

# Anamorfična projekcija na poljubno neravno površino

Anamorphic projection on an arbitrary uneven surface

Rok Cej

Franc Solina

rokcej1997@gmail.com

franc.solina@fri.uni-lj.si

Laboratorij za računalniški vid

Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113

1000 Ljubljana, Slovenia

## POVZETEK

Razvili smo metodo, ki omogoča anamorfično projekcijo na neravno, razbrazdano površino. Sliko, ki jo projeciramo v tem primeru, ni dovolj le v celoti perspektivno deformirati. Neravna površina je namreč sestavljena iz velikega števila majhnih ploskev različnih orientacij in za vsako od teh ploskev bi morali izračunati ustrezno perspektivno deformacijo. To najlažje storimo tako, da za vsak slikovni element projecirane slike izračunamo ustrezno deformacijo. To pa zahteva, da imamo 3D model površine, na katero se slika projecira, kar pridobimo s pomočjo senzorja "Kinect".

## KLJUČNE BESEDE

Anamorfoza, Kinect, globinski senzor, optična iluzija

## ABSTRACT

This report describes the creation of a distorted image or video that looks perfect when projected onto a given uneven surface and viewed from a predetermined angle. It utilizes the depth sensor Kinect and a projector. The program is written in C++ and it starts off by recreating the projection surface in 3D. It then uses the surface model to create an anamorphic projection. If the Kinect and the projector are properly aligned, the projected image or video creates an anamorphic illusion in real life.

## KEYWORDS

Anamorphosis, Kinect, depth sensor, optical illusion

## 1 UVOD

Ljudje lahko dokaj zanesljivo interpretiramo slike, ki jih ne gledamo frontalno, ampak pod določenim kotom, saj zna naš zaznavni sistem podzavestno razstaviti informacijo na vsebino slike in na njeno perspektivno deformacijo. Še posebej dobro ta princip deluje, če lahko zanesljivo zaznamo, kako je slikovna ploskev orientirana v prostoru. Pri tem igra pomembno vlogo tudi koherenca med premikanjem opazovalca in perspektivno deformacijo. Majhen premik opazovalca povzroči le majhno spremembo perspektivne deformacije. Pri anamorfičnih slikah pa ta koherenca ne obstaja. Anamorfična podoba se tipično razkrije le iz točno določene smeri opazovalčevega pogleda. Odvisno od vrste

anamorfoze, je ta smer pogleda lahko bolj ali manj natančno določena.

### 1.1 Vrste anamorfoz

Anamorfozo so odkrili v času renesanse, ko so umetniki in znanstveniki odkrivali zakone perspektive [2, 3]. Prva vrsta anamorfoze, ki so jo uporabljali, je bila **perspektivna anamorfoza**. Perspektivno deformirana podoba je naslikana na ravno ploskev. Da bi se ta anamorfična podoba razkrila, jo je potrebno pogledati z določenega zornega kota, običajno je to dokaj oster kot glede na ravnino, ki nosi deformirano podobo (Slika 1).

**Katoprične ali zrcalne anamorfoze** za razkritje prave podobe potrebujejo ogledalo, običajno cilindrične ali konične oblike. Če tako ogledalo postavimo na pravo mesto, se deformirana podoba razkrije kot odsev v ogledalu (Slika 2).

Med anamorfične upodobitve štejemo tudi **iluzionistično slikarstvo**, kjer lahko na predvidenem mestu opazovanja pridobimo izrazit občutek prostorske dimenzije. V umetnostni zgodovini so znane predvsem poslikave stropov, kjer se nam dozdeva, da se prostor odpira proti nebu (Slika 3), danes pa podoben prostorski učinek uporabljajo potujoči umetniki, ki s kredo rišejo podobe na ulicah (Slika 4).

Sodobni umetniki, kot je npr. švicarski slikar Felice Varini [11], anamorfozo uporabljajo pri poslikavi notranjih prostorov ali celih urbanih scen tako, da se z določenega zornega kota razkrije nek pravilen geometrijski vzorec, kot da bi lebdel v prostoru (Slika 5). Anamorfični princip se uporablja tudi pri slikanju prometnih označb na cestišča, da bi bila bolj jasno berljiva in razločna pod ostrim kotom opazovanja, kot ga imajo vozniki in drugi udeleženci v prometu. Tudi razni reklamni napisi, ki jih pravilno vidimo v zrcalih ali pod določenim kotom opazovanja sodijo v kategorijo anamorfičnih poslikav.

