

## Acquisizione e riproduzione fedele della carta napoleonica del Moncenisio mediante il Sistema di Visione Attiva SVA

Marinella CADONI, Antonio CHIMIENTI  
Roberto NERINO, Giuseppe PETTITI (\*), Massimiliano SPERTINO (\*\*)  
Nicola VASSALLO (\*\*\*)

CNR Torino IEIIT, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy

(\*) tel +39 011 3919454, fax +39 011 341882, e-mail [giuseppe.pettiti@ieiit.cnr.it](mailto:giuseppe.pettiti@ieiit.cnr.it)

(\*\*) tel +39 011 3919247, e-mail [spertino@iriti.cnr.it](mailto:spertino@iriti.cnr.it)

(\*\*\*) CNR Torino IRPI, Strada delle Cacce, 73, 10135 Torino, Italy

tel +39 011 3977203, fax +39 011 343574, e-mail [nicola.vassallo@irpi.cnr.it](mailto:nicola.vassallo@irpi.cnr.it)

### Riassunto

In questo lavoro presentiamo l'applicazione del sistema di visione attiva SVA (Balsamo et al., 2007) all'acquisizione e riproduzione fedele della carta napoleonica del Moncenisio. La carta, per la sua rilevanza storica e le potenzialità informative di un eccezionale documento cartografico di questo genere, è descritta in un altro articolo (Vassallo, 2007). In questo lavoro è descritta la procedura che porta alla *digitalizzazione in forma di immagine* del presente manufatto. Questa operazione non è banale nel momento in cui si vuole ottenere una copia fedele dell'originale, senza deformazioni geometriche e con una resa fedele del colore. In più, l'immagine finale deve essere ad una elevata risoluzione spaziale, in modo che anche i minimi dettagli siano ben visibili (ad esempio delle linee fini). Il fatto di poter disporre di una copia fedele della carta napoleonica offre diverse prospettive: dagli usi consentiti dalla cartografia storica, non soltanto per scopi storico-geografici o di storia della tecnica, ma anche per finalità di tutela e di pianificazione territoriale, per citarne solo alcuni.

L'articolo descrive le procedure adottate e le difficoltà (la definizione della risoluzione adeguata, il problema dello spazio di lavoro e la sua accessibilità, la regolazione dell'illuminazione) incontrate in questo tipo di lavoro. Vengono inoltre riportati i risultati delle misure sperimentali atte a valutare la qualità dell'immagine finale in termini di fedeltà rispetto all'originale.

### Abstract

In this work the implementation of the active vision system SVA (Balsamo et al., 2007) is presented, for the acquisition and the faithful reproduction of the Napoleonic map of Moncenisio. Due to its historic relevance and information contents, the map is described in a companion paper (Vassallo 2007). In our article the image digitalization process of this historical map has been described. This operation was not trivial since the aim of the project is to obtain a digital copy of the map without geometric distortions and with precise colorimetric information. Moreover, the aim is to produce a final digital image at very high resolution so that also small details are captured (e.g. thin lines). The availability of a reliable copy of this Napoleonic map offers several opportunity of exploitation: historical cartography and the history of cartographic techniques, cultural heritage preservation and fruition being the most obvious.

The paper describes the adopted procedures and the difficulties (resolution, working space and its accessibility, illumination problems) met in this work and examines the possible commercial alternatives. In the end, the performance of this techniques are evaluated by comparing the acquired map with the original one.

### 1. Introduzione

L'acquisizione di informazione relativa a superfici pittoriche, tipicamente affreschi, richiede l'utilizzo di un sistema che sia trasportabile e in grado di eseguire misure geometriche e colorimetriche correlate. Infatti esiste una correlazione tra le due tipologie di dati (geometrico e colorimetrico) (ad es.: il colore percepito dipende anche dalla geometria di ripresa). Allo scopo di rispondere alle esigenze di flessibilità, trasportabilità e maneggevolezza sopra descritte, è stato progettato e realizzato dal gruppo di visione attiva dell'IEIIT del CNR di Torino un Sistema di Visione Attiva (SVA), che è in grado di operare su volumi di lavoro di qualche decina di metri cubi. Il sistema è dotato di calcolatore per il controllo automatico delle operazioni.

Il sistema SVA è stato progettato e realizzato all'interno del progetto *SIINDA*, per rispondere alle esigenze di acquisizione e monitoraggio di opere d'arte che non possono essere trasportate, tipicamente superfici architettoniche, affreschi, in un volume di lavoro di qualche decina di metri cubi.

