettuerà alcuno spostamento. Si noti che, se la TM non raggiunge mai lo stato di accettazione o di rifiuto, la macchina non può terminare e la computazione proseguirà per sempre (*looping*).

Esempio 3.1.1.1 (TM). Un esempio di TM $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ è il seguente:

- $Q = \{q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}, q_0, q_1, q_2, q_3\}$
- $\Sigma = \{0, 1\}$
- $\Gamma = \{\sqcup, 0, 1, x, y\}$

e δ segue dal suo diagramma:



Figura 3.1: La TM M .

La notazione $a \rightarrow b; c$ presente sugli archi di questo diagramma sta ad indicare che viene letto il simbolo $a \in \Gamma$ sulla cella puntata correntemente dalla testina, questo viene

rimpiazzato col simbolo $b \in \Gamma$, e la testina si sposta verso $c \in \{L, R\}$. Dunque, per non sovrascrivere la cella corrente, è sufficiente porre $a \rightarrow a; c$ come etichetta dell'arco in questione.

Si noti che, all'interno dei diagrammi delle TM, lo stato di rifiuto, e gli archi in esso entranti, sono generalmente omessi per brevità, implicando che ogni stato q che non presenta transizioni esplicitamente rappresentate descrive in realtà archi (q, q_{reject}) .

3.1.2 Configurazioni di TM

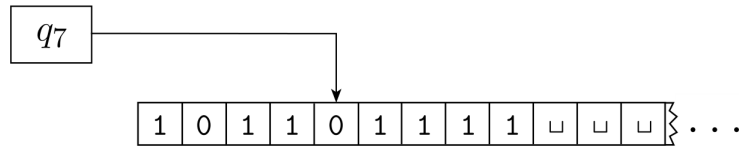
Definizione 3.1.2.1: Configurazione (TM)

Sia $M = (Q, \Sigma, \Gamma, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ una TM; con il simbolismo

$$u \ q \ v$$

per certi $u, v \in \Gamma^*$, $q \in Q$ si denota una **configurazione** di M , dove q rappresenta lo stato attuale della computazione di un certo input, uv è la stringa che descrive il nastro (si assume che, dopo l'ultimo simbolo di v , il nastro contenga solo \sqcup), e la posizione della testina è sul primo simbolo di v .

Esempio 3.1.2.1 (Configurazioni di TM). Data la seguente TM



si ha che la sua configurazione è

$$1011 \ q_7 \ 01111$$

Definizione 3.1.2.2: Produzione di configurazioni

Siano C_1 e C_2 due configurazioni di una certa macchina di Turing descritta dalla 7-tupla $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$; si dice che C_1 **produce** C_2 se e solo se M può passare da C_1 a C_2 in un unico passo. In simboli

$$\begin{aligned} ua \ q_i \ bv \quad \text{produce} \quad u \ q_j \ acv &\iff \delta(q_i, b) = (q_j, c, L) \\ ua \ q_i \ bv \quad \text{produce} \quad uac \ q_j v &\iff \delta(q_i, b) = (q_j, c, R) \end{aligned}$$

per certi $u, v \in \Gamma^*$, $a, b, c \in \Gamma$ e $q_i, q_j \in Q$.

Osservazione 3.1.2.1: Configurazioni particolari

Sia $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ una TM; se la TM si trova sull'estremità sinistra del nastro, dunque sul primo carattere, la configurazione corrente è $q_i bv$ per certi $q_i \in Q$ e $b \in \Gamma, v \in \Gamma^*$; dunque, se si verifica una transizione che comporta una mossa a sinistra ed un rimpiazzo del simbolo b con $c \in \Gamma$, per quando detto nella [Definizione 3.1.1.1](#), si ha che la prossima configurazione di M sarà $q_j cv$ per qualche $q_j \in Q$. Se invece la TM si trova sull'estremità destra — dunque al termine dell'input fornito sul nastro — la configurazione corrente è $ua q_i \sqcup$ per certi $q_i \in Q$ e $a \in \Gamma, u \in \Gamma^*$, ma per brevità il simbolo \sqcup verrà omissso, assumendo che i simboli \sqcup seguano la parte del nastro rappresentata dalla configurazione.

Dunque, dato un input w , posto sul nastro, la *configurazione iniziale* di M è denotata con $q_0 w$, mentre le *configurazioni di accettazione e rifiuto* — dette anche *configurazioni di arresto*, poiché non producono ulteriori configurazioni — sono descritte rispettivamente con q_{accept} e q_{reject} .

Definizione 3.1.2.3: Stringhe accettate (TM)

Sia $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ una TM, e sia $w = w_1 \cdots w_n$ una stringa tale per cui $\forall i \in [1, n] \quad w_i \in \Sigma$; allora, M **accetta** w se esiste una sequenza di configurazioni C_0, \dots, C_n tali per cui

- $C_0 = q_0 w$
- $\forall i \in [0, n-1] \quad C_i$ produce C_{i+1}
- $C_n = q_{\text{accept}}$

3.1.3 Turing-riconoscibilità**Definizione 3.1.3.1: Turing-riconoscibilità**

Un linguaggio è detto **Turing-riconoscibile** (o **ricorsivamente enumerabile**) se esiste una macchina di Turing che lo riconosce. La classe dei linguaggi Turing-riconoscibili è denotata con REC, dunque in simboli

$$L \in \text{REC} \iff \exists M \in \text{TM} \mid L(M) = L$$

Esempio 3.1.3.1 (Linguaggi Turing-riconoscibili). Si consideri la TM M descritta all'interno dell'[Esempio 3.1.1.1](#); si noti che essa, per sua costruzione, è in grado di riconoscere il linguaggio L descritto dall'espressione regolare 01^*0 , poiché si comporta come segue:

- partendo dallo stato iniziale q_0 , se viene letto uno 0, la TM lo sovrascrive con il carattere x , e si sposta a destra, andando nello stato q_1 ;
- se ora viene letto un 1, la TM lo sovrascrive con il carattere y , e si sposta ancora a destra, ma rimane nello stato q_1 ;

- se ora viene letto uno 0, la TM lo sovrascrive con il carattere x , e si sposta ancora a destra, andando nello stato q_2 ;
- infine, se viene letto \sqcup , la macchina non sovrascrive il carattere, si sposta a destra (la direzione è irrilevante in questo caso) e termina accettando l'input — dunque andando nello stato q_{accept} ;

In ogni altro caso, la macchina rifiuta immediatamente.

Allora, poiché esiste una TM M tale per cui $L(M) = L$, si ha che $L \in \text{REC}$.

Esempio 3.1.3.2 (Linguaggi Turing-riconoscibili). TODO

3.1.4 Turing-decidibilità

Definizione 3.1.4.1: Decisore

Una macchina di Turing è detta **decisore** se termina sempre, dunque se accetta o rifiuta per qualsiasi input, non andando mai in *loop*.

Osservazione 3.1.4.1: Decisori

Data una TM $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$, e ponendo

$$\begin{aligned} L(M) &:= \{w \in \Sigma^* \mid M \text{ accetta } w\} \\ R(M) &:= \{w \in \Sigma^* \mid M \text{ rifiuta } w\} \end{aligned}$$

si ha che, in generale

$$L(M) \cup R(M) \subseteq \Sigma^*$$

poiché M potrebbe andare in loop, e dunque

$$M \text{ decisore} \iff L(M) \cup R(M) = \Sigma^*$$

Definizione 3.1.4.2: Turing-decidibilità

Un linguaggio è detto **Turing-decidibile** (o **ricorsivo**, o semplicemente **decidibile**) se esiste un decisore che lo riconosce. La classe dei linguaggi Turing-decidibili è denotata con DEC.

Simmetricamente, se un linguaggio L è Turing-decidibile per qualche decisore M , allora si dice che M **decide** L .

Osservazione 3.1.4.2: Turing-decidibilità

Si noti che $\text{DEC} \subset \text{REC}$, poiché un linguaggio Turing-decidibile è sicuramente Turing-riconoscibile, per definizione stessa.

3.2 Varianti di macchine di Turing

3.2.1 Macchine di Turing con testina ferma

Definizione 3.2.1.1: Macchina di Turing con testina ferma

Una **macchina di Turing con testina ferma** è una 7-tupla $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ dove ogni elemento della 7-tupla rimane invariato rispetto alla [Definizione 3.1.1.1](#), a meno della funzione di transizione δ , definita come segue:

$$\delta : (Q - \{q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R, S\}$$

in cui il simbolo S (*stay*) indica che la testina della TM non si muove.

Proposizione 3.2.1.1: Equivalenza delle TM con testina ferma

Sia M una macchina di Turing con testina ferma; allora esiste una TM M' ad essa equivalente.

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ una macchina di Turing con testina ferma; di conseguenza, nel prodotto cartesiano del codominio di δ è presente l'insieme $\{L, R, S\}$, e dunque per costruire una macchina di Turing $M' = (Q', \Sigma, \Gamma, \delta', q'_0, q'_{\text{accept}}, q'_{\text{reject}})$ equivalente ad M , è sufficiente inserire nuovi stati in Q' tali che

$$\forall p, q \in Q, a, b \in \Gamma \quad \delta(p, a) = (q, b, S) \implies \exists r \in Q' \mid \begin{cases} \delta'(p, a) = (r, b, R) \\ \delta'(r, \gamma) = (p, \gamma, L) \end{cases}$$

per un certo $\gamma \in \Gamma$, dove $r \in Q'$ è il nuovo stato, dunque facendo spostare la testina in una direzione — in questo caso, verso destra — e poi facendola spostare nuovamente nella direzione opposta — dunque in questo caso, verso sinistra.

Seconda implicazione. Sia $M' = (Q', \Sigma, \Gamma, \delta', q'_0, q'_{\text{accept}}, q'_{\text{reject}})$ una TM; allora, la segnatura della funzione di transizione di M' segue dalla [Definizione 3.1.1.1](#), dunque nel prodotto cartesiano del suo codominio è presente l'insieme $\{L, R\}$, e poiché

$$\{L, R\} \subseteq \{L, R, S\}$$

allora è possibile considerare M' stessa come macchina di Turing con testina ferma, che però non presenta mai il simbolo S all'interno delle transizioni.

□

3.2.2 Macchine di Turing multinastro

Definizione 3.2.2.1: Macchina di Turing multinastro

Una **macchina di Turing multinastro** è una 7-tupla $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ dove ogni elemento della 7-tupla rimane invariato rispetto alla [Definizione 3.1.1.1](#), a meno della funzione di transizione δ , definita come segue:

$$\delta : (Q - \{q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}\}) \times \Gamma^k \rightarrow Q \times \Gamma^k \times \{L, R, S\}^k$$

dove $k \geq 1$ è il numero di nastri — e di testine — della macchina.

Osservazione 3.2.2.1: Operazione di *shift* sul nastro

Le macchine di Turing sono in grado di effettuare operazioni di *shift* di 1 cella a destra o a sinistra dell'intero nastro, semplicemente scansionando tutto quest'ultimo, e rimpiazzando ogni carattere con quello letto precedentemente.

Osservazione 3.2.2.2: Inizio del nastro

Una TM non è in grado di sapere se la sua testina si trova all'inizio dell'input, ma è possibile ottenere questo comportamento effettuando uno *shift* a destra dell'intero nastro (si noti l'[Osservazione 3.2.2.1](#)), e successivamente ponendo un simbolo sentinella — dunque che non sia già presente nell'alfabeto del nastro — nella prima cella.

Proposizione 3.2.2.1: Equivalenza delle TM multinastro

Sia M una macchina di Turing multinastro; allora esiste una TM M' ad essa equivalente.

