

## RICOSTRUZIONE DI INFORMAZIONI 3D A PARTIRE DA IMMAGINI BIDIMENSIONALI

di Sebastiano Battiato e Fausto Galvan

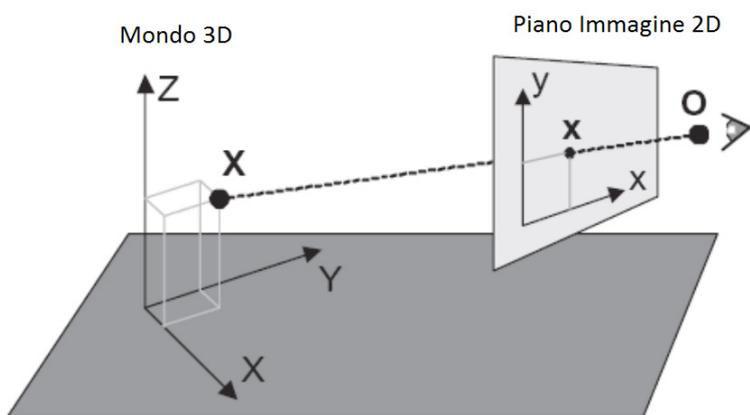
Tra gli strumenti di indagine disponibili oggi, cominciano a farsi strada anche metodi che permettono di estrapolare da una (o più) immagini informazioni relative alle dimensioni di oggetti e/o persone fotografate. Alcuni di questi algoritmi rendono possibile ricostruire l'intera scena 3D ripresa dalla camera al momento dello scatto. Dopo una breve introduzione alla teoria matematica di riferimento verranno brevemente elencati alcuni risultati di rilievo già utilizzati ampiamente in ambito investigativo.

### 1 Introduzione

Quando scattiamo una fotografia di certo non consideriamo che in quel momento oltre a catturare la scena che ci interessa, stiamo anche raccogliendo e fissando in modo indelebile un elevato numero di ulteriori informazioni, di cui l'immagine digitale è portatrice. Questi dati possono rivelarsi utili in altri contesti quali, ad esempio, quello investigativo dove, facendo uso di appositi strumenti informatici è possibile estrarre particolari a prima vista non disponibili e, sotto certe condizioni, persino ricostruire con notevole precisione la rappresentazione tridimensionale (3D) cui fa riferimento l'immagine bidimensionale di partenza.

### 2 La formazione dell'immagine in una fotocamera

Per comprendere come sia possibile estrarre tali informazioni dagli oggetti ripresi, è necessario introdurre alcune nozioni relative al processo di formazione dell'immagine.



**Fig.1.** Il processo di formazione dell'immagine sul sensore della macchina fotografica può essere modellato matematicamente come un'operazione che trasporta punti della scena reale 3D in punti in un piano 2D che corrisponde all'immagine.

Secondo il modello classico, (*pinhole camera*)<sup>(1)</sup> un punto X nel mondo 3D viene proiettato nel piano bidimensionale dell'immagine in un corrispondente punto x. Quest'ultimo è l'interse-

zione del piano immagine con il segmento di retta che unisce il centro ottico O della fotocamera ed il punto X della scena ripresa (Fig.1).

L'interpretazione algebrica di questa proiezione è sintetizzata dalla seguente equazione:

$$x=PX \quad (1)$$

in cui P è un operatore matematico chiamato "matrice di proiezione", una tabella i cui coefficienti dettano le regole per la trasformazione dei punti reali in punti dell'immagine.

Se siamo in grado di conoscere (o ricostruire in qualche modo) la matrice P abbiamo la possibilità di invertire l'effetto di questa trasformazione. In altre parole, partendo da un punto nell'immagine possiamo determinare la sua posizione all'interno della scena reale che l'immagine riproduce.

