

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra matematiky

Bakalářská práce

**Rozpoznávání význačných rysů
na modelech lidské hlavy**

Plzeň, 2015

Kateřina Kubásková

Originální zadání

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Plzni dne

.....
Kateřina Kubásková

Poděkování

Mé poděkování patří Prof. Dr. Ing. Ivaně Kolingerové za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Petru Martínkovi za spolupráci při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Abstract

At present feature detection is very often used in geoinformatics or computer graphics. A lot of feature detection methods have been developed in the last years. The goal of this work is to find methods suitable to detect features, implement and test them on the triangulated model of human head which is used to create an identikit.

Keywords

feature, feature ridges and valleys, curvature, thresholding, triangular model, morphological operators, MLS approximation

Anotace

Detekce význačných rysů je v poslední době velmi využívaná v geoinformatice nebo počítačové grafice. V průběhu let vzniklo mnoho metod na detekci význačných rysů. Cílem této bakalářské práce je nalézt vhodné metody na detekci význačných rysů, implementovat je a testovat na triangularizované modely lidské hlavy, které slouží k tvorbě identikitu.

Klíčová slova

význačný rys, význačné hřbety a údolí, křivost, prahování, triangularizovaný model, morfologické operátory, MLS aproximace

Obsah

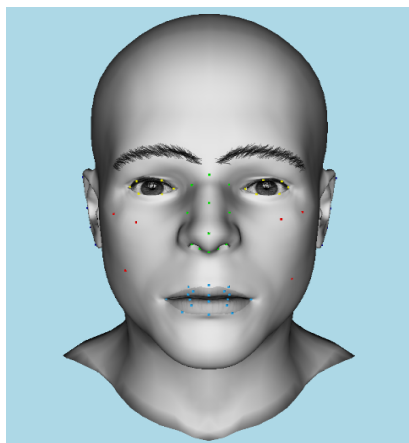
1	Úvod	8
2	Teorie	9
2.1	Základy diferenciální geometrie	9
2.1.1	Vektorová funkce jedné proměnné	9
2.1.2	Vektorová funkce více proměnných	10
2.1.3	Křivky	10
2.1.4	Plochy	12
2.2	Operátory vektorové analýzy	15
2.3	Matematická morfologie	16
2.4	Triangularizovaný model	18
3	Přehled metod detekce význačných rysů	19
3.1	SOD (Second Order Difference)	
	Úhel mezi normálami	19
3.2	ESOD (Extended Second Order Difference)	
	Rozšířený úhel mezi normálami	20
3.3	BFP (Best Fit Polynomial)	
	Nejlepší aproximace polynomem	21
3.4	ABBFP (Angle Between Best Fit Polynomial)	
	Úhel mezi nejlepšími aproximacemi polynomem	21
3.5	Metoda využívající Laplace-Beltramiho operátoru	22
3.6	Pokročilé metody detekce význačných rysů	23
3.6.1	Diskrétní křivosti a morfologické operátory	24
3.6.2	MLS aproximace	
	Metoda nejmenších čtverců	29
4	Navržená metoda	34
4.1	Ohodnocení vrcholů	34
4.2	Prahování	35
4.3	Nalezení význačných oblastí	35
4.3.1	Obarvení nalezených oblastí	36
4.4	Detekce řídicích bodů	38
5	Implementace	42
5.1	Vstupní soubory	42
5.2	Datové struktury	43
5.3	Popis tříd	43
6	Výsledky a experimenty	46
6.1	Střední křivost	46
6.2	Maximální křivost	48
6.3	Kotangentový Laplace-Beltramiho operátor	49
6.4	Střední křivost z metody nejmenších čtverců	49
6.5	Maximální křivost z metody nejmenších čtverců	50
6.6	Výsledky detekce význačných oblastí hlavy	52
6.6.1	Obarvení nalezených význačných oblastí	52

6.7	Navrhovaný postup automatické detekce význačných rysů	53
6.8	Výsledky detekce řídicích bodů	54
7	Závěr	56
A	Tabulky	61
B	Uživatelská dokumentace	64

1 Úvod

Přesná definice toho, co představuje pojem význačný rys neexistuje a velmi často závisí na typu řešeného problému. Význačnými rysy na modelu rozumíme charakteristické části, kterých si lidské oko při pohledu na model všimne. Nalezení těchto význačných rysů není však pro počítač tak snadné jako pro člověka. To, co my děláme automaticky, to musí být počítači předloženo ve formě konkrétního algoritmu. V průběhu let vzniklo mnoho metod pro hledání význačných rysů, které jsou využívány v různých oborech. V geoinformatice a kartografii se pracuje s terénními daty a je potřeba vyhledávat terénní linie, které se následně zakreslují do mapy. V počítačové grafice nebo geometrickém modelování se detekce hran využívá k analyzování tvaru objektu, jeho rozpoznávání nebo ohodnocení kvality. Pomocí význačných hran se může model dále vyhlazovat nebo zjednodušovat. V počítačové grafice se nejčastěji setkáváme s reprezentací modelu pomocí trojúhelníkové sítě.

Cílem této práce je nalezení, implementace a otestování vhodných metod pro rozpoznávání význačných hran na triangularizovaném modelu lidské hlavy. Tyto modely jsou pak využívány k tvorbě 3D identikitů, což jsou modely sloužící k identifikaci osoby. Metoda by měla být schopná automaticky i ručně detekovat význačné rysy. Dále bychom se měli pokusit pomocí význačných rysů nalézt důležité body (koutky rtů, koutky očí, body na boltcích ucha, atd.). V angličtině se tyto body často označují jako tzv. *landmarks*, my je budeme dále označovat jako *řídící body* a potřebujeme je detekovat proto, abychom pomocí nich mohli identikity deformovat a různě upravovat přidáváním textur (viz obr. 1.1). Jsou to tedy výchozí body pro práci s identikity. Doposud bylo zapotřebí řídicí body hledat ručně a to je velmi časově náročné, tato práce by proto měla docílit částečného usnadnění.



Obr. 1.1: Identikit muže, zobrazeno včetně řídicích bodů. Převzato z [1].

V této bakalářské práci se nejprve seznámíme se všemi potřebnými pojmy a definicemi (kap. 2), dále pak v kap. 3 projdeme známe metody na detekci význačných rysů. Námi navrhovaná metoda detekce význačných rysů a řídicích bodů je popsána v kap. 4 a implementace metody v kap. 5. Všechny výsledky a experimenty ukážeme v kap. 6 a v závěru v kap. 7 vše shrneme a zhodnotíme.

2 Teorie

V této kapitole budou uvedeny všechny potřebné základní teoretické definice a poznatky, které bakalářská práce využívá. Jedná se především o oblast diferenciální geometrie, protože mnoho metod pro detekci hran je založeno na výpočtu křivosti ploch. Dále pak popíšeme diferenciální operátory vektorové analýzy a matematickou morfologii a definujeme triangularizovaný model.

2.1 Základy diferenciální geometrie

V diferenciální geometrii se k popisu křivek a ploch používá vektorových funkcí, než tedy přejdeme k jejich popisu, je zapotřebí ještě definovat vše potřebné.

2.1.1 Vektorová funkce jedné proměnné

Následující dvě kapitoly jsou napsané na základě literatury [16-18].

Vektorová funkce jedné reálné proměnné může být definována následovně:

Nechť $\mathcal{J} \subset \mathbb{R}$. Zobrazení $\mathbf{P}: \mathcal{J} \rightarrow \mathbb{R}^n$ se nazývá vektorová funkce jedné reálné proměnné s definičním oborem \mathcal{J} .

Limita vektorové funkce:

Řekneme, že vektorová funkce $\mathbf{P}: \mathcal{J} \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ má v hromadném bodě $t_0 \in \mathcal{J}$ limitu $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^n$, jestliže

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : 0 < |t - t_0| < \delta \Rightarrow \|\mathbf{P}(t) - \mathbf{a}\| < \varepsilon. \quad (2.1)$$

Limitu pak zapisujeme

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \mathbf{P}(t) = \mathbf{a}. \quad (2.2)$$

Spojitosť vektorové funkce:

Je-li $\lim_{t \rightarrow t_0} \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t_0)$, řekneme, že funkce $\mathbf{P}: \mathcal{J} \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá v bodě t_0 .

Derivace vektorové funkce:

Nechť $\mathbf{P}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ a t_0 je vnitřní bod \mathcal{J} . Jestliže existuje limita

$$\mathbf{P}'(t_0) := \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t_0)}{t - t_0} \quad (2.3)$$

potom tuto limitu nazveme derivací funkce \mathbf{P} v bodě t_0 .

Třída C_n vektorové funkce:

Řekněme, že vektorová funkce $\mathbf{P}(t)$ je třídy C_n ($n \in \mathbb{N}$), jestliže je na dané množině spojitá i se svými derivacemi až do řádu n .

2.1.2 Vektorová funkce více proměnných

Nechť $\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$, $n, m \in \mathbb{N}$. Zobrazení $\mathbf{P} : \Omega \rightarrow \mathbf{R}^n$ se nazývá reálná vektorová funkce m reálných proměnných o n složkách. Je-li pak $n=1$, jde o funkci m proměnných.

Parciální derivace vektorové funkce více proměnných

Parciální derivace vektorové funkce $\mathbf{P}(u_1, u_2, \dots, u_m)$ jsou definovány následovně:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u_1} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\mathbf{P}(u_1+h, u_2, \dots, u_m) - \mathbf{P}(u_1, u_2, \dots, u_m)}{h} = \left(\frac{\partial x_1}{\partial u_1}, \frac{\partial x_2}{\partial u_1}, \dots, \frac{\partial x_n}{\partial u_1} \right), \\ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u_2} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\mathbf{P}(u_1, u_2+h, \dots, u_m) - \mathbf{P}(u_1, u_2, \dots, u_m)}{h} = \left(\frac{\partial x_1}{\partial u_2}, \frac{\partial x_2}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial x_n}{\partial u_2} \right), \\ &\vdots \\ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u_m} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\mathbf{P}(u_1, u_2, \dots, u_m+h) - \mathbf{P}(u_1, u_2, \dots, u_m)}{h} = \left(\frac{\partial x_1}{\partial u_m}, \frac{\partial x_2}{\partial u_m}, \dots, \frac{\partial x_n}{\partial u_m} \right). \end{aligned} \quad (2.4)$$

V diferenciální geometrii je pak používána vektorová funkce $\mathbf{P}(u^1, u^2)$ dvou proměnných $u^1, u^2 \in \Omega$, která je zobrazením z množiny $\Omega \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ do vektorového prostoru \mathbb{E}_3 . Pro parametry u^1, u^2 je zvykem používat horních indexů, protože pro plochy se dále použije tzv. Einsteinovy sumační konvence.

2.1.3 Křivky

Nyní již můžeme formulovat pojem regulární křivka:

Regulární křivkou třídy C_n v \mathbb{E}_3 rozumíme množinu $\mathcal{K} \subset \mathbb{E}_3$, pro níž existuje vektorová funkce $\mathbf{P}(t)$, $t \in \mathcal{J}$ tak, že

- (a) $\mathbf{P} : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{K}$, \mathcal{J} je otevřený interval,
- (b) \mathbf{P} je třídy C_n ,
- (c) $|\mathbf{P}'(t_0)| \neq 0$ pro všechna $t_0 \in \mathcal{J}$,
- (d) $t_1 \neq t_2 \Rightarrow \mathbf{P}(t_1) \neq \mathbf{P}(t_2)$.

Nejčastěji se v diferenciální geometrii pracuje s parametrickým vyjádřením křivky, které dostaneme rozepsáním $\mathbf{P}(t)$ do složek.

Transformace parametru

Nechť $\mathbf{P}(t)$, $t \in \mathcal{J}$, je regulární křivkou a nechť je dána φ je spojitá funkce $\varphi : \mathcal{J}^* \rightarrow \mathcal{J}$ a $\varphi'(t_0^*) \neq 0$ pro každé $t_0^* \in \mathcal{J}^*$. Pak $\mathbf{P}(\varphi(t^*))$, $t^* \in \mathcal{J}^*$, je vektorovou rovnicí téže křivky $\mathbf{P}(t)$ a byla provedena transformace parametru.

Délka křivky

Nechť $\mathbf{P}(t)$, $t \in \mathcal{J}$, $\mathcal{J} = (t_0, t_1)$ je regulární křivka, pak pro délku křivky platí vztah

$$d = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{\mathbf{P}'(t) \cdot \mathbf{P}'(t)} dt. \quad (2.5)$$

Oblouk jako parametr

Nechť $\mathbf{P}(t)$, $t \in \mathcal{J}$ je regulární křivkou. Definujme funkci

$$s(t) = \int_{t_a}^{t_h} \sqrt{\mathbf{P}'(\hat{t}) \cdot \mathbf{P}'(\hat{t})} d\hat{t} \quad (2.6)$$

a inverzní funkci označme $t(s)$. Pak nový parametr s nazýváme obloukem křivky.

Derivace podle oblouku se potom v diferenciální geometrii značí tečkou, tj.

$$\dot{\mathbf{P}}(s) = \frac{d\mathbf{P}(s)}{ds}. \quad (2.7)$$

Tečný vektor a tečna křivky

Vektor

$$\mathbf{P}'(t_0) = \frac{d\mathbf{P}}{dt}(t_0) \quad (2.8)$$

nazýváme tečný vektor křivky $\mathbf{P}(t)$, $t \in \mathcal{J}$, v bodě t_0 . Tečna křivky v daném bodě je pak přímka $\mathbf{P}(u) = \mathbf{P}(t_0) + u\mathbf{P}'(t_0)$.

Tečna křivky je přímka spojující její dva nekonečně blízké body okolo bodu dotyku t_0 , jinak řečeno „tečna“ je „limitní polohou sečny“ křivky. Platí, že křivka má v daném bodě jedinou tečnu.

Oskulační rovina

Oskulační rovina je „limitní polohou tečné roviny“. Jinak řečeno, jde o rovinu, která se v daném bodě ke křivce nejvíce přimyká. Definice oskulační roviny je následující:

Nechť $\mathbf{P}(t)$, $t \in \mathcal{J}$, je regulární křivka a je dáno $t_0 \in \mathcal{J}$. Nechť vektory $\mathbf{P}'(t_0)$ a $\mathbf{P}''(t_0)$ jsou nekolineární¹, pak rovinu

$$\mathbf{R}(u, v) = \mathbf{P}(t_0) + u\mathbf{P}'(t_0) + v\mathbf{P}''(t_0) \quad (2.9)$$

nazýváme oskulační rovinou křivky v daném bodě t_0 .

Bod křivky, v němž jsou vektory $\mathbf{P}'(t_0)$ a $\mathbf{P}''(t_0)$ kolineární, nazýváme inflexní bod. V takovém bodě není definována oskulační rovina, resp. za oskulační rovinu lze považovat každou rovinu procházející tečnou.

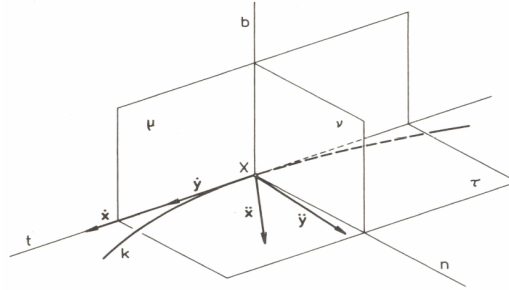
Normála křivky

Normála křivky v daném bodě je každá přímka $\mathbf{R}(s) = \mathbf{P}(t_0) + s\mathbf{n}$, kde $\mathbf{n} \cdot \mathbf{P}'(t_0) = 0$, tj. každá přímka, která je kolmá na tečnu. **Hlavní normála** \mathbf{n} je normála ležící v oskulační rovině, **binormála** \mathbf{b} je normála, která je kolmá k oskulační rovině, **rektifikační rovina** je rovina určená bodem na křivce, tečným a binormálovým vektorem a **normálová rovina** je určena bodem na křivce,

¹Kolineární vektory jsou vektory lineárně závislé (tj. ležící na jedné přímce). Nekolineární vektory jsou lineární nezávislé.

normálovým a binormálovým vektorem.

Na obr. 2.1 jsou přehledně zobrazeny vztahy zmíněných normál a rovin.



Obr. 2.1: Tečna t , hlavní normála n , binormála b , oskulační rovina τ , rektifikační rovina μ a normálová rovina ν křivky k v bodě X . Převzato z [12].

V oblasti diferenciální geometrie se dále používají dvě různé křivosti křivek: první a druhá. Křivost křivky je její nejdůležitější charakteristika, neboť udává zakřivení křivky v konkrétním bodě. První křivost neboli flexe určuje míru vychýlení křivky od tečny v daném bodě.

První křivostí křivky v bodě rozumíme číslo ${}^1\kappa(s_0) = |\ddot{\mathbf{P}}(s_0)|$, tj. velikost vektoru druhé derivace vektorové funkce parametrizované pomocí oblouku.

Druhá křivost neboli torze představuje vychýlení křivky z oskulační roviny v daném bodě.

Druhou křivostí křivky v bodě rozumíme číslo ${}^2\kappa(s_0) = -\dot{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{n}$, neboli $|{}^2\kappa(s_0)| = |\dot{\mathbf{b}}|$.

Tyto vztahy využívají parametrizace křivky pomocí oblouku, její odvození však ve většině případů není jednoduché, proto se spíše používají vztahy s obecným parametrem.

Pro regulární křivku s obecným parametrem platí

$$({}^1\kappa)^2 = \frac{(\mathbf{P}' \times \mathbf{P}'')^2}{(\mathbf{P}' \cdot \mathbf{P}')^3} \quad (2.10)$$

$${}^2\kappa = \frac{(\mathbf{P}', \mathbf{P}'', \mathbf{P}''')}{(\mathbf{P}' \times \mathbf{P}'')^2} \quad (2.11)$$

2.1.4 Plochy

Regulární plochou třídy C_n v \mathbb{E}_3 rozumíme množinu $\mathcal{P} \subset \mathbb{E}_3$, pro niž existuje vektorová funkce $\mathbf{P}(u^1, u^2), (u^1, u^2) \in \Omega$, kde Ω je oblast (otevřená kompaktní množina), taková že

(a) $\mathbf{P}: \Omega \rightarrow \mathcal{P}$ je zobrazení na množinu,

(b) \mathbf{P} je třídy C_n ($n \leq 3$),

(c) $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u^1}$ s $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u^2}$ jsou lineárně nezávislé ve všech bodech oblasti Ω ,

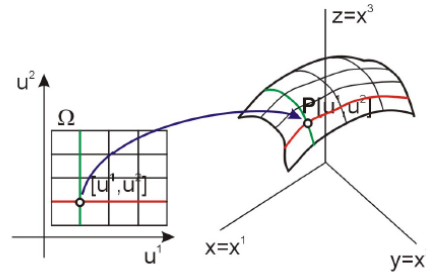
(d) $(u_0^1, u_0^2) \in \Omega, (u_1^1, u_1^2) \in \Omega$ a $(u_0^1, u_0^2) \neq (u_1^1, u_1^2) \Rightarrow \mathbf{P}(u_0^1, u_0^2) \neq \mathbf{P}(u_1^1, u_1^2)$.

Z výše uvedeného bodu c) plyne, že pro regulární plochu ve všech jejích bodech platí $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u^1} \times \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u^2} \neq 0$.

Nechť je daná plocha určená vektorovou funkcí $\mathbf{P}(u^1, u^2)$ na oblasti Ω a necht' jsou dány funkce $\alpha^1(t)$ a $\alpha^2(t)$, $t \in \mathcal{J}$ určující křivku v Ω , pak $\mathbf{P}(\alpha^1(t), \alpha^2(t))$ nazýváme křivkou na ploše.

Je-li $\alpha^1(t)$ nebo $\alpha^2(t)$ konstantní nazýváme křivku parametrickou křivkou na ploše.

Platí, že každým bodem plochy procházejí dvě parametrické křivky, které se nedotýkají. Na obr. 2.2 jsou obě parametrické křivky na ploše vykresleny.



Obr. 2.2: Zobrazení parametrických křivek na ploše. Převzato z [13].

Než budeme pokračovat v teorii ploch je nutné definovat již zmíněnou Einsteinovu sumační konvenci:

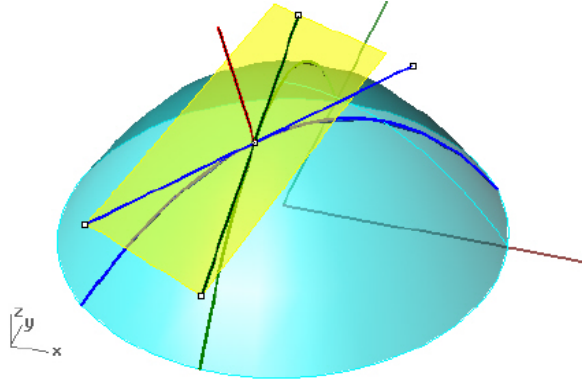
Einsteinovou sumační konvencí rozumím úmluvu, podle níž ve vztazích, kde je týž index použit zároveň jako dolní a horní, provádíme podle tohoto indexu sčítání.

Tečné vlastnosti ploch

Přímku, která se dotýká některé křivky ležící na ploše, nazýváme tečnou plochy. Dále platí, že všechny tečny regulárních křivek na regulární ploše v daném bodě leží v jedné rovině, a tu nazýváme tečná rovina. Ukázka tečné roviny a tečen je na obr. 2.3.

Rovinu $\mathbf{R}(\alpha^1, \alpha^2) = \mathbf{P} + \alpha^1 \mathbf{P}_1 + \alpha^2 \mathbf{P}_2 = \mathbf{P} + \alpha^i \mathbf{P}_i$, kde $\mathbf{P}_i = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial u^i}$, nazýváme tečná rovina plochy. Přímka $\mathbf{R}(t) = \mathbf{P} + t(\mathbf{P}_1 \times \mathbf{P}_2)$ je normálou plochy a vektor $\lambda(\mathbf{P}_1 \times \mathbf{P}_2)$, $\lambda \neq 0$, je normálový vektor v daném bodě plochy.

Stejně jako pro křivky je i pro plochy důležitým prvkem, který je charakterizuje, jejich křivost. U ploch se setkáváme hned s několika typy křivostí, první uvedenou bude *normálová křivost*, která se vztahuje ke křivkám na ploše.



Obr. 2.3: Ukázka tečné roviny (žlutá), normály (červený vektor), tečen (modrá a zelená úsečka) a křivek na ploše (modrá a zelená křivka). Převzato z [13].

Normálová křivost

Normálovou křivostí křivky \mathcal{K} v bodě X rozumíme číslo

$${}^n\kappa = \ddot{\mathbf{P}} \cdot \mathbf{n}, \quad (2.12)$$

tedy velikost ${}^n\kappa$ kolmého průmětu vektoru $\ddot{\mathbf{P}}$ do jednotkového vektoru \mathbf{n} normály plochy.