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia M una macchina di Turing multinastro; si vuole dunque costruire una macchina di Turing M' tale da simulare M . Poiché M' è una TM, essa è costituita da un solo nastro, e dunque per simulare M è necessario suddividere il nastro di M' in regioni, che saranno delimitate da un nuovo carattere $\#$, e per simulare le testine di ogni nastro, verrà utilizzata una versione marcata dei caratteri in Γ , al fine di segnare “virtualmente” la posizione di ogni testina in ogni nastro. Dunque, si ha che:

- inizialmente M' trasforma il nastro nel formato descritto, e dunque viene effettuato uno *shift* a destra del nastro (si veda l'[Osservazione 3.2.2.1](#)), anteposto il carattere $\#$ al suo inizio (si veda l'[Osservazione 3.2.2.2](#)), e successivamente inseriti i seguenti caratteri marcati per segnare le testine virtuali:

$$\# \overset{\bullet}{w}_1 \ w_2 \cdots w_n \ # \ \overset{\bullet}{x}_1 \ x_2 \cdots x_m \ # \ \dots \ # \ \overset{\bullet}{y}_1 \ y_2 \cdots y_j \ # \ \sqcup \ \dots$$

- per simulare una singola mossa di M , la testina di M' scansiona tutto il suo nastro, aggiornando opportunamente i simboli marcati con \bullet per simulare lo spostamento di ogni testina su ogni nastro; successivamente, viene effettuata una seconda scansione, per simulare i rimpiazzi dei simboli sulle celle, descritti dalla δ ;
- se una qualsiasi testina virtuale effettua uno spostamento a destra, e si trova su un $\#$ — dunque a cavallo tra 2 nastri simulati — allora M' deve simulare il fatto che, nel nastro reale, la reale testina in M starebbe leggendo una porzione di nastro vuota, non letta precedentemente; allora, viene effettuato uno *shift* verso destra di tutto il nastro di M' , dalla cella corrente in poi, e sulla cella corrente viene posto il carattere \sqcup ;

Di conseguenza, M' risulta essere in grado di simulare correttamente il comportamento di ogni nastro della macchina di Turing multinastro M , e dunque segue la tesi.

Seconda implicazione. Per $k = 1$, si ha che la funzione di transizione δ descritta nella [Definizione 3.2.2.1](#) diventa

$$\delta : Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R, S\}$$

che rappresenta la funzione di transizione delle macchine di Turing con testina ferma (si veda la [Definizione 3.2.1.1](#)); allora, per la [Proposizione 3.2.1.1](#), si ha che ogni macchina di Turing M' , poiché è anche una macchina di Turing con testina ferma, è una macchina di Turing multinastro avente $k = 1$ nella funzione δ .

□

3.2.3 Macchine di Turing non deterministiche

Definizione 3.2.3.1: NTM

Una **NTM** (*Nondeterministic Turing Machine*) è una 7-tupla $(Q, \Sigma, \gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ dove ogni elemento della 7-tupla rimane invariato rispetto alla [Definizione 3.1.1.1](#), a meno della funzione di transizione δ , definita come segue:

$$\delta : (Q - \{q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}\}) \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma \times \{L, R\})$$

poiché una NTM computa non deterministicamente.

Proposizione 3.2.3.1: Equivalenza delle NTM

Sia N una NTM; allora esiste una TM M ad essa equivalente.

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ una NTM, e si consideri l'albero di computazione che N produce elaborando gli input, associando un *indirizzo* ad ogni nodo dell'albero, come segue:

- alla radice r dell'albero viene assegnato l'indirizzo ε ;
- ad ogni altro nodo v diverso dalla radice, viene assegnato l'indirizzo xa , dove x è l'indirizzo del padre di v , ed a è un numero in $[1, b]$, dove b è il numero di figli del nodo dell'albero avente maggior numero di figli.

Ad esempio, l'indirizzo 132 indica il secondo figlio del terzo figlio del primo figlio della radice dell'albero di computazione di N . Si consideri allora una TM M a 3 nastri, dove

- il primo nastro contiene l'input di N ;
- il secondo nastro mantiene una copia del primo nastro, corrispondente a qualche diramazione della sua computazione non deterministica;
- il terzo nastro contiene l'indirizzo del nodo dell'albero di computazione non deterministica corrente.

e dunque, data in input una stringa w , M computa come segue:

- inizialmente, il primo nastro di M contiene w , il secondo è vuoto ed il terzo contiene ε ;
- M ripete i seguenti passi:
 - M copia il primo nastro sul secondo;
 - M simula la ramificazione della computazione non deterministica di N correntemente sul secondo nastro, controllando prima di eseguire ogni passo quale scelta fare tra quelle consentite dalla funzione di transizione δ ; se la simulazione di N accetta la stringa, M accetta;
 - se non rimangono più simboli sul terzo nastro, o la simulazione rifiuta la stringa, M sostituisce la stringa sul terzo nastro con il prossimo indirizzo da controllare.

Dunque, la macchina M simula la computazione di N esplorando l'albero di computazione di N in BFS (*Breadth-First Search*), poiché se l'esplorazione avvenisse in DFS si rischierebbe di entrare in un ramo di computazione potenzialmente infinito, senza trovare un ramo che avrebbe potuto accettare l'input. Allora, per la [Proposizione 3.2.2.1](#), segue la tesi.

Seconda implicazione. Sia M una TM; allora, poiché una macchina di Turing è una particolare macchina di Turing non deterministica, segue la tesi.

□

3.2.4 Enumeratori

Definizione 3.2.4.1: Enumeratore

Un **enumeratore** è una TM descritta da una 7-tupla $(Q, \Sigma, \gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$ — dove ogni elemento della 7-tupla rimane invariato rispetto alla [Definizione 3.1.1.1](#) — connessa ad una stampante (ad esempio un nastro secondario), la quale stampa le stringhe di TODO DA FINIRE

Proposizione 3.2.4.1: Equivalenza degli enumeratori

Sia E un enumeratore; allora esiste una TM M ad esso equivalente.

Dimostrazione.

Prima implicazione. TODO

Seconda implicazione. TODO

□

3.3 Linguaggi Turing-riconoscibili e Turing-decidibili

3.3.1 Tesi di Church-Turing

Definizione 3.3.1.1: Algoritmo

Un **algoritmo** è un insieme di istruzioni semplici per l'esecuzione di un certo compito.

Definizione 3.3.1.2: Tesi di Church-Turing

La **tesi di Church-Turing** è la seguente: “la classe delle funzioni calcolabili coincide con la classe delle funzioni calcolabili da una macchina di Turing”.

Informalmente, la tesi di Church-Turing afferma che se un problema è umanamente calcolabile, allora esiste una macchina di Turing in grado di risolverlo, ovvero di calcolarlo.

La tesi di Church-Turing, sebbene ormai universalmente accettata, non può essere dimostrata.

Osservazione 3.3.1.1: Algoritmi e macchine di Turing

Poiché si assume la tesi di Church-Turing, si ha che dato un *algoritmo*, esiste una *macchina di Turing* che può eseguirlo. Dunque, all'interno di questi appunti verrà assunta l'intercambiabilità tra gli algoritmi (o metodi) descritti, e le macchine di Turing.

3.3.2 Linguaggi non Turing-riconoscibili

Osservazione 3.3.2.1: Codifiche

Sia O un oggetto; poichè una TM può prendere in input qualsiasi oggetto, ammesso che sia codificato attraverso una qualche codifica predeterminata, all'interno di questi appunti si utilizzerà il simbolismo $\langle O \rangle$ per sottointendere una qualche codifica del dato oggetto O , in modo che sia possibile rappresentare O sul nastro di una TM.

Esempio 3.3.2.1 (Codifiche di δ). Sia δ la funzione di transizione di un DFA; allora, una sua possibile codifica potrebbe essere scrivere ogni riga della rappresentazione tabellare di δ , separata da un #.

Definizione 3.3.2.1: Numerabilità

Un insieme A è detto **numerabile** se e solo se esiste una biezione $f : \mathbb{N} \rightarrow A$.

Esempio 3.3.2.2 (Numeri pari). L'insieme

$$P := \{2n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

dei numeri pari è numerabile, poichè la funzione

$$f : \mathbb{N} \rightarrow P : n \mapsto 2n$$

è biettiva; infatti è iniettiva poichè

$$\forall x, y \in \mathbb{N} \quad f(x) = f(y) \iff 2x = 2y \implies x = y$$

ed è suriettiva poichè

$$\forall p \in P \quad \exists x \in \mathbb{N} \mid p = 2x$$

(altrimenti p non sarebbe pari).

Lemma 3.3.2.1: Numerabilità delle macchine di Turing

L'insieme delle macchine di Turing è numerabile; dunque, esiste una biezione $f : \mathbb{N} \rightarrow \text{TM}$.

Dimostrazione. Sia Σ un alfabeto contenente dei caratteri che rendano possibile codificare ogni macchina di Turing in una codifica $\langle M \rangle$ per ogni $M \in \text{TM}$; sia dunque \prec una relazione d'ordine su Σ^* definita come segue:

$$\forall x, y \in \Sigma^* \quad x \prec y \iff \begin{cases} |x| < |y| & |x| \neq |y| \\ x \prec_l y & l := |x| = |y| \end{cases}$$

dove \prec_l è la relazione d'ordine dell'ordinamento lessicografico. Si noti che, per sua stessa definizione, la relazione d'ordine \prec risulta essere totale; di conseguenza, è possibile ordinare *totalmente* le stringhe presenti in Σ^* , ed è dunque possibile definire una biezione

$f : \mathbb{N} \rightarrow \Sigma^*$ (è sufficiente associare $i \in \mathbb{N}$ con l' i -esima stringa ottenuta dall'ordinamento descritto). Questo dimostra che Σ^* è numerabile, per qualsiasi alfabeto Σ (una volta stabilito un ordinamento lessicografico per caratteri esterni alle lettere dell'alfabeto canonico, se presenti).

Dunque, poiché con l'alfabeto Σ scelto è possibile codificare ogni macchina di Turing TM, questo dimostra che è possibile numerare anche le macchine di Turing. Allora TM è numerabile. \square

Proposizione 3.3.2.1: Non-numerabilità di \mathcal{B}

Sia \mathcal{B} l'insieme delle stringhe binarie di lunghezza infinita; in simboli

$$\mathcal{B} := \{w \in \{0, 1\}^* \mid |w| = +\infty\}$$

Allora \mathcal{B} non è numerabile.

Dimostrazione. La tecnica che verrà utilizzata è nota in letteratura come [Argomento diagonale di Cantor](#), attraverso la quale Cantor ha dimostrato che \mathbb{R} non è numerabile.

Per assurdo, sia \mathcal{B} numerabile; allora, per definizione, esiste una biezione $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{B}$. Si assuma ad esempio che f sia la seguente mappa biunivoca:

$$\begin{array}{rcl} f(0) & = & 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ \dots \\ f(1) & = & 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \\ f(2) & = & 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots \\ f(3) & = & 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ \dots \\ f(4) & = & 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \dots \\ \vdots & & \vdots \end{array}$$

e si consideri la stringa binaria descritta dall'opposto delle cifre sulla *diagonale* di tale matrice, ovvero

$$b := 11000\dots$$

Essa dunque è definita come segue:

$$b \in \{0, 1\}^* \mid b_i = \overline{f(i)_i}$$

estendendo la definizione di i -esimo carattere anche allo 0; allora per sua stessa definizione b non può essere presente nella mappa di f , poiché se esistesse un $k \in \mathbb{N}$ tale che $f(k) = b$, allora la k -esima cifra di b (ovvero b_k) dovrebbe essere il negato di $f(k)_k$ stesso, ma $f(k)_k = b_k$ poiché $f(k) = b$ \nmid . \square

Proposizione 3.3.2.2: Biezioni tra insiemi

Siano A e B due insiemi; allora esiste una biezione $f : A \rightarrow B$ se e solo se $|A| = |B|$.

Dimostrazione.

Prima implicazione. Siano A e B insiemi, sui quali è definita una biezione $f : A \rightarrow B$; allora:

- f è biettiva, ed in particolare è iniettiva, e dunque

$$\forall x_1, x_2 \in A \quad x_1 \neq x_2 \implies f(x_1) \neq f(x_2)$$

il che implica necessariamente che $|A| \subseteq |B|$;

- f è biettiva, ed in particolare è suriettiva, e dunque

$$\forall y \in B \quad \exists x \in A \mid f(x) = y$$

il che implica necessariamente che $|B| \subseteq |A|$.

Allora $|A| = |B|$, come volevasi dimostrare.

Seconda implicazione. Se A e B sono due insiemi tali che $|A| = |B|$, allora è sicuramente possibile definire una mappa *uno-ad-uno* che associa gli elementi di A con gli elementi di B , poiché non possono essere presenti elementi in eccesso o in difetto in nessuno dei due insiemi in quanto hanno la stessa cardinalità; dunque, segue la tesi.

