Analiza na mnogoterostih

Franc Forstnerič

3. december 2014

Kazalo

Poglavje I

GLADKE MNOGOTEROSTI

I.1 Uvod

Svet, ki nas obkroža, ni raven, ampak je trirazsežna mnogoterost. Če sledimo ideji fizikov in dodamo čas kot četrto spremenljivko, dobimo štiridimenzionalno mnogoterost prostor-čas. Že Einstein je spoznal, da je le-ta raven samo lokalno, globalno pa je ukrivljen; z njegovim študijem se ukvarja splošna teorija relativnosti. In zakaj bi se ustavili pri dimenziji 4? Lahko dodamo še dimenzije, ki opisujejo kvantna stanja delcev in dobimo 10-dimenzionalno mnogoterost. Nekatera najzanimivejša vprašanja sodobne matematike in njenih uporab se dotikajo globalnih lastnosti mnogoterosti. Teorija mnogoterosti je ena najbolj interdisciplinarnih področij sodobne matematike in je za moderno geometrijo in topologijo, pa tudi za matematično fiziko, mehaniko ter številna druga področja znanosti, prav tako fundamentalne narave, kot je pojem realnih števil za elementarno analizo.

Matematično povedano: Gladka mnogoterost dimenzije n je Hausdorffov topološki prostor, ki izgleda lokalno v okolici vsake točke tako kot n-dimenzionalni evklidski prostor, ti lokalni kosi pa so zlepljeni skupaj z gladkimi difeomorfizmi. Najpreprostejši primeri so krivulje in ploskve v evklidskem prostoru.

Pojem mnogoterosti se je počasi in naravno razvil iz del slavnih matematikov in fizikov kot so bili Gauss, Riemann, Klein, Poincaré, Einstein, Cartan, Chern in mnogi drugi. Analitične pojme in sredstva kot so odvajanje, integriranje, diferencialne enačbe, vektorska polja, diferencialne forme, Riemannova in Hermitska metrika... lahko naravno posplošimo z evklidskih prostorov na gladke mnogoterosti. Opremljene s temi analitičnimi sredstvi so mnogoterosti osnova za vrsto področij sodobne matematike, ter nepogrešljivo orodje v fiziki, mehaniki, astronomiji in drugih področjih naravoslovja in tehnike.

Knjiga je zamišljena kot uvod v teorijo gladkih mnogoterosti. Predpostavlja se poznavanje osnov matematične analize in topologije v obsegu predmetov na študijskem programu 1.stopnje Matematika na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

I.2 Topološke mnogoterosti

II.1 Mnogoterosti brez roba, osnovni primeri

Naj bo $n \in \mathbb{Z}_+ = \{0, 1, 2, \ldots\}$ nenegativno naravno število. Modelna n-dimenzionalna mnogoterost (brez roba) je evklidski prostor $\mathbb{R}^n$.

Definicija 1. Topološki prostor X se imenuje *n-razsežna topološka mnogoterost*, če je X

(a) *Hausdorffov*;

(b) *lokalno evklidski dimenzije n*, to je, za vsako točko $p \in X$ obstaja odprta okolica $U \subset X$ in homeomorfizem $\phi\colon U \to \phi(U) \subset \mathbb{R}^n$ na neko odprto množico v $\mathbb{R}^n$;

(c) 2-*števen*, to je, obstaja števna baza topologije.

Število n v definiciji 1 se imenuje *dimenzija* mnogoterosti X, $n = \dim X$. Iz definicije sledi, da je 0-razsežna mnogoterost končna ali števna množica z diskretno topologijo.

Dimenzija je enolično določena, kar sledi iz naslednjega izreka.

Izrek 1 (Brouwer(1911))**.** *Neprazna odprta množica v $\mathbb{R}^n$ ni homeomorfna nobeni odprti množici v $\mathbb{R}^k$, če je $k \neq n$.*

Vsak homeomorfizem $\phi\colon U \to \phi(U) \subset \mathbb{R}^n$ kot v točki (b) se imenuje *lokalna karta* na X, inverzna preslikava $\phi^{-1}\colon U' = \phi(U) \to U$ pa je *lokalna parametrizacija* podmnožice $U \subset X$. Družina $\mathcal{U} = \{(U_j, \phi_j)\colon j \in \mathcal{J}\}$ lokalnih kart na topološki mnogoterosti X, za katero velja $\bigcup\limits_{j \in \mathcal{J}} U_j = X$, se imenuje *topološki atlas* na X.

Ogledali si bomo nekaj osnovnih primerov mnogoterosti.

Primer 1. Modelna n-dimenzionalna mnogoterost je evklidski prostor $\mathbb{R}^n$.

Vsaka odprta podmnožica $X \subset \mathbb{R}^n$ je mnogoterost; inkluzija $X \hookrightarrow \mathbb{R}^n$ je lokalna (in tudi globalna) karta na X.

Primer 2. *Sfera* dimenzije $n \in \mathbb{N}$:

$$\mathbb{S}^n = \left\{ x = (x_0, x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^{n+1} : \sum_{j=0}^{n} x_j^2 = 1 \right\}. \tag{I.2.1}$$

Za vsak $j \in \{0, 1, \ldots, n\}$ označimo z $U_j^{\pm}$ naslednji hemisferi:

$$U_j^+ = \{x \in \mathbb{S}^n : x_j > 0\}, \qquad U_j^- = \{x \in \mathbb{S}^n\colon x_j < 0\}.$$

Označimo s $\pi_j\colon \mathbb{R}^{n+1} \to \mathbb{R}^n$ koordinatno projekcijo vzdolž smeri x_j:

$$\pi_j(x_0, x_1, \ldots, x_n) = (x_0, \ldots, \hat{x}_j, \ldots, x_n) = (x_0, \ldots, x_{j-1}, x_{j+1}, \ldots, x_n).$$

(Strešica na x_j pomeni, da smo to spremenljivko izpustili.) Zožitev projekcije π_j na množici $U_j^\pm$ podaja lokalni karti

$$\phi_j^\pm = \pi_j|_{U_j\pm}\colon U_j^\pm \to \mathbb{R}^n.$$

Očitno je $\phi_j^\pm(U_j^\pm)$ enotna krogla $\mathbb{B}(0;1) \subset \mathbb{R}^n$ s središčem v izhodišču. Inverz teh dveh preslikav je

$$(\phi_j^\pm)^{-1}\colon \mathbb{B}(0;1) \to U_j^\pm, \quad (y_1, \ldots, y_n) \mapsto (y_1, \ldots, y_j, \pm\sqrt{1 - \|y\|^2}, y_{j+1}, \ldots, y_n).$$

Ker je unija teh kart enaka $\bigcup_{j=0}^{n} U_j^\pm = \mathbb{S}^n$, je tako dobljena družina atlas na $\mathbb{S}^n$.

Primer 3. *Sfera* $\mathbb{S}^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ (I.2.1) *s stereografsko projekcijo.* Naj bodo $(x_1, \ldots, x_n, u)$ koordinate na $\mathbb{R}^{n+1}$. Označimo z $N = (0, \ldots, 0, 1)$ in $S = (0, \ldots, 0, -1)$ severni in južni pol sfere. Stereografska projekcija iz N oziroma S na hiperravnino $\{u = 0\} \cong \mathbb{R}^n$ nam da karti

$$\phi\colon \mathbb{S}^n \setminus \{N\} \xrightarrow{\cong} \mathbb{R}^n, \qquad \psi\colon \mathbb{S}^n \setminus \{S\} \xrightarrow{\cong} \mathbb{R}^n,$$

podani z naslednjima formulama:

$$\phi(x_1, \ldots, x_n, u) = \frac{1}{1-u}(x_1, \ldots, x_n), \qquad \psi(x_1, \ldots, x_n, u) = \frac{1}{1+u}(x_1, \ldots, x_n).$$

Primer 4. *Riemannova sfera.* Posebej si oglejmo 2-sfero $\mathbb{S}^2 \subset \mathbb{R}^3_{(x,y,u)}$. Ravnino $\mathbb{R}^2_{(x,y)}$ s koordinatama (x, y) identificirajmo s kompleksno ravnino $\mathbb{C} = \{z = x + \mathrm{i}y\colon x, y \in \mathbb{R}\}$. Lokalni karti na sferi $\mathbb{S}^2 = \{(z, u)\colon |z|^2 + u^2 = 1\}$ iz primera 3 sta

$$\phi(z, u) = \frac{z}{1-u}, \qquad \psi(z, u) = \frac{z}{1+u}.$$

Odtod sledi $\bar{\psi}(z, u) = \bar{z}/(1 + u)$ in

$$\bar{\psi}(z, u)\phi(z, u) = \frac{z\bar{z}}{1-u^2} = 1,$$

ker je $|z|^2 + u^2 = 1$. Odtod sledi, da je prehodna preslikava med obema kartama enaka

$$\bar{\psi} \circ \phi^{-1}(\zeta) = \frac{1}{\zeta}, \qquad \zeta \in \mathbb{C}^*.$$

Torej karti $(\mathbb{S}^2 \setminus \{N\}, \phi)$, $(\mathbb{S}^2 \setminus \{S\}, \bar{\psi})$ definirata *kompleksni atlas* na $\mathbb{S}^2$ (glej razdelek III.4). Sfera $\mathbb{S}^2$, opremljena s tem kompleksnim atlasom, se imenuje *Riemannova sfera.*

Primer 5. Podmnogoterosti v evklidskem prostoru. Poseben primer: hiperploskve.
Naj bo $D \subset \mathbb{R}^n$ odprta množica in $f\colon D \to \mathbb{R}$ gladka funkcija (vsaj razreda $\mathcal{C}^1$). Množica

$$X_c = \{x \in D\colon f(x) = c\} = f^{-1}(c)$$

se imenuje *nivojnica* funkcije f. Primer nivojnic so sfere:

$$\mathbb{S}^n_r = \left\{ \sum_{j=0}^{n} x_j^2 = r^2 \right\} \subset \mathbb{R}^{n+1}.$$

Vprašanje je, pri katerih pogojih na f je nivojnica X mnogoterost. Zadosten pogoj podaja izrek o implicitni funciji (glej razdelek I.6).

II.2 Mnogoterosti z robom

Sedaj bomo uvedli še pojem mnogoterosti z robom. Modelni prostor je v tem primeru zaprta zgornja polravnina:

$$\mathbb{H}^n = \{(x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^n : x_n \geq 0\}.$$

Njen *rob* je hiperravnina

$$\partial\mathbb{H}^n = \{x \in \mathbb{H}\colon x_n = 0\} \cong \mathbb{R}^{n-1}.$$

Definicija 2. Topološki prostor X je *topološka n-dimenzionalna mnogoterost z robom*, če je X Hausdorffov, 2-števen in ima vsaka točka $p \in X$ odprto okolico $U \subset X$ in homeomorfizem $\phi\colon U \to U'$ na neko odprto množico $U' \subset \mathbb{H}^n$.

Točke $p \in X$ mnogoterosti z robom klasificiramo na *notranje* in *robne* točke. Naj bo $\phi\colon U \to \mathbb{H}^n$ lokalna karta na X v neki okolici $p \in U \subset X$. Imamo naslednji dve možnosti:

1. primer: $\phi(p) \in \mathring{\mathbb{H}}^n = \{x \in \mathbb{H}^n\colon x_n > 0\}$. Če okolico U točke p primerno zmanjšamo, velja $\phi(U) \subset \mathring{\mathbb{H}}^n$, zato je $\phi(U)$ odprta podmnožica v $\mathbb{R}^n$. Taki točki $p \in X$ pravimo *notranja točka* mnogoterosti X.

2. primer: $\phi(p) \in \partial\mathbb{H}^n = \{x \in \mathbb{H}\colon x_n = 0\}$, $\phi_n(p) = 0$. Taki točki pravimo *robna točka* mnogoterosti X.

Klasifikacija točk na notranje in robne je neodvisna od izbora lokalne karte, kar sledi iz naslednjega izreka.

Izrek 2 (Brouwer)**.** *Če je U odprta podmnožica $\mathbb{R}^n$ in je $\theta\colon U \to \theta(U)$ homeomorfizem na neko podmnožico $\theta(U) \subset \mathbb{R}^n$, potem je $\theta(U)$ odprta v $\mathbb{R}^n$.*

Če je θ difeomorfizem, je to očitna posledica izreka o inverzni preslikavi.

Sedaj si oglejmo prehodno preslikavo med dvema kartama na mnogoterosti z robom X:

$$\theta = \phi^{-1} \circ \psi \colon V' \xrightarrow{\cong} U'.$$

Iz Brouwerjevega izreka sledi, da θ preslika $V' \cap \mathring{\mathbb{H}}^n$ na $U' \cap \mathring{\mathbb{H}}^n$ ter $V' \cap \partial\mathbb{H}^n$ na $U' \cap \partial\mathbb{H}^n$. To pomeni, da je vsaka točka $p \in X$, ki je notranja glede na neko lokalno karto, tudi notranja glede na poljubno lokalno karto. Analogen sklep velja za robne točke.

Množico vseh notranjih točk mnogoterosti X označimo z $\mathring{X}$ in jo imenujemo *notranjost*, množico vseh njenih robnih točk pa z ∂X in jo imenujemo *rob mnogoterosti* X.

Naj bo $p \in \partial X$ robna točka in (U, ϕ) lokalna karta. Njena zožitev

$$\phi|_{U \cap \partial X} \colon U \cap \partial X \longrightarrow U' \cap \partial\mathbb{H}^n$$

je lokalna karta na ∂X z vrednostmi v $\partial\mathbb{H}^n \cong \mathbb{R}^{n-1}$. Odtod sledi

Posledica 1. *Če je X topološka mnogoterost dimenzije n z robom, potem je njen rob ∂X topološka mnogoterost brez roba dimenzije $n-1$.*

Primer 6. Naj bo $f \colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ gladka funkcija in $c \in \mathbb{R}$ neka njena *regularna vrednost*. To pomeni, da je diferencial $df_x \neq 0$ neizrojen v poljubni točki x na novojnici $f(x) = c$. Tedaj je množica

$$X = \{x \in \mathbb{R}^n \colon f(x) \leq c\}$$

n-dimenzionalna mnogoterost z robom $\partial X = \{x \in \mathbb{R}^n \colon f(x) = c\}$. (Glej izrek o implicitni funkciji, razdelek I.6.)

II.3 Topološke lastnosti mnogoterosti

V tem razdelku si bomo ogledali nekaj bistvenih topoloških lastnosti mnogoterosti.

Izrek 3. *Vsaka topološka mnogoterost je:*

(a) lokalno povezana s potmi *(vsaka točka ima bazo s potmi povezanih okolic);*

(b) lokalno kompaktna *(vsaka točka ima kompaktno okolico);*

(c) števno kompaktna *(unija števne družine kompaktnih množic). Poleg tega velja $X = \bigcup_{j=1}^{\infty} K_j$, kjer so množice K_j kompaktne in je $K_j \subset \mathring{K}_{j+1}$ za vsak j;*

(d) normalna*;*

(e) metrizabilna *(obstaja metrika na X, ki inducira topologijo na X);*

(f) parakompaktna.

Dokaz. Lastnosti (a) in (b) sta očitni posledici definicije.

Lastnost (c) sledi iz (b) ter 2-števnosti, saj ima X števno bazo odprtih množic $\{V_i \colon i \in \mathcal{I}\}$, tako da je $\overline{V}_i$ kompakt. Množice $K_j = \overline{V}_1 \cup \ldots \cup \overline{V}_j$ sestavljajo naraščajoče zaporedje kompaktov

$$K_1 \subset K_2 \subset \ldots \subset \bigcup_{j=1}^{\infty} K_j = X.$$

S prehodom na podzaporedje lahko kompakte K_j izberemo tako, da velja $K_j \subset \mathring{K}_{j+1}$ za vsak $j = 1, 2, \ldots$; takemu zaporedju pravimo *normalno izčrpanje* mnogoterosti X.

Lastnost (d) sledi iz dejstva, da ima vsak lokalno kompakten in števno kompakten prostor separacijsko lastnost T_4 (vsak par disjunktnih zaprtih podmnožic v X lahko ločimo s parom disjunktnih odprtih okolic). Poleg tega je vsak Hausdorffov T_4 prostor normalen.

Lastnost (e) sledi iz (d) in *Urysohnovega metrizacijskega izreka* (glej Kelley, General Topology, str. 125):

Izrek 4. *Vsak regularen (torej tudi vsak normalen) 2-števen topološki prostor je homeomorfen nekemu podprostoru v Hilbertovi kocki* $H = [0,1]^\infty$ *(t.j. kartezični produkt števne družine kopij intervala* $[0,1]$*).*

Funkcija $d \colon H \times H \to \mathbb{R}_+$, definirana s predpisom

$$d((x_1, x_2, \ldots), (y_1, y_2, \ldots)) = \sum_{j=1}^{\infty} 2^{-j} |x_j - y_j|,$$

je metrika na Hilbertovi kocki $H = [0,1]^\infty$. Njena zožitev na podmnožico $X \subset [0,1]^\infty$ je metrika na X.

Topološki prostor X se imenuje *parakompakten*, če za vsako odprto pokritje $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$ obstaja neko finejše (včrtano) lokalno končno pokritje $\mathcal{V} = \{V_\beta\}$. To pomeni:

- $\forall \beta \ \exists \alpha = \alpha(\beta)$, da je $V_\beta \subseteq U_\alpha$, in
- vsaka točka $p \in X$ ima okolico $U \subset X$, za katero je presek $U \cap V_\beta$ neprazen za največ končno različnih indeksov β.

Za dokaz implikacije (e) $\Rightarrow$ (f) glej npr. Kelley, General Topology, str. 160. $\square$

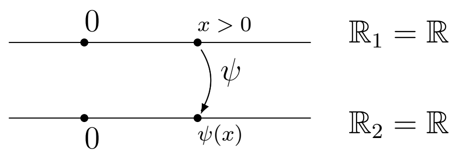
Opomba. Za lokalno evklidske Hausdorffove topološke prostore so naslednje lastnosti med seboj ekvivalentne:

- 2-števnost,
- števna kompaktnost,
- metrizabilnost,
- parakompaktnost.

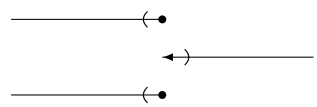
II.4 Posplošitve pojma mnogoterosti

Ne-Hausdorffovo mnogoterosti. Če iz definicije mnogoterosti izpustimo Hausdorffovo lastnost, dobimo t.i. *ne-Hausdorffovo mnogoterost*; to je topološki prostor, ki je lokalno evklidski in 2-števen. Primeri se naravno pojavijo v teoriji foliacij in drugih področjih.

Oglejmo si preprost konkreten primer. Naj bo $\psi\colon [0,\infty) \to [0,\infty)$ neka zvezna strogo naraščajoča funkcija, $\psi(0) = 0$. Lahko npr. vzamemo $\psi(t) = t$.



Definiramo ekvivalenčno relacijo: če je $x \in \mathbb{R}_1$ in $y \in \mathbb{R}_2$, potem je $x \sim y$ natanko tedaj, ko je $x > 0$ in $y = \psi(x) > 0$. Kvocientni prostor $X/_\sim$ je ne-Hausdorffova mnogoterost, ki jo ponazarja naslednja slika. Različni točki nad 0 nimata disjunktnih okolic.



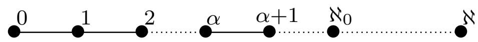
Primere ne-Hausdorffovih mnogoterosti najdemo tudi v prostorih zarodkov zveznih ali gladkih funkcij. Naj bo X topološka mnogoterost. *Zarodek funkcije* v točki $x \in X$ je določen s parom (U, f), kjer je $U \subset X$ neka odprta množica, ki vsebuje točko x in je $f\colon U \to \mathbb{R}$ funkcija. Dva para (U, f) in (V, g) sta ekvivalentna (oziroma določata isti zarodek) v točki x natanko tedaj, ko obstaja okolica $x \in W \subset U \cap V$, tako da je $f|_W = g|_W$. Zarodek funkcije f v točki x označimo $[f]_x$.

Oglejmo si naslednji par gladkih funkcij na $\mathbb{R}$:

$$
\begin{aligned}
f(x) &= \begin{cases} 0, & x \le 0; \\ \mathrm{e}^{-1/x}, & x > 0. \end{cases} \\
g(x) &= 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}.
\end{aligned}
$$

Očitno velja $[f]_x = [g]_x$ natanko tedaj, ko je $x < 0$. Množica vseh zarodkov $\{[f]_x, [g]_x \colon x \in \mathbb{R}\}$ je ne-Hausdorffova 1-dimenzionalna mnogoterost.

Ne-parakompaktne mnogoterosti. Iz definicije mnogoterosti bi lahko izpustili tudi aksiom o 2-števnosti. Primer take mnogoterosti je *dolga premica*, ki jo dobimo takole. Vzamemo vsa ordinalna števila do števila $\aleph$ (slednji predstavlja množico vseh realnih števil $\mathbb{R}$). Za vsako ordinalno število α obstaja njegov naslednik $\alpha + 1$. Med njima je interval $[\alpha, \alpha + 1]$, homeomorfen intervalu $[0, 1]$.



Unija vseh intervalov $[\alpha, \alpha + 1]$ je enodimenzionalna mnogoterost, ki ni 2-števna.

I.3 Gladke in kompleksne mnogoterosti

V tem razdelku bomo uvedli pojem gladkih, realno analitičnih in kompleksnih mnogoterosti. Najprej si oglejmo ustrezne razrede funkcij in preslikav.

III.1 Gladke in holomorfne funkcije

Naj bo D neka odprta množica v $\mathbb{R}^n$. Za vsako število $r \in \mathbb{Z}_+ = \{0, 1, 2, \ldots\}$ označimo s $\mathcal{C}^k(D)$ prostor vseh k-krat zvezno parcialno odvedljivih funkcij na D; $\mathcal{C}^0(D) = \mathcal{C}(D)$ je prostor vseh zveznih funkcij na D. Očitno velja

$$\mathcal{C}^0(D) \supset \mathcal{C}^1(D) \supset \mathcal{C}^2(D) \supset \ldots \supset \bigcap_{r=0}^{\infty} \mathcal{C}^r(D) = \mathcal{C}^\infty(D),$$

pri čemer so vse inkluzije stroge.

Funkcija f na D je *realno analitična*, če ima vsaka točka $a = (a_1, \ldots, a_n) \in \mathbb{R}^n$ okolico $U \subset \mathbb{R}^n$, na kateri je f predstavljena z vsoto neke konvergentne potenčne vrste:

$$f(x_1, \ldots, x_n) = \sum_{k_1,\ldots,k_n=0}^{\infty} c_{k_1,\ldots,k_n} (x_1 - a_1)^{k_1} \cdots (x_n - a_n)^{k_n} = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+^n} c_k (x - a)^k.$$

Seveda je to ravno Taylorjeva vrsta funkcije f v točki a.

$\mathcal{C}^\omega(D)$ označuje prostor vseh realno analitičnih funkcij. Velja $\mathcal{C}^\omega(D) \subsetneq \mathcal{C}^\infty(D)$.

Vsi navedeni prostori so neskončno razsežni realni vektorski prostori (vsota funkcij ter produkt s skalarjem) ter algebre (produkt funkcij).

Ponovimo še pojem holomorfne funkcije. Modelna n-dimenzionalna kompleksna mnogoterost je kompleksni evklidski prostor $\mathbb{C}^n$, to je kartezični produkt n kopij kompleksne ravnine $\mathbb{C}$. Naj bodo $z = (z_1, \ldots, z_n)$ kompleksne koordinate na $\mathbb{C}^n$, $z_j = x_j + \mathfrak{i}\, y_j$, $x_j, y_j \in \mathbb{R}$, $\mathfrak{i} = \sqrt{-1}$. Za vsako diferenciabilno kompleksno funkcijo $f = u + \mathfrak{i} v \colon D \to \mathbb{C}$ na neki domeni $D \subset \mathbb{C}^n$ je diferencial

$$df_a = \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_j}(a)\, dx_j + \frac{\partial f}{\partial y_j}(a)\, dy_j$$

v poljubni točki $a \in D$ realno-linearna preslikava $\mathbb{R}^{2n} \cong \mathbb{C}^n \to \mathbb{R}^2 \cong \mathbb{C}$. Razcepimo jo na vsoto $\mathbb{C}$-linearnega dela ∂f in $\mathbb{C}$-antilinearnega dela $\overline{\partial} f$:

$$df = \partial f + \overline{\partial} f = \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial z_j} \, dz_j + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial \bar{z}_j} \, d\bar{z}_j. \tag{I.3.1}$$

Pri tem je $dz_j = dx_j + \mathfrak{i}\, dy_j$, $d\bar{z}_j = dx_j - \mathfrak{i} dy_j$ in

$$\frac{\partial f}{\partial z_j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x_j} - \mathfrak{i}\frac{\partial f}{\partial y_j}\right), \qquad \frac{\partial f}{\partial \bar{z}_j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x_j} + \mathfrak{i}\frac{\partial f}{\partial y_j}\right). \tag{I.3.2}$$

Definicija 3. Diferenciabilna funkcija $f\colon D \to \mathbb{C}$ na domeni $D \subset \mathbb{C}^n$ je *holomorfna*, če zadošča naslednjim ekvivalentnim lastnostim v poljubni točki $a \in D$:

- diferencial $df_a\colon \mathbb{C}^n \to \mathbb{C}$ je $\mathbb{C}$-linearna preslikava.
- $df = \partial f$.
- $\overline{\partial} f = 0$.

V primeru $n = 1$ je diferencial df_a kompleksno linearen natanko tedaj, ko je f *kompleksno odvedljiva* v točki a, to je, ko obstaja njen kompleksni odvod

$$f'(a) = \lim_{z \to a} \frac{f(z) - f(a)}{z - a}.$$

Diferencial je tedaj enak $df_a(h) = f'(a)h$, $h \in \mathbb{C}$. Pišemo $df_a = f'(a)\, dz$, kjer je $dz = dx + \mathfrak{i} dy$.

V splošnem je funkcija $f(z_1, \ldots, z_n)$ holomorfna natanko tedaj, ko velja

$$\overline{\partial} f = 0 \Longleftrightarrow \frac{\partial f}{\partial \bar{z}_j} = 0 \quad \forall j = 1, \ldots, n.$$

Desna enakost ravno pomeni, da je f holomorfna kot funkcija vsake kompleksne spremenljivke z_j posebej. Takim funkcijam rečemo *separatno holomorfne*.

Pišimo $f = u + \mathfrak{i} v$, kjer sta u in v realni funkciji. Enačba $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}_j} = 0$ je ekvivalentna Cauchy-Riemannovemu sistemu

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{\partial v}{\partial y_j}, \qquad \frac{\partial u}{\partial y_j} = -\frac{\partial v}{\partial x_j}. \tag{I.3.3}$$

Po izreku Hartogsa je funkcija $f(z_1, z_2, \ldots, z_n)$ holomorfna natanko tedaj, ko je *separatno holomorfna* v smislu, da je za vsako točko $a = (a_1, \ldots, a_n) \in D$ in za vsak $j = 1, \ldots, n$ funkcija

$$\mathbb{C} \ni \zeta \mapsto f(a_1, \ldots, a_{j-1}, a_j + \zeta, a_{j+1}, \ldots, a_n)$$

holomorfna na množici $\{\zeta \in \mathbb{C}\colon (a_1, \ldots, a_{j-1}, a_j + \zeta, a_{j+1}, \ldots, a_n) \in D\}$. Netrivialno je dokazati, da je vsaka separatno holomorfna funkcija zvezna. Iz separatne holomorfnosti ter zveznosti dobimo s pomočjo večkratne uporabe običajne Cauchyjeve integralne formule naslednjo Cauchyjevo integralno formulo na vsakem polidisku

$$P(a, r) = \{z \in \mathbb{C}^n\colon |z_j - a_j| < r_j,\ j = 1, \ldots, n\}, \quad r = (r_1, \ldots, r_n) \in (0, \infty)^n,$$

z zaprtjem $\overline{P(a, r)} \subset D$:

$$f(z_1, \ldots, z_n) = \frac{1}{(2\pi \mathrm{i})^n} \int_{|\zeta_1 - z_1| = r_1} \cdots \int_{|\zeta_n - z_n| = r_n} \frac{f(\zeta_1, \ldots, \zeta_n)\, d\zeta_1 \cdots d\zeta_n}{(\zeta_1 - z_1) \cdots (\zeta_n - z_n)}.$$

Z razvojem n-ternega Cauchyjevega jedra

$$C(z, \zeta) = \frac{1}{(\zeta_1 - z_1) \cdots (\zeta_n - z_n)}$$

v geometrijsko vrsto okrog a dobimo s pomočjo členske integracije razvoj holomorfne funkcije v konvergentno potenčno vrsto na poljubnem polidisku $P(a, r) \subset D$:

$$f(z) = \sum_{k_1, \ldots, k_n = 0}^{\infty} c_{k_1, \ldots, k_n} (z_1 - a_1)^{k_1} \cdots (z_n - a_n)^{k_n} = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+^n} c_k (z - a)^k.$$

Pomembno je, da zgornja vrsta ne vsebuje nobenih členov oblike $\overline{z_j - a_j}$.

Označimo z $\mathscr{O}(D)$ prostor vseh holomorfnih funkcij na D. Standardna oznaka $\mathscr{O}$ je po japonskem matematiku z imenom *Kiyoshi Oka*, enem od pionirjev kompleksne analize v več spremenljivkah.

III.2 Gladke mnogoterosti brez roba

Naj bo X n-dimenzionalna topološka mnogoterost brez roba in $\mathcal{U} = \{(U_j, \phi_j)\colon j \in \mathcal{J}\}$ nek atlas na X. Pišimo $U_{ij} := U_i \cap U_j$.

Definicija 4. Topološki atlas $\mathcal{U} = \{(U_j, \phi_j)\colon j \in \mathcal{J}\}$ na topološki mnogoterosti X se imenuje $\mathcal{C}^r$*-atlas* za nek $r \in \{1, \ldots, \infty, \omega\}$, če je za vsak par indeksov $i, j \in \mathcal{J}$ prehodna preslikava $\phi_i \circ \phi_j^{-1} =: \phi_{ij}$ difeomorfizem razreda $\mathcal{C}^r$ na svoji domeni.

V primeru, ko je $U_{ij} = \emptyset$, je pogoj na prazno izpolnjen. Če pa je $U_{ij} \neq \emptyset$, mora biti prehodna preslikava

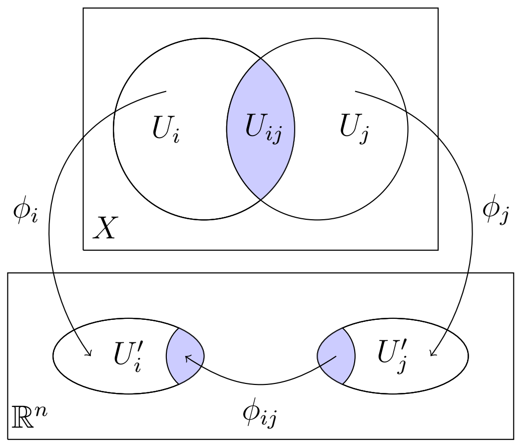
$$\phi_{ij} = \phi_i \circ \phi_j^{-1}\colon \phi_j(U_{ij}) \longrightarrow \phi_i(U_{ij})$$

$\mathcal{C}^r$ difeomorfizem med domenama v $\mathbb{R}^n$ (to je, ϕ_{ij} ter njen inverz $\phi_{ij}^{-1} = \phi_{ji}$ sta preslikavi razreda $\mathcal{C}^r$). Pravimo tudi, da sta karti (U_i, ϕ_i), (U_j, ϕ_j) med seboj $\mathcal{C}^r$-kompatibilni.

Družina prehodnih preslikav očitno zadošča naslednjim trem pogojem na ustreznih domenah:

- $\phi_{ii} = \mathrm{Id}$ na U_i;
- $\phi_{ij} \circ \phi_{ji} = \mathrm{Id}$ ($\Leftrightarrow \phi_{ij}^{-1} = \phi_{ji}$);
- $\phi_{ij} \circ \phi_{jk} \circ \phi_{ki} = \mathrm{Id}$ ($\Leftrightarrow \phi_{ij} \circ \phi_{jk} = \phi_{ik}$.

Družina difeomorfizmov $\{\phi_{ij}\}$ s temi lastnostmi se imenuje *1-kocikel difeomorfizmov* na pokritju $\{U_j\}$.



Definicija 5. $\mathcal{C}^r$ atlasa $\mathcal{U} = \{(U_i, \phi_i)\}$ ter $\mathcal{V} = \{(V_j, \psi_j)\}$ na topološki mnogoterosti X sta med seboj $\mathcal{C}^r$ *ekvivalentna* (ali $\mathcal{C}^r$ *kompatibilna*), če je njuna unija $\mathcal{U} \cup \mathcal{V}$ spet $\mathcal{C}^r$ atlas.

Očitno sta atlasa $\mathcal{U}$ in $\mathcal{V}$ $\mathcal{C}^r$ ekvivalentna natanko tedaj, ko je vsaka karta $(U_i, \phi_i) \in \mathcal{U}$ $\mathcal{C}^r$ kompatibilna z vsako karto $(V_j, \psi_j) \in \mathcal{V}$. Ni težko videti, da je $\mathcal{C}^r$-ekvivalenca ekvivalenčna relacija na množici vseh $\mathcal{C}^r$ atlasov na dani mnogoterosti X.

Definicija 6. $\mathcal{C}^r$ *struktura*, ali *struktura* $\mathcal{C}^r$ *mnogoterosti*, na topološki mnogoterosti X je določena z izborom ekvivalenčnega razreda $\mathcal{C}^r$-atlasa.

Ekvivalentno, $\mathcal{C}^r$ struktura na X je določena z izborom maksimalnega $\mathcal{C}^r$-atlasa na X, to je unija vseh $\mathcal{C}^r$ atlasov v nekem ekvivalenčnem razredu.

Naloga. Naj bo $\{(U, \phi), (V, \psi)\}$ atlas na n-sferi $\mathbb{S}^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$, definiran s stereografsko projekcijo. (Glej primer 3 na str. 3.) Pokaži, da ta atlas definira na $\mathbb{S}^n$ isto realno-analitično strukturo kot atlas $\{(U_j^{\pm}, \phi_j^{\pm}), j = 0, \dots, n\}$ iz primera 2 na str. 2.

III.3 Gladke mnogoterosti z robom

Definicijo 4 lahko uporabimo tudi za atlase na topološki mnogoterosti z robom. Tako dobimo pojem $\mathcal{C}^r$ *mnogoterosti z robom*.

Prehodna preslikava $\phi_{\alpha\beta}$ med poljubnima kartama v danem $\mathcal{C}^r$ atlasu je difeomorfizem med odprtimi podmnožicami v $\mathbb{H}^n = \{y = (y_1, \ldots, y_n) \in \mathbb{R}^n \colon y_n \geq 0\}$. Iz izreka o inverzni preslikavi sledi, da je difeomorfizem odprta preslikava, kar pomeni, da je slika odprte množice v $\mathbb{R}^n$ spet odprta množica v $\mathbb{R}^n$. Torej preslika $\phi_{\alpha\beta}$ notranjost $\mathring{V} = V \cap \{y_n > 0\}$ v notranjost $\phi_{\alpha\beta}(V) \cap \{y_n > 0\}$ ter rob $V \cap \{y_n = 0\}$ v rob $\phi_{\alpha\beta}(V) \cap \{y_n = 0\}$.

Naj bo $\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \phi_\alpha)\}$ $\mathcal{C}^r$-atlas na mnogoterosti z robom $(X^n, \partial X)$. Družina vseh kart $(U_\alpha \cap \partial X, \phi_\alpha|_{U_\alpha \cap \partial X})$, kjer je

$$\phi_\alpha|_{U_\alpha \cap \partial X} \colon \underbrace{U_\alpha \cap \partial X}_{\text{odprta v } \partial X} \to \underbrace{\phi_\alpha(U_\alpha)}_{\subset \mathbb{H}^n} \cap \underbrace{\{y_n = 0\}}_{= \mathbb{R}^{n-1}}$$

je očitno $\mathcal{C}^r$ atlas na ∂X, ki definira na ∂X strukturo $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti dimenzije $n-1$.

III.4 Kompleksne mnogoterosti

Označimo koordinate na $\mathbb{R}^{2n} \cong \mathbb{C}^n$ z

$$\mathbb{R}^{2n} \ni (x_1, y_1, \ldots, x_n, y_n) \rightsquigarrow (x_1 + iy_1, \ldots, x_n + iy_n) \in \mathbb{C}^n.$$

Kompleksna struktura na topološki mnogoterosti X^{2n} je podana z atlasom

$$\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \phi_\alpha); \alpha \in \mathcal{I}\}, \quad \phi_\alpha \colon U_\alpha \to U'_\alpha \subset \mathbb{R}^{2n} = \mathbb{C}^n,$$

tako da so vse prehodne preslikave

$$\phi_{\alpha\beta} \colon \phi_\beta(U_{\alpha\beta}) \to \phi_\alpha(U_{\alpha\beta})$$

biholomorfne (to je bijektivne, holomorfne in s holomorfnim inverzom).

Definicija 7. Kompleksna mnogoterost kompleksne dimenzije n je topološka mnogoterost X realne dimenzije $2n$ skupaj z izborom kompleksne strukture (ekvivalentno, skupaj z izborom ekvivalenčnega razreda kompleksnih atlasov na X).

Kompleksno dimenzijo označimo z $\dim_{\mathbb{C}} X$. Velja torej $\dim_{\mathbb{R}} X = 2 \dim_{\mathbb{C}} X$.

Očitni primeri holomorfnih funkcij na podmnožici v $\mathbb{C}^n$ so polinomi v $z_1, \ldots, z_n$ (holomorfni polinomi) ter racionalne funkcije $\frac{P}{Q}$, kjer sta P, Q polinoma (slednja je holomorfna na množici $Q \neq 0$). Kompleksna mnogoterost z atlasom, ki ima za prehodne preslikave racionalne funkcije, se imenuje *kompleksno algebraična mnogoterost*.

I.4 Primeri in konstrukcije mnogoterosti

IV.1 Riemannove ploskve

Kompleksne mnogoterosti kompleksne dimenzije 1 (torej realne dimenzije 2) se imenujejo *Riemannove ploskve*. Najpreprostejši primeri so domene v kompleksni ravnini $\mathbb{C}$.

Najpreprostejša kompaktna Riemannova ploskev je *Riemannova sfera* (glej primer 4 na str. 3). To je topološka 2-sfera $\mathbb{S}^2 = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$ (kompaktifikacija ravnine $\mathbb{C}$ z eno točko), opremljena s kompleksno strukturo, ki jo dobimo npr. s pomočjo stereografske projekcije enotne sfere v $\mathbb{C} \times \mathbb{R}$ na $\mathbb{C}$ kot v primeru 4.

Isto kompleksno strukturo na $\mathbb{S}^2$ dobimo z naslednjo konstrukcijo. Naj bo $U = \mathbb{C}$ in $V = \mathbb{C}_* \cup \{\infty\}$. Naj bo $\phi = \mathrm{Id}_U$ in $\psi : V \to \mathbb{C}$ preslikava $\psi(z) = 1/z$, pri čemer je po dogovoru $1/\infty = 0$. Par kart $\{(U, \phi), (V, \psi)\}$ je atlas na $\mathbb{S}^2$ s prehodno preslikavo $(\phi \circ \psi^{-1})(\zeta) = 1/\zeta$. To je ista prehodna preslikava kot pri stereografski projekciji.

Riemann-Koebejev upodobitveni izrek pove, da je vsaka povezana in enostavno povezana Riemannova ploskev biholomorfno ekvivalentna eni od ploskev $\mathbb{S}^2$ (Riemannova sfera), $\mathbb{C}$, ali $\Delta = \{|z| < 1\}$. (Glej Izrek 12 na str. 37.) Vsaka Riemannova ploskev je holomorfen kvocient ene od zgornjih ploskev. Več o tem v razdelku I.8.

IV.2 Kartezični produkt mnogoterosti

Če sta X^n in Y^m mnogoterosti razreda $\mathcal{C}^r$, ima kartezični produkt $X \times Y$ naravno strukturo $\mathcal{C}^r$ mnogoterost dimenzije $n + m$. Izberimo $\mathcal{C}^r$ atlas $\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \phi_\alpha)\}$ na X in $\mathcal{C}^r$ atlas $\mathcal{V} = \{(V_\beta, \psi_\beta)\}$ na Y. *Produktni atlas* na $X \times Y$ je $\{(U_\alpha \times V_\beta, \phi_\alpha \times \psi_\beta)\}$, kjer je preslikava

$$\phi_\alpha \times \psi_\beta \colon U_\alpha \times V_\beta \to \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$$

definirana s predpisom

$$(\phi_\alpha \times \psi_\beta)(x, y) = (\phi_\alpha(x), \psi_\beta(y)) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m = \mathbb{R}^{n+m}.$$

Očitno je $\phi_\alpha \times \psi_\beta$ homeomorfizem na svojo sliko. Prehodne preslikave so oblike

$$(u, v) \mapsto (\phi_{\alpha\alpha'}(u), \psi_{\beta\beta'}(v)),$$

torej so $\mathcal{C}^r$ difeomorfizmi. Kartezični produkt $X \times Y$ dveh $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti, opremljen s produktnim atlasom, je torej $\mathcal{C}^r$ mnogoterost.

Enako vidimo, da je produkt $X \times Y$ dveh kompleksnih mnogoterosti spet kompleksna mnogoterost in velja $\dim_{\mathbb{C}} X \times Y = \dim_{\mathbb{C}} X + \dim_{\mathbb{C}} Y$.

Primer 7. $\underbrace{\mathbb{S}^1 \times \ldots \times \mathbb{S}^1}_{n}$ je n-dimenzionalni torus.

IV.3 Kvocientne mnogoterosti

Motivacija: Krožnica $\mathbb{S}^1$ je izomorfna kvocientnemu prostoru $\mathbb{R}/\mathbb{Z}$ množice realnih števil po podgrupi vseh celih števil. Če si $\mathbb{S}^1$ predstavljamo kot množico vseh kompleksnih števil z normo ena, lahko kvocientno projekcijo $\pi\colon \mathbb{R} \to \mathbb{S}^1$ podamo z naslednjo preslikavo:

$$\pi\colon \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{S}^1 \subset \mathbb{C}, \qquad \pi(t) = e^{2\pi \mathrm{i} t}.$$

Naj bo X topološki prostor in $\sim$ ekvivalenčna relacija na X. Množica $X/_\sim$, katere elementi so ekvivalenčni razredi relacije $\sim$, se imenuje *kvocientni prostor* prostora X glede na $\sim$.

Označimo s $\pi\colon X \to X/_\sim$ kvocientno projekcijo, ki elementu $x \in X$ priredi njegov ekvivalenčni razred $[x] = \{y \in X : x \sim y\} \in X/_\sim$. Topologijo na $X/_\sim$ definiramo z zahtevo, da je množica $U \subset X/_\sim$ odprta natanko tedaj, ko je njena praslika $\pi^{-1}(U) \subset X$ odprta. To je najmočnejša topologija na $X/_\sim$, v kateri je projekcija π zvezna preslikava.

$$\begin{array}{ccc} X & \supset & \pi^{-1}(U) \\ {\scriptstyle\pi}\big\downarrow & & {\scriptstyle\pi}\big\downarrow \\ X/_\sim & \supset & U \end{array}$$

Naslednji dve trditvi sta očitni posledici definicij.

Trditev 1. *Kvocientna projekcija π je odprta preslikava natanko tedaj, ko je $\sim$* odprta relacija *v naslednjem smislu: za vsako odprto množico $V \subset X$ je množica $\pi^{-1}(\pi(V)) = \{x \in X : x \sim y \text{ za nek } y \in V\}$ odprta.*

Trditev 2. *Naj bo $\sim$ odprta ekvivalenčna relacija na Hausdorffovem topološkem prostoru X. Kvocientni prostor $X/_\sim$ je Hausdorffov natanko tedaj, ko je graf relacije*

$$\mathcal{R} = \{(x, y) \in X \times X : x \sim y\}$$

zaprta množica v $X \times X$. Taka relacija se imenuje zaprta.

V nadaljevanju nas bodo zanimale ekvivalenčne relacije $\sim$ na mnogoterosti X, ki so hkrati odprte in zaprte. Torej je kvocientna projekcija $\pi\colon X \to X/_\sim$ odprta preslikava ter je $X/_\sim$ Hausdorffov 2-števen topološki prostor. Zanimali nas bodo primeri, ko je $X/\sim$ spet mnogoterost. Najprej si oglejmo nekaj primerov.

IV.4 Projektivni prostori

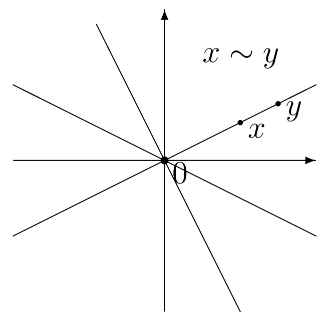
Za poljuben končnorazsežen realen ali kompleksen vektorski prostor V definiramo projektivizacijo $\mathbb{P}(V)$ kot množico vseh 1-dim vektorskih podprostorov v V.

$$\mathbb{RP}^n = \mathbb{P}(\mathbb{R}^{n+1}) = \text{ množica vseh realnih premic skozi 0 v } \mathbb{R}^{n+1}$$
$$\mathbb{CP}^n = \mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1}) = \text{ množica vseh kompleksnih premic skozi 0 v } \mathbb{C}^{n+1}.$$

Na $\mathbb{R}^{n+1}_* = \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$ definiramo ekvivalenčno relacijo $\sim$ takole:

$$x \sim y \iff \exists\, t \in \mathbb{R},\ \text{da je } y = tx.$$

Torej je $x \sim y$ natanko tedaj, da sta vektorja x in y kolinearna.



