

Uvod v diferencialno geometrijo

Jaša Knap

1 Uvod

Definicija 1.1. Topološki prostor M je n -dimenzionalna mnogoterost, če za vsak $m \in M$ obstaja okolica $m \in U \subseteq M$ in homeomorfizem $\varphi : U \rightarrow V^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n$ (pri tem je $V \approx B^n$).

Primer 1.2. Naslednje množice so primeri mnogoterosti.

1. $M = \mathbb{R}^n$ je n -dimenzionalna mnogoterost,
2. S^1 je 1-dimenzionalna mnogoterost,
3. $S^n = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}) \mid \sum_{j=1}^{n+1} x_j^2 = 1 \right\} \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ je n -dimenzionalna mnogoterost,
4. Projekтивni prostori $\mathbb{R}P^n = B^n / \sim$, kjer je $\vec{x} \sim \vec{y} \iff \vec{y} = -\vec{x}$ so n -dimenzionalne mnogoterosti.
5. Grupa

$$\text{SU}(2) = \left\{ g = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ -\bar{\beta} & \bar{\alpha} \end{pmatrix} \mid \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \det g = 1 \right\}$$

je 3-dimenzionalna mnogoterost. Topološko in geometrijsko je namreč $\text{SU}(2) = S^3$. To je primer Lijeve grupe.

6. Grupa

$$\text{SO}(3) = \left\{ g = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \mid g^T = g^{-1}, \det g = 1 \right\}.$$

Izkaže se, da je $\text{SO}(3) = B^3 / \sim = \mathbb{R}P^3$. To velja, ker vsaka preslikava iz $\text{SO}(3)$ predstavlja rotacijo prostora, vsako rotacijo pa lahko predstavimo z osjo in velikostjo kota vrtenja. Pri tem kota π in $-\pi$ predstavljata vrtenje za isti kot. Če točki v krogli $B(0, \pi)^3 \approx B^3$ priredimo os in njeno razdaljo od izhodišča proglasimo za velikost kota vrtenja ter enačimo iste rotacije, dobimo natanko projekivni prostor $\mathbb{R}P^3$.

1.1 Gladke mnogoterosti

Na topoloških mnogoterostih bi radi znali odvajati različne objekte, kot so na primer funkcije, krivulje, tenzorji itd. Zato moramo mnogoterosti opremiti z dodatno strukturo. Za začetek se spomnimo definicije odvedljivosti preslikav v evklidskih prostorih.

Definicija 1.3. Preslikava $F : W^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ je odvedljiva v točki $w \in W$, če obstaja linearna preslikava $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ in preslikava $\mathcal{O} : W \rightarrow \mathbb{R}^n$, da za vse ustrezne argumente velja

$$F(w + h) = F(w) + Ah + \mathcal{O}(h)$$

in $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|\mathcal{O}(h)\|}{\|h\|} = 0$. Odvod preslikave F v točki w je preslikava $A = D_w F = (DF)_w$.

Definicija 1.4. Preslikava $F : W^{\text{odp}} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ je odvedljiva na množici W , če je odvedljiva v vsaki točki $w \in W$.

Definicija 1.5. Difeomorfizem je bijektivna odvedljiva preslikava, ki ima odvedljiv inverz.

Definicija 1.6. Naj bo M n -dimenzionalna mnogoterost. Gladek atlas \mathcal{U} na M je družina parov $\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha) \mid \alpha \in A\}$, če za vsak $\alpha \in A$ velja:

1. $U_\alpha^{\text{odp}} \subseteq M$
2. $\varphi_\alpha : U_\alpha \rightarrow V_\alpha \subseteq \mathbb{R}^n$ je homeomorfizem za nek $V_\alpha \subseteq \mathbb{R}^n$
3. $\{U_\alpha \mid \alpha \in A\}$ je pokritje M
4. za vsaka $\alpha, \beta \in A$ je preslikava $g_{\alpha\beta} = \varphi_\beta \circ \varphi_\alpha^{-1} : (\varphi_\alpha)_*(U_\alpha \cap U_\beta) \rightarrow (\varphi_\beta)_*(U_\alpha \cap U_\beta)$ difeomorfizem

Dodatek: Če so vse prehodne preslikave $g_{\alpha\beta}$ k -difeomorfizmi z zveznim k -tim odvodom, imamo \mathcal{C}^k -atlas. Če so vse preslikave gladke, imamo \mathcal{C}^∞ -atlas, če so vse analitične, pa \mathcal{C}^ω -atlas.

