

Relaciones de equivalencia

Clase 11

IIC 1253

Prof. Diego Bustamante

Outline

Obertura

Relaciones de equivalencia

Conjunto cociente

Epílogo

Segundo Acto: Relaciones

Conjuntos, relaciones y funciones



Objetivos de la clase

- Comprender concepto de relación de equivalencia.
- Comprender concepto de clase de equivalencia y conjunto cociente.
- Demostrar propiedades de las clases de equivalencia.

Outline

Obertura

Relaciones de equivalencia

Conjunto cociente

Epílogo

Relaciones de equivalencia

Las propiedades de las relaciones se pueden usar para definir tipos de relaciones. Un tipo muy importante es el siguiente:

Definición

Una relación R sobre A es una **relación de equivalencia** si es refleja, simétrica y transitiva.

Ejercicio

Demuestre que \equiv_n es una relación de equivalencia.

Relaciones de equivalencia

Ejercicio

Demuestre que la relación \equiv_n es refleja, simétrica y transitiva.

Relaciones de equivalencia

Demostración

Reflexividad: Debemos demostrar que para todo $x \in \mathbb{N}$, $x \equiv_n x$. Por definición, debemos mostrar que existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $|x - x| = k \cdot n$. Como $x - x = 0$ para todo natural, podemos tomar $k = 0$ y luego se cumple la igualdad anterior, con lo que mostramos que $x \equiv_n x$.

Simetría: Debemos demostrar que si $x \equiv_n y$, entonces $y \equiv_n x$. Por definición, sabemos que existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $|x - y| = k \cdot n$. Como $|x - y| = |y - x|$, tenemos que $|y - x| = k \cdot n$, y luego por definición de equivalencia módulo n , se cumple que $y \equiv_n x$.

Relaciones de equivalencia

Demostración

Transitividad: Dados x, y, z tales que $x \equiv_n y$ e $y \equiv_n z$, debemos demostrar que $x \equiv_n z$. Usando la definición, esto es equivalente a demostrar que si $|x - y| = k_1 \cdot n$ y $|y - z| = k_2 \cdot n$, entonces $|x - z| = k \cdot n$ para algún $k \in \mathbb{N}$.

Asumiremos que $x \neq y \neq z$ (el resultado es trivial de otra manera).

Supongamos ahora que $x - y > 0$ e $y - z > 0$ (los demás casos son análogos).

Entonces, podemos escribir

$$x - y = k_1 \cdot n$$

$$y - z = k_2 \cdot n$$

y sumando ambas igualdades, obtenemos que $x - z = k_1 \cdot n + k_2 \cdot n$. Notemos que $x - z > 0$ también. Por lo tanto, si tomamos $k = k_1 + k_2$, tenemos que $|x - z| = k \cdot n$, concluyendo entonces que $x \equiv_n z$. □

Relaciones de equivalencia

Ejercicio

Demuestre que la relación *equivalencia lógica* sobre $L(P)^2$:

$$\varphi \equiv \psi \text{ si y sólo si } \forall \sigma, \sigma(\varphi) = \sigma(\psi)$$

es una relación de equivalencia.

Demostración: Debemos demostrar que la equivalencia lógica es refleja, simétrica y transitiva.

Reflexividad: Debemos demostrar que para toda fórmula $\varphi \in L(P)$, se cumple que $\varphi \equiv \varphi$. Si tomamos cualquier valuación σ , se cumple que $\sigma(\varphi) = \sigma(\varphi)$, y luego por definición obtenemos que $\varphi \equiv \varphi$.

Relaciones de equivalencia

Simetría: Debemos demostrar que si $\varphi \equiv \psi$, entonces $\psi \equiv \varphi$. Por definición, si $\varphi \equiv \psi$ tenemos que para toda valuación σ , se cumple que $\sigma(\varphi) = \sigma(\psi)$. Como la igualdad de los naturales es conmutativa¹, tenemos que $\sigma(\psi) = \sigma(\varphi)$, y luego por definición $\psi \equiv \varphi$.

Transitividad: Debemos demostrar que si $\varphi \equiv \psi$ y $\psi \equiv \theta$, entonces $\varphi \equiv \theta$. Por definición, tenemos que para todo σ se cumple que $\sigma(\varphi) = \sigma(\psi)$ y $\sigma(\psi) = \sigma(\theta)$. Aplicando la segunda igualdad en la primera, obtenemos que $\sigma(\varphi) = \sigma(\theta)$, y luego por definición concluimos que $\varphi \equiv \theta$. □

¹Demuestre esto desde la definición de teoría de conjuntos.

Relaciones de equivalencia

Definición

Sea \sim una relación de equivalencia sobre un conjunto A y un elemento $x \in A$. La **clase de equivalencia** de x bajo \sim es el conjunto:

$$[x]_{\sim} = \{y \in A \mid x \sim y\}$$

Si la relación se entiende del contexto, sólo escribiremos $[x]$.

Ejercicio

Estudie las clases de equivalencia de la relación de equivalencia lógica. ¿Qué representan? ¿Cuántas hay?

