

Χρήση Τρισδιάστατου Σαρωτή Laser στην Αποτύπωση Διατομών Σηράγγων

Β. ΓΚΙΚΑΣ

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Σ. ΚΑΡΑΜΗΤΣΟΣ

Δρ Αγρονόμος και Τοπογράφος
Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Ι. ΚΩΤΣΗΣ

Αγρονόμος και Τοπογράφος
Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την εφαρμογή της νέας τεχνολογίας τρισδιάστατης σάρωσης laser στην αποτύπωση σηράγγων συγκοινωνιακών έργων που βρίσκονται στο στάδιο της κατασκευής. Αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο και παρουσιάζονται διεξοδικά η μεθοδολογία συλλογής, επεξεργασίας και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της σάρωσης, καθώς και οι επιπτώσεις στο κόστος του έργου. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από την αυτόνομη εφαρμογή της μεθόδου με χρήση πραγματικών δεδομένων, όσο και από τη σύγκρισή της με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αποτύπωση σηράγγων με γεωδαιτικό σταθμό.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια κατασκευής μιας σήραγγας, η αποτύπωση διατομών σε συγκεκριμένες θέσεις είναι απαραίτητη προκειμένου να υπολογισθεί ο όγκος των εκσκαφών και των επενδύσεων του έργου, να εντοπιστούν παραμορφώσεις - καθιζήσεις ή άλλες δομικές αστοχίες, να ελεγχθεί η ορθότητα της χάραξης και της οδήγησης της εκσκαφής, να εξακριβωθεί η καλή πορεία εκτέλεσης και τήρησης των χρονοδιαγραμμάτων και τέλος να συνταχθούν τα κατασκευαστικά σχέδια του έργου.

Η διαδικασία που συνήθως ακολουθείται, συνίσταται στην αποτύπωση υλοποιημένων σημείων σε θέσεις διατομών της στοάς, μετά από την εκτέλεση προγραμματισμένων εργασιών διάνοιξης, υποστήριξης ή επένδυσης της σήραγγας. Οι εργασίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες και επίπονες λόγω της σκόνης, του χαμηλού φωτισμού, του υψηλού θορύβου, του λασπώδους δαπέδου και της συνεχούς κίνησης οχημάτων και ανθρώπων. Οι απαραίτητες μετρήσεις γίνονται με τη βοήθεια γεωδαιτικού σταθμού ή με άλλα ειδικά όργανα κατάδειξης του περιγράμματος της διατομής (profilers) [6].

Σε αντίθεση με τους κλασικούς τρόπους αποτύπωσης, η νέα τεχνολογία της τρισδιάστατης σάρωσης laser, προσφέρει συνολική και σχεδόν συνεχή αποτύπωση του εσωτερικού της στοάς, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα επιλογής διατομών σε οποιασδήποτε θέση. Επιπλέον, προ-

σφέρει μεγάλη ταχύτητα και ευκολία στις εργασίες πεδίου, δεδομένου ότι ο κυρίως όγκος εργασιών αφορά στην επεξεργασία των δεδομένων [8,12].

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των τρισδιάστατων σαρωτών laser, η μεθοδολογία αποτύπωσης σηράγγων με χρήση αυτών των οργάνων, καθώς και οι τεχνικές επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων σάρωσης με αναφορά σε πραγματικά δεδομένα. Επιπρόσθετα, αξιολογούνται οι εφαρμοζόμενες τεχνικές και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση της μεθόδου με αποτελέσματα που προέκυψαν από την αποτύπωση σηράγγων με χρήση γεωδαιτικού σταθμού (Total Station).

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ρ, θ, ν	Πολικές συντεταγμένες σημείου σάρωσης,
x, y, z	Σύστημα αναφοράς σαρωτή,
X, Y, Z	Σύστημα αναφοράς του έργου,
R	Πίνακας στροφής μεταξύ των συστημάτων αναφοράς του έργου και του σαρωτή,
ξ, η	Σύστημα αναφοράς διατομής,
dHz	Οριζόντια ανάλυση σαρωτή,
dVz	Κατακόρυφη ανάλυση σαρωτή.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

3.1 Κλασικές μέθοδοι αποτύπωσης σηράγγων

Μέχρι σήμερα πολλές μέθοδοι και διάφορα όργανα έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να συλλεχθούν οι αναγκαίες μετρήσεις για την αποτύπωση διατομών σηράγγων. Η επιλογή της καταλληλότερης από αυτές εξαρτάται από το είδος του έργου, το διαθέσιμο εξοπλισμό, το κόστος, καθώς και τις δυνατότητες που προσφέρει η κάθε μία σε συνάρ-

τηση με την ευκολία, την ταχύτητα, την ακρίβεια και την εμβέλεια εφαρμογής της.

Σε γενικές γραμμές οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε εκείνες που το κάθε σημείο της διατομής προσδιορίζεται με απευθείας επαφή της μετρητικής διάταξης στην επιφάνεια της σήραγγας (παλαιότερα εφαρμοζόμενες μέθοδοι παντογραφίας) και σε εκείνες που η αποτύπωση της διατομής γίνεται από απόσταση βάσει των αρχών της τοπογραφίας και φωτογραμμετρίας και τη χρήση ειδικών οργάνων [17,18].

3.2 Τρισδιάστατοι σαρωτές

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές laser είναι ένα νέο και πολλά υποσχόμενο είδος οργάνων (Σχήμα 1). Μπορούν να προσδιορίζουν τις θέσεις σημείων σε τρεις διαστάσεις ως προς ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, μετρώντας την απόσταση, την κατακόρυφη και την οριζόντια γωνία προς αυτά. Η λειτουργία τους είναι όμοια με αυτή ενός γεωδαιτικού σταθμού με τη διαφορά ότι απουσιάζει η οπτική διάταξη σκόπευσης.

Επίσης, σε αρκετά όργανα δεν υπάρχει η δυνατότητα κέντρωσης και οριζοντίωσης, η οποία αντικαθίσταται με τη χρήση ειδικών τεχνικών (σκόπευση από γνωστές θέσεις και σάρωση αντικειμένων γνωστών θέσεων και διαστάσεων κ.α.).



Σχήμα 1: Αποτύπωση σήραγγας με 3D Laser scanner
Figure 1: 3D Laser scanner during tunnel survey

Όλα τα όργανα αυτής της κατηγορίας, εκτός από τις πολικές συντεταγμένες, μετρούν και την ανακλαστικότητα του κάθε σημείου, ενώ έχουν τη δυνατότητα και της λήψης ψηφιακών φωτογραφιών της περιοχής ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται.

