Organizační úvod

TODO!!!

Úvod

TODO!!!

Věta 0.1 (Spojitý obraz kompaktu)

Nechť (P, ϱ) a (Q, τ) jsou metrické prostory a $f : P \to Q$ je spojité zobrazení. Nechť $K \subset P$ je kompaktní množina. Potom $f(K)$ je kompaktní.

Důkaz

Nechť $y_n \in f(K)$. Pak $\exists x_n \in K,\ f(x_n) = y_n$. Z definice kompaktnosti $\exists x \in K, x_{n_k} \to x \in K$. Podle Heineho věty $f(x_{n_k}) = f(y_{n_k}) \to f(x) \in f(K)$. □

Definice 0.1

Nechť $(\mathbb{P}, \varrho)$ a $(\mathbb{Q}, \tau)$ jsou metrické prostory, $K \subset \mathbb{P}$ a $f : K \to \mathbb{Q}$. Řekneme, že f je na K stejnoměrně spojitá, pokud

$$\forall \varepsilon > 0\ \exists \delta > 0\ \forall x, y \in K : (\varrho(x, y) < \delta \implies \tau(f(x), f(y)))\,.$$

Věta 0.2 (O vztahu spojitosti a stejnoměrné spojitosti na MP)

Nechť $(\mathbb{P}, \varrho)$ a $(\mathbb{Q}, \tau)$ jsou MP, $K \subset \mathbb{P}$ je kompaktní a nechť $f : K \to \mathbb{Q}$ je spojitá. Pak f je stejnoměrně spojitá na K.

Důkaz

Nechť f je spojitá, ale ne stejnoměrně. Potom

$$\exists \varepsilon > 0\ \forall \delta > 0\ \exists x, y \in K : \varrho(x, y) < \delta \wedge \tau(f(x), f(y)) \geq \varepsilon.$$

Zvolíme $\delta_n = \frac{1}{n}$ a pro každé si najdeme x_n, y_n. K je kompaktní, tedy existuje podposloupnost $x_{n_k} \to x_0 \in K$.

$$\varrho(y_{n_k}, x_0) \leq \varrho(x_{n_k}, y_{n_k}) + \varrho(x_n, x_0) \leq \frac{1}{n_k} + \varrho(x_n, x_0) \to 0 \implies y_{n_k} \to x_0$$

Z Heineho věty $f(x_{n_k}) \to f(x_0)$ a $f(y_{n_k}) \to f(x_0)$. Ale my máme, že jsou od sebe vzdáleny o ε. ↯ □

1 Úplné metrické prostory

Definice 1.1 (Cauchyovská posloupnost)

Nechť $(\mathbb{P}, \varrho)$ je metrický prostor a $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost bodů z $\mathbb{P}$. Řekneme, že x_n splňuje Bolzano-Cauchyovu podmínku (případně, že je cauchyovská), jestliže platí:

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists n_0 \in \mathbb{N} \ \forall m, n \in \mathbb{N}, m, n \geq n_0 : \varrho\left(x_n, x_m\right) < \varepsilon.$$

Důsledek
Každá konvergentní posloupnost je cauchyovská.

Definice 1.2 (Úplný prostor)

Řekneme, že metrický prostor $(\mathbb{P}, \varrho)$ je úplný, jestliže každá cauchyovská posloupnost je konvergentní.

Věta 1.1 (Vztah kompaktnosti a úplnosti)

Nechť $(\mathbb{P}, \varrho)$ je MP a $\mathbb{P}$ je kompaktní. Pak $\mathbb{P}$ je úplný metrický prostor.

Důkaz
Nechť $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ je cauchyovská posloupnost. $\mathbb{P}$ kompaktní $\implies$ $\exists x_{n_k} \to x \in \mathbb{P}$. Nechť $\varepsilon > 0$. Najdu n_0 z BC podmínky. Z $x_n \to x \exists k_0 \forall k \geq k_0 : \varrho\left(x_{n_k}, x\right) < \varepsilon$. Nalezneme n_k, $k \geq k_0$, $n_k \geq n_0$. Pak

$$\forall n \geq n_0 : \varrho\left(x_n, x\right) \leq \varrho\left(x_n, x_{n_k}\right) + \varrho\left(x_{n_k}, x\right) < 2\varepsilon.$$

$\square$

Věta 1.2 (Úplnost a prostor spojitých funkcí)

Metrický prostor $C([0,1])$ se supremovou metrikou je úplný.

Důkaz
Nechť $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ je cauchyovská posloupnost. Tedy

$$\forall \varepsilon > 0 \; \exists n_0 \; \forall m, n \geq n_0 : \varrho\left(f_n, f_m\right) = \sup_{x \in [0,1]} |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon. \qquad (*)$$

Zvolme $x \in [0,1]$ pevné. Potom máme posloupnost reálných čísel místo funkcí, tedy z BC podmínky v $\mathbb{R}$ je $f_n(x)$ cauchyovská, tedy existuje $\lim_{n\to\infty} f_n(x) = f(x) \in \mathbb{R}$. Takto jsme si zadefinovali novou funkci f.

$f_n \to f$. Provedeme limitu $n \to \infty$ na $(*)$.

$$\forall \varepsilon > 0 \; \exists n_0 \; \forall m, n \geq n_0 : \sup_{x \in [0,1]} |f(x) - f_n(x)| \leq \varepsilon.$$

Tedy $\varrho(f, f_n) \leq \varepsilon \implies f_n \to f$.

f je spojitá: Nechť $y \in [0,1]$. Chceme dokázat, že f je spojitá v y. Nechť $\varepsilon > 0$. Z BC $\exists n_0 \; \forall x \in [0,1] : |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon$. Zafixujeme n_0. f_{n_0} je spojitá v y, tedy $\exists \delta > 0 \; \forall x \in [0,1], |x-y| < \delta : |f_{n_0}(x) - f_{n_0}(y)| < \varepsilon$. Nyní $\forall x \in [0,1], |x-y| < \delta$:

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - f_{n_0}(x)| + |f_{n_0}(x) - f_n(y)| + |f_{n_0}(y) - f(y)| \leq 3\varepsilon.$$

(Třetí člen dostaneme tak, že zafixujeme $m = n_0$ a n pošleme do nekonečna v BC podmínce výše.) $\square$

Věta 1.3 (Banachova, o kontrakci)

Nechť $(\mathbb{P}, \varrho)$ je úplný MP a $T : \mathbb{P} \to \mathbb{P}$ je kontrakce (tedy $\exists \gamma \in (0,1) \; \forall x, y \in P : \varrho\left(T(x), T(y)\right) \leq \gamma \cdot \varrho(x,y)$). Pak existuje právě jedno $x \in \mathbb{P}$ tak, že $T(x) = x$.

Důkaz
Zvolme $x_1 \in P$ libovolně. Definujeme indukcí $x_{n+1} = T(x_n)$. Tvrdíme, že x_n je cauchyovská, $\forall n \in \mathbb{N}$:

$$\varrho(x_{n+1}, x_n) = \varrho(T(x_n), T(x_{n+1})) \leq \gamma \varrho(x_n, x_{n+1}) \leq \gamma^2 \varrho(x_{n-1}, x_n) \leq \ldots \leq \gamma^n \varrho(x_1, x_2).$$

Nechť $\varepsilon > 0$, zvolme n_0, aby $\varrho(x_2, x_1) \gamma^{n_0-1} \frac{1}{1-\gamma} < \varepsilon$. Nyní $\forall m,\, n \geq n_0,\, m < n$:

$$\varrho(x_m, x_n) \leq \varrho(x_{m+1}, x_m) + \ldots + \varrho(x_n, x_{n-1}) \leq \varrho(x_1, x_2) \cdot \left(\gamma^{m-1} + \ldots + \gamma^{n-2}\right) \leq$$

$$\leq \varrho(x_2, x_1) \gamma^{n_0-1} \frac{1}{1-\gamma}.$$

Tedy x_n je cauchyovská a má limitu.

Tvrdíme, že $T(x_n) \to T(x)$: T je spojité v x. K $\varepsilon > 0$ volme $\delta = \varepsilon$. Pak

$$\forall y \in B(x, \delta) : \varrho(x, y) < \delta \implies \varrho(T(x), T(y)) \leq \gamma \cdot \varrho(x, y) \leq \gamma\delta < \varepsilon.$$

Podle Heineho věty $x_n \to x \implies T(x_n) \to T(x)$. Víme, že $x_{n+1} = T(x_n)$, tj.

$$\lim_{n\to\infty} x_{n+1} = \lim_{n\to\infty} T(x_n).$$

Jednoxznačnost: Nechť $\exists x, y$, $T(x) = x$ a $T(y) = y$. Pak

$$\varrho(x, y) = \varrho(T(x), T(y)) \leq \gamma \cdot \varrho(x, y) \implies \varrho(x, y) = 0 \implies x = y.$$

$\square$

Věta 1.4 (O převedení na integrální tvar)

Nechť $I \subset \mathbb{R}$ je otevřený interval, $x_0 \in I$, $f : I \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ spojité a $y : I \to \mathbb{R}$ je spojitá. Pak y je řešení ODR $y' = f(x, y(x))$ na I s počáteční podmínkou $y(x_0) = y_0$ právě tehdy, když $y(x) = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(s, y(s))ds$, $\forall xz \in I$.

