

Studio di un sistema di visione per la mappatura colorimetrica della Sindone di Torino

Ing. Mariolino De Cecco, Prof. Giulio Fanti^(*)

CISAS G. Colombo (Centro Interdipartimentale Studi ed Attività Spaziali)
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Padova
Via Venezia 1, 35137 Padova - Italy
tel.+39-49-8276804, fax+39-49-8276785, e-mail: <fanti@mail.dim.unipd.it>

SOMMARIO

Vengono proposti due diversi sistemi di visione da utilizzarsi per una possibile futura mappatura colorimetrica a media ed alta risoluzione della Sindone di Torino.

Definiti i requisiti dell'apparato sperimentale vengono discusse le soluzioni costruttive adottate.

Individuati poi gli effetti principali di disturbo quali la temperatura, il rumore termoelettrico del sensore, l'illuminazione non uniforme, la mutua influenza cromatica fra i campioni e la distorsione geometrica, vengono proposte alcune soluzioni sia procedurali che numeriche per ridurre l'incertezza di misura causata da tali disturbi.

Viene infine presentato un esempio applicativo di correzione cromatica di una copia del volto dell'uomo della Sindone di Torino.

ABSTRACT

Two different vision systems employable for a future normal and high colorimetric-mapping of the Turin Shroud are proposed. Once defined the requirements of the experimental apparatus, the resulting design is discussed.

Some procedural and numerical solutions are proposed to reduce the measurement uncertainty due to the principal influence quantities such as: temperature, thermoelectric noise, non-uniform lighting, chromatic influence of the standard samples and geometrical distortion.

An example to reduce chromatic effects in an extreme case corresponding to the acquisition of the man face of the Turin Shroud is presented and discussed.

^(*)Nota: per fini puramente accademici, il contributo individuale dei singoli autori è specificato come segue: M. De Cecco (40%) ha messo a punto il software per l'elaborazione delle immagini, ha elaborato gli algoritmi per la riduzione degli effetti interferenti ed ha curato la parte sperimentale con G. Fanti (60%) che ha sviluppato la proposta presentata in un lavoro precedente ed ha impostato il metodo di riduzione degli effetti dei disturbi nell'acquisizione delle immagini.

1) INTRODUZIONE

Nonostante gli innumerevoli studi scientifici eseguiti sulla Sindone di Torino (ST) abbiano chiarito diversi aspetti, rimangono tuttora irrisolti diversi quesiti, il primo dei quali riguarda la determinazione del meccanismo che ha causato l'immagine corporea dell'Uomo della Sindone.

A questo riguardo sono state fatte diverse ipotesi tra cui l'effetto di un fenomeno energetico legato alla Resurrezione^[1], l'effetto dell'aloè e mirra che ha interagito col sudore del corpo avvolto nel telo^[2], l'effetto chimico per contatto corpo-lenzuolo analogo a quello che si riscontra negli erbari^[3], la strinatura^[4], etc. Di tutte le ipotesi fatte, tranne la prima che non è facile da sostenere per problemi di sconfinamento scienza-religione, tutte le altre sono state dimostrate inaccettabili perché non permettono di ottenere completamente le particolari caratteristiche dell'immagine corporea.

E' quindi necessario eseguire uno studio multidisciplinare che tenti di chiarire, almeno in parte, diversi aspetti finora oscuri del fenomeno; è prevista, a partire dal 2000 una campagna di misure sulla ST, in collaborazione fra scienziati di fama mondiale, per cercare di fare luce su alcuni aspetti ancora oscuri.

Per chiarire diversi punti è necessario disporre anche di una mappatura ad alta definizione del lenzuolo, eseguita con tecniche innovative. A questo riguardo è già stata presentata^[5] una proposta di mappatura colorimetrica ad alta risoluzione spaziale e cromatica da eseguirsi con sistemi di visione artificiale basati su fotocamere digitali e maschera colorimetrica per l'analisi comparativa fra colori campione e l'immagine della ST.

La proposta di mappatura colorimetrica ad alta risoluzione dimensionale e cromatica^[5] ha lo scopo di: a) ottenere, a vari livelli di risoluzione, un data base della ST per studi futuri; b) eseguire una colorimetria digitale a livello di pixel utile per diverse applicazioni, tra cui anche una correlazione tra la massa del corpo umano e la possibile radiazione che avrebbe causato l'immagine corporea; c) eseguire una colorimetria digitale in grado di evidenziare la stabilità temporale o l'eventuale degrado colorimetrico dell'immagine; d) ottenere una ricostruzione tridimensionale ad alta risoluzione dell'intero corpo umano raffigurato.

A differenza dei tradizionali spettrofotocolorimetri che trasformano le misure spettrali di aree di immagine nei corrispondenti valori tristimolo (componenti RGB del rosso, verde e blu), il sistema proposto permette, con più limitata risoluzione cromatica (se non si utilizzano per esempio filtri a banda stretta), di acquisire i valori tristimolo non mediati sull'intera area di acquisizione, ma corrispondenti a ciascun punto (picture element = pixel) dell'immagine acquisita.

Se per esempio si acquisisce una porzione di immagine della ST con sensore avente 3000x2000 pixel, si avranno 6.000.000 di informazioni colorimetriche diverse, ciascuna in riferimento alla singola areola acquisita dal pixel. Sarà quindi possibile eseguire analisi comparative fra i diversi valori tristimolo dei singoli punti dell'immagine corporea o delle impronte di sangue, etc. .

In questo lavoro viene considerata la risoluzione cromatica di diversi sistemi digitali al fine di ottimizzare il sistema e le procedure di acquisizione. La stabilità cromatica dell'immagine acquisita è un requisito fondamentale, fortemente dipendente dalle condizioni di illuminazione e dal "rumore elettrico" del sistema di acquisizione e di supporto.

Vengono qui affrontati più in dettaglio problemi metrologici riguardanti l'acquisizione e la correzione delle immagini in modo da ridurre l'incertezza di misura sia nei valori cromatici che in quelli della posizione superficiale dei pixel delle immagini ottenute.