Το πλήθος των σημείων που λαμβάνονται σε μία σάρωση εξαρτάται από τη γωνιακή ανάλυση του οργάνου, η οποία είναι συνάρτηση του γωνιακού βήματος των κινητήρων που

περιστρέφουν τη μετρητική κεφαλή γύρω από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα, καθώς και από την ανάλυση του δίσκου κώδικα Gray που έχει τοποθετηθεί στον κάθε άξονα. Ο αριθμός των σημείων που μπορεί να μετρήσει ένας σύγχρονος σαρωτής ξεκινά από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες και φτάνει έως μερικά εκατομμύρια σημεία ανά στάση σάρωσης.

Εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτούνται ιδιαίτερα αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες. Για το λόγο αυτό μόλις τα τελευταία χρόνια έγινε δυνατή η κατασκευή τέτοιων οργάνων, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας Η/Υ.

Οι κυριότερες εφαρμογές της τεχνολογίας τρισδιάστατης σάρωσης laser σχετίζονται με αποτυπώσεις τεχνικών έργων (π.χ. σήραγγες και γέφυρες), μηχανολογικών εγκαταστάσεων, αρχιτεκτονικών μνημείων, εσωτερικών χώρων κ.α. [1,2,8,14,15].

3.3 Ο σαρωτής Callidus CP 3200

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής Callidus 3D Laser Scanner CP 3200, της εταιρείας Callidus Precision Systems.

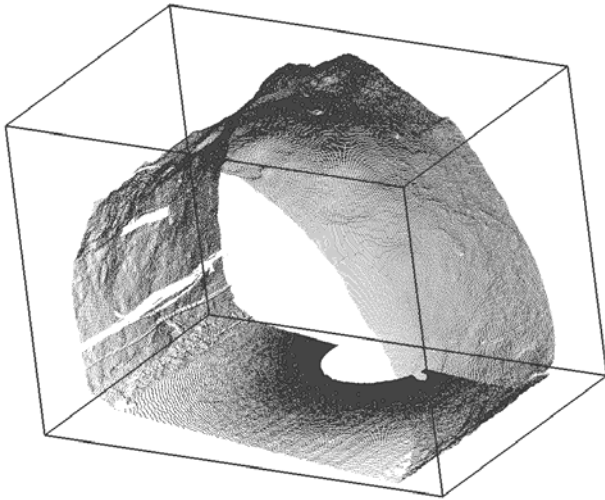
Το όργανο διαθέτει μια κινούμενη κεφαλή με δυνατότητα πλήρους περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα και 140° γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Η μέγιστη γωνιακή ανάλυση είναι $dHz = 0.0625^\circ$ και $dVz = 0.25^\circ$ για τις οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες και ακρίβεια 0.005° και 0.009° αντίστοιχα. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο προσδιορισμός της ακρίβειας και αξιοπιστίας μετρήσεων τρισδιάστατων σαρωτών laser αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε αρκετά ερευνητικά κέντρα [7].

Σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να μειωθεί η χωρική ανάλυση καταγραφής, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των ενδιάμεσων τιμών 0.125° , 0.25° , 0.5° , 1° και των 0.5° , 1° για την οριζόντια και κατακόρυφη ανάλυση αντίστοιχα. Η μέγιστη εμβέλεια μέτρησης αποστάσεων ανέρχεται στα 80 m, με τυπική απόκλιση περίπου 5 mm για αποστάσεις έως 32 m [3, 4].

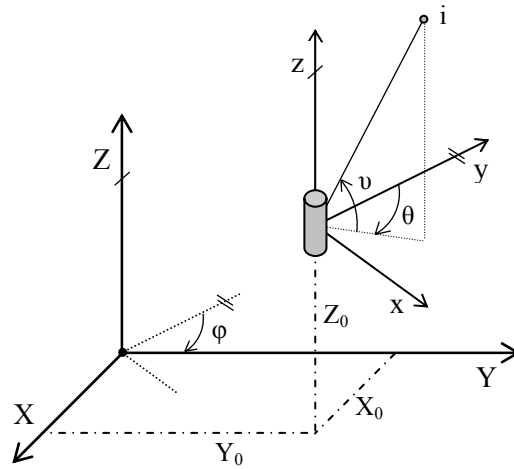
Η οριζοντίωση του οργάνου επιτυγχάνεται με αεροστάθμες και τρικόγλια με έδρες ρυθμιζόμενου ύψους, σε συνδυασμό με ηλεκτρονικό κλισίμετρο (Tilt Sensor). Δεδομένου ότι ο σαρωτής δεν φέρει διάταξη κέντρωσης, η θέση του προσδιορίζεται από τη σκόπευσή του από σημεία γνωστών συντεταγμένων. Για το σκοπό αυτό υπάρχει η δυνατότητα της τοποθέτησης καταφώτου στο όργανο.

Στην περίπτωση που επιλεγούν οι τιμές μέγιστης γωνιακής ανάλυσης, τότε το όργανο έχει τη δυνατότητα μέτρησης έως 3.225.600 σημεία από μία στάση, σε χρονικό διάστημα περίπου 30 min.

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για μία σάρωση συμπεριλαμβανομένων των εργασιών τοποθέτησης και εντοπισμού του οργάνου είναι της τάξης των 45 min.



Σχήμα 2: Νέφος σημείων
Figure 2: Point cloud



Σχήμα 3: Συστήματα Αναφοράς
Figure 3: Coordinate systems

4. Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ

Όπως αναφέρθηκε, οι τρισδιάστατοι σαρωτές είναι όργανα τα οποία μετρούν τις πολικές συντεταγμένες και την ανακλαστικότητα μεγάλου πλήθους σημείων χωρίς τη χρήση καταφώτου. Το αποτέλεσμα της σάρωσης είναι ένα “νέφος σημείων” (Point Cloud), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Σε αυτό το σχήμα φαίνεται ένα μικρό τμήμα μιας σήραγγας, όπως αποτυπώθηκε αμέσως μετά τη διάνοιξη και την προσωρινή αντιστήριξή της με σκυρόδεμα τύπου gunite (βλέπε και Σχήμα 1). Η λεπτομέρεια του νέφους είναι τέτοια που επιτρέπει την εύκολη αναγνώριση τόσο του εσωτερικού ανάγλυφου, όσο και οποιουδήποτε άλλου αντικειμένου που βρίσκεται στο πεδίο σάρωσης, όπως για παράδειγμα οι σωληνώσεις που εμφανίζονται ως σκιασμένες περιοχές στην αριστερή πλευρά της στοάς.

