

Axióma výberu

25. novembra 2010

Axióma výberu

Axióma VIII (Axióma výberu)

$$(\forall \mathcal{S}) [(\forall A \in \mathcal{S})(A \neq \emptyset) \wedge (\forall A \in \mathcal{S})(\forall B \in \mathcal{S})(A \neq B \Rightarrow A \cap B = \emptyset) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\exists V)(\forall A \in \mathcal{S})(\exists x)(V \cap A = \{x\})]$$

Pre každý systém neprázdnych po dvoch disjunktných množín existuje výberová množina, t.j. taká množina, ktorá má s každou z množín tohoto systému jednoprvkový prienik.

Reformulácie AC

Definícia

Nech \mathcal{S} je množina. Zobrazenie $f: \mathcal{S} \rightarrow \bigcup \mathcal{S}$ sa nazýva *selektor* alebo tiež *výberová funkcia* na množine \mathcal{S} , ak platí

$$(\forall x \in \mathcal{S}) f(x) \in x.$$

Tvrdenie (ZF)

Nasledujúce podmienky sú ekvivalentné (ako tvrdenia ZF):

- (i) *axióma výberu;*
- (ii) *pre každý systém neprázdnych po dvoch disjunktných množín existuje selektor;*

Reformulácie AC

- (iii) pre každý systém neprázdnych množín existuje selektor;
- (iv) karteziánsky súčin ľubovoľného systému neprázdnych množín je neprázdny, t.j.

$$(\forall i \in I) X_i \neq \emptyset \quad \Rightarrow \quad \prod_{i \in I} X_i \neq \emptyset;$$

- (v) ak R je relácia medzi množinami A a B taká, že pre každé $a \in A$ existuje $b \in B$ s vlastnosťou aRb , tak existuje funkcia $f: A \rightarrow B$ taká, že $f \subseteq R$;
- (vi) ak $f: A \rightarrow B$ je surjekcia, tak existuje $g: B \rightarrow A$ také, že $f \circ g = id_B$.

Ekvivalentné formy AC

Definícia

Podmnožinu čiastočne usporiadanej množiny (P, \leq) , ktorá je usporiadaním \leq lineárne usporiadaná, budeme nazývať *reťazec* v P .

Lema

*Nech A je množina a $\mathcal{C} \neq \emptyset$ je systém čiastočných usporiadaní na množine A taký, že pre ľubovoľné $C, D \in \mathcal{C}$ platí $C \subseteq D$ alebo $D \subseteq C$. (Inak povedané, \mathcal{C} je reťazec v množine všetkých relácií čiastočného usporiadania na A čiastočne usporiadanej reláciou \subseteq .)
Potom $R := \bigcup \mathcal{C}$ je tiež čiastočné usporiadanie na A .
Navyše, ak všetky čiastočné usporiadania v \mathcal{C} sú lineárne, tak aj R je lineárne usporiadanie.*

Ekvivalentné formy AC

Veta (ZF)

Nasledujúce podmienky sú (ako tvrdenia systému ZF) ekvivalentné s axiómou výberu:

(WO) *Na každej množine existuje dobré usporiadanie.*

(PM) *Pre každý reťazec v čiastočne usporiadanej množine (P, \leq) existuje maximálny reťazec, ktorý ho obsahuje.*

(ZL) *Ak každý reťazec v čiastočne usporiadanej množine (P, \leq) má horné ohraničenie, tak (P, \leq) má maximálny prvok.*

WO = princíp dobrého usporiadania

PM = (Hausdorffov) princíp maximality

ZL = Zornova lema

Cauchyho a Heineho definícia spojitosti

Definícia (Cauchyho definícia spojitosti)

Funkcia $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ je *spojitá* v bode $a \in \mathbb{R}$, ak

$$(\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0)(\forall x \in \mathbb{R})(|x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(a)| < \varepsilon).$$

Definícia (Heineho definícia spojitosti)

Funkcia $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ je *sekvenciálne spojitá* v bode $a \in \mathbb{R}$, ak platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(a).$$

Tvrdenie

Nech $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ je ľubovoľná funkcia a $a \in \mathbb{R}$. Funkcia f je spojitá v bode a práve vtedy, keď je sekvenciálne spojitá v bode a .

