

Analiza 2a

12. november 2024

Kazalo

1	Funkcije več spremenljivk	3
1.1	Prostor \mathbb{R}^n	3
1.1.1	Prostor \mathbb{R}^n	3
1.1.2	Zaporedja v \mathbb{R}^n	3
1.2	Zveznost preslikav iz \mathbb{R}^n v \mathbb{R}^m	4
1.2.1	Zveznost preslikav iz \mathbb{R}^n v \mathbb{R}	4
1.2.2	Zveznost preslikav iz \mathbb{R}^n v \mathbb{R}^m	5
1.3	Parcialni odvodi in diferenciabilitynost	6
1.3.1	Parcialni odvod	6
1.3.2	Diferenciabilitynost	6
1.3.3	Višji parcialni odvodi	7
1.3.4	Diferenciabilitynost preslikav	7
1.4	Izrek o implicitni preslikavi	9
1.4.1	Osnovna verzija izreka o implicitni preslikavi	9
1.4.2	Izrek o inverzni preslikavi	9
1.4.3	Izrek o implicitni preslikavi	11
1.5	Podmnogoterosti v \mathbb{R}^n	12
2	Integrali s parametri	13
2.1	Odvajanje integralov s parametri	13

1 Funkcije več spremenljivk

1.1 Prostor \mathbb{R}^n

1.1.1 Prostor \mathbb{R}^n

Definicija 1.1.1. Prostor \mathbb{R}^n je kartezični produkt $\underbrace{\mathbb{R} \times \cdots \times \mathbb{R}}_n$. Na njem definiramo seštevanje in množenje s skalarjem po komponentah. S tema operacijama je $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ vektorski prostor nad \mathbb{R} . Posebej definiramo še skalarni produkt

$$x \cdot y = \sum_{i=1}^n x_i y_i,$$

ki nam da normo $\|x\| = \sqrt{x \cdot x}$ in metriko $d(x, y) = \|x - y\|$. (\mathbb{R}^n, d) je tako metrični prostor.

Definicija 1.1.2. Naj bosta $a, b \in \mathbb{R}^n$ vektorja, za katera je $a_i \leq b_i$ za vse $i \in \{1, \dots, n\}$. Zaprt kvader, ki ga določata a in b , je množica

$$[a, b] = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \forall i \in \{1, \dots, n\} : a_i \leq x_i \leq b_i\}.$$

Podobno definiramo odprt kvader kot

$$(a, b) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \forall i \in \{1, \dots, n\} : a_i < x_i < b_i\}.$$

Opomba. Odprte množice v normah $\|x\|_\infty$ in $\|x\|_2$ so iste.

Izrek 1.1.3. Množica $K \subseteq \mathbb{R}^n$ je kompaktna natanko tedaj, ko je zaprta in omejena.

1.1.2 Zaporedja v \mathbb{R}^n

Definicija 1.1.4. Zaporedje v \mathbb{R}^n je preslikava $a : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Namesto $a(m)$ pišemo a_m , kjer $a_m = (a_1^m, \dots, a_n^m)$.

Opomba. Zaporedje v \mathbb{R}^n porodi n zaporedij v \mathbb{R} .

Trditev 1.1.5. Naj bo $(a_m)_m$ zaporedje v \mathbb{R}^n , $a_m = (a_1^m, \dots, a_n^m)$. Velja:

$$\text{Zaporedje } (a_m)_m \text{ konvergira} \Leftrightarrow \text{konvergira zaporedja } (a_1^m)_m, \dots, (a_n^m)_m.$$

V primeru konvergence velja:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} a_m = \left(\lim_{m \rightarrow \infty} a_1^m, \dots, \lim_{m \rightarrow \infty} a_n^m \right).$$

Dokaz. Definicija limite. □

1.2 Zveznost preslikav iz \mathbb{R}^n v \mathbb{R}^m

1.2.1 Zveznost preslikav iz \mathbb{R}^n v \mathbb{R}

Opomba. Če je $m = 1$, potem preslikave rečemo *funkcija*.

Definicija 1.2.1. Naj bo $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Naj bo $a \in D$. Preslikava f je zvezna v točki a , če

$$\forall \epsilon > 0. \exists \delta > 0. \forall x \in D. \|x - a\| < \delta \Rightarrow \|f(x) - f(a)\| < \epsilon.$$

Preslikava f je zvezna na D , če je zvezna v vsaki točki $a \in D$.

Trditev 1.2.2. Naj bo $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Naj bo $a \in D$. Preslikava f je zvezna v točki a natanko tedaj, ko za vsako zaporedje $(x_n)_n$, $x_n \in D$, ki konvergira proti a , zaporedje $(f(x_n))_n$, $f(x_n) \in \mathbb{R}^m$ konvergira proti $f(a)$.

Definicija 1.2.3. Naj bo $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Preslikava f je enakomerno zvezna na D , če

$$\forall \epsilon > 0. \exists \delta > 0. \forall x, x' \in D. \|x - x'\| < \delta \Rightarrow \|f(x) - f(x')\| < \epsilon.$$

Trditev 1.2.4. Zvezna preslikava na kompaktni množici je enakomerno zvezna.