4.1 Συστήματα αναφοράς και σύνδεση νεφών σημείων

Οι μετρήσεις που συλλέγει ο σαρωτής σε κάθε στάση οργάνου παράγουν ένα νέφος σημείων, οι θέσεις των οποίων υπολογίζονται στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή, το οποίο ορίζεται ως εξής:

- η αρχή του συστήματος ταυτίζεται με το ηλεκτροοπτικό κέντρο της μετρητικής κεφαλής του οργάνου,
- ο άξονας y ταυτίζεται με το μαγνητικό βορρά που προσδιορίζεται από τη μαγνητική πυξίδα του σαρωτή,
- ο άξονας x επιλέγεται με κατεύθυνση προς την ανατολή έτσι ώστε να προκύπτει δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς,
- ο άξονας z ταυτίζεται με την κατακόρυφο στη θέση του οργάνου.

Ο μετασχηματισμός των πρωτογενώς μετρημένων πολικών συντεταγμένων ρ_i, θ_i, ν_i σε καρτεσιανές, για κάθε σημείο του νέφους i , δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \rho_i \begin{bmatrix} \sin(\theta_i) \cos(\nu_i) \\ \cos(\theta_i) \sin(\nu_i) \\ \cos(\nu_i) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η επεξεργασία νεφών σημείων που συλλέχθηκαν από διαφορετικές στάσεις του σαρωτή, είναι απαραίτητη η μετατροπή τους από το σύστημα αναφοράς του σαρωτή σε ενιαίο σύστημα αναφοράς. Σύμφωνα με το Σχήμα 3, ο μετασχηματισμός της θέσης ενός νέφους σημείων από το σύστημα αναφοράς του σαρωτή σε ενιαίο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς (X, Y, Z), το οποίο ορίζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του έργου, γίνεται με βάση την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

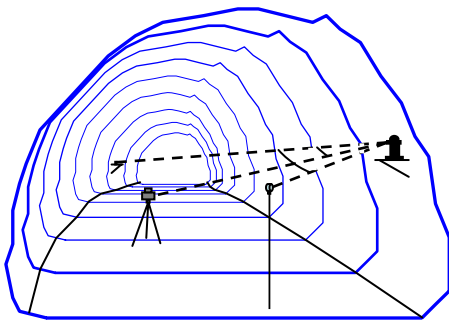
όπου, $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ η μετάθεση της αρχής του συστήματος αναφοράς του σαρωτή στο σύστημα αναφοράς του έργου. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων μετασχηματισμού σε εφαρμογές σήραγγων μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος είναι ανάλογος με εκείνον της πολυγωνομετρίας στις τοπογραφικές αποτυπώσεις. Για την εφαρμογή του απαιτείται η τοποθέτηση ενός καταφώτου εντός του πεδίου εμβέλειας του σαρωτή και ο προσδιορισμός της θέσης του στο σύστημα αναφοράς του έργου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Στη φάση επεξεργασίας των δεδομένων σάρωσης, το κατάφωτο επισημαίνεται εύκολα λόγω της υψηλής ανακλαστικότητάς του μέσω του λογισμικού που συνοδεύει το όργανο. Οι παράμετροι μετασχη-

ματισμού προκύπτουν με βάση τις γνωστές συντεταγμένες του καταφώτου στα δύο συστήματα αναφοράς. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο σύγχυσης του καταφώτου με άλλους κοντινούς στόχους που παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα, είναι αναγκαίο η διαδικασία αναγνώρισής του να επαληθεύεται από το χρήστη, τόσο κατά τη συλλογή, όσο και κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

Η δεύτερη μεθοδολογία σύνδεσης των συστημάτων αναφοράς γειτονικών νεφών σημείων βασίζεται σε διαδικασίες “Fuzzy Join” που εφαρμόζονται στις θέσεις σημείων τα οποία είναι κοινά και στα δύο νέφη. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται το ποσοστό των κοινών σημείων να ανέρχεται κατ’ ελάχιστον στο 20% του συνόλου των σημείων στα δύο νέφη [4].

Προϊόν της όλης διαδικασίας είναι τρεις τιμές για τη σχετική μετάθεση μεταξύ των δύο νεφών, ως προς το βορρά, την ανατολή και την υψομετρική διαφορά τους, καθώς και μία στροφή περί την κατακόρυφο. Δεδομένου ότι το όργανο είναι οριζοντιωμένο, οι δύο υπόλοιπες στροφές θεωρούνται μηδενικές. Παρότι η μεθοδολογία δεν προϋποθέτει τον ορισμό και την υλοποίηση οριζόντιας γωνιακής αφετηρίας καθώς και τη γνώση της θέσης του σαρωτή, παρατηρήθηκε ότι εμφανίζει μεγάλο ποσοστό αστοχίας στις αποτυπώσεις σηράγγων. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την επίμηκη γεωμετρία της περιοχής σάρωσης που σχηματίζεται σε παρόμοια έργα.

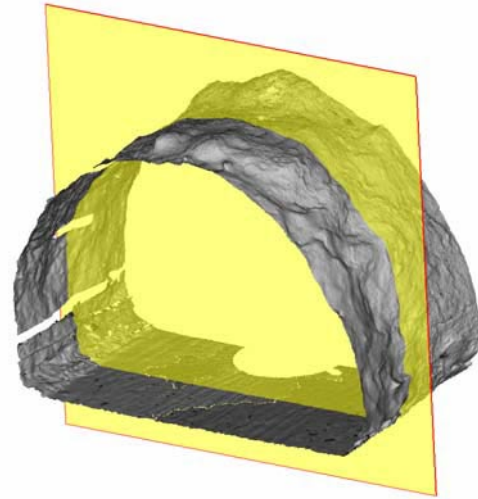


Σχήμα 4: Προσανατολισμός νέφους σημείων
Figure 4: Point cloud positioning and orientation

4.2 Μέθοδοι εξαγωγής διατομών

Η εξαγωγή των διατομών από το μοντέλο της σήραγγας σε επιλεγμένες θέσεις του άξονα μπορεί να γίνει είτε απευθείας από το νέφος των σημείων, είτε μετά από διαδικασίες παρεμβολής.

Στην πρώτη περίπτωση η επιλογή των σημείων γίνεται με κριτήριο την απόστασή τους από το επίπεδο της διατομής σε σχέση με μια προεπιλεγμένα μικρή απόσταση (Σχήμα 5). Στη συνέχεια, τα επιλεγμένα σημεία εισάγονται σε κάποιο λογισμικό CAD και σχεδιάζεται η διατομή.



