

PC-CAVE

Sistem popolne potopitve v navidezno okolje za osebne računalnike

Iztok Bajec
mentor: doc. dr. Niko Zimic
Fakulteta za računalništvo in informatiko
Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
ibajec@lotus.fri.uni-lj.si

Povzetek

Do nedavnega je bil pojem navidezne resničnosti povezan z grafičnimi superračunalniki, katerih nakup si je lahko privoščila le vojska. Vse hitrejši procesorji, predvsem pa prodor 3D grafičnih pospeševalnikov iz sveta grafičnih postaj v osebne računalnike, botrujejo vse več idejam in možnostim izkoristka te tehnologije.

Trend izgradnje vse bolj natančnega posnemanja narave in vse bolj kompleksnih umetnih svetov je opazen tudi v industriji računalniških igrar. To sili proizvajalce 3D grafičnih pospeševalnikov v nenehno izpopolnjevanje svojih izdelkov. Zadnje čase smo priča igrar s kompleksnostjo in kvaliteto prikaza, ki sta bili še pred nedavnim dosegljivi le vojaškim simulatorjem.

Zaradi popularnosti sistemov na osnovi Intel procesorjev in z Microsoft Windows operacijskimi sistemi, predvsem pa zaradi proizvajalcev vse bolj priljubljenega in podprtega vmesnika za 3D grafiko DirectX, se nam je rodila ideja o izgradnji sistema za navidezno resničnost, ki temelji na tej kombinaciji.

Sledeči članek predstavlja pregled razpoložljive strojne opreme in ubranih pristopov pri realizaciji sistema PC-CAVE - prvega delujočega sistema za navidezno resničnost na osebem računalniku, ki temelji na "off-the-shelf" sestavnih delih.

Abstract

Not long ago virtual reality was a synonym for graphical supercomputers, for their high prices, affordable only to military establishments. Along with incredibly fast progress of microprocessor speeds, especially the arrival of 3D graphics accelerators for desktop computers, there are many new fresh ideas and possible uses of this fascinating technology.

The trend of making more and more accurate simulations and more and more complex environments can also be noticed in the gaming industry, which is pushing the developers of 3D graphics accelerators for constant upgrading of their products. Therefore we can nowadays witness games that are achieving complexities and rendering quality which were not long ago reserved strictly for military simulators.

Bearing in mind the popularity of the Intel platform and Microsoft Windows operating systems, especially with the developers more and more popular DirectX API, we arrived at the idea of developing a virtual reality system, based on this platform.

This article is a review of the currently available hardware and the approaches used when developing a system called PC-CAVE - the first working personal computer virtual reality system based on off-the-shelf products.

1 Navidezna resničnost konec 18. stoletja

Že vse od obdobja renesanse so skušali slikarji poustvariti naravo v tolikšni meri, da bi naključni opazovalec ne zmoget razlikovati med naslikanim in resnično obstoječim. Stremenje po tej iluziji je kasneje, konec 18. stoletja, privedlo do izgradnje velikih krožnih slik, imenovanih *panorama*, pri katerih opazovalci stojijo na sredini ovalnega prostora in na polovici višine slike. Panorama je za takratni čas predstavljal vrhunec v uspešnosti prevare opazovalca [1].

Morda se sprašujemo, zakaj bi sploh radi opazovalca preslepili o resničnosti neresničnega. Nekateri vidijo v tem nesmisel, saj po eni strani uničujemo

naravo, po drugi strani pa želimo graditi neke domišljajske svetove, ki naključnega opazovalca preslepijo v tolikšni meri, da ne loči več med prikazanim in resnično obstoječim.

A vseeno že ob prvem podrobnejšem razmisleku opazimo možne uporabnosti takšne prevare:

1. v avtomobilski industriji, kjer bi lahko sedli v prototip novega avtomobila, ki bi obstajal le v obliki binarne kode, in preverili njegovo ergonomijo.
2. v gradbeni in pohištveni industriji, kjer bi si kupec lahko ogledal svojo novo, še ne zgrajeno hišo in izbiral ustrezno notranjo opremo ter morda le z dotikom stene zamenjal njeno barvo.
3. v kirurgiji, kjer je zamisel, da bi se študentje medicine lahko učili svojih spretnosti in pridobivali znanja na umetnih, neobstoječih pacientih, naravnost čudovita. Primer delujoče aplikacije s tega področja je učenje ortopedske kirurgije [2].

Človeška sposobnost zaznavanja je omejena na pet osnovnih čutov: vid, sluh, otip, voh in okus. Vidno zaznavanje so precej uspešno prevarali že likovni umetniki s konca 18. stoletja z že prej omenjenimi panoramami, katerih edina vidnejša omejitev je bila statičnost. Danes, ko smo priča neverjetno hitremu razcvetu tehnologije in predvsem napredku integriranih sistemov, si pri teh prevarah pomagamo še s tehnologijo in napadamo tudi druge čute, ne le vidnega zaznavanja opazovalca.

Omejimo se le na prevaro opazovalčevega vidnega zaznavanja. Dejstvo je, da je vidno zaznavanje zelo težko prevarati. Kako potemtakem prepričati opazovalca, da ne loči več med resnično obstoječimi predmeti in predmeti, prikazanimi na platnu?

Bralec naj se ozre okrog sebe in pomisli, kaj lahko o predmetih, ki ga obkrožajo, pove, ne da bi se jih dotaknil. Najprej bo opazil barvo. Opiše lahko barvo predmetov in morda njihov vzorec.

Kljub določenim težavam s simulacijo porazdelitve svetlobe po prostoru v pravem času (ang. *real time*) je imitacija barve predmeta, ne glede na digitalizacijo in omejen razpon števila barv, relativno preprosta tudi v računalniški grafiki.

Naslednja lastnost, ki jo bo bralec opazil, je velikost posameznega predmeta. Tu pa že naletimo na manjše težave. Omejeni smo namreč z velikostjo platna oziroma z velikostjo računalniškega zaslona (v nadaljevanju samo platno). Posledica tega je nezmožnost prikaza vseh predmetov v naravni

velikosti.

Zadnja lastnost, ki jo bralec opazi, je sicer povezana z velikostjo predmeta. Zdi se nam sicer samoumevna, vendar je zaznavno in simulacijsko najkompleksnejša. To je relacija medsebojne oddaljenosti predmetov.

1.1 Zaznavanje globine

Kot smo spoznali že v uvodu, so se s to problematiko ukvarjali slikarji že vse od časov renesanse.

Z uporabo ustreznega senčenja, velikosti ter medsebojnega prekrivanja predmetov so opazovalcu pričarali občutek prisotnosti naslikanih predmetov oz. občutek prostora. Če se bralec še enkrat spomni uvodnega razmisleka in opazovanja okolice, spozna da so to lastnosti, katere je tudi sam najprej opazil.

