

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Tehnoloogiainstituut

Siim Assi

**PAINDUVATE IEAP TÄITURITE DEFORMATSIOONI TÄPPISMÄÄRAMINE
VIDEOTÖÖTLUSEGA**

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja: Andres Punning, Ph.D

Tartu 2016

RESÜMEE/ABSTRACT

Painduvate IEAP täiturite deformatsiooni täppismääramine videotöötusega

Painduvate ioonsete elektroaktiivsete polümeeride (IEAP) täiturite deformatsiooni kirjeldamine videotöötusega on üks osa IEAP mehaanilise käitumise analüüsimiseks ja matemaatilise mudeli leidmiseks. Antud töö eesmärgiks on arendada pilditöötlusprogramm IEAP deformatsiooni täppismääramiseks, luua metoodika vajalike videoandmete salvestuste tegemiseks ning analüüsida saadud tulemusi.

Bakalaureuse töö on jaotatud neljaks osaks. Esimeses antakse ülevaade ühe punktiga fikseeritud tala (konsool) painete leidmisest ja selle seostest IEAP käsitluses. Teises peatükis tuuakse IEAP ettevalmistamisprotsess ning määratakse videopildi kriteeriumid pilditöötlusprogrammi jaoks. Kolmandas peatükis kirjeldatakse töö käigus loodud pilditöötlusprogrammi ning viimases osas tuuakse välja pilditöötusega saadud andmed ning analüüsi tulemused.

CERCS: T111 Pilditehnika; T150 Materjalitehnoloogia.

Võtmesõnad: IEAP; OpenCV; konsool.

Precise characterization of the IEAP deformation with an image processing

The aim of this bachelor's thesis is to develop an image processing program which helps to determinate the mathematical characterization of the IEAP mechanical behavior. This paper is divided into four main parts. The first chapter will give short overview of a cantilever beam bending and link to the IEAP bending. The second part describes the IEAP preparations and criteria for the video recordings. The third section introduces the image processing program and the final chapter is for the results and analyses.

CERCS: T111 Imaging, image processing; T150 Material technology.

Keywords: IEAP; OpenCV; cantilever.

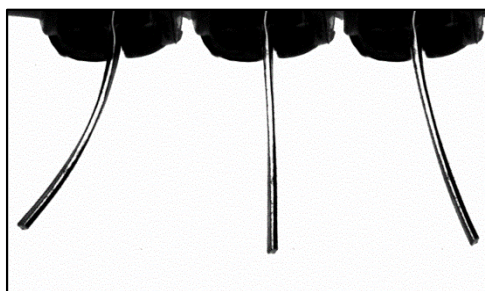
SISUKORD

RESÜMEE/ABSTRACT	1
SISUKORD	3
1 SISSEJUHATUS	4
1.1 Mehaaniline käsitus	6
1.2 Fish-skeleton meetod	8
1.2.1 <i>Fish-skeleton</i> pikitelje pikkuse leidmine	9
2 Metoodika	11
2.1 Kaamera ja tööala ettevalmistamine	11
2.2 Fish-skeleton kunstlihase ettevalmistamine	12
2.3 Kunstlihase asetus kaadris	13
3 Pilditöötlustarkvara	13
3.1 Arendusvahendid ja riistvara	13
3.2 Arendustarkvara installeerimine Windows keskkonnas	14
3.3 Fish-skeleton pilditöötluste ülesehitus	14
3.4 Fish-skeleton tarkvara GUI kasutamine	17
4 <i>Fish-skeleton</i> tulemused ja nende analüüs	18
4.1 Saadud andmed	18
4.2 Tulemuste hindamine	23
4.3 Saadud tulemuste analüüs	27
4.4 Järeldused	30
Kokkuvõte	31
VIITED	32
LISAD	33

1 SISSEJUHATUS

Elektromehaaniliselt aktiivsed polümeerid EAP on üks uudne lahendus elektrienergia muundamiseks mehaaniliseks energiaks. EAP-d muudavad oma mõõtmeid või kuju elektrilise stimuleerimise tulemusena. EAP-del on tavapäraste elektrivoolu ja magnetvälja vastasmõjul põhinevatel täituritel (näiteks elektrimootor, valjuhääldi, solenoid, jne.) ees palju eeliseid, millest kõige tähelepanuväärsem on tema miniatuursus. EAP-sid nimetatakse teaduslikus ja populaarteaduslikus kirjanduses lisaks aktuaatorile veel täituriks, kunstlihaseks, tehislhaseks, painduvaks superkondensaatoriks ja ka arukaks materjaliks, nutimaterjaliks või intelligentseks materjaliks (*smart material*). Kunst- ja tehislhasteks nimetatakse EAP-sid seetõttu, et nende käitumine elektrilise mõjutamise toimetel meenutab bioloogilise lihase käitumist. [1]

Ioonsed elektroaktiivsed polümeerid (IEAP) - üks EAP alaliik - on kihilised komposiitmaterjalid, mis koosnevad kahelt poolt elektronjuhtivate elektrodidega kaetudioonjuhtivast membraanist. IEAP-d valmistatakse lehtmaterjalina, millest hiljem lõigatakse välja sobiva kuju ja suurusega täitur. Membraan või ka kogu laminaat on immutatud vedela elektrolüüdiga, mis koosneb vastasmärgilistestioonidest ning solvendist. Tavaliselt valitakse elektrolüüt niisugune, et katioonid ja anioonid oleks erinevate suurustega. Elektrodidele kehtib ebatavaline nõue - nad peavad olema kergesti deformeeritavad (välja venitatavad), kuid seejuures säilitama oma elektronjuhtivuse. Elektrodimaterjaliks on kasutatud metalle, mitmesuguste süsiniku allotroopide (süsiniknanotorud, grafeen, jms.) ja sideaine segu, või elektrit juhtivaid polümeere. Kui IEAP elektrodide vahele rakendada pinge, siis tekkinud elektriväljas hakkavad katioonid liikuma negatiivse elektroodi suunas ning anioonid positiivse elektroodi suunas (sageli kandes endaga kaasas veel solvendi molekule). Kuna kationide ja anioonide suurused on erinevad, siis pundub laminaadi üks külg välja natuke rohkem kui teine. Niisuguse ebasümmeetrilise pundumise tulemusena tõmbub laminaat paindesse. IEAP-d painduvad efektselt madala pinge rakendamisel, nagu näidatud joonisell, kusjuures paindumise suuna määrab rakendatud pinge polaarsus. Maksimaalse pinge määrab solvendi elektrolüüs, enamasti on see olenevalt IEAP tüübist 1- 3 V.



Joonis 1. IEAP täitur vabas olekus (keskel) ning paindunult kahele poole.

Ehkki IEAP täitur paindub efektselt, on niisuguse paindumise kirjeldamine ja - eriti täppismõõtmine - väga keeruline. Paljudes selleteemalistes töodes kasutatakse selleks Euler-Bernoulli konsooli mudelit [2][3]. Selleks püstitatakse paindumise lihtsustatud kirjeldamiseks mitu postulaati, millest käesoleva töö kontekstis on kõige olulisemad:

1. kogu konsooli ulatuses on deformatsioon neutraaljoone suhtes sümmeetriline;
2. konsooli pikkus ei muutu.

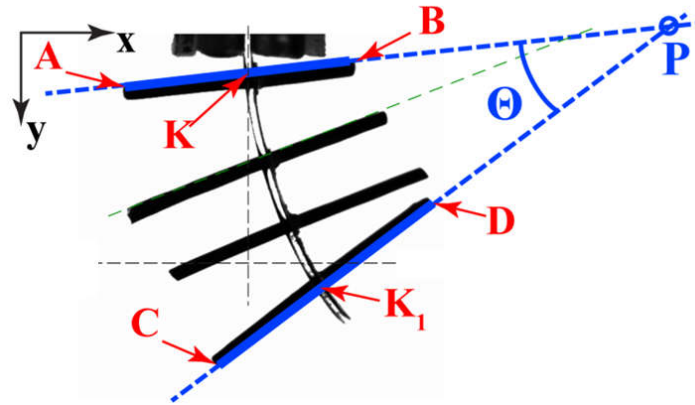
Nagu näha jooniselt 1, on selge, et makroskoopiliste mõõtmistega ei ole võimalik neid kahte postulaati ei kinnitada ega ümber lükata. Õhukese, alla 0,5 mm paksuse painduva laminaadi korral ei ole võimalik määrata ei paindumise sümmeetrisust, ei membraani pikkuse muutust, ega absoluutset deformatsiooni. Sellest hoolimata väidetakse paljudes IEAP teemalistes artiklites, et paindumine on nulljoone suhtes sümmeetriline - paindudes laminaadi üks külg muutub lühemaks ning teine täpselt samapalju pikemaks. See paradigma on üldlevinud, ning seda kasutatakse absoluutselt kõikide IEAP tüüpide korral.

Eelnevalt on IEAP täiturite absoluutse deformatsiooni mõõtmise meetodika välja töötatud A. Punningu poolt [4][5]. Deformatsioonivälja saamiseks pildistatakse IEAP täituri tööd skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) all, ning võrreldakse saadud kujutisi kasutades digitaalse pildikorrelatsiooni meetodit. A. Punningu tulemused näitavad veenvalt, et erinevat sorti IEAP täiturid painduvad erinevalt, mõned venivad paindumise ajal pikemaks, mõned lühemaks, mõnikord nihkub neutraalkiht isegi IEAP piiridest väljapoole. Samas on A. Punningu meetodil on kaks suurt puudust:

1. Mõõtmine toimub SEM kambris, vaakumis. Seetõttu saab seda kasutada ainult väga väheste IEAP tüüpide korral, mille elektrolüüt ei aurustu vaakumis. Selliseks elektrolüüdiks on näiteks mõni ioonvedelik.
2. SEM kujutise salvestamine võtab aega (selle konkreetse SEM seadme korral umbes 40 sekundit). Usaldusväärse pildikorrelatsiooni saamiseks peab IEAP täitur olema kogu selle aja paigal. Seetõttu saab seda meetodit kasutada ainult eriti aeglaste IEAP materjalide iseloomustamiseks.

Käesoleva töö eesmärgiks on välja töötada uus meetodika, mis võimaldaks määrata IEAP täituri teljesuunalist deformatsiooni tingimustes, kus täituri liigutust registreeritakse optilise kaameraga. Lihtsaks abivahendiks osutusid peened jäigad IEAP täituri külge kinnitatud vardad, mis võimaldavad lihtsat geomeetriat kasutades väga täpselt määrata IEAP kujutiselt kaarepikkuse. Joonisel 2 esitatud geomeerialt on näha, et leides varrastega AB ja CD määratud kiirte lõikepunkti, on võimalik leida nendevaheline nurk Θ ning raadius R (lõik P-K). Kaare K-K₁ pikkus L on siit

avaldatav valemiga $L=\Theta R$.



Joonis 2. IEAP kujutiselt painderaadiuse R (lõik PK) ja -nurga Θ leidmine.[6]

Salvestades liikuvast täiturist mitu kaadrit, ning määrates igalt neist kaarepikkuse, on võimalik suure täpsusega kindlaks teha, kas kaare $K-K_1$ pikkus kaadrist kaadrisse muutub või ei muutu.

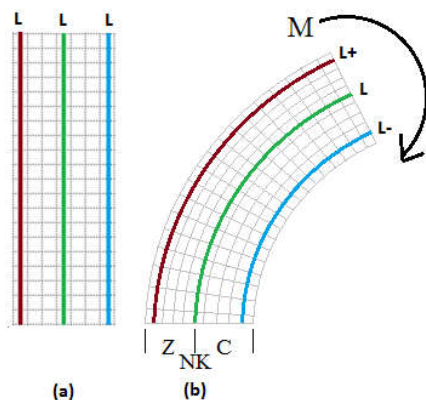
Kui piltide koguarv on väike, siis on võimalik mõõtmised teha käsitsi kasutades joonlauda ning malli. Siiski on mõistlik see tegevus automatiseerida, kasutades näiteks pilditötlustarkvara. Niisugust ülesannet lihtsustab oluliselt eelteadmine, et kõikidel pildidel on sarnased kujutised - pildi ülemisest servast algav kaar, mida läbivad mõned kaare normaali suunalised sirgjooned.

Metoodika testimiseks ja esialgsete andmete analüüsimiseks vajalik pilditötlustarkvara valmis töö käigus. Automatiseeritud kaarepikkuste leidmiseks loodud rakenduse jaoks valiti Phytoni programmeerimiskeel koos *Open Source Computer Vision* (OpenCV) pilditötlus teekidega, kuna Pythoni programmeerimise ja OpenCV arendusvahendid on vabavaraliselt kättesaadavad ning programmeerimise tekst kergelt jälgitav. Töö tulemusena esitatakse graafiliselt saadud kunstlihase analüüsid ning tuuakse järeldused kunstlihase mõõtmisel saadud tulemustele ja antakse hinnang antud kaarepikkuste mõõtmismeetodile.

1.1 Mehaaniline käsitlus

IEAP deformatsiooni uurimiseks fikseeritakse kunstlihas kontaktide vahele ning mõjutatakse elektrilise stimuleerimise läbi. Kinnitatud IEAP-d võime vaadelda kui tala, mis on ühest otsast jäigalt kinnitatud. Eeldame, et antud tala järgib Euler-Bernoulli konsooli mudelit, kus tala deformeerumisel ristlõikepind ei kõverdu ja säilitab ristseisu tala teljega. See hüpotees on paindel vaadeldav täpse seaduspärasusega, kui konsoolile rakendub puhas paine. Puhtale tasandpainele allutatud telgsümmeetrilise ristlõikega ühtlane ja sirge tala kõverdub ühtlaselt ning tema telg kujuneb konstantse kõverusega jooneks ehk ringi kaareks. Joonise 3 on modelleeritud deformeerunud konsool, millele on rakendatud puhas paine M . Varras kõverdub ning kõik tema ristlõikepinna tasandid, mille kõveruskeskpunkt O on toodud joonisel 4, lõikuvad ühel ja samal

sirgel. Vardas märgitud pikisuunalised sirglõigud kõverduvad kontsentriliste ringjoonte kaarteks keskmega punktis O. Tala paindetasandiga risti asetsevad pikikihid nõgusal poolel lühenevad ja moodustavad tala survetsooni (C joonisel 3 (b)), kumeral poolel pikenevad ning moodustavad tõmbetsooni (Z). Nende kahe tsooni piirikihti, mis ei pikene ega lühene, nimetatakse neutraalkihiks (NK). Varda neutraalkihi jälge ristlõikepinnal nimetatakse neutraaljooneks. [7][8]



Joonis 3. Tõmbe- ja survepingest tingitud tala paindumine. Talal (b) on pikenenud L+ tõmbepinge mõjul punane külg ning lühenenud survepinge mõjul L- sinine. Neutraalkihti jääv kaarjoone pikkus L ei muutu.

