

Morphing

Branimir Beš
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska
branimir.bes@fer.hr

Antun Herkov
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska
antun.herkov@fer.hr

Damjan Grubelić
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska
damjan.grubelic@fer.hr

Ivan Jakas
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska
ivan.jakas@fer.hr

Katarina Lebo
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska
katarina.lebo@fer.hr

Sažetak—U ovom radu opisan je problem preobrazbe (engl. *morphing*) jedne slike u drugu, prikazano je jednostavno rješenje tog problema, *linearni morphing*, uključujući njegov način funkciranja i nedostatke, te je objašnjen napredniji način preobrazbe – temeljen na kontrolnim točkama i Delaunayovoj triangulaciji – koji te nedostatke uspješnije otklanja. Obje metode implementirane su za morphing slika lica kao alat u Pythonu te su prikazani i uspoređeni njihovi rezultati.

Ključne riječi—morphing, landmarks, Delaunayova triangulacija, afina transformacija, warping

I. UVOD

Morphing je postupna transformacija, ili preobrazba (grč. *metamorphosis*) jedne slike u drugu. Prvi i temeljni korak ove transformacije jest odrediti karakteristične točke (engl. *landmarks*) izvorne slike i one slike koju želimo dobiti morphingom, odnosno odredišne slike (engl. *target*), pri čemu je transformacija preciznija što je više točaka odabrano. Na svaku od slika primijenimo Delaunayovu triangulaciju, nakon koje slijedi izračun affine transformacije koja preslikava vrhove trokuta izvorišne u morphed sliku te odredišne u morphed sliku, što se u engleskoj literaturi naziva *warping*. Sama jednadžba affine transformacije, kao i detaljniji postupak, bit će prikazani u nastavku. Za sliku nastalu morphingom bitno je naglasiti da sadrži svojstva i izvorišne i željene slike, pri čemu je dojam uspješnosti preobrazbe subjektivan.

Morphing je tehnika korištena u raznim područjima, od filmske i zabavne industrije do medicine ili arheologije. Međutim, ovu tehnologiju moguće je iskoristiti za morphing napade (engl. *morphing attacks*). Naime, zbog postupnog ispreplitanja svojstava dviju slika, morfirana slika sadrži karakteristike i izvorne slike i odredišne slike. Stoga je to moguće iskoristiti za krivotvorene identifikacijskih iskaznica te zavaravanje

biometrijskog sustava za sigurnosnu provjeru i zaključavanje. Pregled dosadašnjih postignuća, problema te budućih ciljeva bit će opisan u II poglavlju ovoga rada. U III poglavlju bit će predstavljeno rješenje problema, odnosno prethodno pojednostavljeni postupak morphinga bit će detaljnije opisan, uz uvođenje pojmova poput linearног i napredног morphinga, te će svaki korak biti popraćen odgovarajućom slikom. Konačni rezultati i opisi istih bit će predstavljeni u IV poglavlju.

II. PREGLED PODRUČJA I PROBLEMATIKE

Ideja preobrazbe slike iz jedne u drugu prvi put je zapisana još u 16. stoljeću, pojavom *Tabule scalate*. „Mehanički morphing“ bio je ostvaren tako da su dvije slike, podijeljene na dijelove, bile smještene na različitim stranama korigirane barijere. Na ovaj način se, ovisno o kutu gledanja, moglo dobiti različite slike. Potrebno je spomenuti kako je moguće raditi morphing između više od dvije slike, čime je moguće ostvariti još interesantnije efekte, posebice za filmsku industriju, ali u ovome radu fokus nije na tome. Pregled povijesti područja započinje s filmskom industrijom zato što je ona možda i najzaslužnija za veliku brzinu razvoja morphinga. Početci znanstveno-fantastičnih filmova također su se služili idejom preobrazbe, međutim, to je također bilo ostvareno mehaničkim putem, primjerice, mijenjanjem kuta upada svjetla za različite efekte ili korištenjem više različitih lutaka koje predstavljaju postupni prijelaz iz čovjeka u neko drugo stanje. Razvoj digitalne tehnologije poslužio je i razvoju različitih filmskih efekata i animacija. Prvi primjeri filmova koji koriste kompjutorski generirane efekte (engl. *Computer-generated imagery*, *CGI*), a samim time i 3D morphing, pojavili su se 1980-ih godina i otada tehnika neprestano napreduje [1]. Neizostavna je u bilo kakvoj transformaciji osobe ili predmeta, najčešće prisutnoj u filmovima fantazije, a zbog dubine prostora, zah-