Trditev 1.2.5. Naj bo $f : K^{\text{komp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ zvezna preslikava. Potem je $f_*(K)$ kompaktna.

Definicija 1.2.6. Preslikava $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je *C-lipschitzova*, če

$$\exists C \in \mathbb{R}. \forall x, x' \in D. \|f(x) - f(x')\| \leq C\|x - x'\|.$$

Trditev 1.2.7. Za preslikavo $f : D \rightarrow X'$ velja:

$$f \text{ je } C\text{-lipschitzova} \Rightarrow f \text{ je enakomerno zvezna} \Rightarrow f \text{ je zvezna}.$$

Trditev 1.2.8. Naj bosta $f, g : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ zvezni funkciji v $a \in D$. Naj bo $\lambda \in \mathbb{R}$. Tedaj so v a zvezni tudi funkcije:

$$f + g, f - g, \lambda f, fg.$$

Če za vsak $x \in D$, $g(x) \neq 0$, tedaj so v a zvezna tudi funkcija:

$$\frac{f}{g}.$$

Trditev 1.2.9. Kompozitum zveznih preslikav je zvezna preslikava.

Dokaz. Z zaporedji kot pri analizi 1. □

Zgled. Nekaj primerov zveznih preslikav.

- Preslikava $\Pi_j(x_1, \dots, x_n) = x_j$ je zvezna na \mathbb{R}^n za vsak $j = 1, \dots, n$.
- Vse polinomi v n -spremenljivkah so zvezne funkcije na \mathbb{R}^n .
- Vse racionalne funkcije so zvezne povsod, razen tam, kjer je imenovalec enak 0.

Definicija 1.2.10. Preslikava $f : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ je *funkcija n-spremenljivk*.

Opomba. Naj bo (M, d) metrični prostor in $N \subset M$. Naj bo $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna funkcija na M . Potem $f|_N$ je tudi zvezna funkcija na N .

Trditev 1.2.11. Naj bosta $D \subseteq \mathbb{R}^n$ in $D_j = \Pi_j(D)$. Naj bo $a \in D$, $a = (a_1, \dots, a_n)$ in $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna v a . Tedaj za vsak $j = 1, \dots, n$ funkcija $\varphi_j : D_j \rightarrow \mathbb{R}$, $\varphi_j(t) = f(a_1, \dots, a_{j-1}, t, a_{j+1}, \dots, a_n)$ zvezna v a_j .

Dokaz. Definicija zveznosti v točki. □

Opomba. Če je funkcija več spremenljivk zvezna v neki točki $a \in \mathbb{R}^n$, je zvezna tudi kot funkcija posameznih spremenljivk.

Zgled. Naj bo $f(x, y) = \begin{cases} \frac{2xy}{x^2+y^2}; & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0; & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$. Ali je f zvezna kot funkcija vsake spremenljivke posebej? Ali je f zvezna na \mathbb{R}^2 ?

Zgled. Naj bo $f(x, y) = \begin{cases} \frac{2x^2y}{x^4+y^2}; & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0; & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$. Ali je f zvezna kot funkcija vsake spremenljivke posebej? Ali je zvezna na vsaki premici? Ali je f zvezna na \mathbb{R}^2 ?

Opomba. Zgleda pokažeta, da obrat v prejšnji trditvi ne velja.

1.2.2 Zveznost preslikav iz \mathbb{R}^n v \mathbb{R}^m

Naj bo $D \subseteq \mathbb{R}^n$ in $F : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Naj bo $x \in D$, potem $F(x) \in \mathbb{R}^m$, $F(x) = y = (y_1, \dots, y_m)$. Lahko pišemo $F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$. Torej F določa m funkcij n -spremenljivk.

Trditev 1.2.12. Naj bo $a \in D \subseteq \mathbb{R}^n$. Naj bo $F = (f_1, \dots, f_m) : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Velja:

Preslikava F je zvezna v $a \Leftrightarrow f_1, \dots, f_m$ so zvezne v a .

Dokaz. Definicija zveznosti v točki. □

Zgled (Omejenost linearnih preslikav). Naj bo $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linearna preslikava, potem

$$\exists M \in \mathbb{R}. M \geq 0. \forall x \in \mathbb{R}^n. x \neq 0. \frac{\|\mathcal{A}x\|}{\|x\|} \leq M \text{ (oz. } \|\mathcal{A}x\| \leq M\|x\|).$$

Trditev 1.2.13. Linearne preslikave so zvezne

Dokaz. Vse koordinatne funkcije linearne (polinomi 1. stopnje). □

Trditev 1.2.14. Naj bo $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linearna preslikava. Velja:

Preslikava \mathcal{A} je zvezna \Leftrightarrow Preslikava \mathcal{A} je zvezna v točki 0 \Leftrightarrow Preslikava \mathcal{A} je omejena.

Dokaz. Definicija zveznosti in omejenosti. □

Definicija 1.2.15. Naj bo $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linearna preslikava. Preslikavo $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $x \mapsto \mathcal{A}x + b$, $b \in \mathbb{R}^m$ imenujemo *afina preslikava*.