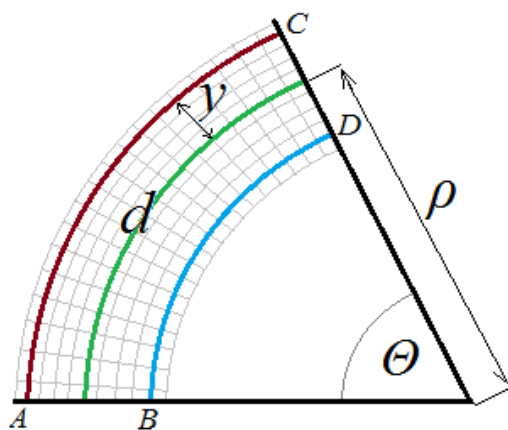
Painet saab iseloomustada kõverusraadiusega ρ või kõveruse teguriga κ , kus κ näitab kui suur on antud tala paine (valem1)[8]. Mida suurem on κ , seda ulatuslikum on kõverus.

$$\kappa = \left(\frac{1}{\rho}\right), \quad (1)$$

kus:

- κ -kõverus;
- ρ -kõverusraadius.

Joonisel 4 on toodud kaarjoone pikkuse sõltuvus kõverusest. Neutraaljoone d ja kaarjoone AC kõveruseks on l/ρ [8], kus ρ on kõverusraadius. O' tähistab punktidega AB ja CD määratud sirgete ristumiskohta ning Θ nende vahelist nurka.



Joonis 4. Läbipaindunud tala iseloomulikud suurused.

Valem 2 näitab kaarjoone suhtelise deformatsiooni ε sõltuvust kõverusraadiusest ja kõverusest. Mis saadakse kaarjoone pikkuse muudu jagamisel esialgse kaarjoone pikkusega või siis neutraalkihi kauguse y jagamisel kõverusraadiusega ρ [7].

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{y}{\rho} = \kappa y \quad (2)$$

kus:

- ε_x - kaarjoone suhteline deformatsioon;
- Δl - kaarjoone pikkuse muutus;
- l - kaarjoone pikkus;
- y - kaugus neutraalkihist;
- ρ - kõverusraadius;
- κ - kõverus.

IEAP puhul tekitab painde elektrolüüdis asuvate ionide ümberasumine elektroodide vahele. Katioonide ning anioonide suuruste erinevus tekitab olukorra, kus ühele elektroodile liikunud suuremad osakesed tekitavad suurema surve kui teisele elektroodile, mille tagajärjel IEAP paindub. Ioonide ümberpaiknemisest tingitud kunstlihase paine erineb mehaanika klassikalisest käsitlusest ning sellest põhjustatud painet on vaja täpsemalt uurida. Selle uurimiseks saab kasutada *Fish-skeleton* meetodit. Järgmises alajaotuses tutvustatakse seda meetodit lähemalt.

1.2 *Fish-skeleton* meetod

Üheks võimaluseks ionide ümberpaiknemisest põhjustatud kõveruse uurimiseks on kasutada *Fish-skeleton* meetodit. See meetod uurib kunstlihaste pikitelje pikkuse muutumist erinevate pöördenurkade korral.

Pikitelje pikkuse leidmiseks on IEAP täituri külge kinnitatud peenikesed vardad, mis asetsevad risti kunstlihase tüvega ning järgivad kunstlihase ristlõikepinda selle kaardumisel. Koos lisatud varrastega sarnaneb kunstlihase väljanägemine kala luustikuga, sealt ka antud meetodi nimetus – *Fish-skeleton*. Sarnasus kala luustikuga on näidatud joonisel 5.

Pikitelje kõverjoone pikkuse võrdlemiseks mõõdetakse selle pikkus kunstlihase keskelt ning võrreldakse saadud tulemust esimeses kaadris leitud pikkusega. Kunstlihase pikitelje pikkuse muutumise korral võime väita, et IEAP paindumine ei järgi ainult klassikalise mehaanika mudelit ning neutraaljoon ei paikne kunstlihase keskel.

1.2.1 *Fish-skeleton* pikitelje pikkuse leidmine

Selles alajaotuses kirjeldatakse paindunud kunstlihase pikitelje pikkuse leidmist *Fish-skeleton* meetodiga. Eeldatakse, et mõõdetav kunstlihas on telgsümmeetrilise ristlõikelt ühtlane ja sirge tala, mis kõverdub ühtlaselt ja moodustab kaarjoone. Kunstlihase pikkus on palju kordi suurem tema laiusest aga sügavus ja laius on samas suurusjärgus. Valemist 2 näeme, et kaardunud kunstlihase kaarjoone pikkuse arvutamiseks on vaja leida kõverraadius kunstlihase keskkohast ning painde pöördenurk.

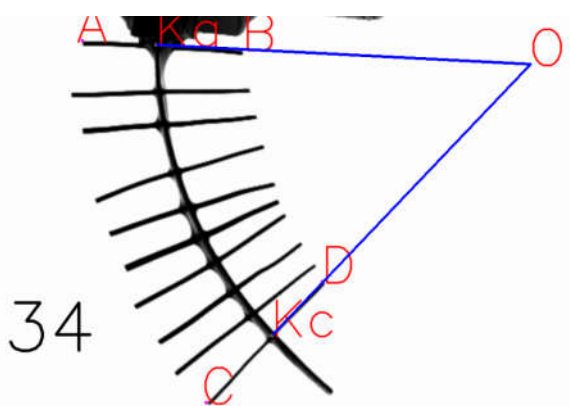
Kunstlihase keskpunkti koordinaadi saamiseks mõõdetakse salvestatud pildilt kunstlihase servade koordinaadid ning arvutatakse nende põhjal keskkohat valemit 3. Valem 3 näitab, kuidas leitakse kahe punktiga $A(x_1, y_1)$ ja $B(x_2, y_2)$ määratud sirge keskkohat K [9].

$$K\left(\frac{x_1 + x_2}{2}; \frac{y_1 + y_2}{2}\right), \quad (3)$$

kus:

x_n, y_n - punktide koordinaadid;

K - keskkohat.



Joonis 5. Lisatud varrastega sarnaneb kunstlihas kala luustikuga.

Kõverusraadiuse arvutamiseks läheb vaja varraste pikenduste ristumispunkti O ning selle kaugust täituri keskpunktist K_a (joonis 5). Valitud varraste AB ja CD pikendustega määratud ristumispunkti O leidmiseks kasutame valemit 4, kus kahe punktiga $A(x_1, y_1)$ ja $B(x_2, y_2)$ määratakse sirge $S(X, Y)$ võrrand. AB ja CD sirge võrranditest moodustatud võrrandisüsteemi lahendamisel saadakse nende ristumispunkt, mis annab otsitud punkti O koordinaadid [9].

$$\frac{Y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{X - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (4)$$

kus:

X, Y - sirge koordinaadid;

x_n, y_n - punktide koordinaadid.

Arvutatud ristumispunkt $O(x,y)$ ja pilditöötlustarkvaraga leitud kunstlihase keskpunkti $K(x,y)$ vaheline kaugus avaldub valemiga 5 [9].

$$d = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (5)$$

Kunstlihase pikitelje pikkuse leiame normaalide vahelise nurga kaudu ning nende omavahelise nurga saamiseks lahutame kahe sirge tõusud omavahel (valem 6). Kahe punktiga, $A(x_1,y_1)$ ja $B(x_2,y_2)$, määratud sirgjoone tõusunurk α ja sirge tõus k [9]. Nurka kasutame kaarjoone pikkuse leidmiseks valemis 7.

$$k = \tan(\Theta) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (6)$$

kus:

- k - sirgjoone tõus;
- Θ - sirgjoone tõusunurk;
- x_n, y_n - punktide koordinaadid.

$$l = kr, \quad (7)$$

kus:

- l - kõõlu pikkus ;
- k - sektori nurk (rad);
- r - ringjoone raadius.

Eelnevas peatükis tutvustati klassikalise mehaanika mudelit ja selle rakendamist *Fish-skeleton* meetodi jaoks. Näidati kunstlihasele mõjunud puhtast paindest põhjustatud kaardumise iseloomulikud suurused ning matemaatilised valemid nende leidmiseks. Järgmises peatükis tuuakse välja meetoodika kunstlihase mõõtmiseks.

2 Metoodika

Antud peatükis käsitletakse olulisemaid punkte kunstlihase ettevalmistamiseks tema pikitelje pikkuse leidmiseks. Peatükk on jaotatud kolmeks osaks. Esimeses osas tutvustatakse tähtsamaid kaameraga seotud parameetreid ning pannakse paika kaamera asetus kunstlihase suhtes. Teises osas tuuakse välja kunstlihase *Fish-skeleton* ettevalmistuse etapid ning kolmandas osas antakse soovitusi kunstlihase paiknemisele kaadris.

2.1 Kaamera ja tööala ettevalmistamine

Kunstlihase reageerimine pingele jäädvustatakse kaameraga ja analüüsitakse hiljem pilditöötlustarkvaraga. Antud töö käigus loodud pilditöötlusprogramm eeldab, et katse objekt on taustast hästi eristatav ja tausta värvus on valge. Selle saavutamiseks on soovitatav kasutada tausta valgustamiseks ühtlast valgusallikat, näiteks hajutatud valgusega valgusdiodidega (LED) valgusti (ekraani taustavalgustus) või hõõglambiga projektor, mille valguse temperatuur jääb vahemikku 4000-4500K. Selline LED valgusti temperatuur on tajutav valge värvusena [10] ning on sobilik antud pilditöötlusele, kuna ei jäta taustale halle varjundeid. Joonisel 6 on näidatud kunstlihase jäädvustamiseks kaamera asetus koos valgustatud alusega.



Joonis 6. *IPMC kunstlihas valgustatud taustaga.*

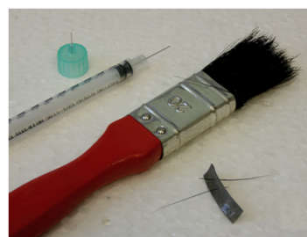
Valgustuse toide peab olema ühtlane, see tähendab, et tausta eredus ei tohi kaadrist kaadrisse muutuda. Parimaks toiteks sobib alalisvoolu puhul akutoide. Impulsstoiteallika ja võrgutoite 50Hz puhul tuleb katsetada selle sobivust pildi jäädvustamisel. Valguse ühtlasemaks hajutamiseks on soovitatav kasutada mattklaasi kunstlihase all ning seda valgustada ühtlase valgusega. Laboris tehtud videosalvestustel kasutati ka hõõglambiga projektorit, mida toideti alalisvooluga. Valgusvihu hajutamiseks valgustati mattklaasi umbes ühe meetri kauguselt.

Töös katsetatud kunstlihaste salvestused jäädvustati *Imaging Source DMK 22BUC03* sensoriga (*1/3 inch Micron CMOS (MT9V024)*, 744×480 pikslit ja kuni 76 kaadrit sekundis [11]). Jäädvustamiseks kinnitatakse sensor koos objektiiviga kunstlihase kohale nagu on näidatud joonisel 6. Objektiivi valikul tuleb arvestada parallaksist tingitud nihet. Parallaksist tekkinud näiv objekti nihe kõige suurem kui kaamera asub objekti lähedal. Viies objektiivi mõõdetavast kunstlihasest kaugemale saame parallaksist tingitud näivat mõõdetava kunstlihase näivat nihet vähendada [12]. Töö käigus analüüsitud kunstlihaste salvestused jäädvustati Pentax 2.8 / 50mm objektiiviga, mis paigutati laboris kunstlihasest maksimaalsele kaugusele, mida antud objektiiv võimaldas.

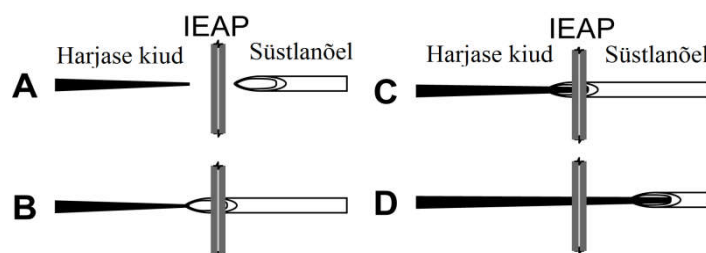
2.2 *Fish-skeleton* kunstlihase ettevalmistamine

Fish-skeleton meetodiga kunstlihase pikitelje pikkuse leidmiseks on vaja käsitsi kunstlihasele lisada vardad. Varrasteks võib kasutada näiteks tavatarbekaubana leiduva pintslitariharjaseid.

Joonisel 8 on visualiseeritud kogu kiu paigaldamise protsess süstlanõela abil. Esmalt valitakse sobiva suurusega kunstlihas, süstlanõel ning paraja suurusega harjase kiud (joonis 7). Kiude kinnitamiseks kunstlihasesse lükatakse süstlanõela tipp läbi kunstlihase (joonis 8 A). Lihasest läbi tunginud nõela otsa sisestatakse kiud. Tänu pintslitariharjase koonilisele kujule on seda võimalik mahutada süstlanõela sisse abivahendeid kasutamata (joonis 8 B). Järgnevalt tõmmatakse süstlanõel koos pintslitariharjasega tagasi (joonis 8 C), seni kuni on kiud jääb tihkelt kunstlihasesse kinni. Edasi eraldatakse süstlanõel kiust ning korrigeeritakse teravate lõiketangidega kiu pikkusi. Kogu tsüklit korratakse teiste kiudude paigaldamisel.



