

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

DIPLOMSKO DELO

JAN ŠUC

LJUBLJANA 2018

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA TEKSTILSTVO, GRAFIKO IN OBLIKOVANJE

3D-TISK V STOP-MOTION ANIMACIJI

DIPLOMSKO DELO

JAN ŠUC

LJUBLJANA, september 2018

UNIVERSITY OF LJUBLJANA
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING
DEPARTMENT OF TEXTILES, GRAPHIC ARTS AND DESIGN

3D-PRINT IN STOP-MOTION ANIMATION

DIPLOMA THESIS

JAN ŠUC

LJUBLJANA, September 2018

PODATKI O DIPLOMSKEM DELU

Število listov: 41

Število strani: 30

Število slik: 21

Število preglednic: 0

Število literaturnih virov: 6

Število prilog: 0

Študijski program: univerzitetni študijski program (1. stopnja) Grafične in interaktivne komunikacije

Komisija za zagovor diplomskega dela:

Predsednica: *prof. dr. Urška Stanković Elesini*

Mentorica: *prof. dr. Deja Muck*

Članica: *doc. dr. Urška Vrabič Brodnjak*

Ljubljana,

ZAHVALA

Najprej bi se rad zahvalil moji mentorici, prof. dr. Deji Muck, za pomoč pri zastavitvi in izpeljavi naloge. Poleg tega bi se rad zahvalil izr. prof. dr. Heleni Gabrijelčič Tomc, za nasvete v zvezi z izdelavo topologije glave modela lutke. Zahvalil bi se rad tudi asistentu Mateju Pivar, za pomoč pri tisku in naknadni obdelavi 3D-modelov.

Nazadnje bi se rad zahvalil še družini, ki me je med študijem finančno in moralno podpirala, še posebej staršema Mojci Pahor in Bojanu Šuc.

IZVLEČEK

V diplomski nalogi je podrobno opisan postopek izdelave lutke z menjajočimi se obrazi za uporabo pri stop-motion animaciji. Glavni fokus naloge je: izdelava in animacija 3D-modela v računalniškem programu; izvoz, tisk in naknadna obdelava modelov; barvanje modelov ter izdelava funkcionalne lutke. 3D-tisk je hitro razvijajoča se panoga tehnologij, ki so v porastu posebej v zadnjih letih. Na voljo imamo različne tehnologije, ki nam ponujajo številne možnosti tiska, vsaka od njih pa ima svoje prednosti in slabosti.

Cilji naloge so izdelava funkcionalnega 3D-modela lutke s pomočjo referenčnih slik, animacija 3D-modela in izvoz modelov za tisk, priprava modelov za tisk, tisk modelov in naknadna obdelava ter barvanje modelov in izdelava funkcionalne lutke za stop-motion animacijo.

Najprej je bil izdelan načrt luke, po katerem smo v programu *Blender* s pomočjo referenčnih slik izdelali 3D-model človeške glave. Tako izdelan model smo nato razrezali na več delov, da smo dobili lutko z gibljivo glavo in menjajočimi se obrazi. Ko je bil model lutke končan smo animirali obraz s pomočjo ključev za preoblikovanje (*ang. shape key*). Izdelali smo ključno sličico za nasmeh, ter izdelali animacijo obraza iz resnega v nasmejanega, s 16-imi sličicami. Model obraza iz vsake posamezne sličice smo izvozili kot *.stl datoteko*. Poleg tega smo izvozili tudi modela glave ter ramen. Izvožene datoteke smo odprli v programu *PreForm*, ter jih v njem pripravili za tisk na *SLA tiskalniku Form 2*. Po tisku je sledila naknadna obdelava modelov. Modele smo najprej za 20 min potopili v kopel iz 90% raztopine izopropilnega alkohola, nato pa še odstranili podporne strukture. Na koncu smo natisnjene modele še pobarvali ter nanje nalepili magnete.

Pri izdelavi 3D-modelov, ki jih nameravamo animirati je zelo pomembna topologija, saj ta vpliva na premikanje točk v mreži. Če je topologija neustrezna lahko pri animaciji modela pride do čudnih deformacij. Pri 3D-tisku, ki uporablja podporne strukture je potrebno le-te pravilno generirati. Prevelika gostota podpor oteži njihovo odstranjevanje, lahko pa tudi spremeni površino modelov. Po drugi strani pa premajhna gostota podpornih struktur povzroči, da se modeli sploh ne natisnejo. Odstranjevanje podpor s kleščami je pri modelih s tankimi stenami skoraj nemogoče, saj model poškodujemo. Tako smo prišli do zaključka, da je boljša metoda odstranjevanja podpor z vročim olfa nožem, saj modela ne poškoduje.

Ključne besede: 3D-tisk, stop-motion, animacija, menjajoče se glave

ABSTRACT

The diploma thesis describes the process of making a puppet with replacement heads for use in stop-motion animation. The main focus of the diploma thesis was: creating and animating a 3D-model in a computer program; exporting, printing and post-processing of the models; and finally dyeing of models and making a functional puppet. 3D printing is a rapidly developing technology, which has been on the rise in recent years. We can choose between a variety of technologies that offer a wide range of printing options, each of which has its advantages and disadvantages. The goal of this project was to produce a functional 3D-model of the puppet, using reference images, animation of the 3D-model and export of models, preparation of models for print, model printing and post-processing, and in the end, the coloring of models and production of a functional puppet for stop-motion animation.

First, a blueprint for the puppet was made, by which, a 3D-model of the human head was created in *Blender* program, using reference images. The model thus made was cut into several parts so we got a puppet with a moving head and a changing face. When the model of the puppet was finished, we animated the face with the shape keys. We created a keyframe for a smile, and made an animation from a serious to a smiling face with 16 different frames. The model of the face from each individual frame was exported as *.stl file*. In addition, we also exported head and shoulder models. The exported files were opened in the *PreForm* program and prepared for printing on the *SLA Form 2* printer. The print was followed by post-processing of the models. The models were first immersed for 20 minutes in a bath of 90% solution of isopropyl alcohol, and then the removal of the support structures followed. In the end, the printed models were painted and glued with magnets.

When creating 3D-models that we intend to animate, a very important thing to consider is the topology since it affects the movement of the mesh points. If the topology is inadequate, the model animation can cause strange deformations of the mesh. In 3D printing, which uses support structures, these must be properly generated. The excessive density of supports makes it difficult to remove them, and can also change the surface of the model. On the other hand, the insufficient density of support structures can cause models not to print at all. Removing the supports with the pliers is almost impossible for thin-walled models, since the model can be damaged. In the end we came to the conclusion that the method with a hot utility knife is a better method of separation because it does not damage the model.

Key words: 3D-print, stop-motion, animation, replacement heads

VSEBINSKO KAZALO

IZVLEČEK	I
ABSTRACT	II
VSEBINSKO KAZALO	III
SEZNAM SLIK	V
OKRAJŠAVE	VI
1 UVOD	1
1.1 NAMEN IN CILJI	1
2 TEORETIČNI DEL	2
2.1 ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.2 PREDSTAVITEV TEHNOLOGIJ 3D-TISKA	3
2.2.1 Fotopolimerizacija v kadi (<i>ang. Vat Photopolymerization</i>)	4
2.3 PRIPRAVA MODELOV ZA TISK	6
2.3.1 3D Print Toolbox	6
2.3.2 Pomembne smernice pri pripravi modelov za 3D-tisk	6
2.4 ANIMACIJA	7
2.4.1 Stop-motion animacija.....	8
3 EKSPERIMENTALNI DEL	11
3.1 METODE.....	11
3.1.1 Ustvarjanje 3D elementov	11
3.1.2 Animacija	13
3.1.3 Priprava za tisk	14
4 REZULTATI IN RAZPRAVA	16
4.1 REZULTATI	16
4.1.1 Načrtovanje lutke.....	16
4.1.2 Ustvarjanje 3D elementov	16
4.1.3 Animacija	19

4.1.4	Priprava za tisk	20
4.1.5	Tisk in naknadna obdelava	22
4.1.6	Barvanje modelov in sestava lutke	25
4.2	RAZPRAVA	28
5	ZAKLJUČEK	29
6	LITERATURNI VIRI	30

SEZNAM SLIK

Slika 1: Število zadetkov v posameznem letu v zbirki Web of Science, za iskalni profil (3D OR D OR 3-dimension* OR three-dimension* OR threedimension*) AND print* AND ("Stop-motion" OR "Stop - motion" OR "Stop motion") AND animation*	2
Slika 2: Koraki aditivne proizvodnje (vir: (1)).....	3
Slika 3: Serija menjajočih glav (vir: (6)).....	9
Slika 4: Referenčna slika frontalno (levo) in s profila (desno)–	12
Slika 5: Topologija modela obraza.....	13
Slika 6: Načrt modela lutke	16
Slika 7: Menjujoči se model obraza spredaj (levo) in zadaj (desno).....	18
Slika 8: Model glave frontalno (levo) in s profila (desno)	18
Slika 9: Model ramenskega del lutke frontalno (levo) in s profila (desno).....	19
Slika 10: Sprednja slika resnega obraza (levo) in slika ključne sličice za nasmeh (desno)	20
Slika 11: Stranska slika resnega obraza (levo) in slika ključne sličice za nasmeh (desno).	20
Slika 12: Postavitev 1	21
Slika 13: Postavitev 2	21
Slika 14: Dodatni tisk	22
Slika 15: Neuspeli tisk.....	23
Slika 16: Poškodovana modela.....	24
Slika 17: Natisnjeni in obdelani modeli	24
Slika 18: Površina modela prvega (levo) in drugega tiska (desno) po odstranjevanju podpornih struktur	25
Slika 19: Pobarvani modeli obrazov (levo) ter glave in ramenskega dela lutke (desno) ...	26
Slika 20: Modeli z vstavljenimi magneti.....	26
Slika 21: Končni izdelek	27

OKRAJŠAVE

3D – 3-dimenzionalno

2D – 2-dimenzionalno

CAD – računalniško podprto načrtovanje (*ang. computer-aided design*)

SLA ali LA – stereolitografija (*ang. stereolithography*)

UV – ultravijolično

SLS – selektivno lasersko sintranje (*ang. selective laser sintering*)

3DP – 3-dimenzionalni tisk (*ang. 3-dimensional print*)

TPM - tripropilen glikol monometil eter

IPA – izopropil alkohol

PCA - naprava za naknadno utrjevanje (*ang. post curing apparatus*)

1 UVOD

Animiramo s pomočjo različnih procesov, ki so odvisni od vrste animacije in želenega končnega izgleda izdelka. Stop-motion animacija potrebuje za doseganje enovitih projektov zahtevnejši pristop od ostalih vrst animacije, saj morajo biti seti in liki dejansko zgrajeni v fizični obliki, ne samo simulirani s pomočjo programov. Nekatera podjetja se tako obračajo k 3D-tisku z namenom pospeševanja procesa stop-motion animiranja.

Področje stop-motion animiranja, kjer se 3D-tisk izkaže za najbolj uporabnega je izdelava menjajočih se glav lutke, ki jih uporabljamo za doseganje ekspresivnosti obrazne mimike in prikaz čustev lutke. Gre za postopek, ko za določeno telo lutke izdelamo več glav z različnimi izrazi, ki jih med animiranjem menjamo za doseganje ustreznega izražanja palete čustev.

V diplomski nalogi smo izdelali model lutke z menjajočimi se obrazi za uporabo pri stop-motion animaciji. Zanimal nas je celoten postopek izdelave, od zajema referenčnih slik in oblikovanja modela s pomočjo referenc za doseg realističnih rezultatov, do tiska natančnih in funkcionalnih modelov uporabnih za animacijo.

