

Tecnologie Laser Scanning Teoria e Applicazioni

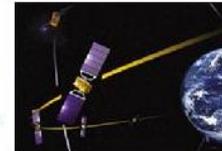
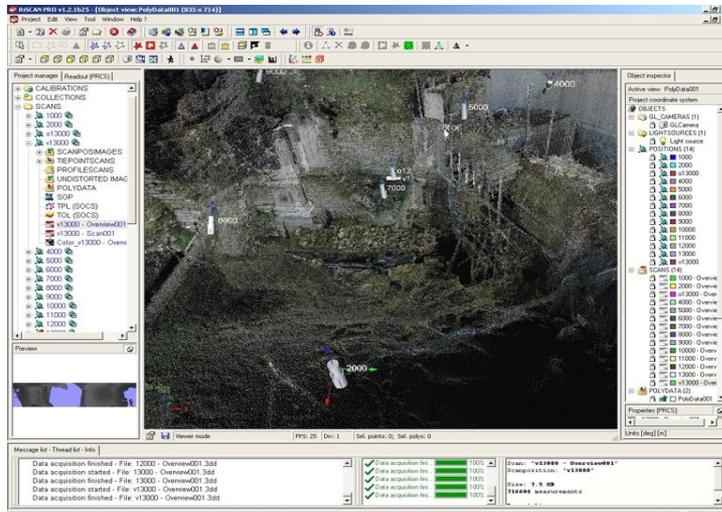


Prof. ing. Raffaella Cefalo

raffaella.cefalo@dia.units.it

**GeoSNav Laboratory, DIA
Universita' degli Studi di Trieste**

<http://geosnav.dia.units.it/>



parte di questa presentazione è tratta dalla
dispensa sulle tecnologie Laser Scanning del Prof.
Andrea Piemonte, DIC, Università di Pisa

Caratteristiche principali del laser

- Il fenomeno fisico sul quale si basa il funzionamento del **laser** è quello dell'emissione stimolata, enunciato da A. Einstein nel 1917 e preso in considerazione, a livello applicativo, negli anni '50 nell'ambito della ricerca sugli orologi atomici.
- Intorno al 1920 Einstein scoprì che irradiando gli atomi eccitati con fotoni di energia ΔE l'emissione di fotoni viene stimolata.
- I fotoni emessi hanno le stesse caratteristiche dei fotoni incidenti e viaggiano in fase con i fotoni stimolatori, ovvero non c'è sfasamento tra le onde che stimolano l'emissione e le onde emesse.
- Questo fenomeno prende il nome di **emissione per stimolazione**.

L.A.S.E.R.

- Il **L.A.S.E.R.** acronimo di **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione) è stato inventato, a livello teorico, nel 1958 da uno scienziato americano, Charles H. Townes e realizzato, per la prima volta da due americani, T. H. Maiman e A. Javan, e dai russi N. G. Basov e A. M. Prochorov, negli **anni '60**.
- Il LASER è un dispositivo in grado di emettere radiazioni luminose di tipo **coerente**, cioè con tutti i raggi in fase, e **monocromatico**, cioè composte da un solo colore e quindi da una sola frequenza.
- Il raggio LASER ha anche la caratteristica di essere fortemente concentrato al punto da potersi considerare perfettamente rettilineo.
- Il suo diametro è dell'ordine del millesimo di millimetro.

Strumenti LASER

- Uno strumento LASER è in grado di produrre un'emissione stimolata a seguito della sua struttura di specchi paralleli, di cui uno perfettamente riflettente, ed uno semiriflettente.
- I fotoni, passando vicino agli atomi eccitati, producono il decadimento degli elettroni dall'orbita instabile a maggiore energia, a quella stabile a energia inferiore con conseguente emissione di altri fotoni, aventi tutti la stessa frequenza e la stessa fase, costretti a oscillare in avanti e indietro fra i due specchi.
- Questi costituiscono una cavità ottica poiché la distanza fra i due specchi deve risultare un multiplo intero di mezza lunghezza d'onda della radiazione LASER.

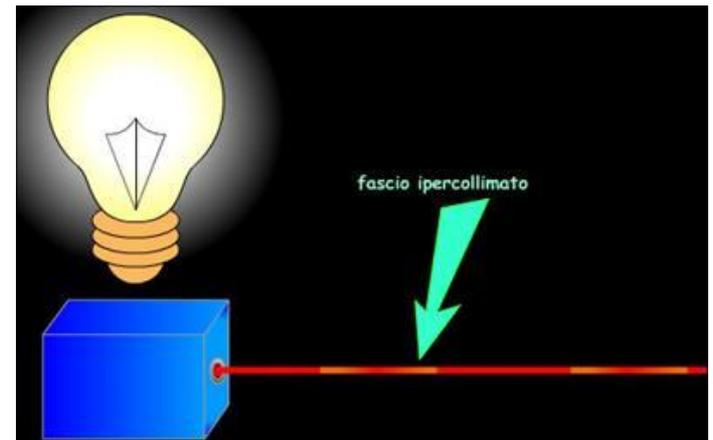
Raggio laser

- Raggiunta una certa intensità, i fotoni riescono ad uscire dallo specchio semitrasparente (1%) in un unico raggio **perfettamente monocromatico e in fase**, perché generato dall'emissione stimolata di atomi tutti assolutamente eguali, e perfettamente rettilineo, perché prodotto da un innumerevole numero di oscillazioni in linea retta che ne garantiscono la direzione rettilinea.

Caratteristiche del laser

- **Unidirezionalità**: la luce LASER si propaga in una direzione ben definita, a differenza della luce di una normale lampadina a incandescenza che emette luce in tutte le direzioni.

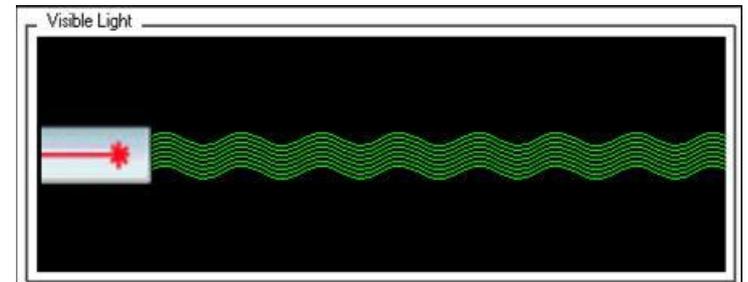
Un fascio LASER a grande distanza diverge in maniera minima: un fascio verde di un laser ad Argo con sezione in partenza di un centimetro di diametro si allarga fino ad una sezione di tre centimetri di diametro dopo un percorso di 500 metri.



Caratteristiche del laser

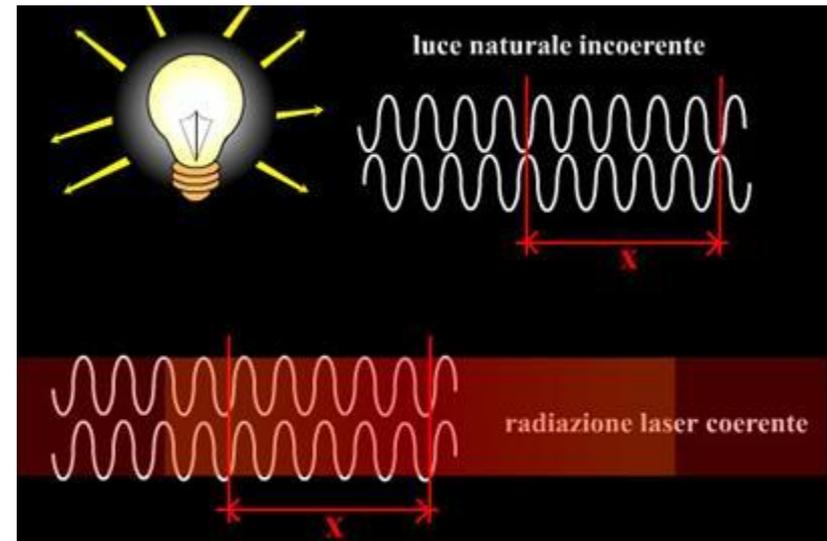
- **Monocromaticità:** la radiazione Laser presenta sempre una stessa frequenza mentre una lampadina a incandescenza emette radiazione composta da fotoni di energia differente.

La monocromaticità è legata alla coerenza temporale ed è dovuta al meccanismo dell'emissione stimolata di radiazione da parte del materiale attivo.



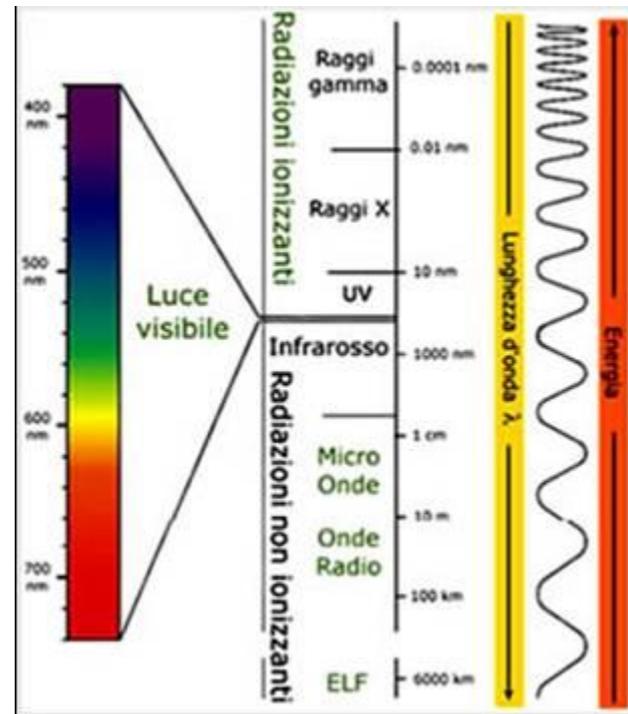
Caratteristiche del laser

- **Coerenza:** la proprietà di unidirezionalità dei fasci laser è legata alla coerenza spaziale ed è una conseguenza della struttura della cavità risonante del laser formata da due specchi paralleli che creano in uscita un fascio di fotoni con direzione esattamente perpendicolare alla loro superficie.



Lunghezze d'onda utilizzate

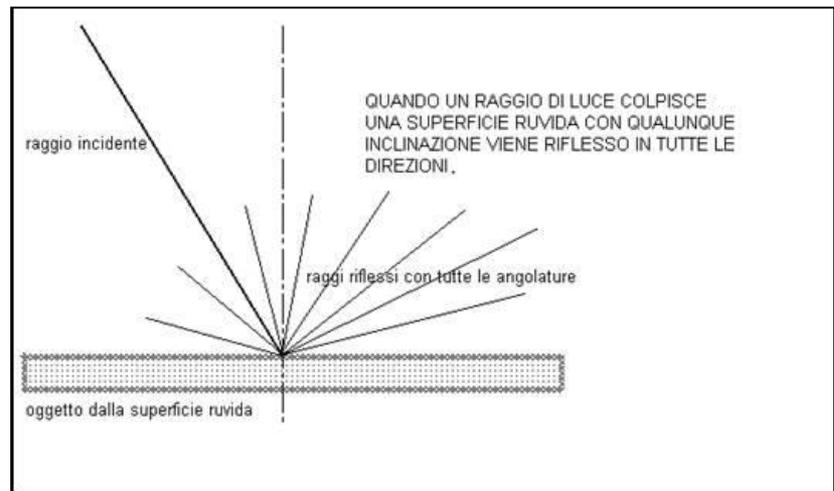
- La lunghezza d'onda del laser varia dai 200 nm ai 700 nm passando così dall'ultravioletto al visibile e all'infrarosso.



spettro elettromagnetico

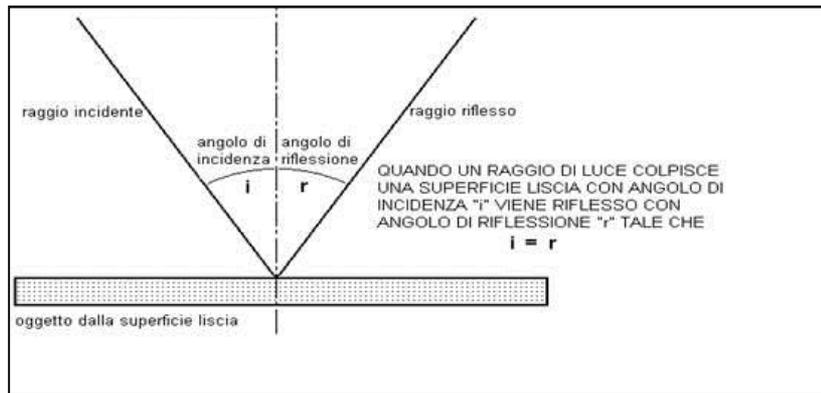
Riflessione del raggio laser

- La riflessione del raggio laser dipende dalla rugosità della superficie e dalla lunghezza d'onda del laser.
- Nel caso di **superficie rugosa** la riflessione segue il principio della legge di Lambert, quindi la direzione di riflessione è indipendente da quella del raggio incidente



Riflessione del raggio laser

- se invece la superficie è perfettamente liscia, la riflessione del raggio è speculare.



- Nella realtà difficilmente ci si trova ad eseguire misure su superfici simili a quelle descritte:
il raggio laser quindi si comporta in maniera ibrida.
- Infine si ha un comportamento diverso per le **superfici catarifrangenti o retroriflettenti** dove il raggio laser viene riflesso nella stessa identica direzione del raggio incidente.

Questa eccezione è sfruttata per individuare dei **target** simili a quelli usati in topografia, al fine di unire più scansioni fra loro o **georiferire** le nubi di punti in un sistema di riferimento noto.

Il laser scanner

- Il laser scanner terrestre è una tecnologia introdotta recentemente nel campo del rilevamento: consiste di un'apparecchiatura in grado di ricostruire modelli tridimensionali attraverso la registrazione di scansioni singole o multiple.
- La strumentazione generando un impulso laser, registra parte del segnale riflesso dall'oggetto colpito.
- Essendo nota la direzione del raggio nello spazio rispetto ad un sistema di riferimento interno allo strumento, ogni singolo punto viene posizionato con coordinate x, y, z relative;
- in funzione della riflettanza del materiale colpito viene registrata anche l'intensità del segnale.

- Le scansioni permettono di acquisire in tempi brevi **milioni di punti** in modo automatico, coniugando alla velocità d'esecuzione un'elevata accuratezza.
- Gli scanner laser 3D sono impiegati per **due tipi di misurazione**:
 - **laser scanner distanziometrici a misura di fase o a tempo di volo**, per oggetti grandi e distanti molti metri, fino a 1500 m
 - la **triangolazione ottica**, per scansioni ad altissima risoluzione di oggetti di dimensioni ridotte posizionati a minor distanza, fino a 50 m.

Risoluzioni dei laser scanner

- La **risoluzione** delle scansioni varia in base al tipo di strumentazione e alle finalità dell'impiego, da valori dell'ordine del **decimo di millimetro** degli scanner che usano la triangolazione ottica (per distanze inferiori ad 1 m fino a 50 m), ai valori **millimetrici o centimetrici** degli scanner a tempo di volo (da 1 m fino a 1500 m).

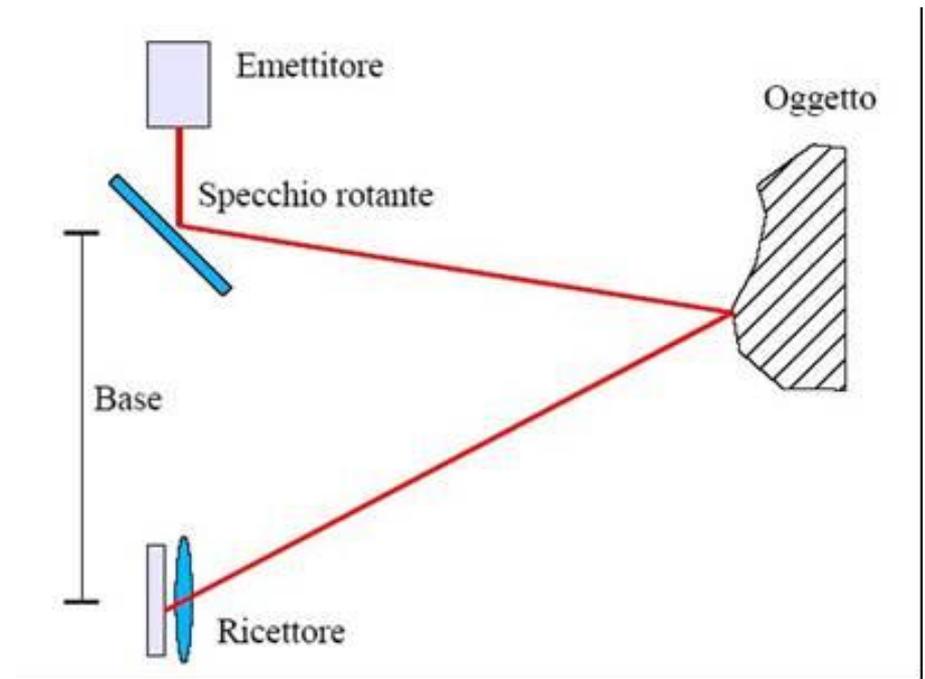
Principio di funzionamento dei laser scanner triangolatori

- I laser scanner triangolatori sono usati per **oggetti di piccole dimensioni** (reperti archeologici, statue, fontane, bassorilievi)
- la loro applicazione principale è la prototipazione rapida, grazie alla quale un manufatto creato in maniera artigianale o già esistente in natura viene rilevato nel suo complesso per produrne poi copie in maniera automatica ed industriale.
- Grazie alle elevate precisioni, dell'ordine del decimo di millimetro, gli **scanner triangolatori** trovano largo impiego nella catalogazione di **reperti archeologici** o nel **rilievo di monumenti** importanti quali statue, fontane, bassorilievi.
- Il principio che utilizza questo strumento è paragonabile alla più classica intersezione in avanti usata in topografia.

Laser scanner triangolatore

Poiché è nota con esattezza la distanza tra emettitore e ricevitore e gli angoli di direzione, il triangolo è risolto.

L'emettitore è il raggio laser che viene proiettato da uno specchio rotante sull'oggetto da rilevare. Naturalmente il movimento dello specchio è noto in ogni momento.



schema di funzionamento

- Il ricevitore è invece una fotocamera digitale calibrata su cui compare lo **spot** ovvero l'impronta lasciata dal laser sull'oggetto da misurare.
- Velocemente viene calcolata la posizione di questo spot rispetto al centro del fotogramma che proiettato per la distanza focale dell'ottica permette di ricavare l'angolo di direzione necessario a completare il calcolo. **La distanza ottimale dall'oggetto del rilievo è direttamente proporzionale alla distanza tra l'emettitore e il ricevitore.**
- Nei casi in cui l'oggetto da misurare è troppo distante o troppo vicino, e quindi gli angoli che si formano alla base sono troppo acuti o troppo ottusi, la precisione tende a scadere.
- Il triangolo formato tra emettitore – oggetto - ricevitore deve essere il più possibile simile ad un triangolo equilatero.

- In gergo tecnico, si usa affermare che questi scanner sono utilizzati per gli indoor objects
- I principali rilievi vengono fatti in laboratori, officine o in locali chiusi.

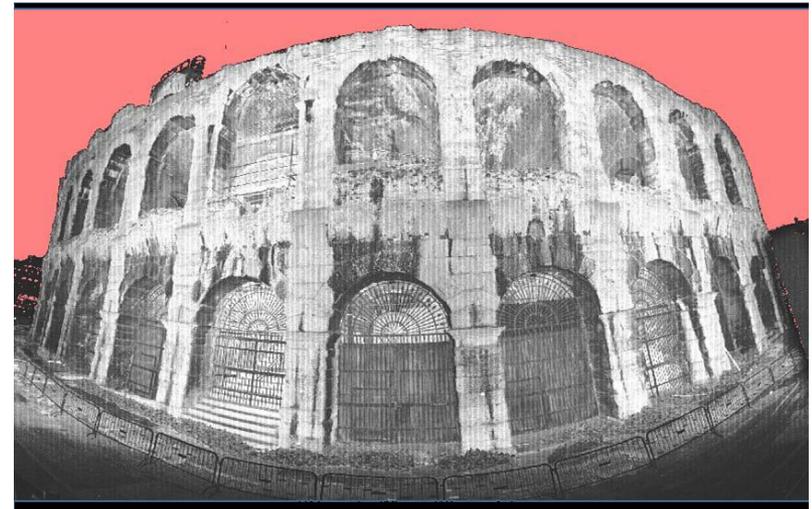
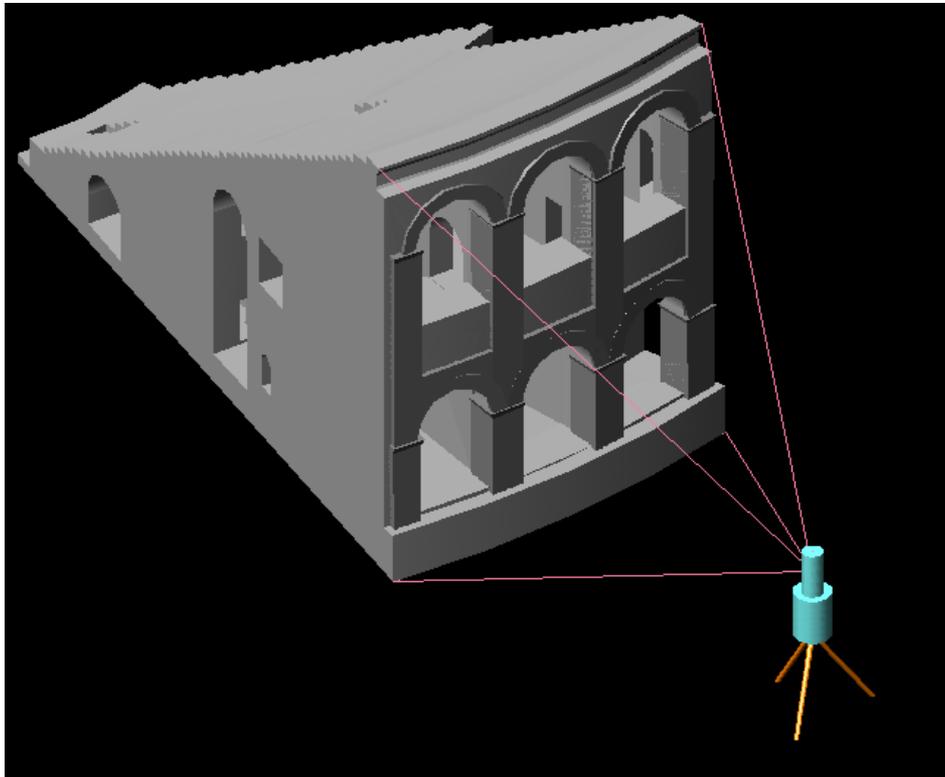
Questa necessità non è dettata tanto dalle dimensioni dell'oggetto, che di solito è medio piccolo e ben gestibile in una officina, ma soprattutto dalle problematiche dovute alla luce ambientale.