- **senčenje** nudi osnovno informacijo prostorskega. Slikarji so se naučili, kako z uporabo senc, svetlobe in barv naslikanih predmetov prikazati njihovo obliko in tako poudariti okrogline ali ostrost robov, ter jih pričarati kot resnično obstoječe. S pomočjo senc, ki jih predmeti puščajo, so se naučili pričarati občutek, da predmet leži na neki površini.
- Bralec bo opazil, da mu svetli predmeti oz. predmeti živih barv dajo občutek, da so bližje kot medli predmeti oz. predmeti temnih barv.
- **velikost predmetov** vključuje velikost slike predmeta, projiciranega preko očesne leče na očesno mrežnico. Naši možgani vedo, da so predmeti, ki se nahajajo daleč, videti manjši kot predmeti, ki so nam blizu. Ta informacija nam pomaga pri presoji oddaljenosti znanih predmetov. Če, na primer, vidimo nekoga v daljavi, ne bomo rekli, da je pritlikav, temveč da je daleč.
- **medsebojno prekrivanje** predmetov je tako očitna lastnost, da jo večinoma jemljemo kot samoumevno. Naj si bralec vzame trenutek in pogleda svojo ročno uro. Občutek, da je ura bližje njemu oz. pred roko, ki se nahaja za njo, dobi zaradi njene neprosojnosti - ne vidi dela roke, ki je za njo. Predmeti, ki so nam bližje, prekrivajo predmete, ki so bolj oddaljeni od nas.
- **gradient vzorca** (ang. *texture gradient*) je edina lastnost, katero so odkrili šele novodobni psihologi. Predmet z določenim vzorcem, npr. travnik, daje občutek prostorskega zaradi vzorca, ki je očitnejši v naši bližini.
- **meglica** (ang. *aerial perspective*) je zmanjšanje vidljivosti oddaljenih predmetov kot posledica atmosferskih dejavnikov. Pokrajinski razgledi mnogokrat v daljavi dobijo pridih modre

meglíce, kot posledico razprševanja rdeče svetlobe v vmesnem ozračju.

- **gibalna paralaksa** (ang. *motion parallax*) je posledica opazovalčevega gibanja. Predstavlja lastnost oddaljenih predmetov, da se gibljejo počasneje kot predmeti, ki so bližje. Bralec se lahko spomni, da je pri zadnji vožnji z vlakom opazil, da se bližnja drevesa hitreje premikajo kot oddaljeni hribi. Poudariti velja, da je gibalna paralaksa neodvisna od opazovalčeve rotacijske osi.
- **perspektiva**, razmerje med predmeti v bližini in oddaljenimi predmeti, je po svoji naravi za posredovanje občutka prostorskega najpomembnejša, saj je stopnja občutka prostorskega z njo sorazmerna. S poudarjanjem perspektive, morda celo pretiravanjem, povečamo občutek oddaljenosti predmetov v daljavi in s tem omogočimo opazovalcu, da lažje in hitreje dobi občutek prostorskega.

Uporaba teh tehnik zadošča, dokler imamo zaprto eno oko ... ko pa odpremo obe očesi, se pojavijo prve pomanjkljivosti.

Zaradi fizičnega razmika oči, pri odraslem človeku v povprečju 64mm, vidimo z vsakim očesom rahlo drugačno sliko (slika 1), ki ju naši možgani združijo v eno samo celovitejšo in popolnejšo sliko, kar ima za posledico zopet občutek prostorskega.



Slika 1: prostorski par.

Vprašanje je, kako uspešno prikazati opazovalcu takšno sliko, saj platno zaradi svoje ploskosti ne more zadostiti tej zahtevi.

Pri panoramah so ta problem reševali na zanimiv in iznajdljiv način. Med platno in opazovalno ploščad so namestili nekaj resničnih predmetov, ki so dodatno okrepili iluzijo resničnega obstoja naslikanega in poudarili občutek globine. Nekateri izmed resnično obstoječih predmetov so se delno nahajali v platnu in bili le delno naslikani, s čimer je bila še dodatno zamegljena meja med naslikanim in resnično obstoječim.

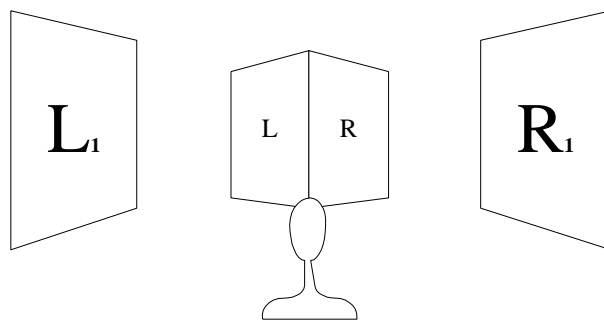
Med drugim so tudi vstop v samo panoramo dodelali tako, da je npr. pri prizoru pomorske bitke

potekal skozi temačen hodnik, in tako že sam po sebi poskrbel za izgubo kratkotrajnega spomina o zunanjem, resničnem svetu. Opazovalna ploščad pa je predstavljala poveljniški most ene izmed ladij, vključenih v bitko [1].

Pri računalniških simulacijah in vizualizacijah, ki večinoma ne predstavljajo statičnih slik, je tak pristop neuporaben. Z razvojem tehnike pa so se vseeno pojavljale ideje, kako uspešno posredovati opazovalčevim očem dve rahlo različni sliki in mu s tem pričarati občutek prostorskega.

1.2 Načini prikaza prostorske slike

Že od nekdaj so napredni ljudje, kot sta bila Evklid in Leonardo, vedeli, da z vsakim očesom vidimo drugačno sliko sveta. Toda šele Whetstone je, s pomočjo naprave imenovane *stereoskop* (slika 2), leta 1838 to razložil tudi širšim množicam [3].



Slika 2: Whetstonov stereoskop.

1.2.1 Dispariteta očesne mrežnice

Če bi lahko posneli sliki z mrežnic levega in desnega očesa ter ju prekrili, bi opazili, da sta ti dve sliki rahlo različni. Ta različnost je posledica dveh različnih pogledov. Psiholozi to lastnost imenujejo *dispariteta*.

Dispariteta predstavlja razmik, v horizontalni smeri, točk pri prekritih slikah očesne mrežnice, ki predstavljajo isti predmet v prostoru. Istoležne točke, ki izhajajo iz istih predmetov v prostoru, bomo imenovali točke z *nično dispariteto*.

Občutek disparitete in pomembnost nične disparitete si bralec lahko pridobi z enostavnim poskusom. Postavite prst predse. Najprej se osredotočite na prst; zdaj vaše oči konvergirajo k prstu - tj. optični osi vašega pogleda se na prstu sekata. V vaših očeh se nahaja množica mišic, ki skušajo premakniti oči tako, da bo pri obeh slika prsta na sredini očesne

mrežnice. Posledica tega je nična dispariteta prsta. Če pa sedaj preusmerite pozornost na predmete v daljavi, boste opazili, da vidite prst dvojno - dispariteta ni več nična.

1.2.2 Paralaksa

Sistemi sposobni prikaza prostorske slike se razlikujejo od navadnih le v tem, da zmorejo opazovalčevim očem prikazati dve rahlo različni sliki. Če sedaj prekrijemo ti dve sliki, tedaj razmiku med točkami, ki prikazujejo isti predmet, pravimo paralaksa. Posledica paralakse je dispariteta točk na očesnih mrežnicah opazovalčevih oči, kar mu da občutek prostorskega prostora.

Ena izmed prvih aparatov, ki so bile sposobne takšnega prikaza, je *View-Master*. Ta s pomočjo dveh različnih optičnih sistemov prikazuje dve sliki. Posneti sta bili s pomočjo dveh fotografskih aparatov, pritrjenih na posebno vodilo, tako da je bil razmik med njima le v horizontalni smeri. Princip delovanja modernih sistemov ostaja enak. Uporabnikovim očem se prikazujeta dve različni sliki, le načini posredovanja se spreminjajo. Moderni posredovalniki projicirajo kodirano sliko in s pomočjo posebnih vmesnikov omogočijo uporabniku, da z vsakim očesom vidi ustrezno sliko.