Důkaz
$\implies$: víme $y'(s) = f(s, y(s))$ je spojité, tj. lze integrovat:

$$y(x) - y_0 = y(x) - y(x_0) = \int_{x_0}^{x} y'(s)ds = \int_{x_0}^{x} f(s, y(s))ds.$$

$\Leftarrow$: zderivujeme (integrant je spojitý $\implies$ integrál lze zderivovat) $y'(x) = f(x, y(x))$. Zřejmě také $f(x_0) = y_0$. $\square$

Věta 1.5 (Picard)

Nechť $I \subset \mathbb{R}^2$ je otevřený interval a $(x_0, y_0) \in I$.

Poznámka
Stačí libovolná otevřená množina.

Důkaz
Nechť $f : I \to \mathbb{R}$ je spojitá a lokálně lipschitzovská vůči Y. Pak existuje $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ okolí x_0 a funkce $y(x)$ definovaná na $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ tak, že $y(x)$ splňuje ODR $y'(x, y(x))$ na $(x_0 - \delta, x_0 + \ \delta)$ s počáteční podmínkou $y(x_0) = y_0$. Navíc y je jediné řešení na $(y_0 - \delta, y_0 + \delta)$. $\square$

Důkaz
Zvolme $\delta, \Delta > 0$, aby $[x_0 - \delta, x_0 + \delta] \times [y_0 - \Delta, y_0 + \Delta] \subset I$. Definujeme

$$X = \{y \in C([x_0 - \delta, x_0 + \delta]) | y(x) \in [y_0 - \Delta, y_0 + \Delta]\}.$$

Definujeme operátor $T : C([x_0 - \delta, x_0 + \delta]) \to C([x_0 - \delta, x_0 + \delta])$ tak, že $T[y](x) = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(s, y(s)) ds$.

Klíčové pozorování: y řeší naši ODR $\Leftrightarrow T[y] = y$. (Z předchozí věty.)

X je úplný: Nejprve dokážeme, že X je uzavřená podmnožina $C([x_0 - \delta, x_0 + \delta])$: X lze zapsat (dokáže se velmi přímočaře) jako $\overline{B(y_0, \Delta)}$: Tj. X je uzavřená a úplnost se dědí na uzavřené podmnožiny.

Máme pevné $\delta, \Delta > 0$, že $A := [x_0 - \delta, x_0 + \delta] \times [y_0 - \Delta, y_0 + \Delta] \subset I$. f spojitá na tomto kompaktu $\implies \exists M > 0$, $|f(x, y)| \leq M$ na A. Z lipschitzovskosti $\exists x > 0 : \forall [x, y] \in A, \forall [x, \tilde{y}] |f(x, y) - f(x, \tilde{y})| \leq K \cdot |y - \tilde{y}|$. Případným zmenšením $\delta > 0$ dosáhneme

$$\delta \leq \min \left\{ \frac{\Delta}{M}, \frac{1}{2K} \right\}.$$

Ukážeme $T : X \to X$: $y \in X$, $y(x) \in [y_0 - \Delta, y_0 + \Delta]$.

$$|T[y](x) - y_0| = |\int_{x_0}^{x} f(s, y(x)) ds| \leq |x - x_0| M \leq \delta \cdot M \leq \Delta.$$

$$\implies T[y](x) \in [y_0 - \Delta, y_0 + \Delta] \implies T[y] \in X.$$

Dokážeme, že je toto zobrazení kontrakce a pak už máme hotovo z věty výše. Kontrakce: Nechť $y, \tilde{y} \in X$ a $x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$.

$$T[y](x) - T[\tilde{y}](x)| = |\int_{x_0}^{x} (f(s, y(s)) - f(s, \tilde{y}(s))) ds| \leq \int || \leq$$

$$\leq \int_{x_0}^{x} |K \cdot (y(s) - \tilde{y}(s))| ds < |x_0 - x| \cdot K \cdot \sup_{s \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]} (y(s) - \tilde{y}(s)) \leq \delta \cdot K \cdot \varrho(y, \tilde{y}) \leq \frac{1}{2} \varrho(y, \tilde{y}).$$

Supremum dá $\varrho(T[y], T[\tilde{y}]) \leq \frac{1}{2} \varrho(y, \tilde{y})$. $\square$

2 Funkce více proměnných

2.1 Úvodní definice a spojitost

Poznámka
Většina definice je jen „opakování“ z letního semestru, nebo z definice spojitých funkcí na metrických prostorech.

Definice 2.1 (Funkce více reálných proměnných, vektorová funkce)

Nechť $M \subset \mathbb{R}^n$. Funkcí více reálných proměnných rozumíme zobrazení $f : M \to \mathbb{R}$.

Vektorovou funkcí více reálných proměnných rozumíme zobrazení $f : M \to \mathbb{R}^m$, kde $m \in \mathbb{N}$.

Definice 2.2 (Eukleidovská vzdálenost)

Pro $[x_1, \dots, x_n], [y_1, \dots, y_n] \in \mathbb{R}^n$ definujeme eukleidovskou vzdálenost (metriku) jako

$$|x - y| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}.$$

Definice 2.3 (Koule, prstencové okolí)

$B(c, r) = \{x \in \mathbb{R}^n | |x - c| < r\}$. $P(c, r) = B(c, r) \setminus \{c\}$.

Definice 2.4 (Limita funkce)

Nechť $F : G \to \mathbb{R}$, kde $G \subseteq \mathbb{R}^n$ je otevřená. Řekneme, že f má v bodě $a \in G$ limitu rovnou $A \in \mathbb{R}^*$, jestliže platí

$$\forall \varepsilon > 0\ \exists \delta > 0\ \forall x \in P(a, \delta) : f(x) \in B(A, \varepsilon).$$

Značíme $\lim_{x \to \infty} f(x) = A$.

Definice 2.5 (Spojitost)

Řekneme, že f je spojitá v a, jestliže $\lim_{x \to a} f(x) = f(a)$.

Definice 2.6 (Spojitost a limita vektorové funkce)

Spojitost a limitu vektorové funkce definujeme po složkách.

Poznámka
Zřejmě platí aritmetika limit, věta o dvou policajtech a věta o spojitosti složené funkce.

Definice 2.7 (Limita posloupnosti bodů)

$$x_j \in \mathbb{R}^n, \lim_{j\to\infty} x_j = a \in \mathbb{R}^n \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0\ \exists j_0 \forall j \geq j_0 : |x_j - a| < \varepsilon.$$

Poznámka
Následující větu lze dokázat analogicky věty výše.

Věta 2.1 (Heine)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ otevřená, $a \in G$, $A \in \mathbb{R}^*$ a $f : G \to \mathbb{R}$. Pak je ekvivalentní

- $\lim_{x\to a} f(x) = A$.
- $\forall$ *posloupnost* $\{x_j\}_{j=1}^{\infty}$ *splňující* $x_j \in G \setminus \{a\}$, $\lim_{j\to\infty} x_j = a$ *platí* $\lim_{j\to\infty} f(x_j) = A$.

2.2 Parciální derivace a totální diferenciál

Definice 2.8 (Parciální derivace)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená, $i \in [n]$, $f : G \to \mathbb{R}$ a $x \in \mathbb{G}$. Parciální derivací funkce f v bodě x podle i-té proměnné nazveme

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x) = \lim_{t\to 0} \frac{f(x_1, \ldots, x_i + t, \ldots, x_n) - f(x_1, \ldots, x_n)}{t} = \lim_{t\to 0} \frac{f(x + t \cdot e_i) - f(x)}{t},$$

pokud tato limita existuje.

Definice 2.9 (Extrémy)

Nechť $M \subset \mathbb{R}^n$, $f : M \to \mathbb{R}$ a $x_0 \in M$. Řekneme, že f nabývá v bodě x_0 svého minima (resp. lokálního minima, resp. maxima, lokálního maxima) vzhledem k M, jestliže $\forall x \in M : f(x) \geq f(x_0)$ (resp. $\exists \delta > 0\ \forall x \in B(x_0, \delta)$, resp. $f(x) \leq f(x_0)$).

Věta 2.2 (Nutná podmínka existence extrému)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená, $i \in [n]$, $a \in G$ a $f : G \to \mathbb{R}$. Má-li f v bodě a lokální minimum (maximum) a existuje-li $\frac{\partial f}{\partial x_i}(a)$, pak $\frac{\partial f}{\partial x_i}(a) = 0$.