Il laser scanner è in definitiva una stazione totale senza riflettore motorizzata ed automatizzata.

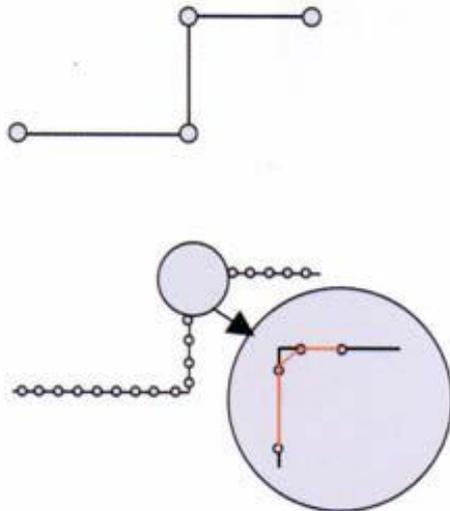
Con il laser scanner si rilevano in tempi brevissimi milioni di punti.



Impostato un passo di campionamento ed il campo di misura il laser scanner rileva qualsiasi oggetto che sia in vista e alla portata dello strumento.



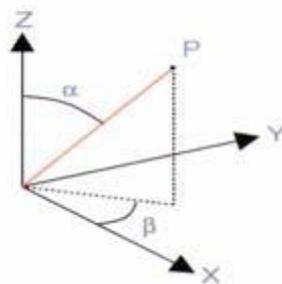
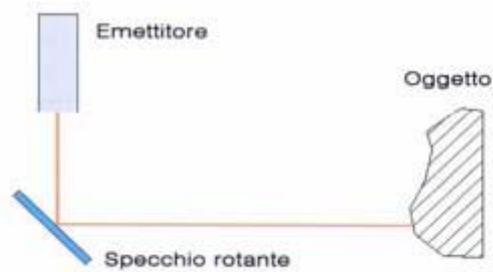
- Il rilievo di un oggetto con strumentazione topografica tradizionale viene realizzato determinando le coordinate spaziali dei suoi punti caratteristici, scelti dall'operatore.
- Il laser scanner rileva un numero enorme di punti ma non effettua nessuna scelta ed i punti risultano distribuiti secondo una maglia regolare, ma casuale.



L'intelligenza necessaria a trasformare il dato acquisito dal laser in un rilievo metrico vero e proprio deve essere inserita a posteriori.

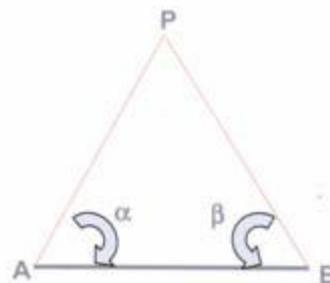
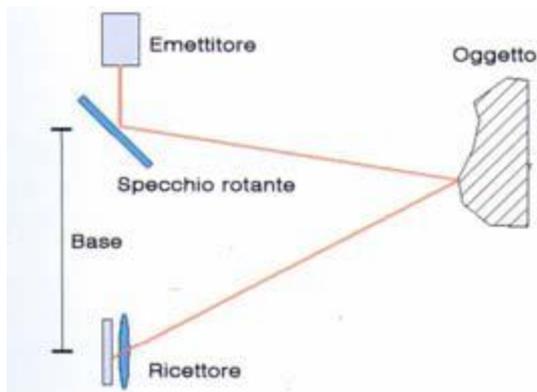
**ONEROSA FASE DI
POSTELABORAZIONE**

Le tecnologie laser scanner sono molteplici e permettono di rilevare o oggetti piccoli ad elevatissima risoluzione e precisione od oggetti estesi a risoluzione più bassa.



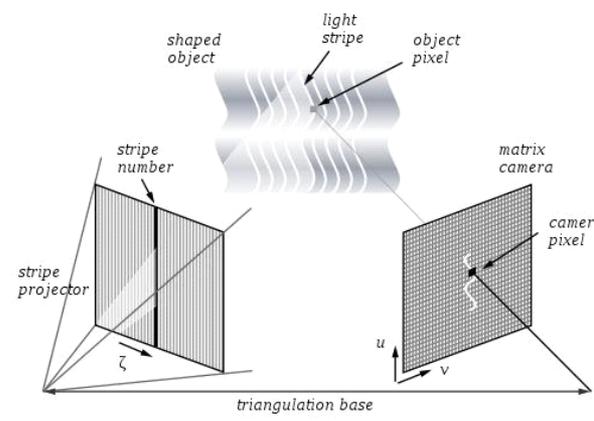
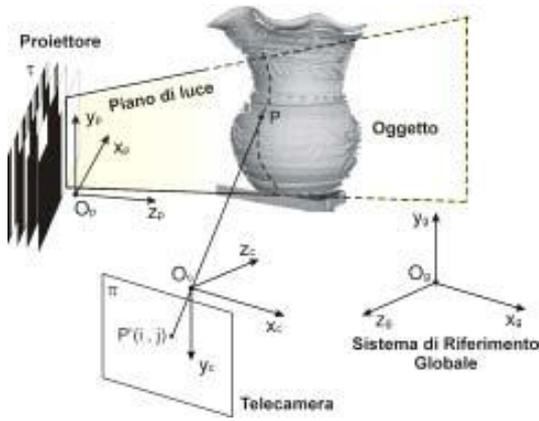
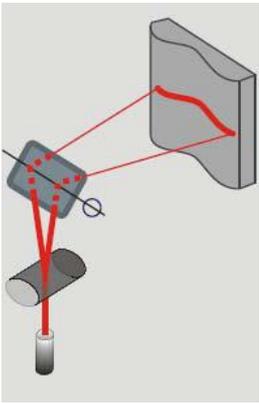
Sistemi a scansione
DISTANZIOMETRICI

(a misura di fase o tempo di volo)



Sistemi a scansione
TRIANGOLATORI

Tipologie di rilievo LASER SCANNER



Sistemi di scansione

LIGHTSTRIPE
(Luce strutturata)



Sistemi di scansione
A CONTATTO

I sistemi distanziometrici permettono precisioni centimetriche e portate fino ad un migliaio di metri (dipende dalla riflettanza degli oggetti rilevati).

Sono adatti a rilievi architettonici ed ambientali e sono utilizzati sia da stazioni fisse che installati su piattaforme mobili

Gli altri sistemi elencati raggiungono precisioni submillimetriche e sono adatti per piccoli oggetti.

UN PROBLEMA FONDAMENTALE NEL LAVORARE CON IL LASER
E' LA MOLE DEI DATI PRODOTTI



MAGGIORE DETTAGLIO



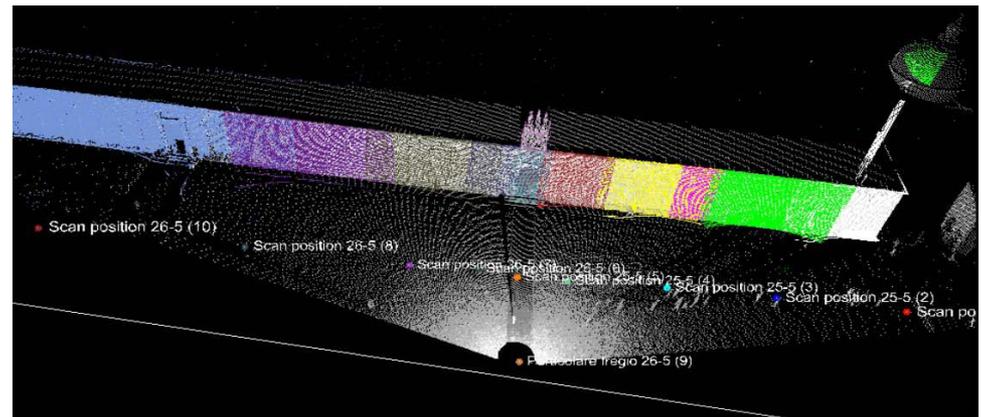
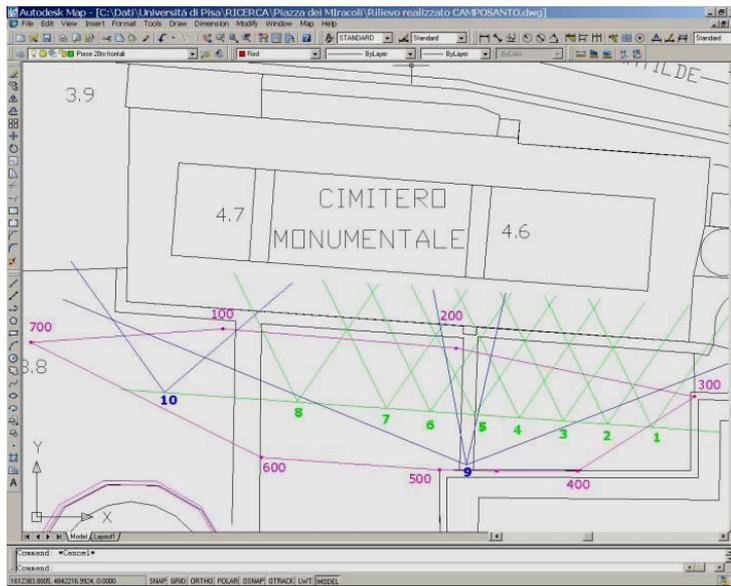
DATI PIU' "PESANTI"

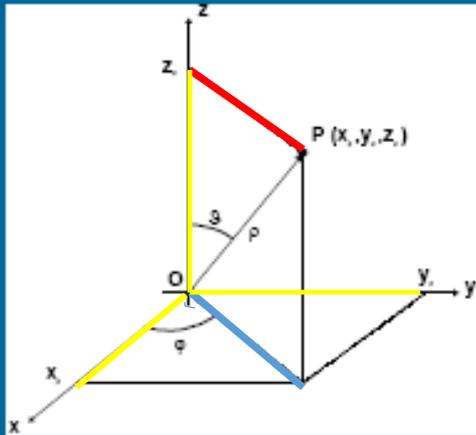


HARDWARE E SOFTWARE DI ELABORAZIONE PIU' COSTOSI

Oggetti molto grandi o che presentano diverse esposizioni da rilevare necessitano di **più punti di scansione** (punti di vista) per un rilievo completo.

Ogni **scansione** è un rilievo a sè stante che successivamente deve essere messa in relazione spaziale con le altre.





$$\begin{aligned}x_p &= \rho \cos \varphi \sin \vartheta \\y_p &= \rho \sin \varphi \sin \vartheta \\z_p &= \rho \cos \vartheta\end{aligned}$$

$$\rho = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}$$

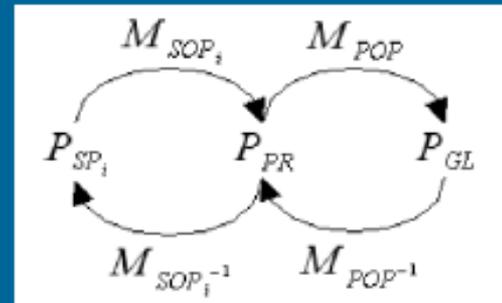
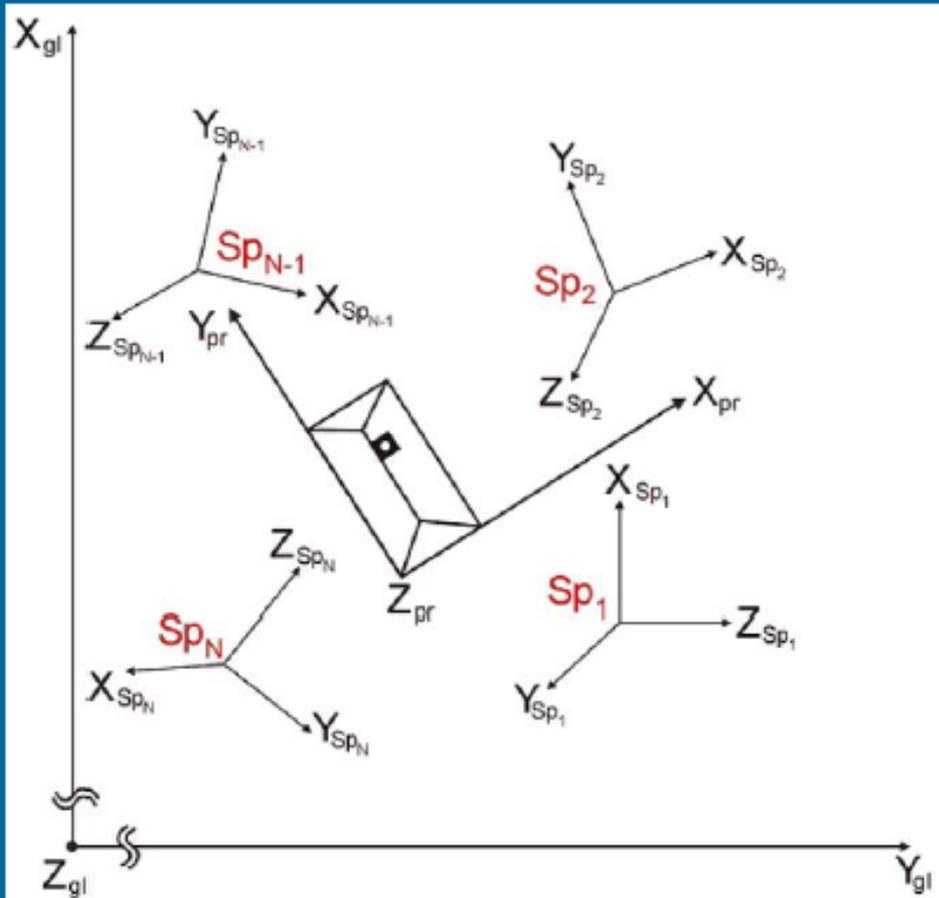
$$\cos \vartheta = \frac{z_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2}}$$

Le coordinate dei punti sono determinate dal laser in coordinate sferiche polari (ρ, φ, ϑ) e ci vengono fornite in coordinate cartesiane (X, Y, Z).

Il sistema di riferimento è proprio di ogni strumento e di ogni stazione di misura.

SOCS(Scanner's Own Coordinate System)

La prima elaborazione successiva alla fase di acquisizione è la **registrazione**, ovvero riportare in un unico sistema di riferimento tutte le scansioni.



PRCS:
(Project Coordinate System)

GLCS:
(Global Coordinate System)

SOP :
(Sensor Orientation and Position)

POP :
(Project Orientation and Position)

$$M_{SOP} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} + R(r_x, r_y, r_z) \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

La trasformazione fra sistemi di coordinate per il laser è una rototraslazione rigida nello spazio.

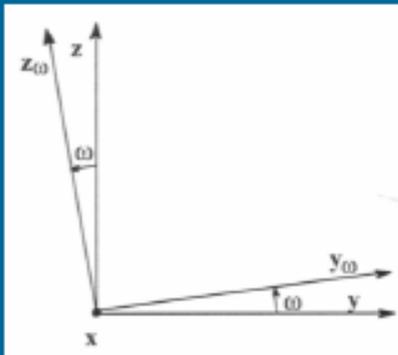
La traslazione consiste nel determinare il vettore di spostamento dell'origine del sistema di riferimento.

$$\begin{cases} x = X + a \\ y = Y + b \\ z = Z + c \end{cases}$$

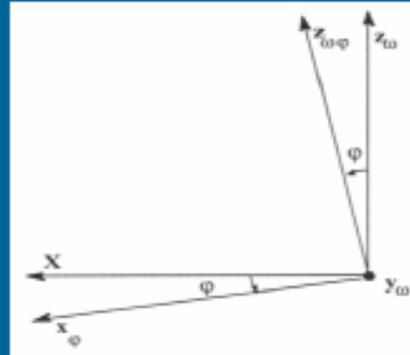
La rotazione consiste nel determinare i tre angoli di rotazione attorno ai tre assi.

La rotazione fra sistemi di riferimento può essere vista come la composizione di tre rotazioni elementari.

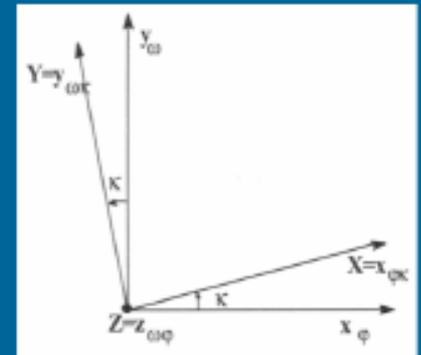
$$[R_\omega] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}$$



$$[R_\varphi] = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}$$



$$[R_\kappa] = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

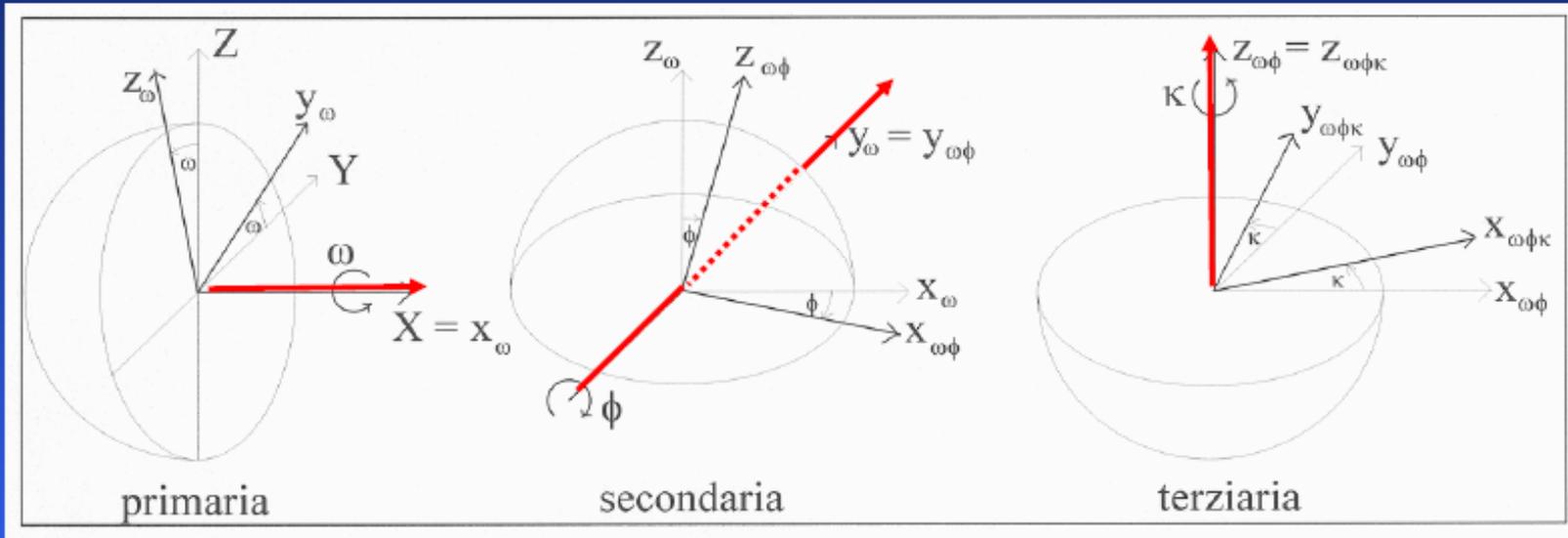


$$R = R_\omega \cdot R_\varphi \cdot R_\kappa$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos\varphi \cdot \cos\kappa & -\cos\omega \cdot \sin\kappa + \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \sin\omega \cdot \sin\kappa + \sin\varphi \cdot \cos\omega \cdot \cos\kappa \\ \sin\kappa \cdot \cos\varphi & \cos\omega \cdot \cos\kappa + \sin\varphi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa & -\sin\omega \cdot \cos\kappa - \sin\varphi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa \\ -\sin\varphi & \sin\omega \cdot \cos\varphi & \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = {}^tR \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

una rotazione nello spazio si può scomporre in tre rotazioni piane



$$\begin{pmatrix} x_\omega \\ y_\omega \\ z_\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{\omega\phi} \\ y_{\omega\phi} \\ z_{\omega\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\omega \\ y_\omega \\ z_\omega \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{\omega\phi\kappa} \\ y_{\omega\phi\kappa} \\ z_{\omega\phi\kappa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\omega\phi} \\ y_{\omega\phi} \\ z_{\omega\phi} \end{pmatrix}$$

Nei rilievi da terra, il calcolo dei 6 parametri della trasformazione viene realizzato ai minimi quadrati sulla base di un certo numero di punti doppi (coordinate note nei due sistemi di riferimento).