Uvažujeme-li křivku $\mathbf{P}(s) = \mathbf{P}(u^1(s), u^2(s))$, která je parametrizována obloukem, pak pro její první křivost platí: $\ddot{\mathbf{P}} = {}^1\kappa \cdot \boldsymbol{\nu}$ ($\boldsymbol{\nu}$ je jednotkový vektor hlavní normály). Z geometrického významu skalárního součinu tedy platí ${}^n\kappa = {}^1\kappa \cdot \cos\gamma$, kde $\gamma = \angle \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\nu}$, tj. odchylka normály plochy a hlavní normály křivky. Dále platí, že normálová křivost všech křivek plochy se společnou tečnou v daném bodě je stejná. V konkrétním bodě rozlišujeme dva základní směry plochy:

- **hlavní** - směr plochy, ve kterém je normálová křivost extrémální (maximální, resp. minimální),
- **asymptotický** - směr, ve kterém je normálová křivost nulová.

Bod, v němž každý směr je asymptotický, nazýváme planární bod a kruhový bod je takový bod, v němž je normálová křivost konstantní a nenulová. Křivka, jejíž tečna leží v hlavním směru v každém jejím bodě, se nazývá hlavní křivka. Normálové křivosti v hlavních směrech jsou **hlavní křivosti** a označujeme je ${}^n\kappa_{min}$ a ${}^n\kappa_{max}$. Lze dokázat, že v bodě jsou všechny směry hlavní nebo existují právě dva hlavní směry, které jsou na sebe kolmé.

Pomocí hlavních křivosti lze vyvozovat v omezené míře závěry o tvaru plochy, neboť vymezují rozsah zakřivení plochy v okolí daného bodu. Hlavní křivosti můžeme dále využít k definici dalších typů křivosti.

Gaussova křivost

Gaussova křivost plochy v daném neplanárním bodě je dána vztahem

$$G = {}^n\kappa_{min} \cdot {}^n\kappa_{max}. \quad (2.13)$$

Z této definice plyne, že Gaussova křivost je invariantní vůči změně orientace plochy, tj. plocha má opačný normálový vektor. Při změně orientace se totiž změní

znaménko normálové křivosti, ale hlavní křivosti stále zůstanou extrémny. Jejich násobek tak zajistí neměnnost Gaussovy křivosti.

Střední křivost

Střední křivostí plochy v neplanárním bodě rozumíme číslo

$$H = \frac{{}^n\kappa_{min} \cdot {}^n\kappa_{max}}{2}. \quad (2.14)$$

Opět k definici střední křivosti využíváme hlavních křivosti. Díky sčítání však střední křivost již není invariantní vůči změně orientace plochy. Více z oblasti diferenciální geometrie je možné nalézt v literatuře [12-15], ze které bylo v této kapitole čerpáno.

2.2 Operátory vektorové analýzy

V metodách na detekci hran se také setkáme s některými operátory vektorové analýzy (např. gradient a Laplaceův operátor), proto je vhodné se s nimi seznámit [19], [20].

Skalární a vektorové pole

Funkci tří proměnných $f : \mathcal{I} \rightarrow \mathbb{R}$, $\mathcal{I} \subset \mathbb{E}_3$, $f = f(x, y, z)$ nazýváme skalárním polem.

Vektorovou funkci $\mathbf{v} : \mathbb{E}_3 \rightarrow \mathbb{E}_3$, $\mathbf{v} = (v_1(x, y, z), v_2(x, y, z), v_3(x, y, z))$ nazýváme vektorovým polem.

Gradient

Nechť $f : \mathcal{I} \rightarrow \mathbb{R}$, $\mathcal{I} \subset \mathbb{E}_3$, $f = f(x, y, z)$, $A \in \mathcal{I}$ je diferencovatelné skalární pole, potom vektor

$$\text{grad } f(A) = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{e}_z = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right), \quad (2.15)$$

*se nazývá **gradient** skalární funkce f v bodě A a $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ jsou jednotkové vektory ve směru os.*

Gradient je tedy vektor, jehož složkami jsou parciální derivace skalárního pole podle jednotlivých souřadnic. V praxi se velmi často užívá značení pomocí (vektorového) diferenciálního operátoru **nabla**

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

pak píšeme $\text{grad } f = \nabla f$. Operátor ∇ se také nazývá Hamiltonův operátor. Gradient má velké využití, neboť směr největšího růstu funkce f z bodu A popisuje vektor $\mathbf{n} = \frac{\text{grad } f(A)}{\|\text{grad } f(A)\|}$.

Divergence

Divergence vektorového pole je skalární pole

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial v_3}{\partial z}. \quad (2.16)$$

Opět lze tento operátor vyjádřit pomocí Hamiltonova operátoru jako skalární součin

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{v}.$$

Využití tohoto operátoru je především v oblasti fyziky [19].

Laplaceův operátor

Laplaceovým operátorem rozumíme symbolický operátor

$$\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right). \quad (2.17)$$

Pomocí Hamiltonova operátoru lze Laplaceův operátor vyjádřit jako divergenci gradientu

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \nabla^2 = \left(\mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x}, \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y}, \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \left(\mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x}, \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y}, \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right).$$

Laplaceův operátor se uplatňuje v mnoha přírodních vědách (elektřina, magnetismus, nauka o vlnění, rovnice pro difúzi) a využijeme ho i při detekci hran.

2.3 Matematická morfologie

Matematická morfologie je technika zpracovávání geometrických struktur původně založená na teorii množin. Je vhodná pro analyzování tvaru objektů a transformace obrazu zachovávající jejich tvar. Původně byla určena pro analýzu binárních obrazů, později byla zobecněna i na šedotónové obrazy [24].

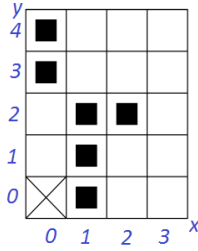
Obraz lze popsat pomocí bodových množin libovolné dimenze, např. v N -rozměrném euklidovském prostoru. Přírozeným spojitým definičním oborem pro popis rovinných útvarů je euklidovský prostor \mathbb{E}_2 a systém jeho podmnožin. Digitální obraz se reprezentuje celými čísly \mathbb{Z} . Dále se zaměříme na binární matematickou morfologii, jejíž definiční obor je \mathbb{Z}_2 a obor hodnot $\{0, 1\}$ [25]. Grafický a množinový příklad bodové množiny je uveden na obr. 2.4.

Základními operátory pro morfologické operace jsou dilatace, eroze, otevření, uzavření, tref či miň, ztenčování a zesilování.

Nechť X je bodová množina odpovídající obrazu a B je strukturní element, který slouží k morfologickým operacím jako lokální sonda, pak **dilataci** je možné vyjádřit jako

$$X \oplus B = \{p \in \mathbb{E}_2 : p = x + b, x \in X \wedge b \in B\}. \quad (2.18)$$

$$X = \{(1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 2), (0, 3), (0, 4)\}$$

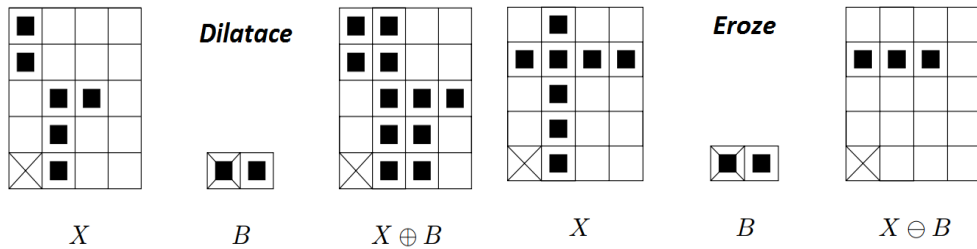


Obr. 2.4: Příklad bodové množiny v prostoru \mathbb{Z}_2 . Počátek označen křížkem.

Na každý bod původního obrazu X se obtiskne strukturální element B podle jeho počátku. Dilatace se běžně používá k zaplnění děr. Duální operace dilatace je **eroze**. Ta je definována následovně

$$X \ominus B = \{p \in \mathbb{E}_2 : p = x + b, p \in X \forall b \in B\}. \quad (2.19)$$

Každý bod původního obrazu X se porovnává se strukturálním elementem, je-li celý strukturální element obsažen v původní množině X , zapíšeme do výsledného obrazu hodnotu 1, jinak 0. Pomocí eroze zmizí menší strukturální elementy. Příklady dilatace a eroze jsou zobrazeny na obr. 2.5.



Obr. 2.5: Příklad dilatace a eroze. X je původní množina, B strukturální element a $X \ominus B$ je výsledný obraz. Převzato z [25].

Vzhledem k tomu, že dilatace a eroze nejsou navzájem inverzní zobrazení, pak jejich kombinací vznikají další operátory. Morfologický operátor eroze následovaná dilatací nazýváme **otevření**:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B. \quad (2.20)$$

Prohozením operace eroze a dilatace v rov. 2.20 dostaneme morfologický operátor **uzavření**:

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B. \quad (2.21)$$

Operátor otevření se běžně používá k oddělení objektů spojených tenkou čarou a k odstranění šumu. Uzavření spojuje blízké objekty a zaplňuje díry. Velikost a tvar strukturálního elementu určuje míru uzavření a otevření [24]. Ukázka otevření a uzavření je vidět na obr. 2.6. Po aplikaci jednoho otevření (resp. uzavření) strukturálním elementem B je množina již otevřena (resp. uzavřena) a opakované použití těchto operátorů nic nezmění [25].



Obr. 2.6: Ukázka použití morfologického operátoru otevření a uzavření. Převzato z [26].

Morfologická operace **tref či miň** používá složený strukturní element $B = \{B_1, B_2\}$, kde B_1 obsahuje požadované body náležející objektu a B_2 body, které náleží pozadí. Tento operátor zachovává body z množiny X , které odpovídají sub-elementu B_1 a neodpovídají sub-elementu B_2 . Matematicky jej lze vyjádřit takto

$$X \otimes B = \{p \in X : B_1 \subset X \wedge B_2 \wedge X^c\}, \quad (2.22)$$

kde X^c značí doplněk množiny X . Dále můžeme definovat další dva operátory. **Ztenčování** bodové množiny X složeným strukturním elementem B je dáno

$$X \oslash B = X(X \otimes B). \quad (2.23)$$

Pro **zesilování** platí

$$X \odot B = X \cup (X^c \otimes B). \quad (2.24)$$

Nechť $\{B_{(1)}, B_{(2)}, \dots, B_{(n)}\}$ je posloupnost složených strukturních elementů $B_i = (B_{i1}, B_{i2})$, pak sekvenční ztenčování (resp. zesilování) je opakovaná aplikace prostého operátoru ztenčování (resp. zesilování) s touto posloupností [25]. Konvergence sekvenčního ztenčování vede na čáry o šířce jednoho bodu a používá se jako aproximace skeletu. Tento postup je jedním ze způsobů skeletonizace.

2.4 Triangularizovaný model

Triangularizovaný model neboli trojúhelníková síť je běžný způsob reprezentace povrchu trojrozměrného objektu v paměti počítače. Trojúhelníková síť je po částech lineární funkce, která reprezentuje povrch jako soubor trojúhelníků. Ty jsou definovány třemi vrcholy umístěnými v prostoru. Model je možné reprezentovat grafem $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{F})$, kde množina $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ představuje jednotlivé vrcholy sítě, $\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ je množina hran a $\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_r]$ je množina trojúhelníků [3]. Každá hrana modelu náleží právě dvěma trojúhelníkům.

Velmi užívaným termínem v této bakalářské práci bude sousedství vrcholu trojúhelníkové sítě. Sousedství vrcholu v_i je množina skládající se z vrcholu v_i a jeho sousedů přes hranu:

$$\mathbf{N}_i = \{v_i\} \cup \{v_j \mid \exists \text{ hrana } (v_i, v_j)\}. \quad (2.25)$$

Poloměr okolí sousedství lze rekurzivně zvětšovat, pak n -sousedství \mathbf{N}^n lze definovat jako

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{\{i_1, \dots, i_k\}} &:= \bigcup_{1 \leq \mu \leq k} \mathbf{N}_{i_\mu}, \\ \mathbf{N}_i^1 &:= \mathbf{N}_i, \\ \mathbf{N}_i^{n+1} &:= \mathbf{N}(\mathbf{N}_i^n) \quad (n > 1). \end{aligned} \quad (2.26)$$

3 Přehled metod detekce význačných rysů

V této kapitole budou zmíněny vybrané metody pro hledání význačných rysů na trojúhelníkových sítích. Existuje několik klasických metod, které jsou založené na následujícím postupu:

1. **Ohodnocení** - nebo také klasifikace, při které dochází k přiřazení váhy každému vrcholu nebo také hraně sítě. To, zda ohodnocujeme vrcholy či hrany, záleží především na typu metody, většina níže zmíněných metod používá ohodnocení hran. Jelikož je hodnota váhy úměrná významnosti hrany, pak čím je ohodnocení hrany vyšší, tím je pro nás daná hrana důležitější.
2. **Prahování** - navazuje na předchozí klasifikaci a na základě ohodnocení se vyberou hrany (resp. vrcholy), které splňují konkrétní kritérium a tvoří množinu význačných hran (resp. vrcholů).

Kritériem pro výběr význačných hran je nejčastěji prahová hodnota, která je závislá na konkrétních datech (velikosti a geometrii), proto se zpravidla nechává zadat uživatelem. Používají se dva typy prahování [2]:

- **Standardní** - nejjednodušší přístup, kdy se každá váha hrany (resp. vrcholu) porovná s definovanou hodnotou parametru (např. hodnota prahu zadaná uživatelem). Je-li váha vyšší než požadovaná mez, pak je označena jako význačná. Standardním prahováním rozumíme také výběr určitého procenta nejvyšších hodnot vah.
- **Hysterézní** - tato strategie používá dvě prahové hodnoty (dolní a horní hranici). Jestliže je váha hrany větší než horní prahová hodnota, pak je tato hrana automaticky označena jako význačná. Pokud je váha menší než dolní prahová hodnota, pak je hrana automaticky zlikvidována. Zbývající hrany, které leží mezi dolní a horní prahovou hodnotou, jsou vybrány mezi význačné pouze tehdy, pokud jeden nebo více jejich sousedů patří mezi význačné hrany.

Následující klasifikační operátory slouží k již zmíněnému ohodnocení hran nebo vrcholů.

3.1 SOD (Second Order Difference) Úhel mezi normálami

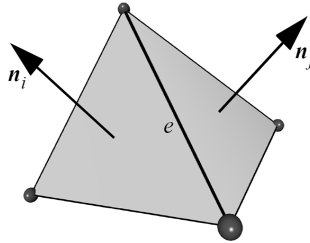
Jedna z nejpoužívanějších metod, která přiřazuje jednotlivým hranám váhu úměrnou úhlu mezi jednotkovými normálovými vektory dvou přilehlých trojúhelníků, kterým náleží daná hrana. Váha je tedy dána výrazem

$$w(e) = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j}{\|\mathbf{n}_i\| \cdot \|\mathbf{n}_j\|} \right), \quad (3.1)$$

kde \mathbf{n}_i a \mathbf{n}_j jsou normálové vektory trojúhelníků incidujících s hranou e . Normálový vektor trojúhelníku lze stanovit pomocí vektorového součinu směrových vektorů daného trojúhelníku

$$\mathbf{n} = (B - A) \times (C - A), \quad (3.2)$$

kde A, B a C jsou body trojúhelníku. Princip metody SOD je ukázán na obr. 3.1.

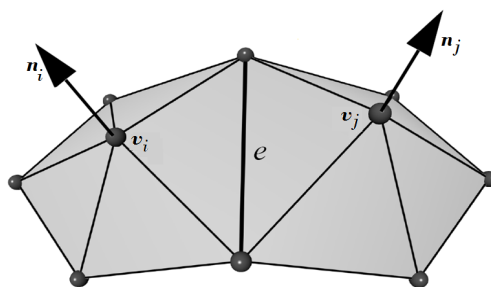


Obr. 3.1: Princip metody SOD, kde $\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j$ jsou normálové vektory trojúhelníků incidujících s hranou e (tj. hrana, pro kterou se ohodnocení počítá). Převzato z [5].

Tato technika je velmi efektivní na hrubých modelech, které obsahují ostré hrany (např. technické součástky). Na hladkých sítích nebo na objektech obsahujících šum neposkytuje dobré výsledky, protože výpočty jsou prováděny v rámci malého okolí [2].

3.2 ESOD (Extended Second Order Difference) Rozšířený úhel mezi normálami

Tento postup je jednoduchým rozšířením předchozího. Místo úhlu mezi normálovými vektory sousedních trojúhelníků je váha hrany určena úhlem mezi normálami ve vrcholech sousedních trojúhelníků, které leží naproti uvažované hraně (viz obr. 3.2). Pokud normály ve vrcholech nejsou známy, lze je určit jako aritmetický průměr normál okolních trojúhelníků obsahující daný vrchol (viz rov. 3.3).



Obr. 3.2: Princip metody ESOD. Vektory \mathbf{n}_i a \mathbf{n}_j jsou normálové vektory ve vrcholech v_i a v_j , které leží naproti hraně e . Převzato z [5].

Aritmetický průměr normál:

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{n}_j}{N_i}, \quad (3.3)$$

kde N_i je celkový počet sousedních trojúhelníků vrcholu v_i a \mathbf{n}_j jsou jejich normálové vektory.

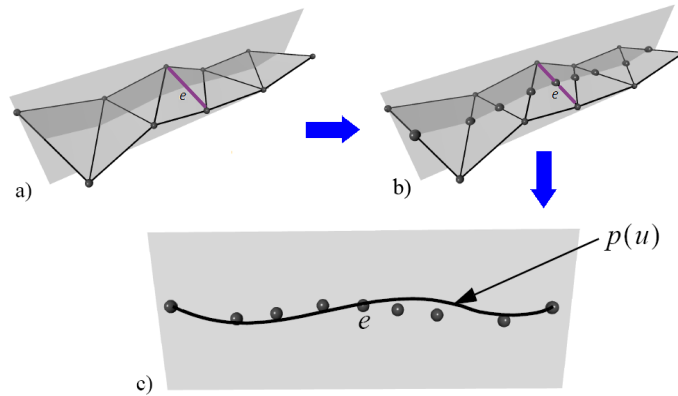
Pro určení ohodnocení hrany pak můžeme opět využít vztah z rov. 3.1. Rozšířením oblasti výpočtu získáme vyšší odolnost proti šumu. Nicméně ESOD ztrácí efektivitu na hrubých sítích [2].

3.3 BFP (Best Fit Polynomial) Nejlepší aproximace polynomem

Metoda je založena na lokální aproximaci hrany polynomem $p(u)$ stupně n , který je interpretován jako rovinná křivka v trojrozměrném prostoru. Ohodnocení hrany je pak dáno druhou derivací polynomu v místě hrany, neboť to představuje lokální zakřivení, viz rov. 3.4 a obr. 3.3.

$$w(e) = p''(e). \quad (3.4)$$

Problém však představuje získání bodů pro tvorbu polynomu. V [2] je uvedeno rozumné řešení pomocí parametrické roviny kolmé na uvažovanou hranu e . Ta se umístí do středu této hrany a body použité k interpolaci jsou průsečíky roviny s řadou sousedních trojúhelníků. Nejdůležitější výhodou této strategie je v tom, že počet průsečíků může být zvolen libovolně. Libovolně lze také definovat stupeň polynomu (např. počtem průsečíků).



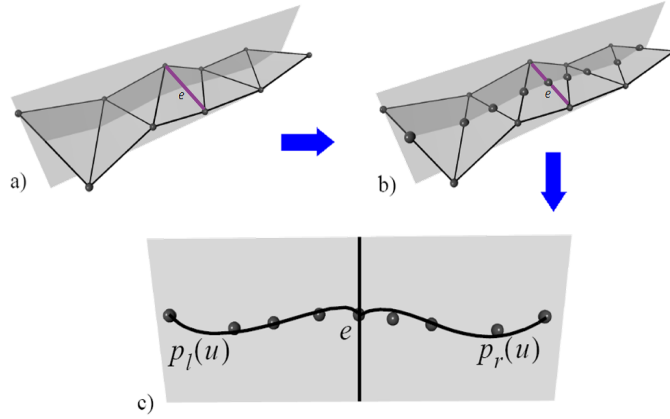
Obr. 3.3: Princip metody BFP: a) Rovina kolmá na hranu e , b) průsečíky s touto rovinou, c) polynom $p(u)$. Převzato z [5].

3.4 ABBFP (Angle Between Best Fit Polynomial) Úhel mezi nejlepšími aproximacemi polynomem

Tato metoda je rozšířením předchozí. Opět uvažujeme aproximaci polynomem pro každou hranu, nyní však aproximujeme dvěma polynomy. První aproximuje průsečíky na jedné straně od uvažované hrany e a druhý vrcholy na opačné straně (viz obr. 3.4). Ohodnocení hrany e je pak dáno úhlem mezi tečnami křivek v bodě hrany e , tedy

$$w(e) = \cos^{-1} \left(\frac{(1, p'_l(e)) \cdot (1, p'_r(e))}{\|(1, p'_l(e))\| \cdot \|(1, p'_r(e))\|} \right), \quad (3.5)$$

kde $p'_l(e)$ a $p'_r(e)$ jsou derivace prvního a druhého polynomu v místě hrany.



Obr. 3.4: Princip metody ABBFP. a) Rovina kolmá na hranu e , b) průsečíky s touto rovinou, c) polynomy $p_l(u)$ a $p_r(u)$. Převzato z [5].

Výhody této metody jsou podobné jako u BFP. Opět můžeme libovolně volit počet průsečíků a stupeň polynomu [2].

3.5 Metoda využívající Laplace-Beltramiho operátoru

Označení Laplace-Beltramiho operátor se používá pro obecnější formu Laplaceova operátoru v Riemannově prostoru a je definován stejně jako Laplaceův operátor jako divergence gradientu

$$\Delta f(x, y, z) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}, \quad (3.6)$$

kde Δ je Laplaceův operátor. Laplace-Beltramiho operátor je tedy součet druhých parciálních derivací funkce f . Tato definice pro hladké funkce je však pro náš diskrétní případ trojúhelníkové sítě nepoužitelná. Diskrétní Laplace-Beltramiho operátor pro trojúhelníkový model definovaný v rov. 2.4 pro vrchol v_i je dán

$$\delta_i = \sum_{(v_i, v_j) \in \mathbf{E}} \omega_{ij} (v_j - v_i), \quad (3.7)$$

kde ω_{ij} je váha hrany (v_i, v_j) [3].

