

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Mitja Lojk

**Algoritem za avtomatsko prepoznavo ključnih točk  
mehkih tkiv glave**

DIPLOMSKO DELO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM  
PRVE STOPNJE RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

Ljubljana, 2014



UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Mitja Lojk

**Algoritem za avtomatsko prepoznavo ključnih točk  
mehkih tkiv glave**

DIPLOMSKO DELO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM  
PRVE STOPNJE RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Patricio Bulić

Ljubljana, 2014



»Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.«



Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

Z uporabo algoritmov za avtomatsko iskanje silhete obraza na stranskih telerentgenogramskih posnetkih, ter kasnejše določanje ključnih točk mehkih tkiv obraza, kot so nos, brada, ustnice in kožni nasion, skušamo olajšati delo uporabnikom programov, ki so namenjen izdelavi kefalometričnih analiz. Poiščite in preizkusite ustrezen postopek za avtomatsko prepoznavanje ključnih točk mehkih tkiv glave.





## IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Mitja Lojk, z vpisno številko **63990266**, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

*Algoritem za avtomatsko prepoznavo ključnih točk mehkih tkiv glave.*

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvomizr. prof. dr. Patricia Bulića,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela na svetovnem spletu preko univerzitetnega spletnega arhiva.

V Ljubljani, dne 21. septembra 2014

Podpis avtorja:



*Zahvalil bi se staršem za moralno in finančno podporo med študijem ter mentorju in profesorju,izr. prof. dr. Patriciu Buliću, za nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi diplomskega dela.*







# Kazalo

**Povzetek**

**Abstract**

<b>Poglavje 1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>Poglavje 2</b>	<b>Zobna in čeljustna ortopedija.....</b>	<b>3</b>
2.1	Diagnostika v čeljustni ortopediji .....	3
2.1.1	Morfološka diagnostika .....	4
2.1.2	Funkcionalna diagnostika .....	4
2.1.3	Razvojna diagnostika.....	4
2.2	Telerentgenska diagnostika.....	5
2.3	Stranski telerentgenogram glave in vratu .....	5
2.4	Tehnika telerentgenskega slikanja .....	6
2.5	Analiza posnetkov STRGV.....	7
<b>Poglavje 3</b>	<b>Iskanje silhuete .....</b>	<b>9</b>
3.1	Iskanje robov (Edge Detection) .....	9
3.2	Energija točke .....	10
3.3	Odstranitev motečih elementov .....	11
3.4	Normalizacija dimenzij posnetka.....	12
3.5	Korekcije posnetka .....	13
3.5.1	Gamma korekcija.....	13
3.5.2	Gaussovo glajenje.....	13
3.6	Iskanje prve točke silhuete.....	16
3.7	Določanje začetnih točk.....	17
3.8	Problem merila.....	17
3.9	Določanje poteka silhuete .....	19

3.9.1	Možni kandidati za naslednjo točko.....	19
3.9.2	Izbira pravega kandidata za naslednjo točko. ....	20
3.9.3	Iskanje vseh možnih točk silhuete .....	22
3.9.4	Izluščenje relevantnih točk iz točk silhuete.....	23
3.9.5	Aproksimacija točk na področju merila .....	23
<b>Poglavje 4</b>	<b>Določanje pomembnih točk.....</b>	<b>25</b>
4.1	Razmerja obraza .....	25
4.2	Iskanje konice nosu (PRN).....	27
4.3	Iskanje kožnega nasiona (N').....	27
4.4	Iskanje konice brade (PG') .....	28
4.5	Točno določanje točke (PRN) .....	28
4.6	Iskanje konic ustnic (LS in LI).....	28
<b>Poglavje 5</b>	<b>Sklepne ugotovitve .....</b>	<b>31</b>



## Seznam uporabljenih kratic

<b>kratica</b>	<b>angleško</b>	<b>slovensko</b>
<b>AxCeph</b>	software for cephalometric diagnosis	program za izdelavo kefalometričnih analiz
<b>NURBS</b>	non-uniform rational basis spline	neenakomerna racionalna osnovna krivulja
<b>STRGV</b>	skull lateral X-ray	stranski telerentgenogram glave in vratu
<b><math>\Delta E</math></b>	color-energy difference	razlika v energiji dveh barv
<b><math>\mu</math></b>	color brightness	svetlost barve
<b>U</b>	pixel weight	utež točke



## **Povzetek**

Diplomska naloga opisuje algoritem za iskanje silhuete obraza na posnetkih STRGV (stranski telerentgenogram glave in vratu) ter kasnejše določanje ključnih točk mehkih tkiv obraza, kot so nos, brada, ustnice in kožni nasion.

Zobozdravniki – ortodonti, kirurgi in čeljustni ortopedi pred zdravljenjem oziroma operacijskim posegom nad trdimi tkivi glave uporabljajo razna orodja za postavljanje diagnoze in odločanje o načinu in poteku zdravljenja. Cilja, ki ju zasledujejo, sta izboljšanje funkcionalnosti in lepota obraza. Eno od teh orodij so kefalometrične analize.

Cilj te diplomske naloge pa je določiti metodologijo za avtomatsko prepoznavanje ključnih točk mehkih tkiv glave in s tem olajšanje dela uporabnikom programa AxCeph [1], ki je namenjen izdelavi kefalometričnih analiz.

**Ključne besede:** telerentgenogram, silhueta, avtomatska prepoznavna, mehka tkiva



## **Abstract**

The scope of this BSc thesis is to describe the algorithm that traces the soft tissue silhouette of a face on STRGV image (skull lateral X-ray) and then locates key points of soft tissue like tip of the nose, chin and soft tissue nasion.

In order to make an informed decision on orthodontic treatment or orthognatic surgery, dentists- orthodontist and dental surgeons use various tools. This tools provide relevant information for diagnosis and help establish an appropriate treatment plan. Goals of the treatment are functional and aesthetic improvements. Cephalometric analyses are one of these tools.

The goal of this thesis is to find the most appropriate methodology for automatic recognition of key reference points on soft tissue of the head in order to simplify and speed up the process of creating cephalometric analyses in AxCeph software [1].

**Keywords:** X-ray, silhouette, automatic recognition, soft tissue



## Poglavje 1    Uvod

Zobozdravniki – ortodonti ali kirurgi, strmijo k stodontni uspešnosti zdravljenja, zato je pomembno predvideni rezultat zdravljenja videti že pred posegom. Poleg tega ima ortodontsko delo pogosto vpliv tudi na estetski videz pacienta. To pa je za posameznika lahko ključnega pomena.

V ta namen ortodonti izdelujejo tako imenovane kefalometrične analize [1], [2]. To so analize telerentgenskih posnetkov, ki služijo kot sestavni del diagnostičnih postopkov v čeljustni in zobni ortopediji. Temeljijo na posnetkih STRGV, na katerih ugotavljamo in označujemo referenčne točke in ravnine/premice. Na osnovi izmerjenih kot med geometrijskimi elementi sestavimo preglednice z odstopanji od standardnih vrednosti, ki veljajo za določeno razvojno obdobje zobovja oz. starost pacienta ter raso.

Na voljo imamo analize in tolmačenja analiz številnih univerz in posameznikov, kot so Ricketts, Downs, Steiner idr. [1]. Tako imamo tudi v Sloveniji svoj tip analize imenovan Ljubljanski tip analize. Zobozdravnik – ortodont ali kirurg se lahko za posamezen primer odloči opraviti še dodatne meritve k eni od znanih analiz, s pomočjo katerih lahko lažje formalizira nepravilnosti ter definira potek ortodontskega zdravljenja.

V želji po pospešitvi postopka izdelave kefalometričnih analiz smo se odločili izdelati algoritem, ki bo na posnetkih STRGV avtomatsko določil ključne referenčne točke obrazne linije oz. mehkih tkiv glave. Prvi pogoj za to je poznavanje silhuete obraza.

S pojmom silhueta obraza označujemo navidezno krivuljo, ki poteka po zunanjem delu mehkih tkiv obraza in tako predstavlja njegovo stransko obliko. S silhueto obraza narišemo stranski obris obraza osebe.

Opisani algoritem je tako sestavljen iz dveh delov. Prvi del se ukvarja z iskanjem silhuete obraza, drugi poskuša iz dobljene silhuetne linije določiti iskane referenčne točke, ki jih sestavljajo: nos, vrh brade, usta, ustnice in kožni nasion.





## **Poglavje 2    Zobna in čeljustna ortopedija**

Zobna in čeljustna ortopedija spadata med stomatološke smeri [2]. Njun glavni namen je zdravljenje oziroma preprečevanje ortofacialnih nepravilnosti. Ta stanja navadno niso bolezenskega značaja, temveč predstavljajo le odklon od normalnega razvoja kosti obraza. Tako se zobna in čeljustna ortopedija osredotočata na naslednja področja:

- študija rasti obraza,
- študija razvoja obraza,
- variacije obraza,
- variacije čeljusti,
- variacije zob.

### **2.1 Diagnostika v čeljustni ortopediji**

Diagnostika v zobni in čeljustni ortopediji se, kot že samo ime pove, ukvarja s postavljanjem diagnoz posamičnih primerov obraznih stanj, pri čemer uporablja več postopkov, ki so vnaprej določeni [2]. Osredotoča se na tri vrste ortofacialnih odstopanj: razvojne, funkcionalne in morfološke.

Njen glavni namen je identificiranje vzroka, ki je pripeljal do trenutne nepravilnosti ter kako ga odpraviti oziroma ublažiti njegove posledice [2]. Poznamo tri tipe diagnostike:

- morfološka diagnostika,
- kefalometrična diagnostika,
- funkcionalna diagnostika.