Questi punti, oltre ad essere in numero congruo, devono anche essere bene distribuiti nell'intera area rilevata.

La precisione di una trasformazione viene valutata calcolando lo scarto quadratico medio (RMSE) dei residui v_i relativi agli N (>3) punti corrispondenti.

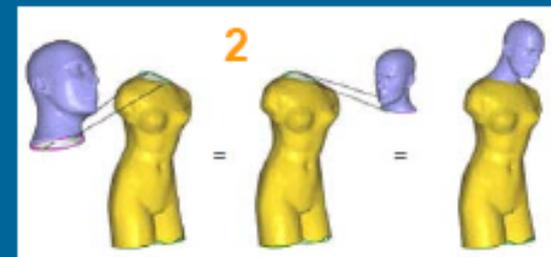
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(v_x)_i^2 + (v_y)_i^2 + (v_z)_i^2]}{N}}$$

La scelta della tecnica di registrazione è elemento essenziale della progettazione del rilievo.

La registrazione può essere fatta:

- DIRETTAMENTE NEL SISTEMA GLOBALE (Le scansioni non necessitano di zone di sovrapposizione)
- PAIRWISE: TRAMITE TARGET A COMUNE (*marker¹*) o RICONOSCIMENTO DI FORME (*shape descriptors²*)

La scelta è determinata dalla complessità e dalla forma dell'oggetto da rilevare.

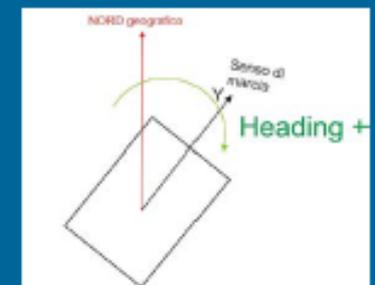
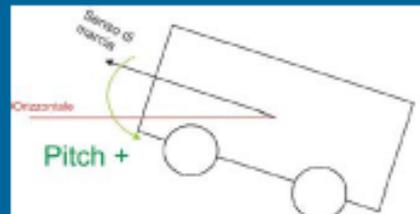


Nel caso in cui il rilievo laser viene fatto da piattaforma in movimento non è praticamente possibile registrare le scansioni rispetto punti presegnalizzati.

Si ricorre alla **georeferenziazione diretta** delle scansioni.

Le piattaforme mobili sono solitamente dotate di sistemi **GNSS** (*Global Navigation Satellite System* – es. *GPS*) integrati da strumentazioni **INS** (*Inertial Navigation System*).

Il GPS fornisce il **vettore di traslazione**, mentre il sistema inerziale fornisce gli **angoli di roll, pitch e heading** della piattaforma rispetto al sistema di riferimento globale.



Mobile Mapping System

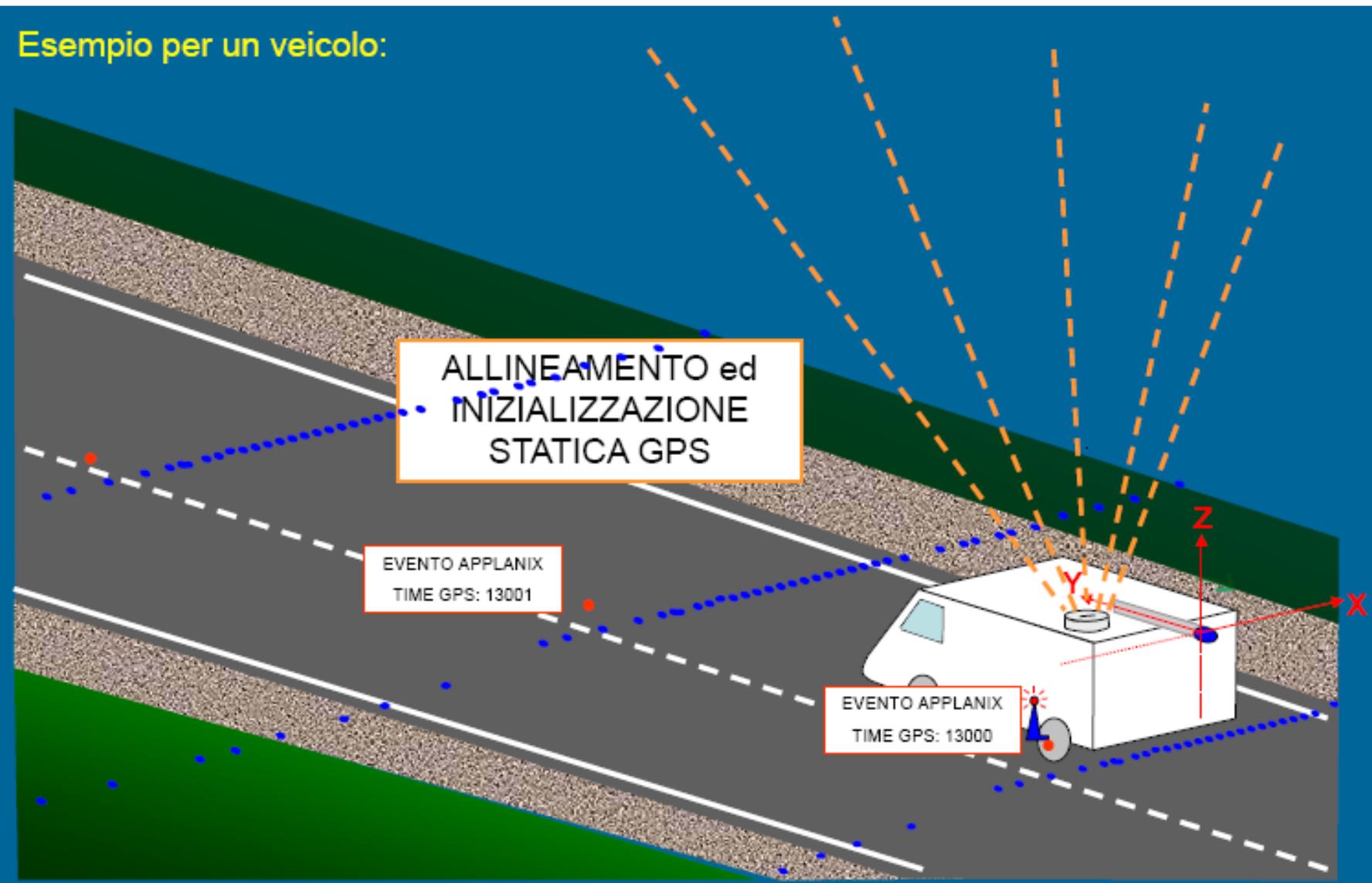
- Si definisce *Mobile Mapping System* qualunque piattaforma mobile provvista di sensori e sistemi di misura atti a fornire la *posizione 3D* quasi-continua della piattaforma e contemporaneamente in grado di acquisire dati geografici, senza l'ausilio di punti di controllo a terra.

Esempio per un veicolo:

ALLINEAMENTO ed
INIZIALIZZAZIONE
STATICA GPS

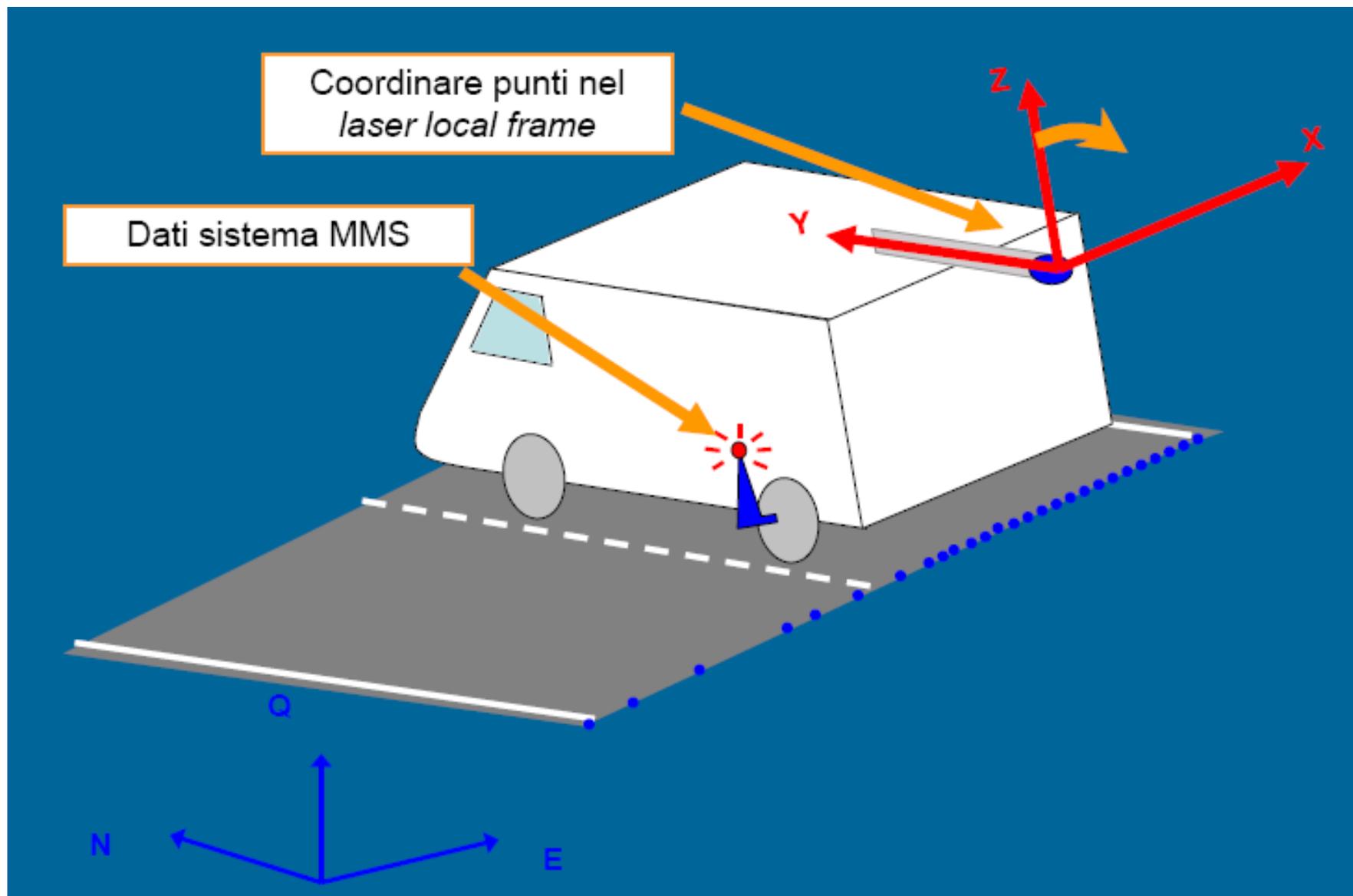
EVENTO APPLANIX
TIME GPS: 13001

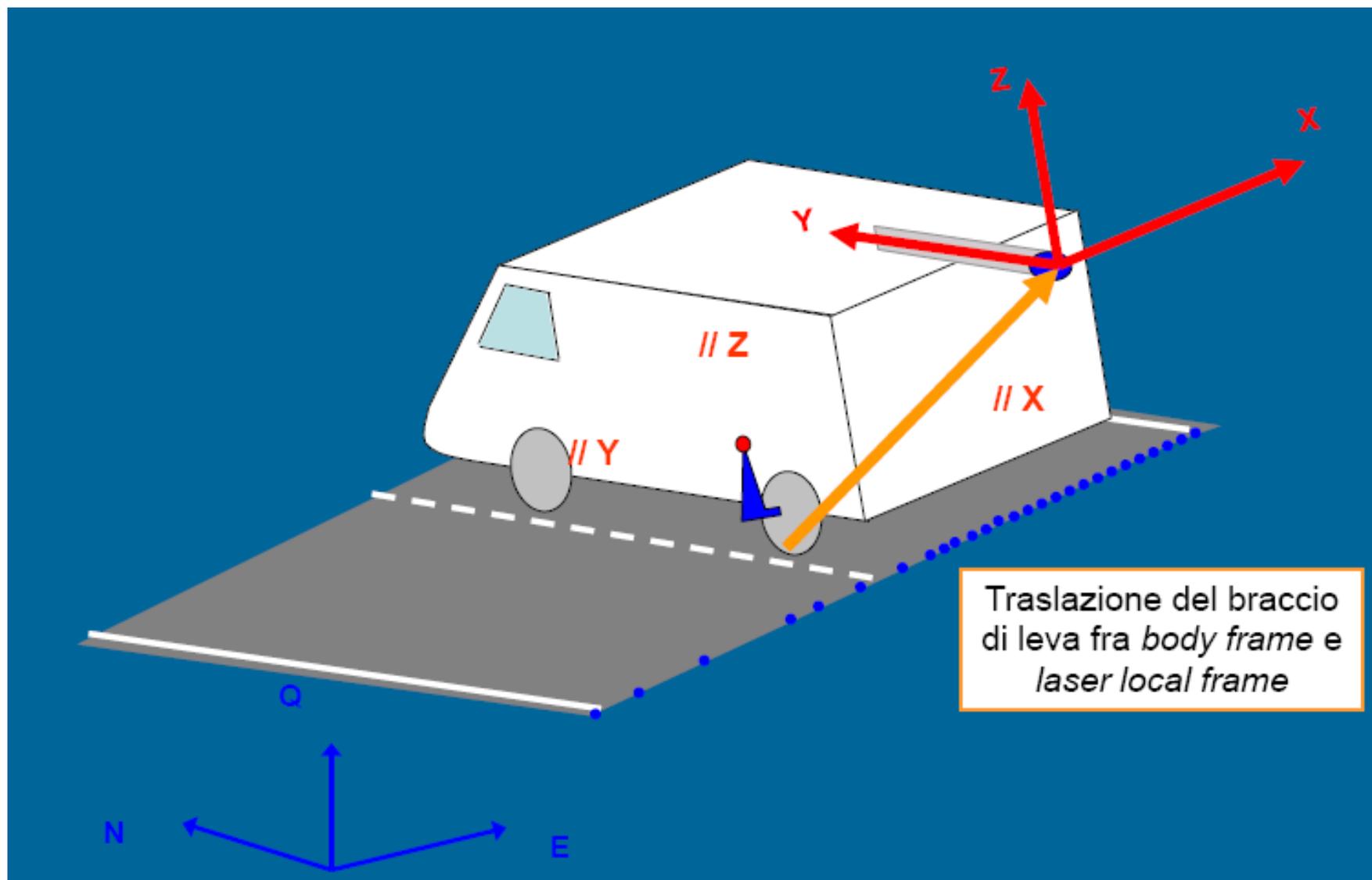
EVENTO APPLANIX
TIME GPS: 13000

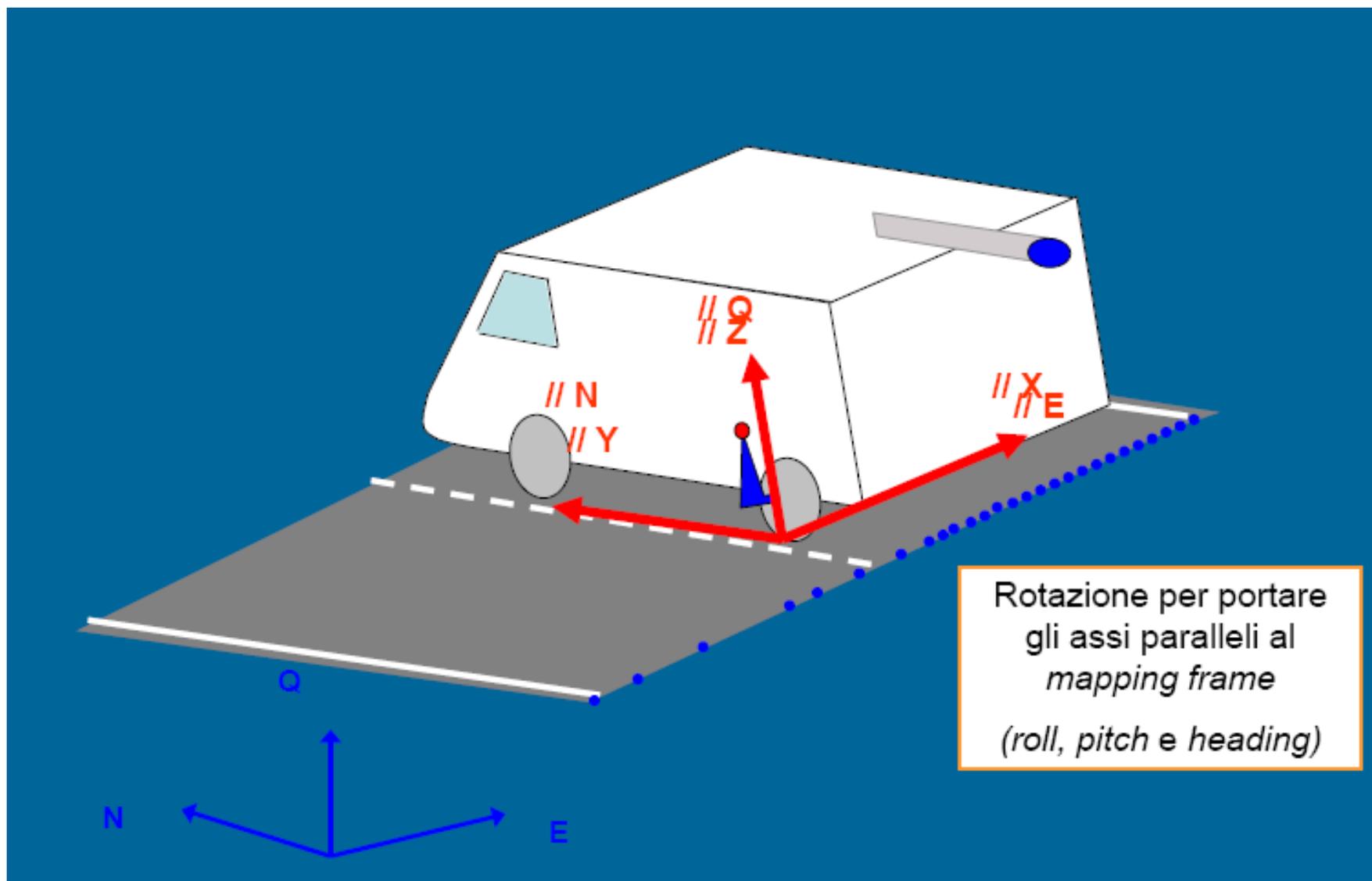


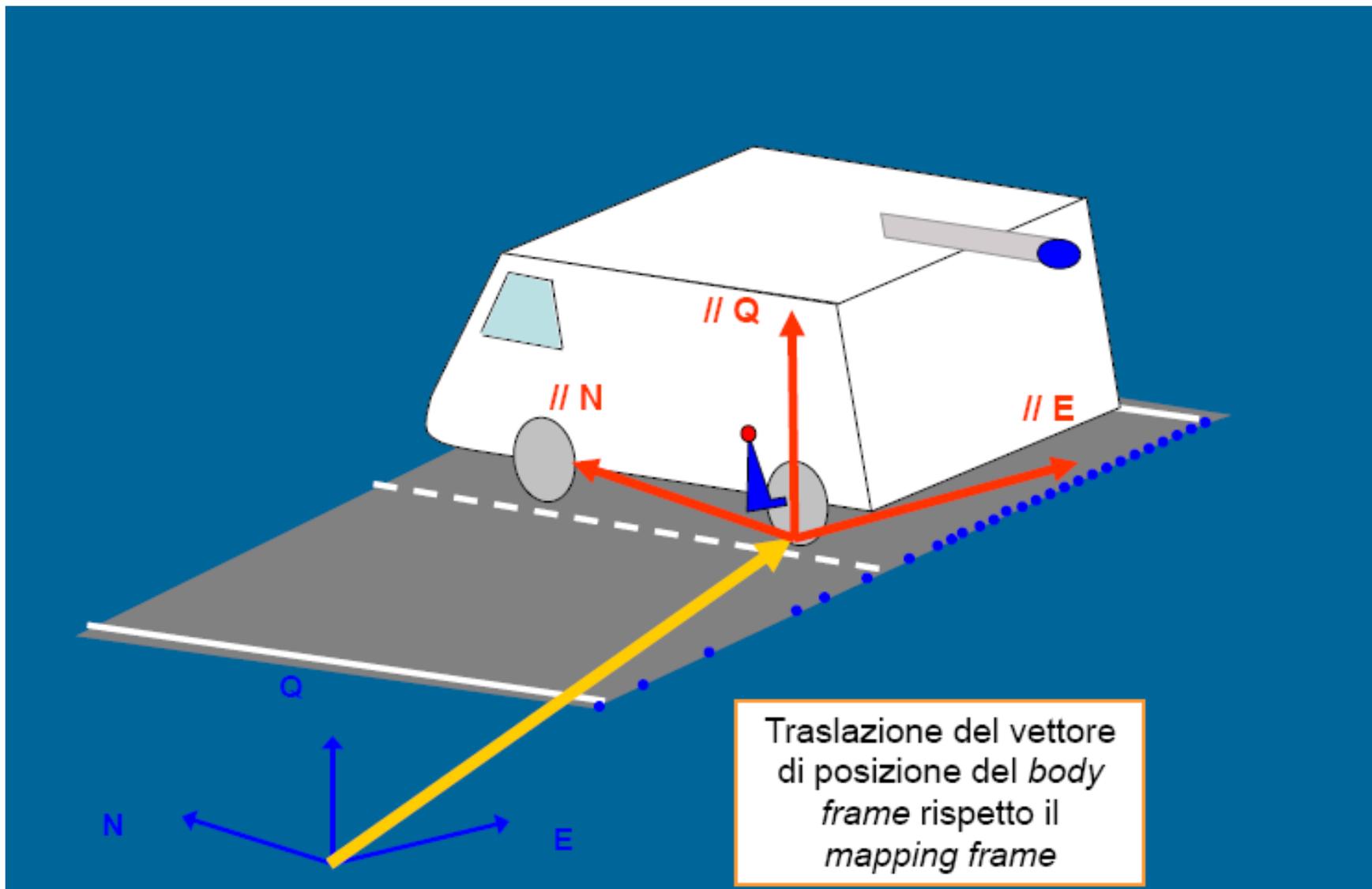
Coordinare punti nel
laser local frame

Dati sistema MMS

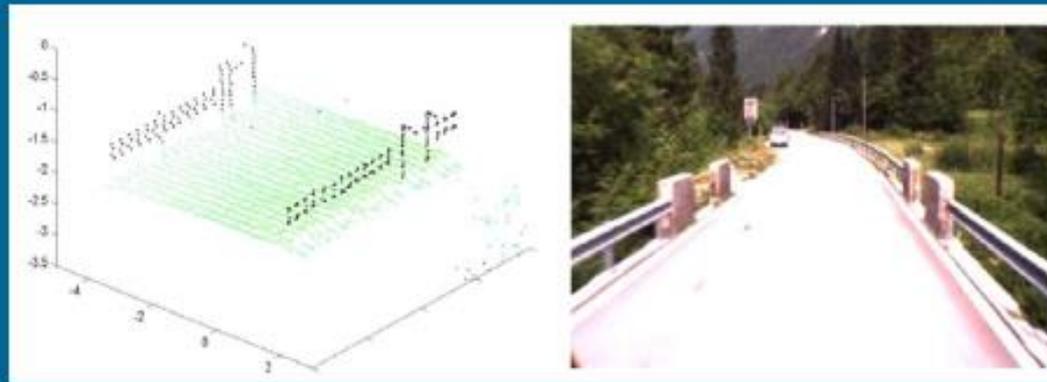
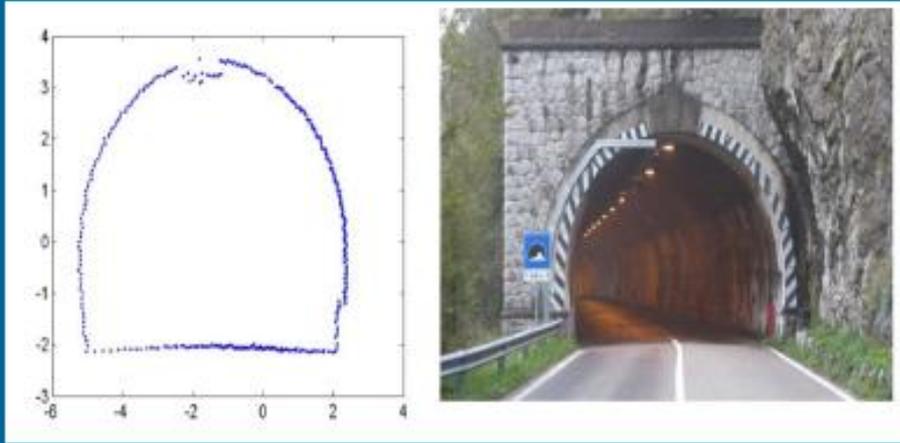


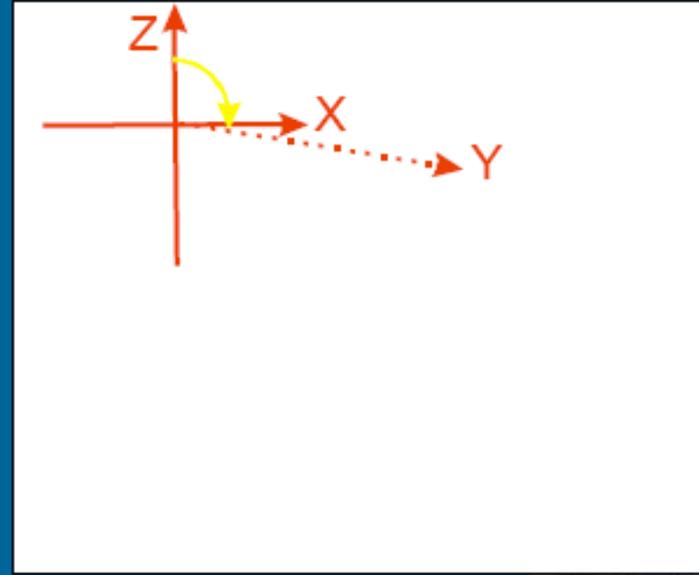






Sistemi LASER





Esempio di laser scanner monoassiale:

**IBEO Automotive LD GmbH
su MMS GIGI One dell'Università di Trieste.**

Hardware

- LiDAR: 3x laser scanners for back and side mounting (4 or more scanners optional)
- SMcontrol™ computer unit with 8 inch TFT display for control and visualization of laser scanner data
- TERRAcontrol™ comprising:
 - Computer unit with integrated internal 12-channel GPS receiver and L1/L2 GPS antenna
 - Inertial Measurement Unit with 256Hz data rate, calibrated
 - Speed Sensor
- 2x 0.5 megapixel documentation video systems

Software

- Software for LiDAR data geocoding, transformation, and co-ordinate system projection
- TerraScan, TerraModeler and TerraMatch from TERRASOLID for LiDAR data post-processing of laser scanner points
- TERRAoffice™ inertial navigation software including forward/backward Kalman filtering
- GrafNav GPS post-processing software of WAYPOINT CONSULTING; full-featured kinematic and static GPS post-processing software

<http://www.3dlasermapping.com/>

<http://www.streetmapper.net/>



Maximum Range	>100 m (to 20% reflectivity target)
Range Precision	±7 mm (1 sigma)
Coverage (spatial resolution)	Up to 1cm @ 100 km/hr †
Absolute Accuracy	±5 cm (assumes good GPS data)
Position/Orientation System - POS	Applanix POS LV 420
Scanner Field of View	Full 360° without obscurations
Scanner Rate	9000 RPM
Measurement Rate	100,000 shots/sec per sensor
Measurements per Shot	Up to 4 simultaneous (1st, 2nd, 3rd and last each per sensor)
Number of Sensors	1 to 4 Lidars
Cameras	Up to 2
Capable Vehicles	Fully Adaptable
Operational Temperature	-20°C to 40°C (outside ambient)
Storage Temperature	-40°C to 80°C
Eye Safety	IEC/CDRH Class 1

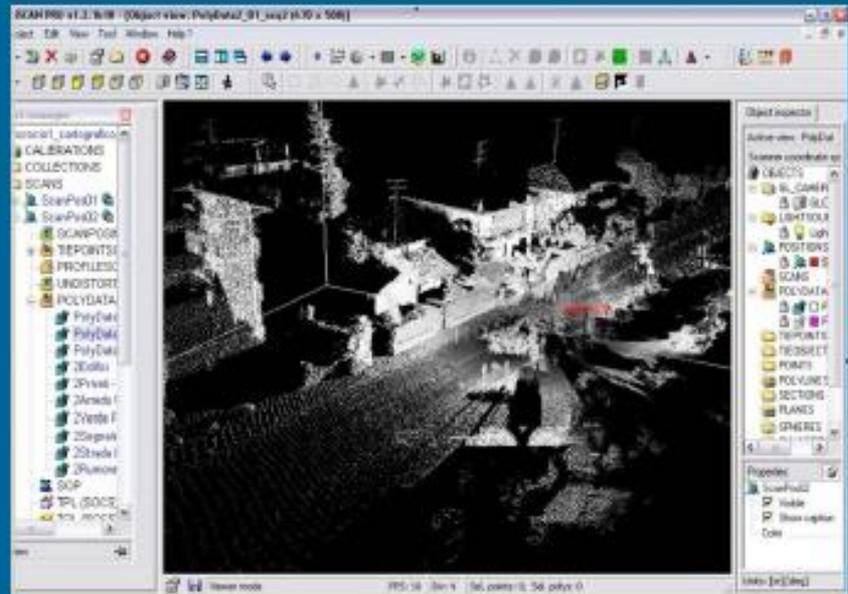
<http://www.optech.ca/>

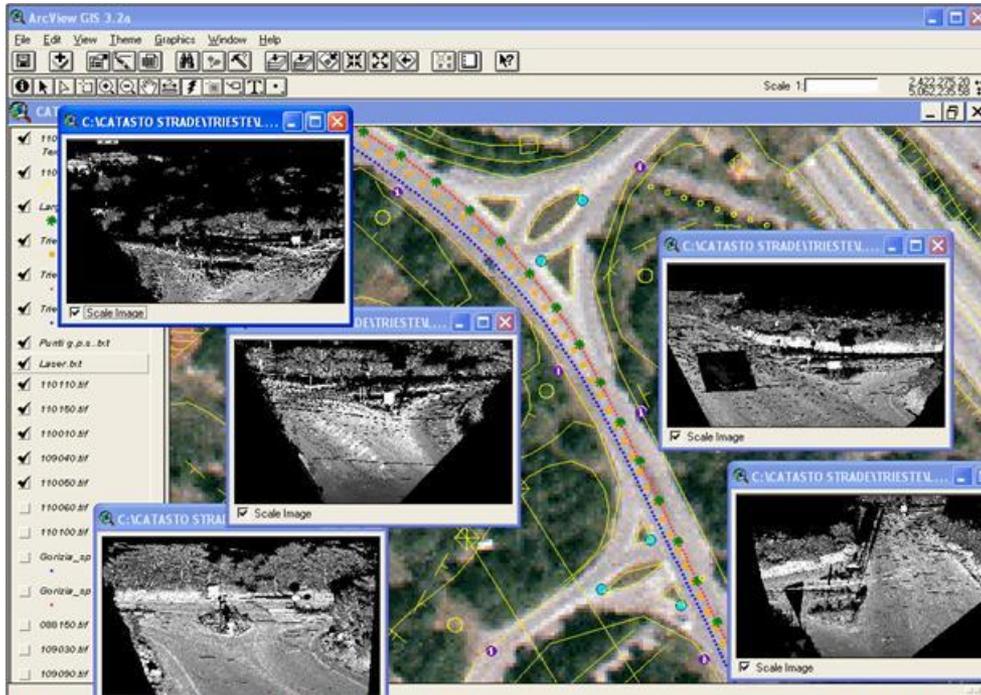


Un veicolo può anche servire come semplice sistema di spostamento rapido del laser.

Il laser scanner può essere montato sul veicolo VINCI'S del Dipartimento di Ingegneria Civile di Pisa per essere più facilmente spostato da una stazione all'altra e per avere un miglior angolo di vista dell'oggetto.

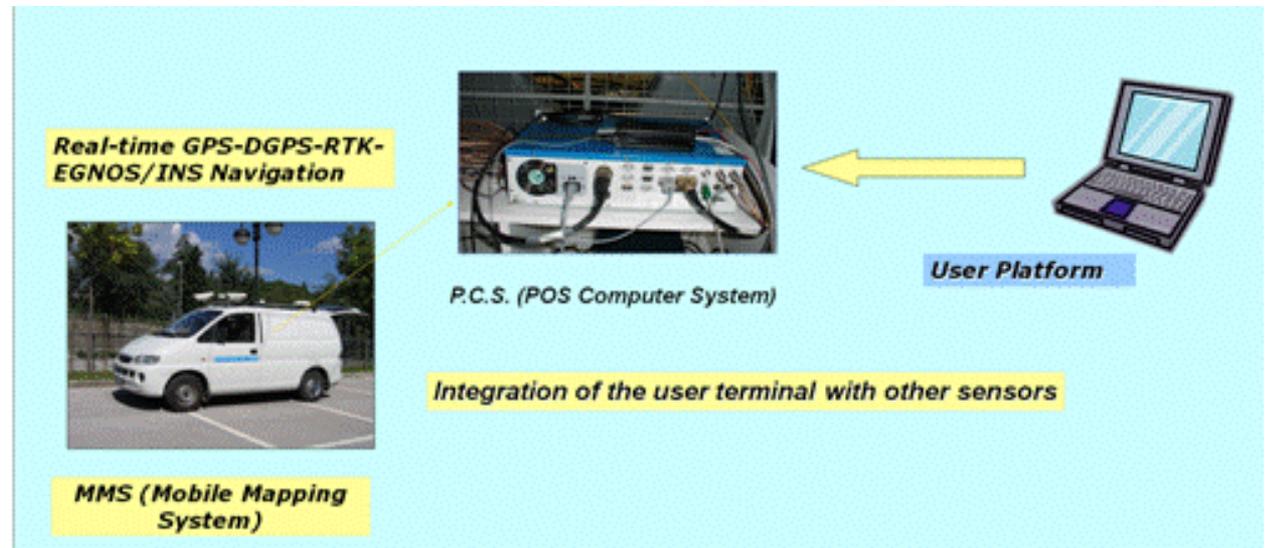
Nell'esempio sottostante è riportato il rilievo di un incrocio e delle sue pertinenze.





Integration with Laser Scanner data

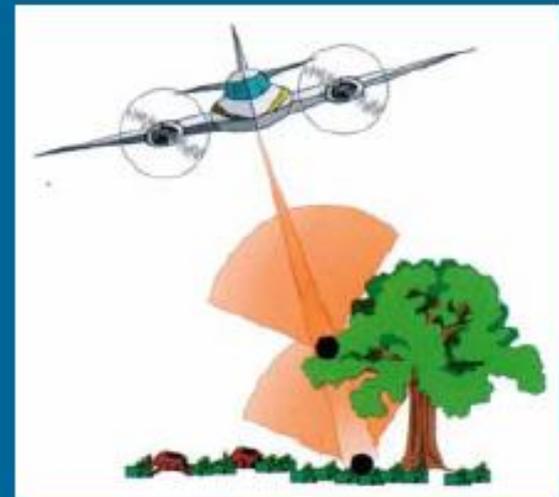
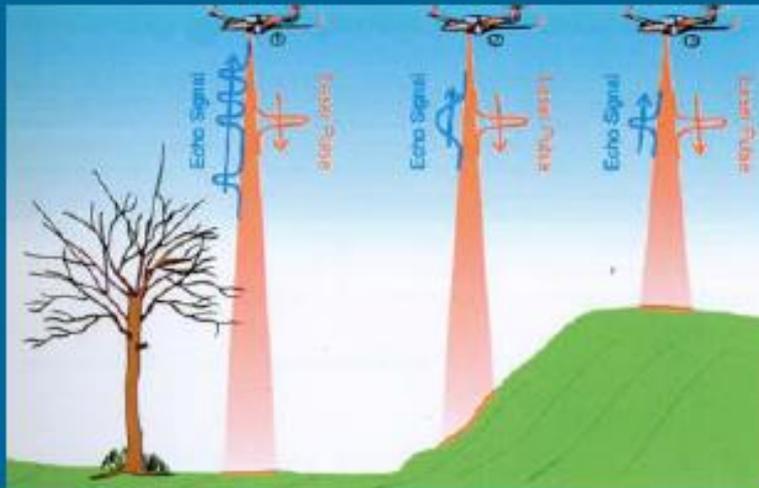
MMS GIGI One
 Centro di Eccellenza
 per la Ricerca in
 TeleGeomatica
 UNITS



Si sta diffondendo anche per i laser scanner terrestri la possibilità, un tempo riservata ai laser aviotrasportati, di misurare i diversi impulsi di ritorno della misura laser.

In qualche modo, nei rilievi ambientali è possibile “bucare” la vegetazione.

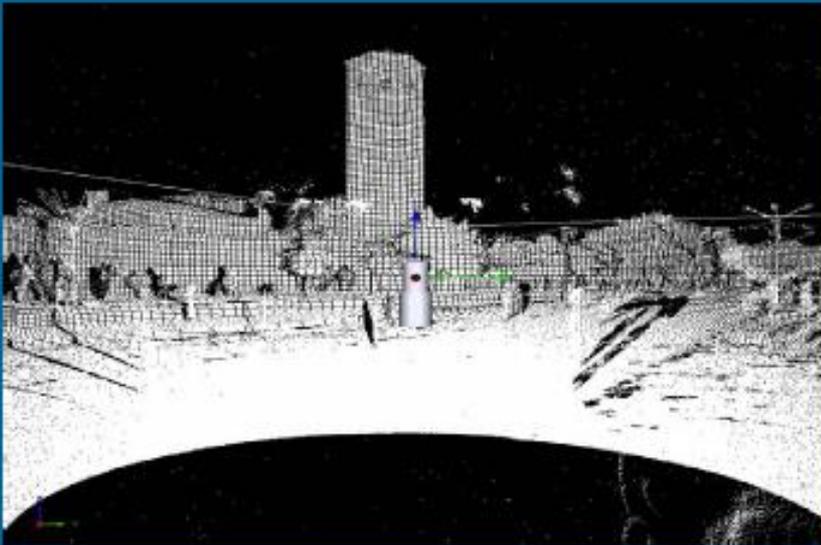
Le nuvole laser possono essere ad esempio elaborate rispetto il primo impulso o l'ultimo impulso (es. definizione di DTM o DSM).



Per elaborazioni numeriche automatiche (es. creazione DSM o DTM) la nuvola di punti può essere sufficiente.

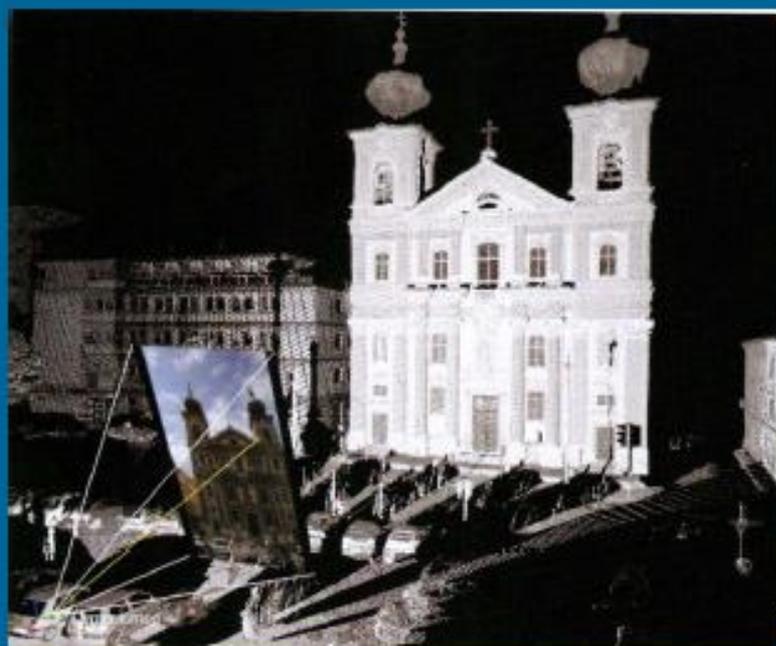
Se l'operatore deve intervenire manualmente sulla nuvola per operazioni di filtraggio è praticamente indispensabile poter disporre di una **nuvola di punti a colori reali**.

Si possono affiancare al rilievo laser delle prese fotogrammetriche.



