

PROBLEMATICHE NEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DI STRUMENTI MUSICALI

Riccardo RONCELLA*, Gianfranco FORLANI*, Livio PINTO**

* Università di Parma – Dip. Ing. Civile, Via Usberti, 181/a, 43100 PARMA –
{riccardo.roncella, [gianfranco.forlani](mailto:gianfranco.forlani@unipr.it)}@unipr.it

** Politecnico di Milano – DIIAR, P.za L. da Vinci 32, 20133 MILANO – livio.pinto@polimi.it

Riassunto

Nel rilievo di precisione di oggetti di grande pregio occorre tipicamente impiegare tecniche che non implicino contatti o manipolazioni della superficie, come la fotogrammetria o il laser a scansione; nel caso dei violini, tuttavia, la vernice di cui sono ricoperti ha finora reso impossibile l'uso della seconda tecnica. Un rilievo preliminare ha invece mostrato che, pur con problemi legati all'illuminazione dell'oggetto, la fotogrammetria digitale e la ricostruzione di superficie per correlazione di immagini sono invece in grado di ottenere le precisioni richieste, dell'ordine del decimo di mm.

Abstract

Surveying valuable craftworks, such as old musical instruments, requires non contact measurements; the obvious candidate technology for such a task would today be laser scanning. Because of the reflective paint used on violins, though, it turned out to be very difficult. Controlling illumination and using a projected pattern, digital photogrammetry coupled with image correlation techniques for surface reconstruction is capable to provide the requested accuracy, in the order of a tenth of a mm, although through careful survey design and execution.

Introduzione

Nel rilievo non-topografico nel settore dei vicini le richieste più stringenti in termini di precisione sono spesso accoppiate alla necessità che il rilievo sia effettuato con tecniche non distruttive o addirittura senza contatto. Esempi sono comuni nell'industria biomedica, nel controllo di qualità dell'industria manifatturiera, nell'archeologia, nel restauro e nella conservazione dei beni architettonici, ecc. Un caso particolare riguarda la riproduzione di strumenti musicali, ed in specie quelli antichi, dei quali si vuole ricostruire la forma della cassa armonica per riottenere le medesime caratteristiche di eccellenza del suono. Gli antichi strumenti musicali ad arco (in particolare violini e viole) vengono studiati e riprodotti nelle liuterie, facendo riferimento ad alcune sezioni, lungo particolari direzioni longitudinali e trasversali dello strumento, tramite delle "dime" che documentano le curvature dello strumento (Gatti, 1999). Le precisioni in gioco sono solitamente millimetriche o sub-millimetriche. Si tratta in definitiva di una prototipale tecnica di "Reverse Engineering" (RE), metodologia che permette, partendo dal modello fisico, la costruzione di sistemi di copiatura per la replicazione senza modifiche dello strumento-modello, al giorno d'oggi sostituita da un modello numerico. Dal modello numerico (DSM o nuvola di punti) ottenuto dal rilievo dello strumento musicale è quindi possibile estrarre le sezioni volute, che possono poi essere impiegate nella realizzazione delle dime, eventualmente anche attraverso macchine a controllo numerico. Le precisioni elevate e le dimensioni limitate indicano nella tecnologia laser il candidato ideale per rilievi di questo tipo; tuttavia le riflessioni provocate dalla vernice di cui sono ricoperti i violini

hanno finora impedito di raggiungere risultati soddisfacenti. Anche la tecnica fotogrammetrica, che come il laser non entra in contatto con il modello (alcuni strumenti non possono essere maneggiati; altri, pur venendo quotidianamente suonati per mantenerne inalterate le caratteristiche musicali, non possono essere trasportati), risente del problema delle riflessioni. Tuttavia in questo caso, oltre a poter evitare i fenomeni di multi-path che affliggono il rilievo laser, vi è una maggior possibilità di controllo delle condizioni del rilievo per cui, con un'opportuna progettazione del blocco fotogrammetrico, dell'illuminazione e della segnalizzazione, è possibile raggiungere le precisioni sub-millimetriche richieste. Utilizzando algoritmi robusti ed automatici di riconoscimento dei punti omologhi la densità di punti è, se non sempre confrontabile con quella ottenuta impiegando laser a scansione, sufficiente allo scopo.