Důkaz

Položme $h(t) = f(a + t \cdot e_i)$. Pak h je definováno na okolí 0. f má v a extrém, tedy h má v 0 extrém. Dále

$$h'(0) = \lim_{t\to 0} \frac{h(t) - h(0)}{t} = \lim_{t\to\infty} \frac{f(a + t \cdot e_i) - f(a)}{t} = \frac{\partial f}{\partial x_i}(a).$$

Podle Fermatovy věty je $h'(0) = 0$. □

Definice 2.10 (Derivace ve směru)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená, $f : G \to \mathbb{R}$, $x \in G$ a $0 \neq v \in \mathbb{R}^n$. Derivací funkce f v bodě $x \in G$ ve směru v nazveme

$$\frac{\partial f}{\partial v}(x) = \lim_{t\to 0} \frac{f(x + t \cdot v) - f(x)}{t},$$

pokud limita existuje.

Definice 2.11 (Totální diferenciál)

Nechť G je otevřená, $f : G \to \mathbb{R}$ a $a \in G$. Řekneme, že lineární zobrazení $L : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ je totální diferenciál funkce f v bodě a, pokud $\lim_{h\to 0} \frac{f(a+h)-f(n)-L(h)}{|h|} = 0$.

Značíme $D_f(a)$ a hodnotu v bodě $h \in \mathbb{R}^n$ značíme $D_f(a)(h)$.

Poznámka

Lineární zobrazení $L : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ lze reprezentovat jako $L(h) = A_i h_1 + \ldots + A_n h_n$.

Ekvivalentně lze definovat jako $\lim_{x\to a} \frac{f(x)-f(a)-L(x-a)}{|x-a|} = 0$.

Geometrický význam je, že lineární funkce $f(a) + L(x - a)$ je velmi blízko původní funkce $f(x)$ na okolí a.

Věta 2.3 (O tvaru totálního diferenciálu)

Nechť G je otevřené, $a \in G$ a $f : G \to \mathbb{R}$. Nechť existuje totální diferenciál f v bodě a. Pak existují parciální derivace $\frac{\partial f}{\partial x_i}(a)$ a pro všechna $h \in \mathbb{R}^n$ platí $D_f(a)(h) = \frac{\partial f}{\partial x_1} h_1 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_n} h_n$. Navíc pro $\mathbf{o} \neq v \in \mathbb{R}^n$ platí $\frac{\partial f}{\partial v}(a) = D_f(a)(v)$.

Důkaz
Víme $\lim_{h\to 0} \frac{f(a+h)-f(a)-L(h)}{|h|} = 0$. Speciálně pro $h = t \cdot e_i$:

$$0 = \lim_{t\to 0} \frac{f(a+t\cdot e_i) - f(a) - L(t\cdot e_i)}{t} = \lim_{t\to 0} \frac{f(a+t\cdot e_i) - f(a) - A_i \cdot t}{t} = \frac{\partial f}{x_i}(a) - A_i.$$

Tj. $\frac{\partial f}{x_i}(a) = A_i$. Obdobně pro v. $\square$

TODO!!!

TODO!!!

Věta 2.4 (O přírůstku funkce)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $f : G \to \mathbb{R}$ má totální diferenciál v každém bodě G. Nechť $a, b \in G$ a nechť úsečka L spojující a, b je obsažena v G, tj. $L = \{(1-t)\cdot a + t \cdot b | t \in [0,1]\} \subset G$. Pak existuje $\zeta \in L$ tak, že $f(b) - f(a) = Df(\zeta)\cdot(b-a)$.

Důkaz
Položme $F(t) = f(a + t(b-a))$. Podle Lagrangeovy věty $\exists \zeta_2 \in (0,1)$ tak, že $f(b) - f(a) = F(1) - F(0) = F'(\zeta_2)$. Položme $\zeta = a + \zeta_2(b-a)$.

Podle řetízkového pravidla $\frac{\partial F}{\partial t}(\zeta) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial y_j}(\zeta)(b_j - a_j) = Df(\zeta)(b-a)$. $\square$

2.3 Parciální derivace vyšších řádů

Definice 2.12

Nechť f má na otevřené množině $G \subset \mathbb{R}^n$ parciální derivaci

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}, i \in [n],$$

pak definujeme pro $a \in G$ a $j \in [n]$ druhou parciální derivaci

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(a) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)(a), i \neq j,$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2}(a) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)(a), i = j.$$

Obdobně definujeme derivace vyšších řádů.

Definice 2.13 ($C^k(\mathbb{R})$)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $f : G \to \mathbb{R}$. Řekneme, že $f \in C^1(G) = C^1(G, \mathbb{R})$, pokud existují parciální derivace $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, $i \in [n]$, a jsou to spojité funkce.

Řekneme, že $f \in C^k(G) = C^k(G, \mathbb{R})$, $k \in \mathbb{N}$, pokud existují všechny parciální derivace f až do řádu k včetně a jsou to spojité funkce.

Důsledek
Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená. Z věty dříve dostáváme, že je-li $f \in C^1(G)$, pak existuje totální diferenciál f na G.

Věta 2.5 (Záměnnost parciálních derivací)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená, $a \in G$ a $f \in C^2(G, \mathbb{R})$. Pak

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(a) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(a).$$

Důkaz
SLÚNO $n = 2$. Vezměme t dost malé, aby $B_{\max}([a_1, a_2], t) \subset G$. Položme $W(t) = \frac{f(a_1+t, a_2+t) - f(a_1, a_2+t) - f(a_1+t, a_2) + f(a_1, a_2)}{t^2}$. Položme $\varphi(x) = f(x, a_2 + t) - f(x, a_2)$. Pak $W(t) = \frac{1}{t^2}(\varphi(a_1 + t) - \varphi(a_1))$.

φ je spojitá a $\exists \varphi'$. Lagrange: $\exists c_1 \in (a_1, a_1 + t)$:

$$\frac{1}{t^2} \cdot \varphi'(c_1) \cdot (a_1 + t - a_1) = \frac{1}{t}\left(\frac{\partial f}{\partial x}(c_1, a_2 + t) - \frac{\partial f}{\partial x}(c_1, a_2)\right) = \frac{1}{t}(h(a_2 + t) - h(a_2)),$$

$h(a) = \frac{\partial f}{\partial x}(c_1, z)$ je spojitá a derivovatelná, tedy použijeme Lagrange:

$$= \frac{1}{t} \cdot h'(c_2) \cdot (a_2 + t - a_2) = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(c_1, c_2) \leftarrow \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(a_1, a_2).$$

(f má spojité druhé derivace, tedy můžeme prohodit f a limitu.) Totéž provedeme pro zaměněné souřadnice. □

Definice 2.14 (Hessova matice)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $a \in G$. Nechť $f \in C^2(G)$. Definujeme Hessovu matici f jako

$$D^2 f(a) = \begin{pmatrix} \frac{partial^2 f}{\partial x_1^2}(a) & \dots & \frac{partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n}(a) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1}(a) & \dots & \frac{partial^2 f}{\partial x_n^2}(a) \end{pmatrix}.$$

Podle předchozí věty je matice symetrická, a proto můžeme pracovat s následující kvadratickou formou

$$D^2 f(a)(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = u^T D^2 f(a) \cdot v, \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^2.$$

Definice 2.15

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $a \in G$. Nechť $f \in C^2(G)$. Pak definujeme Taylorův polynom stupně 2 jako

$$T_2^{f,a}(x) := f(a) + Df(a)(x-a) + \frac{1}{2}D^2 f(a)(x-a, x-a).$$

Věta 2.6 (Taylorova věta pro druhý řád)

Nechť $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ je třídy C^2 na okolí bodu $a \in \mathbb{R}^n$. Pak

$$\lim_{x \to 0} \frac{f(x) - T_2^{f,a}(x)}{|x-a|^2} = 0.$$

Důkaz

Bez důkazu. □

Poznámka

Lze definovat i Taylorovy polynomy řádu k pomocí k-tých parciálních derivací.

Věta 2.7 (O pozitivně definitní kvadratické formě)

Nechť $Q : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ je pozitivně definitní kvadratická forma. Potom

$$\exists \varepsilon > 0 \ \forall h \in \mathbb{R}^n : Q(h,h) \geq \varepsilon ||h||^2.$$

Důkaz

Funkce $A(h) = Q(h,h) = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_j h_i$ je spojitá. Množina $M \ \{h \in \mathbb{R}^n | ||h|| = 1\}$ je omezená a uzavřená, tedy kompaktní. Funkce $A(h)$ tedy nabývá na M svého minima v bodě h_0. Označme $\varepsilon = Q(h_0, h_0) > 0$.

