

# Slimme 3D Indoormodellen ter Ondersteuning van Crisismanagement in Grote Openbare Gebouwen

Sisi Zlatanova<sup>1</sup>, George Vosselman<sup>2</sup>, Kourosh Koshelham<sup>3</sup>, Rob Peters<sup>4</sup>,  
Bart Beers<sup>5</sup>, Robert Voûte<sup>6</sup>, Bart De Lathouwer<sup>7</sup>, Matty Lakerveld<sup>8</sup>,  
Henk Djurrema<sup>9</sup> en Gerke Spaling<sup>10</sup>

<sup>1</sup>TU Delft

<sup>2</sup>Twente Universiteit

<sup>3</sup>University of Melbourne

<sup>4</sup>Veiligheidsregio Kennemerland

<sup>5</sup>CycloMedia

<sup>6</sup>CGI

<sup>7</sup>OGC

<sup>8</sup>Crotec

<sup>9</sup>Veiligheidsregio Noord- en Oost-Gelderland

<sup>10</sup>Veiligheidsregio Twente

## Samenvatting

In dit project richten wij ons op het gebrek aan up-to-date 3D indoormodellen voor een groot aantal openbare gebouwen. Deze modellen zijn voor vele stakeholders, maar vooral voor organisaties die zorg moeten dragen voor het managen van de veiligheid van openbare gebouwen, inclusief de BHV (Bedrijfshulpverleners), de brandweer en de veiligheidsregio's, cruciaal. De enige ruimtelijke inoorgegevens, die momenteel voor de meeste gebouwen beschikbaar zijn, zijn 2D bouwtekeningen of ontwerp-BIMs (Building Information Models) voor de nieuwe gebouwen. Deze geven de staat van het gebouw 'zoals ontworpen' weer, die kan verschillen van de staat van het gebouw 'zoals gebouwd' of 'zoals het is'. Tijdens operaties in de hulpverlening is kennis over verbouwingen (bijv. verlaagde plafonds of verhoogde vloeren), hoogte van de kamers en gangen en aanwezig meubilair van cruciaal belang voor brandbestrijders. Dergelijke informatie kan alleen verkregen worden via een up-to-date 3D inoormodel van het gebouw.

Het project richt zich op verscheidene thema's, die elders afzonderlijk behandeld zijn, maar nooit als één geheel. Het project streeft er naar een brug te slaan tussen onderzoek op het gebied van 3D inoorreconstructie variërend van puntenwolken,

3D inoormodellen (geometrie, semantiek en topologie) en 3D inoornavigatie ten behoeve van gebruikers.

Op dit moment bestaat er geen procedure voor halfautomatische of automatische 3D reconstructie uit puntenwolken. Puntenwolken zijn de data die vergaard worden nadat een apparaat een scan heeft uitgevoerd van alle hoeken en gaten van het gebouw. De puntenwolk wordt vertaald in een uitgebreid 3D-model dat verder kan worden onderverdeeld of geaggregeerd om verschillende gebruikers en activiteiten in crisissituaties te ondersteunen.

## 1 Introductie

Voor openbare gebouwen zijn meestal 2D bouwtekeningen beschikbaar, terwijl semantisch rijke 3D inoormodellen zelden beschikbaar zijn. Door de ontwikkeling van 3D stadsmodellering, waar de nadruk vooral op locaties buitenshuis ligt, neemt de behoefte aan 3D inoormodellen voor veel toepassingen toe. Een belangrijke opkomende toepassing, die in toenemende mate op 3D ruimtelijke informatie binnenshuis moet kunnen vertrouwen, is routeplanning in grote gebouwen ten behoeve van rampenbestrijding. Bij brand in een drukbezocht, meerde verdiepingen tellend gebouwencomplex, zoals een ziekenhuis, is het snel genereren van optimale evacuatie routes van levensbelang. Om optimale routes te genereren in een inoormgeving, waar factoren zoals gebruikers, type, grootte en toegankelijkheid van in- en uitgangen (deuren, ramen), hoogte van de plafonds (verlaagde plafonds, die potentieel gevaar op kunnen leveren door verborgen luchtzakken) bewegingswijze (bijv. gehandicapten) een rol spelen, is een 2D kaart vaak onvoldoende. Een 3D model met informatie over begaanbare en niet-begaanbare ruimtes met zowel hun geometrische eigenschappen als topologische en semantische relaties is van essentieel belang.