1.3 Parcialni odvodi in diferenciacijabilnost

1.3.1 Parcialni odvod

Definicija 1.3.1. Naj bo $f : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija. Naj bo $a = (a_1, \dots, a_n) \in D$ notranja točka. Funkcija f je *parcialno odvedljiva po spremenljivki x_j v točki a* , če obstaja limita

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a_1, \dots, a_{j-1}, a_j + h, a_{j+1}, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{h},$$

oz. če je funkcija

$$x_j \mapsto f(a_1, \dots, a_{j-1}, x_j, a_{j+1}, \dots, a_n)$$

odvedljiva v točki a_j .

Če je ta limita obstaja, je to *parcialni odvod* funkcije f po spremenljivki x_j v točki a . Oznaki: $\frac{\partial f}{\partial x_j}(a)$, $f_{x_j}(a)$, $(D_j f)(a)$.

Opomba. Vse elementarne funkcije so parcialno odvedljive po vseh spremenljivkah tam, kjer so definirane.

Zgled. Naj bo $f(x, y, z) = e^{x+2y} + \cos(xz^2)$. Izračunaj $f_x(x, y, z)$, $f_y(x, y, z)$, $f_z(x, y, z)$.

1.3.2 Diferenciacijabilnost

Definicija 1.3.2. Naj bo $f : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija. Naj bo $a = (a_1, \dots, a_n) \in D$ notranja točka. Funkcija f je *diferenciacijabilna v točki a* , če obstaja tak linearen funkcional $\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, da velja:

$$f(a + h) = f(a) + \mathcal{L}(h) + o(h),$$

kjer $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|o(h)\|}{\|h\|} = 0$.

Opomba. Če je tak \mathcal{L} obstaja, je enolično določen.

Dokaz. Pokažemo, da iz $\mathcal{L}(h) = (\mathcal{L}_1 - \mathcal{L}_2)(h) = (o_2 - o_1)(h) = o(h)$ sledi, da je $L = 0$. □

Definicija 1.3.3. Če je f diferenciacijabilna v a je \mathcal{L} natanko določen in ga imenujemo *diferencial* funkcije f v točki a . Oznaka: $\mathcal{L} = df_a$. Linearen funkcional \mathcal{L} imenujemo tudi *odvod* funkcije f v točki a . Oznaka: $(Df)(a)$.

Opomba. Recimo, da je funkcija f diferenciacijabilna v točki a . Preslikava $h \mapsto f(a) + (df_a)(h)$ je najboljša afina aproksimacija funkcije $h \mapsto f(a + h)$.

Trditev 1.3.4. Naj bo $f : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ diferenciacijabilna v notranji točki $a \in D$. Tedaj je f v točki a parcialno odvedljiva po vseh spremenljivkah. Poleg tega je zvezna v točki a . Pri tem za $h = (h_1, \dots, h_n)$ velja:

$$(df_a)(h) = \frac{\partial f}{\partial x_1}(a) \cdot h_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \cdot h_n = f_{x_1}(a) \cdot h_1 + \dots + f_{x_n}(a) \cdot h_n$$

Opomba. Naj bo $\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ linearen funkcional, $x \in \mathbb{R}^n$, potem $\mathcal{L}(x) = l_1 x_1 + \dots + l_n x_n = \begin{bmatrix} l_1 & \dots & l_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$,

kjer $\begin{bmatrix} l_1 & \dots & l_n \end{bmatrix}$ matrika linearnega funkcionala glede na standardne baze.

Dokaz. Zveznost pokažemo z limito. Za parcialno odvedljivost pogledajmo kaj se dogaja za $h = (h_1, 0, \dots, 0)$. □

Opomba. Trditev pove, da je $df_a = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1}(a) & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \end{bmatrix} = (\frac{\partial f}{\partial x_1}(a), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(a))$.

Zapis: $(\vec{\nabla} f)(a) = (\text{grad } f)(a) = (\frac{\partial f}{\partial x_1}(a), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(a))$.

Vektor $(\text{grad } f)(a)$ imenujemo *gradient funkcije f v točki a* . Operator $\vec{\nabla} = (\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n})$ je *operator Nabla*.

Zgled. Naj bo $f(x, y) = \begin{cases} \frac{2xy}{x^2+y^2}; & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0; & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$. Ali je f diferenciacijabilna?

Zgled. Naj bo $f(x, y) = \begin{cases} \frac{2x^2y}{x^2+y^2}; & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0; & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$. Ali je f zvezna? Ali je f parcialno odvedljiva? Ali je f diferenciacijabilna?

Opomba. Zgleda pokažeta, da obrat v prejšnji trditvi ne velja

Izrek 1.3.5. Naj bo $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija in naj bo $a \in D$ notranja točka. Denimo, da je f parcialno odvedljiva po vseh spremenljivkah v točki a in so parcialni odvodi zvezni v točki a . Tedaj je f diferenciacijabilna v točki a .

Dokaz. Za $n = 2$. Definicija diferenciacijabilnosti + 2-krat Lagrangeev izrek. □

1.3.3 Višji parcialni odvodi

Naj bo $f : D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija. Denimo, da je f parcialno odvedljiva po vseh spremenljivkah na D : f_{x_1}, \dots, f_{x_n} . To so tudi funkcije n -spremenljivk in morda so tudi te parcialno odvedljive po vseh oz. nekaterih spremenljivkah.

