

UDK 528.45:624.024:004.925.83:004.514.66:004.4  
Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

## Prijedlozi poboljšanja automatizacije modeliranja krovova postupcima proceduralnog modeliranja

Rexhep NIKČI, Fisnik NIKČI – Emmering<sup>1</sup>, Fadil SHEHU – Priština<sup>2</sup>,  
Robert ŽUPAN – Zagreb<sup>3</sup>

*SAŽETAK. U radu se opisuje proceduralno 3D modeliranje i vizualizacija urbanih 3D modela zgrada, odnosno samo jednog njihova dijela – krovova, jer se diverzifikacija krovova može izvoditi parametrizacijom ili pak proceduralnim modeliranjem. Do sada su se različite vrste krovova izvodile promjenom parametara, a u ovom radu dajemo prijedloge direktne promjene unutar skripte za različite jednostavne i složene vrste krovnih konstrukcija. To automatski skraćuje vrijeme modeliranja u bilo kojem softveru, jer je u konačnici riječ o modeliranju ne samo krovova nego cijelih gradova, pa je kraće vrijeme modeliranja vrlo važno korisnicima koji očekuju da se geovizualizacija cijelih gradova odvija u realnom vremenu. To se ispituje u softveru CityEngine, koji se temelji na proceduralnom modeliranju i uglavnom se upotrebljava za kreiranje 3D sadržaja urbanih područja i 3D modeliranje urbanih područja. Najprije su prikupljeni svi potrebni podaci koji su u otvorenom pristupu dostupni na internetu i atributi krovova za modeliranje. Na kraju se konačni rezultati generiranog 3D modela objavljuju u CityEngine WebScene, kao i analiza vremena potrebnog za modeliranje više vrsta krovova unutar 3D modela.*

*Ključne riječi: geovizualizacija, 3D, proceduralno modeliranje, zgrade, krov.*

<sup>1</sup> Rexhep Nikçi, dipl. ing. geod., Vermessungsbüro Nikçi, Pfarrer-Ferstl-Str. 66, DE-82275 Emmering, Njemačka, e-mail: rexhep.ini@t-online.de

Fisnik Nikçi, Vermessungsbüro Nikçi, Pfarrer-Ferstl-Str. 66, DE-82275 Emmering, Njemačka, e-mail: fisniknikci@web.de

<sup>2</sup> Fadil Shehu, mag. ing. geod. et geoinf., Boulevard Bill Clinton nr. 13, XZ-10000 Priština, Kosovo, e-mail: fadil.shehu@iber-lepenc.org

<sup>3</sup> Prof. dr. sc. Robert Župan, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: robert.zupan@geof.unizg.hr

## 1. Uvod

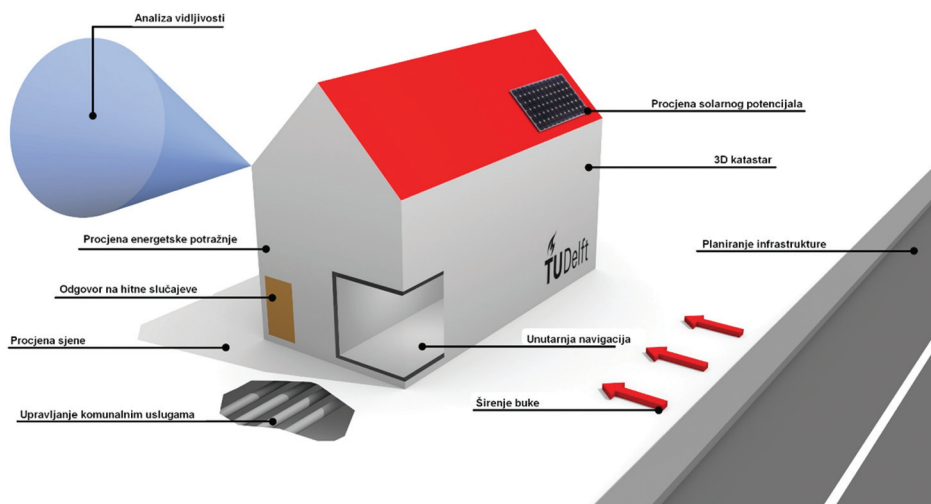
Geodetska struka i korisnici prostornih podataka sve više usvajaju i upotrebljavaju 3D modele gradova. 3D modeli gradova postaju sveprisutni za donošenje odluka i zahvata u prostor, kao i za poboljšanje učinkovitosti prostornog upravljanja. Gradske i lokalne vlasti upotrebljavaju 3D modele gradova za urbano planiranje i simulacije okoliša kao što je npr. analiza površine pod sjenom koju daju zgrade, zatim analize o tome kako se prometna buka širi kroz urbano područje ili predviđa koliko Sunčeva zračenja pada na krov zgrade kako bi se procijenilo je li ekonomski isplativo instalirati solarnu ploču i sl. (slika 1). Slično kao i tradicionalni 2D skupovi geopodataka, 3D modeli gradova relativno su bolja ili lošija aproksimacija stvarnog svijeta: značajke se modeliraju na određenom stupnju i određenim elementima koji su pojednostavnjeni ili izostavljeni. Količina i mješavina sadržaja vođena je uobičajenom uporabom 3D modela grada, podrijetlom osnovnih podataka, tehnikom akvizicije, uložnim sredstvima i prostornim odnosima. Količina detalja koju sadrži 3D model u smislu geometrije i atributa zajednički se naziva razina detalja (Level of Detail – LOD), što upućuje na to koliko je temeljito modeliran prostorni opseg. Kao rezultat toga, LOD je bitan koncept općenito u geografskoj informacijskoj znanosti (GIS), a posebno u 3D modeliranju gradova.

Ručna izrada velikog broja detaljnih modela vrlo je zahtjevan proces, pogotovo ako se sjetimo metoda izrade modela zgrada laserskim snimanjem i naknadnog ručnog uređivanja. Za primjer se može navesti zgrada Sveučilišta u Brnu za koju je ekipa od nekoliko studenata i nastavnika trebala godinu dana, uz napomenu da je ipak taj model imao visoki LOD, odnosno stupanj detaljnosti, npr. LOD4. Stoga nam metode proceduralnog modeliranja pomažu u smanjenju ili zamjeni ručne i pojedinačne izrade potrebne za definiranje modela, dok u isto vrijeme pružaju učinkovit način za opisivanje i pohranu modela. Štoviše, nakon što se dobije proceduralni opis (tj. skup pravila ili gramatika) modela, lako se mogu generirati varijacije modela samo manipuliranjem s nekoliko parametara pravila. Raznolikost modela koji se mogu predstaviti proceduralno je velika i kreće se od biljaka i namještaja, preko zgrada pa sve do izgleda cijeloga grada.

