

Sebastian Korenič Tratnik, Aljoša Rakita in Franc Solina

Prenos slikarskega stila s pomočjo globokih nevronske mreže na primeru del slovenskega impresionizma

Transferring Painting Style Through Deep Neural Networks Using the Works of Slovenian Impressionism as an Example

Sinopsis

Uporaba računalniških metod v umetnosti je že uveljavljena, pri čemer področje postaja znova aktualno s hitrim razvojem umetne inteligence. V članku predstavljamo postopke računske estetike na primeru prenosa slikarskega stila. Osrednja tema in metodološka osnova za teoretično in praktično predstavitev je tehnologija globokih nevronske mreže. Kot izhodišče za demonstracijo zajetja formalnih parametrov podobe in tvorjenja algoritma za računsko generiranje sloga nam služijo dela slovenskega impresionizma.

Ključne besede: umetna inteligenca, slikarstvo, računska estetika, prenos sloga, globoke nevronske mreže, konvolucijske nevronske mreže, slovenski impresionizem

Key words: artificial intelligence, painting, computational aesthetics, style transfer, deep neural networks, convolutional neural networks, Slovene impressionism

»Pameten človek je rekel, da bi bil Rafael imeniten slikar, tudi če rok ne bi imel. Kajti resničen umetnik ustvari umotvor z očesom; česar je pozneje še treba, je golo rokodelstvo.«

Ivan Cankar

1. del: Računalniška umetnost, računska estetika, umetna inteligenca

Nedavno se je tudi v širši javnosti povečalo zanimanje za umetno inteligenco, ki naj bi omogočila vse od avtonomne vožnje avtomobilov do iskanja rešitev problemov v

medicini in na drugih področjih, kjer s pomočjo novih tehnologij nastajajo ogromne zbirke podatkov (angl. big data). Z metodami umetne inteligence se poskušajo računalniki iz velikih zbirk podatkov naučiti zakonitosti, ki omogočajo boljšo analizo novih podatkov.¹ Osrednja metoda strojnega učenja, ki je omogočila zadnji preboj v umetni inteligenci, so globoke nevronske mreže (angl. *deep neural networks* (DNN) ali *convolutional neural networks* (CNN)). Te metode omogočajo ne le analize podatkov, ampak tudi tvorjenje novih, sintetičnih podatkov, ki jih je težko ločiti od pravih podatkov. V tem članku nas seveda zanimajo predvsem slike in ustvarjanje novih slik. Na področju fotografije in videa je danes možno ustvariti nove sintetične slike, ki jih vsaj s prostim očesom ni možno ločiti od pravih fotografij in videa (angl. *deep fakes*).²

Namen članka je predstaviti ustvarjalne računske postopke v kontekstu praktične demonstracije, kjer so tehnologije globokih nevronske mreže uporabljene za avtomatizirano tvorjenje likovnih del. Raziskali bomo, kako generirati podobe na avtomatski način z uporabo algoritemskih metod na primeru prenosa likovnega stila s slikarskih izdelkov na fotografije. V prvem delu besedila bomo uvedli ključne pojme in podali pregled različnih formalnih pristopov, ki temeljijo na računski inteligenci, iz katere bomo izhajali v izvedbenem delu, ki sledi. V drugem delu bomo predstavili praktično demonstracijo računskega podobotvorja na primeru prenosa stila iz klasičnih oljnih slik na sodobne digitalne fotografije. Izhajajoč iz slovityh del slovenskih impresionistov, pogosto narejenih po ohranjeni

¹ Strojno učenje omogoča, da računalniški sistem, ki je predhodno analiziral milijone slik, na katerih so bile upodobljene npr. mačke, v delčku sekunde ugotovi, ali je na neki novi sliki, ki jo pokažemo računalniku, tudi upodobljena mačka. Zato rečemo, da se je računalnik naučil prepoznavati mačke.

² <https://en.wikipedia.org/wiki/Deepfake>

fotografski osnovi, bomo lahko izločili formalne parametre podobe in prišli do algoritma za digitalno tvorjenje likovnih del. Raziskava ponuja nastavek za razumevanje zmožnosti novega in aktualnega področja, ki metode umetne inteligence povezuje z likovno umetnostjo in je v korist tako zainteresirani splošni javnosti kot prakticirajočim likovnim ustvarjalcem.

Uveljavljanje računalniških metod v umetnosti

Danes je uporaba računalniških procesov in digitalnih tehnologij v umetnosti že uveljavljena. Oktobra 2018 je bila v dražbeni hiši Christie's v New Yorku dražba umetniških del, kjer so bile razstavljene tudi slike kreirane s pomočjo globokih nevronske mreže. To je bila prva tovrstna dražba v priznani dražbeni hiši.³ Navkljub dilemi, ali lahko dela, ki so produkt računalnikov oziroma algoritmov, označimo kot umetnost, veliko ljudi kaže zanimanje za računalniške likovne izdelke.

Kmalu po izumu računalnikov sredi 20. stoletja so jih umetniki sprejeli kot novo orodje za umetniško izražanje, ko so nastale prve umetniške upodobitve, narejene s pomočjo računalnika. Skladno s tedanjim stanjem tehnologije, kjer so kot izhodne naprave prednjačili tiskalniki in risalniki, je bilo pionirsko polje, na katerem so se v likovno umetnost uvajali računalniki, najprej grafika. Med leti 1965 in 1985 je polje računalniške umetnosti doživelo intenziven razvoj. Med pionirje računalniške umetnosti uvrščamo tudi Edvarda Zajca (Zajec).

V najširšem smislu lahko računalniško umetnost razumemo kot »katerokoli estetsko formacijo, ki je nastala na osnovi logičnih ali numeričnih transpozicij danih podatkov s pomočjo elektronskih mehanizmov« (Franke 31). Vendarle se pojem pogosto kritizira. Medtem ko je sam po sebi zelo splošen in lahko zajema tako rekoč vso umetniško produkcijo, v kateri ustvarjalni postopek temelji na uporabi računalnika, je uporaba računalnika v umetnosti zelo raznolika. Lahko govorimo o podkategorijah na enak način, kot npr. v slikarstvu lahko govorimo o podkategorijah različnih medijev, procesov in tehnik. Po drugi strani obstaja bistvena razlika med analognimi in digitalnimi postopki, zaradi katere nekateri nasprotujejo primerjavi računalniške umetnosti z drugimi oblikami umetnosti (Humphries 19–20; Smith 39–40). Sodobnejše analize opozarjajo, da računalniškega podobotvorja ne smemo ločevati v estetske/umetniške in tehnične/znanstvene formacije, saj so v obeh kategorijah vpletene kulturne in zgodovinske konvencije, ki jih določajo in ki odsevajo širše modele

kulturne resničnosti, ki vplivajo tako na umetnost kot na tehnologijo (Jones 31).

Skozi desetletja, ki so sledila, so se računalniški postopki uveljavili kot nekaj samoumevnega v vse bolj hibridnih projektih sodobne umetnosti, ki so vključevali vrsto novih senzorjev in s pomočjo publike uveljavili princip interakcije (Wilson, *Information*).

Uveljavili so se različni formalizmi, po katerih je možno kreirati podobe, kot so matematični model fraktalov, oblikovne slovnice in kot zadnji val, globoke nevronske mreže. Velik del formalizmov lahko uvrstimo pod pojem generativne umetnosti, kjer na višjem ali nižjem nivoju v okviru različnih formalizmov definiramo, kako naj s pomočjo računalnika nastane nova podoba (Boden).