2) TIPI DI MAPPATURE COLORIMETRICHE PROPOSTE

In riferimento al lavoro precedente^[5], è stata prevista l'esecuzione di quattro mappature della ST a diversa risoluzione spaziale; in particolare:

-2a) mappatura ad altissima risoluzione (per future analisi dettagliate su particolari quali monetine e lettere): tali immagini, di dimensioni di qualche centimetro, hanno dimensioni dei pixel dell'ordine del micrometro.

-2b) mappatura ad alta risoluzione mediante la quale si può ottenere una mappatura di 48 immagini in orizzontale per 12 immagini in verticale con dimensione dei pixel dell'ordine di tre centesimi di millimetro.

-2c) mappatura a media risoluzione mediante la quale si può ottenere una mappatura di 8 immagini in orizzontale per 3 immagini in verticale con dimensione dei pixel dell'ordine di due decimi di millimetro.

-2d) mappatura a bassa risoluzione per ottenere un quadro d'unione costituito da sole 4 immagini corrispondenti all'intero lenzuolo, con dimensione dei pixel dell'ordine del millimetro. Tale mappatura è inoltre utilizzabile per controllare i valori medi di colorimetria tristimolo ottenuti mediante le mappature a più elevata risoluzione.

Sono state previste mappature che utilizzano luce riflessa proveniente da opportuni illuminanti che interessano il campo della luce visibile (per esempio tipo D₆₅), ma l'analisi potrebbe essere estesa anche a mappature in fluorescenza eccitata da sorgenti di luce ultravioletta se fosse di interesse l'evidenziazione delle impronte di sangue della ST e delle macchie di siero che circondano le tracce di sangue.

3) REQUISITI DELL'APPARATO SPERIMENTALE E PROCEDURA DI ACQUISIZIONE

Il sistema di acquisizione per la mappatura colorimetrica della ST richiede che siano soddisfatti diversi requisiti in modo da ottenere un sistema sufficientemente stabile dal punto di vista meccanico, metrologicamente accettabile e sufficientemente veloce per permettere l'acquisizione di molte immagini in tempi limitati.

La colorimetria proposta è di tipo relativo in quanto esegue un confronto fra i valori acquisiti punto per punto (a livello di pixel) della ST e quelli mediati di un campione di riferimento pretratarato.

Si prevede per il momento di acquisire i valori tristimolo del colore della ST tramite acquisizione con sensori a colori tipo RGB (Red, Green, Blu); nel caso però interessasse una colorimetria a banda più stretta si possono utilizzare sensori B/N ad elevata sensibilità (Bianco e Nero) accoppiati con un'opportuna ruota porta filtri contenente una ventina o più di filtri a banda stretta.

I principali requisiti da soddisfare sono i seguenti.

3.1) Stabilità meccanica del sistema di visione.

Il sistema mobile di acquisizione di immagini comprende una fotocamera o videocamera con:

- distanziatore per mantenere costante, durante ogni tipo di mappatura, la distanza fra il sensore e la ST e quindi minimizzare la variazione dimensionale del campo di vista,
- maschera di supporto di colori campione,
- piano di riferimento per la taratura preventiva del sistema,
- struttura di supporto (che potrebbe essere un cavalletto spostabile su rotaie vincolate al pavimento),
- sistema di illuminazione eventualmente compresa una sfera di integrazione.

La struttura di supporto deve essere ottimizzata dal punto di vista:

- strutturale per minimizzare possibili vibrazioni del supporto,
- meccanico per mantenere distanze ed inclinazioni predefinite durante l'intera mappatura del lenzuolo in modo da ridurre possibili distorsioni geometriche.

In funzione del tipo di mappatura eseguita (vedi §2), sono stati progettati diversi sistemi di acquisizione; uno schema di tali sistemi è rappresentato in figura 1.

3.2) Scelta dei campioni di colore

Si prevede di eseguire un'analisi di colorimetria tristimolo della ST relativa a 3 campioni di riferimento caratterizzati da altrettanti colori predominanti mutuamente indipendenti. Ovviamente, nel caso si decidesse di eseguire un'analisi cromatica a più alta risoluzione tramite filtri a banda stretta, i campioni devono aumentare.

Tali campioni, opportunamente tarati mediante spettrofotometri di qualità, devono permettere di convertire i risultati colorimetrici della ST in valori conforme alla normativa CIELAB-76, CIELUV o CIELCH.

Deve innanzitutto essere risolto il problema metrologico della scelta dei campioni che dovrebbero soddisfare le seguenti quattro condizioni fondamentali; un campione può essere scelto in modo arbitrario, ma deve essere:

- 1) dotato di minima incertezza;
- 2) riproducibile in diversi laboratori attrezzati;
- 3) accessibile nel senso che deve poter essere utilizzato per misurazioni di riferimento;
- 4) invariabile nel tempo ed in seguito a variazioni ambientali quali temperatura, umidità, etc.

Dato che i materiali plastici, costituenti diversi campioni standard non soddisfano completamente la quarta condizione (per esempio possono variare le loro proprietà colorimetriche dopo qualche decina di mesi se sono esposti a luce solare), si preferisce fare riferimento, almeno in parte a campioni metallici.

Potrebbe essere scelto per esempio un campione di oro e uno di platino puri al 999,9%.

Dato che la finitura della superficie del campione influisce sull'acquisizione, si può definire una superficie opaca ottenuta con una particolare procedura di lavorazione sufficientemente dettagliata. Si può inoltre definire un metodo di controllo a posteriori, per esempio basato sull'analisi di rugosità.

3.3) Acquisizioni di immagini di elevata qualità

Il sistema di acquisizione digitale deve essere scelto in modo da minimizzare il "rumore termoelettrico" del sensore.