Zapravo, LOD je važan koncept u svim koracima izrade 3D modela zgrada ili cijeloga grada, čak i prije bilo kakve akvizicije. To je važan čimbenik u planiranju modeliranja jer se LOD često nalazi u postavkama zadanih karakteristika željenog 3D modela grada, npr. trebaju li se modelirati ceste ili krovni oblici zgrada. Stoga se može smatrati elementom javne nabave – skupovi podataka razlikuju se po LOD-u, a količina podataka koju treba prikupiti postavlja njihovu vrijednost i vrijednost izrade. Imati na umu LOD prilikom planiranja prikupljanja podataka ključno je i za pravilno proračunavanje resursa, a LOD određuje tehnologije akvizicije koje bi se trebale upotrebljavati jer su različiti LOD-ovi rezultat različitih pristupa prikupljanju podataka, npr. pokreće minimalni broj prijelaza pri korištenju laserskog skeniranja iz zraka i određuje je li određena tehnika prikupljanja dovoljna ili zahtijeva dodatna sredstva. U prikupljanju podataka LOD nadalje služi kao glavna uputa o tome kako temeljito prikupiti podatke. Naime, pojam LOD-a već se može naći u najranijim radovima vezanim uz nabavu 3D modela gradova. Nadalje, svi 3D skupovi podataka nisu

model trenutnog stvarnog svijeta; neki od njih rezultat su oblikovanja, npr. u geovizualizaciji, kartografiji i arhitekturi za planiranje budućih scenarija. LOD ima utjecaj na aspekte skladištenja, održavanja i primjene. Iako se neka istraživanja posebno fokusiraju na 3D modele zgrada, bilo bi vrijedno proširiti istraživanje na druge urbane značajke kao što su ceste i vegetacija.

Nadalje, kontrola kvalitete u 3D GIS-u ne obuhvaća procjenu LOD-a podataka. Stoga bi integracija LOD-a u standarde kvalitete trebala biti prioritet u budućim istraživanjima (Biljecki 2017).



Slika 1. 3D modeli gradova imaju mnoštvo različitih primjena za vizualizaciju okoliša i podršku odlučivanju u različitim domenama ljudskog djelovanja (modificirano iz Biljecki i dr. 2015).

## 2. Pregled dosadašnjih radova

Već nekoliko godina 3D modeli gradova preuzimaju središnju ulogu u velikom broju aplikacija. Njihova različita područja primjene trenutačno dovode do povećane potražnje. U konstrukciji 3D modela gradova izazov je posebice velik broj različitih i složenih oblika građenja (De Santis i dr. 2018, Adão i dr. 2017). Stoga su u posljednja dva desetljeća istraženi i predloženi različiti pristupi konstrukciji zgrada, ali ta tema i dalje ostaje vrlo aktivno područje istraživanja u različitim znanstvenim disciplinama. Pregled različitih pristupa konstrukciji dan je u Brenner (2005), Haala i Kada (2010), Brenner (2010) i Wang (2013). Općenito, postoji nekoliko načina za kategorizaciju postojećih pristupa 3D modeliranju zgrada. Obično se ti pristupi modeliranju zgrada klasificiraju prema kriterijima navedenim npr. u Brenner (2010) prema količini ljudske interakcije (ručno, poluautomatsko i potpuno automatsko modeliranje):

- izvori podataka (oblaci točaka, slike, više izvora),
- konstruirani modeli (geometrijski, topološki i semantički opis),
- kontrola (pokrenuta modelom odozgo prema dolje, vođena podacima odozdo prema gore i kombinacija, odnosno hibridne metode).

S obzirom na kontrolne kriterije, neki pristupi modeliranju zgrade temeljeni na modelima i podacima mogu se naći u Adão i dr. (2019), a za izravnu usporedbu između pristupa konstrukciji na temelju modela i podataka primjeri su i kod Tarsha-Kurdi i dr. (2007). U posljednje vrijeme, pristupi modeliranju vođeni podacima i modelom spojeni su s pristupima hibridne konstrukcije koji pokušavaju iskoristiti prednosti obje metode: fleksibilnost oblika pristupa vođenih podacima s mogućnostima regularizacije oblika pristupa vođenih modelom. U Satari i dr. (2012), npr. za konstrukciju glavnoga krova korištena je metoda temeljena na podacima, a pristup vođen modelom upotrebljava se kako bi se dodali detalji kao što je potkrovlje. Tako razvijeni pristup konstrukciji također se može klasificirati kao hibridni pristup, jer se automatski izvedeno modeliranje zgrade ili građevine uvelike inkorporira tijekom konstrukcije odozdo prema gore. Veliki izazov za većinu pristupa konstrukciji automatsko je modeliranje malih krovnih nadgradnji kao što su mansarde i dimnjaci. Stoga su tijekom posljednjih nekoliko godina razvijene različite strategije za rješavanje izazova. Uz modeliranje postojećih zgrada, važno je i automatsko generiranje virtualnih urbanih područja. Virtualna područja upotrebljavaju se, npr. u filmovima i računalnim igrama, s jedne strane, kako bi troškovi proizvodnje i razvoja bili što niži, a s druge strane, iz sigurnosnih razloga. U tu svrhu razvijeno je nekoliko pristupa koji upotrebljavaju različite tehnike proceduralnog modeliranja.

Nakon proučavanja s kojim se sve problemima znanstvenici susreću u različitim pristupima, koji su prikazani u dosadašnjoj literaturi, razvit će se segment učinkovitih tehnika/metoda koje upotrebljavaju samo najnužnije ili bolje rečeno oskudne podatke da bi se postigla veća automatizacija cijele izrade od dosadašnje ručne izrade virtualnih okruženja sastavljenih od vanjskih dijelova zgrada isključivo prikazanih vanjskim obilježjima bilo za brzu izradu ili konstrukciju postojećih zgrada. Unatoč brojnim postignućima postojećih pristupa proceduralnom modeliranju, proizvodit će se virtualne zgrade s interijerima i eksterijerima sastavljenim od nepravokutnih oblika (konveksnih ili konkavnih  $n$ -kutova). Stoga će prva pretpostavka biti da se mogu automatski proizvesti samo zgrade proizvoljno oblikovanih tlocrta.

Dosadašnja istraživanja temeljila su se na raznolikosti gramatika, skupovima pravila i razinama detaljnosti. Nakon što se dobije proceduralni opis (tj. skup pravila ili gramatika) modela, lako se mogu generirati varijacije modela ili samo krovnih konstrukcija kao u ovom slučaju, samo manipuliranjem s nekoliko parametara pravila. U konstrukciji 3D modela krovova izazov je posebice velik broj različitih i složenih oblika i stilova građenja. Stoga su u posljednja dva desetljeća predloženi mnogobrojni pristupi konstrukciji zgrada, ali ta tema i dalje ostaje vrlo aktivno područje istraživanja u različitim znanstvenim disciplinama. Osim toga, nedavni razvoj sustava za prikupljanje podataka o ulicama, kao što su mobilni sustavi za kartiranje, otvaraju nove perspektive za

poboljšanja u modeliranju zgrada u smislu da se terenski podaci (vrlo gusti i točni) mogu iskoristiti s više performansi (u usporedbi s podacima dobivenim daljinskim istraživanjima) za obogaćivanje modela zgrada na razini fasade (npr. geometrija i tekstura).

