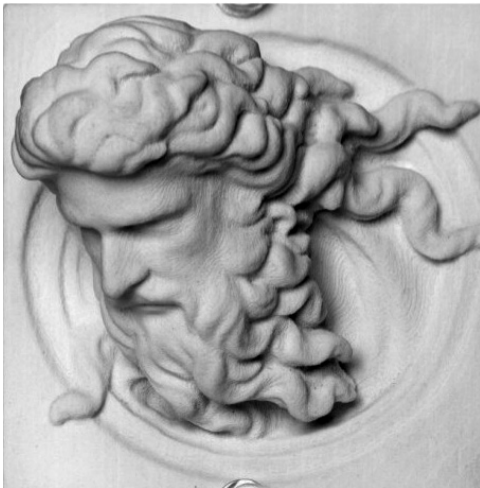


Strumenti, tecniche, prospettive e nuove implicazioni nel rilievo digitale

Lorenzo Sanna e Ettore Ursini



Note/Bibliografia

¹ Insieme all'I.C.R. di Roma rappresenta attualmente gli Istituti di Restauro Statali Italiani. Afferisce al Ministero per i Beni e le Attività Culturali, sede propria a Firenze, con scuola annessa, museo e laboratori operativi.

² La conformazione stessa degli oggetti crea delle zone d'ombra nel campo di scansione, aree che possono essere acquisite solo da una diversa posizione della sorgente laser emittente.

³ Acronimo di Red (Rosso), Green (Verde), Blue (Blu) i colori primari della sintesi additiva.

⁴ Acronimo di Charge Couple Device, dispositivo ad accoppiamento di carica, un sensore in grado di convertire l'intensità della luce riflessa in corrente elettrica analogica.

⁵ L'area sud-occidentale coincidente in larga misura con la costa californiana.

⁶ Ricordiamo almeno le Facoltà di Ingegneria di Pisa e Firenze e le Facoltà di Architettura di Firenze e Ferrara.

⁷ In esperienze recenti come quella del restauro del Satiro Danzante di Mazara del Vallo, eseguito dall'Istituto Centrale per il Restauro di Roma in collaborazione con la Foxbit s.r.l. (Napoli), il rilievo tridimensionale è servito di supporto alla progettazione della protesi di sostegno della statua mediante un intervento di ricostruzione virtuale e successiva prototipazione solida dell'elemento.

Analogamente in maniera assolutamente non invasiva è stata progettata l'imbracatura di sostegno ed è stata prodotta una copia in scala reale per la fruizione da parte dei non vedenti.

⁸ Piante, prospetti, sezioni e viste assonometriche e prospettiche.

Abstract. Digital survey is a recent and powerful technique specifically designed for three-dimensional surveying of high-detailed, complex objects. The chance to obtain very accurate measurements allows specific applications in different fields such as architecture, archaeology, industrial design, infrastructures and landscape survey, having the possibility to operate in no-contact mode.

Different outputs can be carried out from the numeric models such as canonical bidimensional drawings, 3d animations, web models and also reproductions in different scales using CAD/CAM technologies. On the other side new professional skills are required to manage and plan the whole workflow.

Premessa.

L'obiettivo di questo articolo è quello di fornire delle indicazioni in merito alle nuove tecnologie di rilievo digitale, assieme ad alcune considerazioni sugli strumenti del settore e ad una ragionata panoramica dei campi di utilizzo e delle loro prospettive di applicazione e diffusione nel futuro prossimo.

Introduzione.

Parliamo infatti di una metodologia di rilievo sviluppatasi di recente, da non più di due decenni, conosciuta principalmente in ambito ingegneristico-territoriale (rilievi di cave, porzioni di terreno, grandi infrastrutture), industriale (progettazione aerospaziale ed automobilistica, design), architettonico e successivamente in quello dei beni culturali in senso ampio (archeologia, statuaria, dipinti etc.).

Attualmente stiamo completando per conto dell'Opificio delle Pietre Dure¹ il rilievo digitale della Porta del Paradiso, realizzata da Lorenzo Ghiberti e bottega tra il 1427 e il 1452 per il Battistero di Firenze e quindi abbiamo avuto occasione di testare queste tecniche anche rispetto ad un'opera di notevolissimo pregio, che per

dimensioni si pone alla scala della scultura monumentale e per qualità di modellato e livello di dettagli, appartiene non solo alla più pregevole esecuzione scultorea ma a lavorazioni e gusto propri dell'arte del conio (Foto 1, 2).