1.1 NAMEN IN CILJI

Namen diplomske naloge je bil ustvariti 3D-model človeške glave, ter ga razdeliti na več delov, tako da dobimo lutko z več premikajočimi in menjajočimi se deli, ki jih lahko animiramo. Model lutke smo nato natisnili na 3D-tiskalniku, ga pobarvali in izdelali lutko z realistično obrazno mimiko. S tem smo želeli raziskati uporabnost 3D-tiska v stop-motion animaciji, izpostaviti prednosti in slabosti te tehnike ter predvsem opisati celoten postopek izdelave lutke z menjajočimi se obrazi.

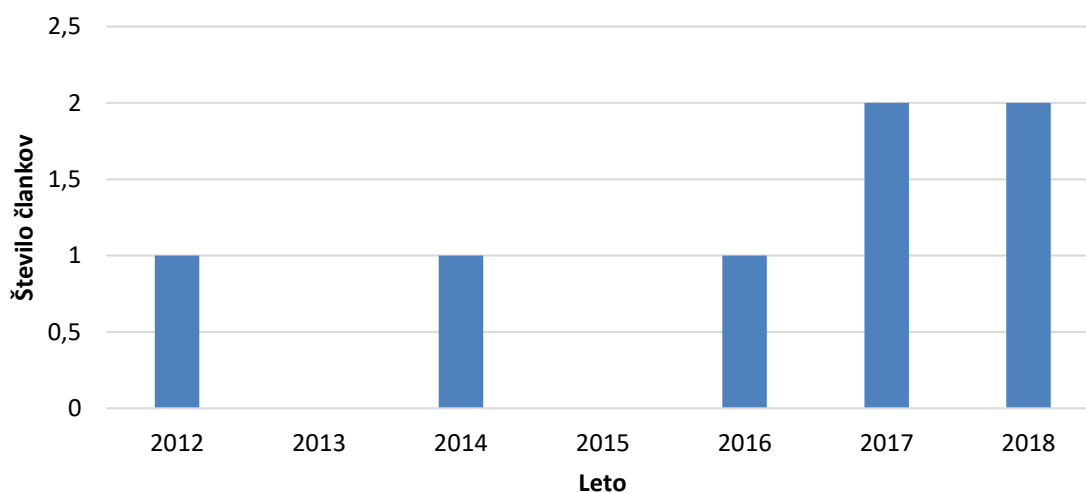
Cilji naloge so bili:

- izdelati funkcionalni 3D-model lutke s pomočjo referenčnih slik,
- animirati 3D-model in priprava le-teh za 3D-tisk,
- izvoz modelov za tisk,
- naknadna obdelava z barvanjem modelov in izdelava funkcionalne lutke za stop-motion animacijo.

2 TEORETIČNI DEL

Število raziskav na področju 3D-tiska v uporabi stop-motion animacije je precej skopo. V tuji literaturi smo od leta 2012 do danes našli le 7 del, ki se nanašajo na omenjeno področje. Na sliki 1 je prikazan seznam objavljenih znanstvenih člankov, ki smo jih našli v podatkovni zbirki *Web Of Science* pri iskanju z iskalnim profilom (*3D OR 3-D OR 3-dimension* OR three-dimension* OR threedimension**) AND *print** AND (*"Stop-motion" OR "Stop - motion" OR "Stop motion"*) AND *animation**. V slovenski literaturi nismo našli nobenega dela, ki bi opisovalo proces 3D-tiska in animacijo.

Število objavljenih znanstvenih člankov na temo 3D-tiska in stop-motion animacije

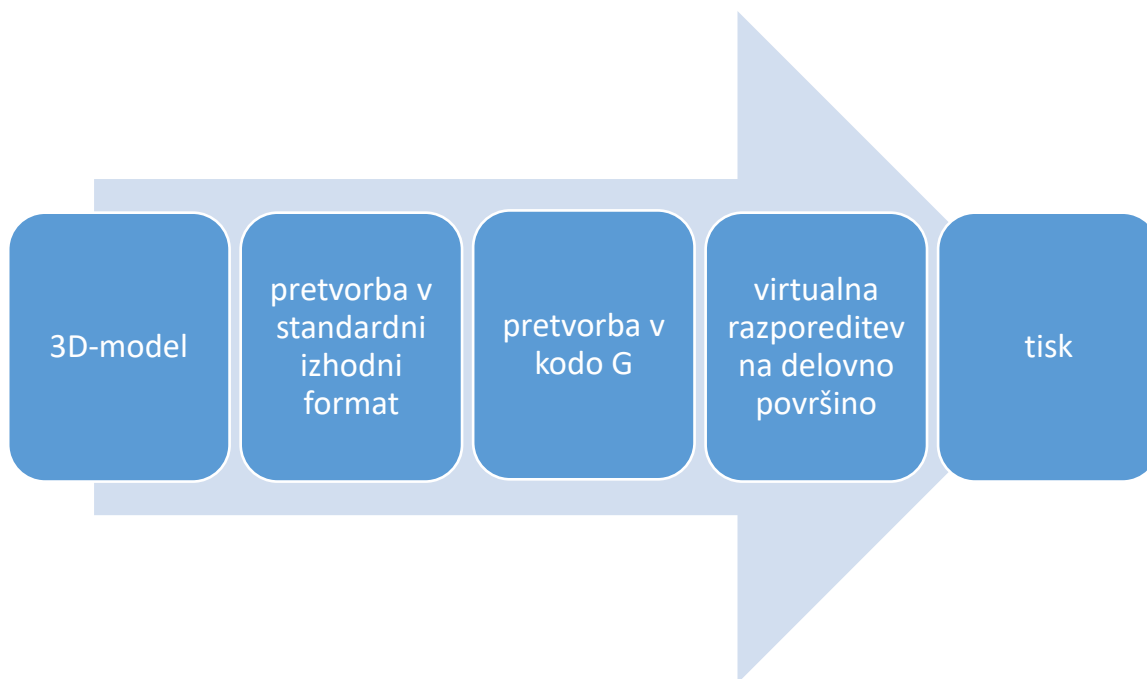


Slika 1: Število zadetkov v posameznem letu v zbirki Web of Science, za iskalni profil (*3D OR D OR 3-dimension* OR three-dimension* OR threedimension**) AND *print** AND (*"Stop-motion" OR "Stop - motion" OR "Stop motion"*) AND *animation**

2.1 ADITIVNA PROIZVODNJA

Tradicionalna proizvodnja je gnala industrijsko revolucijo, ki nam je omogočila svet kot ga poznamo danes, vendar je kljub temu postavila nepremostljive omejitve, ki ustvarjajo težnjo po novih pristopih. Manufaktura, ki je sopomenka za proizvodnjo prihaja iz francoske besedne zveze za »*ročno izdelano*«, vendar ta etimološka beseda ni več primerna za opis današnjega stanja moderne proizvodnje. Litje, oblikovanje in strojna obdelava so kompleksni procesi, ki vključujejo orodje, stroje, računalnike in robote. Opisane tehnologije so subtraktivne, kar pomeni, da so predmeti izdelani z odvzemanjem (subtrakcijo) materialov z obdelovanca. Končni izdelki so omejeni z zmožnostmi orodij, uporabljenih pri

izdelavi. Ravno nasprotno od tega je aditivna proizvodnja ime za skupino nastajajočih tehnologij, ki ustvarjajo predmete od spodaj navzgor z dodajanjem materialov v plasteh ali slojih, zato jih imenujemo tudi slojevite tehnologije ali tehnoloogije 3D-tiska. Generalizirani koraki aditivne proizvodnje z dodajalnimi tehnologijami so prikazani na sliki 2.



Slika 2: Koraki aditivne proizvodnje (vir: (1))

Proces aditivne proizvodnje se začne s 3D-modelom predmeta, navadno izdelanega v računalniškem *CAD* programu ali z 3D skenom dejanskega predmeta. Specializirani program razreže tak model na več plasti ter tako ustvari datoteko, ki jo pošljemo v napravo za aditivno proizvodnjo. Slednja nato izdelava predmet tako, da sloj za slojem natisne oziroma oblikuje material v obliki plasti. (2)

2.2 PREDSTAVITEV TEHNOLOGIJ 3D-TISKA

V tem poglavju so predstavljene tehnologije iz vseh sedmih generičnih skupin po opredelitvi organizacije za razvoj standardov *ASTM*. Podrobneje so opisane izvirne, prve razvite tehnologije iz vsake skupine, na podlagi katerih so nastale današnje tehnologije. Če poznamo delovanje izvornih tehnologij, razumemo tudi delovanje vseh njihovih nadgradenj oziroma modifikacij in tudi povsem na novo razvitih in še razvijajočih se tehnologij. (1)

Podrobneje je predstavljena tehnologija fotopolimerizacije v kadi, ki smo jo uporabili za izvedbo naloge. Ostale tehnologije so še:

- kapljično nanašanje ali brizganje materiala (*ang. Material Jetting*),
- kapljično nanašanje ali brizganje veziva (*ang. Binder Jetting*),
- spajanje slojev praškastega materiala (*ang. Powder Bed Fusion*),
- lasersko navarjanje (*ang. Direct Energy Deposition*),
- laminacija pol (*ang. Sheet Lamination*),
- ekstrudiranje materiala (*ang. Material Extrusion*). (1)

2.2.1 Fotopolimerizacija v kadi (*ang. Vat Photopolymerization*)

Tehnologije tiska, pri katerih poteka proces fotopolimerizacije, uporabljajo kot osnovni material za gradnjo oziroma tisk predmetov tekoče fotopolimere, ki se utrjujejo z obsevanjem. Večina fotopolimerov je občutljiva za sevanje v ultravijoličnem delu, v nekaterih primerih pa se za utrjevanje lahko uporablja tudi vidni spekter svetlobe. Ob obsevanju se sproži kemijska reakcija in tekoči polimeri se spremenijo v trdno obliko. Ta reakcija je kompleksna in vključuje različne reaktante. Imenujemo jo fotopolimerizacija.

Za fotopolimerizacijo v kadi sta razviti dve primarni konfiguraciji, dodatna pa se razvija in še ni popolnoma komercializirana. Prva je vektorsko skeniranje (*ang. vector scan*), ki se splošno uporablja pri komercialnih stereolitografskih tiskalnikih. Druga je projekcija z uporabo maske (*ang. mask projection*), ki sočasno obseva celoten sloj tekočega fotopolimera. Tretja uporablja dvofotonski način, ki je v osnovi visoko ločljiv točkasti ali rastrski (*ang. point by point*) način. (1)

2.2.1.1 Stereolitografija (SLA)

Med tehnologijami, ki jih uvrščamo v generično skupino tehnologij na osnovi fotopolimerizacije v kadi je bila najprej razvita stereolitografija (SLA ali LA), ki je tudi najstarejša in ena najbolj razširjenih tehnologij 3D-tiska.