□

Lemma 3.3.2.2: Linguaggi non Turing-riconoscibili

Esistono linguaggi non Turing-riconoscibili; in simboli, dato un alfabeto Σ si ha che

$$\exists L \in \mathcal{P}(\Sigma^*) \mid L \notin \text{REC}$$

Dimostrazione. Dato un linguaggio L definito su un qualche alfabeto Σ , ordinato secondo l'ordinamento \prec definito all'interno della dimostrazione del [Lemma 3.3.2.1](#), si definisce *sequenza caratteristica* di L una stringa binaria χ_L in cui l' i -esimo carattere di χ_L è 1 se e solo se l' i -esima stringa di L (rispetto a \prec) è presente in Σ^* . Ad esempio, dato

$$L := \{1, 01, 010\}$$

definito sull'alfabeto binario (il quale è ordinabile su \prec), si ha che χ_L è ottenuta come segue:

$$\begin{array}{ll} \Sigma^* &= \{ \varepsilon, 0, 1, 00, 01, 10, 11, 000, 001, 010, 011, \dots \} \\ L &:= \{ \quad \quad 1, \quad \quad 01, \quad \quad \quad 010 \} \\ \chi_L &:= \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \end{array}$$

Si consideri dunque la funzione

$$f : \mathcal{P}(\Sigma^*) \rightarrow \mathcal{B} : L \mapsto \chi_L$$

dove \mathcal{B} è l'insieme delle stringhe binarie infinite; f dunque mappa ogni linguaggio nella sua stringa caratteristica. Si noti dunque che

$$\forall \chi_A, \chi_B \in \mathcal{B} \quad \chi_A = \chi_B \implies A = B$$

poiché le due stringhe descrivono lo stesso linguaggio; allora f è iniettiva. Inoltre, si verifica che

$$\forall \chi_L \in \mathcal{B} \quad \exists L \in \mathcal{P}(\Sigma^*) \mid f(L) = \chi_L$$

poiché ogni stringa binaria deve necessariamente descrivere un linguaggio, per definizione di χ_L ; allora f è suriettiva. Di conseguenza, f è biettiva, e quindi per la [Proposizione 3.3.2.2](#) si ha che

$$|\mathcal{P}(\Sigma^*)| = |\mathcal{B}|$$

Si noti però che, per la [Proposizione 3.3.2.1](#), \mathcal{B} non è numerabile, e di conseguenza neanche $\mathcal{P}(\Sigma^*)$ lo è. Questo prova che l'insieme dei linguaggi definiti su Σ non è numerabile.

Poiché l'insieme TM è numerabile per il [Lemma 3.3.2.1](#), anche ogni sottoinsieme di TM deve necessariamente esserlo; allora, fissato un alfabeto Σ , si consideri l'insieme delle macchine di Turing definite su Σ ; si noti che, per quanto dimostrato precedentemente, l'insieme dei linguaggi definiti su Σ non è numerabile. Allora, deve necessariamente esistere qualche linguaggio, definito su Σ , che non può essere riconosciuto da nessuna macchina di Turing definita su Σ stesso; di conseguenza, segue la tesi. \square

3.3.3 Problema dell'accettazione

Definizione 3.3.3.1: Linguaggi di accettazione

Si definiscono **linguaggi di accettazione** i linguaggi definiti come segue

$$A_{\mathcal{C}} := \{\langle B, w \rangle \mid B \in \mathcal{C}, w \in L(B)\}$$

Teorema 3.3.3.1: Decidibilità di A_{DFA}

A_{DFA} è decidibile; in simboli

$$A_{\text{DFA}} := \{\langle B, w \rangle \mid B \in \text{DFA}, w \in L(B)\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing; stabilita una qualche codifica per $\langle B, w \rangle$, per prima cosa, M controlla che sul nastro sia descritta una codifica valida per $\langle B, w \rangle$, ed in caso contrario rifiuta. Successivamente, M deve simulare la transizione di stati definita dalla δ di B , e può farlo servendosi delle infinite delle del suo nastro, aggiornando opportunamente lo stato corrente. Allora, M accetta se e solo se B avrebbe accettato, e rifiuta se e solo se B avrebbe rifiutato; allora M non va mai in loop, e dunque è un decisore. \square

Teorema 3.3.3.2: Decidibilità di A_{NFA}

A_{NFA} è decidibile; in simboli

$$A_{\text{NFA}} := \{\langle B, w \rangle \mid B \in \text{NFA}, w \in L(B)\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione I. Una volta controllata la validità della codifica in input, è possibile utilizzare una NTM M per simulare l'NFA posto sul suo nastro, e dunque M accetterebbe se e solo se l'NFA accetterebbe, e rifiuterebbe se e solo se l'NFA rifiuterebbe; allora, poiché M non può andare in loop, ed è dunque un decisore, per la [Proposizione 3.2.3.1](#) segue la tesi. \square

Dimostrazione II. Sia M una macchina di Turing; una volta controllata la validità della codifica in input, M può utilizzare l'algoritmo di conversione presentato all'interno della dimostrazione del [Teorema 1.3.2.1](#) per convertire l'NFA fornito in input in un DFA (grazie all'[Osservazione 3.3.1.1](#)); allora, per il [Teorema 3.3.3.1](#), segue la tesi. \square

Teorema 3.3.3.3: Decidibilità di A_{REX}

A_{REX} è decidibile; in simboli

$$A_{\text{REX}} := \{\langle R, w \rangle \mid R \in \text{REX}, w \in L(R)\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing; una volta controllata la validità della codifica in input, M può utilizzare l'algoritmo di conversione presentato all'interno della dimostrazione del [Teorema 1.6.2.1](#) per convertire l'espressione regolare fornita in input in un NFA (grazie all'[Osservazione 3.3.1.1](#)); allora, per il [Teorema 3.3.3.2](#), segue la tesi. \square

Teorema 3.3.3.4: Decidibilità di A_{CFG}

A_{CFG} è decidibile; in simboli

$$A_{\text{CFG}} := \{\langle G, w \rangle \mid G \in \text{CFG}, w \in L(G)\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Se una grammatica G è in CNF, allora ogni stringa w , avente lunghezza $n := |w| \geq 1$, derivabile attraverso le regole di G , richiede esattamente $2n - 1$ passaggi. La dimostrazione procede per induzione sulla lunghezza della stringa w .

Caso base. Per $n = 1$, poiché G è in CNF, si ha che l'unica regola che può aver prodotto la stringa w è della forma $S \rightarrow a$ dove $a \in \Sigma$, ed infatti il numero di passaggi è pari a

$$2n - 1 = 2 \cdot 1 - 1 = 2 - 1 = 1$$

Ipotesi induttiva forte. Data una grammatica G in CNF, ogni stringa non vuota w lunga al più n derivabile attraverso le sue regole, richiede esattamente $2n - 1$ passaggi.

Passo induttivo. È necessario dimostrare la tesi per una stringa w tale che $|w| = n + 1$. Poiché G è in CNF, le sue regole possono essere della forma $A \rightarrow BC$, oppure $D \rightarrow a$ con $a \in \Sigma$; allora, assumendo che w abbia lunghezza $n + 1$ con $n > 1$, il numero di passaggi per derivare w deve essere maggiore 1 (come dimostrato nel caso base), e dunque deve esistere una regola della forma $A \rightarrow BC$ che possa aver prodotto w ; dunque, esisteranno due sottostringhe y e z di w , tali che $B \xRightarrow{*} y$ e $C \xRightarrow{*} z$, e sicuramente non vuote, poiché sono state generate da una regola della forma $A \rightarrow BC$. Dunque, poiché non sono vuote, e sono sottostringhe di w , hanno lunghezza al più n , e di conseguenza su di esse è possibile applicare l'ipotesi induttiva forte. Allora, ponendo $k := |y|$, e di conseguenza $|z| = |w| - |y| = n + 1 - k$, si ha che y è stata derivata attraverso

$$2k - 1$$

passaggi, mentre w attraverso

$$2(n + 1 - k) - 1 = 2n + 2 - 2k - 1 = 2n - 2k + 1 = 2(n - k) + 1$$

passaggi. Allora, w deve essere stata derivata attraverso i passaggi per derivare y , i passaggi per derivare z , ed il passaggio $A \rightarrow BC$ stesso, e dunque sono

$$[2k - 1] + [2(n - k) + 1] + 1 = 2k - 1 + 2n - 2k + 1 + 1 = 2n + 1$$

passaggi. Allora segue la tesi, poiché

$$2(n + 1) - 1 = 2n + 2 - 1 = 2n + 1$$

Sia dunque M una macchina di Turing; una volta controllata la validità della codifica in input, M può convertire la CFG — fornita in input — in CNF, attraverso il [Metodo 2.1.3.1](#) (grazie all'[Osservazione 3.3.1.1](#)), e successivamente

- se la stringa w ha lunghezza 0, M controlla che la regola $S \rightarrow \varepsilon$ sia presente in G , altrimenti rifiuta;
- se la stringa w ha lunghezza $n \geq 1$, M lista tutte le derivazioni di G , resa in CNF, aventi lunghezza $2n - 1$ (sufficiente per quanto dimostrato precedentemente), le quali sono in numero *finito* — dunque M non va in loop — e se w è presente in una di queste, M accetta, altrimenti rifiuta.

Allora M non può andare in loop, quindi è un decisore, e dunque segue la tesi. \square

Corollario 3.3.3.1: Decidibilità dei CFL

Ogni CFL è decidibile; in simboli

$$\text{CFL} \subsetneq \text{DEC}$$

Dimostrazione. Sia $L \in \text{CFL}$, e dunque per definizione esiste una $G \in \text{CFG}$ tale che $L(G) = L$; affinché L sia decidibile, deve esistere una TM in grado di deciderlo, e dunque di riconoscere ogni sua stringa $w \in L$, senza andare mai in loop. Si consideri ora la TM

costruita all'interno della dimostrazione del [Teorema 3.3.3.4](#), la quale decide se una data stringa appartiene al linguaggio di una data CFG, e sia questa M_G . Allora, per decidere L è sufficiente costruire una TM M — avente M_G come sua sottoprocedura — tale che, data una stringa $w \in L$ in input, esegua M_G su $\langle G, w \rangle$ per stabilire se $w \in L(G)$. Allora M è un decisore poiché M_G è un decisore, e dunque segue la tesi. \square

Definizione 3.3.3.2: Macchina di Turing universale

Si definisce **macchina di Turing universale** una macchina di Turing in grado di simulare qualsiasi altra macchina di Turing.

Teorema 3.3.3.5: Riconoscibilità di A_{TM}

A_{TM} è Turing-riconoscibile; in simboli

$$A_{TM} := \{ \langle M, w \rangle \mid M \in TM, w \in L(M) \} \in REC$$

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing multinastro; una volta controllata la validità della codifica in input (presente su uno dei due nastri), sia M tale da computare come segue:

- uno dei due nastri viene utilizzato da M per mantenere le codifiche della macchina di Turing in input, che comprendono:
 - il numero di stati $\langle |Q| \rangle$
 - il numero di simboli dell'alfabeto dell'automa $\langle |\Sigma| \rangle$
 - il numero di simboli dell'alfabeto del nastro $\langle |\Gamma| \rangle$
 - la funzione $\langle \delta \rangle$, descritta attraverso codifica di tuple $\langle \langle q, x \rangle, \langle r, y, z \rangle \rangle$ che costituiscono coppie input-output presenti nella rappresentazione insiemistica della funzione di transizione δ (dunque, si ha che $q, r \in Q, x, y \in \Gamma, z \in \{L, R\}$)
- l'altro nastro viene utilizzato da M per mantenere lo stato della configurazione corrente della macchina di Turing che M deve simulare, indicata attraverso la codifica $\langle a, q, b \rangle$ (dove $q \in Q, a, b \in \Gamma^*$)
- allora, M inizialmente scansiona il primo nastro, cercando $\langle \delta \rangle$;
- successivamente, per ogni codifica di regole $\langle \langle q, x \rangle, \langle r, y, z \rangle \rangle$, se $x = b_1$, la codifica della configurazione corrente viene aggiornata in base alla transizione considerata, altrimenti M passa alla regola successiva;
- se la codifica della configurazione corrente, presente sul secondo nastro, contiene $q_{accept} \circ q_{reject}$, M accetta o rifiuta rispettivamente.