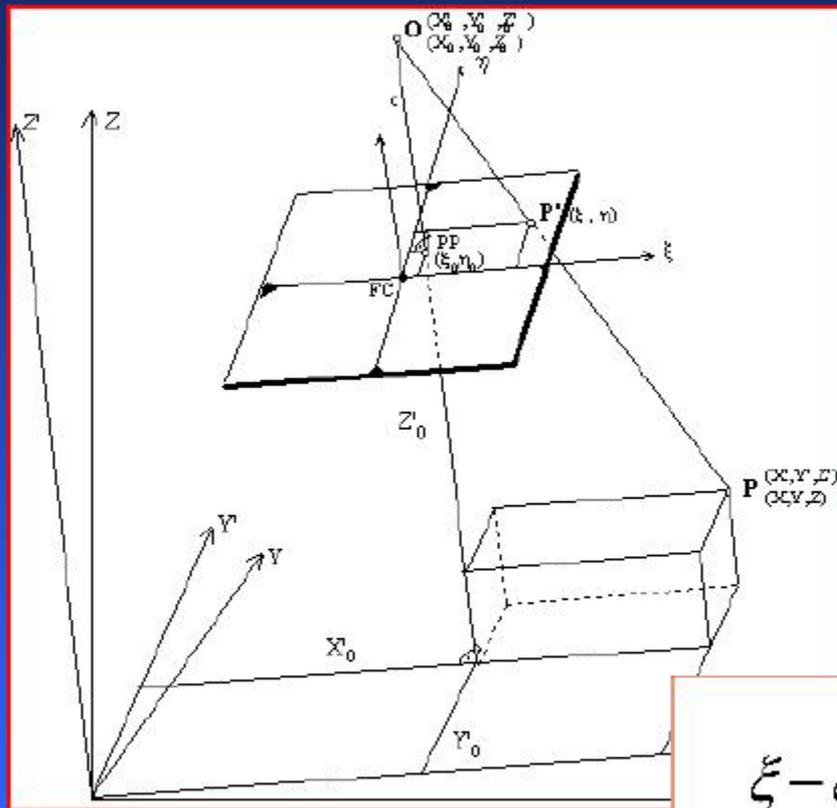
Le prese possono essere fatte con fotocamere solidali o integrate al laser scanner oppure con fotocamere indipendenti dal laser.

In ogni caso si deve risolvere il problema di orientare le prese fotogrammetriche per la corretta colorazione della nuvola di punti.



Alla base di ogni procedura di orientamento stanno le condizioni di collinearità:

Collinearità



Ponendo $\zeta = 0$ le **condizioni di collinearità** che esprimono l'allineamento tra i tre punti diventano

$$\frac{\xi - \xi_0}{c} = \frac{X' - X'_0}{Z'_0 - Z'}$$

$$\frac{\eta - \eta_0}{c} = \frac{Y' - Y'_0}{Z'_0 - Z'}$$

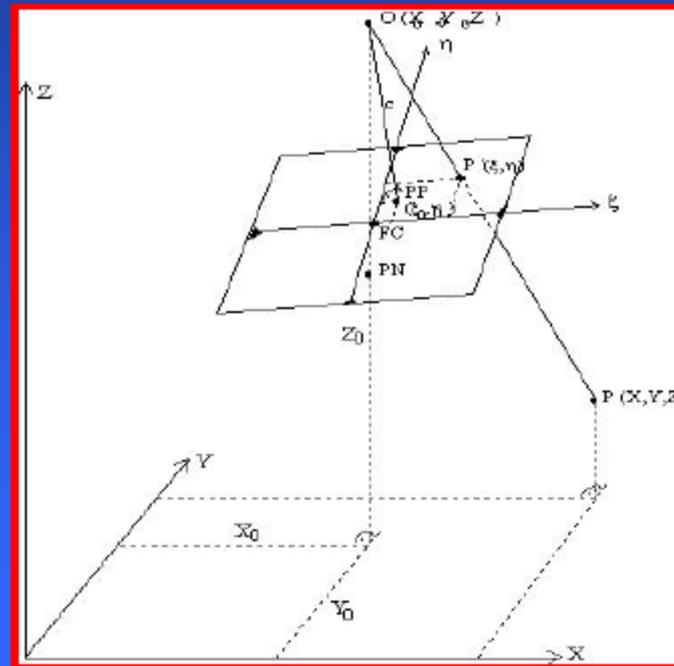
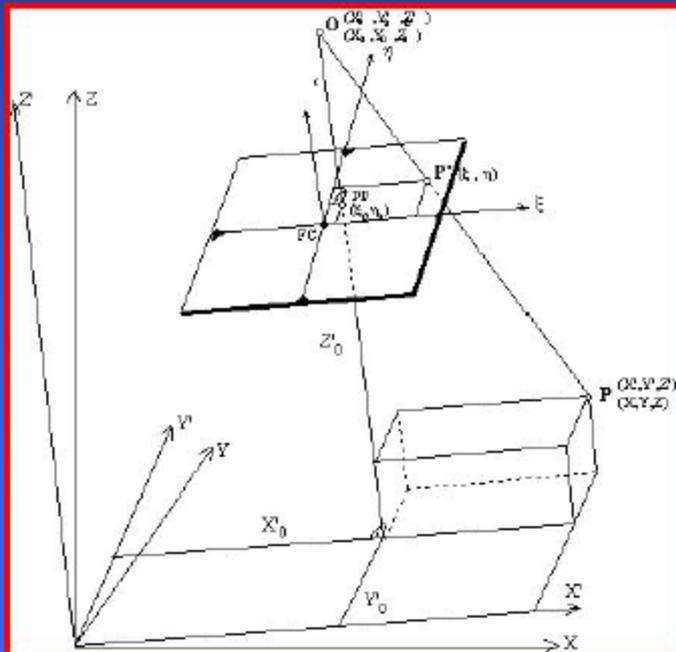
Collinearità

$$\frac{\xi - \xi_0}{c} = \frac{X' - X'_0}{Z'_0 - Z'}$$

$$\frac{\eta - \eta_0}{c} = \frac{Y' - Y'_0}{Z'_0 - Z'}$$

Occorre infine riportare il sistema terreno ruotato X', Y', Z' , nel sistema terreno vero e proprio X, Y, Z .

E' sufficiente applicare la rotazione tra i due sistemi



E' sufficiente applicare la matrice di rotazione:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \kappa \cos \phi & -\operatorname{sen} \kappa \cos \phi & \operatorname{sen} \phi \\ \cos \kappa \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \omega + \cos \omega \operatorname{sen} \kappa & \cos \kappa \cos \omega - \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \kappa & -\operatorname{sen} \omega \cos \phi \\ \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \kappa - \cos \kappa \operatorname{sen} \phi \cos \omega & \cos \omega \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \kappa + \cos \kappa \operatorname{sen} \omega & \cos \phi \cos \omega \end{pmatrix}$$

QUESTA COINCIDE CON LA MATRICE DI TRASFORMAZIONE DA
(X', Y', Z') (parallelo a (ξ,η,ζ) e centrato in O) A (X,Y,Z)

Cioè sostituire :

$$\begin{pmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{pmatrix} = R^T \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

EQUAZIONI DI COLLINEARITA'

Ricavando le coordinate immagine si ottengono le equazioni di collinearità nella forma

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Parametri di
Orientamento Interno

c distanza principale (costante della camera)

ξ_0, η_0 coordinate del punto principale

Parametri di
Orientamento Esterno

X_0, Y_0, Z_0 coordinate assolute del centro di presa

ω, ϕ, κ tre rotazioni d'assetto

EQUAZIONI DI COLLINEARITA'

Utilizzo delle equazioni
nelle tre fasi

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Da coordinate oggetto a coordinate immagine →

acquisizione

Determinazione parametri di or. esterno →

orientamento

Da coordinate immagine a coordinate oggetto →

restituzione

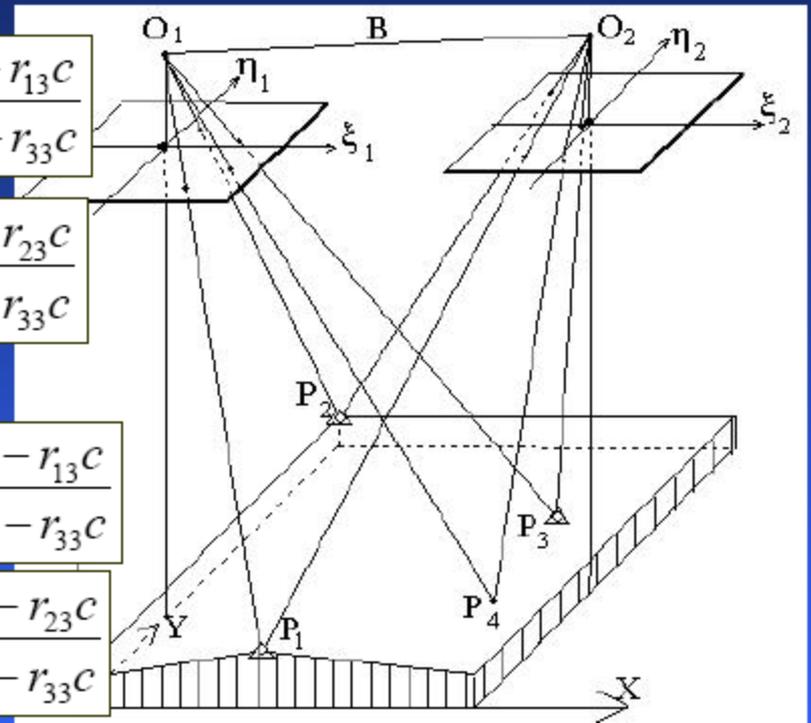
Per questo occorrono più immagini

$$X = X_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_{11}(\xi_1 - \xi_0) + r_{12}(\eta_1 - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi_1 - \xi_0) + r_{32}(\eta_1 - \eta_0) - r_{33}c}$$

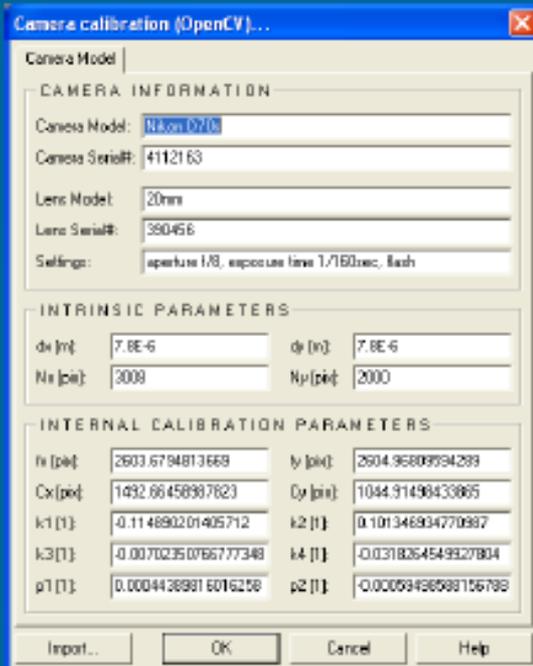
$$Y = Y_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_{21}(\xi_1 - \xi_0) + r_{22}(\eta_1 - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi_1 - \xi_0) + r_{32}(\eta_1 - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$X = X_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{r_{11}(\xi_2 - \xi_0) + r_{12}(\eta_2 - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi_2 - \xi_0) + r_{32}(\eta_2 - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$Y = Y_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{r_{21}(\xi_2 - \xi_0) + r_{22}(\eta_2 - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi_2 - \xi_0) + r_{32}(\eta_2 - \eta_0) - r_{33}c}$$

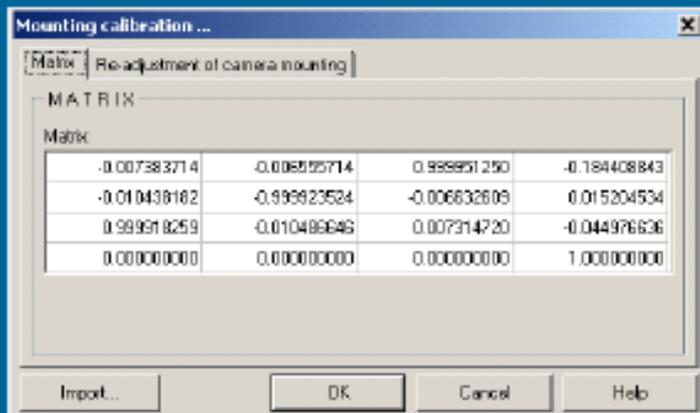


una coppia di **punti omologhi** = 4 equazioni



Parametri di orientamento interno e distorsione:

- Sono forniti dal certificato della camera per apparati metrici o semimetrici.
- Devono essere calcolati per camere amatoriali.

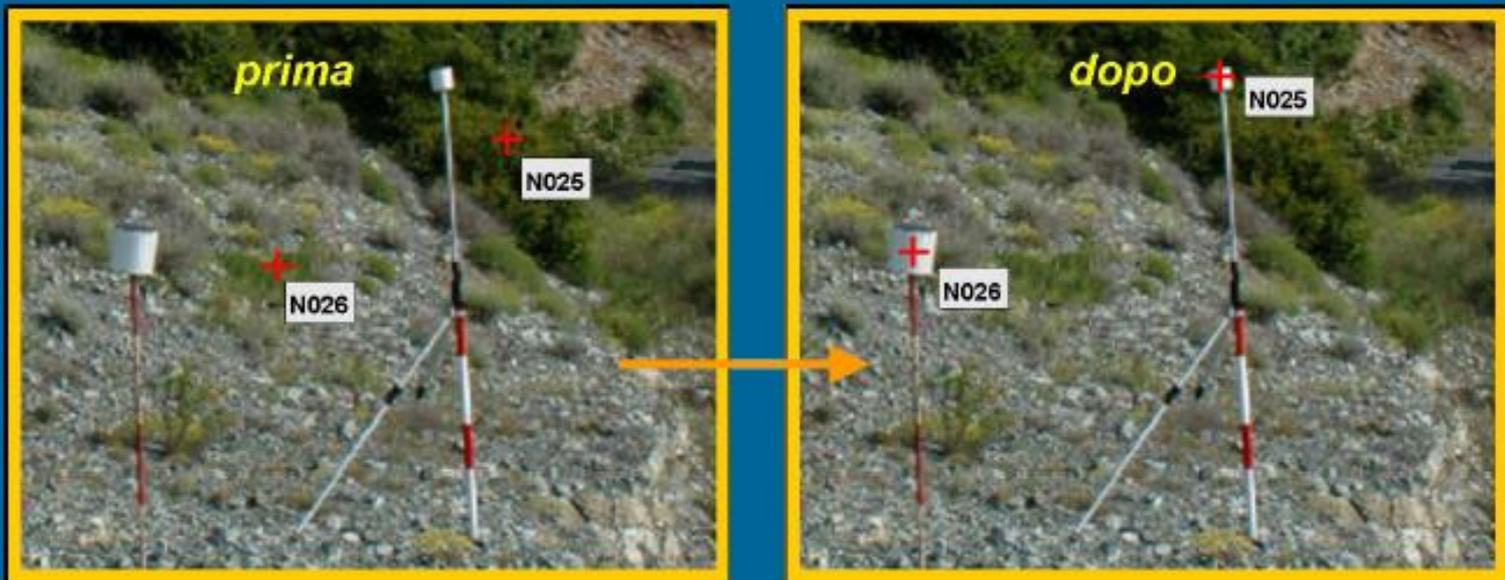


Parametri di orientamento esterno:

- Sono forniti dalla matrice di *mounting*.

Nei laser con fotocamera integrata viene fornito un *mounting* di *default* che deve essere spesso raffinato in fase di elaborazione.

Il calcolo del nuovo mounting viene fatto rispetto ai target di riferimento.

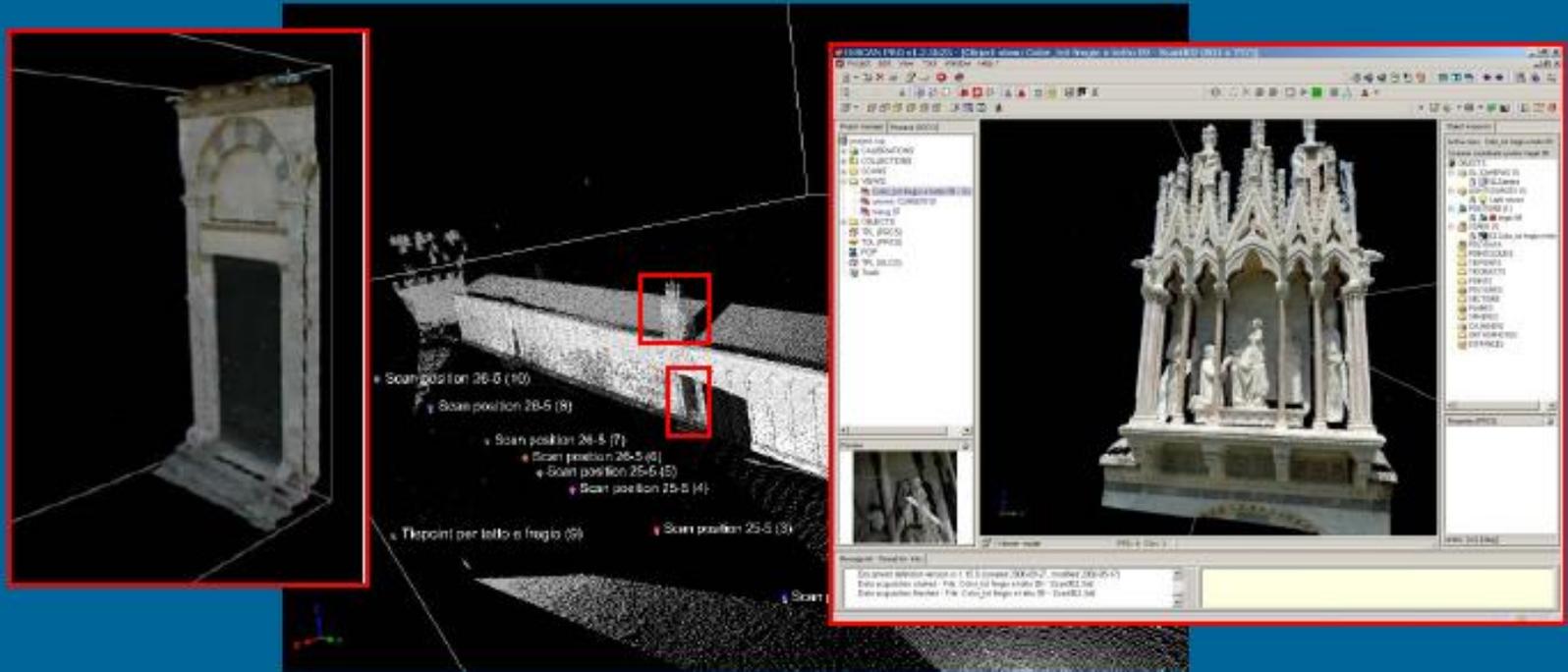


Nella fotogrammetria solitamente si parte da delle coordinate note sul fotogramma (ξ, η) per ricavare la posizione del punto nello spazio oggetto (X, Y, Z) .

Il problema di orientamento per le immagini da associare al laser è inverso: I parametri di orientamento interno sono noti, quelli di orientamento esterno misurati direttamente.

Devono quindi essere stimate le coordinate immagine (ξ, η) relative ad ogni punto oggetto (X, Y, Z) misurato. I valori RGB corrispondenti a tale pixel sull'immagine sono associati ai punti della nuvola laser.

Oltre a facilitare l'elaborazione dei dati, le prese fotogrammetriche permettono anche di ottenere un modello 3D a colori reali (*texture*).





Dati tecnici:

Scanner Hardware LMS-Z420i

- Laser scanner 3D in classe 1 con portata fino a 1000m.
- Ripetibilità fino a 4mm.
- Velocità scansione fino a 12.000p.ti/s.
- Campo di misura 80° x 360°.
- Interfaccia TCP/IP per trasferimento dati.

Camera NIKON D70s

- 6.1 Megapixel (3.008 x 2.000 pixels).
- Obiettivo Nikon f=20mm.
- Interfaccia USB per la connessione al PC.

Software RiSCAN PRO

- Software Riegl per l'acquisizione e l'elaborazione dati.
- Archiviazione strutturata in formato XML.
- Motore di visualizzazione e gestione oggetti.
- Pacchetto base in licenza shareware.