Een belangrijke reden voor het niet beschikbaar zijn van up-to-date semantisch rijke 3D inoormodellen is het gebrek aan geautomatiseerde of half-geautomatiseerde modelleringsmethoden die toegepast kunnen worden bij een verscheidenheid aan binnenhuisarchitecturen om complete en accurate modellen effectiever en efficiënter te kunnen creëren. Ontwerpmodellen (BIMs) zijn slechts beschikbaar voor enkele nieuw geconstrueerde gebouwen (Isikdag et al 2013). Bovendien worden zij meestal niet op de juiste wijze onderhouden en representeren dus de huidige staat van het gebouw niet. In veel situaties hebben we een up-to-date relevant 3D model nodig van de binnenkant van het gebouw met zowel gedetailleerde informatie over de geometrie en de functie van de componenten van het gebouw als over de onderlinge relaties. Met relevantie wordt bedoeld dat de informatie bijdraagt aan de besluitvorming van een bevelvoerder. Om bijvoorbeeld een brand in een ziekenhuis beter te kunnen managen kan een 3D model worden gebruikt om de rampenbestrijdingsofficieren te trainen en later de geoptimaliseerde evacuatie routes voor mensen die kunnen lopen of die gebruik maken van een rolstoel of brancard te genereren. Tijdens de reddingsoperatie is bijvoorbeeld kennis over verlaagde plafonds of verhoogde vloeren cruciaal voor brandbestrijders, omdat hierdoor zichtbaar wordt waar zich gesloten ruimten met zuurstof bevinden waardoor het vuur zich – vaak ongezien – kan verspreiden.

Handmatig modeleren en updaten is tijdrovend en kostbaar en dus inefficiënt voor grote gebouwen. Geautomatiseerde benaderingen zijn vooral data-gestuurd (in tegenstelling tot toepassingsgestuurd) en vertrouwen op het extraheren van simpele geometrische kenmerken, zoals vlakken, lijnen en hoekpunten om structurele elementen van het gebouw (muren, vloeren, plafonds, deuren en ramen) te kunnen herkennen (Budroni en Boehm, 2010; Sanchez en Zakhor, 2012; Valero et al, 2012; Mura et al, 2013; Xiong et al, 2013; Pu en Vosselman, 2010; Vosselman en Maas,

2009). Deze methoden zijn gevoelig voor fouten en gaten in de data en de hieruit voortvloeiende modellen zullen niet noodzakelijkerwijs bestaan uit topologisch consistente en correcte ruimten, die essentieel zijn voor het uitvoeren van complexe bevestigingen voor routeplanning. Benaderingen die proberen het interieur te herkennen (Jenke et al, 2009; Xiao en Furukawa, 2012; Becker et al, 2013; Oesau et al, 2014) focussen op geometrische reconstructie en leveren geen semantische relaties zoals burens, deel van en richting (boven/onder) tussen de ruimten. Ten gevolge daarvan kunnen complexe bevestigingen niet worden uitgevoerd en zijn zij niet geschikt voor verkenning en navigatie.

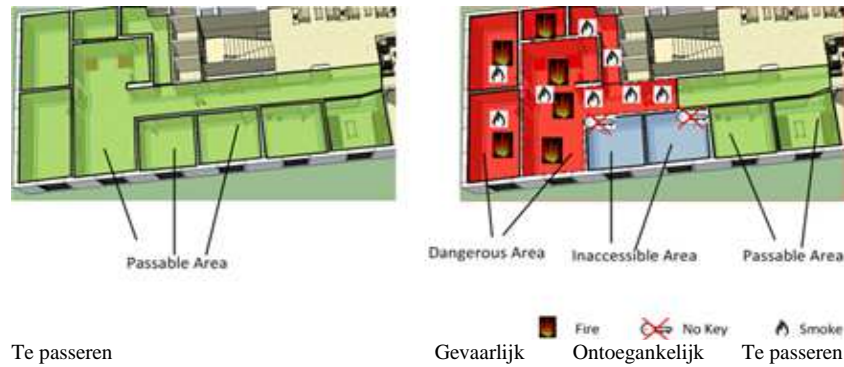
Onderzoek en ontwikkeling van routing is veelomvattend, maar relatief weinig onderzoek richt zich op echte 3D oplossingen. De meeste routebenaderingen gaan uit van begaanbare oppervlakken (2D, 2,5D), waardoor problemen ontstaan als de hoogte van de plafonds, deuren, ramen of tafels nodig is voor navigatie naar uitwegen in muren of plafonds. Verschillende modellen, die uitgaan van de echte 3D situatie, zijn voorgesteld, maar deze zijn meestal conceptueel. Slechts enkele zijn verbonden met de echte 3D situatie (e.g. Meijer et al, 2005). Omdat bekende wetenschappelijke benaderingen (Lee, 2004; Becker et al, 2008) zich meestal alleen richten op zeer generieke ruimtes (zoals kamers) en resulteren in ruwe netwerken zijn zij ongeschikt voor complexe analyses. Aanvullende algoritmen worden gebruikt om het netwerk met de locatie van deuren en ramen aan te vullen en om obstakels te vermijden. Zulke benaderingswijzen kunnen worden gebruikt voor een groot aantal navigatietoepassingen in het dagelijks leven als gebruikers voldoende tijd hebben om het interieur te bekijken en te onderzoeken. In noodsituaties schieten zij te kort.