Trditev 1.3.6. Naj bo funkcija f definirana v okolici $a \in \mathbb{R}^n$. Naj bosta $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$. Denimo, da na tej okolici obstajata $\frac{\partial f}{\partial x_i}, \frac{\partial f}{\partial x_j}$ in tudi druga odvoda $\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\partial f}{\partial x_i}), \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\partial f}{\partial x_j})$. Če sta $\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\partial f}{\partial x_i}), \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\partial f}{\partial x_j})$ zvezna v a , potem sta enaka v točki a :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) (a) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) (a).$$

Dokaz. Dovolj za $n = 2$.

Definiramo $J = f(a+h, b+k) - f(a+h, b) - f(a, b+k) + f(a, b)$ in $\varphi(x) = f(x, b+k) - f(x, b)$, $\psi(y) = f(a+h, y) - f(a, y)$. Zapišemo J s pomočjo funkcij φ, ψ ter uporabimo 2-krat Lagrangeev izrek in upoštevamo zveznost. \square

Opomba. Pravimo, da parcialni odvodi komutirajo in pišemo $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$.

Definicija 1.3.7. Naj bo $D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n$. Množico vseh k -krat zvezno parcialno odvedljivih funkcij označimo z $C^k(D)$. Množica gladkih funkcij je $C^\infty(D) = \bigcap_{k=1}^\infty C^k(D)$. Množica zveznih funkcij na D je $C(D)$.

Opomba. Funkcija $f \in C^k(D)$, če obstajajo vse parcialni odvodi funkcije f do reda k in so vse ti parcialni odvodi zvezni na D .

Opomba. Množica $C^k(D)$ z operacijama seštevanja, množenja s skalarji in komponiranja preslikav je algebra nad \mathbb{R} .

1.3.4 Diferenciabilnost preslikav

Definicija 1.3.8. Naj bo $F : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava, $a \in D$ notranja točka. Preslikava F je *diferenciabilna* v točki a , če obstaja taka linearna preslikava $\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, da velja:

$$F(a+h) = F(a) + \mathcal{L}(h) + o(h),$$

kjer je $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{|o(h)|_m}{|h|_n} = 0$.

Preslikavo \mathcal{L} imenujemo *diferencial* F v točki a . Oznaka: dF_a . Imenujemo ga tudi *odvod* F v točki a . Oznaka: $(DF)(a)$.

Opomba. Kot pri funkcijah, če je tak \mathcal{L} obstaja, je enolično določen.

Zgled. Obravnavaj diferenciabilnost preslikav:

- $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linearna, $F(x) = \mathcal{A}x$.
- $F : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, $F(X) = X^2$. Namig: S pomočjo neenakosti CSB pokažimo, da $|H^2| \leq |H|^2$.

Izrek 1.3.9. Naj bo $a \in D$ notranja točka. Naj bo $F = (f_1, \dots, f_m) : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Velja:

Preslikava F je diferenciabilna v $a \in D \Leftrightarrow$ so f_1, \dots, f_m diferenciabilne v a .

Tedaj

$$(DF)(a) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(a) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(a) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(a) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(a) \end{bmatrix}$$

Matrika linearne preslikave $(DF)(a)$, ki je zapisana v standardnih bazah, se imenuje *Jacobijeva matrika*.

Dokaz. (\Rightarrow) Zapišemo enakost $F(a+h) = F(a) + dF_a(h) + o(h)$ po komponentah.

(\Leftarrow) Definicija diferenciabilnosti. \square

Posledica 1.3.9.1. Naj bo $a \in D$ notranja točka. Naj bo $F = (f_1, \dots, f_m) : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava. Velja:

Če so vse funkcije f_1, \dots, f_m v točki a parcialno odvedljive po vseh spremenljivkah in so ti vse odvodi zvezni v točki a , potem je F diferenciabilna v točki a .

Zgled. Naj bo $F(x, y, z) = (x^2 + 2y + e^z, xy + z^2)$, $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$. Določi $(DF)(1, 0, 1)$.

Definicija 1.3.10. Preslikava $F : D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je razreda $C^k(D)$, če so $f_1, \dots, f_m \in C^k(D)$.

Izrek 1.3.11 (Verižno pravilo). Naj bo $a \in D \subseteq \mathbb{R}^n$ notranja točka. Naj bo $b \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ notranja točka. Naj bo $F : D \rightarrow \Omega$ diferenciable v točki a in velja $F(a) = b$. Naj bo $G : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^k$ diferenciable v točki b . Tedaj $G \circ F$ diferenciable v točki a in velja:

$$D(G \circ F)(a) = (DG)(b) \cdot (DF)(a) = (DG)(F(a)) \cdot (DF)(a).$$

Označimo $F(x_1, \dots, x_n) = (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$ in $G(y_1, \dots, y_m) = (g_1(y_1, \dots, y_m), \dots, g_k(y_1, \dots, y_m))$. Potem

$$D(G \circ F)(a) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial y_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial g_k}{\partial y_m} \end{bmatrix} (b) \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} (a)$$

Dokaz. Definicija diferenciablenosti. □

Posledica 1.3.11.1 ($k = 1$, $G = g$ funkcija). Naj bo $\Phi(x_1, \dots, x_n) = g(f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$. Potem

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_j}(a) = \frac{\partial g}{\partial y_1}(b) \cdot \frac{\partial f_1}{\partial x_j}(a) + \frac{\partial g}{\partial y_2}(b) \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x_j}(a) + \dots + \frac{\partial g}{\partial y_m}(b) \cdot \frac{\partial f_m}{\partial x_j}(a)$$

Zgled. Naj bo $F(x, y) = (x^2 + y, xy)$, $g(u, v) = uv + v^2$. Naj bo $\Phi = g \circ F$. Izračunaj $(D\Phi)(x, y)$ na dva načina.

