

Ari Riipinen

**Kaupunki-infrastruktuurin luonti proseduraalisin
menetelmin**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

29. huhtikuuta 2016

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

Tekijä: Ari Riipinen

Yhteystiedot: ari.p.riipinen@student.jyu.fi

Työn nimi: Kaupunki-infrastruktuurin luonti proseduraalisin menetelmin

Title in English: Procedural generation of city infrastructure

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 15+0

Tiivistelmä: Proseduraalisten menetelmien käyttö erilaisten ympäristöjen automaattiseen luontiin yleistyy jatkuvasti. Eräs merkittävä käyttökohde on kaupunkien luonti, sillä kaupunki-infrastruktuuri sisältää niille useita mahdollisia sovelluskohteita. Tässä tutkielmassa tarkastellaan muutamia tyypillisimpiä infrastruktuurin osa-alueita sekä menetelmiä niiden luomiseen proseduraalisesti.

Avainsanat: Proseduraalinen generointi, kaupunki, infrastruktuuri

Abstract: The usage of procedural methods to automatically generate various kinds of environments is becoming increasingly commonplace. One significant use is city generation, due to city infrastructure containing various possible applications for them. This thesis examines some of the most typical parts of infrastructure, as well as methods for generating them procedurally.

Keywords: Procedural generation, city, infrastructure

Kuviot

Kuvio 1. Tieverkostomalleja (Sun ym. 2002).	4
Kuvio 2. Tieverkosto, jossa topologia on merkitty keltaisella ja maastoon sovitettu tie punaisella (Kelly ja McCabe 2007).	4
Kuvio 3. Erilaisiin kaupunginosiin sovellettuja tonttijakoja (Kelly ja McCabe 2007).	5
Kuvio 4. Erilaisilla menetelmillä tuotettuja rakennuksia.	7
Kuvio 5. Proseduraalisesti generoituihin huoneisiin sovitettu julkisivu (Martin 2006).	8

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	TIEVERKOSTO	3
	2.1 Tieverkoston topologia	3
	2.2 Teiden sovittaminen maastoon	3
	2.3 Kaupunginosat	5
3	RAKENNUKSET	6
	3.1 Julkisivu	6
	3.2 Sisätilat	7
4	YHTEENVETO	9
	LÄHTEET	10

1 Johdanto

Tietoteknisten laitteiden jatkuva kehitys asettaa tiettyjä odotuksia myös niille tarjottavalle sisällölle. Kuluttajien huomiosta kilpaillaan tuomalla markkinoille laajempia ja monimutkaisempia sisältökokonaisuuksia, jotka pyrkivät mahdollisimman tehokkaasti hyödyntämään käytettävissä olevien järjestelmien resursseja. Niinpä teknologian kehittyessä myös sisällöntuotannon on tehtävä samoin. Esimerkiksi 3D-grafikassa sculpting-tekniikat ovatkin korvaamassa vanhaa verteksitason työskentelyä, ohjelmointikielet siirtyvät yhä kauemmaksi raa'asta konekielestä ja pelituotannossa ohjelmointiympäristön voi korvata alan vaatimukset paremmin täyttävä pelinkehitysympäristö.

Pelkästään työkalujen kehittyminen ei kuitenkaan riitä, vaan myös niiden käyttämien tekniikoiden on kehityttävä. Monimutkaisten kokonaisuuksien koonti manuaalisesti alkutekijöistään ei nykyaikana useissa tapauksissa ole enää järkevää, vaan avuksi tarvitaan automaatiota. Eräs tällainen automatisointitekniikka on proseduraalinen generointi. Siinä kohde määritellään kerran kokoelmana yleensä parametrisoituja ohjeita, joita kutsumalla voidaan sitten luoda uusia instansseja kohteesta tarpeen mukaan (Kelly ja McCabe 2006). Yksinkertaistaen siis manuaalisesti valmiiksi tehdyn kohteen korvaa sarja tietokoneen tulkittavissa olevia ohjeita sen luomiseksi.