Allora M è in grado di simulare la macchina di Turing che gli è stata fornita in input; si noti però che se la macchina che M sta simulando va in loop, anche M va in loop necessariamente. Allora M riconosce A_{TM} , ma non lo decide. Inoltre, per la [Proposizione 3.2.2.1](#) si ha che esiste una TM U equivalente alla M descritta, che risulta dunque essere una

macchina di Turing universale. Allora, poiché U è equivalente ad M , U riconosce (ma non decide) A_{TM} , e dunque segue la tesi. \square

Teorema 3.3.3.6: Indecidibilità di A_{TM}

A_{TM} è indecidibile; in simboli

$$A_{TM} := \{\langle M, w \rangle \mid M \in TM, w \in L(M)\} \in REC - DEC$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia $A_{TM} \in DEC$, e dunque per definizione esiste un decisore H tale che $L(H) = A_{TM}$. Allora, poiché è un decisore, H computa come segue:

$$\forall M \in TM, w \in L(M) \quad H(\langle M, w \rangle) = \begin{cases} \text{accetta} & M \text{ accetta } w \\ \text{rifiuta} & M \text{ rifiuta } w \end{cases}$$

dove la sintassi $H(\langle M, w \rangle)$ indica che H computa avendo la codifica $\langle M, w \rangle$ sul nastro. Sia ora D una macchina di Turing avente H come sua sottoprocedura, la quale viene chiamata quando l'input di M è la descrizione di M stessa (ovvero $\langle M \rangle$). Inoltre, D computa come segue:

$$\forall M \in TM \quad D(\langle M \rangle) = \begin{cases} \text{accetta} & H(\langle M, \langle M \rangle \rangle) \text{ rifiuta} \iff M \text{ rifiuta } \langle M \rangle \\ \text{rifiuta} & H(\langle M, \langle M \rangle \rangle) \text{ accetta} \iff M \text{ accetta } \langle M \rangle \end{cases}$$

dunque D inverte il risultato ottenuto computando $H(\langle M, \langle M \rangle \rangle)$. Allora, si ha che se M è pari a D stesso, si ottiene che

$$D(\langle D \rangle) = \begin{cases} \text{accetta} & H(\langle D, \langle D \rangle \rangle) \text{ rifiuta} \iff D \text{ rifiuta } \langle D \rangle \\ \text{rifiuta} & H(\langle D, \langle D \rangle \rangle) \text{ accetta} \iff D \text{ accetta } \langle D \rangle \end{cases}$$

che rappresenta chiaramente un assurdo \nmid . \square

Corollario 3.3.3.2: Gerarchia dei linguaggi di Chomsky

Dato un alfabeto Σ , si ha che

$$REG \subsetneq CFL \subsetneq DEC \subsetneq REC \subsetneq \mathcal{P}(\Sigma^*)$$

Dimostrazione. La tesi segue direttamente dal [Corollario 2.1.1.1](#), dal [Corollario 3.3.3.1](#), dal [Osservazione 3.1.4.2](#), dal [Teorema 3.3.3.6](#) e dal [Lemma 3.3.2.2](#). \square

Definizione 3.3.3.3: Co-Turing-riconoscibilità

Un linguaggio è detto **co-Turing-riconoscibile** se questo è il complemento di un linguaggio Turing-riconoscibile. La classe dei linguaggi co-Turing-riconoscibili è denotata con $coREC$. Allora, in simboli, dato un linguaggio L , si ha che

$$L \in coREC \iff \bar{L} \in REC$$

Teorema 3.3.3.7: Co-Turing-riconoscibilità

Un linguaggio è decidibile se e solo se è Turing-riconoscibile e co-Turing-riconoscibile; in simboli

$$\text{DEC} = \text{REC} \cap \text{coREC}$$

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia $L \in \text{DEC}$; per l'Osservazione 3.1.4.2 si ha che $\text{DEC} \subseteq \text{REC}$, dunque sicuramente $L \in \text{REC}$. Inoltre, poiché $L \in \text{DEC}$, per definizione esiste un decisore $M \in \text{TM}$ tale che $L(M) = L$; allora, se si invertono gli stati di accettazione e di rifiuto di M , si ottiene una TM M' che riconosce \bar{L} , poiché accetta se e solo se M rifiuta, e rifiuta se e solo se M accetta; di conseguenza, M' non può andare in loop, e dunque è un decisore. Allora, poiché esiste un decisore $M' \in \text{TM}$ tale che $L(M') = \bar{L}$, si ha che $\bar{L} \in \text{DEC}$ per definizione stessa, ed in particolare

$$\bar{L} \in \text{DEC} \implies \bar{L} \in \text{REC} \iff L \in \text{coREC}$$

Seconda implicazione. Sia L tale che $L \in \text{REC}$ e $L \in \text{coREC}$, e dunque siano M_1 ed M_2 rispettivamente le TM tali da riconoscere L e \bar{L} ; inoltre, sia Σ l'alfabeto su cui sono definiti L ed \bar{L} , e si consideri una stringa $w \in \Sigma$. Si noti che, per definizione stessa di complemento, si ha che

$$\begin{aligned} L \cup \bar{L} &= \Sigma^* \\ L \cap \bar{L} &= \emptyset \end{aligned}$$

e dunque $w \in L \iff w \notin \bar{L}$. Allora, fornendo in input w alle TM M_1 ed M_2 , si verifica che una delle due macchine deve necessariamente accettare w , indipendentemente se l'altra rifiuta o va in loop.

Sia allora M una NTM costituita da 2 nastri, tale da simulare *concorrentemente* — dunque un passo alla volta — M_1 ed M_2 sui suoi 2 nastri, e tale che

$$M(w) = \begin{cases} \text{accetta} & M_1 \text{ accetta } w \\ \text{rifiuta} & M_2 \text{ accetta } w \end{cases}$$

Per quanto detto in precedenza, fornendo in input una qualsiasi stringa $w \in \Sigma^*$ ad M , si verifica che una delle due TM simulate accetta w necessariamente. Allora, segue che M termina sempre, e dunque è un decisore; inoltre, poiché accetta se e solo se M_1 accetta — la quale riconosce L — e rifiuta se e solo se M_2 accetta — la quale riconosce \bar{L} — di fatto M decide L , e dunque $L \in \text{DEC}$. □

Corollario 3.3.3.3: Irriconoscibilità di $\overline{A_{\text{TM}}}$

A_{TM} non è co-Turing-riconoscibile; in simboli

$$A_{\text{TM}} := \{\langle M, w \rangle \mid M \in \text{TM}, w \in L(M)\} \notin \text{coREC}$$

Dimostrazione. Per il [Teorema 3.3.3.5](#) ed il [Teorema 3.3.3.6](#), si ha che

$$A_{\text{TM}} \in \text{REC} - \text{DEC}$$

allora per il [Teorema 3.3.3.7](#), segue che

$$A_{\text{TM}} \in \text{REC} - \text{DEC} \iff A_{\text{TM}} \notin \text{coREC}$$

□

3.3.4 Problema del vuoto

Definizione 3.3.4.1: Linguaggi del vuoto

Si definiscono **linguaggi del vuoto** i linguaggi definiti come segue

$$E_C := \{\langle A \rangle \mid A \in \mathcal{C} : L(A) = \emptyset\}$$

Teorema 3.3.4.1: Decidibilità di E_{DFA}

E_{DFA} è decidibile; in simboli

$$E_{\text{DFA}} := \{\langle A \rangle \mid A \in \text{DFA} : L(A) = \emptyset\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing; una volta controllata la validità della codifica in input, M può interpretare il DFA fornito in input come un grafo, e dunque controllare che tale DFA non accetti alcuna stringa equivale a controllare che non esista alcun cammino dallo stato iniziale del DFA ad un qualsiasi suo stato accettante; allora, usando ad esempio una visita dei nodi in DFS (*Depth-First Search*) — realizzabile grazie all'[Osservazione 3.3.1.1](#) — M accetta se e solo se non è presente alcun cammino come descritto, e dunque non può andare in loop; allora, segue la tesi. □

Teorema 3.3.4.2: Decidibilità di E_{CFG}

E_{CFG} è decidibile; in simboli

$$E_{\text{CFG}} := \{\langle G \rangle \mid G \in \text{CFG} : L(G) = \emptyset\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing; una volta controllata la validità della codifica in input, M può utilizzare il seguente algoritmo — grazie all'[Osservazione 3.3.1.1](#) — per stabilire se il linguaggio della grammatica $G = (V, \Sigma, R, S)$ presente sul suo nastro sia vuoto:

- M marca inizialmente tutti i simboli terminali di G ;
- fintanto che sono presenti variabili non marcate, M marca ripetutamente ogni variabile $A \in V$ tale che $A \rightarrow U_1 \cdots U_k \in R$, dove $U_1, \dots, U_k \in (V \cup \Sigma)^*$ sono già stati tutti marcati;

- accetta se e solo se S non è marcata, altrimenti rifiuta.

Di conseguenza, l'algoritmo che sta eseguendo M su G , partendo dai terminali di quest'ultima, controlla che sia possibile ripercorrere gli alberi di derivazione dai terminali fino ad S , attraverso le regole in R , sfruttate "al contrario". Allora, se al termine dell'algoritmo S è marcata, esiste una sequenza di terminali derivabile da S , e dunque $L(G) \neq \emptyset$. \square

3.3.5 Problema dell'uguaglianza

Definizione 3.3.5.1: Linguaggi dell'uguaglianza

Si definiscono **linguaggi dell'uguaglianza** i linguaggi definiti come segue:

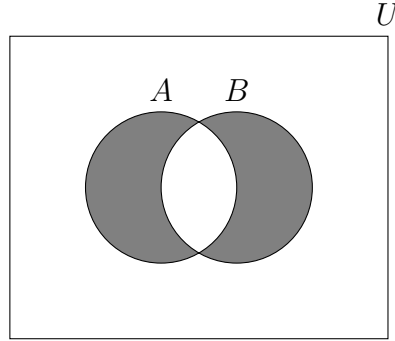
$$EQ_{\mathcal{C}} := \{\langle A, B \rangle \mid A, B \in \mathcal{C} : L(A) = L(B)\}$$

Definizione 3.3.5.2: Differenza simmetrica

Siano A e B due insiemi; allora, si definisce **differenza simmetrica** tra A e B la seguente:

$$A \Delta B := (A \cap \overline{B}) \cup (\overline{A} \cap B)$$

Graficamente, dati due insiemi A e B all'interno di un insieme universo U , la differenza simmetrica $A \Delta B$ è colorata in grigio nel seguente diagramma:



Proposizione 3.3.5.1: Differenza simmetrica vuota

Dati due insiemi A e B , si ha che

$$A \Delta B = \emptyset \iff A = B$$

Dimostrazione.

Prima implicazione. Per assurdo, sia $A \Delta B = \emptyset$ e $A \neq B$; si noti che $A \neq B$ se e solo se esiste $x \in A - B$, oppure $x \in B - A$, e dunque

- $x \in A - B \implies x \in A \wedge x \notin B \implies x \in A \cap \overline{B} \implies A \Delta B \neq \emptyset \nmid$
- $x \in B - A \implies x \in B \wedge x \notin A \implies x \in \overline{A} \cap B \implies A \Delta B \neq \emptyset \nmid$

Seconda implicazione. Per dimostrare la tesi, è sufficiente considerare che

$$A = B \implies A \cap \overline{B} = \overline{A} \cap B = \emptyset \implies A \Delta B = \emptyset$$

□

Teorema 3.3.5.1: Decidibilità di EQ_{DFA}

EQ_{DFA} è decidibile; in simboli

$$EQ_{\text{DFA}} := \{\langle A, B \rangle \mid A, B \in \text{DFA} : L(A) = L(B)\} \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing; una volta controllata la validità della codifica in input, M può convertire i due DFA A e B forniti in input in un terzo DFA C — utilizzando gli algoritmi presentati all'interno della [Proposizione 1.3.3.1](#), della [Proposizione 1.3.4.1](#) e della [Proposizione 1.3.8.1](#) — tale che

$$L(C) = L(A) \Delta L(B)$$

e dunque per la [Proposizione 3.3.5.1](#), si ha che

$$L(A) = L(B) \iff L(C) = \emptyset$$

Sia M' la TM costruita all'interno del [Teorema 3.3.4.1](#); allora, M può utilizzare M' sull'input $\langle C \rangle$, poiché se M' accetta, allora $L(C) = \emptyset$, e dunque A è equivalente a B ; allora M accetta se e solo se M' accetta, e poiché M' è decisore per la dimostrazione del [Teorema 3.3.4.1](#) stessa, segue la tesi. □

Teorema 3.3.5.2: Indecidibilità di EQ_{CFG}

EQ_{CFG} è indecidibile; in simboli

$$EQ_{\text{CFG}} := \{\langle G, H \rangle \mid G, H \in \text{CFG} : L(G) = L(H)\} \notin \text{DEC}$$

Dimostrazione. Omessa. □

4

Riducibilità

4.1 Riduzione

4.1.1 Funzioni calcolabili

Definizione 4.1.1.1: Riduzione

Una **riduzione** è un modo di convertire un problema in un altro, in modo tale che una soluzione al secondo possa essere utilizzata per risolvere il primo.