La presenza di rumore causa infatti variazioni dei livelli di colore, anche di $\pm 1\%$, che possono aumentare l'incertezza di valutazione colorimetrica oltre i limiti accettabili per la presente analisi (vedi §4.2). Sono possibili due soluzioni, che potrebbero essere entrambe adottate:

- 1) utilizzo di normali sensori CCD o CID di fotocamere o di telecamere ad alta risoluzione in condizioni ambientali (temperatura) stabili e acquisizione di un centinaio di immagini dello stesso soggetto; l'immagine risultante dalla media di tali acquisizioni sarebbe dotata di una varianza più ridotta (in questo caso di un fattore 10) nell'ipotesi che il rumore sia solamente di origine casuale;
- 2) utilizzo di sensori raffreddati a temperature criogeniche che hanno costi più elevati, ma hanno migliori caratteristiche di stabilità del segnale acquisito.

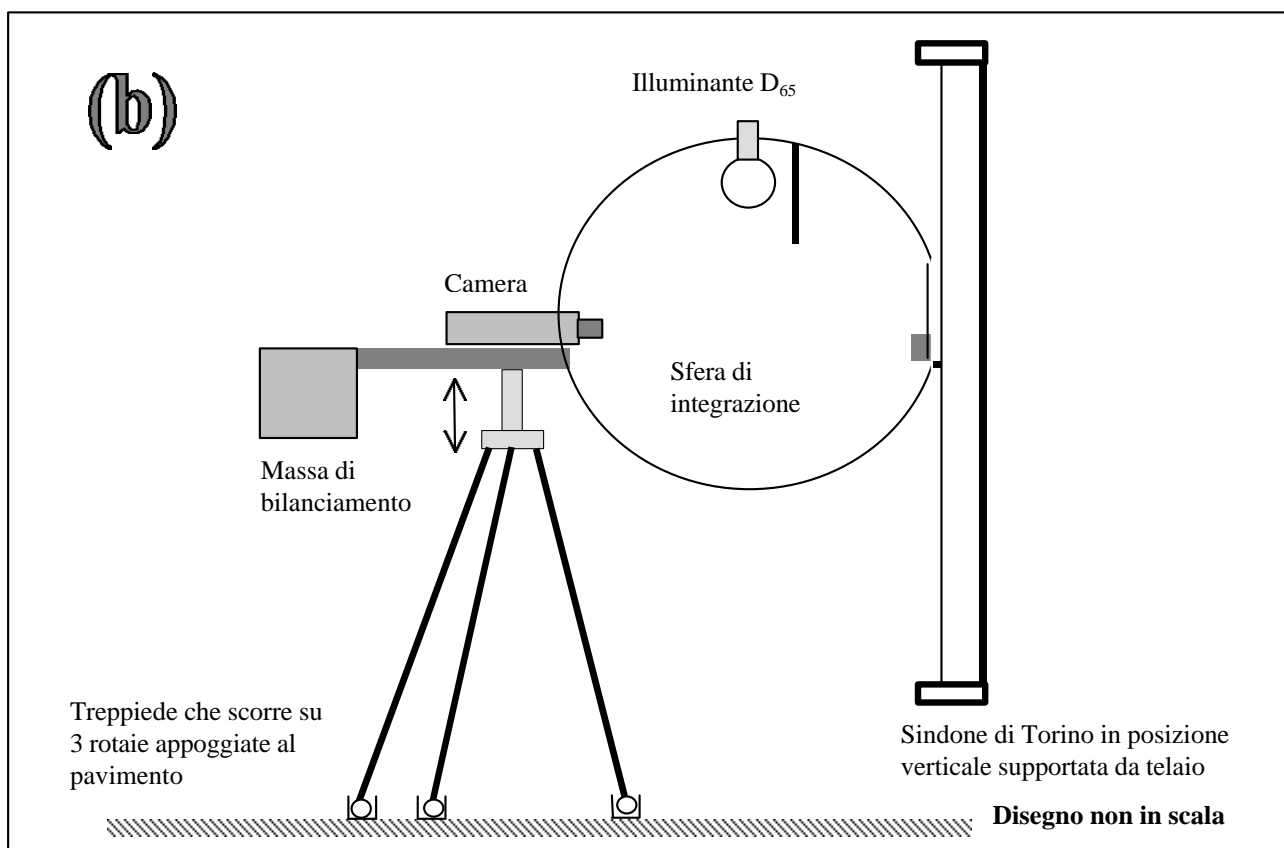
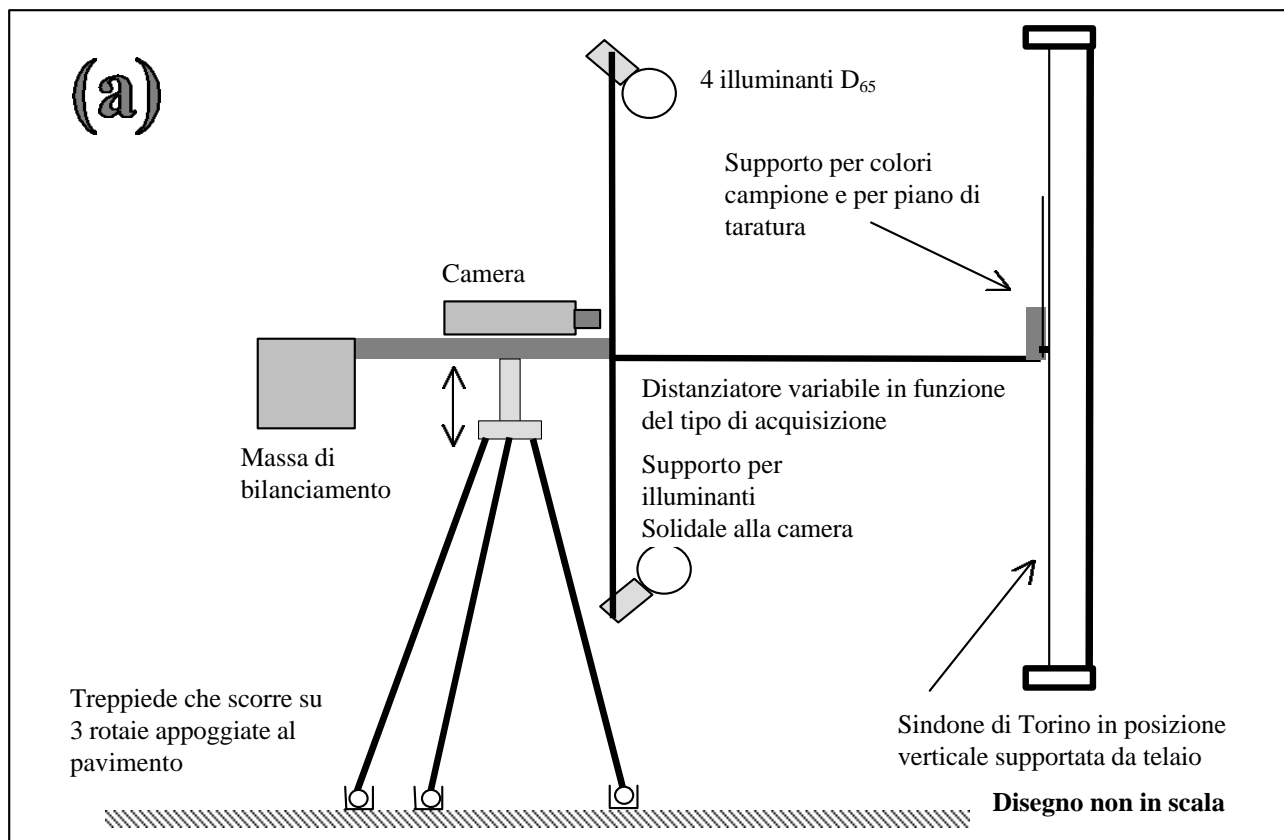