## 2 De uitdaging

In dit project streven wij naar de ontwikkeling van een snelle en goedkope 3D modelleringsbenadering gebaseerd op discrete puntenwolken, die de principes van binnenhuisarchitectuurontwerpen en de menselijke perceptie gebruiken voor het identificeren van de voor navigatie beschikbare ruimten en netwerken.

De eerste uitdaging is 3D reconstructie van het interieur uit puntenwolken. Omdat puntenwolken een accurate representatie van de 3D geometrie van objecten leveren, zijn deze een geschikt hulpmiddel voor 3D reconstructie. De technologie om puntenwolken te verkrijgen maakt een snelle ontwikkeling door, waardoor het mogelijk wordt in de toekomst frequente en goedkope updates te realiseren. Echter, de bestaande procedures voor 3D reconstructie uit puntenwolken richten zich nauwelijks op semantiek. In dit project richten wij ons op ruimtes die nodig zijn voor navigatie en ondersteuning van de hulpverlening. Deze ruimtes moeten gemodelleerd worden via halfautomatische en automatische procedures, waardoor het mogelijk wordt regelmatig en goedkoop de inderomgeving, semantiek en topologische informatie te updaten. Deze procedures dienen robuust te zijn tegen mogelijke onnauwkeurigheid of incompleetheid van de data (bijv. daar waar het verkrijgen van data over het gebouw moeilijk is) en toepasbaar voor een variëteit aan binnenhuisarchitecturen.

Een tweede uitdaging is de ontwikkeling van de benodigde modellen en algoritmen om de optimale verkenning te ondersteunen. Ons project streeft naar een snelle en 'on-the-fly' ruimteverdeling en aggregatie, die automatische afleiding van de meest geschikte route via veilige gebieden in noodsituaties mogelijk maken (Figuur 1).



Figuur. 1: Voorbeeld van een onderverdeling van ruimte in te passeren, gevaarlijk en ontoegankelijk gebied in geval van een noodsituatie.

Voor de noodsituatie was alles te 'passeren' (links) en tijdens de noodsituatie is het te passeren gebied gekrompen tot twee kamers en halve gang (rechts).

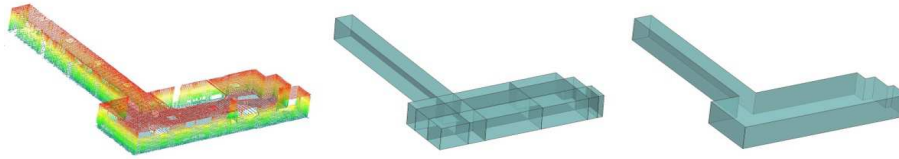
Het hoofddoel van dit project is het ontwikkelen van ruimtelijke gereedschappen en modellen voor gebouwen, die een geoptimaliseerde indoorrouting en -navigatie in noodsituaties mogelijk maken. Onze benadering is gebaseerd op grammatica. Dat is een concept dat de configuratie en de interrelaties binnenshuis verklaard. Om dit hoofddoel te bereiken zijn de volgende deeldoelen gedefinieerd:

- ontwikkel een vormgrammatica voor het (half-)automatische genereren van semantiek rijke 3D modellen voor binnenshuis uit grote puntenwolken;
- ontwikkel een ruimte onderverdeling/aggregatie grammatica om een netwerk te creëren en navigatieondersteuning te verlenen aan vele verschillende stakeholders, die zich in geval van nood moeten kunnen oriënteren en hulpmiddelen moeten kunnen vinden (uitgangen, kamers, indoorfaciliteiten, artikelen in kasten).

