

Segundo ingrediente: una versión más fuerte del lema de amplificación

Proposición

Sea L un lenguaje sobre un alfabeto Σ . Si $L \in BPP$, entonces existe una MT probabilística M tal que $t_M(n)$ es $O(n^k)$ y para cada $w \in \Sigma^$:*

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

Demostración de la versión más fuerte

Como $L \in \text{BPP}$, sabemos que existe una MT probabilística M_1 tal que $t_{M_1}(n)$ es $O(n^{k_1})$ y para cada $w \in \Sigma^*$:

$$\Pr_s(M_1(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{4}$$

Suponemos que $t_{M_1}(n)$ es $\Omega(n)$ y $t_{M_1}(n) \geq 2$ para todo $n \in \mathbb{N}$

- ¿Por qué podemos suponer esto?

Demostración de la versión más fuerte

Sea $a = \frac{4}{3}$

Como en la demostración del lema de amplificación, defina una MT probabilística M que con entrada $w \in \Sigma^*$ realiza los siguientes pasos:

1. realiza $(2\ell + 1)$ ejecuciones de la MT probabilística M_1 , donde $\ell = 2\lceil \log_a(t_{M_1}(|w|)) \rceil$
2. retorna **sí** si al menos $(\ell + 1)$ de las ejecuciones dieron respuesta **sí**, y **no** en caso contrario

Demostración de la versión más fuerte

Como en la demostración del lema de amplificación, obtenemos que:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \left(\frac{3}{4}\right)^\ell$$

Vamos a utilizar esta relación y la definición de ℓ para demostrar la versión más fuerte del lema de amplificación

Demostración de la versión más fuerte

Sea $k(n) = 2\lceil \log_a(t_{M_1}(n)) \rceil$

Tenemos que:

$$\begin{aligned} 3(2k(n) + 1)t_{M_1}(n) &= 3(4\lceil \log_a(t_{M_1}(n)) \rceil + 1)t_{M_1}(n) \\ &\leq 15\lceil \log_a(t_{M_1}(n)) \rceil t_{M_1}(n) \end{aligned}$$

puesto que $t_{M_1}(n) \geq 2$ para todo $n \in \mathbb{N}$.

Además, existe una constante n_0 tal que para todo $n \geq n_0$:

$$15\lceil \log_a(t_{M_1}(n)) \rceil t_{M_1}(n) \leq t_{M_1}(n)^2$$

puesto que $t_{M_1}(n)$ es $\Omega(n)$.

Demostración de la versión más fuerte

Por lo tanto para todo $n \geq n_0$:

$$\begin{aligned} 3(2k(n) + 1)t_{M_1}(n) &\leq t_{M_1}(n)^2 \\ &= a^{\log_a(t_{M_1}(n)^2)} \\ &= a^{2 \log_a(t_{M_1}(n))} \\ &\leq a^{2 \lceil \log_a(t_{M_1}(n)) \rceil} \\ &= a^{k(n)} \end{aligned}$$

Dado que $a = \frac{4}{3}$, concluimos que para todo $n \geq n_0$:

$$3(2k(n) + 1)t_{M_1}(n) \leq \left(\frac{4}{3}\right)^{k(n)}$$

Demostración de la versión más fuerte

Suponga que $|w| \geq n_0$

- Vamos a considerar el caso $|w| < n_0$ por separado

De la conclusión en la transparencia anterior obtenemos lo siguiente considerando que $\ell = k(|w|)$:

$$\begin{aligned} \Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) &\leq \left(\frac{3}{4}\right)^\ell \\ &\leq \frac{1}{3(2\ell + 1)t_{M_1}(|w|)} \end{aligned}$$

Demostración de la versión más fuerte

Dado que $t_M(|w|) = (2\ell + 1)t_{M_1}(|w|)$, tenemos que:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

Demostración de la versión más fuerte

Dado que $t_M(|w|) = (2\ell + 1)t_{M_1}(|w|)$, tenemos que:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

Para concluir la demostración necesitamos considerar el caso $|w| < n_0$

Demostración de la versión más fuerte

Dado que $t_M(|w|) = (2\ell + 1)t_{M_1}(|w|)$, tenemos que:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

Para concluir la demostración necesitamos considerar el caso $|w| < n_0$

En este caso podemos modificar M para que satisfaga la condición:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) = 0 < \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

¿Por qué podemos hacer esto?