Definizione 4.1.1.2: Funzione calcolabile

Una funzione $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ è detta **funzione calcolabile** se esiste una macchina di Turing che, su qualsiasi input $w \in \Sigma^*$, se si ferma, termina avendo solo $f(w)$ sul suo nastro.

Definizione 4.1.1.3: Riducibilità mediante funzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; A è detto essere **riducibile mediante funzione a** B , se esiste una funzione calcolabile $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ tale che

$$\forall w \in \Sigma^* \quad w \in A \iff f(w) \in B$$

Tale relazione è indicata attraverso il simbolismo

$$A \leq_m B$$

e la funzione f prende il nome di **riduzione di A a B** .

Lemma 4.1.1.1: Riducibilità dei complementi

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; allora, si ha che

$$A \leq_m B \iff \overline{A} \leq_m \overline{B}$$

Dimostrazione. Si assuma $A \leq_m B$, senza perdita di generalità; allora, per definizione, esiste una funzione calcolabile $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ tale che $\forall w \in \Sigma^* \quad w \in A \iff f(w) \in B$. Allora, si ha che

$$w \in \overline{A} \iff w \notin A \iff f(w) \notin B \iff f(w) \in \overline{B}$$

e dunque f , poiché calcolabile, è anche la riduzione da \overline{A} a \overline{B} , dunque per definizione segue che $\overline{A} \leq_m \overline{B}$. \square

4.2 Turing-decidibilità mediante riduzione

4.2.1 Teoremi

Teorema 4.2.1.1: Decidibilità mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_m B$, e B è decidibile, allora A è decidibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m B \\ B \in \text{DEC} \end{cases} \implies A \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Poiché $B \in \text{DEC}$ in ipotesi, esiste un decisore M tale che M decide B ; inoltre, poiché $A \leq_m B$, esiste una funzione calcolabile $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ tale per cui A sia riducibile a B . Sia dunque N una macchina di Turing che, data in input una stringa $w \in \Sigma^*$, computa come segue:

- N computa $f(w)$;
- N simula M avente $f(w)$ come input;
- N accetta se e solo se M accetta.

Allora, per costruzione di N , e per riducibilità di A a B , si ha che

$$w \in L(N) \iff f(w) \in L(M) = B \iff w \in A$$

e dunque N decide A . \square

Corollario 4.2.1.1: Indecidibilità mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_m B$, ed A è indecidibile, allora B è indecidibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m B \\ A \notin \text{DEC} \end{cases} \implies B \notin \text{DEC}$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia $B \in \text{DEC}$; allora, poiché $A \leq_m B$, per il [Teorema 4.2.1.1](#), si ha che $A \in \text{DEC}$ \nmid . \square

4.2.2 Problema della terminazione**Definizione 4.2.2.1: Linguaggi di terminazione**

Si definiscono **linguaggi di terminazione** i linguaggi definiti come segue

$$\text{HALT}_{\mathcal{C}} := \{ \langle A, w \rangle \mid A \in \mathcal{C}, A \text{ si ferma su input } w \}$$

Teorema 4.2.2.1: Indecidibilità di HALT_{TM}

HALT_{TM} è indecidibile; in simboli

$$\text{HALT}_{\text{TM}} := \{ \langle M, w \rangle \mid M \in \text{TM}, M \text{ si ferma su input } w \} \notin \text{DEC}$$

Dimostrazione I. Per assurdo, sia HALT_{TM} decidibile, e dunque per esso esiste un decisore H ; di conseguenza $H(\langle M, w \rangle)$ accetta se e solo se M si ferma avendo w come input. Si consideri ora una macchina di Turing D — avente H come sua sottoprocedura — che, data in input una codifica $\langle M, w \rangle$, computa come segue:

- D esegue $H(\langle M, w \rangle)$;
- se H rifiuta, allora M va in loop avendo w come input, e dunque D rifiuta;
- se H accetta, allora M si ferma avendo w come input, e dunque D procede a simulare M stessa:
 - se M accetta, D accetta
 - se M rifiuta, D rifiuta.

Di conseguenza, D è in grado di stabilire, data una macchina di Turing M ed un input w , se $w \in L(M)$; inoltre, si noti che D non può andare in loop, e dunque D è un decisore. Allora, l'esistenza di D dimostrerebbe che $A_{\text{TM}} \in \text{DEC}$, ma questo è assurdo per il [Teorema 3.3.3.6](#) \nmid . \square

Dimostrazione II. Si consideri la macchina di Turing F che, data in input una codifica $\langle M, w \rangle$, computa come segue:

- F costruisce una macchina di Turing M' che, data in input una stringa x , computa come segue:
 - M' esegue $M(x)$
 - se M accetta, M' accetta;
 - se M rifiuta, M' cicla (ad esempio muovendo la testina verso una direzione per sempre);
- F restituisce $\langle M', w \rangle$ sul suo nastro.

Si noti dunque che, poiché F si ferma avendo solo $\langle M', w \rangle$ sul nastro, per qualsiasi input $\langle M, w \rangle$, la funzione $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^* : \langle M, w \rangle \mapsto \langle M', w \rangle$ che F descrive è calcolabile per definizione. Allora, si noti che

$$\langle M, w \rangle \in A_{\text{TM}} \iff w \in L(M) \iff w \in L(M')$$

per definizione di A_{TM} e per costruzione di M' rispettivamente; inoltre

$$w \in L(M') \iff f(\langle M, w \rangle) = \langle M', w \rangle \in \text{HALT}_{\text{TM}}$$

per definizione di HALT_{TM} ; dunque

$$\langle M, w \rangle \in A_{\text{TM}} \iff f(\langle M, w \rangle) \in \text{HALT}_{\text{TM}}$$

Allora, per definizione, segue che

$$A_{\text{TM}} \leq_m \text{HALT}_{\text{TM}}$$

e poiché $A_{\text{TM}} \notin \text{DEC}$ per il [Teorema 3.3.3.6](#), è verificata la tesi per cui $\text{HALT}_{\text{TM}} \notin \text{DEC}$ per il [Corollario 4.2.1.1](#). \square

4.2.3 Problema del vuoto

Teorema 4.2.3.1: Indecidibilità di E_{TM}

E_{TM} è indecidibile; in simboli

$$E_{\text{TM}} := \{\langle M \rangle \mid M \in \text{TM} : L(M) = \emptyset\} \notin \text{DEC}$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia E_{TM} decidibile, e dunque per esso esiste un decisore H ; di conseguenza $H(\langle M \rangle)$ accetta se e solo se $L(M) = \emptyset$. Si consideri ora una macchina di Turing D — avente H come sua sottoprocedura — che, data in input una codifica $\langle M, w \rangle$, computa come segue:

- D costruisce una macchina di Turing M' che, data in input una stringa x , computa come segue:
 - se l'input x di M è proprio w , M' accetta se M accetta;
 - se l'input x di M non è w , M' rifiuta;

(si noti che questa macchina è realizzabile poiché è sufficiente aggiungere ad M degli stati che controllano l'input fornito, e computare come descritto);

- D esegue $H(\langle M' \rangle)$;
- se H accetta, allora $L(M') = \emptyset$, e dunque D rifiuta;
- se H rifiuta, allora $L(M') \neq \emptyset$, e dunque D accetta.

Di conseguenza, D è in grado di stabilire, data una macchina di Turing M ed un input w , se $w \in L(M)$, poiché accetta se e solo se H rifiuta, ovvero se e solo se $L(M') \neq \emptyset$, e per costruzione di M' si ha che $L(M') \neq \emptyset \iff L(M') = \{w\}$; inoltre, si noti che D non può andare in loop, e dunque D è un decisore. Allora, l'esistenza di D dimostrerebbe che $A_{TM} \in DEC$, ma questo non è possibile per il [Teorema 3.3.3.6](#) \nmid . \square

4.2.4 Problema della regolarità

Definizione 4.2.4.1: Linguaggi di regolarità

Si definiscono **linguaggi di regolarità** i linguaggi definiti come segue

$$REG_{\mathcal{C}} := \{\langle A \rangle \mid A \in \mathcal{C}, L(A) \in REG\}$$

Teorema 4.2.4.1: Indecidibilità di REG_{TM}

REG_{TM} è indecidibile; in simboli

$$REG_{TM} := \{\langle M \rangle \mid M \in TM, L(M) \in REG\} \notin DEC$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia REG_{TM} decidibile, e dunque per esso esiste un decisore H ; di conseguenza $H(\langle M \rangle)$ accetta se e solo se $L(M) \in REG$. Si consideri ora una macchina di Turing D — avente H come sua sottoprocedura — che, data in input una codifica $\langle M, w \rangle$, computa come segue:

- D costruisce una macchina di Turing M' che, data in input una stringa x , computa come segue:
 - se l'input x di M' ha la forma $0^n 1^n$ (per qualche $n \in \mathbb{N}$), M' accetta;
 - se l'input x di M' non ha tale forma, M' accetta se $M(w)$ accetta (dunque ignorando x);
- D esegue $H(\langle M' \rangle)$;
- se H accetta, allora $L(M') \in REG$, e dunque D accetta;
- se H rifiuta, allora $L(M') \notin REG$, e dunque D rifiuta.

Di conseguenza, D è in grado di stabilire, data una macchina di Turing M ed un input w , se $w \in L(M)$, poiché accetta se e solo se H accetta, ovvero se $L(M') \in REG$, e per

costruzione di M' si ha che $L(M') \in \text{REG} \iff \begin{cases} x \notin \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\} \\ M(w) \text{ accetta} \end{cases} \quad \text{TODO DA FINIRE NON HO CAPITO} \quad \square$

4.2.5 Problema dell'uguaglianza

Teorema 4.2.5.1: Indecidibilità di EQ_{TM}

EQ_{TM} è indecidibile; in simboli

$$EQ_{\text{TM}} := \{\langle M_1, M_2 \rangle \mid M_1, M_2 \in \text{TM}, L(M_1) = L(M_2)\} \notin \text{DEC}$$

Dimostrazione I. Per assurdo, sia EQ_{TM} decidibile, e dunque per esso esiste un decisore H ; di conseguenza $H(\langle M_1 \rangle, M_2)$ accetta se e solo se $L(M_1) = L(M_2)$. Si consideri ora una macchina di Turing D — avente H come sua sottoprocedura — che, data in input una codifica $\langle M \rangle$, computa come segue:

- D esegue $H(\langle M, M_{\text{reject}} \rangle)$, dove M_{reject} è una macchina di Turing che rifiuta ogni input, e dunque $L(M_{\text{reject}}) = \emptyset$;
- se H accetta, allora $L(M) = L(M_{\text{reject}}) = \emptyset$, e dunque D accetta;
- se H rifiuta, allora $L(M) \neq L(M_{\text{reject}}) = \emptyset$, e dunque D rifiuta.

Di conseguenza, D è in grado di stabilire, data una macchina di Turing M , se $L(M) = \emptyset$, poiché attraverso H controlla che il linguaggio di M coincida con $L(M_{\text{reject}}) = \emptyset$; inoltre, si noti che D non può andare in loop, e dunque D è un decisore. Allora, l'esistenza di D dimostrerebbe che $E_{\text{TM}} \in \text{DEC}$, ma questo non è possibile per il [Teorema 4.2.3.1](#) \nmid . \square

Dimostrazione II. Si consideri la macchina di Turing F che, data in input una codifica $\langle M \rangle$, computa come segue:

- F costruisce una macchina di Turing M' che, data in input una stringa x , rifiuta sempre — e dunque $L(M') = \emptyset$;
- F restituisce $\langle M, M' \rangle$ sul suo nastro.