Sala dello Scrutinio - Venezia



[WMV](#)

Sala dei Cinquecento - Firenze



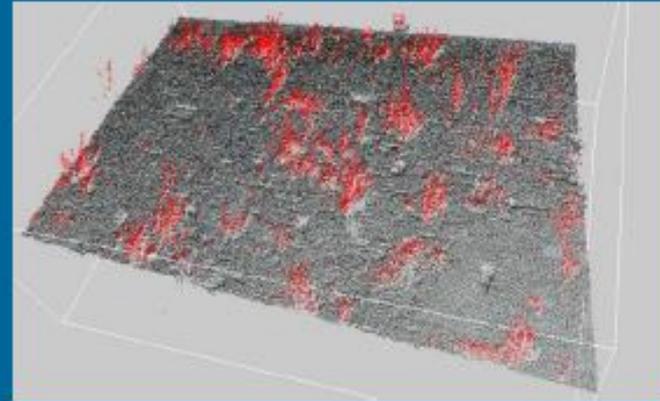
[WMV](#)

Inner Court of Monut Grace

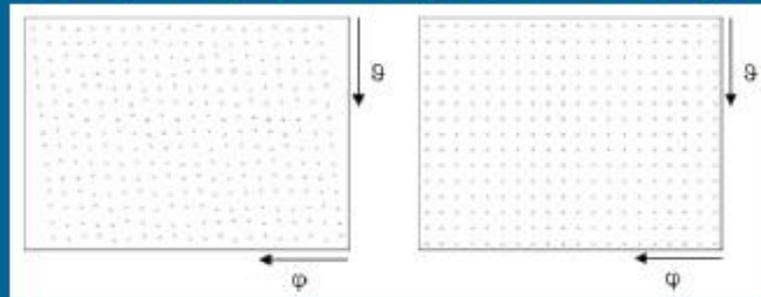


[WMV](#)

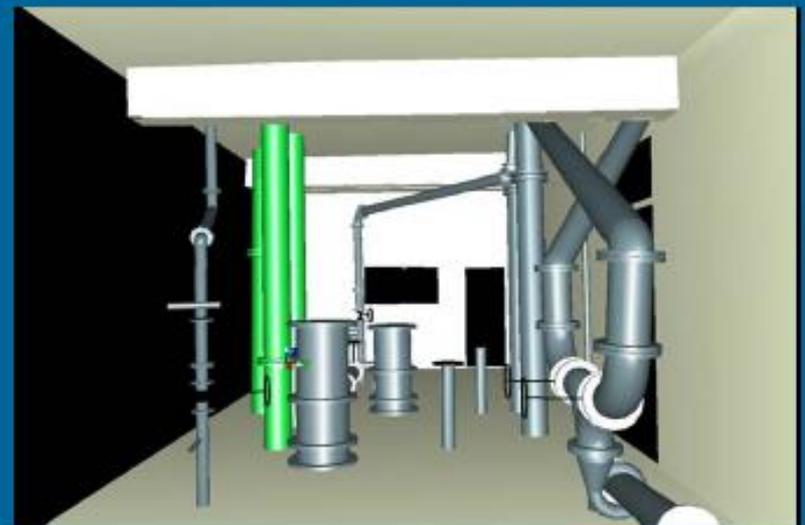
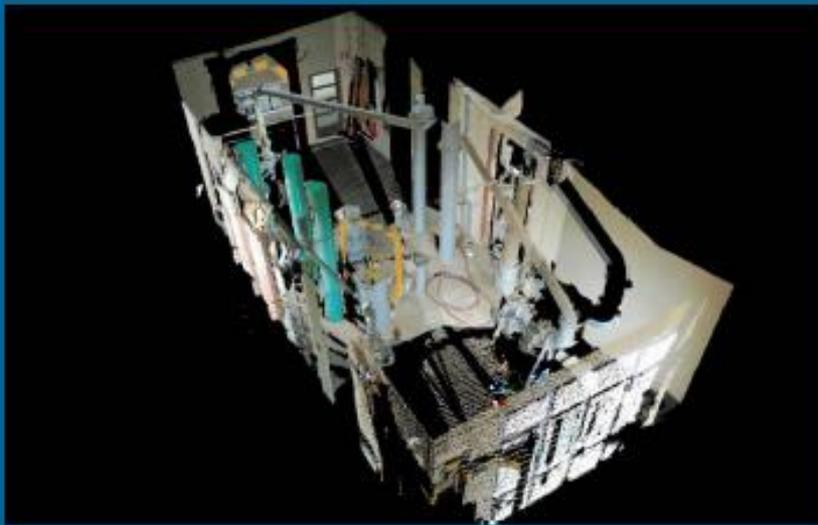
Filtraggio: vanno eliminati gli oggetti che non appartengono all'oggetto del rilievo (per certe operazioni esistono filtri automatici ma molto spesso è necessario l'intervento manuale dell'operatore).



Ricampionamento: si utilizza per ridurre il numero di punti o ottenere una densità omogenea dei punti (non si ha più il rilievo originale!).



Segmentazione: sostituzione della nuvola di punti con entità geometriche di dimensione (byte) più piccola. Queste primitive geometriche possono essere linee, poligoni, cilindri, piani, sfere, ...).



La segmentazione, oltre a semplificare ed alleggerire il modello, può permettere anche la **classificazione** della nuvola di punti.

La segmentazione dei dati laser non è un'operazione elementare né automatica. La sua efficacia ed efficienza dipende:

- Dalla precisione e dalla densità dei punti laser acquisiti.
- Dalla complessità tridimensionale degli oggetti (una statua difficilmente può essere segmentata).

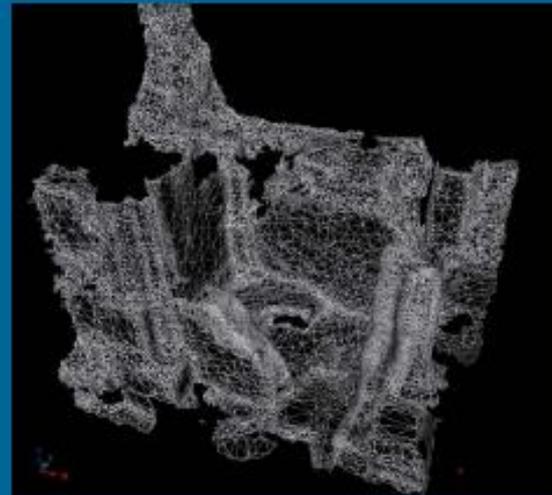


Per i dati aerei un software che presenta diverse applicazioni per il filtraggio, la segmentazione e la classificazione è il TerraScan.

Una nuvola di punti classificati costituisce già un modello 3D ma per svariate applicazioni è necessario costruire il **modello a superfici continue**.

Se l'oggetto rilevato fosse costituito da geometrie semplici si potrebbe ricorrere solo a piani, sfere, cilindri, ...

Non essendo così nella maggior parte dei casi si ricorre ad altre metodologie, tra cui le **mesh TIN** (*Triangular Irregular Network*) o i più moderni modelli **NURBS** (*Non-Uniform Rational B-Splines*).

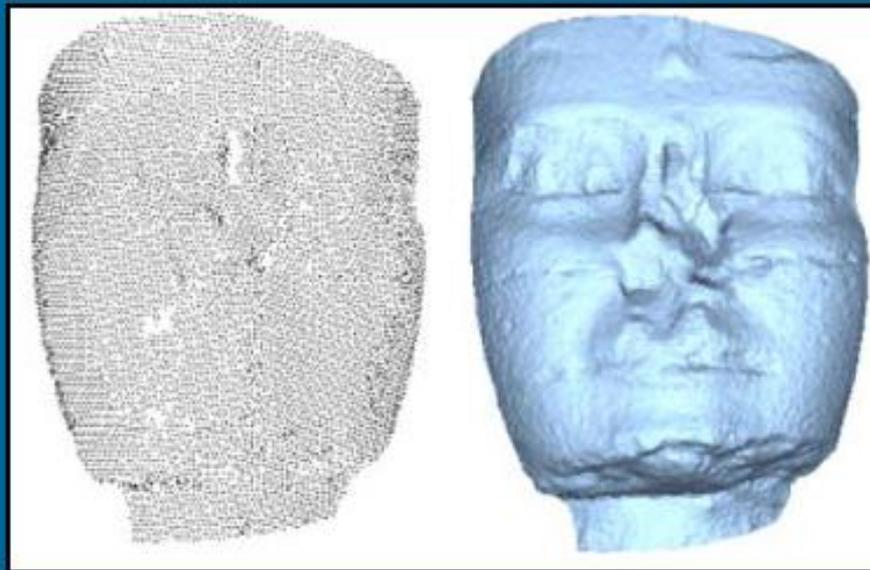


TIN (*Triangular Irregular Network*)

La modellazione si basa sull'utilizzo di triangoli.

Dati i punti (x,y,z) distribuiti nello spazio, essi sono congiunti da linee che formano triangoli piani ed adiacenti e che rappresentano con continuità l'oggetto.

L'algoritmo più utilizzato per individuare i vertici dei triangoli è la **triangolazione di Delaunay** (i cerchi che circoscrivono i triangoli non contengono altri elementi).



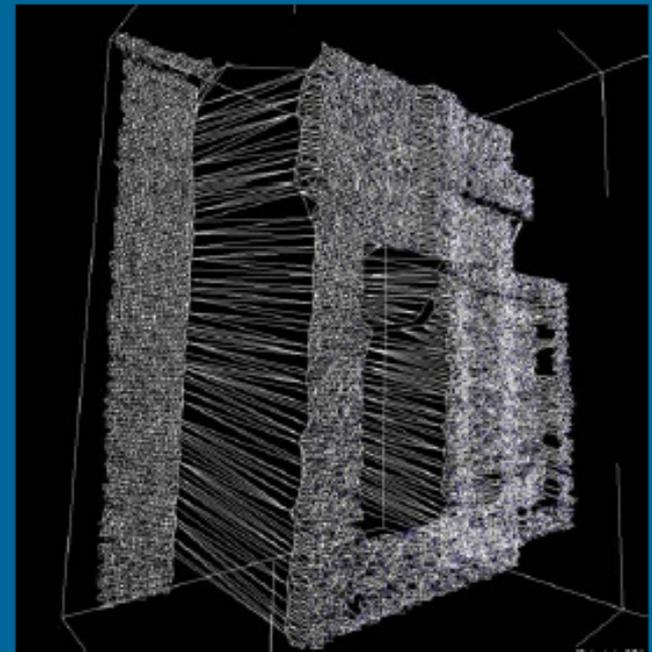
La mesh triangolare viene definita in effetti come una **modellazione 2.5D**.

Gli algoritmi infatti proiettano tutti i punti su di un piano scelto dall'operatore, effettuano la triangolazione su tale piano, e quindi restituiscono la "quota" ai punti.

In effetti, la triangolazione andrebbe osservata solo su tale piano.

La triangolazione di Delaunay è efficace quando i triangoli hanno pendenze poco variabili (terreno), mentre è carente per oggetti con grandi curvature (statua).

In questi casi si dovrebbe procedere per triangolazione di sottoinsiemi rispetto a piani diversi.



NURBS

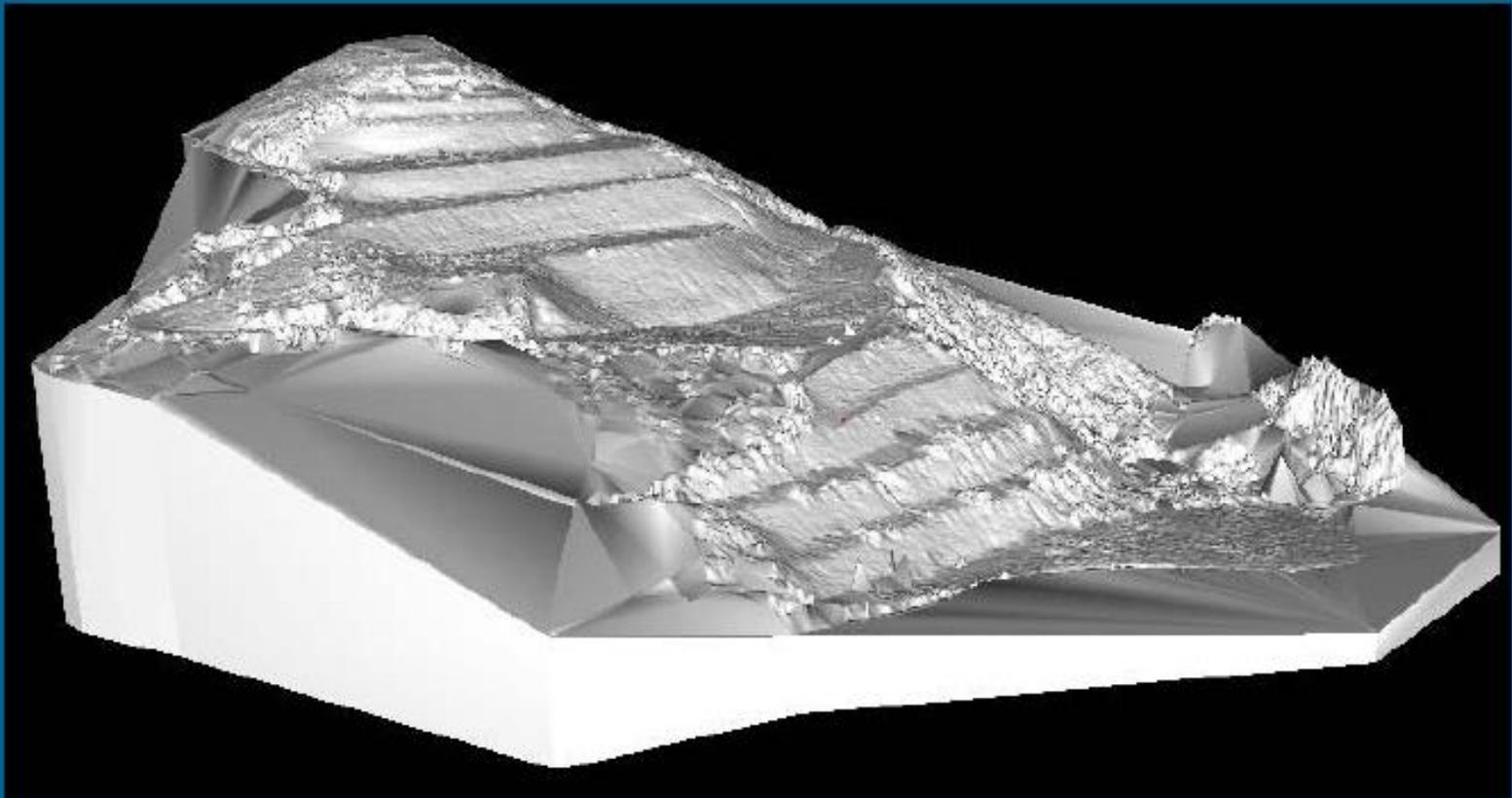
NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines)

A differenza dei poligoni piani, le NURBS definiscono la curva che approssima la superficie da modellare.

Per esse è necessaria **maggior potenza di calcolo** sia in fase di modellazione che di rendering.

Sono adatti alla **modellazione di superfici complesse**.

Esempio di modello TIN di un sito di cava:

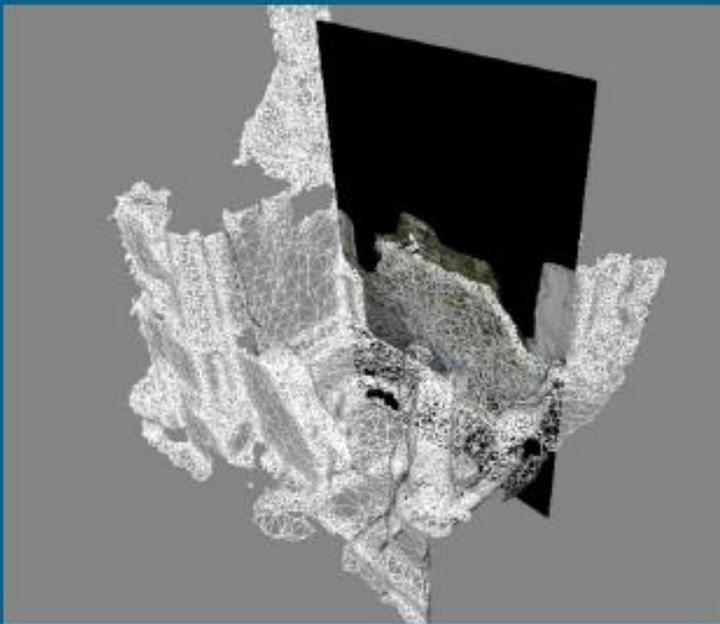


Può essere di interesse la semplice rappresentazione del modello 3D al quale vengono applicate le *texture*.

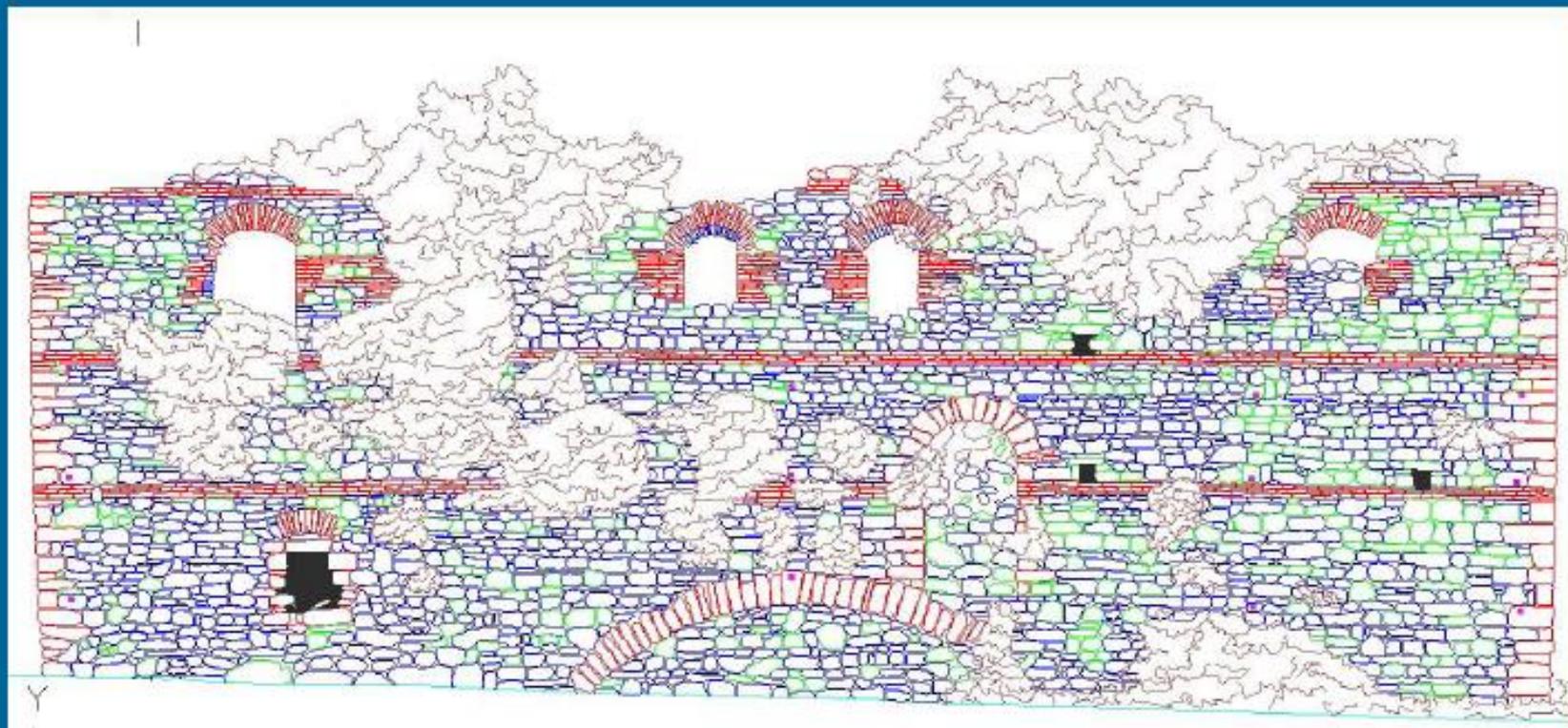


Conoscendo il modello digitale della superficie di cui si è effettuata una presa fotogrammetrica è possibile produrre un'ortofoto.

Si tratta di un prodotto metrico fotorealistico, tramite il quale, quindi, è possibile fare misure o produrre un prospetto vettoriale.