Delovanje

Tiskalnice s tehnologijo SLA sestavljajo perforirana delovna platforma ali plošča, kad s tekočim fotopolimerom, sistem za nanašanje fotopolimera z vakuumskim strgalom, UV-laser (moč do 1W) ter računalniško vodeni optični sistem za skeniranje, ki vključuje leče in zrcala. Princip temelji na strjevanju fotopolimera z uporabo vodenega zunanega vira

svetlobe. Delovna platforma s perforirano ploščo v kadi se pomika v smeri Z in se spusti pod površino tekočega fotopolimera za prvega sloja. Optični sistem naprave preveri točnost nivoja površine fotopolimera, da se lahko laserski žarek pravilno fokusira. Nato žarek z določeno dolžino ekspozicije in močjo sevanja skenira površino tekočega fotopolimera in utrdi potrebno konturo – steno delovnega 3D-predmeta v trenutnem sloju. Po končanem skeniranju se delovna plošča spusti za debelino sloja, sistem za nanos in poravnavo z vakuumskim strgalom pa enakomerno poravnava novi sloj tekočega fotopolimera. Nato sistem miruje, dokler se gladina fotopolimera ne popolnoma umiri. Opisano sosledje se ponavlja pri vsakem sloju. (1)

Pomen in uporaba opornih in podpornih struktur

Pri dodajalnih tehnologijah moramo pogosto uporabljati podpore. Izjema so le nekatere tehnologije, ki uporabljajo praškast material v t. i. posteljah (*SLS, 3DP, ...*). Ker gradnja 3D-predmeta pri tehnologiji *SLA* poteka v kadi s tekočim fotopolimerom, je nujno uporabiti opore. Pri *SLA* ločimo dve zvrsti opor, in sicer osnovne in podporne. Vsak delovni 3D-predmet mora pred začetkom imeti osnovno oporo, ki omogoča vezanost predmeta v procesu tiska na delovno ploščo, neovirano gibanje sistema za nanašanje in poravnavo polimera (vakumsko strgalo) in kompenziranje izboklin in nagibov na delovni površini. (1)

Sočasen tisk podpor pa je nujen pri izdelavi predmetov s previsnimi deli. Previs je vsak del predmeta, katerega kot je manjši od 30° oziroma večji od 150° glede na normalo. (1)

Naknadna obdelava (*SLA*)

SLA je ena najzahtevnejših tehnologij v fazi postprocesiranja oziroma naknadne obdelave. Najprej je treba natisnjeni 3D-predmet previdno odstraniti z osnovne plošče. Pri tem je dobro uporabljati rokavice, saj je neutrjen, tekoč polimer nevaren za kožo. Nato se odvečni tekoči fotopolimer odcedi in predmet dodatno očisti s kemičnimi sredstvi, najpogosteje na osnovi tripropilen glikol monometil etra (*TPM*) ali propilen karbonata, na koncu pa se še izpere v izopropil alkoholu (*IPA*). (1)

Predmet po tisku še nima končne trdnosti, zato ga je treba dodatno obdelati. Ta postopek imenujemo naknadno utrjevanje v UV-peči. Takšne peči so t. i. naprave za naknadno utrjevanje - *PCA* (ang. *post curing apparatus*). Temperatura, pri kateri se predmet utrjuje, je odvisna od vrste uporabljenega polimera ter mase in volumna 3D-predmeta. (1)

Proces naknadne obdelave se konča z odstranitvijo podpornega materiala in zaključeno površinsko obdelavo, ki lahko vključuje tudi brušenje, vrtanje, peskanje, itd., da se doseže zahtevana končna kakovost površine. (1)

2.3 PRIPRAVA MODELOV ZA TISK

Blender je računalniški grafični program, ki se uporablja za izdelavo 3D-modelov, animiranih filmov, simulacij, vizualnih učinkov, interaktivnih aplikacij, video iger ter obogatene in virtualne resničnosti. Omogoča 3D modeliranje, pripravo za 3D-tisk, določanje UV-koordinat teksture in UV-teksturiranje, rastrsko obdelavo 2D grafik in fotografij, video montažo z učinki, izdelavo armatur vključno z inverzno kinematiko, simulacije delcev, tekočin, vetra in dima, simulacije mehkih teles, las, dlake in tkanin, 3D- in 2D-animiranje ter sledenje video kameri (*ang. camera tracking*). Poleg drugih odlik ima tudi vgrajen igralni pogon (*ang. game engine*), pogon za Newtonovo fiziko (*ang. bullet engine*) in fotorealistični izris (*ang. cycles render*). (1)

2.3.1 3D Print Toolbox

Blender ponuja poleg svojih osnovnih orodij tudi dodatno zbirko orodij, ki jo aktiviramo tako, da vklopimo relevanten *addon*, ki ga najdemo v meniju:

File > User Preferences > Addons > Mesh: 3D Print Toolbox. (1)

Ob vklopu *3D Print Toolboxa* se na levi strani pojavi nov tabulator, kjer se nahaja nabor dodatnih orodij. *Blender* se nenehno razvija in z njim tudi orodja za 3D-tisk. Za zdaj lahko pripravimo modele do datoteke *.stl*, ki jo je treba z drugim programom prevesti še v kodo G (*ang. G-code*). (1)

2.3.2 Pomembne smernice pri pripravi modelov za 3D-tisk

Pogoste napake pri pripravi modelov za 3D-tisk:

1. Spodnja površina 3D-modela ni točno postavljena na pravilno tiskalno površino ($Z=0$). To napako odstranimo s tem, da model premaknemo po osi *Z* tako, da so spodnji poligoni modela v višini tiskalne površine.
2. Pogost je tudi problem z normalami poligonov modela. Pri nekaterih manipulacijah modelov se lahko zgodi, da se normale površin med postopki obrnejo, zaradi česar

se model ne natisne ali pa se natisne samo del modela s pravilno obrnjenimi normalami. Ta problem lahko odpravimo tako, da obrnemo normale v pravo stran.

3. Pri modelih se pogosto pojavi tudi problem mnogoterosti ali vodotesnosti (*ang. non-manifold*), kar pomeni, da ni jasno, katere površine 3D-modela so zunanje in katere notranje. 3D-model mora biti »zaprt«, da lahko algoritem izračuna volumen objekta. Če kocki npr. zbrisemo en poligon, bo model *non-manifolden*, ker je tako brez debeline oz. volumna. V kolikor želimo natisniti kocko, ki bo na eni strani odprta to dosežemo na način, da ji določimo ustrezno debelino sten. (1)

2.3.2.1 Gostota mreže

Optimalna gostota mreže je odvisna od več dejavnikov: od modela, od velikosti v kateri želimo objekt natisniti ter od samega postopka 3D-tiskanja. Model, ki nima zaobljenih površin ne potrebuje velikega števila poligonov. Pri zaobljenih modelih je gostota odvisna od velikosti modela. Za tiskalnike, ki omogočajo visoko natančnost tiska in s tem majhne velikosti modelov, gostoto mreže prilagodimo glede na željeno natančnost objekta. (1)

Vpliv števila poligonov na tisk

Število poligonov vpliva na natančnost tiska in na hitrost, predvsem pri izvozu/uvozu in prenosu datotek, deloma pa tudi pri samem tiskanju, zato je smiselno, da pri gostoti mrež ne pretiravamo s številom poligonov. (1)

Gostota mreže 3D-modelov

Enakomerna gostota mreže je zaželena, vendar je možna samo pri preprostih modelih, kot so nekateri konveksni poliedri, katerih stranske ploskve so med sabo skladni pravilni mnogokotniki. V praksi opazimo, da najlepše rezultate dosegamo z modeli, ki imajo čim bolj kvadratne poligone po celotni površini. (1)

2.4 ANIMACIJA

Animacija je rezultat postopka, ki tako v tehničnem kot v umetniškem smislu ustvarja gibajoče slike (*ang. motion pictures*). Gibajoče slike so zaporedje slik, ki so ena za drugo predstavljene na določenem mediju in tako ustvarjajo optično iluzijo kontinuiranega gibanja. V časovnem zaporedju predhodno sliko ponavljajoče zamenja nova slika, ki prikazuje majhno spremembo nekega stanja (velikosti, oblike, barve, teksture in tako dalje) in/ali napredek gibanja. Spremembe stanja in gibanja so v realnosti večinoma zvezni pojavi, v

animacijah pa jih kot takšne dojamemo zaradi specifičnega delovanja človeškega vidnega sistema in percepcije.

Animacijske tehnike, ki jih danes poznamo so sledeče:

- risana animacija,
- stop-motion animacija,
- računalniška animacija.

Zvrsti animiranega filma so definirane glede na material, ki ga uporabljamo za izdelavo animacije. (3)

2.4.1 Stop-motion animacija

Če pogledamo na animacijo z drugega zornega kota, je pravzaprav vsaka animacija v svojem bistvu stop-motion animacija. Je proces zajemanja posameznih trenutkov, ki jih nato združimo ter tako ustvarimo vtis gibanja, pa naj bo to s pomočjo modelov ali risb.

Kar je splošno znano pod pojmom stop-motion animacija je zamudno delo ustvarjanja in slikanja modelov ali lutk, v serijah minimalnih premikov. Za novince je to lahko ena od bolj dostopnih umetniških tehnik, saj za izdelavo končnega izdelka ne potrebujemo kaj več od predmetov, ki jih najdemo med starimi otroškimi igračkami. Roke umetnika pa lahko to tehniko popeljejo v povsem nove razsežnosti. (4)

Kot način dela stop-motion animacija od ustvarjalca zahteva da vzame v roke lutko in jo korak za korakom s pomočjo različnih tehnik oživi. V nadaljevanju je predstavljena tehnika animacije obraza lutke z menjajočimi se obrazi. (5)

2.4.1.1 *Obrazne armature*

Toga glava, narejena iz plastike, najboljše deluje pri stiliziranih lutkah z enostavnejšim videzom, vendar ostale, zahtevnejše lutke, potrebujejo več mobilnosti na obrazu. Zato, ker so človeški in živalski obrazi velikokrat prav tako gibljivi kot preostanek telesa, so obrazi nekaterih lutk opremljeni z armaturnimi deli, s pomočjo katerih je obraz animiran. Posamične lopatice, žice ali drugi mehanizmi so lahko vgrajeni v obraz lutke z namenom, da simulirajo premikanje čeljusti, ust, čela in obrvi. V veliko primerih je premikajoča se obrazna armatura prekrita s fleksibilnim materialom kot sta npr. pena ali silikon; kar daje

površini obraza fleksibilnost in izgled prave kože. Potiskanje ali vlečenje obraznih lopatic daje lutki edinstven razpon možnih emocij, ki jih animator lahko uporabi. (5)

2.4.1.2 Menjajoči se obrazi in hitro prototipiranje

Še ena nastajajoča tehnologija, ki je implementirana v različne aspekte konstrukcij lutk in setov, je hitro prototipiranje ali 3D-tisk. Osnovni koncept za to metodo je izdelava računalniškega 3D-modela in tisk le-tega kot fizično repliko. Tehnologija hitrega prototipiranja ima veliko drugih načinov uporabe in implementacij, vendar jo je film *Coraline* uveljavil kot uporabno tehniko animacije. Področje filma, kjer je bila ta tehnika najbolj uporabljena je bila animacija obraza določenih glavnih likov. Obrazi na likih, kot so Coralina mama Wybie, druga mama in Coraline sama so bili sestavljeni iz tankih menjajočih se mask, ki so bile odstranjene in zamenjane za vsako sličico pri procesu animacije. Animacija z menjajočimi se deli za obrazno mimiko je tehnika, ki je obstajala od nastanka stop-motion animacije. Najverjetneje se je razvila iz logike za ročno narisano animacijo, kjer je vsaka sličica sestavljena iz ločenih skic, vsake naslednje drugačne od prejšnje, ki so jih postavili pod kamero za animiranje in posneli. Adaptacija te ideje v stop-motion animacijo je pomenila, da je morala biti vsaka sličica sestavljena iz drugačnega obraza, ki je bil zamenjan za vsako naslednjo sličico.

Tehniko menjajočih se obrazov naj bi prvi uporabil ameriški animator *Howard S. Moss* leta 1917. Večina njegovih filmov je izgubljenih, vendar v peščici ohranjenih nastopa hecna lutka s pretirano obrazno mimiko (Slika 3).



Slika 3: Serija menjajočih glav (vir: (6))

Majhno število vmesnih obrazov je pomagalo ustvariti tranzicijo iz enega ključnega izraza v drugega za izdelavo karikiranega efekta.

V zadnjih letih se je tehnika ponovno pojavila pri nekaterih lutkah v filmu *Nočna mora pred božičem* ter *James in orjaška breskev*. V teh primerih so bili obrazi na zadnji strani včasih opremljeni z magneti, da jih je bilo lažje pritrditi na lutkino glavo in jih obdržati na pravem mestu. Več kot očitno sta bila pri velikem številu obrazov zelo pomembna številčni in označevalni sistem, saj je šlo pri veliko obrazih le za minimalne spremembe v izgledu.