Fig. 1: Schema dei sistemi di acquisizione; nella figura (a) è indicato il sistema previsto per le mappature (2c, 2d); nella figura (b) è indicato il sistema previsto per le mappature (2a, 2b) con campi di vista più limitati che rendono utilizzabili sfere di integrazione di dimensioni accettabili.

3.4) Sistema di illuminazione

Si prevede di utilizzare diversi apparati sperimentali in funzione del tipo di mappatura da eseguirsi sulla ST: in particolare una superficie relativamente ridotta del campione da acquisire può permettere l'utilizzo di sfere di integrazione di dimensioni accettabili, in grado di fornire un'illuminazione diffusa praticamente uniforme; d'altra parte, se si devono acquisire immagini di dimensioni dell'ordine del metro (quali sono quelle previste per la mappatura (2d) a bassa risoluzione) l'utilizzo di sfere di integrazione richiederebbe spazi con volumi quasi proibitivi e difficoltà di gestione della procedura di acquisizione.

Perciò si prevede l'uso di una sfera di integrazione con illuminanti D_{65} a luce diretta (illuminante con temperatura del colore di 6500 K) per le mappature (2a, 2b) ad altissima e ad alta risoluzione, mentre si preferisce utilizzare un quadruplo illuminante D_{65} posto a 45° (come previsto dalla normativa CIE-Commission International d'Eclairage) per le mappature (2c, 2d) a media ed a bassa risoluzione.

3.5) Procedura

E' importante definire una procedura dettagliata da seguire durante tutte le mappature colorimetriche. Tale procedura deve inoltre tenere conto del fatto che potrà essere utilizzata anche fra qualche decennio o secolo se sarà monitorato il possibile degrado dell'immagine corporea della ST.

In ogni caso la procedura deve essere definita in modo da minimizzare tutte le possibili fonti di incertezza, alcune delle quali saranno discusse nei prossimi paragrafi.

Per esempio deve essere prevista la possibilità di inserire, sul piano dell'immagine da acquisire, opportuni piani tarati di riferimento (di colore uniforme e contenenti opportune griglie di riferimento) in modo tale da disporre delle informazioni necessarie a correggere gli effetti sistematici più influenti quali ad esempio distorsioni geometriche e disuniformità di illuminazione.

4. METODOLOGIE DI RIDUZIONE DEGLI EFFETTI DI DISTURBO

Il sistema di mappatura colorimetrica che viene proposto è soggetto a diverse fonti di incertezza dovute sia al sistema di acquisizione delle immagini, sia alle condizioni di illuminazione che alla percentuale delle diverse intensità cromatiche presenti nell'immagine stessa.

In questo paragrafo sono discussi sia la natura che le modalità di compensazione dei principali effetti di disturbo agenti sul sistema di visione; si rimanda ad altra sede la trattazione di effetti locali, caratteristici dello specifico sensore, quali per esempio la presenza di pixel difettosi ed i loro effetti sui pixel adiacenti (cross-talk).

4.1 Effetto della temperatura

La temperatura è un disturbo tipico che nel caso dei sistemi di visione influenza principalmente il sensore della fotocamera o della telecamera ad alta risoluzione. Si ritiene infatti trascurabile in questa sede l'effetto dimensionale (traslazione e rotazione) del piano di riferimento rispetto al sistema di acquisizione.

Non si ritiene che la temperatura sia un possibile disturbo sulla variazione della radiazione emessa dal campione (ST) perché, alla temperatura ambiente ed in condizioni di opportuna illuminazione esterna, l'effetto risulta trascurabile.

Se si utilizzano sensori raffreddati, il rumore è certamente ridotto, ma in ogni caso devono essere stabilite nella procedura le diverse temperature di lavoro (per esempio ambiente a 20 ± 1 °C e sensore a -190 ± 6 °C) in modo da ridurre gli effetti sistematici conseguenti a escursioni termiche.

4.2 Effetto del rumore termoelettrico

Il sensore CCD di una telecamera è rappresentabile come un insieme di tre matrici di fotodiodi, ciascuna sensibile alle tre componenti fondamentali: rosso, verde e blu (RGB). Sugli elementi primari hanno influenza sia il rumore termico, sia il rumore elettronico di conversione dell'energia luminosa in tensione.

L'effetto del rumore non è sempre visibile a livello macroscopico (se la risoluzione spaziale dell'occhio umano è inferiore a quella dell'immagine, il sistema visivo umano media le diverse tonalità dei colori rendendo apparentemente uniforme l'immagine acquisita). Se si esegue uno zoom ingrandendo le dimensioni di ogni pixel, vedi figura 2, tale effetto diviene evidente (mediante zoom si rende la risoluzione dell'occhio maggiore di quella del sistema di visione).