Joonis 7. Kunstlihase ettevalmistamiseks vajalikud vahendid.



Joonis 8. IEAP kunstlihase ettevalmistamine pikitelje pikkuse mõõtmiseks.

2.3 Kunstlihase asetus kaadris

Analüüsitava kunstlihase paigutus kaamera suhtes on oluline pilditöötuse jaoks. Pilditöötuse käigus otsitakse eeldatava kujuga objekti. Kõik lisadetailid, mis kaadris huvialasse jäävad võivad põhjustada programmi ettearvamatuid käitumisi. Selle alajaotuse eesmärgiks on anda soovitusi kunstlihase asetuseks kaadris, et tagada programmi tõrgeteta töö.

Kunstlihas koos alusega tuleb asetada kaamera alla selliselt, et täituri elektroodi kinnitused paiknevad kaadri ülemises servas. Kunstlihase kinnitust jääma kaadrisse nii vähe kui võimalik. Kui kinnitust ei ole võimalik kaadrist välja jätta, tuleb selle kaadrisse jääv osa muuta võimalikult sümmeetriliseks. Vastasel juhul võib kaadri ülemisse serva jääv kinnitus segada automaatset kunstlihase keskkoha leidmist esimesest kaadrist. Enne salvestamist tuleb kontrollida ja vajadusel seadistada kaamera kontrasti- ja heledusseadistusi. Parima automaatse kunstlihase tuvastamiseks oleks hea, et kunstlihas oleks algul sirge. See tagab ka, et analüüsis kasutatav esimese kaadri andmed on saadud sirgelt tüvel. Joonisel 9 on toodud olukorrad, millele tuleb pöörata tähelepanu kunstlihase jäädvustamisel.



Joonis 9. Kunstlihase jäädvustamisel tuleb võimalusel vältida: ebasümmeetrilist kinnitust (1), eraldi asetsevaid objekte (2), taustaga samavärvi peegeldusi/objekte (4) ja esimeses kaadris kõverdunud kunstlihast (3).

3 Pilditöötlustarkvara

Antud töö käigus valmis pilditöötuse tarkvara, millega saab hinnata *Fish-skeleton* meetodil kunstlihase pikitelje pikkust. Selles peatükis räägitakse lähemalt kasutatud arendusvahenditest ja nende paigaldamisest *Windows* operatsioonisüsteemiga arvutisse. Tehakse ülevaade arenduse käigus kasutatud riistvarast ning töö käigus valminud programmi ülesehitusest.

3.1 Arendusvahendid ja riistvara

Programmeerimise platvormi valikul oli kaks põhilist argumenti: arendusvahendite kättesaadavus ja programmeerimise lihtsus. Autor valis pilditöötuseks Pythoni keskkonna koos OpenCV teekidega.

Arvutusvõimsuse efektiivsus ei ole antud töö juures määrava tähtsusega, kuid tarkvara edasiarendustel on võimalik arvutuskiirust tõsta, lisades programmile mitmetuumalise protsessori toe või siis kasutada graafikaprotsessori paralleelarvutust. Vastavalt kasutades Pythoni *multiprocessing* teeki või siis koos PyOpenCL-iga.

3.2 Arendustarkvara installeerimine Windows keskkonnas

Tarkvara on kirjutatud Python 2.7 versiooniga, mis on vabavariiselt kättesaadav aadressilt: <https://www.python.org/ftp/python/2.7/python-2.7.msi>. Installeerimiseks tuleb see alla laadida ning käivitada allalaaditud tarkvara paigaldusfail. Paigaldusjuhiseid järgides installeerub tarkvara edukalt.

Koos Pythoniga tuleb talle juurde lisada NumPy ja PIL teek, mis on vajalik andmemassiivide ja piltide haldamiseks ning töötlemiseks. NumPy paigaldusfaili saab alla laadida näiteks aadressilt: <https://sourceforge.net/projects/numpy/files/NumPy/1.10.1/numpy-1.10.1-win32-superpack-python2.7.exe/download/> (10.02.2016) ja PIL <http://effbot.org/downloads/PIL-1.1.7.win32-py2.7.exepil.1.1.7/> (10.02.2016) installeerimisjuhendit järgides need arvutisse paigaldada. Seejärel tasub kontrollida, kas Python, PIL ja NumPy teegid said korralikult arvutisse installeeritud. Kontrollimiseks sisesta Python IDLE keskkonda järgmised read:

```
import numpy
from PIL import Image
print numpy.__version__ , Image.VERSION
```

Programmi koodi käivitamisel prinditakse NumPy ja PIL versiooni numbrid: 1.10.1 1.1.7.

OpenCV3.0.exe paigaldamise faili saab alla laadida interneti aadressilt: <https://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-win/3.0.0/opencv-3.0.0.exe/download/> (10.02.2016). Saadud fail lahti pakkida arhiveerimise tarkvaraga ning kopeerida lahtipakitud `opencv/build/python/2.7` kaustas asuv `cv2.pyd` `C:/Python27/lib/site-packages` kausta. Kontrollimiseks, kas OpenCV paigaldus õnnestus, käivitada alljärgnev programmi koodi Python IDLE aknas ja veenduda, et Python Shell aknasse kuvatakse OpenCV versioon 3.0.0.

```
import cv2
print cv2.__version__
```

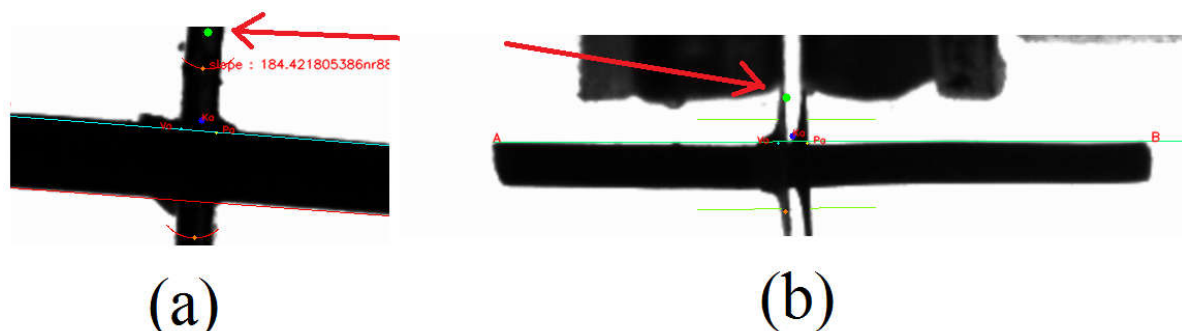
3.3 *Fish-skeleton* pilditötluse ülesehitus

Ülesehituselt on pilditötlusprogramm jaotatud kolmeks osaks. Esimene ja teine osa on puhtalt mõeldud kaadrite skaneerimiseks. Kolmas osa programmist on graafiline kasutajaliides- *grafical user interface* (GUI), kus kasutaja määrab peamised parameetrid.

Esimene osa on mõeldud vajalike muutujate salvestamiseks kogu ülejäänud kaadrite jaoks. Eeldatakse, et esimeses kaadris on kunstlihas pingestamata olekus ning kinnitatud kaadri ülemises servas. Esimesest kaadrist otsitakse kunstlihase keskkoha, kui seda pole juba käsitsi määratud. Kasutaja poolt määratud lihase keskkoha kirjutatakse automaatselt leitud keskkoha asemele. Esimesest kaadrist leitakse ka harude ja kunstlihase laius, mida kasutatakse kogu ülejäänud kaadrite skaneerimisel.

Teine osa programmist on mõeldud kunstlihase järgimiseks ning kinnitatud varraste otspunktide leidmiseks. Tippude koordinaadid salvestatakse tekstina eraldi faili koos teiste arvutatud suurustega: tippude vahelised kaugused, kunstlihase laiused haru ristumiskoha juures, arvutatud kõverjoone pikkused ning kõverjoone pikkuste muutumised.

Järgnevalt kirjeldatakse lihtsustatud programmi tööd. Selleks käiakse kogu varraste otspunktide leidmise protsess läbi koos videotöötlustarkvara poolt töödeldud kaadrite näidetega. Esimesena loetakse failist kaader mällu, kust leitakse kunstlihase alguspunkt. Alguspunkt määratakse *stemBaseLocation()* meetodiga, kus vaadatakse kas kaadri üleval servas on ainult kunstlihas või siis on kaadrisse jäänud ka lihase kinnitus. Kinnituskontaktide kaadrisse jäämisel eeldatakse, et kunstlihas on kinnitusest vähemalt kaks korda kitsam ning leitakse see ridasid skaneerides see asukoht, kus kinnitustala läheb üle kunstlihaseks. Joonisel 10a on toodud kaader, kus kinnitust ei ole ning joonisel 10b on koos kinnituskontaktidega.

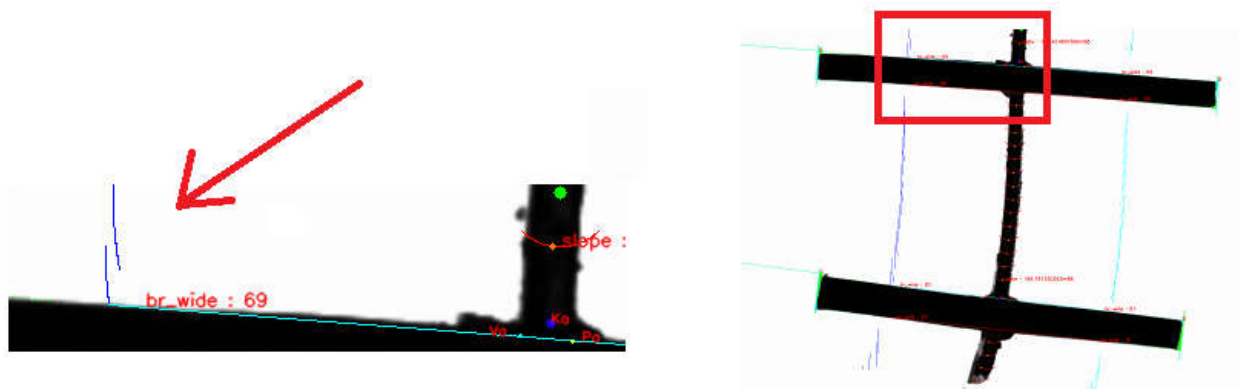


Joonis 10. Kunstlihase skaneerimise alguspunkt, mis määratakse esimeses kaadris ning mida kasutatakse kõigi ülejäänud kaadrite töötlemiseks. Alguspunkt on näidatud noolega.

Järgmiseks salvestatakse esimesest kaadrist saadud varraste oletatav pikkus. See pikkus on aluseks varraste skaneerimise raadiuseks ja varraste kaudseks laiuseks. Varraste laiust kasutatakse kunstlihase keskkoha otsimiseks.

Järgmisena alustab pilditöötlustarkvara harude otsimist. Selleks võtab tarkvara salvestatud alguspunkti koordinaadi ning skaneerib punktist paremale ja vasakule jäävat ala. Skaneerimise raadiuseks on 1/3 salvestatud varda kogu pikkusest. Skaneeritava sektori suurusjärk jääb 30-40 kraadi vahele, mis oleneb raadiuse pikkusest ning kas skaneeritakse kaadri esimest haru. Joonisel 11

on toodud vasaku ala skaneerimise visualiseeritud jäljed kaadril.



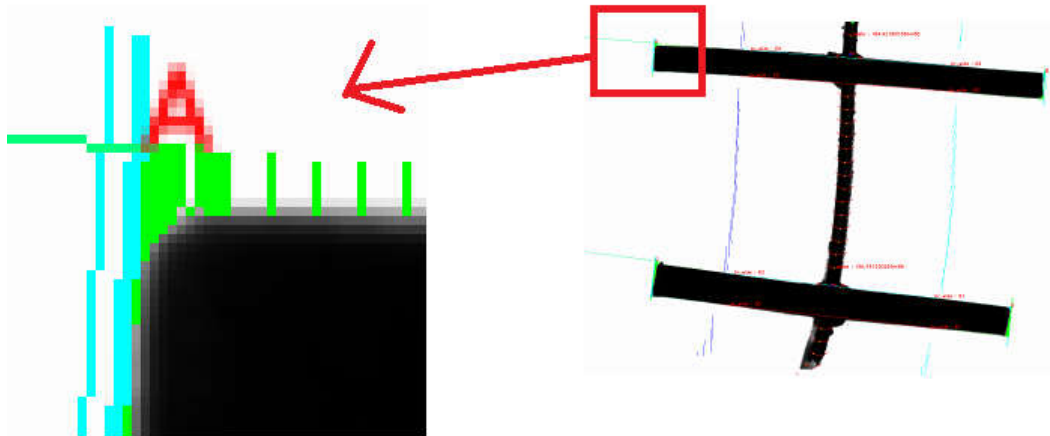
Joonis 11. Noolega on näidatud harude skaneerimiseks kasutatava sektori jälg.

Kui programm ei suuda haru leida, siis liigub kunstlihast mõõda edasi ning otsib uuesti kunstlihase keskpunkti. Programmile ei ole oluline kunstlihase täpne keskkoh, vaid piisab täpsusest, et mõõda kunstlihast (tüve) edasi liikuda. Edasi liikumise samm on määratud kunstlihase laiusega. Järgmisel joonisel 12 on toodud juht, kus programm ei avasta tüvega risti olevat varrast ning jätkab mõõda kunstlihast edasi liikumist.