Cauchyho a Heineho definícia spojitosti

- ▶ Ak by sme sa zaoberali spojitosťou funkcie $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ na celom \mathbb{R} , tak ekvivalencia Cauchyho a Heineho definície platí už v ZF.
- ▶ Z platnosti ekvivalencie týchto dvoch definícií spojitosti pre reálne funkcie v bode už vyplýva platnosť axiómy výberu pre spočítateľné systémy podmnožín \mathbb{R} .

Hamelova báza

Definícia

Nech V je vektorový priestor nad poľom F .

Podmnožinu $A \subseteq V$ nazývame *lineárne nezávislou* podmnožinou, ak pre ľubovoľné $n \in \mathbb{N}$, $c_1, \dots, c_n \in F$ a $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n \in A$ platí

$$c_1 \vec{\alpha}_1 + \dots + c_n \vec{\alpha}_n = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad c_1 = \dots = c_n = 0.$$

Hovoríme, že podmnožina $A \subseteq V$ *generuje* priestor V , ak každý vektor z A sa je lineárna kombinácia (konečného počtu) vektorov z A . Označujeme $[A] = V$.

$(\forall \vec{\alpha} \in V) (\exists n \in \mathbb{N}) (\exists c_1, \dots, c_n \in F)$ a $(\exists \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n \in A)$

$$\vec{\alpha} = c_1 \vec{\alpha}_1 + \dots + c_n \vec{\alpha}_n.$$

Hamelova báza

Definícia

Podmnožina A sa nazýva *Hamelova báza* priestoru V , ak je lineárne nezávislá a $[A] = V$.

Veta

Nech V je vektorový priestor nad poľom F a A je lineárne nezávislá podmnožina V . Potom existuje Hamelova báza B taká, že $A \subseteq B$.

Tvrdenie

Nech V je vektorový priestor nad poľom F . Nech $B_{1,2}$ sú Hamelove bázy priestoru V . Potom $|B_1| = |B_2|$.

Cauchyho funkcionálna rovnica

$$(\forall x, y \in \mathbb{R})f(x + y) = f(x) + f(y), \quad (1)$$

Lema

Ak f je riešenie funkcionálnej rovnice (1), tak

$$(\forall r \in \mathbb{Q})(\forall x \in \mathbb{R})f(rx) = rf(x) \quad (2)$$

Tvrdenie

Ak f je spojité riešenie funkcionálnej rovnice (1), tak $f(x) = ax$ pre nejaké $a \in \mathbb{R}$.

Cauchyho funkcionálna rovnica

Tvrdenie

Ak f je riešenie funkcionálnej rovnice (1) a f je spojitý v nejakom bode $x_0 \in \mathbb{R}$, tak f je spojitý na celom \mathbb{R} , a teda f má tvar $f(x) = ax$ pre nejaké $a \in \mathbb{R}$.

Tvrdenie

Ak funkcia $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ vyhovuje rovnici (1) a je ohraničená na nejakom netriviálnom intervale I , tak $f(x) = ax$ pre nejaké $a \in \mathbb{R}$.

Tvrdenie

Ak f je monotónne riešenie funkcionálnej rovnice (1), tak $f(x) = ax$ pre nejaké $a \in \mathbb{R}$.

Cauchyho funkcionálna rovnica

S využitím Hamelovej bázy vieme dokázať i existenciu riešení, ktoré nie sú lineárne.

Veta (AC)

Existujú nelineárne riešenia rovnice (1) (t.j. riešenia, ktoré nie sú tvaru $f(x) = ax$).

Linearizácia čiastočne usporiadanej množiny

Tvrdenie

Pre každú čiastočne usporiadanú množinu (A, \leq) existuje linearizácia (A, \preceq) , t.j. také lineárne usporiadanie na množine A , že pre ľubovoľné $a, b \in A$ platí

$$a \leq b \quad \Rightarrow \quad a \preceq b.$$

(Inak povedané, relácia \preceq obsahuje reláciu \leq ; t.j. $\leq \subseteq \preceq$.)

