

PERCORSI ACCESSIBILI PER AREE URBANE STORICHE: CALCOLO DI CARATTERISTICHE E VETTORIALIZZAZIONE DA NUVOLE DI PUNTI

D. Treccani ^{a,b}, L. Díaz-Vilariño ^a, A. Adami ^b

^a Universidade de Vigo, CINTECX, GeoTECH group, 36310 Vigo, Spain - (daniele.treccani, lucia)@uvigo.es

^b Politecnico di Milano, DABC c/o Unesco Research Lab, Polo territoriale di Mantova, piazza Carlo d'Arco, 3, 46100 Mantova - (daniele.treccani, andrea.adami)@polimi.it

Parole chiave: segmentazione semantica, accessibilità, censimento dei marciapiedi, processamento di nuvole di punti, beni culturali, vettorializzazione, QGIS, analisi di percorsi.

Key words: semantic segmentation, accessibility, sidewalk inventory, point cloud processing, cultural heritage, vectorization, qgis, network analysis.

Abstract

Il tema del censimento dei marciapiedi è un tema la cui importanza sta crescendo di pari passo con la maggiore adozione del concetto di *smart city* per la gestione delle città. Al fine di gestire correttamente la città e prendere decisioni consapevoli, è necessario conoscere le condizioni reali della città stessa. Inoltre, quando si pianificano e calcolano i percorsi culturali all'interno della città, questi devono tenere conto delle esigenze specifiche di tutti gli utenti. Pertanto, è importante conoscere le condizioni del network di marciapiedi della città e le loro caratteristiche fisiche e geometriche. In genere, le mappe del reticolo di marciapiedi sono generate sulla base di dati cartografici esistenti e gli attributi dei marciapiedi sono raccolti attraverso il crowdsourcing. In questo lavoro, la mappa del network di marciapiedi di una città storica è stata prodotta a partire dai dati della nuvola di punti. La nuvola di punti è stata segmentata in "strade" e "marciapiedi", quindi i cluster di punti appartenenti alle superfici dei marciapiedi sono stati utilizzati per calcolare gli attributi dei marciapiedi stessi e per generare un layer vettoriale composto da nodi (*nodes*) e bordi (*edges*). Il dato vettoriale è stato poi utilizzato per calcolare i percorsi accessibili tra i punti di interesse, utilizzando QGIS. I test effettuati su un caso di studio reale, Sabbioneta, città storica e sito UNESCO, mostrano un'accuratezza di vettorializzazione del 98,7%. In futuro si prevede che i dati vettoriali e i percorsi calcolati potranno essere utilizzati per generare mappe utili ai tecnici che dovranno intervenire sulla pianificazione urbana, e per sviluppare applicazioni di navigazione urbana per il web o per i telefoni cellulari.

Sidewalk inventory is a topic whose importance is increasing together with the widespread use of smart city management. In order to manage the city properly and to make informed decisions, it is necessary to know the real conditions of the city. Furthermore, when planning and calculating cultural routes within the city, these routes must take into account the specific needs of all users. Therefore, it is important to know the conditions of the city's sidewalk network and also their physical and geometrical characteristics. Typically, sidewalk network are generated basing on existing cartographic data, and sidewalk attributes are gathered through crowdsourcing. In this paper, the sidewalk network of an historic city was produced starting from point cloud data. The point cloud was semantically segmented in "roads" and "sidewalks", and then the cluster of points of sidewalks surfaces were used to compute sidewalk attributes and to generate a vector layer composed of nodes and edges. The vector layer was then used to compute accessible paths between Points of Interest, using QGIS. The tests made on a real case study, the historic city and UNESCO site of Sabbioneta (Italy), shows a vectorization accuracy of 98.7%. In future, the vector layers and the computed paths could be used to generate maps for city planners, and to develop web or mobile phones routing apps.

1. Introduzione

L'inventario dei marciapiedi è un processo legato a diversi aspetti dell'amministrazione di una città. Infatti, per una corretta pianificazione e per un adeguato processo decisionale relativo alla gestione dell'accessibilità, è necessaria una conoscenza preliminare delle condizioni attuali dell'ambiente urbano. Poi, quando si tratta di una città storica, la predisposizione di percorsi pedonali accessibili che collegano i Punti di Interesse (PI) all'interno della città è una procedura importante che deve tenere in considerazione le condizioni e le caratteristiche del network dei marciapiedi.