Prednosti pri uporabi menjajočih se obrazov sta predvsem zmožnost doseganja visoke palete izrazov in gladkost prehodov med njimi, česar samo z eno glavo ni mogoče doseči. Izziv, ki se pojavi pri tej tehniki je velika količina dela pri oblikovanju obrazov in ustrezno beleženje le-teh na zaslonu. Uporabljeni materiali, pa naj bo to plastika ali glina, velikokrat izgubijo obliko po določenem času, kar ustvari problem ohranjanja konsistentnosti izgleda.

Napredek v tehnologiji, ki je bila uporabljena za menjajoče se obraze pri filmu *Coraline* je povezal moderno računalniško animacijo in prinesel natančnost, ki jo ta omogoča v svet stop-motion animacije. Proces izdelovanja menjajočih se obrazov za *Coraline* se je začel s tradicionalnimi metodami pred uporabo digitalnih. Obrazna mimika in sinhronizacija ustnic sta bili oblikovani in animirani v 2D-tehniki, s pomočjo katere so nato modelirali ključne izraze iz gline. Glinene lutke so nato skenirali in nato v računalniku animirali 3D-modele in generirali vmesne obraze za prehode med izrazi. Vsaka ključna sličica obraza je bila nato izvožena v *STL* (ang. *stereolithography*) formatu in natisnjena na 3D-tiskalniku. (5)

3 EKSPERIMENTALNI DEL

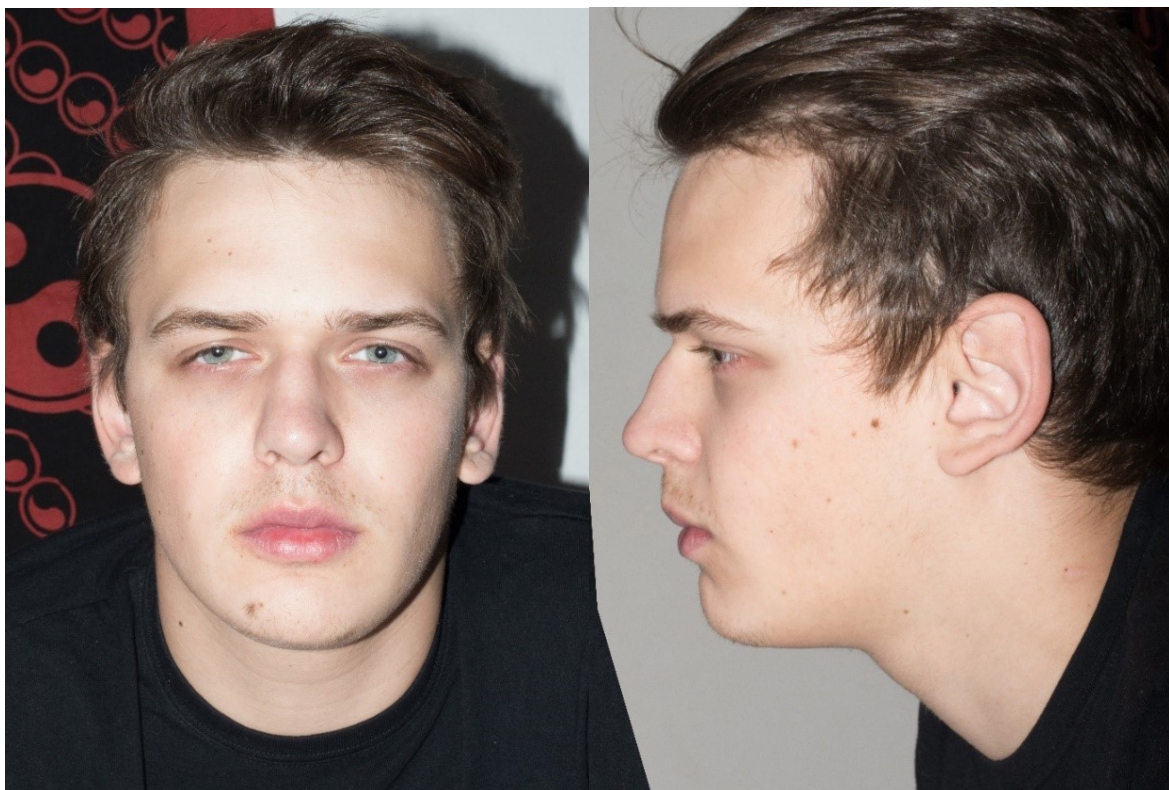
Pri delu smo za 3D modeliranje uporabili program *Blender 2.79*. Tisk smo izvedli s tekočim fotopolimerom bele barve V4 ob uporabi tiskalnika *Form 2* s programsko opremo *PreForm*. Naknadno obdelavo natisnjenih objektov smo izvedli s sprejanjem in z barvanjem. Pri tem smo uporabili:

- sprej *Clash C11 Carpenter Orange*,
- akrilna barva *Graduate 500 Cadmium Red*,
- akrilna barva *Graduate 573 Portrait Pink*,
- akrilna barva *Gruden 806 Raw Siena Hue*,
- akrilna barva *Gruden 901 Carbon Black*,
- neodim magneti premera 5mm in globine 2mm,
- univerzalno sekundno lepilo *Cianokol*,
- 90% raztopina izopropilnega alkohola.

3.1 METODE

3.1.1 Ustvarjanje 3D elementov

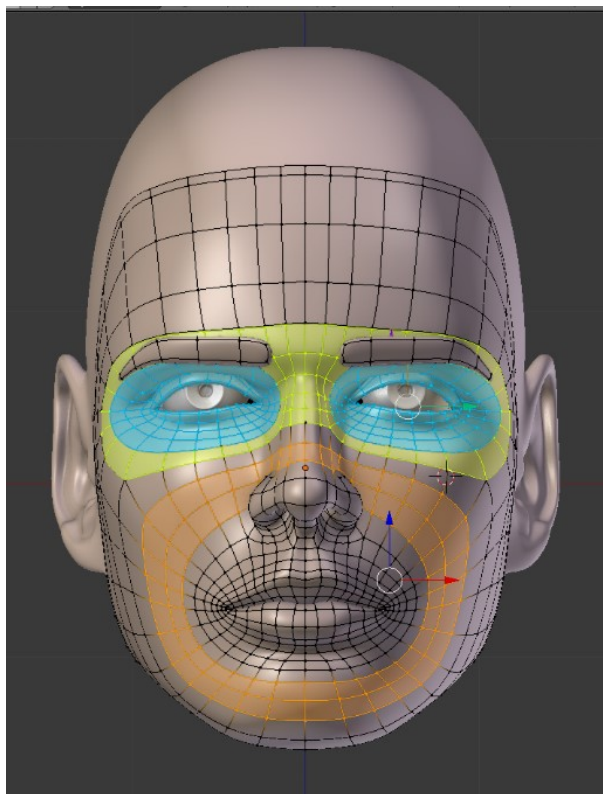
3D-model glave lutke smo izdelali v programu Blender, po izgledu realistične človeške glave. *Blender* ima vgrajeno možnost uvoza referenčnih datotek in modeliranja z njihovo pomočjo. Za referenčne slike smo uporabili stransko in sprednjo fotografijo človeškega obraza (Slika 4), kateri sta nam pomagali pri pravilnem postavljanju verteksev in naredili modeliranje hitrejše in bolj natančno.



Slika 4: Referenčna slika frontalno (levo) in s profila (desno)

Ko smo nastavili referenčne datoteke smo začeli z modeliranjem. Objektu smo najprej dodali dva preoblikovalca (*ang. modifier*); zrcaljenje (*ang. mirror*) in glajenje (*ang. subdivision surface*). Prvi prezrcali objekte čez določeno kordinatno os, drugi pa razdeli poligone na širi dele tako, da dobimo mrežo višje ločljivosti. V nastavitvah smo pri preoblikovalcu za zrcaljenje (*ang. mirror modifier*) izbrali možnost zrcaljenja čez X-os ter spajanje zrcaljenega predmeta z originalnim na razdalji manjši od 1mm. S tem smo omogočili modeliranje le desne polovice obraza, katero je program zrcalil in tako ustvarjal celoten simetričen model obraza. Pri preoblikovalcu za glajenje (*ang. subdivision surface modifier*) smo se odločili za stopnjo subdivizije 3, ki je bila za naše potrebe optimalna rešitev. Pri visokih stopnjah subdivizije se zaradi števila verteksev računalnik upočasni, pri nižjih stopnjah pa je ločljivost mreže slaba in model nenatančen.

Pri modeliranju obraza smo bili ves čas pozorni na topologijo mreže. Topologija vpliva na premikanje točk mreže, zaradi česar je pomemben faktor pri animaciji modela; neustrezno grajena topologija vodi v deformacije in abnormalne premike mreže. Pri modelu obraza smo oblikovali topologijo skladno z zgradbo mišic človeškega obraza (Slika 5). z oranžno barvo je označena smejalna mišica; z modro očesna votlina in očesne mišice; z zeleno pa nosne mišice, mišice na območju obrvi in mišice pod očesi.



Slika 5: Topologija modela obraza

Vratu in ramen nismo sami modelirali, saj na tem predelu ni veliko pomembnih detajlov in bo pri lutki služil bolj kot podstavek za glavo. Model ramen smo izdelali s pomočjo odprokodnega programa za izdelavo človeških 3D-modelov *Makehuman*.

3.1.2 Animacija

Tako izdelanemu obrazu smo nato dodali še obrazno mimiko, katero smo tudi modelirali po izgledu realistične človeške glave. Opazovali smo kako nasmeh spremeni obraz, katere mišice se napnejo in tako na podlagi slik ter tudi z ogledovanjem svoje obrazne mimike v ogledalu iz modela resnega obraza izdelali še ključno sličico za nasmeh.

Odločili smo se za animiranje modela s pomočjo ključev za preoblikovanje (*ang. shape key*). Ustvarili smo ključ za nasmeh, ter začeli z modeliranjem ključne sličice za nasmeh. Pri tem smo si pomagali z referenčno sliko nasmejanega obraza ter z opazovanjem lastne mimike v ogledalu, saj smo tako lažje opazili spremembe obraznih potez in mišic. Pri tem koraku smo veliko uporabljali proporcionalno urejanje mreže (*ang. proportional edit*), saj omogoča spreminjanje mreže tako, da premika tudi točke, ki ležijo v bližini točke ki jo manipuliramo. To omogoča preoblikovanje mreže na organski način, premikamo le eno ključno točko in ostale točke v bližini ji sledijo. S tem se izognemo premikanju vsake točke posebj, kar je zamudno in pri velikih mrežah velikokrat neuspešno delo.

Obraz smo animirali tako, da smo na časovnici dodelili začetni ključni sličici vrednost ključa za preoblikovanje (0), končni pa maksimalno (1). Odločili smo se za uporabo šestnajstih ključnih sličic, saj je to najmanjša vrednost, pri kateri naše oko gibanje zaznava kot gladko. Lahko bi se odločili za uporabo več ključnih sličic, vendar pri rezultatu ne bi bilo bistvene razlike, tisk pa bi bil precej dražji.

3.1.3 Priprava za tisk

Preden smo model lutke pripravil za tisk smo ga v *Blenderju* povečali oziroma zmanjšali na želeno velikost. To smo storili tako, da smo v zavahku scena (*ang. scene*) izbrali za enoto scene centimetre, velikost enote pa nastavil na 0,001cm. Model lutke smo povečali tako, da je bila glava velika 4cm. Ko smo imeli model v želeni velikosti smo v objektnem načinu označili vse dele lutke ter izbrali funkcijo *Mesh > Apply > Apply scale*; da smo vsem modelom aplicirali izbrano velikost.