Je zapotřebí zdůraznit, že diskrétní Laplace-Beltramiho operátor je vektor, proto pro ohodnocení vrcholu v_i použijeme velikost vektoru

$$w(v_i) = \|\delta_i\| \quad (3.8)$$

Pokud pro všechny vrcholy zvolíme

$$\omega_{ij} = 1 \quad (3.9)$$

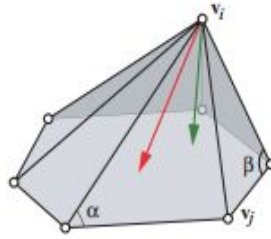
dostaneme tzv. **jednotkový Laplacián**. Ten je možné využít pro ohodnocení kvality sítě ve smyslu rovnoměrnosti trojúhelníků. Jeho výsledný vektor směřuje

do těžiště vějíře sousedních trojúhelníků, takže i pro rovnou plochu může být jednotkový Laplacián nenulový, a proto není vhodný k ohodnocení vrcholů.

Pokud α a β jsou úhly naproti hraně (v_i, v_j) (obr. 3.5) a zvolíme-li váhu hrany

$$\omega_{ij} = \frac{\cot \alpha + \cot \beta}{2}, \quad (3.10)$$

dostáváme **kotangentový Laplacián**. Pro rovinnou plochu bude již tento vektor nulový díky geometrické závislosti. Velikost kotangentového Laplaciánu je tím větší, čím je větší lokální zakřivení okolo vrcholu v_i [3].



Obr. 3.5: Kotangentový (zelený vektor) a jednotkový Laplacián (červený vektor). Převzato z [3].

Kotangens úhlu α nebo β uvedený v rov. 3.10 lze efektivně vypočítat pomocí vztahu

$$\cot \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{\sqrt{\|\mathbf{a}\|^2 \cdot \|\mathbf{b}\|^2 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})^2}}, \quad (3.11)$$

kde \mathbf{a} a \mathbf{b} jsou vektory svírající úhel α .

Pro výpočet ohodnocení vrcholu není vhodný ani jeden z výše zmíněných postupů, jelikož kotangentový Laplacián závisí na rozměrech trojúhelníků. Proto se často používá upravená definice Laplace-Beltramiho operátoru s normalizačním koeficientem d_i , tedy

$$\delta_{\mathbf{i}} = \frac{1}{d_i} \sum_{(v_i, v_j) \in \mathbf{E}} \omega_{ij} (v_j - v_i), \quad (3.12)$$

kde $d_i = \frac{S_i}{3}$ a S_i je obsah všech sousedních trojúhelníků vrcholu v_i . Tato úprava nezmění směr výsledného vektoru, pouze jeho velikost normalizuje [4]. Pro úplnost uvedeme vztah pro určení obsahu obecného trojúhelníku $\triangle ABC$:

$$S_{\triangle ABC} = \frac{1}{2} \|(B - A) \times (C - A)\|. \quad (3.13)$$

3.6 Pokročilé metody detekce význačných rysů

Metoda popsaná v [2] využívá výše uvedené klasifikační operátory SOD, ESOD, BFP, ABBFP. Pomocí prahování je vybrána množina hran, které mohou být považovány za význačné. S cílem vyplnění děr v oblastech význačných hran přidáme do množiny označených hran každou hranu, která má oba vrcholy ve významné oblasti, ale sama není označena. V poslední fázi je aplikována skeletonizace, s jejíž pomocí dochází k převodu oblastí na množinu význačných hran. Výsledky této metody jsou uspokojivé na hrubých modelech, ale při použití na

hladších objektech selhává.

Další metody jsou založené na rekonstrukci hladké plochy. Z dané plochy pak lze snadno vypočítat hlavní křivosti odpovídající jejich hlavním směrům. Význačné rysy jsou pak dány extrémy těchto křivostí. V [7] klasifikují význačné rysy na modelech na hřbety a údolí. Jejich metoda dosahuje dobrých výsledků, ale detekce je časově velmi náročná, protože pro každý vrchol se počítá tenzor zakřivení a jeho derivace a model se globálně aproximuje na implicitní plochu. Výpočetní čas pro tenzory zakřivení trojúhelníkové sítě a jejich derivace se podařilo zredukovat v [8] použitím lokální aproximace polynomem.

Další důležitá kategorie je metoda založená na teorii volby normálového tenzoru [22]. V této metodě přijali teorii volby normálového tenzoru, která má velké využití v počítačovém vidění (např. segmentaci). Pomocí ní pak analyzují tvar povrchu. Tato metoda zvládá n -rozměrné trojúhelníkové sítě. Tedy detekce zahrnuje i rozlišení barevného odstínu. Snadno detekuje ostré hrany, ale i hladší přechody a je robustní na zašuměných datech.

3.6.1 Diskrétní křivosti a morfologické operátory

Ing. Karlíček ve své diplomové práci [9] využívá k detekci význačných rysů na triangularizovaných modelech křivosti. Jeho metoda je použitelná na terénních i trojrozměrných modelech. Navrhovaný postup rozdělil do tří částí:

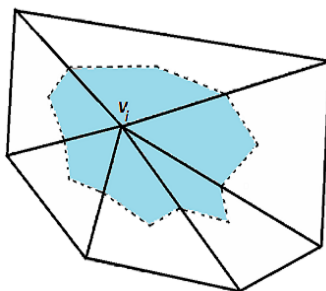
- **Ohodnocení vrcholů** - každému vrcholu se definuje jeho významnost pomocí křivostí.
- **Získání význačných oblastí** - na váhy z předchozího kroku aplikujeme prahování pomocí dolní meze nebo intervalu.
- **Použití morfologických operátorů** - na vzniklé význačné oblasti se aplikují morfologické operátory a následně se využije skeletonizace pro získání význačných hran.

Pro výpočet křivostí je nutné umět spočítat derivaci hladké funkce v konkrétním bodě, ale trojúhelníkový model je funkce po částech lineární. Z tohoto důvodu navrhovaná metoda využívá algoritmu z článku [6], který se zabývá diferenciální geometrií pro trojúhelníkové sítě a uvádí aproximační vztahy křivostí.

Abychom mohli formulovat vztahy pro výpočet křivostí, je nutné určit oblast plochy, ke které se bude křivost vztahovat. Jedna z možností je spojení oblastí vymezených těžišti trojúhelníků a středy hran obsahujících daný vrchol. Tato varianta je zobrazena na obr. 3.6.

V [9] však dali přednost lepší variantě využívající Voroného oblasti, protože poskytuje menší chybu než oblast předchozí. Základní myšlenka Voroného oblasti vychází z toho, že obsahuje pouze body, které jsou ke konkrétnímu vrcholu nejbližší. Voroného oblast okolo konkrétního vrcholu získáme sjednocením podoblastí v každém sousedním trojúhelníku, která vznikne tak, že vezmeme středy hran obsahující zvolený vrchol a propojíme ho se středem kružnice opsané tohoto

trojúhelníku. Na obr. 3.7 si lze prohlédnout příklad Voroného oblastí.

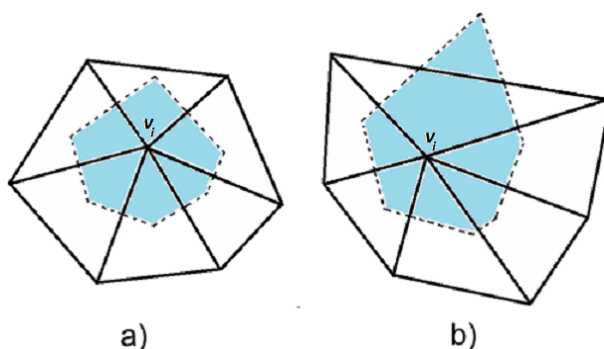


Obr. 3.6: Oblast plochy vytvořená na základě těžišť sousedních trojúhelníků daného vrcholu v_i a středů hran obsahující tento vrchol. Převzato z [9].

Obsah Voroného oblasti pro vrchol v_i , jehož všechny sousední trojúhelníky jsou ostroúhlé, lze vypočítat jako

$$A_{Voroného} = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{1}{8} (|v_i v_j|^2 \cot \alpha + |v_i v_{j+1}|^2 \cot \beta), \quad (3.14)$$

kde N_i je počet sousedních trojúhelníků vrcholu v_i , α je úhel u vrcholu v_{j+1} a β je úhel u vrcholu v_j a $|v_i v_j|$ je délka hrany (v_i, v_j) . Vztah pro výpočet kotangens úhlu je uveden v rov. 3.10.

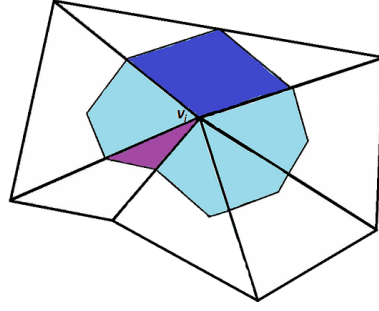


Obr. 3.7: Voroného oblast plochy pro konkrétní vrchol v_i trojúhelníkové sítě. a) Oblast má všechny trojúhelníky ostroúhlé, b) oblast obsahuje i tupoúhlý trojúhelník. Převzato z [9].

V případě, že všechny sousední trojúhelníky vrcholu v_i nejsou ostroúhlé, pak vztah (3.14) neplatí a navíc dochází k překrývání oblastí nebo mezi nimi může vzniknout díra. Pro tento případ je navržena tzv. *kombinovaná* oblast, která zajišťuje napojování oblastí a navíc co nejvíce využívá oblast Voroného. Pro konkrétní vrchol v_i trojúhelníkové sítě lze kombinovanou oblast získat následovně [9]:

1. Jestliže je sousední trojúhelník vrcholu v_i ostroúhlý, pak se vytvoří Voroného oblast.
2. V opačném případě se použije střed hrany, která leží naproti tupému úhlu, a ten propojíme se středy přilehlých stran.

Uvedený postup je zobrazen na obr. 3.8. Nyní už nic nebrání formulování vztahů pro výpočet křivosti.



Obr. 3.8: Kombinovaná oblast vrcholu v_i . Světle modré oblasti značí Voroného oblasti v ostroúhlých trojúhelnících. V tupoúhlých trojúhelnících jsou oblasti tmavě modré a fialové. Tmavě modrá barva je použita v trojúhelníku, jehož tupý úhel je u vrcholu v_i , a fialová oblast v trojúhelníku, který má tupý úhel u jednoho ze zbývajících dvou vrcholů. Převzato z [9].

Střední křivost

Střední křivost pro konkrétní vrchol v_i trojúhelníkové sítě lze vypočítat pomocí vztahu

$$H = \left\| \frac{1}{4 \cdot A_{\text{kombinovaná}}} \sum_{(v_i, v_j) \in \mathbf{E}} (\cot \alpha + \cot \beta)(v_i - v_j) \right\|, \quad (3.15)$$

kde α a β představují úhly naproti hraně (v_i, v_j) a $A_{\text{kombinovaná}}$ značí obsah kombinované oblasti. Tato rovnice je velmi podobná kotangentovému Laplaciánu.

Gaussova křivost

Vztah pro Gaussovu křivost pro konkrétní vrchol v_i trojúhelníkové sítě je následující

$$G = (2\pi - \sum_{j=1}^{N_i} \theta_j) / A_{\text{kombinovaná}}, \quad (3.16)$$

kde θ_j je úhel j -tého trojúhelníku u vrcholu v_i a N_i představuje počet sousedních trojúhelníků vrcholu v_i . Z rov. 3.16 je zřejmé, že Gaussova křivost je pro jakoukoli rovinou plochu nulová.

Hlavní křivosti

Hlavní křivosti lze potom jednoduše určit pomocí vztahů z diferenciální geometrie, které využívají Gaussovu a střední křivost.

$$\begin{aligned} {}^n k_{\max} &= H + \sqrt{H^2 - G}, \\ {}^n k_{\min} &= H - \sqrt{H^2 - G}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Při použití těchto vztahů na trojúhelníkových sítích je však nutné kontrolovat, že H^2 je větší než G , což nemusí být nutně splněno a mohl by tak nastat numerický problém. Jestliže je menší (pouze ve vzácných případech), je nutné nastavit $\sqrt{H^2 - G}$ na nulu.

Na ohodnocení vrcholů pomocí křivostí se dále v navrhované metodě [9] aplikuje prahování, které umožní klasifikovat vrcholy do dvou skupin

$$1 \leq i \leq N : \quad \Omega_i = \begin{cases} 1, & w_i \in [a, b], \\ 0, & \text{v ostatních případech,} \end{cases} \quad (3.18)$$

kde N udává počet vrcholů trojúhelníkového modelu, Ω_i představuje zařazení vrcholů do vybrané podmnožiny (pro $\Omega_i = 1$) a mimo množinu (pro $\Omega_i = 0$), w_i označuje ohodnocení vrcholů a hodnoty $a, b \in \mathbb{R}$ udávají prahové hodnoty, které jsou většinou zadávány uživatelem. Význačná množina \mathcal{F}_v je pak tvořená vrcholy, které byly zařazeny do skupiny 1:

$$\mathcal{F}_v := \{v_j \in \mathbf{F} \mid \Omega_j = 1\}. \quad (3.19)$$

Dále metoda [9] využívá binární matematické morfologie, která je již delší dobu známá především ze zpracování digitálních obrazů. Pomocí morfologických operátorů je pak možné upravení význačné množiny, k tomu je však nutné předefinování na trojúhelníkové síti. N-sousedství \mathbf{N}^n vrcholu definované v kap. 2.4 je v definicích morfologických operátorů použito jako strukturní element a tím dojde k přizpůsobení topologie trojúhelníkového modelu pro použití morfologických operátorů.

Dilatace

Dilatace množiny \mathcal{F}_v je definována jako

$$\text{dilatace}^n(\mathcal{F}_v) := \{v_j \mid \exists v_i \in \mathcal{F}_v : v_j \in \mathbf{N}_i^n\}. \quad (3.20)$$

Dilatace je operace, která přidává nové vrcholy do význačné oblasti, proto může být použita pro zaplňování děr.

Eroze

Eroze množiny \mathcal{F}_v je definována jako

$$\text{eroze}^n(\mathcal{F}_v) := \{v_j \mid \mathbf{N}_j^n \subseteq \mathcal{F}_v\}. \quad (3.21)$$

Eroze se naopak od dilatace snaží některé vrcholy z význačné oblasti vymazat, proto se používá k odstranění nepotřebných „větvi“.

Otevření

Operace otevření má za cíl odstranit nežádoucí zmenšení význačné oblasti po aplikaci operace eroze. Otevření je formulováno jako eroze následovaná dilatací

$$\text{otevření}^n(\mathcal{F}_v) = \text{dilatace}^n(\text{eroze}^n(\mathcal{F}_v)). \quad (3.22)$$

Tím je možné vymazat nepotřebné „větve“ význačné oblasti a zachovat její velikost.

Uzavření

Uzavření vznikne prohozením operací v operaci otevření a využívá se, aby chom zamezili zvětšení význačné oblasti po dilataci.

$$\text{uzavření}^n(\mathcal{F}_v) = \text{eroze}^n(\text{dilatace}^n(\mathcal{F}_v)). \quad (3.23)$$

Tato operace tedy zaplní díry uvnitř význačné oblasti a zároveň ponechá její velikost.

Skeletonizace

Vzhledem k tomu, že většinou chceme, aby význačné rysy byly reprezentovány úzkou linií, pak je velmi důležitý také operátor skeletonizace. Cílem této operace je získání kostry významné oblasti, která není tenčí než jeden vrchol a popisuje její topologii. To lze udělat tak, že se neustále odstraňují vrcholy na hranici oblasti, ale na rozdíl od eroze u skeletonizace chceme určité části význačné oblasti zachovat. Je tedy důležité definovat kritéria odstranění vrcholu [9].

Nechť $\Omega \in \{0, 1\}^N$ je vektor popisující rozdělení vrcholů modelu do skupiny s hodnotu 0 nebo 1. Nechť $(u_\mu^i)_{\mu=0}^{\mu=N_i-1}$ označuje sekvenci indexů vrcholů okolo vrcholu v_i seřazenou podle hodinových ručiček (i je index daného vrcholu a N_i je počet jeho sousedů). Dále se v [9] definuje komplexita c_i vrcholu v_i jako

$$c_i := \sum_{\mu=0}^{\mu=N_i-1} \left| \Omega_{u_\mu^i} - \Omega_{u_{\mu+1 \bmod N_i}^i} \right|, \quad (3.24)$$

kde $\Omega_{u_\mu^i}$ představuje hodnotu skupiny (0 nebo 1) vrcholu μ , který sousedí s vrcholem v_i . Vrchol v_i je **komplexní**, jestliže $\Omega_i = 1$ a $c_i \neq 4$. K určení komplexity vrcholu je tedy nutné projít všechny sousedy vrcholu a sčítat počet přechodů z vrcholů význačné množiny na vrcholy mimo význačnou množinu a naopak. Pro $c_i = 4$ je vrchol součástí význačné hrany se šířkou jedna a pro $c_i > 4$ se ve vrcholu schází více význačných hran. Dále ještě zbývá definovat **střed** a **disk** význačné oblasti. Vrchol v_i je definován jako střed, pokud $\mathbf{N}_i \subset \mathcal{F}_v$. Množina $O_i := \{v_j \mid v_i \text{ je střed} \wedge v_j \in \mathbf{N}_i \setminus v_i\}$ určuje disk okolo středu v_i . Samozřejmě, že vrchol označený jako disk může být také středem. Množina všech komplexních vrcholů význačné oblasti je $C \subseteq \mathcal{F}_v$, $O \subset \mathcal{F}_v$ určuje sjednocení všech disků a $\odot \subset \mathcal{F}_v$ je sjednocení všech středů. Některé vrcholy však nemusí být přiřazeny do nějaké třídy, proto je vytvořena další množina, tzv. **vnější**. Množina všech vnějších vrcholů je definována jako $D := \mathcal{F}_v \setminus (O \cup C \cup \odot)$. Jelikož vrchol během skeletonizace může změnit třídu, zavedeme mezi nimi priority. Změna třídy by totiž znamenala rozdělení spojených význačných oblastí. Třída disků bude mít menší prioritu než třídy ostatní, pak tedy vrchol klasifikovaný jako disk se může během skeletonizace změnit např. na komplexní [9].

Operace skeletonizace bude iterativně mazat z význačné oblasti disky, které během skeletonizace nezmění prioritu. Před každým vyhozením vrcholu je tedy nutné přepočítat jeho třídu. Operace se ukončí v době, kdy v oblasti nebude docházet k žádné změně.

Po aplikování této metody může kostra obsahovat pouze komplexní nebo vnější vrcholy ale úzké linie ještě nemusí být dosaženo. K získání výsledné úzké linie se tedy použije následujícího postupu:

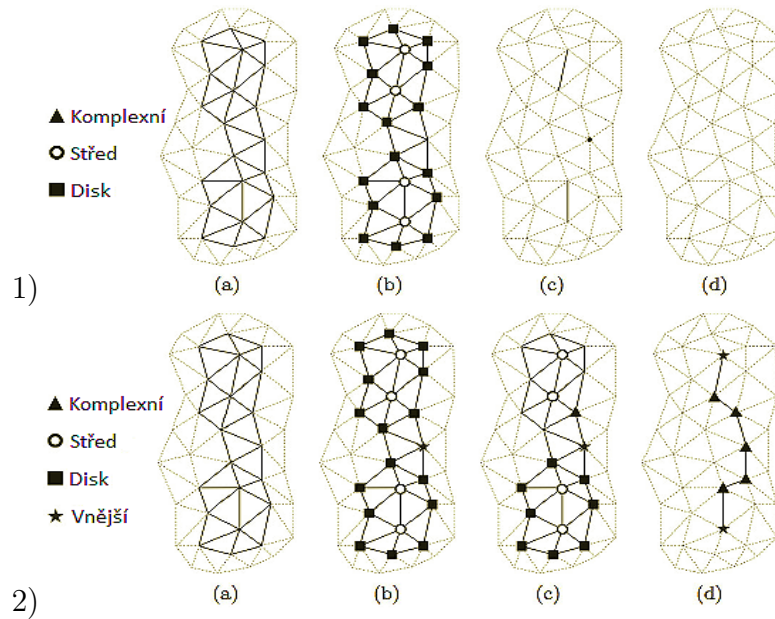
1. Vyhozeny jsou ty vnější vrcholy, které mají více než dva sousedy ve význačné oblasti \mathcal{F}_v .
2. Ponechány jsou vrcholy s nejvýše jedním sousedem v \mathcal{F}_v .

Výsledkem této operace je množina \mathcal{F}_v obsahující pouze komplexní vrcholy a vnější vrcholy s nejvýše jedním sousedem (tj. vrcholy na konci větve). Takto vytvořený algoritmus je opravou běžného algoritmu skeletonizace, který pouze z význačné množiny maže všechny disky na okraji význačné oblasti. Na určitých typech konfigurací trojúhelníkové sítě pak použitím tohoto algoritmu dochází k oddělení oblastí, které byly původně spojeny, nebo výsledná kostra obsahuje i čáry tloušťky větší než jedna. Více o tomto tématu je možné nalézt v literatuře [9], [23]. Na obr. 3.9 je zobrazena ukázka chybné skeletonizace a opravené skeletonizace pomocí výše zmíněného algoritmu.

Prořezávání

Operátor prořezávání odstraňuje nežádoucí krátké „větve“. Necht' \mathcal{F}_v je množina význačných vrcholů a $C \subseteq \mathcal{F}_v$ je množina komplexních vrcholů, pak operátor prořezávání je definován

$$\text{prořezávání}(\mathcal{F}_v) := \mathcal{F}_v \setminus \bar{C}. \quad (3.25)$$



Obr. 3.9: Ukázka chybné skeletonizace [1]) a její opravený algoritmus [2]). a) Význačná oblast, b) rozdělení vrcholů do jednotlivých tříd, c) po aplikování skeletonizace, d) po aplikování prořezávání. Převzato z [21].

3.6.2 MLS aproximace Metoda nejmenších čtverců

Jedna z dalších pokročilých metod, která detekuje význačné rysy stanovením křivostí přímo ze sítě aplikováním metody nejmenších čtverců² na lokální oblast, je popsána v [10]. Stejně jako v [7] se v této metodě využívá klasifikace

²Metoda nejmenších čtverců je numerická metoda pro aproximaci řešení přeřčených soustav rovnic.

význačných linií na hřebety a údolí. Aproximace povrchu metodou nejmenších čtverců nejčastěji zahrnuje dvě fáze: stanovení lokální tečné roviny a výpočet polynomu, který lokálně aproximuje vrcholy promítnuté na tuto tečnou rovinu. Avšak v [10] navrhli modifikovanou metodu, která používá substituci pro tečnou rovinu a tím snižuje časovou složitost. V každém vrcholu se dále stanoví křivosti a jejich derivace. Hřebety a údolí jsou detekovány kontrolováním nulové derivace hlavních křivostí v každém vrcholu sítě. Nakonec jsou detekované hřebety a údolí spojeny do linií v odpovídajících hlavních směrech. Tato metoda redukuje výpočetní složitost předešlých metod, které rekonstruují hladké plochy a navíc spojení vrcholů v hlavních směrech zvyšuje kvalitu výsledné vizualizace.