Nyní

$$\forall h \in \mathbb{R}^n : Q(h,h) = Q\left(\frac{h}{||h||}||h||, \frac{h}{||h||}||h||\right) = ||h||^2 Q\left(\frac{h}{||h||}, \frac{h}{||h||}\right) \geq ||h||^2 Q\left(h_0, h_0\right) = ||h||^2 \varepsilon.$$

□

Věta 2.8 (Postačující podmínky pro lokální extrém)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená množina, $a \in G$ a nechť $f \in \mathcal{C}^2(G)$. Nechť $Df(a) = 0$ (tedy je bod podezřelý na lokální extrém).

1. *Je-li $D^2 f(a)$ pozitivně definitní, pak a je bod lokálního minima.*
2. *Je-li $D^2 f(a)$ negativně definitní, pak a je bod lokálního maxima.*

3. Je-li $D^2 f(a)$ nedefinitní, pak v a nemá extrém.

Důkaz
1) Z předchozí věty víme, že

$$\exists \varepsilon > 0 \; \forall h \in \mathbb{R}^n : D^2 f(a)(h,h) \geq \varepsilon ||h||^2.$$

Z té ještě předchozejší víme, že

$$\lim_{x \to a} \frac{f(x) - f(a) - Df(a)(x-a) - \frac{1}{2} D^2 f(a)(x-a, x-a)}{||x-a||^2} = 0.$$

K zadanému $\varepsilon > 0$ nalezneme $\delta > 0$:

$$\forall x \in P(a,\delta) : \frac{f(x) - f(a) - Df(a)(x-a) - \frac{1}{2} D^2 f(a)(x-a, x-a)}{||x-a||^2} > -\frac{1}{4}\varepsilon.$$

Odtud $f(x) - f(a) - \frac{1}{2} D^2 f(a)(x-a, x-a) > -\frac{1}{4}\varepsilon ||x-a||^2 \implies$

$$f(x) > f(a) + \frac{1}{2} D^2 f(a)(x-a, x-a) - \frac{1}{4}\varepsilon ||x-a||^2 \geq$$

$$\geq f(a) + \frac{1}{2}\varepsilon ||x-a||^2 - \frac{1}{4}\varepsilon ||x-a||^2 > f(a).$$

2) obdobně.

3) Tedy existují $h_1, h_2 \in \mathbb{R}^n$ tak, že $D^2 f(a)(h_1,h_1) > 0$ a $D^2 f(a)(h_2,h_2) < 0$. Uvažme funkci $\varphi(t) = f(a + t \cdot h_1)$, pak $\varphi'(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_1}(a + t \cdot h_1) \cdot (h_1)_i = Df(a + t \cdot h_1) \cdot h_1$. $\varphi'(0) = Df(a) h_1 = 0$.

Dále $\varphi''(t) = D^2 f(a + t \cdot h_1)(h_1, h_1)$, tedy $\varphi''(0) = D^2 f(a)(h_1,h_1) > 0$. Tedy φ má v $t = 0$ lokální minimum, tj. f nemá v bodě a lokální maximum. Analogicky pro h_2, z čehož dostaneme, že f nemá v a ani lokální minimum. □

2.4 Implicitní funkce a vázané extrémy

Věta 2.9 (O implicitní funkci)

Nechť $p \in \mathbb{N}$, $G \subset \mathbb{R}^{n+1}$ je otevřená množina, $F : G \to \mathbb{R}$, $\tilde{x} \in \mathbb{R}^n$, $\tilde{y} \in \mathbb{R}$, $[\tilde{x}, \tilde{y}] \in G$ a nechť platí

1. $F \in \mathcal{C}^p(G)$,
2. $F(\tilde{x}, \tilde{y}) = 0$,
3. $\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x}, \tilde{y}) \neq 0$,

pak existuje okolí $U \subset \mathbb{R}^n$ bodu $\tilde{x}$ a okolí $V \subset \mathbb{R}$ bodu $\tilde{y}$ tak, že

$$\forall x \in U\ \exists! y \in V : F(x, y) = 0.$$

Píšeme-li $y = \varphi(x)$, pak $\varphi \in \mathcal{C}^p(U)$ a platí

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_j}(x) = -\frac{\frac{\partial F}{\partial x_j}(x, \varphi(x))}{\frac{\partial F}{\partial y}(x, \varphi(x))}, \forall x \in U\ \forall j \in [n].$$

Důkaz
4 kroky: a) $\exists\varphi$, b) φ je spojitá, c) $\varphi \in \mathcal{C}^1$, d) $\varphi \in \mathcal{C}^p$.

a) BÚNO $\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y}) = 0$. F je $\mathcal{C}^2$, a tedy $\exists\delta_1 > 0\ \exists\zeta_1 > 0$, tak $\forall x \in B(\tilde{x},\delta_1)\ \forall y \in B(\tilde{y},\zeta_1)$, $\frac{\partial F}{\partial y}(x,y) > 0$. $\forall B(\tilde{y},\zeta_1) : \frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},y) > 0 \implies$ funkce $y \mapsto F(\tilde{x},y)$ je rostoucí, tj. $F(\tilde{x},\tilde{y}+\zeta_1) > 0$, $F(\tilde{x},\tilde{y}-\zeta_1) < 0$. Nalezneme $\delta_2 < \delta_1$ tak, že $F(x,\tilde{y}+\zeta_1) > 0$, $F(x,\tilde{y}-\zeta_1) < 0$, $\forall x \in B(\tilde{x},\delta_2)$. Položme $U = B(\tilde{x},\delta_2)$ a $V = B(\tilde{y},\zeta_1)$.

Nechť $x \in B(\tilde{x},\delta_2)$ je libovolné pevné. Víme, že $\frac{\partial F}{\partial y}(x,y) > 0$, tedy $y \mapsto F(x,y)$ je rostoucí a spojitá, tedy podle Darbouxovy věty (o nabývání mezihodnot) $\exists! y \in (\tilde{y}-\zeta_1, \tilde{y}+\zeta 1)$ tak, že $F(x,y) = 0$. Označme $y = \varphi(x)$.

b) Nechť $\varepsilon > 0$, $\varepsilon < \zeta_1$. Mohu použít větu část *a*) na F a $G^* = U \times (\tilde{y}-\varepsilon,\tilde{y}+\varepsilon)$. Dostaneme $\exists U^*$ okolí $\tilde{x}$ a V^* okolí $\tilde{y}$, že $\forall x \in U^* \exists! y \in V^* F(x,y) = 0$. Speciálně $\varphi(U^*) \subset V^* \subset (\tilde{y}-\varepsilon,\tilde{y}+\varepsilon)$. Tedy φ je spojité.

c) Chceme ukázat, že φ má totální diferenciál v $\tilde{x}$, tedy

$$\forall\varepsilon > 0\ \exists\delta > 0\ \forall x \in B(\tilde{x},\delta) \subset \mathbb{R}^n : |\varphi(\tilde{x}+h) - \varphi(\tilde{x}) - \sum_{i=1}^{n} - \frac{\frac{\partial F}{\partial x_j}(x,\varphi(x))}{\frac{\partial F}{\partial y}(x,\varphi(x))} h_i| < \varepsilon \sum_{i=1}^{n} |h_i|.$$

Zvolme $\varepsilon > 0$, $\varepsilon \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y})} < \frac{1}{2}$. Víme, že F má totální diferenciál v $[\tilde{x},\tilde{y}]$, tedy

$$\exists\delta > 0\ \forall h \in B(0,\delta) |F(\tilde{x}-\tilde{y},\tilde{y}+h_{n+1}) - F(\tilde{x},\tilde{y}) - \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial F}{\partial x_i}(\tilde{x},\tilde{y}) h_i - TODO$$

$$|F(\tilde{x}+\tilde{h},\varphi(\tilde{x}+\tilde{h})) - F(\tilde{x},\tilde{y}) - \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial F}{\partial x_i}(\tilde{x},\tilde{y}) \cdot h_i - \frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y}) \cdot (\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi(\tilde{x}))| \le \varepsilon \cdot (\sum_{i=1}^{n} |h_i| + |\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi(\tilde{x})$$

$$|(\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi(\tilde{x})) - \frac{\frac{\partial F}{\partial x_i}(\tilde{x},\tilde{y})}{\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y})} \cdot h_i| \le \frac{\varepsilon}{\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y})} \cdot (\sum_{i=1}^{n} |h_i| + |\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi(\tilde{x})|).$$

Tudíž stačí jen odhadnout $|\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi'(\tilde{x})|$.