Per chiarezza preferiamo spiegare ciò che si intende per rilievo digitale, facendo riferimento all'etimologia del termine desunto dal sostantivo inglese "digit" (cifra, numero).

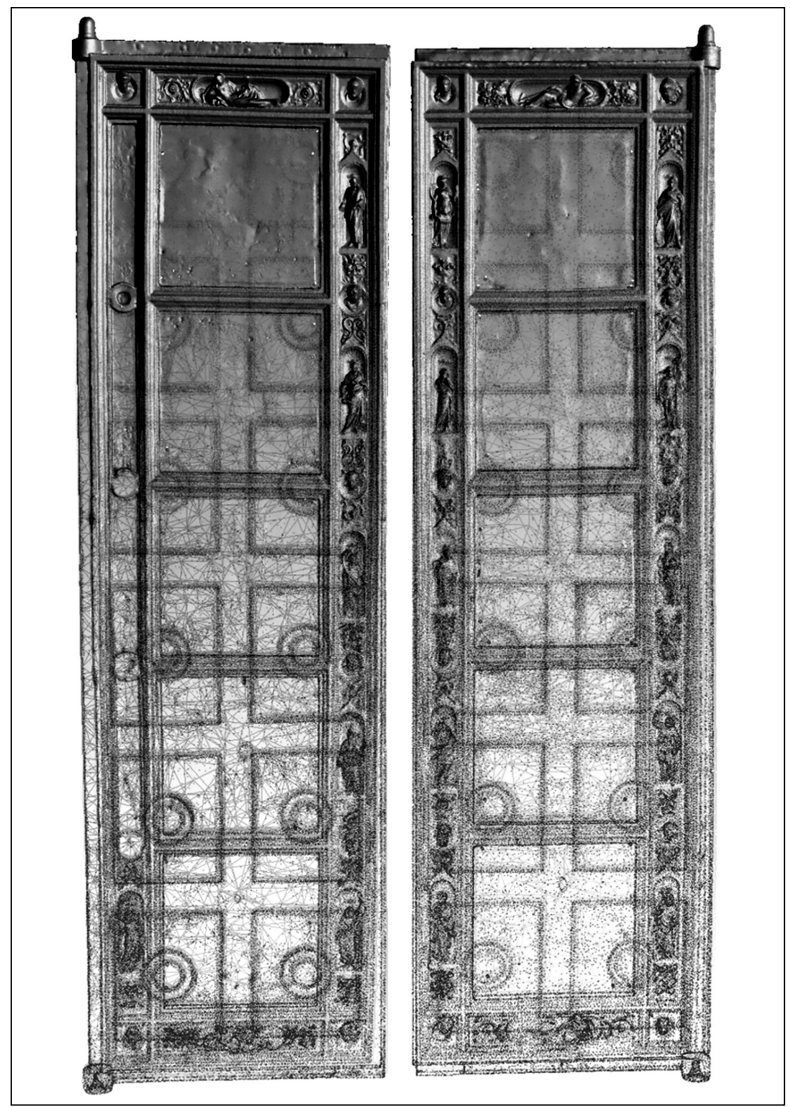
E' corretto parlare di rilievo digitale intendendo l'insieme delle procedure atte ad acquisire e restituire dati di misura, forma e colore in veste numerica, secondo quantità discrete. In sostanza i rilievi digitali si basano sull'utilizzo di macchine a controllo numerico per la misura e la restituzione dei dati e perciò trovano nell'informatica la necessaria interfaccia operativa per questo tipo di operazioni.

A questo proposito, vale la pena ricordare quello che è stato l'*humus* scientifico-tecnologico che ha reso possibile la nascita di questa nuova metodologia. Possiamo tranquillamente affermare che l'intero settore della metrologia ha compiuto enormi e rapidi progressi negli ultimi due

Foto 1 - Il modello reale



Foto 2 - Il modello numerico: dai punti alle superfici



decenni a seguito dello sviluppo degli studi sul laser e sulla luce strutturata, tecnologie perlopiù già sfruttate in campo militare, aerospaziale ed ottico e successivamente commercializzate in ambito industriale e civile.