Σχήμα 5: Νέφος σημείων και επίπεδο διατομής
Figure 5: Point cloud and section plane

Στη δεύτερη περίπτωση, με βάση το νέφος σημείων δημιουργείται αρχικά ένα τρισδιάστατο ακανόνιστο (μη μαθηματικό) μοντέλο (Irregular Mesh) [5, 13, 14]. Οι διατομές σε προκαθορισμένες θέσεις του άξονα προκύπτουν από την τομή του επιπέδου τους με το μοντέλο που δημιουργήθηκε. Επισημαίνεται ότι η παραγωγή των μη μαθηματικών μοντέλων θα πρέπει να γίνεται με κατάλληλους αλγόριθμους του τύπου “3D” ή “2.5D” [9, 10, 11]. Οι γνωστοί αλγόριθμοι παραγωγής ψηφιακών μοντέλων εδάφους, που χρησιμοποιούνται στα λογισμικά τοπογραφίας, οδοποιίας, GIS κ.α., αδυνατούν να δημιουργήσουν ακανόνιστα μοντέλα σηράγγων. Η αδυναμία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι αλγόριθμοι αυτοί απαιτούν αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ του προς αποτύπωση αντικειμένου και της επιφάνειας προβολής.

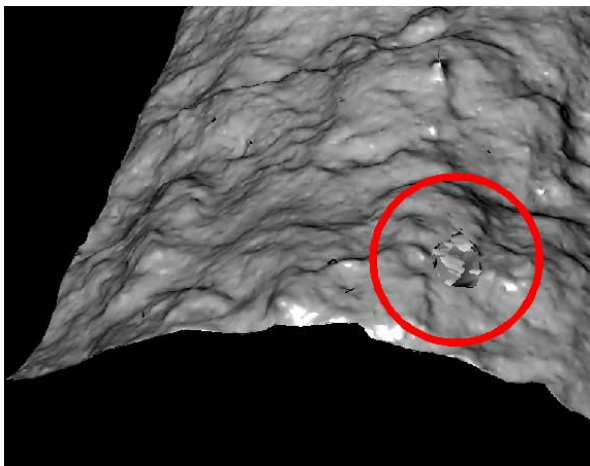
Θα πρέπει, δηλαδή, σε κάθε σημείο της επιφάνειας προβολής να αντιστοιχίζεται μόνο ένα σημείο του αντικειμένου, κάτι που δεν συμβαίνει σε έργα σηράγγων λόγω της ύπαρξης δύο ομόλογων σημείων, ένα στο δάπεδο της στοάς και ένα στην οροφή [19].

Οι δύο παραπάνω μεθοδολογίες αποτελούν μοναδική επιλογή στις περιπτώσεις αποτύπωσης σηράγγων που βρίσκονται στο στάδιο πριν την κατασκευή της τελικής επένδυσης, δεδομένου ότι το πραγματικό σχήμα των διατομών είναι ακανόνιστο και συνεπώς δεν είναι δυνατή η παρεμβολή οποιασδήποτε μαθηματικής επιφάνειας [9, 16].

4.3 Σύγκριση μεθόδων εξαγωγής διατομών

Από την εφαρμογή των δύο μεθόδων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα ως προς τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που εμφανίζει η κάθε μέθοδος. Ειδικότερα:

- Η δεύτερη μέθοδος είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ λόγω της παραγωγής των ακανόνιστων μοντέλων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, για το σαρωτή laser και τον Η/Υ (Pentium 3.2, 4Gb RAM, 256 Mb μνήμη κάρτας γραφικών), που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, ο μέγιστος όγκος δεδομένων που μπορεί να ανακτηθεί από το υπολογιστικό σύστημα αντιστοιχεί σε μήκος σήραγγας έως 1 km (~ 20.000.000 σημεία). Ωστόσο, δεδομένου ότι η επεξεργασία των μετρήσεων για την παραγωγή του τρισδιάστατου ακανόνιστου μοντέλου απαιτεί αυξημένη υπολογιστική ισχύ, η επεξεργασία έγινε σε μικρότερα τμήματα, μήκους της τάξης των 50 m.
- Παρατηρήθηκε ότι οι αλγόριθμοι παραγωγής ακανόνιστων μοντέλων εμφανίζουν κάποια μικρά και τοπικού χαρακτήρα προβλήματα αξιοπιστίας. Η προέλευσή τους ενδέχεται να οφείλεται στο θόρυβο που προστίθεται λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων κατά τη μέτρηση της απόστασης. Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά είναι εύκολα ανιχνεύσιμα και διορθώσιμα, είτε απευθείας στο μοντέλο μέσω του λογισμικού επεξεργασίας, είτε στη φάση εξαγωγής των διατομών με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού CAD. Η διαδικασία αυτή όμως θα πρέπει να εκληφθεί ως ένα επιπλέον στάδιο επεξεργασίας που απαιτείται σε σχέση με την πρώτη μέθοδο.
- Η δεύτερη μέθοδος δεν απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία σε λογισμικό CAD για την αποκατάσταση της συνέχειας του σχήματος των διατομών. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι το μεγάλο πλήθος των διατομών και των σημείων ανά διατομή καθιστούν τη σχετική εργασία ασύμφορη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην πλειονότητά τους τα λογισμικά επεξεργασίας που συνοδεύουν τους σαρωτές δεν διαθέτουν τη σχετική δυνατότητα αυτόματης απόδοσης. Στο Σχήμα 6 φαίνεται σε κύκλο μια μικρή περιοχή του τρισδιάστατου ακανόνιστου μοντέλου, η οποία παρουσιάζει προβλήματα ασυνέχειας λόγω πολλαπλών ανακλάσεων.



Σχήμα 6: Προβλήματα αλγόριθμων παραγωγής ακανόνιστων μοντέλων

Figure 6: 3D meshing algorithm problems

- η δυνατότητα δημιουργίας ενός συνολικού μοντέλου της σήραγγας παρέχει τη δυνατότητα ολικής και απ' ευθείας διαχείρισης του έργου. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται στα περισσότερα λογισμικά επεξεργασίας τρισδιάστατης σάρωσης, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις εργασίες επιμετρήσεων.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

5.1 Στοιχεία του έργου και παράμετροι αποτύπωσης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία προέρχονται από την κατασκευή της σήραγγας Ικονίου του Προαστιακού Σιδηρόδρομου στην περιοχή Σχιστός Αττικής. Στο πλαίσιο υλοποίησης του ευρύτερου έργου, η σήραγγα, συνολικού μήκους 3520 m, θα εξυπηρετεί τη σύνδεση του λιμένα Πειραιά με τον εμπορευματικό σταθμό στο Θυρίasio Πεδίο.