tjevničija je nego 2D-morphing slike, stoga koristi i naprednije metode koje neće biti obrađene u ovome radu. U zabavnoj industriji 3D-morphing u stvarnom vremenu (eng. real-time morphing) koristi se za prikazivanje detalja te jako sitnih artefakata u virtualnoj realnosti, u videoigricama, simulacijama i reklamama. Njegovim korištenjem moguće je iz jedne slike napraviti pokretnu sliku zbog postupnih prijelaza značajnih za ovu metodu. Dodatna zanimljivost morphinga značajna za zabavnu industriju, osim 2D i 3D morphinga, jest morphing zvuka, koji će ovdje poslužiti kao predstavnik jednodimenzijskog morphinga. Njegovom primjenom moguće je izmijeniti glas osobe, stoga može poslužiti u sinkronizaciji crtanih filmova.

Osim zabave, morphing slike može poslužiti u raznim znanstvenim granama, primjerice medicini i arheologiji. Prve medicinske primjene morphinga slike pojavile su se 90-ih godina prošloga stoljeća. Weber i suradnici iskoristili su ga za analizu dinamike procesa zacjeljivanja u nosu i jednjaku, a nedugo nakon toga prvi put je iskoriten za prikaz razvoja nekoliko različitih vrsta embrija u maternici. Interpolacijom rendgenskih slika korištenjem morphinga povećana je razlučivost te je moguće pratiti oporavak i zacjeljivanje kostiju, rast organa djeteta u maternici ili pak razvoj bolesti, točnije razvoj određenih tkiva. Dalekosežni cilj morphinga medicinskih slika jest ekstrapolacija, odnosno predviđanje, dugoročnog ponašanja malignih bolesti [2].

Morphing bi mogao biti značajan za arheologiju, zbog potencijalne mogućnosti rekonstrukcije i modeliranja artefakata, no bit će potrebno odrediti stvarnu točnost metode i moguća poboljšanja [3].

Opasnost od iskoristavanja digitalnog morphinga u negativne svrhe sve je veća pojavom biometrijskih lozinki. Svaki sustav zaključan biometrijskom lozinkom, bilo zjeničama osobe, bilo licem ili otiskom prsta, osjetljiv je na morphing. Također, modernizacija graničnih prijelaza, gdje je u potpunosti kompjutorska provjera identifikacijskih iskaznica, suočena je s ovim problemom, a najviše iz razloga što morfirana osobna slika sadrži svojstva i izvorne osobe i ciljane osobe, te na taj način može prevariti sigurnosni sustav. Međutim, ni ljudsko oko nije imuno na morphing. Čak i policijski službenici na graničnim prijelazima – ukoliko izvorna i ciljana osoba imaju slična svojstva po svojoj prirodi, primjerice tamnu kosu, izražene obrve, sitan nos – mogu biti zavarani baš zbog ispreplitanja svojstava. Taj dio problema pokušava se riješiti treniranjem službenika i drugim metodama provjere [4]. Jedna od predloženih ideja suzbijanja morphinga jest analiza prisustva rezidualnog šuma na slici te drugi algoritmi temeljeni na dubokom učenju [5].

III. OPIS RJEŠENJA

Digitalni morphing slike jest postupna preobrazba iz jedne slike u drugu. Za ostvarivanje ove transformacije, u ovom radu uspoređena je osnovna linearna tehnika, cross dissolving, i njezino unapređenje koje se zasniva na odabiru ključnih točaka morphinga te geometrijskoj raspodjeli slike.