Esempio di restituzione vettoriale da elaborato fotogrammetrico:

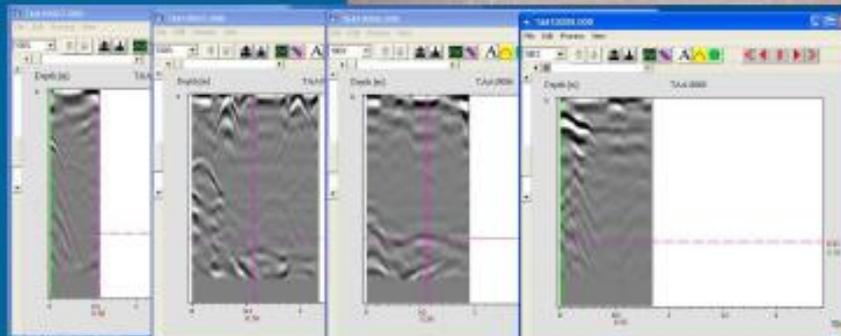
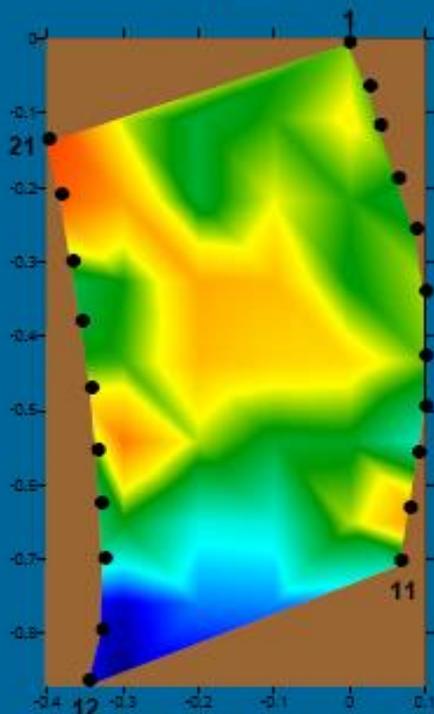
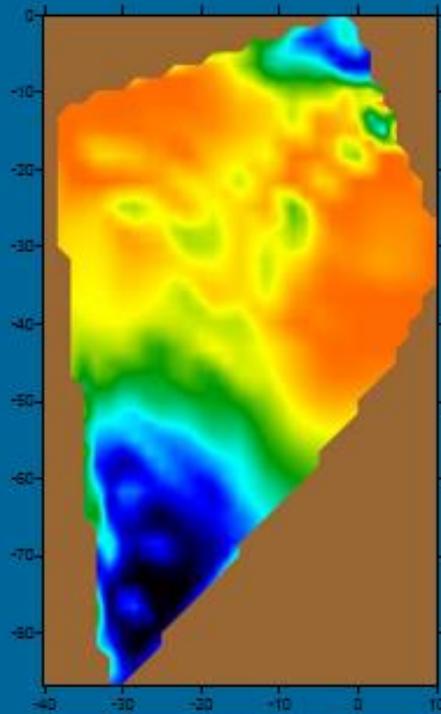




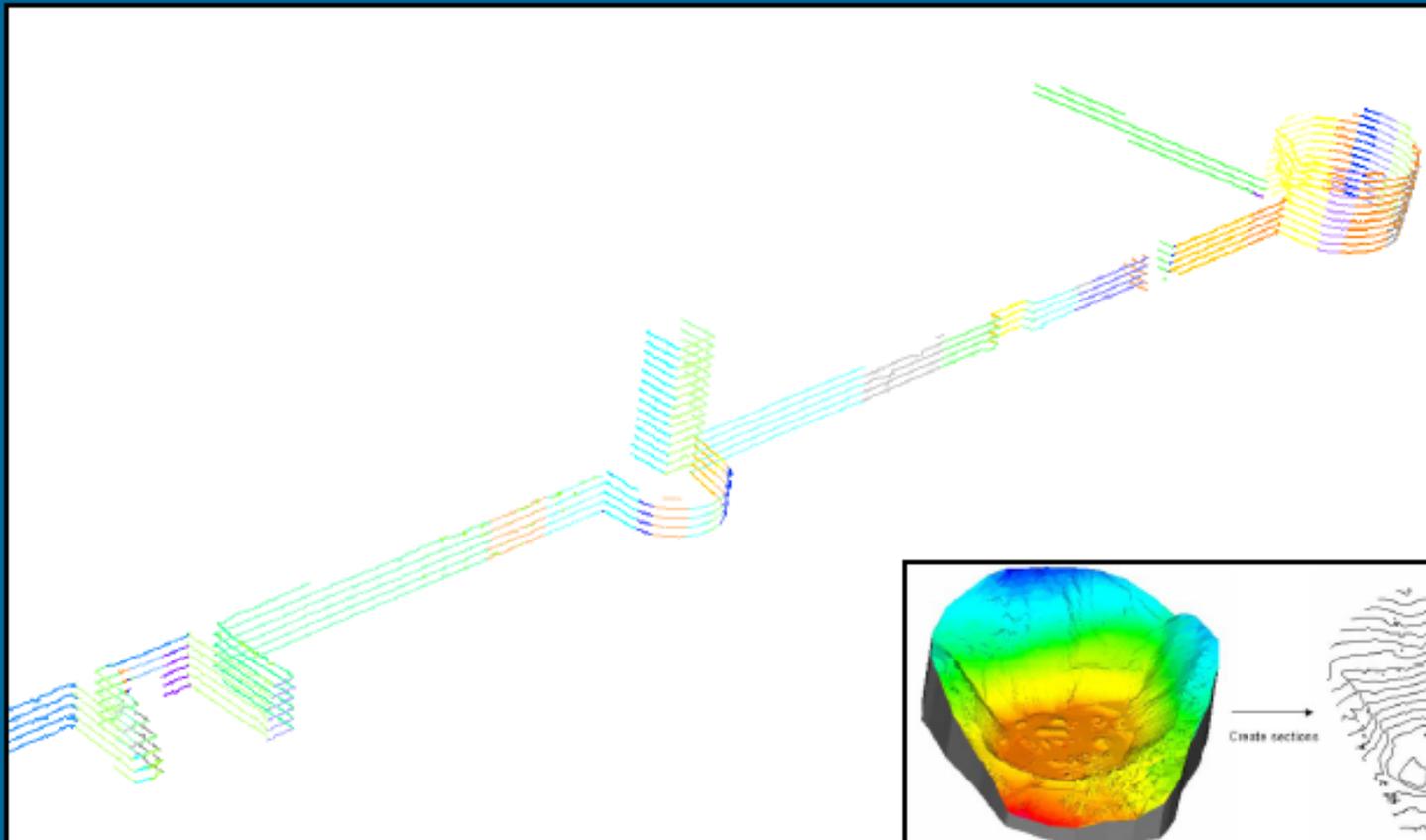
Il modello può servire da base per altri studi:

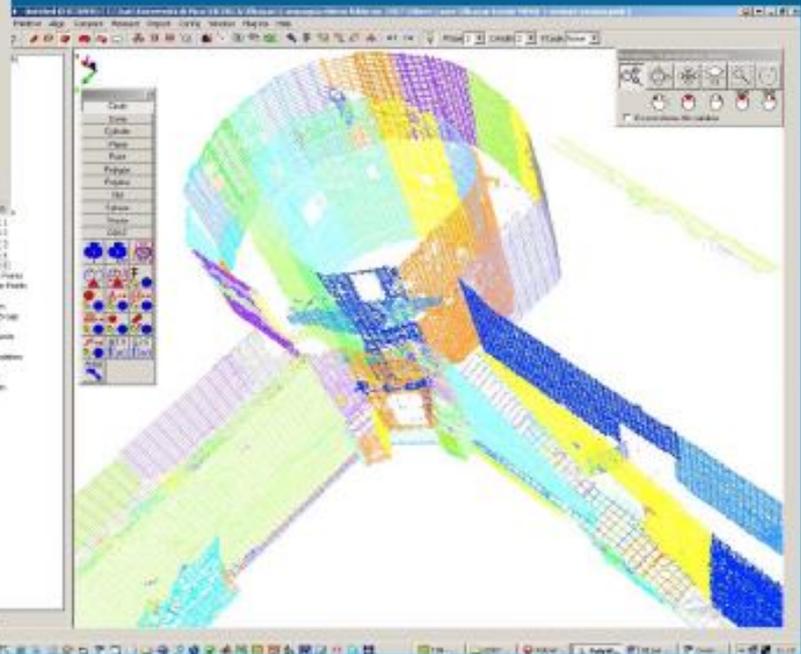
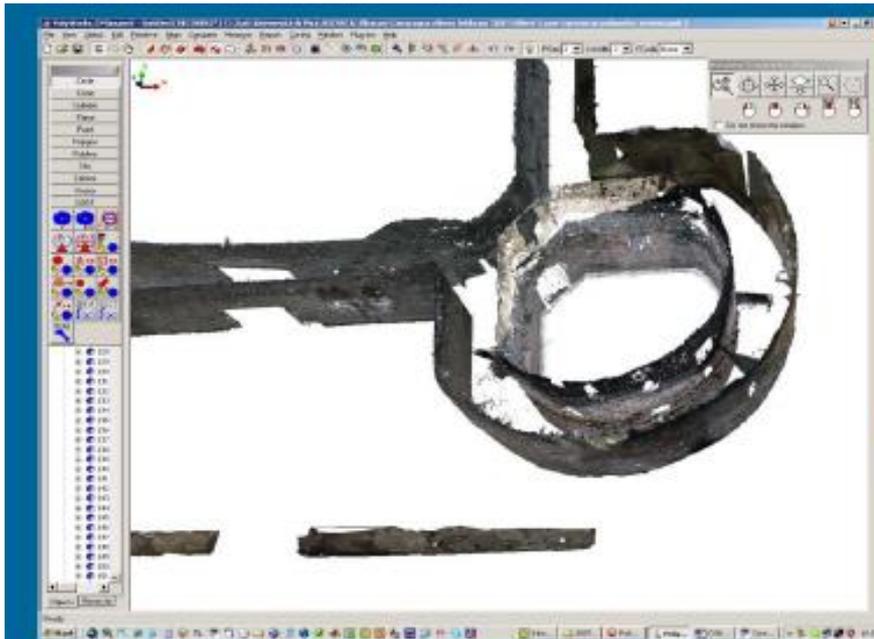
RADAR

US (DLS)



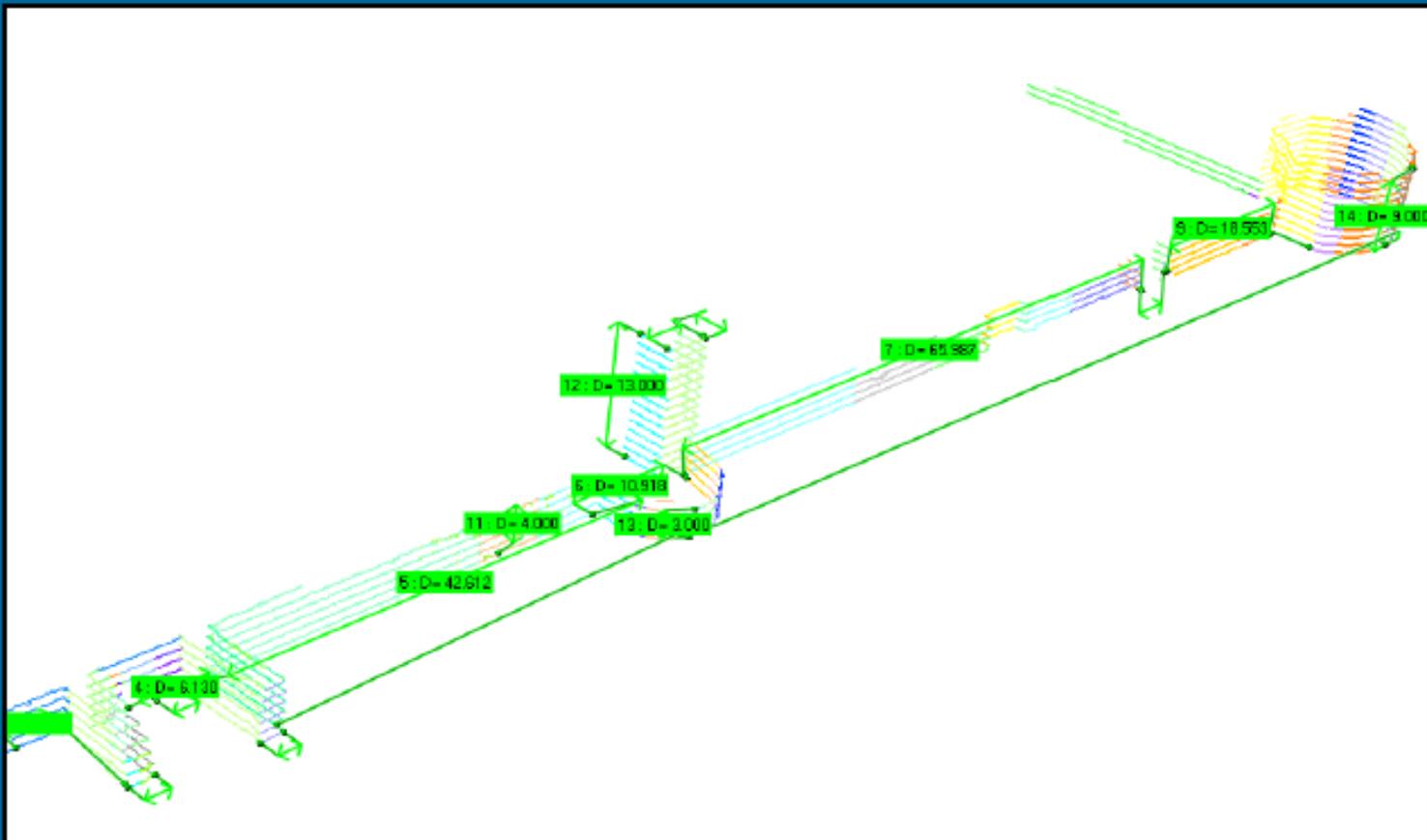
Si possono ricavare sia dal modello a superfici continue, sia dalla nuvola di punti originale sezioni lungo i piani desiderati (curve di livello se l'asse Z è parallelo alla verticale).



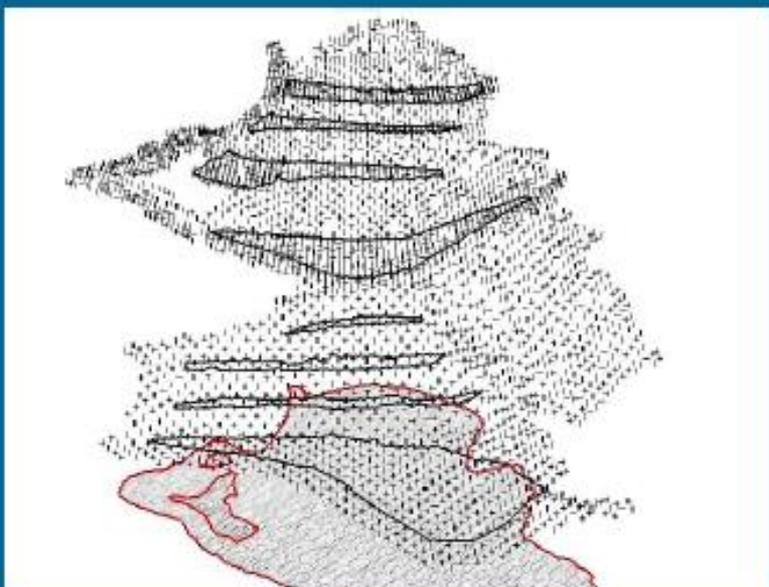


Percorso virtuale

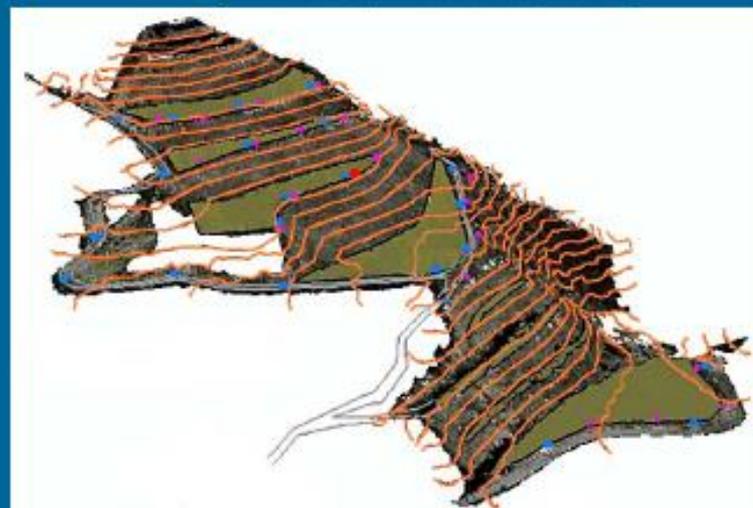
Il modello 3D è un prodotto metrico e quindi misurabile nello spazio.



L'elevata densità di campionamento fa sì che il laser sia uno dei principali strumenti utilizzati per la produzione di modelli digitali del terreno.



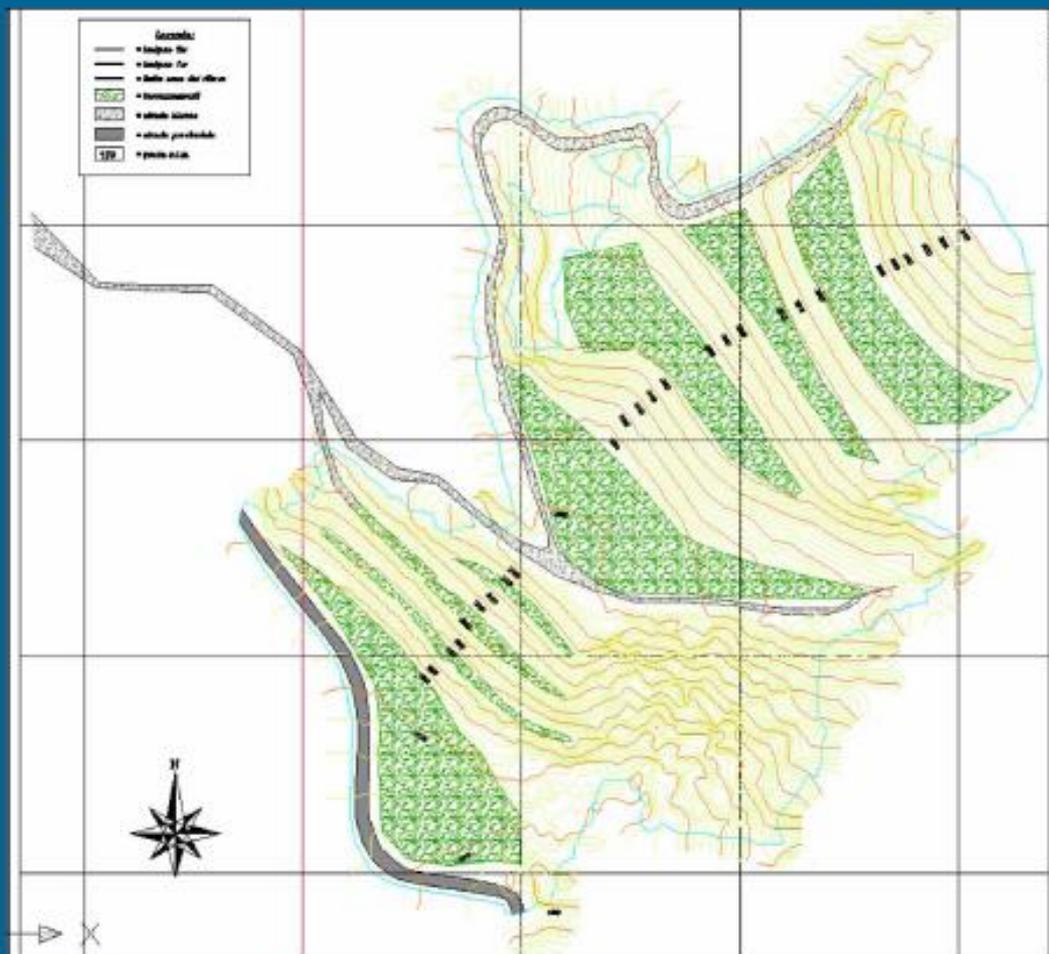
X	Y	Z
1.627.052.534	4.811.197.811	222.627
1.627.053.778	4.811.197.338	223.102
1.627.054.890	4.811.197.233	224.306
1.626.993.279	4.811.256.418	217.882
1.626.995.329	4.811.256.629	218.522
1.626.995.212	4.811.256.742	219.195
1.626.995.101	4.811.257.394	218.578
1.626.995.036	4.811.257.301	219.130
1.626.996.469	4.811.256.877	218.357
1.627.054.737	4.811.229.940	219.876
1.627.055.605	4.811.229.902	219.835
1.627.054.624	4.811.230.109	219.875
1.627.054.933	4.811.231.603	219.883
1.627.055.616	4.811.230.832	219.896
1.627.055.555	4.811.231.832	219.855
1.627.053.783	4.811.233.737	219.880
1.627.052.884	4.811.235.950	219.895
1.627.053.703	4.811.234.620	219.879



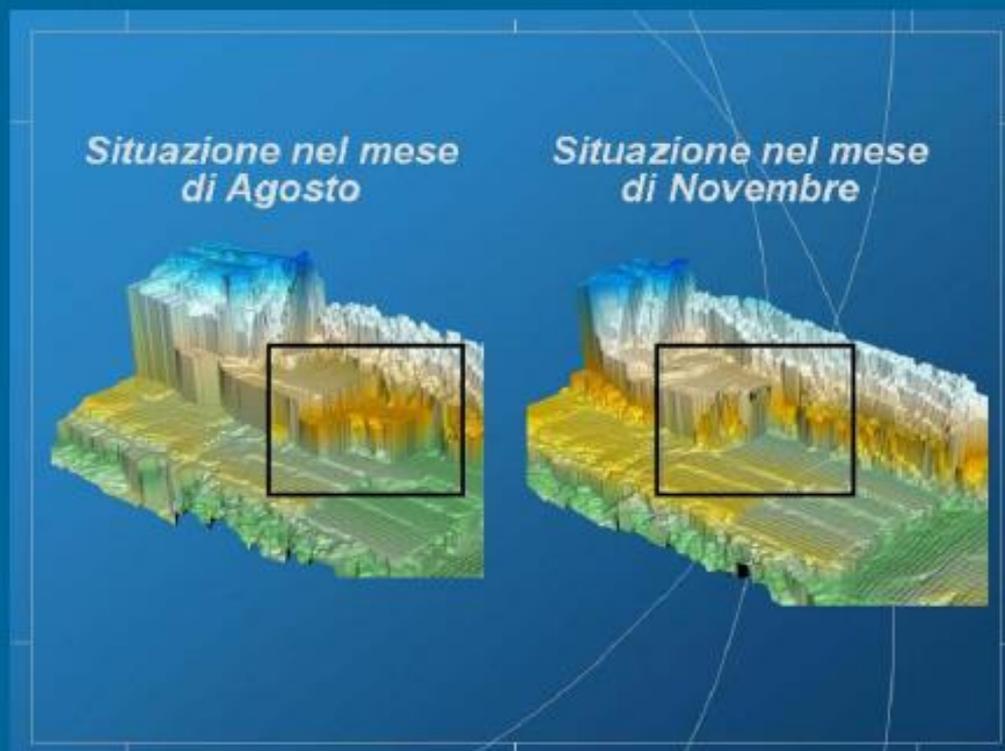
Dal dato laser si può ricavare il DTM e di conseguenza le curve di livello per la rappresentazione piana del modello.

Si possono, inoltre, vettorializzare dalla nuvola di punti altri oggetti.

Un possibile prodotto è quindi anche una cartografia a grande scala del territorio.



Eseguendo rilievi di un oggetto in epoche diverse e realizzandone il modello tridimensionale è possibile calcolare **differenze di volumi**.