Očitno je $\sim$ ekvivalenčna relacija in kvocientni prostor je realni projektivni prostor $\mathbb{RP}^n$:

$$\begin{tikzcd} \mathbb{R}^{n+1}_* \arrow[d, "\pi"'] \\ \mathbb{RP}^n = \mathbb{R}^{n+1}_*/_\sim \end{tikzcd}$$

Za vsak vektor $x = (x_0, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^{n+1}_*$ označimo njegovo sliko z

$$\pi(x) = [x_0 \colon x_1 \colon \ \ldots \colon x_n] \in \mathbb{RP}^n.$$

Po definicije relacije $\sim$ velja

$$[x_0 \colon x_1 \colon \ \ldots \colon x_n] = [y_0 \colon y_1 \colon \ \ldots \colon y_n] \iff \exists t \in \mathbb{R}_* \ni\colon y_j = tx_j \quad \forall j = 0, 1, \ldots, n. \qquad \text{(I.4.1)}$$

To so t.i. *homogene koordinate* na $\mathbb{RP}^n$. Podobno definiramo kompleksne homogene koordinate $[z_0 \colon z_1 \colon \ \ldots \colon z_n]$ na $\mathbb{CP}^n$.

Trditev 3. *Kvocientna projekcija $\pi\colon \mathbb{R}^{n+1}_* \to \mathbb{RP}^n$ je odprta in prostor $\mathbb{RP}^n$ je kompakten Hausdorffov. Isto velja za projekcijo $\pi\colon \mathbb{C}^{n+1}_* \to \mathbb{CP}^n$.*

Dokaz. Naj bo U odprta množica v $\mathbb{R}^{n+1}_*$. Potem je množica

$$\pi^{-1}(\pi(U)) = \bigcup_{t \in \mathbb{R}_*} tU \quad (\text{stožec nad } U)$$

odprta. Odtod sledi po trditvi 1, da je projekcija $\pi : \mathbb{R}^{n+1}_* \to \mathbb{RP}^n$ odprta preslikava.

Graf relacije $\sim$ je množica

$$\left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^{n+1}_* \times \mathbb{R}^{n+1}_* : \sum_{j,k=0,\ldots,n} (x_j y_k - x_k y_j)^2 = 0 \right\},$$

ki je zaprta (saj je ničelna množica zvezne funkcije). Torej je projektivni prostor $\mathbb{RP}^n$ Hausdorffov po trditvi 2.

Naj bo $\mathbb{S}^n$ enotna sfera v $\mathbb{R}^{n+1}$. Potem je $\mathbb{RP}^n = \pi(\mathbb{S}^n) = \mathbb{S}^n/_{x\sim -x}$, torej je $\mathbb{RP}^n$ kompakten.

$$\begin{tikzcd} \mathbb{Z}_2 \arrow[r, hook] & \mathbb{S}^n \arrow[d, "\pi"', "\text{2-listna projekcija}"] \\ & \mathbb{RP}^n \end{tikzcd} .$$

Analogni zaključki veljajo za kompleksni projektivni prostor $\mathbb{CP}^n$. Naj bo $\mathbb{S}^{2n+1} \subset \mathbb{C}^{n+1}$ enotna sfera v $\mathbb{C}^{n+1}$. Vsaka kompleksna premica $\mathbb{C}v = \{tv \colon t \in \mathbb{C}\}$ skozi poljuben enotni vektor $v \in \mathbb{S}^{2n+1}$ seka sfero $\mathbb{S}^{2n+1}$ v krožnici

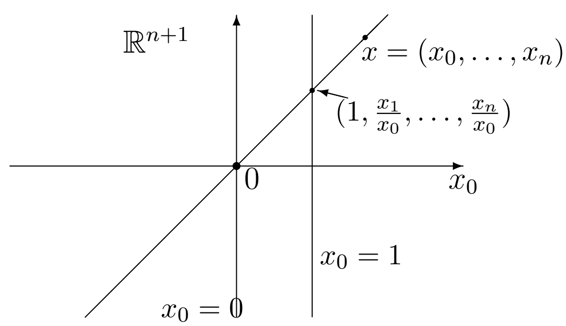
$$\mathbb{C}v \cap \mathbb{S}^{2n+1} = \left\{e^{\mathrm{i}t}v, \quad t \in \mathbb{R}\right\} \cong \mathbb{S}^1.$$

Zožitev projekcije $\pi \colon \mathbb{C}^{n+1}_* \to \mathbb{CP}^n$ na sfero nam da t.i. *Hopfovo fibracijo* $\pi \colon \mathbb{S}^{2n+1} \to \mathbb{CP}^n$, ki je realno-analitičen sveženj z vlaknom $\mathbb{S}^1$ (angl. *circle bundle*):

$$\begin{tikzcd} \mathbb{S}^1 \arrow[r, hook] & \mathbb{S}^{2n+1} \arrow[d] \\ & \mathbb{CP}^n \end{tikzcd}$$

Sedaj bomo opisali konstrukcijo realno analitičnega atlasa na $\mathbb{RP}^n$ ter kompleksnega atlasa na $\mathbb{CP}^n$. Za vsak $j = 0, 1, \ldots, n$ definiramo

$$U_j = \{x = (x_0, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^{n+1}_* \colon x_j \neq 0\}, \quad V_j = \pi(U_j) \subset \mathbb{RP}^n.$$



Definiramo preslikavo $\phi_j \colon V_j \to \mathbb{R}^n$ s predpisom

$$\phi_j([x]) = \phi_j([x_0 \colon x_1 \colon \ \ldots \colon x_n]) \overset{def}{=} \left(\frac{x_0}{x_j}, \ldots, \frac{x_{j-1}}{x_j}, \frac{x_{j+1}}{x_j}, \ldots, \frac{x_n}{x_j}\right)$$

Iz (I.4.1) sledi, da je ϕ_j dobro definirana, saj so razmerja x_i/x_j neodvisna od izbire homogenega predstavnika elementa v $\mathbb{RP}^n$. Očitno je ϕ_j bijekcija in lahko je preveriti, da je homeomorfizem. Njen inverz je

$$\phi_j^{-1}(y_1,\ldots,y_n) = [y_1 : \cdots : y_j : 1 : y_{j+1} : \cdots : y_n] \in V_j.$$

Za vsak par indeksov $0 \le i < j \le n$ je prehodna preslikava med ϕ_i in ϕ_j enaka

$$\phi_{ij}(y) = \phi_i \circ \phi^{-1}(y_1,\ldots,y_n) = \left(\frac{y_1}{y_i},\ldots,\frac{y_{i-1}}{y_i},\frac{y_{i+1}}{y_i},\ldots,\frac{1}{y_i},\ldots,\frac{y_n}{y_i}\right).$$

Odtod vidimo, da je $\{(V_j,\phi_j)\colon j=0,1,\ldots,n\}$ realno analitičen atlas na $\mathbb{RP}^n$ oz. holomorfen atlas na $\mathbb{CP}^n$. Dokazali smo prvi del naslednje trditve.

Trditev 4. *Realni projektivni prostor $\mathbb{RP}^n$ z atlasom $\{(V_j,\phi_j) : j = 0,1,\ldots,n\}$ je kompaktna realno analitična mnogoterost dimenzije n, kompleksni projektivni prostor $\mathbb{CP}^n$ s tem atlasom pa je kompaktna kompleksna mnogoterost kompleksne dimenzije n.*

$\mathbb{P}^n$ vsebuje veliko linearno vloženih prostorov $\mathbb{P}^k$, $1 \le k < n$ (to velja tako za realne kot za kompleksne projektivne prostore). Izberemo nek $(k+1)$-dimenzionalen linearen podprostor $\Sigma \subset \mathbb{C}^{n+1}$.

$$\begin{tikzcd} \mathbb{C}^{n+1}_* \arrow[d] & \Sigma\setminus\{0\} \arrow[l, hook'] \arrow[d] \\ \mathbb{CP}^n & \mathbb{P}(\Sigma)\cong\mathbb{CP}^k \arrow[l, hook'] \end{tikzcd}$$

Kompleksne premice v Σ so točke v $\mathbb{P}(\Sigma) \cong \mathbb{CP}^k$.

Če je $k = n-1$: Σ je hiperravnina v $\mathbb{C}^{n+1}$, podana z linearno enačbo: $a_0z_0+\ldots+a_nz_n = 0$ (vsaj en $a_j \ne 0$). Prirejena projektivna hiperravnina v $\mathbb{CP}^n$ je

$$\mathbb{P}(\Sigma) = \left\{[z_0\colon z_1\colon \ \ldots : z_n] \in \mathbb{CP}^n\colon \ \sum_{j=0}^n a_jz_j = 0\right\}.$$

Definicija je neodvisna od predstavnika ekvivalenčnega razreda, saj se multiplikativen faktor $t \in \mathbb{C}_*$ krajša.

Na preprostem primeru bomo opisali pojem *projektivnega zaprtja.* Vzemimo neko afino linearno hiperravnino $L \subset \mathbb{C}^n$:

$$L = \big\{(\zeta_1,\ldots,\zeta_n) \in \mathbb{C}^n\colon a_0 + \sum_{j=1}^n a_j\zeta_j = 0\big\}. \tag{I.4.2}$$

Prostor $\mathbb{C}^n$ vložimo na standarden način kot podmnožico v $\mathbb{CP}^n$:

$$\mathbb{C}^n = \big\{[z_0\colon z_1\colon \ \ldots : z_n] \in \mathbb{CP}^n\colon z_0 \ne 0\big\},$$

$$[z_0\colon z_1\colon \ \dots : z_n] \cong \left(\frac{z_1}{z_0}, \dots, \frac{z_n}{z_0}\right) = (\zeta_1, \dots, \zeta_n) \in \mathbb{C}^n.$$

Zanima nas, kaj je zaprtje $\overline{L} \subset \mathbb{CP}^n$. Enačbo (I.4.2) homogeniziramo (oz. projektiviziramo) tako, da vstavimo izraze

$$\zeta_j = \frac{z_j}{z_0}, \quad j = 1, \dots, n,$$

v enačbo za L in pomnožimo z z_0. Tako dobimo

$$\overline{L} = \Big\{[z_0\colon z_1\colon \ \dots : z_n] \in \mathbb{CP}^n : \sum_{j=0}^{n} a_j z_j = 0\Big\}.$$

Presek $\overline{L}$ s hiperravnino v neskončnosti $H = \{z_0 = 0\} \cong \mathbb{CP}^{n-1}$ je enak

$$\overline{L} \cap H = \Big\{[0\colon z_1\colon \ \dots : z_n]\colon \sum_{j=1}^{n} a_j z_j = 0\Big\}.$$

Torej je $\overline{L} \cap H$ hiperravnina v $H = \mathbb{CP}^{n-1}$, izomorfna prostoru $\mathbb{CP}^{n-2}$.

Posplošitev: če je $P(z_0, \dots, z_n) \not\equiv 0$ homogen polinom stopnje $d \in \mathbb{N}$, potem je množica

$$A_P = \{[z_0\colon \ \dots : z_n] \in \mathbb{CP}^n\colon P(z_0, \dots, z_n) = 0\}$$

dobro definirana. A_P se imenuje *projektivno algebraična hiperploskev stopnje d.*

Lahko gledamo tudi množice, definirane z več homogenimi polinomskimi enačbami:

$$A_{P_1} \cap A_{P_2} \cap \dots \cap A_{P_k} \ \dots \ \text{projektivno algebraična podmnožica v } \mathbb{CP}^n$$

Primer 8. Naj bo

$$C = \{x^2 = y^3\colon x, y \in \mathbb{C}\} \subset \mathbb{C}^2;$$

to je kompleksna (afino algebraična) krivulja v $\mathbb{C}^2$ s singularnostjo v $(0,0)$. Če pišemo $x = z/\zeta$ in $y = w/\zeta$ ter vstavimo v enačbo za C, dobimo enačbo za projektivno zaprtje C v projektivni ravnini $\mathbb{CP}^2$:

$$\overline{C} = \{[\zeta\colon z\colon w] \in \mathbb{CP}^2\colon z^2\zeta = w^3\}.$$

Njen presek s premico v neskončnosti je

$$\overline{C} \cap \{\zeta = 0\} = \{[0\colon z\colon 0]\} = \{[0\colon 1\colon 0]\}.$$

Lahko vidimo, da je presečno število krivulje $\overline{C}$ s premico v neskončnosti $H = \{\zeta = 0\}$ v točki $[0\colon 1\colon 0]$ enako 3 (pravimo tudi, da je to trojna presečna točka).

Opomba. *Lokalno presečno število* dveh kompleksnih krivulj v $\mathbb{C}^2$ (ali v poljubni kompleksni ploskvi) izračunamo tako, da lokalno definicijsko funkcijo ene krivulje (v našem primeru npr. funkcijo ζ, ki definira projektivno premico $\{\zeta = 0\} = H$) zožimo na drugo krivuljo (v našem primeru $\overline{C}$) in jo izrazimo v lokalni karti na drugi krivulji, v kateri presečni točki ustreza izhodišče. Presečno število je tedaj red ničle zožene funkcije v izhodišču. V zgornjem primeru je primerna lokalna koordinata na $\overline{C}$ funkcija w (saj presečni točki ustreza $w = 0$), zvezo med ζ in w (v lokalni karti $\{z = 1\}$ na $\mathbb{CP}^2$) pa nam podaja enačba $\zeta = w^3$. Red ničle funkcije ζ pri $w = 0$ je enak 3 in to je presečno število med $\overline{C}$ in H v točki $[0\colon 1\colon 0]$.

Iz definicije sledi, da je lokalno presečno število dveh kompleksnih krivulj vselej pozitivno.

Globalno presečno število dveh krivulj je definirano kot vsota lokalnih presečnih števil v vseh presečnih točkah. Za krivulje v kompaktni komleksni ploskvi (kot npr. $\mathbb{CP}^2$) je to vselej nenegativno (končno) celo število. Krivulje v odprtih ploskvah (kot npr. $\mathbb{C}^2$) pa se lahko sekajo v števni diskretni množici točk in v tem primeru globalnega presečnega števila ni mogoče smiselno definirati.

Naloga. Dokaži, da je presečno število vsake kompleksne krivulje stopnje d v $\mathbb{CP}^2$ s katerokoli projektivno premico $\mathbb{CP}^1 \subset \mathbb{CP}^2$ enako d, torej stopnji krivulje.

Konstrukcijo projektivizacije v zgornjem primeru lahko posplošimo takole. Če je

$$L = \{(\zeta_1, \ldots, \zeta_n) \in \mathbb{C}^n \colon P(\zeta_1, \ldots, \zeta_n) = 0\},$$

kjer je P polinom stopnje d (ne nujno homogen), pišemo $\zeta_j = \frac{z_j}{z_0}$ in vstavimo v P:

$$\widetilde{P}(z_0, \ldots, z_n) = z_0^d \, P\left(\frac{z_j}{z_0}, \ldots, \frac{z_n}{z_0}\right) = 0$$

Dobljeni homogen polinom $\widetilde{P}$ stopnje d se imenuje *homogenizacija* polinoma P. Množica

$$\overline{L} = \{[z_0\colon \ldots \colon z_n] \in \mathbb{CP}^n \colon \widetilde{P}(z_0, \ldots, z_n) = 0\}$$

ravno zaprtje množice $L \subset \mathbb{C}^n$ v $\mathbb{CP}^n$.

I.5 Gladke funkcije in preslikave mnogoterosti

Naj bo X mnogoterost razreda $\mathcal{C}^r$ za nek $r \in \{1, 2, \ldots, \infty, \omega, \mathscr{O}\}$.

Definicija 8. Zvezna funkcija f na mnogoterosti X je gladka razreda $\mathcal{C}^r$ v točki $p \in X$ (realno analitična v primeru $r = \omega$; holomorfna v primeru $r = \mathscr{O}$), če je za neko lokalno karto (U, ϕ) na X (iz atlasa, ki določa dano $\mathcal{C}^r$ strukturo na X), $p \in U$, funkcija

$$f \circ \phi^{-1} \colon \phi(U) \to \mathbb{R}$$

gladka razreda $\mathcal{C}^r$ v neki okolici točke $\phi(p) \in \mathbb{R}^n$. Funkcija f je razreda $\mathcal{C}^r$ na X, če je $\mathcal{C}^r$ v vsaki točki $p \in X$.

V primeru, ko je X kompleksna mnogoterost dimenzije n, nadomestimo $\mathbb{R}^n$ s $\mathbb{C}^n$ in $\mathbb{R}$ s $\mathbb{C}$; funkcija $f\colon X \to \mathbb{C}$ je holomorfna, če je za vsako lokalno holomorfno karto (U,ϕ) na X funkcija $f \circ \phi^{-1}\colon \phi(U) \to \mathbb{C}$ holomorfna.

$$\begin{tikzcd}
p \in U \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\phi"'] & \mathbb{R} \\
\phi(p) \in \phi(U) \subset \mathbb{R}^n \arrow[ur, "f\circ\phi^{-1}"'] &
\end{tikzcd}$$

Lema 1. *Pogoj v definiciji 8 je neodvisen od izbire lokalne karte v danem $\mathcal{C}^r$ atlasu.*

Dokaz. Naj bo (V,ψ) neka druga lokalna karta na X, $p \in V$. Tedaj je

$$f \circ \psi^{-1} = f \circ (\phi^{-1} \circ \phi) \circ \psi^{-1} = (f \circ \phi^{-1}) \circ (\phi \circ \psi^{-1}).$$

Ker je $\phi \circ \psi^{-1}$ prehodna preslikava v $\mathcal{C}^r$ atlasu, je $\mathcal{C}^r$ difeomorfizem. Odtod sledi, da je $f \circ \psi^{-1}$ razreda $\mathcal{C}^r$ natanko tedaj, ko je $f \circ \phi^{-1}$ razreda $\mathcal{C}^r$. $\square$

Definicijo gladke funkcije lahko posplošimo na preslikave.

Definicija 9. Naj bosta X, Y dve $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti. Zvezna preslikava $f\colon X \to Y$ je gladka razreda $\mathcal{C}^r$ v točki $p \in X$, če obstajata lokalni karti (U,ϕ) na X ter (V,ψ) na Y, tako da velja $p \in U$, $f(U) \subset V$ in je preslikava $\tilde{f} = \psi \circ f \circ \phi^{-1}$ razreda $\mathcal{C}^r$ v neki okolici točke $\phi(p) \in \mathbb{R}^n$. Preslikava je razreda $\mathcal{C}^r$ (na X), če je razreda $\mathcal{C}^r$ v vsaki točki iz X.

$$\begin{tikzcd}
U \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\phi"] \arrow[dr, phantom, "\circlearrowleft"] & V \arrow[d, "\psi"] \\
U' \arrow[r] & V'
\end{tikzcd}$$

Lema 2. *Definicija je neodvisna od izbire lokalnih kart na X oz. na Y.*

Dokaz. Naj bo (U',ϕ') neka druga karta na X, $p \in U'$, ter (V',ψ') neka druga karta na Y, $f(p) \in V'$. Potem velja (oznako za kompozicijo izpustimo):

$$\psi' f (\phi')^{-1} = \psi'(\psi^{-1}\psi) f (\phi^{-1}\phi)(\phi')^{-1} = (\psi'\psi^{-1})(\psi f \phi^{-1})(\phi(\phi')^{-1}).$$

Preslikava $\psi'\psi^{-1}$ je prehodna preslikava med dvema kartama na Y, torej je $\mathcal{C}^r$ difeomorfizem. Podobno je zadnja preslikava $\phi(\phi')^{-1}$ na desni prehodna preslikava med dvema kartama na X in zato $\mathcal{C}^r$ difeomorfizem. Odtod sledi, da je preslikava $\psi f \phi^{-1}$ razreda $\mathcal{C}^r$ natanko tedaj, ko je $\psi' f (\phi')^{-1} \in \mathcal{C}^r$ razreda $\mathcal{C}^r$. $\square$

Definicija 10. $\mathcal{C}^r$-difeomorfizem $f : X \to Y$ je bijektivna preslikava (homeomorfizem) med $\mathcal{C}^r$-mnogoterostima, ki je $\mathcal{C}^r$ ter je njen inverz f^{-1} tudi $\mathcal{C}^r$.

Opomba. Iz definicij sledi, da je vsaka lokalna karta (U, ϕ) na neki $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti X $\mathcal{C}^r$-difeomorfizem $U \xrightarrow{\phi} \phi(U) \subset \mathbb{R}^n$.

Trditev 5. *Kompozicija gladkih $\mathcal{C}^r$-preslikav mnogoterosti je spet $\mathcal{C}^r$-preslikava.*

Dokaz.

$$
\begin{tikzcd}
p \in U \subset X \arrow[r, bend left, "f"] \arrow[d, "\phi"] & f(p) \in V \subset Y \arrow[r, bend left, "g"] \arrow[d, "\psi"] & g(f(p)) \in W \subset Z \arrow[d, "\theta"] \\
0 \in \phi(U) \subset \mathbb{R}^n \arrow[r, bend left, "\psi f \phi^{-1}", "\mathcal{C}^r"'] \arrow[rr, bend right, "\mathcal{C}^r", "(\theta g \psi^{-1})(\psi f \phi^{-1}) = \theta(gf)\phi^{-1}"'] & 0 \in \psi(V) \subset \mathbb{R}^n \arrow[r, bend left, "\theta g \psi^{-1}", "\mathcal{C}^r"'] & 0 \in \theta(W) \subset \mathbb{R}^n
\end{tikzcd}
$$

Dobimo ravno $g \circ f$ v paru lokalnih kart (U, ϕ) na X in (W, θ) na Z. Ker je ta $\mathcal{C}^r$, sledi po definiciji, da je $g \circ f$ tudi $\mathcal{C}^r$. $\square$

Kategorija $\mathcal{C}^r$ $(r \in \{0, 1, \ldots, \infty, \omega)$:

- objekti: $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti
- morfizmi: $\mathcal{C}^r$-preslikave

Kategorija $\mathscr{O}$**:**

- objekti: kompleksne mnogoterosti
- morfizmi: holomorfne preslikave

Opomba. Če sta X in Y $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti, sta avtomatično tudi $\mathcal{C}^k$ mnotogoterosti za vsak $k < r$. Torej lahko govorimo o $\mathcal{C}^k$ preslikavah $X \to Y$ za vsak $k \leq r$. Ne moremo pa smiselno definirati pojma $\mathcal{C}^k$-preslikave za $k > r$.

V nadaljevanju bomo uporabljali naslednje oznake:

- $\mathcal{C}^r(X, Y)$ je množica vseh $\mathcal{C}^r$-preslikav $X \to Y$.
- $\mathcal{C}^r(X) \overset{def}{=} \mathcal{C}^r(X, \mathbb{R})$ je algebra vseh $\mathcal{C}^r$ funkcij na X.

Iz definicij sledi, da lahko vse lokalne lastnosti gladkih preslikav med evklidskimi prostori, ki se ohranjajo pri kompozicij z difeomorfizmi, posplošimo na preslikave mnogoterosti preko prehoda v lokalne karte. Npr., definiramo lahko rang preslikave v točki.

Definicija 11. Naj bo $f : X \to Y$ preslikava razreda $\mathcal{C}^1$. Izberimo lokalno karto (U, ϕ) na X in lokalno karto (V, ψ) na Y, tako da velja $p \in U$ in $f(U) \subset V$. Potem je

$$\operatorname{rang}_p f = \operatorname{rang}_{\phi(p)} \psi \circ f \circ \phi^{-1}.$$

Lahko je preveriti, da je definicija neodvisna od izbire para lokalnih kart.

Primer 9. Navedli bomo nekaj primerov gladkih preslikav.

1. Preslikave med evklidskimi prostori: običajna definicija gladkosti.

2. Preslikave v projektivne prostore:

$$\begin{array}{ccll} \mathbb{R}^n \supset D & \xrightarrow{f} & \mathbb{RP}^N & \quad \text{koordinate } [y_0\colon \ldots : y_N] \\ x & \mapsto & [f_0(x)\colon \ldots : f_N(x)] & \end{array}$$

   Ta preslikava je dobro definirana na množici $\{x \in D\colon f_j(x) \neq 0 \text{ za vsaj en } j\}$. Predpostavimo, da je ta množica kar eneka D.
   Kdaj je f razreda $\mathcal{C}^r$? Preverimo v lokalnih kartah $\mathbb{RP}^N$. Recimo,da je $f_j(a) \neq 0$ za nek $a \in D$. Torej velja isto v neki okolici $a \in U \subset D$. Sedaj vzamemo na $\mathbb{RP}^N$ lokalno karto $[y_0\colon \ldots : y_j\colon \ldots : y_N] \mapsto \left(\frac{y_0}{y_j}, \ldots, \frac{y_N}{y_j}\right) \in \mathbb{R}^n$ (izpustimo $\frac{y_j}{y_j}$):

$$(\psi \circ f)(x) = \left(\frac{f_0(x)}{f_j(x)}, \ldots, \frac{f_N(x)}{f_j(x)}\right) \in \mathbb{R}^N, \qquad f_j(x) \neq 0 \text{ za } x \in U$$

   Odtod vidimo: Če so vse komponente f_j $\mathcal{C}^r$-funkcije na D, potem je $f\colon D \to \mathbb{RP}^N$ $\mathcal{C}^r$-preslikava.

   Podobno vidimo, da je preslikava $f\colon D \to \mathbb{CP}^N$, definiranan na neki domeni $D \subset \mathbb{C}^n$, holomorfna preslikava v $\mathbb{CP}^N$, če so vse njene komponente holomorfne funkcije in je v vsaki točki vsaj ena od komponent različna od nič.

3. Naj bo D domena v $\mathbb{C}$. *Meromorfna funkcija* na D je holomorfna funkcija $f\colon D \setminus \{a_j\} \to \mathbb{C}$ na komplementu neke diskretne množice točk $\{a_j\} \subset D$, ki ima v vsaki točki a_j pol (ali odpravljivo singularnost). Lokalno v okolici pola a_j:

$$f(z) = \frac{g(z)}{(z - a_j)^{n_j}}, \qquad g \text{ holomorfna v okolici točke } a_j,\ n_j \in \mathbb{N}$$

   V polu:

$$\lim_{z \to a_j} |f(z)| = \infty$$

   Meromorfni funkciji f priredimo preslikavo $\tilde{f}\colon D \to \mathbb{C} \cup \{\infty\} = \mathbb{CP}^1$ (kompaktifikacija z eno točko, Riemannova sfera) s predpisom

$$\tilde{f}(z) = \begin{cases} f(z) & \text{če } z \neq a_j\ \forall j \\ \infty & \text{če } z = a_j \text{ za nek } j \end{cases}$$

$\tilde{f}$ je zvezna preslikava $D \to \mathbb{CP}^1$. Trdimo, da je $\tilde{f}$ dejansko holomorfna preslikava.

$$\mathbb{CP}^1 = \{[z_0\colon z_1]\colon z_0, z_1 \text{ nista obe } 0\}, \qquad \text{karti: } \begin{tikzcd} {[z_0\colon z_1]} \arrow[r, "\phi"] \arrow[dr, "\psi"'] & \frac{z_1}{z_0} = \zeta \arrow[d, "\frac{1}{\zeta}"] \\ & \frac{z_0}{z_1} \end{tikzcd}$$

Lahko zapišemo

$$\tilde{f}(z) = \begin{cases} [1\colon f(z)] & z \neq a_j \ \forall j \\ [0\colon 1] & z = a_j \text{ za nek } j \end{cases}$$

V okolici a_j:

$$f(z) = \frac{g(z)}{(z-a_j)^{n_j}}, \qquad g(a_j) \neq 0,\ g \text{ holomorfna}$$

$$\Longrightarrow \tilde{f}(z) = \left[1\colon \frac{g(z)}{(z-a_j)^{n_j}}\right] = [(z-a_j)^{n_j}\colon g(z)] \in \mathbb{CP}^1.$$

Sedaj pogledamo $\tilde{f}$ v drugi karti ψ:

$$(\psi \circ \tilde{f})(z) = \frac{(z-a_j)^{n_j}}{g(z)} \quad \text{holomorfna v okolici točke } a_j.$$

V točki $z = a_j$ ima $\psi \circ \tilde{f}$ ničlo reda n_j.

Opomba: če je f meromorfna na D, potem $f = \frac{g}{h}$, kjer sta g in h holomorfni. Potem

$$\tilde{f}(z) = \left[1\colon \frac{g(z)}{h(z)}\right] = [h(z)\colon g(z)] \in \mathbb{CP}^1$$

Velja tudi obratno: vsaka holomorfna preslikava $D \subset \mathbb{C} \xrightarrow{\tilde{f}} \mathbb{CP}^1$, $\tilde{f} \not\equiv \infty$, definira meromorfno funkcijo na D (isti postopek, le obrnjen).

$$\mathbb{C}^n \supset D \ni z \longmapsto [f_0(z)\colon f_1(z)\colon \ \ldots\colon f_N(z)] \in \mathbb{CP}^N.$$

Če so $f_0, \ldots, f_N$ holomorfne funkcije in je za vsako točko $z \in D$ vsaj ena od vrednosti $f_j(z)$ različna od 0, je f holomorfna preslikava.

4. Naj bo $F = (P_0, P_1, \ldots, P_N)\colon \mathbb{C}^n \to \mathbb{C}^N$ holomorfna preslikava, katere komponente P_j so homogeni polinomi stopnje d (vsi iste stopnje!). Torej je $F(tz) = t^d F(z)$ za vsak $t \in \mathbb{C}$. Predpostavimo, da je $F(z) = 0 \Leftrightarrow z = 0$. (To lahko velja samo v primeru ko je $n \leq N$.) Torej F preslika vsako kompleksno premico v $\mathbb{C}^{n+1}$ skozi izhodišče $z = 0$ v neko kompleksno premico skozi izhodišče v $\mathbb{C}^{N+1}$. Zato F določa natanko eno preslikavo $f\colon \mathbb{CP}^n \to \mathbb{CP}^N$, tako da komutira naslednji diagram:

$$\begin{tikzcd} \mathbb{C}^{n+1}_* \arrow[r, "F"] \arrow[d, "\pi"'] \arrow[dr, phantom, "\circlearrowleft"] & \mathbb{C}^{N+1}_* \arrow[d, "\pi"] \\ \mathbb{CP}^n \arrow[r, "f"] & \mathbb{CP}^N \end{tikzcd}$$

Naloga. Preveri, da je f holomorfna preslikava, ki je v vsakem paru standardnih lokalnih kart na obeh projektivnih prostorih podana z racionalno preslikavo v spremenljivkah $z = (z_0, z_1 \dots, z_n) \in \mathbb{C}^{n+1}$.

I.6 Podmnogoterosti

Modeli gladkih podmnogoterosti so gladke krivulje in ploskve v evklidskem prostoru.

Pojem podmnogoterosti bomo sedaj definirali za podmnožice v poljubni gladki ali kompleksni mnogoterosti.

Definicija 12. Naj bo X gladka mnogoterost dimenzije m in razreda $\mathcal{C}^r$ za nek $r \in \mathbb{Z}_+ \cup \{\infty, \omega\}$. Podmnožica $N \subset X$ se imenuje $\mathcal{C}^r$ *podmnogoterost* dimenzije n, če za vsako točko $p \in N$ obstaja odprta okolica $U \subset X$ in lokalna karta $\phi\colon U \to U' \subset \mathbb{R}^m$ (v maksimalnem atlasu, ki določa gladko strukturo na X), tako da velja

$$\phi(N \cap U) = (\mathbb{R}^n \times \{0\}^{m-n}) \cap U'.$$

Vsaka lokalna karta (U, ϕ) na X, ki zadošča zgornjemu pogoju, se imenuje *odlikovana karta* glede na N.

Število $d = m - n$ se imenuje *kodimenzija* N v X in se označi $\operatorname{codim}(N, X)$. Podmnogoterost kodimenzije 1 se imenuje *hiperploskev*.

Naj bo $\pi\colon \mathbb{R}^m = \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}^n$ koordinatna projekcija $\pi(x_1, \dots, x_m) = (x_1, \dots, x_n)$. Vsaki odlikovani (glede na N) karti (U, ϕ) priredimo lokalno karto $(N \cap U, \pi \circ \phi|_{N \cap U})$ na N. Množica tako dobljenih kart sestavlja atlas $\mathcal{U}'$ na N. Prehodne preslikave v tem atlasu so zožitve prehodnih preslikav med kartami atlasa $\mathcal{U}$ in so zato razreda $\mathcal{C}^r$. Torej atlas $\mathcal{U}'$ določa na N strukturo $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti; imenujemo jo *podmnogoterostna struktura*, ki je inducirana z inkluzijo.

Analogno definiramo pojem kompleksne podmnogoterosti.

Primer 10. Če je $U \subset \mathbb{R}^n$ odprta množica in je $f = (f_1, \dots, f_d)\colon U \to \mathbb{R}^d$ preslikava razreda $\mathcal{C}^r$, potem je njen graf

$$G_f = \{(x, f(x))\colon x \in U\} \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^d$$

podmnogoterost razreda $\mathcal{C}^r$. Preslikava

$$\phi\colon U \times \mathbb{R}^d \to U \times \mathbb{R}^d, \qquad \phi(x, y) = (x, y - f(x)),$$

je difeomorfizem, ki graf G_f preslika na $U \times \{0\}^d$, torej ga globalno izravna.

Analogno je graf holomorfne preslikave $f = (f_1, \dots, f_d)\colon U \to \mathbb{C}^d$ na domeni $U \subset \mathbb{C}^n$ kompleksna podmnogoterost kompleksne kodimenzije d v $U \times \mathbb{C}^d \subset \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^d$.

Podmnogoterosti lahko lokalno, včasih pa tudi globalno, predstavimo kot nivojnice gladkih oziroma holomorfnih preslikav. Pri tem igra odločilno vlogo naslednji klasični izrek.

Izrek 5 (**Izrek o implicitni funkciji**). *Če je f funkcija razreda $\mathcal{C}^r$ v okolici točke $p \in \mathbb{R}^m$, tako da je $f(p) = 0$ in je $df_p \neq 0$ ($\Leftrightarrow \nabla f_{(p)} \neq 0$), potem lahko nivojnico $Z = f^{-1}(0)$ lokalno v okolici točke p predstavimo kot graf $\mathcal{C}^r$ funkcije $m-1$ spremenljivk; torej je Z lokalna $\mathcal{C}^r$ hiperploskev v okolici točke p.*

Splošneje, če je $f = (f_1, \ldots, f_d) \colon U \to \mathbb{R}^d$ preslikava razreda $\mathcal{C}^r$ v neki okolici točke $p \in \mathbb{R}^m$, tako da je $f(p) = 0$ in ima diferencial df_p v točki p maksimalen rang d, potem je nivojnica $Z = f^{-1}(0)$ lokalno v okolici točke p predstavljiva kot graf neke $\mathcal{C}^r$ preslikave $g = (g_1, \ldots, g_d)$ nad domeno v $\mathbb{R}^{m-d}$. Torej je Z podmnogoterost razreda $\mathcal{C}^r$ in kodimenzije d v neki okolici točke p.

Natančneje: Če je f funkcija razreda $\mathcal{C}^r$ v okolici točke $p = (p_1, \ldots, p_m) \in \mathbb{R}^m$ za nek $r \geq 1$ in je $\frac{\partial f}{\partial x_m}(p) \neq 0$, potem lahko v neki okolici točke p nivojnico $\{f = 0\}$ predstavimo kot graf

$$x_m = g(x_1, \ldots, x_{m-1})$$

neke $\mathcal{C}^r$ funkcije g, definirane v okolici točke $(p_1, \ldots, p_{m-1}) \in \mathbb{R}^{m-1}$. Koordinatna projekcija $(x_1, \ldots, x_m) \mapsto (x_1, \ldots, x_{m-1})$ zato podaja lokalno karto razreda $\mathcal{C}^r$ v okolici p na nivojnici $Z = \{f^{-1}(0)\}$.

Analogen izrek velja za holomorfne preslikave.

Ker je izrek o implicitni funkciji lokalne narave, velja tudi za funkcije in preslikave na mnogoterostih.

Primer 11. Sfera $\mathbb{S}^n_\rho$ s središčem 0 in polmerom $\rho > 0$ v $\mathbb{R}^{n+1}$ je podana z enačbo

$$f(x_0, x_1, \ldots, x_n) = x_0^2 + x_1^2 + \cdots + x_n^2 = \rho^2.$$

Ker je diferencial df_p enak 0 samo v izhodišču $p = 0$, je $\mathbb{S}^n_\rho$ realno analitična hiperploskev v $\mathbb{R}^{n+1}$ za vsak $\rho > 0$.

Podobno dobimo *kompleksno sfero* $\Sigma \subset \mathbb{C}^{n+1}$ kot nivojnico zgornje funkcije, pri čemer spremenljivke $x_0, \ldots, x_n$ zavzamejo poljubne kompleksne vrednosti.

Primer 12. Če je X gladka mnogoterost dimenzije m z robom, potem je njen rob ∂X gladka podmnogoterost dimenzije $m-1$. Npr., enotna sfera $\mathbb{S}^m \subset \mathbb{R}^{m+1}$ je rob zaprte enotne krogle

$$\overline{\mathbb{B}}^{m+1} = \{(x_0, x_1, \ldots, x_m) \in \mathbb{R}^{m+1} \colon x_0^2 + \ldots + x_m^2 \leq 1\}.$$

Primer 13. Za vsako zaprto množico $E \subset \mathbb{R}^n$ obstaja nenegativna gladka funkcija $f \colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}_+$, da je $\{f = 0\} = E$. Torej nivojnica $f^{-1}(0)$ gladke funkcije v splošnem ni mnogoterost. V tem primeru pogoji izreka o implicitni funkciji niso izpolnjeni.

Izrek o implicitni funkciji je preprosta posledica izreka o inverzni preslikavi. V posebnem primeru $d = 1$ je redukcija naslednja. Preslikava

$$F(x_1, \ldots, x_m) = (x_1, \ldots, x_{m-1}, f(x_1, \ldots, x_m)) \in \mathbb{R}^m$$

je razreda $\mathcal{C}^r$ v okolici točke p. Njen diferencial dF je podan z Jacobijevo matriko

$$\mathcal{J}_F = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & 0 \\ & I_{m-1} & & \vdots \\ & & & 0 \\ \hline \partial f/\partial x_1 & \ldots & \partial f/\partial x_{m-1} & \partial f/\partial x_m \end{array}\right]$$

Ker je $\det \mathcal{J}_F = \frac{\partial f}{\partial x_m} \neq 0$, je po izreku o inverzni preslikavi F obrnljiva v točki p. Torej lahko enačbo $F(x) = y$ enolično rešimo kot $x = G(y)$ za y v okolici točke $F(p)$. Pišimo $G = (g_1, \ldots, g_m)$. Iz oblike preslikave F dobimo s primerjavo koordinat naslednje enačbe:

$$x_1 = y_1, \ldots, x_{m-1} = y_{m-1},\ x_m = g_m(x_1, \ldots, x_{m-1}, y_m).$$

Ker je nivojnica $Z = \{f = 0\}$ določena z enačbo $y_m = 0$, iz zgornjih enačb sledi, da je Z lokalno predstavljena z grafom

$$x_m = g_m(x_1, \ldots, x_{m-1}, 0).$$

Posledica 2. *Če je f gladka funkcija in je $df_p \neq 0$ za vsako točko $p \in Z = f^{-1}(0)$, potem je Z gladka podmnogoterost dimenzije $n - 1$.*

Definicija 13. Število $c \in \mathbb{R}$ je regularna vrednost funkcije f, če je $df_p \neq 0$ za vsak $p \in f^{-1}(c)$. Vrednost, ki ni regularna, je kritična.

Iz definicije sledi, da je število c kritična vrednost funkcije f natanko tedaj, ko nivojnica $f^{-1}(c)$ vsebuje vsaj eno kritično točko, to je točko, v kateri je $df_p = 0$. V takih točkah nivojnica ni nujno mnogoterost, kot lahko vidimo na naslednjem primeru.

Primer 14. Oglejmo si ravninsko krivuljo, podano z enačbo

$$C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \colon x^2 = y^3\}.$$

Ekvivalentno: $y = \sqrt[3]{x^2} = x^{\frac{2}{3}}$. Lahko jo parametriziramo s $t \in \mathbb{R}$:

$$x(t) = t^3, \quad y(t) = t^2.$$

V okolici točke $(0, 0)$ krivulja C ni gladka podmnogoterost, je pa topološka mnogoterost.

Naloga: oglej si nivojnice $x^2 - y^3 = c$ za majhne c v okolici $(0, 0)$.

Izrek o implicitni funkciji je poseben primer naslednjega izreka o rangu.

Izrek 6 (Izrek o rangu preslikave). *Naj bo $D \subset \mathbb{R}^n$ domena in $f\colon D \to \mathbb{R}^m$ preslikava razreda $\mathcal{C}^r$ za nek $r \geq 1$. Če je rang*

$$k = \operatorname{rang} df_x = \operatorname{rang}_x f \leq \min\{n, m\}$$

konstanten (neodvisen od točke $x \in D$), potem za vsako točko $p \in D$ obstajata $\mathcal{C}^r$ karti (U, ϕ) na $\mathbb{R}^n$ in (V, ψ) na $\mathbb{R}^m$, tako da je $p \in U \subset D$, $\phi\colon U \overset{\cong}{\to} U' \subset \mathbb{R}^n$, $\phi(p) = 0$ $f(U) \subset V$, $\psi\colon V \overset{\cong}{\to} V' \subset \mathbb{R}^m$, $\psi(f(p)) = 0$,

$$\begin{tikzcd} U \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\phi"] & V \arrow[d, "\psi"] \\ U' \arrow[r, "\tilde{f}"] & V' \end{tikzcd}$$

tako da je preslikava $\tilde{f} = \psi \circ f|_U \circ \phi^{-1}\colon U' \to V'$ oblike

$$\tilde{f}(x_1, \ldots, x_n) = (x_1, \ldots, x_k, 0, \ldots, 0), \quad x = (x_1, \ldots, x_n) \in U'.$$

Torej je $\tilde{f} = \iota \circ \pi$, pri čemer je

$$\pi\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^k, \quad \pi(x_1, \ldots, x_n) = (x_1, \ldots, x_k) \quad \text{(koordinatna projekcija)},$$
$$\iota\colon \mathbb{R}^k \hookrightarrow \mathbb{R}^m, \quad \iota(x_1, \ldots, x_k) = (x_1, \ldots, x_k, 0, \ldots, 0) \quad \text{(vložitev)},$$

Izrek o rangu se dokaže podobno kot izrek o implicitni funkciji z redukcijo na izrek o inverzni preslikavi. Ker je izrek lokalen, se direktno posploši na mnogoterosti.

Posebni primeri – lokalni difeomorfizmi, imerzije, submerzije:

1. $k = m = n \Longrightarrow \tilde{f} = \mathrm{Id}$. Preslikava f je *lokalni difeomorfizem.*
2. $k = n \leq m \Longrightarrow \tilde{f}(x_1, \ldots, x_n) = (x_1, \ldots, x_n, 0, \ldots, 0)$; f se imenuje *imerzija.*
3. $n \geq m = k \Longrightarrow \tilde{f}(x_1, \ldots, x_n) = (x_1, \ldots, x_m)$ projekcija na prvih m koordinat; preslikava f s to lastnostjo se imenuje *submerzija.*

Iz izreka o implicitni funkciji preprosto sledi naslednja trditev.

Trditev 6. *Naj bosta X in Y mnogoterosti razreda $\mathcal{C}^r$ $(r \geq 1)$ in $f\colon X \to Y$ preslikava razreda $\mathcal{C}^r$. Denimo, da za neko točko $y_0 \in Y$ velja*

$$\operatorname{rang}_x f = \dim Y \qquad \forall x \in f^{-1}(y_0).$$

Potem je množica $f^{-1}(y_0)$ podmnogoterost X razreda $\mathcal{C}^r$ in kodimenzije $\dim Y$*; torej je*

$$\dim X = \dim f^{-1}(y_0) + \dim Y.$$

Posledica 3. *Če je $f\colon X \to Y$ submerzija, je vsako vlakno $f^{-1}(y) \subset X$ $(y \in Y)$ podmnogoterost kodimenzije* $\dim Y$ *mnogoterosti X.*

I.7 Imerzije in vložitve mnogoterosti

Naj bosta X in Y mnogoterosti razreda $\mathcal{C}^r$ za nek $r \in \{1, 2, \ldots, \infty, \omega, \mathscr{O}\}$. Zanima nas, kdaj je slika $f(X) \subset Y$ neke $\mathcal{C}^r$ preslikave $f\colon X \to Y$ podmnogoterost v Y.

Izrek o rangu (Izrek 6) pove naslednje:

Trditev 7. *Če je $f\colon X \to Y$ $\mathcal{C}^r$ preslikava s konstantnim rankom k, ima vsaka točka $p \in X$ odprto okolico $U \subset X$, tako da je $f(U)$ podmnogoterost razreda $\mathcal{C}^r$ in dimenzije k v Y. V posebnem to velja za vsako imerzijo $f\colon X \to Y$ (preslikavo z rangom enakim $n = \dim X$ v vsaki točki).*

Pravimo, da je vsaka imerzija $f\colon X \to Y$ *lokalno vložitev.*

Globalno slika $f(X)$ imerzije ni nujno podmnogoterost iz različnih razlogov. Najočitnejši so morebitne dvojne točke (samopresečišča) preslikave f. Vendar to ni edini razlog: premico $\mathbb{R}$ lahko injektivno imerziramo v $\mathbb{R}^2$ tako, da ima slika $N = f(\mathbb{R})$ stekališča v točkah iz N, to je, obstaja zaporedje $x_k \in \mathbb{R}$ z $\lim_{k\to\infty} x_k = +\infty$, tako da je $\lim_{k\to\infty} f(x_k) = p \in N$. Slika N tedaj ni podmnogoterost v nobeni okolici točke p.

Pozitiven odgovor na zastavljeno vprašanje daje naslednji izrek.

Izrek 7 (Vložitve mnogoterosti). *Naj bo $f\colon X \to Y$ injektivna imerzija razreda $\mathcal{C}^r$. Slika $f(X) \subset Y$ je $\mathcal{C}^r$ podmnogoterost mnogoterosti Y natanko tedaj, ko je $f\colon X \to f(X)$ homemorfizem. (Pri tem je $f(X)$ opremljena z relativno topologijo kot podprostor v Y.)*

Definicija 14. Injektivna imerzija $f\colon X \to Y$, ki je homemorfizem X na sliko $f(X) \subset Y$, se imenuje $\mathcal{C}^r$ *vložitev* X v Y.