Demostración de $\text{BPP} \subseteq \Sigma_2^P$

Sea L un lenguaje sobre un alfabeto Σ , y suponga que $L \in \text{BPP}$

Demostración de $BPP \subseteq \Sigma_2^P$

Sea L un lenguaje sobre un alfabeto Σ , y suponga que $L \in BPP$

Por lema de amplificación existe una MT probabilística M tal que $t_M(n)$ es $O(n^k)$ y para cada $w \in \Sigma^*$:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

Demostración de $\text{BPP} \subseteq \Sigma_2^P$

Sea L un lenguaje sobre un alfabeto Σ , y suponga que $L \in \text{BPP}$

Por lema de amplificación existe una MT probabilística M tal que $t_M(n)$ es $O(n^k)$ y para cada $w \in \Sigma^*$:

$$\Pr_s(M(w, s) \text{ es incorrecto}) \leq \frac{1}{3t_M(|w|)}$$

Además podemos suponer que $t_M(n) > 0$ para cada $n \in \mathbb{N}$

► ¿Por qué?

Demostración de $BPP \subseteq \Sigma_2^P$

Notación

Usamos $s \in \{0, 1\}^m$ para indicar que $s \in \{0, 1\}^*$ y $|s| = m$

Dados a y b en $\{0, 1\}$, la operación $a \oplus b$ es definida como $(a + b) \bmod 2$

► Vale decir, $\oplus$ es el o exclusivo

Dados $x, y \in \{0, 1\}^m$ con $x = a_1 a_2 \cdots a_m$ e $y = b_1 b_2 \cdots b_m$, la operación $x \oplus y$ da como resultado el siguiente string en $\{0, 1\}^m$:

$$(a_1 \oplus b_1)(a_2 \oplus b_2) \cdots (a_m \oplus b_m)$$

Demostración de $BPP \subseteq \Sigma_2^P$

Defina el lenguaje A de la siguiente forma:

$$A = \{ (w, y_1, \dots, y_m, z) \mid w \in \Sigma^*, m = t_M(|w|), \\ y_i \in \{0, 1\}^m \text{ para cada } i \in \{1, \dots, m\}, z \in \{0, 1\}^m \\ \text{y } M(w, y_j \oplus z) \text{ acepta para algún } j \in \{1, \dots, m\} \}$$

Demostración de $BPP \subseteq \Sigma_2^P$

Defina el lenguaje A de la siguiente forma:

$$A = \{(w, y_1, \dots, y_m, z) \mid w \in \Sigma^*, m = t_M(|w|), \\ y_i \in \{0, 1\}^m \text{ para cada } i \in \{1, \dots, m\}, z \in \{0, 1\}^m \\ \text{y } M(w, y_j \oplus z) \text{ acepta para algún } j \in \{1, \dots, m\} \}$$

Ejercicio

Demuestre que $A \in PTIME$

Demostración de $BPP \subseteq \Sigma_2^P$

Dada la caracterización de Σ_2^P en las transparencias anteriores, para demostrar que $L \in \Sigma_2^P$ basta demostrar la siguiente condición:

Para cada $w \in \Sigma^*$ tal que $t_M(|w|) = m$:

$w \in L$ si y sólo si

$$\exists y_1 \in \{0, 1\}^m \cdots \exists y_m \in \{0, 1\}^m \forall z \in \{0, 1\}^m (w, y_1, \dots, y_m, z) \in A$$

Demostración de $BPP \subseteq \Sigma_2^P$

Dada la caracterización de Σ_2^P en las transparencias anteriores, para demostrar que $L \in \Sigma_2^P$ basta demostrar la siguiente condición:

Para cada $w \in \Sigma^*$ tal que $t_M(|w|) = m$:

$w \in L$ si y sólo si

$$\exists y_1 \in \{0, 1\}^m \cdots \exists y_m \in \{0, 1\}^m \forall z \in \{0, 1\}^m (w, y_1, \dots, y_m, z) \in A$$

Para hacer esta demostración vamos a utilizar el método probabilístico.

