

Matematika III – 3. týden
Funkce více proměnných: Implicitně definovaná
zobrazení a vázané extrémny

Jan Slovák

Masarykova univerzita
Fakulta informatiky

30.9. – 4. 10. 2013

Obsah přednášky

- 1 Literatura
- 2 Implicitně zadaná zobrazení
 - Připomenutí z minulé přednášky
 - Věta o implicitní funkci
- 3 Tečny a normály k implicitně zadaným plochám
 - Gradient funkce
 - Tečné a normálové prostory
- 4 Vázané extrémny

Kde je dobré číst?

- Zuzana Došlá, Roman Plch, Petr Sojka, Diferenciální počet funkcí více proměnných s programem Maple, MU Brno, 1999, 273 s.
- J. Slovák, M. Panák, M. Bulant, Matematika drsně a svižně, Muni Press, Brno 2013, v+773 s., elektronická edice www.math.muni.cz/Matematika_drsne_svizne

Připomenutí z minulé přednášky

Zobrazení $F : E_n \rightarrow E_m$,

$F(x_1, \dots, x_n) = (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$ je třídy C^1 ,
jestliže tuto vlastnost mají všechny funkce f_1, \dots, f_m .

$$D^1F(x) = \begin{pmatrix} df_1(x) \\ df_2(x) \\ \vdots \\ df_m(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} (x)$$

se nazývá **Jacobiho matice zobrazení F** v bodě x . Lineární zobrazení $D^1F(x)$ definované na přírůstcích $v = (v_1, \dots, v_n)$ pomocí stejně značené Jacobiho matice nazýváme **diferenciál zobrazení F** v bodě x z definičního oboru, jestliže

$$\lim_{v \rightarrow 0} \frac{1}{\|v\|} (F(x+v) - F(x) - D^1F(x)(v)) = 0.$$

Zobrazení $F : E_n \rightarrow E_m$, jehož všechny souřadné funkce mají spojitě parciální derivace v okolí bodu $x \in E_n$, má diferenciál $D^1F(x)$ zadaný Jacobiho maticí (tj. diferenciál je lineární zobrazení s touto maticí).

Theorem ("Chain Rule")

Nechť $F : E_n \rightarrow E_m$ a $G : E_m \rightarrow E_r$ jsou dvě diferencovatelná zobrazení, přičemž definiční obor G obsahuje celý obor hodnot F . Pak také složené zobrazení $G \circ F$ je diferencovatelné a jeho diferenciál je v každém bodě z definičního obodu F kompozicí diferenciálů

$$D^1(G \circ F)(x) = D^1G(F(x)) \circ D^1F(x).$$

Příslušná Jacobiho matice je dána součinem příslušných Jacobiho matic.

Theorem (Věta o inverzním zobrazení)

Nechť $F : E_n \rightarrow E_n$ je zobrazení třídy C^1 na nějakém okolí bodu $x_0 \in E_n$ a nechť je Jacobiho matice $D^1f(x_0)$ invertibilní. Pak na nějakém okolí bodu x_0 existuje inverzní zobrazení F^{-1} a jeho diferenciál v bodě $F(x_0)$ je inverzním zobrazením k $D^1F(x_0)$, tzn. je zadán inverzní maticí k Jacobiho matici zobrazení F v bodě x_0 .

Věta o implicitní funkci

Pro jednoduchost vyložíme ideu v rovině E_2 :