## **2.1.1 Morfološka diagnostika**

### **2.1.1.1 Okluzijska diagnostika**

Okluzijsko diagnostiko delimo na tri področja [2]:

- klinični pregled, katerega področje je status zob in ustne votline,
- analiza študijskih modelov na področju prostorskega razmerja zob in zobnega loka ter medčeljustnih odnosov,
- analiza panoramskega rentgenograma, ki predstavlja osnovni izvid za paciente stare od 8 do 10 let.

### **2.1.1.2 Kefalometrična diagnostika**

Delimo jo na tri področja [2]:

- antropometrične meritve, ki se izvajajo neposredno na glavi (z njo obraz razdelimo v skupino dolgih harmoničnih ali kratkih obrazov),
- analiza fotografij, kjer se uporabljajo fotografije, narejene od spredaj in s strani (osredotočamo se na razmerja in estetiko obraza),
- **telerentgenska diagnostika**, kjer analiziramo telerentgenograma glave in vratu.

V diplomski nalogi nas bo zanimala telerentgenska diagnostika, ki jo bomo kasneje podrobneje opisali.

## **2.1.2 Funkcionalna diagnostika**

Pri funkcionalni diagnostiki se osredotočamo na ortofacialne funkcije [2]. Te funkcije so dihanje, sesanje, požiranje, žvečenje, govor, izraz čustev ter estetski videz itd. in so izrednega pomena, saj njihovo nepravilno delovanje povzroča napačen razvoj tako mehkih kot tudi trdih tkiv.

## **2.1.3 Razvojna diagnostika**

Zobne in čeljustne nepravilnosti so odkloni v rasti in razvoju orofacialnega področja [2]. Poznavanje prenatalnega in postnatalnega razvoja omogoča razumevanje nastanka nekaterih nepravilnosti in predstavlja možnosti za njihovo nadaljnje zdravljenje.

## 2.2 Telerentgenska diagnostika

Telerentgenska diagnostika je razvrščena v kefalometrično diagnostiko, ki smo jo v predhodnem poglavju že razvrstili [2]. Za čeljustne ortopede je zanimiva, ker ima določene prednosti pred študijskim modelom.

Pomanjkljivost študijskega modela je v tem, da so včasih nepravilnosti na njem videti enako oziroma zelo podobno in jih je zelo težko ločiti. Z njimi namreč lahko določamo le stanje zob oziroma zobnih lokov [2]. Ko isto nepravilnost opazujemo na posnetkih STRGV, na katerih lahko opazujemo tudi skeletne in medčeljustne odnose, opazimo da gre morda za popolnoma druge nepravilnosti. Na posnetkih STRGV lahko določamo tudi velikost, obliko in medsebojne odnose struktur glave in obraza.

V ta namen izdelujemo dva tipa posnetkov:

- profilni posnetek – *norma lateralis*,
- posteroanteriorni posnetek – *norma frontalis*.

## 2.3 Stranski telerentgenogram glave in vratu

V sklopu diplomske naloge smo se osredotočili na profilni posnetek (*norma lateralis*) oziroma posnetek STRGV, ki ga na Medicinski fakulteti v Ljubljani uporabljajo pri vsakem ortodontskem zdravljenju, saj je v ortodontiji obvezen pripomoček pri postavitvi diagnoze [2]. Uporablja se pred, med in po začetku zdravljenja. Tako lahko diagnosticiramo začetno stanje, spremljamo razvoj zdravljenja in na koncu ocenimo rezultate.

S telerentgenskimi meritvami ovrednotimo kvantitativne in kvalitativne vrednosti oblike in velikosti ter medsebojne odnose struktur glave in obraza - tako kosti lobanje in obraza kot mehkih tkiv obraza [2]. Pri mehkih tkivih analiziramo strukturo nosa, ustnic in brade. Izmerjene vrednosti nato primerjamo s standardnimi vrednostmi in tako malokluzijo razvrstimo ter določimo njen obseg.

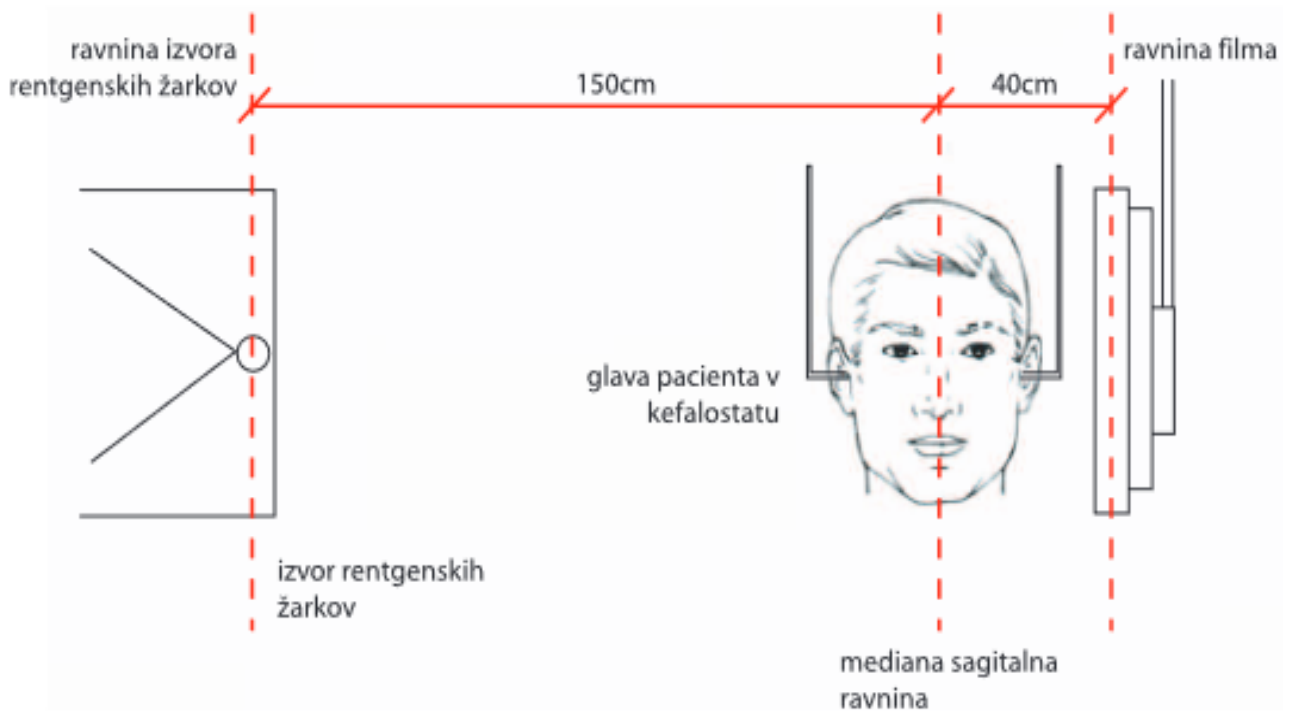
Med zdravljenjema s superpozicijo posnetkov v različnih fazah zdravljenja opazujemo napredek [2]. Z njimi lahko nazorno prikažemo spremembe, ki so nastale med zdravljenjem. S primerjavo prvega in zadnjega posnetka lahko ocenimo uspešnost celotnega zdravljenja.

## 2.4 Tehnika telerentgenskega slikanja

Naprava za izdelavo posnetkov STRGV je sestavljena iz dveh delov [2]. Prvi del je rentgenski aparat, ki slika; drugi del je kefalostat, ki skrbi, da je glava postavljena v zahtevan položaj (slika 2.1). Za pravilen položaj morajo biti izpolnjeni štiri pogoji:

- rentgenski žarki morajo potekati pravokotno na film,
- mediana sagitalna ravnina glave mora biti postavljena vzporedno s filmom,
- mediana sagitalna ravnina glave mora biti oddaljena 40 centimetrov od filma,
- razdalja med izvorom žarkov in mediano sagitalno ravnino glave mora biti 1,5 metra.

*Sagitalna ravnina* poteka vzdolž čela (sagitalni šiv) [15].



tehnika rentgenskega slikanja

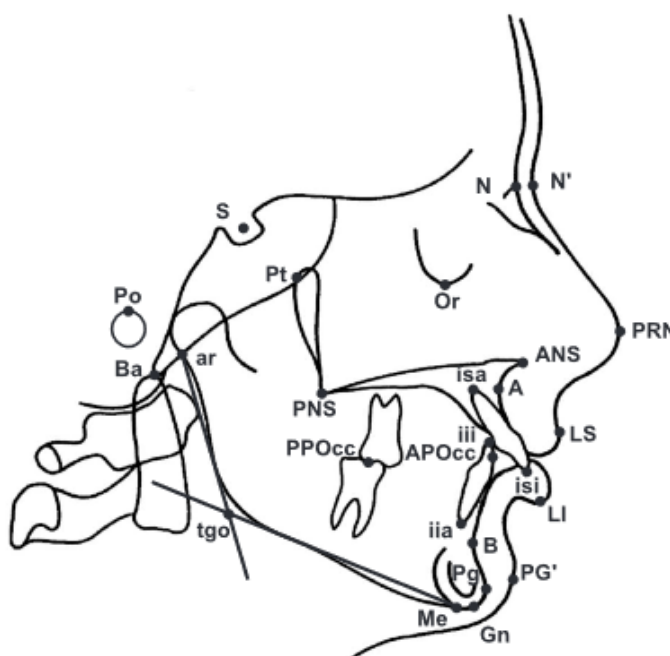
Slika 2.1: Grafična predstavitev postavitve pri slikanju [2]

## 2.5 Analiza posnetkov STRGV

Na posnetkih STRGV analiziramo sagitalne in vertikalne odnose, položaj centralnih sekalcev ter profil brade in nosu [2]. Izmerjene vrednosti vnašamo v protokol in jih primerjamo s standardnimi vrednostmi. Glede na odstopanja izmerjenih vrednosti od standardnih vrednosti ugotavljamo težo malokluzije. Poznati moramo referenčne točke na kostnih strukturah, zobeh ter mehkih delih in referenčne linije.