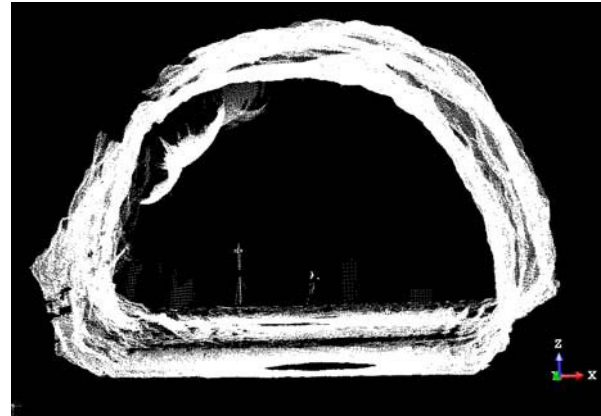
Στην παρούσα εφαρμογή, η επιλογή των στάσεων του οργάνου έγινε με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του όγκου και της ακρίβειας της πληροφορίας που μπορεί να συλλεχθεί από κάθε στάση. Έτσι, με βάση την εμβέλεια του οργάνου (~32 m), το είδος αντιστήριξης και διάνοιξης που χρησιμοποιήθηκε στη στοά και το όριο των μέγιστων επιτρεπόμενων σφαλμάτων στον εντοπισμό (< 2 cm), προέκυψε ότι οι στάσεις του οργάνου έπρεπε να τοποθετηθούν ανά 50 m και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον άξονα του έργου.

5.2 Ρυθμίσεις και επιλογές λειτουργίας του σαρωτή

Για όλες τις στάσεις επιλέχθηκε η δυνατότητα πλήρους περιστροφής της κεφαλής του σαρωτή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, ενώ στον οριζόντιο άξονα επιλέχθηκε ένα εύρος περιστροφής από -40° έως $+180^\circ$. Η γωνιακή ανάλυση τέθηκε ίση με $dH = 0.125^\circ$ και $dV = 0.25^\circ$ για τις οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες αντίστοιχα και μέγιστη απόσταση σάρωσης 32 m.

Με βάση τις ρυθμίσεις αυτές από κάθε στάση οργάνου καλύφθηκε μια περιοχή μήκους περίπου 50 m, συνολικού πλήθους σημείων της τάξης των 700.000, επιτρέποντας έτσι την εξαγωγή διατομών που αποτελούνται από 6.000 έως 9.400 σημεία.

(π.χ. αεραγωγός αερισμού, τρίποδας με κατάφωτο, θήκη μεταφοράς σαρωτή laser).

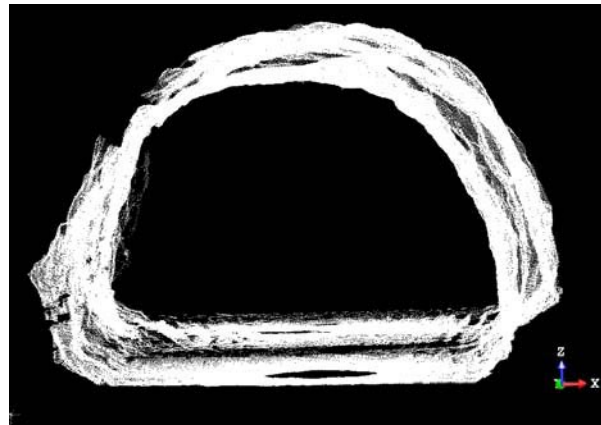


Σχήμα 7: Νέφος σημείων σε μήκος σήραγγας 400 m
Figure 7: Point cloud over 400 m of tunnel

5.3 Προσανατολισμός νεφών και εξαγωγή διατομών

Η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού μεταξύ διαδοχικών νεφών σημείων έγινε με τη μέθοδο προσδιορισμού της θέσης του σαρωτή από γνωστά σημεία με χρήση κατάφωτου. Η μέθοδος αυτή προτιμήθηκε σε σχέση με την τεχνική “Fuzzy Logic” για το λόγο που αναφέρθηκε στη παράγραφο 4.1. Ο εντοπισμός του σαρωτή έγινε με τη μέτρηση των οριζόντιων και των κατακόρυφων γωνιών καθώς και των αποστάσεων από διαφορετικές κορυφές του δικτύου της σήραγγας με χρήση του γεωδαιτικού σταθμού Trimble 5601DR, ακρίβειας $\pm 2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ και $3''$. Στο Σχήμα 7 φαίνεται το νέφος σημείων όπως συλλέχθηκε για ένα μικρό τμήμα της σήραγγας.

Η διαδικασία εξαγωγής των διατομών έγινε με εφαρμογή ενός μη μαθηματικού μοντέλου σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.2. Η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων έγινε με χρήση του πακέτου λογισμικού Mensi GS-series RealWorks που συνοδεύει το σαρωτή laser [11]. Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές εξαγωγής διατομών, η τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης laser αποτυπώνει και αντικείμενα ξένα προς τη σήραγγα, τα οποία ενδεχομένως βρίσκονται στη ζώνη εμβέλειας του σαρωτή (π.χ. οχήματα, αεραγωγούς αερισμού, κ.α.). Για το λόγο αυτό προηγήθηκε κατάλληλη προεπεξεργασία του νέφους σημείων, προκειμένου να αφαιρεθούν όσα αντικείμενα βρίσκονται στο εύρος σάρωσης και δεν σχετίζονται με τη σήραγγα. Η απαλλαγή του νέφους από τα αντικείμενα αυτά απαιτεί προσεκτικούς χειρισμούς του λογισμικού που παρέχεται από τους κατασκευαστές των οργάνων και είναι εργασία που δεν είναι δυνατό να αυτοματοποιηθεί. Στο Σχήμα 8 δίνεται ένα παράδειγμα νέφους σημείων πριν και μετά την αφαίρεση αντικειμένων που δεν σχετίζονται με την επιφάνεια της σήραγγας



Σχήμα 8: Νέφος σημείων πριν και μετά την αφαίρεση ξένων αντικειμένων
Figure 8: Point cloud before and after removal of irrelevant objects