$$|\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi'(\tilde{x})| \le |\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi'(\tilde{x}) - \sum_{i=1}^{n} \frac{-\frac{\partial F}{\partial x_i}(\tilde{x},\tilde{y})}{\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y})} \cdot h_i| + |\sum_{i=1}^{n} \frac{-\frac{\partial F}{\partial x_i}(\tilde{x},\tilde{y})}{\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y})} \cdot h_i| \le$$

$$\le \frac{\varepsilon}{\frac{\partial F}{\partial y}(\tilde{x},\tilde{y})} \left(\sum_{i=1}^{n} |h_i| + |\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi'(\tilde{x})| \right) + c_i \sum_{i=1}^{n} |h_i| \le$$

$$\le \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{n} |h_i| + |\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi'(\tilde{x})| \right) + c_i \sum_{i=1}^{n} |h_i| \implies$$

$$|\varphi(\tilde{x}+\tilde{h}) - \varphi'(\tilde{x})| \le c_2 \sum_{i=1}^{n} |h_i|.$$

Kombinací dosažených nerovností už dostaneme chtěnou nerovnost. Tedy $\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}(x) = -\frac{\frac{\partial F}{\partial x_i}(x,\varphi(x))}{\frac{\partial F}{\partial y}(x,\varphi(x))}$.

d) $F \subset \mathcal{C}^p \implies \varphi \in \mathcal{C}^p$. Indukcí: $p = 1$ víme. Dále nechť víme $\varphi \in \mathcal{C}^{p-1}$ a $F \in \mathcal{C}^p$. Víme, že

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}(x) \quad \frac{\partial F}{\partial x_i}(x,\varphi(x))$$

Věta 2.10 (O implicitních funkcích)

Nechť $n, m \in \mathbb{N}$, $p \in \mathbb{N}$, $G \subset \mathbb{R}^{n+m}$ *otevřená,* $F_j : G \to \mathbb{R}$, $j \in [m]$, $\tilde{x} \in \mathbb{R}^n$, $\tilde{y} \in \mathbb{R}^m$, $[\tilde{x}, \tilde{y}] \in G$ *a nechť platí*

- $F_j \in \mathcal{C}^p(G)$ *pro* $j \in [m]$,
- $F_j(\tilde{x}, \tilde{y}) = 0$, $\forall j \in [m]$,
- *determinant* $m \times m$ *matic parciálních derivací* F_j *je nenulový.*

Pak existuje $U \subset \mathbb{R}^n$ *okolí* $\tilde{x}$ *a* $V \subset \mathbb{R}^m$ *okolí* $\tilde{y}$ *tak, že*

$$\forall x \in U \ \exists! y \in V, F_j(x, y) = 0 \ \forall j \in [m], (y_j = \varphi_j(x)) \implies \varphi_j \in \mathcal{C}^p(U), j \in [m].$$

Věta 2.11 (Lagrangeova věta o vázaných extrémech)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ *je otevřená množina,* $m < n$, f, $g_1, \dots, g_m \in \mathcal{C}^1(G)$ *a mějme množinu* $M = \{z \in \mathbb{R}^n | g_1(z) = \ldots = g_m(z) = 0\}$. *Je-li* $a \in M$ *bodem lokálního extrému* f *vzhledem k* M *a vektory* $(\frac{\partial g_1}{\partial z_1}(a), \dots, \frac{\partial g_1}{\partial z_n}(a))$, *...*, $(\frac{\partial g_m}{\partial z_1}(a), \dots, \frac{\partial g_m}{\partial z_n}(a))$ *jsou lineárně nezávislé, pak existují čísla* $x_1, \dots, x_m$ *tak, že*

$$Df(a) + \lambda_1 Dg_1(a) + \ldots + \lambda_m \cdot Dg_m(a) = 0.$$

Důkaz
Položme $k = n - m$, $\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m$. Víme, že $Dg_1(a), \dots, Dg_m(a)$ jsou LN $\implies \exists\, m$ lineárně nezávislých sloupců, BÚNO jsou to poslední sloupce. Podle věty o implicitních funkcích $\exists U$ okolí $\tilde{x}$ a V okolí $\tilde{y}$ tak, že $\forall x \in U\ \exists! y \in V : g_j(x, y) = 0$, $j \in [m]$. Píšeme $y_j = \varphi_j(x) \in \mathcal{C}^1$, $j \in [m]$.

Položme $\psi(x) = f(x_1, \dots, x_k, \varphi_1(x_1, \dots, x_k), \dots) \in \mathcal{C}^1$. Víme f má extrém vzhledem k $M \implies \psi$ má extrém $\implies \frac{\partial \psi}{\partial x_j}(x) = 0$, $j \in [k]$.

$$0 = \frac{\partial \psi}{\partial x_j}(a) = \sum_{i=1}^{k} \frac{\partial f}{\partial z_i} a \frac{\partial (x_i)}{x_j} + \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial f}{\partial z_{k+i}}(a) \frac{\partial \varphi_i(\tilde{x})}{\partial x_j} = 0 + \dots.$$

Zderivováním $g_l(x_1, \dots, \varphi \dots, \dots) = 0$, $l \in [m]$, dostaneme

$$\frac{\partial}{\partial z_j} g(x) = \frac{\partial g_l}{\partial z_j}(a) + \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial g_l}{\partial z_{k+i}}(a) \cdot \frac{\partial \varphi_i(\tilde{x})}{\partial x_j} = 0.$$

Označme si vektory $v_j = (0, \dots, 1, \dots, 0, \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_j}(\tilde{x}), \dots, \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_j}(\tilde{x}))$ (1 je na j-tém místě), $j \in [k]$. Označme $A = \mathrm{LO}\{v_1, \dots, v_k\}$. $\dim A = k$. Z toho plyne $A^\perp = n - k = m$. Derivace ψ říká, že $Df(a) \in A^\perp$. Derivace g říká, že $Dg_l(a) \in A^\perp$, $\forall l \in [m]$. Z předpokladu tvoří $Dg_l(a)$ bázi $A^\perp$ (jelikož jsou LN). Tj. $Df(a)$ lze napsat jako L kombinaci prvků báze, tj. $Dg_l(a)$. □

2.5 Regulární zobrazení

Definice 2.16 (Difeomorfismus)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřené a $f : G \to \mathbb{R}^n$. Řekneme, že f je difeomorfismus na G, jestliže je f prostá na G, $U = f(G)$ je otevřená v $\mathbb{R}^n$, $f \in C^1(G)$ a $f^{-1} \in C^1(U)$/

Definice 2.17 (Regulární zobrazení)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $f : G \to \mathbb{R}^n$. Řekneme, že f je regulární zobrazení, jestliže $f \in \mathcal{C}^1(G)$ a pro každé $a \in G$ a pro každé $a \in G$ platí $J_f(a) \neq 0$.

Věta 2.12 (O lokálním difeomorfismu)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $f : G \to \mathbb{R}^n$ je třídy $\mathcal{C}^1$. Nechť pro $a \in G$ platí $J_f(a) \neq 0$. Pak existuje $V \subset G$ okolí a takové, že $f|_V$ je difeomorfismus na V.

Důkaz
Definujeme $\Omega = \mathbb{R}^n \times G \subset \mathbb{R}^{2n}$ a $F : \Omega \to \mathbb{R}^n$, $F(y,x) = f(x) - y \in \mathbb{C}^1$. Označme $b = f(a)$, pak $F(b,a) = f(a) - b = 0$. Dále Jacobián F podle druhých n souřadnic je roven $J_f(a) \neq 0$. Podle věty o implicitních funkcích existuje U_1 okolí bodu b a V_1 okolí bodu a v $\mathbb{R}^n$, že $\forall y \in U_1\ \exists! x \in V_1 : F(y,x) = 0$. Tj. při označení $x = \varphi(y)$ je $\varphi \in \mathcal{C}^1(U_1)$ a $0 = f(x) - y = f(\varphi(y)) - y \implies \varphi = b^{-1} \in \mathcal{C}^1$. (Na $A = V_1 \cap f^{-1}(U_1)$, což je otevřená množina jako průnik otevřené a vzoru otevřené při spojitém zobrazení. Nyní $f|_A$ je difeomorfismus a zobrazení A na otevřenou U_1.) □

3 Metrické prostory vol. II

3.1 Více o kompaktních a úplných prostorech

Definice 3.1 (Kompaktní prostor podruhé)

(P,ϱ) MP a $K \subset P$. Řekneme, že K je kompaktní, jestliže z každé posloupnosti bodů z K lze vybrat konvergentní podposloupnost s limitou v K.

Definice 3.2 (ε-síť, totálně omezený)

Nechť (P,ϱ) je metrický prostor. Nechť $\varepsilon > 0$ a $H \subset P$. Řekneme, že H je ε-síť prostoru P, pokud $P \subset \bigcup_{x \in H} B(x,\varepsilon)$.

Řekneme, že P je totálně omezený, pokud $\forall \varepsilon > 0\ \exists$ konečná ε-síť prostoru P.

Věta 3.1 (Omezenost a totální omezenost)

Nechť (P,ϱ) je totálně omezený metrický prostor. Potom je P omezený.

