LA RAPPRESENTAZIONE 3D DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO-URBANISTICO MEDIANTE FUSIONE DI DATI LASER, FOTOGRAMMETRICI ED ELABORATI DI RILIEVO DIRETTO

Domenico VISINTINI, Barbara FICO, Anna SPANGHER

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine, via Cotonificio 114 - 33100 UDINE
tel. 0432 558719, fax 0432 558700, *e-mail*: domenico.visintini@uniud.it, barbara-fico@libero.it, anna.spangher@libero.it, http://geomatica.uniud.it

Riassunto

In questo articolo si analizza il problema del rilevamento e della rappresentazione del patrimonio architettonico-urbanistico sulla base delle nostre elaborazioni relative alla piazza principale (Piazza Vittoria) e al Castello di Gorizia. Sono inizialmente sintetizzate le fasi sia del rilevamento aereo sia di quello terrestre, entrambi svolti con sistemi laser/fotogrammetrici integrati. Viene quindi illustrata la loro fusione ottimale e l'integrazione di questi dati con elaborati disponibili su supporto cartaceo, opportunamente georeferenziati, ottenuti da rilievi diretti o costituiti da carte storiche. Ciò permette di produrre differenti rappresentazioni tridimensionali fotorealistiche e/o virtuali di questi ambiti architettonico-urbanistici. Infine si descrive la realizzazione del modello in ambiente VRML, dove è possibile non solo navigare interattivamente, ma ottenere informazioni su ogni oggetto selezionato, poiché appartenente ad un *"3D City Model & GIS"* attualmente in fase di ultimazione.

Abstract

Some topics of the surveying and the representation of architectonic and urban spaces are here described, in particular mention to the data processing carried out for the main public square (Piazza Vittoria) and for the Castle of Gorizia (Italy). First of all, the steps of the aerial surveying and the terrestrial one, both achieved by integrated laser/photogrammetric systems, are treated as well as their optimal fusion. Afterwards, these data are integrated with digitalized paper mappings, as direct surveys or historical maps, suitably geo-referenced. That allows different photo-realistic and/or virtual 3D representations of such environments. At last, the realization of the model in VRML format is described, allowing the interactive navigation and providing information about each selected object since belonging to a "3D City Model & GIS" currently in completion.

1. Introduzione

Le moderne tecniche di rilevamento integrato laser/fotogrammetrico assolvono appieno le esigenze del rilevamento e della rappresentazione di oggetti complessi, sia nel caso di un singolo edificio (bene architettonico-culturale), sia nel caso di uno spazio urbano e territoriale (ambito edilizio-urbanistico). Esse producono infatti, con eccellente automazione, un'enorme mole di informazioni geometriche e materiche, quindi un ottimale strumento conoscitivo dei valori formali, costruttivi e tecnologici dell'opera rilevata. L'obiettivo che si persegue in questo articolo è la produzione di una serie di rappresentazioni di un ambiente virtuale che fonde assieme e nel miglior modo sia le

La ricerca rientra nell'ambito delle attività previste dal progetto INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia "Ricomposizione della cartografia catastale e integrazione della cartografia tecnica regionale numerica per i sistemi informativi territoriali degli enti locali mediante sperimentazione di nuove tecnologie di rilevamento" svolto dall'Università di Udine in collaborazione con il Geodetski Inštitut Slovenije di Lubiana.

informazioni metriche laser/fotogrammetriche sia anche quelle storico-artistiche. Tale modello completo documenta così l'evoluzione del patrimonio architettonico-urbanistico nel tempo, l'attuale stato di fatto dello stesso e permette la simulazione del progetto o del restauro dell'opera nel futuro.

2. Dati laser e fotogrammetrici aerei

Sono ormai ben note le potenzialità della scansione laser aerea che rappresenta oggigiorno la metodologia di rilievo più avanzata ed efficiente in ambito territoriale, soprattutto grazie al notevole livello di automazione raggiunto e all'elevatissima frequenza di acquisizione delle misure (superiore ai 100.000 punti/sec). L'elaborazione dei dati avviene generalmente secondo le fasi sotto riportate; per la descrizione dettagliata di ciascuna fase si rimanda p.e. a Crosilla, Visintini, Prearo e Fico (2005), qui si sottolinea soltanto l'elaborazione di tipo automatico per gran parte di esse.

1. Acquisizione (automatica) dei dati;
2. Georeferenziazione (automatica) dei dati;
3. Allineamento (semi-automatico) delle strisciate;
4. Filtraggio (automatico) dei punti;
5. Classificazione (semi-automatica) dei punti;
6. Modellazione 3D (semi-automatica) degli edifici;
7. Produzione degli elaborati finali (Rappresentazione).

Il sistema aviotrasportato, costituito da un telemetro laser oscillante accoppiato ad un sensore GPS/INS, permette di acquisire (1.) dense nuvole di punti (fino a 30 punti al metro quadrato) e di ottenere coordinate 3D con precisioni decimetriche per una descrizione del territorio metricamente corretta e altamente dettagliata. Si evidenzia la centralità della georeferenziazione (2.) che, mediante combinazioni di rotazioni e traslazioni, fornisce la posizione 3D dei punti rispetto ad un sistema di riferimento globale (WGS84 e quindi cartografico). I principali prodotti ottenibili sono dei modelli digitali in formato TIN o *grid*, quali il modello digitale della superficie (DSM) dopo l'allineamento (3.) che migliora i risultati della georeferenziazione, il modello digitale del terreno (DTM) dopo il filtraggio (4.) e il modello digitale di elevazione (DEM) dopo la classificazione (5.). La modellazione degli edifici (6.) non è necessaria per scopi ambientali, idro-geologici o forestali.

Per questo lavoro sono stati utilizzati i dati del sistema Optech ALTM 3033 (www.optech.on.ca) acquisti da elicottero su un'area di 1,67 kmq del centro storico di Gorizia mediante 14 strisciate sovrapposte e incrociate, ognuna con densità minima pari a 7 pti/mq. Grazie alla notevole sovrapposizione, sono state ridotte le occlusioni prospettiche degli edifici alti ed è stata ottenuta un'elevata densità media, pari a 15÷20 pti/mq (vedi in Figura 1 a sinistra i punti blu relativi alla chiesa barocca di S. Ignazio in Piazza Vittoria). Utilizzando per le fasi 3.÷7. il software TerraScan® della Terrasolid (www.terrasolid.com) in ambiente Microstation, è stato rilevato l'intero edificato urbano ricostruendo 355 modelli poliedrici. Si rimanda a Visintini e Fico (2005) per un'analisi statistica della notevole verosimiglianza delle volumetrie edilizie ottenute.

Gli edifici sono modellizzati in TerraScan con un approccio di tipo "non parametrico", basato cioè solo sull'analisi dei punti classificati come edificio, senza alcuna ipotesi sulla tipologia delle coperture (approccio parametrico). Dapprima sono automaticamente individuate le falde del tetto, il cui contorno è poi corretto manualmente mediante comandi di "*editing* assistito" interattivo; infine si ottengono le pareti per estrusione verticale verso il basso, fino all'intersezione con il DTM.

L'accoppiamento e l'integrazione fra il rilevamento laser e quello fotogrammetrico si avvale convenientemente del primo come metodo di misura 3D e del secondo come strumento di vestizione *raster* fotorealistica, quindi di fatto per produrre ortofoto digitali sul DSM laser.

Nel nostro caso sono state acquisite 153 immagini digitali da 4.080x4.076 pixel con una camera Rollei DB44 (www.rollei.de) integrata al sistema laser, i cui parametri di orientamento esterno sono quindi misurati direttamente dal sistema GPS/INS. Da queste immagini, mediante il software TerraPhoto® della Terrasolid, è stata prodotta l'ortofoto aerea con pixel di 20 cm, suddivisa in 36 file di 2.000x2.000 pixel equivalenti a zone di 400x400 m. Con l'ortofoto sono stati poi "texturizzati" il DTM e le coperture dei modelli poliedrici degli edifici (vedi Figura 1 a destra).

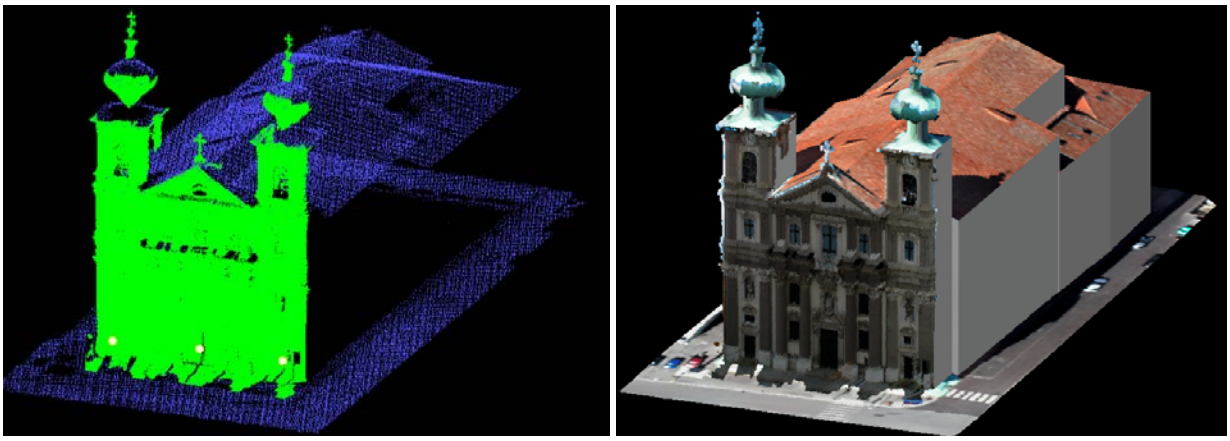

Figura 1 - A sinistra, i dati laser aerei (in blu) e terrestri (in verde) relativi alla chiesa barocca di S. Ignazio a Gorizia; a destra, la rappresentazione fotorealistica finale dopo le elaborazioni.

3. Dati laser e fotogrammetrici terrestri

L'impiego dei sistemi terrestri di scansione laser è ormai noto e diffuso; per questo rilevamento è più difficile, rispetto al caso aereo, indicare una procedura standardizzata, poiché essa dipende dal particolare tipo di oggetto rilevato. Il rilevamento è comunque divisibile in cinque momenti salienti:
0. Creazione di una rete di appoggio topografico;
1. Acquisizione (automatica) dei dati;
2. Registrazione (semi-automatica) delle scansioni;
3. Trattamento (semi-automatico) dei dati acquisiti;
4. Produzione degli elaborati finali (Rappresentazione).

All'inizio si posizionano dei *target* riflettenti per la registrazione e l'eventuale georeferenziazione delle scansioni: tali punti materializzano così una rete di appoggio (0.) da misurare per via topografica e che, a rigore, non è un'operazione del rilevamento laser. Gli stessi *target* sono poi rilevati durante l'acquisizione laser (1.) dell'oggetto ed automaticamente riconosciuti grazie alla loro elevata riflettività, anche se è necessario controllare che non siano assunti come *target* altri oggetti riflettenti (p.e. segnali stradali o oggetti metallici) o, viceversa, non siano identificati i *target* distanti. A partire dalle loro coordinate 3D nelle varie scansioni, si stimano i 6 parametri delle roto-traslazioni per la mutua registrazione (2.) in una unica nuvola riferita ad una sola origine. Questa nuvola viene infine trattata automaticamente o manualmente (3.) per la pulitura, il filtraggio e l'eventuale ricampionamento dei dati, più o meno complessi a seconda dell'oggetto rilevato.

I dati laser terrestri di questo articolo riguardano due ambiti di fondamentale importanza per la città: la Piazza Vittoria, slargo a forma di triangolo rettangolo allungato (303x101 m) sulla quale prospettano 31 edifici (vedi in Figura 1 a sinistra i punti verdi relativi alla chiesa) e il sovrastante Castello di Gorizia del quale sono stati rilevati la ripida salita di accesso, la corte interna e l'ampia sala principale. Per i dettagli si rimanda rispettivamente a Visintini, Crosilla, Fico e Guerra (2005) e a Visintini, Fico e Spangher (2005). In entrambi i casi è stato utilizzato il sistema Riegl LMS-360i (www.riegl.com) del Laboratorio di Fotogrammetria dell'Università IUAV di Venezia ed il relativo software RiSCAN PRO® per tutte le fasi 1÷4. Nei due ambiti sono stati utilizzati rispettivamente 31 e 65 *target* riflettenti (vedi in Figura 1 a sinistra i punti bianchi sulla chiesa) rilevati con stazione totale EDM da due reti topografiche di 14 e 10 vertici rispettivamente.

Riguardo alle immagini fotogrammetriche, queste permettono di colorare la nuvola laser con i valori RGB e di vestire il DSM: con una camera fissata al sistema, la texturizzazione e la creazione delle ortofoto delle pareti è pseudo-automatica. Si noti che in RiSCAN la *texture* è un prodotto intermedio per creare le ortofoto (terrestri), mentre TerraPhoto crea direttamente le ortofoto (aeree).

Seguendo questa metodologia, è stata impiegata una camera da 3.008x2.000 pixel Nikon D100 (www.nikoimaging.com) integrata al laser Riegl, acquisendo 55 immagini in Piazza Vittoria (vedi Figura 1 a destra la texturizzazione della facciata della chiesa) e ben 186 immagini per il Castello.

4. Fusione fra dati aerei (georeferenziati) e terrestri (non georeferenziati)

Per realizzare la fusione fra dati aerei e terresti esistono diversi metodi che però fanno tutti capo al medesimo concetto: riportare i diversi dati in sistema di riferimento unico e globale ovvero, sintetizzando, georeferenziarli rispetto al sistema cartografico Gauss-Boaga. Si tratta ovviamente di roto-traslare le scansioni terrestri: riprendendo il concetto fotogrammetrico di orientamento esterno diretto e indiretto sono possibili i quattro seguenti metodi, ognuno caratterizzato da diverse precisioni ottenibili e semplicità operative, comunque evidentemente contrapposte:

- Georeferenziazione diretta con ricevitore GPS integrato: la traslazione è data dalla posizione dell'antenna GPS e la rotazione è stimata dalla posizione di almeno 3 scansioni.
- Georeferenziazione diretta con strumentazione topografica integrata: come per una stazione totale, la roto-traslazione si stima per intersezione all'indietro da vertici trigonometrici noti.
- Georeferenziazione indiretta mediante altri *database* georeferenziati disponibili: la roto-traslazione è stimata iterativamente dal *matching* a minima distanza fra scansioni e *database*.
- Georeferenziazione indiretta mediante rete topografica: per calcolare i parametri della georeferenziazione si sfruttano gli stessi *target* della registrazione, risolvendo l'inquadramento globale della rete posizionando un ricevitore GPS geodetico su alcuni punti di stazione della stessa.

È stato seguito l'ultimo approccio, inquadrando le due diverse reti topografiche con misure GPS differenziali con un ricevitore Leica System 520 posto su 6 vertici in Piazza Vittoria e su 3 vertici (+1 *master* comune) sul Castello: sia i *target* che le scansioni terrestri vengono così georeferenziati.

5. Elaborati di rilievo diretto e loro georeferenziazione

Per elaborati di rilievo diretto qui si intendono tutte le rappresentazioni grafiche, anche storico-artistiche, realizzate su supporto cartaceo: dai tradizionali "piante, sezioni e prospetti" architettonici a quelle di tipo urbanistico come le vecchie cartografie tecniche e catastali "non numeriche" e, più indietro nel tempo, fino alle vere e proprie cartografie storiche. Dopo aver digitalizzato questi elaborati mediante scansione con uno *scanner* (da tavolo!), la loro georeferenziazione avviene, come ben noto, mediante una trasformazione piana che permette di ricampionare le coordinate pixel in coordinate cartografiche. Si segue quindi un approccio semplificato "non cartografico", comunque corretto viste le limitate estensioni in gioco. La complessità della trasformazione adottata varia a secondo della scala e della qualità metrica degli elaborati: per planimetrie moderne in scala architettonica è sufficiente un'unica roto-traslazione piana con variazione di scala (a 4 parametri), mentre per carte storico-artistiche a media-piccola scala (territoriale) è generalmente necessario utilizzare delle trasformazioni polinomiali su diverse sotto-aree (*warping*), per tener così conto localmente della loro modesta e disomogenea accuratezza cartografica.

In ogni caso, per la stima dei parametri incogniti è necessario disporre delle coordinate cartografiche di un numero variabile di punti visibili sugli stessi elaborati: invece di procedere ad un nuovo rilievo topografico a tal fine, per il nostro caso si sono sfruttate le informazioni dei rilievi laser. Visto il livello di dettaglio e di accuratezza raggiunti nella modellazione degli edifici, i loro vertici planimetrici hanno costituito i punti doppi per la stima delle trasformazioni piane: nel caso delle cartografie storiche vanno ovviamente sfruttati edifici tuttora esistenti!

Si presenta qui per ogni ambito un esempio di fusione fra dati laser, fotogrammetrici ed elaborati cartacei. In Figura 2 a sinistra, la situazione del 1884 rappresentata sul DTM con la carta storica in scala 1:3.700 è fusa con la situazione attuale costituita dai dati laser aerei e terrestri, colorati con i valori RGB delle immagini. Sono stati eliminati i punti laser del Palazzo dell'INPS, a fianco alla chiesa, costruito negli anni '50 al posto del Collegio dei Gesuiti demolito nel 1937. Le aree in nero rappresentano quindi elementi non più esistenti, quali un edificio vicino ai giardini pubblici, la base quadrata del monumento a S. Antonio, ora fra la chiesa e l'INPS, e la fontana del Pacassi, che si vede più a destra in figura, spostata nel 1911 e 1970 per problemi di viabilità. In Figura 2 a destra, i punti laser terrestri del Castello colorati RGB sono fusi con le planimetrie della cinta esterna (in giallo) e del primo piano (in blu) dove si trova, a destra, la Sala degli Stati Provinciali rilevata.

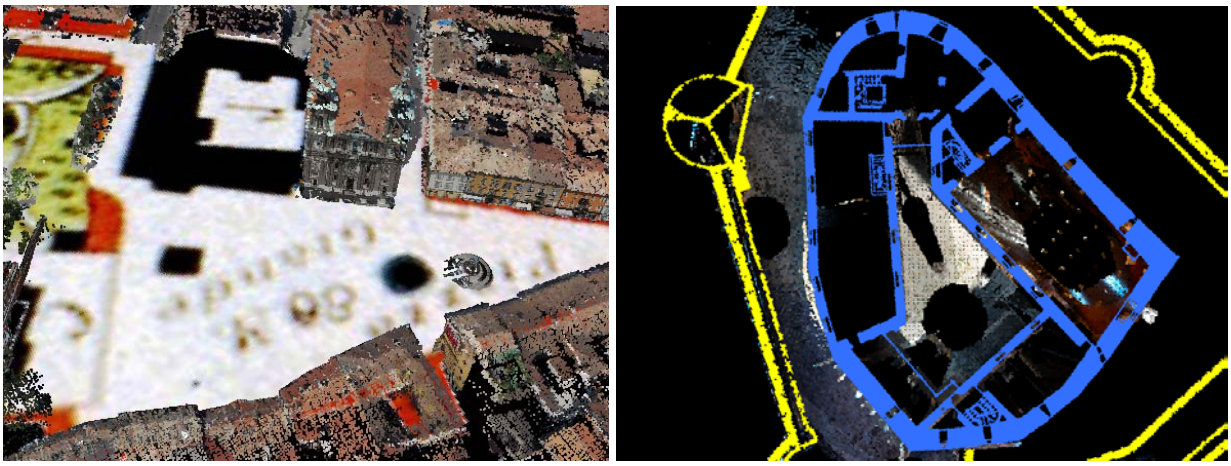

Figura 2 - A sinistra, Piazza della Vittoria: punti laser aerei&terrestri e carta storica del 1884; a destra, il Castello: punti laser terrestri e planimetrie della cinta esterna e del primo piano.

6. Rappresentazione tridimensionale fotorealistica

Avendo riferito tutti i dati nel sistema Gauss-Boaga, i dati terrestri sono stati importati in ambiente TerraScan e viceversa quelli aerei in ambiente RiSCAN Pro, in modo da gestire al meglio la nuvola complessiva per produrre automaticamente le rappresentazioni di interesse (superfici, sezioni, profili e ortofoto) mediante il software, fra i due, con la procedura informatica più efficiente allo scopo. In altri termini, si sfruttano i software di "rilevamento" per ricavare ogni prodotto TIN, vettoriali e *raster* ottenibile, che viene poi importato in ambiente CAD dove ci si avvale invece di software di "rappresentazione" (in senso grafico, quindi di *rendering*) quale 3D Studio Max® della Autodesk (www.autodesk.com). Questo software ha permesso l'effettiva vestizione fotorealistica delle superfici TIN degli oggetti come già visto in Figura 1. L'aspetto fondamentale è la corretta associazione ad ogni triangolo che compone il DTM o le falde delle coperture della corrispondente immagine digitale georeferenziata. Nelle diverse ortofoto originali sono stati opportunamente rimossi gli elementi di disturbo, principalmente le automobili parcheggiate in piazza e davanti agli edifici: l'ortofoto aerea è proiettata sul DTM e sul tetto degli edifici, le diverse ortofoto terrestri sulle corrispondenti facciate. Sono stati inoltre aggiunti degli alberi e l'arredo urbano, ottenendo così un modello virtuale assai realistico. Infine sono stati creati, anche mediante lo stesso RiSCAN, alcuni di filmati AVI di navigazioni realistiche lungo traiettorie aeree e terrestri di interesse.

7. Realizzazione di un modello in ambiente virtuale VRML

Per quanto le rappresentazioni 3D fin qui descritte siano già ottimali, ci si è voluti spingere oltre, trasportando i dati dall'ambiente 3D Studio all'ambiente VRML (vedi Figura 3 a sinistra), di facile fruibilità anche dai non addetti ai lavori. Il principale problema informatico incontrato è stato la presenza di molte falde dei tetti, generate mediante la modellazione di TerraScan, definite come superfici triangolari con direzione normale entrante. Queste non vengono visualizzate in ambiente VRML, creando così un modello pieno di "buchi": si è allora proceduto ad "invertire" tali normali. Sono stati poi definiti una serie di parametri visuali e di navigazione del modello virtuale, quali:

- *NavInfo*, che definisce:
  - il tipo di movimento di *default* all'interno della scena (*walk*, *examine*, *fly* o *none*);
  - l'esistenza di una luce di scena;
  - il limite di visibilità (se impostato a zero significa che si vede tutto);
  - la velocità di movimento all'interno della scena;
  - le caratteristiche dell'*Avatar*, ovvero di un possibile personaggio che si muove nella scena;
- *Background*, che definisce i colori o le immagini di sfondo alla scena;
- *Fog,* che definisce l'eventuale nebbia/foschia presente all'interno della scena.

Nell'esportazione da 3D Studio a VRML sono stati inoltre definiti ulteriori parametri, quali:

- il tipo di poligono utilizzato per gli oggetti (nel nostro caso per l'appunto i triangoli);

- la vista iniziale (fra tutte quelle precedentemente acquisite con una camera virtuale);
- l'utilizzo di altri eventuali parametri di *NavInfo*, *Background* o *Fog* precedentemente definiti;
- la risoluzione delle coordinate esportate (fino a 6 valori dopo la virgola).

Per ogni edificio è stato creato un collegamento ipertestuale MHTML mediante una *Anchor* che, se cliccata, attiva una scheda (vedi Figura 3 a destra) contenente (per ora) le seguenti informazioni:

- Una vista assonometrica fotorealistica predefinita;
- Dati storici: ricavati da diverse fonti bibliografiche, p.e. dallo stesso sito del Comune di Gorizia;
- Dati tecnici: altezza, perimetro, superficie, volume, numero di piani: questi dati, a parte l'ultimo, sono derivati dallo stesso rilievo laser aereo e memorizzati nel *database* di un "*3D City Model & GIS"* attualmente in ultimazione e descritto in questi stessi atti da Fico e Beinat (2006).
- Dati urbanistici: destinazione d'uso nel P.R.G.C. e stato di conservazione.

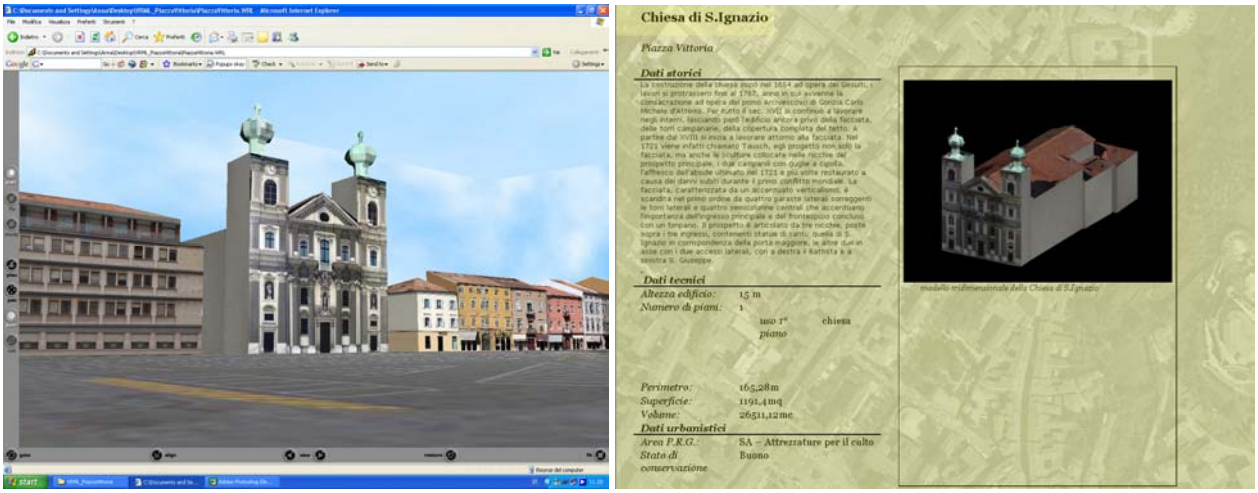

Figura 3 - A sinistra, una schermata della navigazione VRML in Piazza Vittoria; a destra, la scheda informativa che compare dopo aver cliccato sulla Chiesa di Sant'Ignazio.

Sono stati inoltre utilizzati altri programmi di realtà virtuale quali VrmlPad®, Internet Space Builder® e Internet Space Assembler® della ParallelGraphics (www.parallelgraphics.com) per migliorare ulteriormente le caratteristiche informatiche e la fruibilità operativa del modello VRML.

8. Conclusioni

Relativamente al patrimonio architettonico-urbanistico, in questo articolo si è visto che è possibile fondere agevolmente assieme in un unico modello 3D le informazioni metriche e digitali dei rilevamenti laser e fotogrammetrici con quelle storico-artistiche degli elaborati di rilievo diretto. La loro rappresentazione può assumere varie proiezioni (piante, sezioni, prospetti, assonometrie, prospettive), diversi formati (TIN, vettoriali, *raster*, miste), varie modalità (statica o dinamica) ed altre caratteristiche informatiche (interattiva, interrogabile, virtuale, ecc.). In definitiva, si ottiene un unico modello 3D che descrive l'evoluzione nel tempo e l'attuale stato di fatto, di grande aiuto alla progettazione o al restauro, la cui stessa simulazione si può rappresentare sul medesimo modello.

Bibliografia

Crosilla F., Visintini D., Prearo G., Fico B. (2005), "Esperienze di filtraggio, classificazione, segmentazione e modellazione di dati spaziali da rilievo laser aereo", *Bollettino della SIFET*, 1: 13-51.

Fico B., Beinat A. (2006), "Definizione automatica da rilievi LIDAR di attributi geometrici per il GIS 3D urbano", *Atti della X Conferenza Nazionale ASITA*, Bolzano.

Visintini D., Fico B., Crosilla F., Guerra F. (2005), "A 3D virtual model of the Gorizia downtown (Italy) by matching aerial and terrestrial surveying techniques", *IAPRS&SIS*, Proceedings of the XXth International Symposium of CIPA, Torino, Italy, XXXVI, 5/C34, 1: 575-580.

Visintini D., Fico B. (2005), "Il rilevamento aereo delle volumetrie edilizie: laser vs fotogrammetria", *Atti della IX Conferenza Nazionale ASITA*, Catania, 2: 2023-2028.