Jak už bylo řečeno, pro hladký povrch je možné stanovit maximální a minimální křivosti (${}^n\kappa_{max}$ a ${}^n\kappa_{min}$) a jejich odpovídající hlavní směry (t_{max} a t_{min}) ve vrcholu v_i . Derivace ${}^n\kappa_{max}$ a ${}^n\kappa_{min}$ v odpovídajících směrech t_{max} a t_{min} jsou dány

$$\begin{aligned} e_{max} &= \frac{\partial {}^n\kappa_{max}}{\partial t_{max}}, \\ e_{min} &= \frac{\partial {}^n\kappa_{min}}{\partial t_{min}}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Vrcholy, pro které platí ${}^n\kappa_{max} = {}^n\kappa_{min}$, jsou vyloučeny.

Extrémy hlavních křivostí podél jejich hlavních směrů jsou dány nulovou derivací e_{max} a e_{min} a jsou použity k definování vrcholů a údolí

$$\begin{aligned} e_{max} &= 0, & \frac{\partial e_{max}}{\partial t_{max}} < 0, & & {}^n\kappa_{max} > |{}^n\kappa_{min}| & & \text{hřebety} \\ e_{min} &= 0, & \frac{\partial e_{min}}{\partial t_{min}} > 0, & & {}^n\kappa_{min} < -|{}^n\kappa_{max}| & & \text{údolí} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Nyní bude popsána modifikovaná metoda nejmenších čtverců na trojúhelníkových sítích. Mějme množinu vrcholů $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ na diskretním povrchu S v \mathbb{R}^3 . Ke každému vrcholu v_j hledáme tečnou rovinu H . Jednotkový normálový vektor tečné roviny určíme pomocí aritmetického průměru normál sousedních trojúhelníků k danému vrcholu, včetně vrcholu samotného. Pak je tečná rovina H dána obecnou rovnicí:

$$H : x \cdot n_1 + y \cdot n_2 + z \cdot n_3 = d, \quad (3.28)$$

kde n_1, n_2 a n_3 jsou složky normálového vektoru $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)^T$ roviny. Nechť množina \mathbf{N}_j^n určuje n -sousedství vrcholu v_j , pak tuto množinu vrcholů promítneme na tečnou rovinu H . Množina $\mathbf{X}' = [x'_1, x'_2, \dots, x'_m]$ je ortogonální projekce vrcholů \mathbf{N}_j^n na H a získáme ji aplikováním vztahu 3.29 na všechny vrcholy.

$$x'_j = (v_j + \mathbf{n}t), \quad (3.29)$$

kde \mathbf{n} je normálový vektor tečné roviny H a t je parametr, pro který platí vztah

$$t = \frac{d - \mathbf{n}^T v_j}{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}. \quad (3.30)$$

Potom $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ jsou body ortogonální projekce vrcholů \mathbf{V} na rovinu H , reprezentované ve specifickém ortonormálním souřadnicovém systému, definovaném na H tak, aby vrchol v_j byl v počátku. Nový souřadnicový systém

dostaneme pomocí nových báзовých souřadnic Q , jimiž je jednotkový normálový vektor tečné roviny \mathbf{n} a dále dva směrové ortonormální vektory náležící tečné rovině. Všechny vrcholy pak transformujeme do nových souřadnic pomocí vztahu

$$x_j = T_j^{-1}(x'_j - p_j), \quad (3.31)$$

kde x_j jsou souřadnice vrcholu x'_j v nové bázi Q , T_j^{-1} je inverzní matice přechodu z původní báze Q' do nové Q a p_j jsou souřadnice počátku v nové bázi Q [11]. Volba n -sousedství závisí na uživateli, avšak vzhledem k velké výpočetní složitosti se doporučuje volna $n = 3$. Menší volba neposkytuje dobré výsledky.

Lokální aproximace povrchu S je definována jako polynom p třetího stupně o dvou neznámých, který minimalizuje následující výraz 3.32

$$\mathcal{E} = \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} (p(x_i) - f_i)^2 \theta(\|v_i - v_j\|), \quad (3.32)$$

$$\theta(d) = e^{-(d^2/h^2)}, \quad (3.33)$$

kde funkce θ je nezáporná váha (obvykle Gaussian, viz rov. 3.33), parametr h je průměrná délka hran v_j v 1-sousedství a $f_i = \mathbf{n}^T v_i - d$ jsou výšky vrcholů v_i nad rovinou H .

Nechť $\mathbf{b}(x) = [b_1(x), b_2(x), \dots, b_k(x)]^T$ je báзовý vektor polynomu a $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_k]^T$ je vektor neznámých koeficientů polynomu, pak polynom lze přepsat $p(x) = \mathbf{b}(x)^T \mathbf{c}$ a výraz \mathcal{E} , který minimalizujeme, lze vyjádřit jako

$$\mathcal{E} = \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} (\mathbf{b}(x_i)^T \mathbf{c} - f_i)^2 \theta(\|v_i - v_j\|). \quad (3.34)$$

K nalezení koeficientů polynomu položíme parciální derivace $(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial c_1}, \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial c_2}, \dots)$ sumy \mathcal{E} rovny nule [27].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial c_1} = 0 : & \quad \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} 2b_1(x_i) [\mathbf{b}(x_i)^T \mathbf{c} - f_i] \theta(\|v_i - v_j\|) = 0, \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial c_2} = 0 : & \quad \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} 2b_2(x_i) [\mathbf{b}(x_i)^T \mathbf{c} - f_i] \theta(\|v_i - v_j\|) = 0, \\ & \quad \vdots \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial c_k} = 0 : & \quad \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} 2b_k(x_i) [\mathbf{b}(x_i)^T \mathbf{c} - f_i] \theta(\|v_i - v_j\|) = 0, \end{aligned} \quad (3.35)$$

To může být zapsáno jako

$$2 \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} \mathbf{b}(x_i) \mathbf{b}(x_i)^T \mathbf{c} \theta(\|v_i - v_j\|) = \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} \mathbf{b}(x_i) f_i \theta(\|v_i - v_j\|). \quad (3.36)$$

Označíme-li matici $\mathbf{A} = \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} \mathbf{b}(x_i) \mathbf{b}(x_i)^T \theta(\|v_i - v_j\|)$ a vektor

$\mathbf{d} = \sum_{v_i \in \mathbf{N}_j^n} \mathbf{b}(x_i)^T f_i \theta(\|v_i - v_j\|)$, pak dostáváme lineární systém rovnic $\mathbf{A} \mathbf{c} = \mathbf{d}$

a řešení minimalizace \mathcal{E} je ve tvaru $\mathbf{c} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{d}$.

Metoda nejmenších čtverců je použita k odhadu maximální a minimální křivosti ${}^n\kappa_{max}$ a ${}^n\kappa_{min}$ a jejich derivace e_{max} a e_{min} v každém vrcholu sítě. Polynom $z = p(x_i)$ se převede na implicitní tvar plochy $F = z - p(x_i)$ a následně se odhadnou křivosti a jejich derivace na povrchu.

Pro každý vrchol v_i se může stanovit jednotkový normálový vektor $\mathbf{n} = \nabla F / (|\nabla F|)$. Hlavní křivosti κ v odpovídajících hlavních směrech $\mathbf{t} = (t_1, t_2, t_3)^T$ můžou být odhadnuty následovně:

$$\kappa = (F_{ij}t^i t^j) / (|\nabla F|), \quad (3.37)$$

kde F_{ij} značí druhé parciální derivace F a je použita Einsteinova sumační konvence. Odhadneme maximální hodnoty ve směru \mathbf{t}_{max} a minimální hodnoty ve směru \mathbf{t}_{min} pomocí analýzy vlastních čísel $\nabla \mathbf{n}$, kde matice $\nabla \mathbf{n}$ je ve tvaru

$$\nabla \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \frac{\partial n_1}{\partial x} & \frac{\partial n_1}{\partial y} & \frac{\partial n_1}{\partial z} \\ \frac{\partial n_2}{\partial x} & \frac{\partial n_2}{\partial y} & \frac{\partial n_2}{\partial z} \\ \frac{\partial n_3}{\partial x} & \frac{\partial n_3}{\partial y} & \frac{\partial n_3}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Číslo $\lambda \in \mathbb{C}$ nazýváme vlastním číslem čtvercové matice $\mathbf{M} = \nabla \mathbf{n}$ právě tehdy, když existuje nenulový vektor $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^n$ tak, že platí $\mathbf{M}\mathbf{s} = \lambda\mathbf{s}$. Vektor \mathbf{s} se nazývá vlastní vektor příslušný vlastnímu číslu λ [28].

Vlastní vektory odpovídající dvěma nenulovým vlastním číslům matice $\nabla \mathbf{n}$ jsou hlavní směry \mathbf{t}_{max} a \mathbf{t}_{min} . Derivace křivosti e ve směrech \mathbf{t} je definována jako

$$e = \nabla \kappa \cdot \mathbf{t} = \frac{F_{ijl}t^i t^j t^l + 3\kappa F_{ij}t^i n^j}{|\nabla F|}, \quad (3.39)$$

kde F_{ijl} značí třetí parciální derivace F .

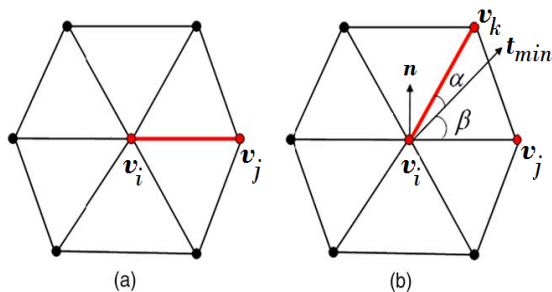
Dále v algoritmu z [10] přistupují ke kontrole, zda hrana $[v_i, v_{i+1}]$ obsahuje vrchol hřbetu. Jestliže je úhel mezi $\mathbf{t}_{max}(v_i)$ a $\mathbf{t}_{max}(v_{i+1})$ tupý, pak se musí $\mathbf{t}_{max}(v_{i+1})$ a $e_{max}(v_{i+1})$ otočit. Jestliže jsou následující rovnice (3.40) splněny, pak hřbet leží mezi vrcholy v_i a v_{i+1} .

$${}^n\kappa_{max}(v) > |{}^n\kappa_{min}(v)| \text{ pro } v = v_i, v_{i+1} \text{ a } e_{max} \cdot (v_i)e_{max}(v_{i+1}) < 0. \quad (3.40)$$

Konkrétní vrchol hřbetu se nalezne porovnáním hodnoty ${}^n\kappa_{max}$ pro dva vrcholy. Vrchol hřbetu je v_i , jestliže platí ${}^n\kappa_{max}(v_i) > {}^n\kappa_{max}(v_{i+1})$. Pokud platí opak, pak je vrcholem hřbetu v_{i+1} . Obdobně i pro hrany údolí.

Poté, co jsou hřbety a údolí detekovány, jsou v metodě dále spojovány do linií. Jak již bylo zmíněno, spojování se provádí v hlavních směrech. Spojení vrcholů probíhá ve dvou krocích (obr. 3.10). Náhodně se vybere vrchol v_i a prozkoumají se jeho sousední vrcholy:

1. Jestliže najdeme jeden nespojený vrchol, spojíme ho s v_i .
2. Jestliže však mezi jeho sousedy existují dva nebo více nespojených vrcholů, pak spojíme v_i s tím, se kterým hlavní směr svírá menší úhel.



Obr. 3.10: Spojení vrcholů: a) vrchol v_i je spojen se svým jedním nespojeným sousedem v_j , b) spojení vrcholu v_i s vrcholem, se kterým hlavní směr t_{min} svírá menší úhel (tj. úhel α), \mathbf{n} je normálový vektor ve vrcholu v_i . Převzato z [10].

Jelikož detekce hran opět může produkovat krátké nechtěné linie, pak je možné opět na linie aplikovat prořezávání [10].

4 Navržená metoda

Modely hlav jsou velmi hladké sítě s velkým množstvím vrcholů a bez výrazně ostrých hran. Výběr vhodné metody na detekci význačných rysů je velmi obtížný. Základní metody zmíněné na začátku kap. 3 fungují dobře na hrubých sítích, jako jsou technické součástky atd. Na hladkých sítích spíše fungují pokročilé metody, které jsou však složitější a výpočetně velmi náročné. Námi navrhovaná metoda je rozdělena do jednotlivých fází:

- **Ohodnocení vrcholů** - nejprve vybereme vhodné metody na ohodnocení vrcholů modelu hlavy.
- **Prahování** - dále stanovíme optimální volbu prahové hodnoty.
- **Nalezení význačných oblastí** - nalezneme význačné oblasti (oči, uši, nos, rty).
- **Detekce řídicích bodů** - nakonec navrhujeme detekci řídicích bodů na detekovaných význačných rysech.

4.1 Ohodnocení vrcholů

Většina pokročilých metod na detekci význačných rysů využívá ohodnocení vrcholů pomocí křivostí. Avšak každá metoda využívá jiné aproximační metody k výpočtu těchto křivostí. Metoda navržená v [9] byla na modelech lidských hlav již aplikována a dosahovala velmi dobrých výsledků. Všechny význačné oblasti hlavy - uši, oči, nos a ústa byli nalezeny (viz obr. 4.1). Navíc výpočet křivostí není příliš výpočetně náročný, proto je tato metoda spolu s vytvořeným softwarem naším výchozím bodem, se kterým budeme dále pracovat a vylepšíme ho tak, aby výsledky na modelech hlav byly co nejlepší.



Obr. 4.1: Výsledky Karlíčkovy metody. Vlevo: ukázka ohodnocení vrcholů pomocí maximální křivosti. Vpravo: nalezené význačné rysy. Převzato z [9].

Dále využijeme také zmíněné metody z [10], která též pracuje s křivostmi, avšak k jejich výpočtu využívá metody nejmenších čtverců. Tato metoda má z metod, které využívají aproximace sítě na hladký povrch, nejmenší časovou složitost. Pomocí ní určíme maximální a minimální křivosti ${}^n\kappa_{max}$ a ${}^n\kappa_{min}$ v každém vrcholu sítě. Dále k výpočtu střední a Gaussovy křivosti využijeme vztahů z diferenciální

geometrie, viz rov. 2.13 a 2.14. Na ohodnocení vrcholů pomocí křivostí tedy opět můžeme aplikovat standardní prahování. Vzhledem ke způsobu výpočtu však nyní nedostáváme pouze kladné hodnoty ohodnocení jako v [9]. Rozdělíme tedy prahování pro záporné a kladné hodnoty. Metoda má výhodu v tom, že rozsah lokální aproximace je libovolný, vzhledem k časové náročnosti je však vhodné použít 3-sousedství.

Poslední metodou ohodnocující vrcholy, kterou v této práci využijeme a zhodnotíme její výsledky, bude Laplace-Beltramiho operátor.

Na hodnoty ohodnocení vrcholů je možné také aplikovat oříznutí, které odstraní odlehlé hodnoty ohodnocení. Oříznutí spočívá v tom, že se vybere uživatelem zadané procento vrcholů s nejvyšší hodnotou ohodnocení a nastaví se jim nová váha. Ta je dána nejvyšší hodnotou ohodnocení vrcholů bez již vybraných vrcholů [9].

4.2 Prahování

Výsledky všech těchto metod ohodnocujících vrcholy jsou však závislé na uživatelem zadaných prahových hodnotách. Vrcholy jsou tím význačnější, čím je hodnota ohodnocení větší, proto je horní prahová hodnota vždy volena jako maximální ohodnocení a zabýváme se pouze volbou dolní prahové hodnoty (resp. pro záporné hodnoty ohodnocení pomocí křivostí získané metodou nejmenších čtverců volíme pouze horní hodnoty prahu). Naším úkolem je však také automatická detekce význačných rysů. K tomu je tedy podstatné nalézt vhodné prahové hodnoty jednotlivých metod, pomocí nichž dostaneme dobré výsledky na všech modelech. Každá metoda dosahuje rozdílného rozsahu ohodnocení vrcholů, proto ohodnocení normalizujeme na hodnoty 0-100 (resp. -100-0 pro záporné hodnoty ohodnocení získané metodou nejmenších čtverců). Pro úplnost je vztah normalizace ohodnocení vrcholů dán

$$w(v_i) = \frac{w(v_i)}{|w_{max}|} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4.1)$$

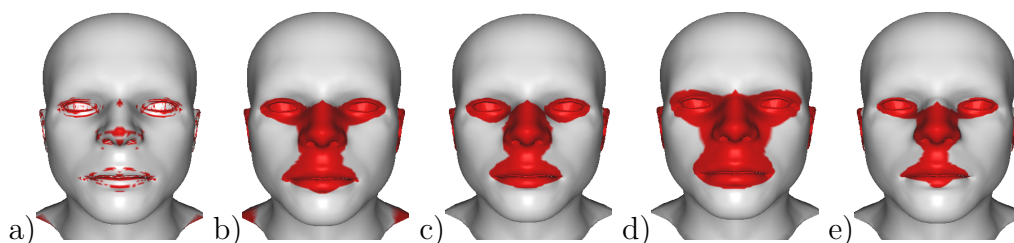
kde $w(v_i)$ je ohodnocení vrcholu v_i , $|w_{max}|$ je absolutní hodnota maximálního ohodnocení všech vrcholů.

K automatické detekci může být vhodné použít jako prahovou hodnotu průměr ohodnocení všech vrcholů. Průměr však může zkreslovat ohodnocení na částech hlavy, které pro nás nejsou příliš významné, jako např. zadní část hlavy. Pak tedy průměrné ohodnocení ze všech vrcholů nemusí obecně fungovat na požadovaných částech obličeje a vhodnější by bylo použít průměrné ohodnocení pouze na jednotlivých oblastech (jako např. oblast rtů, očí, nosu). Nejen z tohoto důvodu byly tedy detekovány význačné oblasti zahrnující celou část očí, uší, rtů a nosu. Postup této detekce je popsán v následující kapitole.

4.3 Nalezení význačných oblastí

K nalezení význačných oblastí můžeme využít morfologických operátorů, které jsou implementovány v [9]. Použití morfologických operátorů na modelech hlav

vidíme na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Aplikace morfologických operátorů na modely lidských hlav. a) Význačné rysy po ohodnocení pomocí střední křivosti a aplikaci prahové hodnoty jako průměr ohodnocení, b) operátor uzavření s rozsahem 10 na význačné rysy z [a]), c) operátor otevření s rozsahem 10 na výsledek z [b]), d) operátor dilatace v rozsahu 4 na výsledek z [c]), e) operátor eroze v rozsahu 3 na výsledek z [b]). Model převzat z [1].

Pro detekci oblastí obličeje pomocí morfologických operátorů jsme museli najít vhodnou konfiguraci parametrů. Pro ohodnocení vrcholů použijeme střední křivost z metody [9] především kvůli nízké výpočtové složitosti. Dolní prahovou hodnotu volíme jako průměr ohodnocení na všech vrcholech modelu. Tak dostaneme význačné rysy, které jsou červeně vykresleny na obr. 4.2 a).

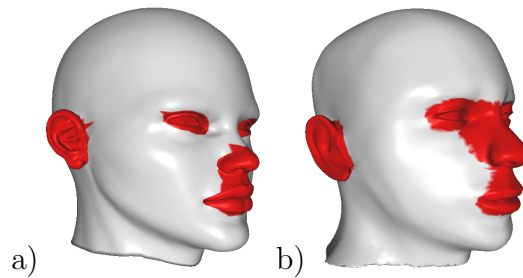
Na výsledné význačné rysy aplikujeme postupně operátory uzavření, otevření, opět uzavření a následně dilataci. Výsledky tohoto postupu však závisí na rozsahu použití operátorů (tj. voleném n -sousedství \mathbf{N}^n). Jelikož se jednotlivé modely hlav liší v celkového počtu vrcholů N , pak je vhodné pro větší modely volit větší rozsah operátorů než pro menší. Z experimentálních výsledků jsme rozsahy morfologických operátorů (kromě dilatace) stanovili takto:

- $N \leq 13000 \Rightarrow n = 5$,
- $13000 \leq N \leq 20000 \Rightarrow n = 10$,
- $N > 20000 \Rightarrow n = 15$.

Jinak řečeno pro modely, které mají méně než 13000 vrcholů volíme rozsah okolí 5, pro ty, které mají méně než 20000, ale více než 13000, volíme rozsah okolí 10 a pro zbylé rozsah okolí 15. Rozsah okolí naposled aplikované dilatace je volen uživatelem podle toho, jak velké oblasti požaduje. Možné je také ji vůbec neaplikovat ($n = 0$). Výsledné význačné oblasti toho postupu jsou zobrazeny na obr. 4.3. Vidíme, že pomocí tohoto postupu získáme význačné oblasti všech částí obličeje. Jediná nevýhoda je v oblasti nosu, kde na některých modelech získáme pouze oblast špičky nosu [obr. 4.3 a)]. Tento nedostatek však pomocí morfologických operátorů nelze vylepšit, neboť pokud použijeme větší rozsahy, dostaneme příliš velké oblasti. V další podkapitole využijeme jiného postupu k nápravě tohoto nedostatku.

4.3.1 Obarvení nalezených oblastí

Po detekování význačných oblastí hlavy je nutné je od sebe navzájem oddělit. K tomu nám pomůže obarvení jednotlivých částí obličeje.



Obr. 4.3: Detekce oblastí obličeje. Ohodnocení vrcholů pomocí střední křivosti, volba dolního prahu jako průměru ohodnocení. Na význačné rysy aplikovány operátory uzavření, otevření a uzavření v rozsahu: a) 15, b) 10. Dilatace v nulovém rozsahu (tj. není aplikována). Modely převzaty z [1].

Obarvení:

Oči: červená

Nos: modrá

Rty: zelená

Uši: šedivá

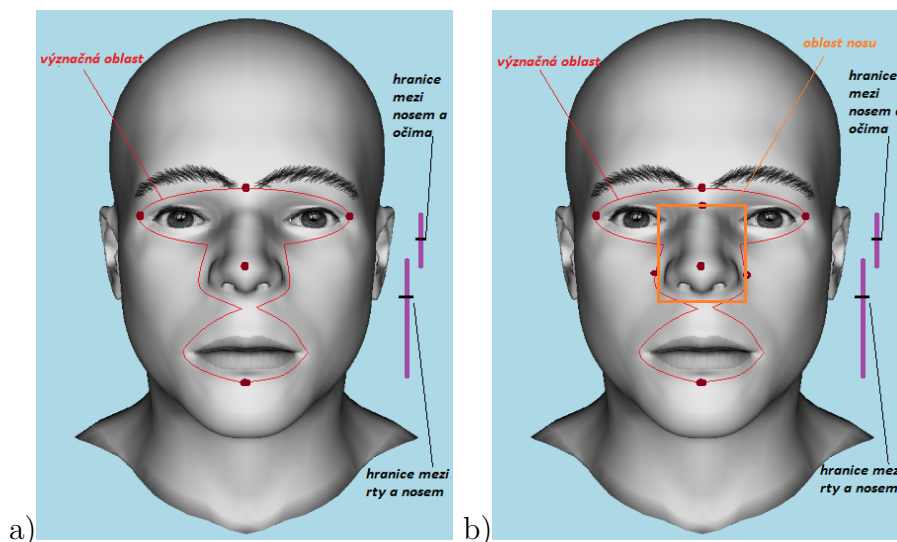
První postup

Jelikož uši jsou od všech zbylých částí odděleny, jejich obarvení je jednoduché. Nalezneme bod s maximální x-souřadnicí, obarvíme ho a projdeme všechny jeho sousedy. Ty, co leží ve význačné oblasti, také obarvíme a stejný postup provedeme u všech sousedů. Oblasti očí, nosu a rtů jsou však často propojené, a jejich obarvení je tedy komplikovanější. Zvolíme tedy postup na obr. 4.4 a). Hranice mezi očima a nosem je dána polovinou vzdálenosti mezi bodem, který je dán maximální x-souřadnicí (samozřejmě kromě bodů v oblasti uší), a špičkou nosu (maximální y-souřadnice). Hranice mezi rty a nosem je pak ve dvou třetinách vzdálenosti špičky nosu.