L'occasione per una verifica operativa della tecnica è stata offerta dal rilevamento di un violino storico di proprietà della Scuola di Liuteria "A. Stradivari" di Cremona. A tale scopo è stata effettuata una serie di prese preliminari, per mettere a fuoco le problematiche specifiche del rilievo.

Il rilievo preliminare: problematiche e risultati della ricostruzione

Il rilievo è stato effettuato sospendendo verticalmente il violino, con una pinza che ne serrava il *manico*. Per orientare con precisione le immagini si è predisposto uno sfondo della scena che fornisse punti ben distinti, non essendo consentito porre target sul violino; sono stati impiegati due fogli, uno appoggiato orizzontalmente e l'altro verticalmente, con stampato il pattern di calibrazione di Photomodeler™. Per controllare l'illuminazione erano disponibili due lampade su treppiede, dotate di schermatura. Tuttavia, malgrado svariati tentativi, a causa della curvatura del violino non è stato possibile riprendere dalle angolazioni ideali dal punto di vista della geometria di presa senza evitare la presenza di riflessioni. Per quanto riguarda la tessitura, non essendo certi che quella propria del violino fosse sufficiente per il matching, si è preparata una diapositiva con pattern random, da proiettare, mediante proiettore per PC, direttamente sullo strumento. Per la messa in scala è stato inquadrato anche un righello posto a fianco del violino.

Le prese sono state effettuate con una camera Nikon D70 (risoluzione 3000x2000; pixelsize = 7.8 μm) con obiettivo da 90 mm, da 9 posizioni disposte approssimativamente ai vertici, al centro e nel punto medio dei lati di un rettangolo di circa 1.5 m di base e 1.0 di altezza, ad una distanza di circa 1.5 m dal violino. Le prese sono convergenti con angoli tra gli assi ottici inferiori a 30°.

Il pattern di sfondo per l'orientamento è risultato meno utile di quanto atteso; da un lato, infatti, la molteplicità dei punti di legame è risultata piuttosto bassa a causa della distanza tra violino e sfondo e degli angoli piuttosto marcati tra le immagini. Per contro, esso provoca nelle immagini riprese dall'alto verso il basso un riflesso evidente sulla parte inferiore del *fondo* o della *tavola armonica*. Per ottenere una struttura dei punti di legame efficace per l'orientamento del blocco fotogrammetrico, ci si propone, nel rilievo vero e proprio, di sospendere attorno allo strumento fili di nylon con appesi target sferici facilmente riconoscibili.

In questa fase il blocco di immagini è stato quindi orientato con Photomodeler impiegando prevalentemente punti visibili in tutte le foto, collimati sul violino. Date le caratteristiche della tessitura superficiale, caratterizzate da striature trasversali, le immagini riprese alla medesima quota mal si prestano ad essere impiegate nel matching a coppie, dal momento che la linea epipolare risulta circa parallela alla tessitura. Si è scelto quindi di impiegare nella ricostruzione di superficie solo coppie verticali, per le quali l'epipolare presenta un angolo di circa 90° con la tessitura delle fibre di legno.

Per le immagini del *fondo* del violino, prive di pattern proiettato, non si sono tuttavia ottenuti risultati soddisfacenti: solo un numero molto piccolo di punti (alcune centinaia) è stato riconosciuto come omologo (con valori del coefficiente di correlazione sufficientemente elevati) e solo in alcune zone del *fondo*. La ragione è emersa con un attento esame di ingradimenti delle immagini. Infatti, seppur le venature del legno potrebbero essere sufficienti a garantire la buona riuscita del processo, le caratteristiche di luminosità e trasmittanza della vernice superficiale introducono risposte

cromatiche differenti in funzione dell'angolatura del punto di vista, creando problemi di riconoscibilità dei punti soprattutto con basi di presa non piccole (vedi figura 1).