Pro spojitě diferencovatelné zobrazení $F(x, y) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ hledejme body (x, y) , ve kterých platí $F(x, y) = 0$. Příkladem může být třeba obvyklá (implicitní) definice přímek a kružnic:

$$F(x, y) = ax + by + c = 0$$

$$F(x, y) = (x - s)^2 + (y - t)^2 - r^2 = 0, \quad r > 0.$$

V prvním případě je (při $b \neq 0$) předpisem zadaná funkce

$$y = f(x) = -\frac{a}{b}x - \frac{c}{b}$$

pro všechna x , ve druhém umíme pouze pro (a, b) splňující rovnici kružnice a $b \neq t$ najít okolí bodu a , na kterém nastane jedna z

$$y = f(x) = t + \sqrt{(x - s)^2 - r},$$

$$y = f(x) = t - \sqrt{(x - s)^2 - r}.$$

Krajní body intervalu $[t - r, t + r]$ také vyhovují rovnici kružnice, platí v nich ale $F_y(s \pm r, t) = 0$, což vystihuje polohu tečny ke kružnici v těchto bodech rovnoběžné s osou y . **V těchto bodech skutečně neumíme najít okolí, na němž by kružnice byla popsána jako funkce $y = f(x)$.**

Navíc umíme i derivace:

$$f'(x) = \frac{1}{2} \frac{2(x-s)}{\sqrt{(x-s)^2 - r^2}} = \frac{x-s}{y-t} = -\frac{F_x}{F_y}.$$

Naopak, pokud budeme chtít najít závislost $x = f(y)$ takovou, aby $F(f(y), y) = 0$, pak v okolí bodů $(s \pm r, t)$ bez problémů uspějeme. Všimněme si, že v těchto bodech je parciální derivace F_x nenulová.

Zhrňme pozorování (pro pouhé dva příklady):

Pro funkci $F(x, y)$ a bod $(a, b) \in E_2$ takový, že $F(a, b) = 0$, umíme najít funkci $y = f(x)$ splňující $F(x, f(x)) = 0$, pokud je $F_y(a, b) \neq 0$. V takovém případě umím i vypočítat $f'(x) = -F_x/F_y$. Dokážeme, že takto to platí vždy, navíc rozšířené i na libovolné počty proměnných.

Poslední tvrzení o derivaci přitom je dobře zapamatovatelné (a při pečlivém vnímání věcí i pochopitelné) z výrazu pro diferenciál:

$$0 = dF = F_x dx + F_y dy = (F_x + F_y f'(x)) dx.$$

Obdobně pro implicitní výrazy $F(x, y, z) = 0$, kdy hledáme funkci $g(x, y)$ takovou, že $F(x, y, g(x, y)) = 0$. Např. graf funkce $f(x, y) = x^2 + y^2$ (rotační paraboloid) můžeme implicitně zadat rovnicí

$$0 = F(x, y, z) = z - x^2 - y^2.$$

Jaké dimenze se mohou/mají v problému vyskytovat obecně?
Pokud bychom pro naši poslední F chtěli najít křivku $c(x) = (c_1(x), c_2(x))$ v rovině takovou, že

$$F(x, c(x)) = F(x, c_1(x), c_2(x)) = 0,$$

pak to lze, ale výsledek nebude jednoznačný pro danou počáteční podmínku.

Obecný postup:

Jedna funkce $m + 1$ proměnných zadává implicitně nadplochu v \mathbb{R}^{m+1} , kterou vyjadřujeme alespoň lokálně jako graf jedné funkce v m proměnných.

Proto n funkcí v $m + n$ proměnných bude zadávat průnik n nadploch v \mathbb{R}^{m+n} , což je ve „většině“ případů m -rozměrný objekt. Příklad: dvě rovnice $f(x, y, z) = 0$, $g(x, y, z) = 0$ v E_3 zadávají (za nějaké podmínky na derivace) křivku v E_3 .

Uvažujme proto spojitě diferencovatelné zobrazení

$$F = (f_1, \dots, f_n) : \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^n.$$

Jacobiho matice tohoto zobrazení bude mít n řádků a $m + n$ sloupců a můžeme si ji symbolicky zapsat jako

$$D^1F = (D_x^1F, D_y^1F) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{m+1}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{m+n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_m} & \frac{\partial f_n}{\partial x_{m+1}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_{m+n}} \end{pmatrix},$$

kde $(x_1, \dots, x_{m+n}) \in \mathbb{R}^{m+n}$ zapisujeme jako $(x, y) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n$, D_x^1F je matice s n řádky a prvními m sloupci v Jacobiho matici, zatímco D_y^1F je čtvercová matice řádu n se zbylými sloupci. Vícerozměrnou analogií k předchozí úvaze s nenulovou parciální derivací podle y je požadavek, aby matice D_y^1F byla invertibilní.