Binnenshuisarchitectuur kenmerkt zich door drie elementen: herhaling, regelmaat en creativiteit. Regelmatige structuren, zoals rechthoekige ruimten zijn herhaaldelijk binnenshuis te vinden, maar wel in vele verschillende opstellingen waarmee de architect zijn creativiteit toont. Een ontwerpprincipie dat deze elementen combineert en het architectonische werk toelicht is de vormgrammatica. Deze maakt het mogelijk dat verschillende ontwerpen gerealiseerd kunnen worden door het iteratief toepassen van de grammaticavoorschriften op simpele vormen (Stiny, 2008). Door het kiezen van diverse vormparameters en het variëren van de volgorde van de voorschriften kunnen veel verschillende creatieve ontwerpen gecreëerd worden. Vormparameters bevatten ook semantiek van ruimten, zoals hoogte van muren, plafonds, vloeren, deuren en ramen.

Voor het 3D modelleren van het interieur willen wij een parametrische vormgrammatica ontwerpen, die gelijk is aan de Palladian grammatica en gebruikt is om Palladian stijl binnenshuisontwerpen te omschrijven (Stiny en Mitchell, 1978). Het bestaat uit een beginvorm en een set van voorschriften die iteratief toegepast worden op de beginvorm om tussenliggende vormen en uiteindelijk de definitieve interieurs. We gebruiken een parameterkubus als eenheidsgrootte (beginvorm) omdat deze een 3D subruimte representeert. De voorschriften kunnen dan de grootte van de eenheidskubus veranderen, het in een bepaalde positie plaatsen en meervoudige rechthoeken samenvoegen om meer complexe interieurs te vormen. Figuur 2 geeft een voorbeeld van een eenvoudig interieur, dat gemodelleerd is door het plaatsen en samenvoegen van rechthoekige vormen. Het voordeel van vormgrammatica ten opzichte van gelijksoortige methoden, zoals bijv. de splitgrammatica die gebruikt

wordt door Becker et al (2013), is dat deze gebaseerd is op een architectonisch indoorontwerp en daardoor beter geschikt is voor het modelleren van indoorruimten. In aanvulling hierop maken vormparameters deel uit van de vereiste semantiek en kunnen deze direct gebruikt worden voor optimale verkenning.



Figuur. 2: Voorbeeld van een puntenwolk van een simpel interieur (links) gemodelleerd door het plaatsen van rechthoekige vormen (midden) en samengevoegd (rechts).

Wij zullen de vormgrammatica ontwikkelen en uitbreiden om het modelleren van complexe indooromgevingen tot het benodigde Level of Detail voor optimale routing en navigatie (Zlatanova et al, 2013) mogelijk te maken. Verder is het de bedoeling de grammatica uitbreiden met semantische voorschriften waardoor het mogelijk wordt semantiek te verwijderen en toe te voegen aan de gereconstrueerde ruimten. Elk object dat geen deel uitmaakt van de binnenhuisstructuur van het gebouw zal geclassificeerd worden als rommel en verder als verschillende typen meubilair. Er worden ook methoden ontwikkeld om de volgorde en parameters van de grammaticavoorschriften uit de puntenwolk te bestuderen. Onze eerdere experimenten tonen aan dat de distributie van punten in de puntenwolk informatie leveren over de positie van de belangrijkste structurele elementen en gebruikt kunnen worden voor het berekenen van de grammaticavoorschriften (Khoshelham en Diaz-Vilarino, 2014). Hoewel wij gebruikersinteractie willen beperken tot het leren van de grammatica van de data, zullen we bij de implementatie van de software gereedschappen ontwikkelen die gebruikersinteractie om het corrigeren of het modificeren van de procedure en de modellen toestaan en faciliteren.