1.4 Izrek o implicitni preslikavi

1.4.1 Osnovna verzija izreka o implicitni preslikavi

Radi bi poiskali zadostni pogoji na funkcijo $f(x, y)$, da bi enačba $f(x, y) = 0$ lokalno v okolici točki (a, b) , za katero velja $f(a, b) = 0$, predstavljala graf funkcije $y = \varphi(x)$.

Izrek 1.4.1 (Osnovna verzija izreka o implicitni preslikavi). Naj bo $D \subseteq \mathbb{R}^2$ odprta, $(a, b) \in D$, $f : D^{\text{odp}} \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija razreda $C^1(D)$ in naj velja:

1. $f(a, b) = 0$.
2. $f_y(a, b) \neq 0$.

Potem obstajata $\delta > 0$ in $\epsilon > 0$, da velja: $I \times J \subseteq D$, kjer je $I = (a - \delta, a + \delta)$, $J = (b - \epsilon, b + \epsilon)$ in enolično določena funkcija $\varphi : I \rightarrow J$ razreda C^1 , za katero velja:

1. $\varphi(a) = b$.
2. $\forall (x, y) \in I \times J. f(x, y) = 0 \Leftrightarrow y = \varphi(x)$ (rešitve enačbe $f(x, y) = 0$ so natanko graf funkcije φ).
3. $\varphi'(x) = -\frac{f_x(x, \varphi(x))}{f_y(x, \varphi(x))}$ za vsak $x \in I$.

Dokaz. Funkcijo φ konstruiramo s pomočjo izreka o bisekciji z upoštevanjem stroge monotonosti funkciji $y \mapsto f(x, y)$. Zveznost ($\bar{I} \times \bar{J}$ je kompaktna), odvedljivost in zveznost odvoda pokažemo z pomočjo izraza $f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y) = 0$ in Lagrangeeva izreka, kjer $x + \Delta x \in (a - \delta, a + \delta)$, $y = \varphi(x)$, $y + \Delta y = \varphi(x + \Delta x)$. \square

Posledica 1.4.1.1. Če je funkcija f razreda C^k , potem je tudi funkcija φ razreda C^k .

Zgled. Kaj če pogoji niso izpolnjeni?

1. $f(x, y) = (x - y)^2$, $f(x, y) = 0$ v okolici točke $(0, 0)$ (pogoji ni potrebni).
2. $f(x, y) = y^3 - x$, $f(x, y) = 0$ v okolici točke $(0, 0)$ (odvedljivost φ).
3. $f(x, y) = y^2 - x^2 - x^4$, $f(x, y) = 0$ v okolici točke $(0, 0)$ (enoličnost φ).
4. $f(x, y) = y^2 + x^2 + x^4$, $f(x, y) = 0$ v okolici točke $(0, 0)$ (množica rešitev).

1.4.2 Izrek o inverzni preslikavi

Naj bo $\Phi : D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava, $\Phi \in C^1(D)$. Kakšne so zadostni pogoji za (lokalno) obrnljivost preslikave Φ ?

Definicija 1.4.2. Naj bosta $D, \Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ odprti. Preslikava $\Phi : D \rightarrow \Omega$ je C^1 -difeomorfizem, če

1. Φ je bijekcija,
2. $\Phi \in C^1(D)$,
3. $\Phi^{-1} \in C^1(\Omega)$.

Podobno definiramo C^k -difeomorfizem za $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$.

Zgled. Ali je $f(x) = x^3$, $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ difeomorfizem?

Trditev 1.4.3. Naj bosta $D, \Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ odprti. Naj bo $\Phi : D \rightarrow \Omega$ C^1 -difeomorfizem. Tedaj je $\det(D\Phi) \neq 0$ na D .

Dokaz. Pogledamo $\Phi^{-1} \circ \Phi = \text{id}_D$ (verižno pravilo). \square

Posledica 1.4.3.1. $(D\Phi^{-1})(y) = (D\Phi)^{-1}(x)$, kjer $y = \Phi(x)$.

Zgled. Ali velja obrat trditve? Naj bo $\Phi(x, y) = (e^x \cos y, e^x \sin y)$, $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$. Ali je Φ difeomorfizem?

Lema 1.4.4 (Lagrangeev izrek za funkcijo več spremenljivk). Naj bo $D \subseteq \mathbb{R}^n$ odprta množica, točki $a, b \in D$ taki, da za vsak $t \in [0, 1]$ daljica $(1 - t)a + tb \in D$, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija razreda C^1 . Tedaj obstaja taka točka ξ iz daljice med a in b , da je $f(b) - f(a) = (Df)(\xi)(b - a)$.