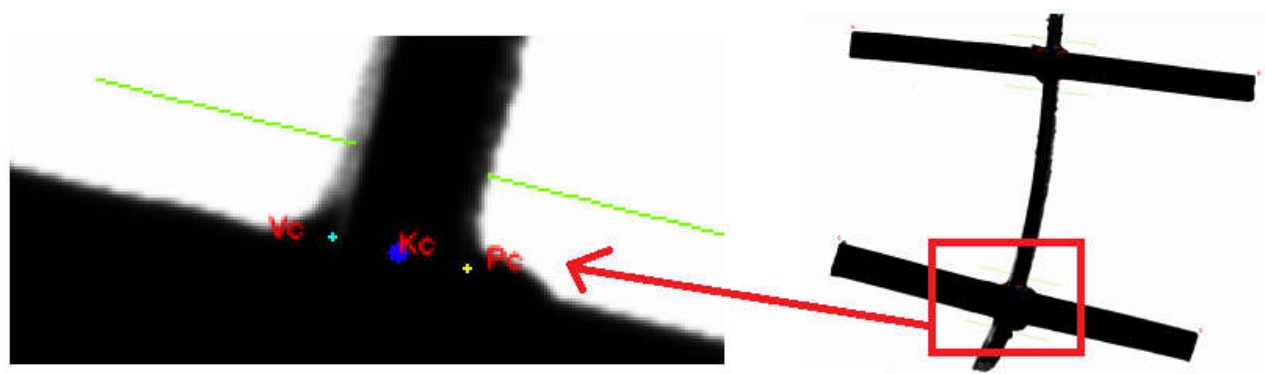
Joonis 12. Noolega on näidatud kunstlihase tüve mõõda edasi liikumiseks vajalike keskkohade otsimine.

Haru leidmisel salvestatakse nii kunstlihasest vasakule kui ka paremale poole jääv varda serv. Serva punktidest moodustatakse sirge, mida mõõda jätkab programm varda otspunktide otsimist. Esiteks liigutakse mõõda moodustatud sirget vasakul asuva otspunkti poole. Otspunkti skaneerimispunktide arvu vähendamiseks kasutatakse otsimiseks meetodit, kus esialgu tehakse suuremad hüpped kunstlihasest eemale. Seejärel kontrollitakse, kas antud kaugusel on veel varrast olemas. Kui varrast enam ei tuvastatud, siis liigutakse pool vahemaast tagasi ja vaadatakse sealt, kas varras on olemas. Hüppeid tehakse seni, kuni saavutatakse kaadriresolutsiooni täpsus. Nurga asukohaks määratakse viimase hüppe asukoht sirgel. Eeldades, et pintli karvad enda kuju kaadrites ei muuda, tuvastab programm karva otspunktid alati samal kaugusel karva suhtes. Alltoodud joonisel 13 on näha kirjeldatud otspunktide leidmine.



Joonis 13. *Varda otspunkti otsimine.*

Edasi mõõdetakse kunstlihase laius ning määratakse täpne keskpunkt kaarjoone pikkuse arvutamiseks. Selleks skaneeritakse kaader kunstlihase lähedalt ning otsitakse selle külje koordinaate. Keskpunkt ning selle leidmisel programmi poolt tekitatud jälj (peenike joon) on toodud joonisel 14.

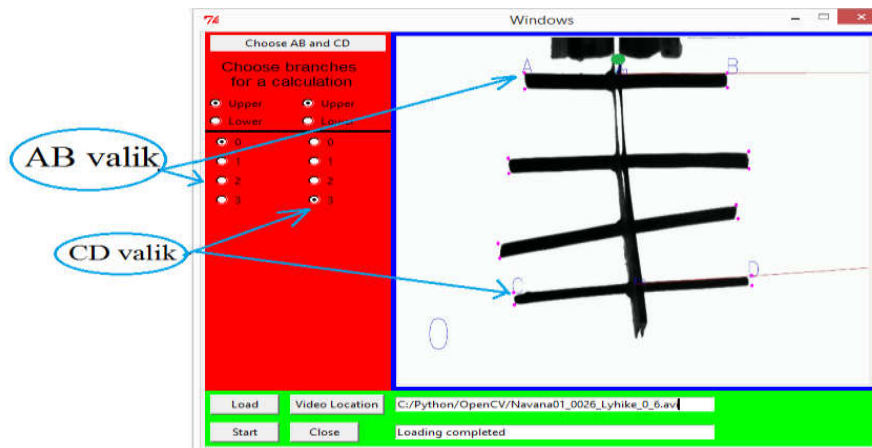


Joonis 14. *Kunstlihase keskkoha määramine.*

Edasi liigub programm leitud haru alumisele küljele ning läbitakse sama tsükel: otsitakse otspunktid ja mõõdetakse kunstlihase keskpunkt. Ühe kaadri töötlemine lõpeb kunstlihase lõpupunkti jõudmisel. Seejärel tehakse vajalikud arvutused otspunktide vaheliste kauguste ja kaarjoonte pikkuste leidmiseks ning kirjutatakse esimese kaadri andmed teksti faili. Laaditakse uus kaader mällu ning tsükel algab otsast peale. Tsükel kestab seni, kuni videofailis on veel kaadreid, seejärel lõpetab programm oma töö ja ootab uusi käsklusi GUI keskkonnast.

3.4 Fish-skeleton tarkvara GUI kasutamine

Joonisel 15 on toodud pilditöõtlustarkvara GUI pilditõõmmis. Kasutajaliides võimaldab programmi käivitamiseks vajalikud seadistused ning valikud teha arvutihiirega. Kasutajale olulised protsessi staatused ja puudused kuvatakse kasutajale ekraanile.



Joonis 15. Fish-skeleton pilditöötluste tarkvara GUI koos suunavate juhistega.

GUI-d kasutades tuleb esmalt valida videofaili asukoht, mida hakatakse analüüsima. Kinnitada valik *Load* nupuga ning teha valik AB ja CD harude analüüsiks. Peale valiku kinnitamist *Load* nupuga, kuvatakse esimene kaader videofailist ekraanile. Ekraanile ilmunud pildil saab vajadusel valida sobiliku alguspunkti – rohelisega tähistatud ring GUI ekraanil. Analüüsi alustamiseks tuleb klikkida *Start* nupule. Protsessi tulemused salvestatakse tekstifailina kasutaja kausta. Lisaks genereerib antud programm uue .avi videofaili, mis võimaldab hiljem visuaalselt hinnata leitud otspunktide asukohti.

4 Fish-skeleton tulemused ja nende analüüs

Selles peatükis annab autor ülevaate pilditöötluste tulemustest ning nende andmete analüüsist. Esimeses alajaotuses tuuakse kolmest videofailist saadud tulemused. Teises osas analüüsitakse saadud tulemuste kvaliteeti ning kolmandas toob autor välja järeldused.

4.1 Saadud andmed

Pilditöötlusprogrammi poolt saadud tulemused esitatakse .txt dokumendina, mis salvestatakse kausta, kust antud tarkvara käivitati. Failile määratud nimi koosneb analüüsitud videofaili nimest ning valitud harude numbritest. Näiteks faili nimi, K1_0_3.txt, koosneb analüüsitud K1.avi videofaili nimest ning juurde liidetud valitud AB ja CD harude asukoht. Tekstifaili nimi salvestatakse ka dokumendi esimesele reale. Teisele reale on kirjutatud andmete tähised. Nii tähised kui ka leitud andmed on tekstis eraldatud semikooloniga, mis võimaldab andmete töötamiseks kasutada tabelarvutusprogramme (*OpenOffice Calc*, *Microsoft Excel*). Pilditöötlustega saadud punktide koordinaadid ning teised andmed on failis salvestatud tekstireale koos vastava kaadri numbriga. Esimesed andmeväljad, mis järgnevad kaadri numbrile, on otspunktide AB ja CD koordinaadid. Tipu punktide koordinaate saab kasutada andmete kvaliteedi analüüsis. Järgmiseks on kunstlihase keskpunkti koordinaadid ja kunstlihase vasaku ja parema külje koordinaadid, mis

asuvad määratud AB haru juures. Sirgete AB ja CD ristumispunkt O on toodud enne arvutatud suurusi. Punkti O koordinaatidele järgnevad A ja B ning C ja D vahelised kaugused. Edasi tuuakse arvutatud kunstlihase pikitelje pikkuse suhteline muut e_2 . Lisaks on viimaste andmeväljadena toodud mõõdetud kunstlihase laiused. Alljärgnevalt on toodud salvestatud faili esimesed kaks rida koos tähistega.

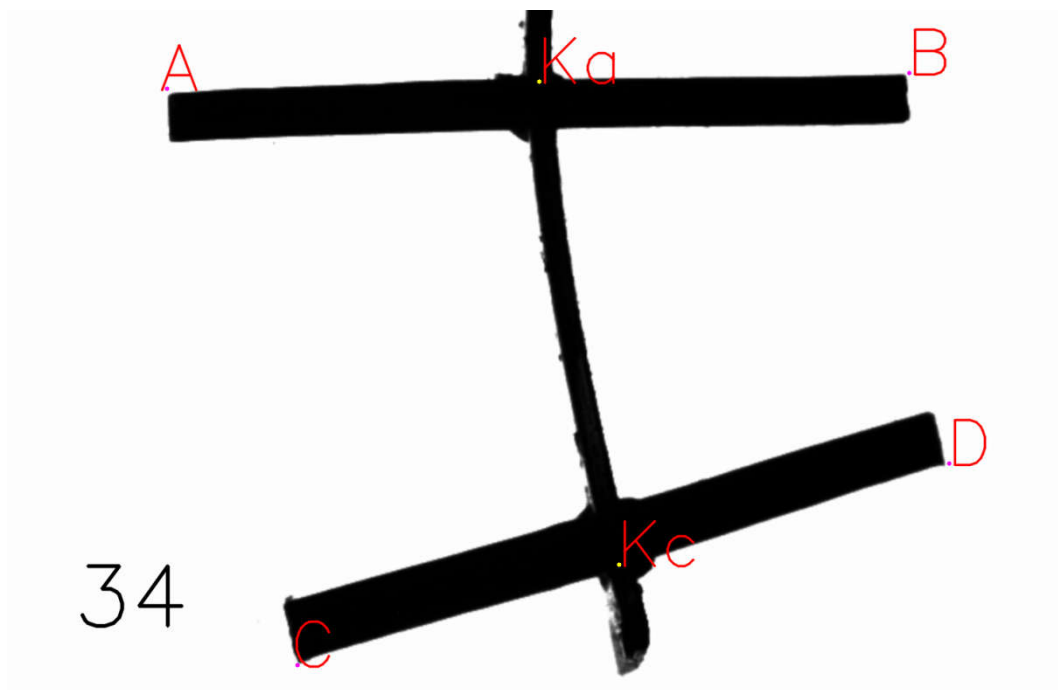
„K1_0_2

nr;AX;AY;BX;BY;CX;CY;DX;DY;Ka_X;Ka_Y;Ka_rX;Ka_rY;Ka_lX;Ka_lY;OX;OY;Len_AB;Len_CD;Arc_len_O_Ka;stem_width_AB;stem_width_CD;e2 “.

Kus:

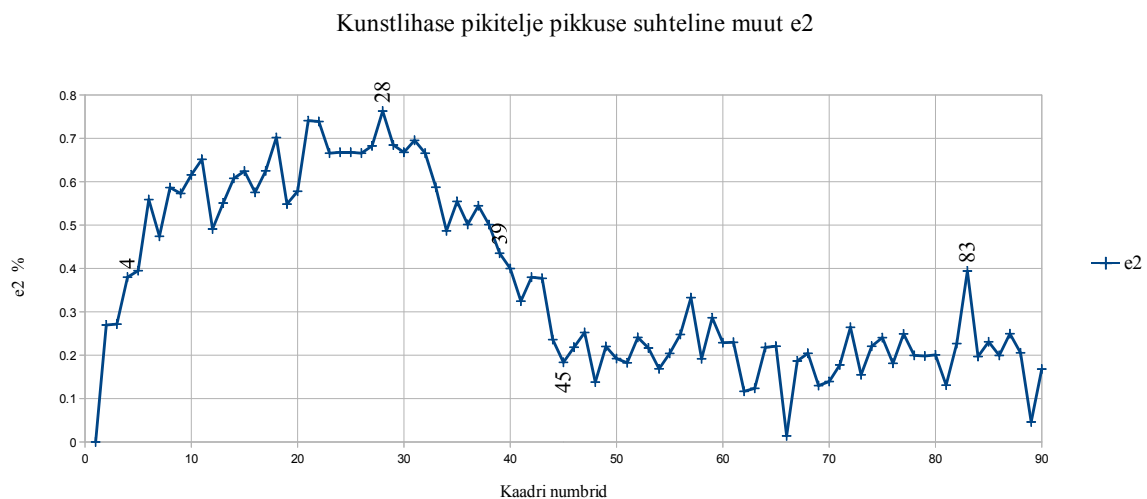
K1_0_2	- tekstifaili nimi;
nr	- kaadri number;
AX;AY	- punkti A koordinaadid;
BX;BY	- punkti B koordinaadid;
CX;CY	- punkti C koordinaadid;
DX;DY	- punkti D koordinaadid;
OX;OY	- punkti O koordinaadid;
Ka_X ;Ka_Y	- mõõdetud kunstlihase keskpunkti koordinaadid AB sirge lähedal;
Ka_rX ;Ka_rY	- mõõdetud kunstlihase parema külje koordinaadid AB sirge lähedal;
Ka_lX ;Ka_lY	- mõõdetud kunstlihase vasaku külje koordinaadid AB sirge lähedal;
Len_AB	- sirge AB pikkus;
Len_CD	- sirge CD pikkus;
Arc_len_O_Ka	- AB ja CD vahelise kaarjoone pikkus, mille kaardumisraadiuseks on punktide O ja Ka vaheline kaugus;
stem_width_AB	- kunstlihase paksus, mis on mõõdetud AB haru juurest;
stem_width_CD	- kunstlihase paksus, mis on mõõdetud CD haru juurest.
e2	- esimesest kaadrist leitud Arc_len_O_Ka pikkuse ja vastavast kaadrist Arc_len_O_Ka pikkuste suhteline muutus;

Vaatame lähemalt kolme erineva salvestuse pilditötluse tulemusi. Kuna salvestatud andmed on eraldatud semikooloniga on neid võimalik importida tabelitötlustarkvarasse ning saadud tabelite põhjal esitada tulemused graafiliselt. Huvipakkuvaks suuruseks on e_2 väli. Esimesena tuuakse video *K1.avi* töötlemisel saadud tulemused. Joonisel 16 on antud video 34. kaadrist tehtud pilt.