Si noti dunque che, poiché F si ferma avendo solo $\langle M, M' \rangle$ sul nastro, per qualsiasi input $\langle M \rangle$, la funzione $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^* : \langle M \rangle \mapsto \langle M, M' \rangle$ che F descrive è calcolabile per definizione. Allora, si noti che

$$\langle M \rangle \in E_{\text{TM}} \iff L(M) = \emptyset = L(M')$$

per definizione di E_{TM} e per costruzione di M' rispettivamente; inoltre

$$L(M') = L(M) \iff f(\langle M \rangle) = \langle M, M' \rangle \in EQ_{\text{TM}}$$

per definizione di EQ_{TM} ; dunque

$$\langle M \rangle \in E_{\text{TM}} \iff f(\langle M \rangle) \in EQ_{\text{TM}}$$

Allora, per definizione, segue che

$$E_{\text{TM}} \leq_m EQ_{\text{TM}}$$

e poiché $E_{\text{TM}} \notin \text{DEC}$ per il [Teorema 4.2.3.1](#), è verificata la tesi per cui $EQ_{\text{TM}} \notin \text{DEC}$ per il [Corollario 4.2.1.1](#). \square

4.3 Turing-riconoscibilità mediante riduzione

4.3.1 Teoremi

Teorema 4.3.1.1: Turing-riconoscibilità mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_m B$, e B è Turing-riconoscibile, allora A è Turing-riconoscibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m B \\ B \in \text{REC} \end{cases} \implies A \in \text{REC}$$

Dimostrazione. La dimostrazione è analoga al [Teorema 4.2.1.1](#), tranne per il fatto che le macchine di Turing considerate sono riconoscitori e non decisori; verrà dunque omessa. \square

Corollario 4.3.1.1: Turing-irricognoscibilità mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_m B$, ed A non è Turing-riconoscibile, allora B non è Turing-riconoscibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m B \\ A \notin \text{REC} \end{cases} \implies B \notin \text{REC}$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia $B \in \text{REC}$; allora, poiché $A \leq_m B$, per il [Teorema 4.3.1.1](#) si ha che $A \in \text{REC}$ \nmid . \square

Corollario 4.3.1.2: Co-riconoscibilità mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_m B$, ed B è co-Turing-riconoscibile, allora A è co-Turing-riconoscibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m B \\ B \in \text{coREC} \end{cases} \implies A \in \text{coREC}$$

Dimostrazione. Per il [Lemma 4.1.1.1](#) si ha che

$$A \leq_m B \iff \bar{A} \leq_m \bar{B}$$

e dunque, per il [Teorema 4.3.1.1](#), si ha che

$$\begin{cases} \bar{A} \leq_m \bar{B} \\ B \in \text{coREC} \iff \bar{B} \in \text{REC} \end{cases} \implies \bar{A} \in \text{REC} \iff A \in \text{coREC}$$

□

Corollario 4.3.1.3: Co-irriconoscibilità mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_m B$, ed A non è co-Turing-riconoscibile, allora B è non co-Turing-riconoscibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m B \\ A \notin \text{coREC} \end{cases} \implies B \notin \text{coREC}$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia $B \in \text{coREC}$; allora, poiché $A \leq_m B$, per il [Corollario 4.3.1.2](#), si ha che $A \in \text{coREC}$ \nmid . □

Corollario 4.3.1.4: Riducibilità al proprio complemento

Sia A un linguaggio tale da essere riducibile al suo complemento; allora, se A è Turing-riconoscibile, è anche decidibile. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_m \bar{A} \\ A \in \text{REC} \end{cases} \implies A \in \text{DEC}$$

Dimostrazione. Per il [Lemma 4.1.1.1](#) si ha che

$$A \leq_m \bar{A} \iff \bar{A} \leq_m \bar{\bar{A}} = A$$

e dunque, per il [Teorema 4.3.1.1](#), si ha che

$$\begin{cases} \bar{A} \leq_m A \\ A \in \text{REC} \end{cases} \implies \bar{A} \in \text{REC} \iff A \in \text{coREC}$$

e poiché

$$\text{DEC} = \text{REC} \cap \text{coREC}$$

per il [Teorema 3.3.3.7](#), segue che $A \in \text{DEC}$. □

4.3.2 Problema dell'uguaglianza

Teorema 4.3.2.1: Irriconoscibilità di EQ_{TM}

EQ_{TM} non è Turing-riconoscibile; in simboli

$$EQ_{\text{TM}} := \{\langle M_1, M_2 \rangle \mid M_1, M_2 \in \text{TM}, L(M_1) = L(M_2)\} \notin \text{REC}$$

Dimostrazione. Si consideri la macchina di Turing F che, data in input una codifica $\langle M, w \rangle$, computa come segue:

- F costruisce una macchina di Turing M_1 che, data in input una stringa x , rifiuta sempre — e dunque $L(M_1) = \emptyset$;
- F costruisce una macchina di Turing M_2 che, data in input una stringa x , computa come segue:
 - M_2 esegue $M(w)$ (dunque ignorando x);
 - se M accetta, M_2 accetta;
 - se M rifiuta o cicla, M_2 rifiuta;
 dunque, se M accetta w , M_2 riconosce Σ^* , altrimenti M_2 riconosce \emptyset ;
- F restituisce $\langle M_1, M_2 \rangle$ sul suo nastro.

Si noti dunque che, poiché F si ferma avendo solo $\langle M_1, M_2 \rangle$ sul nastro, per qualsiasi input $\langle M, w \rangle$, la funzione $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^* : \langle M, w \rangle \mapsto \langle M_1, M_2 \rangle$ che F descrive è calcolabile per definizione. Allora, si noti che

$$\langle M, w \rangle \in A_{\text{TM}} \iff w \in L(M) \iff L(M_2) = \Sigma^*$$

per definizione di A_{TM} e per costruzione di M_2 rispettivamente; inoltre

$$L(M_1) = \emptyset \neq L(M_2) \iff f(\langle M, w \rangle) = \langle M_1, M_2 \rangle \notin EQ_{\text{TM}} \iff \langle M_1, M_2 \rangle \in \overline{EQ_{\text{TM}}}$$

per definizione di EQ_{TM} ; dunque

$$\langle M, w \rangle \in A_{\text{TM}} \iff f(\langle M, w \rangle) \in \overline{EQ_{\text{TM}}}$$

Allora, per definizione, segue che

$$A_{\text{TM}} \leq_m \overline{EQ_{\text{TM}}}$$

e poiché $A_{\text{TM}} \notin \text{coREC}$ per il [Corollario 3.3.3.3](#), è verificata la tesi per cui $\overline{EQ_{\text{TM}}} \notin \text{coREC} \iff EQ_{\text{TM}} \notin \text{REC}$, per il [Corollario 4.3.1.3](#). \square

Teorema 4.3.2.2: Irriconoscibilità di $\overline{EQ_{\text{TM}}}$

EQ_{TM} non è co-Turing-riconoscibile; in simboli

$$EQ_{\text{TM}} := \{\langle M_1, M_2 \rangle \mid M_1, M_2 \in \text{TM}, L(M_1) = L(M_2)\} \notin \text{coREC}$$

Dimostrazione. Si consideri la dimostrazione del [Teorema 4.3.2.1](#); in essa, la TM F costruisce due macchine di Turing M_1 ed M_2 , dove la prima riconosce \emptyset . Se M_1 fosse invece tale da accettare sempre, riconoscerebbe Σ^* , e dunque si avrebbe che

$$\langle M, w \rangle \in A_{\text{TM}} \iff w \in L(M) \iff L(M_2) = \Sigma^*$$

per definizione di A_{TM} e per costruzione di M_2 rispettivamente; inoltre

$$L(M_1) = L(M_2) \iff f(\langle M, w \rangle) = \langle M_1, M_2 \rangle \in EQ_{\text{TM}}$$

per definizione di EQ_{TM} ; dunque

$$\langle M, w \rangle \in A_{\text{TM}} \iff f(\langle M, w \rangle) \in EQ_{\text{TM}}$$

Allora, per definizione, segue

$$A_{\text{TM}} \leq_m EQ_{\text{TM}}$$

e poiché $A_{\text{TM}} \notin \text{coREC}$ per il [Corollario 3.3.3.3](#), è verificata la tesi per cui $EQ_{\text{TM}} \notin \text{REC}$, per il [Corollario 4.3.1.3](#). \square

4.4 Esercizi

4.4.1 Indecidibilità

Problema 4.4.1.1: Indecidibilità di ODD_{TM}

TODO

Problema 4.4.1.2: Indecidibilità di $START-0_{\text{TM}}$

TODO

Problema 4.4.1.3: Indecidibilità di $UNION-ALL_{\text{TM}}$

TODO

4.4.2 Irriconoscibilità

Problema 4.4.2.1: Irriconoscibilità di ODD_{TM}

TODO

5

Complessità di tempo

5.1 Analisi asintotica

5.1.1 O -grande ed o -piccolo

Definizione 5.1.1.1: Complessità temporale di una TM

Sia D un decisore; si definisce **complessità temporale** (o **tempo di esecuzione**) di D la funzione $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ tale che $f(n)$ sia il numero massimo di passi che D utilizza per processare una stringa di lunghezza n .

Esempio 5.1.1.1 (Complessità temporali di TM). Sia D un decisore che, data in input una stringa x , sposta la testina verso destra finché non legge \sqcup , e quando legge quest'ultimo accetta. Allora, se input è presente una stringa avente lunghezza n , D impiega esattamente n passi a processarla, e dunque $f(n) = n \implies f \equiv \text{id}$.

Definizione 5.1.1.2: O -grande

Siano $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$; $f(n)$ è detta essere **in O -grande** di $g(n)$ se e solo se

$$\exists c, n_0 \in \mathbb{N} - \{0\} \mid \forall n \geq n_0 \quad f(n) \leq c \cdot g(n)$$

ed è indicato con il simbolismo

$$f(n) = O(g(n))$$

Viceversa, $g(n)$ è detto essere **limite superiore asintotico** per $f(n)$.

Esempio 5.1.1.2 (O -grande). Siano $f(n) = 100n^2$ e $g(n) = n^3$; poiché esistono $c = 10$

ed $n_0 = 10$ tali che

$$\forall n \geq n_0 = 10 \quad f(n) = 100n^2 \leq 10 \cdot n^3 = c \cdot g(n)$$

si ha che $f(n) = O(g(n))$ per definizione.

Definizione 5.1.1.3: o -piccolo

Siano $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$; $f(n)$ è detta essere **in O -piccolo** di $g(n)$ se e solo se

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{f(n)}{g(n)} = 0$$

o equivalentemente, se e solo se

$$\exists c, n_0 \in \mathbb{N} - \{0\} \mid \forall n \geq n_0 \quad f(n) < c \cdot g(n)$$

Esempio 5.1.1.3 (o -piccolo). Si consideri l'[Esempio 5.1.1.2](#); poiché sono stati scelti $c = n_0 = 10$, per $n = n_0$ si ottiene che

$$f(n_0) = f(10) = 100 \cdot 10^2 = 10000 = 10 \cdot 1000 = 10 \cdot 10^3 = 10 \cdot g(10) = c \cdot g(n_0)$$

Allora, scegliendo n_0 tale da essere maggiore di 10 — dunque ad esempio 11 — si ha che

$$\forall n \geq n_0 = 11 \quad f(n) = 100n^2 < 10 \cdot n^3 = c \cdot g(n)$$

e dunque $f(n) = o(g(n))$ per definizione.

Osservazione 5.1.1.1: O -piccolo ed o -grande

Si noti che, date due funzioni $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$, per definizione stessa si ha che

$$f(n) = o(g(n)) \implies f(n) = O(g(n))$$

Proposizione 5.1.1.1: Algebra asintotica

Siano $f, g, h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$; allora, si ha che:

- $\forall c \in \mathbb{R} \quad f(n) = c \cdot o(g(n)) \implies f(n) = o(g(n))$
- $f(n) = o(g(n)) + o(h(n)) \implies f(n) = o(\max(g(n), h(n)))$
- $f(n) = o(g(n)) \cdot o(h(n)) \implies f(n) = o(g(n) \cdot h(n))$

Si noti che tali regole valgono anche per O -grande, per l'[Osservazione 5.1.1.1](#).

5.1.2 Varianti di macchine di Turing

Teorema 5.1.2.1: Relazione tra TM e TM multinastro

Sia $t(n)$ una funzione tale che $t(n) \geq n$, e sia M una macchina di Turing multinastro avente tempo $t(n)$; allora, esiste una TM M' , equivalente a M , avente tempo $O(t^2(n))$.