APPLICAZIONI





Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide







Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide







Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing

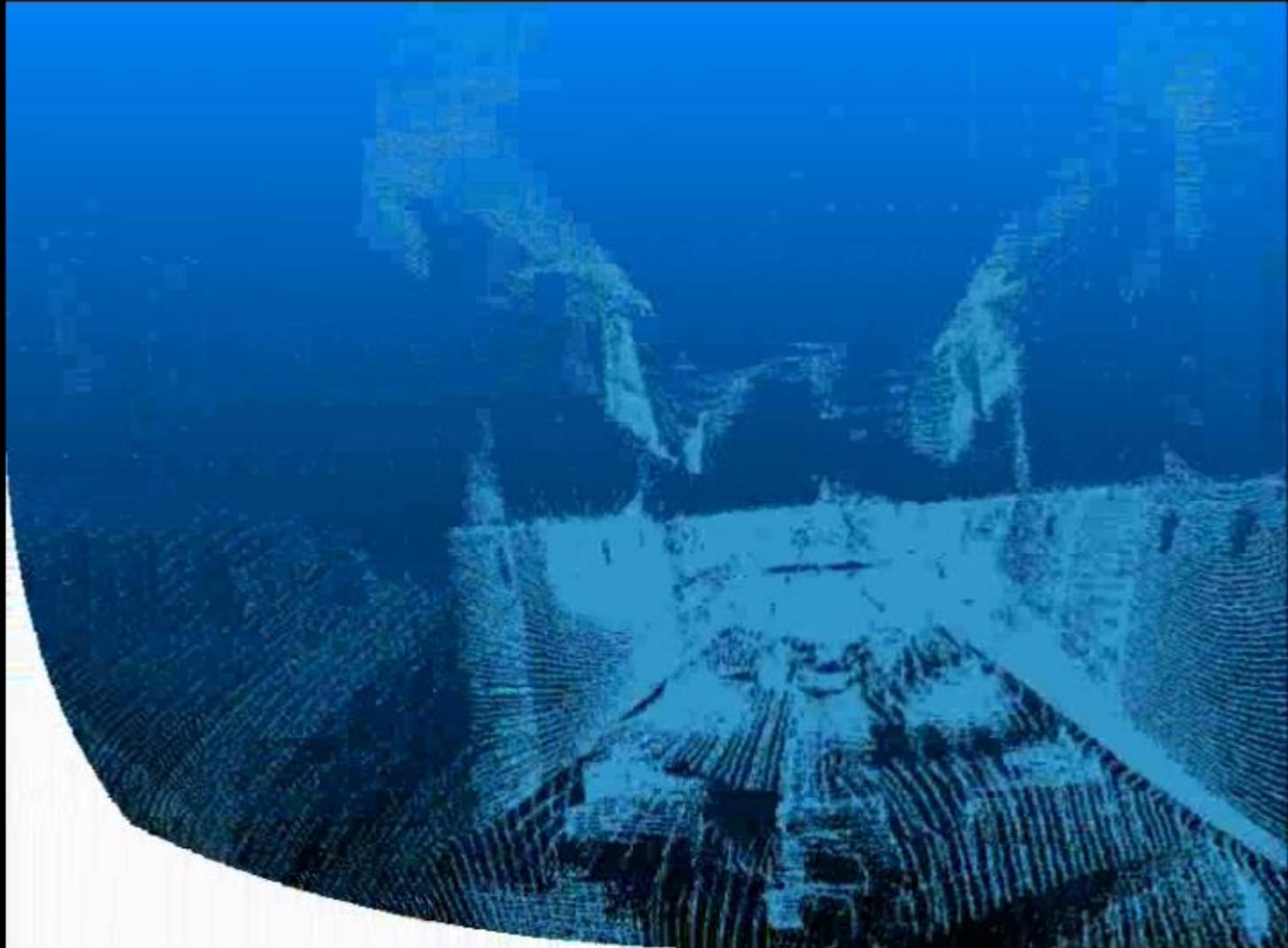
Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing
▼

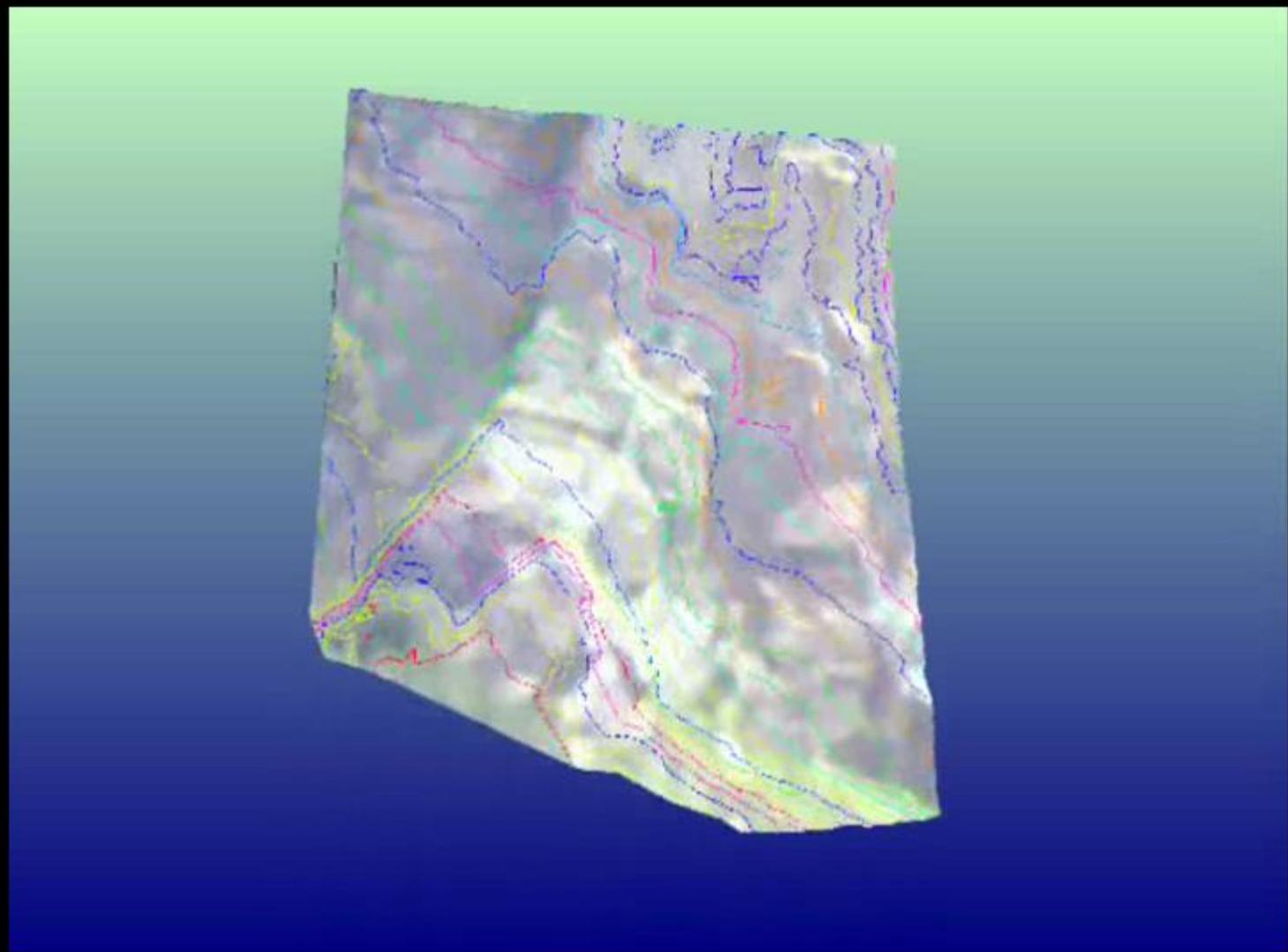
Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing
▼

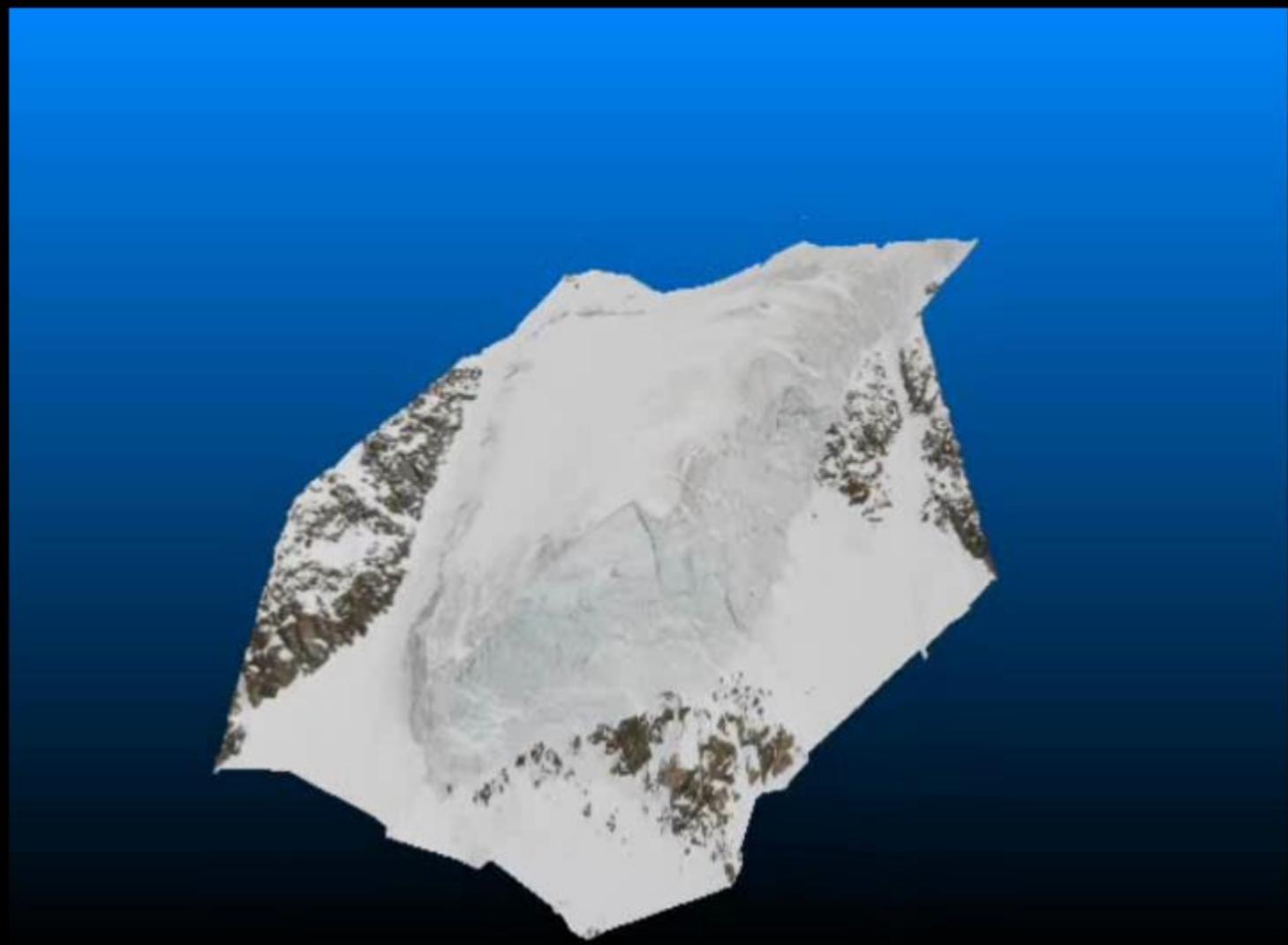
Library

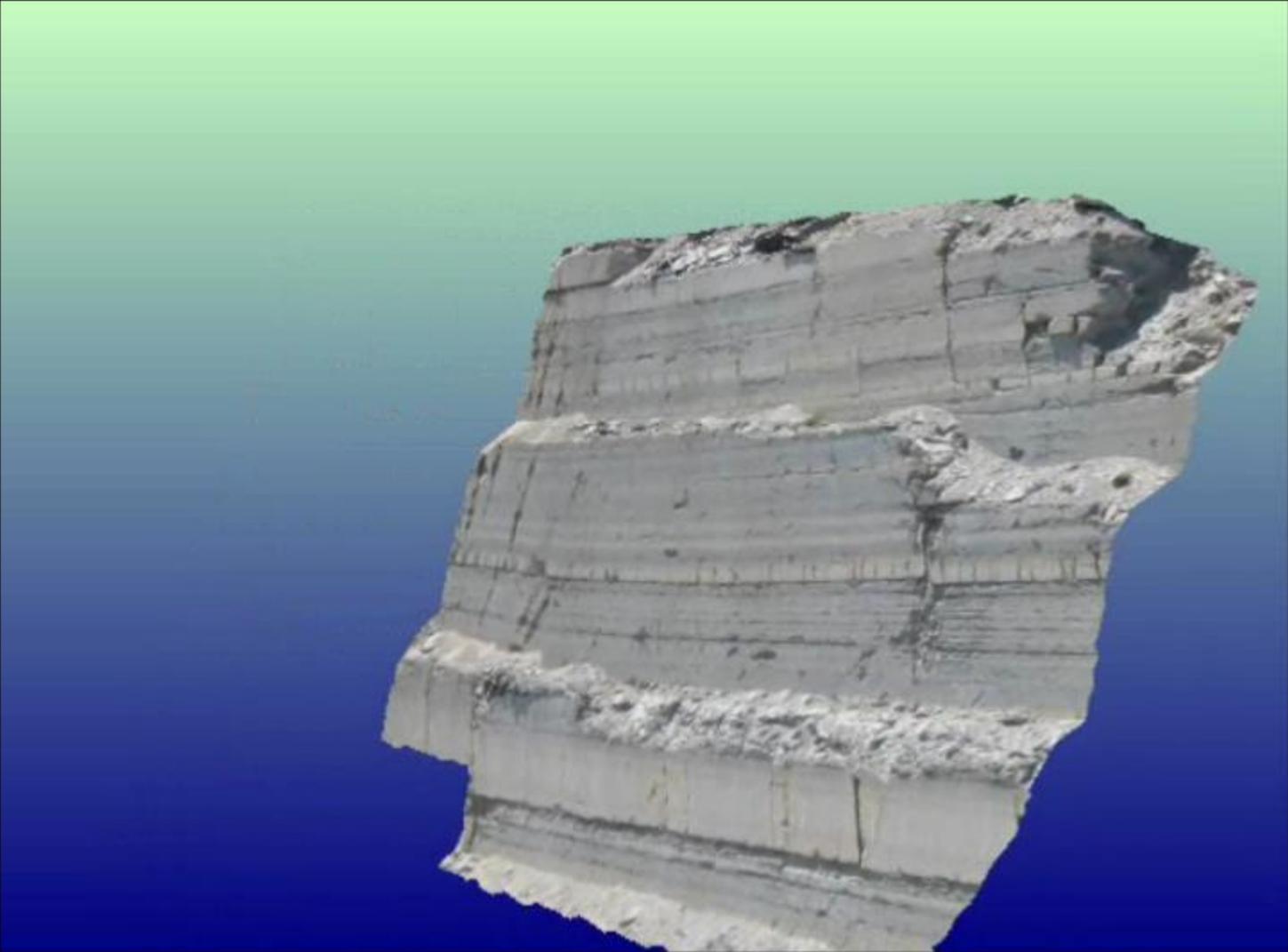
Rip

Burn

Sync

Media Guide





Now Playing

Library

Rip

Burn

Sync

Media Guide



Now Playing

Library

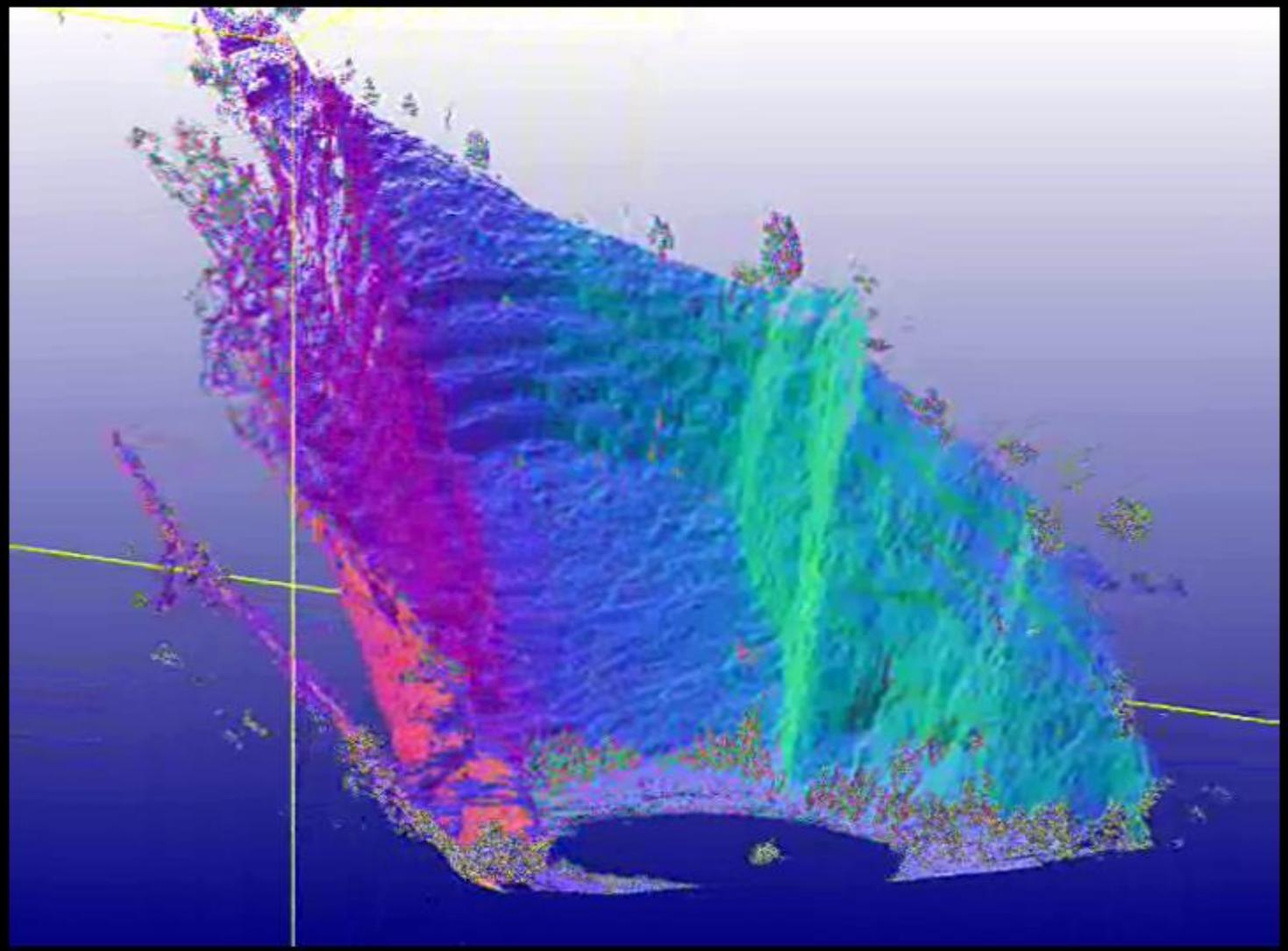
Rip

Burn

Sync



Media Guide



Video

- <https://www.youtube.com/watch?v=v4U2agOzxEM>
- <https://www.youtube.com/watch?v=h77RPrucBbc>
- <https://www.youtube.com/watch?v=pocn9xCr0Zw>
- <http://www.youtube.com/watch?v=jUly4oFOxz8&feature=related>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Q2CQr9GeznQ>
- <https://www.youtube.com/watch?v=zTmmX9kYcBw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=zAPWRaifZII>

Costi

Costo Laser Scanner **NUOVO**: 80.000€ – 100.000€

Costo Laser Scanner **USATO**: 50.000€

Costo **NOLEGGIO** con operatore: 2.000€/giorno

Costo **SOFTWARE** di elaborazione: 10.000€ – 30.000€

$$\frac{\text{Tempo RILIEVO}}{\text{Tempo ELABORAZIONE DATI}} = \frac{1 \text{ giorno}}{2 \text{ giorni}}$$

Costo Total Station Motorizzata **NUOVA**: 30.000€

Alcune case produttrici di laser scanner distanziometrici



<http://www.riegl.com/>



<http://www.leica-geosystems.com/>



<http://www.zf-laser.com/>



<http://www.topcon.eu/>



<http://www.faro.com/italy.aspx>



Alcuni Software per il postprocessing delle nuvole di punti



RiscanPro



PolyWorks



3D Reconstructor



Z-Map Laser



Cyclone 6 + Cloudworks



CloudCUBE



PointCloud

Ringraziamenti

- Prof. ing. Andrea Piemonte Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, Università di Pisa
e-mail: andrea.piemonte@dic.unipi.it
web: <http://www.dic.unipi.it/andrea.piemonte/>
- Ing. Lorenzo Andriani, Tesi di Laurea triennale: “Tecniche Laser Scanner per il rilievo 3D delle colonne romane in via dei Capitelli, Trieste”, 2010
- Daniele Belluzzi, Geotop, Ancona
<http://www.geotop.it/>

Grazie per l'Attenzione!



GEOSNAV

GEOSNAV LABORATORY
GEODESY AND SATELLITE NAVIGATION LABORATORY
UNIVERSITY OF TRIESTE, ITALY