Joonis 16. *K1.avi* videofailist pilditöötusega saadud 33. kaadri pilt. Pildil on toodud haru otspunktid A,B,C ja D ning kunstlihase keskpunktid Ka ja Kc.

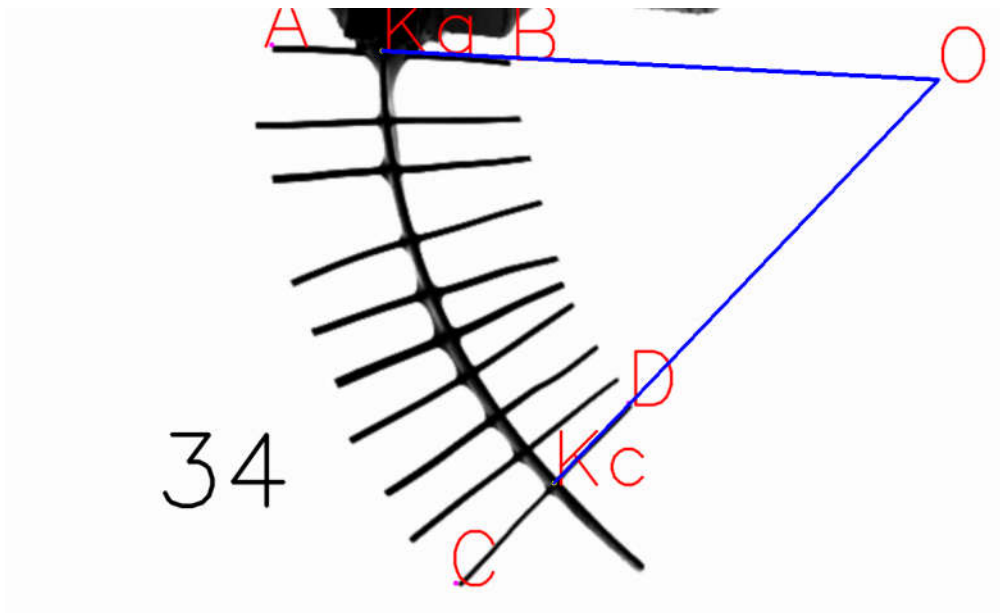
K1.avi videofaili töötlemisel saadud e2 tulemused on esitatud joondiagrammina. Diagramm annab ülevaate ajas muutunud kunstlihase pikitelje pikkustest. Y teljel on toodud pikkuste muut pikslites ning X teljel on kaadrite numbrid.



Joonis 17. *Videofaili, K1.avi, töötlemisel saadud tulemused.*

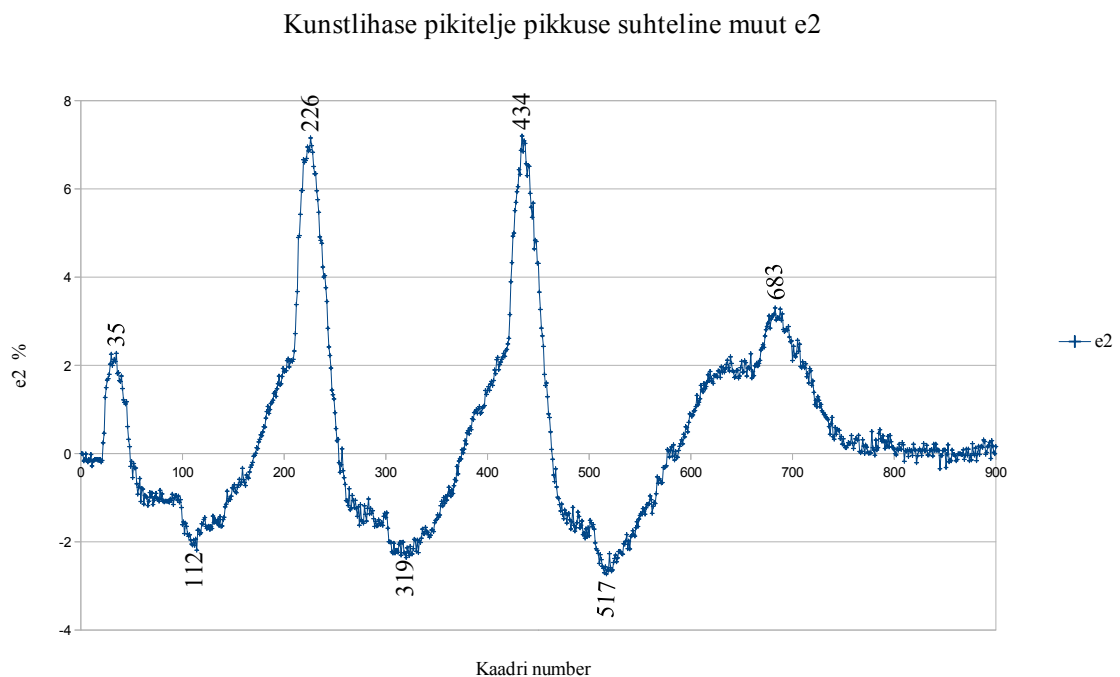
Tulemusest (joonis 17) on näha, et läbipainde pikkuse muutumine on toimunud kaader kaadrise. Suurim kõverjoone pikkuse muutus on olnud viienda ja neljakümnenda kaadri vahel. Edasi on kõverjoone pikkuse muutus vähenenud.

Järgnevalt on vaatluse all *K2.avi* video, mille 34. kaadri pilt on kuvatud joonisel 18.



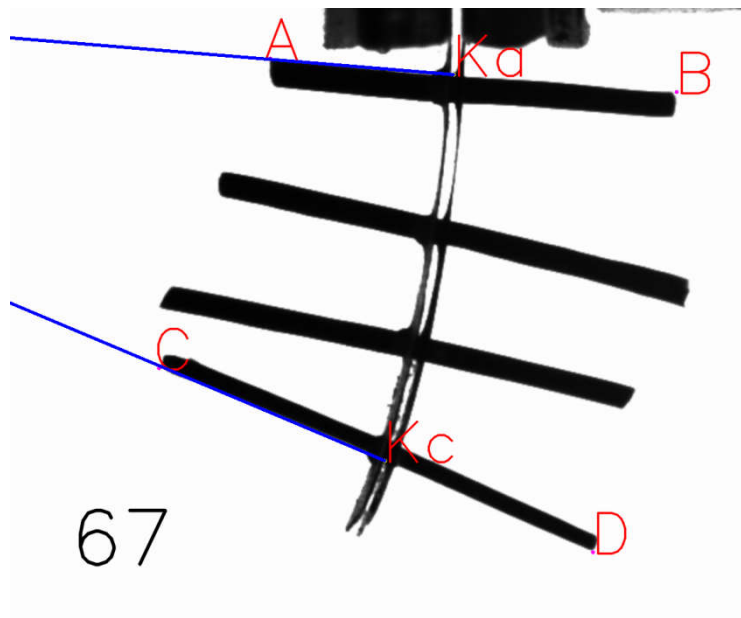
Joonis 18. Pilditöötusprogrammiga töödeldud K2.avi videofaili 34. kaader.

Selle videofaili kaadrite arv on 10 korda suurem K1.avi kaadrite arvust, mis tingib selle, et joondiagrammilt ei ole võimalik üksiku punkti asukohata silmaga tuvastada. Antud e2 graafikust joonisel 19 on näha, et kõverjoone pikkus muutub kaadrite lõikes mitmeid kordi, tekitades sedasi joondiagrammile mitmeid hüppeid.



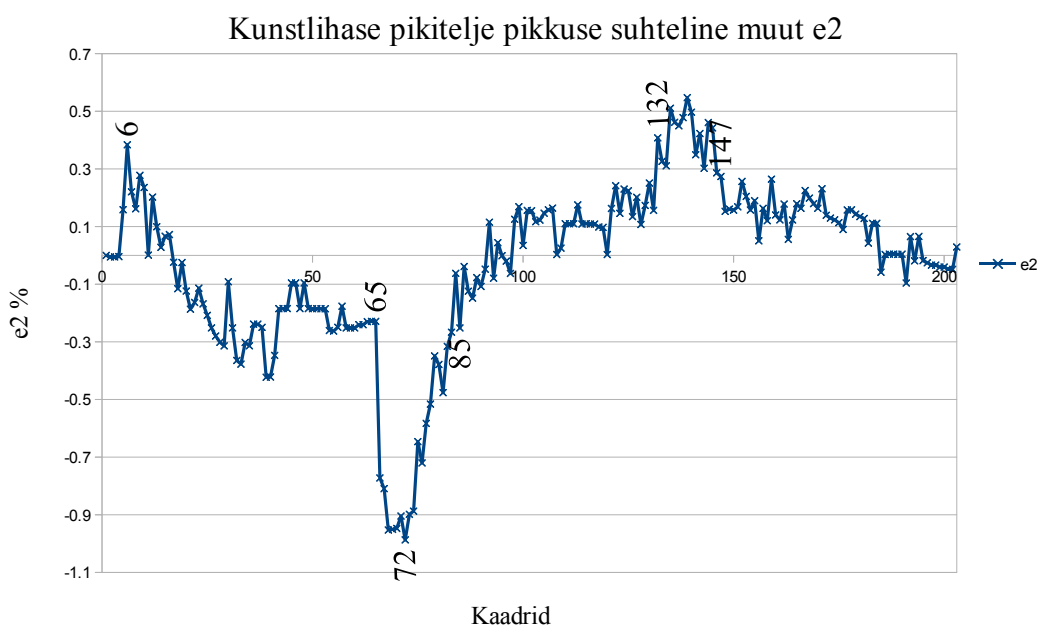
Joonis 19. Videofaili, K2.avi, töötlemisel saadud e2 tulemus.

Viimasena on vaatluse alla võetud K3.avi videofail, mille 67. kaader on näidatud joonisel 20.



Joonis 20. Pilditöötlusprogrammiga töödeldud K3.avi video 67. kaader.

Joonisel 21 on esitatud K3.avi faili e2 graafik. Joondiagrammilt on näha, et läbipaindest tingitud kõverjoone pikkuste muutumised toimuvad kohe alguses, keskel ning ka 132. ja 147. kaadri vahel. Esimene muutus näitab, et kunstlihase pikitelje pikkus on muutunud maksimaalselt 0.4% võrreldes esimesest kaadrist leitud pikkusega. Kaadrite 65. ja 85. vahel on pikitelje pikkus muutunud umbes 1%. Joondiagrammil näidatud 132. ja 147. kaadrite vahel on kunstlihase pikitelje pikkuse erinevus umbes 0.5% võrreldes esimesel kaadril leituga.

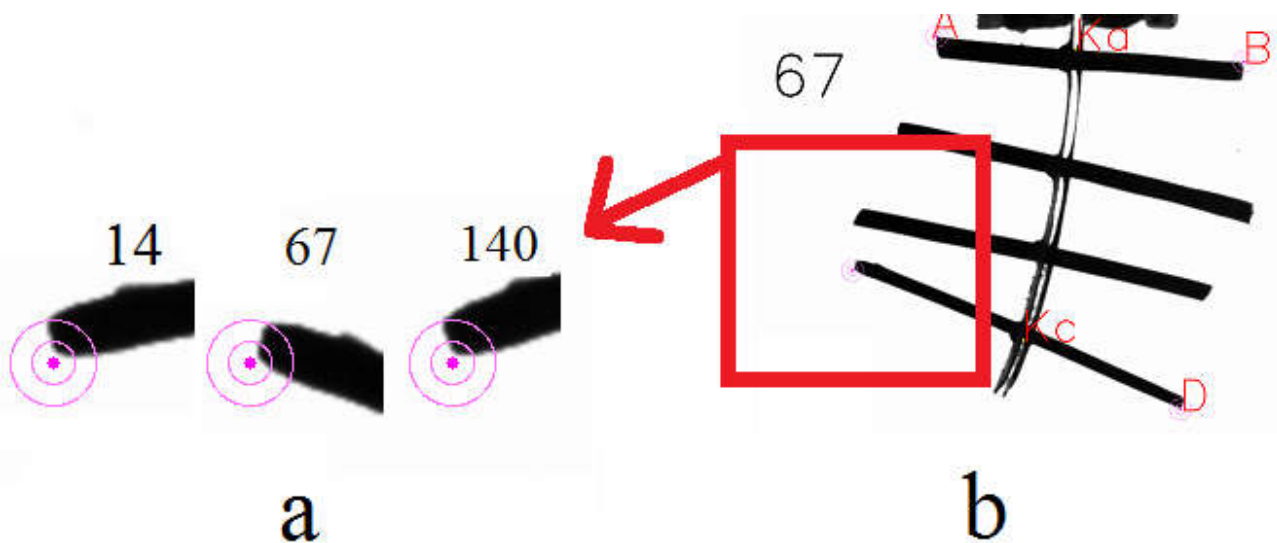


Joonis 21. Videofaili, K3.avi, töötlemisel saadud e2 muutuse tulemus.

4.2 Tulemuste hindamine

Töö tulemusena leitud haru otspunkti koordinaatide täpsuse hindamiseks, kasutab autor asukoha hajuvuse standardhälvet. Selleks tuuakse välja kolm hinnatavat parameetrit. Esimene ja teine on otseselt teineteisega seotud. Kolmas parameeter annab ülevaate tipu asukoha muutumisest kogu analüüsitud kaadrite hulgas.

Esimene ja teine parameeter näitab, kui palju on tippude ümbrus muutunud. Seega hindab antud parameeter punkti ümbrust ning ei näita otseselt, kas ümbruse muutus on toimunud pildi muutusest või punkti nihkumisest harust eemale või lähemale. Hajuvuse suurusest võime järeldada, et kas leitud punktide ümbrus on sarnane kõikide kaadrite jaoks. Hajuvuse äärealale jäävad punktide asukoht tipu suhtes on nihkunud võrreldes teiste punktidega ning võib põhjustada väikest kunstlihas pikitelje pikkuse muutust. Mida väiksem on hajuvus, seda usaldusväärsemad on tuvastatud nurkade asukohad. Hinnatavaks ühikuks on piksel, mis mille suuruseks on kaks korda väiksem, kui originaalkaadri piksli suurus, kuna pilditöötlemise käigus suurendatakse pildi resolutsiooni `cv2.pyrUp()` meetodiga.