Proseduraalisilla menetelmillä voidaan mallintaa esimerkiksi materiaaleja, maastoa ja kasvillisuutta. Tässä tutkielmassa keskityn kuitenkin kuvaamaan niiden käyttöä kaupunkiympäristön luomiseen, erityisesti infrastruktuurin osalta. Pyrin tällä rajauksella luomaan mahdollisimman yleishyödyllisen kuvan aihepiiristä, keskittymättä liikaa osa-alueisiin, joiden käyttökohteet ovat rajatumpia, kuten teksturointiin, jonka hyöty esimerkiksi simuloinnissa on hyvin vähäinen.

Proseduraalisen generoinnin hyödyt kaupunki-infrastruktuurin luomisessa ovat merkittävät, varsinkin jos se halutaan toteuttaa erityisen tarkasti tai skaalautuvasti. Jos esimerkiksi rakennuksille tarvitaan niiden käyttötarkoituksiin soveltuvat sisätilat, voi niiden manuaalinen suunnittelu yksi kerrallaan käydä melko pienelläkin kaupungilla liian työlääksi ja alkaa toistaa itseään. Lisäksi realistiset ominaisuudet, kuten maaston vaihteluihin sopeutuva tiever-

kosto tai asumiskelpoisiksi suunnitellut rakennukset, voivat johtaa hyvinkin monimutkaisiin kaupunkiympäristöihin.

Proseduraalisesti luotavaa kaupunkia ei yleensä luoda täysin satunnaisesti, vaan siinä käytettäville menetelmille määrätään tiettyjä vakioparametreja, esimerkiksi rakennusarkkitehtuurien yleispiirteitä sekä numeeristen arvojen sallittuja rajoja ja todennäköisyyksiä. Nämä vakiot voidaan joko suunnitella tarpeen mukaan kaupungin käyttötarkoitukseen sopiviksi tai kopioida todellisesta ympäristöstä valmiiksi olemassa olevan kaupungin tai sen ominaisuuksien mallintamiseksi. Tällaiset mallit pyrkivät yleensä realismiin, joten voisikin olla mahdollista soveltaa riittävän tarkasti toteutettuja proseduraalisia ratkaisuja myös todellisten ympäristöjen kehittämiseen.

Tämä tutkielma on jaettu lukuihin kaupunkien proseduraalisen luonnin tyypillisimpien erillisten vaiheiden mukaan. Korkeuskarttoihin ei erikseen perehdytä, vaan oletetaan valmiin kartan olevan jo käytettävissä. Luvussa 2 esitetään menetelmiä tieverkoston, ja samalla tonttien, luomiseen ja luku 3 keskittyy rakennuksiin. Lopuksi yhteenvedossa luodaan vielä lyhyt katsaus muutamiin tutkielmassa muuten mainitsematta jääneisiin infrastruktuurin osaluaisiin.

2 Tieverkosto

Tieverkoston luonti on tyypillisesti ensimmäinen vaihe kaupunkia valmiiseen korkeuskarttaan proseduraalisesti luotaessa. Koska siinä käytetään yleensä yksinomaan korkeustietoa, voidaan samoja menetelmiä helposti hyödyntää kaupunkien lisäksi myös muissa tieverkoston vaativissa sovelluskohteissa. Tällaisia voivat olla esimerkiksi tieteellisiin tarkoituksiin käytettävät ajosimulaattorit (Campos ym. 2015).

Tämän luvun alaluvuissa käydään tieverkoston luomisen vaiheita läpi niiden tyypillisessä järjestyksessä. Luvussa 2.1 käsitellään tieverkoston topologisen mallin luomista ja luvussa 2.2 teiden rakentamista sitä noudattaen. Luku 2.3 keskittyy kaupunginosien johtamiseen luodusta tieverkostosta ja niiden jakamiseen pienemmiksi kokonaisuuksiksi teitä lisäämällä.