5.4 Αντιπαράβολή με συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης

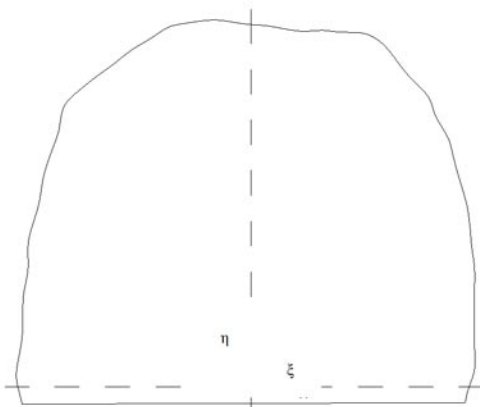
5.4.1 Αποτύπωση με γεωδαιτικό σταθμό

Προκειμένου να συγκριθεί η διαδικασία και τα αποτελέσματα της αποτύπωσης με τρισδιάστατο σαρωτή laser με εκείνα που προέρχονται από συμβατικές μεθόδους, αποτυπώθηκε ένα μικρό τμήμα της σήραγγας, συνολικού μήκους 90 m, με τη βοήθεια γεωδαιτικού σταθμού. Στο τμήμα αυτό ελήφθη μια διατομή ανά 3 m με χρήση του γεωδαιτικού σταθμού Trimble 5601DR. Ο προσδιορισμός της χιλιομετρικής θέσης των διατομών, όπως και ο προσανατολισμός του επιπέδου τους, έγινε αυτόματα από το λογισμικό που διαθέτει το όργανο από στάσεις γνωστών συντεταγμένων. Σε κάθε διατομή ελήφθησαν περί τα τριάντα σημεία, με ιδιαίτερη επιμέλεια τόσο κατά την επίσημάνσή τους, όσο και κατά τη μέτρησή τους. Δεδομένου ότι τα σημεία σάρωσης laser

και η αποτύπωση με το γεωδαιτικό σταθμό αναφέρονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς (σύστημα αναφοράς του έργου - X, Y, Z), οι διατομές από τα δεδομένα σάρωσης υπολογίστηκαν στις ίδιες χιλιομετρικές θέσεις με τις διατομές από το γεωδαιτικό σταθμό.

5.4.2 Σχολιασμός των μετρήσεων

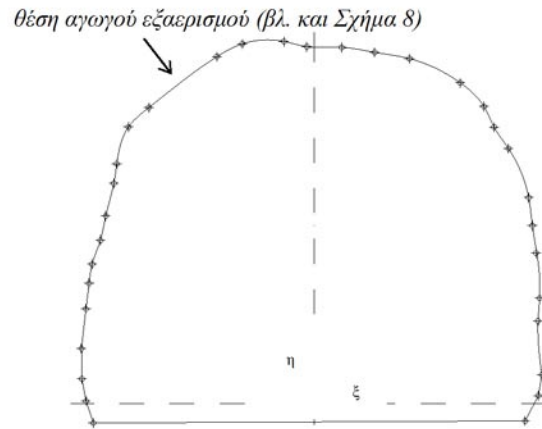
Η συγκριτική αντιπαραβολή των δύο μεθόδων στηρίχθηκε συνολικά σε τριάντα διατομές. Στα Σχήματα 9 και 10 παρατίθεται ενδεικτικά μια διατομή όπως προέκυψε με εφαρμογή των δύο μεθόδων. Ειδικότερα, στο Σχήμα 9 φαίνεται η διατομή όπως έχει προκύψει από την προσαρμογή στο νέφος σημείων ενός μη μαθηματικού μοντέλου. Πριν από την προσαρμογή, έγινε η επεξεργασία του νέφους, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.3, προκειμένου να αφαιρεθούν όποια αντικείμενα δεν ανήκουν στο σώμα της σήραγγας, όπως για παράδειγμα ο αγωγός εξαερισμού της στοάς. Το κενό που δημιουργήθηκε μετά από την απομάκρυνση του αγωγού εξαερισμού από τη διατομή καλύφθηκε με ένα αρκετά μεγάλο ευθύγραμμο τμήμα που φαίνεται στο πάνω αριστερό τμήμα της διατομής. Από το σχήμα 9 είναι εμφανής ο βαθμός λεπτομέρειας που επιτυγχάνεται, δεδομένου ότι η συγκεκριμένη διατομή αποτελείται από 9.252 σημεία.



Σχήμα 9: Διατομή από Laser Scanner
Figure 9: Laser Scanner's profile

Στο Σχήμα 10 φαίνεται η ίδια διατομή όπως προέκυψε με χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Αποτελείται συνολικά από είκοσι εννέα σημεία, αριθμός που υπερκαλύπτει τις σχετικές προδιαγραφές. Παρότι ο βαθμός λεπτομέρειας που επιτυγχάνεται είναι αρκετά ικανοποιητικός, εν τούτοις, είναι εμφανής η απώλεια πληροφορίας. Αυτό είναι εμφανές στη θέση του αγωγού εξαερισμού όπου το κενό συμπληρώθηκε με ένα αρκετά μεγαλύτερο ευθύγραμμο τμήμα σε σχέση με αυτό του Σχήματος 9. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αδυναμία μέτρησης μεγάλου αριθμού σημείων στη θέση του αγωγού, σε αντίθεση με τη διαδικασία τρισδιάστατης σάρωσης, όπου

τέτοιου είδους προβλήματα περιορίζονται κατά πολύ εξαιτίας της μικρής πιθανότητας σκίασης λόγω της αλληλοεπικάλυψης των νεφών.



Σχήμα 10: Διατομή από Total Station
Figure 10: Total Station's profile

Βασική παράμετρος κατά τη διεξαγωγή υπολογισμών στη φάση των επιμετρήσεων αποτελεί το εμβαδόν των διατομών της σήραγγας. Για κάθε μία από τις τριάντα διατομές που υπολογίστηκαν στο τμήμα ελέγχου με τις δύο μεθόδους υπολογίστηκε το εμβαδόν της. Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η απόκλιση που εμφανίζεται στον υπολογισμό του εμβαδού των διατομών με τις δύο μεθόδους κυμαίνεται από 1% έως 5% για εμβαδόν διατομής της τάξης των 50 m².

6. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης είναι ιδιαίτερα αποδοτική, δεδομένου ότι για μια σάρωση από μια στάση με πλήρες γωνιακό εύρος, απαιτούνται περίπου 45 min, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου εγκατάστασης του οργάνου και των εργασιών εντοπισμού και προσανατολισμού του. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από χαμηλό φόρτο εργασιών πεδίου, δεδομένου ότι αυτές περιορίζονται στον εντοπισμό του σαρωτή και στους απαιτούμενους χειρισμούς για την εκκίνηση της διαδικασίας σάρωσης. Αντίθετα, η χρήση των περισσότερων γεωδαιτικών σταθμών, όπως ο Trimble 5601DR, προϋποθέτουν τον υπολογισμό των στοιχείων χάραξης με τη μορφή γραμμικών συντεταγμένων (χιλιομετρική θέση και απόσταση από τον άξονα), χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η δυνατότητα χρήσης εξειδικευμένου λογισμικού για αυτή την εργασία. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης, δεν απαιτούνται εργασίες χάραξης των θέσεων στάσης του σαρωτή, παρά μόνον η λήψη στοιχειώδους μέριμνας ώστε η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών στάσεων να μην υπερβαίνει τα 50 m, προκειμέ-

νου να μην προκύψουν κενά ή δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Τέλος, δεν απαιτούνται ιδιαίτερα καλές συνθήκες φωτισμού, καθώς το όργανο δεν χρησιμοποιεί οπτικό τρόπο σκόπευσης.