Razvoj računalniške umetnosti v kontekstu likovne ustvarjalnosti na Slovenskem

Pri nas ima računalniška umetnost zavidevanja vredno tradicijo, saj so se za razliko od običajnega časovnega zamika za uvajanje novosti v provinco na tem področju likovni ustvarjalci angažirali sočasno z glavnimi svetovnimi tokovi in so celo prednjačili pred večjimi evropskimi državami. Na Slovenskem je pionir v uporabi računalnikov znotraj sfere likovne umetnosti že omenjeni akademski slikar Edvard Zajec, ki je leta 1968 med svojim podiplomskim študijem v ZDA na Univerzi v Ohio začel uporabljati računalnik za grafično ustvarjanje (Grafenauer). Po vrnitvi za dobro desetletje je na računalniškem centru Univerze v Trstu sodeloval z računalnikarjem Matjažem Hmeljakom, s katerim sta postala likovni tandem: sprva je Hmeljak le programiral za Zajca, sčasoma pa se je tudi sam razvil v samostojnega likovnega umetnika (Solina in Dragan 187–188). V ospredju njegovega zanimanja je bilo ustvarjanje slik preko računalniškega programiranja, kar predstavlja začetno etapo razvoja tudi drugje po svetu.

V tedanjem jugoslovanskem okolju se je raziskovanje računalniške umetnosti začelo vzpostavljati tudi na institucionalni ravni z organizacijo simpozijev in kongresov. Kot osrednje mesto teoretičnih raziskav novomedijskih tehnologij se je uveljavil Zagreb. Po večletnem nizu bienalnih razstav najnovejših umetniških trendov od leta 1961 dalje je bil tam pod okriljem gibanja *Nove tendence* leta 1968 mednarodni simpozij z naslovom *Computers and visual research*. Sledili so še drugi dogodki, nastala pa je tudi večjezična revija *Bit international*, ki je izhajala med letoma 1968 in 1973. V Ljubljani je leta 1971 potekal mednarodni kongres združenja IFIP (*International Federation for Information Processing*), kjer je bil prvič predstavljen inovativen pristop k analizi in generiranju oblik s pomočjo oblikovnih slovnice, ki je imel pozneje velik vpliv tako na računalniško analizo kot na računalniško genezo podob (Stiny in Gips). Računalniško tehnologijo so v svojem ustvarjanju na področju grafike uporabljali tudi drugi slovenski likovni

³ Dražba je bila presenetljivo uspešna in odmevna na umetnostnem trgu, saj je bil na njej prodan slikarski portret, ki ga je naslikala umetna inteligenca. »Portret Edmonda de Belamyja iz družine de Belamy je podpisan s formulo, ki je bila osnova za generiranje slike: $\min G \max D \mathbb{E}_x [\log(D(x))] + \mathbb{E}_z [\log(1 - D(G(z)))]$. Slika, ki je bila izdelana s pomočjo globoke nevronske mreže vrste GAN na osnovi ekstrakcije podatkov iz več kot 15.000 portretov naslikanih od 14. do 20. stoletja, je bila prodana za skoraj pol milijona dolarjev (https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_de_Belamy).

umetniki, kot je Peter Ciuha, pomembna pa je bila tudi vrsta grafičnih oblikovalcev, ki je v svojem delu za ljubljansko televizijo predstavljala predhodnike ustvarjalnega videa, kot sta Peter Skalar ali Grega Košak (Solina in Dragan 188–189).

Koncepti so izstopili iz prvenstveno grafičnega konteksta v širše sfere vizualnega z delom Sreča Dragana, ki je odigral pionirsko vlogo na področju umetniškega videa in konceptualne umetnosti na Slovenskem (Bovcon). Dragan je za realizacijo svojih umetniških projektov želel raziskati in uporabiti nove tehnološke zmožnosti, pri čemer je prišlo do niza projektov v sodelovanju s Francom Solino v okviru Laboratorija za računalniški vid. To prizadevanje je doživelo tudi svojo institucionalno podporo in uvajanje v univerzitetni kurikulum v interdisciplinarnem sodelovanju Fakultete za računalništvo in informatiko (FRI) in Akademije za likovno umetnost in oblikovanje (ALUO). V okviru katedre za nove medije se je uveljavilo večletno sodelovanje študentov in sodelavcev teh dveh ustanov pri realizaciji intermedijskih projektov in uporabe novih informacijskih tehnologij v umetnosti (Solina in Dragan). To že odraža zadnjo etapo integracije računalniških metod v sodobno umetnost, kjer se pozornost preusmeri na oblikovanje novomedijskih, multimedijskih, intermedijskih in interaktivnih umetnostnih del, ki presegajo zamejeno sfero likovnega oblikovanja.

Računska estetika – kvantifikacijska metodologija in formalizacija podobotvorja

Vzporedno z uporabo računalnika v umetnosti se je raziskovalo tudi umetnost znotraj računalništva z razvojem raziskovalnega področja t.i. računske estetike (angl. *computational aesthetics*). Računska estetika je razmera novo raziskovalno področje v okviru računalništva. Začetek te vede se umešča v leto 1933, ko je George David Birkhoff napisal prvo kvantitativno teorije estetike v svoji knjigi *Aesthetic Measure*, ki je ponudila računske metode na področju estetike (Birkhoff). V jedru tega raziskovalnega polja sta predmet estetike in uporaba kvantifikacijske metodologije. Računska estetika se ne zamejuje na čisto analitične ali čisto sintetične pristope ter v svojem cilju analiziranja in spodbujanja ustvarjalnosti integrira aspekte računalništva, filozofije in psihologije ter lepih, uporabnih in performativnih umetnosti (Cunningham). Cilj tega interdisciplinarnega področja je razumeti in formalizirati aspekte podobotvorja in uporabiti to znanje za izboljšanje komunikativne kvalitete računalniško generiranih podob. Metodološki pristopi so temu primerno interdisciplinarni in temeljijo na povezovanju posameznikov z različnih sfer: na eni strani tehničnih inovatorjev, ki se ukvarjajo z razvijanjem računalniških orodij, in na drugi strani ustvarjalcev iz umetniške oz. oblikovalske struje, ki ta nova orodja uporabljajo v svojem delu.

Izsledki raziskav se uporabljajo tudi v komercialne namene, npr. za gradnjo inteligentnih kamer in uporabnikom prijaznih računalniških programov. Na praktični ravni prihaja do zasnove različnih projektov, kot npr.:

- ocenjevanje estetskih kvalitete,
- izboljšanje kvalitete podob,
- analiza slikovne kompozicije,
- klasifikacije stila, kompozicije in avtorstva (bodisi slik, fotografij ali videov),
- avtomatsko ustvarjanje umetnosti,
- merjenje čustvenih učinkov umetniških del na ljudeh,
- izboljšanje in kvantifikacija kvalitete umetniške restavracije.

Skratka, gre za enega izmed najbolj aktualnih raziskovalnih polj na preseku računalništva in umetnosti, znotraj katerega se umešča tudi naša raziskava, ki raziskuje najnovejši trend na tem področju: uporabo globokih nevronskih mrež za generiranje umetnosti.