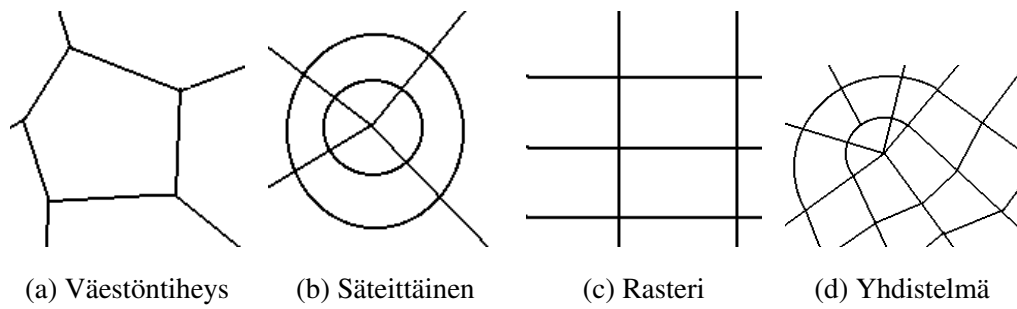
2.1 Tieverkoston topologia

Ensimmäinen vaihe tieverkoston luonnissa on sen solmukohtien määrittäminen ja niiden yhdistäminen verkoksi. Solmukohdat kuvaavat luotavassa tieverkostossa suurien pääteiden risteyksiä ja niiden väliset yhteydet risteyksestä toiseen johtavia teitä (Kelly ja McCabe 2007). Solmukohdat ja niiden yhteydet voidaan luoda ennalta määrättyjen mallien mukaan, esimerkiksi olemassa olevan kaupungin tieverkoston mallintamiseksi, tai vapaammin käyttäjän syötteestä. Tämä vaihe onkin muuten pääosin automaattisessa prosessissa ehkä merkittävin tilaisuus hyödyntää ulkopuolista informaatiota.

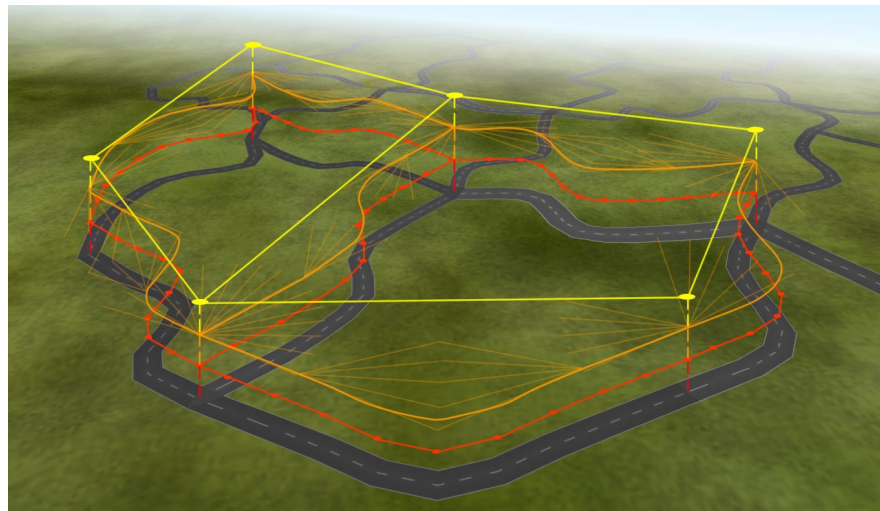
Mallien mukainen topologian luonti alkaa halutun mallin valitsemisesta. Kuviossa 1 on näistä muutamia esimerkkejä. Tämän jälkeen mallia voidaan vielä muokata tarpeen mukaan esimerkiksi simuloitavasta asukastiheydestä riippuen (Sun ym. 2002). Solmukohdat asetetaan muokatun mallin osoittamiin risteyksiin ja yhdistetään siinä kuvatuilla teillä.