Paralakso delimo na štiri osnovne razrede:

- **nična paralaksa** (ang. *zero parallax setting* - ZPS) se pojavi, ko se točke, pripadajoče istemu predmetu v prostoru, pri projiciranju prostorske slike na platno popolnoma prekrivajo - vrednost paralakse je tedaj enaka 0. Ko opazovalec opazuje takšno sliko, se optični osi njegovega pogleda srečata na platnu. Z drugimi besedami, če narišemo črto, ki poteka od uporabnikovih oči do platna, se le-ti sekata na platnu.
- **pozitivna paralaksa** je pojav, ko je vrednost paralakse t enaka razmiku med očmi t - vzporedni optični osi - ter pojav, ko se optični osi sekata za platnom. V naravi vzporednost nastopi v primeru, če opazovalec opazuje predmete, ki se nahajajo v veliki oddaljenosti.
Pozitivna paralaksa med 0 in t pričara opazovalcu občutek, da se opazovani predmet nahaja v prostoru za platnom.
Prikazovanje slik z vzporedno pozitivno paralakso na majhnih platnih, npr. na monitorjih, povzroča opazovalcu težave pri gledanju takšne slike.
- **divergentna paralaksa** je še ena oblika pozitivne paralakse. Nastopi v primeru, ko je vrednost paralakse večja od t . Tu jo omenjamo

zaradi njene posebnosti. Pojav takšne paralakse v naravi namreč ni možen, zato opazovalec pri opazovanju slik, ki takšno paralakso uporabljajo, občuti nelagodje. Opazovalec ga občuti zaradi napora očesnih mišic, ki se trudijo združiti takšno sliko.

- **negativna paralaksa** je pojav, ko se optični osi sekata pred platnom. Pravimo ji tudi križna paralaksa. Pri opazovanju predmeta z negativno paralakso opazovalec dobi občutek, kot da se ta predmet nahaja pred platnom oz. nekje med platnom in njim samim. Rečemo tudi, da se ta predmet nahaja v opazovalčevem prostoru.

1.3 Kodiranje prostorske slike

Kodiranje prostorske slike pogojuje uporabo ustreznih vmesnikov za njihovo dekodiranje. Če bi npr. želeli uporabljati prej omenjeni *View-Master*, bi kodiranje predstavljalo sliko, kjer se podsliki prostorskega para nahajata druga ob drugi.

Z razvojem tehnike so nastali različni načini kodiranja slike. Podrobneje si bomo ogledali le tiste tipe kodiranja, ki delujejo na podlagi časovnega multipleksiranja. Naprave, ki takšno sliko dekodirajo, tako da uporabnik z levim in desnim očesom vidi ustrezni podsliki, lahko predstavljajo npr. posebna očala (3.1.3).

- **interpolacija** je način kodiranja, kjer je prostorski par združen v eno sliko. Lihe vrstice te slike predstavljajo sliko, namenjeno enem očesu, sode pa drugemu. Ta način kodiranja je uporaben predvsem zaradi svoje preprostosti, saj za dekodiranje vsake posamezne slike potrebujemo le preprost preklopnik, ki polovico vseh vrstic posreduje enem očesu, polovico pa drugemu. Zaradi svoje nezahtevnosti se uporablja pri prikazovanju prostorskih slik na televizorjih, monitorjih ter standardnih videorekorderjih.
- **zgoraj-spodaj** je način kodiranja, ki je bil namenjen uporabi na obstoječi aparaturi - uporabi pri prikazovanju prostorskih slik na televizorjih, videorekorderjih ter monitorjih. Kljub temu se je obdržal le v računalniški grafiki. Zasnovan je v obliki združitve prostorskega para v eno samo sliko, kjer zgornja polovica ekrana predstavlja sliko, namenjeno enem očesu, spodnja pa drugemu. Pri prikazovanju na računalniškem monitorju, ki osvežuje s frekvenco 60Hz, traja prikaz ene takšne podslike 1/120s. Ob prikazovanju na računalniškem monitorju s podvojeno frekvenco osveževanja se prostorsko ločeni podsliki pretvorita v časovno ločeni podsliki.

Zaradi tega postane posredovanje ustrezne podslike ustreznemu očesu relativno preprosto opravilo. Uporabniku je potrebno le zakriti tisto oko, kateremu trenutna podslika ni namenjena.

- **levo-desno** je način kodiranja, namenjen rešitvi problema ob uporabi kodiranja zgoraj-spodaj pri video napravah. Težava je premajhno število rasterskih vrstic. Ta težava se ne pojavi v računalniški grafiki, saj sodobni monitorji uporabljajo veliko večje število vrstic kot televizorji in videorekorderji. Od tod obstanek uporabe kodiranja zgoraj-spodaj predvsem pri računalniški grafiki. Kodiranje predstavlja združitev prostorskega para v eno sliko, podobno kot prva dva pristopa, z razliko da se v tem primeru podsliki nahajata druga ob drugi. S posebnimi postopki, ki jih tu zaradi njihove naravnosti v video naprave ne bomo podrobneje obdelali, se takšna kodirana slika pretvori v časovno ločeni podsliki, namenjeni levemu oz. desnemu očesu.
- **zaporedno** kodiranje, za razliko od prej omenjenih načinov, ne predstavlja dejanskega kodiranja prostorskega para v eno samo sliko. To se uporablja predvsem pri delovnih postajah ter najnovejših stereoskopsko prilagojenih računalnikih. Vzrok je preprost: kodiranje temelji na zaporednem izmenjevanju podslik prostorskega para pri visokih osveževalnih frekvencah - tega pa so sposobne le delovne postaje. Postopek posredovanja ustrezne podslike ustreznemu očesu je enak kot pri kodiranju zgoraj-spodaj.
- **pasovno** kodiranje (ang. *White-Line-Code* - WLC) je namenjeno predvsem multimedijskim sistemom PC. Kljub nizki ceni predstavlja visokokvalitetno rešitev stereoskopskega prikazovanja prostorske slike. Pasovno kodiranje je bilo razvito kot zamisel o najbolj fleksibilnem možnem načinu kodiranja, saj je tak pristop neodvisen od hitrosti osveževanja in deluje tudi pri interpolaciji. Osnova tega načina je belo-črni kodni pas na dnu vsake izrisane slike. V trenutku, ko izrisujemo sliko levega očesa, ima ta pas daljši črni del, pri izrisu slike desnega pa beli del. Naloga strojne opreme, ki skrbi za posredovanje ustrezne podslike ustreznemu očesu, je zaznavanje te kode in zakritje ustreznega očesa.

2 Sistemi navidezne resničnosti

Najnovejši sistemi, ki se ukvarjajo s tematiko prostorskega, se imenujejo sistemi za navidezno

resničnost (ang. *Virtual Reality* - VR). V grobem jih delimo na enouporabniške in večuporabniške sisteme.

2.1 Enouporabniški sistemi navidezne resničnosti

Približno 200 let po prvih panoramah so raziskovalci sestavili čelado, na katero so obesili dva ekrana, vsakega pred ustrezno oko uporabnika, ter mu na tak način posredovali podsliki prostorskega para. To čelado so poimenovali VR čelada (ang. *Head Mounted Display* - HMD). VR čelada je danes naprava, na katero vsakdo najprej pomisli, ko je omenjena navidezna resničnost.