Om navigatie en begeleiding mogelijk te maken moeten de modellen (geometrie en semantiek) verrijkt worden met connectiviteitsinformatie, dat wil zeggen dat er een netwerk gecreëerd zal moeten worden. Een benadering om een dergelijk netwerk tot stand te brengen is het toepassen van 'Poincaré Duality', waarbij elke knooppunt een ruimte representeert en een kant de (connectiviteit)link tussen de ruimten beschrijft. (Becker et al, 2008k, Lee, 2004 en Zlatanova, 2008). Dit concept is bepalend voor Indoor GML, een OGC kandidaat voor standaardisatie (<http://www.opengeospatia.org/projects/groups/indoorgmlswg>). Door het veranderen van de onderverdeling van de ruimte kunnen verschillende totale automatische netwerken worden gecreëerd. De semantiek en de eigenschappen die bij de geometrische ruimten behoren kunnen overgedragen worden naar de knooppunten en randen van het netwerk. Ruimte kan onderverdeeld worden door gebruik te maken van verschillende geometrische of semantische criteria of een combinatie van deze (Afyouni et al, 2012). Als voorbeeld geven Khan en Kolbe (2013) een methode voor een onderverdeling van de ruimten, die uitgaat van voortbeweging van mensen (lopen, rijden).



Figuur 3: Voorbeelden van een onderverdeling van de ruimte met gebruik van parameters van hulpmiddelen (links en in het midden) en het navigatieresultaat op een mobiele telefoon die het indirecte beeld van het gebouw weergeeft (rechts, Xu et al, 2013).

Wij zullen de gebruikersperceptie van de ruimte toepassen (Hall, 1969; Junstrand et al, 2001; Nakauchi en Simmons, 2002; Schefflen, 1975) en verder is 'aantrekkelijkheid' van de objecten van belang. We hebben een raamwerk ontwikkeld waar onderscheid gemaakt wordt tussen *agents* (mensen en menselijke proxies), die *acties* uitvoeren om *hulpmiddelen* te benaderen. De agents, acties en hulpmiddelen kunnen beïnvloed worden door *modificaties* (d.w.z. gebeurtenissen die de status van elke van de drie kunnen wijzigen). Modificaties kunnen noodsituaties, zoals vuur of rook, zijn (Zlatanova et al, 2013). Onze eerste onderzoek geeft aan dat hulpmiddelen een aantal karakteristieken kunnen bevatten (functie, aantrekkelijkheid, tijd, toegang, aantal agents, sociale afstand, etc.). Deze eigenschappen worden gebruikt om een ruimte rond de hulpmiddelen toe te kennen, die gebruikt kunnen worden voor het lokaliseren van agents, maar niet gebruikt kunnen worden om door andere agents te navigeren. Deze ruimten bakenen de mogelijke begaanbare ruimte (d.w.z. de ruimten die buiten de ruimten voor hulpmiddelen vallen zoals in Figuur 3 aangegeven). Door het ontwikkelen van een juiste grammatica om deze criteria te gebruiken kunnen de ruimten rond hulpmiddelen dynamisch worden gewijzigd. Zo kan bijvoorbeeld het gebied rond een koffiehok verschillende meters zijn gedurende de koffiepauze en slechts een meter als er geen koffiepauze is.

### 3 Beoogde resultaten

Het project zal resulteren in algoritmen en open-source softwaregereedschappen, die beschikbaar zullen zijn voor bedrijven die zich richten op data-acquisitie en softwareontwikkeling, inclusief de consortiumpartners, om 3D inoormodellen voor de eindgebruikers te produceren. Hierdoor worden inkomsten voor deze bedrijven gegenereerd. De eindgebruikers, d.w.z. de Bedrijfshulpverleners, de brandweer en de

veiligheidsregio's, zullen de indoormodellen gebruiken om de noodsituaties effectiever te managen. Het voordeel voor de maatschappij is dat er een veiligere leefomgeving binnenshuis ontstaat. Verder verwachten wij dat het gebruik van indoormodellen zich zal uitbreiden tot andere toepassingen, bijv. voor het analyseren van efficiënt energieverbruik en het structureel monitoren van de gezondheidssituatie in gebouwen. Wij verwachten binnen drie jaar een nieuwe methode en softwareprototype voor het vervaardigen van 3D indoormodellen uit puntenwolkendata te zullen ontwikkelen. Om de software te testen zullen wij 3D indoormodellen voor twee ziekenhuizen vervaardigen. Onze consortiumpartner iNowit zal ons ondersteunen door de nodige vergunningen te regelen en onze industriële partner CycloMedia zal de puntenwolkengegevens van de ziekenhuizen verzamelen. De hieruit voortvloeiende modellen zullen door de consortiumpartners worden gebruikt om de onderzoeksresultaten verder te promoten.