Lutko smo za tisk pripravili tako, da smo najprej v *Blenderju* preverili primernost modela za tisk s pomočjo razširitve programa za 3D-tisk. Vsak del modela smo preverili, da je vodotesen (*ang. manifold*). Ker nekateri deli modelov niso bili vodotesni, smo jih skušali popraviti z ukazom *Make manifold*, vendar je slednji spremenil izgled modela in se izkazal za neustrezno rešitev, zato smo napake odpravili znotraj programa *PreForm*. *PreForm* je program podjetja *Formlabs* namenjen pripravi modelov za tisk na njihovih tiskalnikih, na enem izmed katerih smo natisnili modele.

Iz *Blenderja* smo kot *.stl* datoteko izvozili 18 modelov - 16 ključnih sličic obraza, en model glave in en model ramen. Za optimalno obliko modelov smo preoblikovalce aplicirali v naslednjem vrstnem redu: najprej zrcaljenje, nato glajenje in nazadnje booleanove operatorje. Tako pripravljene modele smo nato odprli v programu *PreForm*, ter jih razporedili na delovno površino. Ob uvozu modelov v program nas je ta že sam opozoril, da modeli niso ustrezno pripravljene za tisk, saj v *Blenderju* nismo odpravili nevodotesnih robov, ter nam ponudil opcijo, da jih pred uvozom samodejno popravi. Ker je program *PreForm* lepše ohranil obliko modelov od *Blenderja* smo se odločili za to opcijo pri pripravi vseh modelov. Pri razporejanju smo bili pozorni na to, da postavimo čim več modelov na delovno površino, saj smo želeli natisniti modele v čim-manj prehodih in tako zmanjšati čas tiska, saj je tiskanje na *SLA* tiskalniku dolgotrajen proces. Modele nam je uspelo razporediti na dve delovni površini - na prvo smo postavili deset modelov obraza, na drugo pa ostalih šest modelov obraza ter modela ramen in glave. Postavljene modele smo najprej nagnili na

optimalno pozicijo za tisk, generirali podporne strukture ter nato preverili ali so pri teh nastavitvah ustrezni za tisk.

Ker datoteka *.stl* ne nosi podatkov o velikosti modela, je bilo modele ob uvozu v *PreForm* potrebno povečati. V orodni vrstici smo preverili velikost modela, ter ugotovili, da ga moremo 10-krat povečati, če želimo, da bo natisnjen v želeni velikosti. Ob nadaljnjem uvozu smo vse modele povečali 10-krat. Ker je šlo za tisk večje količine modelov je bila zelo uporabna funkcija programa *PreForm* za označevanje modelov. Na nosilcu podpornih struktur tiskalnik vsakemu modelu označi njegovo ime; kar mi je pomagalo pri razlikovanju modelov obraza, ki so se med seboj minimalno razlikovali.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

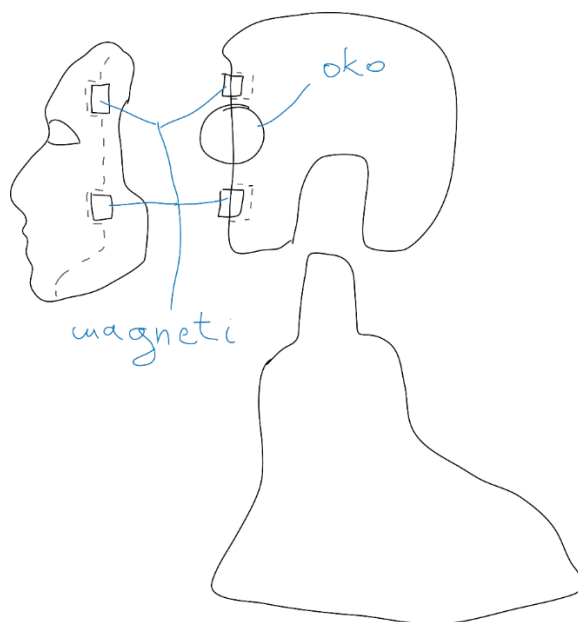
4.1 REZULTATI

4.1.1 Načrtovanje lutke

Lutko smo zasnovali tako, da je sestavljena iz treh delov:

- obraza, ki se pri animaciji menja,
- glave, ki se ne menja skozi proces animacije,
- ramenskega dela, ki se prav tako ne menja.

Čeprav se glava in ramenski del pri animaciji ne menjata, to še ne pomeni, da sta statična; glava je na ramenski del postavljena tako, da se obrača v levo in desno stran ter glavi omogoča delne funkcionalnosti prave človeške glave. To smo dosegli tako, da smo vrat podaljšali navzgor s tankim valjem, na katerega se nasadi glava, kar ji omogoča opisano mobilnost. Menjajoči se obraz se na glavo pritrdi z magneti, kar omogoča enostavno menjavo obrazov med animiranjem. Magneti postavijo obraz na točno mesto in pomagajo pri konsistentnosti posameznih sličic pri animaciji.



Slika 6: Načrt modela lutke

4.1.2 Ustvarjanje 3D elementov

Modelirati smo začeli z izdelavo očesa in vek. Najprej smo izdelali krog, ki smo ga prilagodili obliki zgornje in spodnje veke. Nato smo obrobo očesa večkrat ekstrudirali in

novo nastale vertekse prilagajali obraznim potezam s pomočjo referenčnih slik v sprednjem in stranskem pogledu. S tem smo dobili dve očesni votlini, ki smo ju na sredini povezali in tako ustvarili osnovo za modeliranje nosu.

To osnovo smo spodaj ekstrudirali do konca nosu, in jo oblikovali po obliki nosu glede na referenčne slike. Za doseg čim boljšega prilaganja referenčnim slikam je ključno dodajanje zank (*ang. edge loops*), s pomočjo katerih uravnavamo ukrivljenost površin in definiramo robove. Na koncu nosu smo dodali še dve luknji za nosni votlini, ki smo ju na vrhu zaprli, saj drugače model ne bi bil primeren za tisk.

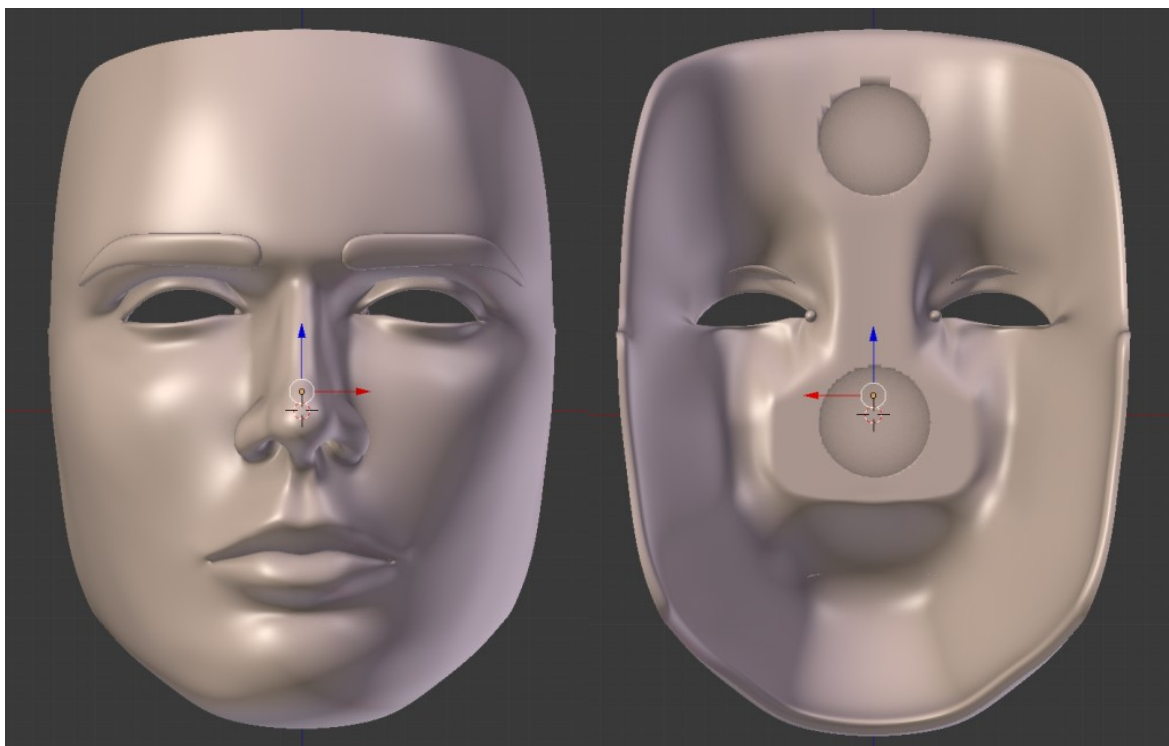
Nadaljevali smo z modeliranjem ust in ustne votline. Usta smo prav tako ustvarili s pomočjo kroga, ki smo ga prilagodili obliki ustne votline ter ga večkrat ekstrudirali in postopoma prilagajali obliki ust. Na notranji strani smo poskrbeli, da je bila ustna votlina zaprta, spet z namenom ustreznosti modela za tisk. Usta smo nato povezali z ostalim delom mreže.

Tako smo dobili vse glavne poteze obraza, ki smo jih nato začeli povezovati. Mrežo med glavnimi potezami smo sproti ustvarjali tako, da je čim bolje povezovala mreže osnovnih potez. To smo dosegli z ekstrudiranjem in dodajanjem zank. Poleg tega smo bili pri povezovanju mreže pozorni na topologijo obraza, ki je pomemben faktor pri animaciji modela.

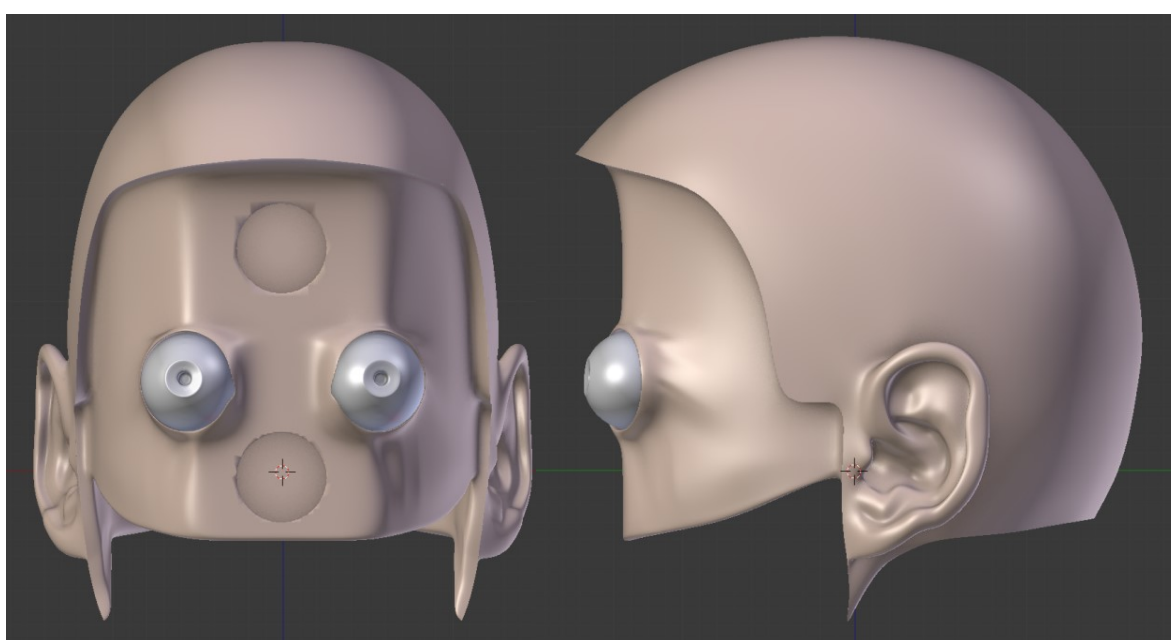
Nastalemu modelu obraza smo ekstrudirali vertekse na čelu tako, da smo ustvarili obliko glave do začetka vratu. Pri strani smo pustili prostor za uho, ki smo ga oblikovali posebej in naknadno priključili na osnovno mrežo.