- Para demostrar que un objeto con ciertas propiedades existe, en lugar de construirlo demostramos que la probabilidad de que exista es mayor que 0

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Suponga que $w \in L$ y $t_M(|w|) = m$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Suponga que $w \in L$ y $t_M(|w|) = m$

Tenemos que:

$$\begin{aligned} \Pr_{y_1, \dots, y_m} \left(\exists z \in \{0, 1\}^m \bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza} \right) &\leq \\ \sum_{z \in \{0, 1\}^m} \Pr_{y_1, \dots, y_m} \left(\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza} \right) &= \\ \sum_{z \in \{0, 1\}^m} \prod_{i=1}^m \Pr_{y_i} \left(M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza} \right) \end{aligned}$$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Dado $a \in \{0, 1\}^m$, la función $f : \{0, 1\}^m \rightarrow \{0, 1\}^m$ definida como $f(x) = x \oplus a$ es **inyectiva**

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Dado $a \in \{0, 1\}^m$, la función $f : \{0, 1\}^m \rightarrow \{0, 1\}^m$ definida como $f(x) = x \oplus a$ es **inyectiva**

Por lo tanto dado que $w \in L$, concluimos que:

$$\Pr_{y_i} \left(M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza} \right) \leq \frac{1}{3m}$$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Dado que $m > 0$ concluimos que:

$$\begin{aligned} \Pr_{y_1, \dots, y_m} \left(\exists z \in \{0, 1\}^m \bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza} \right) &\leq \\ \sum_{z \in \{0, 1\}^m} \prod_{i=1}^m \Pr_{y_i} \left(M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza} \right) &\leq \\ \sum_{z \in \{0, 1\}^m} \prod_{i=1}^m \frac{1}{3^m} &= \\ \sum_{z \in \{0, 1\}^m} \frac{1}{(3^m)^m} &= \\ \frac{2^m}{(3^m)^m} &< 1 \end{aligned}$$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Por lo tanto existen $y_1 \in \{0, 1\}^m, \dots, y_m \in \{0, 1\}^m$ tales que la siguiente condición es cierta:

$$\forall z \in \{0, 1\}^m \bigvee_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ acepta}$$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

Por lo tanto existen $y_1 \in \{0, 1\}^m, \dots, y_m \in \{0, 1\}^m$ tales que la siguiente condición es cierta:

$$\forall z \in \{0, 1\}^m \bigvee_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ acepta}$$

Concluimos que:

$$\exists y_1 \in \{0, 1\}^m \cdots \exists y_m \in \{0, 1\}^m \forall z \in \{0, 1\}^m (w, y_1, \dots, y_m, z) \in A$$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

¿Es necesario el uso de z para esta dirección de la demostración?

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

¿Es necesario el uso de z para esta dirección de la demostración?

Dado que $w \in L$ y $m > 0$ tenemos que:

$$\begin{aligned}\Pr_{y_1, \dots, y_m} \left(\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i) \text{ rechaza} \right) &= \prod_{i=1}^m \Pr_{y_i} \left(M(w, y_i) \text{ rechaza} \right) \\ &\leq \prod_{i=1}^m \frac{1}{3^m} = \\ &= \frac{1}{(3^m)^m} < 1\end{aligned}$$

La dirección ($\Rightarrow$) de la equivalencia

¿Es necesario el uso de z para esta dirección de la demostración?