Težava VR čelade se skriva že v sami namembnosti - to je naprava, ki dopušča le enouporabniški VR sistem, kar nam nakazuje težavnost izvedbe medsebojnega sodelovanja več uporabnikov v umetno zgrajenem - *navideznem* - prostoru. Drugi problem je visoka cena tehnološko najbolj dovršenih produktov, kar zopet potrjuje, da je to pretežno enouporabniška naprava. Najbolj pa moti dejstvo, da se pri večini modelov ne moremo znebiti občutka, da gledamo v ekran, saj nam ekrana, postavljena pred oči, ne prekrivata celotnega vidnega polja in tako preko perifernega vida dobimo občutek okna v navidezni svet.

Z VR čelado so, zaradi prevare predvsem vidnega zaznavanja uporabnika, povezane tudi nezaželene motnje - slabost, vrtoglavica in dezorientiranost (ang. *cybersickness*) [4].



Slika 3: slonček.

Kljub temu sta glavni prednosti VR čelade v tem, da predvsem zaradi svoje zasnove z dvojnimi ekranom, ob uporabi interpolacijskega kodiranja prostorske slike, že v osnovi dopušča stereoskopski prikaz in da zaradi svoje enouporabniške usmerjenosti dopušča sledenje smeri uporabnikovega pogleda. S pomočjo dodatnih vmesnikov, kot je npr. slonček (slika 3) omogoča tudi uspešno sledenje uporabnikove pozicije v prostoru, s čimer dosežemo še večji občutek prostora [5, 6].

2.2 Večuporabniški sistemi navidezne resničnosti

Večuporabniški sistemi izkoriščajo prednosti, znane iz kinodvoran - prednosti, ki jih nudi veliko platno. Z velikim platnom pokrijemo velik del uporabnikovega vidnega polja in lahko prikažemo manjše predmete v naravni velikosti (v razmerju 1:1). Med drugim z ločitvijo prikazne površine in uporabnika dopustimo tudi večje število opazovalcev. A s tem nastanejo težave pri posredovanju prostorske slike.

2.2.1 Sistemi WorkDesk in WorkWall

WorkWall sistemi predstavljajo sisteme, s katerimi lahko prikazujemo stereoskopske prikaze velikih razsežnosti. Idealni so za računalniške simulacije, vizualizacije in skupinske predstavitve. Zaradi svoje velikosti že v osnovi omogočajo večuporabniško skupinsko delo, kar dosežejo z uporabo tehnike zlitja slike večih projektorjev. Ta način dopušča uporabo visokih ločljivosti in predstavitev prikazanih predmetov v razmerju 1:1.

Sistemi Immersive WorkWall vsebujejo aktivna očala za dekodiranje prostorskega para slik ter 3D zvočni sistem, s čimer vzbujajo tudi uporabnikov slušni čut. Njihova zgradba je zasnovana modularno in omogoča skalabilnost do mer 2,50m×8m. Njihove cene se pričnejo pri 200.000 dolarjih [7].

WorkDesk sistemi (natančneje ImmersaDesk) temeljijo na projektorju skritem v samem trupu konstrukcije. Ta preko zrcala projicira sliko na platno in tako prikaže sliko srednjega formata. Glavna odlika teh sistemov je njihova premičnost, saj jih lahko zaradi njihove konstrukcije hitro in preprosto premikamo po prostoru. Hkrati pa zaradi velikosti prikazne površine dokaj uspešno prekrijejo celotno vidno polje uporabnika in s tem dosežejo uporabnikov občutek popolne potopitve v navidezni prostor, ne da bi ga tudi v resnici popolnoma obkrožali.

Sistemi WorkWall in WorkDesk temeljijo na CRT (ang. *Cathode Ray Tube*) projektorjih proizvajalca

Elektrohome, ki že v osnovi podpirajo stereoskopski prikaz. Za dekodiranje prostorskega para slik skrbijo očala proizvajalca Stereographics [8].

2.2.2 Sistemi WorkSpace

Leta 1992 so raziskovalci Laboratorija za vizualizacije Univerze Illinois v ZDA razvili sistem za navidezno resničnost in ga poimenovali CAVE (ang. *CAVE automatic virtual environment*). CAVE (slika 4) je konstrukcija v obliki kocke s stranico 3m, sestavljene iz treh hrbtno projiciranih platen ter talne projekcije. To je sistem, ki uporabniku pričara občutek popolne potopitve. Vključuje vidno, slušno ter otipno zaznavanje in predstavlja prvi sistem, ki dovoljuje večuporabniško izkušnjo navideznega prostora.



Slika 4: CAVE sistem proizvajalca Fakespace.

Z željo po še večji uporabnosti teh sistemov in predvsem po njihovi modularni zasnovi, so pri proizvajalcu Fakespace razvili sistem RAVE, ki se lahko hitro spremeni v sistem stereoskopske stene, potopitveni kino ali pa v vstopni VR sistem, podobno kot so sistemi družine CAVE [8].

Sistemi WorkSpace temeljijo na enaki strojni opremini kot že prej omenjeni sistemi WorkWall in WorkDesk.

Vsi ti sistemi so zelo učinkoviti: nudijo visoko stopnjo realizma, visoko interaktivnost, pa tudi visok davek ... ceno. Vsi ti sistemi namreč temeljijo na CAVELib vmesniku, ki nudi splošno podporo pri

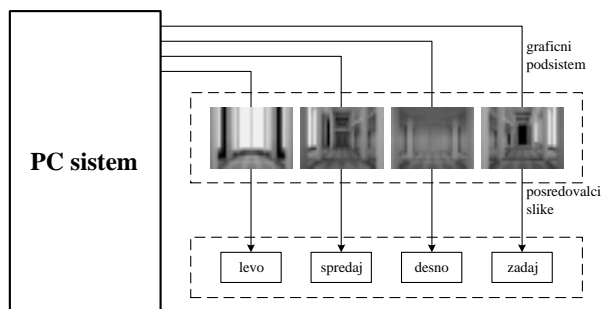
gradnji navideznih okolij, vendar je na voljo le za delovne postaje oz. grafične superračunalnike.

Z napredkom tehnologije osebnih računalnikov (Wintel arhitektura - Microsoft Windows operacijski sistem + Intel procesorji) predvsem v 3D grafičnem področju je opazen njihov prodor tudi na dosedaj njim nedostopna področja. Napredek so opazili tudi pri podjetju SGI, ki še vedno drži primat v visokorazredni tehnologiji s svojimi Onyx2 grafičnimi superračunalniki, saj v svoje najnovejše Wintel produkte vgrajujejo procesorje podjetja nVidia [9]. Slednje drži primat v višjem spodnjem cenovnem razredu s svojimi namenskimi grafičnimi procesorji GeForce GTS.

Vedno hitrejši procesorji in vedno boljša podpora 3D grafiki na Wintel arhitekturi je pripeljala do ideje za izgradnjo sistema navidezne resničnosti. Poimenovali smo ga PC-CAVE (ang. *personal computer CAVE*).

3 PC-CAVE sistem

Kot že prej omenjeno, CAVE sistem predstavlja sistem za navidezno resničnost, ki nudi uporabniku občutek popolne potopitve v navidezni prostor. Izgradnja sistema, ki bi spadal v to družino, predstavlja potrebo po izgradnji sistema, sposobnega vzporednega izračuna, izrisa ter prikaza več prostorskih slik.



Slika 5: PC-CAVE sistem.

