

Rilievo LiDAR da auto di pareti rocciose lungo infrastrutture di trasporto: l'esperienza sull'Autostrada del Brennero-A22

D. Bianchi, L. Simeoni, A. Vitti

Università di Trento, Italia

C. Costa, D. Quattrocioni

Autostrada del Brennero SpA, Trento, Italia

SOMMARIO: La memoria descrive il rilievo LiDAR da auto, inteso come strumento per la gestione del rischio da caduta massi, sperimentato lungo un tratto dell'autostrada A22 adiacente a pareti rocciose sub-verticali. Sono analizzate la densità di punti e la percentuale di superficie di pareti ad alto rischio rilevate. La densità è risultata generalmente superiore a 300 punti/m², ritenuta il limite inferiore per riuscire a individuare il distacco di piccoli blocchi mediante la ripetizione dei rilievi. La superficie di pareti ad alto rischio rilevata è risultata in media quasi il doppio di quella precedentemente prevista da una simulazione del rilievo in ambiente GIS sebbene, soprattutto a causa della presenza della vegetazione, sia coincisa in generale solo per circa il 30% con quella simulata. Si può concludere che, per il caso di studio, il rilievo LiDAR da auto possa essere uno strumento efficiente ed efficace per il monitoraggio di pareti nella gestione del rischio da caduta massi lungo vie di trasporto.

1 INTRODUZIONE

Le cadute massi sono eventi che coinvolgono frequentemente infrastrutture di trasporto di superficie, mettendo a repentaglio l'integrità delle strutture e la sicurezza degli utenti. L'infrastruttura oggetto di questo studio è l'Autostrada del Brennero-A22, collegamento cruciale delle autostrade italiane in quanto è parte dell'asse europeo E45. I più recenti dati ufficiali riportano che la A22 è stata utilizzata in media da circa 200000 veicoli al giorno (Autostrada del Brennero s.p.a, 2024). In particolare, il tratto di A22 oltre il casello di Bolzano Nord consiste principalmente in tratti con sezioni a cielo aperto e viadotti che attraversano la Valle del fiume Isarco. Quest'ultima ha origine glaciale e, nella porzione più meridionale, presenta la tipica conformazione ad U, con pareti rocciose che sono prevalentemente di origine vulcanica (i.e. ignimbrite e tufo) e presentano pendenze elevate: queste costituiscono un fattore di rischio da caduta massi per l'infrastruttura e per gli utenti.

Nell'ambito dello studio del rischio da caduta massi lungo 30 km di Autostrada del Brennero-A22, l'ente gestore desidera servirsi del rilievo LiDAR in modalità cinematica da auto come strumento efficace ed efficiente per il monitoraggio delle pareti rocciose, in grado di riconoscere e caratterizzare le aree suscettibili di crollo. Infatti, questa tecnica di rilievo garantisce le condizioni di sicurezza degli operatori e non costringe l'ente gestore alla chiusura del traffico in quanto il veicolo viaggia lungo la corsia lenta dell'autostrada. Alcuni esempi hanno già evidenziato come il LiDAR montato su veicoli mobili (Lato et al. 2009, Lin et al. 2013, Giuliano et al. 2022, Michoud et al. 2015) rappresenti uno strumento innovativo per il rilievo di pareti rocciose. D'altra parte, è ben noto che il rilievo LiDAR eseguito in modalità statica è un ottimo strumento a supporto delle attività di mitigazione del rischio e gestione delle infrastrutture di trasporto, specialmente se ripetuto nel tempo (Walton et al. 2023, Kromer et al. 2017, Kromer et al. 2015, Jaboyedoff et al. 2010). Inoltre, i rilievi LiDAR in modalità statica permettono un'accurata identificazione delle deformazioni pre-crollo e dei volumi distaccati, arrivando a riconoscere crolli di blocchi della dimensione di 1 dm³.

L'efficacia del rilievo LiDAR da auto è stata analizzata in termini di densità di punti e percentuale di superficie rilevata, utilizzando le nuvole di punti riguardanti alcune porzioni di parete rocciosa presenti nel tratto di autostrada tra i caselli di Bolzano Nord e Chiusa (circa 30 km). Quest'ultime sono state individuate mediante un'analisi di rischio da caduta massi dalla quale è emerso che il rischio più alto è associato alle pareti con pendenza maggiore di 70° presenti in 8 tratti di autostrada (concentrati in 10 km). Prima della sua esecuzione, l'efficacia e l'efficienza del rilievo in modalità cinematica sono state preventivamente stimate mediante una simulazione in ambiente GIS.