Namen diplomske naloge je poiskati referenčne točke na mehkih tkivih, zato bomo ostale referenčne točke zanemarili [2]. Referenčne točke na mehkih tkivih so naslednje (slika 2.2):

- **N'** - kožni nasion,
- **PRN** - konica nosu - leži na konici mehkih delov nosa,
- **LS** - točka zgornje ustnice - meja med rdečino in belino zgornje ustnice,
- **LI** - točka spodnje ustnice - meja med rdečino in belino spodnje ustnice,
- **PG'** - kožni pogonion - najbolj prominentna točka na profilu mehkih delov brade



Slika 2.2: Simbolični stranski telerentgenogram s ključnimi referenčnimi točkami [2]

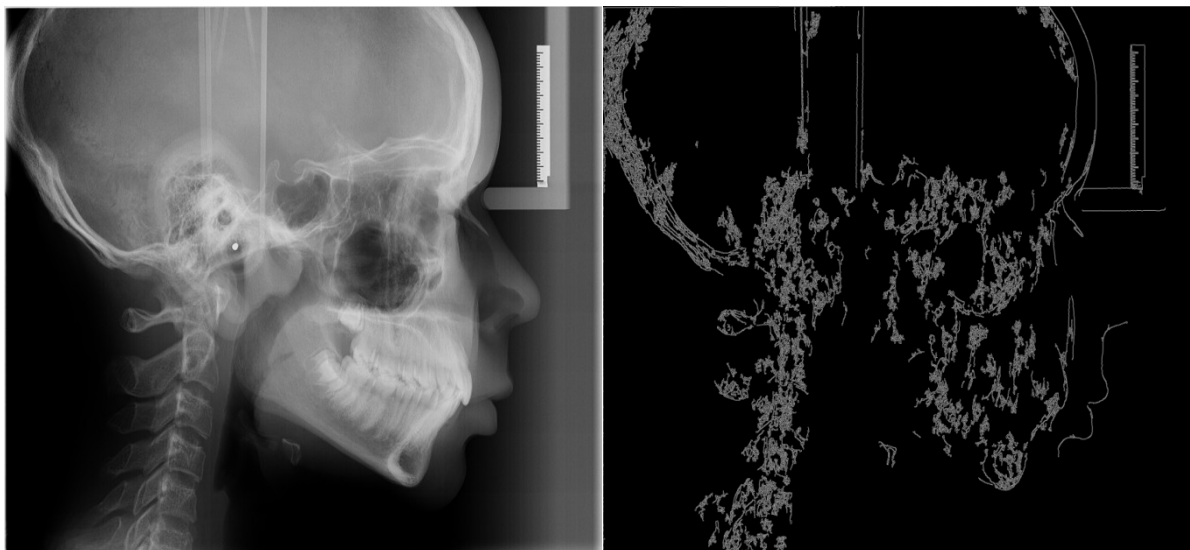


## Poglavje 3 Iskanje silhuete

Ker se bomo odslej ukvarjali zgolj s posnetki tipa STRGV, se bomo od te točke naprej nanje sklicevali zgolj z besedo posnetek.

### 3.1 Iskanje robov (Edge Detection)

Tekom razvoja smo poskusili problem iskanja silhuete rešiti s pomočjo tako imenovanih *edge detection algoritmov* [3]. Teste smo opravili s Sobel filtrom [5] in naprednejšim Canny algoritmom [6], [8] za iskanje robov, vendar se je izkazalo, da imajo posnetki pogosto kljub predhodni obdelavi preveč šuma. Zato je rezultat standardnih algoritmov za iskanje robov na slabših slikah praktično neuporaben. Primer vidimo na sliki 3.1.



Slika 3.1: Rezultat Canny filtra nad povprečnim posnetkom

Iz slike je razvidno, da se iz dobljenih rezultatov ne da določiti oblike bradne in nosne linije. Zato smo to idejo opustili in začeli z razvojem algoritma, ki bi bil primernejši za naše posnetke. Postopek je opisan v poglavjih, ki sledijo.

### 3.2 Energija točke

Pojem energija točke [10] je ključen v nadaljevanju algoritma, zato ga je vredno podrobneje preučiti. Predstavlja merilo s katerim lahko določimo razliko v barvi dveh točk. To merilo je za nas ključnega pomena, saj je pogoj za prepoznavanje meje med predmeti na posnetku prav sprememba barve.

Za prepoznavanje te razlike je bilo razvitih več standardov, ki poskušajo simulirati način prepoznave razlike oziroma razdalje med barvami kot to počne človeško oko. Tako je bila vpeljana funkcija  $\Delta E$  (razlika v energiji dveh barv) [10], ki poda številsko razliko med dvema barvama. Izračun funkcije  $\Delta E$  določa več različnih standardov. Ti standardi upoštevajo poleg svetlosti tudi preostale komponente posamične barve, ki nas v tej nalogi niso zanimale. Naši posnetki so namreč omejeni na sivine in zato tako kompleksni izračuni niso potrebni. Lahko se omejimo samo na svetlost, ki je tako za naše potrebe edino merilo za izračun energije točke.

Svetlost barve  $\mu$  (svetlost barve) [9] računamo po enačbi 3.1, pri čemer smo se omejili na barvni model RGB [13]. RGB je kratica, ki izhaja iz angleščine in pomeni »red«, »green« in »blue« (rdeča, zelena in modra), ki so tudi osnovne barve modela. Vsaka od teh barv se lahko pojavi v 256 odtenkih, kar skupaj znaša 16.777.216 barv ( $256^3$ ). Trojček vsebuje tri šestnajstiške vrednosti, ki ponazarjajo količino osnovne barve.

$$\mu = \frac{R + G + B}{3} \quad (3.1)$$

Za nas bo torej  $\Delta E$  enak razliki vrednosti  $\mu$  dveh točk, oziroma razlika svetlosti teh dveh točk.

$$\Delta E = \mu_1 - \mu_2 \quad (3.2)$$

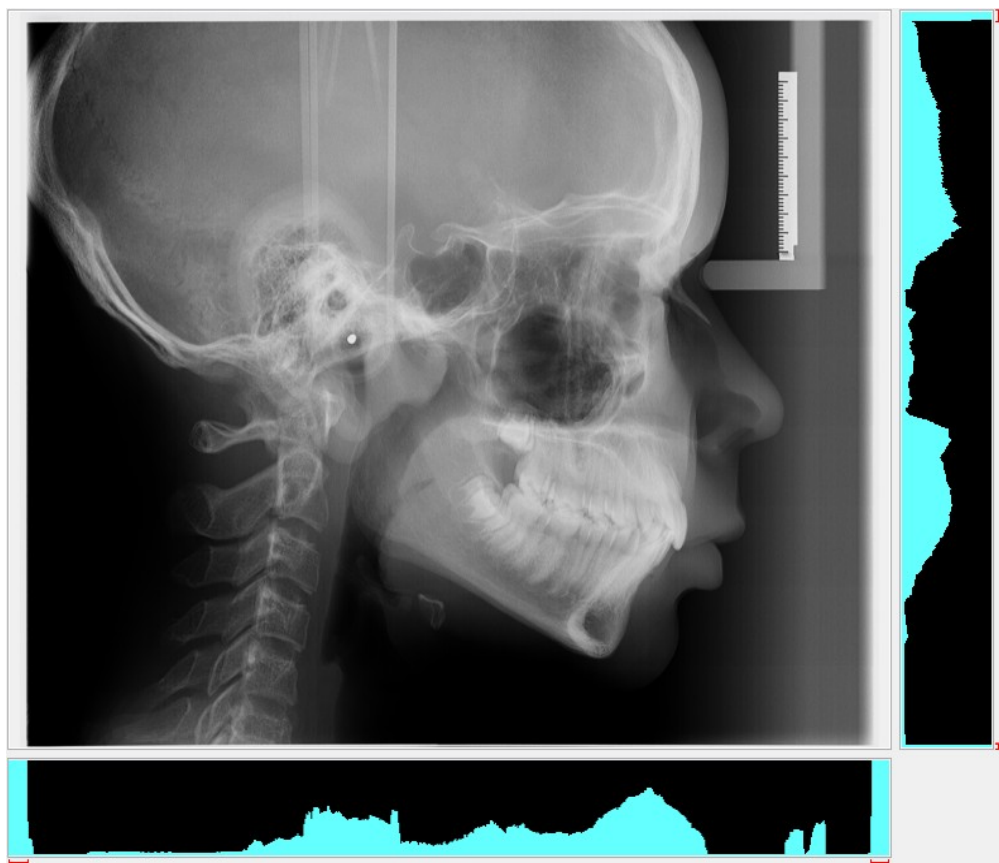


### 3.3 Odstranitev motečih elementov

Preden začnemo predpripravo, se je koristno znebiti robov posnetka, ki so se izkazali za moteč faktor v nadaljevanju algoritma, poleg tega si tako zmanjšamo obseg problema.

V ta namen je koristno izračunati energijo točk posnetka po vertikalni in horizontalni osi. Ob tem dobimo dva grafa; na njunih robovih so energijsko zelo močne točke, ki nam v resnici kažejo robove slike. Na sliki 3.2 so robovi označeni z rdečo barvo.

Na tej točki posnetek obrežemo, vendar ne smemo pozabiti, da se nam je zaradi tega izhodišče X in Y osi posnetka zamaknilo za obrezani del. Zato si moramo te robove zapomniti in jih na koncu algoritma upoštevati pri rešitvi.