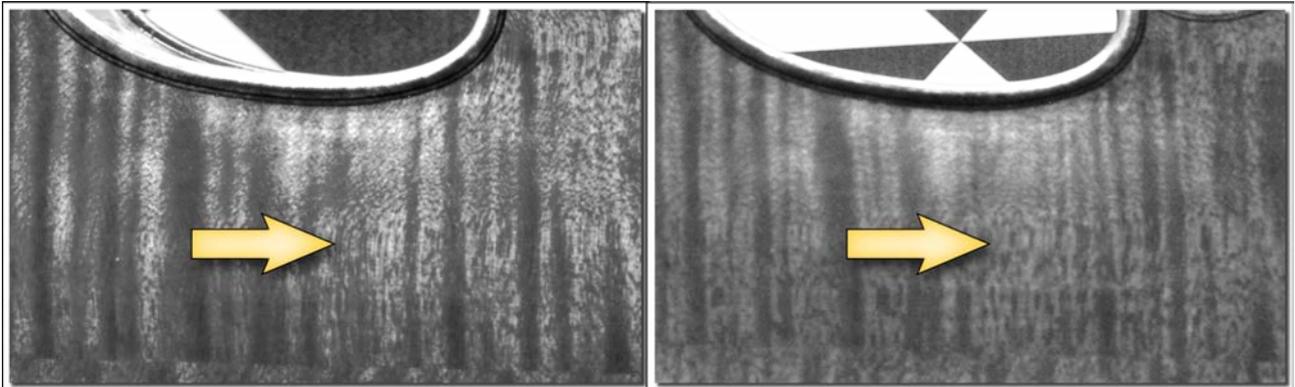


Figura 1 – Ingrandimento della zona centrale del fondo del violino in due immagini riprese da punti diversi: si nota come, al variare del punto di vista, la vernice trasparente superficiale influenzi in maniera non trascurabile la risposta cromatica dell'oggetto, modificando talvolta anche drasticamente le caratteristiche di contrasto degli elementi della tessitura.

Impiegando invece quelle relative alla tavola armonica, le sole sulle quali è stato proiettato il pattern sintetico, si aumenta la riconoscibilità di punti omologhi, che raggiungono una densità e disposizione sufficiente a descrivere la superficie (figura 2.a. e 2.c.). In questo caso il pattern risente molto meno dell'effetto sopra citato e quindi il riconoscimento degli omologhi non dipende più soltanto dalla tessitura naturale; al tempo stesso la griglia regolare, che esprime la quadrettatura dei pixel dello schermo, si dimostra di per sé sufficiente allo scopo. La figura (vedi figure 2.b. e 2.d.) mostra una vista del wireframe ottenuto a partire dai punti restituiti, per la porzione destra della tavola armonica.