Questa memoria presenta i risultati della simulazione seguiti dalla descrizione dell'esecuzione del rilievo LiDAR cinematico da auto e della metodologia adottata per l'elaborazione delle nuvole di punti provenienti dal rilievo. I risultati in termini di densità di punti e di percentuale di superficie di parete ad alto rischio rilevata sono poi confrontati con quelli previsti dalla simulazione GIS, che aveva preventivamente dimostrato efficacia ed efficienza del rilievo LiDAR cinematico (Ferro et al. 2023, Simeoni et al. 2024).

2 METODOLOGIA DI RILIEVO LIDAR DA AUTO

Il rilievo LiDAR statico è il più classico e semplice strumento di monitoraggio utilizzato per le pareti rocciose, generalmente a scala di sito. Tuttavia, in caso di rilievi su scala territoriale, il tempo richiesto per svolgere il rilievo e l'impegno richiesto al gestore dell'infrastruttura per garantire le condizioni di sicurezza degli operatori senza sospendere la circolazione dei mezzi sull'autostrada (Simeoni et al. 2024) risultano onerosi. Perciò, si è scelto di utilizzare il rilievo LiDAR cinematico da auto.

Prima dell'esecuzione del rilievo lungo il tratto di circa 30 km di A22, tra i caselli di Bolzano Nord e Chiusa, la sua fattibilità tecnica, espressa in termini di efficienza ed efficacia, è stata valutata mediante una simulazione del rilievo in ambiente GIS (Ferro et al. 2023). In particolare, si è simulato l'avanzamento dell'auto alla velocità di 15 km/h con l'utilizzo di un laser scanner RIEGL VUX-1HA situato ad un'altezza di 1.75 m dal manto stradale. Per tenere conto del guardrail, che ostacola il laser, si è limitato il campo visivo a -5° (FOV) dello strumento rispetto alla vista orizzontale e si è fissato l'angolo del piano di scansione a 25° . Tale simulazione ha mostrato che le pareti ad alto rischio potenzialmente rilevabili coincidono con più dell'85% del totale, di cui il 70% rilevabile con densità superficiale di punti maggiore di 400 punti/m².

Dati i risultati promettenti provenienti dalla simulazione, a metà aprile 2023 è stato eseguito il rilievo LiDAR in modalità cinematica. La scelta della strumentazione è ricaduta sull'unità di *mobile mapping* TRIMBLE MX9, composta da due laser scanner, ognuno capace di rilevare fino a 1.8 milioni di punti per secondo e con una portata massima che varia tra 235 m e 475 m al diminuire della frequenza di campionamento (da 1800 kHz a 300 kHz), quattro videocamere ad alta qualità, una Inertial Motion Unit (IMU) ad alta precisione e ricevitori GNSS.

Le attività di rilievo hanno richiesto complessivamente due giorni. Dapprima è stato necessario materializzare 63 punti di controllo (GCP) sulla corsia di emergenza (dove possibile) mediante l'utilizzo di apposita sagoma e spray tracciante. La tecnologia GNSS e la modalità di rilievo di tipo Real Time Kinematic (RTK) con stazionamenti di 180 s hanno permesso di ottenere le coordinate spaziali nel sistema di riferimento UTM 32 Nord per ognuno dei GCP, la cui quota ortometrica è stata ricavata per successiva elaborazione di grigliati IGM.

In seguito, il rilievo LiDAR in modalità cinematica da auto è stato eseguito ad una velocità media di circa 30-35 km/h, scortando il veicolo portante lo strumento con 2 veicoli pre-segnalatori e 2 veicoli con segnale di protezione dell'ente gestore (Fig 1).

Per ottimizzare i dati, sono state eseguite 4 sessioni (i.e. *run*), di registrazione traiettoria e laser mobile in andata e ritorno sul tratto interessato, modificando le impostazioni della strumentazione: una coppia di *run* è stata eseguita in modo da massimizzare la densità di punti, mentre la seconda coppia è stata eseguita in modo tale da massimizzare la distanza coperta dal laser. Il tempo impiegato per l'esecuzione del rilievo in modalità cinematica ha richiesto quindi solo mezza giornata (i.e. un'ora per ogni *run* di 30 km).