Důkaz
P je TO, a tedy existuje konečná 1-síť $x_1, \ldots, x_n$. Označme $d = \max\{\varrho(x_i,x_j) |\ i,j \in [n]\}$. Nechť $x, y \in P$, pak $\exists i,j \in [n] : x \in B(x_i,1), y \in B(x_j,1)$. Nyní

$$\varrho(x,y) \leq \varrho(x,x_i) + \varrho(x_i,x_j) + \varrho(x_j,y) < 1 + d + 1.$$

Volme x_0 libovolně, pak $P \subset B(x_0, d+2)$. □

Věta 3.2 (Kompaktnost a totální omezenost)

Nechť (P,ϱ) je kompaktní metrický prostor. Potom je P totálně omezený.

Důkaz
Sporem: Nechť $\exists \varepsilon > 0 \ \forall x_1, \dots, x_n \in P : P \not\subset \bigcup_{i=1}^n B(x_i, \varepsilon)$. Zvolme $x_1 \in P$ libovolně. Víme $P \not\subset B(x_1, \varepsilon)$, tedy $\exists x_2 : \varrho(x_2, x_1) \geq \varepsilon$. Indukcí: Mějme $x_1, \dots, x_{n-1}$ tak, že $\varrho(x_i, x_j) \geq \varepsilon \ \forall i \neq j$. Víme $P \not\subset \bigcup_{i=1}^n B(x_i, \varepsilon)$, tedy $\exists x_n \varrho(x_n, x_i) \geq \varepsilon \forall i \in [n-1]$. Nakonec máme posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^\infty$.

Z definice kompaktnosti $\exists x_{n_k} \to x \in P$. Ale toto není možné, protože $\varrho(x_i, x_j) \geq \varepsilon \forall i \neq j$. □

Věta 3.3 (Kompaktnost a otevřené pokrytí)

Metrický prostor (P, ϱ) je kompaktní právě tehdy, když z každého otevřeného pokrytí lze vybrat konečné podpokrytí. Tedy platí (pro libovolnou indexovou množinu a G_α otevřené)

$$P \subset \bigcup_{\alpha \in A} G_\alpha \implies \exists \textit{konečná } A_0 \subset A : P \subset \bigcup_{\alpha A_0} G_\alpha.$$

Důkaz
„ $\Longrightarrow$ “: Tvrdím, že $\exists m \in \mathbb{N}$ tak, že $\forall x \in P\ \alpha \in A : x \in B(x, \frac{1}{m}) \subset G_\alpha$. To dokážeme sporem: Nechť $\exists x_m \in P\ \forall \alpha \in A :\ B(x_m, \frac{1}{m}) \not\subset G_\alpha$. P je kompaktní, tedy $\exists x_{m_k} \to x$. Z otevřeného pokrytí $\exists \alpha \in A : x \in G_\alpha$, G_α.

G_α je otevřená, tedy $\exists \delta > 0 : B(x, \delta) \subset G_\alpha$. Zvolme k, aby $\frac{1}{m_k} \in B(x, \frac{\delta}{2})$. Nyní $\forall y \in B(x_{m_k}, \frac{1}{m_k})$ platí

$$\varrho(x, y) \leq \varrho(x, x_{m_k}) + \varrho(x_{m_k}, y) < \frac{\delta}{2} + \frac{1}{m_k} < \delta \implies y \in B(x, \delta) \implies B(x_{m_k}, \frac{1}{m_k}) \subset G_\alpha, ↯.$$

Takže tvrzení výše platí. (P, ϱ) je kompaktní, tedy podle věty 11.2 (ve výuce) je totálně omezený. Tedy pro naše $m \in \mathbb{N}$ $\exists$ konečná $\frac{1}{n}$ síť $x_1, \ldots, x_n$. Nyní z toho tvrzení výše $\forall j \in [n]\ \exists G_{\alpha_j} : B(x_j, \frac{1}{m}) \subset G_{\alpha_j}$. Nyní $P \subset \bigcup_{j=1}^n B(x_j, \frac{1}{n}) \subset \bigcup_{j=1}^n G_{\alpha_j}$.

„$\Leftarrow$“: Nechť $\{x_n\} \in P$. Chceme $x_{n_k} \to x \in P$. Označme $D = \{x_n, n \in \mathbb{N}\}$. Je-li D konečná, pak se nějaké x_n opakuje a je snadné vybrat konvergentní (= konstantní) podposloupnost.

Dále nechť D je nekonečná. Máme 2 možnosti:

$$A \exists y \in P\ \forall r > 0 : B(y, r) \cap D \text{ je nekonečná, nebo}$$

$$D \forall y \in P\ \exists r_y > 0 : B(y, r_y) \cap D \text{ konečná.}$$

A: $r = 1$: $\exists x_{n_1} \in B(y, 1) \cap D$, $r = \frac{1}{2}$, protože prvků v libovolné kouli je nekonečno, tak $\exists n_2 > n_1, x_{n_2} \in B(y, \frac{1}{2}) \cap D$. Dále pokračujeme indukcí a dostaneme $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty, x_{n_k} \overset{k \to \infty}{\to} y$.

B: Víme $P \subset \bigcup_{y \in P} B(y, r_y)$ je otevřené pokrytí, tedy $\exists y_1, \ldots, y_n : P \subset \bigcup_{i=1}^n B(y_1, r_{y_i})$. $D = D \cap P \subset \bigcup_{i=1}^n (B(y_i, r_{y_i}) \cap F)$. D je nekonečné, ale podle B je vpravo konečné sjednocení konečných množin, tedy konečná množina. ↯. □

Důsledek (Borelova věta)
Nechť $a, b \in \mathbb{K}$, $a < b$ a $\{I_\alpha\}$ je systém otevřených intervalů. Pak

$$[a, b] \subset \bigcup_{\alpha \in A} I_\alpha \implies \exists A_0 \subset \text{ konečná } [a, b] \subset_{\alpha \in A_0} I_\alpha.$$

Důsledek
Spojitá funkce na $[a, b]$ je omezená.

Důsledek
f je spojitá na $[a, b]$ $\implies$ f je stejnoměrně spojitá na $[a, b]$.

Věta 3.4 (Cantorova, o uzavřených množinách)

Nechť (P,ϱ) *je úplný metrický prostor a* F_n *je posloupnost uzavřených neprázdných množin v* P *tak, že* $F_{n+1} \subset F_n$ *a* $\lim_{n\to\infty} \operatorname{diam} F_n = 0$. *Pak* $|\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n| = 1$.

Důkaz (Viz OM2/MetPro/MetPro.pdf Věta 6.1)
Zvolme $x_n \in F_n$ libovolně. Tvrdíme, že $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ je cauchyovská. Nechť $\varepsilon > 0$. $\exists n_0 \operatorname{diam} F_{n_0} < \varepsilon$. Nyní

$$\forall m, n \geq n_0 : x_n \in F_n \subset F_{n_0}, x_m \in F_m \subset F_{n_0} : \varrho(x_n, x_m) \leq \operatorname{diam} F_{n_0} < \varepsilon.$$

P je úplný, a tedy $x_n \to x \in P$. Nechť $j \in \mathbb{N}$ je pevné a $n \geq j$, pak $x_n \in F_n \subset F_j$ a $x_n \to x$, tedy (F_j je uzavřené) $x \in F_j \forall j$, tedy $x \in \bigcap_{j=1}^{\infty} F_j$. Naopak pokud $x, y \in \bigcap_{j=1}^{\infty} F_j$, pak zvolíme j tak, aby $\operatorname{diam} F_j < \varrho(x,y)$, tedy buď $x \notin F_j$ nebo $y \notin F_j$. □

Věta 3.5 (O totální omezenosti a úplnosti)

Metrický prostor (P,ϱ) *je kompaktní právě tehdy, když je totálně omezený a úplný.*

Důkaz
$\implies$ už máme hotové z věty výše a věty Kompaktnost a totální omezenost. $\Leftarrow$: Nechť $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset P$, chceme $\exists x_{n_k} \to x$. P je totálně omezený, tedy existuje konečná 1-síť $P \subset \bigcup_{i=1}^{h_1} B(s_i, 1)$. $\{x_n\}$ je nekonečná $\implies$ $\exists$ kulička $B_1 = B(s_i, 1)$ tak, že $|\{x_n | x_n \in B_1\}| = +\infty$. Zvolme $x_{n_1} \in B_1$.