Razpoložljivost strojne opreme in njene omejitve privedejo do dveh aplikativnih načinov izračuna in izrisa prostorskih slik:

- **multiple** ... kjer imamo v enem računalniku več grafičnih kartic sposobnih 3D pospeševanja (v nadaljevanju grafičnih kartic). Vsaka od njih krmili svoj izhod (izračun in izris prostorske slike). Tu je prednost hitrejšega dostopa posamezne kartice do glavnega pomnilnika,

vendar smo omejeni s številom uporabljenih grafičnih kartic. Dodatno pomanjkljivost, ki se pojavi ob zahtevah po izrisu velikega števila trikotnikov na posamezno prostorsko sliko, predstavlja uporaba vodila PCI, saj s svojo nizko preputnostjo - 133MB/s - predstavlja ozko grlo sistema.

- **multiračunalnik** ... kjer imamo več medsebojno povezanih računalnikov. Grafična kartica vsakega računalnika krmili svoj izhod. Prednost predstavlja možnost uporabe večjega števila grafičnih kartic, vendar postane realizacija precej težja zaradi potrebe po medsebojnem usklajevanju ter zaradi prenosa velikih količin podatkov po omrežju. Dejstvo pa je, da z uporabo multiračunalniške rešitve, ob ustrezno napisani programski opremi, pridobimo na procesorski moči.

3.1 Posredovanje prostorske slike

Sistem za navidezno resničnost tudi nujno potrebuje posredovalca slike, ki bo sposoben posredovanja prostorskih slik in s tem uporabniku nudil občutek prostorskeosti. Posredovalce slik majhne do srednje površine bomo imenovali monitorji, medtem ko bomo posredovalce slik velike površine imenovali projektorji.

3.1.1 Monitorji

V monitorskem razredu nas ogled razpoložljive strojne opreme, ki nudi občutek prostorskeosti, privede do avtostereoskopskih monitorjev ter Z-Screen mask.

- **avtostereoskopski** monitor je računalniški monitor, ki podpira stereoskopski prikaz prostorske slike na tak način, da s strani uporabnika ni potrebna uporaba nobenih posebnih vmesnikov za dekodiranje prikazane slike. Vmesnik - poseben sistem leč - se namreč nahaja na prikazni površini samega monitorja. Ti monitorji so v vseh primerih LCD (ang. *Liquid Crystal Display*), saj uporabljajo njihovo posebnost - način naslavljanja LCD projekcijske matrike. Slika, ki jo producira grafična kartica, pripeljejo do LCD projekcijske matrike tako, da sodi stolpci predstavljajo podsliko enega očesa, lihi pa drugega. Sistem leč, ki se nahaja pred LCD projekcijsko matriko, poskrbi da ustrezna podslika pride do ustreznega uporabnikovega očesa. Zaradi uporabe tehnologije LCD in sistema leč pride do pomanjkljivosti. Monitor je uporabljen pri majhnem številu opazovalcev (po proizvajalčevi specifikaciji največ šest), saj je zaradi same tehnologije vidni kot pravega prostorskega občutka omejen horizontalno zaradi sistema leč, vertikalno pa zaradi tehnologije LCD. Cenovni

razred takšnih monitorjev je med 9.000 dolarji za 15 palčni ekran in 14.000 dolarji za ekran velikosti 18,1 palca.

- **Z-Screen** maska je nastavek, ki ga pritrdimo na ekranski del CRT monitorja. Maska predstavlja polarizacijsko matriko, ki podsliki prostorskega para prikazanega na ekranu računalniškega monitorja krožno polarizira v različnih smereh. S pomočjo posebnih očal se ustrezna podslika prikaže ustreznemu očesu. Tudi ta sistem je neodvisen od načina kodiranja prostorske slike. Pozitivna lastnost Z-Screen maske je uporaba lahkih in relativno preprostih polarizacijskih stereo očal in s tem možnost dolgotrajne uporabe takšnih prikazovalnikov.

Zaradi majhnosti površine prikazane prostorske slike omenjenih dveh tehnologij in želje po izdelavi večuporabniškega sistema smo začeli razmišljati o uporabi projektorjev kot posredovalcev slike.

3.1.2 Projektorji

Projektorji so naprave, ki so sposobne posredovanja slike velike površine. V tem razredu srečamo tri tehnologije. Prva in tudi najstarejša je tehnologija katodne cevi; druga je tehnologija tekočih kristalov; zadnje čase pa se pojavlja še takoimenovana DLP (ang. *Digital Light Processing*) tehnologija. DLP tehnologijo bomo tu izpustili, saj je uporaba le-te pri posredovanju prostorskih slik omejena. Bralec si lahko o njej več prebere v [10].

- **CRT** - tehnologija katodne cevi temelji na projiciranju elektronskih snopov, podobno kot pri televizorjih, a s to razliko, da le-ti ne prižigajo fosforja na ekranski maski, temveč se preko sistema zreal ojačajo in prosto letijo do platna [10].
- **LCD** - tehnologija tekočih kristalov temelji na osnovi projiciranja snopa bele svetlobe skozi LCD zaslon. Tako se preko sistema leč na platno projicira povečana slika, ki je prikazana na LCD zaslonu. Slabost te tehnologije je - zaradi posebnosti načina naslavljanja slike prikazane na LCD zaslonu - nezmožnost uporabe načina kodiranja zgoraj-spodaj, ki zahteva podvojitve frekvence osveževanja oz. razteg polovice slike na celotno prikazno površino. Tudi sicer je uporabnost te tehnologije omejena, saj je frekvenca osveževanja LCD zaslona le 60Hz. Zaradi te pomanjkljivosti se ti sistemi uporabljajo večinoma le v povezavi s pasivno polariziranimi stereo očali. Zadnje čase se pojavljajo ti. stereo LCD projektorji, ki te pomanjkljivosti odpravljajo.

3.1.3 Stereo očala

Vprašanje, kakšen vmesnik, ki poskrbi da ustrezna podslika prostorskega para pride do ustreznega uporabnikovega očesa, bi bil uporabniku najbolj naraven, ima preprost odgovor: vmesnik v obliki očal. Kot smo že omenili, so stereo očala poseben vmesnik, ki v trenutku, ko je na platnu prikazana leva/desna podslika prostorskega para, poskrbi, da uporabnik z desnim/levim očesom te podsluke ne vidi. Rezultat tega je uporabnikov občutek prostorskega prostorskega para. Stereo očala v grobem delimo na pasivna in na aktivna. Sicer pa v splošni uporabi naletimo na sledeča:

- **dvobarvna očala** spadajo v razred pasivnih očal. Temeljijo na kombinaciji leč, kjer se leči razlikujeta v barvi. Ta kombinacija predstavlja tudi način kodiranja, ki zaradi svoje omejene uporabe v poglavju 1.3 ni bil omenjen. To je kodiranje z **barvnim ključem**, kjer se v prikazovani sliki nahajata obe podsluki prostorskega para. Podsluki sta predstavljeni vsaka s svojim barvnim ključem. Problem takšnega načina kodiranja in s tem posledično tudi očal je omejena sposobnost prikaza barvnih prostorskih slik ter težave pri izgradnji sistemov, delujočih v pravem času. Kljub temu se zaradi svoje preprostosti uporabljajo za masovne predstavitve - v kinematografih.
- **polarizacijska očala** tudi spadajo v razred pasivnih očal. Temeljijo na različno polariziranih lečah, ki prepuščajo le svetlobo ustrezne polariziranosti. Tak pristop omogoča neodvisnost od načina kodiranja, saj s pomočjo polarizacijske maske in posebnega platna omogoča opazovalcu, da z vsakim očesom vidi ustrezno izmed podsluk prostorskega para. Pristop deluje tako s CRT kot tudi z LCD projektorji.
- **aktivna očala** (ang. *shutter glasses*) temeljijo na izmenično prosojnih lečah iz tekočih kristalov in tako pri izmenjevanju projicirane podsluke prostorskega para nad 120Hz omogočijo opazovalcu, da z vsakim očesom vidi ustrezno podsluko. Zaradi takšnega pristopa je uporaba teh očal v kombinaciji z LCD projektorji nemogoča.