Druhý postup

V oblasti nosu jsme si však už dříve všimli, že je výběr význačné oblasti pouze v dolní části nosu (viz obr. 4.3). To je však nedostačující, potřebovali bychom, aby do oblastí patřily všechny body na nose, abychom neztratili některé významné body. Proto je nejlepším řešením body na nose vybírat hrubou silou (tj. bez ohledu na významné oblasti). Oblast nosu získáme pomocí kořenu nosu (nejnižší bod na linii nosu uprostřed obličeje, viz obr. 4.4 b), hranicí mezi rty a nosem a šířkou nosu v oblasti špičky nosu (kde je nos nejširší). Body, které jsou zatím ve význačné oblasti nosu za zvolenou šířkou nosu, jsou z význačné oblasti odstraněny.

Na takto získaných význačných oblastech můžeme počítat průměr ohodnocení a zvolit jej jako prahovou hodnotu pro získání význačných rysů. Toto obarvení navíc může využít k další práci s identikity Ing. Petr Martínek.



Obr. 4.4: Postupy obarvení význačných oblastí: a) první postup, b) druhý postup pomocí hrubé síly v oblasti nosu. Model převzat z [1].

4.4 Detekce řídicích bodů

Je možné tedy pomocí ohodnocení vrcholů a prahování detekovat význačné rysy. Samozřejmě, že různé prahové hodnoty mají různé výsledky. Otázka je, jaké výsledky jsou pro nás nejlepší.

Nejlepší význačné rysy jsou pro nás ty, na kterých nejsnáze detekujeme řídicí body z obr. 1.1. Potřebujeme tedy dostat ohraničení oka, rtů a uší. Na nosu potřebujeme mít detekován hřbet a špičku nosu spolu s nosními dírkami. Pak mohou být jednoduchým způsobem detekovány nejdůležitější body. Před tím, než popíšeme navrhovaný postup detekce, zavedeme jistá označení. Každý vrchol je dán svými souřadnicemi v prostoru \mathbb{E}_3 (x, y, z). Označení x_i je tedy x -souřadnice vrcholu v_i .

Oči

Nejprve zmíníme hledání řídicích bodů pro oči. Těmi jsou vždy koutky očí a osm dalších bodů rovnoměrně rozmístěných na ohraničení očí. Význačné rysy, které ohraničují oblast očí, označíme jako \mathcal{F}_v^{oci} [viz obr. 4.5 a)]. Nechť množina $\mathcal{F}_v^{oci+} = \{v_i \mid v_i \in \mathcal{F}_v^{oci} \wedge x \leq 0\}$ označuje význačné rysy na jednom oku, pak pro koutky v_1, v_2 toho oka platí

$$\begin{aligned} v_1 &\in \mathcal{F}_v^{oci+} \wedge x_1 \text{ je minimum,} \\ v_2 &\in \mathcal{F}_v^{oci+} \wedge x_2 \text{ je maximum.} \end{aligned} \quad (4.2)$$

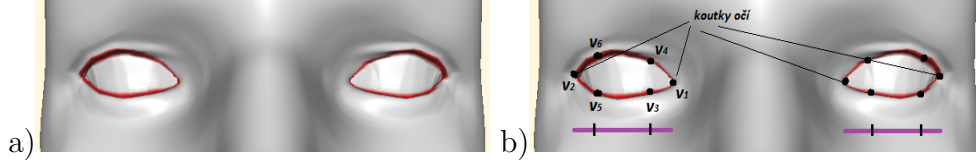
Stejně i pro druhé oko, kde význačné rysy na oku označuje množina $\mathcal{F}_v^{oci-} = \{v_i \mid v_i \in \mathcal{F}_v^{oci} \wedge x < 0\}$.

Další body na očích detekujeme pomocí koutků očí, a to podle obr. 4.5 b). Nechť v_1 je vnitřní koutek levého oka a v_2 je vnější koutek levého oka, pak body

na tomto oku jsou dány podmínkami

$$\begin{aligned}
v_3 \in \mathcal{F}_v^{oci+} &\wedge |x_3 - x_{L_1}| < 0.01 \wedge z_3 \text{ je maximum,} \\
v_4 \in \mathcal{F}_v^{oci+} &\wedge |x_4 - x_{L_1}| < 0.01 \wedge z_4 \text{ je minimum} \\
v_5 \in \mathcal{F}_v^{oci+} &\wedge |x_5 - x_{L_2}| < 0.01 \wedge z_5 \text{ je maximum,} \\
v_6 \in \mathcal{F}_v^{oci+} &\wedge |x_6 - x_{L_2}| < 0.01 \wedge z_6 \text{ je minimum,}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

kde $x_{L_1} = x_2 - \frac{x_1 - x_2}{4}$ a $x_{L_2} = x_1 + \frac{x_1 - x_2}{4}$. To znamená, že body hledáme v pásmu okolo hodnot x_{L_1} a x_{L_2} , tj. v jedné čtvrtině vzdálenosti mezi vnějším a vnitřním koutkem oka. Analogický postup i pro pravé oko.



Obr. 4.5: Postup detekce řídicích bodů na očích, a) Červeně vyznačeny význačné rysy ohraničující oko, b) postup detekce dalších bodů na očích, černě vyznačeny detekované řídicí body. Model *muz_1* převzat z [1].

Uši

Opět si označíme množinu význačných rysů na uších \mathcal{F}_v^{usi} . Ukážeme pouze vztahy por detekci na levém uchu, jelikož detekce na druhém je obdobná. Nechť množina $\mathcal{F}_v^{usi+} = \{v_i \mid v_i \in \mathcal{F}_v^{usi} \wedge x \leq 0\}$ označuje význačné rysy na levém uchu, pak dva body na uších jsou dány extrémy z-souřadnice, tedy platí

$$\begin{aligned}
v_1 \in \mathcal{F}_v^{usi+} &\wedge w_1 > 0 \quad z_1 \text{ je maximum,} \\
v_2 \in \mathcal{F}_v^{usi+} &\wedge w_2 > 0 \quad z_2 \text{ je minimum,}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

kde w_1 a w_2 jsou ohodnocení vrcholů v_1 a v_2 . Body jsou tedy hledány na kladně ohodnocených význačných rysech.

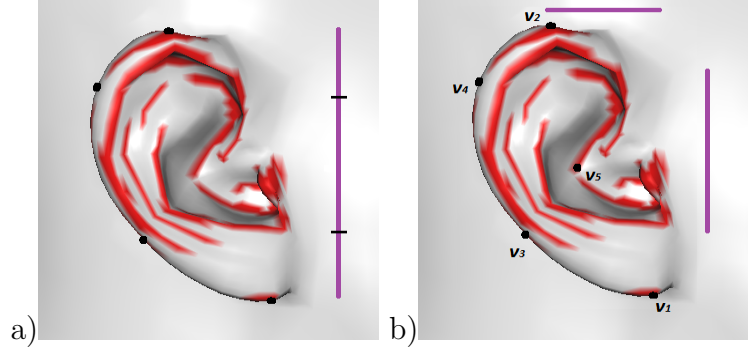
Další dva body na boltečích ucha jsou detekovány v jedné čtvrtině vzdálenosti mezi horním v_2 a dolním v_1 bodem ucha s minimální y-souřadnicí jako je zobrazeno na obr. 4.6.

$$\begin{aligned}
v_3 \in \mathcal{F}_v^{usi+} &\wedge |z_3 - z_{L_1}| < 0.01 \wedge w_3 > 0 \wedge y_3 \text{ je minimum,} \\
v_4 \in \mathcal{F}_v^{usi+} &\wedge |z_4 - z_{L_2}| < 0.01 \wedge w_4 > 0 \wedge y_4 \text{ je minimum,}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

kde $z_{L_1} = z_1 - \frac{z_1 - z_2}{4}$ a $z_{L_2} = z_2 + \frac{z_1 - z_2}{4}$ a w_3 a w_4 jsou ohodnocení vrcholů v_1 a v_2 .

Nakonec ještě detekujeme jeden řídicí bod někde uprostřed ucha. Ten je dán minimální x-souřadnicí ležící mezi horním bodem ucha v_1 a dolním v_2 a mezi body v_3 a v_4 [viz obr. 4.6 b)]

$$v_5 \in \mathcal{F}_v^{usi+} \wedge y_1 > y_5 > y_2 \wedge z_4 > z_5 > z_3 \wedge x_5 \text{ je minimum.} \tag{4.6}$$



Obr. 4.6: Postup detekce řídicích bodů na uchu, červeně vyznačeny význačné rysy ohraničující ucho, černě zobrazeny detekované řídicí body. a) Detekce bodů na boltcích ucha, b) detekce bodu uprostřed ucha. Model *muz_1* převzat z [1].

Rty

Stejně jako u očí, i u rtů budeme nejprve detekovat koutky a opět jako vrcholy s maximální a minimální x-souřadnicí. Necht' \mathcal{F}_v^{rty} označuje význačné rysy na rtech, pak koutky rtů jsou dány vztahy

$$\begin{aligned} v_1 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge x_1 \text{ je maximum,} \\ v_2 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge x_2 \text{ je minimum.} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Dále detekujeme dva body uprostřed rtů, jeden na spodním rtu a jeden na horním a platí pro ně podmínky

$$\begin{aligned} v_3 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge |x_3 - x_s| < 0.005 \wedge x_3 \text{ je maximum,} \\ v_4 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge |x_4 - x_s| < 0.005 \wedge x_4 \text{ je minimum,} \end{aligned} \quad (4.8)$$

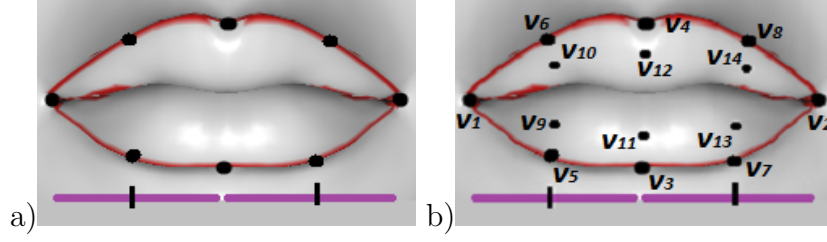
kde x_s je x-souřadnice špičky nosu. To znamená, že tyto dva body leží na linii, která prochází špičkou nosu a kořenem nosu. Špička nosu se nalezne velmi snadno a to jako bod s maximální y-souřadnicí. Na obr. 4.7 a) je také zobrazen postup detekce dalších čtyř řídicích bodů, které rovnoměrně leží na ohraničení rtů.

$$\begin{aligned} v_5 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge |x_5 - x_{L1}| < 0.015 \wedge z_5 \text{ je maximum,} \\ v_6 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge |x_6 - x_{L1}| < 0.015 \wedge z_6 \text{ je minimum} \\ v_7 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge |x_7 - x_{L2}| < 0.015 \wedge z_7 \text{ je maximum,} \\ v_8 \in \mathcal{F}_v^{rty} & \wedge |x_8 - x_{L2}| < 0.015 \wedge z_8 \text{ je minimum,} \end{aligned} \quad (4.9)$$

kde $x_{L1} = x_1 - \frac{x_1 - x_s}{2}$ a $x_{L2} = x_2 - \frac{x_2 - x_s}{2}$.

Na rtech je zapotřebí detekovat ještě body ležící uprostřed rtů, tam však ve většině případů nejsou význačné rysy detekovány, proto je nebudeme hledat na množině \mathcal{F}_v^{rty} , ale celkově na celé význačné oblasti rtů. Tyto body budou mezi již detekovanými body opět v jedné čtvrtině vzdálenosti od každého z nich [viz obr. 4.7 b)]. Uvedeme vztah pouze pro první dva body.

$$\begin{aligned} v_9 \in \mathcal{F}_v & \wedge |x_9 - x_5| < 0.01 \wedge |z_9 - (z_5 - \frac{z_5 - z_6}{4})| < 0.01, \\ v_{10} \in \mathcal{F}_v & \wedge |x_{10} - x_5| < 0.01 \wedge |z_{10} - (z_6 + \frac{z_5 - z_6}{4})| < 0.01 \end{aligned} \quad (4.10)$$



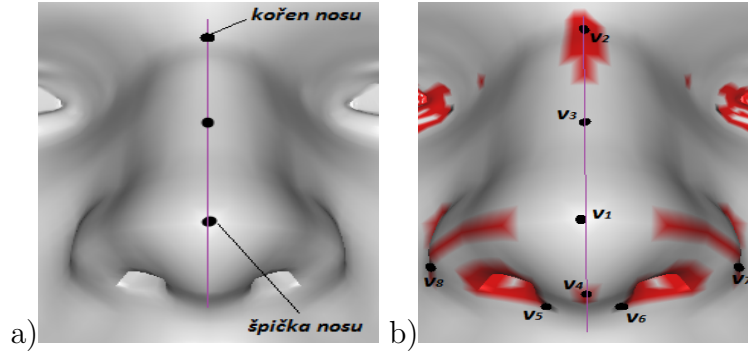
Obr. 4.7: Postup detekce řídicích bodů na rtech, červeně vyznačeny význačné rysy ohraničující rty a černě detekované body. a) Detekce bodů na ohraničení rtů, b) detekce bodů uprostřed rtů. Model *zena_1* převzat z [1].

Nos

Na nose je detekce nejtěžší, neboť jak bude zmíněno v následující kapitole, výsledky význačných rysů na něm nejsou nejlepší. Z toho důvodu je nutné body na hřbetu nosu (špička nosu, kořen nosu atd.) detekovat mimo význačné rysy. Špička nosu je dána maximální y-souřadnicí. Kořen nosu je dán minimální y-souřadnicí na linii, která prochází špičkou nosu (viz obr. 4.8). Dále detekujeme bod v polovině vzdálenosti mezi špičkou a hřbetem nosu na linii procházející špičkou nosu. Nechť v_1 je špička nosu a v_2 je kořen nosu, pak třetí bod na hřbetu nosu je dán

$$v_3 \in F \wedge |x_3 - x_1| < 0.005 \wedge |x_3 - x_{L_1}| < 0.01, \quad (4.11)$$

kde $x_{L_1} = x_1 - \frac{x_1 - x_2}{2}$ je polovina vzdálenosti mezi špičkou nosu a kořenem nosu.



Obr. 4.8: Postup detekce řídicích bodů na nose, černě zobrazeny detekované body. a) Detekce špičky nosu a hřbetu nosu, b) detekce bodů na nosních dírkách a šířce nosu. Model *muz_1* převzat z [1].

Posledních pět bodů detekujeme již na význačné množině vrcholů \mathcal{F}_v^{nos} . Jeden leží opět na linii nosu ve význačné množině pod špičkou nosu. V dolní části nosu hledáme vrcholy s maximální a minimální x-souřadnicí. Dva body na nosních dírkách lze detekovat jako maximum x-souřadnice na záporné části nosu (tj. $x < 0$) v oblasti pod špičkou nosu a minimum v kladné části. Detekce je zobrazena na obr. 4.8 b) a vztahy jsou

$$\begin{aligned} v_4 &\in \mathcal{F}_v^{nos} \wedge z_4 > z_s \wedge |x_4 - x_s| < 0.005, \\ v_5 &\in \mathcal{F}_v^{nos} \wedge z_5 > z_s \wedge x_5 > 0.015 \wedge x_5 \text{ je minimum}, \\ v_6 &\in \mathcal{F}_v^{nos} \wedge z_6 > z_s \wedge x_6 < -0.015 \wedge x_6 \text{ je maximum}, \\ v_7 &\in \mathcal{F}_v^{nos} \wedge |z_7 - z_s| < 0.1 \wedge x_7 \text{ je maximum}, \\ v_8 &\in \mathcal{F}_v^{nos} \wedge |z_8 - z_s| < 0.1 \wedge x_8 \text{ je minimum}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

5 Implementace

Jak už bylo řečeno, převzali jsme program z [9], jelikož zvládne 3D vizualizaci modelu a umožňuje výpočet křivostí a prahování. Do programu byly následně implementovány další používané metody a postupy a byl upraven pro fungování na modelu hlavy. Aplikace je implementována ve vývojovém prostředí *Microsoft Visual Studio 2010* s využitím programovacího jazyka *C#* a *.Net* frameworku verze 4. Vizualizace je provedena s využitím knihovny *SlimDX*, která zapouzdřuje jednotlivé funkce grafické knihovny *DirectX*. K složitějším matematickým výpočtům bylo použito knihovny *Math.Net Numerics*.

5.1 Vstupní soubory

Navrženou metodu testujeme pouze na modelech hlav, které jsou uloženy v **.ply** souboru. Jeho struktura je velmi jednoduchá. Existují dvě verze - textová a binární, program však předpokládá pouze textovou verzi. Na začátku souboru se nachází hlavička označená identifikátorem **ply** a ukončená **end_header**. Z ní je možné vyčíst informace o modelu, např. počet vrcholů **element vertex**, počet polygonů **element face**, formát souboru **format** a také datové typy jednotlivých atributů vrcholu **property**. Za ukončením hlavičky je na každé řádce uložen jeden vrchol a jeho atributy jsou odděleny mezerou. Naše soubory většinou obsahují souřadnice vrcholu v prostoru, jeho normálový vektor, barvu vrcholu v modelu RGB a souřadnice pro mapování textur, ale obecně mohou obsahovat i méně atributů. Po všech vrcholech následuje na každé řádce definice jednoho polygonu, kde první číslo udává počet jeho bodů, v našem případě trojúhelníkové sítě je to vždy trojka.

```
ply
format ascii 1.0
comment VCGLIB generated
element vertex 3
property float x
property float y
property float z
property float nx
property float ny
property float nz
property uchar red
property uchar green
property uchar blue
property uchar alpha
property float texture_u
property float texture_v
element face 1
property list uchar int vertex_indices
end_header
0.61107 -0.198838 0.003877 6.12667 -0.595943 1.05574 50 50 50 255 0.39535 0.57025
0.612675 -0.208 -0.039742 5.57379 -2.65789 -0.0280691 50 50 50 255 0.393867 0.549308
0.617793 -0.183061 -0.034702 6.20377 -0.658753 0.70862 50 50 50 255 0.398423 0.55185
3 0 1 2
```

Program navíc podporuje formát **.obj**. Jeho struktura je také velmi jednoduchá. Vytvořená aplikace podporuje pouze soubory, které uchovávají pouze pozici vrcholu a jednotlivé trojúhelníky. Následující ukázka může být triviálním příkladem tohoto formátu:

```
v 75.647881 95.921524 114.445915
v 74.481018 91.059586 114.445915
v 74.481018 91.059586 109.195915
# 4 vertices

f 1 2 3
# 1 triangles
```

5.2 Datové struktury

Aplikace z [9] je založena na jednoduché datové struktuře uchováající trojúhelníkovou síť. Jelikož je zapotřebí rychlý přístup k sousedním trojúhelníkům konkrétního vrcholu, byla vytvořena datová struktura z následujících částí:

- **Vertices** - pole struktur datového typu *PositionNormalColored* obsahující vrcholy s jejich atributy.
- **Triangles** - pole struktur datového typu *Triangle*
- **VertexAdjacency** - pole spojových seznamů obsahující indexy sousedních trojúhelníků ke konkrétnímu vrcholu.

Datový typ *Vector3* je struktura, která se skládá ze tří reálných čísel představujících souřadnice x, y, z . Pro uchování ohodnocení vrcholů je vytvořeno pole ***VertexRank*** datového typu *float*. Při použití prahování se vytvoří význačná oblast, která je dále využívána morfologickými operátory. K jejímu uchování byl vytvořen spojový seznam zvaný ***FeatureVertex*** datového typu *int*, který obsahuje indexy význačných vrcholů. Pole ***featureVertexArray*** datového typu *bool* je vytvořeno pro snížení časové náročnosti morfologických operátorů a říká, jestli je daný vrchol součástí význačné oblasti [9].

Jelikož v našem algoritmu jsou detekovány celé význačné oblasti, bylo zapotřebí datovou strukturu rozšířit o čtyři spojové seznamy ***FeatureRegions***, které obsahují indexy vrcholů patřící do dané význačné oblasti. Opět pro snazší práci máme vytvořená čtyři pole ***featureRegionsArray*** datového typu *bool*, která nesou informaci o tom, zda je konkrétní vrchol v dané význačné oblasti. Dále umožňujeme prahování na jednotlivých význačných oblastech, takže pro jednotlivé oblasti máme tedy spojový seznam ***FeatureVertexRegions***, který obsahuje indexy význačných vrcholů na dané oblasti, a pole ***featureVertexRegionsArray*** datového typu *bool*, které nese informaci o tom, zda je vrchol na dané oblasti význačný. Dále je ještě vytvořen spojový seznam ***VertexRankRegions***, který obsahuje hodnoty ohodnocení vrcholů na dané význačné oblasti. Velikosti spojových seznamů *VertexRankRegions* a *FeatureVertexRegions* si odpovídají. Ve spojovém seznamu ***ControlPoints*** jsou uloženy všechny řídicí body a pole ***controlPointsArray*** datového typu *bool* nese informaci, zda daný vrchol je řídicím bodem.

5.3 Popis tříd

Třídy jsou převzaty z [9], nebyly převzaty třídy, které nejsou v naší aplikaci využitelné (např. třída *TerrainCamera*, *HSL Color*). Obarvení modelu jsme opravili tak, abychom nemuseli využívat převod z barevného modelu HSL do modelu

RGB a tím jsme snížili časovou náročnost. Třídy *EdgeDetector* s *EdgeCreator* byly upraveny a rozšířeny o nové algoritmy. Třída *EdgeCreator* umožňovala ruční tvorbu hran, nyní však slouží k ručnímu výběru vrcholů.

Po spuštění aplikace se volá metoda *Main*, která se nachází ve statické třídě pojmenované *Program*. Ta následně vytvoří instanci třídy *Core* [9].

Core

Hlavní třída, která umožňuje vytvoření a zprostředkování přístupu k jednotlivým komponentám programu (např. okno, kamera, trojúhelníkový model).