Τα βασικά αρνητικά στοιχεία της μεθόδου είναι ο αυξημένος όγκος εργασιών επεξεργασίας των δεδομένων, το πολύ υψηλό κόστος αγοράς και το μεγάλο βάρος του εξοπλισμού. Το υψηλό κόστος των εργασιών γραφείου οφείλεται κυρίως στη διαδικασία απομάκρυνσης των ξένων αντικειμένων από το νέφος σημείων, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.3. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ένας χειριστής χρειάζεται περίπου οκτώ ώρες για κάθε 1 km σήραγγας. Επίσης, για το ίδιο μήκος σήραγγας απαιτούνται, επιπλέον, τέσσερις ώρες υπολογιστικού φόρτου για την εξαγωγή των διατομών.

Σήμερα (2006), η αξία ενός τρισδιάστατου σαρωτή laser κυμαίνεται από 60.000 € έως 150.000 € καθιστώντας το κόστος αγοράς δαπανηρή επένδυση. Σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί η αξία αγοράς του γεωδαιτικού σταθμού καθώς είναι απαραίτητος για βοηθητικές εργασίες και εργασίες πολυγωνομετρίας. Στα παραπάνω θα πρέπει να συνυπολογισθεί και το κόστος για την προμήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή ιδιαίτερα υψηλών δυνατοτήτων, προκειμένου να μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Όλοι οι τρισδιάστατοι σαρωτές laser είναι ογκώδη και βαριά όργανα. Ο σαρωτής Callidus CP 3200 ζυγίζει 18 kg (46 kg με τα παρελκόμενα). Στον Πίνακα 1 παρατίθενται συγκριτικά τεχνικά χαρακτηριστικά και παραμέτροι απόδοσης σε εργασίες αποτύπωσης σηράγγων για το σαρωτή Callidus CP 3200 και το γεωδαιτικό σταθμό Trimble 5601 DR.

Όργανο	Callidus CP 3200	Trimble 5601DR
Ανάλυση	V = 0.25I Hz = 0.0625I	[Σκόπευση]
Ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων	5mm έως 32m	
Απαιτούμενος χρόνος προετοιμασίας σε hrs ανά km	πρακτικά αμελητέος	12
Σημεία ανά 15 min	1612800*	32
Διατομές ανά 30 min	25	2
Απόδοση εργασιών επεξεργασίας σε hrs ανά km	12	6

Αριθμός μελών συνεργείου	2	2
Κόστος οργάνων σε €	80.000	12.000
*Με επιλογή μέγιστης γωνιακής ανάλυσης 3.225.600 σημείων. Στις αποτυπώσεις σηράγγων, σημαντικό μέρος του γωνιακού εύρους δεν παρέχει μετρήσεις αποστάσεων λόγω υπέρβασης της εμβέλειας, οπότε ανά στάση παρέχονται περίπου 1.000.000 σημεία.		
Πίνακας 1: Απόδοση Total station και Laser scanner Table 1: Total station's and Laser scanner's performance		

Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται στον κ. Σίμπα Ν., πρόεδρο της Topomet AE για την πολύ καλή συνεργασία κατά τη συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου, τη συνεισφορά του κατά τη συγγραφή αυτού του άρθρου, καθώς και τη διάθεση υλικού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beraldin J.-A., Picard M., El-Hakim S.F., Godin G., Valzano V., Bandiera A., Lataouche D. "Virtualizing a Byzantine Crypt by Combining High-Resolution Textures with Laser Scanner 3D Data", Proceedings of VSMM 2002, p. 25-27 September 2002, Gyeongju, Korea.
- Bernardini F., Rushmeier H., Thomas J. "The 3D Model Acquisition Pipeline, Computer Graphics", Forum Volume 21, Issue 2, 2002.
- Callidus Precision Systems "Laser Measuring System – Technical Documentation", Callidus Precision Systems Germany, 2003.
- Callidus Precision Systems "3D – Extractor Manual", Callidus Precision Systems Germany, 2003.
- Callieri M., Cignoni P., Scopigno R. "Reconstructing Textured Meshes from Multiple Range RGB Maps", 7th Int.l Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization 2002, Erlangen (D).
- Henriques M. J., "Uncertainty of Tacheometric Measurement of Convergences in Tunnels", 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 22-24 May, 2006.
- Ingensand H., "Metrological Aspects in Terrestrial Laser-Scanning Technology", 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 22-24 May, 2006.
- Kohousek I. "Laser Scanning for Geotechnical Engineering", 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 22-24 May, 2006.
- Mensi GS-series "GS2000 User Manual", Mensi S.A., 2003.
- Mensi GS-series "PointScape1.2 User Manual", Mensi S.A., 2003.
- Mensi GS-series "RealWorks V4 User Manual", Mensi S.A., 2003.
- Paar G., Bauer A., Kontrus H. "Texture – Based Fusion Between Laser Scanner and Camera for Tunnel Surface Documentation", Int. Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, October 3-5, 2005.
- Rigiroli P., Campadelli P., Pedotti A., Borghese N. "Mesh Refinement with Color Attributes", p. 449-461 Computers & Graphics 25, 2001.
- Sequeira V., Ng E., Goncalves J., Hogg D. "Automated 3D Reconstruction of Interiors with Multiple Scan-Views", Proc. of SPIE,

Electronic Imaging '99, The Society for Imaging Science and Technology, 1999.

15. Stylianidis E., Patias P., Liapakis C., Balis V., Philotheou G. “**Visualization of Frescos by Means of Photogrammetry and Laser Scanning**”, CIPA International Symposium, Torino, September 26 – October 1, 2005.

16. Yizhou Yu, Andras Ferencz, Jitendra Malik “**Extracting Objects**

from Range and Radiance Images”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 7, No 4, October – December, 2001.

17. Βλάχος Δ. “**Μαθήματα Τοπογραφίας**”, Θεσσαλονίκη, 1984.

18. Μπαντέλας Α., Γ., Σαββαΐδης Π., Δ., Υφαντής Ι., Μ., Δούκας Ι. Δ. “**Γεωδαισία ΙΙ: Αποτυπώσεις – Χαράξεις Τεχνικών Έργων**”, Εκδ. Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε., Θεσσαλονίκη, p 495, 2000.