Lo strumento (Figura 1 e 2) si compone di tre telecamere allineate lungo un asse comune  $\gamma$ . Due di queste telecamere (TL1 e TL2) sono equipaggiate con teleobiettivi in modo da inquadrare solo piccole porzioni di una scena ad alta risoluzione. Esse possono essere ruotate di angoli noti sia attorno agli assi di pan  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , sia all'angolo di tilt  $\gamma$ , in modo da fissare (puntare) qualsiasi punto della scena. Una delle TL è equipaggiata con filtri spettrali che le consentono l'acquisizione di immagini a colori della superficie esaminata ad alta risoluzione. La terza camera è equipaggiata con un'ottica grandangolare (WA) che le consente di inquadrare l'intera regione di interesse a bassa risoluzione.

Il principio di funzionamento è il seguente: SVA viene posto di fronte al soggetto che si vuole acquisire in modo tale che la telecamera WA inquadri tutta la regione di interesse. L'immagine della WA viene processata per individuare le strutture che sono di interesse per il compito specifico corrente e quindi le telecamere TL vengono fatte convergere su ciascuna di esse (puntamento) per eseguire le misure richieste (es. misure geometriche, colorimetriche).

In condizioni di puntamento la posizione spaziale del punto fissato, viene ottenuta per triangolazione in avanti degli assi ottici delle telecamere TL, a partire dalla conoscenza della base di misura (interasse tra TL1 e TL2) e degli angoli  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , e  $\gamma$ . L'evoluzione 3D della superficie nell'intorno del punto di fissazione viene invece ricostruita in modo denso a partire dalla coppia di immagini stereo TL; a ciascun punto della superficie 3D risultano quindi associate le coordinate cromatiche misurate con l'uso dei filtri spettrali così da permettere una rappresentazione realistica della scena.

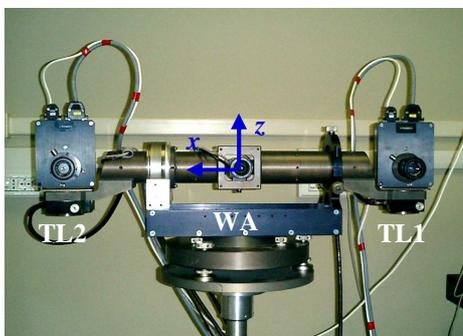


Figura 1 – Vista frontale del SVA

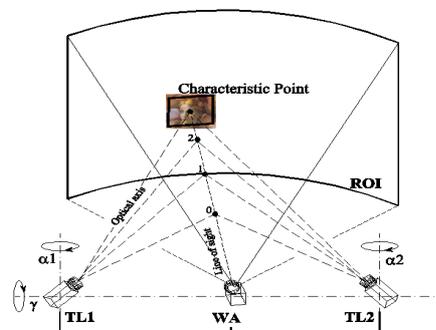


Figura 2 – Operatività del SVA

Lo strumento consente inoltre la misura colorimetrica di larghe superfici (corrispondenti all'area inquadrata dalla WA), la quale risulta impossibile agli strumenti fotometrici classici (per approfondimenti sull'applicazione dello strumento nell'effettuare misure colorimetriche si rimanda a (Balsamo et al., 2006)). Superfici di questo tipo sono acquisite come un insieme di tasselli di immagine, parzialmente sovrappontesi, i quali poi vengono assemblati utilizzando un algoritmo specifico di "mosaicatura" che garantisce il mantenimento dell'accuratezza dell'acquisizione.

Nel caso di scene a geometria complessa (es. statue, superfici molto estese) una singola vista non è sufficiente a rappresentare l'intera superficie e quindi occorre effettuare più prese. Al fine di combinare più prese in una singola descrizione globale, occorre che vi sia un'adeguata sovrapposizione tra le diverse viste.

Il sistema è stato testato in laboratorio e sul campo. Una delle applicazioni più significative ha riguardato l'acquisizione della mappa napoleonica del Moncenisio. La mappa è conservata presso la

sede centrale dell'ANAS di Torino (vedi figura 3), fissata su un supporto piano rigido ed appesa alla parete. La mappa non può essere rimossa dal suo supporto per evitare che si danneggi.



Figura 3 – Particolare dell'originale della mappa napoleonica del Moncenisio conservata presso la sede centrale dell'ANAS di Torino.