Theorem (Věta o implicitním zobrazení)

Nechť $F : \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ je zobrazení třídy C^1 na otevřeném okolí bodu $(a, b) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n = \mathbb{R}^{m+n}$, ve kterém je $F(a, b) = 0$ a $\det D_y^1 F \neq 0$. Potom existuje zobrazení třídy C^1 $G : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ definované na nějakém okolí U bodu $a \in \mathbb{R}^m$ s obrazem $G(U)$, který obsahuje bod b , a takové, že $F(x, G(x)) = 0$ pro všechny $x \in U$. Navíc je Jacobiho matice $D^1 G$ zobrazení G na okolí bodu a zadána součinem matic

$$D^1 G(x) = -(D_y^1 F)^{-1}(x, G(x)) \cdot D_x^1 F(x, G(x)).$$

Dokážeme pro nejjednodušší případ rovnice $F(x, y) = 0$ s funkcí F dvou proměnných.

Rozšíříme funkci F na

$$\tilde{F} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, \quad (x, y) \mapsto (x, F(x, y)).$$

Jacobiho matice zobrazení \tilde{F} je

$$D^1\tilde{F}(x, y) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ F_x(x, y) & F_y(x, y) \end{pmatrix}.$$

Z předpokladu $F_y(a, b) \neq 0$ vyplývá, že totéž platí i na nějakém okolí bodu (a, b) a tam je funkce \tilde{F} invertibilní a \tilde{F}^{-1} je jednoznačně definované a spojitě diferencovatelné.

Nechť $\pi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ je projekce na druhou souřadnici, pak

$$f(x) = \pi \circ \tilde{F}^{-1}(x, 0)$$

je spojitě diferencovatelná funkce.

Spočteme $F(x, f(x)) = F(x, \pi(\tilde{F}^{-1}(x, 0)))$.

Z definice $\tilde{F}(x, y) = (x, F(x, y))$ vidíme, že i její inverze má tvar

$\tilde{F}^{-1}(x, y) = (x, \pi\tilde{F}^{-1}(x, y))$. Proto

$$F(x, f(x)) = \pi(\tilde{F}(x, \pi(\tilde{F}^{-1}(x, 0)))) = \pi(\tilde{F}(\tilde{F}^{-1}(x, 0))) = \pi(x, 0) = 0.$$

Tím máme dokázanu první část věty a zbývá spočíst derivaci funkce $f(x)$.

Tuto derivaci můžeme odečíst opět z věty o inverzním zobrazení pomocí matice $(D^1\tilde{F})^{-1}$.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ F_x(x, y) & F_y(x, y) \end{pmatrix}^{-1} = (F_y(x, y))^{-1} \begin{pmatrix} F_y(x, y) & 0 \\ -F_x(x, y) & 1 \end{pmatrix}.$$

Dle definice $f(x) = \pi\tilde{F}^{-1}(x, 0)$ nás z této matice zajímá první položka na druhém řádku, která je právě Jacobiho maticí D^1f . V našem jednoduchém případě je to právě požadovaný skalár $-F_x(x, f(x))/F_y(x, f(x))$.

Důkaz věty je ukončen. Pro obecný případ je zcela stejný, jen pracujeme s násobením matic a vektorů místo skalárů.

Gradient funkce

Definition

Pro spojitě diferencovatelnou funkci $F(x_1, \dots, x_n) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ se vektor

$$D^1 F = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)$$

nazývá **gradient funkce** F .

V technické a fyzikální literatuře se často zapisuje také jako $\text{grad } F$.