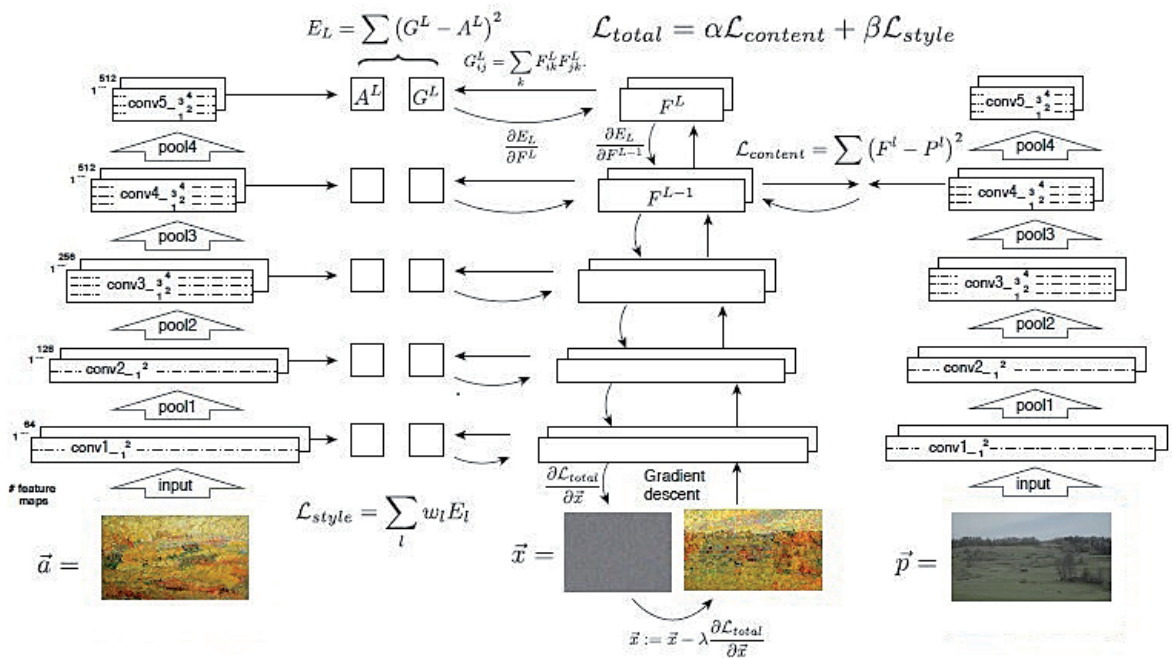
Nevronske mreže

S pojmom nevronskih mrež označujemo množico algoritmov, ki so naučeni razpoznavati določene vzorce v podatkih. Nevronske mreže spadajo na področje umetne inteligence, njihovo poimenovanje pa izvira iz dejstva, da delujejo konceptualno podobno kot človeški možgani. Nevronske mreže so zgrajene iz velikega števila vozlišč, imenovanih nevroni, kjer se izvajajo računske operacije. V vsako vozlišče vodi vhod, ki je po navadi razdeljen na več delov, kar običajno zapišemo v vektorski obliki. Vhodni nevroni se aktivirajo preko senzorjev, ki zaznavajo okolje, ali pa preko drugih vhodnih vrednosti. Ostali nevroni, globlje v nevronske mreže, pa se aktivirajo preko uteženih povezav s predhodnimi »aktiviranimi« nevroni. Vrednosti vektorja, transformiranega preko uteži, se seštevajo in prenesejo na izhod. Tako dodeljujejo prioriteto vhodnim vektorjem za nalogo, ki se jo nevronska mreža uči.

Proces učenja v nevronske mrežah (angl. *neural network* –NN) torej temelji na določanju tistih uteži, ki pripeljejo NN do želenega obnašanja. To obnašanje, ki je odvisno od zastavljenega problema in arhitekture NN (kako so nevroni med seboj povezani), lahko zahteva dolge verige računskih operacij oziroma plasti nevronov, kjer vsaka plast vpliva na aktivacijo naslednjih plasti. Pojem globoko učenje (angl. *deep learning*) izvira ravno iz velikega števila nevronskih plasti. Izhod ene plasti je vhod v drugo in tako naprej, med njimi pa po navadi najdemo tako imenovane aktivacijske funkcije, ki določijo, ali in koliko signala se prenese v naslednjo plast nevronov. Pri globokem učenju se vsaka plast vozlišč uči na množici lastnosti, ki temeljijo na prejšnji plasti. Globlje ko gremo v nevronske mreže, bolj kompleksne lastnosti so mreže sposobne prepoznati, saj se lastnosti seštevajo in kombinirajo z lastnostmi prejšnjih plasti – temu pravimo tudi hierarhija lastnosti (Schmidhuber 5).



V članku opisujemo, kako lahko slikarski stil z izvorne slike, ki jo je naslikal slikar (levo), prenesemo na fotografijo (v sredini), da dobimo računalniško generirano sliko v podobnem stilu, kot je originalna slika (desno) / The article describes how a painting style can be transferred from a source image depicted by a painter (left) to a photo (centre), to obtain a computer-generated image in a style similar to the original painting (right)



Algoritem, ki smo ga uporabili za prenos stila, temelji na globokih nevronskih mrežah VGG (Gatys 2016), ki so bile naučene za zaznavo in lokalizacijo objektov na slikah. Arhitektura mrež je sestavljena iz zelo majhnih 3×3 konvolucijskih filtrov in ima globino 16–19 plasti. Na levi strani je shematsko prikazana sinteza slikarskega stila iz originalne slike, na desni pa aplikacija tega stila na podano fotografijo. Za podrobnosti glej diplomsko nalogo Aljoše Rakite (2018) / The algorithm used for the transfer of the style is based on VGG deep neural networks (Gatys 2016) that have been learned to detect and localize objects in images. The grid architecture consists of very small 3×3 convolution filters and has a depth of 16–19 layers. Shown on the left is a schematic illustration of a synthesis of the original style of the painting, and on the right, an application of this style to the specified photograph. See the thesis of Aljoša Rakita (2018) for details

Začetki nevronske mreže segajo v štirideseta leta 20. stoletja, ko sta McCulloch in Pitts predstavila NN arhitekturo, ki pa se še ni bila sposobna učiti (McCulloch in Pitts). Naslednja desetletja so prinesla preproste NN trenirane s pomočjo nadzorovanega in nenadzorovanega učenja. V nekem smislu pa zametki NN segajo že v začetek 19. stoletja, ko so bile NN v bistvu različice metod linearne regresije (Schmidhuber 9–11). Prve globoke nevronske mreže (angl. *deep neural network* – DNN) so bile izurjene s pomočjo metode GMDH (*Group Method of Data Handling*) leta 1966 (Ivakhnenko). Imele so polinomske aktivacijske funkcije, število plasti pa so določili s postopnim povečevanjem na testnih podatkih, nato pa z zmanjševanjem preko »obrezovanja« in preverjanja na validacijski množici.

Leta 1979 Fukushima predstavi konvolucijske nevronske mreže (angl. *convolutional neural network* – CNN), ki so po arhitekturi zelo podobne današnjim NN in vsebujejo izmenjujoče se konvolucijske plasti ter plasti za podvzročanje. Seveda pa tudi ta način ni bil popoln, Fukushima je uteži določil z lokalnimi funkcijami oziroma ročno in ne preko vzvratnega razširjanja (angl. *backpropagation* – BP), to je z dinamičnim nastavljanjem uteži, kar omogoči, da se stopnja napake prenese po mreži in upošteva pri določanju vrednosti uteži. Ta koncept je bil znan že od začetka šestdesetih let prejšnjega stoletja, ko so v sistemih izvajali BP s pomočjo gradientnega sestopa. BP, namenjen specifično NN, je bil predstavljen leta 1982 (Werbos) in je bil populariziran do konca osemdesetih preko različnih člankov in ostalih znanstvenih del.

Skozi devetdeseta so raziskovalci mrežam dodajali plasti ter eksperimentirali z različnimi načini BP. NN so postale vse globlje in uporabljati so jih začeli na zelo raznolikih področjih. V tem obdobju so NN sistemi začeli zmagovati na različnih tekmovanjih v iskanju vzorcev v podatkih. V naslednjem desetletju so se NN razširile na vsa možna področja uporabe in na nekaterih tudi dominirale. Postavile so vrsto rekordov in stopile tudi v komercialno uporabo. V zadnjih letih so se še bolj izpopolnile in njihova uporaba se je še bolj razširila, predvsem na področju računalniškega vida si ne moremo predstavljati napredka brez nevronske mreže (LeCun 3–4).

Konvolucijske nevronske mreže se uporabljajo za reševanje raznovrstnih problemov; lahko klasificirajo ali pa gručijo. Trenutno je njihov vpliv najbolj opazen na naslednjih področjih uporabe:

- avtomatsko prevajanje/ generiranje govora,
- prepoznavanje podob/objektov na slikah (npr. obrazov),
- robotika,
- priporočilni sistemi,
- bioinformatika,
- procesiranje in generiranje vizualne umetnosti itd.

