

Algoritmos en teoría de números

IIC2283

Para recordar: aritmética modular

Dados dos números $a, b \in \mathbb{Z}$, si $b > 0$ entonces existen $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}$ tales que $0 \leq \beta < b$ y

$$a = \alpha \cdot b + \beta$$

Además, estos números α, β son únicos

β es llamado el resto de la división entera entre a y b , y es denotado como $a \bmod b$

- ▶ Por ejemplo, $8 \bmod 3 = 2$, $9 \bmod 3 = 0$ y $(-8) \bmod 3 = 1$

Para recordar: aritmética modular

Definición

$b \equiv c \pmod{n}$ si n divide a $(c - b)$

Usamos la notación $n|m$ para indicar que n divide a m

► $b \equiv c \pmod{n}$ si $n|(c - b)$

Para recordar: algunas propiedades básicas

Proposición

1. $a \equiv b \pmod{n}$ si y sólo si $a \bmod n = b \bmod n$
2. $a \equiv (a \bmod n) \pmod{n}$
3. Si $a \equiv b \pmod{n}$ y $c \equiv d \pmod{n}$, entonces:

$$\begin{aligned}(a + c) &\equiv (b + d) \pmod{n} \\ (a \cdot c) &\equiv (b \cdot d) \pmod{n}\end{aligned}$$

Para recordar: algunas propiedades básicas

Proposición

1. $a \equiv b \pmod{n}$ si y sólo si $a \bmod n = b \bmod n$
2. $a \equiv (a \bmod n) \pmod{n}$
3. Si $a \equiv b \pmod{n}$ y $c \equiv d \pmod{n}$, entonces:

$$\begin{aligned}(a + c) &\equiv (b + d) \pmod{n} \\ (a \cdot c) &\equiv (b \cdot d) \pmod{n}\end{aligned}$$

Ejercicios

1. Demuestre la proposición
2. Demuestre que un número n es divisible por 3 si y sólo si la suma de sus dígitos es divisible por 3

Algoritmos básicos en teoría de números

Vamos a estudiar tres algoritmos fundamentales en el área:

- ▶ Exponenciación rápida
- ▶ El algoritmo de Euclides para el cálculo del máximo común divisor
- ▶ El algoritmo de Euclides extendido y el cálculo del inverso modular

Exponenciación rápida: calculando $a^b \bmod n$

Utilizamos el siguiente algoritmo para calcular $a^b \bmod n$, el cual es llamado exponenciación rápida:

```
EXP( $a, b, n$ )  
  if  $b = 1$  then return  $a \bmod n$   
  else if  $b$  es par then  
     $val := \mathbf{EXP}(a, \frac{b}{2}, n)$   
    return  $(val \cdot val) \bmod n$   
  else  
     $val := \mathbf{EXP}(a, \frac{b-1}{2}, n)$   
    return  $(val \cdot val \cdot a) \bmod n$ 
```

La complejidad de **EXP**

Ejercicio

Considerando la multiplicación de enteros y el cálculo de la función $x \bmod y$ como las operaciones básicas a contar, demuestre que **EXP**(a, b, n) en el peor caso es $O(\log_2(b))$

Máximo común divisor

Sea $\text{MCD}(a, b)$ el máximo común divisor de los números a y b

- ¿Cómo podemos calcular $\text{MCD}(a, b)$?

Máximo común divisor

Sea $\text{MCD}(a, b)$ el máximo común divisor de los números a y b

- ¿Cómo podemos calcular $\text{MCD}(a, b)$?

Proposición

Si $b > 0$, entonces $\text{MCD}(a, b) = \text{MCD}(b, a \bmod b)$

Máximo común divisor

Sea $\text{MCD}(a, b)$ el máximo común divisor de los números a y b

- ¿Cómo podemos calcular $\text{MCD}(a, b)$?

Proposición

Si $b > 0$, entonces $\text{MCD}(a, b) = \text{MCD}(b, a \bmod b)$

Demostración: Vamos a demostrar que un número c divide a a y b si y sólo si c divide a b y $a \bmod b$

- De esto se concluye que $\text{MCD}(a, b) = \text{MCD}(b, a \bmod b)$

Máximo común divisor

Sabemos que $a = \alpha \cdot b + (a \bmod b)$

$(\Rightarrow)$ Suponga que $c|a$ y $c|b$.