Op basis van onze indoormodelleringsresultaten, voortbordurend op Nederlandse initiatieven op het gebied van standaardisatie, zoals geo-registratie concepten, BGT (Basis Registratie Grootchalige Topografie), BAG (Basis Administratie Adressen en Gebouwen) binnen het geo-domein en CB-NL (de Nederlandse conceptenbibliotheek voor de gebouwde omgeving) in het BIM-domein, kunnen deze aangepast en uitgebreid worden voor hulpverlening en veiligheid in gebouwen. Met de veiligheidsregio's zullen wij een workshop organiseren voor gemeenten en standaardisatieorganisaties om aan te tonen op welke wijze onze resultaten de veiligheid in openbare gebouwen kunnen verbeteren. Tevens nemen wij contact op met Geonovum om de uitbreiding van bestaande standaarden voor indoormodellen verder te bespreken. Wij zullen de grammatica voor de onderverdeling van de ruimte tijdens OGC bijeenkomsten voor het voetlicht brengen met het verzoek deze in te brengen als een generieke benadering voor netwerk berekeningen in de IndoorGML standaard. Het project wordt uitgevoerd in de periode 2015-2019 en wordt gesubsidieerd door het STW/NWO Programma Maps for Society.

## Referenties

- Afyouni, I., C. Ray, and C. Claramunt, 2012, Spatial models for context-aware indoor navigation systems: A survey, *Journal of Spatial Information Science*, Number 4 (2012), pp. 85–123
- Becker, S., Peter, M., Fritsch, D., Philipp, D., Baier, P., Dibak, C., 2013. Combined Grammar for the Modeling of Building Interiors. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* II-4/W1(1-6).
- Becker, T., C. Nagel, T.H. Kolbe, 2008, A Multilayered Space-Event Model for Navigation in Indoor Spaces. In: Lee, Zlatanova (eds.). *3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 2009, Part II, 61-77.
- Budroni, A., Boehm, J., 2010. Automated 3D reconstruction of interiors from point clouds. *International Journal of Architectural Computing* 8(1), 55-73.
- Díaz-Vilariño, L., Lagüela, S., Armesto, J., Arias, P., 2013. Semantic as-built 3d models including shades for the evaluation of solar influence on buildings. *Solar Energy* 92(0), 269-279.
- Díaz-Vilariño, L., Martínez-Sánchez, J., Lagüela, S., Armesto, J., Khoshelham, K., 2014. Door recognition in cluttered building interiors using imagery and Lidar data. *ISPRS Technical Commission V Symposium "Close-range imaging, ranging and applications"*, Riva del Garda, Italy.
- Gröger, G., Plümer, L., 2010. Derivation of 3D Indoor Models by Grammars for Route Planning. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 2010(3), 193-210.
- Hall, E. T. (1969). *The hidden dimension* (Vol. 1990). New York: Anchor Books.