2.2 Teiden sovittaminen maastoon

Tässä vaiheessa topologisen tieverkoston tiet sovitetaan käytössä olevaan korkeuskarttaan. Kelly ja McCabe (2007) esittävät tähän algoritmin, joka jakaa luotavan tien määrätyn pitui-



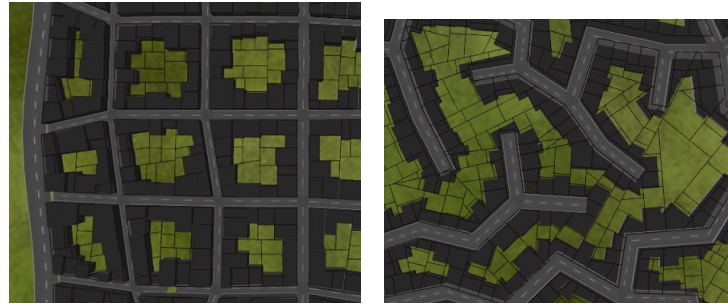
Kuvio 1: Tieverkostomalleja (Sun ym. 2002).



Kuvio 2: Tieverkosto, jossa topologia on merkitty keltaisella ja maastoon sovitettu tie punaisella (Kelly ja McCabe 2007).

siin väleihin, joista jokaisen jälkeen tie saa kääntyä korkeintaan tietyn kulman suhteessa sen lopullisen kohteen sijaintiin. Käännyttävän kulman suuruus riippuu siitä aiheutuvan korkeuseron suhteesta koko tien päätepisteiden korkeuseroon. Näin muodostuva tie etenee maastossa tarpeen mukaan mutkitellen, välttämällä jyrkkiä mäkiä sikäli kun mahdollista, kuten tiet kuvion 2 havainnollistamassa tieverkostossa.

Mikäli käytössä on malli, jonka tarkoituksena on olemassa olevan kaupungin tieverkoston mallintaminen, tulee tämä tietenkin huomioida teiden kulkureittejä laskettaessa. Mikäli tie sijoitetaan maastoon edellä mainitun algoritmin avulla, se ei välttämättä seuraa mallin mukaista reittiä juuri ollenkaan. Eräs ratkaisu tähän voisi olla algoritmin muuttaminen niin, että siinä käännyttävää kulmaa rajoittaisi myös etäisyys mallin mukaisesta tiestä.



(a) Keskusta-alueita.

(b) Esikaupunkialueita.

Kuvio 3: Erilaisiin kaupunginosiin sovellettuja tonttijakoja (Kelly ja McCabe 2007).

2.3 Kaupunginosat

Kaupunginosilla tarkoitetaan tässä yleensä pääteiden toisistaan erottamia osia kaupungista. Yksinkertaisimmillaan tämä jako olisikin toteutettavissa jo pelkän topologisen tieverkoston avulla, mutta maastoon sovitettut tiet mahdollistavat tarvittaessa tarkempia ja monipuolisempia ratkaisuja.

Groenewegen ym. (2009) esittävät kuitenkin kaupunginosien määrittelyyn vaihtoehtoisen mallin. Siinä realismin lisäämiseksi kaupungin rakenne luodaan suurelta osin sen kaupunginosien käyttötarkoitusten perusteella. Kaupunginosille valitaan ensin sopivimmat sijainnit ja pinta-alat kaupungin rajojen sisäpuolella ja vasta sitten yhdistetään ne pääteiden verkostoon, joka saattaaakin nyt tämän seurauksena kulkea paikoitellen kaupunginosien läpi.

Kaupunginosat jaetaan kortteleiksi luomalla niistä jokaiselle oma toisen tason tieverkkonsa ja nämä korttelit jaetaan edelleen tonteiksi, esimerkiksi kuten kuviossa 3 (Kelly ja McCabe 2007). Korttelin jakaminen tonteiksi voidaan toteuttaa omalla kolmannen tason tieverkollaan (Dou ym. 2009) tai yksinkertaisemmin geometrisillä operaatioilla (Kelly ja McCabe 2007). Näiden toisen ja kolmannen tason verkkojen luomiseen sopivat pääosin samat mallipohjaiset menetelmät kuin pääteillekin, verkkojen kasvavan määrän kuitenkin tehdessä solmukohtien manuaalisesta sijoituksesta tai hienosäädöstä tälle tasolle sopimattoman ratkaisun.