Mnogi najsuvremeniji sustavi proceduralnog modeliranja proširili su se izvan upotrebe formalnih gramatika, ali se još uvijek oslanjaju na pravila modeliranja. Danas se više ne temelje na gramatici, ali ih znanstvenici koji se bave računalnom grafikom još uvijek tako nazivaju. Njihove prednosti nadmašuju činjenicu da više ne ulaze u formalnu definiciju. Mađar Aristid Lindenmayer uveo je 1968 L-sustave (Lindenmayer sustave), koji su tehnika prepisivanja nizova koje je svojevremeno proučavao (Lindenmayer 1968). Za razliku od formalnih gramatika koje primjenjuju sekvencijalna pravila izrade modela, L-sustavi upotrebljavaju strategiju paralelne zamjene koja istovremeno primjenjuje pravila modeliranja na sve neterminale u nizu. Ovom se metodologijom također mogu izrađivati fraktali. Iako tehnike utemeljene na pravilima i proceduralne tehnike općenito imaju mnoge prednosti, postoje i određeni nedostaci. Za pisanje procedura ili pravila za opisivanje sadržaja modela potrebno je određeno znanje o programiranju CGA pravila oblikovanja. Kartografi katkad nisu upoznati s takvom vrstom programiranja dok mnogim programerima nedostaje umjetnički, matematički i kartografski smisao ili znanje. Nadalje, teško je steći razumijevanje proceduralnog modela kada se daju samo pravila, a ne njihov rezultat. Posebno za proceduralne modele s takozvanim stohastičkim pravilima koja nude nekoliko različitih rješenja za isti zadatak, može biti teško vizualizirati i kontrolirati prostor mogućih dizajna koji obuhvaćaju. Ti izazovi općenito su komplicirani, ne samo za stručnjake bez znanja programiranja. Do sada se problem u literaturi i dosadašnjim radovima pojavljuje u slučajevima kada dvije jednostavne gramatike modela imaju tzv. korespondencije, odnosno semantička podudaranja, za pravila izrade modela koja automatski generiraju 3D modele. Rasponi transformacija diskretnih pravila samo su za vrlo ograničen prostor s četiri oblika, tzv. krupnozrnate nasuprot finozrnatim transformacijama. Možemo pretpostaviti i u nekom sljedećem istraživanju još ispitati da li spajanje CGA pravila modeliranja za finozrnate transformacije može obuhvatiti beskonačno mnogo varijacija oblika.

Istraživanje Luan i dr. (2008) daje pregled procesa 3D modeliranja koji uključuje prikupljanje 3D podataka, modeliranja i renderiranja. Dane su i mogućnosti primjene 3D modeliranja. Ostala istraživanja vezana uz područje proceduralnog modeliranja gradova i zgrada nalazimo u Müller i dr. (2006). Daje pregled i detaljan opis procesa stvaranja zgrada pomoću gramatike oblika (CGA oblik) i uspoređuje ga s L-sustavima. CGA oblik gramatika je oblika koja se upotrebljava za proceduralno modeliranje CG arhitekture za izradu vanjske forme zgrade uključujući visoku vizualnu kvalitetu i geometrijske detalje. Temelji se na pravilima i za razvoj dizajna stvaranjem sve više i više detalja oblika koji se sastoje od simbola, geometrije (geometrijskih atributa) i numeričkih atributa. Geometrijski atributi kao što su položaj P, Kartezijski koordinatni sustav koji opisuje ortogonalne osi ili vektore X, Y, Z i veličina definiraju orijentirani granični okvir koji se naziva opseg. Opseg se upotrebljava u CGA pravilima za modifikacije, npr. rotaciju oblika. Najčešće postoje dvije metode koje se mogu upotrebljavati za prikupljanje 3D podataka. Jedna je od metoda sustav laser-

skog skeniranja koji se može primijeniti za prikupljanje 3D podataka površine objekata u obliku oblaka točaka. Prednosti su te metode velika brzina i točnost skeniranja. Nedostaci te metode uključuju potrebnu opremu koja je skupa i može ovisiti o vremenskim uvjetima, na primjer, možda neće ispravno raditi na suncu ili kiši. Drugi je nedostatak te metode naknadna obrada dobivenih podataka, koja je potrebna za bolji konačni rezultat i obično zahtijeva ručnu doradu. Druga je metoda prikupljanja podataka Close Range Photogrammetric System, koja se može upotrijebiti za 3D prikupljanje podataka objekata pomoću kalibriranih kamera (Dobraja 2015). Kamere mogu biti fiksne ili ručne. Proces kalibracije (stjecanje unutarnjih i vanjskih parametara kamere) i uparivanje slike jednostavniji je za sustav fiksni kamera, ali sustavi s ručnim kamerama mogu dati 3D podatke objekta snimljenog sa svih strana. Prednost je te metode relativno niska cijena. Prvi je korak nakon dobivanja raspona kalibracija kamere izdvajanje i usklađivanje značajki. Taj se korak izvodi odabirom i uparivanjem najmanje 7 parova točaka koje odgovaraju između dviju slika kako bi se izračunala temeljna matrica i dobila projekcijska matrica. Sljedeći korak u procesu modeliranja procjena je kvalitete informacije o dubini iz zakrivljenosti koja se dalje upotrebljava za konstrukciju površine modela. Obično se izrađuje poligonskom mrežom. Dostupno je nekoliko metoda renderiranja na temelju slike, npr. interpolacija gledišta, renderiranje svjetlosnog polja, preoblikovanje pogleda i druge. Ovaj korak važan je za poboljšanje konačnog 3D modela (Luan i dr. 2008). Postoji više kvalitetnih istraživanja u području proceduralnog modeliranja gradova i zgrada, na primjer istraživanje Parisha i Müllera (2001).