Dokaz. Naj bo $f\colon X \to Y$ injektivna imerzija razreda $\mathcal{C}^r$. Označimo $n = \dim X$ in $m = \dim Y$; torej je $n \le m$. Izberimo točko $p \in X$ in označimo $q = f(p) \in f(X)$. Po izreku o rangu (Izrek 6) obstaja odprta okolica $U \subset X$ točke p, odprta okolica $V \subset Y$ točke q in lokalna karta $\psi\colon V \to V' \subset \mathbb{R}^m$ na Y, tako da velja $\psi(q) = 0$ in

$$\phi(f(U) \cap V) = V' \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}^{m-n}). \tag{I.7.1}$$

Predpostavimo, da je $f\colon X \to f(X)$ homeomorfizem. Tedaj je množica $f(U)$ odprta okolica točke $q = f(p)$ v relativni topologiji na $f(X)$. Torej obstaja odprta množica $W \subset Y$, tako da je $f(X) \cap W = f(U)$. Naj bo $V_0 = V \cap W$ (okolica točke q) in $V_0' = \psi(V_0) \subset \mathbb{R}^m$. Tedaj iz (I.7.1) sledi

$$\psi(f(X) \cap V_0) = V_0' \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}^{m-n}). \tag{I.7.2}$$

Ker je $f\colon X \to f(X)$ bijektivna, to velja za poljubno točko $q \in f(X)$, zato je $f(X)$ podmnogoterost dimenzije $n = \dim X$ in razreda $\mathcal{C}^r$ v Y.

Obratno, predpostavimo da je $f(X)$ podmnogoterost v Y. Fiksirajmo par točk $p \in X$ in $q = f(p) \in Y$ kot zgoraj. Ker je $f(X)$ podmnogoterost v Y, obstaja koordinatna okolica $V_0 \subset Y$ točke $q = f(p)$ in lokalna karta $\psi\colon V_0 \to V_0' \subset \mathbb{R}^m$, ki zadošča pogoju (I.7.2). Ker je f zvezna, obstaja okolica $U \subset X$ točke p, tako da je $f(U) \subset V_0$. Ker je f imerzija, lahko U po potrebi zmanjšamo tako, da je $f\colon U \to f(U)$ difeomorfizem. Kompozicija $\psi \circ f\colon U \to (\psi \circ f)(U) = V'$ je tedaj difeomorfizem množice U na odprto podmnožico $V' \subset (\mathbb{R}^n \times \{0\}^{m-n}) \cap V_0'$ v koordinatnem podprostoru $\mathbb{R}^n \times \{0\}^{m-n}$ prostora $\mathbb{R}^m$. Izberimo odprto množico $W' \subset V_0'$, tako da je $V' = W' \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}^{m-n})$. Ker je $\psi\colon V_0 \to V_0'$ homeomorfizem, je množica $W = \psi^{-1}(W') \subset Y$ odprta v Y. Iz definicije sledi, da W zadošča pogoju $f(U) = f(X) \cap W$. Torej je množica $f(U)$ odprta v relativni topologiji na $f(X)$. Ker smo to pokazali za neko okolico U poljubne točke $p \in X$, je preslikava $f\colon X \to f(X)$ odprta. Ker je tudi zvezna in bijektivna, je homeomorfizem. $\square$

Definicija 15. Zvezna preslikava $f\colon X \to Y$ topoloških prostorov se imenuje *prava*, če je za vsako kompaktno množico $K \subset Y$ njena praslika $f^{-1}(K) = \{x \in X : f(x) \in K\}$ tudi kompaktna.

Naloga. Naj bosta X in Y lokalno kompaktna Hausdorffova topološka prostora (npr., mnogoterosti). Dokaži naslednje trditve.

(a) Preslikava $f\colon X \to Y$ je prava natanko tedaj, ko je za vsako diskretno množico $A = \{a_j\} \subset X$ njena slika $f(A) = \{f(a_j)\} \subset Y$ diskretna v Y. (Množica A se imenuje diskretna, če je zaprta in je vsaka njena točka izolirana.)

(b) Naj bosta X in Y kompaktni topološki mnogoterosti z robom in naj bo $f\colon X \to Y$ zvezna preslikava, ki preslika notranjost $\mathring{X} = X \setminus \partial X$ v notranjost $\mathring{Y} = Y \setminus \partial Y$. Dokaži, da je preslikava $f\colon \mathring{X} \to \mathring{Y}$ prava natanko tedaj, ko velja $f(\partial X) \subset \partial Y$ (to je, f preslika rob mnogoterosti X v rob mnogoterosti Y).

(c) Vsaka prava prelikava je *zaprta*, to je, slika vsake zaprte množice $E \subset X$ je zaprta množica v Y.

(d) **(Lokalizacija pravih preslikav.)** Če je f prava, potem za vsako točko $q \in Y$ in odprto množico $U \subset X$, ki vsebuje prasliko $f^{-1}(q)$, obstaja taka odprta okolica $V \subset Y$ točke q, da je $f^{-1}(V) \subset U$.

Iz točke (d) in izreka 7 sledi naslednje:

Posledica 4. *Če je $f\colon X \to Y$ prava injektivna imerzija razreda $\mathcal{C}^r$, je slika $f(X) \subset Y$ zaprta $\mathcal{C}^r$ podmnogoterost mnogoterosti Y in $f\colon X \to f(X)$ je $\mathcal{C}^r$ difeomorpfizem.*

Naslednji klasični izrek je dokazal H. Whitney.

Izrek 8. *Za vsako mnogoterost X razreda $\mathcal{C}^r$ $(r = 1, 2, \ldots, \infty)$ obstaja prava $\mathcal{C}^r$ vložitev $f\colon X \to \mathbb{R}^N$, $N = 2 \dim X + 1$.*

I.8 Krovne in kvocientne mnogoterosti

Trditev 8. *Naj bo $\pi\colon X \to Y$ lokalni homeomorfizem Hausdorffovih 2-števnih prostorov. Če ima Y strukturo $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti, potem obstaja na X natanko določena struktura $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti, tako da je π lokalni $\mathcal{C}^r$-difeomorfizem.*

Rečemo, da smo $\mathcal{C}^r$ strukturo na Y *povlekli nazaj* na X s homeomorfizmom.

Dokaz te trditve je preprost. Naj bo $\mathcal{V} = \{(V_j, \psi_j)\}$ $\mathcal{C}^r$-atlas na Y. Naj bo $U \subset X$ dovolj majhna odprta množica, tako da je $\pi(U) \subset V_j$ za nek j. Kompozicija $\psi \circ \pi\colon U \to \mathbb{R}^n$ je homeomorfizem na odprto podmnožico $(\psi_j \circ \pi)(U) \subset \mathbb{R}^n$. Par $(U, \psi_j\pi)$ vzamemo za lokalno karto na X. Prostor X lahko pokrijemo s takimi kartami in dobimo atlas $\mathcal{U} = \{(U_i, \phi_i)\}$ na X. Takoj vidimo, da je to $\mathcal{C}^r$-atlas. Prehodna preslikava: $\phi_j \circ \phi_i^{-1} = (\psi_j \circ \pi) \circ (\psi_i \circ \pi)^{-1} = \psi_j \circ \pi \circ (\pi|_{U_i})^{-1} \circ \psi_i^{-1} = \psi_j \circ \psi_i^{-1}$. Torej dobimo iste prehodne preslikave kot v atlasu $\mathcal{V}$ na Y.

Oglejmo si preslikavo $\pi|_{U_i}\colon U_i \to Y$ v paru lokalnih kart $(U_i, \psi_i \circ \pi)$ na X in (V_i, ψ_i) na Y:

$$\tilde{\pi} = \psi_i \circ \pi \circ (\psi_i \circ \pi)^{-1} = \psi_i \circ \pi \circ (\pi|_{U_i})^{-1} \circ \psi_i^{-1} = \mathrm{id}$$

$$\begin{tikzcd}
U_i \arrow[r, "\pi"] \arrow[d, "\phi_i = \psi_i \circ \pi"'] \arrow[dr, phantom, "\circlearrowleft"] & V_i \arrow[d, "\psi_i"] \\
\mathbb{R}^n \arrow[r, "\tilde{\pi} = \mathrm{id}"'] & \mathbb{R}^n
\end{tikzcd}$$

Vidimo torej, da je v tem paru kart π podana z identično preslikavo.

Oglejmo si sedaj naslednji obratni problem. Naj bo $\pi\colon X \to Y$ lokalni homeomorfizem. Predpostavimo, da sta X in Y 2-števna Hausdorffova prostora in da je π surjektivna. Recimo, da je X opremljena s strukturo gladke $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti. Vprašanje je, kdaj obstaja $\mathcal{C}^r$-struktura na Y, da je π lokalni difeomorfizem.

Recimo, da za neko točko $y \in Y$ obstajata vsaj dve točki $x_1 \neq x_2 \in X$, tako da velja $\pi(x_1) = \pi(x_2) = y$. Ker je π lokalni homeomorfizem, obstajajo okolice $x_1 \in U_1 \subset X$, $x_2 \in U_2 \subset X$ in $y \in V \subset Y$, da je $\pi|_{U_j}\colon U_j \to V$ homeomorfizem za $j = 1, 2$. Če sta U_1, U_2 dovolj majhni, potem obstajata $\mathcal{C}^r$ lokalni karti $\phi_j\colon U_j \xrightarrow{\cong} U_j' \subset \mathbb{R}^n$ za $j = 1, 2$. Sedaj dobimo dve lokalni karti na Y:

$$(V, \underbrace{\phi_j \circ (\pi|_{U_j})^{-1}}_{\psi_j}) \quad \text{za } j = 1, 2.$$

Oglejmo si prehodno preslikavo:

$$\psi_2 \circ \psi_1^{-1} = \phi_2 \circ (\pi|_{U_2})^{-1} \circ (\phi_1 \circ (\pi|_{U_1})^{-1}) = \phi_2 \circ (\pi|_{U_2})^{-1} \pi|_{U_1} \circ \phi_1^{-1} = \phi_2 \circ (\underbrace{(\pi|_{U_2})^{-1} \circ \pi|_{U_1}}_{U_1 \xrightarrow{\cong} U_2}) \circ \phi_1^{-1}$$

Če bi vedeli, da je $\pi_{12} \overset{def}{=} (\pi|_{U_2})^{-1} \circ \pi|_{U_1}$ difeomorfizem (v dani $\mathcal{C}^r$-strukturi na X), lahko zaključimo, da sta karti (V, ψ_1) in (V, ψ_2) na Y $\mathcal{C}^r$ kompatibilni.

Sedaj bomo poiskali naravne pogoje na π, pri katerih je zgornji pogoj izpolnjen.

Definicija 16. Zvezna surjektivna preslikava $\pi\colon X \to Y$ topoloških prostorov se imenuje krovna preslikava, če ima vsaka točka $y \in Y$ odprto okolico $V \subset Y$, katere praslika $\pi^{-1}(V) = \bigsqcup_{\alpha \in A} U_\alpha$ je disjunktna unija odprtih podmnožic $U_\alpha \subset X$, tako da je za vsak $\alpha \in A$ zožitev $\pi|_{U_\alpha}\colon U_\alpha \xrightarrow{\cong} V$ homeomorfizem množice U_α na množico V. V tem primeru trojico (X, Y, π) imenujemo *krov.* Prostor X je *totalni prostor*, Y pa je *bazni prostor* krova.

Krov je isto kot sveženj z diskretno topologijo na vlaknu $A \cong \pi^{-1}(y)$. O svežnjih s splošnejšimi (nediskretnimi) vlakni bomo govorili kasneje.

Definicija 17. Naj bo $\pi\colon X \to Y$ krov. Preslikava $f\colon X \to X$, ki zadošča pogoju $\pi \circ f = \pi$, se imenuje *krovna translacija.* Grupo vseh krovnih translacijo krova π označimo z $\mathrm{Deck}_\pi(X)$.

Opomba. Očitno velja $\pi \circ f = \pi$ natanko tedaj, ko za vsako točko $x \in X$ leži njena slika $f(x)$ na istem vlaknu preslikave π. Iz definicij sledi, da je vsaka krovna translacija lokalno (na majhnih množicah) oblike $f|_{U\alpha} = (\pi|_{U_\beta})^{-1} \circ \pi|_{U_\alpha}\colon U_\alpha \to U_\beta$. $\mathrm{Deck}_\pi(X)$ je dejansko grupa za kompozicijo $\circ$.

Naloga. Naj bo X povezan, $f \in \mathrm{Deck}_\pi(X)$ in $f(x) = x$ za nek $x \in X$. Dokaži, da je $f = \mathrm{Id}_X$.

Naloga. Dokaži: Če je X kompakten in je $\pi\colon X \to Y$ surjektiven lokalen homeomorfizem, potem je π končnolistni krov (to je, krov s končnim vlaknom).

Definicija 18. Krov $\pi\colon X \to Y$ se imenuje *regularen*, če grupa $\mathrm{Deck}_\pi(X)$ krovnih translacij deluje tranzitivno na vsakem vlaknu (to je, poljubni dve točki na istem vlaknu $\pi^{-1}(y)$ lahko preslikamo eno v drugo z neko krovno translacijo).

Primer 15.

1. Krožnica $\mathbb{S}^1 = \{z \in \mathbb{C} \colon |z| = 1\}$. Naj bo $k \in \mathbb{N}$.
   $\pi\colon \mathbb{S}^1 \to \mathbb{S}^1$, $\pi(z) = z^k$ je krovna projekcija.
   Vlakno $\pi^{-1}(w) = \{z_1, \ldots, z_k\}$ so ravno vsi k-ti koreni števila w.
   $$w = e^{i\theta}: \quad z_j = e^{\frac{i\theta}{k} + j\frac{2\pi i}{k}}, \quad j = 1, \ldots, k.$$
   Grupa krovnih transformacij je generirana z rotacijo
   $$\mathbb{S}^1 \ni z \xmapsto{\sigma} e^{\frac{2\pi i}{k}} z.$$
   Torej je $\mathrm{Deck}_\pi S_1 = \langle\sigma\rangle = \mathbb{Z}_k := \mathbb{Z}/_{k\mathbb{Z}}$.
2. Ista preslikava $z \mapsto z^k$, $\mathbb{C}_* \to \mathbb{C}_*$.

3. $\mathbb{R} \xrightarrow{\pi} \mathbb{S}^1$, $x \mapsto e^{2\pi i x} = w$
   Vlakno: $\pi^{-1}(w) = x + \mathbb{Z}$
   Grupa $\mathrm{Deck}_\pi(\mathbb{R})$ je generirana s preslikavo $\sigma\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, $\sigma(x) = x + 1$.
   $\mathrm{Deck}_\pi \mathbb{R} = \langle \sigma \rangle = \mathbb{Z}$.

4. Nadomestimo $\mathbb{R}$ s $\mathbb{C}$: $\mathbb{C} \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}_*$, $z \mapsto e^{2\pi i z}$.
   $\mathrm{Deck}_\pi \mathbb{C} = \langle \sigma \rangle = \mathbb{Z}$, $\sigma(z) = z + 1$

Če je $\pi\colon X \to Y$ regularen krov, potem je očitno

$$Y \cong X/_{\mathrm{Deck}_\pi X} = X/_\sim,$$

kjer je relacija definirana s pogojem

$$x \sim x' \Leftrightarrow \exists \sigma \in \mathrm{Deck}_\pi X,\ \sigma(x) = x'.$$

Kvocient Y se v takem primeru imenuje *prostor orbit* grupe $\mathrm{Deck}_\pi X$.

Primer 16. $X = \mathbb{R}$, $\sigma(x) = x + 1$, $\mathbb{R}/_\sim = \mathbb{R}/_{x \sim x+1} = \mathbb{S}^1$.

Sedaj si oglejmo obraten problem. Najprej si moramo ogledati pojem delovanja grupe na mnogoterosti. Označimo z $\mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$ množico vseh $\mathcal{C}^r$ difeomorfizmov $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti X; to je očitno grupa za kompozicijo.

Definicija 19. Naj bo X $\mathcal{C}^r$-mnogoterost in Γ neka grupa z enoto 1. Γ deluje kot grupa $\mathcal{C}^r$ difeomorfizmov na X, če je vsakemu elementu $g \in \Gamma$ prirejen nek difeomorfizem $\theta_g \in \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$, tako da velja

$$\theta_1 = \mathrm{Id}_X, \quad \theta_{gg'} = \theta_g \circ \theta_{g'} \quad \forall g, g' \in \Gamma.$$

Ekvivalentno, predpis $\Gamma \ni g \mapsto \theta_g \in \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$ je homomorfizem grup. (Odtod sledi $\theta_{g^{-1}} = \theta_g^{-1}$ za vsak $g \in \Gamma$.)

Grupa deluje *zvesto*, če $1 \neq g \in \Gamma \implies \theta_g \neq \mathrm{Id}_X$ (to je, homomorfizem $\Gamma \to \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$, $g \mapsto \theta_g$, je injektiven).

Tako delovanje grupe Γ na X se imenuje *levo delovanje*. *Desno delovanje* definiramo s pogojem $\theta_{gg'} = \theta_{g'} \circ \theta_g$. Omejili se bomo na leva delovanja.

Če je delovanje zvesto, lahko grupni element $g \in \Gamma$ identificiramo s prirejenim difeomorfizmom $\theta_g \in \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$; s tem identificiramo Γ z ustrezno podgrupo v $\mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$. V tem primeru bomo pogosto pisali

$$\theta_g(x) = g \cdot x, \quad x \in X,\ g \in \Gamma.$$

Brez izgube splošnosti se omejimo na zvesta delovanja.

Orbita točke $x \in X$ (glede na dano grupo) je množica

$$\Gamma x = \{g\cdot x \colon g \in \Gamma\} \subset X.$$

Očitno je X disjunktna unija orbit. Relacija

$$x \sim y \overset{def}{\Longleftrightarrow} \left[\exists g \in \Gamma,\ \text{tako da } g\cdot x = y\right] \Longleftrightarrow \Gamma x = \Gamma y$$

je očitno ekvivalenčna relacija na X. Kvocientni prostor $X/_{\sim} = X/_{\Gamma}$ se imenuje *prostor orbit.*

$$\begin{tikzcd} X \arrow[d, "\pi"', "\text{kvoc. proj.}"] \\ X/_{\Gamma} \end{tikzcd}$$

Vprašanje je, kdaj (pri kakšnih pogojih na delovanje) je $X/_{\Gamma}$ Hausdorffov prostor in kdaj je kvocientna projekcija $\pi\colon X \to X/_{\Gamma}$ krovna projekcija.

Definicija 20. Naj bo X $\mathcal{C}^r$-mnogoterost in Γ neka diskretna grupa $\mathcal{C}^r$-difeomorfizmov mnogoteorsti X ($\Gamma \subset \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$). Grupa Γ deluje na X *povsem nezvezno* ali *diskretno* (angl.: *totally discontinuously*), če velja:

1. Vsaka točka $x \in X$ ima odprto okolico $U \subset X$, tako da je $gU \cap U = \emptyset$ razen za neko končno množico elementov $g \in \Gamma$.

2. Za vsak par točk $x, x' \in X$, ki nista na isti orbiti ($\Gamma x \neq \Gamma y$) obstajata odprti okolici $x \in U \subset X$, $x' \in U' \subset X$, tako da je $gU \cap U' = \emptyset$ za vse $g \in \Gamma$. (Ekvivalentno, $gU \cap g'U' = \emptyset \quad \forall g, g' \in \Gamma$.)

Če poleg tega zahtevamo še

3. $gx \neq x \quad$ za vsak $x \in X$ in vsak $g \in \Gamma \setminus \{1\}$,

potem imamo *popolnoma nezvezno delovanje brez negibnih točk.*

Točka $x \in X$ se imenuje *negibna točka* difeomorfizma $g \in \mathrm{Diff}(X)$, če velja $gx = x$. Iz prve lastnosti zgoraj preprosto sledi, da je za vsako točko $x \in X$ njena **izotropna grupa**

$$\Gamma_x = \{g \in \Gamma : g\cdot x = x\}$$

končna podgrupa grupe Γ. V obratni smeri lahko dokažemo naslednje:

Trditev 9. *Če deluje Γ povsem nezvezno na X, potem za vsako točko $x \in X$ obstaja odprta okolica $x \in U \subset X$, tako da velja*

$$gU \cap U \neq \emptyset \Longleftrightarrow g \in \Gamma_x.$$

Dokaz. Implikacija $\Leftarrow$ je očitna. Dokažimo sedaj implikacijo $\Rightarrow$. Recimo, da za neko okolico $U \subset X$ točke x elementi $g_1 = 1, g_2, \ldots, g_k \in \Gamma$ zadoščajo pogoju $g_j(U) \cap U \neq \emptyset$, za vse ostale elemente $g \notin \{g_1, \ldots, g_k\}$ pa velja $g(U) \cap U = \emptyset$. Če U zmanjšamo, se množica $\{g_1, \ldots, g_k\}$ kvečjemu zmanjša. Torej lahko izberemo U' tako, da za vsako manjšo okolico $x \in U' \subset U$ dobimo isto kolekcijo elementov $g_1, \ldots, g_k \in \Gamma$, ki zadoščajo zgornji predpostavki. Odtod sledi, da je $g_j(x) = x$ za $j = 1, \ldots, k$, torej so ti elementi v izotropni grupi Γ_x. To vidimo takole. Izberemo zaporedje vloženih okolic

$$U' = U_1 \supset U_2 \supset U_3 \supset \ldots, \quad \bigcap_{j=1}^{\infty} U_j = \{x\}.$$

Fiksirajmo indeks $j \in \{1, \ldots, k\}$. Za vsako množico U_l je $g_j(U_l) \cap U_l \neq \emptyset$. Torej obstaja točka $x_l \in U_l$, tako da je $g_j(x_l) \in U_l$. Pri $l \to \infty$ očitno velja $x_l \to x$ in $g_j(x_l) \to x$, saj se okolice U_l krčijo proti x. Iz zveznosti g_j sledi $g_j(x) = x$. $\square$

Posledica 5. *Če Γ deluje na X povsem nezvezno in brez negibnih točk, potem ima vsaka točka $x \in X$ okolico $U \subset X$, tako da je $gU \cap U = \emptyset$ za vsak $g \in \Gamma \setminus \{1\}$.*

Naloga. Dokaži: Če Γ deluje povsem nezvezno, potem je vsaka orbita

$$\Gamma x = \{gx : g \in \Gamma\} \subset X$$

zaprta diskretna podmnožica v X, torej brez stekališč.

Vprašanje: Recimo, da Γ deluje na X tako, da so vse njene orbite Γx diskretne v X in je vsaka izotropna grupa Γ_x končna. Ali odtod sledi aksiom 1^o v definiciji povsem nezveznega delovanja?

Izrek 9. *Naj bo X $\mathcal{C}^r$-mnogoterost ($r \in \{0, 1, \ldots, \infty, \omega, \mathscr{O}\}$). Če neka končna ali števna grupa Γ deluje na X povsem nezvezno in brez fiksnih točk, potem ima prostor orbit $X/_\Gamma = Y$ strukturo $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti, tako da je kvocientna projekcija $X \xrightarrow{\pi} X/_\Gamma = Y$ krovna projekcija razreda $\mathcal{C}^r$ in je Γ grupa krovnih translacij: $\Gamma = \mathrm{Deck}_\pi(X)$.*

Dokaz. Naj bo $x \in X$. Po pogojih izreka obstaja odprta okolica $U \subset X$, tako da je $gU \cap U = \emptyset$ za vsak $1 \neq g \in \Gamma$. Torej je $[U] = \pi(U) \subset Y$ okolica točke $\Gamma x = [x] \in Y$, za katero velja $\pi^{-1}([U]) = \bigsqcup_{g \in \Gamma} gU$ in so množice gU paroma disjunktne. Projekcija $\pi \colon gU \to [U]$ je očitno bijektivna in zvezna (po definiciji kvocientne topologije na Y). Poleg tega je π odprta preslikava, zato je zožitev $\pi \colon gU \to [U]$ homeomorfizem. Torej je Y lokalno evklidski prostor in je π krovna projekcija. Ker je X 2-števen, je tak tudi Y.
Zahteva 2^o v definiciji povsem nezveznosti nam zagotovi, da je kvocientni prostor Y Hausdorffov.
$\mathcal{C}^r$-strukturo na Y definiramo na naslednji način. Naj bo $x \in X$. Izberimo odprto okolico $x \in U \subset X$, tako da je $gU \cap U = \emptyset \quad \forall g \neq 1$. Okolico U po potrebi še zmanjšamo, tako

da obstaja lokalna karta $\phi\colon U \to \widetilde{U} \subset \mathbb{R}^n$ (v danem $\mathcal{C}^r$ atlasu na X). Sedaj vzamemo preslikavo

$$\phi \circ (\pi|_U)^{-1} \colon \pi(U) \to \widetilde{U} \subset \mathbb{R}^n$$

za lokalno karto na Y. Če sta $\psi = \phi \circ (\pi|_U)^{-1}$ in $\psi' = \phi' \circ (\pi|_{gU})^{-1}$ (pričemer je ϕ' lokalna karta na translatu gU) dve karti te oblike, je prehodna preslikava enaka

$$\psi' \circ \psi^{-1} = \phi' \circ (\pi|_{gU})^{-1} \circ (\phi \circ (\pi|_U)^{-1})^{-1} = \phi' \circ \underbrace{(\pi|_{gU})^{-1} \circ \pi|_U}_{\theta_g \in \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)} \circ \phi^{-1} \in \mathcal{C}^r$$

S tem je izrek dokazan. □

Primer 17. 1. Ciklična grupa $\mathbb{Z}_k = \{0, 1, \ldots, k-1\}$ deluje na $\mathbb{C}$ z generatorjem

$$\sigma(z) = e^{\frac{2\pi i}{k}} z, \quad z \in \mathbb{C}.$$

To je ravno rotacija ravnine za k-ti koren enote.
Pripadajoča kvocientna projecija je $\pi(z) = z^k$. Torej je $\mathbb{C}/_{\langle\sigma\rangle} \cong \mathbb{C}$.
Orbita točke z je

$$\pi^{-1}(\pi(z)) = \{e^{2m\pi i/k} z \colon m = 0, 1, \ldots, k-1\}.$$

2. $X = \mathbb{C}^2$, delovanje ciklične grupe $\mathbb{Z}_2$ z generatorjem $\sigma(z, w) = (-z, -w)$. Orbita točke (z, w) vsebuje še njej antipodno točko $(-z, -w)$. Definiramo polinomsko preslikavo

$$f \colon \mathbb{C}^2 \to \mathbb{C}^2, \quad f(z, w) = (z^2, w^2, zw).$$

Orbite dane grupe so ravno vlakna preslikave f. Torej je slika $f(\mathbb{C}^2) \subset \mathbb{C}^3$ ravno prostor orbit $\mathbb{C}^2/_\Gamma$. Očitno je

$$f(\mathbb{C}^2) = \{(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) \in \mathbb{C}^3 \colon \zeta_3^2 = \zeta_1 \zeta_2\}$$

To je kvadratična kompleksna hiperploskev v $\mathbb{C}^3$, ki je singularna v izhodišču $(0, 0, 0)$.

3. $X = \mathbb{R}^2$, delovanje ciklične grupe $\mathbb{Z}_2$ z generatorjem $\sigma(x, y) = (-x, y)$ (zrcaljenje čez y os).
$\mathbb{R}^2/_\Gamma = [0, \infty) \times \mathbb{R}$ (mnogoterost z robom).
Vse točke $(0, y)$ $(y \in \mathbb{R})$ so fiksne točke delovanja.

Naloga. Recimo, da sta X, Y $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti in je $\pi : X \to Y$ $\mathcal{C}^r$ krovna projekcija. Potem $\mathrm{Deck}_\pi(X)$ deluje na X povsem nezvezno ter brez fiksnih točk. Elementi $g \in \mathrm{Deck}_\pi(X)$ so $\mathcal{C}^r$-difeomorfizmi.

Edini problem: $\mathrm{Deck}_\pi(X)$ v splošnem ne deluje tranzitivno na vlaknih krovne projekcije $\pi \colon X \to Y$. Če $\mathrm{Deck}_\pi(X)$ deluje tranzitivno na vlaknih, potem se krov imenuje *regularen.*

V tem primeru sledi, da je Y izomorfna prostoru orbit: $Y = X/_{\mathrm{Deck}_\pi(X)}$.

Zveza med krovi nad Y ter podgrupami v fundamentalni grup $\pi_1(Y)$.

Najprej bomo na kratko ponovili pojem *fundamentalne grupe* mnogoterosti, nato pa brez dokazov navedli nekaj bistvenih rezultatov o krovnih prostorih. Za dokaze glej npr. [M].

Naj bo $\mathbb{S}^1$ krožnica. Prelikave $\gamma\colon \mathbb{S}^1 \to Y$ se imenujejo *zanke* v Y. Ekvivalentno, zanka je pot $\gamma\colon [0,1] \to Y$, pri kateri se začetna in končna točka ujemata: $\gamma(0) = \gamma(1)$.

Izberemo neko točko $p \in Y$ in opazujemo le zanke, ki so pripete v točki p:

$$\gamma : \mathbb{S}^1 \to Y \qquad \gamma(1) = p$$

Dve taki zanki γ in γ' sta *homotopni*, če obstaja zvezna preslikava $H\colon \mathbb{S}^1 \times [0,1] \to Y$, ki zadošča pogojem

$$H(\cdot\,,0) = \gamma, \quad H(\cdot\,,1) = \gamma', \quad H(0,s) = H(1,s) = p \ (\forall s \in [0,1]).$$

Obstoj homotopije je ekvivalenčna relacija med zankami.

Homotopska grupa $\pi_1(Y,p)$ je množica homotopnih razredov zank v Y skozi p. V resnici je to grupa (v splošnem nekomutativna) z operacijo stika poti:

$$[\gamma][\gamma'] = [\gamma \cdot \gamma']$$

Naloga. Preveri, da je ta operacija dobro definirana, to je, da je homotopski razred stika $\gamma \cdot \gamma'$ odvisen samo od homotopskega razreda obeh zank γ in γ'.

Če je Y povezana, potem izbor bazne točke p ni bistven, saj so grupe $\pi_1(Y,p)$ za različne $p \in Y$ med seboj izomorfne. V tem primeru pišemo kar $\pi_1(Y)$.

Primer 18. $\pi_1(\mathbb{S}^1) = \mathbb{Z}$, $\pi_1(\mathbb{C}_*) = \mathbb{Z}$, $\pi_1(\mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1) = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}$.

Povezana mnogoterost Y se imenuje *enostavno povezana*, če je njena fundamentalna grupa trivialna: $\pi_1(Y) = 0$. (Včasih pišemo grupno operacijo multiplikativno: $\pi_1(Y) = 1$.)

Primer 19. $\pi_1(\mathbb{R}^n) = 0$ za vsak $n \geq 1$; $\pi_1(\mathbb{S}^n) = 0$ za vsak $n > 1$.

Vsaka zvezna preslikavo $f\colon X \to Y$ inducira homomorfizem fundamentalnih grup

$$f_*\colon \pi_1(X) \to \pi_1(Y), \quad [\gamma] \mapsto [f \circ \gamma].$$

Slika $f_*(\pi_1(X))$ je podgrupa v $\pi_1(Y)$.

Če je f krovna preslikava, potem je f_* injektivna. Pri dokazu tega dejstva potrebujemo izrek o dvigu homotopij v krovu.

Izrek 10. *Če je Y povezana in enostavno povezana mnogoterost, potem je vsak krov $\pi\colon X \to Y$ trivialen, to je $X \cong Y \times F$, kjer je F (diskretno) vlakno.*

Izrek 11. *Naj bo Y povezana mnogoterost. Za vsako podgrupo $G \subset \pi_1(Y)$ obstaja krovni prostor $f\colon X \to Y$, tako da je totalni prostor X povezan in je $f_*(\pi_1(X)) = G$. Krov $f\colon X \to Y$ je regularen natanko tedaj, ko je G podgrupa edinka grupe $\pi_1(Y)$. Tedaj je* $\mathrm{Deck}_f(X) \cong \pi_1(Y)/_G$.

Poseben primer: $G = \{0\} \subset \pi_1(Y)$, $f_*\colon \pi_1(X) \xrightarrow{bij.} G \Rightarrow \pi_1(X) = 0 \Rightarrow X$ enostavno povezan. Tak krov $X \to Y$ se imenuje *univerzalen krov* nad Y.

Ta izrek velja v vseh $\mathcal{C}^r$ kategorijah. Če je $f\colon X \to Y$ $\mathcal{C}^r$ krov, je $\mathrm{Deck}_f(X) \subset \mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$.

Uporaba: Če želimo razumeti strukturo neke $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti (recimo pri klasifikaciji mnogoterosti), si ogledamo njen univerzalni krov $\pi\colon X \to Y$. Vemo, da je X enostavno povezan in je grupa krovnih translacij $\mathrm{Deck}_\pi(X)$ podgrupa v grupi $\mathrm{Diff}_{\mathcal{C}^r}(X)$, ki deluje na X prosto in povsem nezvezno. Kvocientna mnogoterost $Y = X/_{\mathrm{Deck}_\pi}(X)$ je prostor orbit te grupe.
S tem prevedemo problem klasifikacije mnogoterosti na problem klasifikacije enostavno povezanih mnogoterosti skupaj s prostim in povsem nezveznim delovanjem grup na njih.

Primer 20. Naj bo Y *Riemannova ploskev*, to je kompleksna mnogoterost $\dim_{\mathbb{C}} Y = 1$. Preprosti primeri so $\mathbb{C}$, domene v $\mathbb{C}$ in Riemannova sfera $\mathbb{CP}^1 = \mathbb{C} \cup \{\infty\} = \mathbb{S}^2$.

Naj bo $X \xrightarrow{\pi} Y$ njen univerzalni krov. Potem je X enostavno povezana Riemannova ploskev.

Izrek 12 (Riemann-Koebe)**.** *Vsaka enostavno povezana Riemannova ploskev je biholomorfno ekvivalentna eni od ploskev $\mathbb{CP}^1$, $\mathbb{C}$, $\Delta = \{|z| < 1\}$. (Riemannov upodobitveni izrek: Vsaka domena $D \subsetneq \mathbb{C}$, $\pi_1(D) = 1$, je biholomorfno ekvivalentna disku Δ.)*

Iz elementarne teorije funkcij ene kompleksne spremenljivke je znano, da so grupe holomorfnih avtomorfizmov teh treh ploskev naslednje:

$$
\begin{array}{ll}
\mathrm{Aut}(\mathbb{CP}^1) = \{z \mapsto \frac{az+b}{cz+d}\colon\ ad - bc \neq 0\} & \text{(ulomljene linearne funkcije)} \\
\mathrm{Aut}(\mathbb{C}) = \{z \mapsto az + b\colon\ a, b \in \mathbb{C}, a \neq 0\} & \text{(kompleksna afina grupa)} \\
\mathrm{Aut}(\Delta) = \{z \mapsto e^{i\theta}\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\colon\ a \in \Delta, \theta \in \mathbb{R}\} & \text{(Möbiusove preslikave)}
\end{array}
$$

Sedaj je treba najti diskretne podgrupe $\Gamma \subset \mathrm{Aut}(X)$, $X \in \{\mathbb{CP}^1, \mathbb{C}, \Delta\}$, ki delujejo prosto in povsem nezvezno.

Ni težko preveriti, da ima vsak $\gamma \in \mathrm{Aut}\,\mathbb{CP}^1$ negibno točko. Torej $\mathbb{CP}^1$ nima netrivialnih holomorfnih kvocientov.

$\gamma(z) = az + b$, $\gamma \in \mathrm{Aut}(\mathbb{C})$ je brez negibne točke natanko tedaj, ko je $a = 1$ in $b \neq 0$. Torej je γ translacija $z \overset{\gamma}{\mapsto} z + b$. Grupa translacij $\mathbb{Z} \cong \langle \gamma \rangle \subset \mathrm{Aut}(\mathbb{C})$ deluje na $\mathbb{C}$ brez fiksnih točk in povsem nezvezno.
Če $b = 1$: kvocientna projekcija $\mathbb{C} \xrightarrow{f} \mathbb{C}_*$, $z \mapsto e^{2\pi i z}$. V splošnem $z \mapsto e^{\frac{2\pi i z}{b}}$:

$$e^{\frac{2\pi i}{b}(z+b)} = e^{\frac{2\pi i z}{b}} e^{2\pi i} = e^{\frac{2\pi i z}{b}}.$$

Naj bosta $a, b \in \mathbb{C}_*$, $\frac{a}{b} \notin \mathbb{R}$.

$$\gamma(z) = z + a, \quad \sigma(z) = z + b$$

$$\mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z} \cong \underbrace{\langle \gamma, \sigma \rangle}_{\Gamma} \subset \mathrm{Aut}(\mathbb{C})$$

$$\mathbb{C}/_{\Gamma} = \text{torus s kompleksno strukturo}$$

Brez izgube splošnosti lahko gledamo primer $a = 1$, $\omega = \frac{b}{a} \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$.

$$\Gamma_\omega = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}\omega \subset \mathrm{Aut}(\mathbb{C})$$

$$\mathbb{C}/_{\Gamma_\omega} = \mathbb{T}_\omega \quad \text{(kompleksen torus, ki pripada številu } \omega\text{)}$$

V mreži $\Gamma_\omega = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}\omega$ lahko vselej najdemo število $\omega' = u + iv$, tako da je $\Gamma_\omega = \Gamma_{\omega'}$ in velja

$$|\omega'| > 1, \quad -\frac{1}{2} < u \leq \frac{1}{2} \quad \text{ali} \quad |\omega'| = 1, \quad 0 \leq u \leq \frac{1}{2}. \tag{I.8.1}$$

Generator $\omega' \in \Gamma_\omega$ s temi lastnostmi je enolično določen in natanko določa kompleksno strukturo na torusu. Drugače povedano:

Izrek 13. *Če sta ω_1 in ω_2 dve kompleksni števili z lastnostmi (I.8.1), potem sta pripadajoča torusa $\mathbb{T}_{\omega_1} = \mathbb{C}/_{\Gamma_{\omega_1}}$ in $\mathbb{T}_{\omega_2} = \mathbb{C}/_{\Gamma_{\omega_2}}$ biholomorfno ekvivalentna natanko tedaj, ko je $\omega_1 = \omega_2$.*

Torej biholomorfno neekvivalentni kompleksni torusi sestavljajo kompleksno enoparametrično družino. (Za dokaz glej npr. L. V. Ahlfors, Complex analysis. Second ed. McGraw-Hill, New York-Toronto-London, 1966.) Vsi 2-torusi so med seboj difeomorfni.

Da se pokazati, da nobena grupa translacij ravnine $\mathbb{C}$ z več kot dvema generatorjema ne deluje povsem nezvezno. Odtod zaključimo, da so netrivialni holomorfni kvocienti ravnine $\mathbb{C}$ ravno $\mathbb{C}_*$ ter kompleksni torusi. Drugače povedano,če je Y enostavno povezana Riemannova ploskev, katere univerzalni krov je $\mathbb{C}$, potem je Y enaka eni od ploskev $\mathbb{C}, \mathbb{C}_*$ ali kompleksni torus.

Vse ostale Riemannove ploskve so holomorfni kvocienti diska $\Delta \subset \mathbb{C}$. Teh je veliko.

Naj bo S_g kompaktna orientabilna ploskev roda $g \in \mathbb{Z}_+$. Pri $g = 0$ je to 2-sfera, pri $g = 1$ imamo torus, za $g > 1$ pa je S_g povezana vsota g torusov. Taka ploskev ima do difeomorfizma natančno samo eno gladko strukturo. (To je, poljubni dve gladki strukturi na njej sta difeomorfni.)

Obstaja veliko grup $\Gamma \subset \mathrm{Aut}(\Delta)$, ki delujejo na disku povsem nezvezno in prosto (brez fiksnih točk), tako da je kvocient $\Delta/_\Gamma$ (ki je Riemannova ploskev) difeomorfen ploskvi S_g:

$$\begin{array}{c} \Delta \\ \downarrow{\scriptstyle \pi} \\ \Delta/_\Gamma \cong S_g \end{array}$$

Za različne grupe $\Gamma \subset \mathrm{Aut}(\Delta)$ lahko dobimo kvociente, ki so med seboj difeomorfni, niso pa biholomorfni.

Prostor modulov (imenovan tudi *Teichmüllerjev prostor*) je množica med seboj nebiholomorfnih kompleksnih struktur na dani ploskvi S_g. V primeru $g > 1$ lahko to množico predstavimo kot domeno v $\mathbb{C}^{3g-3}$, ki je homeomorfna krogli.

Več o uniformizacijski teoriji Riemannovih ploskev in o Teichmüllerjevih prostorih lahko najdete npr. v [L].

I.9 Svežnji

Naj bodo X, Y, Z mnogoterosti razreda $\mathcal{C}^r$ in naj bo $\pi\colon Z \to X$ submerzija razreda $\mathcal{C}^r$, tako da je vsako vlakno $Z_x = \pi^{-1}(x)$ $(x \in X)$ difeomorfno mnogoterosti Y. Taka preslikava se imenuje *sveženj z vlaknom* Y, če je projekcija π lokalno (nad majhnimi odprtimi množicami $U \subset X$) ekvivalentna projekciji $pr : U \times Y \to U$, $pr(x, y) = x$. Natančna definicija je naslednja.

Definicija 21. Preslikava $\pi\colon Z \to X$ razreda $\mathcal{C}^r$ je $\mathcal{C}^r$ *sveženj z vlaknom* Y, če ima vsaka točka $x_0 \in X$ odprto okolico $U \subset X$ in $\mathcal{C}^r$ difeomorfizem

$$\theta\colon Z|_U = \pi^{-1}(U) \to U \times Y, \tag{I.9.1}$$

tako da je $\theta(Z_x) = \{x\} \times Y$ za vsak $x \in U$. Ekvivalentno, naslednji diagram je komutativen:

$$\begin{tikzcd} Z|_U \arrow[r, "\theta"] \arrow[d, "\pi"'] & U \times Y \arrow[d, "pr"] \\ U \arrow[r, "Id"'] & U \end{tikzcd}$$

Mnogoterost X imenujemo *bazni prostor*, Z je *totalni prostor* in Y je *vlakno* svežnja.

Sveženj označujemo takole:

$$\begin{tikzcd} Y \arrow[r] & Z \arrow[d, "\pi"] \\ & X \end{tikzcd}$$

Vsak difeomorfizem $\theta\colon Z|_U = \pi^{-1}(U) \to U \times Y$ kot v definiciji se imenuje *sveženjska karta* svežnja $\pi\colon Z \to X$. Družina sveženjskih kart $\mathcal{U} = \{(U_i, \theta_i)\}_{i\in I}$, kjer je $\cup_{i\in I} U_i = X$, je *sveženjski atlas*. Prehodna preslikava

$$\theta_{ij} = \theta_i \circ \theta_j^{-1}\colon U_{ij} \times Y \to U_{ij} \times Y$$

je oblike

$$\theta_{ij}(x,y) = \big(x, g_{ij}(x,y)\big), \quad x \in U_{ij},\ y \in Y, \tag{I.9.2}$$

kjer je za vsak $x \in U_{ij}$ preslikava $g_{ij}(x,\cdot\,) \in \mathrm{Diff}^r(Y)$ difeomorfizem Y samo nase.

Definicija 22. Naj bosta $\pi\colon Z \to X$ in $\pi'\colon Z' \to X$ svežnja razreda $\mathcal{C}^r$. Preslikava $\Phi\colon Z \to Z'$ razreda $\mathcal{C}^r$, ki zadošča pogoju $\pi' \circ \Phi = \pi$, se imenuje *$\mathcal{C}^r$ izomorfizem svežnjev.*

Pogoj $\pi' \circ \Phi = \pi$ v definiciji pomeni, da komutira diagram

$$\begin{tikzcd} Z \arrow[r, "\Phi"] \arrow[d, "\pi"'] & Z' \arrow[d, "\pi'"] \\ X \arrow[r, "\mathrm{Id}"'] & X \end{tikzcd}$$

Torej Φ preslika vlakno $Z_x = \phi^{-1}(x)$ prvega svežnja difeomorfno na vlakno $Z'_x = (\phi')^{-1}(x)$ drugega svežnja za vsako točko $x \in X$. Izomorfna svežnja imata torej isto vlakno.

Primer 21 (**Svežnji z diskretnim vlaknom).** Če je Y končna ali števna množica z diskretno topologijo, potem je sveženj $\pi\colon Z \to X$ z vlaknom Y krovni prostor nad X (glej def. 16). Krovni prostori so torej svežnji z diskretnimi vlakni. □

Primer 22 (**Produktni in trivialni sveženji).** Sveženj

$$\pi\colon Z = X \times Y \to X, \quad \pi(x,y) = x$$

imenujemo *produktni sveženj z vlaknom Y nad X.*

Sveženj $\pi\colon Z \to X$ z vlaknom Y je *trivialen*, če je izomorfen produktnemu svežnju; to je, če obstaja difeomorfizem $\Phi\colon Z \to X \times Y$, tako da velja $pr \circ \Phi = \pi$. Tak difeomorfizem imenujemo tudi *trivializacija svežnja.*

Iz definicij sledi, da je sveženjska karta $\theta\colon Z|_U = \pi^{-1}(U) \to U \times Y$ izomorfizem zoženega svežnja $Z|_U$ na produktni sveženj $U \times Y$. *Torej je vsak sveženj lokalno trivialen*, torej izomorfen produktnemu svežnju nad majhnimi odprtimi množicami v bazi X. □

Pogosto omejimo tip svežnja z zahtevo, da pripadajo prehodni difeomorfizmi $g_{ij}(x,\cdot\,)$ neki dani podgrupi $\Gamma \subset \mathrm{Diff}^r(Y)$. Grupa Γ se tedaj imenuje *strukturno grupa svežnja.*

Primer 23 (Vektorski svežnji). Naj bo $Y = \mathbb{R}^n$ in $\Gamma = GL_n(\mathbb{R})$, grupa vseh obrnljivih $n \times n$ matrik (ki predstavljajo linearne izomorfizme $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$).