Dokaz. Lagrangeev izrek za funkcijo $\varphi(t) = f((1 - t)a + tb)$. \square

Lema 1.4.5. Predpostavki kot prej. Naj obstaja tak $M \in \mathbb{R}$, da za vsak $j = 1, \dots, n$ in vsak $x \in D$ velja: $\left| \frac{\partial f}{\partial x_j}(x) \right| \leq M$. Tedaj $|f(b) - f(a)| \leq M\sqrt{n}|b - a|$.

Dokaz. Uporabimo prejšnjo trditev. \square

Lema 1.4.6. Naj bo $D \subseteq \mathbb{R}^n$, $a, b \in D$ kot prej. Naj bo $F : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $F = (f_1, \dots, f_m)$ preslikava razreda C^1 . Naj obstaja tak $M \in \mathbb{R}$, da za vsak $j = 1, \dots, n$, vsak $i = 1, \dots, m$ in vsak $x \in D$ velja: $\left| \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x) \right| \leq M$. Tedaj $\|F(b) - F(a)\| \leq M\sqrt{mn}\|b - a\|$.

Izrek 1.4.7 (Izrek o inverzni preslikavi). Naj bo $D \subseteq \mathbb{R}^m$ odprta, $F : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava razreda C^1 , $a \in D$ in $b = F(a)$. Če je $\det(DF)(a) \neq 0$, potem obstajata okolici $a \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ in $b \in V \subseteq \mathbb{R}^m$, da je $F : U \rightarrow V$ C^1 -difeomorfizem.

Definicija 1.4.8. Če je $F : D \rightarrow \Omega$ preslikava med odprtimi množicami v \mathbb{R}^m in je $\det(DF)(x) \neq 0$ za vse $x \in D$, pravimo, da je F *lokalni difeomorfizem*.

Dokaz. Dovolj, da izrek dokažemo za primer, ko $a = b = 0$, $(DF)(0) = I$.

TODO.

□

Posledica 1.4.8.1. Če je Φ razreda C^k za $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$, je Φ lokalni C^k difeomorfizem.

Opomba. Če je $m = 1$, potem $f : I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Naj bo $a \in I$, $f \in C^1(I)$, $f'(a) \neq 0$. Potem $f'(x) \neq 0$ v okolici a , torej f ima lokalni C^1 inverz.

Zgled. Naj bo $F : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, $F(X) = X^2$. Ali je F v okolici točke $I \in \mathbb{R}^{n \times n}$ lokalni difeomorfizem? Kaj to pomeni?

1.4.3 Izrek o implicitni preslikavi

Imamo $n + m$ spremenljivk: (x, y) , kjer $x = (x_1, \dots, x_n)$, $y = (y_1, \dots, y_m)$ in m enačb. Pričakujemo, da bomo lahko m spremenljivk izrazili kot funkcijo ostalih, tj. najdemo preslikavo $\Phi : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, da velja $y = \Phi(x)$.

Primer (Linearen primer). Naj bosta $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $\mathcal{B} : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ linearni, $b \in \mathbb{R}^m$. Naj rešujemo enačbo $Ax + By = b$. Kdaj lahko za vsak $b \in \mathbb{R}^m$ iz te enačbe y razrišemo kot funkcijo x ?

Če je $n = 0$, potem rešujemo enačbo $By = b$. Kdaj lahko to enačbo enolično rešimo za vsak $b \in \mathbb{R}^m$?

Naj bo $F : D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}_x^n \times \mathbb{R}_y^m \rightarrow \mathbb{R}^m$, $F = (f_1, \dots, f_m)$ preslikava razreda C^1 .

Za vsak $y \in \mathbb{R}^m$ naj bo $\frac{\partial F}{\partial x}$ diferencial preslikave $x \mapsto F(x, y)$. Imenujemo ga *parcialni diferencial na prvo spremenljivko*.

Za vsak $x \in \mathbb{R}^n$ naj bo $\frac{\partial F}{\partial y}$ diferencial preslikave $y \mapsto F(x, y)$. Imenujemo ga *parcialni diferencial na drugo spremenljivko*.

$$\text{Velja: } \frac{\partial F}{\partial x}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x, y) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x, y) \end{bmatrix} \quad \text{in} \quad \frac{\partial F}{\partial y}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_m}(x, y) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial y_1}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial y_m}(x, y) \end{bmatrix}.$$

Diferencial preslikave F je potem enak $(DF)(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x}(x, y) & \frac{\partial F}{\partial y}(x, y) \end{bmatrix}$ (bločni zapis).

Opomba. Za vektor $\begin{bmatrix} h \\ k \end{bmatrix}$, kjer je $h \in \mathbb{R}^n$, $k \in \mathbb{R}^m$ velja: $(DF)(x, y) \begin{bmatrix} h \\ k \end{bmatrix} = \frac{\partial F}{\partial x}(x, y)h + \frac{\partial F}{\partial y}(x, y)k \in \mathbb{R}^m$.