### 3. Motivacija

Urbanističko planiranje u praksi uvijek je bilo podržano nizom disciplina. U današnje vrijeme pojava termina pametnoga grada komplicira proces planiranja i on postaje još složeniji. Među izazovima su umjetne infrastrukture koje omogućavaju nove vrste skupova podataka koji zahtijevaju naprednu obradu podataka i analitiku; povećanje snage računala i računalne grafike stvorilo je široko dostupne alate za korisnike s naprednim računalnim vještinama, a inicijative otvorenoga koda preplavile su internetski svijet digitalnim urbanim informacijama. Sve dostupno i navedeno nudi velike mogućnosti za budućnost planiranja uz geovizualizaciju i analitiku okoliša i infrastrukture, ali ujedno stvara potrebu za novom vrstom stručnjaka, stvara nove odnose između urbanih podataka i dovodi u pitanje načine komunikacije između različitih urbanih aktera. Još nije jasno kako je jedno s drugim povezano. Unatoč neizvjesnostima, taj tehnološki bum postao je katapult za sve veći interes za korištenje analitike i simulacija za virtualne gradove kako bi se pronašli obrasci koji se odnose na prostorne lokacije i kako bi se testirao učinak različitih intervencija ili scenarija koji se odnose na oblik grada. Takvi stručnjaci trenutačno trebaju imati znanje iz urbanizma, geoinformatike, modeliranja i analitike s metodama planiranja kako bi pomogli u evaluaciji različitih scenarija i analizi grada, ali može se primijetiti da je taj posao sveobuhvatan i dugotrajan proces, jer često uključuje vanjske konzultante i stručnjake iz drugih područja (Roumpani

2019). Rezultate studija relativno je teško razumjeti, pratiti, ažurirati i komunicirati (Rivolin i Faludi 2005). Koliko god razvijene bile njihove aplikacije, one ostaju gotovo potpuno nepoznanice. Često daju sumnju u njihovu smislenost, a time se ne dovodi do široke rasprave i upotrebe u javnosti. Kao rezultat toga, metode planiranja i projektiranja rijetko upotrebljavaju sustave koji daju urbanu analizu na višim razinama. Razvoj strateškog planiranja od danas ostaje težak iterativni proces koji uključuje niz različitih disciplina i bavi se sve većom složenošću gradova (Healey 2007). Čini se da nova era pruža priliku za postizanje stvarne interdisciplinarnosti integracijom navedenih stručnjaka i znanja sa sposobnošću komunikacije za povezivanje planera s urbanim zajednicama. Međutim, postoji potreba za okvirom kao i sučeljem, kako bi se omogućila integracija stručnosti i skupova podataka, a opet dovoljno fleksibilan da se prilagodi različitim eksperimentima pametnih gradova. Različiti pokušaji stvaranja inteligentnih integriranih sustava već postoje, ali ponegdje se čine kao zbirka različitih modela scenarija pametnih gradova koji vapi za sveukupnim konceptualnim i analitičkim okvirom (Roumpani 2019).

Danas su 3D modeliranje i vizualizacija velikih gradova sve popularniji. Sukladno tome, postoje nova rješenja kako bi ti procesi bili brži i jeftiniji. Razlog je njihove sve veće popularnosti širok izbor područja uporabe 3D modela gradova, za npr. pametne gradove. Mogu se upotrebljavati ne samo u istraživačke i obrazovne svrhe u urbanističkom planiranju i dizajnu, već i za virtualnu stvarnost u filmskoj industriji i industriji igara (Parish i Müller 2001). Najbolja metoda za potrebe izrade 3D modela velikoga grada u kratkom vremenu i uz male troškove proceduralno je modeliranje, a to je ukratko izrada 3D modela korištenjem pravila i algoritama. To je logično rješenje za generiranje 3D urbanih sadržaja (Watson i dr. 2008). Proceduralno modeliranje u softveru Esri CityEngine uglavnom je korišteno za izradu 3D modela urbanih područja. Modeliranje se temelji na CGA (Computer Generated Architecture) pravilima. CGA je skriptni jezik sasvim prikladan za generiranje arhitektonskog 3D sadržaja. Dosadašnja istraživanja na tom području pokazala su da je softver CityEngine prikladan za modeliranje gradova.

Temeljna je ideja proceduralnog modeliranja da se jedno pravilo primjenjuje na veliki broj zgrada, odnosno cijele gradove, ne može se dobiti zadovoljavajući i u potpunosti vjeran prikaz zgrada. Ako želimo detaljniji prikaz zgrada sa svim ukrasnim detaljima na fasadi, ili barem model koji se može upotrebljavati za izračun volumena i bruto razvijene površine, koji sadržava sve balkone, terase itd., moramo napisati poseban kod za svaku zgradu, te u većini slučajeva dodatno razraditi detalje na objektu pomoću alata za poligonalno modeliranje. Za područja i gradove u kojima se zgrade međusobno dosta razlikuju u stilu i građenju, proceduralno modeliranje samo dodatno otežava i produžava proces modeliranja. Proceduralno modeliranje najbolji je izbor za izradu LOD1 modela zgrada velikih područja ili LOD2 modela zgrada za dijelove grada gdje zgrade nalikuju jedna drugoj. Proceduralno modeliranje postaje brz i učinkovit način za izradu 3D modela niske do srednje razine detaljnosti. Ti modeli mogu biti jako korisni u domeni urbanističkog planiranja, u izradi podloga za pametne gradove, kao predmet vizualizacije u turističke svrhe i u mnogim drugim područjima. Izradom 3D modela objekata koji nas okružuju razvijamo modele virtualne stvarnosti.

Pri proceduralnom modeliranju dijela zgrade, konkretno krova, može se pronaći niz poboljšanja proceduralnog modeliranja, jer na zgradama se nalaze različite vrste krovova različite geometrije pa se stoga modeliranje može prilagoditi svakom od njih, ali ako se uoče sličnosti i razlike između tih geometrijskih oblika, mogu se ubrzati postupcima i metodama koje se tu prikazuju.

#### 4. Istraživanje

Glavno bi istraživačko pitanje tada bilo može li se upotrijebiti niz tehnika vizualnog i urbanog modeliranja kako bi se pomoglo u informiranju i evaluaciji novih tehnika geovizualizacije na sveobuhvatan način. Za to bi bilo korisno pogledati tehnike urbanog modeliranja kako bi se istražila njihova povezanost sa širokim dijapazonom upotrebe i planiranja, kako su se provodile i jesu li bile uspješne u dosadašnjoj praksi. Koja je priroda scenarija urbanog modeliranja i koliko imaju smisla? Postoji niz pratećih tema koje proizlaze iz ovog istraživanja.

Iako ima mnogo pitanja na koja se može usmjeriti istraživanje, u našem slučaju istraživanje je usmjereno na pitanje – na koji način unaprijediti proceduralno modeliranje koje je samo po sebi automatsko modeliranje npr. zgrada, odnosno unaprijediti neke segmente zgrada koje smatramo da se mogu razviti u više varijacija parametrizacijom unutar CGA-pravila. Konkretno, istraživanje zgrada i njihovo 3D modeliranje tema je koja se razvija od 1990-ih godina. Međutim, potrebno je nastaviti s istraživanjem, budući da se pristupi 3D konstrukciji više zgrada, kvartova ili cijelih gradova (iako učinkoviti) još uvijek susreću s problemima generalizacije, koherentnosti i točnosti. Osim toga, nedavni razvoj sustava za prikupljanje podataka o ulicama, kao što su mobilni sustavi za kartiranje, otvaraju nove perspektive poboljšanju modeliranja zgrada u smislu da se takvi podaci (relativno velike gustoće i točnosti) mogu iskoristiti (u usporedbi sa senzorskim mjerenjima) za obogaćivanje modela zgrada na razini fasade (npr. geometrija, oblik i tekstura), pa se pojedinačno predlažu pristupi modeliranju zgrada temeljeni na podacima prikupljenim iz zraka i s kopna. Na zračnoj razini, opisali smo izravan pristup bez značajki za jednostavnu konstrukciju poliedarskih zgrada iz skupa kalibriranih zračnih snimaka. U dostupnoj literaturi predlaže se nekoliko pristupa koji u biti opisuju 3D projektiranje urbanih fasada, a to su segmentacija i klasifikacija oblaka uličnih točaka, geometrijsko modeliranje urbane fasade i teksturiranje fasade bez okluzija, koje daju rezultate za cjeloviti 3D model zgrade, krova i fasade, uz veću kvalitetu modela spajanjem te dvije vrste podataka.