S pojavom multimedijske tehnologije se je pojavila možnost, da za prikaz anamorfičnih upodobitev uporabimo video projekcijo. Na primer, reklamne napise je možno perspektivno deformirati, tako da njihova projekcija iz notranjosti trgovin na pločnik pred trgovino ni deformirana in je zato lažje berljiva.

V Laboratoriju za računalniški vid smo celo razvili princip **dinamične anamorfoze**, ki perspektivno deformacijo projecirane slike stalno stalno prilagajajo poziciji opazovalca, tako da je z opazovalčevega zornega kota slika stalno izgleda nedeformirana oziroma tako, kot če bi jo gledali frontalno [8].

## 2 MOTIVACIJA

Če uporabljamo video projektor, je projecirana slika brez vsakršne perspektivne deformacije le, če jo gledamo natanko iz točke projeciranja. Ker ima projektor svoje fizične dimenzije, to v praksi seveda ni možno in zato je projecirana slika, ki jo gledamo vedno

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2020, 5–9 October 2020, Ljubljana, Slovenia

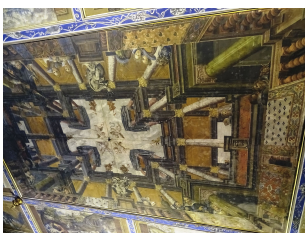
© 2020 Copyright held by the owner/author(s).



Slika 1: Ena od najbolj znanih slik iz zgodovine umetnosti, ki upodablja perspektivno anamorfozo, sta *Ambasadorja* Hansa Holbeina iz leta 1533. Lobanja, ki se v frontalnem pogledu (levo) vidi kot eliptičen madež na sredini slike spodaj, pa se v pogledu od desno zgoraj (v sredini), razkrije kot lobanja (desno). Umetniki so tako ekstremno popačenje običajno uporabili, da bi skrili določene kontroverzne elemente na sliki (vir: Wikimedia Commons).



Slika 2: Zrcalna anamorfoza: popačena 3D skulptura se v odsevu cilindričnega zrcala razkrije kot žaba (avtor: Jonty Hurwitz, vir: Wikimedia Commons).



Slika 3: Primer iluzionistične poslikave stropa je v celjski Stari grofiji, ki ga umeščajo na prehod iz renesanse v zgodnji barok (vir: Wikimedia Commons).

nekoliko deformirana. Kot smo že v uvodu razložili, to običajno ni problem, saj človeška zaznava z lahkoto loči med informacijo na sliki in zmerno perspektivno deformacijo te iste slike. Če pa je kot med osjo projekcije in smerjo našega pogleda zelo velik, pa že lahko nastopijo težave pri interpretaciji slike. Pri anamorfozi pa na ta način pravzaprav želimo skriti pravi pomen slike ali vsaj dela slike. Še večji problem pri interpretaciji slike nastane, če projekcijska površina ni ravna. Zato je naš raziskovalni motiv naslednji – ali lahko projeciramo sliko vnaprej deformirano tako, da bo izgledala nedeformirano iz vnaprej določenega zornega kota, neglede na to, kakšna je površina, na katero projeciramo sliko? Z



Slika 4: Uporaba perspektivne anamorfoze v uličnem slikarstvu (avtor: Julian Beever, 1990-ta). Na levi se vidi izrazit prostorski učinek, gledano z nasprotne strani, pa se vidi kako popačena je na tlaku dejanska podoba, še posebej izrazito noga kopalke, ki v 3D iluziji sega najdlje iz slikovne ploskve (vir: Wikimedia Commons).



Slika 5: Ploskovna grafika superponirana na razgibano urbano sceno, se v celoti razkrije le s točno določenega zornega kota: Felice Varini, Port de St-Nazaire, Francija, za razstavo "Estuaire 2007" (vir: Wikimedia Commons).

drugimi besedami, kako lahko izračunamo inverzno anamorfično deformacijo slike, da bo izgledala pravilno na poljubni neravni površini?