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing a k -nastri avente tempo di esecuzione $t(n)$, e si consideri la TM M' costruita all'interno della prima implicazione della dimostrazione della [Proposizione 3.2.2.1](#). Dunque, si ha che:

- il numero di nastri k non dipende dall'input, ed è dunque costante;
- si assuma n essere la lunghezza della stringa più lunga tra le stringhe presenti sui nastri di M ; allora, per trasformare il nastro nel formato descritto all'interno della dimostrazione — ovvero effettuando uno *shift* verso destra, antepoendo $\#$ all'inizio e inserendo i caratteri marcati per segnare le testine virtuali — sono necessari $O(n) + O(n) = O(n)$ passi;
- si considerino le parti attive dei nastri di M : nel caso peggiore (ovvero se la testina di M non fa altro che spostarsi a destra), ognuna di queste ha lunghezza $t(n)$, poiché M utilizza $t(n)$ celle del nastro in $t(n)$ passi; di conseguenza, una scansione della parte attiva del nastro di M' impiega $k \cdot O(t(n)) = O(t(n))$ passi;
- per simulare una singola mossa di M , la testina di M' scansiona tutto il suo nastro, aggiorna le testine virtuali, e successivamente effettua una seconda scansione per simulare i rimpiazzi; allora, un singolo passo di M impiega $2 \cdot O(t(n)) = O(t(n))$;
- allora, poiché il numero di passi da simulare è $t(n)$, la complessità temporale di M risulta essere

$$O(n) + t(n) \cdot O(t(n)) = O(t^2(n))$$

□

Teorema 5.1.2.2: Relazione tra TM ed NTM

Sia $t(n)$ una funzione tale che $t(n) \geq n$, e sia M una macchina di Turing non deterministica avente tempo $t(n)$; allora, esiste una TM M' , equivalente a M , avente tempo $2^{O(t(n))}$.

Dimostrazione. TODO

□

5.2 Classi di complessità di tempo

5.2.1 Classe DTIME

Definizione 5.2.1.1: Classe DTIME

Data una funzione $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$, si definisce **classe di complessità di tempo DTIME($t(n)$)** l'insieme dei linguaggi decidibili da una macchina di Turing — *varianti escluse* — in $O(t(n))$.

Esempio 5.2.1.1 (Classe di complessità di tempo). Si consideri una macchina di Turing M — in grado di decidere $L = \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ — che, data in input una stringa x , computa come segue:

1. scorre il nastro: se è presente uno 0 alla destra di un 1, rifiuta;
2. torna all'inizio del nastro;
3. fintanto che sono presenti almeno uno 0 ed almeno un 1, ripete i seguenti passi:
 4. scorre il nastro: se trova uno 0, lo rimpiazza con x ;
 5. scorre il nastro: se trova uno 1, lo rimpiazza con x ;
 6. torna all'inizio del nastro;
7. scorre il nastro: se sono presenti solo x sul nastro, accetta.

Se uno qualsiasi dei passaggi menzionati non è effettuabile, M rifiuta; dunque ci si convince facilmente che M decide L come richiesto.

Analizzando la complessità temporale di M , si ottiene che:

- l'istruzione 1 richiede n passi, ed ha dunque costo $O(n)$;
- l'istruzione 2 richiede n passi, ed ha dunque costo $O(n)$;
- il tempo dell'istruzione 3 dipende dalle istruzioni che ripete, e dunque
 - l'istruzione 4 richiede n passi, ed ha dunque costo $O(n)$;
 - analogamente all'istruzione 4, l'istruzione 5 ha costo $O(n)$;
 - analogamente all'istruzione 2, l'istruzione 6 ha costo $O(n)$;

inoltre, si noti che l'istruzione 3 ripete le istruzioni 4, 5 e 6 al più $\frac{n}{2}$ volte, poiché ad ogni iterazione vengono rimossi uno 0 ed un 1 insieme; allora, per via dei costi delle istruzioni che ripete, l'istruzione 3 ha costo pari a

$$\begin{aligned} & \frac{n}{2} \cdot [O(n) + O(n) + O(n)] = \frac{n}{2} \cdot O(\max(n, n, n)) = \\ & = \frac{n}{2} \cdot O(n) = \frac{1}{2} \cdot n \cdot O(n) = \frac{1}{2} \cdot O(n \cdot n) = \frac{1}{2} \cdot O(n^2) = O(n^2) \end{aligned}$$

(si veda la [Proposizione 5.1.1.1](#));

- analogamente all'istruzione 2, l'istruzione 7 ha costo $O(n)$.

Allora, il costo temporale di M risulta essere

$$O(n) + O(n) + O(n^2) + O(n) = O(\max(n, n, n^2, n)) = O(n^2)$$

(si veda la [Proposizione 5.1.1.1](#)) e dunque, segue che $L \in \text{DTIME}(n^2)$.

5.2.2 Classe P

Definizione 5.2.2.1: Classe P

Si definisce **classe dei linguaggi decidibili in tempo polinomiale** da una TM a singolo nastro il seguente insieme

$$P := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \text{DTIME}(n^k)$$

Osservazione 5.2.2.1: Classe P

La classe di problemi descritti dai linguaggi in P è particolarmente importante, poiché P corrisponde approssimativamente alla classe dei problemi che sono realisticamente risolvibili su un computer, in tempi ragionevoli.

Definizione 5.2.2.2: Funzione polinomialmente calcolabile

Una funzione $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ è detta **funzione polinomialmente calcolabile** se esiste una macchina di Turing in tempo polinomiale che, su qualsiasi input $w \in \Sigma^*$, se si ferma, termina avendo solo $f(w)$ sul suo nastro.

Definizione 5.2.2.3: Riduzione polinomiale mediante funzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; A è detto essere **riducibile polinomialmente mediante funzione a B** , se esiste una funzione polinomialmente calcolabile $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ tale che

$$\forall w \in \Sigma^* \quad w \in A \iff f(w) \in B$$

Tale relazione è indicata attraverso il simbolismo $A \leq_P B$ e la funzione f prende il nome di **riduzione di tempo polinomiale di A a B** .

Lemma 5.2.2.1: Riducibilità polinomiale dei complementi

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; allora, si ha che

$$A \leq_P B \iff \bar{A} \leq_P \bar{B}$$

Dimostrazione. La dimostrazione è analoga alla dimostrazione del [Lemma 4.1.1.1](#), pertanto verrà omessa. \square

Osservazione 5.2.2.2: Rappresentazione di grafi

Nelle prossime dimostrazioni si assumerà che sia possibile definire una codifica coerente per rappresentare grafi $G = (V, E)$, al fine di fornire questi in input a macchine di Turing; un esempio potrebbe essere quello della matrice di adiacenza, in cui la generica cella è definita come segue:

$$\forall i, j \in [1, |V|] \quad m_{i,j} = \begin{cases} 1 & (v_i, v_j) \in E \\ 0 & (v_i, v_j) \notin E \end{cases}$$

dove $v_i, v_j \in V$.

Teorema 5.2.2.1: *PATH* in **P**

Sia *PATH* il linguaggio definito come segue:

$$PATH := \{ \langle G, s, t \rangle \mid G = (V, E) \text{ grafo diretto con un cammino } s \rightarrow t \}$$

Allora, si ha che $PATH \in \mathbf{P}$.

Dimostrazione. Sia M una macchina di Turing che, data in input una codifica $\langle G, s, t \rangle$, una volta controllata la validità della codifica in input, computa come segue:

- cerca il vertice s tra i vertici di G ;
- una volta trovato, marca s ;
- finché non vengono marcati tutti i vertici di G :
 - marca ogni vertice avente un arco entrante da un vertice già marcato;
- se tra i vertici marcati è presente t , allora M accetta.

Dunque, poiché $|E|$ è sicuramente minore di n (in quanto il numero di archi è sicuramente inferiore del numero di simboli che servono per rappresentare tutto l'input), sicuramente $|E| = O(n)$, e dunque la complessità temporale di M risulta essere (rispettivamente per ogni istruzione):

$$O(n^k) + O(1) + |E| \cdot O(n^k) + O(n^k) = O(n) \cdot O(n^k) = O(n^{k+1}) \implies PATH \in \mathbf{P}$$

\square

Dimostrazione. La dimostrazione è analoga alla dimostrazione del [Lemma 4.1.1.1](#), pertanto verrà omessa. \square

Teorema 5.2.2.2: P mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_P B$, e B è in P , allora A è in P . In simboli

$$\begin{cases} A \leq_P B \\ B \in P \end{cases} \implies A \in P$$

Dimostrazione. La dimostrazione è analoga al [Teorema 4.2.1.1](#), tranne per il fatto che le macchine di Turing considerate computano in tempo polinomiale; verrà dunque omessa. \square

Corollario 5.2.2.1: P mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_P B$, e A non è in P , allora B non è in P . In simboli

$$\begin{cases} A \leq_P B \\ A \notin P \end{cases} \implies B \notin P$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia $B \in P$; allora, poiché $A \leq_P B$, per il [Teorema 5.2.2.2](#), si ha che $A \in P$ \nmid . \square

5.2.3 Classe coP**Definizione 5.2.3.1: Classe coP**

La classe coP è definita come segue:

$$\text{coP} := \{L \in \text{DEC} \mid \bar{L} \in P\}$$

Teorema 5.2.3.1: P = coP

Si verifica che

$$P = \text{coP}$$

Dimostrazione. TODO \square

5.2.4 Classe EXP**Definizione 5.2.4.1: Classe EXP**

Si definisce **classe dei linguaggi decidable in tempo esponenziale** da una TM a singolo nastro il seguente insieme

$$\text{EXP} := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \text{DTIME}(2^{n^k})$$

Proposizione 5.2.4.1: Relazione tra P e EXP

Si verifica che

$$P \subsetneq EXP$$

Dimostrazione. Omessa. □

Definizione 5.2.4.2: Cammino hamiltoniano

Sia $G = (V, E)$ un grafo; un **cammino hamiltoniano** su G è un cammino che passa una sola volta per ogni nodo di G .

Teorema 5.2.4.1: *HAMPATH* in EXP

TODO

Dimostrazione. TODO □

5.2.5 Classe coEXP**Definizione 5.2.5.1: Classe coEXP**

La classe coEXP è definita come segue:

$$\text{coEXP} := \{L \in \text{DEC} \mid \bar{A} \in \text{EXP}\}$$

Teorema 5.2.5.1: $\text{EXP} = \text{coEXP}$

Si verifica che

$$\text{EXP} = \text{coEXP}$$

Dimostrazione. TODO □

5.2.6 Classe NTIME**Definizione 5.2.6.1: Classe NTIME**

Data una funzione $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$, si definisce **classe di complessità di tempo** **NTIME**($t(n)$) l'insieme dei linguaggi decidibili da una macchina di Turing non deterministica in $O(t(n))$.

5.2.7 Classe NP

Definizione 5.2.7.1: Classe NP

Si definisce **classe dei linguaggi decidibili non deterministicamente in tempo polinomiale** da una NTM il seguente insieme

$$\text{NP} := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \text{NTIME}(n^k)$$

Proposizione 5.2.7.1: Tempo polinomiale in NTIME

Si verifica che

$$\text{NP} \subseteq \text{EXP}$$

Dimostrazione. Sia $L \in \text{NTIME}(n^k)$ per qualche $k \in \mathbb{N}$, e dunque per definizione esiste una NTM che decide L in $O(n^k)$; allora, per il [Teorema 5.1.2.2](#), si ha che $L \in \text{DTIME}(2^{O(n^k)})$. \square

Definizione 5.2.7.2: Verificatore

Sia L un linguaggio decidibile definito su un certo alfabeto Σ , e V un decisore; V è detto **verificatore di L** se

$$L = \{w \in \Sigma^* \mid \exists c \in \Sigma^* : \langle w, c \rangle \in L(V)\}$$

Data una codifica $\langle w, c \rangle \in L(V)$, il tempo di computazione di V è misurato solamente in termini della lunghezza di w ; inoltre, c prende il nome di **certificato di w** . Un linguaggio è detto essere **polinomialmente verificabile** se ammette un verificatore in tempo polinomiale.

Osservazione 5.2.7.1: Lunghezza dei certificati di verificatori

Sia V un verificatore che computa in $O(f(n))$ per qualche f , e sia $\langle w, c \rangle \in L(V)$; la lunghezza di c deve necessariamente essere in $O(f(n))$ — rispetto alla lunghezza di w — poiché $O(f(n))$ è proprio il tempo di cui V dispone per computare.

Teorema 5.2.7.1: NP mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_P B$, e B è in NP, allora A è in NP. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_P B \\ B \in \text{NP} \end{cases} \implies A \in \text{NP}$$

Dimostrazione. La dimostrazione è analoga al [Teorema 4.2.1.1](#), tranne per il fatto che le macchine di Turing considerate computano non deterministicamente in tempo polinomiale; verrà dunque omessa. \square

Corollario 5.2.7.1: NP mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_P B$, e A non è in NP, allora B non è in NP. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_P B \\ A \notin \text{NP} \end{cases} \implies B \notin \text{NP}$$

Dimostrazione. Per assurdo, sia $B \in \text{NP}$; allora, poiché $A \leq_P B$, per il [Teorema 5.2.7.1](#), si ha che $A \in \text{NP}$ \nmid . \square

Teorema 5.2.7.2: Linguaggi polinomialmente verificabili

NP è la classe dei linguaggi polinomialmente verificabili.