Prednost aktivnih očal in hkrati slabost polarizacijskih je, da ta ne zahtevajo posebnega platna, ki ohranja polariziranost svetlobe, tako da lahko projiciramo prostorsko sliko kamorkoli in uporabniku pričramo občutek prostorskega prostorskega para. Prednost polarizacijskih očal je preprostost njihove izdelave ter enostavnost zagotovitve nabav v velikih količinah. Posebnosti omenjenih tipov očal privedejo do štirih možnih načinov projiciranja prostorske slike.

- **CRT projektor + aktivna očala** predstavljata zanimivo kombinacijo predvsem zaradi svoje

preprostosti. Pri tej kombinaciji namreč ne potrebujemo posebnih platen. Med drugim aktivna očala, ki kljub rahlemu prepuščanju podsluke, ki prekritemu očesu ni namenjena, nudijo dokaj dober občutek prostorskega. Njihova slabost je zahteva po projektorjevi sposobnosti visokofrekvenčnih osveževanj projicirane slike in s tem povezana njegova visoka cena.

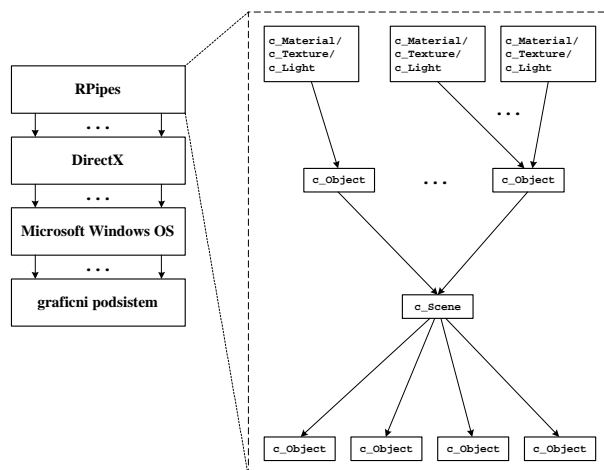
- **CRT projektor + aktivni polarizator + polarizacijska očala + posebno platno** predstavlja verjetno najdražjo izbiro, saj zaradi narave CRT projektorjev potrebujemo tri aktivne polarizatorje. Aktivni polarizator je krožno polariziran, njegova aktivnost pa izhaja iz dejstva, da se polariziranost aktivno spreminja in tako podsluke prostorskega para polarizirata v različnih smereh. Edina prednost tega pristopa je nizka cena polarizacijskih očal.
- **stereo LCD projektor + polarizacijska očala + posebno platno** je rešitev, kjer za ustrezno polarizacijo projicirane svetlobe poskrbi projektor sam. Ta lastnost projektorju seveda dvigne ceno. Ugodnost te rešitve je podpora vseh načinov kodiranja prostorskega para.
- **2×LCD projektor + 2×pasivni polarizator + polarizacijska očala + posebno platno** je še ena sorazmerno ugodna rešitev, saj zaradi uporabe dveh LCD projektorjev omogoča uporabo cenejših, ki ne podpirajo stereoskopskega prikaza. Istočasno pa postavlja tudi zahtevo po dveh ločenih vhodih za eno prostorsko sliko. Ugodnost te rešitve se kaže v izredni stabilnosti projicirane prostorske slike, saj je vsaka podsluka ves čas na ustreznem očesu opazovalca.

Glede na dosegljivost posameznih komponent smo se pri gradnji našega sistema odločili za kombinacijo CRT projektorja in aktivnih očal.

3.2 Programska oprema

V času gradnje sistema smo se zaradi cenovnih in časovnih omejitev odločili za realizacijo sistema v obliki že prej omenjene multipipe rešitve.

Kot osnovo smo vzeli računalnik razreda Pentium II 400Mhz z 256MB RAM. Njegov grafični podsistem predstavlja štiri grafične kartice, ki temeljijo na procesorju nVidia Riva TNT, vsaka s po 16MB pomnilnika. Izbira kombinacije Wintel narekuje tudi izbiro operacijskega sistema Windows 98 z možnostjo nadgradnje na Windows 2000. Izbira Windows 98/2000 ni naključna, saj v tem primeru operacijski sistem sam dopušča uporabo



Slika 6: modularna zasnova vmesnika.

več grafičnih kartic v enem samem računalniku - ti. *multimonitor* način - kar pomeni veliko prednost, saj ob tem ni potrebe po razvoju posebnih gonilnikov za neposredno krmiljenje večjega števila grafičnih kartic v enem sistemu.

Z izbrano strojno opremo in obliko sistema se je pojavila nuja po izgradnji vmesnika, ki bi izkušenemu programerju nizkonivojskega vmesnika Direct3D Immediate Mode (v nadaljevanju DirectX) nudil pomoč pri krmiljenju večjega števila kartic in izbiri načina delovanja le-teh. Želja po njegovi nadgradljivosti je vodila v modularno zasnovo (slika 6). Nujna je transparentnost modulov - sistem sam prepozna število razpoložljivih kartic, medtem ko se programer njihovega števila niti ne zaveda.

3.2.1 Temelji vmesnika

Vsak dober vmesnik je zgrajen modularno. Modul, nujno potreben v računalniški grafiki, predstavlja skupek osnovnih matematičnih operacij nad površinami, vektorji, točkami itd [11, 12].

Za pomoč pri rutinskih operacijah v 3D grafiki, kjer programer večino časa porabi za izbiro materialov, vzorcev ter luči kot osnovnih gradnikov umetnega prostora (v nadaljevanju samo prostora), smo razvili module `c_Light`, `c_Material` in `c_Texture` (slika 7).

Osnovne operacije `c_Light` so izbira modela in nastavitve parametrov luči, s čimer programerju omogočimo njihovo preprostejšo in hitrejšo postavitev v prostor. Med drugim s takšnim pristopom preusmerimo skrb za preverjanje večkratnega obstoja luči v prostoru s programerja na modul. `c_Material` predstavlja skupek operacij

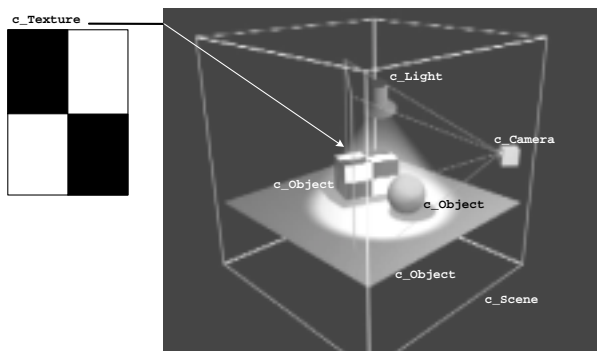
z materiali, kot je npr. izbira materiala geometrijske predstavitve predmeta v prostoru. Tudi tu, zaradi takšnega pristopa, skrb za učinkovito izrabo razpoložljivih sredstev in večkratno uporabo že uporabljenih materialov preide s programerja na modul sam. `c.Texture` pa predstavlja skupek osnovnih operacij nad vzorci, s katerimi lahko programer izbere vzorec, ki se pojavi na prikazanem predmetu. Bralec si lahko več o osnovah 3D grafike prebere v [13].