Že pri običajni perspektivni anamorfozi moramo vedeti, kako je slikovna ploskev orientirana v prostoru. Če pa želimo sliko projecirati na poljubno neravno površino, moramo imeti 3D model

te površine. Sodobna tehnika ima za odčitavanje 3D oblik številne odgovore. Cenovno ugodna in za naše potrebe je smiselna uporaba senzorja Microsoft Kinect. Kinect smo v našem laboratoriju že uporabili za odčitavanje 3D površine v sorodnem projektu *Svetlobni vodnjak* [9], kjer smo klasični kamniti skulpturi dodali še virtualno dimenzijo v obliki polzečih vodnih kapljic, ki smo jih z video projektorjem projecirali v obliki svetlobnih pik [10].

### 3 SORODNA DELA

Na prvi pogled je naš cilj najbolj podoben tehnikam, ki s pomočjo video projekcije na 3D predmete (angl. projection mapping [12]) ustvarijo obogateno resničnost in tako omogočijo povsem novo in dodatno dimenzijo dožemanja tudi gibajočih se predmetov, npr. [4]. Vendar se naš problem razlikuje od zgoraj opisanega v dveh bistvenih elementih:

- (1) Nam ni potrebno video projekcije poravnati z neko vnaprej določeno 3D obliko oziroma predmetom. Zato kompleksna geometrijska kalibracija med 3D površino, na katero se projicira in katere obliko zajema globinski senzor, ter video projekcijo ni potrebna [5].
- (2) V večini sistemov za video obogateno resničnost je smer gledanja uporabnika v grobem poravnana s smerjo video projekcije in zato do potrebe ali pojava perspektivne anamorfoze niti ne pride, čeprav s sledenjem položaja uporabnika nekateri sistemi tudi ustrezno korigirajo perspektivno deformacijo v video projekciji [6].

V komercialnih sistemih za video obogateno resničnost, npr. [7], so tudi integrirani globinski senzori, vendar ti služijo predvsem avtomatični segmentaciji scene na osnovi oddaljenosti od projektorja, da zamudna ročna segmentacija slike ni več potrebna. Zato smo se odločili za razvoj lastnega sistema za anamorfnu projekcijo na neravno površino, ki je namenjen opazovanju projekcije iz nekega vnaprej določenega zornega kota.

### 4 OPREMA

Za anamorfično projekcijo na poljubno neravno površino potrebujemo dve zunanji napravi: Microsoft Kinect in video projektor. Kinect meri razdalje med 0,5 m in 4,5 m, kar narekuje tudi naš delovni prostor za projekcijo anamorfoze.

Programsko opremo za deformacijo slike smo zaradi hitrosti izvajanja razvili v jeziku C++, čeprav bi po funkcionalnosti bila primerna tudi visokonivojska jezika kot sta Processing in Python. Uporabili smo naslednje knjižnice:

- **OpenGL**: Aplikacijski programski vmesnik (API) za grafiko
  - **GLFW**: kreiranje okolja OpenGL
  - **GLEW**: nalaganje razširitev OpenGL
  - **GLM**: matrične in vektorske aplikacije
- **Kinect SDK**: API za Kinect
- **FFmpeg**: dekodiranje video zapisov
- **stb\_image**: branje slikovnih datotek

### 5 PERSPEKTIVNA ANAMORFOZA NA NERAVNO POVRŠINO

Postopek za inverzijo anamorfične deformacije slike smo razdelil na več korakov.

*Pridobivanje globinske slike.* Globinske slike, ki jih pridobiva Kinect imajo dimenzijo  $512 \times 424$ , slikovne pike pa imajo celoštevilске vrednosti, ki so predstavljene s 16 biti. Vsaka od teh

vrednosti predstavlja razdaljo izraženo v milimetrih. Če te vrednosti preslikamo v sivinsko sliko, dobimo globinsko sliko, kjer so v našem primeru svetle točke bolj oddaljene od senzorja. Kjer Kinect ni mogel zajeti globine, so točke črne barve.

*Aproksimacija manjkajočih globinskih podatkov.* Ker Kinect ne more zajeti globine v vsaki točki bodisi zato, ker je bodisi točka preveč oddaljena, ker se infrardeča svetloba, ki jo Kinect uporablja, odbije od površine ali zaradi šuma. Manjkajoče vrednosti določimo z aproksimacijo na osnovi sosednjih točk.