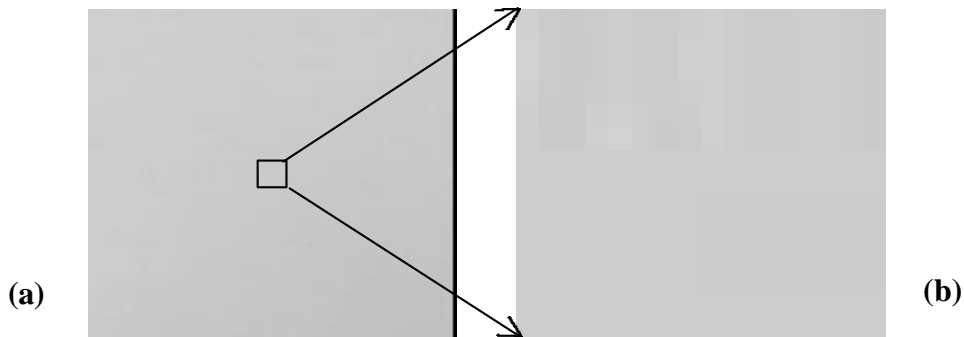


Fig. 2 Nell'immagine (a), acquisita con risoluzione di 512x512 pixel, viene mostrata in B/N la sola componente del rosso. L'immagine (b) è amplificata 80 volte rispetto all'immagine (a): in questo modo il rumore termoelettrico diviene più evidente.

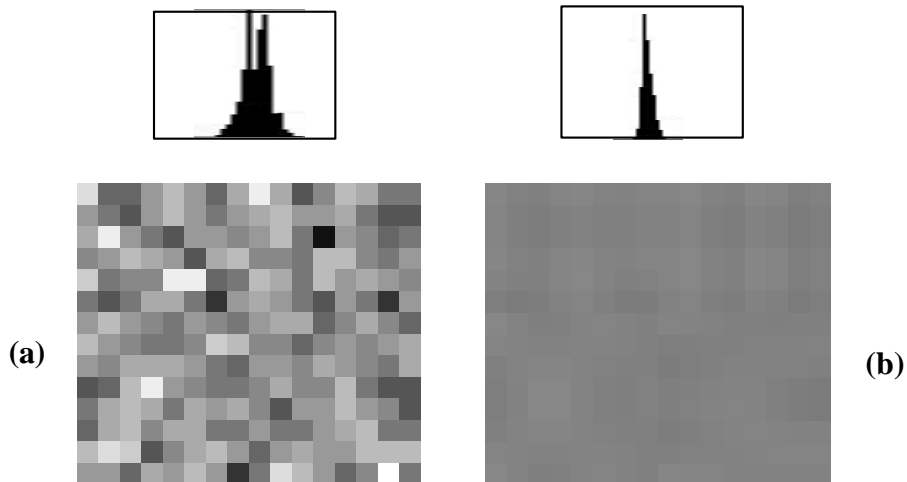


Fig. 3: la figura (a) indica il risultato dell'equalizzazione dell'immagine 2b. E' riportato inoltre (sopra) l'istogramma dei livelli di colore in cui è evidente un effetto di non ripetibilità. In figura (b) è riportata la corrispondente immagine risultato della media di dieci acquisizioni.

La natura prevalentemente casuale del presente effetto ha portato alla definizione della seguente procedura di compensazione: acquisizione di un numero N di immagini e media, per ogni singolo pixel, sui livelli corrispondenti a ciascuna immagine.

Definendo S la varianza del livello di intensità in una delle tre bande RGB, per ogni singola immagine, si ha una diminuzione della varianza della media S_m , dipendente dal numero N di acquisizioni secondo la relazione:

$$S_m = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

Per mostrare l'effetto della compensazione mediante un numero di N=10 immagini è stata prima operata una equalizzazione degli istogrammi per aumentare il contrasto e rendere più visibile l'effetto dell'immagine di figura 2, quindi sono state effettuate le medie. In figura 3a sono mostrati gli zoom dell'immagine 2a equalizzata (con il relativo istogramma dei livelli di grigio più in alto). In figura 3b è riportato il corrispondente risultato delle medie.

4.3 Effetto dell'illuminazione non uniforme

La non uniforme illuminazione del campione può provocare variazioni nel livello di intensità luminosa dei singoli pixel non dipendente dalle caratteristiche della superficie dell'oggetto di cui viene eseguita la mappatura, bensì dalla orientazione degli illuminanti, dalle componenti spettrali della luce incidente o dall'ottica. Tali effetti tendono sistematicamente a variare l'intensità luminosa nei bordi

Una volta definiti e posizionati i componenti del sistema di visione, l'effetto descritto può essere considerato di natura sistematica. Nella procedura di mappatura colorimetrica della ST si è quindi prevista una prima fase di acquisizione dell'immagine di un campione con livello colorimetrico uniforme posizionato negli stessi punti della ST ed orientato con stesso angolo. Mediante tale immagine è possibile compensare gli sistematici esaminati. La procedura consiste nel moltiplicare i livelli di ogni pixel per un opportuno fattore di correzione determinato mediante taratura preventiva.