La crescita parallela in campo informatico della capacità di calcolo dei processori e la straordinaria diffusione dei personal computer in ambito lavorativo nei paesi sviluppati, hanno fatto da volano alla progettazione di hardware e software dedicato che permettesse la gestione dei cospicui flussi di dati numerici ottenuti dai nuovi strumenti.

Non a caso la gran parte dei più affidabili sistemi di misurazione odierna ad uso civile ed ingegneristico prevedono l'adozione della tecnologia laser (più raramente di quella a luce strutturata), talvolta associata ad un sistema di referenziamento satellita-

re (G.P.S.), come è possibile vedere nei recenti modelli di stazioni totali, distanziometri, livelle, etc.. Le principali peculiarità offerte dai nuovi strumenti si rivelano anzitutto nella possibilità di ottenere modelli tridimensionali estremamente accurati, nella grande rapidità di esecuzione e nella modalità operativa in assenza di contatto diretto con l'oggetto.

Infatti sebbene alcuni sistemi digitali operino a contatto, come nel caso dei pantografi digitali, le macchine più interessanti possono acquisire i dati anche a distanze significative (50 e più metri) costituendo un valido strumento per rilievi particolarmente difficili per condizioni esecutive (difficile accessibilità di parti in quota, fragilità dei manufatti o dei siti, opere di alto pregio.....).

Il flusso operativo

In generale il primo prodotto ottenuto

dalle acquisizioni digitali, indipendentemente dalla tecnologia usata, è una nuvola di punti ciascuno dei quali ha proprie coordinate x, y, z.

Questi punti non rappresentano nient'altro che i punti dell'oggetto, o meglio, sono una selezione degli infiniti punti costituenti l'oggetto scelti in funzione del grado di risoluzione ottenibile dalla macchina, delle finalità ultime del rilievo e della mole di dati che può essere gestita con ragionevolezza via software.

Normalmente non è sufficiente una sola scansione per rendere la totalità dell'oggetto² ed è perciò necessario rimontare, attraverso dei riferimenti noti, le singole acquisizioni per generare la nuvola di punti generale.

Di per sé la nuvola rappresenta un oggetto tridimensionale misurabile seppur non costituito da superfici e per ottenere queste ultime, è necessario unire i punti per triangoli, un

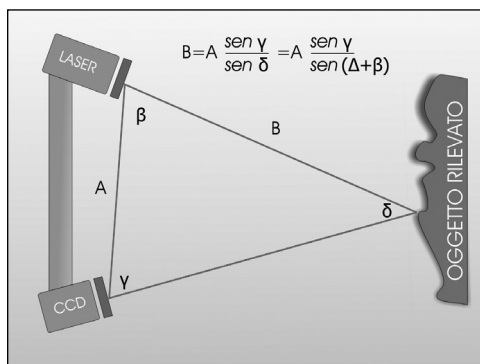
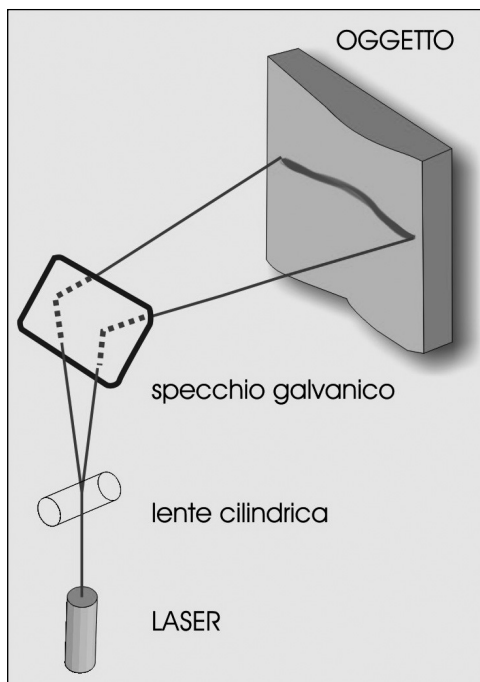


Figura 3 - Sistema laser + ccd

Figura 4 - Sistema a banda di luce



processo che viene svolto in maniera semiautomatizzata via software. Il risultato ottenuto dopo opportune operazioni di pulitura e di smussamento dei vertici, restituisce la superficie totale continua dell'oggetto resa per triangoli (*mesh*), un modello tridimensionale dal quale si possono ottenere misurazioni di vario genere (distanza, angoli, ortogonalità, curvatura,...), sezioni in numero e posizione definibile a piacimento e a seconda del mezzo utilizzato per l'acquisizione, anche il valore di riflettanza dei materiali e/o il loro colore tradotto digitalmente in RGB³.