Slika 3.2: Energija točk posnetka po vertikalni in horizontalni osi

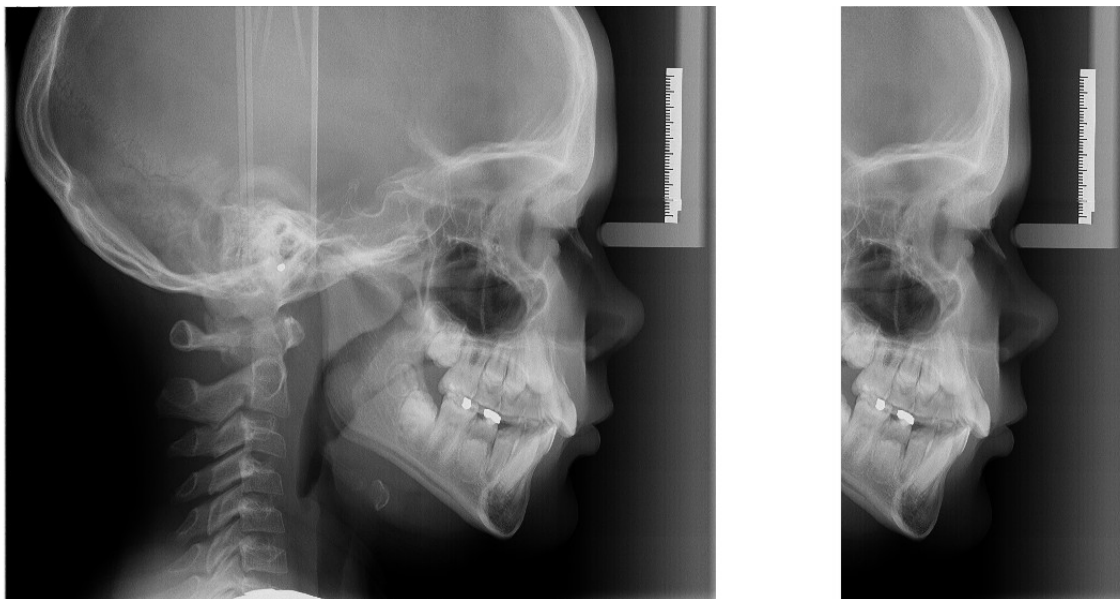
### 3.4 Normalizacija dimenzij posnetka

Posnetki imajo tipično zelo veliko resolucijo (slike so zelo velike). Vendar nam pri iskanju točk na mehkih tkivih ta nič ne pomaga; učinek je ravno nasproten. Gaussovo glajenje [4], [7] je primer precej potratne operacije, ki se izvaja na vsaki točki posebej, kar pomeni, da se z večanjem slike zahtevnost te operacije povečuje s kvadratom.

Poleg tega tudi leva polovica posnetkov, ki zajema zadnji predel glave za nas nima uporabne vrednosti, saj se tam nikoli ne pojavlja silhueta obraza.

Zaradi zgornjih dveh vzrokov smo se odločili, da posnetek obrežemo, tako da iz njega dobimo le pomembne informacije. Izrezali smo desni del posnetka širine, ki je enaka polovici višine posnetka. Nato smo izrezani del zmanjšali tako, da smo ohranili razmerje med širino in višino, pri čemer smo višino omejili na 1000 točk (slika 3.3).

Ko se bomo v nadaljevanju sklicevali na posnetke, ne bomo imeli več v mislih originalnih, temveč normalizirane in ustrezno zmanjšane posnetke.



Slika 3.3: Primer zmanjšanja problema z zmanjšanjem območja in resolucije

### 3.5 Korekcije posnetka

Preden začnemo z algoritmom iskanja točk silhuete, je kot pri ostalih podobnih algoritmih, ki temeljijo na prepoznavanju razlik spremembe energije točk, potrebno sliko dodatno obdelati, da poudarimo pomembne dele posnetkov in da se znebimo manjših šumov, ki bi jih sicer algoritem lahko zaznal kot meje. To smo opravili z Gamma korekcijo [11], [12] in Gaussovimi glajenjem [4], [7]. Rezultat je prikazan na sliki 3.6.

#### 3.5.1 Gamma korekcija

Velikokrat so mehka tkiva na posnetkih zelo slabo vidna ali sploh ne. To težavo lahko do neke mere rešimo z Gamma korekcijo [11], [12]. Gamma korekcija je nelinearna funkcija uporabljena za kodiranje in dekodiranje svetilnosti.

Vrednost Gamme določa razmerje med numerično vrednostjo točke in njeno dejansko svetilnostjo. S povečanjem te vrednosti poudarimo manj vidne sivine posnetka, kar ima v našem primeru za posledico, da postanejo mehka tkiva bolj zaznavna.

#### 3.5.2 Gaussovo glajenje

Algoritmi, ki se ukvarjajo s prepoznavanjem predmetov oziroma robov na slikah, so občutljivi na šum [4], [7]. Z uporabo glajenja nivo šuma zmanjšamo, kar zelo pripomore k boljšim rezultatom sledečim algoritmom.

Za glajenje smo izbrali Gaussovo glajenje [4], [7], [16]. Ta tip glajenja se pogosto uporablja pri algoritmih, ki se ukvarjajo z zgoraj omenjenim prepoznavanjem. Vizualni učinek tega načina glajenja je gladko glajenje, ki spominja na gledanje slike preko prozornega zaslona, ki pa se zelo razlikuje od tako imenovanega *bokeh efekta* (slika 3.4), ki nastane zaradi neizostrenosti leče oziroma sence objekta pod normalno osvetljenostjo. Gaussovo glajenje se uporablja tudi v predobdelavah pri algoritmih računalniškega vida za povečevanje struktur na slikah.



Slika 3.4: Primerjava Gaussovega glajenja in bokeh efekta [16]

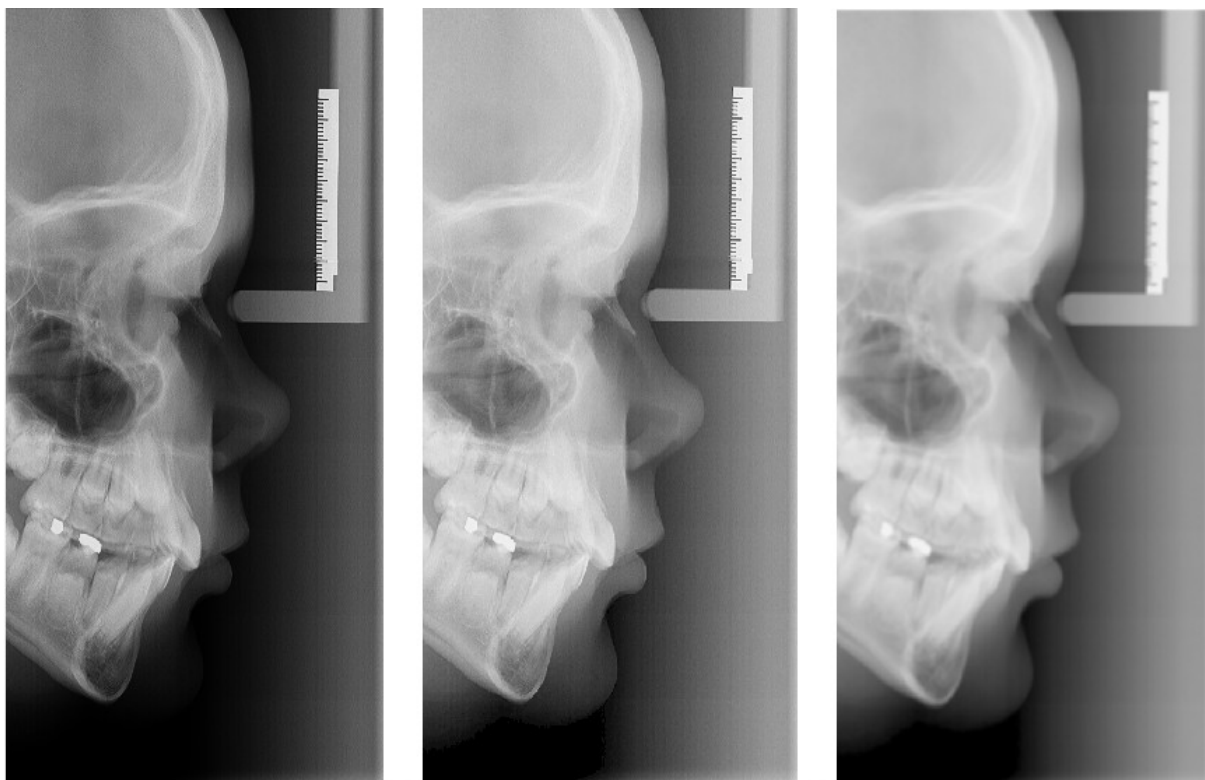
Matematično gledano je Gaussovo glajenje filter, ki uporablja Gaussovo funkcijo za izračun nove vrednosti vsake točke slike [4], [6], [7]. Gaussova funkcija se sicer večinoma uporablja v statistiki in predstavlja normalno distribucijo. Enačba dvodimenzionalne Gaussove funkcije je prikazana v enačbi 3.3:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

Vendar pa lahko Gaussovo glajenje implementiramo tudi s pomočjo Gaussove matrike za glajenje [4], [6], [7]. To naredimo tako, da naredimo konvolucijo matrike slike z Gaussovo matriko. To pot smo izbrali tudi mi. Primer take matrike vidimo na sliki 3.5.

$$\mathbf{B} = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * \mathbf{A}.$$

Slika 3.5: Primer Gaussove matrike s  $\sigma = 1.4$  [6].