A. Linearni morphing

Početno rješenje ovog problema bila je linearna transformacija koja se u engleskoj literaturi naziva cross dissolving tehnika. To je u stvari tehnika linearne interpolacije boja, prilikom koje jedna slika „blijedi“ (engl. fades) u drugu. Cijela slika se, za razliku od naprednijih tehnika, uzima u obzir i pikseli izvorne slike postupno prelaze u piksele ciljne slike miješanjem njihovih boja. Navedeni postupak opisan je jednadžbom 1, gdje SI predstavlja izvornu sliku, dok SC predstavlja ciljnu sliku. Rezultat SM ovisi o parametru α , čije su vrijednosti u intervalu $[0, 1]$. Ukoliko je α jednak nuli, rezultantna slika se ne mijenja, dok ista postaje jednaka ciljanoj slici ako alpha poprimi maksimalnu vrijednost.

$$SM = (1 - \alpha)SI - \alpha \cdot SC \quad (1)$$

Obrada ovih slika implementirana je na način da se za početak, radi jednostavnosti, obje slike obrežu i po potrebi interpoliraju na jednaku veličinu. Zatim slijedi odabir broja koraka morphinga, što ovdje zapravo predstavlja varijacije parametra alphe, odnosno jačinu transformacije. Nakon toga se obje slike šalju u funkciju koja računa afinu transformaciju slike [6].



Slika 1: Linearni morphing, s lijeva na desno: izvorna slika, linearne morphane slika za $\alpha = 0.5$, ciljna slika

B. Advanced

Iako jednostavna i lako implementirana, ova metoda ne daje potpuno zadovoljavajuće rezultate. Prijelazi između slika ne izgledaju prirodno te dolazi do neujednačenosti između određenih karakteristika objekata na slikama – što je vrlo vidljivo kad uspoređujemo crte lica na originalnim slikama i rezultantnoj slici. Stoga se javila potreba za drugaćijim pristupom. To je ostvareno na način da se, umjesto jednake zastupljenosti svih piksela na slici, uzmu u obzir i poravnaju se one karakteristike objekta koje najviše doprinose informaciji o istome.

1) *Odabir kontrolnih točaka:* U ovome radu kao primjeri uzete su slike dviju osoba, zbog čega je očekivano da će kontrolne točke (engl. landmarks) ovih slika biti dijelovi lica: rubovi obrva, očiju, nosa, usana i brade. Prilikom dodjeljivanja kontrolnih točaka objema slikama, korišteni su koncepti strojnog učenja, primjerice regression trees, implementirani u biblioteci Dlib. Na slici 2 prikazani su rezultati tog algoritma, gdje je vidljivo kako su uspješno odabrane ranije spomenute poželjne točke. Što je više odabranih točaka, rezultat je uvjernjiviji, a moguće je i ručno odabratи točke koje bi mogle

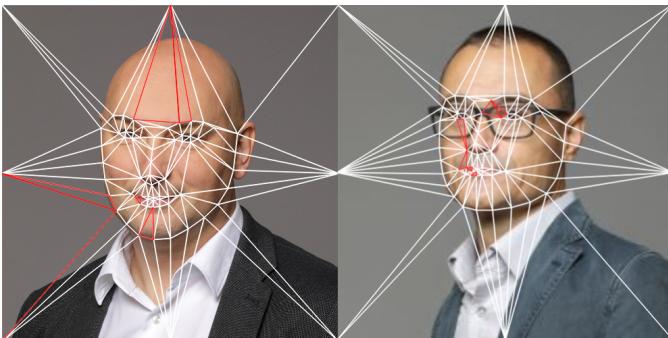
pridonijeti poboljšanju, ako ih je algoritam kojim slučajem izostavio [6].



Slika 2: Kontrolne točke na izvornoj i ciljnoj slici

Nakon odabira točaka, na iste je potrebno primijeniti odabranu geometrijsku mrežu, što predstavlja povezivanje točaka u određene geometrijske likove. U ovome radu odabrana transformacija jest Delaunayova triangulacija.