Izrada virtualnih modela zgrada od velike je važnosti za istraživačke i poslovne svrhe u geodeziji i kartografiji, ali i u drugim srodnim područjima kao što su npr. arhitektura, arheologija i virtualni prostori videoigara, čiji se zahtjevi mogu kretati između ekspeditivnog stvaranja virtualnih zgrada za opsežno popunjavanje virtualnih okruženja temeljenih na računalu i testiranja hipoteza preko digitalnih konstrukcija. Postoje neki poznati pristupi za postizanje izrade ili konstrukcije virtualnih modela, odnosno digitalnih naselja i zgrada.



Ručno modeliranje zahtijeva visokokvalificiranu radnu snagu i znatnu količinu vremena za postizanje željenog digitalnog sadržaja, u procesu koji se sastoji od mnogih faza koje se obično ponavljaju tijekom vremena. Pristup koji se temelji na slici i pristup skeniranju raspona prikladniji su za digitalno očuvanje dobro očuvanih struktura. Međutim, obično zahtijevaju uvježbane ljudske resurse za pripremu terenskih operacija i rukovanje rijetkom opremom (npr. 3D skeneri) i naprednim softverskim alatima (npr. fotogrametrijskim aplikacijama). Slično kao i tradicionalni 2D skupovi geopodataka, 3D modeli gradova (koje upotrebljavamo npr. za pametne gradove ili proširenu stvarnost) aproksimacija su stvarnog svijeta, a značajke se modeliraju na određenom stupnju i određenim elementima koji su pojednostavnjeni ili pak izostavljeni. Sadržaj ovisi o uobičajenoj uporabi 3D modela grada, podrijetlu osnovnih podataka, tehnici prikupljanja podataka, uložnim sredstvima i prostornim odnosima. Ručna izrada velikog broja detaljnih modela vrlo je zahtjevna. Metode proceduralnog modeliranja pomažu u smanjenju ručnog napora potrebnog za definiranje modela, dok u isto vrijeme pružaju učinkovit način za opisivanje i pohranu modela. Nakon što se dobije proceduralni opis (tj. skup pravila ili gramatika) modela, lako se mogu generirati varijacije modela samo manipuliranjem s nekoliko parametara pravila. U konstrukciji 3D modela gradova izazov je posebice velik broj različitih i složenih oblika građenja. Stoga su u posljednja dva desetljeća predloženi mnogobrojni pristupi konstrukciji zgrada, ali ova tema i dalje ostaje kao vrlo aktivno područje istraživanja u različitim znanstvenim disciplinama.

CityEngine prikladan je za modeliranje 3D modela zgrada pa i cijeloga grada koristeći relativno mali skup statističkih i geografskih ulaznih podataka. Taj je sustav vrlo kontroliran od strane korisnika i rabi proceduralni pristup temeljen na spomenutim L-sustavima za modeliranje gradova. Slika 2 prikazuje shemu kreiranja modela gradova pomoću softvera CityEngine. Nakon kreiranja datoteka pravila, primjenjuje se zatim na početne oblike zgrada i generira se 3D sadržaj. Različite karte i podaci s karti, npr. granice kopna i vode i gustoća naseljenosti, mogu se upotrebljavati kao ulazni podaci. Nakon što su definirane grupe zgrada, generiranje zgrada može se provesti primjenom L-sustava. Generiraju se kao dio Booleovih operacija na čvrstim oblicima, a zatim se interpretiraju svi rezultati pomoću softvera za vizualizaciju koji bi trebao biti sposoban obraditi poligonalnu geometriju i teksture. Dodatno, mehanizam za generiranje pročelja zgrada također je uobičajeni dio softvera. Dosadašnja istraživanja i radovi opisuju dva različita L-sustava koji se mogu rabiti za stvaranje cjelovitoga grada: jedan L-sustav za stvaranje ulica, a drugi za generiranje zgrada (Parish i Müller 2001). Ostala istraživanja vezana uz područje proceduralnog modeliranja gradova i zgrada su Müller i dr. (2006). Daju pregled i detaljan opis procesa izrade zgrada upotrebljavajući gramatiku oblika (CGA oblik) i uspoređuju ga s L-sustavima. CGA oblik ustvari je gramatika oblika koja se upotrebljava za proceduralno modeliranje CGA (Computer Generated Architecture) za proizvodnju građevinske školjke (fasade ili vanjštine) neke zgrade uključujući visoku vizualnu kvalitetu i geometrijske detalje. Temelji se na pravilima za razvoj dizajna stvaranjem sve više i više detalja oblika koji se sastoje od signatura, geometrije (geometrijskih atributa) i numeričkih atributa.



Slika 2. Standardni tijek rada u CityEngineu.

## 5. Proceduralno modeliranje

Proceduralno modeliranje koje je temeljeno na gramatici, odnosno skupu pravila, ima svoje početke kada je Noam Chomsky uveo formalne gramatike (Chomsky 1956). Takva je formalna gramatika sustav  $G$  definiran četverostrukim skupom  $\langle NT, T, \omega, P \rangle$  koji se sastoji od skupa neterminalnih simbola  $NT$ , skupa terminalnih simbola  $T$ , takozvanih aksioma ili početnih simbola  $\omega \in NT$  i skupa pravila  $P$ . Svako pravilo ima oblik:

$$(NT \cup T)^* NT (NT \cup T)^* \rightarrow (NT \cup T)^*$$

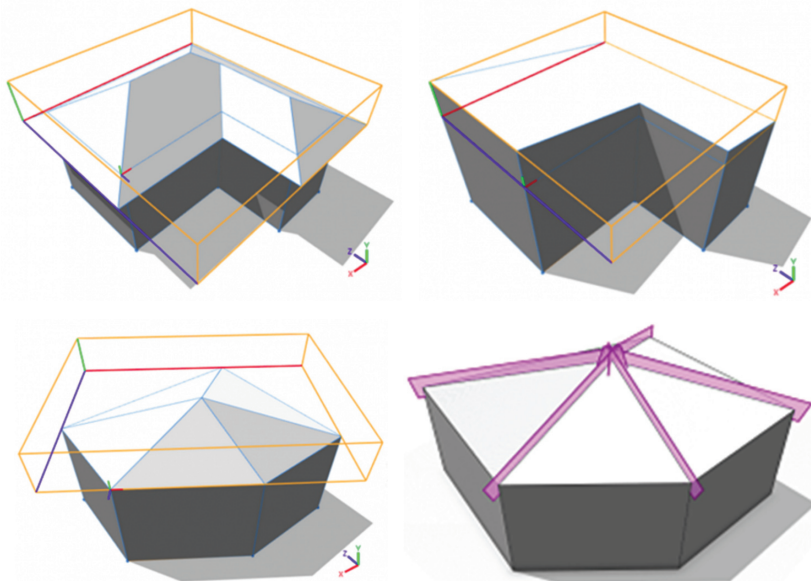
Lijeva strana ili prethodnik preslikava niz simbola  $\cup$ , a nasljednik je niz na desnoj strani. Polazeći od aksioma, nizovi se mogu izvesti naknadnom primjenom pravila. Niz koji sadrži samo terminalne simbole ne može se dalje izvoditi. Pri proceduralnom modeliranju u računalnoj grafici najčešće se upotrebljavaju gramatike bez konteksta (tip 2). Rjeđe se upotrebljavaju kontekstno osjetljive gramatike (tzv. tip 1). Pravila tih tipova uvijek zamjenjuju jedan neterminalni simbol novim nizom. Izvođenje gramatike stvara tzv. *derivacijsko stablo*. Posljednjih godina sustavi proceduralnog modeliranja proširili su se izvan upotrebe formalnih gramatika, ali se još uvijek oslanjaju na pravila, tako da se više ne temelje na gramatici, ali se i dalje tako nazivaju u znanstvenoj literaturi pa ih u radu tako nazivamo. Njihove prednosti već prelaze domene početne definicije. Tako imamo 3 osnovne tehnike od kojih su nam zanimljive samo dvije koje objašnjavamo kronološkim redom:

1. Lindenmayerov sustav ili L-sustav sastoji se od abecede simbola koji se mogu upotrebljavati za izradu nizova, zbirke proizvodnih pravila koja proširuju svaki simbol u neki veći niz simbola, početnog niza aksioma od kojeg se započinje konstrukcija i mehanizma za prevođenje generiranih nizova u geometrijske strukture. L-sustavi uvedeni su i razvijeni 1968. Aristid Lindenmayer mađarski je teorijski biolog i botaničar na Sveučilištu u Utrechtu, koji je upotrebljavao L-sustave za opisivanje ponašanja biljnih stanica i za modeliranje procesa rasta u razvoju biljaka. L-sustavi (URL 1) također su se upotrebljavali za modeliranje morfologije različitih organizama (Lindenmayer 1968) i mogu se rabiti za generiranje fraktala.

- George Stiny izumio je tzv. oblik gramatike ili *shape grammars* (Stiny i Gips 1971). Istaknuta je paladijska gramatika koja projektira tlocrte za vile. Umjesto da operiraju nizovima simbola, gramatike oblika djeluju na rasporede grafičkih primitiva poput linija, krugova ili pravokutnika. Pri tome pravila proizvodnje imaju samo geometrijski prikaz koji preslikava jedan skup oblika u drugi.

## 6. Nova metoda oblikovanja jednostavnih i složenih krovova

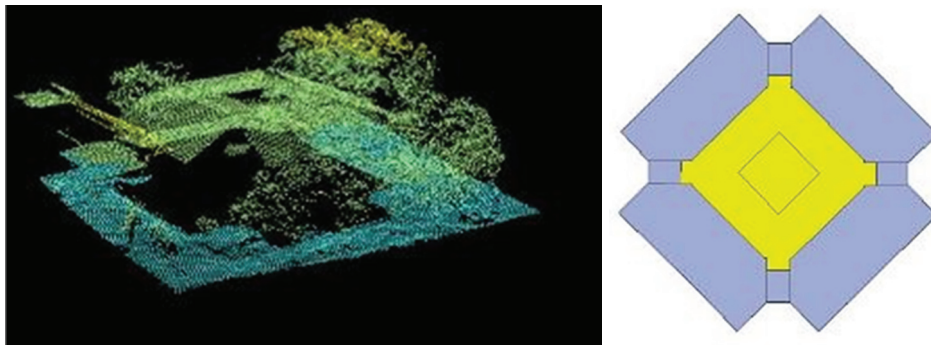
U CityEngineu CGA gramatičkim pravilima definirani su osnovni krovni oblici kao što su ravni krov, kuk, zabat, piramida i šupa. Primjeri osnovnih pravila za različite oblike krovova prikazani su na slici 3.



Slika 3. Različita geometrija krovova različitih oblika zgrada.

Međutim, krovne su konstrukcije zgrada složene. Za realističnije i sofisticiranije tipove krovova nova specifična pravila trebala bi biti napisana za svaku složenu zgradu i to izokreće cilj proceduralnog modeliranja koje svakako olakšava proces modeliranja umjesto ručnog modeliranja svake zgrade pojedinačno. Umjesto pisanja složenih pravila ili dodjeljivanja jedne vrste krova za svaki tlocrt zgrade, mogu se kombinirati neki tipovi krovova i upotrebljavati poslije za svaku zgradu. To bi značilo da je svakom dijelu zgrade s različitim vrijednostima visine dodijeljen neki tip krova ili kombinacija. To je moguće uporabom podataka LiDAR-a. Svaka je zgrada podijeljena na različite krovne dijelove na temelju različitih visina i vrsta. Na primjer, sljedeća slika ima složenu vrstu krova. Srednji dijelovi su ravni s različitim visinama.

Cilj je dobiti što vjerniji model proceduralnim modeliranjem pomoću CGA pravila za zgradu koja je stvarna, a ne izmišljena poput modela koji se upotrebljavaju u industriji računalnih igara. Nakon laserskog snimanja i prikaza krova zgrade u oblaku točaka (slika 4), prvi je pokušaj i cilj dobivanje istovjetnog složenog oblika krova.



Slika 4. Lasersko snimanje i dobivanje vjernog prikaza krova zgrade u odnosu na dobivanje istovjetnog složenog oblika krova iste zgrade pojednostavnjenim proceduralnim modeliranjem.

