

Uvod v diferencialno geometrijo

Jaša Knap

24. januar 2024

1 Uvod

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

Primer 1.2. Naslednje množice so primeri mnogoterosti.

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

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

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

6. Grupa

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

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

1.1 Gladke mnogoterosti

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

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

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

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

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

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

Definicija 1.6. Naj bo M n -dimenzionalna mnogoterost. Družina parov

$$\mathcal{U} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha) \mid \alpha \in A\},$$

je gladek atlas na M , če za vsak $\alpha \in A$ velja:

1. $U_\alpha^{\text{odp}} \subseteq M$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

difeomorfizem.

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

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

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

2 Gladke vložene ploskve

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

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

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

Vložena ploskev $X \subseteq \mathbb{R}^3$ je tudi abstraktna mnogoterost. Poglejmo si, kako bi konstruirali atlas na X . Vzemimo točko $m \in X$. Po definiciji vložene ploskve obstaja nivojnica $f : W \ni m \rightarrow \mathbb{R}$, za katero po drugi točki definicije vemo, da $D_m f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) (m) \neq 0$. Zdaj se spomnimo izreka o implicitni funkciji. Naj bo $m = (x_0, y_0, z_0)$ in BŠS naj bo $\frac{\partial f}{\partial z}(m) \neq 0$. Torej obstaja gladka okolica $V \ni (x_0, y_0) \subseteq \mathbb{R}^2$ in gladka funkcija $g : V \rightarrow \mathbb{R}$, da velja $f(x, y, g(x, y)) = 0$ za vsak $(x, y) \in V$. Po potrebi lahko množico W zmanjšamo na $W_0 \subseteq W$, da dobimo difeomorfizem

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

z inverzom

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

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

2.1 Metrika na ploskvi

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

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

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

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

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

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

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

Naj bo $\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ linearna, L_e matrika linearne preslikave \mathcal{L} glede na bazo $\{e_1, \dots, e_n\}$, L_f pa glede na bazo $\{f_1, \dots, f_n\}$. Naj bo P prehodna preslikava iz baze $\{e_1, \dots, e_n\}$ v bazo $\{f_1, \dots, f_n\}$. Potem iz algebre 1 vemo, da je

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

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

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

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

$$A_f = PA_eP^T.$$

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

Preden se lotimo definicije tangentne ravnine, se spomnimo naslednje definicije.

Definicija 2.2. Naj bo preslikava $F : W \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ odvedljiva. Rang preslikave F v točki $w \in W$ je enak rangju matrike $D_w F$. Pravimo, da ima F v točki $w \in W$ maksimalen rang, če ima matrika $D_w F$ maksimalen rang.

Definicija 2.3. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ vložena ploskev in točka $m \in X$. Tangentna ravnina $T_m X$ je množica tangent vseh krivulj v X , ki v času $t = 0$ gredo skozi m .

$$T_m X = \{\dot{\gamma}(0) \mid \gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3 \text{ krivulja, } \gamma(0) = m\}$$

Trditev 2.4. $T_m X$ je dvodimenzionalen realen vektorski podprostor v \mathbb{R}^3 .

Dokaz: Naj bo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$ neka regularna parametrizacija ploskve X (to pomeni, da mora biti rang preslikave r maksimalen, torej konstantno enak 2) v okolici točke $m \in X$. Označimo za vsak $(u, v) \in V \subseteq \mathbb{R}^2$

$$r(u, v) = \begin{pmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{pmatrix}.$$

Naj bo $m = r(u_0, v_0)$. Trdimo, da je $T_m X = \text{im}(D_{(u_0, v_0)} r)$. Najprej dokažimo inkluzijo $T_m X \subseteq \text{im}(D_{(u_0, v_0)} r)$. Naj bo $\gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$, $\gamma(0) = m$ poljubna krivulja. Direktno po definiciji tangentne krivulje sledi $\dot{\gamma}(0) \in T_m X$. Dokazati moramo $\dot{\gamma}(0) \in \text{im}(D_{(u_0, v_0)} r)$. Naj bo $\beta(t) : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow V$ podana z $\beta(t) = r^{-1}(\gamma(t))$. Ker je prasluka preslikave β vsebovana v \mathbb{R}^2 , obstajata funkciji $u(t), v(t)$, da je $\beta(t) = (u(t), v(t))$. Pri tem velja, da je $\beta(0) = (u(0), v(0)) = (u_0, v_0)$. Vidimo, da je $\gamma(t) = r(u(t), v(t))$. Po verižnem pravilu za odvajanje imamo

$$\dot{\gamma}(0) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \gamma(t) = (D_{(u_0, v_0)} r) \dot{\beta}(0).$$

Torej je $\dot{\gamma}(0) \in \text{im}(D_{(u_0, v_0)} r)$.

Nato dokažimo še obratno inkluzijo $T_m X \supseteq \text{im}(D_{(u_0, v_0)} r)$. Vzemimo poljuben vektor $w \in \mathbb{R}^2$ in naj bo $v = (D_{(u_0, v_0)} r) w$. Potrebujemo krivuljo $\gamma(t) : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow X$, $\gamma(0) = m$, za katero bo veljalo $\dot{\gamma}(0) = v$. Oglejmo si

$$(D_{(u_0, v_0)} r) \dot{\beta}(0) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} r(\beta(t)).$$

Trdimo, da za $\gamma(t) = r(\beta(t))$ velja $\dot{\gamma}(0) \in T_m X$. To je res, saj je $\gamma(t) : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$, hkrati pa tudi $\gamma(0) = r(\beta(0)) = r(u_0, v_0) = m$. Torej velja, da je $T_m X = \text{im}(D_{(u_0, v_0)} r)$. Ker smo zahtevali, da je parametrizacija regularna, je matrika $D_{(u_0, v_0)} r$ ranga 2, torej je $T_m X$ dvodimenzionalen vektorski prostor. \square

Opomba. TODO Če se ne motim, je v drugi polovici zgornjega dokaza napaka. Morali bi nastaviti funkcijo $\beta(t) : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow V$, s predpisom $\beta(t) = wt + (u_0, v_0)$. Potem definiramo krivuljo $\gamma(t) = r(\beta(t))$, za katero res veljata zahtevani lastnosti.

Opomba. Tangentna ravnina je pravi vektorski prostor in ne afin kot recimo pri analizi 2a.

Do nadaljnjega nas bodo zanimalle lokalne lastnosti ploskev, zato bomo delali v glavnem s ploskvami, ki jih lahko pokrijemo z eno samo karto oziroma z eno samo parametrizacijo.

Definicija 2.5. Metrika na ploskvi $X \subseteq \mathbb{R}^3$, opremljeni s parametrizacijo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$, je preslikava

$$g : X \longrightarrow M_2(\mathbb{R}),$$

$$m \longmapsto \begin{pmatrix} g_{11}(m) & g_{12}(m) \\ g_{21}(m) & g_{22}(m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle r_u, r_u \rangle_g(m) & \langle r_u, r_v \rangle_g(m) \\ \langle r_u, r_v \rangle_g(m) & \langle r_v, r_v \rangle_g(m) \end{pmatrix},$$

kjer je za vsak $m \in X$ matrika $g(m)$ simetrična in pozitivno definitna. To lahko povemo s pogojem $\det g(m) > 0$ in $g_{11}(m) > 0$.

Opomba. Za kakšno drugo parametrizacijo ploskve X bi dobili druge koeficiente matrike.

Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ krivulja. Njeno parametrizacijo r lahko napišemo v obliki $\gamma(t) = r(u(t), v(t))$ za primerne funkcije $u, v : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $\beta(t) = (u(t), v(t))$, $\gamma(t) = r(\beta(t))$. V koordinatah lahko zapišemo

$$\gamma(t) = \begin{pmatrix} x(u(t), v(t)) \\ y(u(t), v(t)) \\ z(u(t), v(t)) \end{pmatrix},$$

$$\dot{\gamma}(t_0) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=t_0} r(\beta(t)) = (D_{(u_0, v_0)} r)(\dot{\beta}(t_0)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{pmatrix}_{(u_0, v_0)} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = r_u(u_0, v_0)\dot{u}(t_0) + r_v(u_0, v_0)\dot{v}(t_0).$$

To je razvoj vektorja $\dot{\gamma}(t_0)$ po bazi $\{r_u(u_0, v_0), r_v(u_0, v_0)\}$ prostora $T_{\gamma(t_0)} X$, ki pa ni nujno ortogonalna. Pravzaprav je ortogonalna le v precej posebnih primerih.

Definicija 2.6. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev ter $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X$ njena parametrizacija. Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ krivulja, ki ji pripadata funkciji $u, v : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, tako da velja

$$\gamma(t) = r(u(t), v(t)).$$

Dolžina krivulje γ glede na metriko g je v parametrizaciji r podana s formulo

$$\mathcal{L}_g(\gamma) = \int_a^b \sqrt{(\dot{u}(t) \quad \dot{v}(t)) \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{v}(t) \end{pmatrix}} dt$$

Ustrezni skalarni produkti na ravnini $T_m X$ so glede na parametrizacijo r podani s predpisi $\langle r_u, r_u \rangle_g = g_{11}$, $\langle r_u, r_v \rangle_g = g_{12}$, $\langle r_v, r_v \rangle_g = g_{22}$. Naj bo sedaj ambientni prostor \mathbb{R}^3 opremljen s fiksnim evklidskim skalarnim produktom, in koeficiente g_{ij} poračunamo z njim (na enak način kot prej). Pri tem uporabimo

naslednje standardne oznake:

$$E(u, v) = \langle r_u(u, v), r_u(u, v) \rangle, \quad F(u, v) = \langle r_u(u, v), r_v(u, v) \rangle, \quad G(u, v) = \langle r_v(u, v), r_v(u, v) \rangle.$$

Včasih tudi zlorabimo notacijo

$$E(m) = E(r(u, v)) = E(u, v).$$

Definicija 2.7. Metrika na $X \subseteq \mathbb{R}^2$, ki je glede na parametrizacijo $r : V \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$ podana z matrično funkcijo

$$g_f : V \longrightarrow M_2(\mathbb{R})$$

$$(u, v) \longmapsto \begin{pmatrix} E(u, v) & F(u, v) \\ F(u, v) & G(u, v) \end{pmatrix},$$

se imenuje prva fundamentalna forma ploskve.

Opomba. Dolžina krivulje glede na prvo fundamentalno formo $\mathcal{L}_{g_f}(\gamma)$ sovpada z običajno dolžino krivulje $\mathcal{L}(\gamma)$:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\gamma) &= \int_a^b \|\dot{\gamma}(t)\| dt = \int_a^b \sqrt{\langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, \dot{u}r_u + \dot{v}r_v \rangle} dt \\ &= \int_a^b \sqrt{\begin{pmatrix} \dot{u}(t) & \dot{v}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle r_u, r_u \rangle & \langle r_u, r_v \rangle \\ \langle r_v, r_u \rangle & \langle r_v, r_v \rangle \end{pmatrix}_{(u(t), v(t))} \begin{pmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{v}(t) \end{pmatrix}} dt \\ &= \int_a^b \sqrt{\begin{pmatrix} \dot{u}(t) & \dot{v}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u(t), v(t))} \begin{pmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{v}(t) \end{pmatrix}} dt \\ &= \mathcal{L}_{g_f}(\gamma). \end{aligned}$$

Izomorfizmi v diferencialni geometriji so izometrije, katerih definicija pa je nekoliko drugačna, kot bi morda pričakovali.

Definicija 2.8. Preslikava $f : X \rightarrow \tilde{X}$ nad dvema ploskvama $X, \tilde{X} \subseteq \mathbb{R}^3$ je izometrija, če za vsako krivuljo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ velja enakost med dolžinama

$$\mathcal{L}_X(\gamma) = \mathcal{L}_{\tilde{X}}(f(\gamma)).$$

Opomba. Izometrije med ploskvama porodijo izometrije v običajnem metričnem smislu.