3.2.2 Moduli prostorskega opisa

Prostorski opis je podatkovna struktura, ki opisuje vsebino prostora (slika 7). Zamišljamo si jo lahko kot spisek uporabljenih rekvizitov in njihovih lokacij pri opisu vsebine gledališkega odra.

Navadno vsebuje opis geometrijske predstavitve predmetov v prostoru, kakor tudi opis njihove lokacije, materiala ter njihovega vzorca. Pri večini visokonivojskih vmesnikov za 3D grafiko ima takšna struktura hierarhično obliko drevesa, v katerem so podatki večinoma razvrščeni prostorsko. Primer: predmeti, ki so dejansko bližje skupaj, so blizu tudi v drevesni predstavitvi.

Želja po transparentnosti in čim manjšem omejevanju programerja nas sili v objektno orientirano implementacijo:



Slika 7: prostor in njegovi gradniki.

- `c.Object` je osnovni nadrazred, iz katerega programer izpeljuje svoje razrede. Uporablja ga za opis geometrijske predstavitve predmeta v prostoru ter njegovih lastnosti. Osnovni operaciji, ki ju `c.Object` pozna, sta določitev pozicije ter orientacije v prostoru. Programerjeva naloga je izpeljava novega razreda s spremembo funkcij `SetupState()` ter `Render()`, pri čemer s pomočjo prve nastavi ustrezne lastnosti geometrijske predstavitve, kot sta uporabljen ma-

terial ter vzorec, z drugo pa izvede dejanski izris geometrije. S takšnim pristopom programerju ostaja odprta pot v nadgradnjo razreda z dodatnimi lastnostmi.

- `c.Scene` predstavlja razred, ki skrbi za prostorski opis. Trenutna implementacija zaradi časovnih omejitev ne vsebuje optimizacijskih posegov, vendar programerju dopušča vso svobodo realizacije le-teh. Predvideno razširitev predstavlja implementacija večstopenjske optimizacije, kjer se izris slike dogaja v treh fazah. Najprej iz prostora izločimo predmete, ki s strani opazovalca niso vidni. Zatem pri preostalih izberemo ustrezen nivo natančnosti. Nazadnje trikotnike, ki so nujni za izris slike, razvrstimo tako, da zmanjšamo število potrebnih sprememb parametrov izrisa. Seveda takšna optimizacija predvideva tesno sodelovanje vseh modulov vmesnika.
- `c.Camera` je razred, ki nudi osnovne operacije pozicioniranja opazovalca v prostoru. S pomočjo funkcije `SetLookAt()` programer pove mesto opazovalca in smer njegovega pogleda. `c.Camera` poskrbi za osvežitev notranjih struktur in izračuna projekcijske matrike celotnega grafičnega podsistema.

```
izračunaj pozicijo oči: levo0ko, desno0ko.
for vsak prijavljen RPipe
    rotiraj levo0ko in desno0ko za RPipe.FOV.
    izračunaj projekcijsko matriko levega0česa.
    izračunaj projekcijsko matriko desnega0česa.
```

sprememba pozicije gledalca.

3.2.3 Glavni modul vmesnika

Zasnova modula `c.RPipe` predstavlja glavni del vmesnika. Ta mora ob inicializaciji sistema vzpostaviti kontakt z grafičnim podsistemom in izbrati njegov najboljši način delovanja. Po uspešni vzpostavitvi parametrov delovanja posamezne kartice se mora prijaviti moduloma `c.Scene` ter `c.Camera`.

Vzpostavitev kontakta z grafičnim podsistemom predstavlja vzpostavitev multimonitor načina delovanja `DirectDraw` in `Direct3D` (v nadaljevanju `DirectX`). Multimonitor arhitektura (imenovana tudi `MultiMon`) omogoča operacijskemu sistemu uporabo prikazne površine dveh ali več grafičnih kartic kot eno skupno prikazno površino.

`DirectX` že v sami zasnovi omogoča uporabo multimonitor načina delovanja, v kolikor pri vzpostavitvi kontakta z grafično kartico, tj. klicu

```

preštej grafične kartice: RPipe.
postavi način izrisa v RPIPES_STEREO_ZGORAJ_SPODAJ.
if le en RPipe
    odpri RPipe kot glavni.
else
    odpri vse RPipe, kjer naj bo prvi glavni.

nova Camera.
nova Scena.

for vsak RPipe
    priključi Camero na RPipe.
    priključi Sceno na RPipe.
    nastavi parametre projekcije RPipe.

```

inicializacija grafičnega podsistema.

funkcije `DirectDrawCreateEx()`, navedemo namesto GUID (ang. *Globally Unique Identifier*) grafične kartice vrednost null. To pomeni, da lahko okno aplikacije, ki uporablja DirectX, poljubno premikamo po celotni skupni prikazni površini grafičnega podsistema.

V tem primeru bo DirectX izkoriščal strojno pospeševanje 3D operacij le v primeru, ko bo okno aplikacije v celoti na prikazni površini glavne grafične kartice. DirectX bo izkoriščal strojno pospeševanje na celotni skupni prikazni površini le v primeru, če progamer vzpostavi ti. ekskluzivni celozaslonski način delovanja vsake posamezne kartice grafičnega podsistema.

Tako PC-CAVE sistem zaradi svoje zasnove zahteva ekskluzivni celozaslonski način delovanja, pri čemer pa je potrebna vzpostavitev popolne kontrole nad grafičnim podsistemom in natančna določitev režima delovanja posamezne grafične kartice. Vzrok za to je nezmožnost hardverskih preslikav med medpomnilniki različnih grafičnih kartic.

Vzpostavitev ekskluzivnega celozaslonskega delovanja DirectX aplikacije predstavlja nastavitev fokusnega okna in okna enote.

Vsaka DirectX aplikacija, ki deluje v celozaslonskem ekskluzivnem načinu delovanja, mora imeti eno fokusno okno. Fokusno okno je tisto, ki skrbi za sprejem podatkov posredovanih prek tipkovnice.

Vsaka grafična kartica, ki deluje v celozaslonskem načinu, mora biti DirectX predstavljena z `DirectDraw` objektom in oknom enote. Okno enote predstavlja okno, v katerem izrisujemo sliko - nahaja se na vrhu vseh ostalih oken.

Pri aplikacijah, ki ne delujejo v načinu multimonitor, predstavljata okno enote in fokusno okno isto okno. Pri aplikacijah, ki delujejo v tem načinu, je za vsako grafično kartico potrebno nastaviti okno enote. Med drugim je potrebno tudi vsakemu `DirectDraw`

objektu predstaviti fokusno okno, ki je samo eno - aplikacijsko.

```

postavi aplikacijsko okno kot fokusno.
if glavni RPipe
    okno enote je fokusno okno.
else
    novo okno enote.

```

nastavitev fokusnega okna in okna enote.

Ko `c_RPipe` vzpostavi kontakt z grafičnimi karticami, pri vsaki nastavi fokusno okno ter okno enote in se uspešno prijavi moduloma `c_Scene` in `c_Camera`, je vse nared za izris. Opozoriti je potrebno, da progamer sam določa vsebino izrisanega prostora (glej 3.2.1).

Modulova naloga je predvsem izris prostorskega opisa v obliki zvezne prostorske slike.

```

for vsak RPipe
    vprašaj Camero za perspektivo levega očesa.
    vzpostavi parametre vidnega polja.
    izriši Sceno.
    vprašaj Camero za perspektivo desnega očesa.
    vzpostavi parametre vidnega polja.
    izriši Sceno.

```

izris prostorske slike.