Na temelju slika s Google Eartha potreban je novi atribut *vrsta krova* koji se izrađuje kao i datoteka koja opisuje tlocrt zgrade. Za odabir različitih oblika sa sličnim vrstama krovova u CityEngineu napisana je skripta. Python editor izvršava se unutar CityEnginea i prikladan je za pisanje i izvršavanje skripti. Zahvaljujem tvrtki GDi d.o.o. koja je ustupila licenciju za CityEngine. Slika 5 prikazuje primjer pythonova koda za odabir vrsta krovova koje sadrže iste vrijednosti.

```

from scripting import *

# get a CityEngine instance
ce = CE()

def selection():
    object=ce.getObjectsFrom(ce.scene())
    list=[]
    for shape in object:
        attr1=ce.getAttribute(shape, 'rooftype') #attribute name

        if attr1 == 'Hip': #attribute value

            list.append(shape)
    ce.setSelection(list)
if __name__ == '__main__':
    selection()

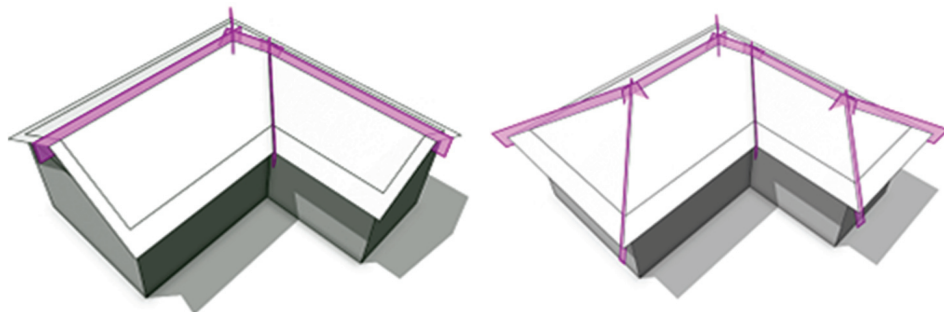
```

Slika 5. Pythonova skripta za odabir prema atributu na temelju vrste krova.

Nakon izvršavanja skripte može se za odabrane oblike modificirati parametar pravila tipa krova. Na donjoj slici mogu se vidjeti odabrani oblici i mogućnosti tipa krova. Za složene krovove potrebno je uvesti unutar skripte cijeli niz operacija. Modeliranje krova optimizira se za generiranje umetnutih lomnih

krovnih ravnina (slika 6). Osnovna je ideja da se orijentacija cijelog opsega postavlja na način:

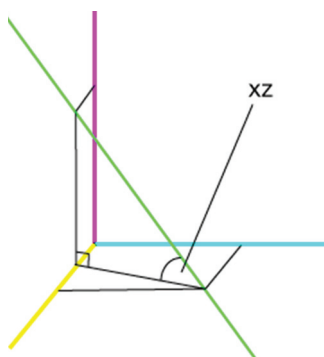
- zadržava se smjer osi  $x$  i projicira se na ravninu prve plohe,
- os  $y$  je duž normale prve strane,
- os  $z$  neka bude normala na gornje dvije strane.



Slika 6. Nakon podjele komponente, svaka strana krova sadrži lomne ravnine prilikom umetanja.

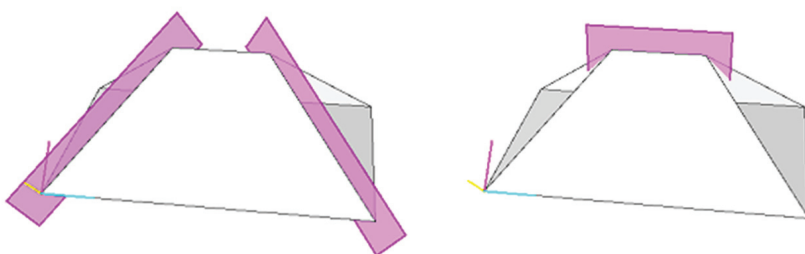
Prema zadanim postavkama nema triju vodoravnih ravnina na sljemenima. U skripti se tada definira pomoću `set(trim.horizontal, true)` ispred komponente `split`. Za mnoge oblike, sljemena na krovu ili grebeni postaju ravnomjerni i stoga parametar ravnomjernosti (`even`) unutar CGA-pravila ne mijenja ništa i to postaje problem pa je potrebna optimizacija geometrijskog oblika krova unutar skripte kao što je i predloženo.

Nakon podjele komponente, svaka strana krova sadrži ravnine sljemena prilikom umetanja. Ovdje prema zadanim postavkama nema vodoravnih ravnina trima na sljemenima. Atribut odreza sastoji se od dviju vrijednosti. Upotrebljava se za kontrolu primjene trim ravnina na trenutačni oblik. Klasifikacija trim ravnina ovisi o orijentaciji ruba koji je korišten za definiranje trim ravnine (tj. zajedničkog ruba između dviju predkomponenata podijeljene površine): ako je kut prema ravnini  $xz$  manji od 40 stupnjeva, trim ravnina je vodoravna, a inače je okomita (slika 7).



Slika 7. Klasifikacija trim ravnine ovisi o kutu između "generirajućeg" ruba i ravnine  $xz$ .

Postoje naravno i kompliciranije izvedenice krovova, pa tako za npr. vertikalni ili horizontalni odrez po magenta ravnini (slika 8) na krovu predlažu se sljedeća rješenja kao i kratke skripte unutar CGA pravila.



Slika 8. Okomite ravnine za rezanje omogućene su prema zadanim postavkama. Ravnine obrezivanja prikazane su magenta bojom.

Ako je kut prema ravnini  $xz$  manji od 40 stupnjeva onda je `roofHip(45)` i `comp(f) { all : Face. }`, slika gore lijevo.

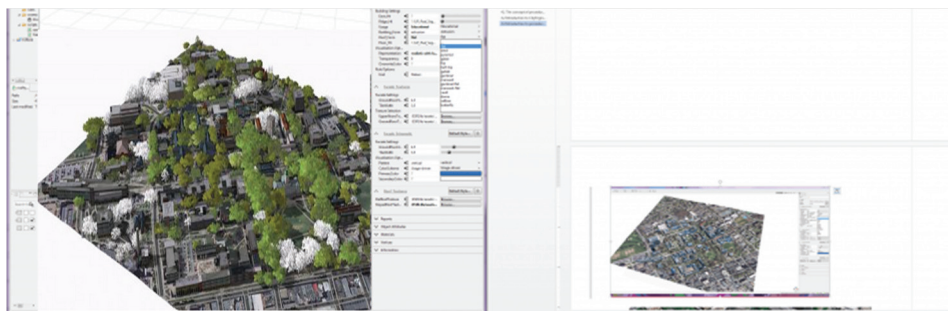
Istovjetno za horizontalne trim ravnine koje je moguće formirati prebacivanjem atributa rezne ravnine. Ravnine obrezivanja prikazane su magenta bojom (slika gore desno), a skripta bi bila u obliku:

Roof-->

```
roofHip(45)
set(trim.horizontal, true)
set(trim.vertical, false)
comp(f) { all : Face. }
```

Za generiranje različitih tipova krovova moguće je izabrati sve tipove koji su

prethodno uneseni unutar skripte, odnosno predefinirani, a cijeli model može se prikazati uz generiranje po potrebi i provjeru rezultata (slika 9).