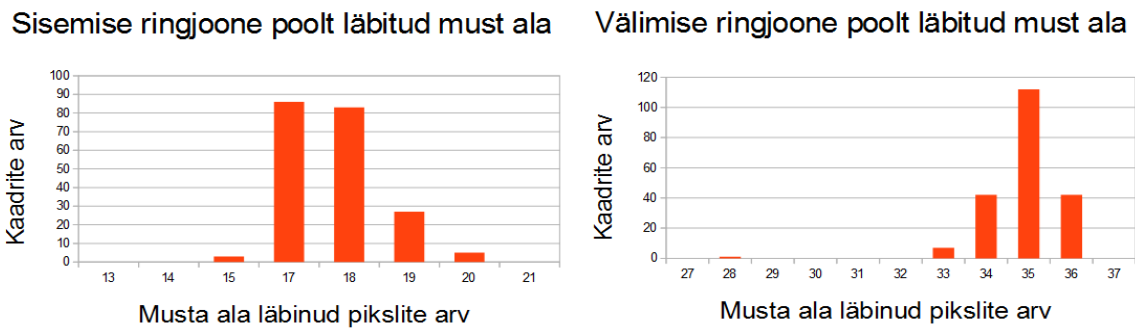
Joonis 22. Punkti asukoha hindamiseks kasutatavad ringid (a). Pildil on toodud K3.avi faili töötlemisel saadud kunstlihassele lisatud varda tipud kolmel erineval videokaadril: 14, 67 ja 140.

Iga varda otspunkti koordinaadile joonistatakse esimeses kaadris määratud raadiusega ringid. Joonis 22 illustreerib, mida mõeldakse nende ringide all. Seejärel loetakse, kui palju antud ringjoonest läbib musta ala ja hinnatakse selle sügavust. Sügavuse hindamiseks kasutatakse OpenCV kasutusel olevat `distanceTransform()` meetodit. See meetod arvutab igale pikslile tema lähima valge piksli kauguse. Joonisel 23 on `distanceTransformi()` poolt töödeldud joonisel pilt eelmisel joonisel 22 näidatud tipu jaoks. Pildil on näha, et haru tipp on täidetud nullist suuremate numbritega ning taust on kaetud nullidega, kuna seal on valge piksli kaugus null.



Joonis 23. *OpenCV distanceTransform() meetodiga leitud valge ala kaugused. Paremaks jälgimiseks on pildi valge ala (nullid) värvitud roheliseks.*

Analüüsisid hajuvust joonisel 20 näidatud tipu C jaoks, mis on saadud *K3.avi* videofailist. Järgmisel histogrammil on toodud sisemise ja välimise ringi poolt läbitud musta ala pikslite hulk.



Joonis 24. *Histogrammina esitatud sisemise ja välimise ringjoone poolt läbitud musta ala.*

Histogrammilt on näha, et sisemise ringi puhul läbitud musta ala esinemissagedus on kõige suurem 17 ja 18 piksli juures. Koos moodustavad 17 ja 18 musta ala läbimine umbes 82% kogu vaadeldavast hulgast. Sisemise ringjoone poolt läbitud musta ala keskvärtuseks on 18.6 (valem 8 [13]) ja standardhälbeks (valem 9 [13]) saame 0.91, mis näitab, et enamasti on standardhälve alla ühe piksli keskmise väärtuse juures.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (n_i x_i) \quad (8)$$

kus:

- \bar{x} -keskväärtus;
- x_i - tunnuse k väärtus;
- n_i - x_i esinemissagedus.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

kus:

- σ - standardhälve;
- \bar{x} - keskväärtus.

Hinnatud on ka tipu punktist C joonistatud välimise ringi hajuvust. Selle standardhälve on 0.88 pikslit.

Järgmiseks võetakse vaatluse alla *distanceTransform()* meetodiga määratud kaugused haru äärealast. Histogrammis on toodud esinemissagedused ja pikslite arv haruni. Standardhälbeks on valemi 9 põhjal 0.48 pikslit.



Joonis 25. Punkti C kaugus pikslites on esitatud esinemissagedusena kaadrites.

Joonisel 25 on näha, et maksimaalne kaugus mustast alast on 5 ja minimaalne 2 pikslit, mille ulatuseks on 3 pikslit. Tabel andmete lähemal uurimisel selgub, et punkt C asub kolme piksli kaugusel 38. kaadris ning 6 piksli kaugusel 12., 91., 106., 134. ja 143. kaadris. (Histogrammil olevad andmed on saadud vahemikena ehk 2 vahemikku kuuluvad 2-3 pikslite arv ning 5 vahemikku kuuluvad viiest suuremad arvud).

Järgnevalt hinnatakse, kui palju mõjutab punkti asukoha määramine 3 piksli täpsusega saadud tulemusi. Selleks analüüsitakse ühte kaadrit ning võrreldakse kaarjoone pikkust uues punktis leitud kaarjoone pikkusega.

Algandmeteks on *K3.avi* videofaili 67. kaader. Antud kaadris on programmi poolt leitud koordinaatideks A(404,78) ja B(1035,130) ning C(231,559) ja D(905,845). Koordinaadid on toodud pikslites, kus esimene tähistab kaugust pildi vasakust servast ning teine tähistab kõrgust (ülemise vasakpoolse nurga koordinaadiks on (0,0)). Programmi poolt leitud kunstlihase keskkohaks on K(689,103). Esiteks on tarvis leida AB ja CD sirgete tõusud, selleks kasutatakse valemit 6.

$$k_{AB} = \frac{130 - 78}{1035 - 404} \approx 0.0824 \quad k_{CD} = \frac{845 - 559}{905 - 231} \approx 0.4243$$

$$0.0824(X - 404) + 78 = 0.4243(X - 231) + 559$$

$$X \approx -1217.5381$$

$$Y \approx -55.6147$$

Ristumispunkti O(X,Y) leidmiseks tuleb lahendada samast valemist tuletatud võrrandisüsteem. Võrrandisüsteemi lahenduse tulemuseks saadud ristumispunkti koordinaadiks on O(-1217.5381, -55.6147). Järgmiseks leitakse ristumispunkti O ja kunstlihase keskpunkti vaheline kaugus kasutades valemit 5.

$$d_{kaO} = \sqrt{(103 + 55.6147)^2 + (689 + 1217.5381)^2} \approx 1913.1247$$

Enne kaarjoone pikkuse leidmist saab leida sirgete AB ja CD tõusude vahe ning kasutada seda kaarjoone pikkuse arvutamiseks.

$$kahe\ sirge\ vaheline\ nurk\ radiaanides = 0.4243 \quad 0.0824 \approx 0.3419$$

Valemi 7 abil saab arvutada kaarjoone pikkuse.

$$l_1 = 1913.1247 \cdot 0.3419 \approx 654.0973$$

Edasiseks arvutuseks kasutatakse lisas 3 toodud Pythonis kirjutatud programmi. Antud programm arvutab eelnevalt näidatud tehted ja kuvab tulemused ekraanile. Ekraanile prinditakse 4 tulpa, mis sisaldab järgmisi välju: lisatud pikslite arv, punkti C koordinaadid, leitud kaarjoone pikkus ja kaarjoone suhtelise deformatsiooni e2 protsentides (tabel 1).

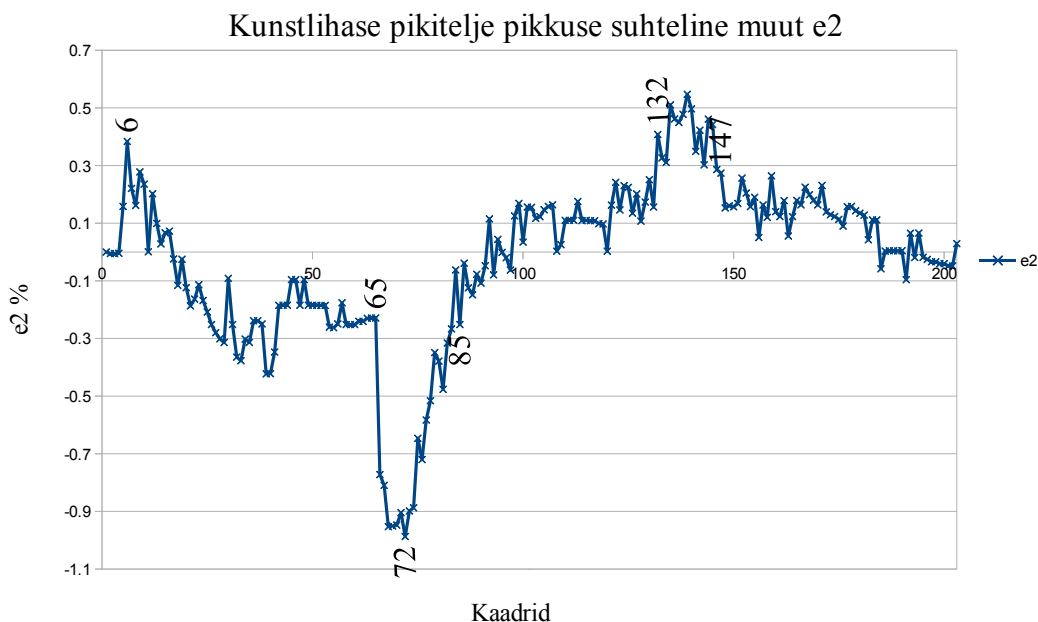
Tabel 1. Lisatud punktide mõju kaarjoone suhtelisele deformatsioonile e2. Arvutatud lisas 3 toodud Python programmiga.

Lisatud piksleid	Koordinaat	A ja B vaheline kaugus	e2 %
0	[231,559]	654.110099465	0
1	[232,560]	654.295379473	0.0283255078
2	[233,561]	654.481210912	0.0567353182
3	[234,562]	654.667596248	0.0852298081
4	[235,563]	654.854537961	0.1138093566
5	[236,564]	655.042038547	0.1424743453
6	[237,565]	655.230100515	0.1712251577
7	[238,566]	655.41872639	0.20006218
8	[239,567]	655.607918713	0.2289858005
9	[240,568]	655.797680038	0.2579964098
10	[241,569]	655.988012937	0.2870944009
11	[242,570]	656.178919996	0.3162801693
12	[243,571]	656.370403816	0.3455541128
13	[244,572]	656.562467016	0.3749166314
14	[245,573]	656.755112229	0.4043681279
15	[246,574]	656.948342105	0.4339090073
16	[247,575]	657.142159309	0.4635396772
17	[248,576]	657.336566523	0.4932605475
18	[249,577]	657.531566445	0.5230720307

Tabelist 1 on näha, et on muutus on suurusjärgus 0.09% kolme piksli lisamisel nii x-koordinaadile kui ka y-koordinaadile ja need muutused kajastuvad ka e2 arvutuste juures. Joonisel 21 on näha need 0.09% muutustena kaader-kaadrisse, mis aga ei põhjusta 0.5% või suuremaid muutusi e2 juures. 0.5% muutus oleks tingitud 18 piksli kõrvalekaldest (tabel 1), kuid punkti videofaili *K3.avi* valitud tipupunkti C hinnang seda ei tuvastanud.

4.3 Saadud tulemuste analüüs

Selles peatükis analüüsitakse saadud tulemusi. Eriti pakub huvi *K3.avi* töötlemisel saadud tulemused. Järgmisele graafikule on lisatud käsitsi kaadri numbrid kohtadesse, mis on analüüsi seisukohast huvitavad. Toome uuesti joonisel 21 kujutatud graafiku, parema ülevaate saamiseks.

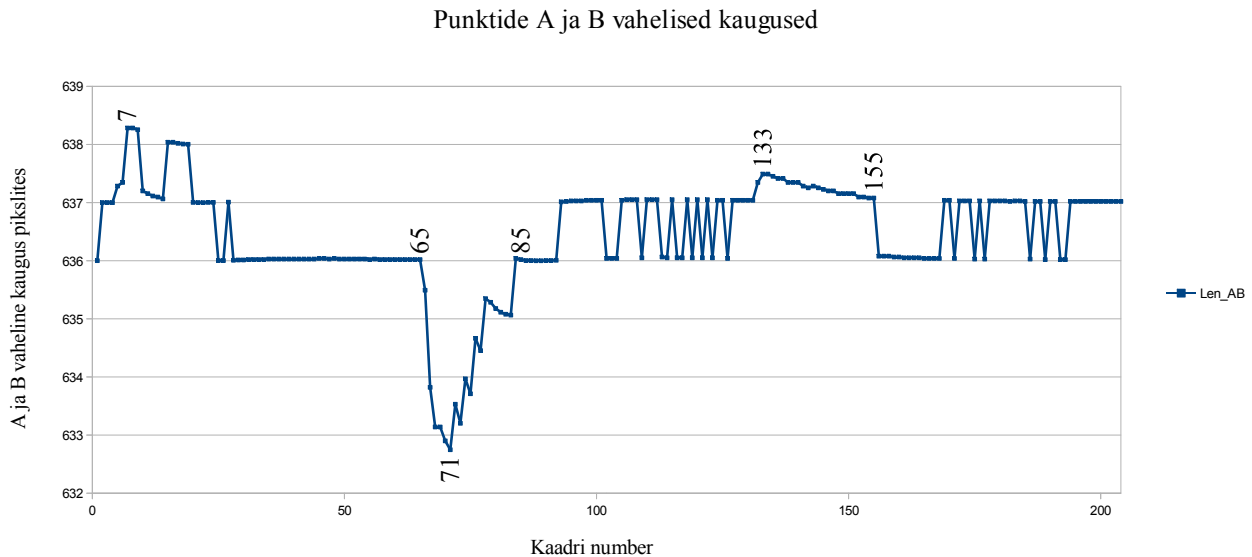


Joonis 26. Videofaili, *K3.avi*, töötlemisel saadud e2 muutuse tulemus.