3 Rakennukset

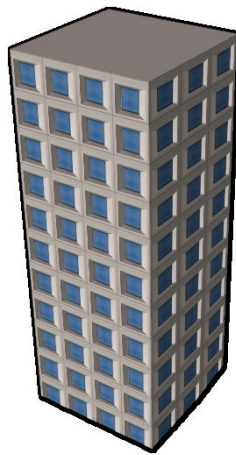
Jotta luvussa 2 esitetystä tieverkostosta saataisiin kaupunki, sen tontit täytetään rakennuksilla. Realistisessa kaupungissa osa alueista kannattaa toki jättää rakentamattomiksi esimerkiksi puistoja tai muita viheralueita varten. Ne kuitenkin sivuutetaan tässä tutkielmassa, niiden ollessa enemmänkin tyypillisempää maaston ja kasvillisuuden kuin kaupungin luontia. Myöskään rakennustyömaita ja vastaavia ei tässä mallinneta, vaan keskitytään kokonaiseen ja valmiiseen kaupunkiympäristöön.

Arkkitehtuuri on oma jatkuvasti kehittyvä oppialansa, eikä kaikkea sen tietoutta liene edes mahdollista muuntaa tietokoneella suoritettaviksi algoritmeiksi. Niinpä useimmat realistiinkin tuloksiin pyrkivistä menetelmistä keskittyvät rakennusten visuaaliseen ulkoasuun, jättäen käytännön rakennustekniset rajoitteet vähemmälle huomiolle.

3.1 Julkisivu

Yksinkertaisimmillaan rakennukset voidaan esittää pelkkinä sopivan kokoisina suorakulmaisina särmiöinä, joiden yksityiskohdat lisätään vasta tekstuureina (Kelly ja McCabe 2007). Tätä ratkaisua edustaa kuvio 4a. Enemmän vaihtelua, ja siten myös realismia, voidaan kuitenkin saada käyttämällä monimuotoisempia geometrisia kappaleita. Vielä melko yksinkertaisen ratkaisun tähän esittävät Greuter ym. (2003), joiden algoritmi yhdistelee monikulmioita, tuottaen vaihtelevan muotoisia kerrostaloja, joista eräs kuviossa 4b.

Monimutkaisemmat ratkaisut, kuten formaaliin kielioppiin perustuvat Lindenmayer-systeemit, kykenevät tuottamaan tarvittaessa jopa olemassa olevien rakennusten arkkitehtonisia piirteitä osittain tai kokonaan matkivia malleja (Kelly ja McCabe 2006). Rakennuksen julkisivun monimuotoisuus voi kuitenkin olla myös rajoittava tekijä. Useimmat algoritmit rakennuksen sisätilojen luontiin sen julkisivun puitteissa nimittäin ovat suunniteltuja täyttämään suorakulmaisen tilan, eivätkä siis voi kunnolla hyödyntää epäsäännöllisempiä muotoja. Nopeaa suoritettavuutta kaivattaessa tällaisia algoritmeja kannattaa kuitenkin harkita, sillä ne voivat parhaimmillaan toimia jopa reaaliajassa (Hahn, Bose ja Whitehead 2006).



(a) Suorakulmainen särmiö (Kelly ja McCabe 2007).



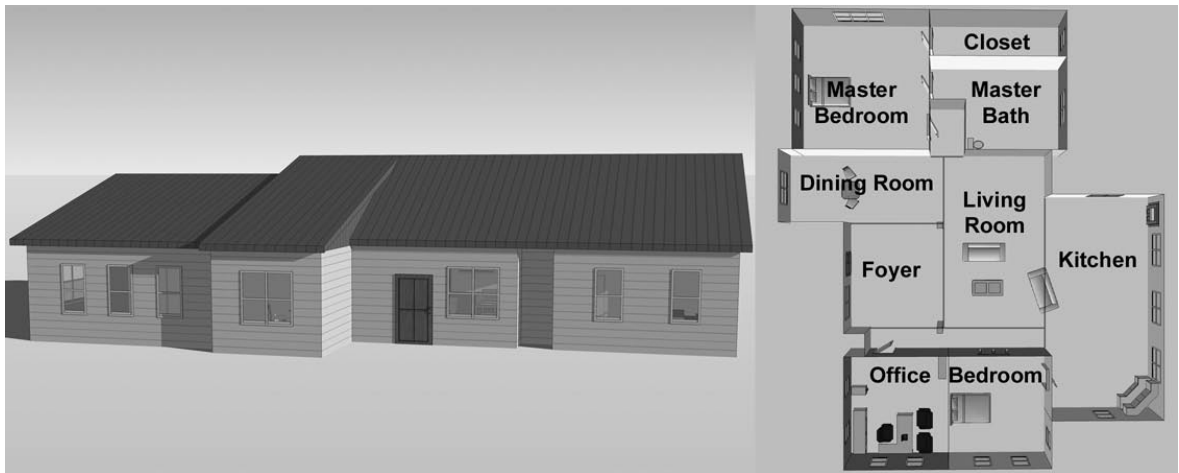
(b) Yhdisteltyjä monikulmioita (Greuter ym. 2003).