Sveženj z vlaknom $\mathbb{R}^n$ in strukturno grupo $GL_n(\mathbb{R})$ imenujemo *realen vektorski sveženj ranga n nad X.* (Glej def. 36 na str. 81.)

Sveženj $\pi\colon Z \to X$ z vlaknom $\mathbb{C}^n$ in strukturno grupo $GL_n(\mathbb{C})$ imenujemo *kompleksen vektorski sveženj ranga n nad X.* Če sta X in Z kompleksne mnogoterosti in so projekcija $\pi\colon Z \to X$ ter sveženjske karte (I.9.1) holomorfne, potem je $\pi\colon Z \to X$ *holomorfen vektorski sveženj* nad X.

Prehodne preslikave (I.9.2) v vektorskem svežnju so oblike

$$\theta_{ij}(x,v) = \bigl(x, g_{ij}(x)v\bigr), \quad x \in U_{ij},\ v \in \mathbb{R}^n, \tag{I.9.3}$$

kjer družina preslikav

$$g_{ij}\colon U_{ij} \to GL_n(\mathbb{R})$$

zadošča 1-kocikelnemu pogoju:

$$g_{ii} = 1, \quad g_{ij}g_{ji} = 1, \quad g_{ij}g_{jk}g_{ki} = 1.$$

Pri tem smo z 1 označili identično matriko (enoto grupe $GL_n(\mathbb{R})$). Podobno velja za kompleksne svežnje, kjer je $g_{ij}\colon U_{ij} \to GL_n(\mathbb{C})$.

Obratno: vsakemu 1-kociklu preslikav (g_{ij}) na nekem pokritju $\mathcal{U} = \{U_i\}$ baze X pripada vektorski sveženj $\pi\colon Z \to X$, ki ima sveženjski atlas $\theta_i\colon Z|_{U_i} \to U_i \times \mathbb{R}^n$ prehodnimi preslikavami g_{ij} (I.9.3). Tako dobljen vektorski sveženj je razreda $\mathcal{C}^r$ (oziroma holomorfen) natanko tedaj, ko so baza X in preslikave g_{ij} razreda $\mathcal{C}^r$ (oziroma holomorfne).

Družina prehodnih preslikav (g_{ij}) določa vektorski sveženj do izomorfizma natančno.

Več o vektorskih svežnjih v poglavju III.

Primer 24 (Univerzalni sveženj nad projektivnim prostorom). Spomnimo se (glej razdelek IV.4), da sta $\mathbb{RP}^n$ in $\mathbb{CP}^n$ realni oz. kompleksni projektivni prostor dimenzije n.

Trditev 10. *Kanonična (kvocientna) projekcija $\pi\colon \mathbb{R}^{n+1}_* \to \mathbb{RP}^n$ je realno analitičen sveženj z vlaknom $\mathbb{R}_*$.*

Projekcija $\pi\colon \mathbb{C}^{n+1}_* \to \mathbb{CP}^n$ je holomorfen sveženj z vlaknom $\mathbb{C}_*$, ki se imenuje univerzalni sveženj *nad $\mathbb{CP}^n$.*

Dokaz. Kot v dokazu trditve ... Naj bo

$$U_j = \{x = (x_0,\dots,x_n) \in \mathbb{R}^{n+1}_*\colon x_j \neq 0\}, \quad V_j = \pi(U_j) \subset \mathbb{RP}^n.$$

Definiramo preslikavo

$$\theta_j \colon U_j \to V_j \times \mathbb{R}_*, \quad \theta_j(x_0, \dots, x_n) = ([x_0 : \dots : x_n], x_j).$$

Tedaj je θ_j sveženjska karta na U_j. Za $0 \le i, j \le n$ je prehodna preslikava enaka

$$\theta_{ij}([x], v) = (\theta_i \circ \theta_j^{-1})([x], v) = \left([x_0 : \dots : x_n], \frac{x_i}{x_j} v \right). \tag{I.9.4}$$

Trditev sledi. Isti dokaz velja v kompleksnem primeru. □

Primer 25 (Razpih (blowup) točke $0 \in \mathbb{C}^{n+1}$). Ker so prehodne preslikave θ_{ij} (I.9.4) linearne na vsakem vlaknu (množenje s številom x_i/x_j), lahko svežnju $\pi \colon \mathbb{R}_*^{n+1} \to \mathbb{RP}^n$ (oz. $\pi \colon \mathbb{C}_*^{n+1} \to \mathbb{CP}^n$) dodamo ničelni prerez. Tako dobimo (realen oz. kompleksen) vektorski sveženj ranga 1 nad $\mathbb{RP}^n$ oz. $\mathbb{CP}^n$. Podrobneje si oglejmo kompleksen primer:

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{C} & \longrightarrow & E & \xrightarrow{\pi'} & \mathbb{C}^{n+1} \\ & & {\scriptstyle \pi}\big\downarrow & & \\ & & \mathbb{CP}^n & & \end{array}$$

Množica E je totalni prostor holomorfnega svežnja premic nad $\mathbb{CP}^n$. Lahko je predstavimo kot *incidenčno podmnožico* v produktu $\mathbb{CP}^n \times \mathbb{C}^{n+1}$:

$$E = \left\{ \big([x], z\big) \in \mathbb{CP}^n \times \mathbb{C}^{n+1} \colon \exists t \in \mathbb{C} : z = tx \right\}, \quad \pi'\big([x], z\big) = z.$$

Projekcija $\pi' \colon E \to \mathbb{C}^{n+1}$ je surjektivna z vlakni

$$(\pi')^{-1}(z) = \begin{cases} \big([z], z\big), & z \le 0; \\ \left\{ \big([x], 0\big) \colon [x] \in \mathbb{CP}^n \right\} & z = 0. \end{cases}$$

Torej je vlakno E_0 nad točko $0 \in \mathbb{C}^{n+1}$ izomorfno projektivnemu prostoru $\mathbb{CP}^n$, zožena projekcija $\pi' \colon E \setminus E_0 \to \mathbb{C}_*^{n+1}$ pa je biholomorfna.

Kompleksna mnogoterost E se imenuje *razpih* (ang. *blowup* točke $0 \in \mathbb{C}^{n+1}$. Ta konstrukcija in njene posplošitve (razpih vzdolž kompleksne podmnogoterosti) so izjemnega pomena v algabraični in analitični geometriji, še posebej pri desingularizaciji analitičnih podmnožic. Najpomembnejši izrek v tej smeri je dokazal japonski matematik Hironaka. Lokalni model *kompleksnega prostora s singularnostmi* so analitične množice v $\mathbb{C}^N$, to je, množice definirane s holomorfnimi enačbami.

Izrek 14 (Hironaka: Izrek od desingularizaciji). *Vsak kompleksen prostor s singularnostmi X lahko desingulariziramo, to je, obstaja kompleksna mnogoterost Z in prava holomorfna surjektivna projekcija $\pi \colon Z \to X$ s kompaktnimi vlakni $Z_x = \pi^{-1}(x)$ ($x \in X$), tako da je π biholomorfna nad regularnim delom X_{reg} prostora X.*

Primer 26 (Glavni svežnji). Naj bo G neka *Liejeva grupa*; to je gladka mnogoterost, v kateri sta produkt $G \times G \to G$, $(g, g') \mapsto gg'$, ter invertiranje $G \to G$, $g \mapsto g^{-1}$, gladki operaciji. Grupa G deluje na sami sebi kot grupa translacij (s produktom na levi):

$$G \ni g \mapsto \theta_g \in \mathrm{Diff}(G), \quad \theta_g(g') = gg' \ \ \forall g' \in G.$$

Primeri Liejevih grup so matrične grupe, to je podgrupe v $GL_n(\mathbb{R})$ ali $GL_n(\mathbb{C})$. Več o Liejevih grupah lahko najdete v poglavju IV.

Sveženj $\pi\colon Z \to X$ z vlaknom G in strukturno grupo G (ki deluje na G kot grupa translacij) imenujemo *glavni G-sveženj nad X*. Tak sveženj je *holomorfen*, če sta X in Z kompleksni mnogoterosti, G je kompleksna Liejeva grupa in so projekcija $\pi\colon Z \to X$ ter sveženjske karte (I.9.1) holomorfne.

Prehodne preslikave (I.9.2) v glavnem G svežnju so oblike

$$(x, g) \mapsto \big(x, g_{ij}(x)g\big), \quad x \in U_{ij},\ g \in G,$$

kjer družina preslikav $g_{ij}\colon U_{ij} \to G$ zadošča 1-kocikelnemu pogoju:

$$g_{ii} = 1, \quad g_{ij}g_{ji} = 1, \quad g_{ij}g_{jk}g_{ki} = 1.$$

Pri tem smo z $1 \in G$ označili enoto grupe G.

Poglavje II

TANGENTNI SVEŽENJ IN VEKTORSKA POLJA

II.1 Tangentni sveženj mnogoterosti

I.1 Motivacija: Tangentni sveženj evklidskega prostora

Naj bo D domena v $\mathbb{R}^n$ in $f = (f_1, \ldots, f_m)\colon D \to \mathbb{R}^m$ diferenciabilna preslikava. Njen *diferencial* v točki $p \in D$ je linearna preslikava

$$df_p\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m, \quad v \mapsto df_p \cdot v,$$

ki je najboljša linearna aproksimacija f v točki p v smislu, da je

$$f(p+v) = f(p) + df_p \cdot v + o(v), \quad \lim_{v \to 0} \frac{o(v)}{||v||} = 0.$$

V standardnem paru baz na $\mathbb{R}^n$ in $\mathbb{R}^m$ je diferencial predstavljen z Jacobijevo matriko $J(f)(p) = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(p)\right)$ parcialnih odvodov komponent f_i po spremenljivkah x_j.

Tangentni prostor $T_p\mathbb{R}^n$ evklidskega prostora $\mathbb{R}^n$ v točki p je množica vseh vektorjev $v \in \mathbb{R}^n$, pripetih v p; torej je $T_p\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$.

Tangentni sveženj domene $D \subset \mathbb{R}^n$ je disjunktna unija tangentnih prostorov $T_p\mathbb{R}^n$ po vseh točkah $p \in D$:

$$TD = \bigsqcup_{p \in D} T_p\mathbb{R}^n \cong D \times \mathbb{R}^n.$$

Označimo s $\pi\colon TD = D \times \mathbb{R}^n \to D$ bazno projekcijo $\pi(p, v) = p$. Tangentni sveženj domene $D \subset \mathbb{R}^n$ je torej *produktni sveženj ranga* n nad D.

Definiramo še *tangentno preslikavo* $Tf\colon TD \to T\mathbb{R}^m$ s predpisom

$$TD = D \times \mathbb{R}^n \ni (p, v) \mapsto TF(p, v) = \big(f(p), df_p \cdot v\big) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m = T\mathbb{R}^m.$$

To je preslikava, ki preslika vlakno nad $p \in D$ v vlakno nad $f(p)$, na vlaknu pa je definirana kot diferencial df_p. Torej komutira naslednji diagram:

$$\begin{tikzcd} TD \arrow[r, "Tf"] \arrow[d, "\pi"'] & T\mathbb{R}^m \arrow[d, "\pi'"] \\ D \arrow[r, "f"'] & \mathbb{R}^m \end{tikzcd}$$

Prireditev, ki domeni $D \subset \mathbb{R}^n$ priredi njen tangetni sveženj $TD = D \times \mathbb{R}^n$ in diferenciabilni prelikavi $f\colon D \to D' \subset \mathbb{R}^m$ priredi njeno tangetno preslikavo $Tf\colon TD \to TD'$, je *funktorialna*, to je, izpolnjuje naslednje lastnosti:

- $T(\mathrm{Id}_D) = \mathrm{Id}_{TD}$.
- $T(g \circ f) = Tg \circ Tf$.
- $T(f^{-1}) = (Tf)^{-1}$, če je $f\colon D \to D'$ difeomorfizem.

Prva lastnost je očitna. Druga sledi neposredno iz verižnega pravila diferencial kompozicije preslikav:

$$d(g \circ f)_p = dg_{f(p)} \circ df_p.$$

Zadnja lastnost sledi iz prvih dveh, saj je $f^{-1} \circ f = \mathrm{Id}$.

Prireditev $D \rightsquigarrow TD$, $f \rightsquigarrow Tf$, je torej *kovarianten funktor*.

Opisane pojme želimo sedaj posplošiti na gladke mnogoterosti. Intuitivna predstava tangetnih vektorjev na evklidskem prostoru ne dopušča direktne posplošitve, saj na mnogoterostih nimamo linearne strukture in zato vektorjev ne moremo preprosto translatirati.

Opisali bomo dve konstrukciji tangetnega funktorja. Prva, *geometrijska konstrukcija*, sloni na predstavi tangentnih vektorjev kot *hitrostnih vektorjev poti*. Ta prireditev je povsem očitna na evklidskem prostoru $\mathbb{R}^n$. Fiksirajmo točko $p \in \mathbb{R}^n$. Naj bo $I \subset \mathbb{R}$ nek odprt interval, ki vsebuje točko $0 \in \mathbb{R}$, in $\gamma = (\gamma_1, \ldots, \gamma_n)\colon I \to \mathbb{R}^n$ diferenciabilna pot, ki zadošča pogoju $\gamma(0) = p$. Njen hitrostni vektor

$$\dot{\gamma}(0) = \frac{d}{dt}\bigg|_{t=0} \gamma(t) \in \mathbb{R}^n$$

lahko razumemo kot tangetni vektor prostora $\mathbb{R}^n$ v točki p. Dve poti γ_1, γ_2 določata isti tangetni vektor, če velja $\gamma_1(0) = \gamma_2(0)$ in $\dot{\gamma}_1(0) = \dot{\gamma}_2(0)$. Obratno, vsak vektor $v \in \mathbb{R}^n$ je hitrostni vektor neke poti skozi točko $p \in \mathbb{R}^n$, npr. premice $\gamma(t) = p + tv$.

Ta ideja se da posplošiti na mnogoterosti. Tangentni vektorji v točki $p \in X$ bodo ravno hitrostni vektorji poti v X, ki gredo pri $t = 0$ skozi p.

Za vektorje $v \in T_p\mathbb{R}^n$ imamo še drugo naravno interpretacijo, ki se ravno tako da posplošiti na mnogoterosti. Vektorju $v = (v_1, \ldots, v_n) \in \mathbb{R}^n$ priredimo *smerni odvod* v točki $p \in \mathbb{R}^n$:

$$\nabla_v f = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j}(p)\, v_j = \nabla f(p) \cdot v.$$

Označimo z $\mathcal{C}_p^\infty$ algebro zarodkov gladkih funkcij v točki p. (Zarodek funkcije v točki p je predstavljen s funkcijo v neki odprti okolici te točke, pri čemer dve funkciji predstavljala isti zarodek v točki p, če se ujemata v neki okolici p.) Očitno je ∇_v linearen operator

$$\nabla_v \colon \mathcal{C}_p^\infty \to \mathbb{R},$$

ki zadošča *Leibnizovemu pravilu*:

$$\nabla_v(fg) = \nabla_v f \cdot g(p) + f(p) \cdot \nabla_v f$$

Tak operator se imenuje *derivacija* na algebri $\mathcal{C}_p^\infty$. Videli bomo, da so derivacije v naravni bijektivni korespondenci s smernimi odvodi, torej z vektorji $v \in \mathbb{R}^n$.

I.2 Geometrijska konstrukcija tangentnega svežnja

Naj bo X mnogoterost razreda $\mathcal{C}^1$ in $p \in X$. Označimo z Γ_p množico vseh $\mathcal{C}^1$ poti $\gamma \colon (-\epsilon, \epsilon) \to X$, ki zadoščajo pogoju $\gamma(0) = p$. Število $\epsilon > 0$ je lahko odvisno od γ.

Definicija 23. Poti $\gamma_1, \gamma_2 \in \Gamma_p$ sta ekvivalentni, $\gamma_1 \sim \gamma_2$, če obstaja lokalna karta (U, ϕ) na X, $p \in U$, tako da velja

$$\left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \phi \circ \gamma_1(t) = \left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \phi \circ \gamma_2(t). \tag{II.1.1}$$

Trditev 11. *Definicija relacije $\sim$ je neodvisna od izbire lokalne karte. Tako definirana relacija $\sim$ je ekvivalenčna relacija.*

Dokaz. Naj bo (V, ψ) neka druga karta na X. Za vsako pot $\gamma \in \Gamma_p$ velja

$$\psi \circ \gamma = (\underbrace{\psi \circ \phi^{-1}}_{\text{prehodna}}) \circ (\underbrace{\phi \circ \gamma}_{\text{pot v } \mathbb{R}^n}).$$

Denimo, da poti γ_1 in γ_2 zadoščata pogoju (II.1.1). Z uporabo verižnega pravila dobimo

$$\begin{aligned}
\left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \psi \circ \gamma_1(t) &= d(\psi\phi^{-1})_{(\phi(p))} \left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \phi \circ \gamma_1(t) \\
&= d(\psi\phi^{-1})_{(\phi(p))} \left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \phi \circ \gamma_2(t) \\
&= \left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \psi \circ \gamma_2(t).
\end{aligned}$$

To ravno pomeni, da sta γ_1 in γ_2 ekvivalentno tudi glede na karto ψ. Očitno je $\sim$ ekvivalenčna relacija. $\square$

Označimo z $[\gamma]_p$ ekvivalenčni razred poti $\gamma \in \Gamma_p$ glede na relacijo $\sim$.

Definicija 24. [**Tangentni prostor**] Tangentni prostor mnogoterosti X v točki $p \in X$ je

$$T_pX = \{[\gamma]_p : \gamma \in \Gamma_p\},$$

to je množica ekvivalenčnih razredov $\mathcal{C}^1$ poti skozi p glede na relacijo v definiciji 23.

Primer 27. $X = \mathbb{R}^n$, $p \in \mathbb{R}^n$. Če uporabimo identično karto na $\mathbb{R}^n$, vidimo:

$$\gamma_1 \sim \gamma_2 \Longleftrightarrow \dot{\gamma}_1(0) = \dot{\gamma}_2(0) \in \mathbb{R}^n.$$

Torej je ekvivalenčni razred $[\gamma]_p$ natančno določen z vektorjem $\dot{\gamma}(0) \in \mathbb{R}^n$. Preslikava

$$T_p\mathbb{R}^n \ni [\gamma]_p \longmapsto \dot{\gamma}(0) \in \mathbb{R}^n$$

je bijektivna: injektivna je po definiciji relacije $\sim$, surjektivnost pa vidimo tako, da poljubnemu vektorju $v \in \mathbb{R}^n$ priredimo pot $\gamma(t) = p + tv$; očitno je $[\gamma]_p \mapsto \dot{\gamma}(0) = v$. Torej lahko identificiramo tangentni prostor $T_p\mathbb{R}^n$ (v smislu Def. 24) z $\mathbb{R}^n$. Glede na to identifikacijo se torej definicija tangentnega prostora $T_p\mathbb{R}^n$ ujema s standardno definicijo.

Naj bo X poljubna $\mathcal{C}^1$-mnogoterost in $p \in X$. Izberemo lokalno karto (U, ϕ) na X, $p \in U$. Preslikava $d\phi_p \colon T_pX \to \mathbb{R}^n$, definirana s predpisom

$$T_pX \ni [\gamma]_p \xmapsto{d\phi_p} [\phi \circ \gamma]_{\phi(p)=0} = (\phi \circ \gamma)^{\cdot}(0) \in \mathbb{R}^n,$$

je bijekcija. Surjektivnost vidimo tako, da vektorju $v \in \mathbb{R}^n$ priredimo pot $t \mapsto \phi(p) + tv \in \mathbb{R}^n$, $\gamma(t) = \phi^{-1}(\phi(p) + tv)$, $\gamma(0) = p$. Očitno je $d\phi_p[\gamma]_p = v$. Injektivnost sledi direktno iz definicije relacije $\sim$ na Γ_p. Preslikava $d\phi_p$ se imenuje *diferencial* preslikave ϕ v točki p.

Sedaj definirajmo diferencial poljubne preslikave.

Definicija 25. Naj bo $f \colon X \to Y$ diferenciabilna preslikava. Njen diferencial v točki p je preslikava $df_p \colon T_pX \to T_{f(p)}Y$, definirana s predpisom

$$df_p[\gamma]_p = [f \circ \gamma]_{f(p)} \in T_{f(p)}Y \quad \forall [\gamma]_p \in T_pX. \tag{II.1.2}$$

Trditev 12. *Diferencial df_p je dobro definirana preslikava, torej je desna stran neodvisna le od od izbire predstavnika ekvivalenčnega razreda $[\gamma]_p \in T_pX$.*

Dokaz. Naj bosta poti γ in γ' ekvivalentni v p: $[\gamma]_p = [\gamma']_p$. To pomeni, da za vsako lokalno karto (U, ϕ) na X, $p \in U$, velja $(\phi \circ \gamma)^{\cdot}(0) = (\phi \circ \gamma')^{\cdot}(0)$. Dokazati moramo

$$[\phi \circ \gamma]_{f(p)} = [f \circ \gamma']_{f(p)} \in T_{f(p)}Y.$$

Izberimo karto (V, ψ) na Y, tako da je $f(p) \in V$. Zgornji pogoj je ekvivalenten

$$(\psi \circ f \circ \gamma)^{\cdot}(0) = (\psi \circ f \circ \gamma')^{\cdot}(0)$$

To sledi z uporabo verižnega pravila za preslikave med evklidskimi prostori:

$$\begin{aligned}(\psi f \gamma)^{\cdot}(0) = (\psi f \phi^{-1} \phi \gamma)^{\cdot}(0) = ((\psi f \phi^{-1}) \circ (\phi \gamma))^{\cdot}(0) = d(\psi f \phi^{-1})_{\phi(p)} (\phi \gamma)^{\cdot}(0) = \\ = d(\psi f \phi^{-1})_{\phi(p)} (\phi \gamma')^{\cdot}(0) = (\psi f \gamma')^{\cdot}(0).\end{aligned}$$

Trditev je s tem dokazana. □

Definicija 26. Tangentni sveženj $\mathcal{C}^1$-mnogoterosti X je disjunktna unija tangentnih prostorov v točkah $p \in X$:

$$TX = \bigsqcup_{p \in X} T_p X$$

Označimo s $\pi \colon TX \to X$ bazno projekcijo; torej je $\pi^{-1}(p) = T_p X$ za vsak $p \in X$.

Diferenciabilni preslikavi $f \colon X \to Y$ mnogoterosti priredimo njeno *tangentno preslikavo* $Tf \colon TX \to TY$, tako da komutira diagram

$$\begin{tikzcd} TX \arrow[r, "Tf"] \arrow[d, "\pi"'] \arrow[dr, phantom, "\circlearrowleft"] & TY \arrow[d, "\pi'"] \\ X \arrow[r, "f"] & Y \end{tikzcd}$$

in je $Tf|_{T_p X} = df_p : T_p X \to T_{f(p)} Y$ diferencial preslikave f v točki $p \in X$.

Osnovni primer: $X = \mathbb{R}^n, Y = \mathbb{R}^m$: $TX = X \times \mathbb{R}^n = \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$. (Isto velja, če je X odprta podmnožica v $\mathbb{R}^n$: $TX = X \times \mathbb{R}^n$.) Za vsako diferenciabilno preslikavo $f \colon X \to \mathbb{R}^m$ je tangentna preslikava $Tf \colon TX \to T\mathbb{R}^m$ podana s predpisom

$$(Tf)(x, v) = \big(f(x), df_x \cdot v\big).$$

Izrek 15. *Tangentna preslikava zadošča naslednjim lastnostim:*

1. $T(\mathrm{Id}_X) = \mathrm{Id}_{TX}$.
2. $f \in \mathcal{C}^1(X, Y)$, $g \in \mathcal{C}^1(Y, Z) \Longrightarrow T(g \circ f) = Tg \circ Tf$.
3. *Če je* $f \in \mathrm{Diff}(X, Y)$ *difeomorfizem z inverzom* $f^{-1} \colon Y \to X$, *je* $T(f^{-1}) = (Tf)^{-1}$.

Dokaz. Navedene lastnosti sledijo neposredno iz definicije diferenciala (def. 25). Zadnja trditev je preprosta posledica prvih dveh. □

Sedaj bomo tangentni sveženj TX opremili s strukturo $\mathcal{C}^{r-1}$ vektorskega svežnja nad X.

Naj bo $\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \phi_\alpha)\}$ nek $\mathcal{C}^r$-atlas na X. Vsaki karti $\phi_\alpha \colon U_\alpha \to U'_\alpha \subset \mathbb{R}^n$ priredimo njeno tangentno preslikavo:

$$T\phi_\alpha \colon TX|_{U_\alpha} = TU_\alpha \longrightarrow TU'_\alpha = U'_\alpha \times \mathbb{R}^n \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n,$$

$$T_pX \ni [\gamma]_p \xrightarrow{T\phi_\alpha} \big(\phi_\alpha(p), (d\phi_\alpha)_p[\gamma]_p\big) = \big(\phi_\alpha(p), (\phi_\alpha \circ \gamma)^{\cdot}(0)\big).$$

Tako dobimo na TX atlas

$$\{(TU_\alpha, T\phi_\alpha)\}.$$

Denimo, da $U_\alpha \cap U_\beta = U_{\alpha\beta} \neq 0$. Oglejmo si prehodno preslikavo:

$$(T\phi_a) \circ (T\phi_\beta)^{-1} \colon \underbrace{\phi_\beta(U_{\alpha\beta}) \times \mathbb{R}^n}_{=T(\phi_\beta(U_{\alpha\beta}))} \to \underbrace{\phi_\alpha(U_{\alpha\beta}) \times \mathbb{R}^n}_{=T(\phi_\alpha(U_{\alpha\beta}))}$$

$$T(\phi_\alpha)(T\phi_\beta)^{-1} = T(\phi_\alpha) \circ T(\phi_\beta^{-1}) = T(\phi_\alpha \circ \phi_\beta^{-1}) = T(\phi_{\alpha\beta})$$
$$(x, v) \mapsto (\phi_{\alpha\beta}(x), d\phi_{\alpha\beta}(x) \cdot v)\,.$$

Ker je prehodna preslikava $\phi_{\alpha\beta}(x)$ $\mathcal{C}^r$-difeomorfizem, je njen diferencial $d\phi_{\alpha\beta}(x)$ predstavljen z neizrojeno $n \times n$ matrično funkcijo, katere komponente so prvi parcialni odvodi komponent $\phi_{\alpha\beta}$, torej so $\mathcal{C}^{r-1}$ funkcije spremenljivke x. Zato je preslikava

$$(x, v) \mapsto d\phi_{\alpha\beta}(x) \cdot v$$

razreda $\mathcal{C}^{r-1}$ v obeh spremenljivkah; v spremenljivki $v \in \mathbb{R}^n$ je linearna.

Topologija na X je enolično določena z zahtevo, da je vsaka množica oblike $TX|_{U_\alpha} = TU_\alpha$ odprta v TX in je prirejena karta $T\phi_\alpha$ homeomorfizem:

$$T\phi_\alpha \colon TX|_{U_\alpha} \xrightarrow{\cong} U'_\alpha \times \mathbb{R}^n.$$

Očitno je X topološka mnogoterost dimenzije $\dim TX = 2 \dim X$.

Preslikava $T\phi_\alpha$ ni sveženjska karta na TX v smislu Definicije 21, saj smo bazno točko $x \in U_\alpha$ preslikali v $U'_\alpha \subset \mathbb{R}^n$, medtem ko se v Definiciji 21 bazna točka ohranja. Definirajmo sedaj preslikavo

$$\Theta_\alpha \colon TX|_{U_\alpha} \to U_\alpha \times \mathbb{R}^n, \quad \Theta_\alpha(e) = (\pi(e), d\phi_\alpha \cdot e), \tag{II.1.3}$$

kjer je diferencial $d\phi_\alpha$ izračunan v bazni točki $p = \pi(e) \in U_\alpha$. Očitno je Θ_α homeomorfizem. (Edina razlika s $T\phi_\alpha$ je, da v Θ_α ohranjamo bazno točko.) Prehodna preslikava

$$\Theta_{\alpha\beta} = \Theta_\alpha \circ \Theta_\beta^{-1} \colon U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^n \to U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^n$$

je enaka

$$\Theta_{\alpha\beta}(x,v) = \big(x, (d\phi_{\alpha\beta})_{\phi_\beta(x)} v\big), \quad x \in U_{\alpha\beta},\ v \in \mathbb{R}^n.$$

Torej je $\Theta_{\alpha\beta}(x,\cdot)\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ linearni izomorfizem vlakna. Družina $\{\Theta_\alpha\}_\alpha$ je torej *sveženjski atlas* razreda $\mathcal{C}^{r-1}$ na TX, in TX opremljen s tem atlasom je $\mathcal{C}^{r-1}$ vektorski sveženj ranga $n = \dim X$ nad X.

Izrek 15 pove, da je prireditev

$$\begin{array}{ccc} X & \rightsquigarrow & TX \\ (f\colon X \to Y) & \rightsquigarrow & (Tf : TX \to TY) \end{array}$$

kovarianten funktor iz kategorije $\mathcal{C}^r$-mnogoterosti v kategorijo $\mathcal{C}^{r-1}$-vektorskih svežnjev nad $\mathcal{C}^r$-mnogoterostmi. Ta funktor se imenuje *tangentni funktor*.

I.3 Tangentni prostor podmnogoterosti

Naj bo $X \subset \mathbb{R}^n$ $\mathcal{C}^r$-podmnogoterost dimenzije m in kodimenzije $d = n-m$. Za vsako točko $p \in X$ obstaja okolica $U \subset \mathbb{R}^n$ in $\mathcal{C}^r$-funkcije $g_1,\ldots,g_d\colon U \to \mathbb{R}$ z linearno neodvisnimi gradienti, tako da je

$$X \cap U = \{x \in U\colon g_j(x) = 0,\ j = 1,\ldots,d\}.$$

Tangentni sveženj $TX|_{X\cap U}$ je enak

$$TX|_{X\cap U} = \{(x,v)\colon x \in U,\, v \in \mathbb{R}^n,\, g_j(x) = 0,\, dg_j(x)\cdot v = 0,\ j = 1,\ldots,d\}$$

Odtod vidimo, da je tangentni sveženj TX podmnogoterost razreda $\mathcal{C}^{r-1}$ tangentnega svežnja $T\mathbb{R}^n|_X = X \times \mathbb{R}^n$.

Velja še nekoliko več. Dopolnimo preslikavo $g = (g_1,\ldots,g_d)\colon U \to \mathbb{R}^d$ do lokalne karte

$$\phi = (\phi_1,\ldots,\phi_m, g_1,\ldots,g_d)\colon U \to \phi(U) = U' \subset \mathbb{R}^n.$$

Prirejena sveženjska karta $T\phi\colon TU \to TU' = U' \times \mathbb{R}^n$ na tangentnem svežnju $T\mathbb{R}^n$ preslika $TX|_U$ na množico

$$\phi(U \cap X) \times \big(\mathbb{R}^m \times \{0\}^d\big) = \big(U' \cap (\mathbb{R}^m \times \{0\}^d)\big) \times \big(\mathbb{R}^m \times \{0\}^d\big).$$

Torej se vsako vlakno T_pX ($p \in U\cap X$) preslika z lokalno sveženjsko karto $T\phi$ v standardni linearni podprostor $\mathbb{R}^m \times \{0\}^d \subset \mathbb{R}^n$.

V takem primeru pravimo, da je TX *vektorski podsveženj* ranga m svežnja $T\mathbb{R}^n|_X \cong X \times \mathbb{R}^n$.

Analogno konstrukcijo lahko naredimo v splošnejšem primeru, ko je X podmnogoterost v poljubni mnogoterosti Y; njen tangentni sveženj TX je vektorski podsveženj svežnja $TY|_X$, to je tangetnega svežnja mnogoterosti Y, zoženega na podmnogoterost X.

I.4 Algebraična konstrukcija tangentnega svežnja

Da se izognemo določenim nevsebinskim tehničnim težavam, se omejimo na primer, ko je X gladka ($\mathcal{C}^\infty$) mnogoterost. Definirajmo

$$\mathcal{C}^\infty_{p,X} = \text{ algebra zarodkov gladkih funkcij v } p \in X.$$

Tangentni prostor T_pX definiramo kot množico vseh operatorjev $v\colon \mathcal{C}^\infty_p \to \mathbb{R}$, ki so linearni in zadoščajo Leibnitzovemu pravilu

$$v(f \cdot g) = v(f) \cdot g(p) + f(p) \cdot v(g).$$

Taki operatorji se imenujejo *derivacije* na algebri zarodkov $\mathcal{C}^\infty_{p,X}$. Torej bomo tangentne vektorje $v \in T_pX$ predstavili z derivacijami.

Oglejmo si sedaj osnovni primer $X = \mathbb{R}^n$, $p = 0 \in \mathbb{R}^n$. Z uporabo Leibnitzovega pravila za konstantni funkciji $f = g \equiv 1$ dobimo

$$v(1) = v(1 \cdot 1) = v(1) \cdot 1 + 1 \cdot v(1) = 2v(1) \Rightarrow v(1) = 0.$$

Odtod sledi, da je vrednost v na vsaki konstantni funkciji enaka nič.

Trditev 13. *Vsako gladko funkcijo f v okolici točke $0 \in \mathbb{R}^n$ lahko predstavimo v obliki*

$$f(x_1, \ldots, x_n) = f(0) + \sum_{j=1}^n x_j\, g_j(x_1, \ldots, x_n)$$

za neke gladke funkcije $g_1, \ldots, g_n$ v neki okolici točke $0 \in \mathbb{R}^n$.

Dokaz. Po osnovnem izreku integralnega računa velja

$$f(x) = f(0) + \int_0^1 \frac{\partial}{\partial t} f(tx)\, dt = f(0) + \int_0^1 \sum_{j=1}^n x_j \frac{\partial}{\partial x_j} f(tx)\, dt = f(0) + \sum_{j=1}^n x_j\, g_j(x)$$

kjer je $g_j(x) = \int_0^1 \frac{\partial}{\partial x_j} f(tx)\, dt$. □

Trditev 14. *Vsaka derivacija v na algebri $\mathcal{C}^\infty_{0,\mathbb{R}^n}$ je enolično predstavljena s smernim odvodom $\sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial}{\partial x_j}$, kjer je $v_j = v(x_j) \in \mathbb{R}$ za $j = 1, \ldots, n$.*

Dokaz. Definiramo $v_j = v(x_j) \in \mathbb{R}$ (derivacija v deluje na koordinatni funkciji x_j). Iz razvoja f v trditvi 13 sledi

$$v(f) = \underbrace{v(f(0))}_{=0} + \sum_{j=1}^n v(x_j) \cdot g_j(0) + \sum_{j=1}^n x_j(0) \cdot v(g_j) = \sum_{j=1}^n v_j \cdot g_j(0) = \left(\sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) (f) \Big|_{x=0}.$$

Trditev je dokazana. S tem dobimo izomorfizem $T_0\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$. □

Sedaj definirajmo diferencial preslikave. Če je $f\colon X \to Y$ gladka preslikava gladkih mnogoterosti, potem je za vsak $p \in X$ preslikava

$$f^*\colon \mathcal{C}^\infty_{f(p),Y} \longrightarrow \mathcal{C}^\infty_{p,X}, \quad g \stackrel{f^*}{\longmapsto} g \circ f$$

homomorfizem algeber zarodkov. Diferencial $df_p\colon T_pX \to T_{f(p)}Y$ definiramo kot njej dualno preslikavo:

$$(df_p \cdot v)(g) \stackrel{def}{=} v(g \circ f) \quad \forall g \in \mathcal{C}^\infty_{f(p),Y}.$$

Lahko je preveriti, da tako definiran diferencial in prirejena tangentna preslikava zadoščata istim lastnostim, kot smo jih dobili pri geometrijski konstrukciji.

Sedaj imamo dve konstrukciji tangetnega funktorja — geometrijsko in algebraično. Obe konstrukciji sta v naravni zvezi, ki jo dobimo iz naslednjega opažanja.

Naj bo $\gamma \in \Gamma_p$ gladka pot skozi točko $\gamma(0) = p \in X$ v mnogoterosti X. Po eni strani γ določa geometrijski tangentni vektor $v = [\gamma] \in T_pX$. Obenem določa tudi derivacijo v_γ na algebri $\mathcal{C}^\infty_p$ (torej algebraičen tangenten vektor $\delta_\gamma \in T^a_pX$, kjer smo s superskriptom a označili, da gre za algebraično definiran tangetni prostor) s predpisom

$$\delta_\gamma\colon \mathcal{C}^\infty_p \to \mathbb{R}, \quad \delta_\gamma(f) = \frac{d}{dt}\bigg|_{t=0} f(\gamma(t)) \;\; \forall f \in \mathcal{C}^\infty_p.$$

Trivialno je preveriti, da je δ_γ res derivacija, ki je odvisna le od vektorja $v = [\gamma] \in T_pX$ (ni pa odvisna od izbire predstavnika tega vektorja). Torej dobimo inducirano preslikavo

$$\theta\colon T_pX \to T^a_pX, \quad v = [\gamma] \mapsto \theta(v) = \delta_\gamma$$

geometrijskega tangentnega prostora T_pX v algebraičen tangentni prostor T^a_pX.

V primeru $X = \mathbb{R}^n$ je preslikava $\theta\colon T_p\mathbb{R}^n \to T^a_p\mathbb{R}^n$ izomorfizem, ki vektorju $v = \dot\gamma(0) \in T_p\mathbb{R}^n$ priredi smerni odvod $\nabla_v \in T^a_p\mathbb{R}^n$ v točki p.

Preverimo laho tudi, da za vsako gladko preslikavo $f\colon X \to Y$ komutira naslednji diagram:

$$\begin{tikzcd}
T_pX \arrow[r, "df_p"] \arrow[d, "\theta"] & T_{f(p)}Y \arrow[d, "\psi"] \\
T^a_pX \arrow[r, "d^a f_p"'] & T^a_{f(p)}Y
\end{tikzcd}$$

Iz teh dejstev sledi, da je θ naravna translacija geometrijskega tangentnega funktorja v algebraičen tangentni funktor.

V praksi pogosto uporabljamo oba pristopa, odvisno od vrste problema.

II.2 Vektorska polja

Naj bo X mnogoterost razreda $\mathcal{C}^r$ za nek $r \geq 1$. Njen tangetni sveženja $\pi\colon TX \to X$ je tedaj vektorski sveženja ranga $n = \dim X$ in razreda $\mathcal{C}^{r-1}$.

Definicija 27. Vektorsko polje na $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti X je prerez tangentnega svežnja, to je preslikava $v\colon X \to TX$, za katero velja $v_x \in T_xX$ za vsako točko $x \in X$. (Ekvivalentno, $\pi \circ v = \mathrm{Id}_X$.) Vektorsko polje v je razreda $\mathcal{C}^k$ za nek $k < r$, če je $\mathcal{C}^k$ preslikava $X \to TX$.

Oglejmo si najprej primer, ko je $X = U$ odprta podmnožica $\mathbb{R}^n$. Naj bodo $x = (x_1, \ldots, x_n)$ koordinate na $\mathbb{R}^n$. Koordinatna vektorska polja na $\mathbb{R}^n$ so

$$\frac{\partial}{\partial x_1}, \ldots, \frac{\partial}{\partial x_n};$$

to so smerni odvodi v koordinatnih smereh. Za vsako točko $p \in \mathbb{R}^n$ so vektorji $\frac{\partial}{\partial x_1}, \ldots, \frac{\partial}{\partial x_n}$ v točki p standardna baza tangentnega prostora $T_p\mathbb{R}^n$. Vsako vektorsko polje na odprti množici $U \subset \mathbb{R}^n$ je linearna kombinacija koordinatnih polj:

$$v(x) = \sum_{j=1}^{n} v_j(x)\, \frac{\partial}{\partial x_j}, \quad x \in U.$$

Koeficienti v_j so funkcije na U. Vektorsko polje je gladko razreda $\mathcal{C}^k$ natanko tedaj, ko so vse komponentne funkcije v_j razreda $\mathcal{C}^k$.

Potisk vektorskih polj. Naj bo $f\colon X \to Y$ $\mathcal{C}^r$-difeomorfizem $(r \geq 1)$ in v vektorsko polje na X. Potem je $f_*v = w$ vektorsko polje na Y, določeno s pogojem

$$(f_*v)_{f(x)} = df_x\, v_x, \quad x \in X.$$

Polje f_*v se imenuje **potisk** vektorskega polja v s preslikavo f. Če je vektorsko polje v razreda $\mathcal{C}^k$ za nek $k \leq r-1$, potem je polje $w = f_*v$ prav tako razreda $\mathcal{C}^k$.

Oglejmo si naslednji poseben primer. Naj bo (U, ϕ) lokalna karta na X. Obstajajo natanko določena vektorska polja $e_1, \ldots, e_n$ na $U \subset X$, tako da je

$$\phi_* e_j = \frac{\partial}{\partial x_j}, \quad j = 1, \ldots, n.$$

V vsaki točki $p \in U$ so vektorji $e_j|_p$ baza tangentnega prostora T_pX, ki jo ϕ_* preslika v standardno bazo prostora $T_{\phi(p)}\mathbb{R}^n$. Tako določena n-terica vektorskih polj $(e_1, \ldots, e_n)$ se imenuje je **polje baz** na $TX|_U$ (angl. **frame field**) glede na karto ϕ. Vsako vektorsko polje v na U lahko tedaj enolično zapišemo v obliki

$$v_p = \sum_{j=1}^{n} v_j(p)\, e_j, \quad g_1, \ldots, g_n\colon U \to \mathbb{R}.$$

Če označimo $x = \phi(p) \in \mathbb{R}^n$, dobimo

$$(\phi_* v)_x = \sum_{j=1}^{n} v_j(p) \frac{\partial}{\partial x_j}\bigg|_x = \sum_{j=1}^{n} v_j\left(\phi^{-1}(x)\right) \frac{\partial}{\partial x_j}\bigg|_x .$$

Naj bo $f = (f_1, \ldots, f_n)\colon D \to D'$ difeomorfizem odprte množice $D \subset \mathbb{R}^n$ na množico $D' \subset \mathbb{R}^n$. Označimo z $x = (x_1, \ldots, x_n)$ koordinate na domeni in z $y = (y_1, \ldots, y_n)$ koordinate na kodomeni. Za poljubno diferenciabilno funkcijo $g\colon D' \to \mathbb{R}$ dobimo po definiciji potiska in z uporabo verižnega pravila naslednjo identiteto:

$$f_*\left(\frac{\partial}{\partial x_j}\right)(g) = \frac{\partial}{\partial x_j}\big(g \circ f(x)\big) = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial g}{\partial y_k}(f(x)) \frac{\partial f_k}{\partial x_j}(x).$$

Ker to velja za vsako testno funkcijo g, dobimo

$$f_*\left(\frac{\partial}{\partial x_j}\bigg|_x\right) = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f_k}{\partial x_j}(x) \frac{\partial}{\partial y_k}\bigg|_{f(x)} .$$

Odtod ponovno vidimo, da je diferencial $f_* = df_x\colon T_x\mathbb{R}^n \to T_{f(x)}\mathbb{R}^n$ predstavljen v standardnem paru baz na tangentnih prostorih $T_x\mathbb{R}^n$ in $T_{f(x)}\mathbb{R}^m$ z Jacobijevo matriko

$$\left[\frac{\partial f_k}{\partial x_j}\right]_{1 \le j,k \le n}$$

Nekoliko splošnejši pojem od potiska je pojem prirejenih vektorskih polj vzdolž preslikave.

Definicija 28. Naj bo v vektorsko polje na mnogoterosti X in w vektorsko polje na mnogoterosti Y. Polje w je **prirejeno** polju v vzdolž preslikave $f : X \to Y$, če velja

$$df_x \cdot v_x = w_{f(x)} \quad \forall x \in X.$$

Primer 28 (**Vektorsko polje vzdolž podmnogoterosti**)**.** Posebno zanimiv primer je, ko je f vložitev mnogoterosti X v mnogoterost Y. Potisk f_*v vektorskega polja v na X je tedaj vektorsko polje na Y vzdolž podmnogoterosti $M = f(X) \subset Y$, ki je tangentno na M. Če je podmnogoterost M zaprta v Y (npr., če je f prava vložitev), potem lahko (s pomočjo lokalnih razširitev in particije enote) polje f_*v razširimo do vektorskega polja w na Y. Vsako tako vektorsko polje w je torej prirejeno polju v vzdolž vložitve f.

Povlek vektorskih polj. Poleg potiska f_*v vektorskega polja lahko definiramo tudi povlek. Če je $f\colon X \to Y$ difeomorfizem in je w vektorsko polje na Y, potem je

$$v = f^*w = (f^{-1})_*w$$

vektorsko polje na X, ki se imenuje **povlek** (angl. **pull-back**) vektorskega polja w z difeomorfizmom f (to je hkrati potisk polja w z inverzno preslikavo $f^{-1}\colon Y \to X$).

Povlek lahko definiramo tudi v splošnejšem primeru, kot je $f\colon X \to Y$ *lokalni difeomorfizem*, to je, ko je diferencial $df_x\colon T_xX \to T_{f(x)}Y$ v točk poljubni točki $x \in X$ izomorfizem. Če je w vektorsko polje na Y, potem očitno obstaja natanko eno vektorsko polje v na X, da je $f_*v = w$; kot prej označimo $v = f^*w$.

Definicija 29 (Invariantna vektorska polja). Naj bo $\gamma \in \mathrm{Diff}(X)$ difeomorfizem. Vektorsko polje v na X se imenuje γ-invariantno, če velja $\gamma_*v = v$ (ekvivalentno, $v = \gamma^*v$). Če je $\Gamma \subset \mathrm{Diff}(X)$ grupa difeomorfizmov, je vektorsko polje v Γ-invariantno, če je γ-invariantno za vsak $\gamma \in \Gamma$.