Primer 2.9. Prva fundamentalna forma na sferi glede na sferične koordinate. Če odvezemo iz S^2 en poldnevnik, jo lahko parametriziramo s sferičnimi koordinatami:

$$r(u, v) : V = (-\pi, \pi) \times (0, \pi) \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$$

s predpisom

$$r(u, v) = \begin{pmatrix} \cos u \cos v \\ \cos u \sin v \\ \sin u \end{pmatrix}.$$

Potem dobimo parcialna odvoda

$$r_u(u, v) = \begin{pmatrix} -\sin u \cos v \\ -\sin u \sin v \\ \cos u \end{pmatrix}, \quad r_v(u, v) = \begin{pmatrix} -\cos u \sin v \\ \cos u \cos v \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Od tod sledi

$$\begin{aligned} E &= \langle r_u, r_u \rangle = 1, \\ F &= \langle r_u, r_v \rangle = 0, \\ G &= \langle r_v, r_v \rangle = \cos^2 u, \end{aligned}$$

kar lahko zapišemo v obliki

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos^2 u \end{pmatrix}.$$

Primer 2.10. Naj bo X rotacijska ploskev, ki jo dobimo, če krivuljo $x = f(z)$ zavrtimo okoli osi z :

$$r : (u, v) \mapsto \begin{pmatrix} f(u) \cos v \\ f(u) \sin v \\ u \end{pmatrix}.$$

Potem imamo odvoda

$$r_u(u, v) = \begin{pmatrix} f'(u) \cos v \\ f'(u) \sin v \\ 1 \end{pmatrix}, \quad r_v(u, v) = \begin{pmatrix} -f(u) \sin v \\ f(u) \cos v \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Od tod sledi

$$\begin{aligned} E &= \langle r_u, r_u \rangle = 1 + f'(u)^2, \\ F &= \langle r_u, r_v \rangle = 0, \\ G &= \langle r_v, r_v \rangle = f(u)^2, \end{aligned}$$

kar lahko zapišemo v obliki

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + f'(u)^2 & 0 \\ 0 & f(u)^2 \end{pmatrix}.$$

Naslednji izrek nam pove povezavo med prvo fundamentalno formo in izometričnostjo ploskev.

Izrek 2.11.

Ploskvi X in \tilde{X} sta izometrični natanko tedaj, ko obstaja par parametrizacij $r : V \rightarrow X$ in $\tilde{r} : V \rightarrow \tilde{X}$, da za pripadajoči fundamentalni formi velja

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u,v)} = \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix}_{(u,v)}.$$

Dokaz: Pokažimo najprej obrat (\Leftarrow). Recimo, da obstajata parametrizaciji $r : V \rightarrow X$ in $\tilde{r} : V \rightarrow \tilde{X}$, da velja

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u,v)} = \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix}_{(u,v)}.$$

Naj bo $f : X \rightarrow \tilde{X}$ podana s predpisom $f = \tilde{r} \circ r^{-1}$. S primerjavo dolžini $\mathcal{L}_r(\gamma)$ ter $\mathcal{L}_{\tilde{r}}(f(\gamma))$ hočemo preveriti, da je f izometrija. Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ poljubna krivulja. Potem obstaja krivulja $\beta : [\alpha, \beta] \rightarrow V$ za katero velja $\gamma(t) = r(\beta(t))$. Potem za $\tilde{\gamma}(t) := f(\gamma(t))$ velja

$$\tilde{\gamma}(t) = f(\gamma(t)) = f(r(\beta(t))) = \tilde{r}(\beta(t)).$$

Ker je $\beta(t)$ ravninska krivulja, velja

$$\begin{aligned}\gamma(t) &= r(\beta(t)) = r(u(t), v(t)), \\ \tilde{\gamma}(t) &= \tilde{r}(\beta(t)) = \tilde{r}(u(t), v(t)).\end{aligned}$$

Torej imamo enačbi

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_r(\gamma) &= \int_a^b \sqrt{E(u, v)\dot{u}^2 + 2F(u, v)\dot{u}\dot{v} + G(u, v)\dot{v}^2} dt, \\ \mathcal{L}_{\tilde{r}}(\tilde{\gamma}) &= \int_a^b \sqrt{\tilde{E}(u, v)\dot{u}^2 + 2\tilde{F}(u, v)\dot{u}\dot{v} + \tilde{G}(u, v)\dot{v}^2} dt.\end{aligned}$$

Ker so posamezni sumandi po predpostavki enaki, sta dolžini enaki, torej je $f = \tilde{r} \circ r^{-1}$ res izometrija.

Zdaj dokažimo še (\implies). Denimo, da imamo med ploskvama X in \tilde{X} izomerijo $f : X \rightarrow \tilde{X}$. Naj bo $\gamma(t) : (0, \varepsilon) \rightarrow X$ krivulja s predpisom $\gamma(t) = r(\beta_1(t)) = r(u_0 + t, v_0)$. Pri tem je točka $(u_0, v_0) \in V$ poljubna in določa točko $p = r(u_0, v_0) \in X$. Zdaj izračunamo

$$\mathcal{L}_r(\gamma(t)) = \int_0^\varepsilon \|\dot{\gamma}(t)\| dt = \int_0^\varepsilon \sqrt{\langle \dot{\gamma}(t), \dot{\gamma}(t) \rangle} dt = \int_0^\varepsilon \sqrt{\langle r_u(u_0 + t, v_0), r_u(u_0 + t, v_0) \rangle} dt = \int_0^\varepsilon \sqrt{E(u_0 + t, v_0)} dt.$$

Sedaj si oglejmo $f(\gamma(t)) = \tilde{r}(\beta_1(t)) = \tilde{r}(u_0 + t, v_0)$. Potem imamo:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\tilde{r}}(f(\gamma(t))) &= \int_0^\varepsilon \|\dot{\tilde{\gamma}}(t)\| dt \\ &= \int_0^\varepsilon \sqrt{\langle \dot{\tilde{\gamma}}(t), \dot{\tilde{\gamma}}(t) \rangle} dt \\ &= \int_0^\varepsilon \sqrt{\langle \tilde{r}_u(u_0 + t, v_0), \tilde{r}_u(u_0 + t, v_0) \rangle} dt \\ &= \int_0^\varepsilon \sqrt{\tilde{E}(u_0 + t, v_0)} dt.\end{aligned}$$

Po predpostavki o izometričnosti velja

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_r(\gamma) &= \mathcal{L}_{\tilde{r}}(f(\gamma)) \\ \implies \int_0^\varepsilon \sqrt{E(u_0 + t, v_0)} dt &= \int_0^\varepsilon \sqrt{\tilde{E}(u_0 + t, v_0)} dt.\end{aligned}$$

Po izreku o povprečni vrednosti obstajata vrednosti $\hat{t}, \hat{\hat{t}} \in (0, \varepsilon)$, da velja

$$E(u_0 + \hat{t}, v_0)\varepsilon = \tilde{E}(u_0 + \hat{\hat{t}}, v_0)\varepsilon$$

in če pošljemo $\varepsilon \rightarrow 0$, zaradi zveznosti funkcij dobimo

$$E(u_0, v_0) = \tilde{E}(u_0, v_0).$$

Še lažje ta rezultat dobimo tako, da na obeh straneh odvajamo po ε in vstavimo $t = 0$.

Če zdaj vzamemo $\beta_2(t) = (u_0, v_0 + t)$, dobimo po enakem postopku kot prej

$$G(u_0, v_0) = \tilde{G}(u_0, v_0).$$

Nato vzamemo $\beta_3(t) = (u_0 + t, v_0 + t)$ in imamo

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_r(\gamma) &= \int_0^\varepsilon \sqrt{E(u_0 + t, v_0 + t) + 2F(u_0 + t, v_0 + t) + G(u_0 + t, v_0 + t)} dt \\ &= \mathcal{L}_{\tilde{r}}(\tilde{\gamma}) = \int_0^\varepsilon \sqrt{\tilde{E}(u_0 + t, v_0 + t) + 2\tilde{F}(u_0 + t, v_0 + t) + \tilde{G}(u_0 + t, v_0 + t)} dt.\end{aligned}$$

Če zdaj zopet odvajamo po ε in vstavimo $t = 0$, dobimo enakost integrandov v točki (u_0, v_0) , od koder sledi še zadnja zahteva

$$F(u_0, v_0) = \tilde{F}(u_0, v_0).$$

□

Primer 2.12. Ali je stožec brez ene tvorilke izometričen kosu ravnine? Naj bo podan

$$S = \{(x, y, z) \mid x^2 + y^2 + z^2 = 1\}.$$

Parametriziramo ga z

$$r(u, v) = (u \cos v, u \sin v, u)$$

in po znanem postopku dobimo

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u,v)} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & u^2 \end{pmatrix}.$$

Pričakujemo, da bo S izometričen nekemu krožnemu izseku, ki ga parametriziramo z

$$\tilde{r}(u, v) = (\alpha u \cos(\beta v), \alpha u \sin(\beta v), 0).$$

Tako dobimo sistem enačb

$$\begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix}_{(u,v)} = \begin{pmatrix} \alpha^2 & 0 \\ 0 & \alpha^2 \beta^2 u^2 \end{pmatrix}.$$

Pogoj

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u,v)} = \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix}_{(u,v)}$$

je izpolnjen pri $\alpha = \sqrt{2}$, $\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ (če bi zamenjali predznake α in β , bi dobili drugačne parametrizacije). Torej je stožec S izometričen krožnemu izseku s parametrizacijo

$$\tilde{r}(u, v) = \left(\sqrt{2}u \cos\left(\frac{1}{\sqrt{2}}v\right), \sqrt{2}u \sin\left(\frac{1}{\sqrt{2}}v\right), 0 \right).$$

Na tej točki se pojavi naravno vprašanje: ali znamo poiskati vse ploskve v \mathbb{R}^3 , ki so izometrične ravnini? Izkaže se, da znamo, pred izrekom pa navedimo še definicijo tangentno premonosne ploskve.

Definicija 2.13. Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^3$ prostorska krivulja, parametrizirana z naravnim parametrom. Tangentna premonosna ploskev, podana s krivuljo γ , je del prostora \mathbb{R}^3 , ki ga opiše tangenta na $\gamma(t)$ na intervalu $t \in [a, b]$. Parametriziramo jo lahko s predpisom

$$r(t, u) = \gamma(t) + u\dot{\gamma}(t).$$

Izrek 2.14.

Naj bo ploskev X izometrična kakšnemu kosu ravnine. Potem je X bodisi stožec, valj, ali kakšna tangentna premonosna ploskev.

Če je $\gamma = \gamma(u)$ naravna parametrizacija, potem je smiselna parametrizacija tangentno premonosne ploskve X podana z

$$r(u, v) = \gamma(u) + v\dot{\gamma}(u).$$

Ker je γ naravna parametrizacija, velja

$$\|\dot{\gamma}(u)\| = \langle \dot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle = 1,$$

in z odvajanjem zveze dobimo

$$\langle \ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle + \langle \dot{\gamma}(u), \ddot{\gamma}(u) \rangle = 0.$$

Iz simetričnosti skalarnega produkta sledi

$$2\langle \ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle = 0 \implies \langle \ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle = 0.$$

Torej je pospešek pri naravni parametrizaciji vedno pravokoten na hitrost. To lahko opazimo, če se v avtu peljemo s konstantno hitrostjo. Pospešek bomo čutili samo v ovinkih in to pravokotno glede na smer vožnje.

Definicija 2.15. Fleksijska ukrivljenost naravno parametrizirane krivulje $\gamma(u)$ je podana s

$$\kappa(u) = \sqrt{\langle \ddot{\gamma}(u), \ddot{\gamma}(u) \rangle} = \|\ddot{\gamma}(u)\|.$$

Izračunajmo prvo fundamentalno formo tangentno premonosne ploskve. Ker velja zveza

$$r(u, v) = \gamma(u) + v\dot{\gamma}(u),$$

takoj dobimo

$$\begin{aligned} r_u(u, v) &= \dot{\gamma}(u) + v\ddot{\gamma}(u), \\ r_v(u, v) &= \dot{\gamma}(u). \end{aligned}$$

Če od tod po znanem postopku poračunamo koeficiente prve fundamentalne forme (pri čemer upoštevamo, da je pospešek pravokoten na hitrost, torej $\langle \ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle = 0$, ter naravnost parametrizacije, torej $\langle \dot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle = 1$), dobimo

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u,v)} = \begin{pmatrix} \langle \dot{\gamma}(u) + v\ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) + v\ddot{\gamma}(u) \rangle & \langle \dot{\gamma}(u) + v\ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle \\ \langle \dot{\gamma}(u) + v\ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle & \langle \dot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + v^2\kappa^2(u) & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Torej vidimo, da je matrika prve fundamentalne forme tangentno premonosne ploskve odvisna samo od fleksijske ukrivljenosti.

Trditev 2.16. Naj bo podana poljubna (zvezna?) funkcija $\tilde{\kappa} : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}$. Potem obstaja naravno parametrizirana ravninska krivulja $\gamma : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^2$, katere fleksijska ukrivljenost v točki $\gamma(u)$ je enaka $\kappa(u) = \tilde{\kappa}(u)$.