Naša raziskava se osredotoča na generiranje likovnih form z osredotočenjem na področje slikarstva in na problematiko

sloga.⁴ Preden se posvetimo podrobnostim demonstracije, namenimo še nekaj besed oblikovnim slovnice in ključnim konceptom generativne umetnosti, preko katerih lahko bolj razumemo formalizem za generiranje slike.

Formalizacija zapisa in oblikovne slovnice

Oblikovne slovnice (angl. *shape grammars*) so se uveljavile kot način formalizacije zapisa. Oblikovne slovnice omogočajo formalno predstavitev umetniške kompozicije z zaporedjem oblikovnih pravil, ki delujejo nad njenimi osnovnimi oblikami. Če na podlagi tovrstne ekspozicije umetniške kompozicije analiziramo več primerov v istem slogovnem sklopu, lahko identificiramo bistvene značilnosti umetnikovega stila. Za razliko od razpoznavanja umetnostnih del preko poznavalskih metod ali z opisom v naravnem jeziku, nam formalni opis umetniške kompozicije z računalniškimi algoritmi omogoča sprotno preverjanje. Ustreznost naših analiz lahko preverimo tako, da z naključno sukcesivno uporabo oblikovnih pravil ustvarimo sinteze novih kompozicij, ki nam lahko služijo kot vzorci za primerjavo. Uporaba slovnice se je na področju likovnega uveljavila zaradi njihove izrazne oz. generativne moči, bogatega teoretičnega ozadja in močnih algoritmičnih metod za analizo formalnih jezikov (Gros in Solina).

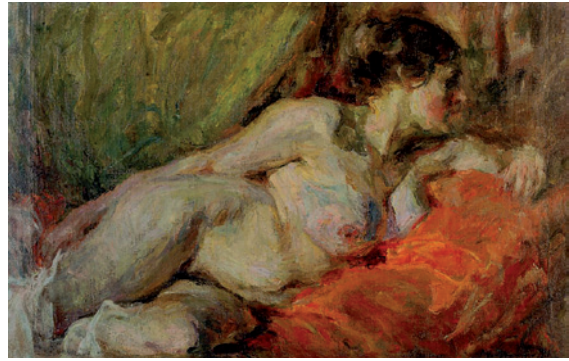
Za razumevanje delovanja oblikovnih slovnice je najbolje narediti primerjavo z lingvistiko, od koder konceptja tudi izhaja. Pri ugotavljanju strukture umetniške kompozicije lahko naredimo analogijo z jezikovno analizo in podobno kot pri sintaktični analizi verbalnega jezika opazujemo površinsko in globinsko strukturo likovnega dela. Medtem ko površinska struktura zajema predvsem vidne lastnosti forme in zunanje specifičnosti uporabljenih likovnih prvin, globinska struktura podaja notranjo razporeditev posameznih elementov umetnine in zgradbo kompozicije. Formalistični opis te dve ravni pretvori v razmerje znakov in pravil. Jezikovne slovnice so sestavljene iz dveh množic znakov (končnih in neskončnih), nabora pravil za preslikovanje elementov iz ene množice v drugo (iz neskončne v končno) in iz začetnega simbola. Oblikovne slovnice delujejo kot generativne matrice, ki iz začetne oblike na podlagi pravil tvorijo končno kompozicijo.

Po uveljavljeni definiciji sestavljajo oblikovno slovnico oblike in oblikovna pravila. Oblike (angl. *shape*) zajemajo osnovne elemente za generiranje bolj kompleksnih form in so sestavljene iz točk in iz ravnih črt. Točkam in

⁴ V računalniško ustvarjenih slikah lahko razločimo štiri nivoje sofisticiranosti, ki se stopnjujejo od uporabe algoritma kot človeškega orodja do popolnoma avtomatiziranega oblikovanja: 1) avtomatično zaznavanje specifičnih stilov iz obstoječih slikarskih podob, 2) objektivno estetsko vrednotenje in merjenje, 3) prilagajanje družbenim, čustvenim in kulturnim ozadjem občinstva in 4) avtomatična konceptualizacija kompleksnih informacij v abstraktne vizualne formate. (Zhang et al. 244) Tovrstne analize spadajo v polje generativne umetnosti, ki je tako obetavna, ker s tem, da je ustvarjena na naključen, avtomatski in avtonomen način, predstavlja možnosti presejanja tradicionalnega subjektivnega človeškega ustvarjanja. Pri tem se odpirajo vprašanja, kako lahko ustvarimo optimalne procese oblikotvorja in ali lahko umetna inteligenca naposled postane bolj ustvarjalna kot človeška bitja.



Matej Sternen, *Akt / Nude*, 1914, olje na platnu / oil on canvas, 73 × 110 cm, Narodna galerija, Ljubljana / National Gallery of Slovenia



Ivan Grohar, *Sejalec / The Sower*, 1907, olje na platnu / oil on canvas, 108 × 120 cm, Moderna galerija, Ljubljana / Museum of Modern Art, Ljubljana



Matija Jama, *Kolo (skica) / Circle Dance (sketch)*, 1926–1935, olje na platnu / oil on canvas, 26,5 × 38,5 cm, zasebna last / private collection, pripravljalne fotografije: Moderna Galerija, Ljubljana / preparatory photos: Museum of Modern Art, Ljubljana



črtam so lahko pridružene oznake, ki so podane z nizi črk, zaradi česar govorimo o označenih točkah oz. o označenih črtah. Poleg tega se oblike določa s parametri, ki jih lahko poljubno izbiramo v okviru predpisanih pogojev, zato govorimo tudi o parametriziranih oblikah. Oblike se razvijajo v kompozicije z aplikacijo oblikovnih pravil. Oblikovna pravila (angl. *shape rules*) predstavljajo smernice oblikovne slovnice, ki določajo prehajanje med oblikami v procesu

generiranja kompozicije. Kompozicija se iz začetnega simbola razvija postopoma z zaporedno uporabo oblikovnih pravil, kot jih nadzirajo oznake, ki določajo semantično stopnjo razvoja kompozicije. Razvoj kompozicije poteka hierarhizirano, tako da se najprej razvijejo oblike z oznako nižjega semantičnega nivoja in se nato napreduje do višjih nivojev, dokler se ne razvijejo vse označene oblike. Proces je končan, ko ni več mogoče uporabiti nobenega oblikovnega

pravila nad danimi oblikami. Lahko obstajajo različni tipi pravil, ki kot taki definirajo različne vrste slovnice. Skupek oblik, ki jih generira posamezna oblikovna slovnica, definira *jezik* oblikovne slovnice kot potencialno neskončni sklop končnih oblik (Stiny in Gips).