Dado que $(a \bmod b) = a - \alpha \cdot b$, concluimos que $c|(a \bmod b)$.

$(\Leftarrow)$ Suponga que $c|b$ y $c|(a \bmod b)$.

Dado que $a = \alpha \cdot b + (a \bmod b)$, tenemos que $c|a$



Cálculo de máximo común divisor

De lo anterior, concluimos la siguiente identidad para $a > 0$:

$$\text{MCD}(a, b) = \begin{cases} a & b = 0 \\ \text{MCD}(b, a \bmod b) & b > 0 \end{cases}$$

Cálculo de máximo común divisor

De lo anterior, concluimos la siguiente identidad para $a > 0$:

$$\text{MCD}(a, b) = \begin{cases} a & b = 0 \\ \text{MCD}(b, a \bmod b) & b > 0 \end{cases}$$

Usamos esta identidad para generar un algoritmo para calcular el máximo común divisor, el cual es conocido como Algoritmo de Euclides:

MCD(a, b)

```
if  $a = 0$  and  $b = 0$  then return error  
else if  $a = 0$  then return  $b$   
else if  $b = 0$  then return  $a$   
else if  $a \geq b$  then return MCD( $b, a \bmod b$ )  
else return MCD( $a, b \bmod a$ )
```

Cálculo de máximo común divisor

De lo anterior, concluimos la siguiente identidad para $a > 0$:

$$\text{MCD}(a, b) = \begin{cases} a & b = 0 \\ \text{MCD}(b, a \bmod b) & b > 0 \end{cases}$$

Usamos esta identidad para generar un algoritmo para calcular el máximo común divisor, el cual es conocido como Algoritmo de Euclides:

MCD(a, b)

```
if  $a = 0$  and  $b = 0$  then return error  
else if  $a = 0$  then return  $b$   
else if  $b = 0$  then return  $a$   
else if  $a \geq b$  then return MCD( $b, a \bmod b$ )  
else return MCD( $a, b \bmod a$ )
```

¿Cuál es la complejidad del algoritmo?

La complejidad del algoritmo

Lema

Si $a \geq b$ y $b > 0$, entonces $(a \bmod b) < \frac{a}{2}$

La complejidad del algoritmo

Lema

Si $a \geq b$ y $b > 0$, entonces $(a \bmod b) < \frac{a}{2}$

Demostración: Si $b > \frac{a}{2}$:

$$a \bmod b = a - b < a - \frac{a}{2} = \frac{a}{2}$$

La complejidad del algoritmo

Si $b < \frac{a}{2}$, entonces:

$$a \bmod b < b < \frac{a}{2}$$

Si $b = \frac{a}{2}$ (a debe ser par):

$$a \bmod b = 0 < b = \frac{a}{2}$$



La complejidad del algoritmo

Ejercicio

Suponga que la operación básica para el algoritmo **MCD** es el cálculo de la función $x \bmod y$. Muestre entonces que el algoritmo en el peor caso es $O(\log_2(\max\{a, b\}))$, suponiendo que la entrada es (a, b)

- Vale decir, **MCD** es de orden lineal en el tamaño de la entrada en el peor caso

Una noción importante: inverso modular

Definición

b es inverso de a en módulo n si $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$

Una noción importante: inverso modular

Definición

b es inverso de a en módulo n si $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$

Ejemplo

37 es inverso de 13 en módulo 60

Una noción importante: inverso modular

Definición

b es inverso de a en módulo n si $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$

Ejemplo

37 es inverso de 13 en módulo 60

¿Todo número tiene inverso modular?

Una noción importante: inverso modular

Definición

b es inverso de a en módulo n si $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$

Ejemplo

37 es inverso de 13 en módulo 60

¿Todo número tiene inverso modular?

- ▶ No, 2 no tiene inverso en módulo 4

Una noción importante: inverso modular

Definición

b es inverso de a en módulo n si $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$

Ejemplo

37 es inverso de 13 en módulo 60

¿Todo número tiene inverso modular?

- ▶ No, 2 no tiene inverso en módulo 4

¿Bajo qué condiciones a tiene inverso en módulo n ?