Joondiagrammile joonisel 26 on märgitud 6. kaader, kus kõverjoone pikkus võrreldes esimese kaadriga on muutunud ~0.4%. Sümmeetrilise tala keskele jääva neutraaljoon ei tohiks kõverdumise korral muutuda vaid jääma kaadrite lõikes samaks. Näidatud joondiagrammil nähtub aga vastupidisus, e2 muutus on olemas. Autori poolt hinnatud piksli asukoha ebatäpsus ei mõjuta e2 ulatust sellisel määral.

Järgnevalt on märgitud joonisele ka väikse muutusega piirkond, mis jääb kaadrite 42 ja 65 vahele. Sellele järgneb suurem negatiivne hüpe. Hüppe ekstreemum asub 70. kaadris ning kunstlihase pikitelje pikkuse erinevus on üle 0.8%. Suur kõrvalekalle lõpeb 100. kaadri juures. Lisaks on joonisele märgitud kunstlihase pikitelje pikkuse vähenemine kaadrite 131 ja 150 juures.

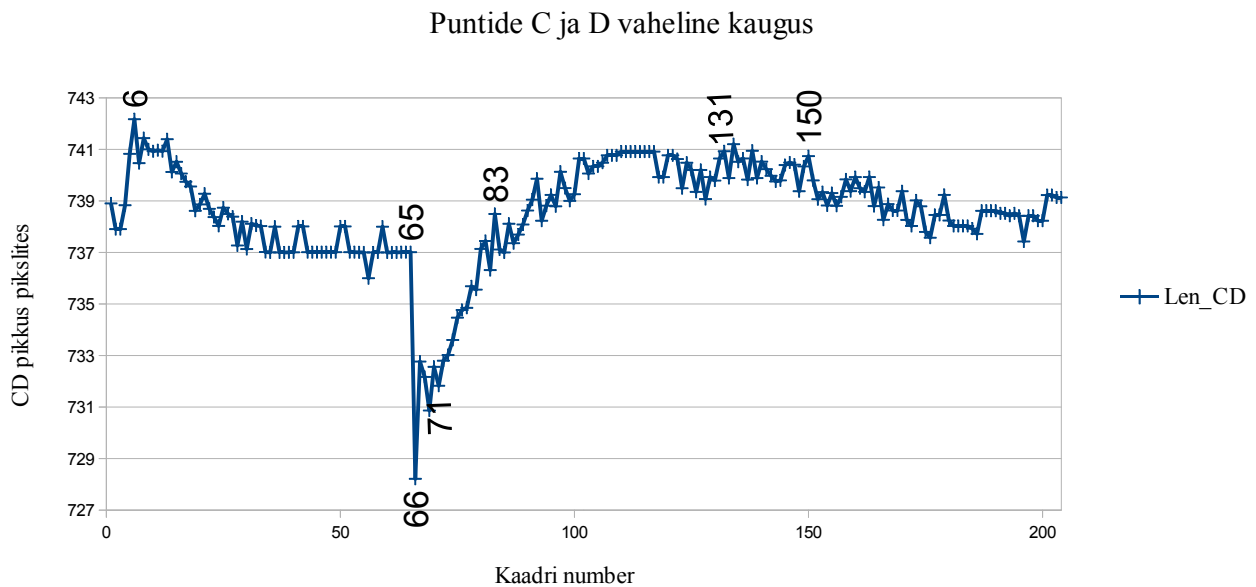
IEAP kuju määramiseks lisatud vardad (karvad) on jäigad ja nende pikkus tegelikult ei muutu. Videokaadritel varraste kujutiste pikkused võivad muutuda näiteks parallaxi tõttu või kui kunstlihase väändel vardad ei osutu enam olevat täpselt risti kaamera objektiiviga. Karvade pikkuste muutusi on võimalik kasutada videolt leitud otspunktide täpsuse A, B, C ja D hindamiseks. AB ja CD pikkused on näidatud järgmisel joondiagrammil koos tähistatud kaadritega, kus on toimunud suuremad pikkuste muutused.



Joonis 27. Videofaili, K3.avi, pilditöötlusel saadud punktide A ja B vahelised kaugused pikslites.

Ülemisel joonisel 27 on toodud joondiagramm, mis näitab punktide A ja B vahelist kaugust pikslites. Need kaugused on saadud K3.avi pilditöötlemisel. Selgesti on jälgitav seaduspärasus eelnevalt toodud (joonis 26) joondiagrammiga. Joonisel 27 näeme, et sirge AB pikkuse suurenemine algab esimesest kaadrist ning jõuab maksimumväärtuseni 7. kaadris. Kõverjoone pikkuse suurenemine jõuab maksimumini 6. kaadris. Punkti A ja B vaheline kaugus on märgatavalt vähenenud 71. kaadris ning kõverjoone pikkus on miinimumis 71. kaadri lähedal. Kõverjoone pikenemine ja vahemaa suurenemine joonisel 27 on märgatav graafiku 132. ja 155. kaadrite juures.

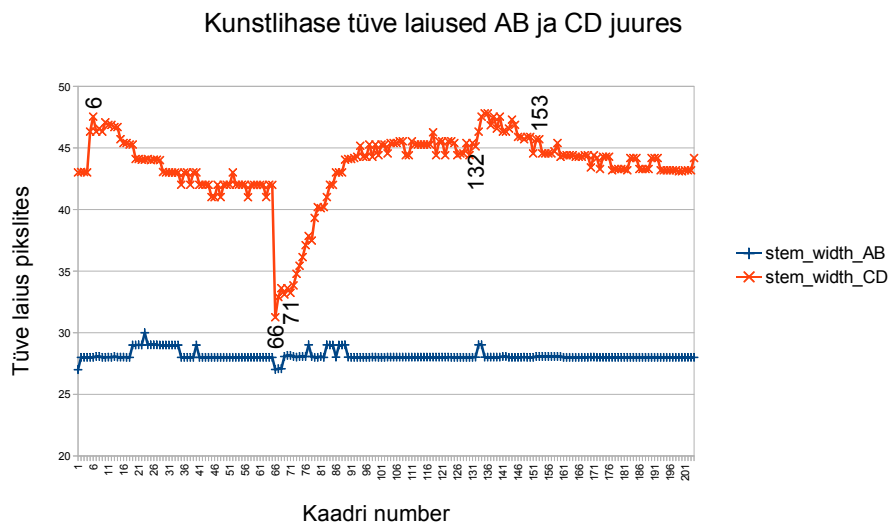
Eelmises peatükis toodud tabel 1 ei anna ka 19 piksli erinevuse korral 1% kõverjoone pikkuse muutumist. Joonisel 27 on 65. kaadris leitud AB pikkuse ja 71. leitud AB pikkuste vaheks 4 pikslit, mis otseselt ei tohiks mõjutada kõverjoone pikkuse muutumist 1%. Järgmisena on toodud ka C ja D punktide vaheline kaugus joonisel 28.



Joonis 28. Videofaili, K3.avi, pilditöötusel saadud punktide C ja D kaugused pikslites.

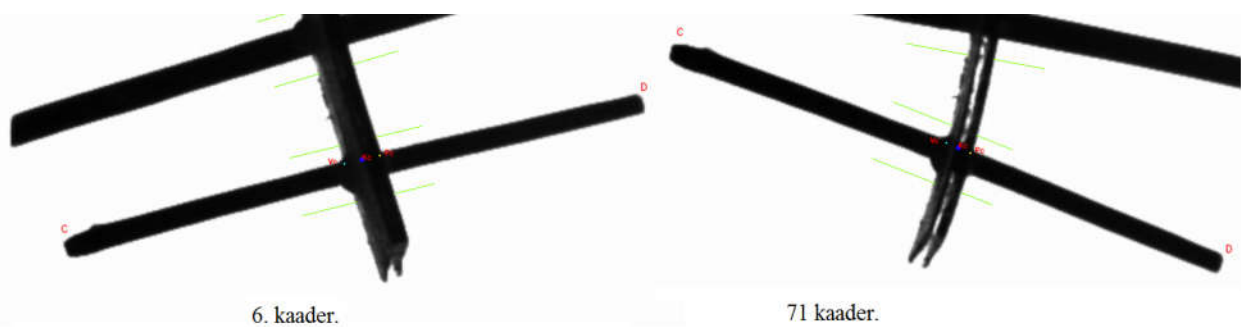
Punktide C ja D vahelise kauguse joondiagramm järgib sama trendi. 6. kaadri juures on näha kahe punkti vahelise kauguse suurenemist ning 66 kaadril on tekkinud ekstreemum. Graafikult on näha, et 65. kaadris oleva CD pikkuse ja 66. kaadris oleva CD pikkuse vahe on 10 pikslit. Võttes AB ja CD vahemaade erinevused kokku on tulemuseks 13 pikslit. Tabeli 1 järgi tekitab 13 piksli muutus vähemalt 0.4% e2 muutuse. CD pikkuse muutus 131. ja 150. kaadrite vahel ei ole nii hästi eristunud kui seda on AB pikkuse muutumise juures.

AB pikkuste ja CD pikkuste erinevused ei anna tegelikku põhjust, miks muutub kunstlihase pikitelje pikkus ja punktide AB ning CD vaheline kaugus toodud diagrammidel. Vaatluse alla tuuakse uus mõõde – kunstlihase laius. Laiust AB ja CD harude juures illustreerib joonis 29.



Joonis 29. Kunstlihase tüve laiused mõõdetuna tüve ja harude ristumispunkti.

Kunstlihase laius AB juures ei ole märkimisväärselt kaader-kaadrisse muutunud, püsides ühtlasena 28 piksli juures. CD juures mõõdetud kunstlihase tüve laius muutub samas rütmis nagu eelnevatel diagrammides näha. Esimeste kaadrite juures suureneb tüve laius ning saavutab oma maksimaalse laiuse 6. kaadris. Võrreldes teiste kaadritega on 66. kaadris kunstlihase laius olnud kõige kitsam. Esimese ja miinimumi vahe jääb suurusjärku 10 pikslit, mida saab graafikult lugeda. Selline kunstlihase laiuse muutumine avaldab mõju pikitelje pikkusele, kuid otsest mõju on nende andmete põhjal järeldada ei sa. Küll aga võime oletada, et mida kaugemal tüvest asuda, seda suuremaks muutub kõrvalekalle pikslites. Kõrvutame joonisel 30 kaadrist 6 ja 71 tehtud pildi väljavõtteid koos pilditöötlusprogrammis mõõdetud kunstlihase laiustega.



Joonis 30. Pildid kaadrist 6 (a) ja 71(b).

Peenikeste jooned näitavad, kunstlihase laiuse mõõtmiskohta. Kaadrist 6 ja 71 on näha, et lihas on oma asendid muutnud ning sellega kaasnenud pilditöötlusega leitud tüve laiuse muutus. Selline kunstlihase asendi muutus muudab ka *Fish-skeleton* meetodil paigaldatud kiude vertikaalset nurka, mis muudab horisontaaltasapinnal vaadeldavate karvade pikkust. Seda on jälgitav joonisel 28 CD pikkuse joondiagrammil. Sama analüüs on tehtud ka *K1.avi* ja *K2.avi* videofailidele (lisa 1 ja lisa 2), kus jooniste ja graafikute põhjal näeme sarnast mustrit. Saab järeldada, et kunstlihase vääne muudab harude pikkust ning see omakorda ka mõõtmise tulemusi. Kuna antud pilditöötlusprogramm mõõdab ka kunstlihase laiust, siis saab väändunud kunstlihased valimist välja jätta. Mida väiksemad on kunstlihase vääne, seda täpsemini saame hinnata e2 muutust IEAP-s.

4.4 Järeldused

Pilditöötlustarkvaraga saadud tulemused näitavad selgelt, et kunstlihase pikiteljelise pikenemine on olemas. Pikenemise muutus e2 on saadud andmete põhjal seotud veel otspunktide leidmise täpsuse ning ka kunstlihase väändest põhjustatud karvade asendi muutusest. Tulemuste analüüsisist järeldub, et töö käigus loodud pilditöötlusprogrammi poolt leitud pikslite asukoha ebatäpsusest tingitud kõverjoone pikkuse muutus ei põhjusta e2 pikkuse juures suuremaid kui 0.1% muutusi ning on jälgitavad analüüsis esitatud graafikutel kõrvalekalletena. Suuremad, kui 0.5% graafikutel toodud e2 muutused vajavad rohkem uurimist ning määrata nende seos kunstlihase väändest põhjustatud pikiteljelise pikkuse muuduga.

Kokkuvõte

Antud lõputöö tulemusena valmis pilditöötlustarkvara (lisa 4), millega on võimalik uuridaioon EAP-d ehk elektromehaaniliselt aktiivsete materjalide käitumist pingestamise korral. Loodud pilditöötlustarkvara on mõeldud *Fish-skeleton* meetodi jaoks, kus IEAPde deformatsiooni uurimiseks lisatakse käsitsi kunstlihasele pintslakiud. Kunstlihasele lisatud varraste abil on võimalik leida kaarjoonte pikkusi. Loodud pilditöötlusprogrammiga on võimalik täpselt määrata kunstlihasele kinnitatud varraste otspunkte ning arvutada kaarjoone pikkus, mis jääb kunstlihase keskele. Selle kaarjoone pikkuse muutumine näitab meile, et neutraaljoon ei asu kunstlihase keskkohas nagu seda on eeldatud Euler-Bernoulli konsooli mudeliga. Töös hinnati programmi poolt otspunktide ebatäpsusi ning leiti, et arvatud kaarjoone pikkuse muutumine on mõjutatud otspunktide ebatäpsusest maksimaalselt 0.1%. Lisaks näidati väändest põhjustatud võimalikke seost otspunktide vahekauguse muutumisele ning selle kaudset seost e_2 muutumises. Antud programmipoolt saadud tulemustest on näha, et kunstlihase keskel asuva kaarjoone pikkus muutub, mis annab meile alust arvata, et kunstlihase käitumist ei saa kirjeldada ainult Euler-Bernoulli konsooli mudeli järgi.