Le sue dimensioni sono di 6 (larghezza)  $\times$  1.5 (altezza) *m* ed è composta sia da strutture rilevanti (montagne, strade, edifici, laghi, ...) sia da strutture fini, come le linee usate per costruire i riferimenti topografici, o le scritte.

Lo scopo di questo lavoro è la descrizione della procedura adottata per l'acquisizione della mappa e per la visualizzazione sia su supporto digitale che cartaceo.

L'articolo è organizzato come segue: il processo di acquisizione dei dati è descritto in sezione 2, in sezione 3 è descritta la procedura di calibrazione colorimetrica necessaria per la realizzazione dell'immagine mosaico finale (descritta in sezione 4). I risultati sperimentali sono presentati in sezione 5 e in sezione 6 le conclusioni.

## 2. Il processo di acquisizione

Per ottenere immagini a fuoco e con una risoluzione sufficiente a distinguere i più piccoli dettagli sulla mappa è stato necessario modificare la lunghezza focale di uno dei teleobiettivi e posizionare il sistema SVA ad una distanza di circa 1.5 *m* dalla mappa. La dimensione del campo inquadrato dalla WA in queste condizioni operative è risultato essere di circa 150  $\times$  100 *cm*, pertanto si è reso necessario fare più riprese spostando il sistema in posizioni diverse. Per poter riferenziare dal punto di vista geometrico le diverse riprese ad un sistema di riferimento comune e solidale con la mappa, sono stati apposti dei *marker* sulla superficie di appoggio della mappa. I *marker*, presenti nella zona in comune a due viste diverse, sono serviti per calcolare le rototraslazioni necessarie a registrare tra loro le diverse acquisizioni. E' stato necessario effettuare 5 riprese per poter riprendere la mappa nel suo insieme. La singola ripresa è così organizzata:

1. *Posizionamento del sistema SVA.* Il sistema viene posizionato in modo tale per cui il campo inquadrato dalla WA contenga almeno 3 *marker* in comune con l'immagine WA della presa precedente (problema del referenziamento).
2. *Controllo dell'illuminazione.* Si acquisisce una immagine di una tabella di colori di riferimento (*Carta di GretagMacbeth*). Questa carta è un insieme di quadrati colorati di cui si conoscono le coordinate colorimetriche per un particolare illuminante.
3. *Estrazione e misura 3D dei marker.* Un programma specifico estrae e misura automaticamente la posizione 3D dei *marker* presenti nel campo inquadrato dalla WA.
4. *Calcolo dei parametri di roto-traslazione tra due viste.* Nota la posizione dei *marker* in due prese consecutive il calcolo della roto-traslazione che lega le due viste, è ottenuto mediante un *fit* ai minimi quadrati (Kanatani, 1994).

5. *Acquisizione delle immagini ad elevata risoluzione.* La superficie inquadrata dalla WA viene acquisita come un insieme di tasselli di immagine TL parzialmente sovrapposti, ottenuti da una scansione sequenziale della scena effettuata con il teleobiettivo dotato dei filtri spettrali. Ciascun tassello è costituito da una matrice di 1536 x 1024 *pixel* a 14 *bit/pixel* di profondità

### 3. Calibrazione colorimetrica

Una delle telecamere del sistema SVA è dotata di 3 filtri spettrali per la misura del punto di colore delle superfici. Considerata la regione spettrale di interesse questi filtri verranno indicati con R, G, B, anche se non corrispondono alle coordinate cromatiche standard usate nella rappresentazione delle immagini. Per fornire le misure secondo gli standard, il segnale fornito da questi filtri deve prima essere convertito nelle componenti CIE X, Y, Z mediante matrici di trasformazione, e quindi nelle componenti CIE L\*a\*b\* con formule standard. Gli elementi di queste matrici costituiscono i parametri che devono essere calibrati. La procedura di calibrazione consiste nel misurare dei campioni di colore (es. utilizzando la carta di GretagMacbeth) sia con il sistema SVA (R, G, B) sia con un colorimetro campione (X, Y, Z), e quindi nel trovare i parametri che minimizzano l'errore della trasformazione da R, G, B a X, Y, Z. Poiché gli elementi delle matrici di trasformazione sono funzione della temperatura di colore dell'illuminante tali parametri sono stati calcolati utilizzando una sorgente luminosa con caratteristiche note. Le informazioni di colore nelle componenti L\*a\*b\* possono essere quindi ulteriormente convertite nelle sistema di coordinate di colore relativo al sistema di *rendering* utilizzato (display, stampante, videoproiettore). In questo caso la conversione è dipendente dal sistema di riproduzione e per una corretta riproduzione del colore deve essere noto il profilo di colore del sistema utilizzato (*ICC profile*).