*Konverzija globinske slike v oblak 3D točk.* Vrednosti posameznih slikovnih točk v globinski sliki spremenimo v koordinate 3D točk z naslednjo enačbo:

$$\vec{position} = depth * \begin{bmatrix} \left(\frac{2x}{width-1} - 1\right) * \tan\left(\frac{fov_x}{2}\right) \\ \left(\frac{2y}{height-1} - 1\right) * \tan\left(\frac{fov_y}{2}\right) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

kjer je:

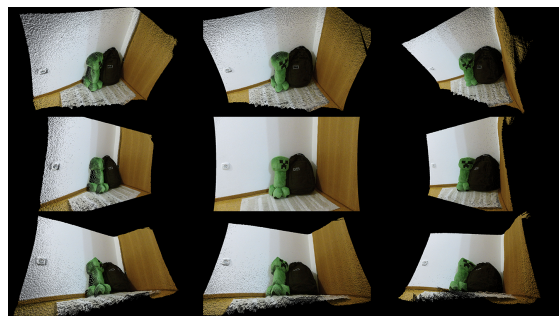
$depth$  = globina

$x, y$  = indeks točke v globinski sliki

$width, height$  = resolucija senzorja v hor. in vert. smeri

$fov_x, fov_y$  = zorni kot Kinecta v hor. in vert. smeri v radianih

Ker ima Kinect tudi barvno kamero, lahko poveže globinske točke s ustreznimi barvnimi vrednostmi iz barvne kamere. Zato lahko te barve pripišemo tudi 3D točkam. Na sliki 6 je pogled na oblak 3D pobarvanih točk z različnih zornih kotov.

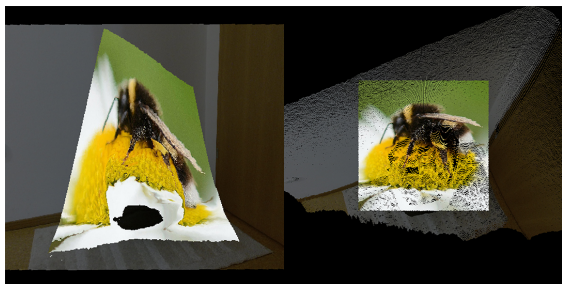


Slika 6: Pogled na oblak točk z različnih zornih kotov.

*Virtualna anamorfoza.* Najprej bomo izračunali virtualno anamorfozo v virtualnem prostoru, preden to naredimo v realnem prostoru. Najprej predpostavimo, da imamo virtualnega opazovalca, ki gleda v smeri pravokotno na smer projekcijskega snopa. Nato si predstavljajmo, da ta opazovalec projicira sliko na razgibano projekcijsko površino. Ta slika bo za opazovalca izgledala povsem pravilno, toda iz smeri projektorja bo popačena. Za vsako točko v oblaku 3D točk, ki predstavlja projekcijsko površino, izračunamo smer med opazovalcem in to točko in ugotovimo, kje ta premica prebada projecirano sliko. Na ta način določimo korespondenco med vsako točko v oblaku 3D točk in ustreznim pikslom projecirane slike. Ko 3D točkam pripišemo korespondenčno teksturo iz slike, se v oblaku 3D točk pojavi popačena slika, vendar če na oblak pogledamo iz smeri virtualnega opazovalca, dobimo nepopačeno sliko (slika 7).

*Prava anamorfoza.* Da bi dosegli isti učinek tudi v realnem svetu, moramo sedaj izračunati sliko, ki naj jo projecira projektor, da bi opazovalec videl nepopačeno sliko. Za vsak piksel





**Slika 7: Virtualna anamorfoza: pogled iz smeri projektorja (levo) in pogled iz smeri virtualnega opazovalca (desno).**

projecirane slike izračunamo smer v katero se ta piksel projicira v 3D prostoru. Zanima nas, kje je presečišče med to smerjo in projekcijsko površino, ki pa je predstavljena kot oblak 3D točk. Dodaten problem povzroča še različna resolucija projecirane slike, ki je veliko višja od resolucije globinskega senzorja (Kinecta), ki definira oblak 3D točk. Zato večina pikselov projecirane slike ni imela direktne korespondenčne 3D točke, ampak smo morali iz štirih najbližjih 3D točk izračunati približek presečišča. Za vsako presečiščno točko smo nato, upoštevaje pozicijo virtualnega opazovalca, lahko povezali piksele projecirane slike z ustreznim pikslom na sliki.

Ker je ta postopek dokaj zamuden, smo uporabili večnitno procesiranje, saj je določanje vrednosti posameznih pikselov v projecirani sliki, neodvisno drug od drugega. Primer tako izračunane projecirane slike je na sliki 8.