Rovnost $F(x_1, \dots, x_n) = b$ s pevnou hodnotou $b \in \mathbb{R}$ zadává podmnožinu $M \subset \mathbb{R}^n$, která má vlastnosti $(n - 1)$ -rozměrné nadplochy. Přesněji: pokud je vektor parciálních derivací nenulový, můžeme lokálně množinu M popsat jako graf spojitě diferencovatelné funkce v $n - 1$ proměnných.

Hovoříme v této souvislosti také o **úrovňových množinách** M_b .

Na derivacích křivek ležících v úrovněvé množině M_b se bude diferenciál dF vždy vyčíslovat nulově:

$F(c(t)) = b$ pro všechna t , proto

$$\frac{d}{dt}F(c(t)) = dF(c'(t)) = 0.$$

Pro obecný vektor $v = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^n$ je velikost příslušné směrové derivace funkce F :

$$|d_v F| = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} v_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} v_n \right| = \cos \varphi \|D^1 F\| \|v\|$$

kde φ je odchylka vektoru v od gradientu F . Dokázali jsme:

Theorem

Směr zadaný gradientem v bodě $x = (x_1, \dots, x_n)$ je právě ten směr, ve kterém funkce F nejrychleji roste.

Tečná rovina k neprázdné úrovněvé množině M_b v okolí jejího bodu s nenulovým gradientem $D^1 F$ je určena ortogonálním doplňkem ke gradientu.

Násobkům gradientu v tomto případě říkáme **normálový vektor** nadplochy M_b .

Theorem

Pro funkci F n proměnných a bod $P = (a_1, \dots, a_n) \in M_b$ v jehož okolí je M_b grafem funkce $(n - 1)$ proměnných je implicitní rovnice pro tečnou nadrovinu

$$0 = \frac{\partial f}{\partial x_1}(P) \cdot (x_1 - a_1) + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n}(P) \cdot (x_n - a_n).$$

Example (Model osvětlení 3D objektu)

Pro 2D povrch známe směr v dopadu světla, tj. máme množinu M zadanou implicitně rovnicí $F(x, y, z) = 0$ a vektor v . Intenzitu osvětlení bodu $P \in M$ pak definujeme jako $I \cos \varphi$, kde φ je úhel mezi normálou zadanou gradientem a vektorem opačným ke směru světla. (Znaménko říká, kterou stranu plochy osvětlujeme.)

Např. $v = (1, 1, -1)$ (tj. „šikmo dolů“) a

$F(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 1$. Pro bod $P = (x, y, z) \in M$

$$I(P) = \frac{\text{grad } F \cdot v}{\|\text{grad } F\| \|v\|} I_0 = \frac{-2x - 2y + 2z}{2\sqrt{3}} I_0.$$

Dle očekávání je plnou intenzitou I_0 osvětlen bod

$P = \frac{1}{\sqrt{3}}(-1, -1, 1)$ na povrchu koule.

Tečné a normálové prostory

Obecné dimenze: funkce $F = (f_1, \dots, f_n) : \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ a n rovnic

$$f_i(x_1, \dots, x_{m+n}) = b_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

dle věty o implicitní funkci je „většinou“ množina všech řešení (x_1, \dots, x_{m+n}) grafem zobrazení $G : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$. Pro pevnou volbu $b = (b_1, \dots, b_n)$ je samozřejmě množinou M všech řešení průnik nadploch $M(b_i, f_i)$ příslušejících jednotlivým rovnicím $f_i = b_i$.

Totéž platí pro tečné směry a normálové směry:

Afinní podprostor v \mathbb{R}^{m+n} obsahující právě všechny tečny k M bodem P dán rovnicemi:

$$0 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(P) \cdot (x_1 - a_1) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(P) \cdot (x_{m+n} - a_{m+n})$$

⋮

$$0 = \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(P) \cdot (x_1 - a_1) + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(P) \cdot (x_{m+n} - a_{m+n}).$$

Tento podprostor se nazývá **tečný prostor** k (implicitně zadané) ploše M v bodě P . **Normálový prostor** v bodě P je afinní podprostor generovaný bodem P a gradienty všech funkcí f_1, \dots, f_n v bodě P , tj. řádky Jacobiho matice D^1F .