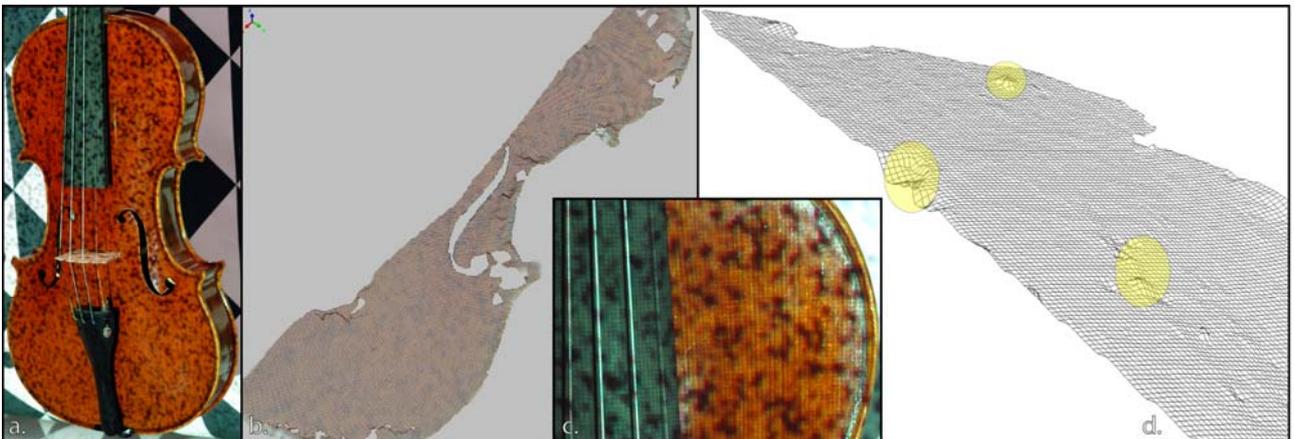


Figura 2 – Ricostruzione della tavola armonica ottenuta dalle immagini con pattern sintetico proiettato sul violino: a. Lo strumento con pattern proiettato; b. Rappresentazione wireframe della ricostruzione della metà destra dello strumento; c. Ingrandimento del pattern utilizzato: è possibile notare come l'utilizzo del proiettore aumenti i problemi di riflesso; d. Particolare della mesh ottenuta con evidenziati in giallo alcuni degli errori di ricostruzione riscontrati.

Come si vede in particolare dalla figura 2.d., in prevalenza la superficie risultante è liscia, il che lascia supporre la correttezza sostanziale del risultato. Restano tuttavia ancora, in più punti, errori di ricostruzione della superficie; questi possono essere dovuti sia a riflessioni indesiderate del proiettore sia ad una dimensione eccessiva di alcune delle zone scure del pattern. Per la riduzione

degli errori si conta, nel rilievo vero e proprio, di impiegare più coppie e quindi confrontare le superfici andando a mediare, con una tecnica robusta, dove le soluzioni sono discordi; un grado ulteriore di lisciamento potrebbe poi essere ottenuto con una approssimazione con funzioni adatte.

La simulazione delle prese fotogrammetriche di un modello fotorealistico del violino

Indipendentemente dai risultati empirici della ricostruzione del violino e dalla stima delle precisioni della ricostruzione sulla base della compensazione del blocco e della conseguente restituzione, è importante disporre di una indicazione sulla precisione teorica di un simile rilevamento, ovvero di dati di riferimento indipendenti dal rilievo stesso. A questo scopo si è ritenuto di effettuare una simulazione realistica dell'intero procedimento, non limitandosi alla pura determinazione della precisione dipendente dalla configurazione di presa, assunta a priori una precisione del matching. Uno dei problemi principali per una corretta valutazione delle precisioni in un progetto di fotogrammetria digitale è infatti la stima realistica della precisione della determinazione degli omologhi attraverso la correlazione di immagini; anche se il least squares matching (l.s.m.) restituisce delle sigma di stima, queste sono spesso piuttosto ottimistiche.

Si è quindi pensato di impiegare un modello di violino con geometria nota, cui associare una tessitura realistica (quella ricavata dalle riprese) e di generare poi delle immagini sintetiche a partire da una geometria di presa assegnata. Il modello, in formato STL e relativo al solo fondo dello strumento, è costituito da 248 vertici che formano 358 facce triangolari. Utilizzando un modellatore solido è stato effettuato il *draping* della tessitura e sono state generate immagini sintetiche con focale della camera e risoluzione immagine simile a quella delle prese. Le immagini generate (vedi figura 3.) sono analoghe, per condizioni di presa, alla terna verticale centrale delle prese realizzate effettivamente. In particolare i punti di presa sono nel piano di simmetria longitudinale del violino, la distanza di presa tra le camere è di 75 cm, gli angoli di convergenza sono prossimi a 30° e la distanza oggetto è di 1.5 m. In queste condizioni l'epipolare è molto prossima a 90° rispetto alla tessitura del violino sull'immagine. Osservando la parte inferiore del fondo nelle immagini si nota poi che, per l'impiego dei triangoli e il grado di discretizzazione del modello piuttosto rozza, la superficie non cambia curvatura con continuità come in un violino reale, ma lungo segmenti di retta.



Figura 3 – Immagini generate da un modello virtuale di violino per determinare empiricamente l'ordine di grandezza delle precisioni di restituzione del least squares matching.

Per studiare l'effetto del riflesso si è inserito il modello digitale del violino in un ambiente virtuale costituito da una serie di superfici piane di colore bianco che simulassero le condizioni di luce diffusa del caso reale. Utilizzando gli algoritmi di ray tracing del software di modellazione è stato quindi possibile generare immagini che presentassero fenomeni di riflessione variabile in funzione del punto di vista. Non è stato tuttavia modellato il comportamento della vernice trasparente sulla superficie del violino cui si è accennato nel precedente paragrafo.