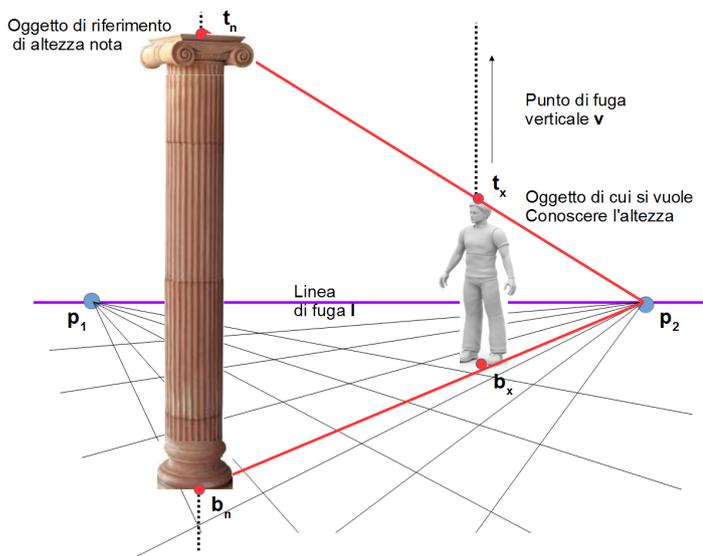
Nella pratica non sempre è possibile ricostruire completamente la matrice di proiezione, ma sotto certe condizioni, o nel caso in cui sia possibile reperire informazioni sulla fotocamera che ha prodotto l'immagine (operazione di Calibrazione) e/o alcune misure degli oggetti ritratti nella foto, il numero di incognite per definire la matrice si riduce notevolmente. Un esempio si ha nel caso della c.d. Rettificazione, quando cioè l'oggetto fotografato è esso stesso 2D. In (2) è riportato un esempio di questa operazione applicata ad una immagine in cui si vogliono rendere leggibili le cifre di una targa automobilistica.

### 3 Estrazione di punti e linee di fuga

Nel caso si operi su oggetti tridimensionali, è necessario prima di tutto ottenere le misure reali di oggetti od elementi presenti nell'immagine. A questo scopo, si può ad esempio ritornare sul luogo in cui è stata catturata la foto per rilevare manualmente le dimensioni di una porta, di una finestra, o del muro di una casa, oppure ricavare queste informazioni da apposita documentazione.

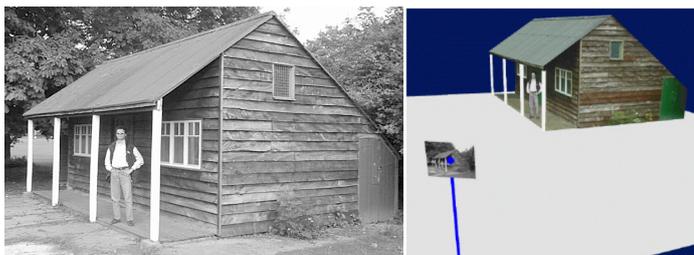
Ma tali misure, da sole, non bastano ai nostri scopi. Nel caso più generale infatti, bisogna considerare l'effetto prospettiva, che distorce le dimensioni in funzione della distanza reale del piano di ripresa. Si ha quindi bisogno di effettuare una analisi più approfondita per estrarre dall'immagine una serie di caratteristiche note come punti e linee di fuga (Fig.2).

Esistono in letteratura numerosi algoritmi che permettono di stimare queste entità geometriche direttamente dall'immagine, senza bisogno di conoscerne i parametri intrinseci (cioè riguardanti i settaggi interni della fotocamera) od estrinseci (riguardanti il posizionamento della fotocamera relativamente alla scena)<sup>(3)</sup>.



**Fig.2.** La stima delle dimensioni di un soggetto in una immagine richiede il calcolo di punti e linee di fuga, orizzontali e verticali. Nel caso in figura l'altezza della persona si ricava utilizzando una dimensione nota (l'altezza della colonna), i punti di fuga orizzontali ( $p_1$  e  $p_2$ ) e verticale ( $v$ ) nonché la linea di fuga (o linea dell'orizzonte)  $l$ .

Nella ricerca di informazioni da immagini, talvolta possiamo spingerci ben oltre la semplice estrapolazione di singole misure. E' possibile infatti, aumentando il numero di misure "reali" rilevate, estendere questi metodi fino ad arrivare a ricostruire l'intera scena 3D da cui l'immagine è tratta, ed anche la posizione della fotocamera al momento dello scatto. Un esempio è riportato in Fig.3 dove sono state usate come dimensioni di riferimento le altezze dell'intelaiatura della finestra principale, di una colonna, e le dimensioni dei due lati della base del portico<sup>(1)</sup>.



**Fig.3.** Esempio di ricostruzione di una scena reale da una singola immagine: a sinistra l'originale, a destra la ricostruzione 3D i cui è indicata la posizione stimata della fotocamera al momento dello scatto.