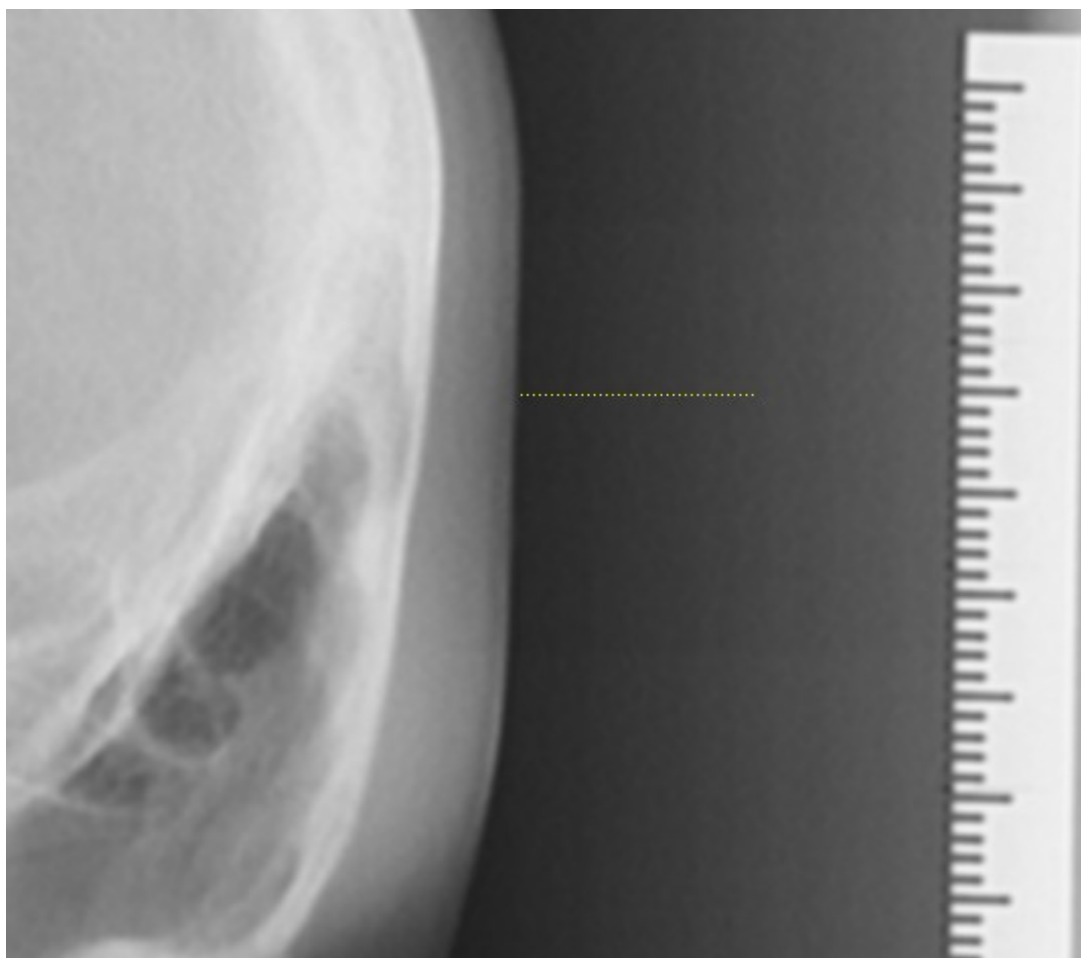


Slika 3.6: Prva slika predstavlja začetni posnetek, druga slika predstavlja začetni posnetek z gamma korekcijo, tretja slika predstavlja začetni posnetek z gamma korekcijo in dvakratnim Gausovim glajenjem

### 3.6 Iskanje prve točke silhuete

Silhuete vseh obrazov na posnetkih imajo skupno značilnost. Energiji točk na mehkem tkivu in ozadju se po vrednosti razlikujeta in to je glavno merilo za določanje, kje se nahaja meja med obrazom in ozadjem posnetka. Vrednost te razlike smo določili na podlagi testiranj.

Ideja temelji na tem, da se postavimo na začetno točko desno od obraza in nato potujemo po sliki proti levi strani, dokler ne najdemo te pričakovane razlike. Takrat vemo, da smo prišli do prve točke silhuete. Primer je prikazan na sliki 3.7.



Slika 3.7: Primer iskanja prve točke silhuete

### 3.7 Določanje začetnih točk

Pri iskanju prve točke silhuete in pri iskanju merila je ključnega pomena, da pravilno izberemo začetno točko, saj se nam sicer lahko zgodi, da med iskanjem prve točke silhuete naletimo na merilo, ki stoji pred obrazom in ga zaznamo kot prvo točko silhuete. Algoritem na začetku še ne zna ločiti med obrazom in merilom, saj je njegova naloga le iskati spremembo v energiji točk.

Na podlagi testiranj smo ugotovili, da so v zgornji tretjini posnetkov točke z najmanjšo energijo vedno neposredno ob silhueti. To dejstvo je bilo povod za določitev prve, začetne točke iskanja. Za to točko smo izbrali najtemnejšo točko v sredini zgornje tretjine obdelanega posnetka.

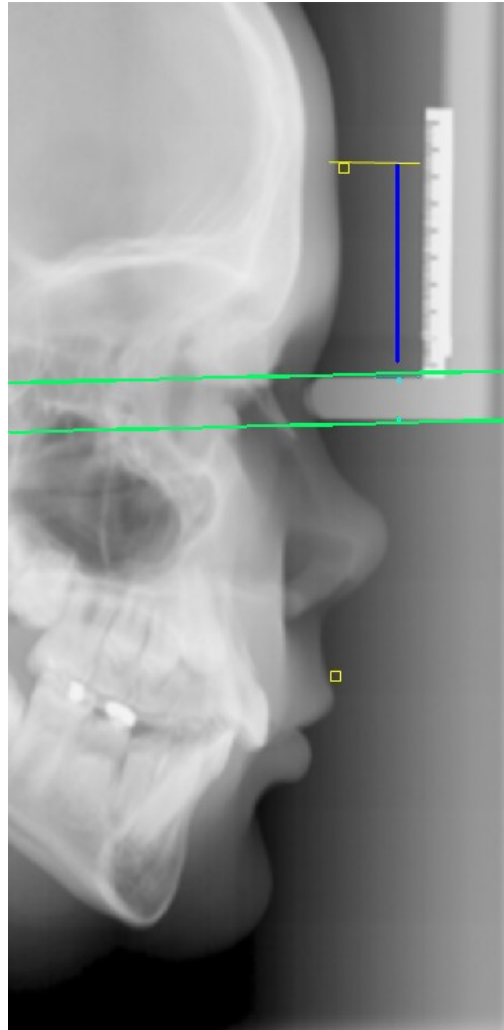
Drugo začetno točko smo ravno tako izbrali na podlagi testiranj. Ugotovili smo, da se energijsko najmočnejši horizontalni pas vedno nahaja na višini zobovja. Tako smo določili »y« koordinato druge točke. Koordinato »x« smo določili tako, da smo poiskali točko z najmanjšo energijo slike na višini »y«. Tudi tukaj se je ravno tako kot pri prvi točki izkazalo, da je točka z najmanjšo energijo vedno neposredno ob silhueti. Na sliki 3.8 sta začetni točki označeni z rumenima kvadratoma.

### 3.8 Problem merila

S posnetkov je razvidno, da se merilo velikokrat dotika, če ne celo pritiska v mehko tkivo in silhueto. To je odvisno od tega, kako močno se je pacient med slikanjem naslonil na merilo. Pri iskanju silhuete to postane velika težava, saj je zelo težko poiskati pravilno pot točk silhuete na predelu stika. Zato smo se odločili, da bomo ta predel točk enostavno ignorirali, dokler ne najdemo ostalih okoliških točk. Ko pa bomo na koncu iskanja ostalih točk imeli dovolj informacij o okoliških točkah, bomo ta del enostavno aproksimirali. To se je izkazalo za zelo dober približek realnega stanja.

Za začetek moramo določiti meje merila oziroma območja, ki jih bomo v nadaljevanju obravnavali kot da jih ni. V ta namen iz prve začetne točke poiščemo v desni smeri prvo točko merila in v levi smeri prvo točko silhuete (čela), kot je to z rumeno črto prikazano na sliki 3.8. Na treh četrtinah te poti, gledano s smeri silhuete proti merilu, se nato sprehodimo navpično

navzdol, dokler spet ne naletimo na merilo. Na sliki 3.8 je ta pot obarvana modro. Ko smo prišli do merila, smo izmerili še njegovo debelino in naklon ter potegnili vzporednice na njegovem spodnjem in zgornjem delu. Ti dve vzporednici sta na sliki 3.8 obarvani zeleno.



Slika 3.8: Primer izbora začetnih točk in označitve merila



### 3.9 Določanje poteka silhuete

Ko imamo določeni prvi dve točki in območje merila, se pomaknemo po silueti v smeri navzgor in navzdol ter tako določimo njene točke. Zato smo razvili metodo, ki zna slediti teku silhuetne linije. To počne tako, da si utira pot po silueti na podlagi trenutne smeri gibanja in z analizo okoliških točk izbere naslednjo točko, se postavi nanjo in postopek ponovi.