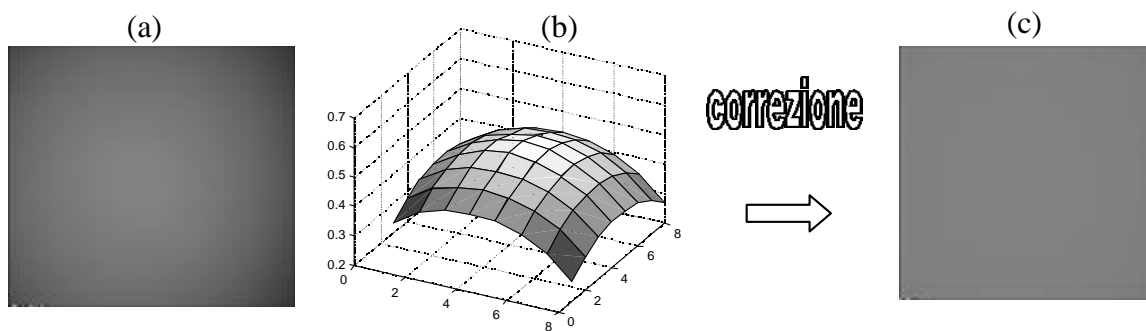


Fig. 4 Da sinistra a destra sono mostrate: (a) l'immagine originaria del campione colorimetrico uniforme illuminata in modo non uniforme, (b) il diagramma tridimensionale della funzione $C(x,y)$ e (c) il risultato della compensazione effettuata sull'immagine (a).

Le immagini di figura 4 si riferiscono ad un campione uniforme. L'immagine 4(a) presenta una distribuzione del livello di rosso marcatamente più intensa al centro rispetto ai bordi.

Il diagramma tridimensionale di figura 4(b) mostra un'interpolazione dei livelli di colore acquisiti in figura 4(a) come funzione bidimensionale $I(x,y)$, dove x ed y sono le posizioni dei pixel all'interno dell'immagine ed I il corrispondente livello del pixel.

Se si desidera riportare il livello di rosso dell'immagine (a) a quello del pixel centrale $I_u(x_c, y_c)$, si determina la funzione compensatrice $C(x, y)$ mediante interpolazione con funzioni polinomiali o spline:

$$C(x, y) = I(x, y) / I_u(x_c, y_c) \quad (2)$$

Per compensare l'immagine durante una mappatura della ST basta dividerla pixel per pixel per la funzione $C(x, y)$ ottenuta nella fase di acquisizione con campione uniforme. Nella figura 3(c) viene mostrato l'effetto della compensazione effettuata sul campione.

4.4 Mutua influenza cromatica fra ST e campioni

E' noto^[6] che il livello medio di colore acquisito mediante CCD da campioni di colore uniforme non è stabile, ma dipende dagli altri oggetti presenti nell'immagine (dalla loro intensità cromatica e dalla superficie relativa).

Per indagare tale effetto nel caso dell'acquisizione di immagini della ST, si sono acquisite le tre immagini di figura 5: l'immagine (a) di un campione di colore rosso uniforme nel campo intero di vista della telecamera, l'immagine (b) di una riproduzione del volto della ST da sola, e (c) l'immagine di entrambi contemporaneamente presenti nel campo di vista.

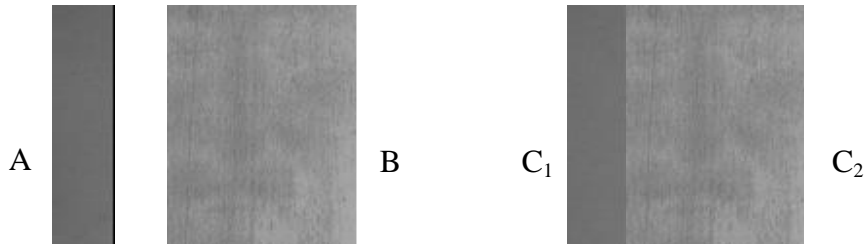


Fig. 5 Acquisizione del solo campione rosso (A), della sola riproduzione della ST (B) ed acquisizione di entrambe le immagini nello stesso campo di vista (C_1 e C_2).

Nella tabella 1 sono riportate le medie dei livelli di colore dei singoli pixel appartenenti alle quattro porzioni di immagini mostrate in figura 5, valutati per le tre bande di colore.

Immagine	Rosso	Verde	Blu	Valore medio RGB
A Rosso	107.6	44.9	53.8	68.2
B ST	139.4	108.3	93.0	116.3
C₁ Rosso (con ST)	112	47.2	56.0	71.3
C₂ ST (con Rosso)	138.9	108.3	92.1	115.7

Tab. 1 Risultati delle medie per le tre immagini A, B, C_1 e C_2 di figura 5.

La variazione delle medie è più marcata per il campione e pari a circa il 4.5 %, e più ridotta per la ST, pari allo 0.5 %. Il rapporto di tali variazioni è inversamente proporzionale al rapporto delle aree delle immagini stesse. L'effetto sul livello medio di grigio di un oggetto A da parte di un oggetto B è tanto più marcato quanto più l'area di B è grande relativamente all'area di A.

4.5 Distorsione geometrica

L'ottica del sistema di visione, in azione combinata con gli effetti prospettici, tende a deformare gli oggetti acquisiti nel campo di vista.

In figura 6(a) è mostrata l'immagine di una griglia sulla quale è possibile discernere l'effetto a botte. Nella figura 6(b) viene quantificato tale effetto tramite un diagramma cartesiano che riporta il numero di pixel sulle righe orizzontali comprese tra i punti s e t in funzione dell'ordinata.

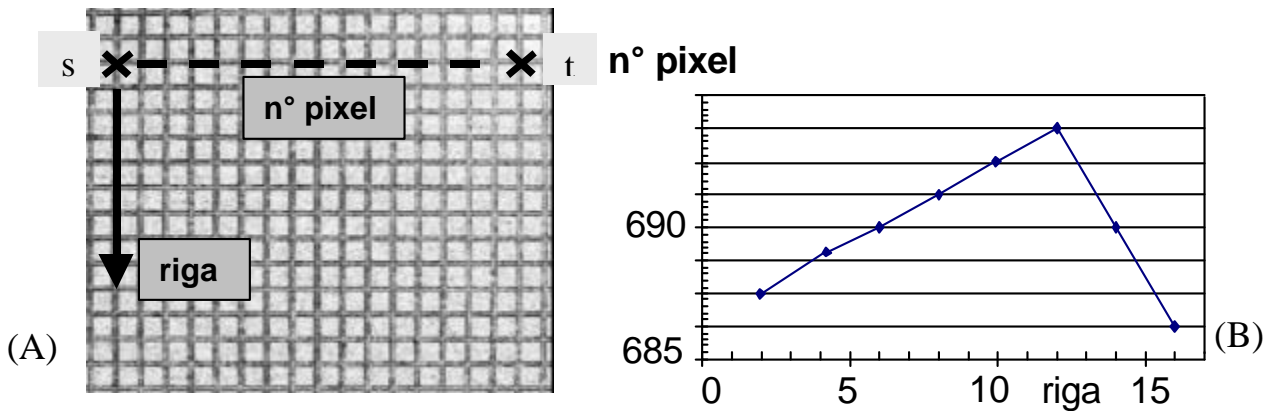


Figura 6(A): griglia a maglie quadrate ripresa con un sistema di visione.