Dokaz: Ker je krivulja γ ravninska, lahko zapišemo

$$\begin{aligned} \gamma(u) &= (x(u), y(u)), \\ \dot{\gamma}(u) &= (\dot{x}(u), \dot{y}(u)), \\ \ddot{\gamma}(u) &= (\ddot{x}(u), \ddot{y}(u)). \end{aligned}$$

Ker je parametrizacija naravna, imamo še sistem enačb

$$\begin{aligned} \|\dot{\gamma}(u)\| &= 1, \\ \|\ddot{\gamma}(u)\| &= \kappa(u), \\ \langle \ddot{\gamma}(u), \dot{\gamma}(u) \rangle &= 0. \end{aligned}$$

Enotski vektor, pravokoten na $\dot{\gamma}(u) = (\dot{x}(u), \dot{y}(u))$, je vektor $(\dot{y}(u), -\dot{x}(u))$. Ta vektor je vzporeden vektorju pospeška, torej bo za neko funkcijo $k : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}$ veljalo

$$(\ddot{x}(u), \ddot{y}(u)) = k(u)(\dot{y}(u), -\dot{x}(u)).$$

Če obe strani enačbe normiramo, iz prejšnjega sistema enačb vidimo, da mora priti natanko

$$(\ddot{x}(u), \ddot{y}(u)) = \kappa(u)(\dot{y}(u), -\dot{x}(u)).$$

Zanima nas, ali obstaja krivulja, za katero je $\kappa = \tilde{\kappa}$, torej z drugimi besedami, ali je rešljiv sistem navadnih diferencialnih enačb

$$\begin{aligned}\ddot{x}(u) &= \tilde{\kappa}(u)\dot{y}(u), \\ \ddot{y}(u) &= -\tilde{\kappa}(u)\dot{x}(u).\end{aligned}$$

Pri analizi 3 smo dokazali eksistenčni izrek za obstoj rešitev tega sistema. Torej obstaja naravno parametrizirana krivulja $\gamma(u) = (x(u), y(u))$, za katero za vsak $u \in [\alpha, \beta]$ velja $\|\ddot{\gamma}(u)\| = \tilde{\kappa}(u)$.

□

Opomba. Pri določenih (u, v) nam krivulja $\gamma(u)$ podaja tangentno premonosno ploskev. Ta ploskev je del ravnine, v kateri leži krivulja $\gamma(u)$. Po izreku je ta ploskev izometrična nekemu kosu ravnine.

S tem razmislekom smo dokazali izrek.

Izrek 2.17.

Vsaka tangentno premonosna ploskev je izometrična kosu ravnine.

Definicija 2.18. Ploščina ploskve X , regularno parametrizirane z $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$ je podana z

$$A(X) = \int_V \|r_u \times r_v\| du dv.$$

Opomba. Da je ta definicija dobra, moramo še preveriti.

Opomba. Ker velja zveza

$$\|r_u \times r_v\|^2 = \langle r_u, r_u \rangle \langle r_v, r_v \rangle - \langle r_u, r_v \rangle^2 = EG - F^2,$$

lahko ploščino izrazimo tudi kot

$$A(X) = \int_V \sqrt{EG - F^2} du dv = \int_V \sqrt{\det \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}} du dv.$$

Definicija 2.19. Naj bosta $r : V_1 \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$ in $\tilde{r} : V_2 \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$ različni regularni parametrizaciji ploskve X . Potem je preslikava

$$\begin{aligned}g &= \tilde{r}^{-1} \circ r : V_1 \longrightarrow V_2 \\ (u, v) &\longmapsto (\tilde{u}(u, v), \tilde{v}(u, v)),\end{aligned}$$

prehodna preslikava med parametrizacijama r in \tilde{r} .

Velja $r(u, v) = \tilde{r}(g(u, v))$. Poglejmo si, kaj se zgodi z matriko prve fundamentalne forme transformaciji med parametrizacijama.

2.2 Transformacijska pravila za prvo fundamentalno formo

Naj bosta $r : V_1 \rightarrow X$ in $\tilde{r} : V_2 \rightarrow X$ dve parametrizaciji iste ploskve. Med njima velja $r(u, v) = \tilde{r}(\tilde{u}(u, v), \tilde{v}(u, v))$. To nam da prehodno preslikavo $g : \tilde{r}^{-1} \circ r : V_1 \rightarrow V_2$. Vektor, razvit po bazi $\{r_u, r_v\}$ bomo skušali razviti po bazi $\{\tilde{r}_{\tilde{u}}, \tilde{r}_{\tilde{v}}\}$. Imamo

$$\begin{aligned}r(u, v) &= \tilde{r}(\tilde{u}(u, v), \tilde{v}(u, v)), \\ r_u &= \tilde{r}_{\tilde{u}}\tilde{u}_u + \tilde{r}_{\tilde{v}}\tilde{v}_u, \\ r_v &= \tilde{r}_{\tilde{u}}\tilde{u}_v + \tilde{r}_{\tilde{v}}\tilde{v}_v.\end{aligned}$$

Zdaj hočemo vektor $ar_u + br_v$ zapisati v obliki $\alpha\tilde{r}_{\tilde{u}} + \beta\tilde{r}_{\tilde{v}}$. Dobimo

$$ar_u + br_v = a(\tilde{r}_{\tilde{u}}\tilde{u}_u + \tilde{r}_{\tilde{v}}\tilde{v}_u) + b(\tilde{r}_{\tilde{u}}\tilde{u}_v + \tilde{r}_{\tilde{v}}\tilde{v}_v) = \underbrace{(a\tilde{u}_u + b\tilde{u}_v)}_{\alpha}\tilde{r}_{\tilde{u}} + \underbrace{(a\tilde{v}_u + b\tilde{v}_v)}_{\beta}\tilde{r}_{\tilde{v}}.$$

Torej za vsak par vektorjev $(a, b)^T, (\alpha, \beta)^T$ velja zveza

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \tilde{u}_u & \tilde{u}_v \\ \tilde{v}_u & \tilde{v}_v \end{pmatrix}}_{\text{Jac}(g)} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}.$$

Torej za vse pare vektorjev velja

$$\begin{aligned} \left\langle \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \right\rangle &= \left\langle \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix} \right\rangle \\ \begin{pmatrix} a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \alpha & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a & b \end{pmatrix} \text{Jac}(g)^T \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix} \text{Jac}(g) \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Od tod sledi naslednji izrek.

Izrek 2.20.

Naj za parametrizaciji ploskve $r : V_1 \rightarrow X$ in $\tilde{r} : V_2 \rightarrow X$ velja

$$r(u, v) = \tilde{r}(\tilde{u}(u, v), \tilde{v}(u, v)) = \tilde{r}(g(u, v)).$$

Potem za prvi fundamentalni formi glede na ti parametrizaciji velja

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} = \text{Jac}(g)^T \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix} \text{Jac}(g).$$

Posledica 2.21. Definicija ploščine je dobra.

Dokaz: Dokazujemo

$$A(X) = \int_{V_1} \sqrt{EG - F^2} du dv = \int_{V_2} \sqrt{\tilde{E}\tilde{G} - \tilde{F}^2} d\tilde{u} d\tilde{v}.$$

Po izreku o transformaciji prve fundamentalne forme velja

$$\begin{aligned} A(X) &= \int_{V_1} \sqrt{\det \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}} du dv \\ &= \int_{V_1} \sqrt{\det \left(\text{Jac}(g)^T \begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix} \text{Jac}(g) \right)} du dv \\ &= \int_{V_1} \sqrt{\begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix} |\det(\text{Jac}(g))|} du dv \\ (\text{uvredba novih spremenljivk}) &= \int_{V_2} \sqrt{\begin{pmatrix} \tilde{E} & \tilde{F} \\ \tilde{F} & \tilde{G} \end{pmatrix}} d\tilde{u} d\tilde{v}. \end{aligned}$$

□

Recimo, da imamo podano $V \subseteq \mathbb{R}^2$ in matrično funkcijo

$$M : V \longrightarrow M_2(\mathbb{R})_{\text{simetrične, pozitivno definitne}}$$

$$(u, v) \longmapsto \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(u, v)}.$$

Zanimivo vprašanje se glasi: Ali lahko to funkcijo realiziramo v vloženi mnogoterosti? Odgovor je da (ampak lokalno, ker bi lahko prišlo do problemov s samopresečišči).

2.3 Ukrivljenost

2.3.1 Druga fundamentalna forma

Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev s parametrizacijo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X$. Intuitivno je ukrivljenost ploskve X v točki $r(u, v) = m \in X$ ‘hitrost’ oddaljevanja X od tangentne ravnine $T_m X$. Naj bo n normala na ravnino $T_m X$ v točki m . Naj bo točka $r(u', v') = r(u + \Delta u, v + \Delta v)$ blizu točke $m = r(u, v)$. Izmeriti hočemo razdaljo od točke $r(u', v')$ do $T_m X$. Dobimo

$$d = \langle n, r(u', v') - r(u, v) \rangle.$$

Ker sta spremembi Δu in Δv majhni, naredimo Taylorjev razvoj, ter izrazimo

$$r(u', v') - r(u, v) = r_u \Delta u + r_v \Delta v + \frac{1}{2} (r_{uu}(\Delta u)^2 + 2r_{uv}\Delta u \Delta v + r_{vv}(\Delta v)^2) + \dots$$

Ker vemo tudi, da je normala pravokotna na vektorja r_u in r_v , lahko zapišemo

$$d = \langle n, r(u', v') - r(u, v) \rangle \approx \underbrace{\langle r_u, n \rangle}_{=0} \Delta u + \underbrace{\langle r_v, n \rangle}_{=0} \Delta v + \frac{1}{2} (\langle r_{uu}, n \rangle (\Delta u)^2 + 2\langle r_{uv}, n \rangle \Delta u \Delta v + \langle r_{vv}, n \rangle (\Delta v)^2).$$

oziroma

$$d \approx \frac{1}{2} (\langle r_{uu}, n \rangle (\Delta u)^2 + 2\langle r_{uv}, n \rangle \Delta u \Delta v + \langle r_{vv}, n \rangle (\Delta v)^2).$$

Zdaj lahko smiselno definiramo drugo fundamentalno formo ploskve.

Definicija 2.22. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev s parametrizacijo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X$. Druga fundamentalna forma X v točki $m = r(u, v)$ je podana z matriko

$$\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(u, v)} = \begin{pmatrix} L(u, v) & M(u, v) \\ M(u, v) & N(u, v) \end{pmatrix},$$

kjer so $L, M, N : V \rightarrow \mathbb{R}$ funkcije s predpisi

$$\begin{aligned} L(u, v) &= \langle r_{uu}(u, v), n(u, v) \rangle \\ M(u, v) &= \langle r_{uv}(u, v), n(u, v) \rangle \\ N(u, v) &= \langle r_{vv}(u, v), n(u, v) \rangle \end{aligned}$$

Opomba. Za drugo fundamentalno formo je res nujen skalarni produkt v \mathbb{R}^3 (za razliko od prve fundamentalne forme, ki v vsaki točki določa drug skalarni produkt).

Razmislili smo, da velja ocena razdalje

$$d(u, v, \Delta u, \Delta v) \approx \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \Delta u & \Delta v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(u, v)} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{pmatrix}.$$

Od te točke naprej predpostavljamo, da so vse krivulje naravno parametrizirane. Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ gladka krivulja. Spomnimo se definicije fleksijske ukrivljenosti krivulje, velja $\kappa(t) = \|\ddot{\gamma}(t)\|$. V nadaljevanju bomo razdelili vektor pospeška na geodetsko in normalno komponentno, torej

$$\ddot{\gamma}(t) = \ddot{\gamma}_g(t) + \ddot{\gamma}_n(t).$$

Zato najprej definirajmo geodetsko in normalno ukrivljenost krivulje.

Definicija 2.23. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev s parametrizacijo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X$ in naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ gladka krivulja. Definirajmo normalo na krivuljo γ kot preslikavo $n_\gamma : [a, b] \rightarrow TX$ s predpisom

$$n_\gamma(t) = \frac{r_u(u(t), v(t)) \times r_v(u(t), v(t))}{\|r_u(u(t), v(t)) \times r_v(u(t), v(t))\|}.$$

Potem definiramo normalno in geodetsko ukrivljenost krivulje γ kot

$$\begin{aligned}\kappa_n(t) &= \langle \ddot{\gamma}(t), n_\gamma(t) \rangle, \\ \kappa_g(t) &= \langle \ddot{\gamma}(t), n_\gamma(t) \dot{\gamma}(t) \rangle.\end{aligned}$$

Zdaj si pogledajmo, kako se izraža normalna ukrivljenost krivulje s pomočjo druge fundamentalne forme.

Izrek 2.24.

Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ gladka krivulja, podana s parametrizacijo $\gamma(t) = r(u(t), v(t))$. Tedaj lahko njeno normalno ukrivljenost izračunamo po formuli

$$\kappa_n(t) = \begin{pmatrix} \dot{u}(t) & \dot{v}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(u(t), v(t))} \begin{pmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{v}(t) \end{pmatrix}.$$

Dokaz: Najprej zapišemo prva dva odvoda

$$\begin{aligned}\dot{\gamma}(t) &= r_u \dot{u} + r_v \dot{v}, \\ \ddot{\gamma}(t) &= r_u \ddot{u} + r_v \ddot{v} + r_{uu} \dot{u}^2 + 2r_{uv} \dot{u} \dot{v} + r_{vv} \dot{v}^2.\end{aligned}$$

Od tod dobimo

$$\begin{aligned}\kappa_n &= \langle \ddot{\gamma}, n \rangle = \langle r_{uu}, n \rangle \dot{u}^2 + 2\langle r_{uv}, n \rangle \dot{u} \dot{v} + \langle r_{vv}, n \rangle \dot{v}^2 \\ &= L \dot{u}^2 + 2M \dot{u} \dot{v} + N \dot{v}^2 \\ &= \begin{pmatrix} \dot{u} & \dot{v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

□

Vsako funkcijo normalne ukrivljenosti lahko razširimo na tangentno ravnino na naslednji način.

Definicija 2.25. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev s parametrizacijo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X$ in naj bo $\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}$ druga fundamentalna forma ploskve X glede na r . Naj bo $r(u_0, v_0) = m \in X$. Vemo, da je $\{r_u(u_0, v_0), r_v(u_0, v_0)\}$ baza za tangentno ravnino $T_m X$, zato lahko vsak vektor v njej enolično zapišemo v obliki $\xi r_u(u_0, v_0) + \eta r_v(u_0, v_0)$. Potem obstaja funkcija

$$\begin{aligned}\kappa_n : T_m X &\longrightarrow \mathbb{R} \\ \kappa_n(\xi r_u(u_0, v_0) + \eta r_v(u_0, v_0)) &= \begin{pmatrix} \xi & \eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(r(u_0, v_0))} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

Včasih zlorabimo notacijo in pišemo

$$\kappa_n(\xi, \eta) := \kappa_n(\xi r_u(u_0, v_0) + \eta r_v(u_0, v_0)).$$

Opomba. Če je $(\xi, \eta) = (\dot{u}, \dot{v})$ in je γ naravno parametrizirana krivulja, potem par (ξ, η) leži na enotski krožnici v ravnini $T_m X$. V \mathbb{R}^3 je to res običajna krožnica glede na evklidski skalarni produkt, v koordinatah (ξ, η) pa jo določa enačba

$$E\xi^2 + 2F\xi\eta + G\eta^2 = 1.$$

Definicija 2.26. Ekstrema funkcije $\kappa_n : T_m X \rightarrow \mathbb{R}$, skršene na enotsko sfero $E\xi^2 + 2F\xi\eta + G\eta^2 = 1$, imenujemo glavni ukrivljenosti ploskve X v točki m . Označimo ju s κ_1 in κ_2 .

Opomba. Ali minimum označimo s κ_1 ali κ_2 , je stvar dogovora. Ekstrema obstajata, ker je krožnica kompakt, torej ima zvezna funkcija κ_n na njej minimum in maksimum.

Definicija 2.27. Tangetna vektorja $\xi_1 r_u + \eta_1 r_v, \xi_2 r_u + \eta_2 r_v \in T_m X$, ki sta (različna) ekstrema funkcije κ_n , se imenujeta glavni smeri.

Opomba. Kmalu bomo dokazali, da sta glavni smeri res kvečjem dve, zato je takšna definicija upravičena (če bi bila κ_n poljubna zvezna funkcija, bi lahko imela več ekstremov).

Definicija 2.28. Gaussova ukrivljenost ploskve X v točki m je podana s produktom

$$\kappa(m) = \kappa_1(m)\kappa_2(m).$$

Opomba. Izkazalo se bo, da je Gaussova ukrivljenost izometrična varianta in da je tesno povezana z Eulerjevo karakteristiko.

Definicija 2.29. Povprečna ukrivljenost ploskve X v točki m je podana s formulo

$$H(m) = \frac{1}{2}(\kappa_1(m) + \kappa_2(m)).$$

Z naslednjim izrekom bomo utemeljili, da sta glavni ukrivljenosti res kvečjem dve.

Izrek 2.30.

Glavni ukrivljenosti ploskve X v točki $m \in X$ sta ničli kvadratne enačbe

$$\det \left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(m)} - \lambda \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(m)} \right) = 0.$$

Dokaz: Ekstrema λ_1, λ_2 sta vezana ekstrema za funkcijo $\kappa_n : T_m X \rightarrow \mathbb{R}$. Zaradi homeomorfizma $T_m X \approx \mathbb{R}^2$ lahko identificiramo elemente $T_m X$ s pari (ξ, η) . Naša krožnica je določena z vezjo $\|(\xi, \eta)\| = 1$ oziroma ekvivalentno $\|(\xi, \eta)\|^2 = 1$. Torej iščemo ekstrema funkcije

$$\kappa_n(\xi, \eta) = \begin{pmatrix} \xi & \eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = L\xi^2 + 2M\xi\eta + N\eta^2$$

pri vezi

$$g(\xi, \eta) = \|(\xi, \eta)\|^2 = \begin{pmatrix} \xi & \eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = E\xi^2 + 2F\xi\eta + G\eta^2 = 1.$$

Zdaj se s pomočjo analize 2 spomnimo, da se vezane ekstreme išče s pomočjo Lagrangeeve funkcije

$$\kappa_n(\xi, \eta) - \lambda g(\xi, \eta).$$

Da bo skalar λ določal ekstrem, mora veljati zveza

$$\text{grad}(\kappa_n(\xi, \eta) - \lambda g(\xi, \eta)) = 0.$$

Zaradi linearnosti gradienta je to ekvivalentno zvezi

$$\text{grad}(\kappa_n(\xi, \eta)) - \lambda \text{grad}(g(\xi, \eta)) = 0.$$

Zdaj poračunamo gradienta, da dobimo

$$\begin{aligned} \text{grad}(\kappa_n(\xi, \eta)) &= \begin{pmatrix} \frac{\partial \kappa_n}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \kappa_n}{\partial \eta} \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}, \\ \text{grad}(g(\xi, \eta)) &= \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial \xi} \\ \frac{\partial g}{\partial \eta} \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Torej rešujemo enačbo

$$\left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Ta enačba ima netrivialne rešitve natanko tedaj, ko je

$$\det \left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \right) = 0.$$

Denimo, da imamo neki rešitvi λ_1, λ_2 . Potem obstajata vektorja $(\xi_1, \eta_1)^T, (\xi_2, \eta_2)^T$, da je za $i = 1, 2$

$$\left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} - \lambda_i \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Če vzamemo enotska vektorja $(\xi_1, \eta_1)^T, (\xi_2, \eta_2)^T$, in množimo i -to zgornjo enačbo z leve z (ξ_i, η_i) , dobimo

$$\underbrace{(\xi_i \ \eta_i) \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix}}_{\kappa_n(\xi, \eta)} - \underbrace{\lambda_i (\xi_i \ \eta_i) \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix}}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Desni člen je enak 1, ker smo izbrali enotska vektorja glede na skalarni produkt, porojen s to matriko. Preostaneta nam torej enačbi

$$\kappa_n(\xi_i, \eta_i) = \lambda_i, \quad i = 1, 2.$$

Točki (ξ_i, η_i) sta vezana ekstrema funkcije κ_n pri vezi $g = 1$. Torej sta to ničli kvadratnega polinoma

$$\det \left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \right) = 0.$$

□

Definicija 2.31. Posplošeni lastni problem ali relativni lastni problem je lastni problem oblike

$$A(\vec{v}) = \lambda B(\vec{v}).$$

Če je $B = Id$, potem dobimo običajni lastni problem

$$A(\vec{v}) = \lambda \vec{v}.$$

Iz dokaza prejšnjega izreka je razvidno, da sta κ_1 in κ_2 lastni vrednosti matrike

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix},$$

glavni smeri $(\xi_1, \eta_1)^T, (\xi_2, \eta_2)^T$ pa sta njena lastna vektorja. Tej matriki včasih rečemo Weingartnova matrika.

Izrek 2.32.

Za Gaussovo ukrivljenost $\kappa : X \rightarrow \mathbb{R}$ velja zveza

$$\kappa(m) = \frac{(LN - M^2)(m)}{(EG - F^2)(m)}.$$

Dokaz: Po definiciji je $\kappa(m) = \kappa_1(m)\kappa_2(m)$. Razmislili smo že, da sta glavni ukrivljenosti lastni vrednosti matrike

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(m)}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(m)},$$

torej bo njun produkt (ki je natanko Gaussova ukrivljenost) enak njeni determinanti. Torej

$$\kappa(m) = \kappa_1(m)\kappa_2(m) = \det \left(\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(m)}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(m)} \right) = \frac{(LN - M^2)(m)}{(EG - F^2)(m)}.$$

□

Izrek 2.33.

Za povprečno ukrivljenost velja zveza

$$H(m) = \frac{1}{2} \frac{(LF - 2MF + NE)(m)}{(EG - F^2)(m)}.$$

Dokaz: Podobno kot v prejšnjem dokazu uporabimo dejstvo, da sta glavni ukrivljenosti lastni vrednosti matrike

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(m)}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(m)},$$

kar pomeni, da bo njuna vsota enaka sledi te matrike. Imamo torej

$$\begin{aligned} H(m) &= \frac{1}{2}(\kappa_1(m) + \kappa_2(m)) = \frac{1}{2} \text{Tr} \left(\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}_{(m)}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(m)} \right) \\ &= \frac{1}{2(EG - F^2)(m)} \text{Tr} \left(\begin{pmatrix} G & -F \\ -F & E \end{pmatrix}_{(m)} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}_{(m)} \right) \\ &= \frac{1}{2(EG - F^2)(m)} \text{Tr} \left(\begin{pmatrix} LG - MF & * \\ * & -MF + NE \end{pmatrix}_{(m)} \right) \\ &= \frac{1}{2} \frac{(LF - 2MF + NE)(m)}{(EG - F^2)(m)}. \end{aligned}$$

□

Opomba. Zgornja izreka bi lahko dokazali drugače z uporabo dejstva, da imata polinoma $ax^2 + bx + c$ in $x^2 + \frac{b}{a}x + \frac{c}{a}$ isti ničli. Glavni ukrivljenosti sta ničli kvadratne enačbe

$$p(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c = \det \left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \right) = 0.$$

Po Vietovih pravilih pa vemo, da je produkt ničel enak izrazu

$$\kappa_1 \kappa_2 = \frac{c}{a}.$$

Očitno velja, da je

$$p(0) = c = \det \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}.$$

Po drugi strani pa lahko dobimo

$$a = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda^2} p(\lambda) = \dots = \det \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}.$$

Torej bo res

$$\kappa = \kappa_1 \kappa_2 = \frac{c}{a} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}.$$

Po drugi strani pa imamo Vietovo pravilo za vsoto ničel, torej $\kappa_1 + \kappa_2 = -\frac{b}{a}$. Če poračunamo b po predpisu za polinom p , dobimo natanko izraz povprečne ukrivljenosti iz prejšnjega izreka.

Izrek 2.34.

Glavni smeri $(\xi_1, \eta_1)_{(m)}^T, (\xi_2, \eta_2)_{(m)}^T$ sta si pravokotni v $T_m X$.

Dokaz: Dokaz poteka prek sklepa o sebi adjungiranosti preslikave

$$\begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}.$$

Najprej za večjo preglednost vpeljimo nove oznake

$$A := \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}, \quad B := \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix}, \quad C := \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} = A^{-1}B.$$

Ker vemo, da za sebi adjungirane preslikave (ki imajo različne lastne vektorje) velja, da morajo biti ti med seboj pravokotni, je dovolj dokazati sebi adjungiranost preslikave C . Torej za vsaka vektroja $\vec{v}, \vec{w} \in T_m X$ dokazujemo

$$\langle C\vec{v}, \vec{w} \rangle = \langle \vec{v}, C\vec{w} \rangle.$$

Pri tem se zavedajmo, da je za poljubna vektorja skalarni produkt določen s pomočjo prve fundamentalne forme. V bazi $\{r_u, r_v\}$ je podan z

$$\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle = \vec{v}^T A \vec{w}.$$

Torej imamo za vsaka $\vec{v}, \vec{w} \in T_m X$ enačbi

$$\begin{aligned} \langle C\vec{v}, \vec{w} \rangle &= (C\vec{v})^T A \vec{w} = \vec{v}^T C^T A \vec{w}, \\ \langle \vec{v}, C^* \vec{w} \rangle &= \vec{v}^T A C^* \vec{w}. \end{aligned}$$

To pomeni, je zahtevi $C = C^*$ ekvivalentno $C^T A = A C^*$, oziroma $C^T A = A C$, kar pokažemo z računom

$$C^T A = (A^{-1}B)^T A = B^T A^{-T} A = B A^{-1} A = B = A A^{-1} B = A C.$$

□

2.3.2 Interpretacija glavne ukrivljenosti

Intuitivno je ukrivljenost krivulje hitrost spreminjanja tangente. Hkrati pa velja, da čimbolj je krivulja ukrivljena, tem hitreje normala spreminja smer. Podoben pojav lahko opazujemo tudi na ploskvah, bolj kot je ploskev ukrivljena, hitreje se spreminja normala. Naj bo torej točka $m \in X$, ter $U \subseteq X$ njena okolica, difeomorfna disku. Poglejmo si, kaj se dogaja z normalo po točkah U .