Izrek 1.4.9 (Izrek o implicitni preslikavi). Naj bo $D \subseteq \mathbb{R}_x^n \times \mathbb{R}_y^m$ odprta množica, $(a, b) \in D$, $F : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava razreda C^1 . Naj velja:

1. $F(a, b) = 0$,
2. $\det(\frac{\partial F}{\partial y}(a, b)) \neq 0$.

Tedaj obstaja okolica $U \subseteq \mathbb{R}^n$ točke a in okolica $V \subseteq \mathbb{R}^m$ točke b in taka enolično določena preslikava $\varphi : U \rightarrow V$ razreda C^1 , da velja:

1. $\phi(a) = b$.
2. $\forall (x, y) \in U \times V. F(x, y) = 0 \Leftrightarrow y = \varphi(x)$ (rešitve te enačbe je isto kot graf φ znotraj $U \times V$).
3. $(D\varphi)(x) = - \left(\frac{\partial F}{\partial y}(x, y) \right)^{-1} \frac{\partial F}{\partial x}(x, y)$, $y = \varphi(x)$ za vsak $x \in U$.

Dokaz. Uporabimo izrek o inverzni preslikavi.

Definiramo preslikavo $\Phi : D \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, $\Phi(x, y) = (x, F(x, y))$. Kandidata za preslikavo φ najdemo v obliki inverza Φ^{-1} , nato enostavno preverimo lastnosti. \square

Posledica 1.4.9.1. Če je preslikava F razreda C^k , je tudi preslikava φ razreda C^k .

Zgled. Naj bo $x, y \in \mathbb{R}$, $F(x, y) = x^2 + y^2 - 1$. S pomočjo izreka o implicitni preslikavi pokaži, da v okolici točke $(0, 1)$ rešitve enačbe $F(x, y) = 0$ graf neke preslikave φ . Določi tudi preslikavo φ .

Zgled. Naj bo $F(x, y, z) = (y + xy + xz^2, z + zy + x^2)$, $F = (f, g)$ in naj rešujemo enačbo $F(x, y, z) = 0$. Preveri zahteve izreka v okolici točke $(0, 0, 0)$ in zapiši spremenljivki y in z kot funkciji spremenljivke x . Določi tudi prvi in drugi odvod funkcij f in g po spremenljivke x . Kaj je rezultat?

Zgled. Naj bo $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ in naj rešujemo enačbo $F(x, y, z) = 0$. Recimo, da $F(a, b, c) = 0$. Kakšna povezava med zadostnimi pogajami in rangom $(DF)(a, b, c)$? Kaj če gledamo preslikavo $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$?

Definicija 1.4.10. Naj bo $D^{\text{odp}} \in \mathbb{R}^n$ in $F : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava razreda C^1 , $a \in D$.

1. Rang preslikave F v točki a je $\text{rang}_a F := \text{rang}(DF)(a)$.
2. Če je $\text{rang}_a F$ konstanten na D , je F tega ranga na D , tj. $\text{rang } F = \text{rang}_a F$.
3. Preslikava F je *maksimalnega ranga v točki a* , če je $\text{rang}_a F = \min\{m, n\}$.

Opomba. Ta pogoj je lokalno stabilen, tj. če je $\text{rang}_a F = \min\{n, m\}$, potem obstaja okolica od a , kjer rang F maksimalen.

Posledica 1.4.10.1. Naj bo $F : D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava razreda C^k , $k \in \mathbb{N}$ in naj velja $m < n$. Naj bo $a \in D$, $F(a) = 0$ in F maksimalnega ranga v točki a . Tedaj obstajajo indeksi $i_1 < i_2 < \dots < i_{n-m}$, $j_1 < j_2 < \dots < j_m$, $i_k \neq j_l$ za vse k in l in take funkcije $\varphi_1, \dots, \varphi_m$ razreda C^k definirane v okolici točke $(a_{i_1}, \dots, a_{i_{n-m}})$, da je v neki okolici U točke a enačba $F(x) = 0$ ekvivalentna sistemu enačb:

$$\begin{aligned} x_{j_1} &= \varphi_1(x_{i_1}, \dots, x_{i_{n-m}}) \\ &\vdots \\ x_{j_m} &= \varphi_m(x_{i_1}, \dots, x_{i_{n-m}}) \end{aligned}$$

Ekvivalentno: Obstaja permutacija $\sigma \in S_n$, da v okolici točke a velja:

$$F(x) = 0 \Leftrightarrow (x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)}) = (x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n-m)}, \varphi(x'_\sigma)), \text{ kjer } \varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_m).$$

Dokaz. **TODO.** □

Primer. Naj bo $\mathcal{A} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linearna, $m \leq n$, $\text{rang } \mathcal{A} = m$ (\mathcal{A} je surjektivna). Rešujemo enačno $\mathcal{A}x = b$. Prostor rešitev je $n - m$ dimenzialen.

Posledica 1.4.10.2. Naj bo $F : D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ preslikava razreda C^1 , $m \leq n$, $a \in D$ in naj velja $\text{rang}_a F = m$. Tedaj obstaja okolica V točke $F(a) = b$ in okolica U točke a , da je $F : U \rightarrow V$ surjektivna.

