

Formalismes, méthodes et outils pour l'analyse morphologique à grande échelle des formes du patrimoine architectural*

Livio De Luca

Résumé

L'architecture historique est probablement l'un des domaines les plus appropriés pour comprendre dans quelle mesure la production culturelle des différentes régions d'un territoire participe à la construction d'une identité commune. En raison de leur nature distincte, ainsi que de leur diffusion croissante, les technologies numériques ouvrent aujourd'hui de nouvelles opportunités pour l'analyse croisée d'une grande quantité d'objets, loin dans l'espace mais proches dans les caractères (typologies, styles, règles de composition, etc.). Cette opportunité pourrait stimuler la création de cadres scientifiques innovants pour améliorer l'étude historique, artistique et technique des liens entre les formes architecturales et les interactions sociales dans l'espace et le temps. Cette question réunit l'étude des natures sémantiques et géométriques des formes architecturales avec la conception et le développement de systèmes d'information capables d'aborder la recherche expérimentale sur la variabilité des formes. Cet article présente les principales lignes de recherche que le laboratoire MAP compte mener dans les cinq prochaines années autour de cet enjeu.

Introduction

Au cours des dernières années, différents projets ont porté sur le développement de méthodes, d'outils et de technologies pour la création de bibliothèques numériques partagées pour le patrimoine culturel (EPOCH [1], 3D-COFORM [2], 3D-ICONS [3], ...). En dépit des avancées technologiques importantes concernant le développement de nouvelles solutions pour la numérisation, le traitement et l'intégration des données sur les artefacts du patrimoine, très peu d'expériences se sont concentrées sur l'intégration de ces nouvelles technologies dans des méthodologies novatrices pour promouvoir des initiatives de recherche à fort impact, notamment pour l'étude du patrimoine architectural à grande échelle.

L'architecture historique est probablement l'un des domaines les plus appropriés pour comprendre dans quelle mesure la production culturelle des différentes régions d'un territoire participe à la construction d'une identité commune. En raison de leur nature distincte, ainsi que de leur diffusion croissante, les technologies numériques ouvrent aujourd'hui de nouvelles opportunités pour l'analyse croisée d'une grande quantité d'artefacts loin dans l'espace mais proches dans les caractères (typologies, styles, règles de composition, etc.). Cette opportunité pourrait stimuler la création de cadres scientifiques innovants pour améliorer l'étude historique, artistique et

* Articolo a invito per inquadramento del tema del focus, non sottoposto a revisione anonima, pubblicato con responsabilità della direzione.

technique des liens entre les formes architecturales et les interactions sociales dans l'espace et le temps.

Cette question réunit l'étude des natures sémantiques et géométriques des formes architecturales avec la conception et le développement de systèmes d'information capables d'aborder la recherche expérimentale sur la variabilité des formes. Cet article présente les principales lignes de recherche que le laboratoire MAP [4] compte mener dans les cinq prochaines années autour de cet enjeu.

Etat de l'art

Au cours de la dernière décennie, l'intérêt pour les technologies émergentes a inspiré un grand nombre de projets de documentation numérique, qui ont démontré le potentiel de la représentation numérique des artefacts du patrimoine à différentes échelles [Levoy et al. 2000; Gruen, Remondino, Zhang 2004; El-Hakim et al. 2008]. En particulier, l'utilisation de technologies de numérisation 3D dans le cadre de programmes de documentation sur le patrimoine culturel a permis l'apparition d'une nouvelle génération de supports graphiques, utiles à des objectifs multiples: analyse archéologique, suivi des phénomènes de détérioration, diffusion et représentation des connaissances historiques, et ainsi de suite. La création de représentations numériques d'artefacts du patrimoine nécessite des méthodes et des outils capables d'acquérir et de reproduire numériquement les plus fins caractères visuels et géométriques.

La reconstruction 3D basée sur la réalité (reality-based 3D reconstruction) est maintenant considérée comme le champ de recherche technologique basée sur l'utilisation de capteurs [Vosselman, Maas 2010; Remondino, El-Hakim 2006]. Grâce aux progrès de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur, les cinq dernières années ont été caractérisées par une impressionnante croissance des approches de modélisation géométrique basées sur l'image capables de reconstruire automatiquement des nuages de points 3D et des maillages denses à partir d'un ensemble de photographies non orientées [Vergauwen, Van Gool 2006; Vu et al., 2009; Pierrot-Deseilligny, Clery 2009]. Ces solutions, basées sur des méthodologies flexibles d'étalonnage et d'orientation de caméras, facilitent la production de représentations 3D par des non-experts (sans connaissance sur les méthodes d'acquisition photogrammétrique et en utilisant des appareils numériques communs). Notre contribution dans ce domaine concerne l'harmonisation

de méthodes de lecture morphologique [De Luca 2009; De Luca 2011] dans des protocoles d'acquisition et de traitement spécialisés [Pierrot-Deseilligny, De Luca, Remondino 2012] pour la réalisation d'enquêtes numériques géométriquement précises selon les exigences proposées aux pratiques de documentation du patrimoine architectural. Cependant, au-delà de la génération de modèles 3D détaillés et colorés, la création d'une représentation géométrique intelligible des formes architecturales est un problème beaucoup plus complexe. Les recherches qui se sont concentrées sur cette question sont généralement basées sur l'étude des grammaires de formes [Havemann et al. 2004; Mueller et al. 2006]. Notre principale contribution dans ce domaine concerne la définition d'un formalisme générique pour la description sémantico-géométrique d'éléments architecturaux d'ordre classique [De Luca, Véron, Florenzano 2007]. Ce formalisme peut être utilisé pour générer des bibliothèques de modèles architecturaux paramétriques (tels que des bases, des balustres, des colonnes, etc.) ainsi que pour mesurer l'écart entre les modèles théoriques (formalisés à partir de traités d'architecture historique) et les objets réels.

Mais, l'étude de la nature morphologique des formes du patrimoine architectural ouvre une question plus vaste: le raisonnement sur la forme de l'objet implique fréquemment le raisonnement sur l'identification de métriques de similarité à mobiliser à des fins de comparaison, d'interprétation et de classification. La mesure de la similarité entre divers objets numériques est depuis plusieurs années une zone de recherche active, à partir du développement des techniques d'analyse d'image par la vision par ordinateur jusqu'aux approches plus récentes d'analyse de modèles 3D par la géométrie algorithmique. Ces méthodes fournissent aujourd'hui de bons résultats pour les applications d'indexation d'objets multimédia [Tangelder, Veltkamp 2008], et leur application au domaine du patrimoine culturel [Biasotti et al. 2015]. Cependant, ce champ émergent ouvre la voie à des enjeux bien plus intéressants pour relier l'analyse et la classification de grandes collections de formes au domaine plus vaste de l'analyse spatiale à grande échelle.

En effet, au-delà des représentations géométriques, une grande quantité de données hétérogènes est généralement collectée, organisée et analysée pour l'étude de l'architecture historique. Les données proviennent le plus souvent de différentes disciplines (architecture, archéologie, histoire, sciences de la conservation, etc.) et sont basées sur différents supports (iconographie, cartes géographiques, manuscrits, etc.). Au-delà de la représentation numérique de la géométrie architecturale (qui permet aujourd'hui la

gestion des données quantitatives), la structuration des descriptions qualitatives est un problème de recherche beaucoup plus important, notamment parce qu'il fait face aux problématiques d'interprétation pluridisciplinaire. De nombreuses méthodologies et technologies ont été développées dans les dernières années pour améliorer la gestion des contenus numériques hétérogènes, en s'appuyant principalement sur des structures formelles (thésaurii, ontologies, etc.) capables de décrire de façon univoque des éléments d'ordre conceptuel implicites et explicites (ainsi que leurs interrelations) [Doerr 2002] mobilisés dans la documentation des artefacts patrimoniaux. Certains travaux ont porté sur des méthodes permettant de lier des tags sémantiques (termes de vocabulaire et concepts structurés) à des modèles 3D [Havemann, Fellner 2008], ou à une description hiérarchique de schémas de composition architecturale [Manferdini et al. 2008]. De plus, l'analyse conjointe des données spatiales et temporelles est devenue d'une importance particulière pour la l'étude des transformations des objets, pour la distribution temporelle des événements catégorisés, ainsi que pour la répartition des données spatiotemporelles [Kapler, Wright 2005].

Nos contributions dans ce domaine ont porté sur la conception et le développement de systèmes d'informations 3D pour structurer des données hétérogènes autour de la description morphologique des bâtiments du patrimoine architectural. En combinant la structuration sémantique des descriptions morphologiques avec l'interconnexion de représentations multiples, notre approche [De Luca et al. 2013] a révélé le potentiel de la représentation 3D enrichie sémantiquement pour plusieurs applications: la gestion de modèles géométriques sémantiques dans les cadres d'annotation 2D/3D [Stefani et al. 2013]; la spatialisation d'annotations sémantiques pour décrire l'état de conservation [Stefani et al. 2014]; la représentation des transformations morphologiques au travers de modèles géométriques dynamiques [Stefani et al. 2009]; l'explicitation de la relation sémantique entre les dimensions conceptuelles et physiques d'un objet patrimonial [De Luca et al. 2013; Carboni, De Luca 2016].

Enjeux scientifiques et technologiques

Compte tenu de ce panorama d'enjeux scientifiques et technologiques apparemment disséminés, l'objectif principal de notre programme de recherche pour les années à

venir consiste à introduire des moyens de rupture pour étudier les expertises techniques et les influences stylistiques dans l'histoire de l'architecture en fournissant des outils et des méthodes innovantes pour l'observation dimensionnée, l'analyse morphologique et la classification des formes architecturales au sein de campagnes d'investigation participatives à grande échelle. Comme l'illustre l'état de l'art, ce programme ambitieux intègre plusieurs avancées potentielles liées aux sciences historiques et informatiques dans un cadre de recherche interdisciplinaire original. On liste ici les trois principales questions ouvertes. Tout d'abord, dans l'architecture historique, les formes peuvent être considérées comme un marqueur essentiel des tendances. Comprendre les dépendances entre ces tendances et leur évolution au fil du temps exige des analyses rigoureuses (basées sur des approches cumulatives) de la façon dont les formes varient selon les territoires et les périodes. L'exploration d'une variabilité si complexe des formes requiert une stratégie de classification visant à étudier les similitudes, les modèles et les exceptions sémantiques et géométriques. Cela comprend l'interconnexion de deux niveaux de description. Au niveau de la classe, les formes architecturales peuvent avoir une définition invariable (un terme de vocabulaire indiquant leur rôle dans une structure globale, par exemple: une colonne) généralement codifiée par le savoir historique. Au niveau de l'instance, les formes ont des caractéristiques complexes (géométrie, aspect visuel, matériaux, ...) qui les distinguent clairement (par exemple: une colonne d'un bâtiment existant, construit à un endroit et à une période particuliers). Un premier défi est alors illustré par la nécessité d'établir un cadre rigoureux de documentation et d'analyse visant à explorer la variabilité des formes architecturales appartenant au même concept architectural.

La diffusion croissante d'outils de modélisation basés sur l'image, flexibles et faciles à utiliser, permet d'envisager l'opportunité de construire, de manière collaborative, une grande bibliothèque numérique de modèles d'architecture 3D basés sur des acquisitions d'objets réels. Mais si la mise en œuvre d'une stratégie de documentation participative pour la collecte massive de représentations numériques de formes architecturales devient un objectif réaliste d'un point de vue technologique, la masse croissante de nuages de points non interprétés et de modèles 3D souligne aujourd'hui un besoin essentiel de mettre au point des nouvelles méthodologies pour faciliter le traitement, le tri et l'analyse des données à l'égard des enjeux de connaissance

historique. En effet, au-delà des aspects de traitement de la géométrie, l'analyse de la sémantique des formes nécessite une compréhension approfondie et l'identification des descripteurs morphologiques pertinents capables d'ajouter des valeurs d'intelligibilité à des masses complexes (et non éloquentes) de représentations géométriques. Cette question fait émerger un deuxième défi représenté par le besoin de concevoir une nouvelle génération d'instruments au service des analystes (historiens, archéologues, architectes, ...) capables d'automatiser de lourdes corrélations géométriques et visuelles.

Comme plusieurs efforts de recherche historique l'ont démontré, le vocabulaire architectural est probablement l'outil d'analyse le plus approprié pour accompagner la lecture interprétative des compositions structurales ainsi que des grammaires stylistiques. Mais, même si chaque sous-communauté de l'histoire de l'architecture (y compris l'aire de l'archéologie) a réalisé des travaux importants pour définir des thésaurii spécialisés selon des périodes ou des régions géographiques particulières, la terminologie maintient encore beaucoup d'ambiguïtés, spécialement en ce qui concerne l'étude des tendances transnationales à grande échelle et sur des longues périodes. Des formes semblables peuvent avoir des noms différents dans différentes langues, mais des différences morphologiques mineures. Le niveau actuel des détails géométriques et visuels fournis par la numérisation 3D, ainsi que le potentiel de leur analyse comparative et de leur corrélation sémantique, ouvre des nouveaux enjeux de classification encore inexplorés, à étudier à l'intersection de la terminologie, de la morphologie et de la représentation des connaissances. En conséquence, le troisième défi consiste à fournir des nouvelles métriques orientées sur l'analyse de la forme capables d'augmenter notre capacité à découvrir des similarités, des modèles et des exceptions au sein d'enquêtes à grande échelle.

Ces trois enjeux recouvrent des outils, des méthodes, des modèles, dispersés, relevant scientifiquement de plusieurs champs disciplinaires. Leur intégration au sein d'approches transversales est certainement le caractère distinctif de notre programme qui s'inscrit au carrefour de tendances qui dessinent le paysage contemporain des technologies et, plus globalement, des humanités numériques.

Tout d'abord, la démocratisation et la diffusion des moyens de numérisation, aujourd'hui même intégrables au sein de plateformes informatiques partagées – cloud

computing – qui permet d'envisager concrètement des démarches de relevé et d'annotation sémantique participative à très grande échelle.

Ensuite, la récente évolution des approches d'analyse et de reconnaissance visuelle, stimulées par les avancées impressionnantes de la vision par ordinateur et du deep learning (apprentissage profond) en matière d'analyse et corrélation de grandes masses de données, qui pourrait jouer un rôle dans le renouvellement des méthodologies d'analyse et classification des formes (histoire de l'art, archéologie, conservation, ...) au travers de l'identification de nouveaux modèles de signature morphologique mêlant descripteurs géométriques, visuels et sémantiques.

Enfin, les parcours d'harmonisation en cours dans le champ des systèmes d'informations patrimoniales, notamment en ce qui concerne la construction d'ontologies de domaine, qui permet aujourd'hui de réunifier des informations hétérogènes et dispersées tout en déplaçant le centre de gravité des approches de documentation, d'une description centrée sur «l'objet patrimonial» à une description plus exhaustive de la «pluralité de regards» (scientifiques, experts, professionnels, conservateurs, administrateurs, ...) qu'enrichit jour après jour la compréhension collective et la transmission de la mémoire de ces objets. Ce dernier aspect constitue également une occasion sans précédent d'explorer, par l'analyse et la corrélation de masses d'annotations et de liens sémantiques, les mécanismes au travers desquels les communautés (voire les sociétés) construisent la valeur patrimoniale de ces objets.

En considérant notre contribution scientifique au service des sciences humaines et sociales à travers la conception et le développement de technologies numériques, et pas le contraire, notre objectif consiste à introduire une nouvelle génération de formalismes (généralisables), de méthodes (reproductibles) et d'outils (réutilisables) couplant géométrie algorithmique et connaissances historiques pour l'analyse morphologique massive et à grande échelle des formes.

Un cadre d'acquisition et d'enrichissement sémantique collaboratif

Tout d'abord, nous comptons introduire (et diffuser) une contribution rationnelle pour résoudre le problème actuel de surcharge d'information. La masse croissante de données 3D non interprétées appelle le développement

de protocoles innovants d'acquisition-traitement, afin d'aider à l'analyse et au tri des données par l'annotation sémantique spatialisée. Un protocole innovant [Manuel et al. 2014], qui relie l'acquisition d'images (et leur annotation sémantique) sur site au traitement géométrique à distance (basé sur technologies cloud), introduit des nouvelles exploitations de la photomodélisation pour une analyse comparative et collaborative de grandes collections de formes. Il s'agit de la plateforme "aioli" [5], que notre laboratoire a récemment développé et mise à disposition des premiers utilisateurs beta dans le cadre de partenariats scientifiques.

C'est donc à partir de ce résultat que l'on se concentrera sur la définition d'une méthodologie (et sur le développement d'une batterie d'outils informatiques opérationnels) pour numériser des masses de formes architecturales à des fins d'analyse morphologique et de classification via des stratégies de crowdsourcing (collecte participative). L'analyse préliminaire des collections de formes sélectionnées, combinée à la recherche documentaire, rassemblera également des sources importantes pour le développement de méthodes d'annotations sémantiques (termes de vocabulaire, ontologies existantes), ainsi que pour l'association des signatures morphologiques à des marqueurs spatio-temporels. Nous comptons réaliser ce travail via l'établissement de conventions de coopérations avec des consortia ayant déjà abordé des importants travaux d'inventaire au sein de réseaux internationaux (European Science Foundation (EFS) PALATIUM [6], Mapping Gothic France [7], Centro Internazionale di Studi Andrea Palladio [8], ...).

Modélisation des connaissances pilotée par la corrélation de signatures morphologiques

Le cadre informationnel introduit par notre approche de collecte de données et d'enrichissement sémantique fusionne les informations spatiales, géométriques et visuelles contenues dans une masse de photo-modèles (nuages de points et surfaces 3D, photographies orientées, paramètres dimensionnels, textures, etc.) avec un ensemble de termes de vocabulaire structurés au sein d'une ontologie de domaine. Ce cadre ouvre des chemins à explorer qui pourraient questionner les méthodes d'annotation sémantique et de classification actuelles (aujourd'hui principalement basées sur des attributs qualitatifs) en introduisant des para-

mètres morphologiques pertinents (calculés par corrélation d'attributs géométriques de détail) dont la richesse informationnelle n'a pas encore été explorée dans ce domaine. L'inclusion d'attributs qualitatifs et quantitatifs permettrait en effet de construire une bibliothèque étendue et sémantiquement structurée d'artefacts numérisés tout en isolant, structurant et illustrant directement les concepts architecturaux au sein d'un échafaudage terminologique. Cependant, même si la littérature scientifique de l'informatique graphique a produit récemment de nombreux travaux mettant en évidence le potentiel de l'annotation sémantique des modèles 3D, l'application des caractéristiques géométriques à la description d'une forme architecturale (en particulier lorsqu'on observe des artefacts patrimoniaux) requiert une analyse approfondie de la relation entre les notions de multiplicité et d'intelligibilité. Cette question traverse deux relations interconnectées: d'un côté, celle entre un modèle générique (concept architectural déjà décrit dans la littérature historique) et une collection connexe d'instances (objets architecturaux réels), d'autre part, la relation entre la géométrie (caractéristiques morphologiques) et la sémantique (connaissance préalable). En continuité de nos contributions antérieures sur ce sujet [Lo Buglio, Lardinois, De Luca 2015; Pamart, Lo Buglio, De Luca 2015], un résultat principal attendu serait d'introduire des scénarii d'annotation et de corrélation où la sémantique puisse être exploitée dans les phases de pré-traitement (en se basant sur la connaissance a priori, approche descendante) et/ou dans les phases de post-traitement (extraction de caractères morphologiques similaires, approche ascendante), par le développement d'outils pour aider l'analyse et l'interprétation humaine par l'automatisation des comparaisons géométriques très lourdes.

Une plate-forme collaborative pour la recherche historique à grande échelle

Les artefacts patrimoniaux sont le plus souvent le résultat de stratifications temporelles, des changements, d'ajouts et des transformations. Cet aspect pose des problèmes importants concernant l'annotation de la forme, car une bonne approche d'observation et d'interprétation doit combiner plusieurs couches sémantiques se chevauchant et se rapportant aux multiples états du même objet, y compris les sources iconographiques qui témoignent de ses transformations au fil du temps. En effet, la mise en œuvre

des méthodes d'annotation/classification envisagées par ce projet nécessite une corrélation profonde de données hétérogènes pouvant être utilisées pour qualifier des formes architecturales. Dans la tentative d'intégrer (d'un point de vue conceptuel et méthodologique) la phase d'acquisition des données spatiales avec celle de leur structuration sémantique, l'idée originale de notre approche concerne la volonté d'établir une relation entre des données hétérogènes à l'intérieur d'une dimension géométrico-spatiale. Cela signifie qu'au lieu d'utiliser des liens de type "entités-relation" pour ancrer des formes architecturales et des informations associées, on utilise des fonctions de projection géométrique (formalisation des paramètres d'orientation spatiale des sources iconographiques) comme un canal de propagation d'informations pertinentes (attributs sémantiques, marqueurs spatiotemporels, signatures morphologiques) entre toutes les échelles de représentation (du détail architectural au territoire). En outre, en traversant l'analyse morphologique des formes à l'échelle architecturale (ainsi qu'à l'échelle du détail architectonique), par une observation des répartitions spatio-temporelles de ces formes à l'échelle géographique, notre approche vise à introduire des mécanismes d'analyse multi-critères et multi-échelles exploratoires. Les résultats de cette phase de notre programme de travail conduiront à la construction d'une plate-forme ouverte, inscrite dans la continuité des

efforts de développement de technologies cloud conduits actuellement par notre équipe, destinée à des enquêtes historiques participatives à grande échelle.

Conclusions

En établissant un cadre de documentation et d'analyse rigoureux, basé sur des outils et méthodes innovantes aidant l'analyse morphologique par l'automatisation des corrélations géométriques lourdes, notre ambition consiste à introduire des nouvelles métriques "orientées forme" pour étudier le patrimoine architectural. Notre programme de recherche pour les années à venir ne suit pas la simple logique du déploiement de solutions technologiques pour la numérisation, le traitement et la diffusion de l'information culturelle mais s'articule autour de l'identification du véritable potentiel de développement des technologies numériques pour l'étude de l'architecture historique. C'est pourquoi notre approche intègre, par une méthodologie de travail interdisciplinaire, des avancées scientifiques liées aux domaines des sciences historiques, de l'ingénierie des connaissances, de la vision par ordinateur et de la géométrie algorithmique, visant, à terme, à la construction d'une infrastructure logicielle et humaine favorisant l'émergence d'approches cumulatives pour l'étude du patrimoine bâti.

Notes

[1] EPOCH Network of Excellence <www.epoch-net.org> (consulté le 20 juillet 2017).

[2] 3D-COFORM Project, Tools and expertise for 3D collection formation <www.3d-coform.eu> (consulté le 20 juillet 2017).

[3] 3D-ICONS Project, 3D Digitisation of Icons of European Architectural and Archaeological Heritage <www.3dicons-project.eu> (consulté le 20 juillet 2017).

[4] MAP, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine. Unité mixte du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et du MCC (Ministère de la Culture et de la Communication). Pour plus d'informations: <www.map.cnrs.fr> (consulté le 20 juillet 2017).

[5] aioli - une plateforme d'annotation sémantique 3D pour la documentation collaborative d'objets patrimoniaux. Plateforme cloud développée au sein du laboratoire MAP. Pour plus d'informations: <www.aioli.cloud> (consulté le 20 juillet 2017).

[6] European Science Foundation (EFS) PALATIUM <<http://www.cour-residences.eu>> (consulté le 20 juillet 2017).

[7] Mapping Gothic France <<http://mappinggothic.org>> (consulté le 20 juillet 2017).

[8] Centro Internazionale di Studi Andrea Palladio <<http://www.palladio-museum.org>> (consulté le 20 juillet 2017).

Auteur

Livio De Luca, CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), laboratoire MAP (Modèles et simulations pour l'architecture et le Patrimoine), livio.deluca@map.archi.fr

Références

- Biasotti, S. et al. (2015). 3D Artifacts Similarity Based on the Concurrent Evaluation of Heterogeneous Properties. En *Journal of Computing and Cultural Heritage*, vol. 8, n. 4.
- Carboni, N., De Luca, L. (2016). Towards a conceptual foundation for documenting tangible and intangible elements of a cultural object. En *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 3, n. 4. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2016.11.001>> (consulté le 20 juillet 2017).
- De Luca, L. (2009). *La photomodélisation architecturale. Relevé, modélisation, représentation d'édifices à partir de photographies*. Paris: Editions Eyrolles.
- De Luca, L. (2011). *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- De Luca, L., Véron, P., Florenzano, M. (2007). A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements. En *The Visual Computer*, vol. 23, n. 3, pp. 181-205.
- De Luca, L. et al. (2011). A semantic-based platform for the digital analysis of the architectural heritage. En *Computers & Graphics*, vol. 35, n. 2, pp. 227-241. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2010.11.009>> (consulté le 20 juillet 2017).
- De Luca, L. et al. (2013). When script engravings reveal a semantic link between the conceptual and the spatial dimensions of a monument: the case of the Tomb of Emperor Qianlong. En *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, vol. 1.
- Doerr, M. (2002). The CIDOC CRM – an ontological approach to semantic interoperability of metadata. En *AI Magazine*, Special Issue on Ontologies.
- El-Hakim, S. et al. (2008). Using terrestrial laser scanning and digital images for the 3d modelling of the Erechteion, Acropolis of Athens. En *Proceedings of Digital Media and its Applications in Cultural Heritage (DMACH)*, 2008, Amman: CSAAR Press, pp. 3-16.
- Gruen, A., Remondino, F., Zhang, L. (2004). Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan. En *The Photogrammetric Record*, vol. 19, n. 107, pp. 177-199.
- Havemann, S., Fellner, D. (2004). Generative Parametric Design of Gothic Window Tracery. En *Proceedings of VAST 2004*. Aire-la-Ville: Eurographics Association.
- Havemann, S. et al. (2008). The Arrigo showcase reloaded – towards a sustainable link between 3D and semantics. En *Proceedings of VAST 2008*.
- Kapler, T., Wright, W. (2005). GeoTime information visualization. En *Information Visualization*, n. 4.
- Levoy, M. et al. (2000). The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. En *Proceedings of SIGGRAPH Computer Graphics*, New York: ACM, pp. 131-144.
- Lo Buglio, D., Lardinois, V., De Luca, L. (2015). What do thirty-one columns tell about a 'theoretical' thirty-second? En *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, vol. 8, n. 1. <<http://dx.doi.org/10.1145/2700425>> (consulté le 20 juillet 2017).
- Manferdini, A. et al. (2008). 3D modeling and semantic classification of archaeological finds for management and visualization in 3D archaeological databases. En *Proceedings of the 14th international conference on virtual systems and multiMedia (VSMM)*.
- Manuel, A. et al. (2014). A hybrid approach for the semantic annotation of spatially oriented images. En *IJHDE (International Journal of Heritage in the Digital Era)*, vol. 3, n. 2, pp. 305-320. <<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/2047-4970.3.2.305>> (consulté le 20 juillet 2017).
- Mueller, P. et al. (2006). Procedural modeling of building. En *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006*, vol. 25, n. 3, pp. 614-623.
- Pamart, A., Lo Buglio, D., De Luca, L. (2015). Morphological analysis of shape semantics from curvature-based signatures. En *Proceedings of 2nd IEEE / Eurographics International Congress on Digital Heritage*, vol. 2. Assessment of Methodologies and Tools in DH2015.
- Pierrot-Deseilligny, M., Clery, I. (2009). APERO, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. En *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (5/W16).
- Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., Remondino, F. (2012). Automated Image-Based Procedures for Accurate Artifacts 3D Modeling and Orthoimage. En *Journal of Geoinformatics FCE CTU*, vol. 6. <<https://doi.org/10.14311/gi.6.36>> (consulté le 20 juillet 2017).
- Remondino, F., El-Hakim, S. (2006). Image-based 3d modelling: a review. En *The Photogrammetric Record*, vol. 21, n. 115, pp. 269-291.
- Stefani, C. et al. (2009). Time indeterminacy and spatio-temporal building transformations. En *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 4, n. 1.
- Stefani, C. et al. (2013). A web platform for the consultation of spatialized and semantically enriched iconographic sources on cultural heritage buildings. En *International Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, vol. 6, n. 3. <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2499934>> (consulté le 20 juillet 2017).
- Stefani, C. et al. (2014). Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform. En *International Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, n. 1, pp. 1-9. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2013.01.011>> (consulté le 20 juillet 2017).

Tangelder, J-W., Veltkamp, R. A survey of content based 3D shape retrieval methods. En *Multimedia Tools Applications*, vol. 39, n. 3.

Vergauwen, M., Van Gool, L. (2006). Web-Based 3D Reconstruction Service, En *Machine Vision Applications*, n. 17, pp. 411-426.

Vosselman, G., Maas, H-G. (Éds.) (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Boca Raton: CRC.

Vu, H-H. et al. (2009). Towards high-resolution large-scale multi-view stereo. En *CVPR*, Jun 2009, Miami, United States. pp. 1430-1437.