Definicija 2.35. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev. Preslikava, ki točki priredi enotsko normalo,

$$\begin{aligned}\tilde{n} : X &\longrightarrow S^2 \\ m &\longmapsto n(m) \in (T_m X)^\perp; \|n(m)\| = 1,\end{aligned}$$

se imenuje Gaussova preslikava.

Povprečno intenzivnost spreminjanja normale na U lahko merimo s kvocientom površin

$$\frac{A(\tilde{n}_*(U))}{A(U)},$$

kjer je $A(U)$ ploščina okolice $U \subseteq X$, $A(\tilde{n}(U))$ pa je ploščina slike

$$\tilde{n} : U \subseteq X \rightarrow \tilde{n}_*(U) \subseteq S^2.$$

Predpostavimo, da je preslikava $n = \tilde{n} \circ r : V \rightarrow S^2$

$$\begin{array}{ccccc} V & \xrightarrow{r} & U \subseteq X & \xrightarrow{\tilde{n}} & \tilde{n}_*(U) \subseteq S^2 \\ & & \searrow n & \nearrow & \end{array}$$

parametrizacija ploskve $\tilde{n}_*(U) \subseteq S^2$. Po definiciji površine ploskve veljata izraza

$$\begin{aligned}A(U) &= \int_V \|r_u \times r_v\| \, du \, dv, \\ A(\tilde{n}_*(U)) &= \int_V \|n_u \times n_v\| \, du \, dv.\end{aligned}$$

Vemo tudi, da velja

$$\|n_u \times n_v\| = \sqrt{\langle n_u \times n_v, n_u \times n_v \rangle}$$

in hkrati (TODO: zakaj?)

$$\|n_u \times n_v\| = \langle n, n_u \times n_v \rangle = \left\langle \frac{r_u \times r_v}{\|r_u \times r_v\|}, n_u \times n_v \right\rangle. \quad (1)$$

Iz enačbe (1) sledi po Lagrangevem pravilu za dvojni vektorski produkt še

$$\|n_u \times n_v\| = \frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} (\langle r_u, n_u \rangle \langle r_v, n_v \rangle - \langle r_u, n_v \rangle \langle r_v, n_u \rangle). \quad (2)$$

Če zdaj enačbo $\langle r_u, n \rangle = 0$ paricalno odvajamo po u , dobimo

$$\langle r_{uu}, n \rangle + \langle r_u, n_u \rangle = 0 \implies \langle r_u, n_u \rangle = -L,$$

če pa jo odvajamo po v , dobimo

$$\langle r_{uv}, n \rangle + \langle r_u, n_v \rangle = 0 \implies \langle r_u, n_v \rangle = -M$$

Podobno z odvajanjem enačbe $\langle r_v, n \rangle = 0$ dobimo preostali dve enačbi

$$\begin{aligned}\langle r_v, n_u \rangle &= -M, \\ \langle r_v, n_v \rangle &= -N.\end{aligned}$$

Od tod pa iz enačbe (2) sledi

$$\|n_u \times n_v\| = \frac{LN - M^2}{\sqrt{EG - F^2}}.$$

S pomočjo te izražave lahko zapišemo

$$\frac{A(\tilde{n}(U))}{A(U)} = \frac{\int_V \|n_u \times n_v\| du dv}{\int_V \|r_u \times r_v\| du dv} = \frac{\int_V \frac{LN-M^2}{\sqrt{EG-F^2}} du dv}{\int_V \sqrt{EG-F^2} du dv}.$$

Od tod pa s pomočjo izreka o povprečni vrednosti in zveznosti funkcij dobimo, da je

$$\lim_{V \rightarrow (u_0, v_0)} \frac{A(\tilde{n}(U))}{A(U)} = \frac{(LN - M^2)(m)}{(EG - F^2)(m)} = \kappa(m).$$

2.4 Ploščate ploskve

Definicija 2.36. Ploskev X je ploščata, če je njena Gaussova ukrivljenost $\kappa = 0$.

Izrek 2.37.

Ploskev X je ploščata, če je del stožca, valja ali tangentno premonosne ploskve.

Posledica 2.38. Ploskev X je ploščata natanko tedaj, ko je izometrična kosu ravnine.

Za dokaz tega izreka bomo potrebovali naslednji dve lemi.

Lema 2.39. Naj bo X poljubna ploskev. Tedaj obstaja za X parametrizacija $s : V \rightarrow X$ ter funkciji $\lambda, \mu : V \rightarrow \mathbb{R}$, za kateri velja

$$\begin{aligned} s_u(u, v) &= \lambda(u, v)e_1(u, v), \\ s_v(u, v) &= \mu(u, v)e_2(u, v). \end{aligned}$$

Preslikavi $e_1, e_2 : V \rightarrow TX$ označujeta glavni smeri ploskve X glede na parametrizacijo s .

Dokaz: Naj bo $s : V_1 \rightarrow X$ parametrizacija ploskve X . Iskano parametrizacijo bomo dobili kot reparametrizacijo s . Lokalno lahko parametrizacijo $s = s(u, v), (u, v) \in V_1$ podamo kot parametrizacijo $s(u, v) = s(\xi, \eta), (\xi, \eta) \in V$. To nam poda funkciji $s(u, v) = s(\xi(u, v), \eta(u, v))$ ter $s(\xi, \eta) = s(u(\xi, \eta), v(\xi, \eta))$. Iz prve enačbe po verižnem pravilu dobimo

$$\begin{aligned} s_u &= \frac{\partial \xi}{\partial u} s_\xi + \frac{\partial \eta}{\partial u} s_\eta, \\ s_v &= \frac{\partial \xi}{\partial v} s_\xi + \frac{\partial \eta}{\partial v} s_\eta. \end{aligned}$$

Zdaj zapišemo glavni smeri kot linearni kombinaciji vektorjev s_u in s_v .

$$\begin{aligned} e_1 &= \alpha s_u + \beta s_v, \\ e_2 &= \gamma s_u + \delta s_v. \end{aligned}$$

V ti kombinaciji vstavimo izražavi s_u in s_v , da dobimo

$$\begin{aligned} e_1 &= \alpha \left(\frac{\partial \xi}{\partial u} s_\xi + \frac{\partial \eta}{\partial u} s_\eta \right) + \beta \left(\frac{\partial \xi}{\partial v} s_\xi + \frac{\partial \eta}{\partial v} s_\eta \right), \\ e_2 &= \gamma \left(\frac{\partial \xi}{\partial u} s_\xi + \frac{\partial \eta}{\partial u} s_\eta \right) + \delta \left(\frac{\partial \xi}{\partial v} s_\xi + \frac{\partial \eta}{\partial v} s_\eta \right). \end{aligned}$$

Od tod izrazimo glavni smeri kot lineani kombianciji vektorjev s_ξ, s_η .

$$\begin{aligned} e_1 &= \left(\frac{\partial \xi}{\partial u} \alpha + \frac{\partial \xi}{\partial v} \beta \right) s_\xi + \left(\frac{\partial \eta}{\partial u} \alpha + \frac{\partial \eta}{\partial v} \beta \right) s_\eta, \\ e_2 &= \left(\frac{\partial \xi}{\partial u} \gamma + \frac{\partial \xi}{\partial v} \delta \right) s_\xi + \left(\frac{\partial \eta}{\partial u} \gamma + \frac{\partial \eta}{\partial v} \delta \right) s_\eta. \end{aligned}$$

To lahko bolj kompaktno zapišemo kot

$$e_1 = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix},$$

$$e_2 = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix}.$$

Zdaj se vprašamo, ali res potrebujemo funkciji λ, η ? Če bi obstajala parametrizacija s , za katero bi veljalo $s_\xi = e_1$, $s_\eta = e_2$, potem bi veljalo

$$e_1 = 1 \cdot s_\xi + 0 \cdot s_\eta,$$

$$e_2 = 0 \cdot s_\xi + 1 \cdot s_\eta.$$

Torej bi morala biti v bazi $\{s_\xi, s_\eta\}$ e_1 in e_2 standardna enotska vektorja, torej

$$e_1 = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$e_2 = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

To lahko zapišemo z eno samo enačbo kot

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Označimo sedaj

$$\begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix}^{-1},$$

da dobimo pogoj

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix}.$$

Vrstici leve matrike sta gradienta funkcij ξ in η .

$$\text{grad } \xi(u, v) = (A(u, v), C(u, v)),$$

$$\text{grad } \eta(u, v) = (B(u, v), D(u, v)).$$

Od tod pa očitno sledi, da morata biti polji $(A(u, v), C(u, v))$ in $(B(u, v), D(u, v))$ potencialni, kar v splošnem ni res. Zato moramo zahtevo $s_\xi = e_1$, $s_\eta = e_2$ omejiti na $s_\xi = \lambda e_1$, $s_\eta = \mu e_2$. Tako dobimo pogoj

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\mu} \end{pmatrix}.$$

Tako imamo

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial u} & \frac{\partial \xi}{\partial v} \\ \frac{\partial \eta}{\partial u} & \frac{\partial \eta}{\partial v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} A & \frac{1}{\lambda} C \\ \frac{1}{\mu} B & \frac{1}{\mu} D \end{pmatrix}.$$

Zato lahko (TODO: po izreku iz analize 3??) najdemo taki funkciji λ, μ , da bo veljalo

$$\begin{aligned} \text{grad } \xi(u, v) &= \frac{1}{\lambda(u, v)} (A(u, v), C(u, v)), \\ \text{grad } \eta(u, v) &= \frac{1}{\mu(u, v)} (B(u, v), D(u, v)). \end{aligned}$$

□

Definicija 2.40. Naj bo $X \subseteq \mathbb{R}^3$ ploskev, $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ krivulja in $\tilde{a} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ vektorsko polje. Vektorskemu polju \tilde{a} priredimo vektorsko polje vzdolž krivulje γ s predpisom $a(u) := \tilde{a}(\gamma(u))$. Ploskev X je premonosna ploskev, podana s krivuljo γ in vektorskim poljem a vzdolž krivulje γ , za katero obstaja parametrizacija

$$\rho(u) = \gamma(u) + va(u).$$

Če za polje a velja $a(u) = \dot{\gamma}(u)$, potem je ploskev tangentno premonosna.

Lema 2.41. Naj bo X premonosna ploskev, podana s krivuljo $\gamma(u)$ in vektorskim poljem $a(u)$ vzdolž krivulje $\gamma(u)$. Ploskev X je tangentno premonosna natanko tedaj, ko velja pogoj na mešani produkt

$$[\gamma'(u), a(u), a'(u)] = 0.$$

Dokaz: Dokazati je treba samo implikacijo v desno smer. Naj bo X tangentno premonosna ploskev z naravno parametrizacijo

$$r(u, v) = \gamma(u) + va(u).$$

Dokazati moramo, da obstaja funkcija ρ v X , za katero velja

$$\rho'(u) = g(u)a(u).$$

Ker bi morala krivulja $\rho(u)$ ležati v premonosni ploskvi X , bi morala obstajati neka funkcija f , za katero bi veljalo

$$\rho(u) = \gamma(u) + f(u)a(u).$$

Torej bo funkcija ρ obstajala, če obstajata funkciji f in g , da velja naslednji pogoj

$$\rho' = \gamma' + f'a + fa' \implies \gamma' = (g - f')a - fa'.$$

Iz pogoja na mešani produkt vemo, da so vektorji γ', a, a' koplanarni. Zato lahko γ' izrazimo kot linearno kombinacijo ostalih dveh, torej obstajata funkciji α, β , da velja

$$\gamma' = \alpha a + \beta a'.$$

Rešitev zgornjih dveh sistemov enačb sta funkciji

$$\begin{aligned} f &= -\beta, \\ g &= \alpha + \beta', \end{aligned}$$

kar pomeni, da funkcija ρ obstaja, torej je X res tangentno premonosna ploskev.

□

Opomba. V zgornjem dokazu bi lahko namesto

$$r(u, v) = \gamma(u) + v\alpha(u)$$

pisali

$$r(u, v) = \gamma(u) + \lambda(v)\alpha(u)$$

za neko monotono funkcijo λ . Monotonost bi privzeli zato, da bi dobili smiselno parametrizacijo.

Zdaj se lotimo še dokaza izreka.