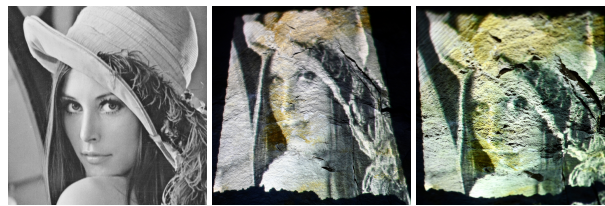
**Slika 8: Anamorfoza v oblaku 3D točk (levo) in projecirana anamorfično deformirana slika (desno).**

*Kalibracija.* Preden posnamemo 3D model površine za projeciranje ga moramo kalibrirati z video projektorjem. Implementirali smo funkcijo, ki na oblak 3D točk nariše rdeč pravokotnik, ki predstavlja področje, za katerega Kinect pričakuje, da bo nanj projecirana slika. Uporabnik mora nato ročno poravnati pozicijo Kinecta ali video projektorja tako, da se rdeči pravokotnik poravna s projecirano sliko.

## 6 REZULTATI IN ZAKLJUČEK

Slika 9 prikazuje projekcijo fotografije v horizontalni smeri na nagnjeno razbrzdano kamnito površino in pogled na to projekcijo navpično navzdol, kjer se anamorfoza razkrije — proporcije slike so enaki kot na originalni fotografiji. Program na zmogljivem osebнем računalniku teče dovolj hitro, da lahko v realnem času procesiramo tudi video [1].

Zaradi nenatančnosti pri zajemu globinske slike je v anamorfični sliki še nekaj nenatančnosti, kar bi bilo možno preseči z bolj



**Slika 9: Levo: originalna slika; Sredina: projecirana slika na nagnjeno, neravno površino; Desno: pogled na projecirano sliko navpično navzdol.**

natančnim globinskim senzorjem. Vseeno pa je tak način video projekcije na poljubno neravno površino možno uporabiti za številne aplikacije. Če bi v živo zajemali globinsko sliko, kar Kinect nenazadnje omogoča, bi bilo možno projecirati nedeformirane slike in video tudi na gibajoče se tarče.

## ZAHVALA

Raziskovalni program Računalniški vid št. P2-0214 (B) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

## LITERATURA

- [1] Rok Cej. *Demonstracija anamorfoze na neravno površino (video)*. 2020. URL: [http://youtu.be/\\_eypZIZTRcM](http://youtu.be/_eypZIZTRcM) (pridobljeno 10. 9. 2020).
- [2] Daniel L Collins. "Anamorphosis and the Eccentric Observer: History, Technique, and Current Practice". V: *Leonardo* 25.2 (1992), str. 179–187.
- [3] Daniel L Collins. "Anamorphosis and the Eccentric Observer: Inverted Perspective and Construction of the Gaze". V: *Leonardo* 25.1 (1992), str. 72–82.
- [4] Creators. *Box*. 2013. URL: <https://youtu.be/IX6JcybgDFo> (pridobljeno 24. 9. 2020).
- [5] Anselm Grundhöfer in Daisuke Iwai. "Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications". V: *Computer Graphics Forum*. Zv. 37. 2. Wiley Online Library. 2018, str. 653–675.
- [6] Brett Jones in sod. "RoomAlive: Magical Experiences Enabled by Scalable, Adaptive Projector-Camera Units". V: *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2014, str. 637–644.
- [7] *Lightform, Design Tools for Projection*. 2020. URL: <http://lightform.com> (pridobljeno 10. 9. 2020).
- [8] Robert Ravnik in sod. "Dynamic anamorphosis as a special, computer-generated user interface". V: *Interacting with computers* 26.1 (2014), str. 46–62.
- [9] Franc Solina in Blaž Meden. "Light fountain—a virtually enhanced stone sculpture". V: *Digital Creativity* 28.2 (2017), str. 89–102.
- [10] Solina, Franc. *Light Fountain 2 - Galaxy*. 2018. URL: <http://youtu.be/y6NAiXINm20> (pridobljeno 10. 9. 2020).
- [11] Wikipedia contributors. *Felice Varini — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2020. URL: [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Felice\\_Varini&oldid=953793776](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Felice_Varini&oldid=953793776) (pridobljeno 10. 9. 2020).
- [12] Wikipedia contributors. *Projection mapping — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2020. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Projection\\_mapping](https://en.wikipedia.org/wiki/Projection_mapping) (pridobljeno 10. 9. 2020).