2) *Primjena Delaunayove triangulacije:* Delaunayova triangulacija za dani skup točaka stvara mrežu trokuta tako da nijedna od točaka nije unutar opisane kružnice bilo kojeg trokuta u dobivenoj mreži. Za ovu triangulaciju također je karakteristično da maksimizira minimalni kut svih trokuta u triangulaciji [7]. Na slici 3 prikazan je rezultat ove triangulacije. Vidljivo je kako su trokuti ustvari smješteni na slična područja, te se na obje slike uglavnom poklapaju rasporedom unutarnjih kutova, odnosno oblikom.



Slika 3: Trokutasta mreža dobivena Delaunayovom triangulacijom

Nakon što se dobije triangulacijska mreža, korištenjem afinih transformacija sve piksele trokuta izvorne slike transformiramo u "iskriviljenu" (engl. warped) verziju izvorne slike te se sličan postupak ponovi i za ciljnu sliku. Nakon što se postigne poravnanje kontrolnih točaka te dobijemo warped verzije izvorne i ciljne slike, između njih vrši se stapanje alfa-kanala (engl. alpha blending) kako bismo dobili konačnu, morphanu sliku [6].

IV. OPIS REZULTATA I DISKUSIJA RJEŠENJA

Implementacijom algoritma linearog morphinga za različite koeficijente alpha dobiveni su sljedeći rezultati. Na

slici 4 vrijednosti koeficijenta su redom 0.3, 0.5 i 0.8. Može se primjetiti kako se ovakvom vrstom morphinga obje slike jednostavno preklapaju jedna na drugu, te doprinos svake od njih ovisi o iznosu alphe. Ukoliko se alpha približava donjoj rubnoj vrijednosti 0, na morphanoj slici prevladavaju svojstva izvorne slike, što je prikazano krajnjom lijevom slikom, ali za alpha koja se približava 1 na krajnjoj desnoj slici, vidljivo je kako su nadjačana svojstva izvorne slike. Na središnjoj slici vrijednost koeficijenta alpha iznosi 0.5, te je u ovome slučaju jednaka zastupljenost svojstava izvorne i odredišne slike. Za slučajeve kada alpha iznosi 0 ili 1, morphinga niti nema, što je jasno iz jednadžbe1. Nedostatak ove metode vidi se u tome što glavne karakteristike slika, u ovome slučaju to su karakteristike lica, nisu poravnate i ne dolazi do postupnog prijelaza ključnih točaka lica prve osobe u karakteristične točke druge osobe. Nikakve složenije transformacije zapravo se ne koriste prilikom ovakve obrade slike, stoga je to bio izvorni pristup morphingu. Zbog navedenih nedostataka, uvedena su poboljšanja ove metode te se ona u ovom svom izvornom obliku u praksi više ne koristi. U drugim znanstvenim radovima danas, slično kao i u ovome izvješću, linearni morphing izvodi se samo kako bi se usporedio s predstavljenim poboljšanjem te kako bi se ukazalo na postignuti napredak i druga moguća poboljšanja.



Slika 4: Linear morphing - različit koeficijent α , s lijeva na desno 0.3, 0.5 i 0.8

Spomenute nedostatke moguće je ukloniti korištenjem naprednijih algoritama, što je ovdje i učinjeno te opisano u pretvodnom poglavljju. Ključna razlika kod naprednog morphinga je ta što su u ovom slučaju odabrane točke podudarnosti na objema slikama. Naime, potrebno je uočiti ključne točke koje definiraju lice na slici, i osigurati da se, umjesto jednostavnog preklapanja slike, svaka značajka jednog lica na određeni način mapira u podudarnu značajku drugog lica. Rezultati ove metode prikazani su ispod, gdje se jasno vidi kako svaka kontrolna karakteristika (pritom se misli na obilježja ljudskog lica kao što su oči, nos, usta i brada) izvorne slike svakim sljedećim korakom sve više nalikuje karakteristici odredišne slike. Prostornom transformacijom osigurano je da morphana slika sadrži u sebi svojstva i izvorne i odredišne slike, ali ista nisu onako očito preklopljena kao kod linearog morphinga, već ugrađena u sliku na određen, slabo primjetan način.