Relaciones de equivalencia

Ejercicio

Estudie las clases de equivalencia de la relación de equivalencia lógica. ¿Qué representan? ¿Cuántas hay?

R: Cada clase de equivalencia contendrá a todas las fórmulas que son lógicamente equivalentes entre sí. Las fórmulas que son lógicamente equivalentes tienen la misma tabla de verdad, por lo que podemos pensar que cada clase de equivalencia representa a una posible tabla de verdad. Por lo tanto, si tenemos un conjunto P de variables proposicionales de tamaño n , la cantidad de clases de equivalencia bajo la relación de equivalencia lógica es 2^{2^n} .

Relaciones de equivalencia

Teorema

Sea \sim una relación de equivalencia sobre un conjunto A .

1. $\forall x \in A, x \in [x]$.
2. $x \sim y$ si y sólo si $[x] = [y]$.
3. Si $[x] \neq [y]$ entonces $[x] \cap [y] = \emptyset$.

Ejercicio

Demuestre el teorema.

Relaciones de equivalencia

Teorema

1. $\forall x \in A, x \in [x]$.

Demostración: Como \sim es una relación de equivalencia, es refleja. Por lo tanto, $\forall x \in A, x \sim x$. Luego, por definición de una clase de equivalencia, tenemos que $\forall x \in A, x \in [x]$.

Teorema

2. $x \sim y$ si y sólo si $[x] = [y]$.

(\Rightarrow) : Suponiendo que $x \sim y$, debemos demostrar que $[x] = [y]$. Esto significa que debemos demostrar que $[x] \subseteq [y]$ y $[y] \subseteq [x]$:

- a Por demostrar que $[y] \subseteq [x]$. Por definición, $[y] = \{z \mid y \sim z\}$. Por otro lado, sabemos que $x \sim y$ y que \sim es transitiva (por ser de equivalencia), por lo tanto $\forall z \in [y], x \sim z$. Finalmente, por definición de clases de equivalencia, tenemos que $\forall z \in [y], z \in [x]$.

Relaciones de equivalencia

Teorema

2. $x \sim y$ si y sólo si $[x] = [y]$.

b Por demostrar que $[x] \subseteq [y]$. Por definición, $[x] = \{z \mid x \sim z\}$. Por otro lado, sabemos que $x \sim y$ y que \sim es simétrica (por ser de equivalencia), entonces $y \sim x$. También es cierto que \sim es transitiva, por lo tanto $\forall z \in [x], y \sim z$. Finalmente, por definición de clases de equivalencia, tenemos que $\forall z \in [x], z \in [y]$.

(\Leftarrow) : Suponiendo que $[x] = [y]$, debemos demostrar que $x \sim y$. Sea $z \in [x]$. Por definición de clases de equivalencia: $x \sim z$ (1). Como $[x] = [y]$, sabemos que $z \in [y]$, y por lo tanto $y \sim z$, y por simetría $z \sim y$ (2). Finalmente, por transitividad entre (1) y (2), concluimos que $x \sim y$.

Relaciones de equivalencia

Teorema

3. Si $[x] \neq [y]$ entonces $[x] \cap [y] = \emptyset$.

Por contrapositivo, supongamos que $[x] \cap [y] \neq \emptyset$. Como la intersección de ambas clases de equivalencia no es vacía, existe z tal que $z \in [x]$ y $z \in [y]$. Aplicando la definición de clase de equivalencia, tenemos que $x \sim z$ (1) e $y \sim z$, y por simetría se cumple que $z \sim y$ (2). Por transitividad entre (1) y (2) se tiene que $x \sim y$, y por la parte 2 del teorema se cumple que $[x] = [y]$. Por lo tanto, queda demostrado el resultado.

Outline

Obertura

Relaciones de equivalencia

Conjunto cociente

Epílogo

Relaciones de equivalencia

Definición

Sea \sim una relación de equivalencia sobre un conjunto A . El **conjunto cociente** de A con respecto a \sim es el conjunto de todas las clases de equivalencia de \sim :

$$A/\sim = \{[x] \mid x \in A\}$$

Ejemplo

Determinemos \mathbb{Z}/\equiv_4 , un dominio infinito con finitas clases. Estas son:

$$[0]_{\equiv_4} = \{b \mid \exists k. 4 \cdot k = b - 0\} = \{0, 4, 8, 12, \dots, -4, -8, -12, \dots\}$$

$$[1]_{\equiv_4} = \{b \mid \exists k. 4 \cdot k = b - 1\} = \{1, 5, 9, 13, \dots, -3, -7, -11, \dots\}$$

$$[2]_{\equiv_4} = \{b \mid \exists k. 4 \cdot k = b - 2\} = \{2, 6, 10, 14, \dots, -2, -6, -10, \dots\}$$

$$[3]_{\equiv_4} = \{b \mid \exists k. 4 \cdot k = b - 3\} = \{3, 7, 11, 15, \dots, -1, -5, -9, \dots\}$$

Relaciones de equivalencia

Ejemplo

Podemos visualizar \mathbb{Z}/\equiv_4 de la siguiente forma



$$\mathbb{Z}/\equiv_4 = \{[0], [1], [2], [3]\}$$

Relaciones de equivalencia

Definición

El **índice** de una relación de equivalencia es la cantidad de clases de equivalencia que induce. Es decir, la cantidad de elementos de su conjunto cociente.