Figura 6(B): diagramma cartesiano del numero di pixel compresi tra i nodi della griglia (indicati con due croci e le lettere s e t) in funzione della riga considerata.

Per compensare l'effetto di deformazione occorre determinare la corrispondenza tra i pixel della griglia e la posizione reale sul piano della griglia stessa. Mediante il metodo delle trasformazioni affini è possibile correggere a posteriori la distorsione. Tale procedura può essere eseguita fuori linea in fase di taratura del sistema.

5 RISULTATI

Come esempio applicativo viene considerata la possibilità di compensare i livelli colorimetrici di immagini acquisite con illuminanti aventi contenuto spettrale completamente diverso, in base alla conoscenza dei livelli colorimetrici di campioni di riferimento (uno solo nel presente esempio).

Per correggere l'immagine 7(B) caratterizzata da una elevata dominante blu, si è utilizzato il solo campione di riferimento rosso, acquisito nelle tre bande RGB.

La forte componente di blu presente nell'immagine 7(B) è stata corretta determinando tre costanti K_R , K_G , K_B relative alle tre bande di colore mediante rapporto tra il valore medio acquisito dal campione nell'immagine (B) ed il valore di riferimento che in questo caso è ottenuto dal valore medio del campione dell'immagine (A). In realtà i valori di riferimento saranno relativi a quelli definiti per il campione primario.

La correzione consiste nel dividere ciascun valore del pixel nelle tre componenti dell'immagine per il fattore K_I corrispondente.

La compensazione nelle condizioni estreme 7(B) ha un effetto non del tutto soddisfacente poiché il campione rosso è povero nelle componenti spettrali del blu, quindi l'incertezza del coefficiente K_B è elevata.

Il campione compensa in maniera molto più efficiente nel campo del rosso. In figura 9 vengono mostrate le due immagini B/N acquisite nella sola componente del rosso. L'immagine compensata possiede i livelli di grigio notevolmente più vicini all'immagine di riferimento rispetto al caso di figura 8.

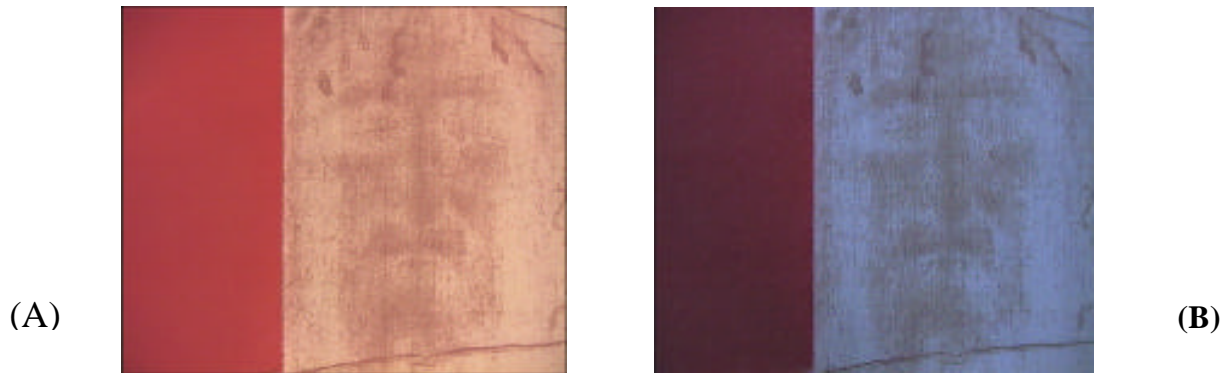


Fig. 7: nella figura (A) viene mostrata l'immagine acquisita con un normale illuminante ad incandescenza. Nella figura (B) viene mostrata l'immagine acquisita con illuminanti aventi componente predominante blu.



Fig. 8 Correzione dell'immagine 7(B) mediante confronto colorimetrico con un solo campione di riferimento (campione rosso).

6 DISCUSSIONE RISULTATI

In questo lavoro non si è evidenziata la risposta metrologica di un particolare sensore o di un particolare sistema di acquisizione, sia esso telecamera o fotocamera digitale perché questo dovrà essere definito durante la successiva fase operativa nella quale si considereranno i tempi disponibili per l'acquisizione della ST e le disponibilità economiche della ricerca, considerando le eventuali soluzioni innovative offerte dal mercato^[7].

Se i tempi disponibili all'acquisizione lo consentiranno, sarebbe inoltre opportuno affiancare al sistema di visione una tradizionale macchina fotografica con pellicole sensibili in modo da potere massimizzare la quantità di informazioni confrontando i diversi risultati ottenuti.

E' stato evidenziato come i diversi effetti di disturbo quali la temperatura, il rumore termoelettrico del sensore, l'illuminazione non uniforme, la mutua influenza cromatica fra i campioni e la distorsione

geometrica possono influenzare negativamente la qualità delle acquisizioni ottenute durante le mappature a diversa risoluzione della ST.