Definícia miery

Definícia

Množina $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{P}(X)$ sa nazýva σ -algebra na množine X , ak platí

- (i) $X \in \mathcal{S}$;
- (ii) $A \in \mathcal{S} \Rightarrow X \setminus A \in \mathcal{S}$; (množina \mathcal{S} je uzavretá vzhľadom na vytváranie doplnkov)
- (iii) $A_n \in \mathcal{S}$ pre $n \in \mathbb{N} \Rightarrow \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{S}$; (množina \mathcal{S} je uzavretá vzhľadom na spočítateľné zjednotenia).

Definícia miery

Definícia

Ak \mathcal{S} je nejaká σ -algebra na X , tak funkcia $m: \mathcal{S} \rightarrow \langle 0, \infty \rangle$ z \mathcal{S} ak platí

$$m\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} m(A_n)$$

pre každý spočítateľný systém $\{A_n; n \in \mathbb{N}\}$ disjunktných množín z \mathcal{S} .

Prvky σ -algebry \mathcal{S} sa zvyknú nazývať *merateľné množiny*.

Stručne: že miera je funkcia zo σ -algebry do \mathbb{R} , ktorá je nezáporná a σ -aditívna.

Miera je *monotónna*:

$$A \subseteq B \wedge A, B \in \mathcal{S} \Rightarrow m(A) \leq m(B)$$

Definícia miery

Miera je *monotónna*:

$$A \subseteq B \wedge A, B \in \mathcal{S} \Rightarrow m(A) \leq m(B)$$

Definícia

Miera $m: \mathcal{S} \rightarrow \langle 0, \infty \rangle$ na množine \mathbb{R} sa nazýva *invariantná na posun* alebo *translačne invariantná*, ak pre každú množinu $A \in \mathcal{S}$ a $x \in \mathbb{R}$ aj množina

$$x + A = \{x + a; a \in A\}$$

patrí do \mathcal{S} a platí

$$m(x + A) = m(A).$$

Inak povedané, miera množiny sa nezmení ak ju posunieme.

Lebesguova miera

Lebesguova miera:

- je translačne invariantná;
- miera intervalu je jeho dĺžka;
- miera konečnej množiny je nulová.

Vitaliho konštrukcia

Tvrdenie

Neexistuje translačne invariantná miera $m: \mathcal{P}(\mathbb{R}) \rightarrow \langle 0, \infty \rangle$ taká, že $m(\langle a, b \rangle) = b - a$ pre ľubovoľné $a < b$, $a, b \in \mathbb{R}$.

Rozklad $(\mathbb{R}, +)$ podľa \mathbb{Q} má triedy

$$a + \mathbb{Q} = \{a + q; q \in \mathbb{Q}\}$$

pre $a \in \mathbb{R}$.

$V =$ výberová množina pre $\{(a + \mathbb{Q}) \cap \langle 0, 1 \rangle; a \in \mathbb{R}\}$

$$\langle 0, 1 \rangle \subseteq \bigcup_{q \in \mathbb{Q} \cap \langle -1, 1 \rangle} q + V \subseteq \langle -1, 2 \rangle,$$

Vitaliho konštrukcia

Označme $B := \bigcup_{q \in \mathbb{Q} \cap \langle -1, 1 \rangle} q + V$.

$$m(B) = \sum_{q \in \mathbb{Q} \cap \langle -1, 1 \rangle} m(q + V) = \sum_{q \in \mathbb{Q} \cap \langle -1, 1 \rangle} m(V).$$

Teda $m(B) \in \{0, \infty\}$

$$1 = m(\langle 0, 1 \rangle) \leq m(B) \leq m(\langle -1, 2 \rangle) = 3$$

Spor

Vitaliho konštrukcia

Dôsledok

Existuje lebesguovsky nemerateľ'ná podmnožina \mathbb{R} .

Banach-Tarskiho paradox

Veta (Banach-Tarski)

Pre ľubovoľné dve ohraničené množiny $A, B \subseteq \mathbb{R}^n$, $n \geq 3$ existujú rozklady $A = A_1 \cup \dots \cup A_k$ a $B = B_1 \cup \dots \cup B_k$ na konečný počet množín také, že A_i a B_i sú kongruentné (t.j. jednu z druhej možno získať posunutím a otočením).