Una identidad útil

Identidad de Bézout

Para cada $a, b \in \mathbb{N}$ tales que $a \neq 0$ o $b \neq 0$, existen $s, t \in \mathbb{Z}$ tales que:

$$\text{MCD}(a, b) = s \cdot a + t \cdot b$$

Una identidad útil

Identidad de Bézout

Para cada $a, b \in \mathbb{N}$ tales que $a \neq 0$ o $b \neq 0$, existen $s, t \in \mathbb{Z}$ tales que:

$$\text{MCD}(a, b) = s \cdot a + t \cdot b$$

Demostración: Sea

$$D = \{n \in \mathbb{N} \mid n > 0 \text{ y existen } s, t \in \mathbb{Z} \text{ tal que } n = s \cdot a + t \cdot b\}$$

Dado que $a \neq 0$ o $b \neq 0$, se tiene que $D \neq \emptyset$ y, por lo tanto, D tiene un menor elemento

► Sea d este elemento, y suponga que $d = s_0 \cdot a + t_0 \cdot b$

Una identidad útil

Existen $\alpha, \beta \in \mathbb{N}$ tales que $0 \leq \beta < d$ y $a = \alpha \cdot d + \beta$

Una identidad útil

Existen $\alpha, \beta \in \mathbb{N}$ tales que $0 \leq \beta < d$ y $a = \alpha \cdot d + \beta$

Como $d = s_0 \cdot a + t_0 \cdot b$, tenemos que $\alpha \cdot d = \alpha \cdot s_0 \cdot a + \alpha \cdot t_0 \cdot b$

► Concluimos que $a - \beta = \alpha \cdot s_0 \cdot a + \alpha \cdot t_0 \cdot b$

Una identidad útil

Existen $\alpha, \beta \in \mathbb{N}$ tales que $0 \leq \beta < d$ y $a = \alpha \cdot d + \beta$

Como $d = s_0 \cdot a + t_0 \cdot b$, tenemos que $\alpha \cdot d = \alpha \cdot s_0 \cdot a + \alpha \cdot t_0 \cdot b$

► Concluimos que $a - \beta = \alpha \cdot s_0 \cdot a + \alpha \cdot t_0 \cdot b$

Entonces tenemos que $\beta = (1 - \alpha \cdot s_0) \cdot a + (-\alpha \cdot t_0) \cdot b$

Una identidad útil

Existen $\alpha, \beta \in \mathbb{N}$ tales que $0 \leq \beta < d$ y $a = \alpha \cdot d + \beta$

Como $d = s_0 \cdot a + t_0 \cdot b$, tenemos que $\alpha \cdot d = \alpha \cdot s_0 \cdot a + \alpha \cdot t_0 \cdot b$

► Concluimos que $a - \beta = \alpha \cdot s_0 \cdot a + \alpha \cdot t_0 \cdot b$

Entonces tenemos que $\beta = (1 - \alpha \cdot s_0) \cdot a + (-\alpha \cdot t_0) \cdot b$

Dado que $0 \leq \beta < d$ y d es el menor elemento en D , concluimos que $\beta = 0$

► Por lo tanto $d|a$

Una identidad útil

De la misma forma concluimos que $d|b$

Una identidad útil

De la misma forma concluimos que $d|b$

Sea $c \in \mathbb{N}$ tal que $c|a$ y $c|b$

Una identidad útil

De la misma forma concluimos que $d|b$

Sea $c \in \mathbb{N}$ tal que $c|a$ y $c|b$

Se tiene entonces que $c|(s_0 \cdot a + t_0 \cdot b)$

- Por lo tanto $c|d$, lo cual implica que $c \leq d$

Una identidad útil

De la misma forma concluimos que $d|b$

Sea $c \in \mathbb{N}$ tal que $c|a$ y $c|b$

Se tiene entonces que $c|(s_0 \cdot a + t_0 \cdot b)$

► Por lo tanto $c|d$, lo cual implica que $c \leq d$

Concluimos que $d|a$, $d|b$ y para todo c tal que $c|a$ y $c|b$, se tiene que $c \leq d$

► Por lo tanto $d = \text{MCD}(a, b)$



Existencia de inverso modular y la Identidad de Bézout

Teorema

a tiene inverso en módulo n si y sólo si $MCD(a, n) = 1$

Existencia de inverso modular y la Identidad de Bézout

Teorema

a tiene inverso en módulo n si y sólo si $\text{MCD}(a, n) = 1$

Demostración: ($\Rightarrow$) Suponga que b es inverso de a en módulo n

► Entonces: $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$

Se deduce que $a \cdot b = \alpha \cdot n + 1$, por lo que $1 = a \cdot b - \alpha \cdot n$