Infine, una preliminare elaborazione dei dati è stata operata dall'esecutore del rilievo (tempo richiesto pari ad una giornata lavorativa) per georeferenziare ed ottimizzare la nuvola di punti

ottenuta tramite la conoscenza delle coordinate dei GCPs. La materializzazione dei GCPs ha permesso di ottenere un'accuratezza delle coordinate 3D di circa 2 cm per la componente orizzontale e di circa 3 cm per quella verticale.

Il sistema di riferimento utilizzato è WGS84 – UTM32N (EPSG:4326), il geoide di riferimento è stato invece ricavato dai file grigliati n.014 e n.027 dell'IGM relativi alle tavolette in scala 1:25,000.

I risultati del rilievo consistono in una nuvola di punti georeferenziata in maniera globale per ciascuno degli 8 tratti studiati (Fig 2a).



Figura 1. TRIMBLE MX9 montato sull'auto e mezzo di scorta.

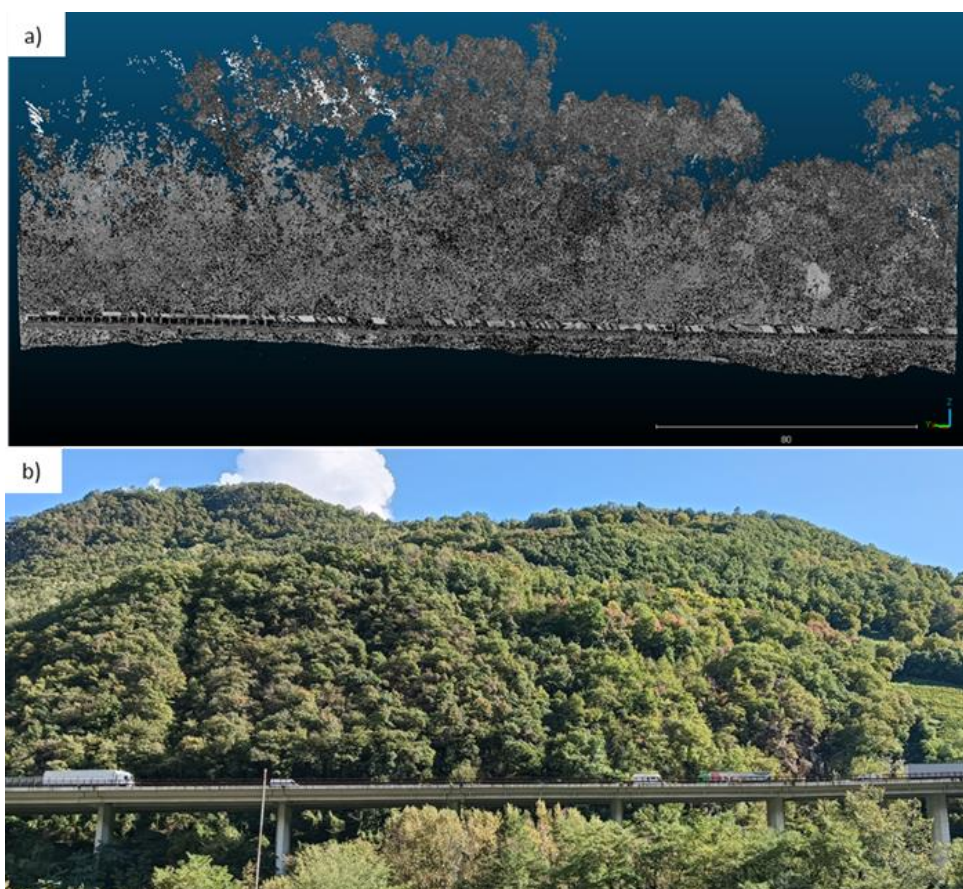


Figura 2. a) Esempio di nuvola di punti ottenuta con il rilievo LiDAR cinematico da auto e b) foto del rispettivo tratto: si può notare l'effetto della presenza della vegetazione che nasconde totalmente il piano di campagna.