Dokaz. **TODO.** □

1.5 Podmnogoterosti v \mathbb{R}^n

Podmnogoterost je posplošitev pojmov „krivulja“ in „ploskev“.

Definicija 1.5.1. Naj bo $M \subseteq \mathbb{R}^{n+m}$, $M \neq \emptyset$. Množica M je *gladka (vsaj razreda C^1) podmnogoterost dimenzije n in kodimenzije m prostora \mathbb{R}^{n+m}* , če za vsako točko $a \in M$ obstaja okolica U v \mathbb{R}^{n+m} in take C^1 funkcije $F_1, \dots, F_m : U \rightarrow \mathbb{R}$, da velja:

1. $M \cap U = \{x \in U \mid F_1(x) = \dots = F_m(x) = 0\} = F^*(\{0\})$.
2. $\text{rang}(F_1, \dots, F_m) = m$ na U .

Opomba. Funkcije F_1, \dots, F_m se imenujejo *lokalne definicijske funkcije* za $M \cap U$.

Opomba. Če $m = 0$: M odprta množica.

2 Integrali s parametri

Naj bo $f : [a, b]_x \times [c, d]_y \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija. Gledamo funkcijo $F(y) = \int_a^b f(x, y) dx$, kjer $y \in [c, d]$ je parameter. Zanima nas v kakšni so povezavi lastnosti funkcije f in funkcije F .

Zgled. Izračunaj $F(y) = \int_0^\pi \sin(xy) dx$. Ali je $F(y)$ zvezna? Kaj je D_F ?

Zgled. Eulerjeva funkcija gama je $\Gamma(s) = \int_0^\infty x^{s-1} e^{-x} dx$.

- Določi D_Γ .
- Kakšen predznak ima Γ na D_Γ ?
- Določi osnovno rekurzivno relacijo za Γ .
- Kakšna povezava med fakulteto in Γ ?
- Kako bi lahko definirali Γ za negativne vrednosti? Za katere lahko?

Definicija 2.0.1. Podmnožica $D \subseteq \mathbb{R}^n$ je lokalno kompaktna, če

$$\forall a \in D. \exists r \in \mathbb{R}. r > 0. D \cap \overline{K(a, r)} \text{ kompaktna množica.}$$

Zgled. Primeri lokalno kompaktnih množic.

- Vsaka zaprta in vsaka odprta množica v \mathbb{R}^n je lokalno kompaktna.
- $D \subseteq \mathbb{R}^2$, $D = K(0, 1) \cup \{(1, 0)\}$ ni lokalno kompaktna.

Trditev 2.0.2. Recimo, da velja

1. $D \subseteq \mathbb{R}^n$ lokalno kompaktna podmnožica;
2. I zaprt interval na \mathbb{R} ;
3. funkcija $f : I_x \times D_y$ zvezna.

Tedaj je funkcija $F(u, v, y) = \int_u^v f(x, y) dx$, kjer so $(u, v, y) \in I \times I \times D$, zvezna na $I \times I \times D$.

Dokaz. **TODO** □

Posledica 2.0.2.1. Recimo, da velja

1. $D \subseteq \mathbb{R}^n$ lokalno kompaktna podmnožica.
2. $I = [a, b]$.
3. Funkcija $f : I_x \times D_y$ zvezna.

Tedaj je funkcija $F(y) = \int_a^b f(x, y) dx$, zvezna na D .

2.1 Odvajanje integralov s parametri

Trditev 2.1.1. Recimo, da velja

1. Funkcija $f : [a, b]_x \times (c, d)_y \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna.
2. $\forall (x, y) \in [a, b] \times (c, d). f$ parcialno odvedljiva po y .
3. Funkcija $\frac{\partial f}{\partial y}(x, y)$ zvezna na $[a, b] \times (c, d)$.

Tedaj je

1. $F(y) = \int_a^b f(x, y) dx$ odvedljiva funkcija na (c, d) .
2. $F'(y) = \frac{dF}{dy}(y) = \frac{d}{dy} \int_a^b f(x, y) dx = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) dx$, tj. lahko zamenjamo vrstni red odvajanja.

Dokaz. **TODO** □

Posledica 2.1.1.1. Recimo, da velja

1. Funkcija $f : [a, b]_x \times (c, d)_y \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna.
2. Funkciji $\alpha, \beta : (c, d) \rightarrow [a, b]$ zvezno odvedljivi.

Tedaj $F'(y) = \frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) dx + \beta'(y)f(\beta(y), y) - \alpha'(y)f(\alpha(y), y)$.

Dokaz. **TODO** □

Posledica 2.1.1.2. Recimo, da velja

1. $D^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n$.
2. Funkcija $f : [a, b]_x \times D_y \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna.
3. $\forall (x, y) \in [a, b] \times D. \forall j \in [n]. f$ parcialno odvedljiva po y_j .
4. $\forall j \in [n]. \frac{\partial f}{\partial y_j}(x, y)$ so zvezne funkcije na $[a, b] \times D$.

Tedaj je

1. $F(y) = \int_a^b f(x, y) dx$ funkcija razreda C^1 na D .
2. $\frac{\partial F}{\partial y_j}(y) = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial y_j}(x, y) dx$.