Kuvio 4: Erilaisilla menetelmillä tuotettuja rakennuksia.

3.2 Sisätilat

Mikäli rakennukselle halutaan toteuttaa julkisivun lisäksi sisätilat, on tyypillisempää aloittaa niistä. Eräs keino tähän on luoda kaavio rakennukseen sisällytettävistä huoneista ja niiden yhteyksistä toisiinsa. Tästä sitten johdetaan rakennuksen pohjapiirustukset sijoittamalla huoneet tontilta varattuun tilaan kaavion topologian mukaisesti ja määräämällä niiden koot tarpeen mukaan (Martin 2006). Esimerkki näin tuotetuista pohjapiirustuksista ja niihin sovitetusta julkisivusta on kuviossa 5. Mikäli rakennuksen tulee olla monikerroksinen, voi kuitenkin olla syytä kiinnittää erityistä huomiota kerrosten muotoihin. Tämä menetelmä itsessään ei näet estä esimerkiksi suuremman kerroksen sijoittumista pienemmän yläpuolelle, mikä realistista arkkitehtuuria tavoitellessa saattaa olla epätoivottua.

Eräs mahdollisuus on myös soveltaa aikaisemmin mainittuja Lindenmayer-systeemejä sekä muita niistä johdettuja semanttisia ratkaisuja rakennuksen ulko- ja sisäpuolen luomiseen kokonaisuutena. Tällaiset toteutukset perustuvat rakennuksen kuvaamiseen käsitteinä ja niiden mahdollisina parametreina. Nämä käsitteet voidaan sitten jakaa alakäsitteiksi omine parametreineen, ja niin edelleen (Tutenel ym. 2011). Mikäli tällaisesta käsittehierarkiasta saadaan



Kuvio 5: Proseduraalisesti generoituihin huoneisiin sovitettu julkisivu (Martin 2006).

riittävän kattava, voidaan sen avulla luoda automaattisesti hyvin monipuolisia mutta kuitenkin säännönmukaisia rakennuksia tai jopa useamman rakennuksen kokonaisuuksia. Lisäksi käsitteiden on mahdollista sisältää jopa huoneisiin asetettavia huonekaluja ja muita sisustusyksityiskohtia.

4 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa käytiin läpi kaupunki-infrastruktuurin proseduraalisen luomisen muutamia tyypillisimpiä vaiheita niiden mahdollisesti tyypillisimmässä järjestyksessä, pois lukien kaupungin rakennus- ja alustana toimivan korkeuskartan toteutus.

Ensimmäisessä luvussa käsiteltiin tieverkoston luomista. Se jaettiin kolmeen osaan: topologiaan, maastoon sovittamiseen ja jakoon kaupunginosiksi. Topologiasta esiteltiin lyhyesti malleihin perustuva toteutus, sekä mainittiin myös mahdollisuus käyttäjältä saadun syöteen hyödyntämiseen. Maastoon sovittamisesta mainittiin lähinnä menetelmä, jota Kelly ja McCabe (2007) käyttävät, sekä eräs mahdollinen muutos siihen mallipohjaisia toteutuksia silmällä pitäen. Lopuksi selitettiin, miten kaupunginosat voidaan määrittellä joko tieverkoston rajaamina tai niiden käyttötarkoitusten mukaan ja miten ne jaetaan edelleen kortteleiksi ja lopulta tonteiksi tieverkoston tasoja lisäämällä.