Dále indukcí: Mějme $B_1, \ldots, B_{k-1}$ kuličky o poloměrech $1, \ldots, \frac{1}{k-1}$ tak, že pro $A_{k-1} = B_1 \cap \ldots \cap B_{k-1}$ platí $|\{x_n |\, x_n \in A_{k-1}\}| = +\infty$, a mějme $n_1 < \ldots < n_{k-1}$ tak, že $x_{n_j} \in A_j$, $\forall j \in [k-1]$. P je totálně omezený $\implies$ $\exists$ konečná $\frac{1}{k}$-síť $A_{k-1} \subset P \subset \bigcup_{i=1}^{h_k} B(s_i, \frac{1}{k})$. V A_{k-1} je nekonečně mnoho x_n, tedy $\exists B_k = B(s_i, \frac{1}{k})$, že pro $A_k = A_{k-1} \cap B_k$ platí $|\{x_n | x_n \in A_k\}| = +\infty$. Dále zvolme n_k tak, aby $n_k > n_{k-1}$ a $x_{n_k} \in A_k$.

x_{n_k} je cauchyovská, neboť pro $\varepsilon > 0$ $\exists n_0 : \frac{1}{n_0} < \varepsilon$, nechť $k, l \geq n_0$, pak $x_{n_k} \in A_k \subset A_{n_0}$ a $x_{n_l} \in A_l \subset A_{n_0}$, tedy jelikož $A_{n_0} \subset B_{n_0}$, $\varrho(x_{n_k}, x_{n_l}) < \frac{2}{n_0} < 2\varepsilon$. P je úplný, tedy existuje x tak, že $x_{n_k} \to x$. □

Věta 3.6 (O zúplnění metrickéůo prostoru)

Nechť (P,ϱ) *je metrický prostor. Pak existuje úplný metrický prostor* $(\tilde{P},\tilde{\varrho})$ *tak, že* $P \subset \tilde{P}$ *a* $\forall x, y \in P$ *platí* $\varrho(x,y) = \tilde{\varrho}(x,y)$.

Důkaz
Bez důkazu. □

Věta 3.7 (Arzela-Ascoli)

Nechť $A \subset C([0,1])$. *Pak* $\overline{A}$ *je kompaktní právě tehdy, když jsou funkce z* A *stejně omezené* *a stejně stejnoměrně spojité. Tedy pokud* $\exists K > 0$*:*

$$\forall f \in A \ \forall x \in [0,1] : |f(x)| \le K,$$

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists \delta > 0 \ \forall x, y \in [0,1] \ \forall f \in A : |x - y| < \delta \implies |f(x) - f(y)| < \varepsilon.$$

Důkaz

$\implies$: $\overline{A}$ je kompaktní $\implies$ $\overline{A}$ je omezená $\implies$ A je omezená $\subset B(0,K)$. Tedy $\forall f \in A \; \forall x \in [0,1] : |f(x)| \leq K$.

$\overline{A}$ je kompaktní $\implies$ $\overline{A}$ je totálně omezená. Nechť $\varepsilon > 0 \implies \exists$konečná ε-síť $\overline{A} \subset \bigcup_{i=1}^{k} B(f_i, \varepsilon)$. Funkce f_i je spojitá na $[0,1] \implies f$ je stejnoměrně spojitá na $[0,1]$. Tedy

$$\exists \delta_i > 0 \; \forall x, y : |x-y| < \delta_i \implies |f_i(x) - f_i(y)| < \varepsilon.$$

Položme $\delta = \min\{\delta_1, \ldots, \delta_k\}$. Nechť $f \in A$, $x, y \in [0,1]$: $|x-y| < \delta$. K tomuto $f \in A$ najdu f_i, aby $f \in B(f_i, \varepsilon)$. Potom

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - f_i(x)| + |f_i(x) - f_i(y)| + |f_i(y) - f(y)| < 2\varepsilon + \varepsilon = 3\varepsilon$$

$\Leftarrow$: Chceme dokázat, že pro $\{f_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \overline{A} \; \exists f_{n+k} \to f$. 1. krok, volba C: Nechť $m \in \mathbb{N}$. Ze stejnoměrné spojitosti pro $\varepsilon = \frac{1}{m}$

$$\exists \delta_m \; \forall x, y \; \forall n : |x-y| < \delta_m \implies |f_n(x) - f_n(y)| < \varepsilon = \frac{1}{m}.$$

Nyní $[0,1]$ pokryjeme $[0,1] \subset \bigcup_{j=1}^{k_m} B(c_j^m, \delta_m)$. Položme $C = \left\{C_j^m | m \in \mathbb{N}, j \in [k_m]\right\}$. C je zřejmě spočetné (spočetné sjednocení konečných).

2. krok, volba f_{n_k}, aby $\forall c \in C : f_{n_k}(c)$ konverguje. C je spočetná, tedy $C = \{c_i, i \in \mathbb{N}\}$. Ze stejné omezenosti $|f_n(c_1)| \leq K$, tedy existuje podposloupnost $f_{n_{k,1}}(c_1)$ posloupnosti $f_{n_k}(c_1)$, která konverguje. Nyní ze stejné omezenosti víme, že $|f_{n_{k,1}}(c_2)| \leq K$, tedy opět vybereme podposloupnost $f_{n_{k,2}}(c_2)$, která konverguje. Dále pokračujeme indukcí.

Položme $f_{n_k} = f_{n_{k,k}}$. Tato vybraná podposloupnost z f_n konverguje ve všech bodech C.

3. krok, f_{n_k} je cauchyovská. Nechť $\varepsilon >$ 0, k čemuž nalezneme $\frac{1}{m} < \varepsilon$. Z 1. kroku máme δ_m a $c_1^m, \ldots, c_{k_m}^m$. Z 2. kroku víme, že $f_{n_k}(c_j^m) \to \ldots (c_j^m)$, $\forall j \in [k_m]$. Tedy z BC podmínky v těchto bodech

$$\exists k_0 \; \forall k, l \geq k_0 : |f_{n_k}(c_j^m) - f_{n_k}(c_j^m)| < \varepsilon, \qquad \forall j \in [k_m].$$

Nechť nyní $x \in [0,1]$. Nalezneme $c_j^m \cdot |x - c_j^m| < \delta_m$:

$$|f_{n_k}(x) - f_{n_l}(x)| \leq |f_{n_k}(x) - f_{n_k}(c_j^m)| + |f_{n_k}(c_j^m) - f_{n_l}(c_j^m)| + |f_{n_l} - f_{n_l}(c_j^m)| < \frac{1}{m} + \varepsilon + \frac{1}{m} \leq 3\varepsilon.$$

Tedy f_{n_k} je cauchyovská a jelikož $C([0,1])$ je úplný, tak $\exists f \in C([0,1]) f_{n_k} \to f$. Nyní z uzavřenosti $\overline{A}$ je $f \in \overline{A}$. $\square$

3.2 Prostory L^p

Poznámka
Většina vět této podsekce i s důkazy se dá najít v W. Radim – Analýza v reálném a komplexním oboru.

Poznámka (Slovníček pro MIT a slabší povahy)
„Tyto skupiny nejsou totéž.“

- $\int_x f d\mu$ čteme $(R) \int_0^1 f(x)dx$.
- f je měřitelná čteme f je spojitá.
- $f = 0$, μ-s. v. čteme jako $f = 0$ všude.
- $(X, \mathcal{A}, \mu)$ čteme jako $([0,1], dx)$.

Věta 3.8 (Jensenova nerovnost)

Nechť $(X, \mathcal{A}, \mu)$ je pravděpodobnostní prostor (μ nezáporná), $f \in L^1(\mu)$, $a, b \in [-\infty, \infty]$ a $f : X \to (a, b)$. Je-li $\varphi : (a, b) \to \mathbb{R}$ konvexní funkce, pak

$$\varphi(\int_X f d\mu) \leq \int_X (\varphi \circ f) d\mu.$$

Důkaz
„Integrál je vlastně průměr a konvexní funkce je v průměru menší, než průměr jejich hodnot.“

Označme $t = \int_x f d\mu$. $\mu(X) = 1 \implies a < t < b$. φ je konvexní $\implies$

$$\implies \exists \beta \in \mathbb{R} : \varphi(s) \geq \varphi(t) + \beta(s - t) \qquad \forall s \in (a, b).$$

Toto použijeme pro $s = f(x)$:

$$\varphi(f(x)) \geq \varphi(t) + \beta \cdot (f(x) - t).$$

f je měřitelná a φ spojitá (neboť je konvexní) $\implies \varphi(f(x))$ je měřitelná.

Zintegrujeme:

$$\int_X \varphi(f(x))\mu(x) \geq \int_X \varphi(t) d\mu(x) + \beta \int_X (f(x) - t) d\mu(x),$$

$$\int_X \varphi(f(x))\mu(x) \geq \varphi(t) + \beta \cdot 0 = \varphi(t).$$

□

Příklad

Při $f(x_i) = a_i \in \mathbb{R}$, $\mu = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n}\delta_{x_i}$, $\varphi = \exp$ dostaneme z minulé věty AG nerovnost.

Příklad

$$ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q$$

, kde $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ a $a, b \geq 0$.