Dokaz izreka : Predpostavimo, da za vsak $m \in X$ velja $\kappa(m) = 0$, kar brez škode za splošnost implicira $\kappa_2(m) = 0$. Če bi bila za vsak $m \in X$ povprečna vrednost $H(m) = 0$ je X ravnina. Predpostavimo torej, da obstaja $k \in X$, da je $H(k) \neq 0$. Po lemi vemo, da obstaja parametrizacija $r(u, v) : V \rightarrow X$, za katero velja $r_u = \lambda e_1$, $r_v = \mu e_2$. Za takšno parametrizacijo velja $F = \langle r_u, r_v \rangle = \lambda\mu \langle e_1, e_2 \rangle = 0$, torej bo prva fundamentalna forma te parametrizacije enaka

$$I = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & G \end{pmatrix}.$$

Vemo pa tudi, da sta glavni ukrivljenosti rešitvi enačb

$$\det \left(\begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} - \kappa_i \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \right) = 0.$$

V našem primeru je za $i = 2$

$$\det \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} = 0 \implies LN - M^2 = 0.$$

Spomnimo se, da je normalna ukrivljenost podana s predpisom

$$\kappa_n(\xi, \eta) = \begin{pmatrix} \xi & \eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix},$$

v naši parametrizaciji pa je smer, ki pripada glavni ukrivljenosti κ_2 v bazi $\{r_u, r_v\}$, podana z $\begin{pmatrix} 0 & \alpha \end{pmatrix}^T$. Velja torej

$$\kappa_2 = \begin{pmatrix} 0 & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha \end{pmatrix} = N\alpha^2.$$

Ker lahko izberemo neničelen α , to pomeni, da je $N = 0$. Iz pogoja $LN - M^2 = 0$ dobimo še $M = 0$, torej za drugo fundamentalno formo naše parametrizacije X velja

$$II = \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Zdaj trdimo, da je $(e_2)_v = 0$. Zato bomo vektorsko polje $(e_2)_v$ razvili po bazi $\{e_1, e_2, n\}$. Najprej bomo po tej bazi razvili vektorja n_u in n_v . Pri tem se zavedajmo, da je $e_1 = \frac{r_u}{\|r_u\|}$ in $e_2 = \frac{r_v}{\|r_v\|}$. Dobimo

$$n_u = \langle n_u, e_1 \rangle e_1 + \langle n_u, e_2 \rangle e_2 + \langle n_u, n \rangle n.$$

Iz zveze $\langle n, r_u \rangle = 0$ s parcialnim odvajanjem po u dobimo

$$\langle n_u, r_u \rangle = -\langle n, r_{uu} \rangle = -L.$$

Torej velja

$$\langle n_u, e_1 \rangle = -\frac{1}{\|r_u\|} \langle n, r_{uu} \rangle = -\frac{L}{\sqrt{E}}.$$

Na enak način dobimo

$$\langle n_u, e_2 \rangle = -\frac{1}{\|r_v\|} \langle n, r_{uv} \rangle = -\frac{M}{\sqrt{G}} = 0.$$

Iz parcialnega odvajanja zveze $\langle n, n \rangle = 1$ po u pa dobimo še $\langle n_u, n \rangle = 0$. Torej velja, da je

$$n_u = -\frac{L}{\sqrt{E}}e_1 \implies e_1 = -\frac{\sqrt{E}}{L}n_u.$$

Z enakim postopkom dobimo, da je v tej bazi $n_v = 0$. Tam je namreč $\langle n_v, r_v \rangle = -N = 0$. Zdaj izrazimo še vektor $(e_2)_v$ po tej bazi. Po enakih idejah kot prej dobimo

$$\begin{aligned}\langle (e_2)_v, e_1 \rangle &= -\frac{\sqrt{E}}{L}\langle (e_2)_v, n_u \rangle = \frac{\sqrt{E}}{L}\langle e_2, (n_v)_u \rangle = 0. \\ \langle (e_2)_v, e_2 \rangle &= 0 \\ \langle (e_2)_v, n \rangle &= (\langle e_2, n \rangle)_v - \langle e_2, n_v \rangle = 0\end{aligned}$$

Torej smo pokazali, da je $(e_2)_v = 0$. Zdaj dokažimo, da je X tangentno premonosna ploskev s premičjem, napetim na vektorsko polje e_2 . Zato si oglejmo krivulje $v \mapsto r(u_0, v)$, kjer je točka u_0 fiksna. V naši parametrizaciji velja, da je $r_v = \mu e_2$. Zato je

$$r_{vv} = \mu_v e_2 + \underbrace{\mu (e_2)_v}_0 = \mu_v e_2.$$

To pomeni, da bosta v vsaki točki krivulje $v \mapsto r(u_0, v)$ vektorja hitrosti in pospeška vzporedna. Torej bo ta krivulja premica. Naj bo sedaj $\gamma(u) = r(u, v_0)$. Naša ploskev je premonosna, lahko jo parametriziramo s parametrizacijo

$$r(u, v) = \gamma(u) + f(v) \underbrace{r_v(u, v_0)}_{a(u)}.$$

Zdaj izračunajmo mešani produkt

$$\left[\frac{\partial \gamma}{\partial u}, a, \frac{\partial a}{\partial u} \right] = [r_u, r_v, r_{uv}] = \langle r_u \times r_v, r_{uv} \rangle = \|r_u \times r_v\| \langle n, r_{uv} \rangle = \|r_u \times r_v\| \underbrace{M}_0 = 0.$$

Po lemi sledi, da je X tangentno premonosna ploskev. □

Opomba. Gaussova ukrivljenost krogle z radijem R je $\frac{1}{R^2}$. To ustreza naši intuiciji, da je ping pong žogica bolj ukrivljena od Zemlje.

3 Geodetske krivulje

Definicija 3.1. Naj bo X ploskev in $m_1, m_2 \in X$. Naj bo Γ družina krivulj $\gamma_i : [a, b] \rightarrow X$, za katere velja $\gamma_i(a) = m_1$ in $\gamma_i(b) = m_2$. Krivulja $\gamma \in \Gamma$ je geodetska krivulja, če je najkrajša krivulja iz družine Γ .

Definicija 3.2. Naj bo X ploskev in $m_1, m_2 \in X$. Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ krivulja, za katero velja $\gamma(a) = m_1$ in $\gamma(b) = m_2$. Potem preslikavo

$$\mathcal{L}(\gamma) = \int_a^b \sqrt{E\dot{u}^2(u(t), v(t)) + 2F(u(t), v(t))\dot{u}\dot{v} + G(u(t), v(t))\dot{v}^2} dt$$

imenujemo dolžinski funkcional.

Naj bo sedaj

$$\mathcal{V} = \{\gamma : [a, b] \rightarrow X, \gamma \text{ gladka krivulja}, \gamma(a) = m_1, \gamma(b) = m_2\}.$$

Opomba. Takšni družini krivulj rečemo tudi variacija. Od tod pride ime "variacijski račun".

Ekstreme funkcionala $\mathcal{L} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}$ bomo iskali tako, kot iščemo ekstreme funkcij ene ali dveh spremenljivk. Kandidati za ekstreme splošne funkcije $F : \Omega \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ so stacionarne točke F , torej točke $x_0 \in \mathbb{R}^n$, da je $D_{x_0}F = 0$. Vemo pa, da bo $D_{x_0}F = 0$ natanko tedaj, ko za vsak dovolj majhen $\varepsilon > 0$ in za vsako krivuljo $\beta : [-\varepsilon, \varepsilon] \rightarrow \Omega$, za katero je $\beta(0) = x_0$, velja

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} F(\beta(t)) = (D_{x_0}F)\dot{\beta}(0) = 0.$$

Vrnimo se k funkcionalu \mathcal{L} . Ne bomo opazovali odvoda \mathcal{L} , temveč le smerne odvode \mathcal{L} po vseh poteh, ki nas zanimajo. Krivulje γ_i v evklidskem prostoru so točke v prostoru krivulj \mathcal{V} . Zanima nas, kaj so krivulje v prostoru \mathcal{V} .

Definicija 3.3. Krivulja v prostoru krivulj \mathcal{V} je preslikava

$$\begin{aligned} \Gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) &\longrightarrow \mathcal{V} \\ s &\longmapsto \gamma_s, \end{aligned}$$

za katero za vsak $t \in [a, b]$ velja $\Gamma(t, s) := \Gamma(s)(t) = \gamma_s(t)$. Hkrati morata biti za vsak $s \in (-\varepsilon, \varepsilon)$ izpolnjena pogoja

$$\begin{aligned} \Gamma(a, s) &= m_1 = \gamma_s(a), \\ \Gamma(b, s) &= m_2 = \gamma_s(b). \end{aligned}$$

Posodobimo sedaj našo definicijo geodetke.

Definicija 3.4. Krivulja $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ je geodetska krivulja, če je stacionarna točka dolžinskega funkcionala, torej če je

$$\left. \frac{\partial}{\partial s} \right|_{s=0} \mathcal{L}(\Gamma(t, s)) = (D_\gamma \mathcal{L}) \left(\left. \frac{\partial}{\partial s} \right|_{s=0} \Gamma(t, s) \right).$$

Opomba. Zgornja enakost je nekoliko sumljiva, ker imamo na levi strani šibek odvod, na desni pa krepek.

Naj bo $\gamma(t) = r(u(t), v(t)) : [a, b] \rightarrow X$ krivulja. Potem je

$$\mathcal{L}(\gamma(t)) = \int_a^b \sqrt{E\dot{u}^2 + 2F\dot{u}\dot{v} + G\dot{v}^2} dt.$$

Naj bo $\Gamma : [a, b] \times (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow X$ pot v \mathcal{V} , torej variacija γ . To pomeni, da velja za vse $(t, s) \in [a, b] \times (-\varepsilon, \varepsilon)$ sistem enačb

$$\begin{aligned}\Gamma(t, s) &= r(u(t, s), v(t, s)) \\ u(t, s) &= u(t), \\ v(t, s) &= v(t), \\ u(a, s) &= u(a), \\ v(a, s) &= v(a), \\ u(b, s) &= u(b), \\ v(b, s) &= v(b).\end{aligned}$$

Potem imamo

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial s} \Big|_{s=0} \mathcal{L}(\Gamma(t, s)) &= \frac{\partial}{\partial s} \Big|_{s=0} \left(\underbrace{\int_a^b \sqrt{E\dot{u}^2 + 2F\dot{u}\dot{v} + G\dot{v}^2} dt}_{R(t, s)} \right)_{E=E(u, v), u=u(t, s), \dot{u}=\dot{u}(t, s), \dots} \\ &= \frac{1}{2} \int_a^b \frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} \frac{\partial}{\partial s} R(t, s) dt \\ &= \frac{1}{2} \int_a^b \left[\frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} (E_u \dot{u} u_s + 2F_u \dot{u} \dot{v} u_s + G_u u_s + E_v \dot{u}^2 v_s + 2F_v \dot{u} \dot{v} v_s + G_v \dot{v}^2 v_s) \right. \\ &\quad \left. + 2(E\dot{u}\dot{u}_s + F\dot{v}\dot{u}_s + F\dot{u}\dot{v}_s + G\dot{v}\dot{v}_s) \right] dt \\ &= \frac{1}{2} \int_a^b \frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} \left[(Eu\dot{u}^2 + F_u\dot{u}\dot{v} + G_u\dot{v}^2)u_s + (E_v\dot{u}^2 + 2F_v\dot{u}\dot{v} + G_v\dot{v}^2) \right] dt \\ &\quad + \int_a^b \frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} [(E\dot{u} + F\dot{v})\dot{u}_s + (F\dot{u} + G\dot{v})\dot{v}_s] dt = (*)\end{aligned}$$

Na tej točki velja omeniti, da če imamo podano variacijo $\Gamma(t, s) = r(u(t, s), v(t, s))$, potem tangento podaja predpis

$$\frac{\partial}{\partial s}(u(t, s), v(t, s)) = (u_s(t, s), v_s(t, s)).$$

To pomeni, da bomo morali v zgornjem izrazu dobiti $(u_s(t, s), v_s(t, s))$. Nadaljujemo s per partesom:

$$\begin{aligned}(*) &= \frac{1}{2} \int_a^b \frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} \left[(Eu\dot{u}^2 + F_u\dot{u}\dot{v} + G_u\dot{v}^2)u_s + (E_v\dot{u}^2 + 2F_v\dot{u}\dot{v} + G_v\dot{v}^2) \right] v_s dt \\ &\quad - \int_a^b \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} (E\dot{u} + F\dot{v}) \right) u_s + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\sqrt{R(t, s)}} (F\dot{u} + G\dot{v}) \right) v_s dt.\end{aligned}$$

Glede na začetne pogoje vemo, da mora biti $u_s(a, s) = u_s(b, s) = 0$, zato bo prvi celoten prvi del izraza enak 0. TODO: Tukaj nisem prepričan, da je vse prav, kot smo pisali. Bom pregledal čez počitnice.

...