Grafické uživatelské rozhraní celé aplikace vytváří třída *Window*. Ta obsahuje všechny metody reagující na uživatelské vstupy, např. kliknutí na tlačítko.

Camera

Tato třída definuje společné vlastnosti všech kamer, mezi které patří její pozice, směr, transformační matice, atd. Každá kamera také umožňuje uložení počátečního stavu, do kterého se lze v případě potřeby vrátit pomocí metody *Reset()*.

Model3DCamery

Tato třída je potomkem předchozí třídy *Camera* a je vytvořena pro použití na trojrozměrné modely. Obsahuje metodu pomocí níž lze umístit zobrazovaný model do správné pozice.

Model

Třída, která reprezentuje načtený model. Obsahuje tedy vrcholy, trojúhelníky, informaci o sousedních trojúhelnících a transformační matici. Dále také pomocí metody *PickVertex(Ray ray)* vypočítá, zda došlo k průsečíku paprsku s modelem.

ModelLoader

Třída obsahující metody pro načtení vstupních dat.

Renderer

Třída vytvořená k zajištění inicializace a nastavení grafického adaptéru. Umožňuje vypnout osvětlení, nastavit nový směr světla, změnit barvu pozadí nebo také přepnout režim vykreslení.

EdgeCreator

Hlavní cíl této metody spočívá v ručním výběru vrcholů modelu. Ty lze následně vymazat nebo přidat mezi význačné rysy nebo řídicí body.

EdgeDetector

Jedna z nejdůležitějších tříd pro detekování význačných rysů. Obsahuje veškeré algoritmy ohodnocující vrcholy a dále metody automatické detekce význačných oblastí, rysů a řídicích bodů.

Utils

Třída obsahující pomocné algoritmy. Příklad může být výpočet normál ve vrcholech nebo vytvoření seznamu sousedních trojúhelníků, či vrcholů.

WindowsInput

Třída obsahující pouze jedinou metodu, která zjišťuje, zda byla stisknuta konkrétní klávesa, podporuje stisk více kláves zároveň.

WindowsTimer

Třída umožňující přesné měření času pro plynulý pohyb kamery na různě výkonných počítačích.

Triangle

Struktura sloužící k definici trojúhelníků.

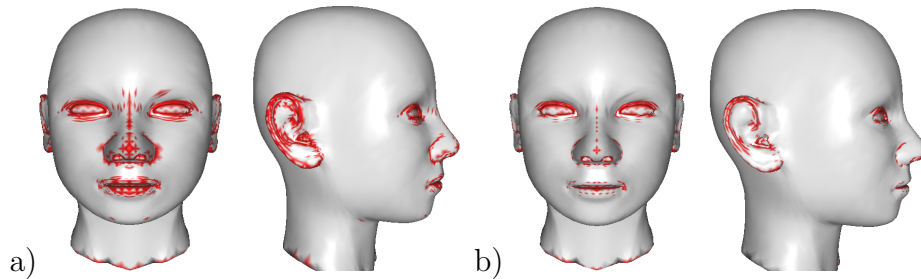
Vertex

Třída, která zastřešuje různé definice vrcholů. *PositionOnly* představuje vrchol pouze s informací o pozici, *PositionColored* obsahuje navíc atribut barvy a *PositionNormalColored* obsahuje také atribut normály v daném vrcholu.

Na přiloženém CD je uložena aplikace i s potřebnými soubory. Celkový obsah CD je vysvětlen v souboru *Readme.txt*.

6 Výsledky a experimenty

V této kapitole si ukážeme výsledky navrhovaného postupu detekce význačných rysů a řídicích bodů a jednotlivé výsledky metod. Nejprve zhodnotíme jednotlivé výsledky detekce význačných rysů pomocí jednotlivých metod. Každá metoda může fungovat na oblastech hlavy různě. Některá metoda může mít dobré výsledky na oblastech uší, ale na nose už bude fungovat špatně. Na obr. 6.1 vidíme, že volba vhodných prahových hodnot je zásadní při detekci význačných rysů. Použitím příliš vysoké dolní prahové hodnoty můžeme ztratit významné body [viz obr. 6.1 b) v oblasti rtů a nosu]. Na druhé straně příliš nízká dolní prahová hodnota způsobuje, že význačných rysů je na některých oblastech zbytečně mnoho [viz obr. 6.1 a) v oblasti očí nebo uší]. To je také důvod proč jsme navrhli detekci jednotlivých význačných oblastí a je tedy možné volit různé prahové hodnoty na jednotlivých oblastech. Nejprve zhodnotíme křivosti použité v [9], dále pak naše implementované metody.



Obr. 6.1: Výsledné význačné rysy na modelu hlavy. Vrcholy ohodnoceny pomocí střední křivosti z [9]. Hodnoty dolního prahu pro model a) 1.193 (tj. průměr celkového ohodnocení). b) 1.85. Model *2H_C_zena* převzat z [1].

6.1 Střední křivost

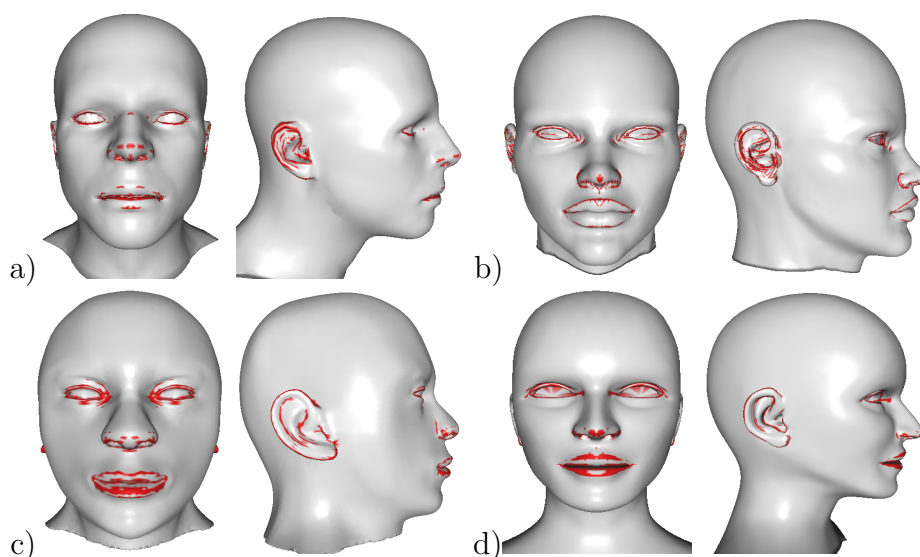
Aplikace z [9] umožňuje výpočet střední, Gaussovy, maximální a minimální křivosti. Nejlepší výsledky na modelech hlav vykazuje aplikace výpočtu střední a maximální křivosti k ohodnocení významnosti hran, což není překvapení, protože střední křivost je míra zakřivení povrchu v daném bodě a maximální křivost je extrémní normálová křivost.

Nyní zhodnotíme výsledky detekce význačných rysů pomocí střední křivosti na jednotlivých oblastech.

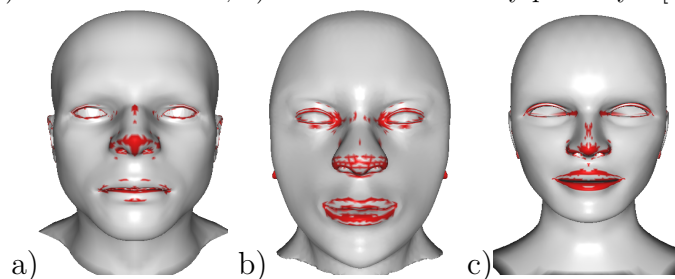
- **Oblast očí** - výsledky na této oblasti jsou velmi dobré. Na všech modelech dochází k nalezení dostatečného množství význačných vrcholů (viz obr. 6.2). Oko je ohraničeno, takže bude možné mezi význačnými rysy nalézt všechny řídicí body.
- **Oblast uší** - další oblast, na které ohodnocení pomocí střední křivosti dosahuje velmi dobrých výsledků. Pro všechny modely dostáváme ohraničení ucha (obr. 6.2).
- **Oblast rtů** - zde už výsledky nejsou příliš uspokojivé. Pouze u některých modelů dostáváme přímé ohraničení rtů [viz obr. 6.2 b)]. Ve většině případů

musíme volit velmi nízkou prahovou hodnotu, abychom ohrazení rtů získali. Důsledkem toho potom získáváme příliš význačných rysů v oblasti rtů, což může způsobit problémy při detekci řídicích bodů [obr.6.2 d)].

- **Oblast nosu** - poslední testovanou oblastí je nos, u kterého jsou však největší problémy. Pomocí střední křivosti se daří odhalit většinou jen nosní dírky (obr. 6.2), zatímco význačné rysy na hřbetu nosu nejsou odhaleny téměř nikdy. Zlepšení však nedostaneme ani v případě, že zvolíme nižší dolní mez, jen získáme více bodů na špičce nosu, které nejsou pro nás příliš významné a na některých modelech částečně hřbet nosu (obr. 6.3).



Obr. 6.2: Výsledné význačné rysy na oblastech hlav. Vrcholy ohodnoceny pomocí střední křivosti z [9]. Volby prahových hodnot na oblastech jsou uvedeny v tabulce v příloze A.1. a) Model *muz_1*, b) model *zena_1*, c) model *1H.cernoch*, d) model *zena_3*. Modely převzaty z [1].



Obr. 6.3: Výsledné význačné rysy na oblasti nosu. Vrcholy ohodnoceny pomocí střední křivosti z [9]. Volba prahových hodnot na oblastech a) Model *muz_1*: oči: 1.6, nos: 0.5, uši: 1.0 a rty: 0.6. b) Model *1H.cernoch*: oči: 7.3, nos: 2.1 uši: 3.6 a rty: 2.1. c) Model *zena_3*: oči: 3.6, nos: 1.4, uši: 3.0 a rty: 1.2. Modely převzaty z [1].

Shrneme-li tyto výsledky, můžeme říct, že pomocí střední křivosti můžeme snadno detekovat význačné rysy na očích a uších, v oblasti rtů a nosu už se nedaří na všech modelech detekovat dostatečné množství význačných rysů. Obecně nelze říci, že by existovala vhodná prahová hodnota pro všechny modely. Tab. A.1 uvádí nejvhodnější volbu dolních prahových hodnot pro jednotlivé modely hlav k získání nejlepších možných výsledků na oblastech hlavy.

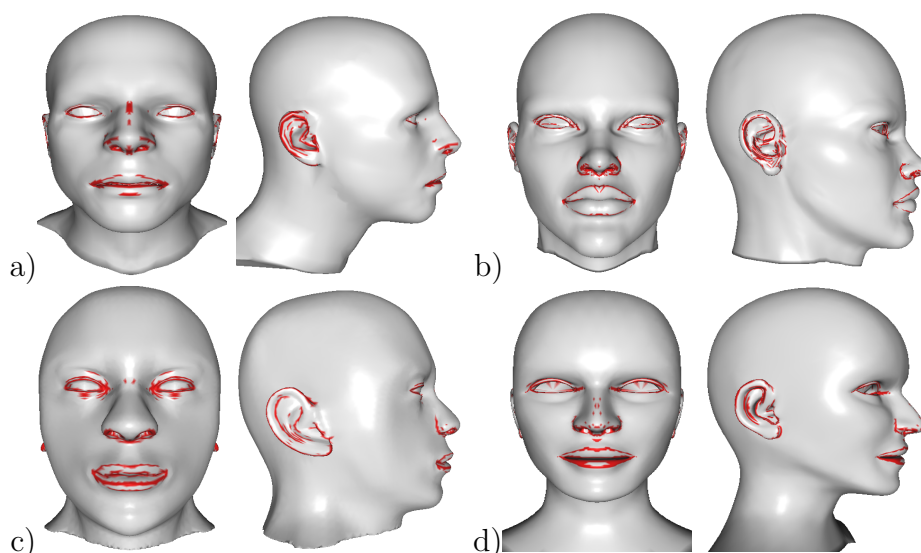
6.2 Maximální křivost

Maximální křivost je maximální normálová křivost v daném směru, proto ji můžeme také využít k nalezení význačných rysů na modelech hlav. Stejně jako u střední křivosti je pro detekci význačných rysů podstatná volba dolního prahu a ta je různá pro jednotlivé oblasti obličeje.

V této části tedy ukážeme, jakých nejlepších výsledků můžeme na jednotlivých částech hlavy dosáhnout pomocí maximální křivosti z [9].

- **Oblast očí** - stejně jako u střední křivosti dochází u všech modelů k ohraničení oka (viz obr. 6.4).
- **Oblast uší** - opět i maximální křivost má dobré výsledky na této oblasti (obr. 6.4).
- **Oblast rtů** - maximální křivost má lepší výsledky na rtech než střední křivost. Ohraničení rtů získáme téměř na všech modelech a s menší množinou význačných rysů (viz obr. 6.4).
- **Oblast nosu** - zde už maximální křivost zlepšení nedosáhne a opět dokážeme na všech modelech detekovat pouze spodní část nosu s nosními dírkami [viz obr. 6.3 b,c)] a na některých modelech se může podařit částečně detekovat hřbet nosu [viz obr. 6.4 d)].

Pomocí maximální křivosti můžeme dosáhnout zlepšení detekce význačných rysů na rtech. V oblasti očí a uší je detekce stejně dobrá jako u střední křivosti. Oblast nosu je i zde komplikovaná a výsledky nejsou uspokojivé. Nejvhodnější volbu dolních prahových hodnot pro jednotlivé modely hlav k získání nejlepších možných výsledků na oblastech hlavy uvádí tab. A.2.

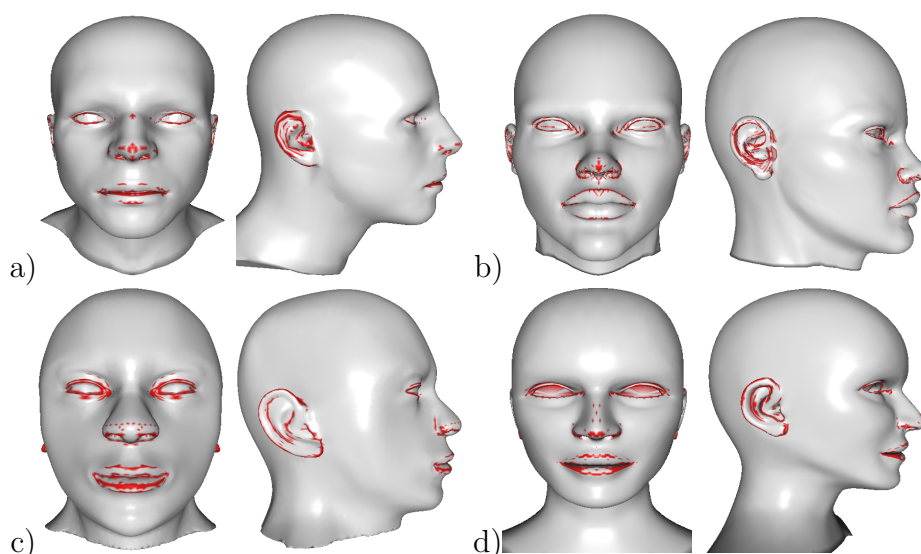


Obr. 6.4: Výsledné význačné rysy na oblastech hlavy. Vrcholy ohodnoceny pomocí maximální křivosti z [9]. Volby prahových hodnot na oblastech jsou uvedeny v tabulce v příloze A.2. a) Model *muz_1*, b) model *zena_1*, c) model *1H_cernoch*, d) model *zena_3*. Modely převzaty z [1].

6.3 Kotangentový Laplace-Beltramiho operátor

Definice diskrétního Laplace-Beltramiho operátoru se velmi podobá střední křivosti z [9] (viz rov. 3.12 a 2.14), proto se výsledky těchto metod nebudou příliš lišit, jedná se však o jeden z nejjednodušších operátorů, a proto jeho výsledky na modelech hlav také uvedeme.

V této části ukážeme nejlepší výsledky kotangentového Laplace-Beltramiho operátoru na jednotlivých oblastech hlavy. Na obr. 6.5 vidíme, že výsledky se od výsledků střední křivosti opravdu moc neliší. Opět v oblasti očí a uší získáme hraničení, které budeme potřebovat k detekci řídicích bodů. Oblast rtů je detekována celá pouze na některých modelech [viz obr. 6.5 b,c)] a na jiných pouze částečně. Tab. A.3 uvádí seznam dolních prahových hodnot, které mají nejlepší možné výsledky na jednotlivých částech hlav modelů.

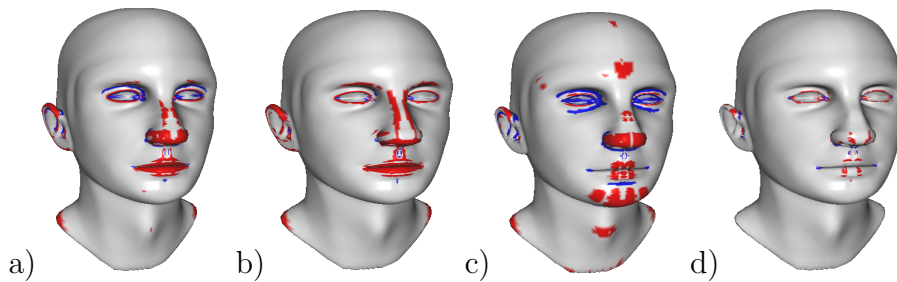


Obr. 6.5: Výsledné význačné rysy na oblastech hlav. Vrcholy ohodnoceny pomocí kotangentového Laplace-Beltramiho operátoru. Volby prahových hodnot na oblastech jsou uvedeny v tabulce v příloze A.3. a) Model *muz_1*, b) model *zena_1*, c) model *1H_cernoch*, d) model *zena_3*. Modely převzaty z [1].

6.4 Střední křivost z metody nejmenších čtverců

Pomocí metody nejmenších čtverců jsme odvodili další vztahy pro křivosti. Rozsah okolí lokální aproximace je vždy volen $n = 3$. Jak už bylo zmíněno, hodnoty křivosti mohou být záporné, proto jsme zavedli prahování kladných a záporných hodnot. Výsledné význačné rysy jsou vykreslovány v závislosti na znaménku ohodnocení, pro záporná modře a pro kladná červeně. Na obr. 6.6 vidíme výsledky jednotlivých křivostí s volbou dolní hodnoty kladného prahu jako průměr kladných ohodnocení a horní hodnoty záporného prahu jako průměru záporného ohodnocení.

Nyní ukážeme nejlepší výsledky střední křivosti na jednotlivých oblastech hlavy a porovnáme je s výsledky střední křivosti z [9].



Obr. 6.6: Výsledky křivostí pomocí metody nejmenších čtverců. Dolní kladná prahová hodnota je průměr kladného ohodnocení na celé oblasti, záporná horní prahová hodnota je průměr záporného ohodnocení. a) Střední křivost: dolní kladný práh: 2.49, horní záporný práh: -3.83, b) Maximální křivost: dolní kladný práh: 2.17, horní záporný práh: -4.21, c) Minimální křivost: dolní kladný práh: 1.52, horní záporný práh: -2.20, d) Gaussova křivost: dolní kladný práh: 0.35, horní záporný práh: -0.12. Model *muz_2* převzat z [1].

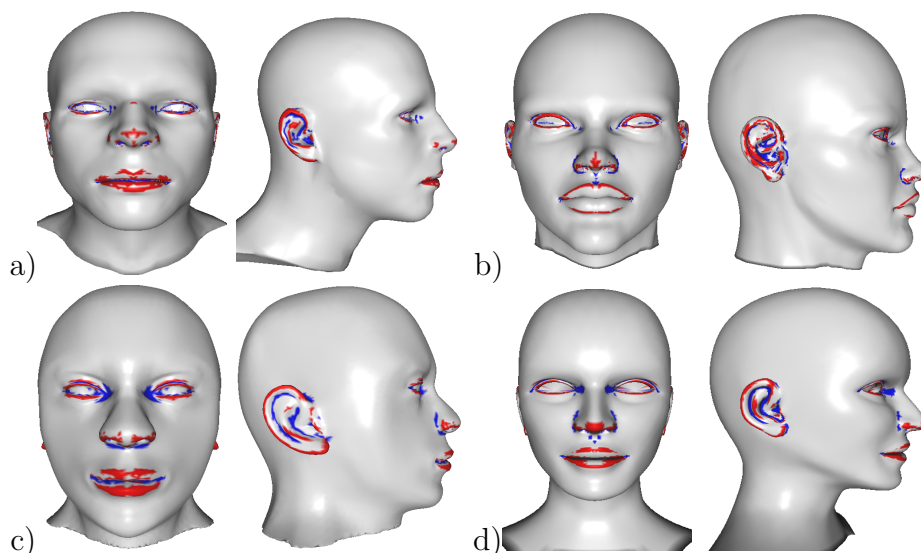
- **Oblast očí** - na všech modelech dochází k ohraničení oka, to je dáno kladnými hodnotami ohodnocení (viz obr. 6.7). Ostatní význačné rysy, jako propadliny a údolí, jsou dány zápornými hodnotami ohodnocení.
- **Oblast uší** - opět na všech modelech dostáváme ohraničení ucha význačnými hřbety (viz obr. 6.7). Dostáváme více význačných rysů na boltcích než u křivosti z kap. 6.1.
- **Oblast rtů** - u oblasti rtů nedochází k tak dobrému ohraničení jako u oblastí ucha a očí. Lze najít prahové hodnoty, díky kterým dostaneme částečné ohraničení, pak však většina vrcholů na rtech patří do význačné oblasti [viz obr. 6.7 a,c,d)]. U některých modelů lze také detekovat štěrbinu mezi rty pomocí záporných hodnot ohodnocení.
- **Oblast nosu** - tato oblast je opět nejhorší, co se týče výsledných význačných rysů. Oproti střední křivosti v kap. 6.1 však máme výhodu v rozdělení vrcholů na hřbety a údolí.

Střední křivost pomocí metody nejmenších čtverců má opět dobré výsledky na oblasti očí a uší, oproti původní křivosti jsou význačné rysy rozdělené znaménkem, což usnadní práci při detekci řídicích bodů. Díky tomuto rozdělení také dokážeme u některých modelů detekovat štěrbinu mezi rty. Celkově je detekce na oblasti rtů u této metody lepší než u střední křivosti z [9]. Rozdělení význačných rysů zpřesňuje výsledky detekce a zlepšuje vizualizaci. Optimální prahové hodnoty pro získání nejlepších výsledků na oblastech hlavy pro jednotlivé metody uvádí tab. A.4.