- Hijazi, I., M. Ehlers and S. Zlatanova, 2012, NIBU: a new approach to representing and analyzing interior utility networks within 3D geo-information systems, In: *International Journal of Digital Earth*, Vol. 5. Issue 1, pp. 22-4
- Isikdag, U., S. Zlatanova and J. Underwood, 2013, A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements, *Computers, Environment and Urban Systems*, Volume 4, September 2013, pp. 112-123
- Jenke, P., Huhle, B., Straßer, W., 2009. Statistical reconstruction of indoor scenes, *Proc. WSCG*.
- Junestrand, S., Keijer, U., & Tollmar, K. (2001). Private and public digital domestic spaces. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(5), 753-778.
- Khoshelham, K. and Oude Elberink, S.J. (2012) Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. In: *Sensors: journal on the science and technology of sensors and biosensors : open access*, 12 (2012)2 pp. 1437-1454.
- Lee, J. , 2004, A spatial access-oriented implementation of a 3-D GIS topological data model for urban entities. *Geoinformatica*, 8 (3), pp. 237–264
- Lee, J. and S. Zlatanova, 2008, A 3D data model and topological analyses for emergency response in urban areas, In: Zlatanova&Li (Eds.), *Geospatial information technology for emergency response (ISPRS book series)*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 143-168.
- Liu, L. and S. Zlatanova, 2013, A two-level path-finding for indoor navigation, In: S. Zlatanova, R. Peters, A. Dilo and H. Scholten (Eds.); *Intelligent systems for crisis response, LNG&C*, Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp. 31-42
- Khan, A.A. and T. H. Kolbe, 2013, Subspacing based on connected opening paces and fro different locomotion types using geometric and graph based representations in multi-layered space event model (MLSEM), *Annals of ISPRS*, Volume II-2/W1, *ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop*, 27 – 29 November 2013, Istanbul, Turkey, pp. 173-185
- Khoshelham, K., Díaz-Vilariño, L., 2014. 3D modeling of interior spaces: learning the language of indoor architecture. *ISPRS Technical Commission V Symposium "Close-range imaging, ranging and applications"*, Riva del Garda, Italy.
- Meijers, M., S. Zlatanova and N. Pfeifer, 2005, 3D geo-information indoors: structuring for evacuation, In: *Proceedings of Next generation 3D city models*, 21-22 June, Bonn, Germany, 6 p.
- Moreno, A., Á. Segura, S. Zlatanova, J. Posada and A. García-Alonso, 2012, Benefit of the integration of semantic 3D models in a fire-fighting VR simulator, *Applied Geomatics*, September 2012, Volume 4, Issue 3, pp. 143-153
- Mura, C., Mattausch, O., Villanueva, A. J., Gobbetti, E., Pajarola R., 2013. Robust Reconstruction of Interior Building Structures with Multiple Rooms under Clutter and Occlusions. In *Proc. 13th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics*, November 2013.
- Nakauchi, Y., & Simmons, R. (2002). A social robot that stands in line. *Autonomous Robots*, 12(3), 313-324
- Oesau, S., Lafarge, F., Alliez, P., 2014. Indoor scene reconstruction using feature sensitive primitive extraction and graph-cut. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 90(0), 68-82.
- Pu, S. and Vosselman, G. (2009) Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (2009)6 pp. 575-584.
- Pu, S. and S. Zlatanova, 2005, Evacuation route calculation of inner buildings, In: van Oosterom, Zlatanova & Fendel (Eds.), *Geo-information for disaster management*, Springer Verlag, Heidelberg, pp. 1143-1161



- Sanchez, V., Zakhor, A., 2012. Planar 3D modeling of building interiors from point cloud data, 19th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Orlando, FL, pp. 1777-1780.
- Shapiro, V., Vossler, D.L., 1991. Construction and optimization of CSG representations. *Comput. Aided Des.* 23(1), 4-20.
- Schefflen, A. E. (1975). Micro-territories in human interaction. *Organization of Behavior in Face-to-Face Interaction*, Mouton Publishers, Den Hague, 159-173
- Stiny, G., 2008. *Shape: talking about seeing and doing*. The MIT Press.
- Stiny, G., Mitchell, W.J., 1978. The Palladian grammar. *Environment and Planning B* 5(1), 5-18.
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., Lytle, A., 2010. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction* 19(7), 829-843.
- Valero, E., Adán, A., Cerrada, C., 2012. Automatic Method for Building Indoor Boundary Models from Dense Point Clouds Collected by Laser Scanners. *Sensors* 12(12), 16099-16115.
- Vosselman, G. and Maas, H.-G. (2010) Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing, ISBN 978-1904445-87-6, 320 p.
- Wang, Z. and S. Zlatanova, 2013, Taxonomy of Navigation for First Responders, In J. Krisp (Eds.) *Progress in Location-Based Services*, LNG&C, Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp. 297-315
- Xiao, J., Furukawa, Y., 2012. Reconstructing the world's museums. Proceedings of the 12th European conference on Computer Vision - Volume Part I, Florence, Italy.
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., Huber, D., 2013. Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction* 31(0), 325-337.
- Xu, W., M. Kruminaitė, B. Onrust, H. Liu, Q. Xiong, and S. Zlatanova, 2013, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-4/W4, 2013. 51 – 55 December 2013, Cape Town, South Africa
- Zlatanova, S., L. Liu, and G. Sithole, 2013. A Conceptual Framework of Space Subdivision for Indoor Navigation. ISA '13 Proceedings of the Fifth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness, ACM New York, NY, USA. pp. 44-48