Řešení

$$\exp(\frac{1}{p}x + \frac{1}{q}y) \leq \frac{1}{p}e^x + \frac{1}{q}e^y,$$

$$e^{\frac{x}{p}} \cdot e^{\frac{y}{q}} \leq \frac{1}{p}e^x + \frac{1}{q}e^y.$$

K zadanému $a, b > 0$ vezmeme x, y aby $e^{\frac{x}{p}} = a$ a $e^{\frac{y}{q}} = b$. Pak

$$ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q.$$

Pro $a = 0$ nebo $b = 0$ je důkaz triviální.

Definice 3.3 (Sdružený index)

Nechť $1 < p < \infty$, pak číslo q splňující $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ nazveme sdružení. Pro $p = 1$ definujeme $q = \infty$ a opačně.

Věta 3.9 (Hölderova a Minkowského)

Nechť $X, \mathcal{A}, \mu$ je prostor s mírou, $1 < p < \infty$, q je sdružený exponent k p a $f, g : X \to [0, \infty]$ jsou měřitelné funkce. Potom platí Hölderova nerovnost:

$$\int_X f \cdot g dx \leq \left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int_X g^q d\mu\right)^{\frac{1}{q}}$$

a Minkowského nerovnost

$$\left(\int_X (f+g)^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_X g^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}}.$$

Důkaz
Označme $A = \left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}}$ a $B = \left(\int_X g^q d\mu\right)^{\frac{1}{q}}$. Pokud $A = 0$ (nebo $B = 0$), pak $f = 0$ skoro všude a nerovnost platí. Pokud $A = \infty$ nebo $B = \infty$, pak nerovnost také triviálně platí.

Položme $F(x) = \frac{1}{A} f(x)$ a $G(x) = \frac{1}{B} \cdot g(x)$. Pak

$$\int_X F(x)^p d\mu = \frac{1}{A^p} \int_X f(x)^p d\mu = 1, \qquad \int_X G(x)^q d\mu = 1.$$

Z $F(x) \cdot G(x) \leq \frac{1}{p}(F(x))^p + \frac{1}{q}(G(x))^q$ (Jangova? nerovnost: $\forall a, b \geq 0 : ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q$) dostaneme:

$$\int_X F(x)G(x)d\mu(x) \leq \frac{1}{p}\int_X (F(x))^p + \frac{1}{q}\int_X (G(x))^q = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, \qquad / \cdot AB$$

$$\int_X f(x)g(x)d\mu(x) \leq AB = \left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int_X g^q d\mu\right)^{\frac{1}{q}}.$$

$$\int_X (f+g)^p d\mu = \int_X f\cdot(f+g)^{p-1} + g\cdot(f+g)^{p-1} d\mu \leq \left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_X (f \;= g)^{(p-1)q}\right)^{\frac{1}{q}} + \left(\int_X g^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_X\right.$$

$$\leq \left[\left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_X g^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}}\right] \cdot \left(\int_X (f+g)^p d\mu\right)^{\frac{1}{q}}.$$

Je-li $\int_X (f \; + g)^p d\mu \neq 0$ (triviální) a $\neq \infty$ vydělíme

$$\left(\int_X (f+g)^p d\mu\right)^{p=1-\frac{1}{q}} \leq \left(\int_X f^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_X g^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}}.$$

Pokud je integrál výše roven ∞, pak využijeme konvexity funkce $t \mapsto t^p$:

$$\infty = \int_X \left(\frac{f(x)+g(x)}{2}\right)^p d\mu \leq \int_X \left(\frac{f(x)^p}{2} + \frac{g(x)^p}{2}\right) d\mu \implies \int f^p = \infty \vee \int g^p = \infty.$$

$\square$

Definice 3.4 (L^p prostory)

Nechť $(X, \mathcal{A}, \mu)$ je prostor s mírou a $1 \leq p < \infty$. Definujeme prostor L^p jako

$$L^p(X,\mu) := \{f : X \to \mathbb{R} | ||f||_{L^p} < \infty\}, \text{ kde } ||f||_{L^p} := \left(\int_X |f|^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}}.$$

Nechť $g : X \to [0, \infty]$ je měřitelná. Esenciální supremum g definujeme jako

$$\operatorname{esssup} g := \inf\{\alpha | \mu(q > \alpha) = 0\}.$$

(Pro $p = \infty$) tedy definujeme

$$L^\infty(X,\mu) := \{f : X \to \mathbb{R} | ||f||_{L^p} < \infty\}, \text{ kde } ||f||_{L^\infty} := \operatorname{esssup}_x |f|.$$

Věta 3.10 (Trojúhelníková nerovnost v L^p)

Nechť $1 \leq p \leq \infty$. Pak pro $f, g \in L^p(X,\mu)$ platí

$$||f+g||_{L^p} \leq ||f||_{L^p} + ||g||_{L^p}.$$

Důkaz

Pro $1 \leq p < \infty$ viz Minkowski: $f(x) = a(x) - c(x)$, $g(x) = c(x) - b(x)$, $f(x) + g(x) = a(x) - b(x)$:

$$\left(\int_X |a(x)-b(x)|^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\int_X |a(x)-c(x)|^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_X |c(x)-b(x)|^p d\mu\right)^{\frac{1}{p}}.$$

Pro $p = \infty$: z definice esssup $\exists N_1, N_2, N_3$, $\mu(N_1) = \mu(N_2) = \mu(N_3) = 0$,

$$||f||_{L^\infty} = \sup_{x\in X\setminus N_1} |f(x)|, ||g||_{L^\infty} = \sup_{X\setminus N_2} |g(x)|, ||f+g||_{L^\infty} = \sup_{x\in X\setminus N_3} |f(x)+g(x)|, \qquad N = N_1 \cup N_2 \cup N_3.$$

$$\sup_{x\in X\setminus N} |f(x) + g(x)| \leq \sup_{x\in X\setminus N} |f(x)| + |g(x)| \leq \sup_{x\in X\setminus N} |f(x)| + \sup_{x\in X\setminus N} |g(x)|.$$

$\square$

Poznámka

Pokud budeme uvažovat L_p jako jeho kvocient podle rovnosti skoro všude, pak je $|| \cdot ||_{L^p}$ norma a L^p je metrický prostor s metrikou.

Věta 3.11 (Úplnost L^p prostorů)

Nechť $1 \leq p \leq \infty$. Pak je prostor $L^p(X,\mu)$ úplný.

Důkaz
$1 \leq p < \infty$. Mějme f_n cacuhyovskou nerovnost v L^p. Tj.

$$\forall \varepsilon > 0 \; \exists n_0 \; \forall m, n \geq n_0 : \left(\int_X |f_n(x) - f_m(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}.$$

Najdeme $f(x)$ jako bodovou limitu (skoro všude) vhodně vybrané podposloupnost. Z cauchyovskosti $\exists k_1 < k_2 < \ldots < k_j < \ldots$ tak, že

$$\forall j : \int_X |f_{k_j}(x) - f_{k_{j+1}}(x)|^p d\mu \leq \frac{1}{2^j}.$$

Položme $g_n(x) = \sum_{j=1}^n |f_{k_j}(x) - f_{k_{j+1}(x)}|$ a $g(x) = \sum_{j=1}^\infty |f_{k_j}(x) - f_{k_{j+1}}(x)|$. Pak z Minkowského nerovnosti $||g_n||_{L^p} \leq \sum_{j=1}^n ||f_{k_j} - f_{k_{j+1}}||_{L^p} \leq \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2^j}\right)^{\frac{1}{p}} \leq C_p$.

Z Fatouova lemmatu

$$\int_X \liminf_{n\to\infty} g_n^p d\mu(x) \leq \liminf_{n\to\infty} \int_X g_n^p(x) d\mu \leq C_p.$$

Tedy řada $\sum_{j=1}^\infty (f_{k_j}(x) - f_{k_{j+1}(x)})$ konverguje absolutně skoro všude $\implies$ funkce $f(x) = f_{k_1}(x) - \sum_{j=1}^\infty (f_{k_j} - f_{k_{j+1}})$ je definována skoro všude. Nyní

$$f_{k_n}(x) = f_{k_1}(x) - \sum_{j=1}^{n-1} (-f_{k_j}(x) - f_{k_j}(x)) \to f(x) \text{ skoro všude.}$$

Zbývá $f \in L^p$ a $f_n \xrightarrow{L^p} f$. Víme, že f_n je cauchyovská. Z Fatouova lemmatu

$$\int_X |f(x) - f_n(x)|^p d\mu = \int_X \liminf_{n\to\infty} |f_{k_n} - f_m|^p d\mu \leq \liminf_{n\to\infty} \int_X |f_{k_n} - f_m|^p d\mu \leq \varepsilon \implies$$

$$\implies f - f_m \in L^p \implies (f - f_m) + f_m \in L^p \wedge \varrho(f, f_m) \leq \varepsilon^{\frac{1}{p}}.$$

Tedy $f_n \to f$. $\square$