Le nuvole di punti sono poi state elaborate tramite i software Cloud Compare (in seguito CC) e QGIS, con lo scopo di valutare la densità superficiale di punti raggiunta dal rilievo e confrontare l'estensione delle pareti ad alto rischio ottenuta dalla simulazione GIS con quella effettivamente rilevata.

L'elaborazione delle nuvole di punti si è focalizzata soprattutto sulla rimozione dei punti attribuibili ad elementi antropici (tralicci, segnaletica stradale, ecc) e vegetazione, con lo scopo di ottenere il piano di campagna effettivamente rilevato e valutarne l'estensione, con particolare attenzione a quelle aree di parete giudicate critiche dall'analisi di rischio.

Per la stima della densità superficiale di punti raggiunta dal rilievo, il software CC seleziona un dominio sferico di raggio locale (R) e valuta il numero di punti (N) sulla superficie generata: la densità è quindi il rapporto tra il numero di punti e la superficie della sfera.

Per rimuovere i punti attribuibili ad elementi antropici si è poi agito in due tempi. Dapprima è stato utilizzato il plugin di CC "*Cloth Simulation Filter (CSF)*" (Zhang et al. 2016) e poi è stato applicato un filtro sull'intensità. Il plugin "*Cloth Simulation Filter (CSF)*" è una procedura iterativa e semi-automatica che permette di distinguere gli oggetti rilevati che ostacolano la vista del piano di campagna come, ad esempio, la vegetazione. E' importante sottolineare che questa procedura richiede i valori di 3 parametri basati sulla tipologia di "scena" rappresentata dalla nuvola di punti. Tratto per tratto, questi valori sono stati definiti mediante numerosi tentativi per ottenere il risultato che più realisticamente rappresentasse la realtà osservata in varie riprese fotografiche. Successivamente, la qualità del piano di campagna è stata raffinata applicando un filtro sul valore di intensità rilevata per ogni punto della nuvola. Il parametro intensità dipende da: angolo di incidenza, distanza e composizione della superficie dell'oggetto intercettato ed è quindi particolarmente utile per distinguere le caratteristiche della copertura del suolo. In particolare, punti associati a valori di intensità bassi (0-20,000) sono stati scartati in quanto corrispondenti a elementi della vegetazione.

Per ciascuno degli 8 tratti studiati, è stata così ottenuta una nuvola di punti rappresentante il piano di campagna. Queste nuvole sono state trasformate in mesh quadrate (con lato pari a 0.5 m) ed importate in QGIS, in modo da essere confrontate con le aree risultate visibili dalla simulazione. I risultati ottenuti sono presentati nella sezione seguente.

3 RISULTATI DEL RILIEVO LIDAR DA AUTO

3.1 Densità di punti

La densità superficiale di punti è uno dei due parametri utilizzati per valutare l'efficacia del rilievo LiDAR in modalità cinematica da auto. In Tabella 2, per ogni tratto, sono riportate le percentuali di punti che hanno raggiunto la soglia di 900 punti/m² e la soglia minima di 300 punti/m². Si è assunto che 900 punti/m² sia un indice di ottima qualità del rilievo LiDAR in modalità cinematica, mentre 300 punti/m² è il valore per garantire che la ripetizione periodica del rilievo cinematico sia efficace per il monitoraggio del distacco dalle pareti rocciose di piccoli blocchi decimetrici. È stato infatti verificato che la deviazione standard delle coordinate può essere assunta cautelativamente di 5 cm ovvero, assumendo una distribuzione Gaussiana, in caso di ripetizione del rilievo è possibile riconoscere differenze di coordinate di almeno 12 cm con un livello di confidenza del 10%. Se la densità di punti è di 300 punti/m², in un'area di 30x30 cm² ricadono almeno 25 punti con i quali è quindi potenzialmente possibile individuare il distacco di un blocco di 30x30x12 cm³ (11 dm³).

Tabella 2. Percentuali di punti che hanno raggiunto le soglie di 300 punti/m² e 900 punti/m² per tutti i tratti rilevati.

Tratto di A22	% punti > 300 punti/m ²	% punti > 900 punti/m ²
Tratto 1	98	96
Tratto 2	78	46
Tratto 3	82	59
Tratto 4	79	48
Tratto 5	88	77

Tratto 6	74	42
Tratto 7	62	20
Tratto 8	69	26

In generale, per ogni tratto, più del 60% di punti sono stati rilevati con una densità maggiore della soglia minima: questo risultato è incoraggiante e sottolinea sin da subito l'efficacia del rilievo LiDAR in modalità cinematica.