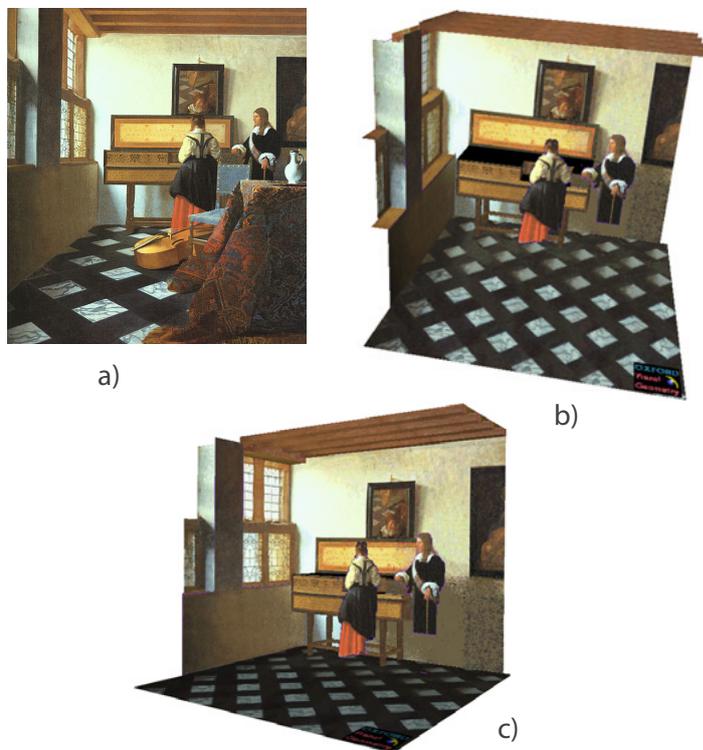
E' bene precisare che, come tutti i metodi di stima, i procedimenti appena esposti sono soggetti ad errori che possono derivare da più fonti: la errata raccolta delle misure di riferimento, un'immagine affetta da distorsioni (es. distorsione prodotta dalle lenti), una posizione del soggetto non perfettamente verticale, ecc. In generale comunque, si riesce ad ottenere stime sufficientemente corrette e soprattutto il cui margine di errore risulta noto e misurabile.

#### 4 Ricostruzione mediante più immagini

Nel caso in cui siano disponibili più immagini della stessa scena ottenute da più camere che riprendono simultaneamente lo stesso luogo, o estrapolate da una singola fotocamera in movimento, possiamo ricavare buoni risultati in ordine alla ricostruzione della scena ricorrendo alla stereopsi computazionale, cioè a quella serie di algoritmi che consentono di ottenere informazioni sulla profondità (quindi sulla struttura tridimensionale) di una scena mediante l'uso di immagini che inquadrano una scena da due differenti posizioni<sup>(4)</sup>, un procedimento che ricorda da vicino quello utilizzato dal sistema visivo umano.

#### 5 Applicazioni nello studio della storia dell'arte

I metodi sopra descritti possono trovare applicazioni in numerosi campi. Uno di questi, legato allo studio della storia dell'arte, ha permesso di ricostruire gli ambienti riprodotti in famosi dipinti. Un esempio è riportato in Fig. 4 nel caso di "La lezione di musica" di J. Vermeer<sup>(1)</sup>.



**Fig.4.** In **a**) il celebre dipinto La lezione di musica (1662-65), di J. Vermeer (1632-1675).

In **b**) e in **c**) due differenti viste della scena ricostruita. Si noti che, a causa dell'occlusione provocata dallo strumento musicale e dal tavolo nell'immagine originale, non è stato possibile ricostruire le estremità inferiori delle due persone ritratte.

# Ricostruzione di informazioni 3D a partire da immagini bidimensionali

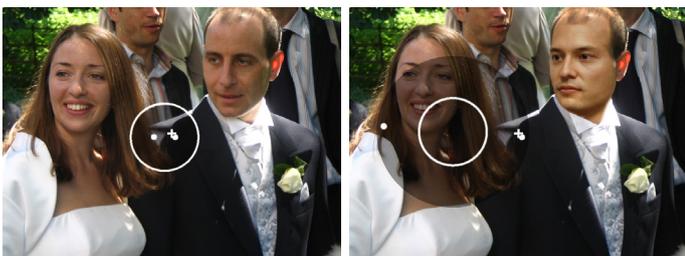


**Fig.5.** Dopo la rettificazione (immagini b e c) il testo e la figura nel pacchetto rettangolare non sono uguali tra loro, rivelando che l'immagine a sinistra è stata contraffatta.