Slika 9. *Primjer generiranja dijela grada proceduralnim modeliranjem.*

## 7. Zaključak

Krovne konstrukcije zgrada složene su geometrijske konstrukcije. Za realističnije i sofisticiranije tipove krovova, nova specifična pravila predložena su za svaku složenu zgradu, odnosno složeni krov i to na neki način izokreće cilj proceduralnog modeliranja koje svakako olakšava proces modeliranja i daje nam automatizam umjesto ručnog modeliranja svake zgrade pojedinačno. Umjesto pisanja složenih pravila ili dodjeljivanja jedne vrste krova za svaki tlocrt zgrade, mogu se kombinirati neki tipovi krovova i upotrebljavati poslije za svaku zgradu. Provedena je ideja da se svakom dijelu zgrade s različitim vrijednostima visine dodijeli neki tip krova ili kombinacija modela krovova. Svaka je zgrada podijeljena na različite krovne dijelove na temelju različitih visina i vrsta. Cilj je dobiti što vjerniji model proceduralnim modeliranjem pomoću CGA pravila za zgradu koja je stvarna a ne izmišljena, kao što su to modeli koji se upotrebljavaju u industriji računalnih igara. Nakon laserskog snimanja i prikaza zgrade u oblaku točaka (slika), prvi je pokušaj dobivanje istovjetnog složenog oblika krova. Prikazane su transformacije pri oblikovanju krovova koje su ponajprije alat za proceduralno modeliranje temeljeno na pravilima. Pri praktičnoj primjeni, pokazana su dva poboljšanja u tehničkom smislu. Prvo, pokazuje se kako transformacije dizajna mogu stvoriti veći skup varijacija iz skupa ulaznih različitih oblika krovova u odnosu na prethodne radove na tu temu. Drugo, pokazuje se kako izračunati transformacijske sekvence između dva ulazna dizajna koji se mogu generirati u optimalni ili stvarni 3D model. Dvije su glavne komponente koje omogućuju transformacije dizajna, a to su izvođenje gramatike i spajanje pravila. Time se otklanjaju različita ograničenja proceduralnog modeliranja temeljenog na pravilima i čine gramatiku oblika pristupačnijom korisnicima početnicima. Transformacije dizajna dopuštaju stvaranje bezbrojnih varijacija iz skupa proceduralnih oblika nasumičnim kombiniranjem i spajanjem njihovih različitih komponenti.

**Literatura**

- Adão, T., Pádua, L., Hruska, J., Peres, E., Sousa, J. J., Morais, R., Magalhães, L. G. (2017): Bringing together UAS-based land surveying and procedural modeling of buildings to set up enhanced VR environments for cultural heritage, Proceedings of the EPCGi'2017 – 24th Portuguese Meeting of Computer Graphics and Interaction, 12–13 October 2017, IEEE Xplore, Guimarães, Portugal.
- Adão, T., Pádua, L., Marques, P., Sousa, J. J., Peres, E., Magalhães, L. (2019): Procedural modeling of buildings composed of arbitrarily-shaped floor-plans: background, progress, contributions and challenges of a methodology oriented to cultural heritage, *Computers*, 8 (2), 38.
- Biljecki, F. (2017): Level of detail in 3D city models, PhD, TU Delft, Delft.
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., Çöltekin, A. (2015): Applications of 3D city models: State of the art review, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4 (4), 2842–2889.
- Brenner, C. (2005): Building Reconstruction from Images and Laser Scanning, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 (3–4), 187–198.
- Brenner, C. (2010): Building Extraction, in Vosselman, G., Maas, H.-G. (eds.), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK, 169–212.
- Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language, *IRE Transactions on information theory*, 2 (3), 113–124.
- De Santis, R., Gloria, A., Viglione, S., Maietta, S., Nappi, F., Ambrosio, L., Ronca, D. (2018): 3D laser scanning in conjunction with surface texturing to evaluate shift and reduction of the tibiofemoral contact area after meniscectomy, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater*, 88, 41–47.
- Dobraja, I. (2015): Procedural 3D modeling and visualization of geotypical Bavarian rural buildings in Esri CityEngine software, Unpublished MA dissertation, Technische Universität München, Faculty of Civil, Geo and Environmental Engineering, Department of Cartography, München.
- Haala, N., Kada, M. (2010): An Update on Automatic 3D Building Reconstruction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (6), 570–580.
- Healey, P. (2007): Re-thinking key dimensions of strategic spatial planning: sustainability and complexity, *Fuzzy Planning: The Role of Actors in a Fuzzy Governance Environment*, 21–42.
- Lindenmayer, A. (1968): Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs, *Journal of theoretical biology*, 18 (3), 280–299.
- Luan, X., Xie, Y., Ying, L., Wu, L. (2008): Research and Development of 3D Modeling, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 8 (1), 49–53.
- Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., Van Gool, L. (2006): Procedural modeling of buildings, *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, 614–623.



- Parish, Y. I., Müller, P. (2001): Procedural Modeling of Cities, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH, Los Angeles, 301–308.
- Rivolin, U. J., Faludi, A. (2005): The hidden face of European spatial planning: Innovations in governance, *European Planning Studies*, 13 (2), 195–215.
- Roumpani, F. (2019): The Role of Procedural Cities in the Future of Planning: An Integrated Method, Doctoral dissertation, University College London (UCL), London.
- Satari, M., Samadzadegan, F., Maas, H.-G. (2012): A Multi-Resolution Hybrid Approach for Building Model Reconstruction from LiDAR Data, *The Photogrammetric Record*, 27 (139), 330–359.
- Stiny, G., Gips, J. (1971): Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture, *IFIP congress* (2), Vol. 2, No. 3, 125–135.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, P., Grussenmeyer, P. (2007): Hough-Transform and Extended RANSAC Algorithms for Automatic Detection of 3D Building Roof Planes from Lidar Data, *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-3/W52, 407–412.
- Wang, R. (2013): 3D Building Modeling Using Images and LiDAR: A Review, *International Journal of Image and Data Fusion*, 4 (4), 273–292.

### **Mrežna adresa**

URL 1: L-system, <https://en.wikipedia.org/wiki/L-system>, (25. 7. 2022.).

## Proposals for Improve the Automation of Roofs Modelling by Procedural Modelling Procedures

*ABSTRACT.* The paper describes the procedural 3D modelling and visualization of urban 3D models of buildings, that is, only one part of them – the roofs, because the diversion of roofs can be performed by parametrization or procedural modelling. Until now, various types of roofs have been performed by changing parameters, and in this paper we provide suggestions for direct changes within the script for various simple and complex types of roof constructions. This automatically shortens the modelling time in any software, because ultimately it is about modelling not only roofs but entire cities, so shorter modelling time is very important for users who expect geovisualization of entire cities to take place in real time. This is examined in the CityEngine software, which is based on procedural modelling and is mainly used to create 3D content of urban areas and applied to 3D modelling of urban areas. First, all the necessary data, which are available in open access on the Internet, and the attributes of the roofs for modelling were collected. At the end, the final results of the generated 3D model are published in CityEngine WebScene, as well as an analysis of the time required to model several types of roofs within the 3D model.

*Keywords:* geovisualization, 3D, procedural modelling, buildings, roof.

*Primljeno / Received:* 2022-07-28

*Prihvaćeno / Accepted:* 2022-09-05