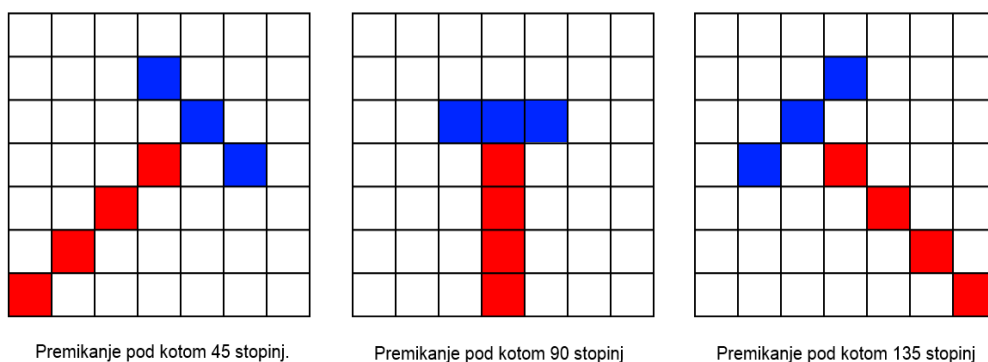
#### 3.9.1 Možni kandidati za naslednjo točko

Sledenje silueti poteka na način točka po točko. Izbira naslednje točke je odvisna tako od kota krivulje točk silhuete, pod katerim smo prišli do zadnje točke kot od značilnosti njenih sosednjih točk.

Tako se za možne kandidate za naslednjo točko vedno upoštevajo tri točke:

- točka, ki sledi trenutni točki, če nadaljujemo pot pod istim kotom,
- točka, ki sledi trenutni točki pod istim kotom minus 45 stopinj,
- točka, ki sledi trenutni točki pod istim kotom plus 45 stopinj.

Slika 3.9 prikazuje možne kandidate za naslednjo točko v primeru, da se gibljemo pod kotom 135, 90° ali 45°. Gibanje nima omejitve kota, vendar so ti trije primeri izbrani, ker so nazorni primeri za razumevanje ideje. Z rdečo barvo so obarvane predhodne točke, ki nakazujejo smer oziroma kot, pod katerim se gibljemo. Prav ta smer določa možne kandidate za naslednjo točko. Kandidati so na sliki 3.9 obarvani modro.



Slika 3.9: Kandidati za naslednjo točko

### **3.9.2 Izbira pravega kandidata za naslednjo točko.**

Ko imamo določene možne kandidate za naslednjo točko, se moramo odločiti za enega izmed njih. To naredimo tako, da vsako od treh točk testiramo, na koncu pa izberemo tisto, ki doseže najboljše rezultate.

Testiranje točke poteka tako, da vsako točko testiramo v treh smereh:

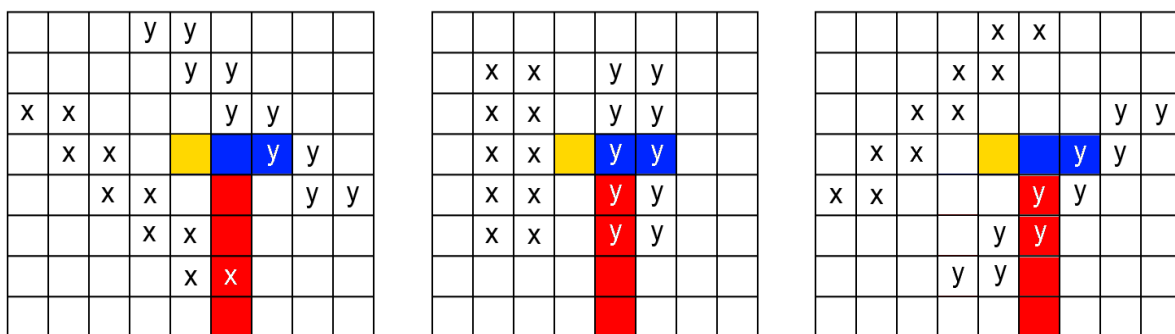
- pod kotom gibanja,
- pod kotom gibanja minus 45 stopinj,
- pod kotom gibanja plus 45 stopinj.

Tu je za kot gibanja mišljen kot, pod katerim smo prišli do zadnje točke, kar je razvidno na sliki 3.9. Za vsako od teh treh smeri in vsako točko se izračuna utež  $U$  (utež točke). Na podlagi teh uteži se odločimo, katera od treh točk kandidatk bo naslednja točka silhuete.

Kot smo omenili že v poglavju o energiji točke (3.2), je merilo za lociranje točk silhuete to, da se energiji točk na mehkem tkivu in ozadju po vrednosti razlikujeta. Iz tega izhaja dejstvo, da uteži treh točk lahko računamo tako, da izračunamo razliko med energijo točk na eni in drugi strani izbrane točke, glede na smer gibanja. Poleg tega upoštevamo, da se smer gibanja lahko spremeni za  $45^\circ$  v eno ali drugo stran. S tem si zagotovimo najboljšega kandidata med tremi možnimi.

Uteži treh točk kandidatk torej računamo tako, da izračunamo razliko med energijami zunanjega in notranjega dela silhuete. Pri tem pa predpostavimo, da bi bila smer krivulje lahko enaka oziroma bi se kot spremenil za  $45^\circ$ . Točka, ki bo pri tem dosegla največjo vrednost, bo postala naslednja točka krivulje.

Za lažje razumevanje je na sliki 3.10 predstavljen primer izbire točk za izračun uteži, za prvo od treh točk kandidatk v primeru, da se gibljemo pod kotom 90 stopinj. S črko  $x$  so označene točke, ki predstavljajo mehko tkivo, s črkami  $y$  pa točke, ki predstavljajo ozadje posnetka.



Slika 3.10: Oznaki x in y označujeta točke, ki vplivajo na računanje uteži treh točk

Iz tega izhaja, da uteži  $U$ , ki so v našem primeru enake  $\Delta E$  lahko izračunamo po enačbi 3.6, ki smo jo izpeljali iz enačb 3.4 in 3.5, pri čemer je enačba 3.4 enaka enačbi 3.2, razširjeni na območje točk. Tako sedaj območje opazovanja ni več posamezna točka, ampak območje točk, ki so na sliki 3.10 označene s črkama x in y. Namesto da se osredotočimo samo na sosednje točke, opazujemo pas točk, ki je vzporeden s smerjo gibanja. S tem v oceno zajamemo večjo količino sosednjih točk in tako povečamo pravilnost izračuna.

$$\mu_1 = \Sigma\mu(x), \mu_2 = \Sigma\mu(y) \tag{3.4}$$

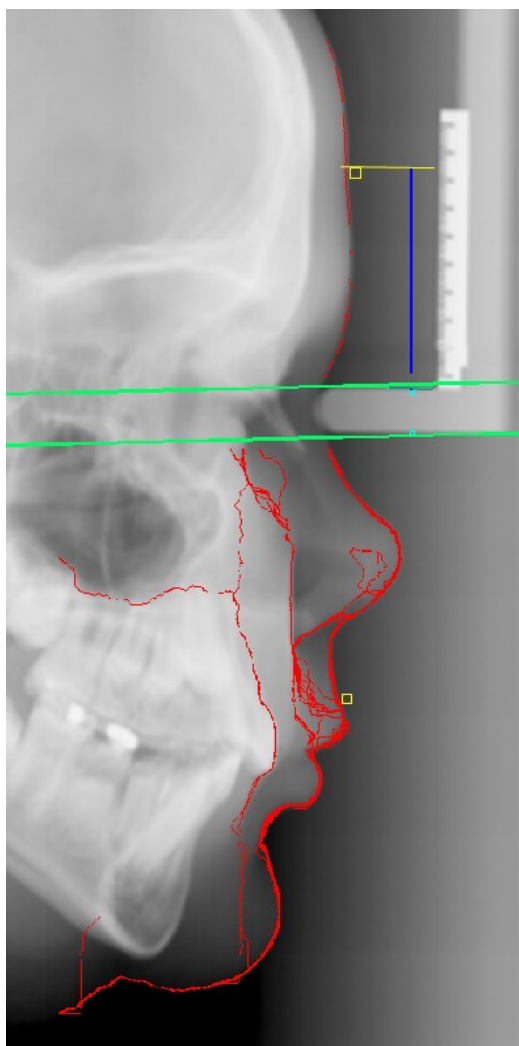
$$U = \Delta E = \mu_1 - \mu_2 \tag{3.5}$$

$$U = \Sigma\mu(x) - \Sigma\mu(y) \tag{3.6}$$

### 3.9.3 Iskanje vseh možnih točk silhuete

Ko smo določili način sprehajanja po silhueti in način, kako poiskati prve točke silhuete, lahko začnemo z dejanskim iskanjem. Izkazalo se je, da je na območju čela en sprehod v smeri navzgor in navzdol po silhueti dovolj, da se določijo vse točke na tem območju. Na predelu pod merilom pa se včasih silhueta prekinja in jo je zato treba iskati na več mestih. To ni problematično, saj na tem predelu ni merila, ki bi ga lahko zamenjali za silhueto. Zato smo se odločili, da na način, ki je opisan pri iskanju prvih točk silhuete (3.6), v enakomernih razmikih od merila navzdol iščemo silhueto in ko pridemo do njene prve točke, se sprehodimo po njej v smeri navzgor in navzdol.

Izbran način iskanja silhuete nam vrne veliko število točk in poti, kar je vidno na sliki 3.11.



Slika 3.11: Primer najdenih točk silhuete

### **3.9.4 Izluščanje relevantnih točk iz točk silhuete**

Naslednja težava, s katero smo se srečali, je bila, kako iz množice točk, ki smo jih dobili v predhodnem poglavju, izluščiti točke, ki nas zanimajo. To smo naredili tako, da smo od vrha proti dnu posnetka v enakomernih presledkih iskali najbolj zunanje točke. Na vsaki od teh višin smo se z desne strani slike sprehodili v levo, dokler nismo naleteli na prvo izmed možnih točk silhuete na tej višini (prvo rdečo točno na določeni višini). Prve točke na vsaki od višin smo shranili v nov seznam točk, ki nam predstavlja dejansko silhueto. Na sliki 3.13 so te točke označene z zelenimi pikami.