Caratteristiche di alcuni sistemi

E' utile specificare che nel quadro generale dei sistemi per il rilievo digitale vanno distinti anzitutto sistemi a contatto e a distanza. Nel primo caso rientrano i moderni pantografi-tasta-

tori, dotati di veri e propri puntali montati su bracci snodabili che, muovendosi su aree definite della superficie dell'oggetto, trasmettono i dati numerici di posizione mediante appositi cavi ad un terminale.

I sistemi a distanza, decisamente più interessanti per la loro non invasività, possono essere suddivisi in sistemi basati esclusivamente sul laser (a tempo di volo, interferometria, variazione di fase e modulazione di frequenza), sull'accoppiamento laser+CCD⁴ (triangolazione, *lightstripe*) o sul solo CCD (*range camera* attive e passive). Lungi dal poter dare in questa sede esaustive spiegazioni di funzionamento per tutti i tipi di sistemi, ci limitiamo a fornire delle indicazioni sugli ambiti operativi più strettamente legati alle professionalità di ingegneri e architetti ed alcuni dettagli tecnici.

I sistemi a tempo di volo (*Time Of Flight*) si basano evidentemente sul tempo impiegato dal segnale laser a impulsi, di cui sono noti anche gli angoli zenitali ed azimutali di emissione, per raggiungere ed essere riflesso dalla superficie dell'oggetto. Sono generalmente utilizzati per oggetti di grande scala, poiché consentono buoni gradi di precisione (dell'ordine di 1cm) rispetto a distanze di acquisizione elevate (oltre 50m). Risultano particolarmente indicati per il rilievo di architetture, grandi strutture e infrastrutture, aree archeologiche, cave e addirittura brani di territorio. Stesso ambito operativo hanno le macchine basate su variazione di fase, modulazione di frequenza ed interferometria.

I sistemi che abbinano laser e sensore CCD (Figura 3) operano con una sorgente laser posta a distanza ed angolazione nota rispetto al sensore e pertanto la registrazione della luce riflessa operata da quest'ultimo, viene inviata ad un software e tradotta in coordinate spaziali x,y,z per ciascun punto. Analogo è il procedimento per il sistema a banda di luce (figura n. 4) dove l'emissione laser viene fatta

passare prima attraverso una lente cilindrica e poi attraverso uno specchio galvanico che la traduce in banda. Contemporaneamente il CCD, misurando l'intensità della luce riflessa, genera un'informazione metrica che viene inviata al software. Questi strumenti sono in grado di generare informazioni molto accurate (risoluzione tra 1 mm e 30 micron) operando da distanze ravvicinate: i sistemi a banda di luce operano da distanze inferiori al metro, gli altri consentono misurazioni anche da distanze medie (sino a 25 m). Per tali caratteristiche questi strumenti sono particolarmente utili per oggetti di media e piccola scala come statue, piccole architetture, monili, gioielli e simili.

Sono molto interessanti, ed anche più economici, i sistemi basati su CCD, tra i quali ci limitiamo a descrivere le *range camera* a luce strutturata il cui funzionamento si esplica con la proiezione, attraverso un comune videoproiettore, di una serie di barre orizzontali e verticali di dimensioni note (Foto 5). Almeno una telecamera dotata di CCD registra l'intero processo ed invia i dati al computer dove, via software, si genera il modello tridimensionale tramite la lettura delle deformazioni dei pattern di dimensioni note effettuata dal CCD misurando l'intensità della luce riflessa. Infatti ad ogni pixel dell'immagine viene associato un punto con coordinate x,y,z, in maniera che tanto maggiore è il numero dei pixel più dettagliato risulta il rilievo. Questo risultato è quindi dipendente dalla distanza di proiezione della griglia e dalla capacità di risoluzione della telecamera e del CCD. Gli ambiti operativi sono comunque condizionati da questo tipo di caratteristiche e sono pertanto indirizzati ad oggetti di medio-piccola grandezza.