### 4. Costruzione dell'immagine mosaico

L'immagine complessiva per ciascuna vista è ottenuta mediante un'operazione di mosaicatura dei singoli tasselli TL. Il metodo di mosaicatura da noi usato sfrutta le caratteristiche del sistema SVA e la conoscenza dei parametri di calibrazione per correggere i tasselli di immagine dall'effetto delle distorsioni geometriche. I singoli tasselli TL vengono poi proiettati su di una sfera di riferimento, dove viene effettuata una prima registrazione locale mediante *cross-correlazione*. Viene infine effettuata una registrazione globale minimizzando globalmente l'errore di registrazione in funzione dei parametri di criticità della registrazione locale. La procedura di mosaicatura ha come sua base teorica la modellizzazione geometrica del sistema SVA e sfrutta la conoscenza dei parametri ottici e geometrici delle telecamere e la conoscenza della geometria della superficie ripresa. Per maggiori dettagli e approfondimenti si rimanda a (Grattoni, Spertino 2003).

### 5. Risultati sperimentali

In figura 4 è riportata l'immagine mosaico finale, ridotta in scala 1 : 16. L'immagine mosaico a piena risoluzione ha le seguenti caratteristiche: è a colori a 24 *bit* (8 *bit* per ciascuna componente di colore), di dimensioni 47000 x 15000 *pixel* e con una risoluzione di 0.1 *mm/pixel*. In figura 5 è visibile una porzione di mosaico in scala 1:1 dove è possibile apprezzare l'elevata risoluzione spaziale: si riescono a distinguere chiaramente le linee tracciate dall'autore della mappa che misurano non più di 1/10 di *mm*.

L'errore di registrazione medio dei tasselli immagine nel mosaico si avvicina al rumore di acquisizione e l' 85% dei pixel immagine nelle regioni di sovrapposizione dei tasselli presenta un disallineamento geometrico inferiore a 0.1 *pixel*.

Sono stati effettuati anche dei test per verificare che effettivamente l'immagine mosaico finale non presentasse deformazioni geometriche rispetto all'originale. Questo aspetto è molto importante, perché l'assenza di deformazioni permette di effettuare delle analisi geometriche affidabili sulla



Figura 4 – Immagine mosaico della mappa napoleonica in scala 1 : 16.



Figura 5 – Dettaglio in scala 1 : 1 dell'immagine mosaico di figura 4.

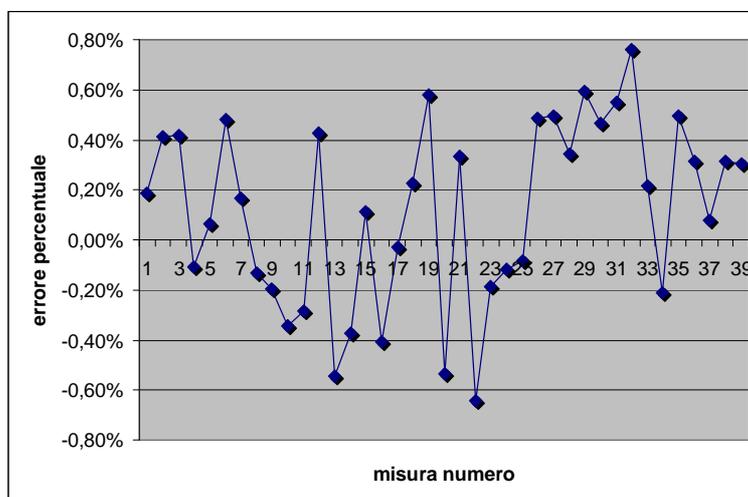


Figura 6 – Risultati delle misure geometriche: in ascissa il numero identificativo della misura e in ordinata l'errore relativo percentuale.