Uho smo oblikovali na nekoliko drugačen način. Najprej smo v stranskem pogledu s pomočjo referenčne slike ustvarili plosko mrežo, ki se je prilegala ušesnim potezam. Točke na tej mreži smo nato postopoma pomikali levo in desno na X-osi, da smo dobili volumen ušesa. Tako nastalo uho smo nato povezali z osnovno mrežo glave. Na koncu smo posebej oblikovali še obrvi ter ju združili z osnovo mrežo.

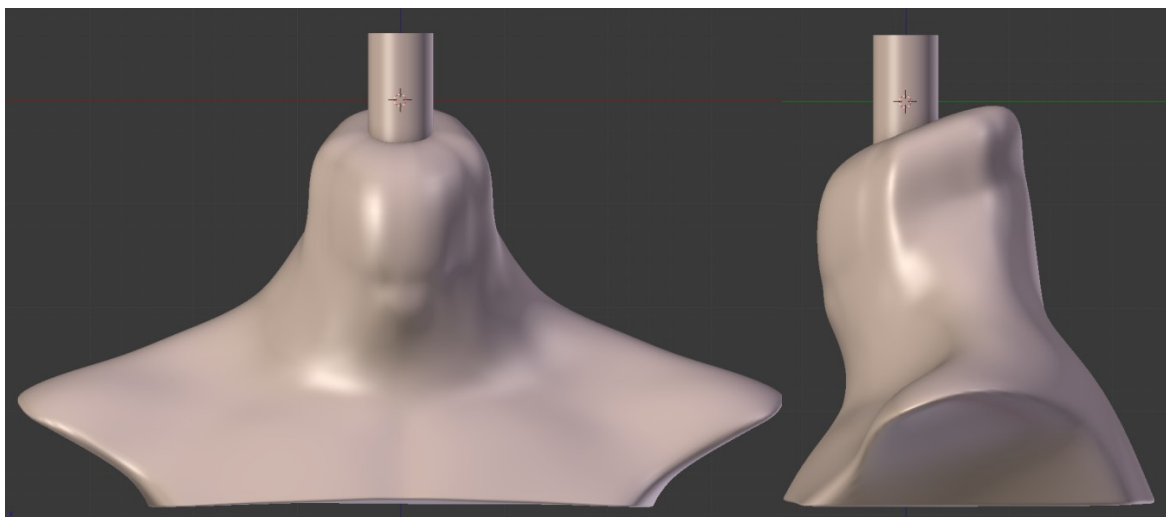
Ko smo imeli pripravljen model glave smo ga razrezali tako, da smo ločili obraz (Slika 7) od ostale mreže glave (Slika 8). Lutka je bila namreč zasnovana tako, da se pri animaciji menja le obraz. Oblikovali smo notranja dela modela obraza in ločenega modela glave tako, da sta se lepo prilegala. S pomočjo booleanovih operatorjev smo obema dodali dve luknji premera 5,2mm in globine 2,15mm. V ti luknji smo naknadno ustavili magnete za lažjo menjavo obrazov pri animaciji.



Slika 7: Menjujoči se model obraza spredaj (levo) in zadaj (desno)



Slika 8: Model glave frontalno (levo) in s profila (desno)

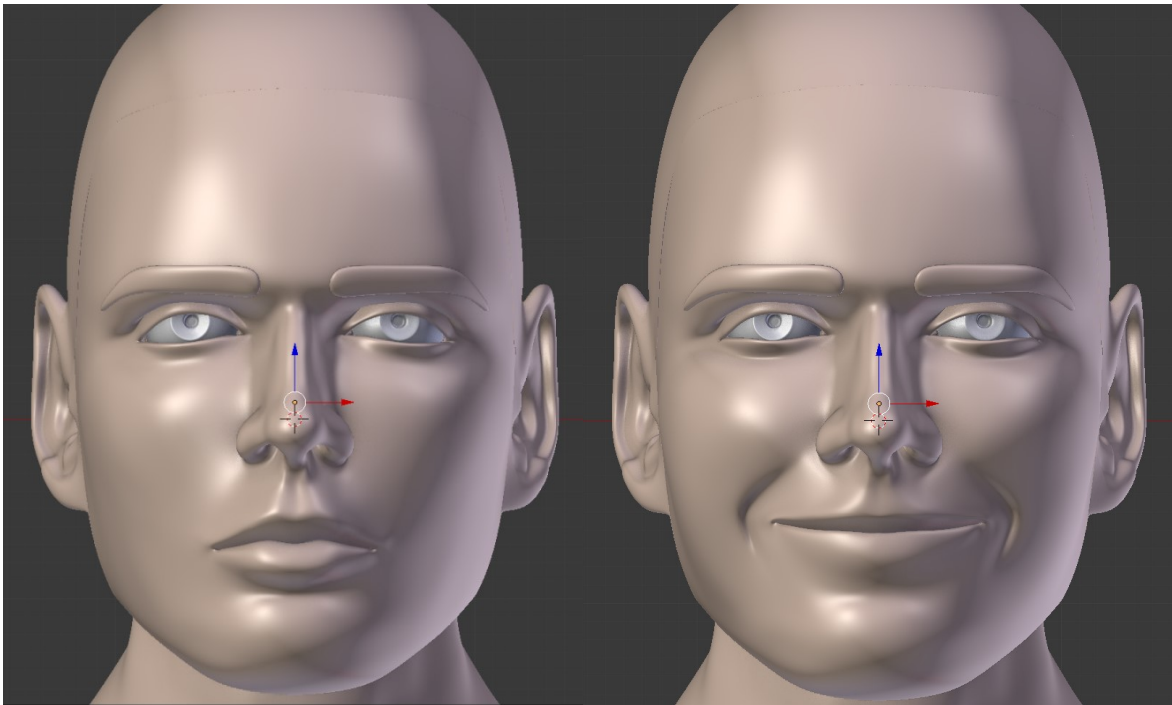


Slika 9: Model ramenskega del lutke frontalno (levo) in s profila (desno)

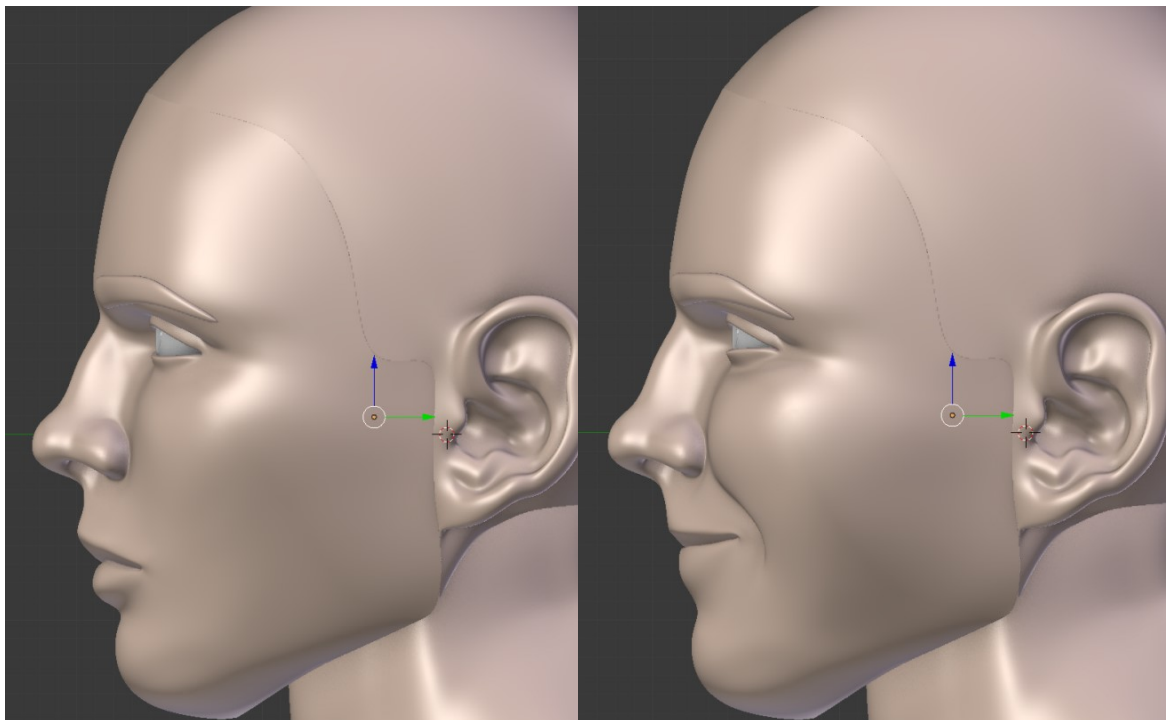
Model ramen smo izdelali s pomočjo odprokodnega programa za izdelavo človeških 3D-modelov *Makehuman*. Iz generiranega modela človeka smo izrezali del, ki je obsegal rame in vrat, ter ga prilagodili obliki in velikosti našega modela glave. V sredino mreže vratu smo dodali valj, ki smo ga od mreže glave odšteli tako, da je glavo možno nataktniti na vrat. Model vratu smo prilagodili glavi tako, da se ta lahko zavrti v levo in desno stran.

4.1.3 Animacija

Obraz smo animirali s pomočjo ključev za problikovanje (*ang. shape key*), pri tem načinu animacije animiramo tako, da osnovno mrežo manipuliramo in tako ustvarimo ključno sličico. Osnovnemu modelu smo razpotegnili koticica ust, ju privili in premaknili rahlo navzgor. Nato smo ustnicam zmanjšali volumen in ju potisnili nazaj proti zobom. Ko smo bili zadovoljni z izgledom ust smo ponovno opazovali obraz pri nasmehu in dodali še ostale poteze. Ugotovili smo, da se spremenijo tudi ličnice in celotno področje, kjer se nahaja smejalna mišica; od nosu okoli ust do brade. Ličnice smo dodatno izbočili in tako ustvarili smejalno gubo med usti in ličnicama. Okoli nosu smo mišici prav tako rahlo dodali volumen ter ličnico potegnili navzgor in ustvarili gubo pri spodnji vek. Slednjo smo tudi potegnili malenkost navzgor in ustvarili vtis priprtih oči.