## 6 Applicazioni in ambito forense

- Individuazione di immagini falsificate, in cui si cercano le discordanze tra caratteristiche geometriche in diverse parti della foto per evidenziare le eventuali manipolazioni<sup>(5)</sup>;
- Fotogrammetria e ricostruzione della scena del crimine, in cui da una o più immagini, si estraggono le misure dei particolari della scena (altezza persone, misure di mobili od oggetti, ecc..) o si crea un modello 3D di un ambiente teatro di un crimine per poter effettuare valutazioni più precise ed approfondite sulla dinamica dei fatti.

Per quanto riguarda la prima categoria, conoscendo la matrice di trasformazione proiettiva, che si semplifica notevolmente in caso di superfici piane come precedentemente sottolineato, l'immagine può essere rettificata ruotandola mediante l'applicazione della matrice inversa  $P^{-1}$ . A questo punto le inconsistenze presenti in caso di immagini modificate possono essere rilevate, come illustrato nell'esempio di Fig. 5<sup>(6)</sup>.



**Fig.6.** Stima del punto principale relativo ai due soggetti della foto. Nell'immagine di sinistra (l'originale) entrambi i punti sono vicini al centro dell'immagine, segnato con il "+", mentre nella foto di destra in cui la testa dello sposo è stata modificata, il relativo punto principale è considerevolmente lontano dal centro immagine.

Nel caso di immagini raffiguranti soggetti umani è possibile provare la non originalità della foto utilizzando la stima del punto principale della fotocamera (la proiezione del centro ottico sul piano immagine). Nelle immagini autentiche infatti, da qualsiasi soggetto venga calcolato questo elemento risulterà vicino al centro della foto; nel caso invece in cui un soggetto sia stato inserito artificialmente nell'immagine, il punto principale ad esso relativo si collocherà lontano dai punti riconducibili agli

altri soggetti della scena, come è possibile apprezzare nella fig. 6. Tale anomalia può quindi essere usata come prova della non originalità dell'immagine<sup>(7)</sup>.

Un esempio di applicazione dei metodi compresi nella seconda categoria si è avuto nelle indagini relative al "caso Garlasco"<sup>(8)</sup>. Per capire se fosse stato possibile all'indagato percorrere un dato cammino senza sporcarsi le scarpe di sangue, si è ricostruito il pavimento di alcuni ambienti della casa utilizzando la versione rettificata (detta ortofoto) delle immagini scattate sul posto dal personale intervenuto.

## 7 Conclusioni

Per concludere non possiamo non citare la disponibilità in commercio di *software* per l'analisi di immagine ad uso forense. Tra questi segnaliamo Amped FIVE<sup>(9)</sup>, il quale tra le varie *features* offre anche la possibilità, sotto certe ipotesi, di inferire misure e grandezze nello spazio 3D di una scena.

Nel web è presente il sito [photosynth.net](http://photosynth.net) (sezione *forensics crime scene*) in cui è possibile *uploadare* alcune foto di una scena ed ottenere la ricostruzione 3D della scena stessa, in un ambiente navigabile, riuscendo inoltre ad ottenere la stima del punto di vista della fotocamera di acquisizione.

## NOTE

1. A. Criminisi: "Single-view metrology: Algorithms and applications", Pattern Recognition. Lecture Notes in Computer Science Vol. 2449, 224-239. Springer Berlin Heidelberg, (2002).
2. S. Battiato, F. Galvan: "Introduzione alla Image/Video Forensics", Sicurezza e Giustizia n. I/MMXIII - pp. 42-43 (2013).
3. R. Szeliski: "Computer Vision. Algorithms and Applications", Springer (2010).
4. A. Fusiello: "Visione computazionale. Tecniche di ricostruzione tridimensionale". Franco Angeli, Milano, (2013).
5. L. Wu, Y. Wang: "Detecting Image Forgeries using Geometric Cues" capitolo in Computer Vision for Multimedia Applications: Methods and Solutions (2011).
6. H. Farid, M. Bravo: "Image forensic analyses that elude the human visual system" in: SPIE Symposium on Electronic Imaging, San Jose, CA (2010).
7. M.K. Johnson, H. Farid: "Detecting Photographic Composites of People", 6th International Workshop on Digital Watermarking, Guangzhou, China, (2007).
8. Corso di Computer Forensics Università di Catania A.A. 2012/2013 (casi di studio): [http://www.dmi.unict.it/~battiato/CF1213/Investigare%20su%20immagini%20e%20video\\_Casi%20di%20studio.pdf](http://www.dmi.unict.it/~battiato/CF1213/Investigare%20su%20immagini%20e%20video_Casi%20di%20studio.pdf).
9. <http://ampedsoftware.com/it/>. ♦