copia della mappa, evitando così di sottoporre l'originale a inutili rischi di danneggiamento o deterioramento. E' stata eseguita perciò una campagna di misure di distanze relative tra coppie di punti sulla mappa originale, con un'incertezza di misura di circa 1 mm. Sono stati analizzati 24 punti, scelti in modo che il loro insieme si distribuisse su tutta la mappa e in maniera tale che fossero individuabili con elevata accuratezza da parte di un operatore. Le distanze prese hanno coperto diversi punti della mappa e con valori da pochi centimetri a più di 5 m. Successivamente questi valori sperimentali sono stati confrontati con le misure ottenute dopo aver individuato gli stessi punti sull'immagine mosaico. I risultati del confronto sono riportati in figura 6. L'errore quadratico medio delle misure calcolate sull'immagine digitale rispetto alle misure di riferimento è

di circa 1.4 mm, valore confrontabile con l'accuratezza con cui sono state effettuate le misure di riferimento.

## 6. Conclusioni e futuri sviluppi

Nel presente articolo è stata presentata la procedura di acquisizione e *digitalizzazione* ad elevata risoluzione della mappa napoleonica del Moncenisio, utilizzando il sistema di visione attiva SVA. Questo strumento di misura rispetto ad altri tradizionali (scanner per acquisizione di mappe di grosse dimensioni) ha il vantaggio di essere trasportabile e maneggevole, pertanto risulta utile in tutte quelle situazioni in cui non è possibile rimuovere il manufatto. In più con questo strumento le misure colorimetriche e geometriche risultano perfettamente correlate al singolo pixel.

I risultati saranno oggetto di specifiche valutazioni, anche allo scopo di calibrare opportunamente le metodiche sia di acquisizione che di elaborazione delle immagini. In ogni caso il fatto di poter disporre di una copia digitale di questo "unicum" (non si conoscono infatti altre copie della carta) si può considerare già un risultato positivo di per sé. Allo stadio attuale della sperimentazione è sicuramente apprezzabile, inoltre, il fatto di poter approfondire l'esame delle tecniche adottate per la rappresentazione su carta dei rilievi topografici. L'immagine digitale ottenuta ha messo infatti in evidenza un reticolo geometrico (riconducibile alle operazioni preliminari al riporto dei rilievi su carta), sottostante alla colorazione e non completamente percepibile ad occhio nudo, mentre altre osservazioni potranno essere fatte sui procedimenti di colorazione e di sfumo per rappresentare i diversi aspetti della geomorfologia. In prospettiva, e questo era uno dei principali obiettivi di partenza, sarà possibile effettuare confronti a vari livelli, con altre carte topografiche sia dell'epoca precedente sia di anni successivi. Nel caso del Moncenisio tale confronto appare particolarmente promettente ed interessante in quanto si dispone eccezionalmente di cartografie che si spalmano con una certa regolarità nell'arco di un secolo tra il 1750 e il 1850, eseguite peraltro con tecniche diverse e che contrassegnarono un periodo importante del progresso della tecnica topografica. Va da sé che tali confronti potranno fornire utili informazioni ad altri utenti abituali e potenziali della cartografia storica, non soltanto per scopi storico-geografici o di storia della tecnica, ma anche per finalità di tutela e di pianificazione territoriale, tanto più se si considera la particolare valenza che sotto vari profili e in particolare sotto il profilo storico, paesaggistico e naturalistico riveste l'area del Moncenisio.

## Riferimenti bibliografici

- Balsamo A., Chimienti A., Grattoni P., Nerino R., Pettiti G., Rastello M.L., Spertino M. (2006), "Active vision applications to cultural heritage acquisition and monitoring", *Journal of Cultural Heritage*, Volume: 7, Issue: 2, pp. 98-109.
- Balsamo A., Chimienti A., Gattoni P., Nerino R., Pettiti G., Rastello M.L., Spertino M., (2006), "Active vision system for 3D surface color measurements", *ISCC/CIE Expert Symposium*, pp. 31-33.
- Grattoni P., Spertino M. (2003), "A Mosaicing Approach for the Acquisition and Representation of 3D Painted Surfaces for Conservation and Restoration Purposes", *Machine Vision and Applications (MVA)*, Vol. 15, pp. 1-10.
- Kanatani K. (1994), "Analysis of 3-D Rotation Fitting", *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Int. PAMI*, n.16, vol. 5, pp.543-549.
- Vassallo N. (2007), "La carta della strada napoleonica del Moncenisio: rilevanza storica e potenzialità informative di un eccezionale documento cartografico", *Atti dell'undicesima Conferenza Nazionale ASITA*.