Ejercicio

¿Cuál es el índice de \equiv_4 ?

Como $\mathbb{Z}/\equiv_4 = \{[0], [1], [2], [3]\}$, el índice de \equiv_4 es 4.

Relaciones de equivalencia

Definición

Sea A un conjunto cualquiera y \mathcal{S} una colección de subconjuntos de A ($\mathcal{S} \subseteq \mathcal{P}(A)$). Diremos que \mathcal{S} es una **partición** de A si cumple que:

1. $\forall X \in \mathcal{S}, X \neq \emptyset$
2. $\bigcup \mathcal{S} = A$
3. $\forall X, Y \in \mathcal{S}$, si $X \neq Y$ entonces $X \cap Y = \emptyset$.

Ejercicio

Dé ejemplos de particiones de \mathbb{N} .

Relaciones de equivalencia

Teorema

Si \sim es una relación de equivalencia sobre un conjunto A , entonces A/\sim es una partición de A .

Ejercicio

Demuestre el teorema.

Demostración: Debemos demostrar que $A/\sim = \{[x] \mid x \in A\}$ es una partición de A . Para esto demostraremos las tres propiedades que debe cumplir según la definición de partición:

1. $\forall X \in A/\sim, X \neq \emptyset$: por teorema anterior, sabemos que $\forall x \in A, x \in [x]$. Como todos los elementos de A/\sim son clases de equivalencia, es claro que todos son no vacíos.

Relaciones de equivalencia

Teorema

Si \sim es una relación de equivalencia sobre un conjunto A , entonces A/\sim es una partición de A .

2. $\bigcup A/\sim = A$: demostramos subconjunto hacia ambos lados.
 - $\bigcup A/\sim \subseteq A$: dado un elemento $x \in \bigcup A/\sim$, por definición de unión generalizada y de conjunto cociente, tenemos que $x \in [y]$ para algún $y \in A$. Por definición $[y] = \{z \in A \mid y \sim z\}$, por lo que $x \in A$.
 - $A \subseteq \bigcup A/\sim$: dado un elemento $x \in A$, por teorema anterior sabemos que $x \in [x]$. Dado que $[x]$ es una clase de equivalencia, tenemos que $[x] \in A/\sim$, y por lo tanto $x \in \bigcup A/\sim$.
3. $\forall X, Y \in A/\sim$, si $X \neq Y$ entonces $X \cap Y = \emptyset$: Todos los conjuntos en A/\sim son clases de equivalencia, y por teorema anterior esta propiedad se cumple.

Relaciones de equivalencia

Algo muy interesante es que lo inverso también se cumple:

Teorema

Si \mathcal{S} es una partición cualquiera de un conjunto A , entonces la relación

$$x \sim y \Leftrightarrow \exists X \in \mathcal{S} \text{ tal que } x \in X \wedge y \in X$$

es una relación de equivalencia sobre A .

Un elemento x estará relacionado con y si ambos pertenecen al mismo conjunto de la partición.

Ejercicio (Propuesto ★)

Demuestre el teorema.

Relaciones de equivalencia

Reflexividad: Dado $x \in A$, sabemos que $x \in X$ para algún $X \in \mathcal{S}$, pues \mathcal{S} es una partición de A . Luego, $\{x\} \subseteq X$, y por axioma de extensión $\{x, x\} \subseteq X$. Aplicando la definición de la relación \sim , concluimos que $x \sim x$ y por lo tanto la relación es refleja.

Simetría: Dados $x, y \in A$ tales que $x \sim y$, por definición de \sim sabemos que existe $X \in \mathcal{S}$ tal que $\{x, y\} \subseteq X$. Por axioma de extensión, se cumple que $\{y, x\} \subseteq X$, y por definición de \sim concluimos que $y \sim x$. Por lo tanto, la relación es simétrica.

Transitividad: Dados $x, y, z \in A$ tales que $x \sim y$ e $y \sim z$, por definición de \sim sabemos que existen $X_1, X_2 \in \mathcal{S}$ tales que $\{x, y\} \subseteq X_1$ y $\{y, z\} \subseteq X_2$. Si fueran distintos conjuntos, $X_1 \cap X_2 \neq \emptyset$ porque \mathcal{S} es una partición de A . Como y está en ambos, necesariamente $X_1 = X_2$. Luego, se cumple que $\{x, y, z\} \subseteq X_2$. Finalmente, aplicando la definición de \sim , tenemos que $x \sim z$, con lo que concluimos que la relación es transitiva.

Outline

Obertura

Relaciones de equivalencia

Conjunto cociente

Epílogo

Objetivos de la clase

- Comprender concepto de relación de equivalencia.
- Comprender concepto de clase de equivalencia y conjunto cociente.
- Demostrar propiedades de las clases de equivalencia.