Primer 29. Vsako vektorsko polje $v = \sum_j v_j \frac{\partial}{\partial x_j}$ s konstantnimi koeficienti na $\mathbb{R}^n$ je invariantno za translacije $x \mapsto x + a$, $a \in \mathbb{R}^n$.

Vektorsko polje $v_x = x\frac{\partial}{\partial x}$ na $\mathbb{R}$ je invariantno za grupo dilatacij $x \mapsto tx$, $t \in \mathbb{R}^*$. □

Naloga. Dokaži naslednjo trditev.

Trditev 15. *Naj bo $f\colon X \to Y$ regularen $\mathcal{C}^r$-krov, $r \geq 1$, in $\Gamma = \mathrm{Deck}_f(X)$ njegova grupa krovnih translacij. Za vsako Γ-invariantno vektorsko polje v na X obstaja natanko določeno vektorsko polje w na Y, tako da je $f^*w = v$.*

II.3 Tok vektorskega polja

Definicija 30. Naj bo v vektorsko polje na mnogoterosti X. $\mathcal{C}^r$ pot $\gamma\colon (\alpha, \beta) \subset \mathbb{R} \to X$ se imenuje *integralna krivulja* (ali *tokovnica*) polja v, če velja

$$\dot\gamma(t) = \gamma_*\left(\frac{\partial}{\partial t}\right) = v(\gamma(t)), \quad t \in (\alpha, \beta).$$

Pri tem je $\frac{\partial}{\partial t}$ koordinatno polje na $\mathbb{R}$. V lokalnih koordinatah $x = (x_1, \ldots, x_n)$ je

$$v = \sum_{j=1}^n v_j(x)\,\frac{\partial}{\partial x_j}$$

Pot $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \ldots, \gamma_n(t))$ je integralna krivulja natanko tedaj, ko velja

$$\gamma_*\left(\frac{\partial}{\partial t}\right) = \sum_{j=1}^n \dot\gamma_j(t)\,\frac{\partial}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^n v_j(\gamma(t))\,\frac{\partial}{\partial x_j}$$

Dobimo sistem navadnih diferencialnih enačb:

$$\begin{aligned}\dot\gamma_1(t) &= v_1\big(\gamma_1(t),\dots,\gamma_n(t)\big)\\ &\vdots\\ \dot\gamma_n(t) &= v_n\big(\gamma_1(t),\dots,\gamma_n(t)\big)\end{aligned}$$

Lokalni eksistenčni izrek za navadne diferencialne enačbe: Naj bo $D \subset \mathbb{R}^n$ odprta množica in $v\colon D \to \mathbb{R}^n$ Lipschitzova preslikava (ki jo interpretiramo kot vektorsko polje na D). Za vsako točko $x^0 = (x_1^0,\dots,x_n^0) \in D$ obstaja okolica $x^0 \in U \subset D$ in število $t_0 > 0$, tako da ima zgornji sistem navadnih diferencialnih enačb skupaj z začetnim pogojem

$$\gamma(0) = x \in U$$

natanko eno rešitev $\gamma(t,x)$ za vsak $t \in (-t_0,t_0)$ in vsako začetno točko $x \in U$. Rešitev $\gamma\colon (-t_0,t_0)\times U \to \mathbb{R}^n$ je zvezna v (t,x), odvedljiva po spremenljivki t in njen t-odvod $\dot\gamma(t,x)$ je zvezen v $(t,x) \in (-t_0,t_0)\times U$.

Če je $v(x) = 0$ za nek $x \in X$, je tokovnica skozi to točko konstantna preslikava $\gamma(t,x) \equiv x$. Taki točki x pravimo *stacionarna* ali *singularna* točka vektorskega polja v.

Tok vektorskega polja. Rešitev zgornjega sistema navadnih diferencialnih enačb bomo pisali v obliki $\phi_t(x)$ in jo imenovali *tok polja* v. Torej je za vsako točko $x \in X$ preslikava $t \mapsto \phi_t(x)$ tokovnica polja v, ki gre pričasu $t = 0$ skozi točko $\phi_0(x) = x$.

Iz definicije mnogoterosti in lokalnega eksistenčnega izreka na $\mathbb{R}^n$ dobimo naslednji izrek.

Izrek 16 (**Lokalni eksistenčni izrek za tok vektorskega polja na mnogoterosti).** *Naj bo v Lipschitzovo vektorsko polje na gladki mnogoterosti X. Za vsako točko $x_0 \in X$ obstaja okolica $U_{x_0} \subset X$ in število $\varepsilon_{x_0} > 0$, tako da je tok $\phi_t(x)$ definiran za vsako začetno točko $x \in U_{x_0}$ in za vsak $t \in I_0 = (-\varepsilon_0,\varepsilon_0)$. Tok $\phi_t(x)$ in njegov odvod $\dot\phi_t(x)$ po t sta zvezni funkciji $(t,x) \in I_0 \times U_0$. Če je polje v gladko razreda $\mathbb{C}^r$, sta ti dve preslikavi razreda $\mathcal{C}^r$.*

Od sedaj dalje predpostavimo, da so vsa vektorska polja Lipschitzova.

Iz eksistenčnega izreka sledi

Posledica 6. *Za vsako kompaktno množico $K \subset X$ obstaja število $\epsilon > 0$, tako da je tok $\phi_t(x)$ definiran za vsako začetno točko $x \in K$ in vsak $t \in (-\epsilon,\epsilon)$.*

Iz enoličnosti rešitev tudi, da za vsako točko $x \in X$ obstaja največji odprt interval

$$I_x = (\alpha(x),\omega(x)) \subset \mathbb{R}, \quad -\infty \le \alpha(x) < 0 < \omega(x) \le +\infty,$$

tako da je tok $\phi_t(x)$ z začetkom $\phi_0(x) = x$ definiran za vse $t \in I_x$.

Fundamentalna domena toka ϕ_t je množica

$$\Omega = \{(x,t) \in X \times \mathbb{R}\colon x \in X,\ t \in I_x\}.$$

Očitno je $X \times \{0\} \subset \Omega$.

Primer 30. Na $\mathbb{R}$ opazujemo vektorsko polje $v(x) = x^2$. Enačba toka je

$$\dot{x} = x^2, \quad x(0) = x_0.$$

Pri začetnemu pogoju $x_0 = 0$ dobimo konstanten tok $\phi_t(0) = 0$. Pri $x_0 \neq 0$ dobimo

$$\phi_t(x_0) = \frac{1}{\frac{1}{x_0} - t} = \frac{x_0}{1 - tx_0}.$$

Pričasu $t_0 = \frac{1}{x_0}$ ima funkcija $\phi_t(x_0)$ pol. Če je $x_0 > 0$, potem tok $\phi_t(x)$ obstaja za vse $-\infty < t < t_0$. Pri začetnemu pogoju $x_0 < 0$ pa tok $\phi_t(x_0)$ obstaja za vse $t_0 < t < +\infty$.

Primer 31. Naj bo Γ grupa translacij ravnine $\mathbb{R}^2$ z dvema generatorjema. Oglejmo si preprost primer $\Gamma = \langle \gamma, \sigma \rangle$, kjer je $\gamma(x, y) = (x + 1, y)$, $\sigma(x, y) = (x, y + 1)$. Vsako konstantno vektorsko polje

$$v = a\frac{\partial}{\partial x} + b\frac{\partial}{\partial y}, \qquad a, b \in \mathbb{R}$$

je Γ-invariantno. Torej obstaja vektorsko polje w na torusu $\mathbb{R}^2/_\Gamma = \mathbb{T}$, ki je prirejeno polju v glede na kvocientno projekcijo $\pi\colon \mathbb{R}^2 \to \mathbb{T}$ (glej definicijo 28). Integralne krivulje polja w so projekcije na $\mathbb{T}$ premic $y = kx + c$ v $\mathbb{R}^2$ s smernim vektorjem $k = b/a$.

Dokaži: Če je število k racionalno, je vsaka integralna krivulja sklenjena (krožnica). Če pa je k iracionalno, je vsaka integralna krivulja injektivna imerzija $\mathbb{R} \to \mathbb{T}$, katere zaloga vrednosti je povsod gosta v torusu $\mathbb{T}$.

Iz lokalnega eksistenčnega izreka ter enoličnosti rešitev sledi

Lema 3. *Funkcija $\omega\colon X \to (0, +\infty]$ je navzdol polzvezna, funkcija $\alpha\colon X \to [-\infty, 0)$ pa navzgor polzvezna. Odtod sledi, da je fundamentalna domena odprta množica v $X \times \mathbb{R}$.*

Sedaj bomo pokazali, da difeomorfizem $f\colon X \to Y$ preslika tokovnice vektorskega polja v na X v tokovnice vektorskega polja f_*v na Y. To je poseben primer naslednje trditve.

Lema 4. *Naj bo $f\colon X \to Y$ naj bo $\mathcal{C}^1$-preslikava, v vektorsko polje na X in w vektorsko polje na Y. Če velja $df_x v_x = w_{f(x)}$ za vsak $x \in X$, potem f preslika poljubno tokovnico polja v v neko tokovnico polja w. Če sta vektorski polji v in w Lipschitzovi, sledi*

$$f(\phi_t(x)) = \psi_t(f(x)),$$

kjer je $\phi_t(x)$ tok polja v in $\psi_t(y)$ tok polja w.

Dokaz. To je preprosta uporaba verižnega pravila. Preslikava $t \mapsto \psi_t(f(x))$ je očitno tokovnica polja w, ki je pri $t = 0$ v točki $f(x)$. Trdimo, da je tudi $t \mapsto f(\phi_t(x))$ tokovnica polja w. Odvajamo in uporabimo verižno pravilo:

$$\frac{d}{dt}(f(\phi_t(x)) = df_{\phi_t(x)} \cdot \frac{d\phi_t}{dt}(x) = df_{\phi_t(x)} \cdot v(\phi_t(x)) = w(f(\phi_t(x))).$$

To ravno pomeni, da je $t \mapsto f(\phi_t(x))$ tokovnica polja w. Pri $t = 0$ je $f(\phi_0(x)) = f(x)$.

Iz enoličnosti integralnih krivulj z dano začetno točko sledi $f(\phi_t(x)) = \psi_t(f(x))$. $\square$

Posledica 7. *Če je $M \subset X$ podmnogoterost in je v vektorsko polje na X, ki je tangentno na M v vsaki točki $x \in M$ (to je, $v(x) \in T_xM \subset T_xX$ za vsako točko $x \in M$), potem za vsak $x \in M$ velja $\phi_t(x) \in M$ na definicijski domeni toka.*

Dokaz. Uporabimo lemo 4 za vložitev $f\colon M \hookrightarrow X$. Ker je polje v tangentno na M vzdolž M, določa vektorsko polje w na M z enačbo $w_x = v_x$ za $x \in M$. Torej je $f_*w = v$. Po lemi zgoraj preslika f tokovnice polja w v tokovnice polja v. Za vsako točko $x \in M$ je tokovnica polja w hkrati tudi tokovnica polja v, torej je enaka $t \mapsto \phi_t(x)$. Sledi $\phi_t(x) \in M$. □

Primer 32. Na $\mathbb{R}^2_{(x,y)}$ si oglejmo vektorsko polje $v(x,y) = -y\frac{\partial}{\partial x} + x\frac{\partial}{\partial y}$. Velja

$$v(x^2+y^2) = \left(-y\frac{\partial}{\partial x} + x\frac{\partial}{\partial y}\right)(x^2+y^2) = -2xy + 2xy = 0.$$

Torej je polje v tangentno na vsako krožnico $x^2 + y^2 = r^2$. □

Trditev 16. *Tok $\phi_t(x)$ poljubnega vektorskega polja v zadošča grupnemu pravilu:*

$$\phi_{t+s}(x) = \phi_t(\phi_s(x)) = \phi_s(\phi_t(x)) \quad \textit{(kjer sta obe strani definirani)}, \quad \phi_0 = \mathrm{Id}\,.$$

Dokaz. Fiksiramo točko x in število $s \in \mathbb{R}$, tako da $\phi_s(x)$ obstaja. Definiramo

$$\gamma(t) = \phi_{t+s}(x), \qquad \sigma(t) = \phi_t(\phi_s(x)).$$

Pri $t = 0$ je $\gamma(0) = \phi_s(x) = \sigma(0)$. Pišimo $u = t + s$. Z uporabo verižnega pravila sledi

$$\dot\gamma(t) = \frac{d}{dt}\phi_{t+s}(x) = \frac{d\phi}{du}(x)\,\frac{\partial u}{\partial t} = v(\phi_u(x)) = v(\phi_{t+s}(x)) = v(\gamma(t)),$$

$$\dot\sigma(t) = \dot\phi_t(\phi_s(x)) = v(\phi_t(\phi_s(x)) = v(\sigma(t)).$$

Torej sta γ in σ tokovnici polja v, ki gresta pri času $t = 0$ skozi isto točko $\phi_s(x)$. Iz enoličnosti tokovnic Lipschitzovega vektorskega polja sledi $\gamma = \sigma$. □

Iz enakosti

$$\mathrm{Id} = \phi_0 = \phi_{-t} \circ \phi_t$$

sledi, da je za vsak fiksen $t \in \mathbb{R}$ preslikava ϕ_t difeomorfizem svojega definicijskega območja $\Omega_t \subset X$ na območje $\phi_t(\Omega_t) \subset X$, z inverzom

$$\phi_{-t} = \phi_t^{-1}.$$

Taka družina $\{\phi_t\}$ se imenuje **lokalna eno-parametrična grupa difeomorfizmov.** Beseda 'lokalna' se nanaša na dejstvo, da je za vsak t preslikava ϕ_t v splošnem definirana le na neki odprti podmnožici $\Omega_t \subset X$.

Trditev 17. *Če je za nek $x \in X$ velja $\omega(x) < +\infty$, potem za vsak kompakt $K \subset X$ obstaja število $\varepsilon > 0$, tako da velja*

$$\phi_t(x) \notin K \quad \forall t \in (\omega(x) - \varepsilon, \omega(x)).$$

Analogna lastnost velja v primeru $\alpha(x) > -\infty$, ko t pada proti $\alpha(x)$.

To pomeni, da tok $\phi_t(x)$ zapusti vsak kompakt v X, ko t narašča proti številu $\omega(x) < +\infty$ oz. pada proti številu $\alpha(x) > -\infty$.

Dokaz. Iz lokalnega eksistenčnega izreka sledi, da za vsak kompakt K obstaja število $\varepsilon > 0$, tako da tok $\phi_t(x)$ obstaja za vsako začetno točko $x \in K$ in za vsak $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$. Recimo, da za neko točko $x \in X$ in število $t \in (\omega(x) - \varepsilon, \omega(x))$ velja $\phi_t(x) \in K$. Zaradi grupne lastnosti toka velja

$$\phi_s(\phi_t(x)) = \phi_{t+s}(x), \quad \forall s \in (-\varepsilon, \varepsilon).$$

Če s izberemo blizu ε, dobimo $t + s > \omega(x)$, kar je v protislovju z definicijo $\omega(x)$. □

Definicija 31 (**Kompletno vektorsko polje).** Vektorsko polje v na mnogoterosti X se imenuje *povsem integrabilno* ali *kompletno*, če njegov tok $\phi_t(x)$ obstaja za vsako začetno točko $x \in X$ in vsak $t \in \mathbb{R}$.

Ekvivalentno, polje v je kompletno natanko tedaj, ko je njegova fundamentalna domena enaka $X \times \mathbb{R}$.

Če je vektorsko polje v kompletno, je $\phi_t \colon X \to X$ difeomorfizem za vsak t. Družina

$$\{\phi_t \colon t \in \mathbb{R}\} \subset \mathrm{Diff}(X), \quad \phi_{t+s} = \phi_t \circ \phi_s \tag{II.3.1}$$

se tedaj imenuje **enoparametrična grupa difeomorfizmov** mnogoterosti X.

Obratno velja naslednje:

Trditev 18. *Vsaka enoparametrična grupa $\{\phi_t \colon t \in \mathbb{R}\} \subset \mathrm{Diff}(X)$ difeomorfizmov mnogoterosti X (II.3.1) je tok vektorskega polja v na X, podanega z*

$$v_x = \left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \phi_t(x), \quad x \in X.$$

To vektorsko polje se imenuje **infinitezimalni generator** *grupe $\{\phi_t\}_{t\in\mathbb{R}}$.*

Dokaz. Fiksirajmo $s \in \mathbb{R}$ in točko $x \in X$ ter odvajamo identiteto

$$\phi_{s+t}(x) = \phi_t(\phi_s(x)) = \phi_s(\phi_t(x))$$

po t pri $t = 0$. Dobimo:

$$\left.\frac{d}{du}\right|_{u=s} \phi_u(x) = \left.\frac{d}{dt}\right|_{t=0} \phi_{s+t}(x) = v_{\phi_s(x)} = (d\phi_s)_x v_x.$$

Enačba $\left.\frac{d}{du}\right|_{u=s} \phi_u(x) = v_{\phi_s(x)}$ nam pove, da je $u \mapsto \phi_u(x)$ tokovnica polja v, kot smo trdili. Zadnja enačba $v_{\phi_s(x)} = (d\phi_s)_x v_x$ pa pove, da je $(\phi_s)_* v = v$ za vsak $s \in \mathbb{R}$, kar pomeni, da je vektorsko polje v ϕ_s-invariantno za vsak $s \in \mathbb{R}$. □

Opomba. Trditev 18 velja tudi za lokalne 1-parametrične grupe ter njihove tokove.

Primer 33. Linearno vektorsko polje na $\mathbb{R}^n$ je oblike

$$v_x = Ax, \qquad x \in \mathbb{R}^n,$$

kjer je A neka $n \times n$ matrika. Enačba toka je sistem linearnih parcialnih diferencialnih enačb prvega reda:

$$\dot{x} = Ax, \quad x(0) = x^0.$$

Tok tega polja je podan z matrično eksponentno vrsto

$$\phi_t(x) = e^{tA}x = \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} t^k A^k \right) x.$$

Torej je vsako linearno vektorsko polje kompletno.

Opomba: Pogosto se za tok ϕ_t vektorskega polja v uporablja oznaka

$$\phi_t(x) = e^{tv}x.$$

Motivacija za to oznako je ravno primer 33.

Primer 34. Vektorska polja na $\mathbb{R}^2_{(x,y)}$ oblike

$$v = f(x)\frac{\partial}{\partial y}, \quad w = f(x)y\frac{\partial}{\partial y}$$

so kompletna s tokovi

$$\phi_t(x,y) = (x, y + tf(x)), \quad \psi_t(x,y) = \left(x, ye^{tf(x)}\right).$$

Vektorska polja te oblike so **strižna polja**, njihovi tokovi pa so sestavljeni iz **strigov**.

Naslednja trditev podaja nekaj zadostnih pogojev za kompletnost vektorskega polja.

Trditev 19. *Naj bo v vektorsko polje na mnogoterosti X in ϕ_t njegov tok.*

(i) *Če obstaja število $\epsilon > 0$, tako da tok $\phi_t(x)$ obstaja za vsak $|t| < \epsilon$ in vsako začetno točko $x \in X$, potem je polje v kompletno.*

(ii) *Vsako vektorsko polje s kompaktnim nosilcem je kompletno.*

(iii) *Če je X sklenjena mnogoterost (kompaktna in brez roba), potem je vsako vektorsko polje na X kompletno.*

(iv) *Če je X kompaktna mnogoterost z robom ∂X, potem je vsako vektorsko polje na X, ki je tangentno na ∂X vzdolž ∂X, kompletno.*

Dokaz. (i): Ob danem pogoju sledi iz identitete

$$\phi_{Nt} = \phi_t \circ \phi_t \circ \cdots \circ \phi_t \quad (N \text{ faktorjev}),$$

ki velja za vsako naravno število $N \in \mathbb{N}$, da tok $\phi_u(x)$ skozi poljubno začetno točko $x \in X$ obstaja za vsak $u \in \mathbb{R}$. Torej je polje v kompletno.

(ii): Naj bo nosilec v vsebovan v kompaktni množici $K \subset X$. Po posledici 6 obstaja število $\epsilon > 0$, tako da tok $\phi_t(x)$ obstaja za vse točke $x \in K$ in za vsak $|t| < \epsilon$. Za točke $x \in X \setminus K$ pa velja $\phi_t(x) = x$ za vse $t \in \mathbb{R}$, saj je $v_x = 0$. Trditev sedaj sledi iz točke (i).

Točka (iii) je poseben primer točke (ii).

Točka (iv) je posledica leme 4 in prve trditve. Zožitev polja v na rob ∂X generira tok v ∂X in je kompletno polje po točki (iii). Odtod sledi, da tok $\phi_t(x)$ z začetno točko $\phi_0(x) = x \in X \setminus \partial X$ nikoli ne doseže roba ∂X, torej je definiran za vsak $t \in \mathbb{R}$. □

Primer 35. Naj bo $\rho\colon \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ funkcija izčrpanja, to je, podnivojnica $\{\rho \le c\}$ je kompaktna za vsak $c \in \mathbb{R}$. Vektorsko polje

$$v = -\frac{\partial \rho}{\partial y}\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial x}\frac{\partial}{\partial y}$$

se imenuje **Hamiltonovo polje**, prirejeno funkciji ρ. Ker je $v(\rho) = 0$, je polje v tangentno na nivojnice funkcije ρ. Slednje so kompaktne, torej je v kompletno polje na $\mathbb{R}^2$.

Izrek 17 (Izrek Lyapunova). *Naj bo $\rho\colon X \to \mathbb{R}$ gladka funkcija izčrpanja, to je, za vsak $c \in \mathbb{R}$ je podnivojnica $\{x \in X : \rho(x) \le c\}$ kompaktna. Naj bo v vektorsko polje na X, ki zadošča pogoju $d\rho_x \cdot v_x \le 0$ za vse x, ki zadoščajo $\rho(x) \ge c_0$ za nek $c_0 \in \mathbb{R}$. Potem je vektorsko polje v kompletno v pozitivnem času, to je, $\omega(x) = +\infty$ za vsak $x \in X$.*

Dokaz. Z uporabo verižnega pravila dobimo:

$$\frac{d}{dt}\rho(\phi_t(x)) = d\rho(\phi_t(x)) \cdot \frac{d\phi_t(x)}{dt} = d\rho(\phi_t(x)) \cdot v(\phi_t(x)) \le 0, \quad \text{če je } \rho(\phi_t(x)) \ge c_0.$$

To pomeni, da funkcija $t \mapsto g(t) = \rho(\phi_t(x))$ ne narašča na nobenem intervalu, na katerem je njena vrednost $\ge c_0$.

Izberemo poljubno točko $x \in X$. Nato izberemo število $c \ge c_0$, tako da je $\rho(x) \le c$. Iz zgornje lastnosti sledi

$$g(t) = \rho(\phi_t(x)) \le c \quad \forall t \in [0, \omega(x)).$$

V nasprotnem primeru bi namreč obstajalo število $t_1 \in (0, \omega(x))$, da bi bilo $g(t_1) > c$. Ker je $g(0) = \rho(x) < c$, bi obstajala točka $t_2 \in (0, t_1)$, v kateri je $g(t_2) > c$ in $\dot{g}(t_2) > 0$. To je v protislovju z zgoraj dokazano lastnostjo.

Odtod sledi, da tok $\phi_t(x)$ za $0 \le t < \omega(x)$ ostaja v kompaktni množici $\{\rho \le c\}$. Po prejšnji trditvi zaključimo, da je $\omega(x) = +\infty$. □

II.4 Lokalna oblika vektorskega polja

Vektorsko polje želimo lokalno v okolici neke točke $p \in X$ čim bolj poenostaviti s primerno izbiro lokalnih koordinat. To je preprosto v okolici nesingularnih točk.

Trditev 20. *Če je vektorsko polje v na X v neki točki $p \in X$ različno od 0, $v_p \neq 0$, potem obstaja lokalna karta (U, ϕ) v okolici točke p, tako da je*

$$\phi_* v = \frac{\partial}{\partial x_1}$$

(koordinatno vektorsko polje na $\mathbb{R}^n$ v smeri prve spremenljivke x_1).

Dokaz. Ker je izrek lokalen, lahko brez izgube splošnosti vzamemo, da je v vektorsko polje na $\mathbb{R}^n$ v okolici točke $p = 0 \in \mathbb{R}^n$:

$$v(x) = \sum_{j=1}^{n} v_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j} \cong \big(v_1(x), \ldots, v_n(x)\big), \qquad v(0) \neq 0.$$

Z linearno zamenjavo koordinat dosežemo $v(0) = \frac{\partial}{\partial x_1}\big|_0 \cong (1, 0, \ldots, 0)$.

Naj bo ϕ_t tok polja v. Definiramo preslikavo g v okolici $0 \in \mathbb{R}^n$ s predpisom

$$g(x_1, \ldots, x_n) = \phi_{x_1}(0, x_2, \ldots, x_n).$$

(Prvo koordinato x_1 smo torej uporabili kot časovno spremenljivko toka.) Iz definicije toka sledi, da je parcialni odvod g po spremenljivki x_1 enak

$$g_* \frac{\partial}{\partial x_1} \cong \frac{\partial g}{\partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x_1} \phi_{x_1}(0, x_2, \ldots, x_n) = v\big(\phi_{x_1}(0, x_2, \ldots, x_n)\big) = v(g(x)).$$

Torej preslika g koordinatno vektorsko polje $\frac{\partial}{\partial x_1}$ v polje v. V točki $x = 0$ je

$$\frac{\partial g}{\partial x_1}(0) = v(0) = (1, 0, \ldots, 0).$$

Na hiperravnini $x_1 = 0$ je $g(0, x_2, \ldots, x_n) = (0, x_2, \ldots, x_n)$ identiteta, zato je

$$\frac{\partial g}{\partial x_j} = (0, \ldots, 1, \ldots, 0), \qquad j = 2, \ldots, n.$$

Torej je $dg(0) = \mathrm{Id}$. Po izreku o inverzni preslikavi je g difeomorfizem v neki okolici 0. Njen inverz $\phi = g^{-1}$ tedaj zadošča $\phi_* v = \frac{\partial}{\partial x_1}$. $\square$

Točke p, v katerih je $v(p) = 0$, se imenujejo *kritične točke* (ali *singularne točke)* vektorskega polja v. V lokalnih koordinatah lahko vzamemo $p = 0 \in \mathbb{R}^n$. Tedaj je

$$v(x) = Ax + o(x), \qquad \lim_{x \to 0} \frac{o(x)}{||x||} = 0.$$

kjer je A neka $n \times n$ matrika. V splošnem ne moremo odpraviti vseh členov višjega reda z zamenjavo koordinat.

Primer 36. V vektorskem polju $v(x) = x + \alpha x^n$ $(x \in \mathbb{R},\ n > 1)$ v splošnem ne moremo odpraviti člena αx^n. Bistvena ovira je, da je to polje tangetno na identiteto pri $x = 0$.

Če pa je $c > 0$, $c \neq 1$, potem lahko vektorskem polje

$$v(x) = cx + o(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

lokalno lineariziramo, to je, spremenimo v linearno polje $w(x) = cx$ s primerno izbrano lokalno zamenjavo koordinat v okolici točke $x = 0$.

II.5 Komutator (Liejev oklepaj) vektorskih polj

Naj bosta v, w $\mathcal{C}^2$ vektorski polji na mnogoterosti X. Njun **komutator** $[v, w]$ je diferencialni operator, ki ima na poljubni $\mathcal{C}^2$ funkciji g vrednost

$$[v, w]\,(g) = v(w(g)) - w(v(g)).$$

Rezultat je torej funcija na X. Preverimo, da je preslikava $g \mapsto [v, w]\,(g)$ derivacija v vsaki točki, to je,

- linearna v g (aditivna in $\mathbb{R}$-homogena)
- zadošča Leibnitzovemu pravilu.

Prva lastnost je očitna. Preverimo drugo. Naj bosta f in g $\mathcal{C}^2$ funkciji. Velja:

$$\begin{aligned} w(v(fg)) &= w(v(f)g + fv(g)) = w(v(f))g + v(f)w(g) + w(f)v(g) + fw(v(g)), \\ v(w(fg)) &= v(w(f)g + fw(g)) = v(w(f))g + w(f)v(g) + v(f)w(g) + fv(w(g)). \end{aligned}$$

Če odštejemo drugo enačbo od prve, se členi na sredini uničijo in dobimo

$$[v, w](fg) = g[v, w](f) + f[v, w](g),$$

kar je ravno Leibnizovo pravilo za $[v, w]$.

Naredimo izračun komutatorja v $\mathbb{R}^n$. Naj bo g neka $\mathcal{C}^2$ funkcija in

$$v = \sum_{j=1}^n v_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}, \qquad w = \sum_{j=1}^n w_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}.$$

$$v(w(g)) = \sum_{j=1}^n v_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{k=1}^n w_k(x) \frac{\partial g}{\partial x_k} \right) = \sum_{j,k=1}^n \left(v_j(x) \frac{\partial w_k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial g}{\partial x_k} + v_j(x) w_k(x) \frac{\partial^2 g}{\partial x_k \partial x_j} \right)$$

$$w(v(g)) = \sum_{j,k=1}^n \left(w_j(x) \frac{\partial v_k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial g}{\partial x_k} + w_j(x) v_k(x) \frac{\partial^2 g}{\partial x_j \partial x_k} \right).$$

V razliki se parcialni odvodi drugega reda $\frac{\partial^2 g}{\partial x_j \partial x_k} = \frac{\partial^2 g}{\partial x_k \partial x_j}$ krajšajo in dobimo:

$$[v, w](g) = \sum_{k=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{n} v_j(x) \frac{\partial w_k}{\partial x_j} - w_j(x) \frac{\partial v_k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial g}{\partial x_k} = \sum_{k=1}^{n} a_k(x) \frac{\partial g}{\partial x_k}.$$

Ker to velja za vsako testno funkcijo g, sledi

$$[v, w] = \sum_{k=1}^{n} a_k(x) \frac{\partial}{\partial x_k} = \sum_{k=1}^{n} \big(v(w_k) - w(v_k) \big) \frac{\partial}{\partial x_k}.$$

Opomba. Iz definicije sledi, da je operacija $(v, w) \mapsto [v, w]$ lokalna, to je, vrednost komutatorja $[v, w]$ v neki točki je odvisna le od vrednosti vektorskih polj v, w v poljubno majhni odprti okolici te točke.

Primer 37. Za lokalne koordinate $x = (x_1, \ldots, x_n)$ očitno velja

$$\left[\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j} \right] = 0, \qquad 1 \leq i, j \leq n.$$

Splošneje, če sta v, w konstantni vektorski polji na domeni v $\mathbb{R}^n$ (to je, polji s konstantni koeficienti), potem je $[v, w] = 0$.

Primer 38.

$$v = \frac{\partial}{\partial x_1}, \quad w = \frac{\partial}{\partial x_1} + h(x_1, x_2) \frac{\partial}{\partial x_2}, \quad [v, w] = \frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2}.$$

Algebraične lastnosti komutatorja: Če sta v in w $\mathcal{C}^r$-vektorski polji, $r \geq 2$, potem je njun komutator $[v, w]$ vektorsko polje razreda $\mathcal{C}^{r-1}$ in velja:

1. Operacija je $\mathbb{R}$-linearna v obeh faktorjih:

$$\begin{aligned}
&[v_1 + v_2, w] = [v_1, w] + [v_2, w] \\
&[v, w_1 + w_2] = [v, w_1] + [v, w_2] \\
&[tv, w] = t\,[v, w], \quad t \in \mathbb{R} \\
&[v, tw] = t\,[v, w], \quad t \in \mathbb{R}.
\end{aligned}$$

2. $[fv, w] = f\,[v, w] - w(f)\,v$ za vsako gladko funkcijo f.

3. $[v, w] + [w, v] = 0$ (v posebnem: $[v, v] = 0$).

4. **Jacobijeva identiteta:**

$$\big[[u, v], w\big] + \big[[w, u], v\big] + \big[[v, w], u\big] = 0.$$

Označimo z $\aleph(X)$ množico vseh gladkih vektorskih polj na gladki mnogoterosti X. Očitno je $\aleph(X)$ realen vektorski prostor. Opremljen z operacijo $[\cdot,\cdot]$ je $\aleph(X)$ *Liejeva algebra.*

Trditev 21. *Če je $f\colon X \to Y$ gladek difeomorfizem in sta v, w vektorski polji na X, potem velja*

$$f_*[v,w] = [f_*v, f_*w].$$

To pomeni, da je vseeno, v katerih koordinatah računamo komutator.

Dokaz. Izberimo gladko funkcijo g na Y. Po definiciji potiska f_*v velja

$$(f_*v)_{f(x)}(g) = v_x(g \circ f).$$

(Leva stran je vrednost vektorskega polja f_*v na funkciji g v točki $f(x)$, desna stran pa vrednost polja v na funkciji $g \circ f$ v točki x.) Zgornjo identiteto lahko zapišemo v obliki

$$(f_*v)(g) \circ f = v(g \circ f).$$

Z večkratno uporabo tega dejstva dobimo:

$$\begin{aligned} f_*[v,w](g) \circ f &= [v,w](g \circ f) \\ &= v\big(w(g \circ f)\big) - w\big(v(g \circ f)\big) \\ &= v\big((f_*w)(g) \circ f\big) - w\big((f_*v)(g) \circ f\big) \\ &= (f_*v)((f_*w)(g)) \circ f - (f_*w)((f_*v)(g)) \circ f \\ &= [f_*v, f_*w](g) \circ f. \end{aligned}$$

Ker to velja za vsako gladko testno funkcijo g na Y, sledi $f_*[v,w] = [f_*v, f_*w]$. □

Opomba. Trditev 24 lahko posplošimo:

Trditev 22. *Če sta v, w vektorski polji na X in sta $\tilde{v}, \tilde{w}$ vektorski polji na Y, tako da za neko gladko preslikavo $f\colon X \to Y$ velja $df_x v_x = \tilde{v}_{f(x)}$ in $df_x w_x = \tilde{w}_{f(x)}$, sledi*

$$df_x[v,w]_x = [\tilde{v}, \tilde{w}]_{f(x)}.$$

II.6 Liejev odvod vektorskega polja

Naj bosta v in w vektorski polji na gladki mnogoterosti X. Označimo s $\phi_t(x)$ tok polja v. Vemo, da je družina $\{\phi_t\}$ lokalna grupa difeomorfizmov mnogoterosti X.

Definicija 32. Liejev odvod vektorskega polja w v smeri vektorskega polja v v točki $x \in M$ je definiran s predpisom

$$(L_v w)_x = \frac{d}{dt}\bigg|_{t=0} \phi_t^* w = \lim_{t\to 0} \frac{1}{t}\big((\phi_t^* w)_x - w_x\big) \in T_x X.$$

Iz definicije sledi, da je $L_v w$ vektorsko polje, ki je odvod vektorskega polja w vzdolž toka vektorskega polja v.

Definicijo lahko posplošimo na primer, ko je w tenzorsko polje poljubnega tipa. Če je $w = f$ funkcija na M, je njen Liejev odvod vzdolž polja v enak

$$(L_v f)_x = \frac{d}{dt}\bigg|_{t=0} f(\phi_t(x)) = v(f)(x) = df_x v_x,$$

torej je ravno smerni odvod funkcije f v smeri vektorja v.

Primer 39. Naj bodo $x = (x_1, \ldots, x_n)$ koordinate na $\mathbb{R}^n$ in $v = \frac{\partial}{\partial x_1}$. Njegov tok

$$\phi_t(x_1, \ldots, x_n) = (x_1 + t, x_2, \ldots, x_n)$$

je paralelni premik v koordinatni smeri x_1. Diferencial $d\phi_t \colon T_x\mathbb{R}^n \to T_{\phi_t(x)}\mathbb{R}^n$ preslika tangentni vektorj $w = \sum_j w_j \frac{\partial}{\partial x_j}|_x \in T_x\mathbb{R}^n$ v vektor $\sum_j w_j \frac{\partial}{\partial x_j}|_{\phi_t(x)} \in T_{\phi_t(x)}\mathbb{R}^n$.

Izberimo vektorsko polje

$$w = \sum_{j=1}^n w_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}.$$

Tedaj je

$$(\phi_t^* w)_x = (d\phi_{-t})_{\phi_t(x)} w_{\phi_t(x)} = \sum_{j=1}^n w_j(x_1 + t, x_2, \ldots, x_n) \frac{\partial}{\partial x_j}\bigg|_x$$

in zato je Liejev odvod enak

$$L_{\frac{\partial}{\partial x_1}} \left(\sum_{j=1}^n w_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j} \right) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial w_j}{\partial x_1}(x) \frac{\partial}{\partial x_j} = \left[\frac{\partial}{\partial x_1}, w \right]. \tag{II.6.1}$$

V tem primeru je torej Liejev odvod enak komutatorju.

Trditev 23. *Za vsak par vektorskih polj v, w velja identiteta*

$$\frac{d}{dt}(\phi_t^* w) = \phi_t^*(L_v w)$$

na fundamentalni domeni polja v.

Dokaz. Pri $t = 0$ je to ravno definicija Liejevega odvoda. Naj bo sedaj $t = s + u$, kjer $s \in \mathbb{R}$ fiksiramo in u spreminjamo. Velja

$$\phi_t^* w = (\phi_u \circ \phi_s)^* w = \phi_s^*(\phi_u^* w).$$

Odvajajmo po t pri $t = s$:

$$\frac{d}{dt}\bigg|_{t=s} \phi_t^* w = \frac{d}{du}\bigg|_{u=0} \phi_s^*(\phi_u^* w) = \phi_s^* \left(\frac{d}{du}\bigg|_{u=0} \phi_u^* w \right) = \phi_s^*(L_v w).$$

Upoštevali smo, da je $\phi_s^* = d\phi_{-s}$ linearna preslikava na vsakem vlaknu tangentnega svežnja in zato komutira z odvodom po u. $\square$

Trditev 24. *Če je $f\colon X \to Y$ difeomorfizem in sta v, w vektorski polji na X, potem velja*

$$f_*(L_v w) = L_{f_* v}(f_* w)$$

Torej je izračun Liejevega odvoda neodvisen od izbire koordinat.

Dokaz. Naj bo ϕ_t tok polja v na X in $\tilde{\phi}_t$ tok polja $\tilde{v} := f_* v$ na Y. Potem velja

$$f \circ \phi_t = \tilde{\phi}_t \circ f.$$

Pišimo $\tilde{w} = f_* w$, kar je ekvivalentno $w = f^* \tilde{w}$. Uporabimo zgornjo identiteto za povlek vektorskega polja $\tilde{w}$. Po eni strani dobimo

$$(f \circ \phi_t)^* \tilde{w} = \phi_t^* \circ f^* \tilde{w} = \phi_t^* w,$$

po drugi strani pa

$$(\tilde{\phi}_t \circ f)^* \tilde{w} = (f^* \circ \tilde{\phi}_t^*) \tilde{w}.$$

Ker sta izraza enaka, sledi

$$\phi_t^* w = f^*(\tilde{\phi}_t^* \tilde{w}).$$

Odvajamo po t pri $t = 0$:

$$L_v w = f^* \left(\frac{d}{dt}\bigg|_{t=0} \tilde{\phi}_t^* \tilde{w} \right) = f^*(L_{\tilde{v}} \tilde{w}).$$

To je očitno ekvivalentno $f_*(L_v w) = L_{\tilde{v}} \tilde{w}$, kar smo želeli dokazati. □

Sedaj bomo pokazali, da je Liejev odvod enak Liejevemu oklepaju.

Trditev 25. *Za vsak par vektorskih polj v, w velja*

$$L_v w = [v, w]. \tag{II.6.2}$$

Dokaz. Iz trditev 21 in 24 sledi, da sta obe operaciji (komutator in Liejev odvod) neodvisni od izbire lokalnih koordinat.

Naj bo $p \in X$ točka, v kateri je $v_p \neq 0$. Po trditvi 20 obstajajo lokalne koordinate $x = (x_1, \ldots, x_n)$ v okolici točke p, v katerih je v enako kooordinatnemu polje $\frac{\partial}{\partial x_1}$. V tem primeru smo željeno enakost že dokazali; glej (II.6.1).

Naj bo sedaj $p \in X$ taka točka, da velja $v_x = 0$ za vsako točko x v neki okolici točke p. V tem primeru je očitno $[v, w]_p = 0$. Poleg tega tok $\phi_t(x) \equiv x$ na okolici $x \in U$ miruje, zato sledi tudi $L_v w|_p = 0$.

To pomeni, da enakost (II.6.2) velja na odprti množici $\Omega = \{p \in X \colon v_p \neq 0\}$ in tudi na notranjosti njenega komplementa $X \setminus \Omega$; torej velja na komplementu roba $\partial\Omega$. Iz definicij sledi, da sta obe vektorski polji $[v, w]$ in $L_v w$ zvezni. Ker je rob množice Ω nikjer gost v X, sledi enakost (II.6.2) v vseh točkah $p \in X$ po zveznosti. □

Posledica 8. *Za poljuben par vektorskih polj velja* $L_w v = -L_v w$.

Trditev 26. *Naj bo* ϕ_t *tok polja* v *in* ψ_s *tok polja* w. *Potem velja*

$$L_v w = 0 \iff \phi_t \circ \psi_s = \psi_s \circ \phi_t.$$

To pomeni, da polji v, w komutirata natanko tedaj, ko njuna tokova komutirata.

Dokaz. ($\Longleftarrow$) Odvajamo identiteto $\phi_t \circ \psi_s = \psi_s \circ \phi_t$ po s pri $s = 0$ (t in x sta fiksni):

$$\left.\frac{d}{ds}\right|_{s=0} \phi_t(\psi_s(x)) = \left.\frac{d}{ds}\right|_{s=0} \psi_s(\phi_t(x)) = w_{\phi_t(x)}.$$

Levo stran v zgornji identiteti lahko po verižnem pravilu izrazimo tudi takole:

$$(d\phi_t)_x \left.\frac{d}{ds}\right|_{s=0} \psi_s(x) = (d\phi_t)_x \, w_x.$$

S primerjavo dobimo

$$(d\phi_t)_x w_x = w_{\phi_t(x)} \iff \phi_t^* w \stackrel{t}{\equiv} w,$$

kar pomeni, da je polje w ϕ_t-invariantno. Z odvajanjem po t pri $t = 0$ sledi $L_v w = 0$.

($\Longrightarrow$) Naj bo $L_v w = 0$. Iz trditve 23 sledi

$$\frac{d}{dt}\phi_t^* w = \phi_t^*(L_v w) = \phi_t^*(0) = 0.$$

Torej je vektorsko polje $\phi_t^* w$ neodvisno od t in je zato enako $\phi_0^* w = w$. Za vsak fiksen t torej velja $(\phi_t)_* w = w$, torej je w ϕ_t-invariantno. Iz trditve 4 sledi, da difeomorfizem ϕ_t preslika tokovnico $\psi_s(x)$ polja w, ki gre pri $s = 0$ skozi točko x, v tokovnico polja w, ki gre pri $s = 0$ skozi točko $\phi_t(x)$. To ravno pomeni $\phi_t(\psi_s(x)) = \psi_s(\phi_t(x))$. □

Poseben primer:

$$v = \frac{\partial}{\partial x_1}, \qquad w = \sum_{j=1}^n w_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}.$$

Njun komutator enak

$$[v, w] = \sum_{j=1}^n \frac{\partial w_j}{\partial x_1}(x) \frac{\partial}{\partial x_j}.$$

Torej je $[v, w] = 0$ natanko tedaj, ko so koeficienti w_j polja w neodvisni od x_1:

$$w = \sum_{j=1}^n w_j(x_2, \ldots, x_n) \frac{\partial}{\partial x_1}.$$

Evidentno je, da so integralne krivulje takega polja translacijsko invariantne v x_1-smer, to je, če je $\psi_s(x)$ neka integralna krivulja polja w, potem je tudi

$$\phi_t(\psi_s(x)) = \psi_s(x) + (t, 0, \ldots, 0) = \psi_s(x_1 + t, x_2, \ldots, x_n)$$

integralna krivulja polja w.

II.7 Komutirajoča polja in Frobeniusov izrek

Izrek 18. *Naj bodo $v_1, v_2, \ldots, v_m$ linearno neodvisna vektorska polja na mnogoterosti X, ki paroma komutirajo:*

$$[v_j, v_k] = 0, \quad j, k = 1, \ldots, m.$$

Potem ima vsaka točka $p \in X$ odprto okolico $U \subset X$ in lokalno karto $\phi\colon U \to \psi(U) = U' \subset \mathbb{R}^n$, tako da je

$$\phi_* v_j = \frac{\partial}{\partial x_j}, \qquad j = 1, \ldots, m.$$

Obrat sledi iz trditve 21: če taka karta ϕ obstaja, potem je

$$\phi_*[v_j, v_k] = [\psi_* v_j, \psi_* v_k] = [\frac{\partial}{\partial x_j}, \frac{\partial}{\partial x_k}] = 0.$$

Dokaz. V neki lokalni karti prevedemo na primer $X = \mathbb{R}^n$, $p = 0$. Naj bo

$$v_j = \sum_{k=1}^{n} a_{jk}(x) \frac{\partial}{\partial x_k}, \qquad j = 1, \ldots, m$$

Ker so vektorska polja $v_1, \ldots, v_m$ linearno neodvisna, ima matrika koeficientov $(a_{jk}(0))$ maksimalen rang m. Brez izgube splošnosti lahko predpostavimo, da je

$$\det(a_{jk}(0))_{j,k=1}^m \neq 0.$$

Odtod sledi, da so $v_1(0), \ldots, v_m(0), \frac{\partial}{\partial x_{m+1}}, \ldots, \frac{\partial}{\partial x_n}$ baza tangentnega prostora $T_0\mathbb{R}^n$.

Naj bo ϕ_t^j tok polja v_j. Označimo $d = n - m$. Definiramo preslikavo g v okolici izhodišča $x = 0$ takole:

$$g(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \phi_{x_1}^1 \circ \ldots \circ \phi_{x_m}^m(\underbrace{0, \ldots, 0}_{m}, x_{m+1}, \ldots, x_n).$$

(Torej začnemo v točki $(0, \ldots, 0, x_{m+1}, \ldots, x_n)$ in gremo za čas x_j v smeri polja v_j za vsak $j = 1, \ldots, m$.) Izračunajmo odvod po spremenljivki x_1:

$$\frac{\partial g}{\partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x_1}\left(\phi_{x_1}^1 \circ \phi_{x_2}^2 \circ \ldots \circ \phi_{x_m}^m(0, \ldots, 0, x_{m+1}, \ldots, x_n)\right) = (v_1)_{g(x)}.$$

Pri računanju odvoda po spremenljivki x_2 upoštevamo, da polji v_1 in v_2 komutirata:

$$g(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \phi_{x_2}^2 \circ \phi_{x_1}^1 \circ \ldots \circ \phi_{x_m}^m(\underbrace{0, \ldots, 0}_{m}, x_{m+1}, \ldots, x_n).$$

Enako kot prej sledi $\frac{\partial g}{\partial x_2}(x) = (v_2)_{g(x)}$. Analogen sklep velja za ostale spremenljivke, torej je

$$\frac{\partial g}{\partial x_j}(x) = (v_j)_{g(x)}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Torej je $g_* \frac{\partial}{\partial x_j} = v_j$ za vsak $j = 1, \dots, m$.

Ker je $g(0, \dots, 0, x_{m+1}, \dots, x_n) = (0, \dots, 0, x_{m+1}, \dots, x_n)$, sledi

$$\frac{\partial g}{\partial x_k}(0) = \frac{\partial}{\partial x_k}, \quad k = m+1, \dots, n.$$

Torej je diferencial dg_0 neizrojen, zato je g difeomorfizem v neki okolici 0 v $\mathbb{R}^n$. Naj bo $\phi = g^{-1}$ njegov inverz; tedaj je $\phi_* v_j = \frac{\partial}{\partial x_j}$ za $j = 1, \dots, m$. $\square$

Naj bo X gladka mnogoterost. Za vsak $x \in X$ naj bo $E_x \subset T_x X$ vektorski podprostor v $T_x X$, $\dim E_x = m = \operatorname{rang} E$ (neodvisen od x). Predpostavimo, da je E_x gladko odvisen od $x \in X$.

$$E = \bigsqcup_{x \in X} E_x \subset TX$$

Natančneje, zahtevajmo, da je E *gladek vektorski podsveženj tangentnega svežnja* TX v naslednjem smislu:

Vsaka točka $p \in X$ *ima okolico* $U \subset X$ *in gladko svežnjsko karto* $TX|_U \xrightarrow[\theta]{\cong} U \times \mathbb{R}^n$, $n = \dim X$, *tako da je*

$$\theta(E|_U)] = U \times (\mathbb{R}^m \times \{0\}^d), \quad d = n - m.$$

Ekvivalentno: za vsako točko $p \in X$ obstaja okolica $U \subset X$ in m gladkih vektorskih polj $v_1, \dots, v_m$ na U, tako da je

$$E_x = \operatorname{Lin}\{(v_1)_x, \dots, (v_m)_x\} \quad \forall x \in U.$$

Definicija 33. Podmnogoterost M v X je **integralna podmnogoterost** podsvežnja $E \subset TX$, če za vsako točko $x \in X$ velja $T_x M \subset E_x$.

Od tod sledi $\dim M \leq m = \dim E_x$.

Primer 40. $m = 1$. E lokalno definiran z vektorskim poljem V. Integralna podmnogoterost E je neparametrizirana tokovnica polja E. Obstoj tokovnic vektorskega polja pove, da imamo vselej 1-dimenzionalne integralne podmnogoterosti.

Vprašanje: Kdaj obstajajo lokalne integralne podmnogoterosti M dimenzije $m = \operatorname{rang} E$?

Recimo, da je $M \subset X$ neka integralna podmnogoterost svežnja $E \subset TX$, $\dim M = m = \operatorname{rang} E$. Naj bodo $V_1, \ldots, V_m$ vektorska polja, ki napenjajo E na neki odprti množici $U \subset X$.

Trdimo: Vektorsko polje $[V_j, V_k]$ je tudi tangentno na E v točkah iz $U \cap M$.

Dokaz: Naj bodo $g_1, \ldots, g_d \colon U \to \mathbb{R}$ lokalne definicijske funkcije $M \cap U$.

$$[V_j, V_k](g_l) = V_j(V_k(g_l)) - V_k(V_j(g_l)), \quad V_k(g_l)|_{M\cap U} = 0,\ V_j(g_l)|_{M\cap U} = 0$$

$$\Longrightarrow [V_j, V_k](g_l) = dg_l[V_j, V_k] = 0 \text{ v točkah iz } M \cap U.$$

Ker to velja za vsak g_l, $l = 1, \ldots, d$, sledi

$$[V_j, V_k]|_x \subset \bigcap_{l=1}^{m} \ker(dg_l)_x = T_x M \quad \forall x \in M \cap U.$$

Odtod sledi, da je komutator $[V_j, V_k]$ linearna kombinacija polj $V_1, \ldots, V_m$ na $M \cap U$.

Zaključek: Če ima E integralne mnogoterosti dimenzije $m = \operatorname{rang} E$ skozi vsako točko $x \in X$, mora E zadoščati naslednjemu pogoju:

Definicija 34 (Involutiven podsveženj). Podsveženj $E \subset TX$ ranga m je involutiven, če ima vsaka točka $p \in X$ okolico $U \subset X$, na kateri je $E|_U$ generiran z gladkimi vektorskimi polji $V_1, \ldots, V_m$, tako da je vsak komutator $[V_j, V_k]$ spet polje, ki je tangentno na $E|_U$.

Opomba: Ker polja $V_1, \ldots, V_m$ generirajo $E|_U$, je pogoj v definiciji ekvivalenten

$$[V_j, V_k] = \sum_{l=1}^{m} a_{jkl} V_l, \quad j, k = 1, \ldots, m$$

za neke gladke funkcije a_{jkl} na U.

Naloga: Preveri, da je involutivnostni pogoj neodvisen od izbire lokalnih vektorskih polj $V_1, \ldots, V_m$, ki generirajo E.

Izrek 19 (Frobenius). *Če je $E \subset TX$ involutiven podsveženj ranga m, potem lahko X razslojimo na disjunktno unijo podmnogoterosti $M_\alpha \subset X$ dimenzije $\dim M_\alpha = m$, tako da je vsaka M_α integralna podmnogoterost svežnja E.*

Taka razslojitev mnogoterosti na paroma disjunktne podmnogoterosti konstantne dimenzije se imenuje *foliacija*. Posamezna podmnogoterost v foliaciji se imenuje *list* foliacije. Vsak list je vsebovan v nekem natanko določenem maksimalnem listu.

Lokalno: Vsaka točka $p \in X$ ima okolico $U \subset X$ in lokalno karto $\phi : U \xrightarrow{\cong} U' \subset \mathbb{R}^n$, tako da je $d\phi_x(E_x) = \mathbb{R}^m \times \{0\}^d$. Tedaj je U disjunktna unija nivojnih ploskev

$$\phi_{m+1}(x) = c_{m+1},\ \phi_{m+2}(x) = c_{m+2}, \dots \phi_n(x) = c_n,$$

kjer so $c_{m+1}, \dots, c_n \in \mathbb{R}$ realna števila.

Dokaz. Fiksirajmo točko $p \in X$. Izberimo lokalne koordinate $x = (x_1, \dots, x_n)$ v okolici p, v katerih je $x(p) = 0 \in \mathbb{R}^n$. Naj bodo $V_1(x), \dots, V_m(x)$ vektorska polja v okolici izhodišča, ki napenjajo E_x za vsak x. Z linearno zamenjavo koordinat dosežemo $V_j(0) = \frac{\partial}{\partial x_j}\Big|_0$ za $j = 1, \dots, m$. Naj bo

$$V_j(x) = \sum_{l=1}^{n} a_{jl}(x) \frac{\partial}{\partial x_l}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Za levi $m \times m$ minor matrike koeficientov velja $\det(a_{jl})_{j,l}^m \neq 0$ na neki okolici $x = 0$ (v točki $x = 0$ je to ravno identična matrika). Pomnožimo matriko koeficientov $(a_{jl})_{j=1,\dots,m}^{l=1,\dots,n}$ na levi z matriko $(a_{jl})_{j,l=1,\dots,m}^{-1}$. Dobimo matriko koeficientov oblike

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 1 & & 0 & \\ & \ddots & & * \\ 0 & & 1 & \end{array}\right]$$

Involutivnost se pri prehodu na novo bazo ohranja. Torej obstajajo vektorska polja oblike

$$W_j(x) = \frac{\partial}{\partial x_j} + \sum_{l=m+1}^{n} b_{jl}(x) \frac{\partial}{\partial x_l}, \quad j = 1, \dots, m,$$

ki generirajo E v neki okolici $0 \in \mathbb{R}^n$.

Ker je sveženj E involutiven, je komutator $[W_j, W_k]$ linearna kombinacija polj $W_1, \dots, W_m$.

Preprost račun pokaže, da je komutator $[W_j, W_k]$ linearna kombinacija vektorskih polj $\frac{\partial}{\partial x_l}$, $l = m+1, \dots, m$.

Od tod sledi z uporabo elementarne linearne algebre, da je

$$[W_j, W_k] = 0, \quad j, k = 1, \dots, m.$$

Zato obstaja zamenjava difeomorfizem $x \mapsto g(x)$ v okolici $0 \in \mathbb{R}^n$, ki preslika vektorsko polje W_j v koordinatno polje $\frac{\partial}{\partial x_j}$ za vsak $j = 1, \dots, m$; to je, $g_* W_j = \frac{\partial}{\partial x_j}$. Odtod sledi, da so nivojne ploskve $g_k = c_k$, $k = m+1, \dots, n$, maksimalne integralne podmnogoterosti svežnja E v neki okolici p. S tem dobimo lokalno razlojitev okolice točke $p \in X$ na integralne podmnogoterosti.

Globalno razslojitev dobimo s topološkimi argumenti (glej npr. [AMR] ali [B]). $\square$

Primer 41. $\mathbb{R}^3_{(x,y,z)}$. Naj bo $E \subset T\mathbb{R}^3 \cong \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$ podsveženj ranga 2.
Lokalno je E določen z dvema linearno neodvisnima vektorskima prostoroma V, W.
Kot v dokazu Frobeniusovega izreka:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\partial}{\partial x} + a(x,y,z)\frac{\partial}{\partial z} \\ W &= \frac{\partial}{\partial y} + b(x,y,z)\frac{\partial}{\partial z} \end{aligned}$$

Integralne ploskve so oblike $z = f(x,y)$. Ploskev parametriziramo $(x,y) \to (x,y,f(x,y))$.
Izračunamo odvoda:

$$\begin{aligned} \text{odvod po } x: &\quad \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial x}\frac{\partial}{\partial z} \\ \text{odvod po } y: &\quad \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial}{\partial z} \end{aligned}$$

Ker polji V in W generirata E, vidimo, da je ta ploskev integralna ploskev svežnja E natanko tedaj, ko je

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x,y) = a(x,y,f(x,y)), \quad \frac{\partial f}{\partial y}(x,y) = b(x,y,f(x,y)).$$

Ker je $f \in \mathcal{C}^2$ sta druga odvoda enaka:

$$\begin{gathered} f_{xy} = a_y + a_z f_y = a_y + a_z b \\ f_{yx} = b_x + b_z f_x = b_x + b_z a \\ f_{xy} - f_{yx} = a_y - b_x + a_z b - b_z a \equiv 0 \end{gathered}$$

Izračunajmo še komutator vektorskih polj V in W:

$$[V,W] = \big(b_x + ab_z - a_y - ba_z\big)\frac{\partial}{\partial z} = (f_{yx} - f_{xy})\frac{\partial}{\partial z}$$

Ta račun diretno pokaže, da vektorski polji V in W komutirata vzdolž vsake integralne ploskve; torej je neničelnost komutatorja ovira za obstoj integralni ploskev.

II.8 Liejeva vrsta toka vektorskega polja

Naj bo V vektorsko polje in ϕ_t njegov tok. Naj bo f gladka funkcija vzdolž tokovnice $\phi_t(x)$.

$$t \mapsto f(\phi_t(x)) \overset{Taylor}{=} f(x) + V_x(f)\cdot t + \frac{d^2}{dt^2}\bigg|_{t=0} f(\phi_t(x))\frac{t^2}{2} + \dots$$

$$\frac{d}{dt}f(\phi_t(x)) = df(\phi_t(x))\frac{d\phi_t(x)}{dt} = df_{\phi_t(x)}V_{\phi_t(x)} = V(f)(\phi_t(x))$$

Če f nadomestimo z $V(f)$ dobimo:

$$\frac{d^2}{dt^2}f(\phi_t(x)) = \frac{d}{dt}V(f)(\phi_t(x)) = V(V(f))(\phi_t(x)) = V^2(f)(\phi_t(x))$$

To je diferencialni operator drugega reda.

$$V = \sum_{j=1}^{n} a_j(x)\frac{\partial}{\partial x_j}, \qquad V(f) = \sum_{j=1}^{n} a_j(x)\frac{\partial f}{\partial x_j}$$

$$V(Vf) = \sum_{j,k=1}^{n} a_k \frac{\partial}{\partial x_k}\left(a_j \frac{\partial f}{\partial x_j}\right)$$

$$\frac{d^k}{dt^k}f(\phi_t(x)) = V^k(f)(\phi_t(x)).$$

Torej:

$$f(\phi_t(x)) = f(x) + V(f)(x)\,t + V^2(f)(x)\frac{t^2}{2} + \ldots + V^k(f)(x)\frac{t^k}{k!} + o(t^k).$$

Uporabimo to formulo v primeru, ko je $V = \sum\limits_{j=1}^{n} a_j(x)\frac{\partial}{\partial x_j}$, $f = x_j$ (j-ta koordinata), $\phi_t(x) = (\phi_{t,1}(x), \ldots, \phi_{t,n}(x))$.

$$x_j \circ \phi_t(x) = \phi_{t,j}(x) = x_j + a_j(x)\,t + V(a_j)(x)\frac{t^2}{2} + \ldots + V^{k-1}(a_j)(x)\frac{t^k}{k!} + o(t^k),$$

kjer smo uporabili

$$V(x_j) = \sum_{k=1}^{n} a_k(x)\frac{\partial x_k}{\partial x_j} = a_j(x).$$

Liejeva vrsta toka je

$$\phi_t(x) = x + V(x)t + V(a)(x)\frac{t^2}{2} + \ldots + V^{k-1}(a)(x)\frac{t^k}{k!} + o(t^k).$$

Še en način, kako pridemo do komutatorja: Naj bo še W vektorsko polje in ψ_s njegov tok.

$$W = \sum_{j=1}^{n} b_j(x)\frac{\partial}{\partial x_j}, \quad \psi_s(x) = s + sb(x) + \frac{s^2}{2}W(b)(x) + \ldots$$

$$\begin{aligned}
\psi_s(\phi_t(x)) &= \psi_s(x + a(x)t + V(a)(x)\frac{t^2}{2} + \ldots) \\
&= x + a(x)t + V(a)(x)\frac{t^2}{2} + \ldots + sb(x + a(x)t + \ldots) + \frac{s^2}{2}W(b)(x + a(x)t + \ldots) + \ldots \\
&= x + ta(x) + sb(x) + st\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial b(x)}{\partial x_j}\,a_j(x) + \ldots + o(t^2, s^2).
\end{aligned}$$

Opazimo, da je $\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial b(x)}{\partial x_j} a_j(x) = V(b)(x)$. Odtod sledi

$$\psi_s(\phi_t(x)) = x + ta(x) + sb(x) + stV(b)(x) + o(t^2, s^2)$$
$$\phi_t(\psi_s(x)) = x + ta(x) + sb(x) + stW(a)(x) + o(t^2, s^2)$$

Razlika:

$$\psi_s(\phi_t(x)) - \phi_t(\psi_s(x)) = st\big[V(b)(x) - W(a)(x)\big] + o(t^2, s^2) = st[V, W](x) + o(t^2, s^2)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial s \partial t}(\psi_s\phi_t(x) - \phi_t\psi_s(x))\bigg|_{s=t=0} = [V, W](x).$$

Domača naloga: Dokaži

$$[V, W](x) = \frac{d}{dt}\bigg|_{t=0} \psi_{-\sqrt{t}} \circ \phi_{-\sqrt{t}} \circ \psi_{\sqrt{t}} \circ \phi_{\sqrt{t}}(x).$$

Če $\sqrt{t}$ nadomestimo z $\mathrm{sign}(t)\sqrt{|t|}$, potem lahko vzamemo dvostranski odvod.

II.9 Grönwallova lema in razdalja med tokovnicami

V tem razdelku bomo dokazali oceno za razdaljo med dvema tokovnicama vektorskega polja. Glavni rezultat je naslednji.

Izrek 20. *Denimo, da je $V = \sum a_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}$ Lipschitzovo vektorsko polje z Lipschitzovo kontanto B na domeni $\Omega \subset \mathbb{R}^n$:*

$$|a(x) - a(y)| \leq B|x - y|, \qquad \forall x, y \in \Omega.$$

Potem za vse pare točk $x, y \in \Omega$ in za vsak $t \geq 0$, za katere je tok $\phi_s(x)$, $\phi_s(y)$ definiran na časovnem intervalu $s \in [0, t]$ in leži v Ω, velja naslednja ocena:

$$|\phi_t(x) - \phi_t(y)| \leq e^{Bt}|x - y|. \tag{II.9.1}$$

V dokazu bomo uporabili naslednjo lemo.

Lema 5 (Grönwall)**.** *Naj bosta $f, g\colon [a, b) \to \mathbb{R}_+ = [0, \infty)$ zvezni funkciji. Denimo, da za neko število $A \geq 0$ in za vsak $t \in [a, b)$ velja neenakost*

$$f(t) \leq A + \int_a^t f(s)g(s)\, ds.$$

Potem velja

$$f(t) \leq A \exp\left(\int_a^t g(s)\, ds\right), \quad t \in [a, b).$$

Poseben primer: Če je funkcija g konstanta $g \equiv B \geq 0$, tedaj iz ocene

$$f(t) \leq A + B \int_a^t f(s)\,ds, \quad t \in [a,b),$$

sledi ocena

$$f(t) \leq Ae^{B(t-a)}.$$

Dokaz. Oglejmo si najprej primer $A > 0$. Označimo

$$h(t) = A + \int_a^t f(s)g(s)\,ds.$$

Predpostavka je torej $f(t) \leq h(t)$ za vsak $t \in [a,b)$. Ker je $g(t) \geq 0$, sledi odtod

$$\dot{h}(t) = f(t)g(t) \leq h(t)g(t) \Longrightarrow \frac{\dot{h}(t)}{h(t)} \leq g(t).$$

Z integriranjem dobimo odtod

$$\ln h(t) \leq \ln A + \int_a^t g(s)\,ds$$

in z eksponenciranjem še

$$f(t) \leq h(t) \leq A \exp\left(\int_a^t g(s)ds\right).$$

Z limitnim prehodom $A \searrow 0$ vidimo, da neenakost velja tudi za $A = 0$. $\square$

Dokaz (izreka 20)**.** Fiksirajmo točki $x, y \in \Omega$.

$$f(t) \stackrel{def}{=} |\phi_t(x) - \phi_t(y)|$$

$$\phi_t(x) = \underbrace{\phi_0(x)}_{=x} + \int_0^t \frac{d}{ds}\phi_s(x)ds = x + \int_0^t a(\phi_s(x))\,ds$$

$$\phi_t(y) = y + \int_0^t a(\phi_s(y))ds$$

$$
\begin{aligned}
f(t) = |\phi_t(x) - \phi_t(y)| &\leq |x-y| + \int_0^t |a(\phi_s(x)) - a(\phi_s(y))|ds \\
&\leq |x-y| + \int_0^t B|\phi_s(x) - \phi_s(y)|ds \\
&= |x-y| + \int_0^t Bf(s)ds
\end{aligned}
$$

Funkcija f zadošča predpostavki Grönwallove leme z $A = |x-y|$ in $B = g$. Sledi ocena $f(t) \leq |x-y|\, e^{Bt}$, kar je ravno neenakost II.9.1. □

II.10 Aproksimacija toka s pomočjo algoritma

V tem razdelku bomo pokazali, da lahko tok $\phi_t(x)$ vektorskega polja približno izračunamo z iteracijami primerno izbrane preslikave. Ta rezultat ima poleg očitne praktične vrednosti tudi velik teoretičen pomen, še posebej v teoriji holomorfnih avtomomorfizmov kompleksnih evkliskih prostorv (glej poglavje 4 v [F]).

Definicija 35. Naj bo $V = \sum_{j=1}^n a_j(x)\frac{\partial}{\partial x_j}$ vektorsko polje na odprti množici $D \subset \mathbb{R}^n$ in $a(x) = (a_1(x), \ldots, a_n(x))$. Naj bo Ω odprta množica v $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$, tako da je $D \times \{0\} \subset \Omega$. Preslikava $A\colon \Omega \to \mathbb{R}^n$ razreda $\mathcal{C}^1$, ki zadošča pogojema

$$A(x,0) = x, \quad \left.\frac{\partial A}{\partial t}\right|_{t=0}(x,t) = a(x), \qquad x \in D, \tag{II.10.1}$$

se imenuje *algoritem* za vektorsko polje V.

Iz definicije sledi

$$A(x,t) = x + ta(x) + o(t)$$

za vsak algoritem.

Najpreprostejši algoritem je kar preslikava $(x,t) \mapsto x + ta(x)$, ki je linearna v t.

Izrek 21. *Naj bo V Lipschitzovo vektorsko polje na domeni $D \subset \mathbb{R}^n$ s tokom ϕ_t. Naj bo $\Omega \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ fundamentalna domena toka. Če je $A(x,t) = A_t(x)$ algoritem za polje V, potem je za vsako točko $(x,t) \in \Omega$, $t \geq 0$, preslikava*

$$A^{(N)}_{\frac{t}{N}} \stackrel{def}{=} \underbrace{A_{\frac{t}{N}} \circ \ldots \circ A_{\frac{t}{N}}}_{N\text{-ti iterat}}$$

definirana v okolici točke x za vsa dovolj velika naravna števila $N > 0$ in velja

$$\phi_t(x) = \lim_{N\to\infty} A^{(N)}_{\frac{t}{N}}(x)$$

Konvergenca je enakomerna na kompaktih v Ω.

Dokaz. Fiksirajmo točko $p \in \mathbb{R}^n$. Naj bo $t_0 > 0$ tako število, da tok $\phi_t(p)$ obstaja za vsak $t \in [0, t_0]$. Naj bo $C = \{\phi_t(p) \colon t \in [0, t_0]\}$ trajektorija. Izberimo kompaktni množici $L_1 \subset L_2 \subset \mathbb{R}^n$, tako da je $C \subset \mathring{L}_1$ and $L_1 \subset \mathring{L}_2$. Potem obstaja kompaktna okolica $K \subset \mathring{L}_1$ točke p, tako da za vsako točko $x \in K$ in za vse $t \in [0, t_0]$ velja $\phi_t(x) \in L_1$. Iz (II.10.1) sledi ocena $|\phi_t(x) - A_t(x)| = o(t)$ ko gre $t \to 0$, enakomerno za $x \in L_2$.

Fiksirajmo število $n \in \mathbb{N}$ in izberimo točko $x \in K$. Predpostavimo za trenutek, da orbita

$$y_0 = x,\ y_1 = A_{t/n}(y_0),\ y_2 = A_{t/n}(y_1), \dots, y_n = A_{t/n}(y_{n-1}) \tag{II.10.2}$$

obstaja in leži v množici L_2. Če je $\beta > 0$ Lipschitzova konstanta polja V na L_2, potem iz izreka 20 sledi ocena

$$|\phi_t(x) - \phi_t(y)| \le \mathrm{e}^{\beta t}|x - y|.$$

Ker je $\phi_t(x) = \phi^n_{t/n}(x)$, sledi odtod

$$\phi_t(x) - A^n_{t/n}(x) = \sum_{j=1}^{n} \phi^{n-j}_{t/n}\left(\phi_{t/n}(y_{j-1})\right) - \phi^{n-j}_{t/n}\left(A_{t/n}(y_{j-1})\right).$$

Če uporabim oceno II.9.1 na vsak člen, dobimo

$$|\phi_t(x) - A^n_{t/n}(x)| \le \sum_{j=1}^{n} \mathrm{e}^{\beta t(n-j)/n}|\phi_{t/n}(y_{j-1}) - A_{t/n}(y_{j-1})| \le n\mathrm{e}^{\beta t}o(t/n).$$

Pri $n \to \infty$ konvergira ta izraz proti 0 enakomerno na $x \in K$. Podobna ocena da

$$|\phi_{kt/n}(x) - A^k_{t/n}(x)| \le k\mathrm{e}^{\beta t}o(t/n), \quad k = 1, \dots, n.$$

Z induktivno uporabo te ocene vidimo, da za vsak dovolj velik $n \in \mathbb{N}$ orbita (II.10.2) obstaja in leži v množici L_2 za vsako točko $x \in K$ in za vsak $t \in [0, t_0]$. □

Primer 42. Preslikava

$$A(x, t) = x + ta(x) + tb(x)$$

je algoritem za vsoto $V + W$ vektorskih polj $V = \sum a_j(x)\frac{\partial}{\partial x_j}$, $W = \sum b_j(x)\frac{\partial}{\partial x_j}$.

Naj bo ϕ_t tok polja V in ψ_t tok polja W. Tedaj je tudi preslikava

$$A(x, t) = \psi_t(\phi_t(x)) = x + ta(x) + tb(x) + o(t)$$

algoritem za vsoto polj $V + W$. Odtod sledi, da je tok θ_t vsote $V + W$ enak

$$\theta_t = \lim_{N\to\infty} \left(\psi_{\frac{t}{N}} \circ \phi_{\frac{t}{N}}\right)^{(N)}.$$

Primer 43. Naj bo ϕ_t tok polja V in ψ_t tok polja W. Tedaj je tudi preslikava

$$A_t(x) = \psi_{-\sqrt{t}} \circ \phi_{-\sqrt{t}} \circ \psi_{\sqrt{t}} \circ \phi_{\sqrt{t}}$$

algoritem za komutator $[V, W]$. Torej je tok θ_t komutatorja $[V, W]$ enak

$$\theta_t(x) = \lim_{N \to \infty} A_{t/N}^{(N)}(x).$$

Poglavje III

VEKTORSKI SVEŽNJI

III.1 Definicija in primeri

Naj bosta E in X $\mathcal{C}^r$ mnogoterosti in $\pi\colon E \to X$ surjektivna $\mathcal{C}^r$ preslikava.

Definicija 36. Projekcija $\pi\colon E \to X$ je (realen) vektorski sveženj ranga m in razreda $\mathcal{C}^r$, če ima vsako vlakno $E_x = p^{-1}(x)$ strukturo m-dimenzionalnega vektorskega prostora ($E_x \cong \mathbb{R}^m$) in je sveženj lokalno trivialen: $\forall x_0 \in X$ $\exists U^{okolica} \subset X$ in $\mathcal{C}^r$ difeomorfizem $\theta\colon E|_U \to U \times \mathbb{R}^m$:

$$\begin{tikzcd} \theta\colon \pi^{-1}(U) = E|_U \arrow[rr, "\cong"] \arrow[dr, "\pi"'] & & U \times \mathbb{R}^m \arrow[dl, "pr_1"] \arrow[dll, phantom, "\circlearrowleft"] \\ & U & \end{tikzcd}$$

tako da je za vsak $x \in U$ preslikava $\theta_x\colon E_x \to \{x\} \times \mathbb{R}^m \xrightarrow{pr_2} \mathbb{R}^m$ linearni izomorfizem.

Če $\mathbb{R}^m$ zamenjamo s $\mathbb{C}^m$, dobimo *kompleksen vektorski sveženj* ranga m nad X.

Opomba: Iz definicije sledi, da so vektorske operacije na vlaknih (seštevanje in produkt s skalarji) gladko odvisne od bazne točke $x \in U$.

Mnogoterost X se imenuje *bazni prostor* ali *baza* svežnja;

mnogoterost E je *totalni prostor* svežja;

za vsako točko $x \in X$ je $E_x = \pi^{-1}(x)$ *vlakno* svežnja nad x.

Sveženjski atlas na E**:** $\mathcal{E} = \{(U_\alpha, \theta_\alpha)\colon \alpha \in A\}$, $X = \bigcup\limits_{\alpha \in A} U_\alpha$, $(\theta_\alpha, U_\alpha)$ je sveženjska karta na E. Prehodne preslikave: $U_\alpha \cap U_\beta = U_{\alpha\beta} \neq \emptyset$.

$$\begin{tikzcd}
 & E|_{U_{\alpha\beta}} \arrow[dl, "\theta_\alpha"'] \arrow[dr, "\theta_\beta"] \arrow[d, phantom, "\circlearrowleft"] & \\
U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^m & & U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^m \arrow[ll, "\theta_{\alpha\beta}"]
\end{tikzcd}$$

$$\theta_{\alpha\beta} = \theta_\alpha \circ \theta_\beta^{-1}, \qquad \theta_{\alpha\beta}(x, v) = (x, g_{\alpha\beta}(x)\, v)$$

$$U_{\alpha\beta} \ni x \mapsto g_{\alpha\beta}(x) \in GL_m(\mathbb{R}) \text{ gladka } m \times n \text{ matrična funkcija}$$

Družina funkcij $g_{\alpha\beta} \colon U_{\alpha\beta} \to GL_m(\mathbb{R})$ je *1-kocikel*, kar pomeni, da zadošča pogojem:

1. $g_{\alpha\alpha} = I =$ identična matrika
2. $g_{\alpha\beta} \circ g_{\beta\alpha} = I$
3. $g_{\alpha\beta} \circ g_{\beta\gamma} \circ g_{\gamma\alpha} = I$

Dva sveženjska atlasa na E sta ekvivalentna, če je njuna unija spet sveženjski atlas. Struktura vektorskega svežnja na E je določena z ekvivalenčnim razredom atlasa.

Izrek 22. *Za vsak 1-kocikel $(g_{\alpha\beta})$ na odprtem pokritju $\mathcal{U} = \{U_\alpha \colon \alpha \in A\}$ gladke mnogoterosti X, ki je podan z gladkimi preslikavami $g_{\alpha\beta} \colon U_{\alpha\beta} \mapsto GL_m(\mathbb{R})$, obstaja gladek vektorski sveženj $E \xrightarrow{\pi} X$ s sveženjskim atlasom $\mathcal{E} = \{(U_\alpha, \theta_\alpha) \colon \alpha \in A\}$ in s prehodnimi preslikavami*

$$\theta_{\alpha\beta}(x, v) = \big(x, g_{\alpha\beta}(x)\, v\big), \quad x \in U_{\alpha\beta},\ v \in \mathbb{R}^m.$$

Dokaz. (Ideja)

$$E = \bigsqcup_{\alpha \in A} U_\alpha \times \mathbb{R}^m /_\sim$$

$$U_\beta \times \mathbb{R}^m \ni (x, v) \sim (x, g_{\alpha\beta}(x)\, v) \in U_\alpha \times \mathbb{R}^m$$

Naredimo natančno te identifikacije $\forall \alpha, \beta \in A$.

Preveri: kocikelni pogoj zagotavlja, da je $\sim$ res ekvivalenčna relacija in da je E Hausdorffov.

Sveženjske karte: $U_\alpha \times \mathbb{R}^m \underset{\theta_\alpha}{\overset{\cong}{\rightleftarrows}} E|_{U_\alpha}$.

Preveri, da velja $\theta_{\alpha\beta}(x, v) = (x, g_{\alpha\beta}(x)\, v)$. $\square$

III.2 Prerezi vektorskega svežnja

Naj bo $\pi\colon E \to X$ vektorski sveženj razreda $\mathcal{C}^r$.

Definicija 37. *Prerez* vektorskega svežnja $\pi\colon E \to X$ je preslikava $f\colon X \to E$, ki zadošča pogoju

$$\pi \circ f = \mathrm{Id}_X .$$

Ekvivalentno, za vsak $x \in X$ je $f(x) \in E_x = \pi^{-1}(x)$ točka v pripadajočem vlaknu nad x. Prerez je razred $\mathcal{C}^r$,če je $\mathcal{C}^r$ preslikava mnogoterosti X v mnogoterost E. (To ima smisel v primeru ko je sveženj $\pi\colon E \to X$ razreda $\mathcal{C}^r$.)
Prerez $0\colon X \to E$, ki vsaki točki $x \in X$ priredi ničelni element $0_x \in E_x$ vektorskega prostora E_x, se imenuje *ničelni prerez*.

S pomočjo ničelnega prereza lahko bazo X identificiramo s podmnožico $X_0 = \{0_x \colon x \in X\} \subset E$, ki je prav tako imenuje ničelni prerez.

Prostori prerezov in operacije:

Množico vseh zveznih prerezov $X \to E$ označimo z $\Gamma(X, E)$;

$\Gamma^r(X, E)$ označije množico vseh prerezov razreda $\mathcal{C}^r$.

Za poljubna prereza $f, g \in \Gamma(X, E)$ definiramo vsoto $f + g \in \Gamma(X, E)$ kot vsoto po točkah:

$$(f + g)(x) = f(x) + g(x) \in E_x \quad \text{(vsota na vlaknu } E_x\text{)}.$$

Za vsak prerez $f \in \Gamma(X, E)$ in vsako funkcijo $\chi\colon X \to \mathbb{R}$ definiramo prerez $\chi f \in \Gamma(X, E)$ s predpisom

$$(\chi f)(x) = \chi(x) f(x) \in E_x.$$

Torej je $\Gamma(X, E)$ vektorski prostor in modul nad kolobarjem $\mathcal{C}(X)$ zveznih funkcij na X.

Če je $E \to X$ razreda $\mathcal{C}^r$, je $\Gamma^r(X, E)$ modul nad kolobarjem $\mathcal{C}^r(X)$ funkcij razreda $\mathcal{C}^r$.

Prerezi trivialnega svežnja $E = X \times \mathbb{R}^n$ so oblike $f(x) = (x, g(x))$, kjer je $g\colon X \to \mathbb{R}^n$ preslikava baze X v vlakno $\mathbb{R}^n$. Na ta način prereze trivialnega svežnja pogosto kar identificiramo s preslikavami baze v vlakno:

$$\Gamma(X, X \times \mathbb{R}^n) \cong \mathcal{C}(X, \mathbb{R}^n); \quad \Gamma^r(X, X \times \mathbb{R}^n) \cong \mathcal{C}^r(X, \mathbb{R}^n).$$

Prerezi v lokalni kartah: Naj bo $\mathcal{E} = \{(U_\alpha, \theta_\alpha) \colon \alpha \in A\}$ sveženjski atlas na E, kjer je $\theta_\alpha \colon E|_{U_\alpha} \xrightarrow{\cong} U_\alpha \times \mathbb{R}^n$, s prehodnimi preslikavami

$$\theta_{\alpha\beta} = \theta_\alpha \circ \theta_\beta^{-1}, \qquad \theta_{\alpha\beta}(x, v) = \big(x, g_{\alpha\beta}(x)\, v\big).$$

V lokalnih karti $E|_{U_\alpha} \xrightarrow{\cong} U_\alpha \times \mathbb{R}^n$ je prerez f podan s funkcijo $f_\alpha \colon U_\alpha \to \mathbb{R}^n$. Kompatibilitetni pogoji nam povedo:

$$f_\alpha(x) = g_{\alpha\beta}(x) f_\beta(x) \quad \forall x \in U_{\alpha\beta}.$$

Velja tudi obratno: Vsaka kolekcija preslikav $f_\alpha \colon U_\alpha \to \mathbb{R}^n$ $(\alpha \in A)$, ki zadošča zgornjim pogojem, določa prerez $f \colon X \to E$.

Če je f v nekem atlasu določen s kolekcijo funkcij (f_α) in je prerez f' določen s kolekcijo (f'_α), je vsota $f + f'$ določena s kolekcijo $(f_\alpha + f'_\alpha)$ in je χf določen s kolekcijo (χf_α).

III.3 Morfizmi vektorskih svežnjev

Nad isto bazo X: Naj bosta $\pi \colon E \to X$, $\pi' \colon E' \to X$ $\mathcal{C}^r$ vektorska svežnja nad X.

Morfizem razreda $\mathcal{C}^r$ prvega svežnja E v drug sveženj E' je $\mathcal{C}^r$ preslikava $\Phi \colon E \to E'$, ki zadošča pogoju $\pi' \circ \Phi = \pi$, to je, naslednji diagram komutira:

$$\begin{tikzcd}
\mathbb{R}^m \arrow[r, hook] & E \arrow[rr, "\Phi"] \arrow[dr, "\pi"'] & \arrow[d, phantom, "\circlearrowright"] & E' \arrow[dl, "\pi'"] & \mathbb{R}^{m'} \arrow[l, hook'] \\
& & X & &
\end{tikzcd}$$

in je za vsak $x \in X$ preslikava $\Phi_x \colon E_x \to E'_x$ linearna na vlaknih.

Jedro in slika morfizma:

$$\begin{aligned}
\ker \Phi &= \{v \in E_x \colon x \in X,\ \Phi_x(v) = 0_x \in E'_x\} \subset E \\
\operatorname{im} \Phi &= \Phi(E) \subset E'.
\end{aligned}$$

Očitno so vlakna $\ker \Phi$ vektorski podprostori v vlaknih svežnja E, vlakna $\operatorname{im} \Phi$ pa so vektorski podprostori v vlaknih svežnja E'. Velja

$$\dim(\ker \Phi_x) + \dim(\operatorname{im} \Phi_x) = m = \operatorname{rang} E, \quad x \in X,$$

toda posamezni dimenziji sta lahko odvisni od točke x.

Vsak morfizem je v lokalnih sveženjskih kartah podan z množenjem z matrično funkcijo.

$$\begin{tikzcd} E|_U \arrow[r, "\Phi"] \arrow[d, "\theta"'] & E'|_U \arrow[d, "\theta'"] \\ U \times \mathbb{R}^m \arrow[r, "\tilde{\Phi}", "\theta' \circ \Phi \circ \theta^{-1}"'] & U \times \mathbb{R}^m \end{tikzcd}$$

$$\tilde{\Phi}(x, v) = (x, \phi(x)\, v), \quad U \ni x \mapsto \phi(x) \in \mathbb{R}^{m \times m} \; m \times m\text{-dimenzionalna matrika}$$

Vprašanje: kdaj je $\ker \Phi$ podsveženj v E? Kdaj je $\operatorname{im} \Phi$ podsveženj v E?

Odgovor: natanko tedaj, ko so vlakna konstantne dimenzije. (Glej vaje.)

Morfizmi vektorskih svežnjev v lokalnih sveženjskih kartah:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \{(U_\alpha, \theta_\alpha) \colon \alpha \in A\} && \text{sveženjski atlas na } E \\ \mathcal{E}' &= \{(U_\alpha, \theta'_\alpha) \colon \alpha \in A\} && \text{sveženjski atlas na } E' \end{aligned}$$

$$\begin{tikzcd} E|_{U_\alpha} \arrow[r, "\Phi"] \arrow[d, "\theta_\alpha"', "\cong"] & E'|_{U_\alpha} \arrow[d, "\theta'_\alpha"] \\ U_\alpha \times \mathbb{R}^n \arrow[r, dashed, "\tilde{\Phi}"'] & U_\alpha \times \mathbb{R}^{n'} \end{tikzcd}$$

$$\tilde{\Phi}(x, v) = (x, \phi_\alpha(x) v)$$

$$\phi_\alpha(x) = \text{ matrična } n \times n' \text{ funkcija za } x \in U_\alpha$$

Φ je določena s kolekcijo preslikav

$$\phi_\alpha \colon U_\alpha \to M^{n' \times n} \quad \forall \alpha \in A$$

Kdaj taka kolekcija $\{\phi_\alpha\}$ določa morfizem $\Phi \colon E \to E'$?
Naj bo U_β neka druga množica našega pokritja, $\phi_\beta \colon U_\beta \to M^{n' \times n}$. Zanima nas zveza med ϕ_α in ϕ_β na $U_{\alpha\beta}$. V E:

$$\begin{tikzcd} (x, v) \arrow[d, "\cong"', "\theta_{\alpha\beta} = \theta_\alpha \circ \theta_\beta^{-1}"] & \in U_\beta \times \mathbb{R}^n, & x \in U_{\alpha\beta} \\ (x, g_{\alpha\beta}(x) v) & \in U_\alpha \times \mathbb{R}^n & \end{tikzcd}$$

$$g_{\alpha\beta} \colon U_{\alpha\beta} \mapsto GL_n(\mathbb{R}) \qquad \text{(1-kocikel prehodnih preslikav)}$$

Preslikamo to točko s Φ. V karti U_β je to

$$U_\beta \times \mathbb{R}^n \ni (x, v) \mapsto (x, \phi_\beta(x) v) \in U_\beta \times \mathbb{R}^{n'}.$$

Ta vektor ustreza vektorju $(x, g'_{\alpha\beta}(x)\phi_\beta(x)v)$ v karti $U_\alpha \times \mathbb{R}^{n'}$ za E'. Zaradi identifikacij v svežnju je to isti vektor kot

$$(x,v) \xmapsto[U_\alpha \text{ na } E]{\text{prehod v karto}} (x, g_{\alpha\beta}(x)v) \xmapsto[\text{v karti } U_\alpha]{\Phi} (x, \phi_\alpha(x)g_{\alpha\beta}(x)v)$$

Torej kolekcija matričnih funkcij $\phi_\alpha\colon U_\alpha \to M^{n'\times n}$ določa morfizem $\Phi\colon E \to E'$ (glede na izbrani par atlasov na E, E') natanko tedaj, ko velja

$$g'_{\alpha\beta}(x)\phi_\beta(x) = \phi_\alpha(x)g_{\alpha\beta}(x), \quad \forall x \in U_{\alpha\beta},\ \forall \alpha, \beta \in A.$$

$$\begin{tikzcd}
U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^n \arrow[rr, "\phi_\alpha", "(x,v)\mapsto(x,\phi_\alpha(x)v)"'] & & U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^{n'} \\
E|_{U_{\alpha\beta}} \arrow[u, "\theta_\alpha"] \arrow[rr, "\Phi"] \arrow[d, "\theta_\beta"'] & & E'|_{U'_{\alpha\beta}} \arrow[u, "\theta_\alpha"'] \arrow[d, "\theta'_\beta"] \\
U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^n \arrow[rr, "\phi_\beta"] \arrow[uu, bend left=60, "\theta_{\alpha\beta}"] & & U_{\alpha\beta} \times \mathbb{R}^{n'} \arrow[uu, bend right=60, "\theta'_{\alpha\beta}"']
\end{tikzcd}$$

Morfizem Φ je izomorfizem natanko tedaj, ko je $n = n'$ in $\phi_\alpha\colon U_\alpha \mapsto GL_n(\mathbb{R})$ ter

$$g'_{\alpha\beta}\phi_\beta = \phi_\alpha g_{\alpha\beta} \Leftrightarrow g'_{\alpha\beta} = \phi_\alpha g_{\alpha\beta}\phi_\beta^{-1}.$$

Od tod vidimo, da 1-kocikla $(g_{\alpha\beta})$ in $(g'_{\alpha\beta})$ (na istem pokritju) določata "isti" svežnj do izomorfizma natančno natanko tedaj, ko obstaja 0-koveriga $\phi_\alpha\colon U_\alpha \mapsto GL_n(\mathbb{R})$, tako da velja $g'_{\alpha\beta} = \phi_\alpha g_{\alpha\beta}\phi_\beta^{-1}$. Včasih označimo $d' = g\Box\phi$ ("twisting cocycle g by the cochain ϕ").

Definiramo kohomološko grupo $H^1(\mathcal{U}, GL_n(\mathbb{R}))$ kot grupo ekvivalenčnih razredov 1-kociklov $g = (g_{\alpha\beta})$ na $\mathcal{U}$, z vrednostmi v $GL_n(\mathbb{R})$, po relaciji $g \sim g' \Leftrightarrow g' = g\Box\phi$ za neko 0-koverigo ϕ. $H^1(\mathcal{U}, GL_n(\mathbb{R}))$ je prostor izomorfnostnih razredov vektorskih svežnjev ranga n na X, ki so trivialni nad vsako množico $U_\alpha \in \mathcal{U}$. Imenuje se *prva Čechova kohomološka grupa na $\mathcal{U}$ s koeficienti v $GL_n(\mathbb{R})$*. Podobno je $H^1(\mathcal{U}, GL_n(\mathbb{C}))$ prostor izomorfnostnih razredov kompleksnih vektorskih svežnjev nad X.

Prva kohomološka grupa mnogoterosti X s koeficienti v $GL_n(\mathbb{C})$ je definirana kot direktna limita

$$H^1(X, GL_n(\mathbb{R})) = \varinjlim_{\mathcal{U}} H^1(\mathcal{U}, GL_n(\mathbb{R})),$$

kjer opazujemo prehode na finejša pokritja. Tega pojma ne bomo natančneje definirali (glej literatiro iz kohomološke algebre).

Brez dokaza navedemo naslednji izrek.

Izrek 23. *Če je mnogoterost X kontraktibilna, potem je vsak vektorski sveženj $E \to X$ trivialen, to je izomorfen produktnemu svežnju $X \times \mathbb{R}^n$.*

Primer 44. $X = \mathbb{S}^n = n$-sfera $= U^+ \cup U^-$, kjer sta $U^\pm$ odprti hemisferi, ki se prekrivata vzdolž ekvatorja. Vsaka od množic $U^\pm$ je difeomorfna odprti n-krogli, torej tudi $\mathbb{R}^n$.
$U^+ \cap U^- \cong \mathbb{S}^{n-1} \times (-\varepsilon, \varepsilon)$
$E \to X$ vektorski svežen ranga m, $E|_{U^+} \cong U^+ \times \mathbb{R}^m$, $E|_{U^-} \cong U^- \times \mathbb{R}^m$.
E določen s prehodno preslikavo g:

$$g\colon U^+ \cap U^- \cong \mathbb{S}^{n-1} \times (-\varepsilon, \varepsilon) \to GL_m(\mathbb{R})$$

Dejansko je določen že s homotopnim razredom te preslikave, torej s preslikavo $\mathbb{S}^{n-1} \to GL_m(\mathbb{R})$.
V posebnem primeru $n = 2, m = 2$: $\mathbb{S}^1 \to GL_2(\mathbb{R})$: homotopni razredi preslikav $\mathbb{S}^1 \to GL_2(\mathbb{R})$ sestavljajo prvo fundamentalno grupo $\pi_1(GL_2(\mathbb{R})) \cong \pi_1(O(2)) = \pi_1(\mathbb{S}^1) = \mathbb{Z}$.