Interpretacija rezultata morfiranja poprilično je subjektivna i još uvjek ne postoji znanstvena metoda koja bi objektivno ocijenila rezultat istoga. Stoga je ova grupa provela anketu među trideset ispitanika koji su ocijenili pet različitih primjera



Slika 5: Advanced morphing - slabije uspješna transformacija

morphinga lica ocjenama od 1 do 5. U ovaj su izvještaj za usporedbu uključene najlošije (slika 5) i najbolje ocijenjene transformacije (slika 6). Glavna razlika u kvaliteti rezultata je u tome što osobe na slici 1 nemaju isti položaj glave i ramena te zbog toga ostaju tragovi izvorne slike. Ovaj problem bi se mogao riješiti povećanjem broja koraka, gdje bi ostatci izvorne slike postupnije izblijedjeli. Na uspješnost preobrazbe utječe različitost među značajkama koje nisu u glavnom fokusu morphinga, primjerice razlika u boji kože, obliku glave, položaju kose, pigmentaciji kože i slično. Jednostavnije rečeno, ovaj algoritam uspješniji je što je sličniji položaj slika koje ulaze u funkciju.



Slika 6: Advanced morphing - najuspješnija transformacija

Objektivno je moguće reći kako je za što bolje rezultate potrebno osigurati slike dobre rezolucije, po mogućnosti odborati međusobno slične slike i one jednake veličine, kako se smanjivanjem ili interpolacijom ne bi smanjila njihova kvaliteta. Dodatno poboljšanje moguće je ostvariti na način da se poveća broj kontrolnih točaka ili čak ručno odaberu one točke koje je algoritam zadužen za pronalaženje istih izostavio iz analize. Negativna strana ovoga je povećanje složenosti algoritma te duže vrijeme potrebno za izvršenje obrade slike. U budućnosti je moguće očekivati razvoj novih algoritama, gdje će željena kvaliteta morfirane slike biti ostvarena i ukoliko nije moguće ostvariti ranije navedene uvjete. Također, razvoj je usmjeren na pronalazak rješenja za objektivno prepoznavanje morfiranih slika, kako bi se na taj način sprječile moguće sigurnosne i druge prijevare.

V. ZAKLJUČAK

Pokazano je da implementacija algoritma temeljenog na kontrolnim točkama i Delaunayovoj triangulaciji zaista daje nezamjetniju preobrazbu iz jedne slike lica u drugu, kao i da svojstva izvorne i ciljne slike te njihova razlika utječu na to koliko su dobri rezultati morphinga.

Opisom, navedenom implementacijom i usporedbom odboranih pristupa za morphing slika lica ostvaren je cilj projekta. Daljnji rad mogao bi uključivati usporedbu kvalitete preobrazbe u odnosu na razne načine odabira kontrolnih točaka, u odnosu na načine transformacije vrijednosti slike uz dane točke ili u odnosu na eventualne druge algoritme za morphing.

LITERATURA

- [1] [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Morphing>
- [2] K. Penska, L. Folio, and R. Bunger, "Medical applications of digital image morphing," *Journal of digital imaging : the official journal of the Society for Computer Applications in Radiology*, vol. 20, pp. 279–83, 10 2007.
- [3] F. Cohen, Z. Zhang, and P. Jeppson, "Virtual reconstruction of archaeological vessels using convex hulls of surface markings," in *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops*, 2010, pp. 55–61.
- [4] S. Venkatesh, R. Raghavendra, K. Raja, and C. Busch, "Face morphing attack generation detection: A comprehensive survey," *IEEE Transactions on Technology and Society*, vol. PP, pp. 1–1, 03 2021.
- [5] S. Venkatesh, R. Ramachandra, K. Raja, L. Spreeuwiers, R. Veldhuis, and C. Busch, "Morphed face detection based on deep color residual noise," in *2019 Ninth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*, 2019, pp. 1–6.
- [6] A. I. Rohra and R. K. Kulkarni, "Survey on recent trends in image morphing techniques," in *2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 2019, pp. 19–23.
- [7] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation