

## RILIEVO ARCHITETTONICO PROPEDEUTICO AL RESTAURO DELLA CAPPELLA DI SAINT-MAXIME A CHALLAND-SAINT-VICTOR

Lorenzo Appolonia, Paolo Salonia\*

### Premessa

La cappella di Saint-Maxime si presenta come una struttura a pianta rettangolare, piccola ed estremamente semplice, chiusa da un'abside tondeggiante. Sulla sua facciata - al disopra della porta e delle due piccole finestre, di cui una oggi parzialmente rotta - campeggia un affresco in quattro quadri, raffigurante la Madonna con il Bambino, san Michele armato di spada e bilancia, sant'Antonio Abate e un santo ignoto, in paramenti sacerdotali, che sorregge con il braccio sinistro un volume, forse sant'Orso. Ai piedi del terzo quadro, quello raffigurante la Madonna, si scorge ancora una scritta parzialmente rovinata «*Hoc opus fecit fieri*» (fig. 1).

Originariamente priva di volta, con capriata scoperta, la cappella venne provvista in seguito di un soffitto a volta in legno, che tagliò alcuni affreschi. L'attuale soffitto in legno fa parte degli interventi di restauro della cappella, tra cui la creazione di un basamento in cemento alle spalle dell'abside, prima assente.

La cappella (fig. 2) attualmente si presenta spoglia e vuota a parte il piccolo altare in pietra sottostante l'arco trionfale, con il pavimento ingombro di calcinacci, e recentemente è stata oggetto di uno studio propedeutico al progetto di restauro.<sup>1</sup> Da tale analisi si è visto come gli affreschi creati da Giacomino da Ivrea erano basati su pigmenti di calcite, malachite, vermiglio, oltre ad ocre di colore giallo e rosso; si è inoltre scoperto l'uso di grafite nei pigmenti di colore nero e che per le aureole degli Evangelisti è stata utilizzata lamina di stagno.

### Obiettivi del progetto

All'interno del vasto progetto di analisi dello stato di conservazione, diagnosi, pianificazione, esecuzione di interventi conservativi e organizzazione di un rigoroso monitoraggio, coerentemente con il "percorso concettuale" avviato già da tempo con altri progetti comuni<sup>2</sup> (si vedano per esempio il rilievo della cinta urbana di Aosta, il rilievo del ciclo di affreschi altomedioevali della Collegiata dei

Santi Pietro e Orso in Aosta ed il rilievo dei capitelli nel relativo chiostro),<sup>3</sup> la finalità ultima di questo lavoro è quella di ottenere, mediante l'utilizzo di tecniche innovative, uno strumento operativo per l'analisi del manufatto. Tali apparecchiature, affiancandosi ai restauratori nella fase conoscitiva, possono poi diventare un valido supporto nella progettazione e la gestione degli interventi di conservazione, secondo la duplice istanza di indagine e di monitoraggio. Si configurerà così, in primo luogo, uno strumento di indagine conoscitiva nella fase di pre-intervento, mediante il quale il restauratore potrà procedere ad interrogazioni interattive su varie tematiche organizzate in maniera integrata nel sistema (alterazioni di degrado, parametri relativi al colore, materiali componenti, ecc.), estraendo informazioni necessarie alla valutazione dello stato di conservazione del ciclo pittorico. Dopo la corretta registrazione all'interno del sistema delle operazioni di restauro effettuate, tale dispositivo diverrà anche strumento di monitoraggio: procedendo, infatti, a nuove rilevazioni dei parametri significativi, sarà possibile derivare valutazioni di tipo comparativo sul comportamento nel tempo dei materiali utilizzati e quindi sull'efficacia dell'intervento stesso.

Con riferimento a quanto appena esposto, ed al connotato sperimentale e scientifico che si vuole imprimere all'intera operazione, tre sono i principali obiettivi perseguiti dal progetto:

- la realizzazione di un rilievo preciso, sufficientemente dettagliato sia dal punto di vista dell'informazione geometrica che colorimetrica, e di una documentazione complessiva che, mediante l'utilizzazione di metodologie e tecnologie innovative, garantisca un valore aggiunto di ricerca e sperimentazione;
- la configurazione di uno strumento operativo per l'analisi dell'intero ciclo di affreschi in cui far confluire anche i dati geometrici prodotti che, interagendo con i restauratori nella fase conoscitiva, contribuisca e supporti la progettazione degli interventi di conservazione;



1. Esterno della cappella: fronte principale con affreschi.  
(P. Salonia)



2. Interno della cappella: l'arco trionfale.  
(P. Salonia)

- il trasferimento del *know-how* ai restauratori e ai diversi operatori dell'Amministrazione regionale coinvolti nel progetto, attraverso lo svolgimento di una fase di *training on job* finalizzata a renderli completamente autonomi nell'utilizzo dello strumento operativo configurato, anche in funzione di possibili aggiornamenti ed implementazioni nel tempo della documentazione relativa al bene, nell'ottica di una sua conservazione preventiva e programmata.

### Impostazione metodologica

Con riferimento agli obiettivi globali del progetto, finalizzati ad una ottimizzazione e facile gestione delle informazioni derivanti da ambiti disciplinari diversi e di tutta la documentazione necessaria alla conservazione del ciclo di affreschi medievali, sulla base delle esperienze di ricerca maturate e nell'ambito di un ormai codificato *iter* conoscitivo per una corretta lettura di manufatti di interesse storico-artistico, è stato possibile individuare uno specifico percorso operativo costituito da fasi di approccio ben distinte e definite.

Tali fasi possono essere così sintetizzate:

#### a) Acquisizione dei dati

- rilievo geometrico;
- analisi a vista (tipologie di degrado, materiali costitutivi);
- analisi storico-critica e ricerca documentaria;
- indagini diagnostiche non invasive.

#### b) Integrazione e gestione dei dati:

- elaborazione ed ottimizzazione in uno specifico sistema informativo ARKIS (Architecture Recovery Knowledge Information System);
- individuazione di percorsi di indagine, di interrogazione e di monitoraggio.

Delle diverse fasi nelle quali si articola il progetto, il presente contributo vuole specificatamente dare conto del rilievo che è stato eseguito e della consistenza dei dati acquisiti ed elaborati, nonché tracciare le linee di sviluppo attualmente in corso.

### Il rilievo geometrico: criteri generali

Il rilievo del ciclo di affreschi medioevali della cappella di Saint-Maxime, allo stato attuale completamente inesistente, è stato calibrato (in termini di dettaglio, di rappresentazione, di scala, ecc.) sulla tipologia stessa del manufatto da indagare e, in relazione alle primarie finalità conservative che l'intenzione progettuale si pone, le tecniche utilizzate hanno garantito alcuni essenziali caratteri quali l'attendibilità, la precisione e la misurabilità del dato restituito.

Inoltre possiede requisiti di tridimensionalità: la possibilità di un controllo stereometrico del manufatto appare infatti quanto mai opportuna viste le finalità documentative del rilievo stesso. I modelli tridimensionali ottenuti, messi a disposizione dell'Amministrazione regionale, potranno essere elaborati, in un successivo momento, per l'acquisizione di tutta una serie di informazioni aggiuntive utili all'accrescimento delle conoscenze per la conservazione (relazioni tra le singole parti, quali affresco/supporto murario, allineamenti dei corpi murari, eventuali fuori piombo, ecc.) e quindi per la pianificazione di indagini integrative e analisi propedeutiche al monitoraggio del manufatto e alle eventuali simulazioni di interventi di restauro.

Infine consente la produzione di una documentazione il più possibile dettagliata non solo dal punto di vista geometrico ma anche dal punto di vista qualitativo, quindi capace di fornire informazioni sul colore e sulla morfologia dei materiali componenti e sulla loro eventuale alterazione a causa dei diffusi fenomeni di degrado.

In relazione a ciò ed al connotato sperimentale e scientifico che si è voluto imprimere all'intera operazione, sono stati individuati alcuni criteri sui quali basare la progettazione e la realizzazione delle operazioni di documentazione e rilievo. Essi possono essere così sintetizzati:

a) Acquisizione preliminare dei dati, programmandone e pianificandone le fasi di restituzione secondo particolari esigenze e/o eventuali priorità di intervento. Questo garantisce alla Soprintendenza la creazione di un archivio completo di eterogenea documentazione di base, permettendo, contemporaneamente, un diverso impiego dei fondi disponibili con evidenti risparmi in termini di tempo e di costi.

b) Utilizzo e sperimentazione di un innovativo sistema calibrato di rilievo, a triplette di immagini, in grado di realizzare accurate scansioni tridimensionali del manufatto rilevato, mediante la produzione di nuvole di punti complete dal punto di vista delle informazioni spaziali (coordinate X, Y, Z) e colorimetriche (valori RGB).

c) Possibilità di utilizzazione dei dati acquisiti (coordinate di punti, nuvole di punti, *range maps*, triplette di immagini ad alta definizione, monografie, ecc.) secondo modalità diversificate in relazione a specifiche e momentanee esigenze di carattere tecnico (tempi e/o costi ridotti di esecuzione, analisi di dettaglio più approfondite, valutazioni di tipo qualitativo dello stato di consistenza, ecc.) od amministrativo (ad esempio le scelte che la Soprintendenza potrà decidere di operare o meno in merito a dotazioni HW e SW).

I due procedimenti possibili sono sostanzialmente due:

- elaborazione in **monoscopia**, mediante processi di **ortomosaicatura** derivanti dalla tripletta di immagini fotografiche, al fine di ottenere una documentazione, anche cartacea, sulla quale poter operare un primo livello di analisi, trattandosi di restituzioni 2D dove la quota (coordinata Z) non emerge e, dunque, l'informazione rilevabile risulta essere solo quella relativa alle X e alle Y;

- operazioni di **modellazione** da cui ottenere modelli digitali delle superfici, esplorabili in ambienti di navigazione tridimensionale, adatti alla gestione di tutto il bagaglio informativo opportunamente processato e utili per fini di studio e di analisi.

In entrambi i casi ciò consente ai restauratori di disporre di una informazione continua, caratterizzata dalla compresenza, sulla esatta "geometria" del manufatto, di tutti i dati di tipo qualitativo.

Considerata, inoltre, la particolarità del caso oggetto di studio, trattandosi di affreschi con alto contenuto cromatico, va aggiunta la considerazione più generale di come l'introduzione delle scienze informatiche abbia totalmente modificato nel settore del rilievo non soltanto le fasi di acquisizione, quanto, e forse soprattutto, le operazioni successive di elaborazione e gestione. Basti pensare alla possibilità, oggi garantita dalle tecniche innovative, di aggiungere alla precisione mensurativa, tipica della fotogrammetria, la ricchezza di

dati qualitativi, morfologici, relativi al colore e ai dettagli, propri dell'immagine fotografica, con l'ulteriore possibilità di misurare, calcolare superfici e creare tematismi. L'utente finale disporrà, in tal modo, di un archivio completo di informazioni suscettibili di elaborazioni successive, senza la mediazione del disegno che, comunque, rappresenta sempre un'astrazione soggettiva rispetto alla realtà.

### Il rilievo geometrico: tecniche e metodologie adottate

Dal punto di vista delle tecniche e metodologie adottate per il rilievo, si è proceduto mediante l'utilizzazione e la sperimentazione di un innovativo sistema calibrato a triplette di immagini in grado di realizzare accurate scansioni 3D degli oggetti rilevati, con integrazione di dati geometrici e colorimetrici e senza l'utilizzo di *laser scanner*.<sup>4</sup>

La tecnologia utilizzata è ZScan (progettata e realizzata dalla Menci Software di Arezzo): questa ha permesso di ottenere nuvole di punti con informazione RGB dalle quali elaborare modelli 3D, a differenti livelli di complessità e scala, partendo dal trattamento di un numero discreto di immagini digitali, acquisite in modalità limitatamente controllate, utilizzando una specifica attrezzatura e *post-processando* i dati all'interno di uno specifico *software* basato su di un innovativo algoritmo di *image matching*. L'attrezzatura di acquisizione (figg. 3a, 3b) consiste in una barra di alluminio calibrata (caratteristiche dimensionali note), che si monta facilmente su un cavalletto fotografico sufficientemente robusto, dotata di un piccolo carrello che supporta una fotocamera digitale anch'essa calibrata (è nota la funzione numerica rappresentativa della distorsione intrinseca dell'ottica).

Dunque, sono noti i parametri di calibrazione sia della barra che della fotocamera digitale e questi informano opportunamente il *software* di elaborazione in modo di rendere possibile l'esatta ricostruzione della posizione del centro ottico e, quindi, della esatta geometria della scena di presa.

Il carrello scorre lungo la barra e porta la fotocamera su di esso montata su differenti posizioni prefissate al fine di acquisire una sequenza di immagini dello stesso oggetto da differenti angoli visuali.

Per produrre, infatti, un singolo modello 3D di una zona parziale del manufatto rilevato, è necessario acquisire tre immagini da sinistra a destra, facendo scorrere la fotocamera

lungo la barra. L'immagine di sinistra e quella di destra devono essere tra loro simmetriche rispetto a quella centrale (nell'ordine si scattano sinistra, centro, destra) e la loro distanza (la *baseline*) deve essere opportunamente calcolata in relazione alla distanza del centro ottico dal manufatto che si rileva, all'accuratezza e al livello di dettaglio che si vogliono conseguire.

Al fine di realizzare i singoli modelli 3D, non vi è stretta necessità di punti di appoggio topografico. È comunque possibile fare uso di GCP (Ground Control Points), da utilizzare durante l'elaborazione delle immagini acquisite, al fine di georeferenziare ogni singola nuvola di punti, in relazione ad un sistema spaziale globale relativo di riferimento e, quindi, di irrobustire la registrazione di tutte le nuvole di punti parziali ed ottenere il modello 3D finale e completo del manufatto rilevato.

Il sistema soddisfa tutte le caratteristiche di grande flessibilità e facilità d'uso garantendo, al contempo, l'accuratezza e l'affidabilità del dato geometrico acquisito.

Alcune limitazioni, comunque, si manifestano in presenza di specifiche caratteristiche della superficie materica dell'oggetto da rilevare: omogeneità eccessiva del colore, riflettività e *pattern* regolari e ripetitivi del materiale costitutivo creano le maggiori difficoltà nella ricostruzione delle nuvole di punti (in proposito, si ricorda l'esperienza sviluppata dallo stesso gruppo CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche, nel caso del rilievo eseguito con l'impiego delle stesse tecnologie del balteo di Il secolo conservato nel Museo Archeologico Regionale di Aosta).

Infine, un ruolo importante è costituito dall'illuminazione, laddove una eccessiva fonte di luce risulti essere più dannosa di una situazione di sotto esposizione, largamente da privilegiare.

Si tratta quindi di un sistema di rilievo basato sulla realizzazione di una ridondante ripresa fotografica dell'oggetto effettuata in condizioni note: per ciascuna porzione dell'oggetto vengono acquisite tre diverse fotografie, da tre diverse angolazioni, seguendo una semplice serie di procedure e mediante l'utilizzo di un sistema di acquisizione e di una camera fotografica opportunamente calibrati. Il processamento di ciascuna tripletta di immagini, all'interno di uno specifico ambiente *software*, mediante l'applicazione di un sofisticato algoritmo basato sui principi



3. L'attrezzatura di acquisizione per il rilievo con risoluzione: a) alla scala architettonica, b) alla scala micrometrica. (P. Salonia)

della stereofotogrammetria, permette la trasformazione dei singoli *pixel* delle immagini in una nuvola di punti di coordinate note, contestualmente dotata dell'informazione di colore in formato RGB, anche senza l'ausilio di alcun supporto topografico. Da queste nuvole di punti possono inoltre essere immediatamente ricavate singole *range maps*, ovvero *mesh* triangolate e texturizzate che restituiscono le singole porzioni della superficie dell'oggetto.

Il sistema di acquisizione consta quindi di un *hardware* costituito da una fotocamera con ottica fissa opportunamente calibrata (per conoscere il valore di distorsione dell'obiettivo montato), da una slitta di precisione di 90 cm montata su un treppiede dotato di testa rotante 3D e di un *software* basato su un algoritmo di analisi dell'immagine che lo rende estremamente efficiente e preciso.

La fotocamera digitale può scorrere sulla barra di acciaio di precisione, nella quale sono stati predisposti alcuni fori, a distanze note, che rappresentano le possibili posizioni della fotocamera stessa. Si tratta sostanzialmente di operare tre scatti in successione da diverse posizioni, con l'accortezza di definire l'intervallo tra queste posizioni in relazione alla distanza dell'oggetto da rilevare e alla scala di dettaglio che si vuole ottenere.

Il sistema di rilievo suddetto offre, in conclusione, una serie di vantaggi che possono essere così sintetizzati:

- grande flessibilità nella fase di acquisizione in quanto, essendo variabile la distanza tra le prese, essa può essere ottimizzata in funzione delle dimensioni dei manufatti, della distanza dall'oggetto e delle condizioni effettive di ripresa;
- rapidità nella fase di acquisizione grazie alla possibilità di rendere meno oneroso il supporto topografico (la ricerca di un elevato grado di accuratezza consiglia, comunque, di essere rigorosi anche su tale supporto);
- rapidità nella fase di elaborazione dei dati acquisiti per la presenza di un apposito ambiente *software*, associato al sistema, che consente di costruire i modelli tridimensionali, sia sotto forma di nuvole di punti che di *mesh* triangolate, inserendo semplicemente le immagini della tripletta e tutti i parametri relativi alla ripresa;
- possibilità di concatenare, nella fase di elaborazione, i singoli modelli ottenuti creandone altri tridimensionali complessivi dell'oggetto, misurabili, esplorabili e analizzabili in appositi ambienti di navigazione.

Le numerose prove sperimentali, eseguite in vari settori applicativi, hanno dimostrato l'affidabilità del sistema in particolare per rilievi architettonici nei quali è richiesto un elevato grado di accuratezza. L'utilizzo dello stesso, riducendo i tempi di acquisizione e creazione di modelli, consente inoltre di contenere i costi del rilievo, garantendo comunque livelli di precisione adeguati agli obiettivi di scientificità da raggiungere.

Infine, si può ben affermare che il sistema adottato rappresenta sicuramente un metodo di indagine diagnostica non invasiva, in considerazione dei dati che produce, del valore aggiunto del loro bagaglio informativo, della assoluta mancanza di interferenze della metodologia con l'oggetto indagato. Infatti, il rilievo eseguito viene integrato da un altro che, adottando le stesse tecnologie e metodologie,

garantirà il controllo micrometrico di alcune zone dell'affresco di particolare interesse (soprattutto dal punto di vista materico e conservativo), georeferenziandole sul rilievo generale perché riferito alla stessa origine del sistema di coordinate spaziali.

In particolare il gruppo dell'ITABC (Istituto Tecnologie Applicate ai Beni Culturali) procederà alla sperimentazione della tecnologia sopra descritta per il rilievo indiretto micrometrico di significativi campioni di superficie del ciclo pittorico, precedentemente selezionate dai tecnici restauratori della Soprintendenza, dal momento che tale sistema calibrato a triplette di immagini è in grado di realizzare accurate scansioni 3D degli oggetti rilevati, con ampio *range* di risoluzione dalla scala architettonica (millimetrica) alla scala micrometrica (submillimetrica).

Il fine di tali sperimentazioni è verificare l'efficacia dell'utilizzo di questa tecnologia come strumento di analisi del degrado delle superfici e di monitoraggio nel tempo delle cinetiche delle patologie riscontrate, anche a seguito di necessari interventi di restauro, potendo ripetere l'acquisizione dei medesimi campioni di superficie in momenti successivi e procedendo mediante confronti digitali delle immagini (*ante* e *post*). Tale strumento potrebbe essere altresì efficace per quantificare gli effetti dei diversi sistemi di pulizia adottati sulla superficie dell'affresco, potendo registrare microscopiche variazioni del suo spessore (entità del materiale asportato, perdita di eventuali frammenti delle superfici pittoriche, ecc.). Per quanto riguarda il rilievo di dettaglio di alcuni campioni di superficie pittorica, quale sperimentazione di tecniche di indagine diagnostica non invasive, si prevede l'acquisizione di campioni di superficie di circa 50 mm di lato, con uno *step* di risoluzione medio di circa 30 micron.

Un caso analogo è stato già sperimentato nel *donjon* del castello di Quart, all'interno del quale il gruppo CNR, utilizzando le tecnologie descritte nel presente articolo, ha sostanzialmente "controllato" gli effetti della pulizia *laser* su quel ciclo di affreschi mediante campagne di rilievo effettuate prima, durante e dopo le operazioni di descialbo.

#### **Fasi di rilievo ed elaborazione dei dati**

Al fine di ottimizzare l'intero lavoro, ed affinché non venissero messe in campo risorse ridondanti rispetto alla natura stessa del manufatto oggetto di rilevamento, si è ritenuto opportuno effettuare un primo sopralluogo direttamente *in situ* mirato ad un'attenta valutazione e conoscenza preliminare dell'oggetto da rilevare.

In tale circostanza si è proceduto ad un'analisi dell'ambiente nel quale è inserito il ciclo di affreschi e della reale accessibilità dei luoghi; è stata inoltre effettuata una estesa campagna fotografica e una sorta di prima sperimentazione sommaria del sistema di rilevamento adottato.

Sulla base dei limiti imposti dalla geometria del manufatto e dai risultati ottenuti da tale sperimentazione, è stato possibile progettare, in modo adeguato, gli schemi di ricoprimento dell'intera superficie pittorica, calibrando le caratteristiche tecniche delle focali da utilizzare e valutando la distanza ottimale della strumentazione dalla superficie pittorica in relazione alla scala di dettaglio da raggiungere. Sono state, quindi, programmate le successive fasi di

rilevamento, calcolandone, con sufficiente approssimazione, i tempi realizzativi e prevedendo in anticipo l'eventuale necessità di utilizzo di elevatori o trabatelli mobili, per raggiungere le parti non facilmente accessibili quali la semicalotta sferica dell'abside.

Il programma generale dei lavori per il rilievo dell'intero ciclo di affreschi della cappella di Saint-Maxime ha previsto, sinteticamente, le seguenti fasi operative:

- **inquadramento topografico** degli ambienti nei quali è inserito il ciclo pittorico;
- **rilievo tridimensionale** degli affreschi (e del supporto architettonico) per una restituzione alle scale richieste e secondo le scelte tecniche operate per la sperimentazione.

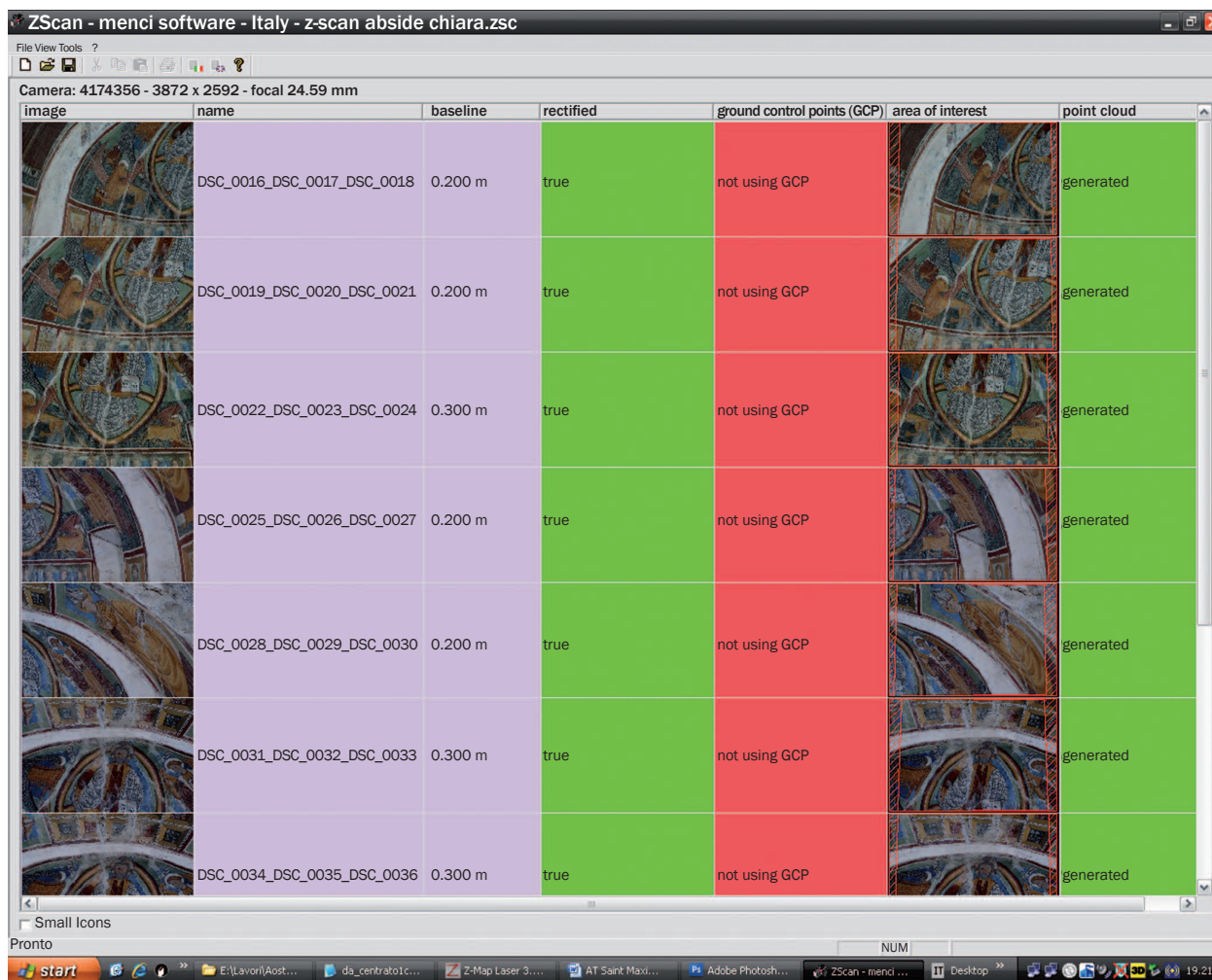
Inoltre, è stato valutato essere fondamentale eseguire il rilievo generale, mediante l'impiego della stessa tecnologia, di tutto l'intero manufatto, esterno ed interno, sviluppando un rigoroso inquadramento topografico che permettesse il controllo delle successive fasi di registrazione globale di tutte le nuvole di punti prodotte (fig. 4). È stato così possibile ottenere un modello complessivo del manufatto che restituisce l'interno della cappella - con approfondimento dell'accuratezza dei dati relativi agli affreschi dell'abside e dell'arco trionfale - posizionato nella corretta spazialità della restituzione dell'esterno della cappella stessa.



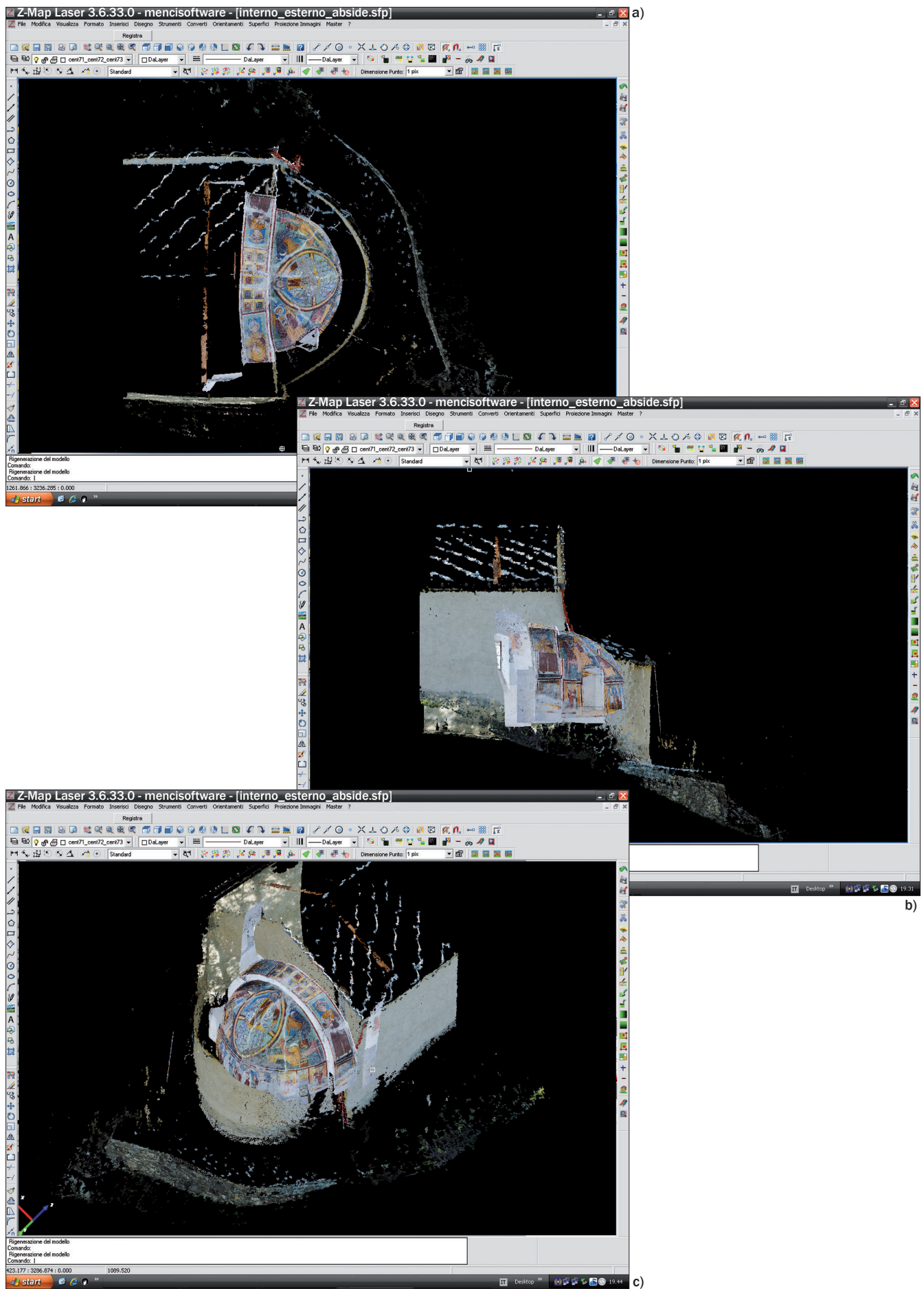
4. Inquadramento topografico dell'intero manufatto al fine di legare spazialmente il rilievo dell'interno con quello dell'esterno. (P. Salonia)

La strumentazione utilizzata per il rilievo è stata:

- stazione totale Pentax per l'appoggio topografico;
- distanziometri *laser* Leica per misure dirette;
- fotocamera digitale Nikon D-200 (CCD di 10.2 megapixel, obiettivo 24 mm, calibrata in un laboratorio certificato UNI) per l'acquisizione di nuvole di punti con informazioni spaziali (X, Y, Z) e colorimetriche (RGB);



5. L'interfaccia intuitiva di ZScan.  
(P. Salonia)



6. Modello complessivo formato da più nuvole di punti tra loro registrate in ZMap. La zona dell'abside, esterno ed interno, in una visualizzazione: a) dall'alto, b) di lato, c) assonometrica. Oltre agli affreschi, sono ben visibili i muri perimetrali e la falda del tetto di copertura. (P. Salonia)

- fotocamera Canon EOS 500 (CCD di 15.2 megapixel, obiettivo macro 60 mm, calibrata in un laboratorio certificato UNI) per l'acquisizione di nuvole di punti con informazioni spaziali (X, Y, Z) e colorimetriche (RGB) al massimo livello di dettaglio micrometrico;
- barra di alluminio calibrata del sistema ZScan, montata su cavalletto Manfrotto;
- barra motorizzata del sistema ZScan-micro;
- PC portatile Toshiba per la gestione dell'acquisizione e l'archiviazione in tempo reale dei dati acquisiti.

Le operatività che l'utilizzo di tale tecnologia impone in fase di acquisizione sono molto simili a quelle richieste per un rilievo di tipo stereofotogrammetrico. Una volta stabilita la distanza ottimale delle stazioni di presa dalla superficie pittorica o da qualsiasi altra parte del manufatto, in funzione del dettaglio che si vuole raggiungere con il rilievo, vengono eseguite una serie di acquisizioni fotografiche, a triplette di immagini, per ottenere la completa copertura dell'intero ciclo pittorico o dell'intera parte che si rileva. Durante la prima fase di *post processamento*, da ciascuna tripletta è stato possibile ottenere i modelli tridimensionali, sia sotto forma di nuvole di punti con valore RGB che di *mesh* triangolate e texturizzate, di ciascuna porzione di affresco e/o di manufatto architettonico. Tali modelli sono stati poi registrati tra loro così da ottenerne uno tridimensionale complessivo del ciclo pittorico geometricamente collocato nel modello globale della cappella, misurabile, esplorabile e analizzabile in appositi ambienti di navigazione. Su tale modello (fig. 6) saranno georiferiti anche i rilievi dei campioni di affresco acquisiti ad alta definizione per l'analisi del degrado ed il monitoraggio del comportamento dell'affresco prima, dopo e durante l'intervento di restauro.

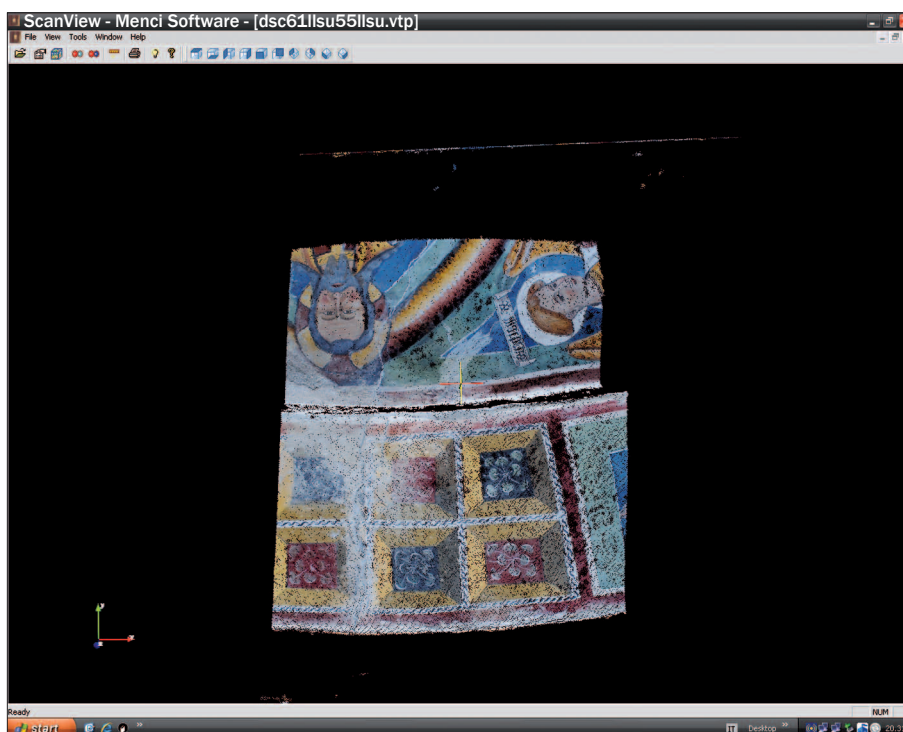
Infine dal modello tridimensionale sarà possibile ottenere delle ortomosaicature del ciclo pittorico, sia relative alle porzioni di superficie piane che a quelle assimilabili ad un piano in cui si potrà suddividere l'abside, all'occorrenza digitalizzabili a *monitor* per la produzione di vettoriali. Tale documentazione sarà fondamentale durante la successiva realizzazione della sperimentazione dell'utilizzo di *ARKIS* per la gestione di tutto il bagaglio informativo relativo al restauro degli affreschi.

La fase di elaborazione dei dati è stata sviluppata mediante l'uso di due *software* che costituiscono parte integrante del sistema ZScan (*ZScan* e *ZMap Laser*).