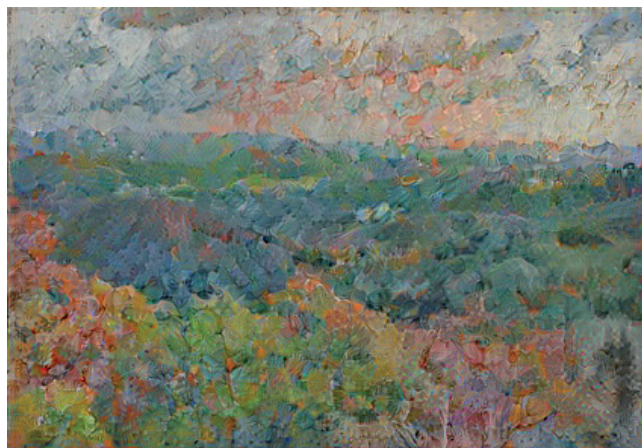
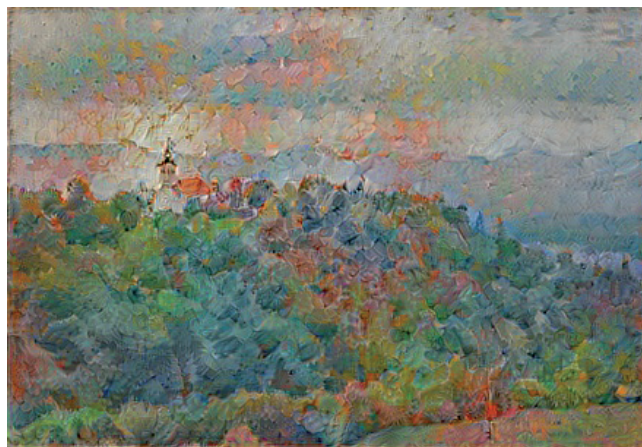
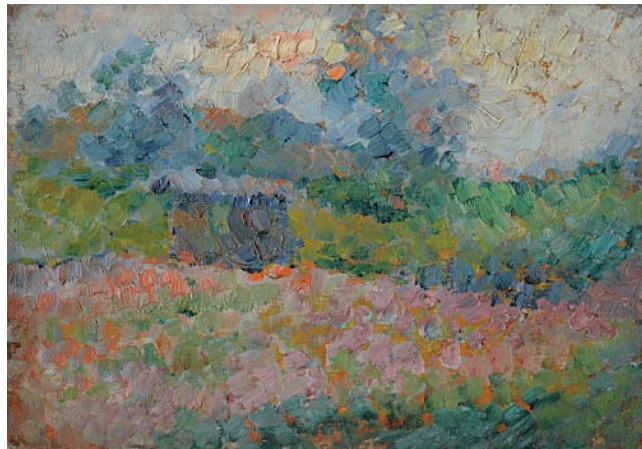
Oblikovne slovnice podajajo formalizem za ustvarjanje novih oblik. Računalnik na podlagi analize površinske strukture dela izloči parametrizirano oblikovno slovnico, ki služi kot osnovni formalizem za nadaljnjo generacijo. Demonstracija, ki jo bomo predstavili kot primer, je temeljila na enostavnem postopku: globoke nevronske mreže smo uporabili tako, da smo na vhod postavili dve sliki, se iz prve naučili njen stil in nato ta stil prenesli na drugo sliko. Uspeh algoritmičnih operacij smo merili na podlagi meril, ki izhajajo iz umetnostno-zgodovinske kontekstualizacije in likovno teoretske analize ter neposredno s komparativno umestitvijo v predstavljene stilistične sklope. Poleg tega smo naredili tudi javno anketo, kjer so kvaliteto slik ocenjevali tudi laiki.

2. del: Praktična demonstracija: prenos stila, slovenski impresionizem

Za demonstracijo in razlago digitalnega prenosa sloga smo uporabili dela slovenskih impresionistov. Dela slikarjev slovenskega impresionizma nam ponujajo sklenjene slogovne sklope, ki so v svojih formalnih karakteristikah za prenos stila še posebej primerni. Kljub temu da je opus slovenskih impresionistov heterogen tako v celoti kot v sklopih posameznih ustvarjalcev, vključuje segmente s formalnimi vzorci, ki omogočajo zelo visoko učinkovitost računskih operacij. Ker računalniški program računa na čim bolj slikovito in likovno regularno površino, se zaradi specifičnosti svoje fature izmed vseh likovnih paradigem za prenos stila med najboljšimi obnese prav impresionizem. Specifičnost fature impresionistične slike, tj. posebnost površine impresionističnega dela, je odvisna od specifičnega postopka njenega nastanka. Da bi bolje razumeli likovno kvaliteto impresionistične slike, bomo najprej povedali nekaj besed o impresionizmu kot takem, o izvoru impresionističnega gibanja in njegovi likovni logiki ter o nacionalnih specifikah slovenskih ustvarjalcev in njihovih slikarskih opusov.

Impresionizem

Impresionizem ima svoj izvor v francoskem slikarstvu ob prelomu 19. stoletja, ko se je peščica slikarjev uprla konvencijam akademskega slikarstva, ki so vodila razstavno politiko tamkajšnjih salonov. V razvojni liniji renesančnega zgodovinskega slikarstva je produkcija tedanje francoske umetnosti temeljila na monolitni paradigmi, ki je na ravni forme težila k iluzionizmu, na ravni vsebine pa k historizmu



Impresionistični stil se zaradi slikovite in teksturno regularne fature za prenos stila še posebej dobro obnese. Anketa je pokazala, da ljudje že težko ločujejo med človeško in računalniško narejenimi slikami. (Ali lahko odkrijete original med zgornjimi tremi slikami? Odgovor lahko najdete na koncu članka.) / The Impressionist style works particularly well for the style transfer due to its colourful and texturally regular structure. A survey found that people find it difficult to distinguish between man- and computer-made paintings. (Can you spot the original among the three paintings above? You can find the answer at the end of the article.)

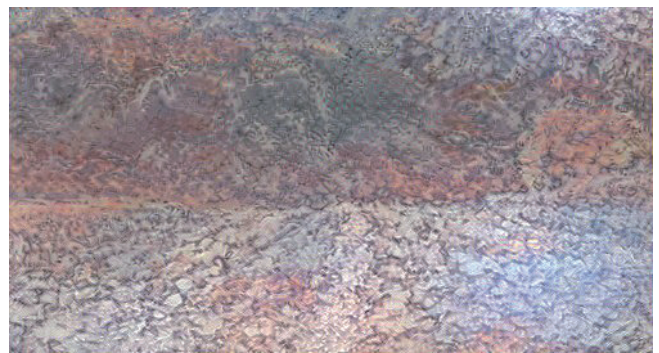
(t.i. historia). Slikarski ideal je bil tedaj v upodabljanju zgodovinske ali religiozne tematike v izpopolnjeni slikarski večini, ki je stremela k zlitju posameznih potez

čopiča v homogeno slikovno površino, ki deluje kot okno v svet. Za razliko od akademskega slikarstva, je površina impresionističnih del razmeroma heterogena tvorba, kjer se likovni elementi ne združujejo v enovito iluzijo. Medtem ko so akademska dela temeljila na nanašanju številnih tankih plasti barve ene na drugo (t. i. lazurno slikarstvo), je površina impresionistične slike sestavljena iz neprozornih nanosov. Poteze s čopičem niso v funkciji ustvarjanja kontinuirane iluzije, temveč temeljijo na diskontinuirani logiki prelomljenih nanosov, kjer barve ne prehajajo ena v drugo, temveč stojijo druga ob drugi in se povezujejo na podlagi optičnega vtisa (t. i. optično mešanje). Pri sopostavljanju največkrat čistih barv se izkorišča optične zakonitosti, tako da se preko različnih kontrastnih razmerij ustvarja vtis, ki prehaja posamezne barvne tone. Proces nanašanja, ki izhaja iz bežnega vtisa, je hiter, poteze čopiča pa temu ustrezno sproščene in spontane, pri čemer prihaja do nanašanja barv v debelih nanosih (*impasto*) ali do slikanja na še neposušeno površino, pri čemer prihaja do učinkov mehčanja in brisanja. Bistvena značilnost impresionističnega slikarstva je, da slikarski proces ne poteka več v notranjosti ateljejskega prostora, temveč slikarji slikajo zunaj (*en plein air*), kjer se s počasnostjo slikarskega postopka lahko osredotočajo na postopno prehajajoče spremembe vidne resničnosti oz. na minevajoče učinke svetlobe. Pri impresionizmu kot takem gre v osnovi za drugačen način gledanja, ki izhaja iz neposrednega sveta kot osnove za preobražanje svetlobe in poustvarjanje zaznanega v sliki, ki sveta ne želi upodobiti v vseh njegovih podrobnostih, temveč v vtisu, ki ga dajejo igre svetlobnih odtenkov. Poseben poudarek je na igrah svetlobe in sence ter na bogastvu odsevov in odbleskov, ki jih nudijo svetlobni pogoji v svojem trajanju.