6.5 Maximální křivost z metody nejmenších čtverců

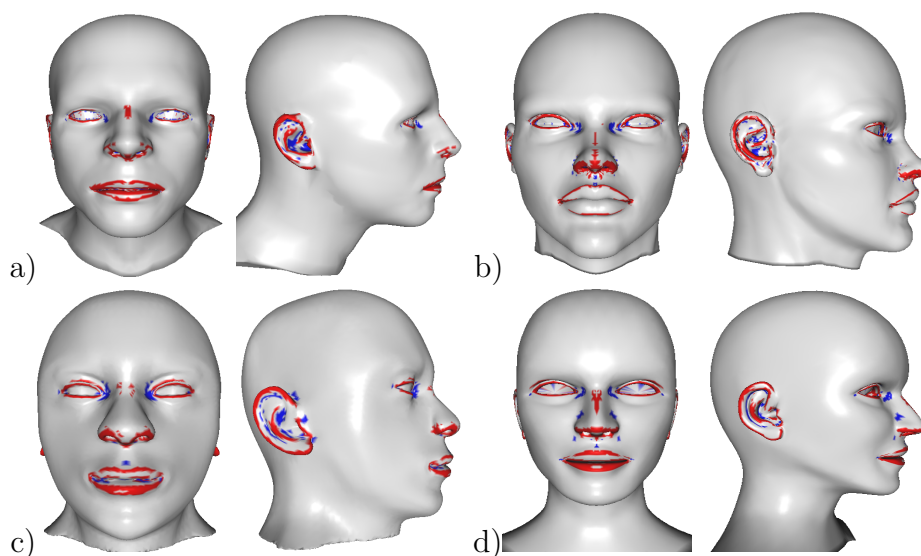
Stejně jako u střední křivosti zhodnotíme výsledky maximální křivosti.

- **Oblast očí** - ohraničení oka je srovnatelné jako u střední křivosti (obr. 6.8).
- **Oblast uší** - opět snadno získáme maximální extrémy na uších (viz obr. 6.8).



Obr. 6.7: Výsledky střední křivosti pomocí metody nejmenších čtverců. Volby prahových hodnot na oblastech jsou uvedeny v tabulce v příloze A.4. a) Model *muz_1*, b) model *zena_1*, c) model *1H_cernoch*, d) model *zena_3*. Modely převzaty z [1].

- **Oblast rtů** - maximální křivost se v této oblasti jeví jako nejlepší postup, který dokáže detekovat ohrazení rtů.
- **Oblast nosu** - v této oblasti maximální křivost nabízí zlepšení pouze u některých modelů, kdy nalezneme částečně hřbet nosu a dolní část nosu s nosními dírkami [viz obr. 6.8 a,b,d)].

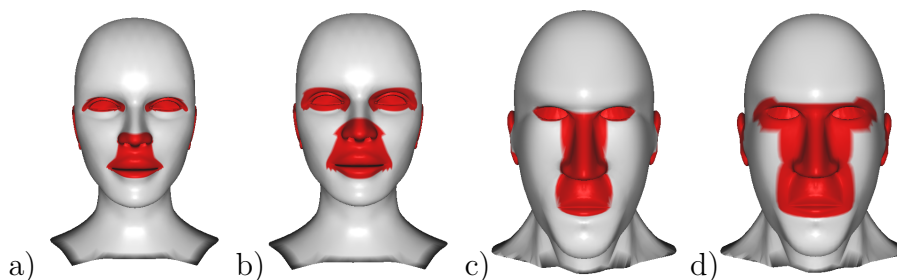


Obr. 6.8: Výsledky maximální křivosti pomocí metody nejmenších čtverců. Volby prahových hodnot na oblastech jsou uvedeny v tabulce v příloze A.5. a) Model *muz_1*, b) model *zena_1*, c) model *1H_cernoch*, d) model *zena_3*. Modely převzaty z [1].

Maximální křivost pomocí metody nejmenších čtverců dosahuje ze všech metod nejlepších výsledků na oblasti nosu a také rtů. Seznam prahových hodnot, které poskytují nejlepší výsledky maximální křivosti na modelech hlav, je uveden v tab. A.5.

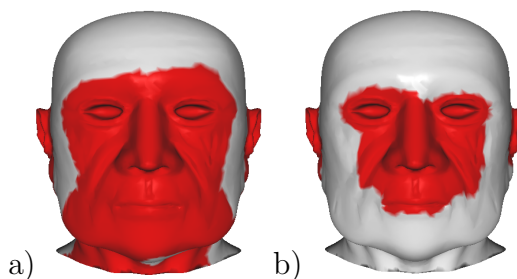
6.6 Výsledky detekce význačných oblastí hlavy

V této kapitole ukážeme výsledky navrhovaného postupu detekce význačných oblastí. Rozdíl detekce oblastí pro různé volby rozsahu okolí dilatace můžeme vidět na obr. 6.9. V případě, že význačné oblasti jsou pro uživatele příliš malé [obr. 6.9 a,c)], lze je všechny zvětšit volbou rozsahu okolí operátoru dilatace [obr. 6.9 b,d)].



Obr. 6.9: Detekce význačných oblastí. a,c) Nulový rozsah dilatace, b,d) rozsah dilatace je 3. Modely převzaty z [1].

Na všech modelech hlav funguje postup detekce význačných oblastí velmi dobře, kromě jednoho, modelu starého muže, který je zobrazen na obr. 6.10. Po aplikování navrhovaného postupu dostáváme obrovskou význačnou oblast. Vylepšení nastane pouze tehdy, pokud aplikujeme jinou prahovou hodnotu než průměr a jinou konfiguraci operátorů a jejich rozsahů. Na obr. 6.10 b) je volba prahové hodnoty: 6, dále je aplikován operátor otevření v rozsahu $n = 6$ a operátor otevření v $n = 2$, nakonec dilatace $n = 2$. U tohoto modelu nebude možná automatická detekce oblastí.

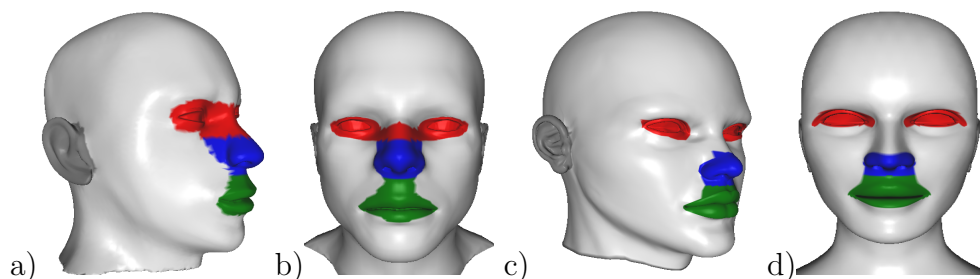


Obr. 6.10: Detekce oblastí obličeje na modelu starého muže. a) Detekce oblastí pomocí navrhovaného postupu, b) Ohodnocení pomocí střední křivosti, volba dolního prahu: 6, uzavření v rozsahu: 6, otevření v rozsahu: 2 a dilatace v rozsahu: 2. Model převzat [1].

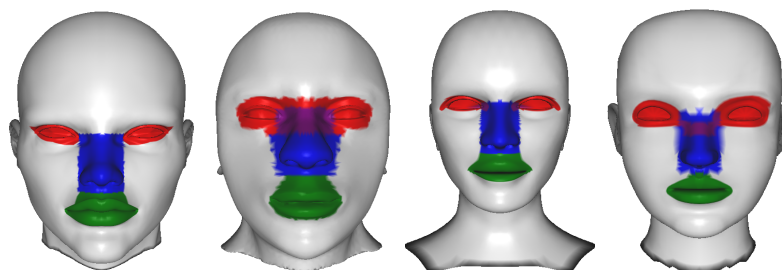
6.6.1 Obarvení nalezených význačných oblastí

Dále ukážeme výsledky rozdělení a obarvení význačných oblastí pomocí prvního postupu (obr. 6.11). Na obr. 6.11 c,d) vidíme již zmíněnou nevýhodu tohoto postupu. Oblast nosu zde není dostačující. Druhý navržený postup tento nedostatek odstraňuje (obr. 6.12). V místě, kde splývají oblasti očí a nosu, se vrcholy vykreslují fialovou barvou.

Program je implementován tak, že v případě, že se uživateli jeví jednotlivé význačné oblasti příliš malé nebo příliš velké, pak na každou oblast lze aplikovat operátor dilatace a danou oblast tak můžeme libovolně zvětšovat nebo popřípadě zmenšovat pomocí operátoru eroze.



Obr. 6.11: Výsledky obarvení význačných oblastí na modelech hlavy pomocí prvního postupu. Modely převzaty z [1].



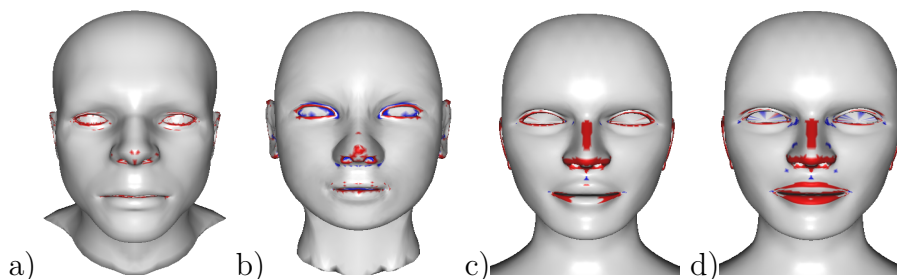
Obr. 6.12: Výsledky obarvení význačných oblastí na modelech hlavy pomocí druhého postupu. Modely převzaty z [1].

6.7 Navrhovaný postup automatické detekce význačných rysů

Naším úkolem je také automatická detekce význačných rysů, k tomu však potřebujeme znát vhodnou konfiguraci parametrů. Z uvedených výsledků metod je jasné, že každá metoda funguje jinak na různých oblastech hlavy a s jinými prahovými hodnotami. V předchozích kapitolách jsme našli nejlepší prahové hodnoty, ale nelze konkrétně stanovit hodnotu, která je pro danou metodu vhodným prahem na všech modelech. K dispozici však máme detekované význačné oblasti a na nich můžeme určit průměrné hodnoty ohodnocení. Ty pak můžeme volit jako prahové hodnoty. Průměr ohodnocení však nevykazuje obecně na všech modelech dobré výsledky, jak můžeme vidět na obr. 6.13. U některých modelů můžeme docílit zlepšení, pokud použijeme oříznutí hodnot ohodnocení a průměr počítáme z oříznutých hodnot [viz obr. 6.13 d) oblast rtů]. Pro jednotlivé modely jsme našli, které metody ohodnocení vrcholů s prahováním pomocí průměru mají nejlepší výsledky na jednotlivých oblastech. Tyto poznatky jsou uvedené v tab. A.6.

Náš navrhovaný postup automatické detekce je tedy následovný. Na detekovaných význačných oblastech aplikujeme metody, které ve většině dosahují nejlepších výsledků, tedy:

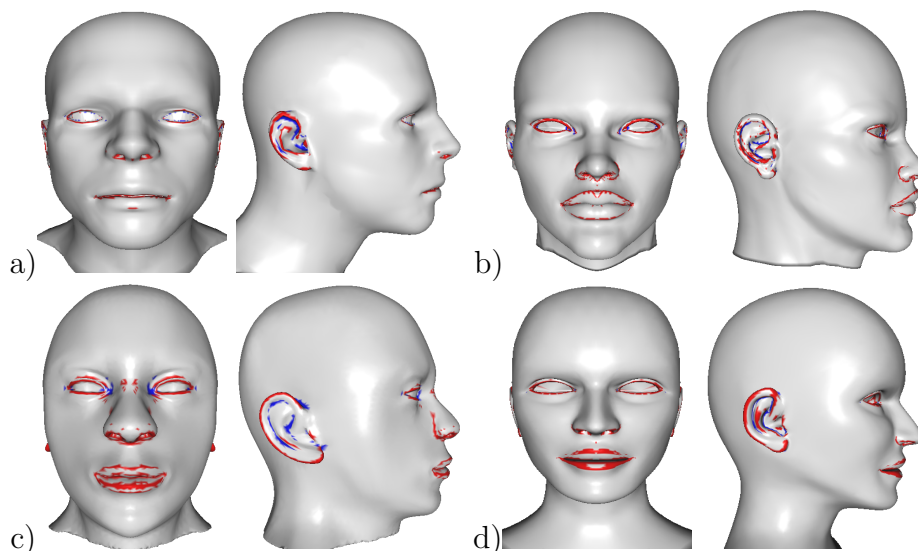
- Oči: maximální křivost z metody nejmenších čtverců bez oříznutí hodnot



Obr. 6.13: Výsledky aplikace průměru ohodnocení na oblastech hlavy pro jednotlivé metody. a) Model *muz_1*, ohodnocení vrcholů pomocí střední křivosti, b) model *2H-C.zena*, ohodnocení vrcholů pomocí střední křivosti z metody nejmenších čtverců, c) model *zena_3*, maximální křivost z metody nejmenších čtverců, d) model *zena_3*, maximální křivost z metody nejmenších čtverců s 5% oříznutím hodnot ohodnocení. Modely převzaty z [1].

- Uši: střední křivost z metody nejmenších čtverců bez oříznutí hodnot
- Rty: střední křivost s 5% oříznutím hodnot
- Nos: maximální křivost bez oříznutí hodnot

Na obr. 6.14 jsou zobrazeny výsledky výše zmíněného postupu automatické detekce význačných rysů. Na některých modelech samozřejmě postup neposkytuje na všech oblastech dobré výsledky [viz obr. 6.14 a) rty], což samozřejmě není překvapení. Výběr metod na jednotlivých oblastech byl řízen nejlepšími výsledky na většině modelů, nemusí tedy na některých modelech fungovat ideálně. Pomocí průměru lze na nose detekovat pouze dolní část nosu s nosními dírkami.



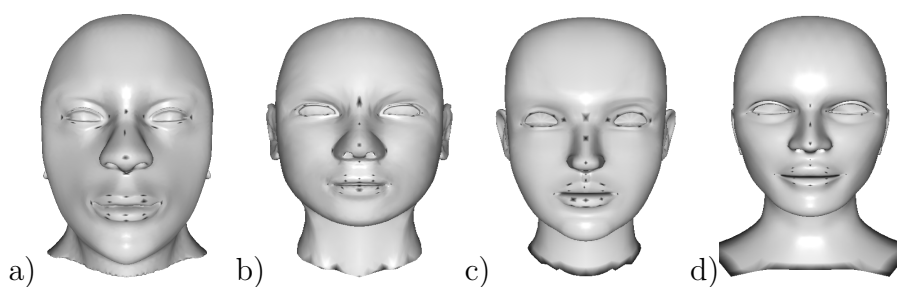
Obr. 6.14: Automatická detekce význačných rysů na modelech lidských hlav. Modely převzaty z [1].

6.8 Výsledky detekce řídicích bodů

Nakonec ukážeme výsledky detekce řídicích bodů na modelech lidských hlav. Ukázky automatické detekce řídicích bodů po navrhované automatické detekci

význačných rysů jsou na obr. 6.15.

Výsledky takto detekovaných řídicích bodů jsou velmi dobré. Samozřejmě, že se můžeme setkat s tím, že body na očích jsou částečně vzdáleny. To můžeme jednoduše zlepšit ruční úpravou význačných rysů, tím že přidáme nebo odebereme vrcholy. V případě, že s nějakým bodem i nadále nejsme spokojeni, lze jej ručně změnit.



Obr. 6.15: Detekce řídicích bodů aplikovaná na význačné rysy detekované automaticky námi navrhovaným postupem. Modely převzaty z [1].

Více obrázků a **.ply** soubory s výsledky lze nalézt na příloženém CD.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nalézt, implementovat a otestovat vhodné metody na detekci význačných rysů na triangularizovaných modelech lidské hlavy. Bylo zapotřebí navrhnout jednak postup automatické detekce a jednak volbu ruční detekce, kterou si volí sám uživatel. Navíc pro potřeby pana Ing. Petra Martínka bylo úkolem automaticky detekovat řídicí body, které jsou dále využívány v práci s identikity. Většina metod založených na trojúhelníkových sítích jsou buď velmi jednoduché a nebo příliš složité. Mezi jednoduché metody patří například detekce rysů na základě úhlu mezi normálami přilehlých trojúhelníků. Na hladších modelech jsou však tyto typy metod nepoužitelné. Mezi složité metody spadají ty, které se snaží rekonstruovat hladkou plochu, a to globálně nebo lokálně.

Navržená metoda vychází z navrhované metody v [9], která je velmi úspěšná na modelech lidské hlavy a navíc není časově náročná, tak jako běžné složité metody. Pomocí této metody jsme tedy dokázali detekovat význačné oblasti (oči, uši, nos, rty) na většině modelů. Avšak ne na všech modelech byly výsledky detekce význačných rysů uspokojivé. Navrhli jsme tedy další dvě metody, kotangentový Laplacián, který patří mezi ty jednodušší. A metodu, která aproximuje trojúhelníkovou síť na hladký povrch pomocí modifikované metody nejmenších čtverců. Tato metoda nemá sice optimální časovou složitost, ale k tomu, abychom dosáhli lepších výsledků, je zapotřebí snížit požadavky na rychlost. Na základě výsledků z metod se poté přistupuje k prahování, čímž dostaneme význačné rysy, které dále můžeme upravit pomocí morfologických operátorů. Význačné rysy je možné detekovat i na nalezených oblastech, tak můžeme na každou oblast aplikovat jiné prahové hodnoty a dostávat lepší výsledky. Prahové hodnoty ovlivňují výsledné význačné rysy, je vhodné jejich zadávání ponechat na uživateli, ale jelikož naším úkolem byla i automatická detekce, pak byly voleny průměrné hodnoty ohodnocení.

Navrhované postupy byly testovány na všech dostupných modelech lidských hlav od Ing. Petra Martínka. Navrhovaná automatická metoda poskytuje u většiny modelů velmi dobré výsledky. Metoda využívající nejmenší čtverce poskytuje stejně dobré výsledky jako metoda z [9]. Rozdělení na záporné a kladné hodnoty ohodnocení a následné obarvení podle těchto barev však podstatně zpřehledňují výsledné význačné rysy. Na oblasti nosu však nedosahujeme žádným navrhovaným postupem chtěných výsledků. Zde je tedy možnost vylepšení pomocí jiné metody. Detekce řídicích bodů poskytuje dobré výsledky, je však závislá na výsledcích význačných rysů. Ty však můžeme pro lepší výsledky ručně upravit odebráním nebo přidáním vrcholu.

Práce byla také prezentována na studentské vědecké konferenci v roce 2015.

Reference

- [1] MARTÍNEK, P. *Katedra informatiky a výpočetní techniky*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU.
- [2] HUBELI, A., MEYER, K., GROSS, M. *Mesh Edge Detection*. CS Technical Report. ETH: Institute of Scientific Computing, Švýcarsko, 2000.
- [3] NEALEN, A., IGARISHI, T., SORKINE, O., ALEXA, M. *Laplacian Mesh Optimization*. GRAPHITE '06, s. 381-389, ISBN:1-59593-564-9.
- [4] REUTER, M., BIASOTTI, S., GIORGI, D., PATANE, G., SPAGNUOLO, M. *Discrete Laplace-Beltrami Operators for Shape Analysis and Segmentation*. Computer & Graphics, 2009, vol. 33, no. 3, s. 381-390.
- [5] GROSS, M., WANG, C. *Mesh Edge Detection and Sharp Edge Reconstruction* [prezentace PowerPoint], 2007 [cit. 2015-4-25]. Dostupné z URL: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.math.zju.edu.cn%2Fcgad%2Fseminar%2F2007_AutumnWinter%2F2007_Autumn_Master_MaHaoDi.ppt&ei=50fDVOSELiitaZmJgvAC&usg=AFQjCNHKgcc1jEI_eW85Y-bnMs57NVP-Mw&sig2=f6qvy0nvcYiqTS2eT0ts0g&bvm=bv.84349003,d.d2s.
- [6] RÖSSL, Ch., KOBBELT, L., SEIDEL, H.-P. *Extraction of Feature Lines on Triangulated Surface Using Morphological Operators*. Smart Graphics, AAAI Technical Report SS-00-04, 2000.
- [7] OHTAKE, Y., BELYAEV, E., SEIDEL, H.-P. *Ridge-Valley Lines on Meshes via Implicit Surface Fitting*. Journal ACM Transactions on Graphics, 2004, vol. 23, no. 3, s. 609-612.
- [8] YOSHIKAWA, S., BELYAEV, A., SEIDEL, H.-P. *Fast and Robust Detection of Crest Lines on Meshes*. ACM Symposium on Solid and Physical Modeling, 2005, s.227-232, ISBN: 1-59593-015-9.
- [9] KARLÍČEK, L. *Rozpoznávání význačných rysů triangularizovaných modelů*. Plzeň, 2014. 71 s., 10 s. příloh. Diplomová práce na Fakultě aplikovaných věd ZČU na katedře informatiky. Vedoucí diplomové práce Prof. Dr. Ing. Ivana Kolingerová.
- [10] KIM, S.-K., KIM, Ch.-H. *Finding ridges and valleys in a discrete surface using a modified MLS approximation*. Computer-Aided Design, 2006, vol. 38, no. 2, s. 173-180.
- [11] LÁVIČKA, M. *Geometrie: Pomocný učební text*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2008.
- [12] JEŽEK, F. *Diferenciální geometrie: Pomocný učební text*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2010.
- [13] TOMICZKOVÁ, S. a Ježek, F. *Diferenciální geometrie - Plochy*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2014.

- [14] TOMICZKOVÁ, S. a Ježek, F. *Diferenciální geometrie - Plochy 2*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2014.
- [15] BASTL, B. *Základy diferenciální geometrie křivek a ploch*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU.
- [16] *Vektorová funkce jedné reálné proměnné* [online]. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU. [cit: 2015-04-29]. Dostupné z URL: <http://analyza.kma.zcu.cz/PREDMETY/M2_MA2/zaznamy/MA2_04_Vektorove_fce.pdf>.
- [17] *Funkce více proměnných* [online]. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU. [cit: 2015-04-29]. Dostupné z URL: <http://analyza.kma.zcu.cz/PREDMETY/M2_MA2/zaznamy/MA2_05_Fce_vice_promennych.pdf>.
- [18] *Diferenciální počet funkce více proměnných* [online]. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU. [cit: 2015-04-29]. Dostupné z URL: <http://analyza.kma.zcu.cz/PREDMETY/M2_MA2/zaznamy/MA2_06_Dif_pocet_FVP.pdf>.
- [19] HRIVŇÁK, D. *Diferenciální operátory vektorové analýzy* [online]. Ostrava: Ostravská univerzita, 2002. [cit: 2015-05-01]. Dostupné z URL: <http://artemis.osu.cz/uvma3/UVMA3_1.pdf>.
- [20] TOMICZEK, P. *Skripta z matematické analýzy 3* [online]. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU. [cit: 2015-04-15]. Dostupné z URL: <<http://home.zcu.cz/~tomiczek/Data/MA3.pdf>>.
- [21] MEYER, M., DESBRUN, M., SCHRÖDER, P., BARR, A. H. *Discrete Differential Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds*. Visualization and Mathematics III, 2003, s. 35-57, ISBN: 978-3-662-05105-4.
- [22] KIM, H.S., CHOI, H.K., LEE, K.H. *Feature Detection of Triangular Meshes Based on Tensor Voting Theory*. Computed Aided Design, 2009, vol. 41, no. 1, s. 47-58.
- [23] KUDELSKI, D., VISEUR, S., MARI, J.-L. *Skeleton Extraction of Vertex Sets Lying on Arbitrary Triangulated 3D Meshes*. 17th IAPR International Conference, DGCI, 2013, s. 203-214, ISBN: 978-3-642-37066-3.
- [24] HORÁK K. *Matematická morfologie* [online]. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. [cit: 2015-05-01]. Dostupné z URL: <http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/lectures-pdf/08_Matematicka_morfologie.pdf>.
- [25] HLAVÁČ V. *Matematická morfologie* [online]. Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT. [cit: 2015-05-01]. Dostupné z URL: <<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZpr0br/71-3MatMorpholBinCz.pdf>>.
- [26] HORÁK K. *Morfologické operace* [online]. Computer Vision. [cit: 2015-04-30]. Dostupné z URL: <http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Exercise10/content_cz.php>.