Vprašanje: kateremu številu pripada tangentni svežen $T\mathbb{S}^2$ sfere?

Primer 45. Univerzalni svežen.
$G_{k,n}$ mnogoterost vseh k-dimenzionalnih realnih vektorskih podprostorov v $\mathbb{R}^n$
$G_{k,n}$ mnogoterost vseh k-dimenzionalnih kompleksnih vektorskih podprostorov v $\mathbb{C}^n$

$$U_{k,n} = \{(\lambda, v) \in G_{k,n} \times \mathbb{R}^n \colon v \in \lambda\} \subset G_{k,n} \times \mathbb{R}^n$$

Naloga: pokaži, da je $U_{k,n}$ realno analitičen vektorski podsvežen v $G_{k,n} \times \mathbb{R}^n$.
V kompleksnem: $U_{k,n}(\mathbb{C}) \to G_{k,n}(\mathbb{C})$ holomorfen vektorski podsvežen v $G_{k,n}(\mathbb{C}) \times \mathbb{C}^n$.
Poseben primer: $G_{1,n+1} = \mathbb{RP}^n$, $G_{1,n+1} = \mathbb{CP}^n$:

$$\begin{tikzcd} \mathbb{R} \arrow[r, hook] & U_{1,n+1} \arrow[d, "\pi"] \\ & \mathbb{RP}^n \end{tikzcd} \qquad \begin{tikzcd} \mathbb{C} \arrow[r, hook] & U_{1,n+1} \arrow[d, "\pi"] \\ & \mathbb{CP}^n \end{tikzcd}$$

$$\begin{aligned} U_{1,n+1}(\mathbb{C}) &= \{([z_0\colon \dots \colon z_n], (v_0, \dots, v_n)) \in \mathbb{CP}^n \times \mathbb{C}^{n+1} \colon z_i v_j = z_j v_i \ \forall i, j\} \\ &= \{[z_0\colon \dots \colon z_n], (z_0, \dots, z_n)) \colon (z_0, \dots, z_n) \in \mathbb{C}_*^{n+1}\} \cup (\text{ničelni prerez}) \end{aligned}$$

Naloga: poišči trivializacijo $U_{k,n}|_{U_j} \cong U_j \times \mathbb{C}$ nad množico

$$U_j = \{[z_0\colon \dots \colon z_n] \in \mathbb{CP}^n, z_j \neq 0\} \cong \mathbb{C}^n$$

in prehodne preslikave.

III.4 Podsvežnji in kvocientni svežnji, eksaktna zaporedja, dualni svežen

Naj bo $E \to X$ vektorski svežen ranga n nad X. Izberimo število $m \in \{0, 1, \dots, n\}$.

Definicija 38. Podmnožica $E' \subset E$ je *vektorski podsveženj ranga* m svežnja E, če je za vsako točko $x \in X$ množica E_x k-dimenzionalen vektorski podprostor v E_x in je E' *lokalno trivialen* v naslednjem smislu: Za vsako točko $p \in X$ obstaja okolica $p \in U \subset X$ in sveženjska karta $\theta\colon E|_U \to U \times \mathbb{R}^n$, tako da velja

$$\theta(E'|_U) = U \times (\mathbb{R}^m \times \{0\}^d), \quad n = m + d.$$

Vsaka taka sveženjska karta na E je *izbrana* glede na E'. Kolekcija vseh izbranih sveženjskih kart definira na E' strukturo vektorskega svežnja ranga m nad X.

Analogno definiramo pojem *kompleksnega vektorskega podsvežnja* v kompleksnem vektorskem svežnju.

Naj bo $E' \subset E$ vektorski podsveženj kot zgoraj.

Kvocientni sveženj $E/_{E'}$ je definiran takole:

$$E/_{E'} = \bigsqcup_{x \in X} E_x/_{E'_x}.$$

Če je θ izbrana sveženjska karta na $E|_U$ (glede na E'), potem θ inducira bijekcijo

$$(E/_{E'}|_U) \xrightarrow[\tilde{\theta}]{\cong} U \times \mathbb{R}^d = U \times \underbrace{\mathbb{R}^n/_{\mathbb{R}^m \times \{0\}^d}}_{\mathbb{R}^d}$$

Preslikavo $\tilde{\theta}$ vzamemo za sveženjsko karto na $E'' = E/_{E'}$.

Naloga: Preveri, da tako dobimo sveženjski atlas na E''.

Zaporedje morfizmov

$$0 \longrightarrow E' \xhookrightarrow[\iota]{\text{inkl.}} E \xrightarrow[\tau]{\text{kvoc.}} E'' \longrightarrow 0$$

se imenuje *kratko eksaktno zaporedje morfizmov vektorskih svežnjev.* To pomeni, da je ι injektivna, τ surjektivna in $\ker \tau = \operatorname{im} \iota$.

Zaporedje morfizmov vektorskih svežnjev

$$\cdots \longrightarrow E_{k-1} \xrightarrow{\Phi_{k-1}} E_k \xrightarrow{\Phi_k} E_{k+1} \longrightarrow \ldots$$

je *kompleks*,če so jedra $\ker \Phi_k \subset E_k$ in slike $\operatorname{im} \Phi_{k-1} \subset E_k$ podsvežnji ($\Leftrightarrow$ rang $\Phi_{k,x}$ neodvisen od bazne točke $x \in X$) inče velja

$$\Phi_k \circ \Phi_{k-1} = 0 \Longleftrightarrow \operatorname{im} \Phi_{k-1} = \ker \Phi_k, \quad \forall k.$$

Zaporedje se imenuje *eksaktno*, če velja

$$\ker \Phi_k = \operatorname{im} \Phi_{k-1}, \quad \forall k.$$

Praktično vse "naravne" funktorje na kategoriji *Vec* vektorskih prostorov in linearnih preslikav lahko posplošimo na svežnje. Naj bo Φ nek kovarianten funktor na kategoriji *Vec*:

$$\begin{tikzcd} V \arrow[r, rightsquigarrow] \arrow[d, "l"] & \Phi(V) \arrow[d, "\Phi(l)"] \\ V' \arrow[r, rightsquigarrow] & \Phi(V) \end{tikzcd}$$

Pri kontravariantnem funktorju imamo obrnjene puščice $\uparrow$.
Denimo, da je $E \to X$ vektorski sveženj nad X. Definiramo prirejen sveženj

$$\Phi(E) \to X, \quad \Phi(E) = \bigsqcup_{x \in X} \Phi(E_x).$$

Na primer, vsakemu vektorskemu prostoru V priredimo njegov dualni prostor $V^* = \operatorname{Hom}(V, \mathbb{R})$ (prostor linearnih funkcionalov na V). To je kontravarianten funktor:

$$\begin{tikzcd} V \arrow[r, rightsquigarrow] \arrow[d, "l"] & V^* \ni \lambda \circ l \\ V' \arrow[r, rightsquigarrow] & (V')^* \ni \lambda \arrow[u] \end{tikzcd}$$

Dualni sveženj: $E^* = \bigsqcup_{x \in X} E_x^*$.
Vsaki sveženjski karti $\theta \colon E|_U \to U \times \mathbb{R}^n$ na E priredimo sveženjsko karto v E^*:

$$\theta^* \colon U \times (\mathbb{R}^n)^* = U \times \mathbb{R}^n \longrightarrow E^*|_U$$

$\theta_x^* \colon \{x\} \times (\mathbb{R}^n)^* \xrightarrow{\cong} E_x^*$ je dual preslikave $\theta_x \colon E_x \to \{x\} \times \mathbb{R}^n$.
Inverz $(\theta^*)^{-1} \colon E^*|_U \to U \times \mathbb{R}^n$ je sveženjska karta na E^*.

III.5 Kotangentni sveženj in diferencialne 1-forme

Kotangentni sveženj T^*X gladke mnogoterosti je dualni sveženj tangentnega svežnja TX:

$$T^*X = (TX)^* = \bigsqcup_{x \in X} T_x^* X$$

Modelni primer: $X = \mathbb{R}^n$. Elementi $T_0^*\mathbb{R}^n$ so linearni funkcionali $\lambda\colon T_0\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$

$$T_0\mathbb{R}^n \ni v = \sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial}{\partial x_j} \xrightarrow{\lambda} \mathbb{R}$$

Vsaka gladka funkcija g v okolici točke 0 v $\mathbb{R}^n$ določa funkcional na $T_0\mathbb{R}^n$ s predpisom

$$v = \sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial}{\partial x_j} \longmapsto v(g) = \sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial g}{\partial x_j}(0) = dg_0 v.$$

Ta funkcional je torej diferencial dg_0 funkcije g v točki 0.
Če je $g(x) = x_k$, dobimo $\langle dx_k, v\rangle = v(x_k) = v_k$; torej

$$\langle dx_k, \frac{\partial}{\partial x_j}\rangle = \delta_{jk} = \begin{cases} 1, & j = k; \\ 0, & j \neq k. \end{cases}$$

Torej tvorijo diferenciali $\{dx_1, \ldots, dx_n\}$ koordinatnih funkcij bazo kotangentnega prostora $T_0^*\mathbb{R}^n$, ki je dualna standardni bazi $\{\frac{\partial}{\partial x_1}, \ldots, \frac{\partial}{\partial x_n}\}$ tangentnega prostora $T_0\mathbb{R}^n$.

Vsak element $\lambda \in T_0^*\mathbb{R}^n$ je oblike

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j dx_j = d\left(\sum_{j=1}^n \lambda_j x_j\right).$$

Diferencialne 1-forme. Prerezi kotangentnega svežnja se imenujejo diferencialne 1-forme. Na domeni $D \subset \mathbb{R}^n$ je vsaka 1-forma oblike

$$\alpha = \sum_{j=1}^n a_j(x) dx_j,$$

kjer so $a_j(x)$ funkcije na D.

Integral diferencialne 1-forme po poti $\gamma(t) = (x_1(t), \ldots, x_n(t))$ $(t \in [0,1])$ je

$$\int_\gamma \alpha = \int_0^1 \langle \alpha(\gamma(t)), \dot\gamma(t)\rangle dt = \int_0^1 \left(\sum_{j=1}^n a_j(\gamma(t))\dot x_j(t)\right) dt.$$

V klasični analizi je to krivuljni integral vektorskega polja $(a_1(x), \ldots, a_n(x))$.

Naj bo $f\colon U \subset \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$, $p \in U$. Zanima nas ekspliciten izraz za dualno preslikavo

$$(df_p)^*\colon T_{f(p)}^*\mathbb{R}^m \longrightarrow T_p^*\mathbb{R}^n$$

diferenciala $df_p \colon T_p\mathbb{R}^n \to T_{f(p)}\mathbb{R}^m$. Naj bo $\lambda \in T^*_{f(p)}\mathbb{R}^m$. Po definiciji dualne preslikave je

$$\langle f_p^*(\lambda), v\rangle = \langle \lambda, df_p\, v\rangle.$$

Uporabimo ta predpis na standardni bazi $\lambda = dy_k$, $v = \frac{\partial}{\partial x_i}$:

$$\left\langle f_p^*(dy_k), \frac{\partial}{\partial x_i}\right\rangle = \left\langle dy_k, df_p \frac{\partial}{\partial x_i}\right\rangle = \left\langle dy_k, \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_j}{\partial x_i}(p)\frac{\partial}{\partial y_j}\right\rangle = \frac{\partial f_k}{\partial x_i}(p).$$

Odtod sledi razvoj po bazi

$$f_p^*(dy_k) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_k}{\partial x_i}(p)dx_i = (df_k)_p = d(y_k \circ f)_p, \quad k = 1, \ldots, m.$$

Naj bo $\lambda = \sum \lambda_k dy_k = d(\sum \lambda_k y_k)$. (Vsak kovektor $\lambda \in T^*_{f(p)}\mathbb{R}^m$ je te oblike.)

$$f_p^*(\lambda) = \sum_{k=1}^m \lambda_k f_p^*(dy_k) = \sum_{k=1}^m \lambda_k d(y_k \circ f)_p = d\left(\sum_{k=1}^m \lambda_k y_k \circ f\right)_p$$

Za linearno funkcijo $g = \sum_{k=1}^m \lambda_k y_k$ smo torej dokazali pravilo

$$f_p^*(dg) = d(g \circ f)_p.$$

Ker lahko vsako funkcijo g v okolici točke $f(p)$ zapišemo kot vsoto

$$g(y) = c + \sum_{k=1}^m \lambda_k y_k + o(|y - f(p)|)$$

za primerno izbrano konstanto c in je tedaj

$$dg_{f(p)} = d(\sum_{k=1}^m \lambda_k y_k),$$

sledi isto pravilo za vsako funkcijo. Situacijo povzamemo v naslednjem diagramu:

$$\begin{tikzcd}
f^*(g) = g \circ f \in \mathcal{C}^\infty_p \arrow[dd, bend right] & & g \in \mathcal{C}^\infty_{f(p)} \arrow[ll, "f^*"'] \arrow[dd, bend left] \\
T_p\mathbb{R}^n \arrow[rr, "df_p", "\text{dual zgornje}"'] & & T_{f(p)}\mathbb{R}^m \\
d(g \circ f)_p \in T_p^*\mathbb{R}^n & & T_p^*\mathbb{R}^m \arrow[ll, "f_p^*"']
\end{tikzcd}$$

Povlek diferencialne forme.
Naj bo $f\colon \Omega \subset \mathbb{R}^n_x \to \mathbb{R}^m_y$ gladka preslikava in $\alpha = \sum_{j=1}^{m} a_j(y) dy_j$ diferencialna forma na neki domeni v $\mathbb{R}^m$, ki vsebuje $f(\Omega)$. Povlek $f^*\alpha$ je diferencialna 1-forma na Ω, ki je po točkah definirana s pomočjo zgoraj definirane preslikave $f^*_x\colon T^*_{f(x)}\mathbb{R}^m \to T^*_x\mathbb{R}^n$:

$$\begin{aligned}
(f^*\alpha)(x) := f^*_x(\alpha(f(x))) = f^*_x\left(\sum_{j=1}^{m} a_j(f(x)) dy_j\right) &= \sum_{j=1}^{m} a_j(f(x)) f^*_x(dy_j) \\
&= \sum_{j=1}^{m} a_j(f(x)) df_j(x) \\
&= \sum_{j=1}^{m} a_j(f(x)) \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f_j}{\partial x_k}(x) dx_k \\
&= \sum_{k=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{m} a_j(f(x)) \frac{\partial f_j}{\partial x_k}\right) dx_k
\end{aligned}$$

III.6 Direktna (Whitneyeva) vsota vektorskih svežnjev

Imejmo vektorska svežnja:

$$\begin{tikzcd} \mathbb{R}^n \arrow[r, hook] & E \arrow[d, "\pi"] \\ & X \end{tikzcd} \qquad \begin{tikzcd} \mathbb{R}^m \arrow[r, hook] & E' \arrow[d, "\pi'"] \\ & X \end{tikzcd}$$

Njuno direktno vsoto $E \oplus E'$ definiramo s predpisom

$$\begin{tikzcd} E \oplus E' = \bigsqcup_{x \in X} E_x \oplus E'_x \arrow[d] \\ X \end{tikzcd}$$

Torej je vsako vlakno $(E \oplus E')_x = E_x \oplus E'_x$ enako direktni vsoti vlaken E_x in E'_x.

Izberimo pokritje $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}_\alpha$ mnogoterosti X, na katerem je E podan z 1-kociklom $g_{\alpha\beta}\colon U_{\alpha\beta} \to GL_n(\mathbb{R})$ in je E' podan z 1-kociklom $g'_{\alpha\beta}\colon U_{\alpha\beta} \to GL_m(\mathbb{R})$. Potem je $E \oplus E'$ podan na $\mathcal{U}$ z 1-kociklom

$$\begin{bmatrix} g_{\alpha\beta} & 0 \\ 0 & g'_{\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

Primer 46. Trivialen sveženj: $X \times \mathbb{R}^n = (X \times \mathbb{R}) \oplus (X \times \mathbb{R}) \oplus \ldots \oplus (X \times \mathbb{R})$.

Notranja direktna vsota.
Naj bosta $E', E'' \subset E$ komplementarna vektorska podsvežnja svežnja $E \to X$:

$$\forall x \in X: \quad E'_x + E''_x = E_x \quad \text{in} \quad E'_x \cap E''_x = \{0\}$$

Potem obstaja izomorfizem vektorskih svežnjev

$$\begin{aligned} E' \oplus E'' &\xrightarrow{\cong} E \\ e'_x \oplus e''_x &\mapsto e'_x + e''_x \in E_x. \end{aligned}$$

Dobimo kratko eksaktno zaporedje:

$$\begin{tikzcd} X \times \{0\} = 0 \arrow[r] & E' \arrow[r, "\tau"] \arrow[dr] & E \arrow[r, "\rho"] \arrow[d] & E'' \arrow[r] \arrow[dl] \arrow[l, bend right, "\psi"'] & 0 \\ & & X & & \end{tikzcd}$$

Trditev 27. $E \cong E' \oplus E''$

Dokaz. Konstruirali bomo homomorfizem vektorskih svežnjev $\psi\colon E'' \to E$, ki zadošča

$$\rho \circ \psi = \mathrm{Id}_{E''} \Rightarrow \psi \text{ je injektiven.}$$

Uporabimo particijo enote. Naj bo $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$ pokritje X, tako da za vsak α obstaja karta $\phi_\alpha\colon E_{U_\alpha} \xrightarrow{\cong} U_\alpha \times \mathbb{R}^n$, da velja

$$\phi_\alpha(\tau(E')|_{U_\alpha}) = U_\alpha \times (\mathbb{R}^{n'} \times \{0\}^{n-n'}).$$

(Torej je ϕ_α izbrana sveženjska karta za podsveženj $\tau(E')$ svežnja E.) Naj bo $n' + n'' = n$. Definiramo

$$F_\alpha := \phi_\alpha^{-1}\left(U_\alpha \times (\{0\}^{n'} \times \mathbb{R}^{n''})\right) \subset E|_{U_\alpha}.$$

To je podsveženj svežnja $E|_{U_\alpha}$, za katerega velja

$$\tau(E')|_{U_\alpha} \oplus F_\alpha = E|_{U_\alpha}.$$

Zožitev $\rho\colon F_\alpha \xrightarrow{\cong} E''|_{U_\alpha}$ je očitno izomorfizem. Definiramo $\psi_\alpha := (\rho|_{F_\alpha})^{-1}$.
Sedaj izberemo particijo enote χ_α podrejeno pokritju $\{U_\alpha\}$:

$$\chi_\alpha\colon X \to [0,1], \quad \operatorname{supp}\chi_\alpha \subset U_\alpha, \quad \sum_\alpha \chi_\alpha = 1$$

Definiramo preslikavo $\psi\colon E'' \to E$ s predpisom

$$\psi = \sum_\alpha \chi_\alpha \psi_\alpha, \qquad \psi(e''_x) = \sum_\alpha \chi_\alpha(x)\psi_\alpha(e''_x) \quad (e''_x \in E''_x).$$

Ker je na vsakem vlaknu linearna kombinacija linearnih preslikav, je linearna. Poleg tega je

$$\rho(\psi(e''_x)) = \sum_\alpha \chi_\alpha(x)\rho(\psi_\alpha(e''_x)) = e''_x,$$

torej je $\rho \circ \psi = \mathrm{Id}|_{E''}$.

Drugi dokaz: s pomočjo particije enote konstruiramo na E polje skalarnih produktov na vlaknih E_x:

$$E_x \times E_x \xrightarrow{g_x} \mathbb{R}, \quad (v,w) \mapsto g_x(v,w)$$

V lokalni karti $E|_{U_\alpha} \cong U_\alpha \times \mathbb{R}^n$ vzamemo standardni evklidski skalarni produkt. Polje skalarnih produktov na vsem svežnju definiramo s predpisom

$$g = \sum_\alpha \chi_\alpha g_\alpha$$

kjer je $\{\chi_\alpha\}_{\alpha\in A}$ particija enote kot zgoraj.

Naj bo $F \subset E$ ortogonalni komplement podsvežnja $\tau(E') \subset E$. Potem je zožitev $\rho_F \colon F \to E''$ bijektivna, torej njen inverz $\psi = (\rho_F)^{-1} \colon E'' \to E$ zadošča $\rho \circ \tau = \mathrm{id}|_{E''}$.

Sedaj imamo v E dva vektorska podsvežnja $\tau(E') \cong E'$ in $\psi(E'') \cong E''$. Ker je $\ker\rho = \tau(E')$ in je $\rho \colon \psi(E'') \to E''$ izomorfizem, sledi, da sta ta dva podsvežnja komplementarna. Torej je

$$E \cong \tau(E') \oplus \rho(E'') \cong E' \oplus E''.$$

□

III.7 Normalni sveženj podmnogoterosti in izrek o cevastih okolicah

Naj bo $M \subset X$ gladka podmnogoterost mnogoetrosi X. Njen tangentni sveženj TM je podsveženj zožitve $TX|_M$ tangentnega svežnja X na podmnogoterost M. Kvocientni sveženj $TX|_M/_{TM} = N_{M/X}$ imenujemo *normalni sveženj* M v X. Imamo torej kratko eksaktno zaporedje homomorfizmov svežnjev

$$0 \to TM \hookrightarrow TX|_M \to TX|_M/TM = N_{M/X} \to 0.$$

Po prejšnji trditvi obstaja vložitev $N_{M/X} \overset{\phi}{\hookrightarrow} TX|_M$ in je

$$TM \oplus N_{M/X} \cong TX|_M.$$

Če izberemo na tangentnem svežnju TX polje skalarnih produktov g (Riemannovo metriko), lahko predstavimo normalni sveženj $N_{M/X}$ kot ortogonalni komplement tangentnega svežnja TM v tangentnem svežnju $TX|_M$ ambientne mnogoterosti, zoženem na M:

$$TX|_M = TM \oplus_{\perp g} N_{M/X}$$

Izrek 24. (O obstoju cevaste okolice) *Če je M gladka podmnogoterost v gladki mnogoterosti X, potem ima M neko odprto okolico $\Omega \subset X$, ki je difeomorfna neki odprti okolici $U \subset N_{M/X}$ ničelnega prereza v normalnem svežnju M v X.*

Izrek je zelo pomemben v uporabah, saj nam omogoča redukcijo problemov v neki okolici M v X na ustrezne probleme v normalnem svežnju $N = N_{M/X}$, kjer pa imamo linearno strukturo in se problemi pogosto poenostavijo.

V nadaljevanju označimo $N = N_{M/X}$. Okolico U v izreku lahko izberemo tako, da so njena vlakna U_x ($x \in M$) konveksne množice v vlaknih N_x, npr. krogle polmera $r(x) > 0$ v neki metriki na N. S pomočjo nelinearne dilacije v vlaknih (npr. z uporabo funkcije tangens) lahko totalni prostor N preslikamo difeomorfno na U.

Če ima U konveksna vlakna, je družina preslikav

$$\tau_t \colon U \to U \ (t \in [0,1]), \quad \tau_t(x,e) = (x, te) \ \forall e \in U_x$$

homotopija množice U na ničelni prerez. Velja

$$\tau_1 = \mathrm{id}_U, \quad \tau_0 = (x,0) = 0_x, \quad \tau_t(x,0) = (x,0),$$

torej homotopija miruje na ničelnem prerezu. Taki homotopiji pravimo *deformacijska retrakcija* U na ničelni prerez.

Posledica 9. *Če je $M \subset X$ vložena podmnogoterost, potem ima M bazo okolic $\Omega \subset X$, tako da je M deformacijska retrakcija vsake od teh okolic.*

Dokaz (izreka 24)**.** Prvi primer: $X = \mathbb{R}^n$, $\dim M = m$, $d = n - m = \operatorname{rang} N$, kjer je $N = N_{M/\mathbb{R}^n}$. $M \times \mathbb{R}^n = T\mathbb{R}^n|_M = TM \oplus N$, $N \subset M \times \mathbb{R}^n$. Za vsako točko $x \in M$ označimo z $0_x \in N_x$ ničelni element vektorskega prostora N_x (to je vlakno normalnega svežnja nad točko x). Preslikava $M \ni x \to 0_x \in N$ je difeomorfizem mnogoterosti M na ničelni prerez $M_0 = \{0_x \colon x \in M\} \subset N$ normalnega svežnja. (Običajno mnogoterost M kar identificiramo z ničelnim prerezom M_0 v normalnem svežnju N.) Vlakno N_x je vektorski podprostor v $T_x\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$, torej lahko vsak element $e_x \in N_x$ razumemo kot vektor v $\mathbb{R}^n$. Definiramo preslikavo

$$\Phi \colon N \to \mathbb{R}^n, \qquad \Phi(e_x) = x + e_x \quad \forall e_x \in N_x.$$

Očitno je $\Phi(0_x) = x$ za vsak $0_x \in M_0$; torej je $\Phi \colon M_0 \to M$ difeomorfizem, ki je inverz od $x \to 0_x$. (Pri identifikaciji $M \cong M_0$ je $\Phi|_M = \mathrm{Id}_M$.)

Diferencial preslikave Φ v točki $0_x \in N_x$ je linearna preslikava

$$(d\Phi)_{0_x} \colon T_{0_x}N \to T_x\mathbb{R}^n.$$

Tangentni prostor $T_{0_x}N$ je direktna vsota tangentnega prostora $T_{0_x}M_0$ ničelnega prereza M_0 (t.i. "horizontalna komponenta") in tangentnega prostora $T_{0_x}N_x$ na vlakno N_x (t.i. "vertikalna komponenta"). Ker je N_x vektorski prostor, lahko tangentni prostor $T_{0_x}N_x$ identificiramo z N_x. Torej imamo

$$T_{0_x}N = T_{0_x}M_0 \oplus T_{0_x}N_x \cong T_xM \oplus N_x.$$

Ker je $\Phi|_M = \mathrm{Id}_M$, je

$$d\Phi_{0_x} \colon T_xM \xrightarrow{\mathrm{id}} T_xM \subset T_x\mathbb{R}^n.$$

Oglejmo si še vertikalno komponento. Iz predpisa $\Phi(e_x) = x + e_x$ sledi, da je za fiksen x preslikava $N_x \ni e_x \mapsto \Phi(e_x)$ linearni izomorfizem N_x na afin podprostor $x + N_x \subset \mathbb{R}^n$, ki ga identificiramo z vektorskim podprostorom $N_x \subset T_x\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$. Diferencial linearne preslikave je kar enak tej preslikavi, torej je

$$d\Phi_{0_x} \colon N_x \to N_x \subset T_x\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$$

linearni izomorfizem.

Povzetek: diferencial $d\Phi_{0_x} \colon T_{0_x}N \xrightarrow{\cong} T_x\mathbb{R}^n$ preslika horizontalno komponento $T_{0_x}M_0$ izomorfno na tangentni prostor $T_xM \subset \mathbb{T}_x\mathbb{R}^n$ in preslika vertikalno komponento $T_{0_x}N_x \cong N_x$ izomorfno na normalni prostor $N_x \subset T_x\mathbb{R}^n$. Ker sta slednja dva prostora komplementarna, sledi, da je $d\Phi_{0_x}$ linearni izomorfizem.

Iz izreka o inverzni preslikavi sledi, da je Φ lokalni difeomorfizem v neki okolici $\Omega_0 \subset N$ ničelnega prereza M_0.

Sedaj je potrebno najti manjšo odprto okolico Ω, $M_0 \subset \Omega \subset \Omega_0$, tako da je $\Phi \colon \Omega \to\subset \mathbb{R}^n$ injektivna in zato difeomorfizem na svojo sliko $\Phi(\Omega) = \Omega_0 \subset \mathbb{R}^n$. Obstoj take okolice sledi iz naslednje leme, ki jo uporabimo za primer $X = \mathbb{R}^n$, $X_0 = M$, $Y = N$, $Y_0 = M_0$.

Lema 6. *Naj bo $\Phi \colon Y \to X$ gladka preslikava in $Y_0 \subset Y$ ter $X_0 \subset X$ podmnogoterosti, tako da veljata naslednji lastnosti:*

1. *$\Phi \colon Y_0 \to X_0$ je difeomorfizem, in*
2. *za vsako točko $y \in Y_0$ je diferencial $d\Phi_y \colon T_yY \to T_{\Phi(y)}X$ linearni izomorfizem.*

Tedaj obstaja odprta okolica $\Omega \subset Y$ podmnogoterosti Y_0, tako da je $\Phi \colon \Omega \to \Phi(\Omega) \subset X$ difeomorfizem.

Dokaz. Dokaz za primer, ko je Y_0 kompaktna:
Recimo, da Φ ni injektivna v nobeni okolici podmnogoterosti Y_0. Tedaj obstaja zaporedji $a_j, b_j \in Y$, ki konvergirata proti Y_0, tako da za vsak indeks j velja $a_j \neq b_j$ in $\Phi(a_j) = \Phi(b_j)$. S prehodom na podzaporedje dobimo konvergentni zaporedji $a_j \to a_0 \in Y_0$, $b_j \to b_0 \in Y_0$. Odtod sledi po zveznosti

$$\Phi(a_0) = \lim \Phi(a_j) = \lim \Phi(b_j) = \Phi(b_0).$$

Ker je Φ injektivna na Y_0, sledi $a_0 = b_0$. To je protislovje, saj je Φ difeomorfizem na neki okolici $U \subset Y$ točke a_0, za vse dovolj velike j pa velja $a_j, b_j \in U$, $a_j \neq b_j$ in $\Phi(a_j) = \Phi(b_j)$.

Dokaz za splošen primer, ko Y_0 ni kompaktna, je podoben, le da je tehnično nekoliko zahtevnejši. □

S tem je izrek 24 dokazan v primeru $X = \mathbb{R}^n$.

V splošnem primeru, ko na X nimamo linearne strukture, ne moremo definirati preslikave Φ kot zgoraj. V tem primeru izrek dokažemo na enega od dveh možnih načinov:

1. z vložitvijo $X \hookrightarrow \mathbb{R}^n$ reduciramo na prejšnji primer;
2. metoda sprejev, ki deluje splošno na vseh mnogoterostih.

Dokaz s pomočjo prve metode prepustimo bralcu.

Oglejmo si sedaj dokaz z drugo metodo, kjer bomo uporabili tokove vektorskih polj. Izberemo gladka vektorska polja $V_1, \ldots, V_m$ na X, ki generirajo tangentni prostor T_xX v poljubni točki $x \in X$. Naj bo ϕ_t^j tok polja V_j. Preslikava

$$F(x, t_1, \ldots, t_m) = \phi_{t_1}^1 \circ \cdots \circ \phi_{t_m}^m(x), \qquad x \in X,\ t_j \in \mathbb{R} \tag{III.7.1}$$

je definirana in gladka na neki odprti okolici U množice $X \times \{0\}^m$ v trivialnem svežnju $X \times \mathbb{R}^m$ ter zadošča naslednjim lastnostim:

$$F(x, 0) = x, \quad \left.\frac{\partial}{\partial t_j}\right|_{t_0} F(x, t) = V_j(x), \qquad x \in X,\ j = 1, \ldots, m.$$

Ker vektorji $V_1(x), \ldots, V_m(x)$ napenjajo tangentni prostor T_xX v vsaki točki, je F submerzija vzdolž $X \times \{0\}^m$. Torej je za vsak $x \in X$ preslikava

$$\Theta_x = \left.\frac{\partial}{\partial t_j}\right|_{t_0} F(x, t) \colon \mathbb{R}^m \to T_xX \tag{III.7.2}$$

linearna in surjektivna. Preslikava $\Theta \colon X \times \mathbb{R}^m \to TX$, ki je na vlaknu $\{x\} \times \mathbb{R}^m$ enaka Θ_x, je torej epimorfizem vektorskih svežnjev.

Naj bo $E' \subset M \times \mathbb{R}^m$ podmnožica z vlakni

$$E'_x = \Theta_x^{-1}(T_x M), \quad x \in M.$$

Preprosto je videti, da je E' gladek vektorski podsveženj trivialnega svežnja $M \times \mathbb{R}^m$.

Naj bo $E \subset M \times \mathbb{R}^m$ nek komplementarni podsveženj, tako da je $M \times \mathbb{R}^m = E \oplus E'$. Homomorfizem $\Theta\colon M \times \mathbb{R}^m \to TX|_M$ tedaj inducira izomorfizem $\Theta\colon E \xrightarrow{\cong} \nu$ svežnja E na normalni sveženj $\nu = N_{M/X}$.

Oglejmo si sedaj preslikavo $\Phi := F|_{E \cap U}\colon E \cap U \to X$. Označimo z $0_x \in E_x$ ničelni element vlakna E_x. Očitno velja $\Phi(0_x) = F(x)$ za vsak $x \in M$, torej Φ preslika ničelni prerez $E_0 \subset E$ difeomorfno na podmnogoterost $M \subset X$. Trdimo, da je za vsako točko $x \in M$ diferencial

$$d\Phi_{0_x}\colon T_{0_x}E \to T_x X$$

linearni izomorfizem. Najprej opazimo, da je

$$T_{0_x}E = T_{0_x}E_0 \oplus E_x$$

direktna vsota horizontalnega podprostora $T_{0_x}E_0$ (tangentni prostor na ničelni prerez E_0) in vertikalnega podprostora (tangentni prostor na vlakno E_x; ker je E_x vektorski prostor, lahko $T_{0_x}E_x$ identificiramo z E_x). Ker je $\Phi\colon E_0 \to M$ difeomorfizem, je

$$d\Phi_{0_x}\colon T_{0_x}E_x \to T_x M$$

izomorfizem. V normalnih smereh E_x pa po konstrukciji velja $d\Phi_{0_x} = \Theta_x$, torej dobimo izomorfizem $E_x \to \nu_x$. S tem je trditev dokazana.

Zaključek dokaza sledi tako kor prej iz leme 6. $\square$

Poglavje IV

LIEJEVE GRUPE IN LIEJEVE ALGEBRE

IV.1 Definicija Liejeve grupe in primeri

Definicija 39. *Realna Liejeva grupa* G je gladka mnogoterost, ki je hkrati grupa, tako da so algebraične operacije (produkt $G \times G \to G$, $(g_1, g_2) \mapsto g_1 g_2$ in inverz $G \to G$, $g \mapsto g^{-1}$) gladke preslikave.

Kompleksna Liejeva grupa je kompleksna mnogoterost G, ki je hkrati grupa, tako da so grupne operacije holomorfne.

Primer 47.

1. $(\mathbb{R}^n, +)$ je Liejeva grupa
   $(\mathbb{C}^n, +)$ je kompleksna Liejeva grupa

2. $GL_n(\mathbb{R}) = \{A \in \mathbb{R}^{n\times n} \colon \det A \neq 0\}^{odprta} \subset \mathbb{R}^{n\times n}$ je realna Liejeva grupa.
   $(A, B) \mapsto A \cdot B$ operacije so polinomske
   $A \mapsto A^{-1} = \frac{1}{\det A}\tilde{A}$ racionalna
   $GL_n(\mathbb{C}) = \{A \in \mathbb{C}^{n\times n} \colon \det A \neq 0\}^{odprta} \subset \mathbb{C}^{n\times n}$ je kompleksna Liejeva grupa.

Definicija 40. Naj bo G Liejeva grupa. Liejeva podgrupa $H \subset G$ je podgrupa, ki je hkrati podmnogoterost.

Primer 48.

1. $SL_n(\mathbb{R}) = \{A \in GL_n(\mathbb{R}) \colon \det A = 1\}$
   Očitno je podgrupa, zaprta. Preveri, da je število $1 \in \mathbb{R}$ regularna vrednost preslikave $A \in GL_n(\mathbb{R}) \mapsto \det A \in \mathbb{R}$ (to je, rang je enak 1 v vsaki točki, kjer $\det A = 1$). Torej je $SL_n(\mathbb{R})$ hiperploskev v $GL_n(\mathbb{R})$ (glej vaje).
   $SL_n(\mathbb{C}) = \{A \in GL_n(\mathbb{C}) \colon \det A = 1\}$ je kompleksna Liejeva podgrupa grupe $GL_n(\mathbb{C})$.

2. $O(n) = \{A \in GL_n(\mathbb{R})\colon A^T A = I\}$ (ortogonalna grupa) je realno analitična Liejeva podgrupa v $GL_n(\mathbb{R})$.
   $U(n) = \{A \in GL_n(\mathbb{C})\colon \overline{A}^T A = I\}$ (unitarna grupa) je realna Liejeva podgrupa v $GL_n(\mathbb{C})$, ni pa kompleksna Liejeva podgrupa, saj ni kompleksna podmnogoterost.

3. Če je $\Gamma = \mathbb{Z}e_1 + \mathbb{Z}e_2 + \ldots + \mathbb{Z}e_k$ diskretna aditivna pogrupa v $\mathbb{R}^n$, je kvocient $\mathbb{R}^n/_\Gamma$ je Liejeva grupa z operacijo $+$, podedovano iz $\mathbb{R}^n$. Če je Γ maksimalnega ranga n, je $\mathbb{R}^n/_\Gamma$ torus.

4. Podobno kot v prejšnji točki je za vsako diskretno aditivno podgrupo $\Gamma \subset \mathbb{C}^n$ kvocient $\mathbb{C}^n/_\Gamma$ kompleksna Liejeva grupa.

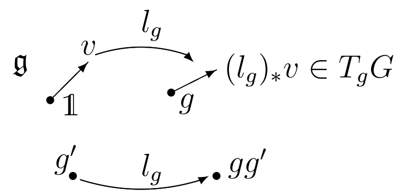
Naj bo $\mathbb{1} \in G$ enota Liejeve grupe G. Vsakemu elementu $g \in G$ priredimo levo moženje

$$l_g\colon G \to G, \quad l_g(g') = gg' \ \ (\forall g' \in G)$$

in desno množenje

$$r_g\colon G \to G, \quad r_g(g') = g'g \ \ (\forall g' \in G).$$

Obe preslikavi l_g, r_g sta difeomorfizma z inverzom $(l_g)^{-1} = l_{g^{-1}}$, $(r_g)^{-1} = r_{g^{-1}}$.



IV.2 Liejeva algebra in invariantna vektorska polja

Definicija 41. Naj bo G Liejeva grupa z enoto $\mathbb{1}$. Njena *Liejeva algebra* je

$$\mathfrak{g} \stackrel{def}{=} T_{\mathbb{1}}G = \text{ tangentni prostor na } G \text{ v enoti } \mathbb{1} \in G.$$

Vsakemu elementu $v \in \mathfrak{g}$ priredimo vektorsko polje $V = \tilde{v}$ na G s predpisom:

$$V_g = d(l_g)|_{\mathbb{1}} \cdot v = (l_g)_* v \in T_g G, \quad g \in G.$$

Očitno je V gladko vektorsko polje na G, saj so grupne operacije gladke.

Trditev 28. *Tako definirano vektorsko polje V na G je levo invariantno.*

Dokaz. Naj bo $g, h \in G$. Potem velja

$$(l_h)_* V_g = (l_h)_* \circ (l_g)_* v = (l_h \circ l_g)_* v = (l_{hg})_* v = V_{hg} = V_{l_h(g)}.$$

To pomeni, da je V levo invariantno. $\square$

Podobno definiramo polje $v \rightsquigarrow \widetilde{V}_g = d(r_g)\, v \in T_gG$. Preveri, da je tako definirano vektorsko polje desno invariantno, to je, $(r_h)_* \widetilde{V} = \tilde{V},\ \forall h \in G$.

Opomba. V splošnem $V \neq \widetilde{V}$, razen če je G abelova grupa.

Primer 49.

1. $G = (\mathbb{R}^n, +)$ (enota je $\mathbb{1} = 0$)
   Liejeva algebra $\mathfrak{g} = T_0\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$
   $v = (v_1, \ldots, v_n) \in \mathbb{R}^n$
   $\tilde{v} = V = \sum\limits_{j=1}^{n} v_j \frac{\partial}{\partial x_j}$ (vektor $v = V_0$ translatiramo po $\mathbb{R}^n$)

2. $\mathbb{R}^* = \mathbb{R} \setminus \{0\}$, $\mathbb{1} = 1$
   $v \in T_1\mathbb{R} \cong \mathbb{R}$, l_x je množenje z x
   $V_x = vx\frac{\partial}{\partial x}$
   Bazno levo invariantno vektorsko polje: $x\frac{\partial}{\partial x}$

Oglejmo si vložitev

$$T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g} \overset{\Phi}{\mapsto} \aleph(G)$$

v Liejevo algebro vseh gladkih vektorskih polj na G. Spomnimo se, da je $\aleph(G)$ Liejeva algebra za operacijo komutator (ali Liejev odvod) vektorskih polj:

$$(V, W) \mapsto [V, W] = L_V W$$

Trditev 29. *Če sta V, W levo invariantni vektorski polji na G, potem so tudi polja $V + W$, cV $(c \in \mathbb{R})$, $[V, W]$ levo invariantna.*

To pomeni, da je slika vložitve $\Phi\colon \mathfrak{g} \hookrightarrow \aleph(G)$ Liejeva podalgebra Liejeve algebre vseh vektorskih polj. *Torej obstaja natanko ena struktura Liejeve algebre na $\mathfrak{g} = T_{\mathbb{1}}G$, za katero je vložitev $\Phi\colon \mathfrak{g} \hookrightarrow \aleph(G)$ Liejev izomorfizem $\mathfrak{g}$ na podalgebro levo invariantnih polj na G.*

Dokaz. Naj bo l poljubno levo množenje na G. Potem je

$$l_*(V + W) = l_*V + l_*W = V + W$$

ker sta V in W levo invariantni. Podobno

$$l_*(cV) = cl_*V = cV, \quad l_*([V, W]) = [l_*V, l_*W] = [V, W].$$

$\square$

Trditev 30. *Tangentni sveženj vsake Liejeve grupe G je trivialen: $TG \cong G \times \mathbb{R}^n$, $n = \dim G$.*

Dokaz. Izberimo bazo $v_1, \ldots, v_n$ Liejeve algebre $T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g}$. Naj bodo $V_1, \ldots, V_n$ pripadajoča levo invariantno polja. Ker je $V_j(g(= d(l_g)v_j$ in je levo množenje l_g difeomorfizem grupe G, so vektorji $V_1(g), \ldots, V_n(g)$ baza T_gG za vsak $g \in G$. Preslikava

$$G \times \mathbb{R}^n \ni (g, (c_1, \ldots, c_n)) \overset{\Phi}{\mapsto} \sum_{j=1}^{n} c_j V_j(g) \in T_gG$$

je izomorfizem vektorskih svežnjev. $\square$

Trditev 31. *Vsako levo invariantno (ali desno invariantno) vektorsko polje na Liejevi grupi je kompletno, to je, njegov tok ϕ_t obstaja za $\forall t \in \mathbb{R}$.*

Dokaz. Naj bo $\gamma(t)$ tokovnica polja V, $\gamma(0) = \mathbb{1}$, $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$.
Izberimo element $g \in G$. Oglejmo si pot $\lambda(t) = l_g(\gamma(t)) = g\gamma(t)$, $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$.
$\lambda(0) = g\gamma(0) = g$
$\dot{\lambda}(t)|_{t=0} = (dl_g)_{\mathbb{1}} \cdot \dot{\gamma}(0) = (dl_g)_{\mathbb{1}} \cdot v = V_g$ po definiciji levo invariantnega polja
$\dot{\lambda}(t) = (l_g)_* \cdot \dot{\gamma}(t) = (l_g)_* V_{\gamma(t)} = V_{g\gamma(t)} = V_{\lambda(t)}$.
Torej je $\lambda(t)$, $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$, tokovnica polja V, ki je v času $t = 0$ v točki g.
To pomeni, da fundamentalna domena toka polja V vsebuje množico $G \times (-\varepsilon, \varepsilon) \subset G \times \mathbb{R}$.
Od tod sledi, da je V kompletno (fundamentalna domena je $G \times \mathbb{R}$). $\square$

Trditev 32. *Tokovnica levo invariantnega vektorskega polja V skozi enoto $\mathbb{1} \in G$ je enoparametrična podgrupa grupe G.*

Dokaz. Fiksirajmo $s \in \mathbb{R}$. Oglejmo si poti

$$\mathbb{R} \ni t \mapsto \gamma(t+s)$$
$$\mathbb{R} \ni t \mapsto \gamma(s)\gamma(t)$$

Obe poti sta tokovnici polja V, ki gresta pri $t = 0$ skozi isto točko $\gamma(s)$. Zaradi enoličnosti tokovnic sledi, da sovpadata, torej je $\gamma(t+s) = \gamma(s)\gamma(t) = \gamma(t)\gamma(s)$ za vsak $s, t \in \mathbb{R}$. $\square$

Primer 50. 1. $G = (\mathbb{R}^n, +)$
$\mathfrak{g} = T_0\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$
$[\cdot, \cdot] = 0$ ker je G abelova
Levo invariantna polja so konstantna polja
$v, w \in \mathfrak{g}$, $[v, w] = [V, W]_0$ (ker imata V,W konstantne koeficiente), $V_0 = v$, $W_0 = w$.