Si è valutata l'influenza della direzione di incidenza del raggio laser considerando due "tasselli" di parete rocciosa a distanza di 150 m dalla sede stradale. Il primo si sviluppa in modo totalmente verticale, risultando quindi inclinato rispetto all'incidenza del raggio laser, mentre il secondo coincide con una porzione strapiombante e quindi è maggiormente ortogonale al raggio incidente. Sono stati ottenuti i valori di 570 punti/m² e 933 punti/m², rispettivamente, dimostrando che la direzione di incidenza del raggio sia un parametro determinante per la cattura delle porzioni di pareti rocciose. I valori di densità risultano comunque maggiori della soglia minima richiesta, grazie all'esecuzione delle 4 run con due differenti configurazioni di rilievo.

Inoltre, è interessante notare che per i Trattati 1 e 7, che con la simulazione GIS erano risultati non rilevabili, il rilievo in modalità cinematica è riuscito a rilevare alcune superfici con ottime densità di punti. Si consideri ad esempio il Tratto 7, dove il piano medio della parete rocciosa è pressoché ortogonale all'asse dell'autostrada e ne rende difficile la rilevazione. In questo tratto si è ottenuta la percentuale minima di punti a densità maggiore di 900 punti/m² (i.e. 20%). Tuttavia, nonostante il risultato scoraggiante della simulazione, è stato possibile rilevare il 62% della parete con una densità maggiore di 300 punti/m².

E' importante sottolineare che è stato riscontrato che le aree vegetate sono state rilevate ovunque con una densità superficiale di punti maggiore di 300 punti/m². Quindi, si può assumere che anche il piano di campagna coperto dalla vegetazione potrebbe essere rilevato con una densità simile e pertanto è fondamentale eseguire il rilievo in periodo tardo autunnale o invernale per ridurre al minimo le zone oscurate dalla vegetazione.

3.2 Aree rilevate

In media, nel rilievo è stata osservata un'area di pareti ad alto rischio che è quasi il doppio di quella prevista dalla simulazione e, in media, le porzioni di pareti ad alto rischio ritenute rilevabili dalla simulazione sono state effettivamente rilevate (o come piano di campagna o come vegetazione o elementi antropici) per il 60%.

Per affinare la valutazione dell'efficacia del rilievo LiDAR in modalità cinematica da veicolo, non sono state prese in considerazione le porzioni di superficie coperte dalla vegetazione o da elementi antropici. Quindi, si sono confrontate le porzioni di pareti ad alto rischio rilevate, ottenute con la metodologia di rimozione degli ostacoli presentata nella sezione 2, con quelle ottenute dalla simulazione GIS. In questo caso, solo il 30% dell'area delle pareti ad alto rischio ritenuta rilevabile dalla simulazione è stata effettivamente osservata dal rilievo LiDAR cinematico.

A titolo di esempio si consideri la Figura 3, che riporta i risultati in QGIS di simulazione e rilievo LiDAR in modalità cinematica per un tratto oggetto dello studio. Le aree di pareti ad alto rischio risultate visibili dalla simulazione sono rappresentate in blu nella Figura 3a, mentre quelle effettivamente rilevate in modalità cinematica (ottenute dalla rimozione di vegetazione ed elementi antropici) sono riportate in rosso nella Figura 3b. L'intersezione dei due risultati (aree gialle in Figura 3c) coincide con le aree di pareti ad alto rischio risultate visibili ed effettivamente rilevate. In questo caso, le aree di pareti ad alto rischio effettivamente rilevate (Fig. 3c) coincidono solo per il 35% con quelle previste dalla simulazione. Se invece si prendessero in considerazione le aree indipendentemente dagli ostacoli rilevati, risulta che il rilievo ha osservato il 75% dell'area prevista dalla simulazione.

Per interpretare questi risultati, va tenuto presente che rilievo e simulazione sono stati eseguiti con due strumenti leggermente diversi e che il rilievo è stato eseguito nel periodo primaverile, quando la vegetazione era molto fitta (Fig. 2b), mentre la simulazione ignora la presenza della vegetazione.