V razvoju impresionističnega stila je bil pomemben tudi tehnološki vidik, saj brez razvoja nekaterih ključnih tehnoloških inovacij slikarji ne bi mogli priti do specifičnih slikarskih procedur slikanja na prostem. V prvi vrsti so tu barvne tube, v katerih so lahko vnaprej zmešane odtenke prinašali na prosto, kar je močno pospešilo proces slikanja, ki je pred tem temeljil na vnaprejšnjem ali sprotnem mletju pigmenta in mešanja z oljem ter s shranjevanjem barv v svinjskih mehurjih. Razvoj sintetičnih pigmentov je prinesel lažji dostop do čistih barv, kar je vodilo k postopno vse večji uporabi svetlih barv in do možnosti aplikacije optičnih zakonov v vse čistejši obliki. Pomemben dejavnik je predstavljal tudi razvoj fotografije in proizvodnja prenosnih fotografskih aparatov, ki so likovnim umetnikom pokazali možnost drugačnega tipa komponiranja, ki je temeljil na bežnih vtisih in spontanah pogledih.

Specifičnost slovenskega impresionizma

Medtem ko so splošne smernice impresionizma znane, pa se v praksi posamezni impresionistični slikarji ali skupine lahko močno razlikujejo. Kmalu po odmevnem odzivu



Rihard Jakopič, *Kamnitnik v snegu / Kamnitnik in the Snow*, 1903, olje na platnu / oil on canvas, 49 × 59,5 cm, Zveza svobodnih sindikatov Slovenije / Association of Free Trade Unions of Slovenia

francoske javnosti se je stil razširil po več evropskih deželah in nastale so posamezne nacionalne šole, ki so njegove postopke in tehnike sprejele, pri čemer je bila recepcija pogosto nacionalno pogojena in je vodila do specifičnih impresionističnih stilov. Impresionizem je na slovensko območje prišel pozno, tj. približno pol stoletja po nastanku. Zaradi velike časovne razlike je prišlo do marsikatere spremembe, ki tedanji impresionizem loči od prvotnega tako

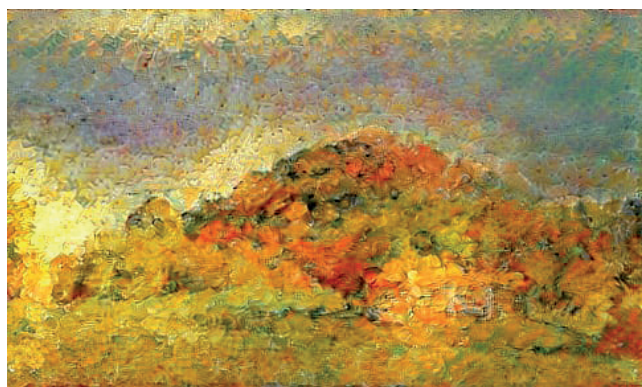
na ravni forme kot na ravni vsebine.⁵ Impresionizem je v kontekstu ustvarjanja slovenskih slikarjev označeval širše pomensko polje, kot ga je označeval v Franciji. Slovenski impresionizem je bil v osnovi eklektično slikarstvo, ki je črpalo iz različnih slikarskih vplivov in posredovalo raznorodna načela slikanja. Slogovne prvine so bile osebno izbrane in proste od zahtev močnih optičnih načel, vsebinski elementi pa prilagojeni lokalni tradiciji simbolizma ali ekspresionizma. Medtem ko se slovenski impresionisti po francoskih zgledujejo predvsem v tehničnem smislu, je vsebinska logika slovenskega impresionizma dejansko ekspresionistična.⁶

Izvedba: opredelitev projekta in tehnične karakteristike

V obravnavo smo vzeli kanonska dela kanonskih slikarjev slovenske moderne. Pri vsakem slikarju smo skušali najti tako slogovno kot motivno reprezentativna dela, ki skupaj tvorijo celoto. Ker je opus impresionistov raznolik, je bilo potrebno izbrati dela, ki si delijo nekaj osnovnih stilističnih parametrov. V opusih smo skušali najti serije slik, ki so bile narejene v podobni maniri in izhajajoč z istih formalnih izhodišč. Ni naključno, da smo pogosto prišli do slogovnih obdobij, v katerih so slikarji ustvarili svoje največje mojstrovine. Raziskovanje določenega sloga je dolgotrajen proces, ki postopno vzpostavlja notranje zakonitosti likovne logike, ki konstituirajo stilistično matrico. Delanje variant znotraj istih formalnih določil vodi do tega, da se slog postopoma izčiščuje, kar pogosto za sabo potegne tudi porast likovne kvalitete.

Postopek procesiranja je v osnovi temeljil na izbiri slikarske predloge, produkciji fotografske osnove in aplikaciji prve na drugo. Gre za vzvratni proces samega dela slovenskih impresionistov, ki, kot vemo, večino dela niso naredili na prostem, temveč v ateljeju, izhajajoč s fotografij. Medtem ko so elemente posameznih fotografij pogosto kombinirali ter jih niso upoštevali popolnoma veristično, pa obstajajo primeri s skoraj povsem homolognim odnosom. Tovrstne vzporednice v kompoziciji so nam omogočale lažji prenos in boljše rezultate.

Sam proces generiranja slik ni bil pretirano zahteven, ampak je bil zato zelo dolgotrajen, saj zahteva veliko računanja. Tako je čas prenosa stila na eno fotografijo dimenzije 512×512 slikovnih enot na osebнем računalniku dosegal v povprečju do dve uri. Z uporabo boljše tehnologije, predvsem z uporabo grafičnih procesorskih enot (GPU), lahko računanje zelo pospešimo.



Rihard Jakopič, *Sončni breg / Sunny Hillside*, 1903, olje na platnu / oil on canvas, 52×60 cm, Narodna galerija, Ljubljana

Na fotografije smo prenesli različne stile, da bi dobili najbolj prepričljive rezultate. Eksperimentirali pa smo tudi z nastavljanjem uteži vsebine oziroma stila in z uporabo originalnih barv. Ponekod smo tudi združili več stilov in jih prenesli na izbrano fotografijo. Skupaj smo proizvedli

⁵ Ena izmed najbolj flagrantnih razlik v načinu slikanja je uporaba fotografij. Ohranjene zbirke fotografij iz zapuščine pričajo o tem, da so bila dela pogosto narejena po fotografski osnovi. Slikanje na prostem je bilo neredko omejeno zgolj na začetno fazo, pri čemer se nekatere skice danes predstavlja kot končane izdelke.

⁶ Formulacijo dolgujemo Jožefu Muhoviču, glej tudi: Muhovič 309; Brejc 34–35; Zerovc 8–9.

nabor z več kot 50 slikami, iz katerega smo izbrali 16 najbolj prepričljivih, ki smo jih nato skupaj še s 14 slikami, ki so originalna dela slikarjev, vključili v anketo.

Izbrane slike smo nato po potrebi še obrezali ali pa jim spremenili dimenzije, saj so bile skoraj vse generirane slike istega formata (ker smo izhajali iz fotografij iz iste naprave).

Rezultati ankete

Prepričljivost tako dobljenih rezultatov smo preverili preko spletne ankete, ki smo jo preko socialnih omrežij, spletne pošte in ostalih metod razširili med čim širši krog ljudi raznolikih profilov (Rakita). Pri anketi je sodelovalo več kot 250 ljudi.

Anketa je vsebovala 32 vprašanj. Prvi dve vprašanji sta bili demografske narave, da bi izvedeli, kakšen je profil anketirancev. Nato je sledilo 30 slik (16 računalniškega in 14 človeškega izvora), kjer so morali anketiranci izbrati med dvema možnostma, ali je sliko naslikal slikar ali pa je produkt računalniškega algoritma.