Opomba. Preslikava $g_{\alpha\beta}$ iz prejšnje definicije je preslikava iz $U_\alpha \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$. Torej jo znamo odvajati in vemo, da je v izbranih koordinatah na \mathbb{R}^n matrika odvoda enaka Jacobijevi matriki:

$$F(x_1, \dots, x_n) = \begin{pmatrix} F_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ F_n(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix} \implies D_w F = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}_w.$$

Definicija 1.7. Topološka mnogoterost M , ki premore kakšen gladek atlas, je gladka mnogoterost.

Za motivacijo naslednje definicije se spomnimo dejstva, da vemo, kakšne so gladke preslikave iz $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$. Nismo pa še definirali gladkih preslikav iz mnogoterosti $M \rightarrow \mathbb{R}$.

Definicija 1.8. Naj bo M n -dimenzionalna mnogoterost. Funkcija $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ je gladka, če je gladka vsaka preslikava $f \circ \varphi_\alpha^{-1} : V_\alpha \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$.

Definicija 1.9. Naj bo (M, \mathcal{U}) gladka mnogoterost. Krivulja $\gamma : (a, b) \rightarrow M$ je gladka krivulja, v M , če za $\forall \alpha \in A$ velja, da je $\varphi_\alpha \circ \gamma : (a, b) \rightarrow V_\alpha \subseteq \mathbb{R}^n$ gladka krivulja v $V_\alpha \subseteq \mathbb{R}^n$.

Definicija 1.10. Atlasa $\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha) \mid \alpha \in A\}$ in $\mathcal{V} = \{(W_\beta, \varphi_\beta) \mid \beta \in B\}$ na mnogoterosti M sta ekvivalentna, če za vsak par $(\alpha, \beta) \in A \times B$ iz $U_\alpha \cap W_\beta \neq \emptyset$ sledi, da je

$$\psi_\beta \circ \varphi_\alpha^{-1} : (\varphi_\alpha)_*(U_\alpha \cap W_\beta) \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow (\psi_\beta)_*(U_\alpha \cap W_\beta) \subseteq \mathbb{R}^n$$

difeomorfizem.

Opomba. Ekvivalentnost atlasov je ekvivalenčna relacija, ekvivalenčni razred atlasa \mathcal{U} označimo z $[\mathcal{U}]$.

Definicija 1.11. Naj bo M topološka mnogoterost in \mathcal{U} gladek atlas na M . Potem je $[\mathcal{U}]$ gladka struktura na M .

Opomba. Dejstvo, da lahko obstajajo kakšne netrivialne (eksotične strukture) na mnogoterostih, je zelo netrivialno. Iz Donaldsonovega in Freedmanovega izreka sledi, da ima \mathbb{R}^4 nešteto neskončno eksotičnih gladkih struktur. Vsi ostali \mathbb{R}^n imajo zgolj svojo trivialno in nobene eksotične.

2 Gladke vložene ploskve

V splošnem bi lahko mnogoterosti obravnavali kot abstraktne matematične strukture, ki ne prebivajo nujno v evklidskih prostorih. Pri uvodu v diferencialno geometrijo pa se bomo v glavnem ukvarjali z eno in dvodimenzionalnimi mnogoterostmi, vloženi v prostor \mathbb{R}^3 .

Definicija 2.1. Množica $X \subseteq \mathbb{R}^3$ je gladka vložena ploskev, če za vsak $m \in X$ obstaja kroglja za m $W \subseteq \mathbb{R}^n$ in gladka funkcija $f : W \rightarrow \mathbb{R}$, za katero velja

1. $X \cap W = f^{-1}(\{0\})$
2. $(Df)_w \neq 0$ za vsak $w \in X \cap W$

Vložena ploskev $X \subseteq \mathbb{R}^n$ je tudi abstraktna mnogoterost. Poglejmo si, kako bi konstruirali atlas na X . Vzemimo točko $m \in X$. Po definiciji vložene ploskve obstaja nivojnica $f : W \ni m \rightarrow \mathbb{R}$ in vemo, da $D_m f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) (m) \neq 0$. Zdaj se spomnimo izreka o implicitni funkciji. Naj bo $m = (x_0, y_0, z_0)$ in BŠS naj bo $\frac{\partial f}{\partial z}(m) \neq 0$. Torej obstaja gladka okolica $V \ni (x_0, y_0) \subseteq \mathbb{R}^2$ in gladka funkcija $g : V \rightarrow \mathbb{R}$, da velja $f(x, y, g(x, y)) = 0$ za vsak $(x, y) \in V$. Po potrebi lahko množico W zmanjšamo na $W_0 \subseteq W$, da dobimo difeomorfizem

$$\begin{aligned} r : V &\longrightarrow W_0 \cap X \\ (x, y) &\longmapsto (x, y, g(x, y)) \end{aligned}$$

z inverzom

$$\begin{aligned} \varphi : W_0 \cap X &\longrightarrow V \\ (x, y, z) &\longmapsto (x, y). \end{aligned}$$

Ta inverz je v bistvu projekcija na prvi dve koordinati. Če definiramo $U = W_0 \cap X$, postane par (U, φ) karta na X .

2.1 Metrika na ploskvi

Če hočemo meriti razdalje med pari točk na gladki mnogoterosti, potrebujemo še dodatno strukturo – metriko. Ta nam omogoča merjenje dolžin krivulj. Če si predstavljamo krivuljo $\gamma : (a, b) \rightarrow M$, je najbolj naravna definicija njene dolžine

$$\mathcal{L}(\gamma) = \int_a^b \|\dot{\gamma}(t)\| dt.$$

Znati moramo torej izračunati dolžino oziroma normo tangentnega vektorja. Najbolje je, če je ta norma porojena s skalarnim produktom, torej $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$.

Naj bo $\langle \cdot, \cdot \rangle$ neki skalarni produkt na $\mathcal{V} = \mathbb{R}^n$ in naj bo $\{v_1, \dots, v_n\}$ baza za \mathcal{V} , ki ni nujno ortonormirana. Vzemimo vektorja $\vec{x} = \sum_{i=1}^n a_i v_i$ in $\vec{y} = \sum_{i=1}^n b_i v_i$. Potem velja, da je skalarni produkt enak

$$\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle = \sum_{i,j=1}^n a_i b_j \langle v_i, v_j \rangle = \begin{pmatrix} a_1 & \dots & a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle v_1, v_1 \rangle & \dots & \langle v_1, v_n \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle v_n, v_1 \rangle & \dots & \langle v_n, v_n \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

Iz simetričnosti skalarnega produkta ($\langle v_i, v_j \rangle = \langle v_j, v_i \rangle$) sledi, da je zgornja matrika simetrična. Iz pozitivne definitnosti skalarnega produkta ($\langle v_i, v_i \rangle > 0$) pa sledi še pozitivna definitnost te matrike.

Opomba. Kvadratne matrike so lahko koordinatni zapisi linearnih preslikav iz $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, lahko pa so tudi koordinatni zapisi skalarnih produktov. To je odvisno od tega, kako se matrike transformirajo pri prehodu v različno bazo.

Naj bo P poljubna preslikava med bazama, L_e linearna preslikava glede na bazo $\{e_1, \dots, e_n\}$, L_f pa glede na bazo $\{f_1, \dots, f_n\}$. Potem iz algebre 1 vemo, da je

$$L_f = PL_eP^{-1}.$$

Zdaj pa izpeljimo, kako se transformira matrika skalarnega produkta. Naj bosta $a_f = Pa_e$ in $b_f = Pb_e$. Potem dobimo iz enakosti

$$\begin{aligned}\langle a_f, b_f \rangle &= \langle a_e, b_e \rangle \\ a_f^T A_f b_f &= a_e^T A_e b_e \\ a_e^T P^T A_f P b_e &= a_e^T A_e b_e, \forall a_e, b_e.\end{aligned}$$

Od tod sledi, da je $P^T A_f P = A_e$ oziroma zaradi ortogonalnosti P ekvivalentno

$$A_f = PA_eP^T.$$

Torej transformacijska pravila določajo vrsto preslikave, podobno kot pri fiziki.