

Organizační úvod

TODO!!!

Úvod

TODO!!!

Věta 0.1 (Spojitý obraz kompaktu)

Nechť (P, ϱ) a (Q, τ) jsou metrické prostory a $f : P \rightarrow Q$ je spojitý 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 $\exists x \in K$, $x_{n_k} \rightarrow x \in K$. Podle Heineho věty $f(x_{n_k}) = f(y_{n_k}) \rightarrow f(x) \in f(K)$. □

└

Definice 0.1

Nechť (\mathbb{P}, ϱ) a (\mathbb{Q}, τ) jsou metrické prostory, $K \subset \mathbb{P}$ a $f : K \rightarrow \mathbb{Q}$. 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}, ϱ) a (\mathbb{Q}, τ) jsou MP, $K \subset \mathbb{P}$ je kompaktní a nechť $f : K \rightarrow \mathbb{Q}$ 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 $x_{n_k} \rightarrow x_0 \in K$.

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

Z Heineho věty $f(x_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$ a $f(y_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$. Ale my máme, že jsou od sebe vzdáleny $\geq \varepsilon$. □

└

1 Úplné metrické prostory

Definice 1.1 (Cauchyovská posloupnost)

Nechť (\mathbb{P}, ϱ) 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:

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

Důsledek

Každá konvergentní posloupnost je cauchyovská.

Definice 1.2 (Úplný prostor)

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

Věta 1.1 (Vztah kompaktnosti a úplnosti)

Nechť (\mathbb{P}, ϱ) 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 $\implies \exists x_{n_k} \rightarrow x \in \mathbb{P}$. Nechť $\varepsilon > 0$. Najdu n_0 z BC podmínky. Z $x_n \rightarrow x \exists k_0 \forall k \geq k_0 : \varrho(x_{n_k}, x) < \varepsilon$. Nalezneme n_k , $k \geq k_0$, $n_k \geq n_0$. Pak

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

└

□

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

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

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 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) \in \mathbb{R}$. Takto jsme si zadefinovali novou funkci f .

$f_n \rightarrow f$. Provedeme limitu $n \rightarrow \infty$ 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 $\varrho(f, f_n) \leq \varepsilon \implies f_n \rightarrow f$.

f je spojitá: Necht $y \in [0, 1]$. Chceme dokázat, že f je spojitá v y . Necht $\varepsilon > 0$. 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 $\forall x \in [0, 1], |x - y| < \delta$:

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

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

Věta 1.3 (Banachova, o kontrakci)

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

┌ *Důkaz*

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

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

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

$$\begin{aligned} \varrho(x_m, x_n) &\leq \varrho(x_{m+1}, x_m) + \dots + \varrho(x_n, x_{n-1}) \leq \varrho(x_1, x_2) \cdot (\gamma^{m-1} + \dots + \gamma^{n-2}) \leq \\ &\leq \varrho(x_2, x_1) \gamma^{n_0-1} \frac{1}{1-\gamma}. \end{aligned}$$

Tedy x_n je cauchyovská a má limitu.

Tvrdíme, že $T(x_n) \rightarrow T(x)$: T je spojitý 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 $x_n \rightarrow x \implies T(x_n) \rightarrow T(x)$. Víme, že $x_{n+1} = T(x_n)$, tj.

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

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

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

└

□

Věta 1.4 (O převedení na integrální tvar)

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

┌ *Důkaz*

\implies : víme $y'(s) = f(s, y(s))$ je spojitý, 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 $f(x_0) = y_0$. □

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 $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ 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

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

Definujeme operátor $T : C([x_0 - \delta, x_0 + \delta]) \rightarrow C([x_0 - \delta, x_0 + \delta])$ 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 $T : X \rightarrow X$: $y \in X, y(x) \in [y_0 - \Delta, y_0 + \Delta]$.

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

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

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

$$\begin{aligned} |T[y](x) - T[\tilde{y}](x)| &= \left| \int_{x_0}^x (f(s, y(s)) - f(s, \tilde{y}(s)))ds \right| \leq \int_{x_0}^x |f(s, y(s)) - f(s, \tilde{y}(s))| ds \\ &\leq \int_{x_0}^x |K \cdot (y(s) - \tilde{y}(s))| ds < |x_0 - x| \cdot K \cdot \sup_{s \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]} |y(s) - \tilde{y}(s)| \leq \delta \cdot K \cdot \varrho(y, \tilde{y}) \leq \frac{1}{2} \varrho(y, \tilde{y}). \end{aligned}$$

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 $f : M \rightarrow \mathbb{R}$.