Progamer s pomočjo modulov zgradi prostorski opis, vzpostavi kontakt z grafičnim podsistemom, ter prepusti kontrolo izrisa vmesniku. Le-ta zna z večkratnimi zahtevami izrisa prostora z več različnih očišč prikazati zvezno prostorsko sliko prostorskega opisa, ki ga je posredoval progamer.

S takšnim pristopom izgradnje vmesnika smo dosegli hitrejši razvoj aplikacij ter neodvisnost programskega dela od načina prikaza.

4 Sklep

Seveda ima sistem tudi določene pomanjkljivosti, saj zaradi izbire sistema na osnovi Wintel vendarle govorimo o kompromisih. Pomanjkljivosti niso tako kritične, predstavljajo le odprto pot v raziskovalni smeri.

Poglejmo najprej s strani stopnje potopitve. Tako kot sistemi `WorkSpace` bi tudi ta lahko uporabljal smer pogleda uporabnika - vodiča, za aktivno obnavljanje smeri pogleda in morda celo ZPS za doseg še boljšega prostorskega občutka uporabnika. Smer

pogleda vodiča dobimo že z relativno preprostim sistemom sledenja, ki kot izhod podaja meritve obrata, naklona in zasuka uporabnikove glave. Težje, a kljub temu tudi rešljiv je ZPS, katerega prvi približek bi lahko predstavljala oddaljenost opazovalcu najbližjega predmeta v odklonu 1° od smeri pogleda. Kompleksnejšo, vendar s tem tudi natančnejšo rešitev pa predstavljajo senzorji, ki merijo odklon oči.

Še vedno je odprta uporaba sistema v izvedbi multiračunalnika, ki omogoča izkoristek dodatne procesorske moči, vendar je tu težava izgradnje transparentnega sistema, ki bo sposoben uporabljati vse razpoložljive računalnike. Predvsem je pri tej izvedbi kočljiva količina po omrežju prenesenih podatkov in medsebojna sinhronizacija grafičnega podsistema.

Nadgradnja je odprta tudi v smeri podpore različnih taktilnih vmesnikov, npr. podatkovnih rokavic, in vmesnikov, ki stimulirajo še druge uporabnikove čute, npr. vonj.

Neobdelana ostaja tudi avtorjeva ideja neodvisnega zvočnega prostora vsakega posameznega uporabnika, kjer več zvočnih kartic proizvaja neodvisno sliko zvočnega prostora uporabnika in mu jo prek brezžične povezave posreduje. Zvočni prostor posameznega uporabnika je definiran s pomočjo smeri uporabnikovega pogleda, ki ga dobimo preko kamer oz. kakšnega drugega sistema za zaznavanje gibanja.

Programsko je pot odprta tudi v smeri optimizacije vseh gradnikov, ki skrbijo za izrabo razpoložljivih sredstev ter nadgradnja razreda `c_Object`, ki naj bi podpiral aktivno optimizacijo števila trikotnikov, posredovanih v obdelavo grafičnemu podsistemu, s poudarkom na tehnikah, predstavljenih v delih Hoppa in Xie [14, 15].

Glede na cilj izdelave vmesnika, ki bo programerju dopuščal dovolj svobode in obenem nudil pomoč pri rutinskih operacijah ter rokovanju z grafičnim podsistemom, je PC-CAVE dosegel svoj namen. To potrjuje uporaba tega vmesnika pri projektih kot so: BARCODE - II. potopitev (slika 8), BARCODE - III. potopitev, ter FireStarter V1.0.

FireStarter V1.0 je projekt Laboratorija za računalniške strukture in sisteme na Fakulteti za računalništvo in informatiko v Ljubljani. Predstavlja pa vizualizacijo in simulacijo modela širjenja požarov v homogenem okolju, ki temelji na osnovni mehke logike. Ugodnost uporabe PC-CAVE programskega vmesnika se kaže v tem, da ob želji naročnika, npr.

pri morebitnih predstavitev, ni potrebna izgradnja novega sistema, ki bi omogočal večjo stopnjo potopitve, marveč samo izbira načina prikaza.

Projekt BARCODE - II. potopitev izkorišča vmesnik v popolni opravi, saj predstavlja umetniški projekt delujoč v obliki tristenske zvezne prostorske projekcije, katere namen je čimpopolnejša potopitev opazovalca in s tem njegova čimbolj natančna prostorska predstava vizualizacije samoorganizirajočega se sistema umetnih izvorov zvoka.

BARCODE - III. potopitev je enostenska stereoskopska projekcija vizualizacije istega sistema, vendar s spletno nadgradnjo interaktivne povezave z VRML okoljem, ki tako predstavlja poskus v smeri kolaboracijskega večuporabniškega okolja.



Slika 8: BARCODE - II. potopitev.

Projekta BARCODE - II. in III. potopitev sta nastala v sodelovanju z znanim slovenskim novodobnim umetnikom Darijem Kreuhom ter priznanim avstralskim komponistom elektroakustične glasbe Rainerjem Linzem. BARCODE - III. potopitev je v času pisanja tega članka na ogled v Cankarjevem domu, pod okriljem evropskega bienala sodobne umetnosti Manifesta³, in na internetu <http://www.manifesta.org>.

Literatura

- [1] H. Buddemeier, *Življenje v umetnih svetovih*, Inštitut za trajnostni razvoj 1996, ISBN 961-90364-0-9.
- [2] A. Sourin, O. Sourina, H. T. Sen, *Virtual Orthopedic Surgery Training*, IEEE Computer Graphics and Applications, maj/junij 2000, str. 6-10.
- [3] StereoGraphics Corporation, *StereoGraphics Developers Handbook*, 1997.

- [4] B. Azar, *The VR Pricing: nausea, dizziness, disorientation*, The APA Monitor, marec 1996.
- [5] I. Bajec, N. Zimic, I. Lapanja, M. Mraz, *Postopek računanja pozicije sprehajalca v prostoru s pomočjo vozička*, Zbornik ERK'98, str. B: 171-174, Portorož 1998.
- [6] I. Bajec, *Virtualne sanje - uporaba navidezne resničnosti v moderni umetnosti*, Zbornik ERK'98, str. B: 465-466, Portorož 1998.
- [7] C. Machover, *Top 10 Hardware Products of 1999 - Fakespace Immersive WorkWall*, IEEE Computer Graphics and Applications, januar/februar 1999, str. 76.
- [8] Fakespace systems,
A Complete Set of Tools to Let You Work,
<http://www.fakespacesystems.com/products.html>.
- [9] D. H. Brown Associates, *SGI Rebounds with Industry Standard "Best of Breed" Strategy*, 15. maj 2000 ¹.
- [10] L. J. Hornbeck, *From Cathode Rays to Digital Micromirrors: A History of Electronic Projection Display Technology*, TI Technical Journal, julij-september 1998, str. 7-46.
- [11] J. R. Miller, *Vector Geometry for Computer Graphics*, IEEE Computer Graphics and Applications, maj/junij 1999, str. 66-73.
- [12] J. R. Miller, *Applications of Vector Geometry for Robustness and Speed*, IEEE Computer Graphics and Applications, julij/avgust 1999, str.68-73.
- [13] A. H. Wat, *Fundamentals of Tree-Dimensional Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1989.
- [14] H. Hoppe, *Smooth View Dependant Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering*, Microsoft Research.
- [15] J. C. Xia, J. El-Sane, A. Varshney, *Adaptive Real-Time Level-of-Detail Rendering of Polygonal Models*, University of New York at Stony Brook.

¹<http://www.sgi.com/workstations/230/pdf/dhbrown.pdf>