- [27] NEALEN A. *An As-Short-As-Possible Introduction to the Least Squares, Weighted Least Squares and Moving Least Squares Methods for Scattered Data Approximation and Interpolation*. TU Darmstadt: Discrete Geometric Modeling Group.
- [28] TESKOVÁ L. *Lineární algebra*. Plzeň: Západočeská univerzita 2001.

Přílohy

A Tabulky

Model hlavy	Dolní prahové hodnoty na oblastech			
	Oči	Uši	Rty	Nos
1H_cernoch	5,4	3,8	2,1	2,8
2H_C.zena	3,1	1,9	1,2	1,8
3H_C.zena	2,1	1,5	1,3	1,4
4H_C.muz_3	0,2	0,2	0,13	0,12
muz_1	1,3	0,8	0,6	0,7
muz_2	1,3	1,1	0,8	0,95
zena_1	1,1	0,8	0,6	0,6
zena_2	6,0	5,5	6,2	4,8
zena_3	2,9	3,8	1,3	1,8
zena_4	0,8	1,0	0,55	0,7

Tabulka A.1: Nejvhodnější hodnoty dolního prahu střední křivosti z [9] na jednotlivých modelech hlav.

Model hlavy	Dolní prahové hodnoty na oblastech			
	Oči	Uši	Rty	Nos
1H_cernoch	5,4	3,6	2,3	2,7
2H_C.zena	3,2	1,9	1,05	1,2
3H_C.zena	1,7	1,7	1,1	1,2
4H_C.muz_3	0,25	0,19	0,1	0,12
muz_1	1,4	0,7	0,46	0,49
muz_2	1,6	1,0	0,7	0,8
zena_1	1,1	0,8	0,55	0,5
zena_2	4,9	5,3	4,6	4,9
zena_3	3,0	2,6	1,2	1,5
zena_4	0,8	0,9	0,55	0,75

Tabulka A.2: Nejvhodnější hodnoty dolního prahu maximální křivosti z [9] na jednotlivých modelech hlav.

Model hlavy	Dolní prahové hodnoty na oblastech			
	Oči	Uši	Rty	Nos
1H_cernoch	3,0	2,1	1,5	1,8
2H_C_zena	3,1	1,7	1,4	1,6
3H_C_zena	0,5	0,35	0,27	0,29
4H_C_muz_3	0,17	0,17	0,11	0,14
muz_1	1,8	0,9	0,68	0,75
muz_2	1,5	0,95	0,7	0,85
zena_1	1,3	0,9	0,6	0,6
zena_2	0,4	0,5	0,4	0,5
zena_3	2,4	2,1	1,3	1,5
zena_4	0,002	0,002	0,0014	0,0023

Tabulka A.3: Nejvhodnější hodnoty dolního prahu Laplace-Beltramiho operátoru na jednotlivých modelech hlav.

Model hlavy	Prahové hodnoty na oblastech							
	Oči		Uši		Rty		Nos	
1H_cernoch	0,4	-0,45	0,55	-0,25	0,5	-0,2	0,6	-0,2
2H_C_zena	2,1	-0,8	1,9	-0,3	2,07	-1,0	2,7	-0,4
3H_C_zena	0,3	-0,15	0,6	-0,06	0,8	-0,1	0,75	-0,07
4H_C_muz_3	0,8	-0,3	1,8	-0,35	1,3	-0,1	1,2	-0,2
muz_1	0,5	-1,1	0,35	-0,6	0,33	-0,3	0,37	-0,5
muz_2	3,4	-3,6	3,5	-3,2	4,2	-3,2	3,9	-3,0
zena_1	1,2	-0,04	1	-0,015	0,95	-0,01	0,9	-0,02
zena_2	3,0	-7,2	2,5	-6,0	2,2	-2,0	4,3	-4,7
zena_3	2,8	-0,2	2,4	-0,1	2,1	-0,09	2,1	-0,08
zena_4	0,2	-0,8	0,18	-0,4	0,15	-0,3	0,18	-0,6

Tabulka A.4: Nejvhodnější hodnoty prahu střední křivosti pomocí metody nejmenších čtverců na jednotlivých modelech hlav.

Model hlavy	Prahové hodnoty na oblastech							
	Oči		Uši		Rty		Nos	
1H_cernoch	0,14	-1,5	0,15	-0,01	0,15	-0,1	0,14	-0,5
2H_C_zena	0,5	-1,5	0,3	-0,5	0,2	-1,0	0,26	-1,0
3H_C_zena	0,4	-5,0	0,65	-1,0	0,55	-1,0	0,65	-6,0
4H_C_muz_3	0,7	-0,1	1,4	-0,08	0,95	-0,01	1,2	-0,1
muz_1	0,12	-1,5	0,075	-0,1	0,06	-0,5	0,065	-1,0
muz_2	3,2	-2,5	2,7	-0,09	3,2	-2,0	3,2	-1,5
zena_1	1,2	-1,2	1,1	-0,8	0,9	-2,0	0,55	-1,5
zena_2	2,5	-8,0	2,4	-8	2,0	-3,0	2,9	-7,5
zena_3	2,2	-0,09	2,3	-0,06	1,7	-0,01	1,75	-0,02
zena_4	0,15	-2,5	0,15	-0,7	0,14	-2	0,13	-2,5

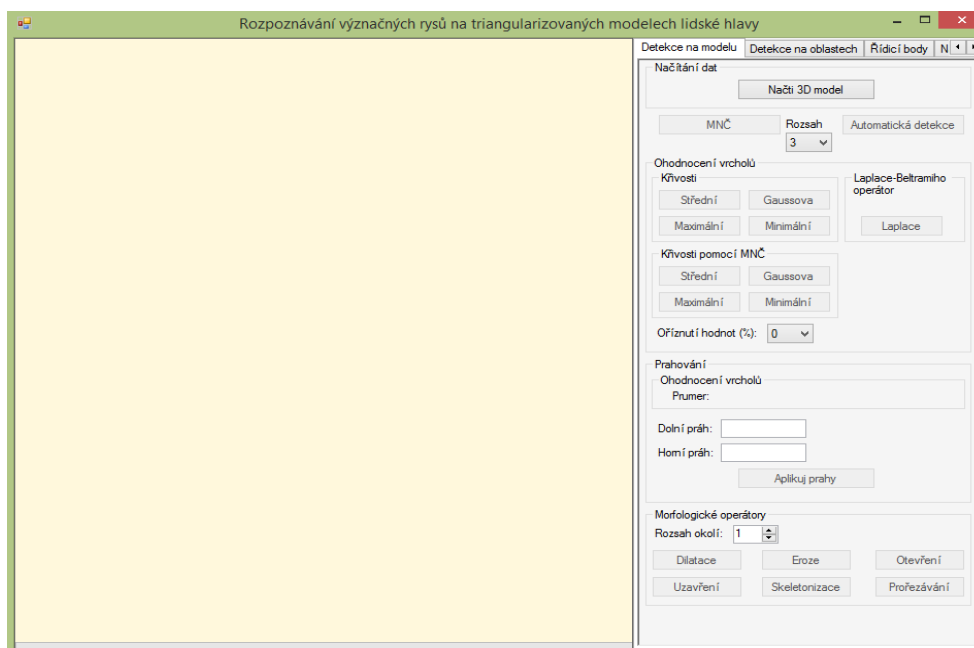
Tabulka A.5: Nejvhodnější hodnoty prahu maximální křivosti pomocí metody nejmenších čtverců na jednotlivých modelech hlav.

Model hlavy	Nejlepší metoda na oblastech			
	Oči	Uši	Rty	Nos
1H_cernoch	maximální maximální MNČ	střední MNČ	střední 5%	maximální
2H_C_zena	maximální MNČ	střední MNČ	střední 5%	střední
3H_C_zena	maximální MNČ	střední MNČ	střední 5%	maximální
4H_C_muz_3	maximální	střední MNČ	střední 5%	maximální
muz_1	střední MNČ maximální Laplace	střední MNČ	střední MNČ 5%	maximální Laplace
muz_2	maximální MNČ	střední MNČ	střední MNČ 5% Laplace	maximální
zena_1	maximální MNČ	maximální MNČ	střední MNČ 5%	maximální střední Laplace
zena_2	maximální MNČ	maximální MNČ	střední 5%	maximální
zena_3	maximální MNČ	střední MNČ	střední MNČ 5%	maximální
zena_4	maximální MNČ	střední MNČ	maximální 5% střední 5%	maximální

Tabulka A.6: Metody s nejlepšími výsledky na daných oblastech modelů s použitím průměru ohodnocení na dané oblasti jako prahové hodnoty. MNČ označuje metodu nejmenších čtverců.

B Uživatelská dokumentace

Aplikaci lze spustit pomocí souboru *Bakalarska_prace.exe*. Je nutné aby na daném počítači bylo nainstalováno prostředí knihovny *SlimDX* a balíček *Math.Net Numerics*, který je možné nainstalovat pomocí *NuGet*. Všechny požadované soubory jsou na příloženém CD. Po spuštění souboru se zobrazí okno, které je rozděleno na dvě části (viz obr. B.1).



Obr. B.1: Uživatelské rozhraní aplikace

V levé části se nachází panel, který slouží k zobrazení 3D modelu. Pravá část obsahuje ovládání aplikace a je rozdělena na čtyři záložky:

1. **Detekce na modelu** - obsahuje vše potřebné k načtení modelu a detekci význačných rysů na celém modelu hlavy pomocí navržených metod.
2. **Detekce na oblastech** - automatické vytvoření jednotlivých oblastí hlavy a detekce význačných rysů na těchto oblastech.
3. **Řídicí body** - část, kde je možné spustit automatickou detekci řídicích bodů nebo řídicí body či význačné rysy ručně upravovat.
4. **Nastavení** - umožňuje změnit nastavení zobrazování modelu nebo pozice kamery.

Jelikož aplikace disponuje metodami, které jsou výpočetně náročné, je v dolní části panelu pro zobrazení modelu umístěn ukazatel průběhu výpočtu.

Načtení dat

Na začátku práce s aplikací je potřeba nejprve načíst model hlavy. To lze pomocí tlačítka *Načti 3D model*, které je v záložce *Detekce na modelu*. Aplikace umožňuje načtení souborů s příponami **.obj** a **.ply**.

Manipulace s objektem

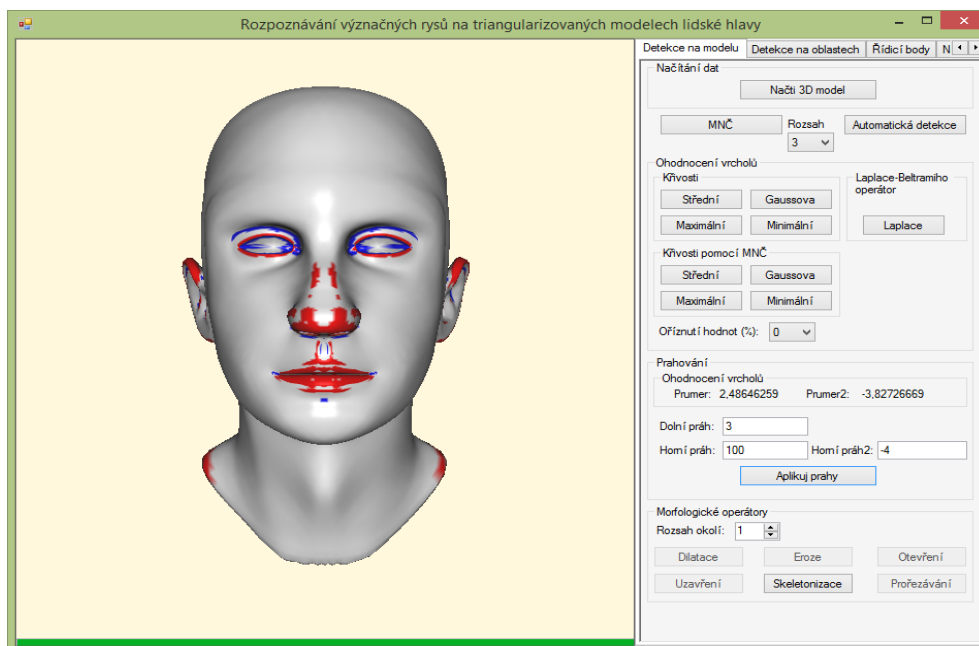
S načteným modelem lze jednoduše manipulovat. Otáčíme jím stisknutím levého tlačítka myši nad zobrazovacím plátnem v levé části okna a následným táhnutím požadovaným směrem. Je možné také využít kláves *W* a *D* pro pohyb oddálení a přiblížení modelu.

Detekce význačných rysů

Po načtení modelu je možné detekovat význačné rysy, a to buď na celém modelu hlavy nebo na jednotlivých oblastech hlavy. Nejprve popíšeme ovládání programu v záložce *Detekce na modelu*. Na začátku je nutné vypočítat ohodnocení všech vrcholů trojúhelníkové sítě. To lze udělat kliknutím na některé z tlačítek nacházejících se ve skupině *Křivosti* nebo *Laplace-Beltramiho operátor* (tj. tlačítka s názvy *Střední*, *Maximální*, *Gaussova*, *Minimální* a *Laplace*). Po kliknutí dojde k obarvení modelu podle příslušného ohodnocení. Červená barva značí místa s největší křivostí a modrá místa s nejmenší. Pokud bychom chtěli k ohodnocení vrcholů využít křivostí pomocí metody nejmenších čtverců, musíme nejprve stisknout tlačítko *MNČ*, které spustí výpočet hlavních křivostí pomocí metody nejmenších čtverců. Aproximace povrchu pomocí metody nejmenších čtverců lze provádět na libovolném rozsahu okolí (*n*-sousedství), vzhledem k výpočetní náročnosti je uživateli umožněna volba rozsahu (3-10) pomocí číselníku *Rozsah* vedle tlačítka *MNČ*. Po výpočtu křivostí už je možné použít tlačítka *Střední*, *Maximální*, *Gaussova* a *Minimální* ve skupině *Křivosti pomocí MNČ*. Navíc je také možné nastavit oříznutí nejvyšších hodnot pomocí *Oříznutí hodnot (%)*, to je však nutné zadat před výpočtem ohodnocení.

Po výpočtu ohodnocení se do textového pole *Dolní práh* a *Horní práh* doplní maximální a průměrná váha. Změnou těchto hodnot nastavujeme meze, které jsou využívány při prahování. Hodnoty ohodnocení jsou normalizovány a násobeny 100, takže by jejich prahové hodnoty měly být voleny v rozmezí (0-100). Při použití křivostí pomocí metody nejmenších čtverců však dostáváme i záporné ohodnocení, takže se objeví textové pole *Horní práh2*, do kterého se automaticky doplní průměrná záporná váha. Záporné ohodnocení je normalizováno stejně jako kladné, tedy prahová hodnota by měla být volena mezi (-100-0). Prahování podle zvolených prahových hodnot lze provést stisknutím tlačítka *Aplikuj prahy*. Vrcholy, které splňují námi zadaná kritéria, jsou vykresleny červeně, popř. modře pro vrcholy se záporným ohodnocením. Příklad uživatelského rozhraní po výpočtu ohodnocení vrcholů a aplikace prahování je zobrazen na obr. B.2.

Aplikováním prahů dojde k vytvoření oblasti význačných rysů, které se vykreslí červeně, popř. i modře při ohodnocení křivostmi z metody nejmenších čtverců. Dojde také k odblokování tlačítek s morfologickými operátory (kromě operace prořezávání, která je možná až po operaci skeletonizace). Aplikace morfologických operátorů není možná po aplikaci ohodnocení pomocí křivostí z metody nejmenších čtverců. Číselník *Rozsah okolí* slouží k nastavení velikosti *n*-sousedství operátorů.

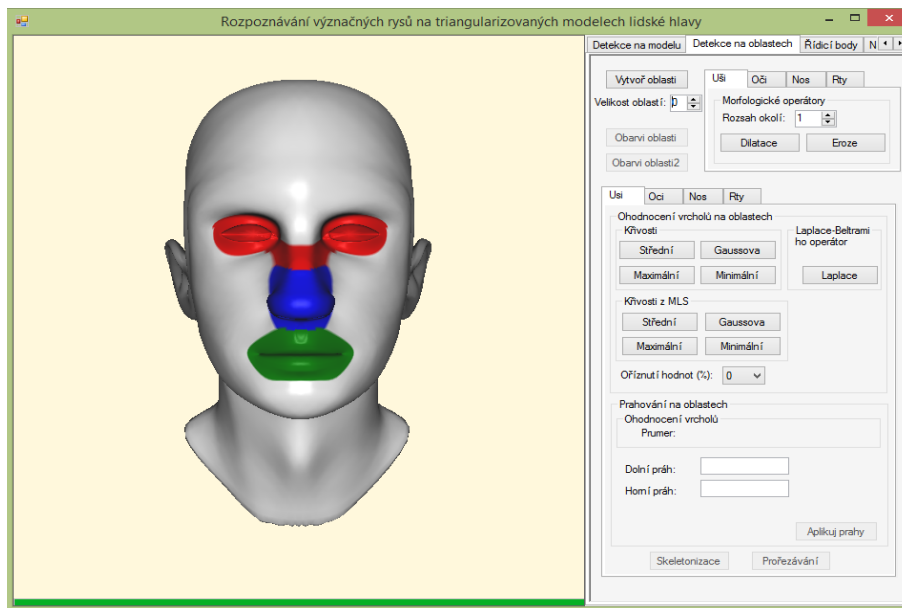


Obr. B.2: Uživatelské rozhraní aplikace po výpočtu ohodnocení vrcholů a aplikace prahů. Zvolené parametry: střední křivost z metody nejmenších čtverců. Červeně vrcholy s kladným ohodnocením a modře vrcholy se záporným.

V horní části záložky *Detekce na modelu* jsou navíc ještě tlačítka *Automatická detekce* a *Řídící body*. Tlačítko *Automatická detekce* slouží k automatické detekci rysů na jednotlivých oblastech hlavy pomocí metod, které poskytují nejlepší výsledky na dané oblasti.

V záložce *Detekce na oblastech* lze nastavit detekci na jednotlivých oblastech hlavy (tj. oči, uši, nos a rty). Abychom mohli detekovat význačné rysy na těchto oblastech, musíme je nejprve vytvořit a k tomu slouží tlačítka *Vytvoř oblasti*, *Obarvi oblasti* a *Obarvi oblasti 2*. Pomocí tlačítka *Vytvoř oblasti* automaticky vytvoříme pomocí střední křivosti a morfologických operátorů význačnou oblast, která zahrnuje oblast očí, rtů, nosu a uší. Tuto význačnou oblast si můžeme vytvořit také sami pomocí křivosti a morfologických operátorů v *Detekce na modelu*. Číselník *Velikost oblastí* určuje velikost význačné oblasti. Po vytvoření této význačné oblasti se odblokují další dvě tlačítka a je možné význačnou oblast obarvením rozdělit na jednotlivé oblasti obličeje. Pokud zvolíme jeden způsob obarvení, pak pro obarvení druhým postupem musíme nejprve opět stisknout tlačítko *Vytvoř oblasti*. Po obarvení lze také zvětšovat či zmenšovat samotné oblasti pomocí morfologických operátorů *Dilatace* a *Eroze* na zvoleném rozsahu okolí v číselníku *Rozsah okolí* (viz obr. B.3).

Nyní už je možné detekovat význačné rysy na oblastech. Detekce se řídí stejnými pravidly jako v záložce *Detekce na modelu*. Opět musíme nejprve vypočítat ohodnocení vrcholů. Pro křivosti z metody nejmenších čtverců musíme nejprve stisknout tlačítko *MNC* v *Detekce na modelu*. Po vypočtení ohodnocení je možné zvolit prahové hodnoty a aplikovat je pomocí tlačítka *Aplikuj prahy*. Tím se odblokuje tlačítko *Skeletonizace*, tlačítko *Prořezávání* se opět uvolní až po provedení skeletonizace.



Obr. B.3: Uživatelské rozhraní aplikace po vytvoření oblastí a jejich obarvení 1.postupem následované dilatací v rozsahu okolí 3 na všech oblastech.

Detekce řídicích bodů

Po detekování význačných rysů je možné v záložce *Řídicí body* přidávat body mezi význačné rysy nebo je naopak odebírat. Nejprve je nutné zakliknout tlačítko *Výběr vrcholů*. Tím se aktivuje ruční výběr vrcholů. Vrcholy je pak možné označit kliknutím levého tlačítka myši se stisknutou klávesou *Ctrl*. Pro přidání vybraných vrcholů do význačné oblasti nebo odebrání slouží tlačítka *Přidat vrcholy* a *Vymazat vrcholy* v sekci *Ruční úprava význačných rysů*. Stejná tlačítka nalezneme i v sekci *Ruční úprava řídicích bodů*, k jejich použití však musíme nejprve spustit automatickou detekci řídicích bodů pomocí tlačítka *Detekce řídicích bodů*.

Aplikace dále umožňuje pro potřeby uživatele uložit seznam řídicích bodů v *.txt* souboru pomocí tlačítka *Export řídicích bodů* (ukládají se jednotlivé indexy vrcholů). Pokud je potřeba uložit indexy pouze vybraných vrcholů, může tak být učiněno pomocí tlačítka *Export výběru*. Tlačítko *Ukaž index vrcholu* zobrazí index vybraného vrcholu a *Zrušení výběru vrcholů* zruší aktuální výběr vrcholů. Dále je možné také změnit způsob vykreslení řídicích bodů, je možné vykreslit pouze řídicí body nebo řídicí body s význačnými rysy dohromady. Po změně způsobu vykreslování je nutné opět spustit automatickou detekci. Také je možné uložit aktuálně obarvený model do souboru *.ply* pomocí tlačítka *Ulož model*.

Nastavení

V záložce *Nastavení* lze měnit nastavení aplikace. Přesněji řečeno lze změnit barvu pozadí, barvu modelu, způsob zobrazení modelu, resetovat kameru, ovládat rychlost otáčení a pohybu modelu a změnit výškovou osu.