19. Ντερμάρης Α. “**TunnelCAD User Manual**”, Ιωάννινα, 2003.

Β. Γκίκας,

Λέκτορας Ε.Μ.Π., Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου, Αθήνα.

Σ. Καραμήτσος,

Δρ Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, Αβέρωφ 18, 10433 Αθήνα.

Ι. Κώτσης,

Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, Ξάνθου 23, 15341 Αγ. Παρασκευή.

Extended Summary

Laser Scanning Technology for Tunnel Surface Documentation

V. GIKAS

Lecturer N.T.U.A.

S. KARAMITSOS

Dr. Rural and Surveying Engineer
N.T.U.A.

I. KOTSIS

Rural and Surveying Engineer
N.T.U.A.

Abstract

This article deals with the fast growing technology of 3D-terrestrial laser scanning (TLS) and its application in tunnel surveying projects. It provides an overview of the theoretical background of the method, followed by a detailed discussion of the methodologies currently applied for data acquisition and processing. The various techniques for geo-referencing the point clouds, mesh model generation and cross section extraction are examined and evaluated. Accuracy issues concerning the data capture process and cross section profile extraction are examined. Also, based on real data examples, practical aspects relating to field work planning and associated cost implications are reviewed and recommendations are drawn.

1. INTRODUCTION

For a number of reasons, the surveying tasks undertaken during tunnel construction operations are of particular importance to the overall success of a project. Surveying operations are deemed to be critical for tunnel lining during excavation, surface modeling and profiling as well as for as-built control purposes. Despite the fact that techniques and instruments are continuously being improved, such operations are very demanding as they are carried out in limited working space, poor lighting conditions, excessive levels of noise and machinery traffic. In the past, geodetic and photogrammetric methods were traditionally used for profiling purposes, cross section extraction and volume calculation at the stages of excavation, sheeting and application of retaining measures. These methods rely on the use of conventional and robotic total stations as well as other specialized systems [6, 17, 18].

Recently, the rapidly expanding technology of TLS has been extended to tunnel construction projects since, in most cases, it offers a rather comprehensive solution to tunnel surveying operations for appreciably less time and cost [1, 2, 8, 14]. This study reviews the theoretical background of laser scanning technology and describes the specialized techniques and problems associated with tunnel surveying

Submitted: June 14, 2006 Accepted: July 1, 2007

using example data sets.

2. TECHNIQUES APPLIED IN TUNNEL SURVEYING AND THE TLS METHOD

In the past, two methods have been extensively used for extracting cross section data during tunnel construction. The first category encompasses pantograph based techniques that rely on direct contact observations (obtained between the measuring equipment and the tunnel's surface) while the second one includes those that depend on the use of geodetic and photogrammetric methods and instruments. The choice of a particular method depends on many factors, such as equipment availability, time planning, cost issues, as well as accuracy specifications.

The development of TLS technology triggered a major shift in the perception of tunnel surveying works. In contrast to classical photogrammetry, which requires a minimum of two images to produce a 3D information volume, laser scanning generates directly a metric 3D information volume, the so-called point cloud, with just one single setup of the instrument (Figure 3). Each point of this cloud has 3D coordinates with accuracies up to a few millimetres. Furthermore, the intensities of the received signals give valuable information for post-processing. In tunnel construction, as is the case in other applications, laser scanning has to be combined with other coordinate determining technologies such as total stations.

3. THEORETICAL BACKGROUND

3.1 Point Cloud Positioning and Orientation

Laser scanners enable contact-free determination of space

coordinates of an area of interest with a very high frequency. For each point one oblique distance and two orthogonal angles are measured, together with the additionally registered intensity of the returning signal distance. Thereby, every scan is associated with a local coordinate system in accordance with the scanner reference system. Geo-referencing, sometimes called “data registration”, is one of the most important steps in processing laser scanning data. It comprises collecting and merging the individual scans in a unified scan.

There exist two methods for geo-referencing point clouds in tunnelling applications. In the first method a circular prism is set up at a known location, within the operating range of the scanner and subsequently geo-referencing is accomplished by identifying and registering the prism’s image in sequential scans (Figure 4). The second method is based on fuzzy join techniques. The 3D coordinates of all points belonging to sequential point clouds are transformed to a common coordinate system [3, 4]. This method requires that a volume of a minimum 20% of common points exists in adjacent point clouds. In practice, however, the accuracy of this latter technique is relatively low due to the bad geometry associated with tunnel projects and, therefore, it is of limited use.

3.2 Cross Section Extraction

Provided that geo-referencing of the point clouds has been restored, then it is possible to extract cross sections and subsequently perform volume calculations and other tasks. One way to extract a cross section directly from the point cloud is simply to pick those points that lie within a threshold distance from a desirable location and then, reconstruct the cross section from those points (Figure 5). However, the processing time involved renders this method practically

inapplicable in tunnel construction. Usually, an irregular, non-mathematical model, the so-called “mesh model” is generated [9, 10, 11]. “3D” or “2.5D” algorithms are used for this purpose [5, 13, 14]. Despite the high demands in computing power, this method results in a complete model of the tunnel’s bore, and hence allows for the extraction of cross sections at any location.

4. APPLICATION AND DISCUSSION

Since 2002, TLS technology has been used in several highway and train tunnel construction projects throughout Greece. The Callidus CP 3200 TLS system (supplied by Callidus Precision Systems) was used. The experience accumulated from these projects helped us to master the techniques, identify their shortcomings, and fully exploit the potential of TLS technology in tunnel construction. Procedures relating to field work, such as optimum operating range, and point cloud positioning and orientation techniques, were established. Similarly, procedures were established with regard to the processing steps of the data: e.g. in relation to techniques for geo-referencing the data, cross section extraction, volume computations and as-built quality control.

Furthermore, in order to validate the results obtained from the TLS method, data were collected with conventional geodetic methods and a number of analyses were performed (Figures 6, 7). Specific conclusions were drawn about the comparative accuracy of the two methods and the accuracy obtained in the final results (i.e. differences in estimating the cross section areas and volume computations). Additional conclusions were also drawn relating to cost factors and other practical concerns, such as labor prerequisites for field work and data processing (Table 1).

V. Gikas,

Lecturer N.T.U.A., Dept. of Rural and Surveying Engineering, 9 Heron Polytechniou Str., 15780 Zographou, Athens.

S. Karamitsos,

Dr. Rural and Surveying Engineer NTUA, 18 Averof str. 10433 Athens, Greece.

I. Kotsis,

Rural and Surveying Engineer NTUA, 23 Xanthou str. 15341 Ag. Paraskevi, Greece.