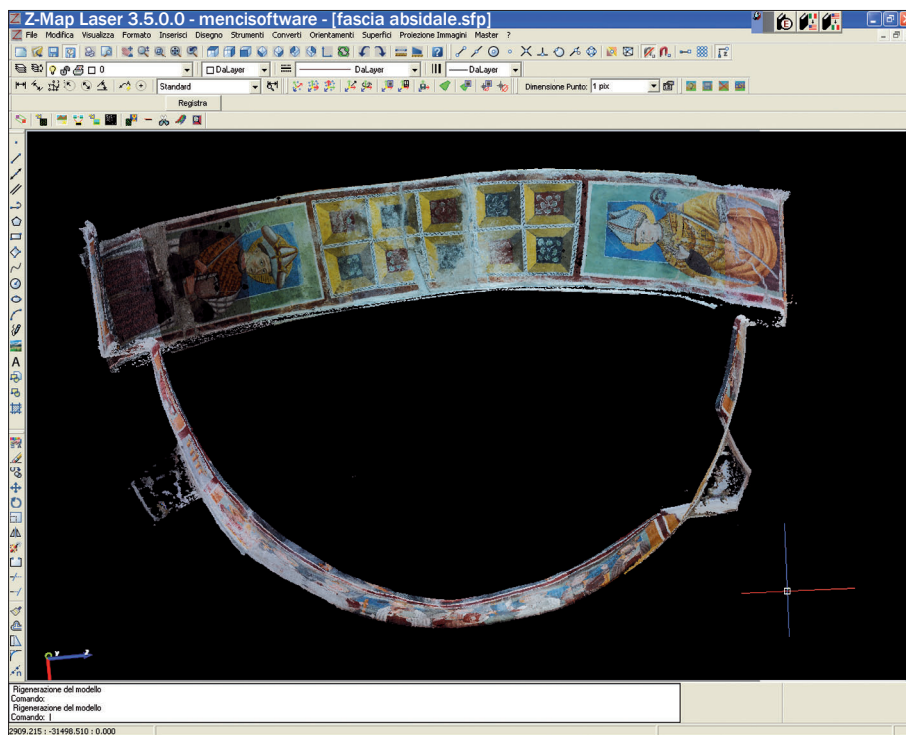
Il primo è quello che permette l'estrazione, da ogni singola sequenza di triplette di immagini, di una singola nuvola di punti che contiene informazioni spaziali e colorimetriche, in coordinate X, Y, Z e RGB (fig. 5). Dopo avere controllato, ed eventualmente corretto, l'equalizzazione del colore tra ogni scatto della tripletta (allo scopo è sufficiente un qualsiasi prodotto commerciale come *Photoshop*), le tre immagini e i parametri fondamentali della presa (*baseline* e *file* di calibrazione dell'ottica utilizzate) sono facilmente caricati nel *software* di elaborazione.

La procedura da seguire, a questo punto, consiste di quattro passaggi fondamentali:

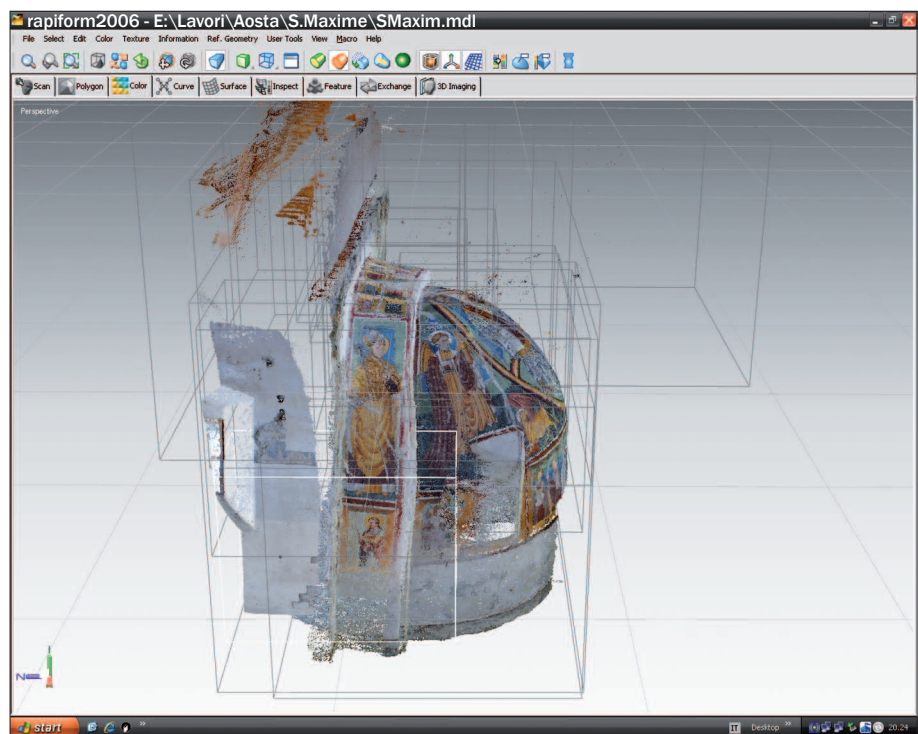
- rettifica delle immagini, mediante l'applicazione di una rettifica trinoculare e *feature matching*, che il *software* compie automaticamente (in base ai parametri dei quali si è detto) per eliminare distorsioni geometriche e ottiche;
- selezione sull'immagine dell'area di interesse (AOI) che deve essere elaborata;
- definizione del valore del passo di risoluzione desiderato, misurato in *pixel*;



7. Produzione di una singola nuvola di punti, una per ogni tripletta, automaticamente generata grazie ad un innovativo algoritmo di image processing di ZScan. (P. Salonia)



8. Una fase di registrazione di più nuvole di punti del catino absidale e dell'arco trionfale effettuata utilizzando il software ZMap Laser. (P. Salonia)



9. Una fase di registrazione di più nuvole di punti del catino absidale e dell'arco trionfale effettuata utilizzando il software Rapidform. (P. Salonia)

- produzione della nuvola di punti, una per ogni tripletta, automaticamente generata grazie ad un innovativo algoritmo di *image processing* (fig. 7).

Contestualmente, lo stesso software permette di creare automaticamente anche una superficie triangolata e texturizzata, mediante un processo di triangolazione della nuvola di punti.

In relazione con la precisione del rilievo e della restituzione dei dettagli desiderati, è stato adottato come passo di risoluzione per l'elaborazione di ogni tripletta un valore pari a 3 pixel, che corrisponde a 0,3 mm da punto a punto della nuvola generata.

Allo scopo di archiviare una rappresentazione completa, ma non ridondante, sono stati sviluppati altri due processi di elaborazione utilizzando ZMap Laser (fig. 8) e un terzo software commerciale, Rapidform della INUS Technology Inc., integrabile nel sistema generale (fig. 9).

Si è trattato della registrazione globale di tutte le nuvole di punti in un unico singolo modello 3D e della "pulizia" delle nuvole di punti stesse, al fine di eliminare le zone di sovrapposizione ed eventuali dati ridondanti.

ZMap consente due diversi tipi di registrazione: il primo, semiautomatico, si basa sul riconoscimento e sulla collimazione da parte dell'operatore di punti omologhi significativi



tra due differenti nuvole di punti (si procede, infatti, a due a due); il secondo, interamente automatico, ottimizza il primo allineamento utilizzando un algoritmo ICP.

Tali procedure sono, evidentemente, utilizzate entrambe per ogni modello da sovrapporre, cercando di compensare la propagazione di errori durante tutto il processo di orientamento; l'accuratezza media ottenuta è stata di 0,5 mm.

### L'integrazione e la gestione dei dati

Come accennato in precedenza, ai fini conservativi dell'apparato pittorico, obiettivo prioritario dell'intera operazione è di giungere ad un "utilizzo critico" dei dati acquisiti, ottimizzando processi di integrazione e di analisi in appositi ambienti informatici, fornendo, in tal modo, un valido strumento di supporto decisionale e progettuale al lavoro dei restauratori.

Su tali basi metodologiche si inserisce il contributo sperimentale dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, laddove per "utilizzo critico" si intenda la possibilità di creare appositi percorsi conoscitivi differenziati in relazione alle specifiche esigenze di un corretto ed appropriato intervento di restauro, producendo informazioni di carattere scientifico, attendibili, oggettive e di immediata interpretabilità.

I dati, pertanto, siano essi geometrici o descrittivi dello stato di conservazione, materico, ecc., saranno strutturati all'interno di un sistema informativo (ARKIS) appositamente progettato per l'integrazione di informazioni complesse ed eterogenee derivanti da diverse acquisizioni proprie di ciascuna fase dell'approccio conoscitivo al manufatto (rilievo fotogrammetrico, analisi a vista e/o strumentali).

Nel paragrafo seguente saranno descritte e specificate le principali caratteristiche del sistema scelto a supporto per la realizzazione dei prefissati obiettivi progettuali.