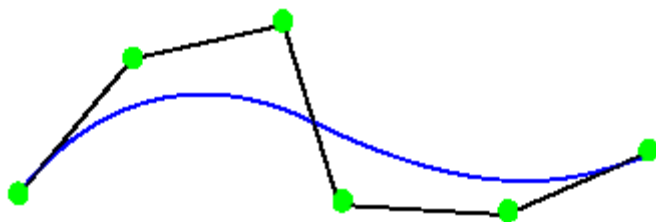
### **3.9.5 Aproksimacija točk na področju merila**

V poglavju o težavah z merilom (3.8) smo ugotovili, da bo potrebno na koncu poiskati točke, ki smo jih ignorirali zaradi merila. Ker poznamo točke, ki pridejo k merilu od zgoraj iz čela in od spodaj z nosu, lahko z upoštevanjem le teh in kota gibanja približno določimo točko, kjer bi se ti dve poti združili. S pomočjo krivulj NURBS (neenakomerna racionalna osnovna krivulja) [14] aproksimiramo krivuljo skozi te točke in tako poiščemo ostale točke tega področja.

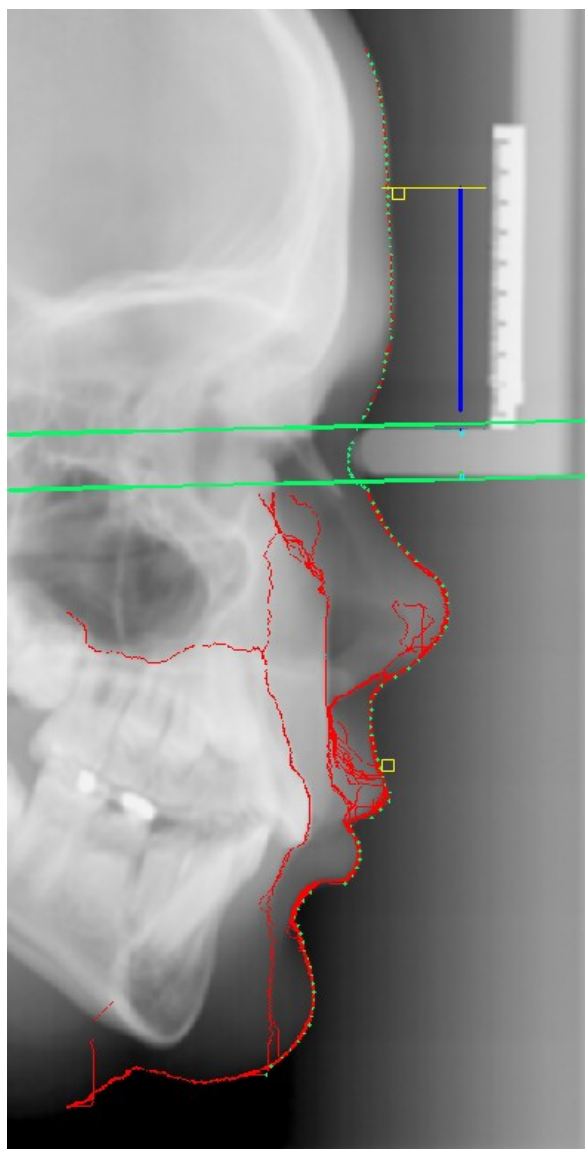
NURBS krivulje so orodje, s katerim lahko aproksimiramo krivuljo skozi točke oziroma v bližini določenih točk [14]. Zelo pogosto se uporabljajo v računalniški grafiki za izdelovanje in predstavitev krivulj ter površin. Pri B-spline [14] krivuljah moramo poleg tega, da definiramo prvo in zadnjo točko, definirati tudi zaporedje točk z utežmi, ki določajo njen potek. Primer take krivulje je na sliki 3.12.

Izbrali smo pet točk, skozi katere smo potegnili krivuljo. Prvi dve izbrani točki sta zadnji dve točki silhuete nad merilom, gledano s smeri čela proti nosu. Za zadnji dve točki smo izbrali zadnji dve točki silhuete, gledano s smeri od konca nosu proti merilu.

Sredinsko točko pa smo določili s pomočjo premic skozi oba para točk in navidezno premico, ki poteka po sredini merila (vzporedno na merilo). Rezultat aproksimacije lahko vidimo na sliki 3.13.



Slika 3.12: Primer NURBS krivulje [14]



Slika 3.13: Relevantne točke silhuete in aproksimirane točke

## **Poglavje 4 Določanje pomembnih točk**

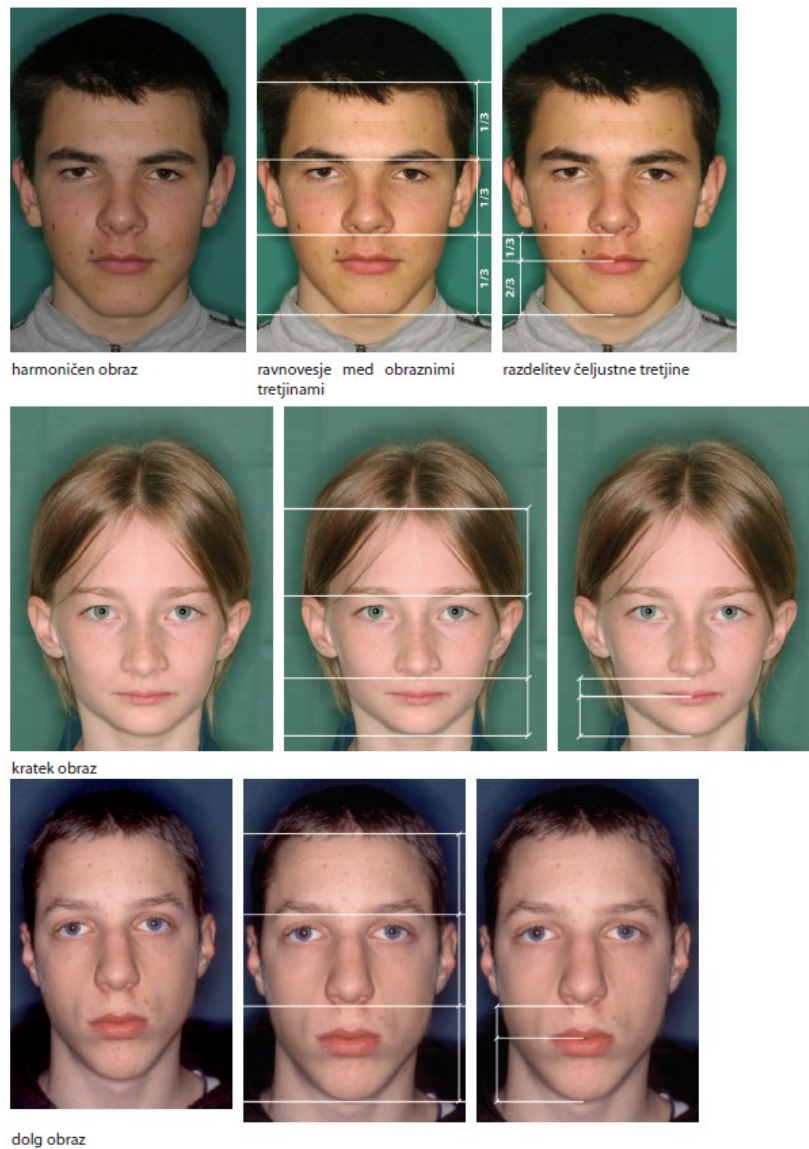
Določanje točk na mehkih tkivih je najbolj zahteven del našega algoritma, saj jih včasih celo človeško oko težko določi. Zato smo razvili nekaj prijemov, ki se poslužujejo zakonitosti človeškega obraza in na podlagi le teh skušajo pravilno izbrati te točke. Od tu naprej se bomo ukvarjali izključno s točkami, ki smo jih dobili v poglavjih 3.9.4 in 3.9.5.

Pomembno sredstvo pri določanju referenčnih točk so standardna razmerja človeškega obraza [2], ki jih bomo podrobneje opisali v naslednjem poglavju.

### **4.1 Razmerja obraza**

Prvo razmerje govori o tem, da je človeški obraz v vertikalni smeri razdeljen približno na enake tretjine (slika 4.1), vendar to velja samo za večino prebivalstva, ki ima harmoničen obraz [2].

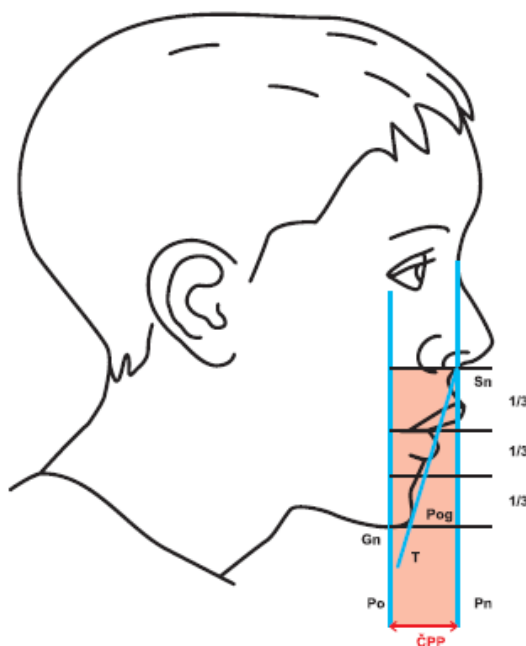
Poleg harmoničnega tipa obraza poznamo tudi dolg in kratek tip obraza, za katera pa to razmerje ne velja (slika 4.1) [2]. Če pa razmerje naredimo bolj ohlapno postane uporabno tudi v teh dveh primerih. To lahko naredimo, ker nam razmerje služi zgolj za omejevanje območja iskanja točk in za nas njegova ekzaktnost ni pomembna.