Dado que $w \in L$ y $m > 0$ tenemos que:

$$\begin{aligned}\Pr_{y_1, \dots, y_m} \left(\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i) \text{ rechaza} \right) &= \prod_{i=1}^m \Pr_{y_i} \left(M(w, y_i) \text{ rechaza} \right) \\ &\leq \prod_{i=1}^m \frac{1}{3^m} = \\ &= \frac{1}{(3^m)^m} < 1\end{aligned}$$

Por lo que el uso de z no es estrictamente necesario para esta parte de la demostración.

► Pero sí es necesario para la otra dirección

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

Suponga que $w \notin L$ y $t_M(|w|) = m$

- Para demostrar la dirección ($\Leftarrow$) consideramos el contrapositivo

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

Suponga que $w \notin L$ y $t_M(|w|) = m$

- Para demostrar la dirección ($\Leftarrow$) consideramos el contrapositivo

Además, suponga que $y_1 \in \{0, 1\}^m, \dots, y_m \in \{0, 1\}^m$

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

Suponga que $w \notin L$ y $t_M(|w|) = m$

- Para demostrar la dirección ($\Leftarrow$) consideramos el contrapositivo

Además, suponga que $y_1 \in \{0, 1\}^m, \dots, y_m \in \{0, 1\}^m$

Dado que $w \notin L$ y $m > 0$ tenemos que:

$$\begin{aligned} \Pr_z \left(\bigvee_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ acepta} \right) &\leq \sum_{i=1}^m \Pr_z \left(M(w, y_i \oplus z) \text{ acepta} \right) \\ &\leq \sum_{i=1}^m \frac{1}{3^m} \\ &= \frac{m}{3^m} \\ &= \frac{1}{3} \end{aligned}$$

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

Se concluye que:

$$\begin{aligned}\Pr_z\left(\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza}\right) &= 1 - \Pr_z\left(\bigvee_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ acepta}\right) \\ &\geq 1 - \frac{1}{3} \\ &= \frac{2}{3}\end{aligned}$$

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

Se concluye que:

$$\begin{aligned}\Pr_z\left(\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ rechaza}\right) &= 1 - \Pr_z\left(\bigvee_{i=1}^m M(w, y_i \oplus z) \text{ acepta}\right) \\ &\geq 1 - \frac{1}{3} \\ &= \frac{2}{3}\end{aligned}$$

Por lo tanto tenemos que existe $z \in \{0, 1\}^m$ tal que $M(w, y_i \oplus z)$ rechaza para cada $i \in \{1, \dots, m\}$

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

Dado que $y_1, \dots, y_m$ son elementos arbitrarios en el conjunto $\{0, 1\}^m$, tenemos finalmente que:

$$\forall y_1 \in \{0, 1\}^m \cdots \forall y_m \in \{0, 1\}^m \exists z \in \{0, 1\}^m (w, y_1, \dots, y_m, z) \notin A$$

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

En esta dirección de la demostración si es necesario el uso de z

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

En esta dirección de la demostración si es necesario el uso de z

Si existe $y \in \{0, 1\}^m$ tal que $M(w, y)$ acepta, entonces existen $y_1 \in \{0, 1\}^m$, $\dots$, $y_m \in \{0, 1\}^m$ tales que la siguiente condición es **falsa**:

$$\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i) \text{ rechaza}$$

La dirección ($\Leftarrow$) de la equivalencia

En esta dirección de la demostración si es necesario el uso de z

Si existe $y \in \{0, 1\}^m$ tal que $M(w, y)$ acepta, entonces existen $y_1 \in \{0, 1\}^m$, $\dots$, $y_m \in \{0, 1\}^m$ tales que la siguiente condición es **falsa**:

$$\bigwedge_{i=1}^m M(w, y_i) \text{ rechaza}$$

Concluimos que la idea de la demostración no funciona sin la utilización de z para m elementos arbitrarios $y_1, \dots, y_m$ del conjunto $\{0, 1\}^m$ □

Las clases de complejidad probabilísticas en una figura