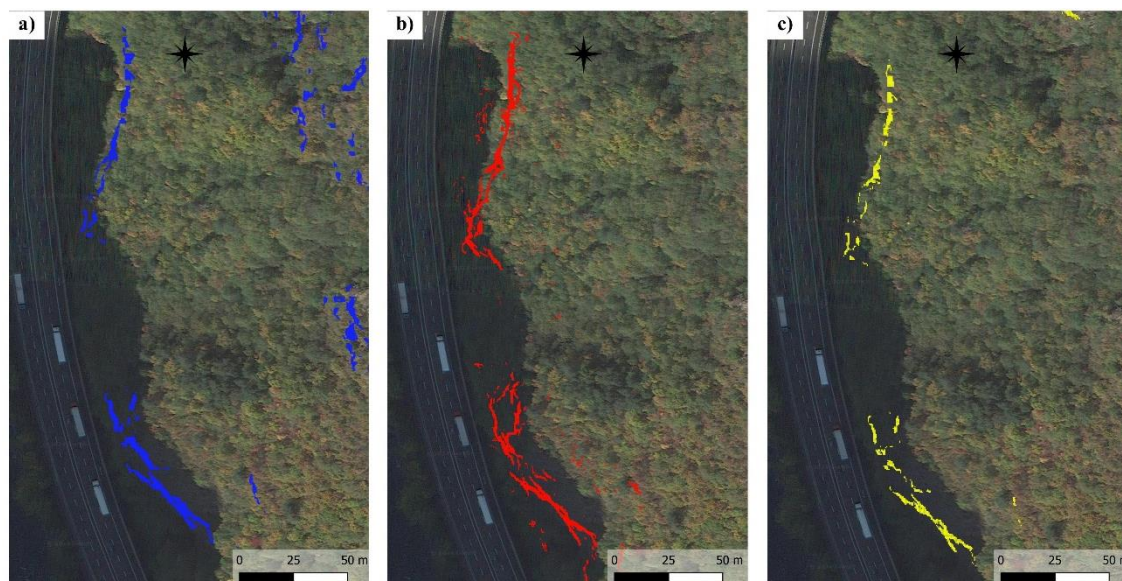


Figura 3. a) Aree di pareti ad alto rischio risultate visibili dalla simulazione, b) aree di pareti ad alto rischio effettivamente rilevate e c) aree di pareti ad alto rischio risultate visibili dalla simulazione ed effettivamente rilevate.

4 CONCLUSIONI

Il presente contributo ha descritto i risultati di un rilievo LiDAR eseguito in modalità cinematica da auto per rilevare le pareti rocciose lungo il tratto di circa 30 km di Autostrada del Brennero-A22 tra i caselli di Bolzano Nord e Chiusa.

Per questo tratto di Autostrada del Brennero, una preliminare analisi di rischio da caduta massi ha individuato ad alto rischio le porzioni di parete rocciosa inclinate più di 70° lungo 8 tratti di autostrada (concentrati in 10 km). L'esigenza del gestore dell'infrastruttura di monitorare efficacemente ed in modo efficiente tali pareti rocciose ha richiesto l'individuazione di una metodologia di rilievo alternativa alla tecnologia LiDAR statica tradizionale. Dopo una preventiva valutazione dell'efficacia e dell'efficienza mediante simulazione in ambiente GIS, si è deciso di eseguire un rilievo LiDAR cinematico da auto.

In termini di tempistiche, il rilievo LiDAR cinematico da veicolo è risultato efficiente in quanto la sua esecuzione ha richiesto solo mezza giornata, utilizzando una velocità di marcia di circa 30 km/h e percorrendo il tratto due volte per ogni senso di marcia, in modo da utilizzare due differenti impostazioni della strumentazione per massimizzare la densità di punti e la distanza coperta dal laser. In termini di sicurezza e gestione del traffico, l'ente gestore non ha dovuto bloccare il traffico, in quanto l'auto con la strumentazione ha viaggiato sulla corsia lenta con una scorta composta da un cantiere mobile con 2 veicoli pre-segnalatori e 2 veicoli con segnale di protezione.