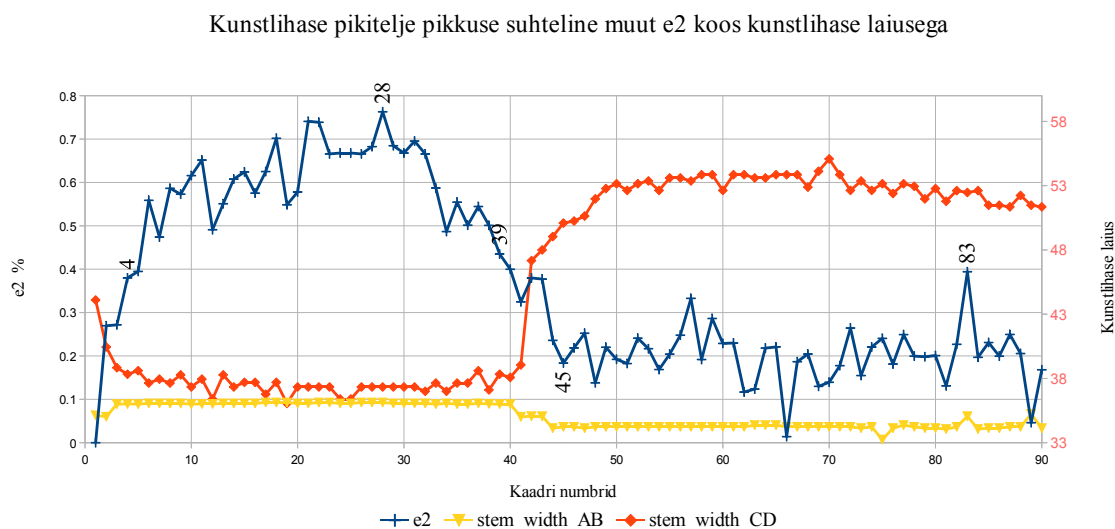
VIITED

- [1] K. Kruusamäe „Tehislihased: ajamid mikrorobotitele, kuid mitte ainult,“ Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat, 2011 XXII aastakäik, Tartu 2012.
- [2] G. Alici, N. Huynh, “Predicting force output of trilayer polymer actuators,” *Sens Actuators A: Phys* 132(2), 616–625 (2006).
- [3] K. Mukai, K. Asaka, K. Kiyohara, et al. “High performance fully plastic actuator based on ionic-liquid-based bucky gel,” *Electrochim Acta*, 53(17), 5555-5562 (2008).
- [4] A. Punning, V. Vunder, I. Must, U. Johanson, G. Anbarjafari, A. Aabloo, “In situ scanning electron microscopy study of strains of ionic electroactive polymer actuators,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 4, 1-14 (2015).
- [5] A. Punning, I. Põldsalu, F. Kaasik, V. Vunder, A. Aabloo, “Micro-mechanics of ionic electroactive polymer actuators,” *Proc. SPIE.*, 9430, 94301K (2015).
- [6] S. Nakshatharan, A. Punning, S. Assi, U. Johanson, A. Aabloo, "Fish-skeleton visualization of bending actuators," *Proc. SPIE.*, 9798, 97981P (2016).
- [7] A. Jürgenson, “Puhas paine,” kogumikus Tugevusõpetus, (Valgus, Tallinn, 1985), lk.198-205.
- [8] J. M.Gere, B. J.Goodno, “Normal stresses in beams (Linearly elastic materials),”in *Mechanics of Materials*, Seventh Edition, Cengage Learning, Toronto, 2009, pp. 361-373.
- [9] H. Pärk, “Joone võrrandid,” [Võrgumaterjal], <http://opiobjektid.tptlive.ee/joonevorrandid/>, (10.04.2016).
- [10] J. Birn, “Color Temperature,” [Võrgumaterjal], <http://www.3drender.com/glossary/colortemp.htm/>, (10.04.2016).
- [11] The Imaging Source Europe GmbH, “DMK 22BUC03 USB 2.0 monochrome industrial camera,” [Võrgumaterjal], <http://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-2.0-monochrome/dmk22buc03/>, (10.04.2016).
- [12] J. Lucas, “What Is Parallax?,” <http://www.space.com/30417-parallax.html/>, (15.04.2016).
- [13] E.-M.Tiit, M.Möls, “Arvkarakteristikud,” kogumikus Rakendusstatistika algkursus, (Tartu, 1997), lk. 26-36.

LISAD

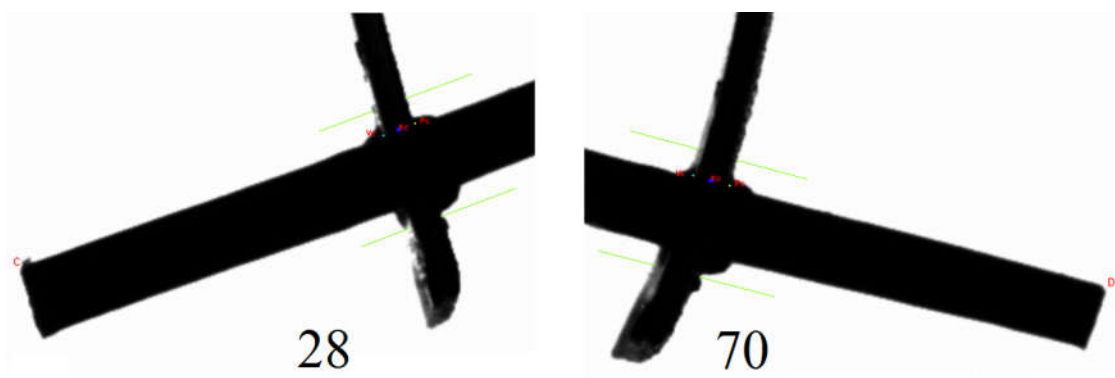
Lisa 1. K1.avi analüüs.

Antud analüüs on tehtud K1_0_3.txt põhjal, mis on saadud videotötluse programmiga. Toodud graafikul on näidatud leitud kunstlihase pikitelje pikkuse suhteline muut e2 koos kunstlihase laiusega. Kunstlihase laius on mõõdetud haru ja kunstlihase tüve juures.



Joonis 31. Kaarjoone pikkuse e2 koos kunstlihase laiusega.

Ülal olevalt jooniselt on näha, et kunstlihase pikitelje pikkuse suhteline muut e2 muutub samas taktis kunstlihase laiusega. All oleval jooniselt on 28. ja 70. kaadrite väljavõtte, kus on näidatud kunstlihase laius. Joonisel on märgata, et kunstlihase paindele on lisandunud ka vääne.

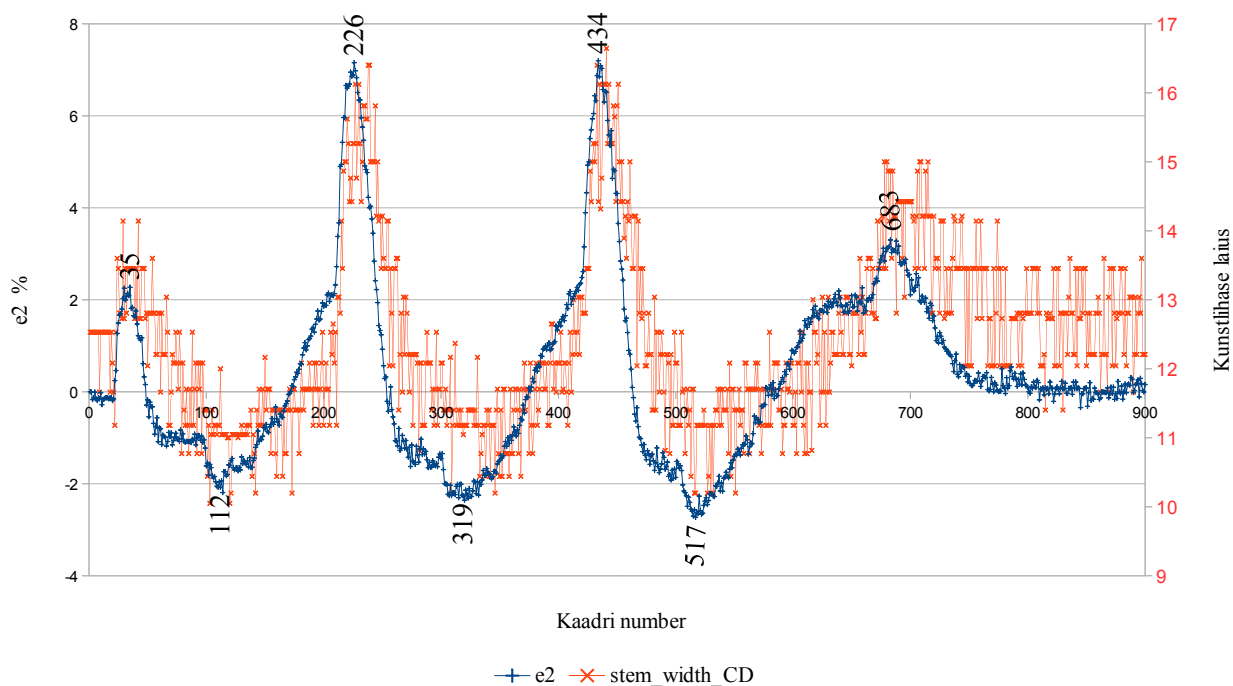


Joonis 32. K1.avi videofaili 28. ja 70. kaader. Peenikeste roheline joontega on näidatud kunstlihase laiuse mõõtmise kohad.

Lisa 2. Videofaili K2.avi analüüs.

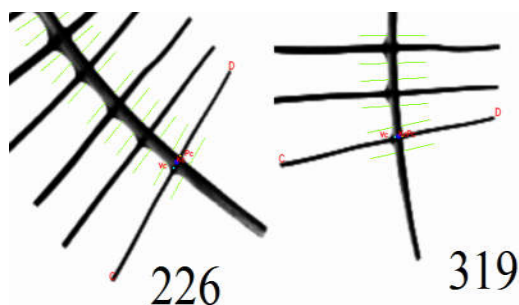
Antud analüüs on tehtud K2_1_19.txt põhjal, mis on saadud videotöötlemise programmiga. Toodud graafikul on näidatud kaarjoone pikkuse suhteline muut e2 koos kunstlihase laiusega. Kunstlihase laius on mõõdetud haru ja kunstlihase ristumiskoha lähedal.

Kunstlihase pikitelje pikkuse suhteline muut e2 koos kunstlihase laiusega



Joonis 33. Kunstlihase pikitelje pikkuse suhteline muut e2 koos kunstlihase laiusega.

Ülal toodud joonisel on sinisega tähistatud kunstlihase pikitelje pikkuse suhteline muut e2. Punasega on tähistatud kunstlihase tüve laiused. Joondiagrammilt on näha, et e2 muutus läbi kaadrite sarnaneb kunstlihase laiuse muutumisega. Kunstlihase laiuse muutus on seotud väändumisel kaadrisse ilmuva külje paljastumisega, mis kahemõõtmelisel pildil sulandub ühte kunstlihase pealispinnaga. Kaadritest 226. ja 319. on tajutav kunstlihase väändumisel ilmub kunstlihase külg nähtavale.



Joonis 34. Videofaili K2.avi pilditöötlemisel saadud 226. ja 319. kaadrite väljavõtted. Piltidelt on näha, et väändest põhjustatud kunstlihase külje paljastumine suurendab kunstlihase laiust.

Lisa 3. Kaarjoone suhtelise deformatsiooni arvutamine.

```
# -*- coding: cp1252 -*-
"""Kaarjoone suhtelise deformatsiooni arvutamine"""
"""Author Siim Assi 2016"""
import math
#meetod kaare pikkuse leidmiseks
def arcLen(radius, corner_k):
    r=radius
    rad_arc=corner_k
    ar_l=r*rad_arc
    return ar_l
#meetod sirge tõusu leidmiseks radiaanides
def slope_k(cord1, cord2):
    x1, y1=cord1
    x2, y2=cord2
    if (x2-x1)==0:
        return 0
    else:
        k=float(y2-y1)/float(x2-x1)
    return k
#meetod kahe punkti vahelise kauguse leidmiseks
def lineLength(cord1, cord2):
    x1, y1 = cord1
    x2, y2 = cord2
    line_length=math.sqrt(pow((x2-x1), 2)+pow((y2-y1), 2))
    return line_length
#meetod kahe sirge ristumispunkti leidmiseks
def crossPoint(slope_k1, slope_k2, cord1, cord2):
    k1=slope_k1
    k2=slope_k2
    x1, y1=cord1
    x2, y2=cord2
    if k2-k1==0:
        return 0, 0
    X=(k2*x2-k1*x1+y1-y2)/float(k2-k1)
    Y=k2*(X-x2)+y2
    return [X, Y]
#programmi muutujad
A=[404, 78]
B=[1035, 130]
C=[231, 559]
D=[905, 845]
ka=[689, 103]
#for-tüskkel punkti C koordinaadi muutmiseks ja e2 leidmiseks
for i in range(20):
    C=[231+i, 559+i]
    k_AB=slope_k(A, B)
    k_CD=slope_k(C, D)
    O=crossPoint(k_AB, k_CD, A, C)
    d_kaO=lineLength(O, ka)
    l_arc=arcLen(d_kaO, (k_AB-k_CD))
    if i==0:
        l_arc1=l_arc
print C, abs(l_arc), (l_arc- l_arc1)/l_arc1*100
```

Lisa 4.*Fish-skeleton* pilditöötlusprogramm.

Pilditöötlusprogramm on lisatud Siim_Assi_Fish_skeleton_2016.rar failina moodlisse.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, _____ Siim Assi _____,
(*autori nimi*)

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
PAINDUVATE IEAP TÄITURITE DEFORMATSIOONI TÄPPISMÄÄRAMINE
VIDEOTÖÖTLUSEGA

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on _____ ANDRES PUNNING _____,
(*juhendaja nimi*)

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace´i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **20.05.2016**