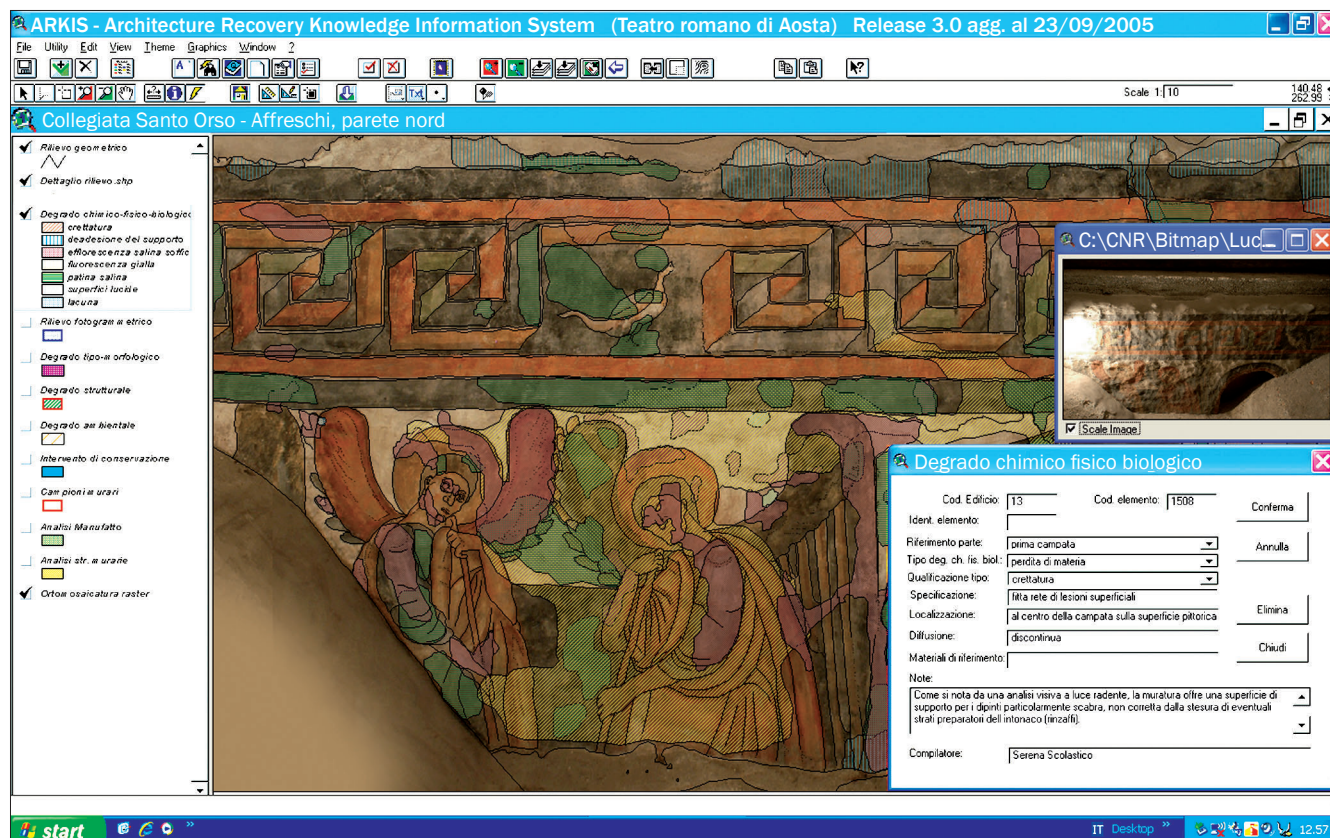
I sistemi informatici che si utilizzeranno nell'ambito del presente progetto, sono già a conoscenza della Soprintendenza, grazie alle passate esperienze effettuate e condivise sul Teatro romano di Aosta e sul ciclo di affreschi alto-medievali della Collegiata dei Santi Pietro e Orso (fig. 10). Tuttavia, per una più puntuale definizione e comprensione concettuale dell'intera progettazione, nonché per la completezza del presente documento, si ritiene opportuno e non superfluo rammentarne brevemente le peculiari caratteristiche.

### Il sistema ARKIS

Il sistema è rappresentato da un software, denominato ARKIS sviluppato in linguaggio AVENUE, in ambiente ArcView (ESRI), il cui aspetto innovativo consiste nel trasferimento delle funzionalità specifiche dei GIS (Geographical Information System) alla scala architettonica.

La struttura del sistema consente di importare direttamente, all'interno di apposite finestre, le basi geometriche (raster derivanti da ortomosaicature, vettorializzazioni ottenute mediante la digitalizzazione a monitor in ambiente CAD, ecc.) realizzate con i metodi descritti nei paragrafi precedenti o acquisite mediante scansione di altra documentazione in formato cartaceo eventualmente esistente.

Su queste basi geometriche i restauratori, o altri operatori coinvolti nel progetto, potranno graficizzare i diversi tematismi, appositamente configurati per rispondere alle esigenze di indagine della Soprintendenza (mappature



10. Integrazione dei dati geometrici e di analisi nel sistema ARKIS: il caso degli affreschi nel sottotetto della Collegiata dei Santi Pietro e Orso. (P. Salonia)

delle alterazioni di degrado, mappatura delle stratigrafie, mappatura degli interventi di restauro progressi, ecc.).

A tali tematismi, individuati in stretta collaborazione con le figure professionali preposte, saranno associate tutte le informazioni alfanumeriche preventivamente rilevate mediante opportune analisi (strumentali, "a vista", documentarie, ecc.); il sistema *ARKIS* consente, infatti, sfruttando le peculiarità tipiche dei sistemi GIS, di interrelare, attraverso una interfaccia appositamente configurata, il dato descrittivo a quello grafico, localizzando l'informazione nel punto o nell'area geometricamente esatti.

In sostanza e senza entrare troppo nel merito delle specifiche tecnico-operative, è questo il processo che consentirà di strutturare gli strati informativi necessari a configurare l'ambiente di consultazione e sintesi, ad uso degli operatori. Una precisazione va comunque fatta rispetto alla tipologia dei dati che possono essere processati all'interno del sistema *ARKIS*: nonostante si stia lavorando ad una implementazione che consenta di visualizzare ed analizzare i dati geometrici nelle tre dimensioni, al momento è possibile soltanto la gestione bidimensionale delle informazioni.

### L'integrazione dei dati in *ARKIS*

Le ortomosaicature, restituite con le tecniche sopra descritte, saranno analizzate e verrà scelto, in accordo con la Soprintendenza, un campione significativo sul quale effettuare le sperimentazioni all'interno del sistema *ARKIS*. Il campione dovrà essere sufficientemente rappresentativo, in modo da fornire un insieme di indicazioni per l'intero processo di tematizzazione e analisi.

Quale tematizzazione "pilota", si ritiene opportuno analizzare le tipologie di degrado presenti sul campione scelto. Queste, individuate con l'ausilio degli operatori secondo il consueto criterio della mappatura, saranno rappresentate graficamente sulle ortomosaicature importate all'interno del sistema. Contestualmente, mediante apposita interfaccia utente, saranno inserite anche le informazioni alfanumeriche associate ad ogni singola area di degrado, identificanti il tipo e la relativa qualificazione (ad esempio: tipo = perdita di materia, qualificazione = caduta della pellicola pittorica). Le schede per l'inserimento dati saranno comunque progettate in modo da far sempre riferimento a vocabolari appositamente configurati, che garantiscano uniformità lessicale, facilità di compiere ricerche e, soprattutto, rispondano alle esigenze del caso specifico.