Na anketo je odgovorilo 268 ljudi, od teh 48 % moških in 52 % žensk. Največ, to je 53 % anketirancev, je bilo starih med 21 in 40 let, 37 % je bilo starih od 41 do 60 let, 5 % je bilo starejših od 60 in prav tako 5 % je bilo mlajših od 21 let. Pri reševanju ankete so bili anketiranci 80-odstotno natančni, saj so pravilno razvrstili 24 od 30 slik. Ko je bila slika umetniškega izvora, je to v povprečju ugotovilo 77 % anketirancev, in s podobno gotovostjo – 75 % – so pravilno ugotovili računalniški izvor slik. Malo manj kot tretjina (32 %) računalniško generiranih slik je anketirance »pretentala«, saj jih je 5 % vprašanih napačno označilo, da jih je naslikal slikar.

Ena od možnih razlag za tako visoko natančnost pri prepoznavanju umetniških slik je ta, da so določene izbrane slike tako ikonične, da jih je veliko Slovencev prepoznalo, ker so jih že tolikokrat videli.⁷ V anketo smo namreč vključili nekaj zelo znanih slik slovenskih impresionistov. Za visoko natančnost pri klasificiranju določenih računalniško generiranih slik pa morda lahko krivimo (ne) uravnoteženost kompozicije in preveč monotono barvno paleto vhodne slike.

Verjetno je na rezultate vplivalo tudi samo zaporedje vprašanj. Pri vseh anketirancih so bila namreč vprašanja postavljena v istem vrstnem redu, in opazimo lahko, da so anketirance bolj »pretentale« računalniško generirane slike, ki so bile v anketi med prvimi na vrsti. Anketiranci so morda opazili ponavljajoče se lastnosti generiranih slik in to znanje uporabili pri poznejših slikah. Iz primerov, ki so anketirance najbolj pretentali, lahko sklepamo, da algoritem



Ivan Grohar, *Hribček / Hillock*, 1910, olje na platnu / oil on canvas, 50,4×74 cm, Narodna galerija, Ljubljana / National Gallery of Slovenia

pravilno opravlja svojo nalogo, vendar mora kreator lažnih slik združiti take slike, ki producirajo najboljši rezultat.

Rezultati spletne ankete kažejo, da vsaj v našem primeru ljudje še vedno znajo ločiti med pravimi in generiranimi slikami. Vendar je približno tretjina generiranih slik anketirance »prevarala« in prepričani smo, da bi ta delež z boljšo kompozicijo fotografij, ki smo jih izbrali za osnovo, ter z bolj raznoliko paleto stilov in z naključnim zaporedjem slik v anketi še narasel. Impresionistični stil se je, kot smo predvideli, za nalogo prenosa stila dobro obnesel. Najboljša

⁷ Seveda je prišlo tudi do nepričakovanih izjem, ko so bile tudi klasike, kot je *Sejalec*, prepoznane kot ponaredek.

Pri reševanju anket lahko od publike pričakujemo preigravanje in predvidevanje podanega zaporedja. Z enim takim trikom smo tudi začeli naš članek; na uvodni sliki je tudi slika na levi strani računalniško generirana!



Matija Jama, *Kamnolom / Quarry*, 1907, olje na platnu / oil on canvas, 50 × 60 cm, Narodna galerija, Ljubljana / National Gallery of Slovenia

Računalniška generativnost in likovna ustvarjalnost

Umetna inteligenca je domena računalništva, ki raziskuje, do kakšne mere lahko uporabljamo procese digitalnih računalnikov za izvajanje funkcij, ki so značilne za človeške možgane, kot so razumevanje naravnega jezika, čutna zaznava ali reševanje problemov. Uporaba globokih nevronskih mrež na raznolikih področjih uporabe (npr. računalniški vid, učenje, kreativnost itd.) nam pomaga pri razumevanju, kako taki procesi delujejo v realnem življenju. Metode, uporabljene v pričujočem članku, odpirajo nove možnosti za analizo umetniških del in omogočajo preizkušanje različnih domnev ali idej, ki so bile doslej le teoretske.

Cilj naše raziskave je bil raziskati eno izmed danes najbolj aktualnih tem v računalniško generirani umetnosti, to je uporabo globokih nevronskih mrež za produkcijo slik. Najprej smo predstavili temeljne parametre formalizacije zapisa in generiranja form v kontekstu računalniške umetnosti. Pojasnili smo, kako se s pomočjo globokih nevronskih mrež prenaša stil z ene podobe na drugo, in nato prenos stila demonstrirali s pomočjo reprodukcij oljnih slik slovenskih impresionistov. Stil, ki smo ga uporabili za generiranje slik, smo sintetizirali iz najpopularnejših del slovenskih impresionistov in ga prenesli na fotografije, na katerih so bili podobni motivi, ki so jih kot predlogo za svoje slike uporabljali tudi sami impresionisti.

Na področju slikarstva lahko prenos stila uporabimo kot ustvarjalen potencial. S kombinacijo s postopkom fotomontaže lahko slike bodisi obrežemo bodisi povežemo z drugimi slikami, s čimer lahko kombiniramo različne stilizme različnih avtorjev in tako pridemo do sinteze avtorskih estetik. Proces prenosa lahko uporabimo ne le za prenašanje posameznih stilov s posameznih slik na posamezne fotografije, temveč lahko preko kombiniranja različnih del različnih avtorjev razvijamo slogovne principe, ki prehajajo same slikarske predloge. S kombinacijo različnih stilističnih vzorcev istega motiva lahko proizvajamo nove variante v slogovno nekonsistentni seriji, s čimer prihajamo do notranje logike slogovne permutacije. Možnosti se s hitrim razvojem tehnologije le še množijo. Za podobotvorje so postale zanimive nevronske mreže vrste GAN (angl. *generative adversarial network*), ki se naučijo generirati slike, ki so podobne slikam v učni množici.⁸ S takimi mrežami je bil narejen tudi že omenjeni portret Edmonda de Belamyja, pa tudi vrsta lažnih fotografij in video posnetkov, ki jih lahko uvrstimo v kategorijo *deep fake*,⁹ to je ponaredkov slik in video posnetkov, ki jih je težko ločiti od pravih.

Generativne specifikacije umetniških zvrsti imajo močne implikacije v estetski teoriji in lahko ponudijo izhodišče v razvoju formalne, matematične estetike (Stiny in Gips 1971). Problem »umetniške ustvarjalnosti«

primera za sintezo in prenos stila sta se izkazali sliki *Križanke* in *Sončni breg* slikarja Riharda Jakopiča.

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Generative_adversarial_network

⁹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Deepfake>

oz. »ustvarjalnega procesa«, ki je sam po sebi nejasen in abstrakten, lahko z razvojem umetne inteligence in računalniških programov, ki temeljijo na formalnih opisih, tudi sam postane predmet opisa, kar bi ga lahko demistificiralo in tudi izboljšalo (Laske 10). Metode računalniško generirane umetnosti in razvijanja umetne inteligence na področju vizualne estetike se pomikajo v ospredje sodobnega umetnostnega diskurza. V povezavi z umetno inteligenco se odpirajo širša vprašanja, koliko se lahko računalniški sistemi približajo človeškim kognitivnim sposobnostim, na področju umetnosti pa, ali lahko postanejo računalniki kreativni? Res je, da je možno računalnikom definirati njihove naloge na vse višji abstraktni ravni. Na začetku njihove uporabe jim je bilo potrebno njihovo nalogo natančno sprogramirati, danes pa lahko samostojno rešujejo mnogo bolj kompleksne naloge. Toda načelno vprašanje, ali bodo lahko računalniki kdaj v prihodnosti pridobili samozavedanje in za umetnost še bolj relevantno kreativnost, ostaja še naprej široko odprto.

Zaključek

Računalniki so se sprva v umetnosti uporabljali zgolj kot sodobno in učinkovito orodje, s katerim so umetniki z izbranimi algoritmi morali bolj ali manj natančno definirati, katere slikovne prvine in kako naj jih računalniki producirajo. Določena mera naključja znotraj neke omejene predloge je bila vedno zaželeno za avtomatizirano raziskovanje variant v okviru nekega motiva. Metode umetne inteligence, posebej globoke nevronske mreže, pa so pri tvorjenju likovnih del veliko bolj avtonomne. V primeru naše raziskave lahko vplivamo na rezultat načeloma zgolj z izbiro dveh slik: slike, s katere metoda avtomatsko posname slikarski stil, in fotografije ali druge slike, na katero se posneti slikarski stil nato aplicira.