Slika 10: Sprednja slika resnega obraza (levo) in slika ključne sličice za nasmeh (desno)

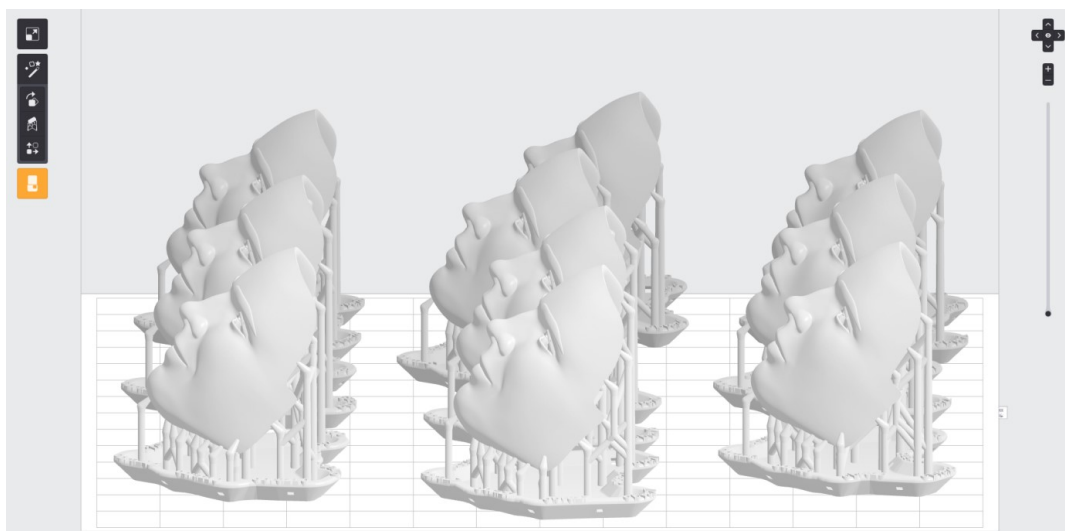


Slika 11: Stranska slika resnega obraza (levo) in slika ključne sličice za nasmeh (desno)

4.1.4 Priprava za tisk

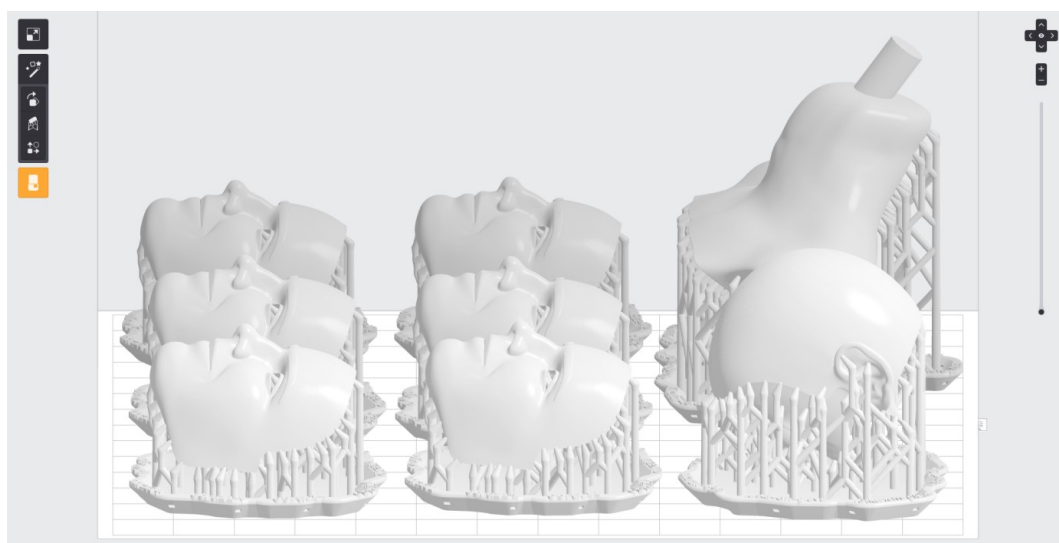
Prvih deset modelov smo postavili na delovno površino kot prikazuje slika 12. Nagnili smo jih tako, da so bili optimalno postavljeni za tisk detajlov na obrazu, ter nato generirali podpore za vseh deset modelov. Ker mi je program *PreForm* sporočal, da nekatera področja okoli oči ni mogoče natisniti pri trenutnih nastavitvah smo spreminjali nastavitve podpor,

dokler modeli niso bili natisljivi. To smo dosegli pri gostoti podpor (1,2), za konico podpore pa smo izbrali najmanjšo možno vrednost (0,4mm). Za debelino plasti smo nastavili vrednost 100 mikronov, saj so obrazi postavljeni v optimalno pozicijo za tisk. Pri tej debelini plasti je tako tiskalnik hkrati zagotavljal zadovoljivo in hiter tisk.



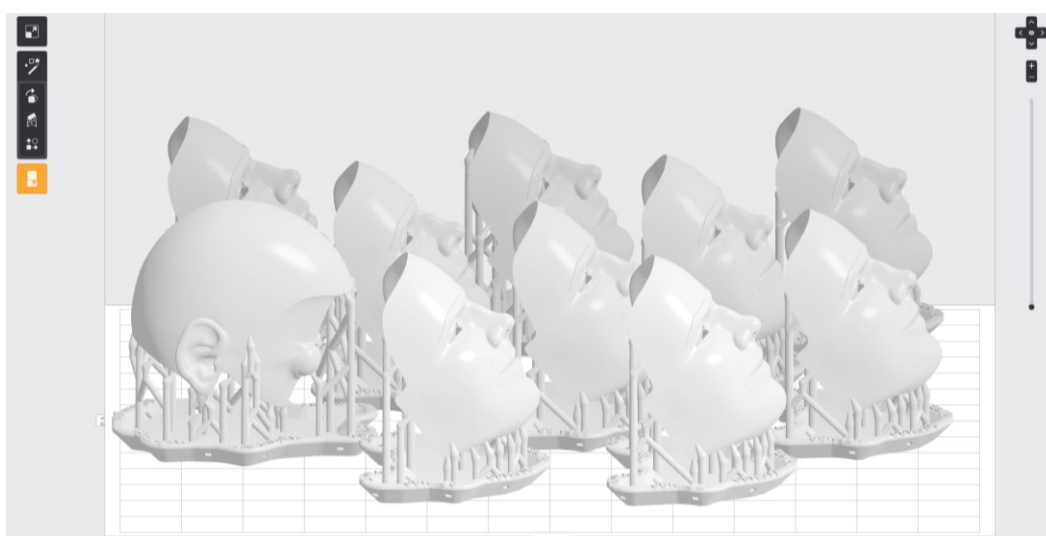
Slika 12: Postavitev 1

Za postavitev ostalih osem modelov smo uporabili spodnjo postavitev (Slika 13). Tudi pri tej postavitvi smo spreminjali orientacijo modelov in podporne strukture dokler nam ni program sporočil, da je postavitev primerna za tisk. Tukaj smo morali uporabiti nekoliko drugačno orientacijo glav, ter večjo gostoto podpornih struktur (1,5), kar se nam je zdelo nenavadno, vendar smo zaupali programu. Debelina konice podpornih struktur je ostala enaka (0,4mm). Zaradi drugačne postavitve obrazov smo pri tem tisku debelino plasti nastavili na najmanjšo možno vrednost (50 mikronov), da bi ohranil natančnost tiska, saj obrazi niso bili optimalno postavljeni.



Slika 13: Postavitev 2

Pri naknadni obdelavi smo ugotovili, da druga postavitev modelov ni bila ustrezna ter da se program ob visoki količini poligonov pri preračunu natisljivosti najverjetneje zmoti. Zaradi velike gostote podpornih struktur se je veliko modelov pri naknadni obdelavi poškodovalo. Poleg tega se noben od modelov obrazov ni lepo prilegal na model glave, zaradi česar smo te modele ponovno natisnili v dodatnem tisku (Slika 14). Pri dodatnem tisku smo na delovno površino postavili vse modele obrazov natisnjene v drugem tisku in modela obrazov iz prvega tiska, ki sta se poškodovala pri naknadni obdelavi. V dodatnem tisku smo natisnili tudi model glave, ki je bil prav tako natisnjen v drugem tisku. Modele smo orientirali kot pri prvem tisku, obrazom dodali podporne strukture gostote (1), glavi pa podporne strukture gostote (0,8). Vse strukture so imele debelino konice 0,4mm. Debelino plasti smo nastavili na 100 mikronov.



Slika 14: Dodatni tisk

4.1.5 Tisk in naknadna obdelava

4.1.5.1 Tisk

Modele smo tiskali na tiskalniku *Form 2* podjetja *FormLabs*, ki uporablja tehnologijo fotopolimerizacije v kadi, natančneje stereolitografije (*SLA*). Tiskalnik ima delovno površino velikosti 145x145mm in je zmožen natisniti modele do velikosti 175mm. Velikost laserskega snopa je 140 mikronov, debelino plasti pa lahko nastavimo od 25 do 100 mikronov. Za tisk smo uporabili bel material, ki ponuja možnost tiska s 100 mikronsko ali 50 mikronsko plastjo.

Prvi modeli so se tiskali 4 ure 27 minut, tiskalnik je za tisk 376 plasti porabil 50,69ml tekočega fotopolimera.

Za tisk drugega dela modelov je tiskalnik porabil 9 ur 51 minut, zaradi večjega števila plasti (1127) in večje natančnosti tiska. Pri tem tisku je tiskalnik porabil 99,42ml tekočega polimera.

Dodatni tisk poškodovanih modelov je trajal 4 ure 45 minut. Tiskalnik je za tisk 404 plasti porabil 56,73ml tekočega fotopolimera.

Neuspeli tisk

Pri dodatnem tisku modelov se niso vsi uspešno natisnili. Model glave se zaradi preredke postavitve podpornih struktur ni natisnil.



Slika 15: Neuspeli tisk

4.1.5.2 Naknadna obdelava

Po končanem tisku vsakega seta modelov smo jih dvakrat izprali v kopeli 90% izopropilnega alkohola, vsakič po 10 minut. Obdelane modele smo nato še izprali z vodo in začeli z odstranjevanjem podpornih struktur.

Strukture smo sprva odstranjevali s pomočjo klešč, s katerimi smo si pomagali pri odščipovanju podpor čim bližje stenam modela in pri tem pazili, da modelov nismo poškodovali. S to metodo smo imeli kar nekaj težav saj so na nekaterih mestih modela glave stene zelo tanke zaradi česar so se modeli hitro poškodovali (Slika 16). Po več neuspelih poskusih smo se odločili za odstranjevanje podpornih struktur s pomočjo vročega olfa noža. Nož smo segreli nad ognjem, nato pa odrezali podporne strukture tik ob modelu. Ta metoda se je izkazala za primernejšo, saj je bilo pri odstranjevanju struktur potrebne manj sile, zaradi

česar se modeli niso lomili. Ko smo strukture odstranili, smo vsakemu modelu na zadnjo stran pripisali številko modela, ki je bila izpisana na podstavku, da smo jih pozneje lažje razlikovali.



Slika 16: Poškodovana modela

Po odstranjevanju podpornih struktur so modeli potrebovali nadaljnjo obdelavo površine, saj je na mestih, kjer so bile podpore, ostal odvečni material. Odvečni material smo odstranili s pomočjo brusilnega papirja. Modele smo na mestih, kjer so imeli višek materiala pod tekočo vodo brusili dokler nismo odstranili ostankov podpornih struktur.



Slika 17: Natisnjeni in obdelani modeli

Ker so imeli modeli natisnjeni v drugi postavitvi veliko več podpornih struktur, se jih je pri odstranjevanju podpor veliko poškodovalo. Poleg tega se tudi po odstranitvi ostankov niso tako lepo prilegali na model glave kot modeli natisnjeni v prvi postavitvi. Zaradi tega smo se odločili za dodaten tisk vseh modelov natisnjenih z drugo postavitvijo,

poleg modelov 3 in 7 iz prve postavitve, ki sta se pri odstranjevanju podpornih struktur poškodovala.