Pridemo do tega, da je krivulja $\gamma(t)$ stacionarna točka funkcionala $\mathcal{L} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}$, če je za vsak par (t, s)

$$\frac{\partial}{\partial s} \mathcal{L}(\Gamma(t, s)) = 0.$$

To formuliramo z naslednjim izrekom, ki je ena izmed osnovnih variant osnovnega izreka o variacijskem računu.

Izrek 3.5.

Naj bosta funkciji $P, Q : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ podani s predpisi

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{1}{2}R^{-\frac{1}{2}}(E_u\dot{u}^2 + 2F_u\dot{u}\dot{v} + G_u\dot{v}^2) - \frac{d}{dt}(R^{-\frac{1}{2}}(E\dot{u} + F\dot{v})), \\ Q(t) &= \frac{1}{2}R^{-\frac{1}{2}}(E_v\dot{u}^2 + 2F_v\dot{u}\dot{v} + G_v\dot{v}^2) - \frac{d}{dt}(R^{-\frac{1}{2}}(F\dot{u} + G\dot{v})). \end{aligned}$$

Naj bo $\Gamma(t) = (u(t, s), v(t, s)) : [a, b] \times (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}^2$ variacija, torej veljajo naj ustrezni pogoji na u in v . Potem velja enakost

$$\int_a^b \left(P(t) \frac{\partial u}{\partial s}(t, s) + Q(t) \frac{\partial v}{\partial s}(t, s) \right) dt = 0$$

natanko tedaj, ko je $P(t) = 0$ in $Q(t) = 0$.

Dokaz: Dokazujemo s protislovjem. Recimo, da obstaja $t_0 \in (a, b)$, da je $P(t_0) \neq 0$. Brez škode za splošnost lahko privzamemo $P(t_0) = c > 0$. Ker je P zvezna, obstaja $\delta > 0$, da je $P(t) > \frac{c}{2}$ za vsak $t \in (t_0 - \delta, t_0 + \delta)$. Naj bo

$$(u(t, s), v(t, s)) = (u(t) + s\varphi(t), v(t)),$$

kjer je φ testna funkcija, torej velja $\varphi(t) > 0$ na $(t_0 - \delta, t_0 + \delta)$ ter $\varphi(t) = 0$ na $[a, b] \setminus [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$. Potem veljata zvezi $\frac{\partial u}{\partial s}(t) = \varphi(t)$ ter $\frac{\partial v}{\partial s}(t) = 0$. Za to variacijo imamo

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(P(t) \frac{\partial u}{\partial s}(t) + Q(t) \frac{\partial v}{\partial s}(t) \right) dt &= \int_a^b P(t) \varphi(t) dt \\ &= \int_{t_0 - \delta}^{t_0 + \delta} P(t) \varphi(t) dt > \frac{c}{2} \int_{t_0 - \delta}^{t_0 + \delta} \varphi(t) dt > 0. \end{aligned}$$

S tem smo pokazali dokaz za P , za Q sledi simetrično. □

To pomeni, da morata za geodetski krivulji veljati diferencialni enačbi drugega reda

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{2}R^{-\frac{1}{2}}(E_u\dot{u}^2 + 2F_u\dot{u}\dot{v} + G_u\dot{v}^2) - \frac{d}{dt}(R^{-\frac{1}{2}}(E\dot{u} + F\dot{v})), \\ 0 &= \frac{1}{2}R^{-\frac{1}{2}}(E_v\dot{u}^2 + 2F_v\dot{u}\dot{v} + G_v\dot{v}^2) - \frac{d}{dt}(R^{-\frac{1}{2}}(F\dot{u} + G\dot{v})). \end{aligned}$$

Imenujemo jih Euler-Lagrangevi enačbi za geodetke.

Opomba. Če je $\gamma(t) = r(u(t), v(t))$ naravna parametrizacija, potem je $R = 1$ in se enačbi nekoliko poenostavita:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{2}(E_u\dot{u}^2 + 2F_u\dot{u}\dot{v} + G_u\dot{v}^2) - \frac{d}{dt}(E\dot{u} + F\dot{v}), \\ 0 &= \frac{1}{2}(E_v\dot{u}^2 + 2F_v\dot{u}\dot{v} + G_v\dot{v}^2) - \frac{d}{dt}(F\dot{u} + G\dot{v}). \end{aligned}$$

Izrek 3.6.

Naj bo $\gamma(t)$ naravno parametrizirana krivulja. Potem je $\gamma(t)$ geodetka natanko tedaj, ko je

$$\ddot{\gamma} \in (T_{\gamma(t)}X)^\perp.$$

Z drugimi besedami, odvod mora biti vedno pravokoten na tangentno ravnino.

Dokaz: Naj bo $\gamma = r(u, v)$. Potem imamo

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, \\ \ddot{\gamma} &= \ddot{u}r_u + \dot{u}^2 r_{uu} + \ddot{v}r_v + \dot{v}^2 r_{vv} + 2\dot{u}\dot{v}r_{uv}.\end{aligned}$$

Veljati morata enačbi $\langle \ddot{\gamma}, r_u \rangle = 0$, $\langle \ddot{\gamma}, r_v \rangle = 0$. Prva od teh enačb je ekvivalentna

$$\begin{aligned}\left\langle \frac{d}{dt}(\dot{u}r_u + \dot{v}r_v), r_u \right\rangle &= \frac{d}{dt} \langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, r_u \rangle - \langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, \dot{r}_u \rangle \\ &= \frac{d}{dt} \langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, r_u \rangle - \langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, \dot{u}r_{uu} + \dot{v}r_{uv} \rangle \\ &= \frac{d}{dt} \langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, r_u \rangle - \langle \dot{u}r_u + \dot{v}r_v, \dot{r}_u \rangle \\ &= \frac{d}{dt} (E\dot{u} + F\dot{v}) - (\dot{u}^2 \langle r_u, r_{uu} \rangle + \dot{u}\dot{v} \langle r_u, r_{uv} \rangle + \dot{v}^2 \langle r_v, r_{vv} \rangle) \\ &= \frac{d}{dt} (E\dot{u} + F\dot{v}) - \frac{1}{2} (E_u \dot{u}^2 + 2F_u \dot{u}\dot{v} + G_u \dot{v}^2).\end{aligned}$$

To je natanko prva Euler-Lagrangeva enačba za geodetke. Simetrično iz $\langle \ddot{\gamma}, r_v \rangle = 0$ dobimo drugo enačbo. \square

Posledica 3.7. *Naj bo $\gamma : [a, b] \rightarrow X$ naravno parametrizirana geodetka. Potem je njena geodetska ukrivljenost κ_g identično enaka 0.*

Trditev 3.8. *Geodetske krivulje lokalno obstajajo.*

Dokaz: Geodetske krivulje $\gamma(t) = r(u(t), v(t))$ so rešitve sistema Euler-Lagrangevih enačb. To je sistem dveh enačb drugega reda za par $(u(t), v(t))$. Po eksistenčnem izreku za navadne diferencialne enačbe rešitev mora nujno obstajati na dovolj majhni okolici začetne točke (u_0, v_0) . \square

Opomba. Ta eksistenčni izrek je po naravi zelo podoben eksistenčnemu izreku za Cauchyjevo nalogo, ki smo ga obdelali pri analizi.

3.1 Geodetska parametrizacija

Definicija 3.9. Naj bo X ploskev in $r : V \rightarrow X$ parametrizacija, za katero je $r(0, v)$ geodetska krivulja, hkrati pa je za vsak v_0 tudi $\gamma_{v_0}(u) = r(u, v_0)$ geodetska krivulja in velja, da je $\dot{\gamma}_{v_0} \perp r_v(0, v_0)$. Potem parametrizaciji r rečemo geodetska parametrizacija.

Trditev 3.10. *Naravna parametrizacija $r(u, v) = \gamma_v(u)$ je geodetska natanko tedaj, ko je njena prva fundamentalna forma oblike*

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & G(u, v) \end{pmatrix}.$$

Dokaz: Naj bo r naravno parametrizirana in naj bo $E = 1$. Potem velja

$$E = \langle r_u, r_u \rangle = \langle \dot{\gamma}_v, \dot{\gamma}_v \rangle = 1.$$

Dokazujemo

$$F(0, v) = 0.$$

Ker sta vektorja $\dot{\gamma}_v(0), r_v(0, v)$ pravokotna, lahko zapišemo

$$F(0, v) = \langle r_u(0, v), r_u(0, v) \rangle = \langle \dot{\gamma}_v(0), r_v(0, v) \rangle = 0.$$

Ker je geodetka $u \mapsto r(u, v_0) = \gamma_{v_0}(u)$ naravno parametrizirana geodetka, velja

$$r_{uu}(u, v_0) = \ddot{\gamma}_{v_0}(u) \in (T_{r(u, v_0)}X)^\perp.$$

V splošnem velja $r_v \in T_{r(u, v_0)}X$, torej sledi

$$\langle r_{uu}, r_v \rangle = 0.$$

Po drugi strani pa vemo, da je $E = 1$, zato lahko poračunamo

$$\langle r_u, r_{uv} \rangle = \langle r_u, r_u \rangle_v = 2\langle r_u, r_{uv} \rangle = 2E_v = 0.$$

Zdaj iz pogojev $F(0, v_0) = 0$ ter $F_u(u, v_0) = 0$ sledi $F(u, v) = 0$ za vse (u, v) . \square

Primer 3.11. Najenostavnejši primer je ploskev $X = S^2$. S pomočjo prejšnjega izreka je to očitno, saj za parametrizacijo

$$r(u, v) = (\cos u \cos v, \cos u \sin v, \sin u)$$

dobimo prvo fundamentalno formo

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos^2 u \end{pmatrix}.$$

Primer 3.12. Naj bo X rotacijska ploskev, ki jo dobimo, če okoli x -osi zavrtimo krivuljo $(f(u), \cosh(\alpha u))$, kjer je f podan z

$$f(u) = \int_0^u \sqrt{1 - \alpha^2 \sinh^2(\alpha t)} dt.$$

Po znanem postopku poračunamo prvo fundamentalno formo in dobimo rezultat

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cosh^2(\alpha u) \end{pmatrix}.$$

Ni težko opaziti, da je ta fundamentalna forma zelo podobna formi sfere. V resnici nam zgornji predpis podaja vložitev hiperbolične ravnine v prostor \mathbb{R}^3 .

3.2 Gaussov izrek (Theorema egregium)

Izrek 3.13.

Naj bo X ploskev in $\kappa : X \rightarrow \mathbb{R}$ njena Gaussova ukrivljenost. Količina κ je izrazljiva s koeficienti prve fundamentalne forme in njihovimi odvodi.

Opomba. Ta izrek z drugimi besedami pravi, da je Gaussova ukrivljenost intrinzična lastnost ploskve.

Definicija 3.14. Intrinzična količina je količina, ki ni odvisna od vložitve ploskve v prostor. Intuitivno to pomeni, da lahko takšno količino izmeri vsak prebivalec ploskve (če je količina seveda izmerljiva).

Opomba. Druga fundamentalna forma ploskve ni intrinzična, ampak ekstrinzična količina ploskve.

Dokaz Theorema egregium: Poiskali bomo način, kako izraziti κ z E, F, G in njihovimi odvodi. Naj bo $r : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow X \subseteq \mathbb{R}^3$ parametrizacija ploskve X . Izberimo par ortonormiranih vektorskih polj e_1, e_2 na X :

$$e_i(u, v) : V \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \bigsqcup_{(u, v) \in V} T_{r(u, v)}X.$$

Skalarne produkte teh dve vektorjev lahko izrazimo s Kroneckerjevo delto

$$\langle e_i, e_j \rangle_I = \delta_{ij}.$$

Naj bo $n(u, v) \in (T_{r(u, v)} X)^\perp$ enotska normala v točki $r(u, v)$. V vsaki točki je $r(u, v) = m \in X$ je trojica vektorjev $\{e_1(u, v), e_2(u, v), n(u, v)\}$ baza prostora \mathbb{R}^3 . Trdimo, da velja sistem enačb

$$\begin{aligned}(e_1)_u &= \alpha_1 e_2 + \lambda_1 n, \\ (e_1)_v &= \alpha_2 e_2 + \lambda_2 n, \\ (e_2)_u &= -\alpha_1 e_1 + \mu_1 n, \\ (e_2)_v &= -\alpha_2 e_1 + \mu_2 n.\end{aligned}$$

Pri tem so $\alpha_i, \lambda_i, \mu_i : V \rightarrow \mathbb{R}$ funkcije, odvisne od (u, v) . Ker velja $\langle e_i, e_i \rangle = 1$, sledi

$$\begin{aligned}\langle e_i, e_i \rangle_u &= 2\langle (e_i)_u, e_i \rangle = 0, \\ \langle e_i, e_i \rangle_v &= 2\langle (e_i)_v, e_i \rangle = 0.\end{aligned}$$

Velja pa tudi $\langle e_1, e_2 \rangle = 0$, iz česar po parcialnem odvajanju po u sledi

$$\langle (e_1)_u, e_2 \rangle + \langle e_1, (e_2)_u \rangle = 0,$$

oziroma

$$\alpha_1 := \langle (e_1)_u, e_2 \rangle = -\langle e_1, (e_2)_u \rangle.$$

Simetrično pokažemo s parcialnim odvajanjem po v

$$\alpha_2 = \langle (e_1)_v, e_2 \rangle = -\langle e_1, (e_2)_v \rangle.$$

Bistveni korak pri dokazovanju Gaussovega Theorema egregium bo naslednja lema.