I temi e le relative informazioni saranno spazialmente ed univocamente determinati, grazie al requisito della topologia che è alla base della tecnologia GIS utilizzata per l'impostazione del sistema. Nel *frame* laterale destro, saranno presenti le legende associate ai vari temi, i quali possono essere visualizzati contemporaneamente o singolarmente. Sul tema attivo si potranno effettuare le analisi e le interrogazioni, mediante gli appositi pulsanti presenti nel *frame* laterale sinistro.

Questa sperimentazione, utilizzando il sistema *ARKIS* su un campione dell'affresco, verrà effettuata in stretta collaborazione con i restauratori e gli altri operatori dell'Amministrazione regionale impegnati nel progetto, in modo da configurarsi, a tutti gli effetti, come una fase di *training on job* finalizzata al trasferimento del *know-how* così da renderli assolutamente autonomi nell'utilizzo del sistema.

*ARKIS*, reso strumento consultabile *on site*, consentirà ai restauratori di accedere e leggere i dati direttamente dal cantiere di lavoro; gli operatori della Soprintendenza potranno anche registrare nel tempo tutte le informazioni relative alle analisi di laboratorio e agli interventi di restauro, implementando la documentazione relativa al bene, nell'ottica di una sua conservazione preventiva e programmata.

### Conclusioni

La documentazione della cappella di Saint-Maxime ha rappresentato una valida occasione per sperimentare l'applicazione di una innovativa tecnologia di rilievo a basso costo per l'estrazione di dati e la ricostruzione di modelli 3D, basata unicamente sul processamento di immagini acquisite con fotocamera digitale.

Come ampiamente trattato nel testo, l'accuratezza ed affidabilità dei risultati che è possibile ottenere mediante tale tecnologia, in termini di dato numerico e di modello 3D ricostruito, è assolutamente di alto livello, almeno pari a quanto è oggi possibile ottenere con i migliori *laser scanner*, ma sicuramente maggiore se si pensa al dato RGB contestuale all'informazione geometrica. Infatti, vale ribadirlo, ogni singolo punto della nuvola nasce associato a sei numeri corrispondenti alle coordinate spaziali (X, Y, Z) e a quelle colorimetriche (RGB).

Da questo è possibile dedurre che l'informazione globale fornita possiede la duplice valenza: quantitativa perché geometricamente esatta e misurabile, qualitativa perché i valori colorimetrici dotano il modello di fotorealismo tale da cogliere i dettagli morfologici e materici.

Nel caso presentato, dunque, l'obiettivo prefissato è stato largamente raggiunto, con la produzione di un materiale complessivo finale che non solamente soddisfa le esigenze di documentazione rigorosa poste dalla Soprintendenza, ma si proietta su diversificati scenari all'interno dei quali poter concepire modalità innovative di valorizzazione e di fruizione del bene culturale.

In tempi precedenti e successivi, la tecnologia presentata è stata applicata in molte altre situazioni sperimentali.

Tra tutte, piace ricordare quelle relative allo studio di altri affreschi sottoposti a interventi di conservazione, proprio al fine di valutare l'efficacia di tali operazioni monitorando rigorosamente, da un punto di vista anche della misura oltre che del colore, la situazione prima, durante e dopo l'opera del restauratore. Il riferimento va, soprattutto, alla cappella del Manto in Santa Maria della Scala a Siena e al castello di Quart in Valle d'Aosta, casi nei quali è stata applicata la tecnologia descritta anche nella sua variante per misure submillimetriche, basate quindi su triplette di immagini digitali macro.

In conclusione, è bene rendere esplicita un'ultima riflessione sull'importanza del ruolo di chi opera nel settore dei beni culturali: quale che sia tale ruolo, i tecnici devono responsabilmente adempiere ai propri compiti promuovendo e praticando lo sviluppo costante di tecnologie sempre più affidabili, dal punto di vista del dato prodotto, ma anche sempre meno costose e proporzionate alle reali risorse delle quali il settore può disporre.

Questo rappresenta un problema centrale ed è una questione di ordine etico.

## Abstract

Knowledge must coincide with planning procedures during the restoration of any site. This activity is greatly assisted by new technology which can be used for cultural patrimony. One method which has been successfully used by the Superintendence over the last ten years for the planning, management and monitoring of monuments and painted murals is digital photogrammetry. This article illustrates a method of approach and the details of the choices relative to 3D re-construction and to restitution via digital photogrammetry which thus enables the reader to comprehend the methodological approach that is the final result of a long series of experimentation and verification.

1) M. ACETO, L. APPOLONIA, V. CHATEL, P. MIRTI, D. VAUDAN, *Combined use of FORS, XRF and Raman spectroscopy in the study of mural paintings in the Aosta Valley (Italy)*, in "Analytical and Bioanalytical Chemistry", n. 7, dicembre 2009; L. APPOLONIA, D. VAUDAN, V. CHATEL, *La fase diagnostica propedeutica al progetto di restauro: I dipinti di Giacomo da Ivrea nella cappella di Saint-Maxime a Challand-Saint-Victor*, in BSBAC, 5/2008, 2009, pp. 299-309.

2) P. SALONIA, V. BELLUCCI, S. SCOLASTICO, M. MARCOLONGO, T. LETI MESSINA, *3D survey technologies for reconstruction, analysis and diagnosis in the conservation process of cultural heritage*, in *Anticipating the future of the cultural past*, Proceedings of Cipa 2007, XXI International Symposium (Athens, 1-6 October 2007), Athens 2007.

"EPOCH" *Homepage, on line*. The European Network of Excellence on ICT Applications to Cultural Heritage (IST-2002-507382), 2006 (accesso giugno 2009).

3) R. BERTON, *Les Chapiteaux du Cloître de Saint-Ours: un bijou d'art roman au Val d'Aoste*, Novara 1954.

S. BARBERI, *Il chiostro di S. Orso ad Aosta*, in "Quaderni della Soprintendenza per i Beni Culturali della Valle d'Aosta", n. 5, n.s., 1988.

The CENOBIUM Project's, *Homepage, on line*, (accesso aprile 2009).

C. BARACCHINI, M. CALLIERI, M. CORSINI, M. DELLEPIANE, U. DERCKES, D. KEULTJES, C. MONTANI, M. SCOGNAMIGLIO, R. SCOPIGNO, R. SIGISMONDI, *Starting the CENOBIUM Project: the cloister of Monreale (Sicily) revealed*, in M. IOANNIDES, D. ARNOLD, F. NICCOLUCCI, K. MANIA (a cura di), Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST 2006 (Nicosia, Cyprus, 30 October - 4 November 2006).

4) D.M. BARBER, R.W. DALLAS, J.P. MILLS, *Laser Scanning for Architectural Conservation*, in "Journal of Architectural Conservation", 12 (1), 2006.

W. BOHLER, A. MARBS, *3D Scanning and Photogrammetry for Heritage Recording: a comparison*, in *Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics (Gävle, Sweden, 7-9 June 2004).

Il ringraziamento è dovuto ai giovani collaboratori, naturalmente rigorosamente precari, senza il quale preziosissimo aiuto, di idee e di sforzi materiali notevoli (le analisi, il rilievo, il restauro sono operazioni faticose!), le esperienze presentate non avrebbero potuto essere cominciate, sviluppate e portate a termine: in questo specifico caso, Nicole Seris, Annie Glarey, Andrea Marcolongo e Tommaso Leti Messina.

Anche questo articolo si è avvalso di testi scritti a più mani per la presentazione dei lavori a convegni internazionali (e dunque vanno citati anche l'architetto Serena Scolastico e il fisico Andrea Pozzi).

\*Collaboratore esterno: Paolo Salonia, architetto, dirigente di ricerca all'ITABC-CNR.