Dimostrazione.

Prima implicazione. Sia $L \in \text{NP}$, e dunque per la [Definizione 5.2.7.1](#) esiste una NTM N che decide $L = L(N)$ non deterministicamente in tempo polinomiale; sia allora V un decisore che, data in input una configurazione $\langle w, c \rangle$, computa come segue:

- V interpreta c come un indirizzo (come descritto nella dimostrazione della [Proposizione 3.2.3.1](#));
- V simula N su input w , eseguendo le scelte dettate dall'indirizzo c ;
- V accetta se la simulazione di N accetta.

Allora, per costruzione di V , si ha che

$$w \in L = L(N) \iff \exists c \in \Sigma^* \mid \langle w, c \rangle \in L(V)$$

e, sempre per costruzione di V , ciò avviene se e solo se esiste un ramo di N che accetta w . Inoltre, poiché $L \in \text{NP}$, la lunghezza dei rami dell'albero di computazione di N è necessariamente in $O(n^k)$, e dunque se un certificato c descrive una serie di scelte tali che N accetta w , la lunghezza di c deve necessariamente essere in $O(n^k)$ anch'essa. Infine, poiché c rappresenta indirizzi di computazione di N , ed $N \in \text{NTIME}(n^k)$, se una stringa w ha lunghezza n , la sua computazione è in $O(n^k)$, e dunque l'indirizzo TODO DA FINIRE

Seconda implicazione. Sia L un linguaggio polinomialmente verificabile, e dunque esiste un verificatore V che verifica L polinomialmente. Sia allora N una NTM—avente V come sottoprocedura—che, data una codifica $\langle w \rangle$, computa come segue:

- N sceglie casualmente una stringa c avente lunghezza polinomiale;
- N simula $V(\langle w, c \rangle)$

- N accetta se V accetta.

Poiché N computa non deterministicamente, il primo passo genererà un albero di computazione in cui ogni ramo elaborerà un solo certificato c avente lunghezza polinomiale; inoltre, poiché V verifica L , deve esistere un certificato tale per cui il suo ramo di computazione sia accettante. Dunque, poiché per costruzione N riconosce tutte e sole le stringhe w tali per cui esiste un certificato c tale che $\langle w, c \rangle \in L(V)$, segue che $L = L(N) \implies L \in \text{NP}$.

□

Definizione 5.2.7.3: Grafo tricolorabile

Un grafo è detto **tricolorabile** se ad ogni suo nodo è possibile assegnare un colore diverso dai suoi nodi adiacenti, utilizzando al più 3 colori.

Teorema 5.2.7.3: 3COL in NP

Sia $3COL$ il linguaggio definito come segue:

$$3COL := \{ \langle G \rangle \mid G = (V_G, E_G) \text{ grafo tricolorabile} \}$$

Allora, si ha che $3COL \in \text{NP}$.

Dimostrazione. Sia V una macchina di Turing che, data una codifica $\langle w, c \rangle$ in input, computa come segue:

1. interpreta w come $\langle G \rangle$, dove $G = (V_G, E_G)$ è un grafo;
2. interpreta c come $\langle c_1, \dots, c_{|V_G|} \rangle$, e $\forall k \in [1, |V_G|] \quad c_k \in \{R, G, B\}$, dunque c viene come possibile tricolorazione di G ;
3. se esiste un arco $(v_i, v_j) \in E_G$, con $i, j \in [1, |V_G|] \mid i \neq j$ tale che $c_i = c_j$, V rifiuta; se tali archi non esistono, V accetta.

Dunque, poiché V accetta $\langle w, c \rangle$ TODO

Allora, si ha che:

- l'istruzione 1 ha costo $O(|w|) = O(n)$;
- l'istruzione 2 ha costo $O()$ TODO DA FINIRE
- l'istruzione 3 è costituita da un ciclo, il cui corpo ha costo $O(1)$, e viene eseguito $|E_G|$ volte, e dunque ha costo $O(|E_G|) \cdot O(1) = O(|E_G|)$; si noti però che, nel caso peggiore, ogni nodo del grafo è connesso con ogni altro nodo, e dunque $O(|E_G|) = O(|V_G|^2) = O(n^2)$.

In conclusione, V ha costo pari a

$$O(n) + \text{TODO} + O(n^2) = \text{TODO}$$

dunque V è un verificatore polinomiale, e per il [Teorema 5.2.7.2](#) segue che $3COL \in NP$. \square

Definizione 5.2.7.4: k -clique

Sia G un grafo non diretto; una k -clique di G è un sottografo di G in cui ogni nodo è collegato con ogni altro nodo.

Teorema 5.2.7.4: $CLIQUE$ in NP

Sia $CLIQUE$ il linguaggio definito come segue:

$$CLIQUE := \{\langle G, k \rangle \mid G = (V_G, E_G) \text{ grafo non diretto contenente una } k\text{-clique}\}$$

Allora, si ha che $CLIQUE \in NP$.

Dimostrazione. Sia V una macchina di Turing che, data una codifica $\langle \langle G, k \rangle, c \rangle$ in input, computa come segue:

1. V interpreta c come sottoinsieme di V_G ;
2. V controlla se esiste un arco in E_G tra ogni coppia di nodi dell'insieme descritto dal certificato c ;
3. se gli archi sono presenti tutti, V accetta, altrimenti rifiuta.

Allora, V risulta essere un verificatore di $CLIQUE$, poiché per costruzione V accetta se e solo se esiste un sottoinsieme di nodi $c \in \Sigma^*$ tale che $\langle \langle G, k \rangle, c \rangle \in L(V)$; inoltre V è un verificatore polinomiale, poiché l'istruzione 2 richiede tempo $O(n^2)$. Allora, per il [Teorema 5.2.7.2](#), segue la tesi. \square

5.2.8 Classe NP-Complete

Definizione 5.2.8.1: NP-difficoltà

Un linguaggio L è detto essere **NP-difficile** se e solo se ogni altro linguaggio in NP è polinomialmente riducibile ad L . In simboli

$$NP\text{-Hard} := \{L \mid \forall L' \in NP \quad L' \leq_P L\}$$

Definizione 5.2.8.2: NP-completezza

Un linguaggio è detto essere **NP-completo** se e solo se è in NP ed è NP-difficile. In simboli

$$NP\text{-Complete} := NP \cap NP\text{-Hard}$$

Osservazione 5.2.8.1: “P versus NP problem”

Uno dei [problemi del millennio](#) consiste nello stabilire se [P coincide o meno con NP](#).

Intuitivamente, è possibile interpretare tale problema aperto attraverso il seguente quesito: *per tutti i problemi per cui un algoritmo può verificare efficientemente la correttezza di una data soluzione, esiste un algoritmo che è anche in grado di trovare tale soluzione efficientemente?* Infatti, si ritiene che $P \neq NP$.

Proposizione 5.2.8.1: Implicazioni di $P = NP$

Sia L un linguaggio NP-completo; allora si ha che

$$L \in P \iff P = NP$$

Dimostrazione.

Prima implicazione. Per la [Definizione 5.2.8.2](#) si ha che

$$\begin{cases} L \in \text{NP-Complete} \\ L \in P \end{cases} \implies \begin{cases} L \in \text{NP} \\ \forall L' \in \text{NP} \quad L' \leq_P L \\ L \in P \end{cases}$$

dunque in particolare, dato un linguaggio $L' \in \text{NP}$, se $L \in \text{NP-Complete} \cap P$ segue che

$$\begin{cases} L' \leq_P L \\ L \in P \end{cases} \implies L' \in P$$

per il [Teorema 5.2.2.2](#); dunque $\text{NP} \subseteq P$. Inoltre, poiché $P \subseteq \text{NP}$ per il [Corollario 5.2.11.1](#), segue la tesi.

Seconda implicazione. Trivialmente, dalle ipotesi e dalla [Definizione 5.2.8.2](#) segue che

$$L \in \text{NP-Complete} \implies L \in \text{NP} = P$$

□

Teorema 5.2.8.1: NP-Complete mediante riduzione

Siano A e B due linguaggi definiti su un alfabeto Σ ; se $A \leq_P B$, A è NP-completo, e B è in NP, allora B è NP-completo. In simboli

$$\begin{cases} A \leq_P B \\ A \in \text{NP-Complete} \\ B \in \text{NP} \end{cases} \implies B \in \text{NP-Complete}$$

Dimostrazione. TODO

□

5.2.9 Classe coNP

Definizione 5.2.9.1: Classe coNP

La classe coNP è definita come segue:

$$\text{coNP} := \{L \in \text{DEC} \mid \bar{L} \in \text{NP}\}$$

Proposizione 5.2.9.1: $P \subseteq \text{coNP} \subseteq \text{EXP}$

Si verifica che

$$P \subseteq \text{coNP} \subseteq \text{EXP}$$

Dimostrazione. TODO □

Teorema 5.2.9.1: Implicazioni di $P = \text{NP}$

Si verifica che

$$P = \text{NP} \implies P = \text{coNP}$$

Dimostrazione. Per il [Proposizione 5.2.9.1](#), si ha che $P \subseteq \text{coNP}$; inoltre, preso un linguaggio $L \in \text{coNP}$, si ha che

$$L \in \text{coNP} \iff \bar{L} \in \text{NP} = P$$

e dunque segue la tesi per doppia inclusione. □

Corollario 5.2.9.1: Implicazioni di $P = \text{NP}$

Si verifica che

$$P = \text{NP} \implies \text{NP} = \text{coNP}$$

Dimostrazione. Per il [Teorema 5.2.9.1](#), si ha che

$$P = \text{NP} \implies \text{NP} = P = \text{coNP}$$

□

5.2.10 Classe coNP-Complete

Definizione 5.2.10.1: coNP-difficoltà

Un linguaggio L è detto essere **coNP-difficile** se e solo se ogni altro linguaggio in coNP è polinomialmente riducibile ad L . In simboli

$$\text{coNP} := \{L \mid \forall L' \in \text{coNP} \quad L' \leq_P L\}$$

Definizione 5.2.10.2: coNP-completezza

Un linguaggio è detto essere **coNP-completo** se e solo se è in coNP ed è coNP-difficile. In simboli

$$\text{coNP-Complete} := \text{coNP} \cap \text{coNP-Hard}$$

Teorema 5.2.10.1: coNP-completezza dei complementi

Dato un linguaggio L , si ha che

$$L \in \text{NP-Complete} \iff \bar{L} \in \text{coNP-Complete}$$

Dimostrazione.

$$\begin{aligned} L \in \text{NP-Complete} &\iff \left\{ \begin{array}{l} L \in \text{NP} \\ \forall L' \in \text{NP} \quad L' \leq_P L \end{array} \right\} \iff \left\{ \begin{array}{l} L \in \text{NP} \\ \forall L' \in \text{NP} \quad \bar{L}' \leq_P \bar{L} \end{array} \right\} \iff \\ &\iff \left\{ \begin{array}{l} \bar{L} \in \text{coNP} \\ \forall \bar{L}' \in \text{coNP} \quad \bar{L}' \leq_P \bar{L} \end{array} \right\} \iff \bar{L} \in \text{coNP-Complete} \end{aligned}$$

□

5.2.11 Classe NEXP**Definizione 5.2.11.1: Classe NEXP**

Si definisce **classe dei linguaggi decidibili non deterministicamente in tempo esponenziale** da una NTM il seguente insieme

$$\text{NEXP} := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \text{NTIME}(2^{n^k})$$

Proposizione 5.2.11.1: Relazione tra NP e NEXP

Si verifica che

$$\text{NP} \subsetneq \text{NEXP}$$

Dimostrazione. Omessa.

□

Corollario 5.2.11.1: Gerarchia temporale

Si verifica che

$$\text{P} \subseteq \text{NP} \subseteq \text{EXP} \subseteq \text{NEXP}$$

dove $\text{P} \subsetneq \text{EXP}$ e $\text{NP} \subsetneq \text{NEXP}$.

Dimostrazione. Poiché una TM è anche una NTM, si ha che $P \subseteq NP$ e che $EXP \subseteq NEXP$; allora, la tesi segue dalla [Proposizione 5.2.7.1](#), dalla [Proposizione 5.2.4.1](#) e dalla [Proposizione 5.2.11.1](#). \square

6

Complessità di spazio

TODO