Lema 3.15.

$$(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u = \langle (e_1)_u, (e_2)_v \rangle - \langle (e_1)_v, (e_2)_u \rangle = \lambda_1 \mu_2 - \lambda_2 \mu_1 = \frac{LN - M^2}{\sqrt{EG - F^2}}.$$

Dokaz leme: Sredinsko enakost smo že dokazali v zgornjem razmisleku. Po drugi strani pa iz istih enačb dobimo sklep

$$\begin{aligned}(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u &= \frac{\partial}{\partial u} \langle e_1, (e_2)_v \rangle - \frac{\partial}{\partial v} \langle e_1, (e_2)_u \rangle \\ &= \langle (e_1)_u, (e_2)_v \rangle + \langle e_1, (e_2)_{uv} \rangle - \langle (e_1)_v, (e_2)_u \rangle - \langle e_1, (e_2)_{uv} \rangle \\ &= \langle (e_1)_u, (e_2)_v \rangle - \langle (e_1)_v, (e_2)_u \rangle.\end{aligned}$$

V splošnem velja $\langle n, r_u \rangle = 0$. Ker je $n = e_1 \times e_2$, imamo po Lagrangeevi enakosti za skalarni produkt vektorskih produktov

$$\langle n_u \times n_v, n \rangle = \langle n_u \times n_v, e_1 \times e_2 \rangle = \langle n_u, e_1 \rangle \langle n_v, e_2 \rangle - \langle n_u, e_2 \rangle \langle n_v, e_1 \rangle = \lambda_1 \mu_2 - \lambda_2 \mu_1.$$

Pri tem zadnjo enakost dobimo prek

$$\begin{aligned}\langle n, e_1 \rangle &= 0, \quad \left(\left/ \frac{\partial}{\partial u} \right. \right) \\ \langle n_u, e_1 \rangle + \langle n, (e_1)_u \rangle &= 0, \\ \langle n_u, e_1 \rangle &= -\langle n, (e_1)_u \rangle,\end{aligned}$$

od koder iz dokazanega sistema enačb res dobimo

$$\langle n_u, e_1 \rangle \langle n_v, e_2 \rangle - \langle n_u, e_2 \rangle \langle n_v, e_1 \rangle = \lambda_1 \mu_2 - \lambda_2 \mu_1.$$

□

Privzemimo sedaj, da smo dokazali

$$(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u = \frac{LN - M^2}{\sqrt{EG - F^2}}.$$

Po drugi strani pa smo izpeljali zvezo za Gaussovo ukrivljenost

$$\kappa = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}.$$

Če nam uspe pokazati, da je izraz $(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u$ izrazljiv s koeficienti prve fundamentalne forme in njihovimi odvodi, bo Theorema egregium dokazan, saj lahko zapišemo

$$\kappa = \frac{(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u}{\sqrt{EG - F^2}}.$$

Oglejmo si Gramm-Schmidtov postopek, ki nadomesti bazo $\{r_u, r_v\}$ z bazo $\{e_1, e_2\}$.

$$\begin{aligned} e_1 &= ar_u \\ e_2 &= br_u + cr_v. \end{aligned}$$

Pri tem takoj vidimo, da je $a = \frac{1}{\sqrt{E}}$. Iz enačbe $\langle e_1, e_2 \rangle$ dobimo

$$\begin{aligned} \langle ar_u, br_u + cr_v \rangle &= abE + acF \\ &= a(bE + cF) \\ &= a\langle (b, c)^T, (E, F)^T \rangle = 0. \end{aligned}$$

To pomeni, da je vektor $(E, F)^T$ vzporeden $(c, -b)^T$, oziroma

$$\begin{aligned} b &= -\lambda F, \\ c &= \lambda E. \end{aligned}$$

Upoštevajmo še, da mora biti e_2 enotski vektor.

$$\begin{aligned} \langle e_2, e_2 \rangle &= \langle -\lambda Fr_u + \lambda Er_v, -\lambda Fr_u + \lambda Er_v \rangle \\ &= \lambda^2 EF^2 - \lambda^2 EF^2 - \lambda^2 EF^2 + \lambda^2 E^2 G \\ &= -\lambda^2 EF^2 + \lambda^2 E^2 G \\ &= \lambda^2 (E^2 G - EF^2) = \lambda^2 E(EG - F^2) = 1. \end{aligned}$$

Torej je

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{E(EG - F^2)}}.$$

To povzemimo:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{\sqrt{E}}, \\ b &= -\frac{F}{\sqrt{E(EG - F^2)}}, \\ c &= \frac{\sqrt{E}}{\sqrt{EG - F^2}}. \end{aligned}$$

Od tod dobimo

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \langle (e_1)_u, e_2 \rangle \\
&= \langle (ar_u)_u, e_2 \rangle \\
&= a \langle r_{uu}, e_2 \rangle + a_u \underbrace{\langle r_u, e_2 \rangle}_0 \\
&= ab \langle r_{uu}, r_u \rangle + ac \langle r_{uu}, r_v \rangle \\
&= \frac{1}{2} ab E_u + ac \left(F_u - \frac{1}{2} E_v \right).
\end{aligned}$$

Podobno dobimo

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= \langle (e_1)_v, e_2 \rangle \\
&= \langle (ar_u)_v, e_2 \rangle \\
&= a \langle r_{uv}, e_2 \rangle + a_v \underbrace{\langle r_u, e_2 \rangle}_0 \\
&= ab \langle r_{uv}, r_u \rangle + ac \langle r_{uv}, r_v \rangle \\
&= \frac{1}{2} ab E_v + ac \left(F_u - \frac{1}{2} G_u \right).
\end{aligned}$$

Ker smo koeficiente a, b in c že uspeli izraziti z E, F, G in njihovimi odvodi, nam je isto uspelo tudi za izraz $(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u$. S tem je Gaussov Theorema egregium dokaz. \square

Opomba. Splošen izraz za κ je kar zakompliciran. Čim pa predpostavimo, da imamo parametrizacijo $F = 0$, velja

$$\begin{aligned}
a &= \frac{1}{\sqrt{E}}, \\
b &= 0, \\
c &= \frac{1}{\sqrt{G}},
\end{aligned}$$

oziroma

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= -\frac{1}{2} \frac{E_v}{\sqrt{EG}} \\
\alpha_2 &= \frac{1}{2} \frac{G_u}{\sqrt{EG}}.
\end{aligned}$$

Od tod dobimo

$$\kappa = \frac{(\alpha_1)_v - (\alpha_2)_u}{\sqrt{EG}}.$$

To povzamemo v izreku.

Izrek 3.16.

Če je $F = 0$, je Gaussova ukrivljenost podana s formulo

$$\kappa = -\frac{1}{\sqrt{EG}} \left(\frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{G_u}{\sqrt{EG}} + \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{E_v}{\sqrt{EG}} \right) \right) \right).$$

Formula za Gaussovo ukrivljenost se še bolj poenostavi, če je parametrizacija ploskve geodetska (torej da je $E = 1, F = 0$).

Izrek 3.17.

Če je ploskev X parametrizirana z geodetsko parametrizacijo, se njena Gaussova ukrivljenost izraža s formulo

$$\kappa = -\frac{1}{\sqrt{G}} \left(\frac{\partial^2 \sqrt{G}}{\partial u^2} \right).$$

3.3 Ploskve s konstantno ukrivljenostjo**Izrek 3.18.**

1. Ploskev X , katere ukrivljenost je identično enaka 0, je izometrična kosu ravnine.
2. Ploskev X , katere ukrivljenost je identično enaka $1/a^2$ ali $-1/a^2$ je izometrična kosu sfere z radijem a oziroma kosu traktoida (pseudosfere) s polmerom a .

Dokaz:

1. Vpeljimo novo oznako za koeficient $g := \sqrt{G}$. Ta funkcija je dobro definirana, saj mora zaradi regularnosti parametrizacije biti $G > 0$. Dokazali smo že, da lahko vsako ploskev lokalno parametriziramo z geodetsko parametrizacijo. V tej parametrizaciji velja

$$\kappa = -\frac{1}{\sqrt{G}} \left(\frac{\partial^2 \sqrt{G}}{\partial u^2} \right) = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 g}{\partial u^2}.$$

Za ploščato ploskev torej velja

$$-\frac{1}{g} \frac{\partial^2 g}{\partial u^2} = 0 \implies \frac{\partial^2 g}{\partial u^2} = 0.$$

To pomeni, da je funkcija $g = g(u, v)$ oblike

$$g(u, v) = A(v)u + B(v).$$

Poiskati moramo ustrezni funkciji $A(v)$ in $B(v)$, ki ju bomo dobili iz geometrijskih lastnosti geodetske parametrizacije. Spomnimo se, da za geodetsko krivuljo $v \mapsto r(0, v)$ velja

$$G(0, v) = \langle r_v(0, v), r_v(0, v) \rangle = 1.$$

Enakost $\langle r_v(0, v), r_v(0, v) \rangle = 1$ dobimo iz naravnosti parametrizacije r . Poiščimo še $G_u(0, v)$. Ker je krivulja $v \mapsto G(0, v)$ naravno parametrizirana, je rešitev prve Euler-Lagrangeeve enačbe za geodetke, ki jo v našem posebnem primeru lahko zapišemo v obliki

$$\ddot{u} = \frac{1}{2} G_u \dot{v}^2.$$

Naša geodetka je podana z $\gamma(t) = r(0, v(t))$ in velja $u = 0, v = t$, od koder sledi

$$\begin{aligned} \ddot{u} &= 0, \\ \dot{v} &= 1. \end{aligned}$$

Torej dobimo

$$0 = \frac{1}{2} G_u \implies G_u(0, v) = 0.$$

Začetna pogoja $G(0, v) = 1$ in $G_u(0, v) = 0$ implicirata

$$\begin{aligned} G(0, v) = 1 &\implies g(0, v) = 1 \\ G_u(0, v) = 0 &\implies G_u = (g^2)_u = 2gg_u = 0 \implies g_u(0, v) = 0. \end{aligned}$$

Od tod dobimo

$$\begin{aligned} g(0, v) &= B(v) = 1, \\ g_u(0, v) &= A(v) = 0. \end{aligned}$$

To pomeni, da je

$$g(u, v) = 1 \implies G(u, v) = 1,$$

torej bo prva fundamentalna forma ploskve X enaka

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

in bo po izreku za prve fundamentalne forme izometrična kosu ravnine.

2. Najprej obravnavajmo primer $\kappa = \frac{1}{a^2}$. Iz enačbe

$$\kappa = -\frac{g_{uu}}{g} = \frac{1}{a^2}$$

dobimo

$$g_{uu} = -\frac{1}{a^2}g.$$

Splošna rešitev te enačbe je oblike

$$g(u, v) = A(v) \cos\left(\frac{1}{a}u\right) + B(v) \sin\left(\frac{1}{a}u\right)$$

in zadošča začetnima pogojema

$$g(0, v) = 1, \quad g_u(0, v) = 0.$$

Tako dobimo $g(0, v) = A(v) = 1$, $g_u(0, v) = \frac{1}{a}B(v) = 0 \implies B(v) = 0$.
Torej imamo

$$\begin{aligned} g(u, v) &= \cos\left(\frac{1}{a}u\right), \\ G(u, v) &= \cos^2\left(\frac{1}{a}u\right), \end{aligned}$$

prva fundamentalna forma se glasi

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos^2(\frac{1}{a}u) \end{pmatrix},$$

kar je natanko fundamentalna forma sfere. Torej je X izometrična kosu sfere.

V primeru $\kappa = -\frac{1}{a^2}$ dobimo enačbo

$$\frac{g_{uu}}{g} = \frac{1}{a^2} \implies g_{uu} = \frac{1}{a^2}g.$$

Nato na isti način kot za $\kappa = \frac{1}{a^2}$ dobimo splošno rešitev

$$g(u, v) = A(v) \cosh\left(\frac{1}{a}u\right) + B(v) \sinh\left(\frac{1}{a}u\right),$$

od tod pa

$$G(u, v) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cosh^2(\frac{1}{a}u) \end{pmatrix},$$

kar je natanko fundamentalna forma traktroida.

□