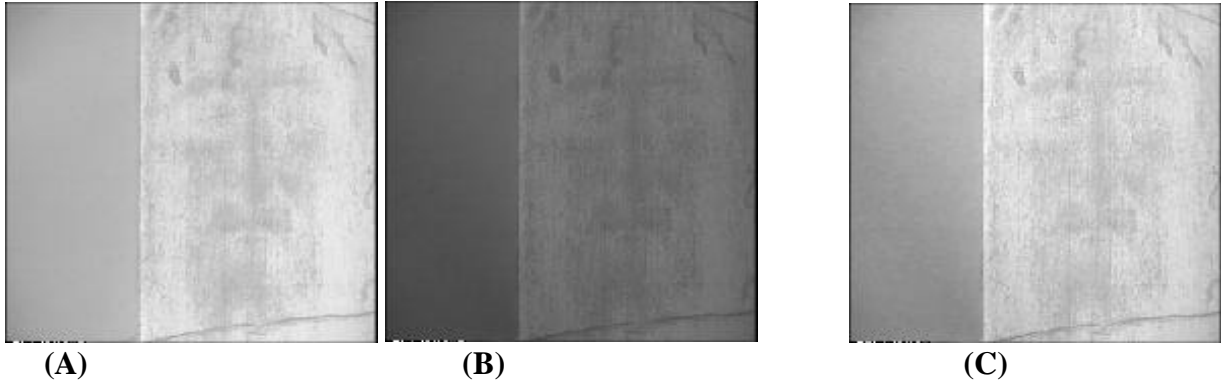


Fig. 9 Nella figura (A) viene mostrata la componente rossa (R) dell'immagine acquisita con normali illuminanti ad incandescenza. In (B) viene mostrata la componente R dell'immagine acquisita con illuminanti nel blu. Nella figura (C) l'immagine (B) acquisita con illuminanti nel blu è stata compensata mediante il livello medio registrato sul campione.

E' pertanto di fondamentale importanza ottimizzare il sistema di visione, a partire dalla fase progettuale, cercando di minimizzare le incertezze causate dai diversi effetti evidenziati.

E' inoltre necessario definire una procedura dettagliata di acquisizione delle immagini che sia compatibile con i tempi che saranno assegnati alle operazioni di mappatura, ma che permetta anche di ottimizzare la qualità dei risultati mediante l'utilizzo di opportuni piani di taratura (di colore uniforme per controllare la disuniformità dell'intensità cromatica e con opportune griglie per la correzione geometrica) da inserirsi nel sistema di visione prima e dopo ogni mappatura.

Dai risultati ottenuti al §5, è stata evidenziata la possibilità di correggere a posteriori i valori cromatici tristimolo di immagini acquisite anche in condizioni estreme.

E' tuttavia risultato evidente che la migliore correzione può essere ottenuta nella gamma di colori predominanti del campione (rosso nell'esempio). Per questo motivo sarebbe opportuno utilizzare nella maschera almeno tre diversi campioni cromatici caratterizzati da tre diversi colori predominanti e mutuamente indipendenti.

Nel caso interessasse eseguire un'analisi colorimetrica a più alta risoluzione cromatica, si possono utilizzare sensori B/N ad elevata sensibilità accoppiati con un'opportuna ruota porta filtri, solidale al sistema di acquisizione, contenente un numero opportuno di filtri a banda stretta.

CONCLUSIONI

Sono stati proposti due diversi sistemi di visione da utilizzarsi per una possibile futura mappatura colorimetrica a media ed alta risoluzione della Sindone di Torino.

Gli scopi e le modalità di esecuzione delle diverse mappature sono stati discussi in un precedente lavoro^[5]. In questo studio si evidenziano i requisiti di tale sistema e si discutono le possibili soluzioni costruttive da adottare.

Sono stati messi in evidenza gli effetti principali di disturbo quali la temperatura, il rumore termoelettrico del sensore, l'illuminazione non uniforme, la mutua influenza cromatica fra i campioni e la distorsione geometrica. Per ciascuno di essi viene valutata la corrispondente incertezza di misura e vengono proposte alcune soluzioni sia procedurali che numeriche per ridurre l'incertezza di misura causata da tali disturbi.

Risulta evidente che è necessario ottimizzare sia il sistema di visione, sia la procedura di acquisizione, minimizzando i diversi effetti di disturbo, sia di tipo ambientale controllando opportunamente l'ambiente di misura, sia di tipo elettro-ottico anche prevedendo di eseguire correzioni a posteriori delle immagini ottenute, sulla base di confronti con campioni tarati di controllo.

L'esempio applicativo di correzione cromatica di un caso estremo di acquisizione corrispondente ad una copia del volto dell'uomo della Sindone di Torino con illuminanti dalla prevalente componente blu, dimostra la fattibilità della correzione cromatica mediante opportuni metodi numerici che devono essere messi a punto prima delle mappature effettive sulla ST ed evidenzia l'opportunità di utilizzare una maschera con almeno tre campioni cromatici tra loro indipendenti.

BILIOGRAFIA

- 1) J. B. Rinaudo: "Nouveau mécanisme de formation de l'image sur le Linceul de Turin, ayant pu entraîner une fausse radiodation médiévale", L'Identification Scientifique de l'Homme du Linceul, Jésus de Nazareth, Actes du Symposium Scientifique International, Rome 1993, F.-X. De Guibert, Paris 1995, pp. 293-299.
- 2) S. Rodante: "Formazione naturale delle impronte sindoniche: sudore di sangue, aloe e mirra" Typescript, Symposium Scientifique International de Paris sur le Linceul de Turin, 7-8 Septembre 1989, pp. 1-9.
- 3) J. Volkringer: "Le probleme de l'empreinte devant la Science", Parigi 1942, 1981.
- 4) D. Pesce: "E l'uomo creò la Sindone", ediz. Dedalo, Bari, 1982.
- 5) G. Fanti: "A proposal for High Resolution Colorimetric Mapping of the Turin Shroud: Analysis of Metrological Problems" Nice Symposium on the Turin Shroud, May 1997, sito Internet <http://www.shroud.com/fanti.htm>.
- 6) G. Fanti: "Misurazione della temperatura con sensori CCD durante la formatura di oggetti in vetro", I Congresso Nazionale di Misure Meccaniche e Termiche, Villasimius, 10-11 Giugno 1993, pag. 173-182.
- 7) "Euro Photonics – European coverage of product developments in optics, lasers, fibre optics, electro-optics and imaging", a Laurin Publication, London, Great Britain.