Ricostruzione di superficie

La ricostruzione di superficie è stata effettuata con una sola coppia di immagini sintetiche, quella centrale e quella inferiore, con un algoritmo di dense l.s.m. (Zhang, 1992; D'Apuzzo, 2003; Roncella, 2006) implementato in linguaggio C#. Si tratta di un metodo di infittimento di tipo parallelo, in cui ogni nuovo punto generato dalla correlazione non dipende dal risultato ottenuto su quelli circostanti. Il metodo si appoggia ad una griglia di seed points (tipicamente i punti di legame impiegati per l'orientamento, eventualmente integrati da altri in zone con morfologia complessa) a partire dai quali si effettua una predizione, nello spazio immagine, dei valori dei parametri di matching. Le posizioni omologhe approssimate si ricavano dal campo di parallassi; anche i valori approssimati dei parametri di forma del l.s.m, se necessario, possono essere stimati con un procedimento simile. Nel caso specifico, data la superficie a debole curvatura, sia il campo di parallassi sia le variazioni dei parametri di forma sono piuttosto regolari. In ogni caso, per diminuire la dipendenza dai dati iniziali, si procede entro i livelli di una piramide di immagini con risoluzioni via via decrescenti, con una progressiva densificazione dei seed point e quindi con una migliore descrizione dell'andamento dei parametri approssimati per il livello successivo. Nel caso specifico sono stati adottati 3 livelli di risoluzione, infittendo anche la spaziatura tra punti (da 1 punto ogni 8 pixel ad 1 punto ogni 2 pixel), con una finestra di matching di 17 pixel.

Nel processamento delle immagini simulate non si è ritenuto di ripetere la fase di orientamento delle immagini, essendo l'obiettivo principale quello di controllare le prestazioni del matching denso con questo tipo di tessitura. La qualità dell'orientamento incide certamente sulle prestazioni, ma soprattutto laddove la superficie dell'oggetto presenta asperità, occlusioni, ecc. che non possono essere ben approssimate dall'interpolazione (questo è vero in effetti anche in caso di pattern ripetitivo). Pertanto, i parametri di orientamento esterno adoperati sono privi di errore. Per quanto riguarda i seed point, anche essi sono assunti privi di errore, essendo stati impiegati circa un centinaio dei punti della mesh del modello riproiettati sui singoli fotogrammi.

Complessivamente sono stati determinati circa 840.000 punti; l'elaborazione ha richiesto circa 70' su un PC con 2GB di RAM e frequenza di clock di 3 GHz.

Infine, dalla nuvola di punti ottenuta dal matching si è ricavato un DSM del fondo dello strumento che è stato confrontato con la superficie originale utilizzata per generare le immagini, in modo da avere una stima dell'errore medio di ricostruzione e mettere in evidenza eventuali problemi da parte del matching. Dalla mappa a colori di figura 4, che rappresenta la distanza puntuale fra le due superfici, si può notare come gli errori siano decisamente contenuti (dell'ordine di alcuni centesimi di millimetro). La mappa mette anche in evidenza come le discrepanze maggiori si concentrino prevalentemente nelle zone del modello in cui la curvatura superficiale presenta discontinuità (si confronti con figura 3.): in queste zone l'ipotesi di modellazione delle variazioni prospettiche del l.s.m. di zone approssimativamente piane viene a cadere con conseguente deterioramento delle precisioni di stima. Il problema tuttavia non dovrebbe presentarsi nel caso reale, in cui la curvatura superficiale cambia con continuità.

Conclusioni

I risultati delle prove effettuate hanno messo in evidenza che, così come per il laser, anche per le tecniche fotogrammetriche la vernice superficiale è il principale ostacolo alla ricostruzione del violino. Si prevede tuttavia di poter giungere ad un risultato soddisfacente, per precisione e completezza, lavorando su due aspetti. Il primo riguarda la ripresa delle immagini, che verrà effettuata tramite sequenze, ovvero con basi di presa corte. Questo consente di poter adoperare con successo tecniche di Structure&Motion che diminuiscono l'importanza del ricorso a punti di legame esterni e risentono molto poco della variazione del punto di vista tra le immagini adiacenti. La ricostruzione verrà tuttavia effettuata impiegando coppie con basi sufficientemente lunghe. Il secondo riguarda un maggior controllo sulla illuminazione e sull'impiego del proiettore (con o

senza pattern sintetico) al fine di rendere il matching poco dipendente dall'apparenza della texture del violino nelle diverse immagini.