Concluimos que si $c|a$ y $c|n$, entonces $c|1$

► Por lo tanto c debe ser igual a 1, de lo que concluimos que $\text{MCD}(a, n) = 1$

Existencia de inverso modular y la Identidad de Bézout

($\Leftarrow$) Suponga que $\text{MCD}(a, n) = 1$

Por la identidad de Bézout existen $s, t \in \mathbb{Z}$ tales que:

$$1 = s \cdot n + t \cdot a$$

Por lo tanto: $a \cdot t \equiv 1 \pmod{n}$

► Concluimos que a tiene inverso en módulo n



¿Cómo podemos calcular el inverso modular?

Sabemos que **MCD** es un algoritmo eficiente para calcular el máximo común divisor entre dos números.

¿Cómo podemos calcular el inverso modular?

Sabemos que **MCD** es un algoritmo eficiente para calcular el máximo común divisor entre dos números.

¡Pero este algoritmo puede hacer más!

- ▶ Puede ser extendido para calcular s y t tales que
$$\text{MCD}(a, b) = s \cdot a + t \cdot b$$

¿Cómo podemos calcular el inverso modular?

Sabemos que **MCD** es un algoritmo eficiente para calcular el máximo común divisor entre dos números.

¡Pero este algoritmo puede hacer más!

- ▶ Puede ser extendido para calcular s y t tales que
$$\text{MCD}(a, b) = s \cdot a + t \cdot b$$

Vamos a usar este algoritmo para calcular *inversos modulares*

El Algoritmo Extendido de Euclides

Suponga que $a \geq b$, y defina la siguiente sucesión:

$$\begin{aligned}r_0 &= a \\r_1 &= b \\r_{i+1} &= r_{i-1} \bmod r_i \quad (i \geq 2)\end{aligned}$$

Calculamos esta sucesión hasta un número k tal que $r_k = 0$

► Tenemos que $\text{MCD}(a, b) = r_{k-1}$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Al mismo tiempo calculamos sucesiones s_i, t_i tales que:

$$r_i = s_i \cdot a + t_i \cdot b$$

Tenemos que: $\text{MCD}(a, b) = r_{k-1} = s_{k-1} \cdot a + t_{k-1} \cdot b$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Al mismo tiempo calculamos sucesiones s_i, t_i tales que:

$$r_i = s_i \cdot a + t_i \cdot b$$

Tenemos que: $\text{MCD}(a, b) = r_{k-1} = s_{k-1} \cdot a + t_{k-1} \cdot b$

Sean:

$$\begin{array}{ll} s_0 = 1 & t_0 = 0 \\ s_1 = 0 & t_1 = 1 \end{array}$$

Se tiene que:

$$\begin{array}{ll} r_0 &= s_0 \cdot a + t_0 \cdot b \\ r_1 &= s_1 \cdot a + t_1 \cdot b \end{array}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Dado que $r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i-1} \bmod r_i$, tenemos que:

$$r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Dado que $r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1} \bmod r_i$, tenemos que:

$$r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1}$$

Por lo tanto:

$$s_{i-1} \cdot a + t_{i-1} \cdot b = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot (s_i \cdot a + t_i \cdot b) + r_{i+1}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Dado que $r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1} \bmod r_i$, tenemos que:

$$r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1}$$

Por lo tanto:

$$s_{i-1} \cdot a + t_{i-1} \cdot b = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot (s_i \cdot a + t_i \cdot b) + r_{i+1}$$

Concluimos que:

$$r_{i+1} = (s_{i-1} - \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot s_i) \cdot a + (t_{i-1} - \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot t_i) \cdot b$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Dado que $r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1} \bmod r_i$, tenemos que:

$$r_{i-1} = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot r_i + r_{i+1}$$

Por lo tanto:

$$s_{i-1} \cdot a + t_{i-1} \cdot b = \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot (s_i \cdot a + t_i \cdot b) + r_{i+1}$$