Toinen luku käsitteli rakennusten luontia. Aluksi käytiin läpi muutama yksinkertainen tapa julkisivujen koostamiseen geometrisista kappaleista ja mainittiin näistä aiheutuva rajoite sisätilojen luonnille jälkikäteen. Tämän jälkeen esiteltiin tyypillisempi järjestys, jossa rakennuksen sisätila luodaan ensin ja annetaan sen määrätä julkisivun tarkempi muoto. Myös kehittyneempiä, Lindenmayer-systeemeistä johdettuja ratkaisuja sivuttiin.

Juuri tieverkosto ja rakennukset, erityisesti niiden julkisivut, ovatkin tyypillisempiä osia kaupunkiympäristön proseduraalisessa luonnissa. Täysin realistinen kaupunki sisältäisi toki paljon muitakin infrastruktuurin elementtejä. Esimerkiksi maankäyttö muuhun kuin rakennuksiin ohitettiin tässä tutkielmassa sivuhuomautuksena. Myöskään vaikkapa toimivaa sähkö- tai viemäriverkkoa ei yleensä kuvailla osana kaupunginluomisprosessia, vaan niitä joko simuloidaan erikseen tai niiden vain esitetään toimivan taustalla asiaan sen enempiä huomiota kiinnittämättä. Tulevissa tutkimuksissa kannattaisikin perehtyä myös tämänkaltaisiin infrastruktuurin osa-alueisiin osana samaa kokonaisuutta, vastaisihan se tällöin enemmän todellisuutta, mahdollistaen entistäkin realistisemmat kaupunkiympäristöt.

Lähteet

Campos, C., J. M. Leitão, J. P. Pereira, A. Ribas ja A. F. Coelho. 2015. “Procedural generation of topologic road networks for driving simulation”. Teoksessa *Information Systems and Technologies (CISTI), 2015 10th Iberian Conference on*, 1–6. Kesäkuu. doi:10.1109/CISTI.2015.7170557.

Dou, X., Y. Qi, F. Hou ja X. Shen. 2009. “Interactive Urban Map Design with Template and Parameterization”. Teoksessa *Image and Signal Processing, 2009. CISP '09. 2nd International Congress on*, 1–5. Lokakuu. doi:10.1109/CISP.2009.5301695.

Greuter, Stefan, Jeremy Parker, Nigel Stewart ja Geoff Leach. 2003. “Real-time procedural generation of 'pseudo infinite' cities”. Teoksessa *Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, 87–ff. ACM.

Groenewegen, Saskia A, Ruben M Smelik, Klaas Jan de Kraker ja Rafael Bidarra. 2009. “Procedural city layout generation based on urban land use models”. Teoksessa *Proceedings of the 30th Annual Conference of the European Association for Computer Graphics (Eurographics' 09)*, 45–48.

Hahn, E., P. Bose ja A. Whitehead. 2006. “Lazy Generation of Building Interiors in Realtime”. Teoksessa *Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE '06. Canadian Conference on*, 2441–2444. Toukokuu. doi:10.1109/CCECE.2006.277767.

Kelly, George, ja Hugh McCabe. 2006. “A survey of procedural techniques for city generation”. *ITB Journal* 14:87–130.

———. 2007. “Citygen: An interactive system for procedural city generation”. Teoksessa *Fifth International Conference on Game Design and Technology*, 8–16.

Martin, Jess. 2006. “Procedural house generation: A method for dynamically generating floor plans”. Teoksessa *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 1–2.

Sun, Jing, Xiaobo Yu, George Baciuc ja Mark Green. 2002. "Template-based generation of road networks for virtual city modeling". Teoksessa *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, 33–40. ACM.

Tutenel, T., R. M. Smelik, R. Lopes, K. J. de Kraker ja R. Bidarra. 2011. "Generating Consistent Buildings: A Semantic Approach for Integrating Procedural Techniques". *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* 3, numero 3 (syyskuu): 274–288. ISSN: 1943-068X. doi:10.1109/TCIAIG.2011.2162842.