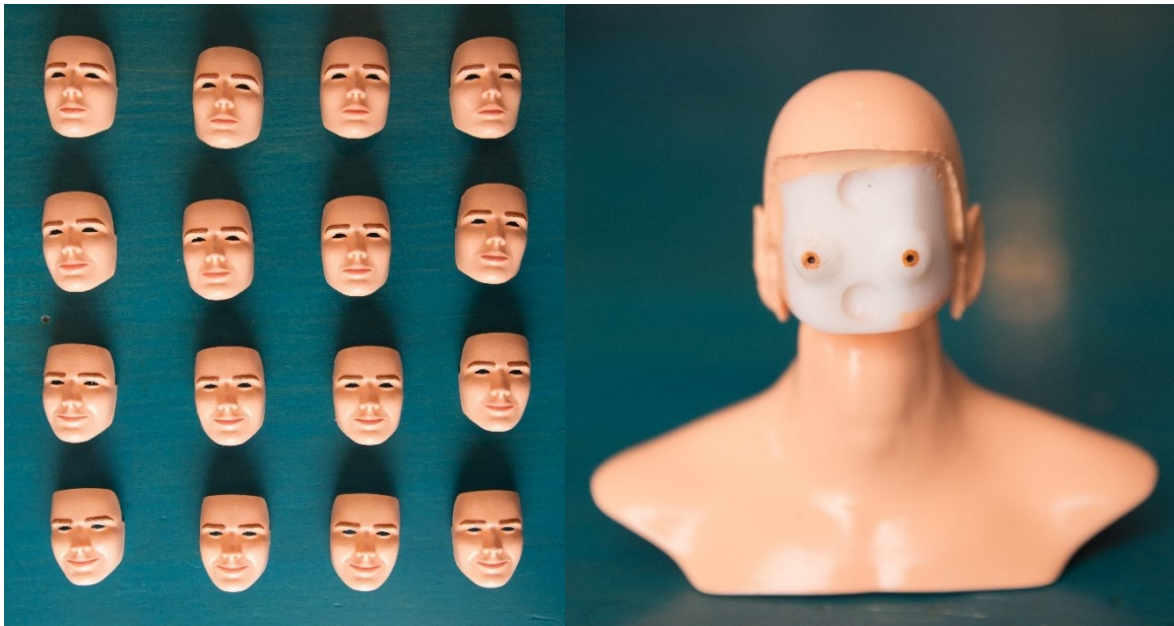


Slika 18: Površina modela prvega (levo) in drugega tiska (desno) po odstranjevanju podpornih struktur

4.1.6 Barvanje modelov in sestava lutke

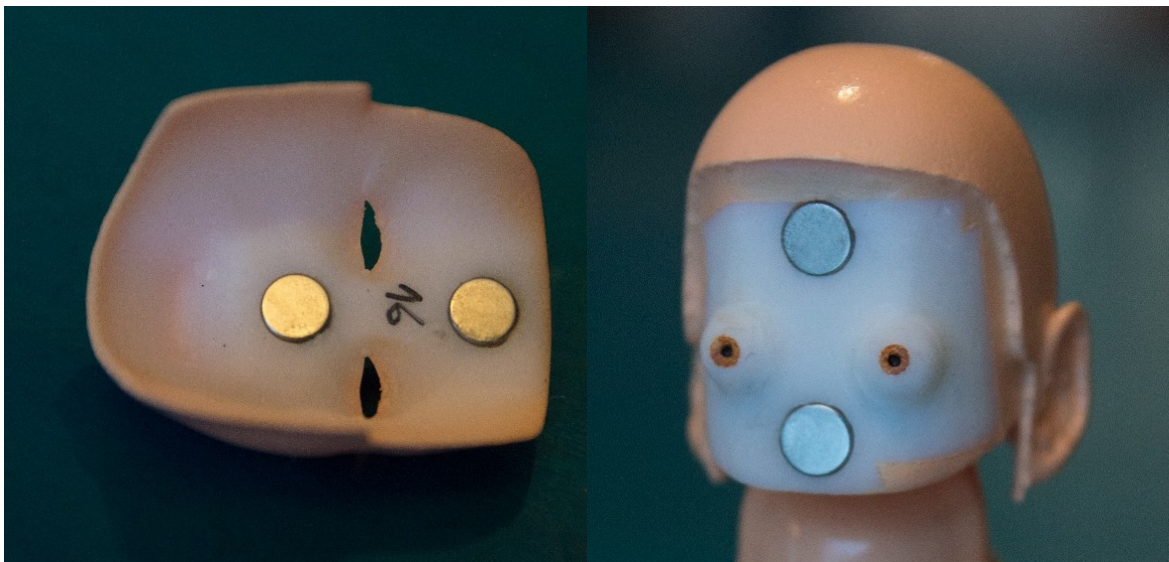
Ko smo končali z naknadno obdelavo modelov smo jih najprej vse pobarvali s sprejem kožne barve, saj smo tako najlažje dosegli konsistentnost odtenka kože pri vseh modelih. Modele smo postavili na podlago s sprednjo stranjo obrnjeno navzgor. Modelu glave smo pred sprejanjem zaščitili oči, saj smo želeli da ostanejo bele. Nato smo vse modele naenkrat enakomerno posprejali, ter jih pustili, da so se čez noč posušili. Ko so se posušili, smo postopek ponovili, tako da je bila barva enakomerna na vseh modelih.

Nato smo jim ročno dorisali še detajle na očeh, obrveh in ustih (Slika 19). Obrvi smo pobarvali s temno rjavo barvo, usta pa z mešanico rdeče, kožne in rjave akrilne barve.



Slika 19: Pobarvani modeli obrazov (levo) ter glave in ramenskega dela lutke (desno)

Tako narejenim modelom lutke smo dodali še magnete, da so pri menjavi obrazov modeli obrazov sami skočili na svoje mesto. Magnetni sistem močno olajša menjavo obrazov lutke pri animaciji. Vsak model obraza je zasnovan tako, da ima na zadnji strani dve luknji, v kateri smo postavili magnete. Prav tako ima model glave na sprednji strani dve luknji za magnete, ki se luknjam na obrazu popolnoma prilegajo. V vsako od teh lukenj smo s sekundnim lepilom prilepili po en neodim magnet premera 5mm in globine 2mm.



Slika 20: Modeli z vstavljenimi magneti

Na koncu smo lutko še sestavili - model glave smo nataknili na ramenski model, obraze pa se preprosto pritrdi in menja z magneti.



Slika 21: Končni izdelek

4.2 RAZPRAVA

Model lutke smo izdelali po referenčnih slikah človeškega obraza v programu *Blender*. To je kar zamudna metoda, saj moramo vsako točko uskladiti z referenčnimi slikami tako, da se jim mreža prilega. Ima pa ta metoda tudi prednosti, da mrežo sami ustvarjamo, zaradi česar je ta čistejša, brez nepotrebnih točk in da imamo popoln nadzor nad topologijo, saj jo sproti gradimo sami. S to metodo smo izdelal vse modele razen modela ramen in vratu, ki smo ga generirali s pomočjo programa *Makehuman*.

Animacija modela je bila prav tako dolgotrajen proces, saj je doseganje realističnih izrazov v računalniških programih samo s pomočjo referenc zahtevno opravilo. Izdelali smo ključno sličico za nasmeh in animirali eno sekundo mimike obraza s 16-imi sličicami. Model obraza iz vsake sličice smo izvozil kot *.stl datoteko*.

Modele smo nato pripravili za tisk v programu *PreForm*, pri čemer smo ugotovili, da je določitev prave gostote podpornih struktur zahtevnejše kot izgleda. Veliko modelov smo po tisku morali zavreči bodisi zaradi pregoste bodisi zaradi preredke postavitve podpornih struktur, čeprav nam je program sporočal, da so modeli pri teh nastavitvah natisljivi. Predpostavljamo, da se program pri velikem številu modelov na delovni površini zaradi velike količine točk zmoti.

Pripravljene modele smo natisnili na tiskalniku *Form 2* podjetja *FormLabs*, ki ima laserski snop debeline 140 mikronov. Tiskali smo z belim tekočim fotopolimerom, pri katerem je najmanjša debelina plasti 50 mikronov. Modele smo naknadno obdelali tako, da smo jih dvakrat potopili v kopel iz 90% raztopine izopropilnega alkohola. Ko smo tako odstranili odvečni fotopolimer je sledilo odstranjevanje podpornih struktur. Zaradi tankih sten pri modelih obrazov so se ti pri odstranjevanju struktur s pomočjo klešč hitro poškodovali. Odločili smo se za odstranjevanje podpornih struktur z vročim olfa nožem, kar se je izkazalo za veliko boljše metodo, saj je zaradi vročega noža pri odstranjevanju potrebne manj sile. Kjer so na modelih ostali vidni ostanki podpornih struktur, smo jih odstranili z brusilnim papirjem.

Ko so bili modeli naknadno obdelani, smo jih najprej dvakrat posprejali s sprejem kože barve nato pa še ročno dorisali detajle na očeh, obrveh in ustih. Dokončanim modelom smo v luknje za magnetne na obrazih in glavi s sekundnim lepilom prilepili še magnetne.

5 ZAKLJUČEK

Pri ponovni izdelavi lutke za stop-motion animacijo se ne bi odločili za izdelavo realističnega modela. Veliko lažja bi bila izdelava karikiranega modela, s povečanimi potezami, še posebej oči bi pridobile na funkcionalnosti, če bi jih izdelali tako, da bi v model glave vsadili dve premikajoči se kroglici. Pri realističnih proporcih to ni mogoče, saj sta očesni zrkli zelo majhni.

Pri modeliranju nam je zelo veliko časa vzelo modeliranje človeškega obraza po referenčnih slikah, veliko hitrejša bi bila izdelava modela s pomočjo 3D skeniranja obraza. Ima pa tako izdelan model to prednost, da sami ustvarimo celotno mrežo in je ta čistejša ter ima manj poligonov in jo posledično program tiskalnika lažje procesira. Poleg tega sami sproti ustvarjamo topologijo modela, medtem ko bi pri uporabi 3D skenerja bila potrebna retopologija modela, če bi želeli, da je ta uporaben za animacijo.

Če bi se ponovno lotili tiska vseh modelov, bi za tisk vseh modelov izbrali podobno konfiguracijo kot smo jo izbrali za dodatni tisk poškodovanih obrazov. Ta konfiguracija ima namreč veliko manj podpornih struktur kar močno olajša in skrajša postopek naknadne obdelave.

Večjo natančnost modelov bi lahko dosegli pri tisku s tehnologijo kapljičnega nanašanja ali brizganja veziva (*3DP*) ali pa s tehnologijo sintranja praškastega materiala (*SLS*), saj pri navedenih tehnologijah ne potrebujemo podpornih struktur, kar pomeni da bi se na ta način lahko izognili nevhvaležnemu postopku odstranjevanja le-teh. Nekatere praškaste tehnologije omogočajo celo večbarvni tisk, s čimer bi lahko skrajšali proces barvanja modelov.

V prihodnosti bi bilo zanimivo na podoben način izdelati lutko z več različnimi obraznimi izrazi in sinhronizacijo ust, tako da bi bila uporabna pri izdelavi krajšega stop-motion filma. Za tako veliko količino modelov različnih obrazov pa bi bila definitivno potrebna uporaba tehnologije, ki ne potrebuje podpornih struktur.

6 LITERATURNI VIRI

1. MUCK, T. in KRIŽANOVSKIJ, I. *3D-tisk*. Ljubljana : Založba Pasadena, 2015, str. 69-92 in 169-183.
2. CAMPBELL, T. in drugi. *Could 3D printing change the world? Technologies, potential, and implications of additive manufacturing* [dostopno na daljavo]. Atlantic Council, oktober 2011, str. 3-4. [citirano: 20.1.2018.]
<https://www.researchgate.net/publication/257942754_Could_3D_Printing_Change_the_World_Technologies_Potential_and_Implications_of_Additive_Manufacturing.>
3. ERZETIČ, B. in GABRIJELČIČ, H. *3D od točke do upodobitve*. Ljubljana : Založba Pasadena, 2010, str. 147-150.
4. PATMORE, C. *The Complete animation course*. London : Thames & Hudson, 2003, 30 str.
5. PRIEBE, K.A. *The Advanced art of stop motion animation*. [dostopno na daljavo] Course Technology PTR, 2011, XVII str. in str. 139-141. [citirano: 20.1.2018.]
<https://theswissbay.ch/pdf/Gentoomen%20Library/Animation/The_Advanced_Art_of_Stop_Motion_Animation.pdf.>
6. Stop motion character. V *Animation world network*. [dostopno na daljavo] Obnovljeno 18.3.2011. [citirano: 20.1.2018.]
<<https://www.awn.com/sites/default/files/styles/inline/public/image/attached/46264-stop-motion-ch3-4-fig03108.jpg?itok=65U390eU>.>