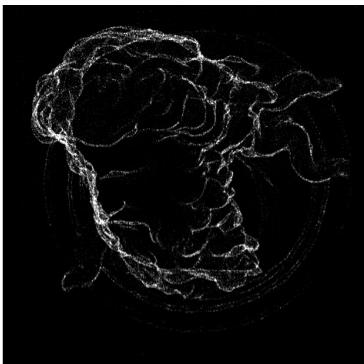
Considerazioni finali

Come si può desumere abbastanza facilmente, le modalità operative sopradescritte e l'utilizzo dei mac-

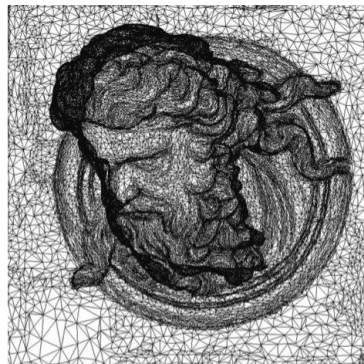
Foto 5 - Sistema a luce strutturata



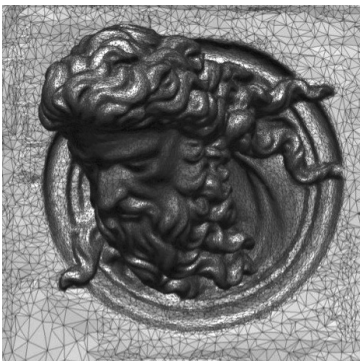
Foto 6 - Flusso di lavoro e output nel rilievo digitale



1) Nuvola di punti



2) Mesh



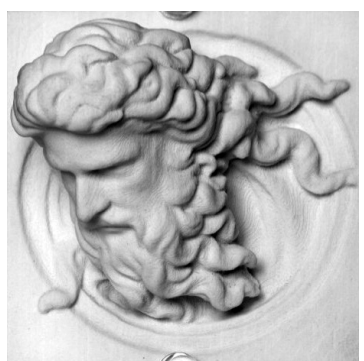
3) Mesh in modalità ombreggiata



4) mappatura fotografica su mesh



5) Fotografia dell'elemento originale



6) Copia in scala reale da prototipazione solida

chinari sopraccitati presuppongono una serie di nuove competenze professionali che devono andare in parte ad affiancarsi a quelle del rilievo tradizionale.

E' di fondamentale importanza la capacità di pianificare, gestire e portare a compimento le operazioni di acquisizione e restituzione dei dati secondo le specifiche e le finalità ultime del rilievo.

E' persino ovvio che ogni nuova metodologia, tanto più se si appoggia a nuove tecnologie, richieda il possesso di nuove professionalità e va sottolineato che l'Italia, nella fase attuale, con i suoi operatori pubblici e privati, detiene una posizione non secondaria sul piano internazionale.

Se in alcune zone degli U.S.A.⁵ il settore trainante per questo tipo di tecnologie è quello dell'architettura, in Italia il ruolo di primo piano ancora appartiene al settore industriale (auto e design), ma un contributo di forte originalità si è avuto proprio con i lavori legati al settore Beni Culturali, ambito che è stato conquistato da non più di un decennio.

L'interesse crescente per queste tecniche vede anche la presenza di importanti Università Italiane⁶ e palcoscenici come l'attuale Esposizione Internazionale di Aichi⁷, testimoniano l'alto livello operativo raggiunto nel nostro paese e aprono differenti prospettive progettuali. Un altro dei fattori che rendono appetibile il rilievo digitale è dato dalla molteplicità di usi possibili dei modelli numerici. Questi, come in parte già accennato, sono disponibili per svariate misurazioni e controlli dimensionali, si prestano all'estrapolazione di elaborati canonici⁸, possono essere utilizzati per filmati animati, per pubblicazioni interattive sul web con diversi gradi di consultazione e con opportune tarature si prestano alla realizzazione diretta di copie in scala su diversi tipi di supporto e con diverse tecnologie (Foto 6).