Medtem ko je bila naša raziskava prvenstveno preizkus ali aplikacija specifične tehnologije, ima svoje ramifikacije tudi za likovno teorijo in prakso. Z ekstrakcijo sloga pridemo do digitalnega algoritma, ki nam omogoča avtomatizirano tvorjenje likovnih del. Po eni strani je to lahko orodje za likovno prakso, ki ustvarjalcem ustvarjalni proces nadgradi z vsemi možnostmi digitalnega procesiranja. Po drugi strani pa to problematizira temeljne predpostavke o ustvarjalnem procesu umetniških praks. Z obeh strani se nam digitalne tehnologije v kombinaciji z analognimi postopki kažejo kot tehtne za nadaljnjo konceptualizacijo in produkcijo likovnih form. Na koncu nam računalniški pristopi omogočajo edinstven uvid v likovno logiko, ki lahko odpravi mistifikacije glede likovne ustvarjalnosti in pripomore h kvalitetnejšemu oblikovanju. ■



Rihard Jakopič, *Jesen / Autumn*, 1912, olje na platnu / oil on canvas, 26,5×33,5 cm, Narodna Galerija, Ljubljana / National Gallery of Slovenia

Za nastanek članka se zahvaljujemo ge. Jasmini Marijan, višji kustodini na oddelku za dokumentacijo Narodne Galerije, in ge. mag. Lari Štrumej z oddelka za zbirke in razstave v Moderni galeriji, ki sta iz arhivov pomagali pridobiti fotografske osnove za slike impresionistov in visokoresolucijske reprodukcije slikarskih faktur, Boju Nuvaku za sodelovanje pri produkciji fotografskih osnov ter dr. Beti Žerovc za strokovno svetovanje in dodatno usmeritev. Avtorja fotografij pejzažev sta / The authors of the photos in the middle are: Boj Nuvak, Sebastian Korenič Tratnik.

Literatura

- Birkhoff, George David. *Aesthetic Measure*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1933.
- Boden, Margaret A. in Ernest A. Edmonds. "What is generative art?" *Digital Creativity* 20.1–2 (2009): 21–46.
- Bovcon, Narvika. *Umetnost v svetu pametnih strojev: Novomedijska umetnost v delih Sreča Dragana, Jake Železnikarja, Marka Peljhana*. Ljubljana: Raziskovalni inštitut Akademije za likovno umetnost in oblikovanje v Ljubljani, 2009.
- Brejc, Tomaž. *Študije o slovenskem slikarstvu v 20. stoletju*. Ljubljana: Slovenska matica, 2010.
- Cankar, Ivan. »Naši umetniki.« *Izbrana dela*, X, Boris Merhar, ur. Ljubljana: Cankarjeva založba, 1959. 355–56.
- A Companion to Contemporary Art Since 1945*. Amelia Jones, ur. John Wiley & Sons, 2009.
- Computational Aesthetics 2007*. Douglas W. Cunningham, ur. Natick, MA: A. K. Peters, Ltd., 2008.
- Dietrich, Frank. "Visual Intelligence – the First Decade of Computer Art (1965–1975)." *Leonardo* 19.2 (1986): 159–69.
- Franke, H. W. *Computer Graphics, Computer Art*. New York: Praeger Publishers, 1971.
- Fried, Michael. *Absorption and Theatricality. Painting and Beholder in the Age of Diderot*. London: University of California Press, 1980.
- Fukushima, Kunihiko. "Neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position-Neocognitron." *IEICE Technical Report A* 62.10 (1979): 658–65.
- Gatys, Leon A., Alexander S. Ecker in Matthias Bethge. "Image style transfer using convolutional neural networks." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016. 2414–23.
- Gros, Jerneja, Franc Solina. »Opisovanje umetniških del z generativnimi slovnici.« *Elektrotehniški vestnik* 59.5 (1992): 314–320.
- Humphries, Holle. "A Philosophical Inquiry into the Nature of Computer Art." *The Journal of Aesthetic Education* 37.1 (2003): 13–31.
- Ivakhnenko, Aleksei in V. G. Lapa. *Cybernetic Predicting Devices*. Indiana: Purdue University School of Electrical Engineering, 1966.
- Laske, Otto. "Definitions of Computer Art." *Computer Music Journal* 8.4 (1984): 9–11.
- LeCun, Yann, Koray Kavukcuoglu in Clément F. Farabet. "Convolutional networks and applications in vision." *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. IEEE, 2010.
- McCulloch, Warren S. in Walter Pitts. "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity." *The Bulletin of Mathematical Biophysics* 5.4 (1943): 115–133.
- Muhovič, Jožef. *Leksikon likovne teorije*. Celje-Ljubljana: Celjska Mohorjeva družba, 2015.
- Rakita, Aljoša. *Prenos slikarskega stila s pomočjo globokih nevronskih mrež*. Diplomsko naloga, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani, 2018.
- Schmidhuber, Jürgen. "Deep learning in neural networks: An overview." *Neural networks* 61 (2015): 85–117.
- Smith, Brian R. "Beyond Computer Art." *Leonardo*. Supplemental Issue 2 (1989): 39–41.
- Solina, Franc in Srečo Dragan. »Novomedijski umetniški projekti kot most med realnim in virtualnim svetom.« *Robotika in umetna inteligenca*. Tadej Bajd in Ivan Bratko, ur. Ljubljana: Slovenska matica, 2014. 187–223.
- Stiny, George in James Gips. "Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture." *IFIP Congress* (2). 2.3 (1971): 125–35.
- Werbos, Paul J. "Applications of advances in nonlinear sensitivity analysis." *System modeling and optimization* 1982: 762–70.
- Wilson, Stephen. "Computer Art: Artificial Intelligence and the Arts." *Leonardo* 16.1 (1983): 15–20.
- *Information Arts: Intersections of Art, Science, and Technology*. MIT Press, 2002.
- Zajec, Edvard. "Computer art: A Binary System for Producing Geometrical Nonfigurative Pictures." *Leonardo*, 11.1 (1978): 13–21.
- Zhang, Kang, Stuart Harrel in Xin Ji. "Computational Aesthetics – On the Complexity of Computer-Generated Paintings." *Leonardo*, 45. 3 (2012): 243–48.
- Žerovc, Beti. *Slovenski impresionisti*. Ljubljana: Mladinska knjiga, 2012.

Summary

The article presents the creative possibilities of computational aesthetics on the case of using the technology of deep neural networks for the automatic production of works of art.

Generative art is one of the most pertinent creative procedures, which is able to present convincing cases of visual art created on a computer by using algorithmic procedures. The concept of deep or convolution neural networks (DNN or CNN) signifies a multiplicity of algorithms, which are taught to be able to recognise patterns in data. Neural networks belong to the field of artificial intelligence and are named after the fact that they work similarly as the human brain, being built out of a great number of knots called neurons, where computational operations are processed. The article contextualises this technology in the field of art by providing a short historical exposition of using computers in art and the parallel development of the field of computational aesthetics. It proceeds with a practical case of its usage in artistic style transfer. By extracting the formal parameters of style using many the samples from different artists, the program is able to form an algorithm for digital creation of new artworks. On the ground of reaching the deep structure of a composition by analysing the surface structure of a painting, the set of neural networks are able to extract a shape grammar, which works as a formalism or a generative matrix for creating new variations of a stylistic set. The text presents a case study that is centred on the paintings of the Slovene Impressionists – Rihard Jakopič, Ivan Grohar, Matej Sternen and Matija Jama. The success of the algorithmic operation can be measured with the criteria based on formal analysis, art-historical contextualisation and a comparative placement in the presented stylistic sets.