Concluimos que:

$$r_{i+1} = (s_{i-1} - \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot s_i) \cdot a + (t_{i-1} - \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot t_i) \cdot b$$

Definimos entonces:

$$s_{i+1} = s_{i-1} - \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot s_i$$

$$t_{i+1} = t_{i-1} - \lfloor \frac{r_{i-1}}{r_i} \rfloor \cdot t_i$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Ejemplo

Vamos a usar el algoritmo para $a = 60$ y $b = 13$

Inicialmente:

$$\begin{array}{lll} r_0 = 60 & s_0 = 1 & t_0 = 0 \\ r_1 = 13 & s_1 = 0 & t_1 = 1 \end{array}$$

Entonces tenemos que:

$$\begin{aligned} r_2 &= r_0 \bmod r_1 \\ s_2 &= s_0 - \left\lfloor \frac{r_0}{r_1} \right\rfloor \cdot s_1 \\ t_2 &= t_0 - \left\lfloor \frac{r_0}{r_1} \right\rfloor \cdot t_1 \end{aligned}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \qquad s_2 = 1 \qquad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \quad s_2 = 1 \quad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

$$r_3 = 5 \quad s_3 = -1 \quad t_3 = 5$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \qquad s_2 = 1 \qquad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

$$\begin{array}{lll} r_3 = 5 & s_3 = -1 & t_3 = 5 \\ r_4 = 3 & s_4 = 2 & t_4 = -9 \end{array}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \qquad s_2 = 1 \qquad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

$$\begin{array}{lll} r_3 = 5 & s_3 = -1 & t_3 = 5 \\ r_4 = 3 & s_4 = 2 & t_4 = -9 \\ r_5 = 2 & s_5 = -3 & t_5 = 14 \end{array}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \quad s_2 = 1 \quad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

$$\begin{array}{lll} r_3 = 5 & s_3 = -1 & t_3 = 5 \\ r_4 = 3 & s_4 = 2 & t_4 = -9 \\ r_5 = 2 & s_5 = -3 & t_5 = 14 \\ r_6 = 1 & s_6 = 5 & t_6 = -23 \end{array}$$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \quad s_2 = 1 \quad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

$r_3 = 5$	$s_3 = -1$	$t_3 = 5$
$r_4 = 3$	$s_4 = 2$	$t_4 = -9$
$r_5 = 2$	$s_5 = -3$	$t_5 = 14$
$r_6 = 1$	$s_6 = 5$	$t_6 = -23$
$r_7 = 0$	$s_7 = -13$	$t_7 = 60$

El Algoritmo Extendido de Euclides

Example (Continuación)

Por lo tanto:

$$r_2 = 8 \quad s_2 = 1 \quad t_2 = -4$$

Y el proceso continua:

$r_3 = 5$	$s_3 = -1$	$t_3 = 5$
$r_4 = 3$	$s_4 = 2$	$t_4 = -9$
$r_5 = 2$	$s_5 = -3$	$t_5 = 14$
$r_6 = 1$	$s_6 = 5$	$t_6 = -23$
$r_7 = 0$	$s_7 = -13$	$t_7 = 60$

Tenemos que: $1 = 5 \cdot 60 + (-23) \cdot 13$

El Algoritmo Extendido de Euclides y el inverso modular

Dados dos números naturales a y n , con $n \geq 2$, si el inverso de a en módulo n existe el siguiente algoritmo lo retorna, y en caso contrario indica que no existe.

```
Inverso( $a, n$ )  
  if  $\text{MCD}(a, n) > 1$  then no_existe_inverso  
  else  
     $s_0 := 1$   
     $t_0 := 0$   
     $s_1 := 0$   
     $t_1 := 1$   
     $r_0 := n$   
     $r_1 := a$ 
```

El Algoritmo Extendido de Euclides y el inverso modular

```
while  $r_1 > 1$  do  
     $aux\_s := s_0 - \lfloor \frac{r_0}{r_1} \rfloor \cdot s_1$   
     $s_0 := s_1$   
     $s_1 := aux\_s$   
     $aux\_t := t_0 - \lfloor \frac{r_0}{r_1} \rfloor \cdot t_1$   
     $t_0 := t_1$   
     $t_1 := aux\_t$   
     $r_0 := r_1$   
     $r_1 := s_1 \cdot n + t_1 \cdot a$   
return  $t_1$ 
```