2. $GL_n(\mathbb{R})$, $\mathfrak{gl}_n = T_I GL_n(\mathbb{R}) = T_I\mathbb{R}^{n\times n} \cong \mathbb{R}^{n\times n}$ (vse $n \times n$ matrike), $I = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix}$
$A \in \mathfrak{gl}_n$, $A = (a_{ij})$
V^A pripadajoče levo invariantno vektorsko polje na $GL_n(\mathbb{R})$
$X \in GL_n(\mathbb{R})$

$\gamma(t) = I + tA \in GL_n(\mathbb{R})$ za majhne $|t|$, $\gamma(0) = I$, $\dot{\gamma}(0) = A$ tangentni vektor poti γ.

$$\begin{aligned}
(V^A)_X &= \frac{d}{dt}\Big|_{t=0} l_X \cdot \gamma(t) \\
&= \frac{d}{dt}\Big|_{t=0} X(I + tA) \\
&= \frac{d}{dt}\Big|_{t=0} (X + tXA) \\
&= XA \in T_X GL_n(R) \cong \mathbb{R}^{n\times n}.
\end{aligned}$$

Označimo koordinate na $\mathbb{R}^{n\times n}$ z $X = x_{ij}$:

$$(V^A)_X = \sum_{i,j=1}^{n} \left(\sum_{k=1}^{n} x_{ik} a_{kj} \right) \frac{\partial}{\partial x_{ij}}$$

Vsota $\sum\limits_{k=1}^{n} x_{ik} a_{kj}$ je (i,j) element matrike XA, ki predstavlja vektorsko polje V^A v točki X. Če je $B \in \mathfrak{gl}_n$, je

$$(V^B)_X = \sum_{l,m=1}^{n} \underbrace{\left(\sum_{p=1}^{n} x_{lp} b_{pm} \right)}_{(l,m) \text{ el. v } XB} \frac{\partial}{\partial x_{lm}}.$$

Odtod sledi

$$\begin{aligned}
\left[V^A, V^B\right] &= \sum_{i,j,k,l,m,p} \left(x_{ik} a_{kj} \frac{\partial (x_{lp} b_{pm})}{\partial x_{ij}} \frac{\partial}{\partial x_{lm}} - x_{lp} b_{pm} \frac{\partial (x_{ik} a_{kj})}{\partial x_{lm}} \frac{\partial}{\partial x_{ij}} \right) = \\
&= \sum_{i,j,k,m} x_{ik} a_{kj} b_{jm} \frac{\partial}{\partial x_{im}} - \sum_{i,j,k,p} x_{ip} b_{pk} a_{kj} \frac{\partial}{\partial x_{ij}}
\end{aligned}$$

Sedaj pogledamo vrednosti pri $X = I$: $x_{ip} = \delta_{ip}$, $x_{ik} = \delta_{ik}$. Torej je

$$\left[V^A, V^B\right]_I = \underbrace{\sum_{i,j,m} a_{ij} b_{jm}}_{(AB)_{im}} \frac{\partial}{\partial x_{im}} - \underbrace{\sum_{i,j,k} b_{ik} a_{kj}}_{(BA)_{ij}} \frac{\partial}{\partial x_{ij}} \rightsquigarrow AB - BA.$$

Torej je $[V^A, V^B]$ levo invariantno vektorsko polje na $GL_n(\mathbb{R})$, ki pripada matriki $[A,B] = AB - BA \in \mathfrak{gl}_n$.
$\mathfrak{gl}_n = (\mathbb{R}^{n\times n}, [\cdot,\cdot])$ matrični komutator
Tok polja $V_X^A = XA$:

Tokovnica $\gamma(t)$ zadošča enačbi $\dot\gamma(t) = V^A_{\gamma(t)} = \gamma(t)A$

$$\Longrightarrow \gamma(t) = e^{tA} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} A^n, \qquad \gamma(0) = I$$

$\phi_t(X) = Xe^{tA}$ je tok skozi točko $X \in GL_n(\mathbb{R})$.

IV.3 Eksponentna preslikava na Liejevi grupi

$$\exp\colon \mathfrak{g} = T_{\mathbb{1}}G \to G$$

Modelni primer: $G = GL_n(\mathbb{R})$, $\mathfrak{g} = \mathfrak{gl}_n \cong \mathbb{R}^{n\times n}$ ($n \times n$ matrike);

$$\exp(A) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} A^k$$

Eksponentno prelikavo na poljubni Liejevi grupi definiramo na naslednji način. Vektorju $v \in \mathfrak{g}$ priredimo levo invariantno polje V s predpisom

$$V(g) = (dl_g)_{\mathbb{1}} v \in T_gG.$$

Ker je polje V kompletno, obstaja tokovnica $\phi_t(\mathbb{1}) = e^{tv}\cdot\mathbb{1}$ za vsak $t \in \mathbb{R}$. Sedaj definiramo

$$\exp v = \phi_1(\mathbb{1}).$$

V primeru, ko je $G = GL_n(\mathbb{R})$, $v = A \in \mathfrak{g}l_n$, $\phi^A_t(I) = e^{tA}$, dobimo

$$\exp(A) = \phi^A_1(I) = e^A = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} A^k.$$

Preslikava $\exp\colon \mathfrak{g} \to G$ je gladka, $\exp(0) = \mathbb{1}$.

Trditev 33. *Diferencial eksponentne preslikave* $\exp\colon \mathfrak{g} \to G$ *v identiteti* $\mathbb{1} \in G$ *je identična preslikava na Liejevi algebri* $\mathfrak{g}$*:*

$$d\exp|_0\colon T_0\mathfrak{g} \cong \mathfrak{g} \longrightarrow T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g}, \quad d\exp|_0 = \mathrm{Id}_{\mathfrak{g}}.$$

Dokaz. Naj bo $v \in \mathfrak{g}$ in V prirejeno levo invariantno polje na G. Označimo z $\lambda_v(t) = \phi^v_t(\mathbb{1})$ tok polja V. Po definiciji je torej $\exp(v) = \lambda_v(1)$ za vsak $v \in \mathfrak{g}$.
Naj bo $s \in \mathbb{R}$. Ker je sV levo invariatno polje, prirejeno vektorju $sv = sV|_{\mathbb{1}} \in \mathfrak{g}$, je preslikava $t \mapsto \lambda_{sv}(t)$ tokovnica polja sV, ki gre pri $t = 0$ skozi $\mathbb{1} \in G$. Trdimo:

$$\lambda_{sv}(t) = \lambda_v(st).$$

Dokaz:

$$\frac{d}{dt}\lambda_v(st) = \underbrace{\frac{d}{du}\lambda_v(u)}_{V(\lambda_v(st))}\underbrace{\frac{du}{dt}}_{s} = s \cdot V(\lambda_v(st)).$$

To pomeni, da je tudi $t \mapsto \lambda_v(st)$ tokovnica polja sV, ki gre pri $t = 0$ skozi $\mathbb{1} \in G$. Iz enoličnosti tokovnic sledi $\lambda_{sv}(1) = \lambda_v(s)$. Torej velja

$$\exp(sv) = \lambda_v(s), \ \forall s \in \mathbb{R}.$$

Z odvajanjem po s pri $s = 0$ dobimo

$$\left.\frac{d}{ds}\right|_{s=0} \exp(sv) = \left.\frac{d}{ds}\right|_{s=0} \lambda_v(s) = v.$$

Ker je $s \mapsto sv \in \mathfrak{g}$ pot s tangentnim vektorjem v, je po geometrijski definiciji diferenciala leva stran zgornje enačbe enaka $d\exp|_0 \cdot v$. Torej zgornja enačba pove

$$d\exp|_0 \cdot v = v, \quad \forall v \in \mathfrak{g}.$$

□

Izrek o inverzni preslikavi pove, da exp preslika neko okolico $0 \in \mathfrak{g}$ difeomorfno na neko okolico $\mathbb{1} \in G$. V splošnem ta preslikava ni surjektivna in lahko ima kritična točke daleč od izhodišča 0.

Sprej na Liejevi grupi. S translacijo eksponentne preslikave z grupnim produktom dobimo na G preslikavo, ki se imenuje *sprej*. Konstrukcija je naslednja.
Naj bo $\dim G = n$. Produkt $G \times \mathfrak{g} \cong G \times \mathbb{R}^n$ je trivialen vektorski sveženj nad G. Definiramo preslikavo $s\colon G \times \mathfrak{g} \to G$ s predpisom

$$s(g,v) = ge^v = l_g(e^v), \quad s(g,0) = g.$$

Njen diferencial v točki $(g,0)$ iz ničelnega prereza je linearna preslikava

$$ds_{(g,0)}\colon T_{(g,0)}(G \times \mathfrak{g}) \to T_gG.$$

Tangentni prostor $T_{(g,0)}(G\times\mathfrak{g})$ je direktna vsota $T_gG \oplus T_0\mathfrak{g}$, kjer je drugi sumand tangenta na vlakno (t.i. vertikalni tangentni prostor v točki $(g,0)$). Zožitev diferenciala na drugo komponento $\mathfrak{g}$ je enak diferencialu preslikave $\mathfrak{g} \ni v \mapsto l_g(e^v)$ pri $v = 0$. Po verižnem pravilu je ta enak

$$d(l_g)_{\mathbb{1}} \circ d_0 e^v = d(l_g)_{\mathbb{1}}\colon \mathfrak{g} \xrightarrow{\cong} T_gG,$$

torej je izomorfizem.

$$\begin{tikzcd} G \times \mathbb{R}^n \arrow[d, "\pi"'] \arrow[d, bend left, "s \text{ (sprej)}"] \\ G \end{tikzcd}$$

IV.4 Liejeve podgrupe in podalgebre

Naj bosta G in G' Liejevi grupi in $\mathfrak{g}$, $\mathfrak{g}'$ njuni Liejevi algebri.

Definicija 42. Gladka preslikava $F\colon G \to G'$, ki je hkrati homomorfizem grup, se imenuje *homomorfizem Liejevih grup.*

Naslednjo trditev smo dokazali na vajah.

Trditev 34. *Naj bo $F\colon G \to G'$ homomorfizem Liejevih grup.*

1. *Za vsako levo invariantno vektorsko polje V na G obstaja natanko eno levo invariantno polje $\widetilde{V}$ na G', tako da velja $dF_g V_g = \widetilde{V}_{F(g)}$ za vsak $g \in G$.*
2. *Diferencial $dF_{\mathbb{1}}\colon \mathfrak{g} \to \mathfrak{g}'$ v identiteti $\mathbb{1} = \mathbb{1}_G \in G$ je homomorfizem Liejevih algeber.*
3. *Jedro $\ker dF_{\mathbb{1}}$ je Liejeva podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.*
4. *Slika $dF_{\mathbb{1}}(\mathfrak{g})$ je Liejeva podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}'$.*
5. *Rang preslikave F je konstanten (neodvisen od točke $g \in G$).*
6. *Jedro $H = \ker F = \{g \in G\colon F(g) = \mathbb{1}_{G'}\}$ je Liejeva podgrupa grupe G.*

Posledica 10. *Če je H Liejeva podgrupa Liejeve grupe G, je njena Liejeva algebra $\mathfrak{h} = T_{\mathbb{1}}H$ Liejeva podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g} = T_{\mathbb{1}}G$.*

Dokaz. Uporabimo prejšnjo trditev za inkluzijo $F\colon H \hookrightarrow G$. □

Sedaj bomo dokazali naslednji izrek.

Izrek 25. *Naj bo G Liejeva grupa z Liejevo algebro $\mathfrak{g} = T_{\mathbb{1}}G$. Za vsako Liejevo podalgebro $\mathfrak{h} \subset \mathfrak{g}$ obstaja natanko ena povezana Liejeva podgrupa $H \subset G$ z Liejevo algebro $\mathfrak{h} = T_{\mathbb{1}}H$.*

Dokaz. Izberemo bazo $v_1, \ldots, v_d \in \mathfrak{h} = \mathbb{R}^d$.
Naj bodo $V_1, \ldots, V_d$ prirejena levo invariantna polja. Ta napenjajo podvseženj $E \subset TG$ ranga d. Njegovo vlakno E_g je enako

$$E_g = \mathrm{Lin}\{V_1(g), \ldots, V_d(g)\}$$

$\dim E_g = d$ neodvisna od izbire $g \in G$.
Trdimo, da je E involutiven. V ta namen moramo dokazati, da je komutator $[V_j, V_k]$ tangenten na E za vsak $j, k = 1, \ldots, d$. To polje je levo invariantno, ki pripada komutatorju $[v_j, v_k] \in \mathfrak{g}$. Ker je $\mathfrak{h}$ Liejeva podalgebra, je $[v_j, v_k] \in \mathfrak{h}$, torej je

$$[v_j, v_k] = \sum_{i=1}^{d} c_{ijk} v_i, \quad c_{ijk} \in \mathbb{R}.$$

Ker vemo, da se operacije na vektorjih iz $\mathfrak{g}$ ujemajo z operacijami na prirejenih levo invariantnih vektorskih poljih, odtod sledi

$$[V_j, V_k] = \sum_{i=1}^{d} c_{ijk} V_i.$$

Polje na desno pa je seveda tangentno na E.
Po Frobeniusovemu izreku obstaja natanko ena maksimalna integralna podmnogoterost $H \subset G$ skozi točko $\mathbb{1}$. H je imerzirana podmnogoterost v G, ki je dobljena kot orbita tokov polj vektorskih polj $V_1, \ldots, V_d$ skozi $\mathbb{1}$.
Ni težko dokazati, da je H tudi podgrupa grupe G (glej vaje). $\square$

H ni nujno enostavno povezana. Lokalno jo dobimo z eksponenciranjem vektorjev iz $\mathfrak{h}$.

Brez dokaza bomo navedli naslednji izrek.

Izrek 26 (Ado)**.** *Vsaka končno dimenzionalna Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je izomorfna neki Liejevi podalgebri $\mathfrak{gl}_n$ za nek $n \in \mathbb{N}$.*

Posledica 11. *Za vsako Liejevo algebro $\mathfrak{g}$ obstaja povezana Liejeva grupa G, ki ima $\mathfrak{g}$ za svojo Liejevo algebro: $T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g}$.*

Če je $\widehat{G} \xrightarrow{\pi} G$ univerzalni krov ($\widehat{G}$ enostavno povezana Liejeva grupa), potem je π lokalni difeomorfizem:

$$T_{\mathbb{1}}\widehat{G} = T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g}$$

Opomba. V splošnem univerzalni krov neke matrične Liejeve grupe (podgrupa v $GL_n(\mathbb{R})$) ni matrična grupa.

Primer 51. $SO(2n)$, $n \geq 2$: npr. $SO(4)$ ima fundamentalno grupo $\pi_1(SO(4)) = \mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}$.

$$0 \to \mathbb{Z}_2 \hookrightarrow Spin(4) \xrightarrow[\text{krov}]{\text{dvolistni univerzalni}} SO(4) \to 1$$

Primer 52.

$$1 \to \mathbb{S}^3 = SU(2) \hookrightarrow U(2) \xrightarrow{det} \mathbb{S}^1 = U(1) \to 1$$

$$\pi_1(U(2)) = \pi_1(\mathbb{S}^1) = \mathbb{Z}$$

IV.5 Adjungirana reprezentacija Liejeve grupe

Vsako Liejevo grupo G lahko vložimo v $\operatorname{Diff} G$:

$$\begin{array}{rcl} G & \hookrightarrow & \operatorname{Diff} G \\ g & \mapsto & l_g \end{array}$$

Levo množenje l_g ni avtomorfizem Liejeve grupe, ker identiteto slika v g.
Avtomorfizem G je difeomorfizem $G \to G$, ki je tudi grupni homomorfizem.

$$\operatorname{Aut} G = \text{ vsi avtomorfizmi } G$$

Primer 53. Vsakemu elementu $g \in G$ priredimo *notranji avtomorfizem* $\sigma(g) \in \operatorname{Aut} G$ s predpisom

$$\sigma(g)h = ghg^{-1} \quad \forall h \in G \ \ (\text{konjugiranje z } g).$$

Preverimo, da je to res avtomorfizem:

$$\sigma(g)(h_1h_2) = gh_1h_2g^{-1} = gh_1g^{-1}gh_2g^{-1} = \sigma(g)h_1 \cdot \sigma(g)h_2$$

□

Naj bo G povezana Liejeva grupa in $\alpha \in \operatorname{Aut} G$. Njegov diferencial α_* preslika vsako levo invariantno polje na G v levo invariantno polje; torej α_* inducira Liejev izomorfizem Liejeve algebre levo invariantnih vektorskih polj na G samo nase. Njegova vrednost v identiteti $\mathbb{1} \in G$ je torej Liejev izomorfizem

$$d\alpha_{\mathbb{1}} : T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g} \xrightarrow{\cong} \mathfrak{g}.$$

Naj bo $v \in \mathfrak{g}$ in V prirejeno levo invariantno polje: $V_{\mathbb{1}} = v$. Označimo $w = d\alpha_{\mathbb{1}}(v) \in \mathfrak{g}$ in W levo invariantno polje z $W_{\mathbb{1}} = w$. Potem je $\alpha_* V = W$.
Označimo s ϕ_t tok polja V in s ψ_t tok polja W. Iz $\alpha_* V = W$ sledi

$$\alpha \circ \phi_t = \psi_t \circ \alpha \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

Uporabimo to identiteto pri $t = 1$ in na začetnem elementu $\mathbb{1} \in \mathfrak{g}$:

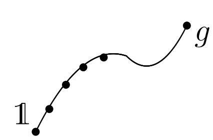
$$\alpha \circ \phi_1(\mathbb{1}) = \psi_1 \circ \alpha(\mathbb{1}) = \psi_1(\mathbb{1}).$$

Po definiciji eksponentne preslikave je $e^v = \phi_1(\mathbb{1})$ in $e^w = \psi_1(\mathbb{1})$. Zgornja enačba torej pove:

$$\alpha(e^v) = e^w = e^{d\alpha_{\mathbb{1}} \cdot v}.$$

Posledica 12. *Če je G povezana Liejeva grupa in je $\alpha \in \operatorname{Aut} G$ avtomorfizem z $d\alpha_{\mathbb{1}} = \mathrm{Id}$, potem je $\alpha = \mathrm{Id}_G$.*

Dokaz. Če je $d\alpha_{\mathbb{1}} = \mathrm{Id}$, sledi $\alpha(e^v) = e^v$, $\forall v \in \mathfrak{g}$. Vemo, da je množica $U = \{e^v \in G : v \in \mathfrak{g}\}$ okolica $\mathbb{1} \in G$. Ker je na tej okolici $\alpha = \mathrm{Id}$ in je G povezana, sledi $\alpha = \mathrm{Id}_G$. Razlog je v tem, da lahko vsak element $g \in G$ zapišemo kot končen produkt $g = g_1 g_2 \dots g_N$ elementov $g_j \in U$.



$$\begin{aligned} g &= g_1 \cdot g_2 \cdot \ldots \cdot g_N, \qquad \forall g_j = e^{v_j} \\ \alpha(g) &= \alpha(e^{v_1})\alpha(e^{v_2})\ldots\alpha(e^{v_N}) = g \end{aligned}$$

□

Dobili smo torej reprezentacijo grupe avtomorfizmov $\operatorname{Aut} G$ kot grupo linearnih avtomorfizmov Liejeve algebre $\mathfrak{g}$:

$$\operatorname{Aut} G \ni \alpha \mapsto d\alpha_{\mathbb{1}} \in \operatorname{Aut} \mathfrak{g} = \text{ grupa vseh Liejevih avtomorfizemov } \mathfrak{g}.$$

Ta reprezentacija je zvesta (faithful), kar je ravno prejšnja posledica.

Oglejmo si sedaj prirejeno reprezentacijo podgrupe vseh konjugiranj σ_g:

$$\begin{tikzcd} G \arrow[r, "\sigma"] & \operatorname{Aut} G \arrow[r, "\text{dif. v } \mathbb{1}"] & \operatorname{Aut} \mathfrak{g} \\ g \arrow[r, mapsto] \arrow[rr, bend right, "Ad"'] & \sigma(g) \arrow[r, mapsto] & d\sigma(g)_{\mathbb{1}} \end{tikzcd}$$

$$\begin{array}{llll} Ad\colon & G & \to & \operatorname{Aut} \mathfrak{g} \quad \text{je adjungirana reprezentacija } G \\ & g & \mapsto & d\sigma(g)_{\mathbb{1}} \end{array}$$

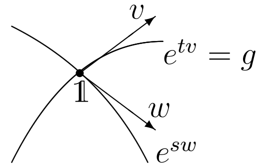
Z diferenciranjem preslikave $Ad\colon G \to \operatorname{Aut} \mathfrak{g}$ v identiteti $\mathbb{1} \in G$ dobimo adjungirano reprezentacijo Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ v $\operatorname{End} \mathfrak{g}$:

$$dAd_{\mathbb{1}} : T_{\mathbb{1}}G = \mathfrak{g} \xrightarrow{ad} T_{\mathbb{1}} \operatorname{Aut} \mathfrak{g} = \operatorname{End} \mathfrak{g}.$$

Trditev 35. *Za vsak $v \in \mathfrak{g}$ velja*

$$ad(v)w = [w, v] \quad \forall w \in \mathfrak{g}.$$

Dokaz. Izberemo lokalne koordinate $x = (x_1, \ldots, x_n)$ na G v okolici $\mathbb{1}$, $x(\mathbb{1}) = (0, \ldots, 0) \in \mathbb{R}^n$.
$\mathfrak{g} \ni v \rightsquigarrow V = \sum_{i=1}^n \xi_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}$ levo invariantno vektorsko polje na G
$\mathfrak{g} \ni w \rightsquigarrow W = \sum_{j=1}^n \eta_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}$
Fiksirajmo $t \in \mathbb{R}$.



$$\sigma(g)e^{sw} = ge^{sw}g^{-1} = e^{tv}e^{sw}e^{-tv}$$

Za fiksen t je

$$Ad(e^t v)w = d\sigma(e^{tv})\Big|_{\mathbb{1}} \cdot w = \frac{d}{ds}\Big|_{s=0} \sigma(e^{tv})e^{sw}.$$

Z odvajanjem po t pri $t = 0$ dobimo:

$$ad(v)w = \frac{d}{dt}\Big|_{t=0} (Ad(e^{tv})w) = \frac{\partial^2}{\partial s \partial t}\Big|_{t=s=0} e^{tv}e^{sw}e^{-tv}$$

Z Liejevim razvojem toka ni težko videti, da je ta izraz enak $[w, v]$. $\square$

Poglavje V

NESINGULARNE PRESLIKAVE IN TRANSVERZALNOST

V.1 Sardov izrek

Definicija 43. Naj bo $f\colon M^m \to N^n$ $\mathcal{C}^r$-preslikava, $r \geq 1$. Točka $q \in N$ je *regularna vrednost* preslikave f, če za vse točke $p \in f^{-1}(q)$ velja

$$\operatorname{rang}_p f = \operatorname{rang}(df_p\colon T_pM \to T_qN) = n = \dim N.$$

Vsaka točka $q \in N \setminus f(M)$ je regularna vrednost f (pogoj je na prazno izpolnjen). Točka $q \in N$, ki ni regularna vrednost f, se imenuje *kritična vrednost*.

Opomba.
1. Če je $m < n$, potem je $q \in N$ regularna točka f natanko tedaj, ko $q \notin f(M)$.
2. Če je $m \geq n$, potem je $q \in N$ regularna točka f natanko tedaj, ko bodisi $q \notin f(M)$ bodisi $q \in f(M)$ in je f submerzija v vsaki točki $p \in f^{-1}(q)$.

Definicija 44. Točka $p \in M$ je kritična točka f, če $\operatorname{rang}_p f < n = \dim N$.

Torej je $q \in N$ kritična vrednost f natanko tedaj, ko obstaja točka $p \in f^{-1}(q)$, ki je kritična točka f.

Zanima nas, kako velika (majhna) je množica kritičnih vrednosti.

Izrek 27 (Sard, 1942)**.** *Naj bo $f\colon M^m \to N^n$ $\mathcal{C}^r$-preslikava, pri čemer je $r \geq \max\{0, m-n\}+1 \geq 1$. Potem ima množica njenih kritičnih vrednosti mero 0 v N in je prve kategorije (to je unija največ števno mnogo zaprtih nikjer gostih podmnožic).*

Izrek z drugimi besedami: Skoraj vsaka točka $q \in N$ je regularna vrednost f.

Poseben primer: $m < n$, $f\colon M^m \to N^n \Rightarrow$ množica $f(M)$ ima mero 0 v N (H. Whitney, 1936).

Posledica 13. *Za skoraj vsak $q \in N$ je $f^{-1}(q)$ prazna ali pa podmnogoterost v M.*

Izrek 28 (Baire)**.** *V polnem metričnem prostoru je množice prve kategorije brez notranjosti.*

Ekvivalentno: števni presek odprtih povsod gostih množic je povsod gost (množica 2. kategorije).
"Generična točka" pomeni točko iz neke množice 2. kategorije v Baireovem prostoru (ki je lahko odvisna od konkretne situacije).

Sardov izrek lahko torej povemo z besedami: *Generična točka $q \in N$ je regularna vrednost gladke preslikave $f\colon M \to N$.*

Glavni posebni primer: $N = \mathbb{R}$. V tem primeru je to Morsejeva lema*:*

Lema 7 (Morse, 1939)**.** *Če je $f\colon M^m \to \mathbb{R}$ funkcija razreda $\mathcal{C}^m$, potem je množica $f(\operatorname{Crit} f) \subset \mathbb{R}$ prve kategorije in ima mero 0.*

Dokaz. Dovolj je lemo dokazati za primer, ko je M zaprta krogla (ali zaprt kvader) v $\mathbb{R}^m$. Mnogoterost M lahko pokrijemo s končno ali števno podmnožicami, ki so difeomorfne zaprti krogli (ali zaprtemu kvadru) v $\mathbb{R}^m$. Dokazovane lastnosti (mera 0, 1. kategorija) dopuščajo števne unije.

Naj bo torej $M = \overline{B} \subset \mathbb{R}^m$ in $f(x_1, \ldots, x_m)$ funkcija razreda $\mathcal{C}^m$ na M.

Indukcija na m.

$m = 1$: $\overline{B}$ zaprt interval v $\mathbb{R}$.
$\operatorname{Crit} f = \{x \in \overline{B}\colon f'(x) = 0\}$ je zaprta, kompaktna. Naj bo $\varepsilon > 0$. Ker je f' zvezna in zato enakomerno zvezna, $\exists \delta > 0$, da za $x, x' \in \overline{B}$, $|x - x'| < \delta$ velja $|f'(x) - f'(x')| < \epsilon$.
Če vzamemo $x \in \operatorname{Crit} f$, je $f'(x) = 0$ in zato $|f'(x)| < \varepsilon$.
Pokrijemo $\operatorname{Crit} f$ s končno mnogo intervali $I_1, \ldots, I_n$, dolžine $|I_j| < \delta$, $I_j \cap \operatorname{Crit} f \neq \emptyset$. Zanima nas ocena za dolžino $|f(I_j)|$ (dolžina slike). $\forall x \in I_j$ velja po Lagrangeu $|f(x') - f(x)| = |f'(\xi)| \cdot |x' - x|$ kjer je $\xi \in I_j$ neka vmesna točka. $\xi - x < \delta$ ker je $|I_j| < \delta$ in $x \in \operatorname{Crit} f \Rightarrow |f'(\xi)| < \varepsilon$. Torej dobimo $|f(x') - f(x)| < \epsilon\delta$ $\forall x' \in I_j \Rightarrow |f(I_j)| \leq \epsilon\delta$.
Število potrebnih intervalov I_j je $\sim N = \frac{|\overline{B}|}{\delta} \Rightarrow f(\operatorname{Crit} f) \subset \bigcup_{j=1}^{N} f(I_j)$, $|f(\operatorname{Crit} f)| \leq$

$\sum\limits_{j=1}^{n}|f(I_j)| \leq N\cdot\varepsilon\cdot\delta \lessapprox \frac{|B|}{\delta}\cdot\varepsilon\cdot\delta = |B|\cdot\varepsilon$. To velja za $\forall\varepsilon>0 \Rightarrow |f(\mathrm{Crit}\, f)|=0$.
Opomba: popolnoma analogen dokaz v primeru: $f\colon \overline{B}\subset\mathbb{R}^m\to\mathbb{R}^n$, $f\in\mathcal{C}^1$.

Induktivni korak: $m-1\Rightarrow m$.
Recimo, da izrek velja za funkcije na mnogoterostih dim $\leq m-1$.
Naj bo $I=(i_1,\dots,i_m)\in\mathbb{Z}_+^m$ multiindeks, $|I|=i_1+\ldots+i_m$, $\frac{\partial^{|I|}f}{\partial X^I}=\frac{\partial^{|I|}f}{\partial x_1^{i_1}\ldots\partial x_m^{i_m}}$, $|I|\leq m$.
Stratificiramo $\overline{B}$:

$$\overline{B}\supset\Sigma^1 \overset{def}{=} \mathrm{Crit}\, f\supset\Sigma^2\supset\ldots\supset\Sigma^m$$

$$\Sigma^k \overset{def}{=} \{x\in\overline{B}\colon \frac{\partial^{|I|}f}{\partial x^I}(x)=0\ \forall 1\leq|I|\leq k\}\quad \text{(vsi parcialni odvodi } f \text{ reda 1 do } k \text{ s 0)}$$

Trdimo, da za vsak $k=1,2,\dots,m-1$ velja:

$$\mathrm{Crit}\, f=\Sigma^1\supset S_k \overset{def}{=} \Sigma^k\setminus\Sigma^{k-1}\subset\bigcup_{|I|=k}H_I$$

pri čemer je

$$H_I \overset{def}{=} \{x\in\overline{B}\colon \frac{\partial^{|I|}f}{\partial x^I}(x)=0,\ d(\partial^I f)(x)\neq 0\}\quad \text{(vsaj en parcialen odvod od } \partial^I f \text{ ni nič)}$$

Sledi

$$S_k\subset\bigcup_{|I|=k}\mathrm{Crit}(f|_{H_I})$$

Dokaz: $x\in S_k\Leftrightarrow \partial^I f(x)=0\ \forall|I|\leq k$ in $\exists|J|=k+1$, $\partial^J f(x)\neq 0$.
$J=(j_1,\dots,j_m)$, recimo da je $j_k>0$.
$I=(j_1,\dots,j_k-1,\dots,j_m)$
$\Rightarrow x\in H_I$, $\frac{\partial}{\partial x_k}(\partial^I f)(x)=\partial^J f(x)\neq 0$.
Iz definicije H_I sledi, da je H_I gladka (razreda $m-|I|=m-k$) hiperploskev, ki je regularna podmnogoterost (saj je definirana z eno funkcijo $\partial^I f$, ki ima neničeln diferencial vzdolž H_I).
Torej izrek že velja za $f|_{H_I}\colon H_I\to\mathbb{R}\Rightarrow|f(\mathrm{Crit}\, f|_{H_I})|=0\Rightarrow|f(\mathrm{Crit}\, f\cap S_k)|=0\ \forall k=1,\dots,m-1$.
Pokazati samo še $|f(\Sigma^m)|=0$.

$$\mathrm{Crit}\, f=\Sigma^1=(\underbrace{\Sigma^1\setminus\Sigma^2}_{S_1})\cup(\underbrace{\Sigma^2\setminus\Sigma^3}_{S_2})\cup\ldots\cup\Sigma^m=S_1\cup\ldots\cup S_{m-1}\cup\Sigma^m$$

$|f(S_k)|=0$, $k=1,\dots,m-1$. Na $\sum^m$ so vsi parcialni odvodi f do reda m enaki 0.
$x\in\sum^m$: $f(x')=f(x)+o(|x-x'|^m)$.
Kot prej (za $m=1$): $\forall\varepsilon>0\ \exists\delta>0$ da je $\forall x\in\sum^m$, $\forall x'$ za katerega velja $|x'-x|<\delta$, velja $|f(x)-f(x')|<\varepsilon\delta^m$. f preslika kroglo $K(x,\delta)$ v interval dolžine $\leq\varepsilon\cdot\delta^m$. Z $N\lessapprox\frac{konst.}{\delta^m}$

kroglami polmera δ pokrijemo množico $\sum^m \Rightarrow |f(\sum^m)| \leq N \cdot \varepsilon \cdot \delta^m \lessapprox \frac{1}{\delta^m} \cdot \varepsilon \cdot \delta^m = \varepsilon \Rightarrow$ $|f(\sum^m)| = 0$.

Dokaz za $N = \mathbb{R}^n$.
1. možnost: podobno kot zgoraj. Začnemo z $n = m$ in indukcija na m, ki narašča. Za $m < n$:

$$M \times \mathbb{R}^{m-n} \supset M \times 0 = M^m \xrightarrow{f} \mathbb{R}^n, \qquad |f(M^m)| = 0$$

2. možnost: indukcija na n.
$n = 2$: $(f_1, f_2)\colon M \to \mathbb{R}^2$. Za $f_1\colon M \to \mathbb{R}$ izrek že velja, skoraj vsak $c_1 \in \mathbb{R}$ je regularna vrednost funkcije f_1. $f_{2\{f_1=c_1\}}$ ima skoraj vsak $c_2 \in \mathbb{R}$ za regularno vrednost. Za tako izbrana c_1, c_2 je $(c_1, c_2) \in \mathbb{R}^2$ regularna vrednost $f = (f_1, f_2)$. Ta argument pokaže, da je množica regularnih vrednosti (c_1, c_2) povsod gosta v $\mathbb{R}^2$. Če je M kompaktna, je ta množica tudi odprta ($\mathrm{Crit}\, f$ je zaprta, zato kompaktna $\Rightarrow f(\mathrm{Crit}\, f)$ kompaktna). Ker je $\forall M$ števna unija kompaktnih domen v M, je $f(\mathrm{Crit}\, f)$ števna unija zaprtih, nikjer gostih množic (1. kategorije).

Splošen primer: $M = \bigcup_j B_j$, $N = \bigcup_j D_j$, $\overline{B}_j$ kompakt, $\overline{D}_j$ kompakt, $f(\overline{B}_j) \subset D_j$. Lahko vzamemo, da je $\overline{B}_j$ kompaktna množica v $\mathbb{R}^m$ in $\overline{D}_j \approx$ kompaktna množica v $\mathbb{R}^n$.

$$f(\mathrm{Crit}\, f) = \bigcup_j f(\mathrm{Crit}\, f|_{\overline{B}_j})$$

za to pa že vemo, da so 1. kategorije, torej mere 0. □

V.2 Transverzalnost

Naj bodo M in $Z \subset N$ gladke mnogoterosti, vsaj $\mathcal{C}^1$, Z podmnogoterost v N in $f\colon M \to N$ gladka preslikava, $x \in M$, $f(x) \in Z$.

Definicija 45. $f \pitchfork_x Z$ (f je v točki x transverzalna na Z) $\Leftrightarrow df_x(T_xM) + T_{f(x)}Z = T_{f(x)}N$.

$f \pitchfork Z \Leftrightarrow f \pitchfork_x Z \ \forall x \in f^{-1}(Z)$

Trditev 36. *Če je $f \pitchfork Z$, potem je $f^{-1}(Z)$ gladka podmnogoterost v M,* $\mathrm{codim}(f^{-1}(Z), M)$ $\dim M - \dim f^{-1}(Z) = \mathrm{codim}(Z, N) = \dim N - \dim Z$.

Dokaz. Izrek o implicitni funkciji plus linearna algebra. □

Poseben primer: $Z = \{q\}$ točka v N. Če $q = f(p)$, potem $T_qZ = \{0\}$, $f \pitchfork_p \{q\} \Leftrightarrow$ $df_p(T_pM) = T_qM \Leftrightarrow f$ je submerzija v p (točka p je regularna točka preslikave f)

$$f \pitchfork Z \Leftrightarrow \forall p \in M \ f \pitchfork_p Z$$

Opomba. Če je $\dim M + \dim Z < \dim N$, potem je $f \pitchfork Z \Leftrightarrow Z = \emptyset$.

$$q = f(p) \in Z\colon\ T_pM \xrightarrow{df_p} T_qN \xrightarrow{\tau} \underbrace{\nu_q = T_qN/_{T_qZ}}_{\text{normalni prostor } Z \text{ v } N \text{ v } q} \to 0.$$

Pogoj transverzalnosti je ekvivalenten: $\tau \circ df_p\colon T_pM \twoheadrightarrow \nu_q$ je surjektivna (ker $\ker \tau = T_qZ$)
Če izberemo v okolici $U \subset N$ točke q lokalne definicijske funkcije $g_1, \ldots, g_d$ za $Z \cap U = \{y \in U\colon g_1(y) = 0, \ldots, g_d(y) = 0\}$ z neodvisnimi diferenciali $dg_1, \ldots, dg_d$, $g = (g_1, \ldots, d_g)\colon U \to \mathbb{R}^d$ potem je $\tau\colon T_qN \to \nu_q \cong \mathbb{R}^d$ predstavljena z dg_q. Torej je $f \pitchfork_p Z \Leftrightarrow dg_q \circ df_p\colon T_pM \to \nu_q \cong \mathbb{R}^d$ je surjektivna $\Leftrightarrow dg_q \circ df_p = d(g \circ f)_p\colon T_pM \to \mathbb{R}^d$ surjektivna.
$g \circ f = (g_1 \circ f, \ldots, g_d \circ f)$ lokalno definicijske funkcije za prasliko $f^{-1}(Z) = \{x \in M\colon f(x) \in Z\}$.
Iz zgornjega sledi: $f \pitchfork_p Z \Leftrightarrow d(g_1 \circ f)_p, \ldots, d(g_d \circ f)_p$ so linearno neodvisni. To je ekvivalentno dejstvu, da je $f^{-1}(Z)$ podmnogoterost kodimenzije d v M v neki okolici p. Dokazali smo:

Trditev 37. *$f \pitchfork_p Z \Leftrightarrow f^{-1}(Z)$ je podmnogoterost M v okolici točke p. $f \pitchfork Z \Rightarrow f^{-1}(Z)$ je podmnogoerost M, $\operatorname{codim}(f^{-1}(Z), M) = \operatorname{codim}(Z, N)$.*

Radi bi dokazali, da lahko vsako gladko preslikavo $f\colon M \to N$ aproksimiramo (poljubno dobro) z neko preslikavo $\tilde{f}\colon M \to N$, ki je transvezalna na dano podmnogoterost $Z \subset N$. Osnovna ideja (R. Abraham, Bulletin AMS, 69(1963)): Namesto ene preslikave gledamo družino preslikav.

$$F\colon M \times \mathbb{R}^m \to N \supset Z, \qquad F(\cdot, y) = f_y\colon M \to N$$

Definicija 46. f je submerzivna družina preslikav (ali dominanten sprej preslikav), če je $\forall (x, y) \in M \times \mathbb{R}^m$ parcialni diferencial $(\partial_y F)_{(x,y)}\colon T_{(x,y)}\mathbb{R}^m = \mathbb{R}^m \xrightarrow{sur.} T_{F(x,y)}N$ (v praksi ne potrebujemo vsega $\mathbb{R}^m$, lahko vzamemo npr. $D \subset \mathbb{R}^m$ ali mnogoterost).

Ekvivalentno: $\forall x \in M$ je preslikava $\mathbb{R}^m \ni y \to F(x, y) \in N$ submerzija.

Primer 54. $N = \mathbb{R}^m$, $f\colon M \to N = \mathbb{R}^n$, $F\colon M \times \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^n$, $f(\cdot, 0) = f$, $(x, y) \mapsto f(x) + y$ (translati preslikave f).

Izrek 29. *Če je $F\colon M \times \mathbb{R}^m \to N$ submerzivna družina preslikava in je $Z \subset N$ zaprta podmnogoterost, potem je za skoraj vsak $y \in \mathbb{R}^m$ preslikava $F(\cdot, y) = f_y\colon M \to N$ transverzalna na Z.*

Dokaz. Iz pogojev sledi, da je F submerzija. Potem je $S \stackrel{def}{=} F^{-1}(Z)$ gladka podmnogoterost v $M \times \mathbb{R}^m$ kodimenzije $d = \operatorname{codim}(Z, N)$. Označimo projekcijo $\pi\colon M \times \mathbb{R}^M \to \mathbb{R}^m$.

Trditev 38. *Za $\forall y \in \mathbb{R}^m$ velja $f_y \pitchfork Z \Leftrightarrow y$ je regularna vrednost projekcije $\pi|_S\colon S \to \mathbb{R}^m$.*

Dokaz. Fiksiramo $(x, y) \in S$
$dF_{(x,y)} \colon T_{(x,y)}S \twoheadrightarrow T_qZ$ $(T_{(x,y)}S = (dF_{(x,y)})^{-1}(T_qZ))$
$dF_{(x,y)} \colon \Lambda \xrightarrow{\cong} \nu_q$ normala na Z v N
$T_{(x,y)}(M \times \mathbb{R}^m) = T_{(x,y)}S \oplus \Lambda$
Y je regularna vrednost $\pi|_S \Leftrightarrow d\pi_{(x,y)} \colon T_{(x,y)}S \xrightarrow{sur.} T_y\mathbb{R}^m = \mathbb{R}^m \Leftrightarrow$ normalo Λ na S v (x, y) lahko izberemo tako, da je $\Lambda \subset \ker d\pi_{(x,y)} = T_{(x,y)}(M \times \{y\}) \cong T_xM$. Od prej vemo, da $dF(x, y)$ preslika to normalo $\Lambda \subset T_{(x,y)}(M \times \{y\})$ izomorfno na neko normalo ν na Z v T_qN. $dF_{(x,y)}|_\Lambda = d(f_y)_x \colon \Lambda \xrightarrow{\cong} \nu$, kjer je $f_y = F(\cdot, y) \Rightarrow \underbrace{(df_y)_x(T_xM)}_{(df_y)_x(\Lambda)=\nu} + T_qZ = T_qN$.

S tem smo dokazali trditev. Izrek sledi iz Sardovega izreka (skoraj vsak $y \in \mathbb{R}^m$ je regularna vrednost preslikave $\pi|_S \colon S \to \mathbb{R}^m$).

Opomba. Če je $f \pitchfork Z$, potem je za $\forall K^{komp.} \subset M$ vsaka $f' \colon M \to Z$, ki je na K dovolj $\mathcal{C}^1$-blizu f, tudi transverzalna na Z na K ($\forall x \in K\colon f' \pitchfork_x Z$). To je zato, ker je transverzalnost odprt (stabilen) pogoj.

Trditev 39. *Če je M kompaktna, lahko vsako preslikavo $M \xrightarrow{f} N$ vložimo v submerzivno družino.*

$$F \colon M \times D \to N \quad \text{submerzivna družina, } F(\cdot, y) = f$$

Dokaz. Ker je množica $f(M) \subset N$ kompaktna, obstajajo vektorska polja $V_1, \ldots, V_m$ na N, ki generirajo T_yN za $\forall y \in f(M)$. Naj bo ϕ_t^j tok polja V_j (obstaja za majhne $|t|$), $F(x, y_1, \ldots, y_m) = \phi_{y_1}^1 \circ \ldots \circ \phi_{y_m}^m(f(x))$. F je dobro definirana na $M \times D$¡ kjer je $0 \in D \subset \mathbb{R}^m$ krogla.

$$\left.\frac{\partial}{\partial y_j}\right|_{(x,0,\ldots,0)} F(x, y) = V_j|_{F(x,0)=f(x)} \qquad \text{lin. neodvisni}$$

Submerzivnostni pogoj torej velja pri $y = 0$ in ker je ta pogoj odprt, velja tudi v neki okolici za dovolj majhne $|y|$.

Uporaba transverzalnostnega izreka.

Presečna teorija: Z podmnogoterost, $X, Y \subset Z$ sklenjeni podmnogoterosti
Če $\dim X + \dim Y < \dim Z \Rightarrow X$ in Y se generično ne sekata (eno malce perturbiramo in postaneta transverzalni, kar pomeni, da se ne sekata).
Če $\dim X + \dim Y = \dim Z \Rightarrow X \cap Y$ je generično podmnogoterost dimenzije 0, torej je $X \cap Y$ končna množica točk.

$$\begin{matrix} T_pX + T_pY = T_pZ \\ T_pX \cap T_pY = \{0\} \end{matrix} \qquad \text{če vse tri orientirane}$$

Točki $p \in X \cap Y$ priredimo število $\delta(p) = \pm 1$ glede na to ali se orientaciji na T_pX, T_pY dopolnita do $+$ ali do $-$ orientacije na T_pZ.

Definicija 47. $X \cdot Y \overset{def}{=} \sum\limits_{p \in X \cap Y} \delta(p)$ je presečno število.

$X \cdot Y$ je neodvisno od gladkih deformacij X in Y v Z.
Poseben primer: X kompaktna mnogoterost dimenzije n, $E \xrightarrow{\pi} X^n$ vektorski sveženj. $\chi(E) = X \cdot X \overset{def}{X} \cdot X'$ (Eulerjevo število), X' generična deformacija X v E. Če $E = TX$, je to Hopfov izrek: $\chi(TX) = X \cdot X' = \chi(X)$ s triangulacijo, X' je graf vektorskega polja, $X \cdot X'$ je število ničel polja V, šteto $\pm$ glede na orientacijo.

Literatura

[AMR] Abraham, R., Marsden, J. E., Ratiu, T.: Manifolds, tensor analysis, and applications. Second ed. Applied Mathematical Sciences **75**, Springer-Verlag, New York, 1988

[Arn] Arnolʹd, V.I.: Mathematical methods of classical mechanics. Translated from the Russian by K. Vogtmann and A. Weinstein. Second edition. Graduate Texts in Mathematics, 60. Springer-Verlag, New York, 1989.

[B] Boothby, W. M.: An introduction to differentiable manifolds and Riemannian geometry. Academic Press, Orlando, 1986.

[F] Forstnerič, F.: Stein Manifolds and Holomorphic Mappings. Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete, 3. Folge, A Series of Modern Surveys in Mathematics, vol. 56, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011

[GP] Guillemin, V. & Pollack, A.: Differential topology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974

[H] Hirsch, M. W.: Differential topology. Springer-Verlag, New York, 1994

[L] O. Lehto, Univalent functions and Teichmüller spaces. Graduate Texts in Mathematics, 109. Springer-Verlag, New York, 1987.)

[M] J. Mrčun: Topologija. Izbrana poglavja iz matematike in računalništva, 44. DMFA, Ljubljana, 2008

[S] Spivak, M.: Calculus on manifolds (A modern approach to classical theorems of advanced calculus). W. A. Benjamin, New York-Amsterdam, 1965

[W] Warner, F. W.: Foundations of differentiable manifolds and Lie groups. Springer-Verlag, New York-Berlin, 1983