Vektorovou funkcí více reálných proměnných rozumíme zobrazení $f : M \rightarrow \mathbb{R}^m$, 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)

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

Definice 2.4 (Limita funkce)

Nechť $F : G \rightarrow \mathbb{R}$, 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 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A$.

Definice 2.5 (Spojítost)

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

Definice 2.6 (Spojítost a limita vektorové funkce)

Spojítost 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)

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

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 $f : G \rightarrow \mathbb{R}$. Pak je ekvivalentní

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

2.2 Parciální derivace a totální diferenciál

Definice 2.8 (Parciální derivace)

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

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

pokud tato limita existuje.

Definice 2.9 (Extrémy)

Nechť $M \subset \mathbb{R}^n$, $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ 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 $f : G \rightarrow \mathbb{R}$. 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

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

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

Definice 2.10 (Derivace ve směru)

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

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

pokud limita existuje.

Definice 2.11 (Totální diferenciál)

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

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

Poznámka

Lineární zobrazení $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ lze reprezentovat jako $L(h) = A_1 h_1 + \dots + A_n h_n$.

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

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 otevřená, $a \in G$ a $f : G \rightarrow \mathbb{R}$. 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 $D_f(a)(h) = \frac{\partial f}{\partial x_1} h_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} h_n$. Navíc pro $0 \neq v \in \mathbb{R}^n$ platí $\frac{\partial f}{\partial v}(a) = D_f(a)(v)$.

┌ Důkaz

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

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

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

TODO!!!

TODO!!!

Věta 2.4 (O přírůstku funkce)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená a $f : G \rightarrow \mathbb{R}$ má totální diferenciál v každém bodě G . Nechť $a, b \in G$ a nechť úsečka L spojující a, b je obsažena v G , tj. $L = \{(1-t) \cdot a + t \cdot b \mid t \in [0, 1]\} \subset G$. 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 řetězkového pravidla $\frac{\partial F}{\partial t}(\zeta) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial y_j}(\zeta)(b_j - a_j) = Df(\zeta)(b - a)$. □

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 $f : G \rightarrow \mathbb{R}$. 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. \square

Definice 2.14 (Hessova matice)

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

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

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

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

Věta 2.6 (Taylorova věta pro druhý řád)

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

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

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

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

┌ Důkaz

Funkce $A(h) = Q(h, h) = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}h_jh_i$ je spojitá. Množina $M = \{h \in \mathbb{R}^n \mid \|h\| = 1\}$ 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

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

└ □

Věta 2.8 (Postačující podmínky pro lokální extrém)

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

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

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

┌

Důkaz

1) Z předchozí věty víme, že

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

Z té ještě předchozejší víme, že

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

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

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

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

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

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

2) obdobně.

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

Dále $\varphi''(t) = D^2f(a + t \cdot h_1)(h_1, h_1)$, tedy $\varphi''(0) = D^2f(a)(h_1, h_1) > 0$. 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. \square

└

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, $F : G \rightarrow \mathbb{R}$, $\tilde{x} \in \mathbb{R}^n$, $\tilde{y} \in \mathbb{R}$, $[\tilde{x}, \tilde{y}] \in G$ a nechť platí

1. $F \in C^p(G)$,
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

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

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 mezhodnot) $\exists! y \in (\tilde{y} - \zeta_1, \tilde{y} + \zeta_1)$ 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(x) = -\frac{\frac{\partial F}{\partial x_i}(x, \varphi(x))}{\frac{\partial F}{\partial y}(x, \varphi(x))}$$

Věta 2.10 (O implicitních funkcích)

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

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

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 $M = \{z \in \mathbb{R}^n | g_1(z) = \dots = g_m(z) = 0\}$. 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

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

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 $\implies \frac{\partial \psi}{\partial x_j}(x) = 0, j \in [k]$.

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

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 $A = \text{LO}\{v_1, \dots, v_k\}$. $\dim A = k$. 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. $Dg_l(a)$. \square

2.5 Regulární zobrazení

Definice 2.16 (Difeomorfismus)

Nechť $G \subset \mathbb{R}^n$ je otevřené a $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$. 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 $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$. Řekneme, že f je regulární zobrazení, jestliže $f \in C^1(G)$ 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 $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ 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 $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$, $F(y, x) = f(x) - y \in \mathbb{C}^1$. 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 .) \square

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 -sít, totálně omezený)

Nechť (P, ϱ) je metrický prostor. Nechť $\varepsilon > 0$ a $H \subset P$. Řekneme, že H je ε -sít 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 -sít 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-sít x_1, \dots, x_n . Označme $d = \max \{\varrho(x_i, x_j) \mid i, j \in [n]\}$. 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 $P \subset B(x_0, d + 2)$. \square