L'efficacia del rilievo LiDAR cinematico da veicolo è stata valutata in termini di densità di punti e di estensione di superficie delle aree di pareti ad alto rischio confrontata con quella attesa dalla simulazione, precedentemente condotta in ambiente GIS. La precisione delle coordinate è stata ottimizzata utilizzando, oltre alle unità IMU e GNSS dello strumento di *mobile mapping*, anche 63 punti di controllo a terra. In questo modo, in caso di ripetizione del rilievo, risulteranno significative differenze di coordinate di almeno 12 cm.

Per quanto riguarda la densità di punti, si sono considerate come soglie di riferimento i valori di 900 punti/m² e di 300 punti/m². Quest'ultima è stata calcolata come soglia minima affinché la ripetizione periodica del rilievo cinematico possa essere ritenuta efficace per il monitoraggio del distacco dalle pareti rocciose di piccoli blocchi decimetrici (dimensione minima di 30x30x12 cm³). Grazie alle impostazioni adottate per la strumentazione e nonostante la dipendenza della densità di punti dall'angolo di incidenza del raggio laser sulla parete rocciosa, la percentuale di punti con densità maggiore di 300 punti/m² è risultata sempre maggiore del 60%, con

picco del 98% per uno dei tratti analizzati. Si può quindi ritenere che, per questo caso di studio, il rilievo LiDAR eseguito in modalità cinematica da veicolo possa essere efficacemente utilizzato come strumento di monitoraggio dei distacchi di blocchi di roccia.

L'estensione delle aree di pareti ad alto rischio (inclinate più di 70°, depurate dalla vegetazione) che è stata osservata dal rilievo è risultata mediamente il doppio di quella prevista dalla simulazione. È interessante notare che, riferendosi soltanto alle porzioni di pareti ad alto rischio, l'area rilevata (ottenuta dalle nuvole di punti depurate dalla vegetazione), coincide in generale solo per circa il 30% con quella simulata. Ciò deriva: dalle differenti caratteristiche tecniche degli strumenti utilizzati per il rilievo e per la simulazione, dalla metodologia di elaborazione delle nuvole di punti, che potrebbe essere maggiormente affinata per ogni singolo tratto, e dalla presenza della vegetazione, che nella simulazione è stata ipotizzata assente. Ciononostante, la simulazione in ambiente GIS può ritenersi uno strumento affidabile, cautelativo ed agevole per stimare preventivamente l'efficacia di un rilievo LiDAR eseguito in modalità cinematica da auto.

BIBLIOGRAFIA

- Autostrada del Brennero s.p.a. (2024) Bilancio e Relazioni 2023. https://www.autobrennero.it/documenti/trasparenza/bilanci/bilancio_2023.pdf.
- Ferro, E., Cemin, F., DeRosa, L., Corsini, A., Ronchetti, F., Lelli, F., Vitti, A., Simeoni, L. 2023. GIS-Based Analysis of the Potential Effectiveness and Efficiency of Mobile Terrestrial LiDAR to Survey and Monitor Rockfall Areas Along 15 km of Highway E45. In Springer Series, *Geomechanics and Geoen지니어ing*, Proc. CNRIG 2023, Palermo, 5-7 Luglio 2023
- Giuliano, J., Dewez, T., Lebourg, T., Godard, V., Prémaillon, M., Marçot N. 2022. Mapping Coastal Erosion of a Mediterranean Cliff with a Boat-Borne Laser Scanner: Performance, Processing, and Cliff Erosion Rate. 3D Digital Geological Models: From Terrestrial Outcrops to Planetary Surfaces, Wiley
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Metzger, R., Pedrazzini, A. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review, *Natural Hazards* 61, 5–28.
- Kromer, R., Hutchinson, D.J., Lato, M.J., Gauthier, D.G., Edwards, T. 2015. Identifying rock slope failure precursors using LiDAR for transportation corridor hazard management, *Engineering Geology* 195, 93–103.
- Kromer, R., Lato, M.J., Hutchinson, D.J., Gauthier, D.G., Edwards, T. 2017. Managing rockfall risk through baseline monitoring of precursors using a terrestrial laser scanner, *Canadian Geotechnical Journal* 54, 953–967.
- Lato, M.J., Hutchinson, D.J., Diederichs, M., Ball, D., Harrap, R. 2015. Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 935–946.
- Lin, Y., Hyypä, J., Kaartinen, H., Kukko, A. 2013. Performance Analysis of Mobile Laser Scanning Systems in Target Representation, *Remote Sensing* 5, 3140–3155.
- Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M.H., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., Maquaire, O., Letortu, P., Davidson, R. 2015. Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy, *Landslides* 12, 403–418.
- Simeoni, L., Vitti, A., Ferro, E., Corsini, A., Ronchetti, F., Lelli, F., Costa, C., Quattrocioni, D., Rover, S., Beltrami, A. 2024. Mobile Terrestrial LiDAR survey for rockfall risk management along a highway, In *Procedia Structural Integrity* 62, 499–505, Proc. FABRE24 Conference, *Existing bridges, viaducts and tunnels: research, innovation and applications*
- Walton, G., Malsam, A., Oester Mapes, N., Arpin, B. 2023. Forecasting and Mitigating Rockfall based on Lidar Monitoring: A Case Study from Colorado, *Transportation Research Record* 2677, 863–870.