Slika 4.1: Prvo razmerje [2]

Drugo razmerje govori o tem, da če območje od začetka brade do začetka nosu razdelimo na tri dele, je prvi del od brade do ust enak dvema tretjinama, območje od ust do začetka nosu pa eni tretjini območja (slika 4.2) [2]. Tudi to razmerje velja zgolj za harmoničen obraz, vendar pri drugih ne odstopa veliko, zato smo tudi ta območja naredili ohlapnejša in s tem pokrili zakonitosti vseh treh tipov obrazov.





Slika 4.2: Drugo razmerje [2]

## 4.2 Iskanje konice nosu (PRN)

Točka PRN leži na konici nosu oziroma na konici mehkih delov nosa. Ta točka je za nas najpomembnejša, ker nam služi kot orientacija za iskanje ostalih točk.

Poiščemo jo tako, da iz prve točke pod merilom potujemo navzdol, dokler koeficient premice skozi dve sosednji točki ne postane negativen. Takrat drugo točko označimo za začasno točko PRN, ker smo njen točni položaj določili kasneje, ko smo imeli več informacij o ostalih točkah, vendar nam tudi ta začasna postavitev dobro služi za orientacijo.

## 4.3 Iskanje kožnega nasiona (N')

Točko N' ni mogoče točno določiti samo iz informacij, ki jih dobimo iz silhuete, ker je odvisna od dveh točk na skeletu. To sta točki N (Nasion) in S (Sella). Lahko pa iz poznavanja silhuete določimo precej dober približek njene pozicije.

Določimo jo tako, da poiščemo najbolj oddaljeno točko od premice, ki poteka skozi točko, ki se nahaja na polovici poti med točko PRN in prvo točko pod merilom ter točko na čelu, ki smo jo določili v poglavju 3.6.

#### **4.4 Iskanje konice brade (PG')**

Ko poznamo približno pozicijo točke PRN, lahko začnemo z iskanjem točke PG', ki je najbolj prominentna točka na profilu mehkih delov brade.

Poiščemo jo tako, da iz zadnje točke silhuete potujemo navzgor, dokler je koeficient premice skozi dve sosednji točki manjši od koeficienta premice skozi prvo izmed točk in začasno točko PRN. Pri tem je zadnja točka silhuete mišljena kot zadnja točka na silueti, gledano s smeri od nosu proti bradi.

#### **4.5 Točno določanje točke (PRN)**

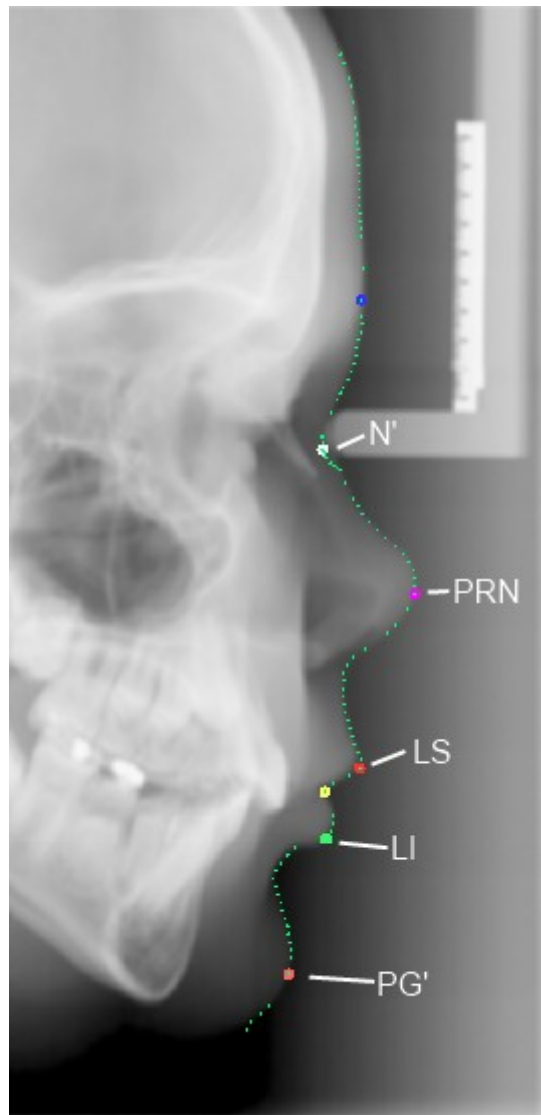
Ko poznamo pozicijo točke N' in PG', lahko določimo dokončno pozicijo točke PRN. To storimo tako, da v bližnji okolici trenutne točke PRN poiščemo tisto točko, ki je najbolj oddaljena od premice, ki poteka skozi točki N' in PG'.

#### **4.6 Iskanje konic ustnic (LS in LI)**

Določili smo že točko PRN in PG', kar pomeni, da lahko začnemo z iskanjem točk SL in LI. Ti dve točki sta v neposredni bližini ustne odprtine, ki se nahaja na izhodišču najbolj ostrega kota med premicami treh zaporednih točk oziroma štirih točk.

Z upoštevanjem slike 4.2, smo prišli do ugotovitve, da območje iskanja ustne votline lahko omejimo na področje srednjih treh sedmin območja med točko PRN in PG'. Če razmerje pomaknemo navzgor do točke PRN in spodaj do točke PG', nam ustna odprtina pade v srednjo tretjino območja. Glede na to, da smo območje razmerja s slike 4.2 rahlo spremenili, smo povečali tudi območje iskanja ustne votline. Tako smo območje iskanja povečali iz srednje tretjine na srednje tri sedmine, kar se je med testiranjem izkazalo za dovolj dobro oceno.

Po določitvi točke ustne votline lahko določimo tudi pozicije točk LS in LI. Za točko LS določimo točko, ki je najbolj oddaljena od premice, ki poteka med točko ustne votline in gornjo mejo intervala iskanja. Za točko LI pa proglasimo točko, ki je najbolj oddaljena od premice, ki poteka skozi točko ustne votline in spodnjo mejo intervala iskanja.



Slika 4.3: Primer določenih točk



## **Poglavje 5    Sklepne ugotovitve**

Testiranja opisanega algoritma so pokazala zelo dobre rezultate na zelo dobrih in povprečnih posnetkih, na slabih so bili rezultati neuporabni, vendar so taki posnetki tudi sami po sebi neuporabni.

Algoritem bi bilo mogoče še izboljšati z dodatnimi predobdelavami posnetkov, kot so avtomatsko raztezanje histograma in s primerno osvetlitvijo oziroma potemnitvijo posnetka.

Ravno tako bi bilo mogoče izboljšati izbiro naslednje točke silhuete. Algoritem bi pri izbiri naslednje točke silhuete lahko upošteval, poleg razlike v energiji pasov točk, tudi energijo mehkih tkiv in ozadja posnetka njegovega predhodnika. Energija točk mehkih tkiv in ozadja posnetkov se, medtem ko potujemo po silueti, spreminja počasi, saj je energija sosednjih točk na mehkem tkivu in na ozadju posnetka skoraj enaka. Zato je to lahko dobro merilo, ko se odločamo, katera bo naslednja točka silhuete.



## Literatura

- [1] Kefalometrija. Audax d. o. o. [Online]. Dosegljivo: <http://mi.audax.si/orodje/kefalometrija.html?skupina=11>.
- [2] F. Farčnik, M. Ovsenik, M. Drevenšek, S. Zupančič, J. Volk. Klinična diagnostika v čeljustni in zobni ortopediji. Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Ljubljana (2005). [Online]. Dosegljivo: <http://www.mf.uni-lj.si/dokumenti/757042567d04d102998eca4614c68e60.pdf>
- [3] Kernel (Image processing). [Online]. Dosegljivo: [http://en.wikipedia.org/wiki/Kernel\\_%28image\\_processing%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_%28image_processing%29).
- [4] Gaussian Smoothing. [Online]. Dosegljivo: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>.
- [5] Sobel operator. [Online]. Dosegljivo: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sobel\\_operator](http://en.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator)
- [6] Canny edge detector. [Online]. Dosegljivo: [http://en.wikipedia.org/wiki/Canny\\_edge\\_detector](http://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector).
- [7] Gaussian blur. [Online]. Dosegljivo: [http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian\\_blur](http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_blur).
- [8] C. Wyman. [Online]. Dosegljivo: <http://homepage.cs.uiowa.edu/~cwyman/classes/spring08-22C251/homework/canny.pdf>.
- [9] Brightness. [Online]. Dosegljivo: <http://en.wikipedia.org/wiki/Brightness>.
- [10] Color difference. [Online]. Dosegljivo: [http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_difference](http://en.wikipedia.org/wiki/Color_difference).
- [11] Understanding gamma correction. Cambridge in colour. [Online]. Dosegljivo: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/gamma-correction.htm>
- [12] Gamma correction. [Online]. Dosegljivo: [http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_correction)

- [13] Barvni model RGB. [Online]. Dosegljivo:  
[http://sl.wikipedia.org/wiki/Barvni\\_model\\_RGB](http://sl.wikipedia.org/wiki/Barvni_model_RGB)
- [14] Non uniform rational B-spline. [Online]. Dosegljivo:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Non-uniform\\_rational\\_B-spline](http://en.wikipedia.org/wiki/Non-uniform_rational_B-spline)
- [15] Anatomija človeka.. [Online]. Dosegljivo:  
[http://sl.wikipedia.org/wiki/Anatomija\\_%C4%8Dloveka](http://sl.wikipedia.org/wiki/Anatomija_%C4%8Dloveka)
- [16] Bokeh [Online]. Dosegljivo: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bokeh>