Spočtěme tečnu a normálový prostor ke kuželosečce v \mathbb{R}^3 .
Uvažujme rovnici

$$0 = f(x, y, z) = z - \sqrt{x^2 + y^2}$$

kuželu s vrcholem v počátku a rovinu zadanou

$$0 = g(x, y, z) = z - 2x + y + 1.$$

Bod $P = (1, 0, 1)$ patří jak kuželu tak rovině a průnik M těchto dvou ploch je křivka.

Její tečnou v bodě P bude přímka zadaná rovnicemi

$$0 = - \frac{1}{2\sqrt{x^2 + y^2}} 2x \Big|_{x=1, y=0} \cdot (x - 1) - \frac{1}{2\sqrt{x^2 + y^2}} 2y \Big|_{x=1, y=0} \cdot y + 1 \cdot (z - 1)$$

$$= -x + z$$

$$0 = -2(x - 1) + y + (z - 1) = -2x + y + z + 1$$

zatímco rovina kolmá k naší křivce bodem P bude parametricky dána výrazem

$$(1, 0, 1) + \tau(-1, 0, 1) + \sigma(-2, 1, 1)$$

s parametry τ a σ .

V praxi mívají optimalizační úlohy často $m + n$ parametrů, které jsou vázány n podmínkami. V našem jazyce diferenciálního počtu tedy hledáme extrémny spojitě diferencovatelné funkce h na množině bodů M zadaných implicitně rovnicí $F(x_1, \dots, x_{m+n}) = 0$. Pokud je M ve všech svých bodech grafem hladkého zobrazení v m proměnných, musí být každý extrém $P \in M$ stacionárním bodem, tj. pro každou křivku $c(t) \subset M$ procházející přes $P = c(0)$ musí být $h(c(t))$ extrémem pro tuto funkci jedné proměnné. Proto musí platit

$$\frac{d}{dt} h(c(t))|_{t=0} = d_{c'(0)} h(P) = dh(P)(c'(0)) = 0.$$

Tato vlastnost je ekvivalentní tvrzení, že gradient h leží v normálovém podprostoru (přesněji v jeho zaměření). Takové body $P \in M$ budeme nazývat **stacionární body** funkce H vzhledem k vazbám F .

Normálový prostor k naší množině M je generován řádky Jacobiho matice zobrazení F a stacionární body jsou proto ekvivalentně určeny následujícím tvrzením, kterému se říká **metoda Lagrangeových multiplikátorů**:

Theorem

Nechť $F = (f_1, \dots, f_n) : \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitě diferencovatelná v okolí bodu P , $F(P) = 0$ a M je zadána implicitně rovnicí $F(x, y) = 0$ a hodnost matice D^1F v bodě P je n . Pak P je stacionárním bodem spojitě diferencovatelné funkce $h : \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}$ právě, když existují reálné parametry $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ takové, že

$$\text{grad } h = \lambda_1 \text{ grad } f_1 + \dots + \lambda_n \text{ grad } f_n.$$

Všimněme si počtu neznámých a rovnic v tomto algoritmu: gradienty jsou vektory o $m + n$ souřadnicích, tedy požadavek z věty dává $m + n$ rovnic. Jako proměnné máme jednak souřadnice x_1, \dots, x_{m+n} hledaných stacionárních bodů P , ale navíc také n parametrů λ_i v hledané lineární kombinaci. Zbývá však požadavek, že hledaný bod P patří implicitně zadané množině M , což představuje dalších n rovnic. Celkem tedy máme $2n + m$ rovnic pro $2n + m$ proměnných a proto lze očekávat, že řešením bude diskrétní množina bodů P (tj. každý z nich zpravidla bude izolovaným bodem).