ABSTRACT

MOBILE LIDAR SURVEY BY CAR FOR ROCKFALL RISK MANAGEMENT: THE EXPERIENCE ALONG THE A22 MOTORWAY

Keywords: mobile terrestrial LiDAR, rockfall risk, point cloud, survey

The use of terrestrial static LiDAR surveys for designing of mitigation works and monitoring rock slopes at the site scale is widespread. On the contrary, the experience of mobile LiDAR

surveys for rockfall risk management at the territorial scale is still scarce and needs to be improved. This paper describes the preliminary results obtained from the execution of a mobile LiDAR survey from a car for rockfall risk management along a section of the Autostrada del Brennero-A22 motorway.

The study of rockfall risk along 30 km of the Autostrada del Brennero (between the gates of Bolzano Nord and Chiusa) allows the use of an innovative methodology, which guarantees the safety conditions of the operators and does not force the infrastructure manager to close the traffic because the vehicle is travelling along the slow lane of the motorway.

For this area, a rockfall risk analysis was carried out and it demonstrated that the rock slopes with inclination greater than 70° are associated with a high risk value. These rock slopes insist on 8 motorway sections (located in 10 km), therefore it was decided to test the mobile LiDAR survey from a vehicle along this portion of motorway. Before its execution, a preliminary GIS simulation confirmed the effectiveness and efficiency of the mobile LiDAR survey from a vehicle.

Therefore, in April 2023, the mobile LiDAR survey from vehicle was carried out along the 30 km section of the motorway with Trimble's MX9 Mobile Mapping station, between the Bolzano Nord and Chiusa gates. The efficacy of the mobile terrestrial LiDAR survey has been proved since it only required half a day to be carried out. Moreover, the safety measures were easy to manage. In fact, the car equipped with the laser scanner did not need to stop, the workers were not required to leave the vehicle and the traffic was not closed since the motorway operator could escort the surveying vehicle with pilot cars for mobile roadworks.

The results consist of point clouds of the rock slopes along the motorway section of interest. The effectiveness of the mobile LiDAR survey from a vehicle was evaluated in terms of point density and detected area of high risk rock slopes compared with that expected from the GIS simulation.

The density was generally higher than 300 points/m², which is considered the lower limit for a successful detection of large cobble detachment if the survey is repeated periodically for rockfall monitoring. It is important to highlight that vegetated areas were generally detected with a point density higher than 300 points/m². Consequently, it can be reasonably assumed that the ground surface covered by vegetation could also be detected with a comparable density. Therefore, it can be considered that the mobile LiDAR survey from a car can be effectively used as a tool to monitor rock block detachments.

The surveyed high risk rock slopes' surface was on average almost twice as large as the simulated one, but in general only about 30% of the simulated area was detected by the mobile LiDAR survey (e.g. once the vegetation and the obstacles were removed from the point clouds). Conversely, if the areas were considered without removing the vegetation and obstacles, the survey detected 75% of the area predicted by the simulation. This is due to: the different technical characteristics between the instruments used for the survey and the simulation, the point cloud processing methodology, which could be further refined for each section and the presence of vegetation, which was flourishing in April, but it was assumed to be absent in the simulation. Nevertheless, the simulation in a GIS environment can be considered a reliable and easy tool to estimate in advance the effectiveness of a mobile LiDAR survey from a car.