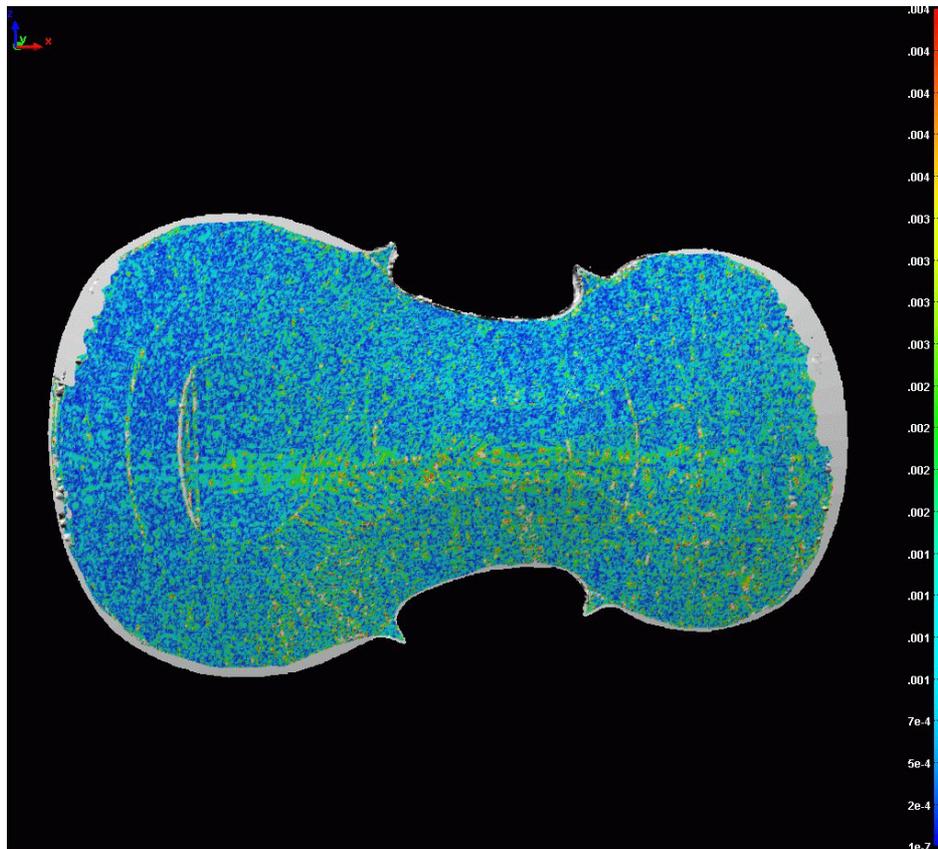


Figura 4 – Mappa delle distanze fra superficie stimata tramite il matching denso e quella originale da cui sono state generate le immagini

Ringraziamenti

Si ringrazia il preside della scuola di Liuteria “A Stradivari” di Cremona, per aver messo a disposizione il violino e l’arch Fulvio Smerieri, docente della stessa scuola, per aver collaborato durante la fase di presa fotogrammetrica.

Bibliografia

- A. Gatti, (1999). Moulding Castings in Musical Instruments: The Approach to the Problem, the Scientific Investigations and the Methodology Used at the Collection of Musical Instruments of the Castello Sforzesco in Milan, The Galpin Society Journal, Vol. 52., pp. 202-218.
- N. D’Apuzzo, (2003). Surface measurement and tracking of human body parts from multi station video sequences. Ph.D Thesis. Zurich 2003 IGP Mitteilung Nr. 81.
- R. Roncella, (2006). Sviluppo e applicazioni di tecniche di fotogrammetria dei vicini. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, Università di Parma.
- Z. Zhang, J. Zhang, X. Wu, H. Zhang, (1992). Global Image Matching with Relaxation Method, The International Colloquium on Photogrammetry, Remote Sensing and Geographic Information Systems, Wuhan, China, 175-186.