Infine, per la gestione del turismo, la predisposizione di percorsi di visita è importante, e dovrebbe essere fatta tenendo in considerazione anche la progettazione di percorsi inclusivi che possano essere facilmente accessibili e sfruttati da tutte le

categorie di utenti. Considerando quindi il quadro legislativo in materia di accessibilità fisica e barriere architettoniche (ad esempio, per l'Italia, il DM 236/1989 e il DPR 503/1996) e alla luce di questioni più ampie provenienti anche dalla pratica (Marconcini et al., 2021), è possibile definire alcuni requisiti che un marciapiede dovrebbe avere per essere considerato accessibile. Ad esempio, la legge italiana prevede una larghezza minima di 90 cm, un dislivello inferiore a 2,5 cm e una pendenza trasversale inferiore all'1%.

In questo contesto, una mappa dettagliata dei marciapiedi esistenti, insieme ai loro attributi geometrici, è una base adeguata per prendere decisioni più consapevoli per la pianificazione urbana e anche per l'organizzazione e la progettazione di percorsi accessibili all'interno della città. La realizzazione di una mappa è di solito il punto di partenza più efficace per rappresentare il network di marciapiedi e per gestire

l'accessibilità fisica di una città. Per produrre questo tipo di mappe si può ricorrere al crowdsourcing (Saha et al., 2019) o all'impiego di questionari compilati da tecnici esperti che hanno visitato il sito. Entrambi sono metodi comuni e diffusi, ma non sono immuni da opinioni soggettive. D'altra parte, l'utilizzo di strumenti di Information Communication Technology (ICT) che sfruttano regole e algoritmi può essere considerato più oggettivo (Marconcini e Pracchi, 2019).

Affrontando poi questo tema in un ambiente urbano storico, la gestione e il calcolo dei percorsi accessibili che collegano due PI è resa più complessa dalla struttura viaria della città storica stessa. Le condizioni tipiche sono: strade strette, un elevato numero di intersezioni, strade temporaneamente chiuse al traffico e/o completamente utilizzate dai pedoni, presenza o meno di attraversamenti pedonali, marciapiedi di diversa larghezza e pavimentazioni urbane in vari materiali. Per tutti questi motivi, il punto di partenza ottimale è una mappa che riporti correttamente gli attributi geometrici di marciapiedi e strade, in modo che il percorso calcolato possa tenere conto sia delle limitazioni effettivamente presenti nel tessuto urbano, sia delle norme e dei regolamenti di accessibilità urbana.

L'analisi del network di marciapiedi è un argomento che in letteratura scientifica è ben affrontato ed è solitamente riferito ad assetti stradali moderni e quindi molto regolari. Il dato di partenza usato nelle ricerche esistenti può provenire da varie fonti (nuvole di punti, immagini satellitari, mappe catastali), ma l'uso di file vettoriali e di Sistemi Informativi Geografici (GIS) è il più comune. L'accessibilità fisica è tipicamente verificata in modo puntuale (su uno specifico marciapiede) e non globale (lungo l'intero percorso). Il lavoro presentato in questo articolo si basa su una nuvola di punti precedentemente classificata, propone un metodo per l'estrazione automatica degli attributi geometrici dei marciapiedi e la successiva vettorializzazione basata sulla posizione spaziale degli stessi, al fine di formare un network. Successivamente, tale network di marciapiedi viene sfruttato per simulazioni di calcolo di percorsi, prendendo in considerazione alcuni scenari realistici che possono verificarsi in una città storica. Il metodo è stato testato su una città storica situata nel Nord Italia, Sabbioneta, che insieme a Mantova è un sito UNESCO dal 2008.

Il documento è organizzato come segue. Nella sezione 2, lavori correlati, viene analizzata la letteratura scientifica esistente e vengono presentati e confrontati i metodi esistenti che si occupano del calcolo dei percorsi e dell'analisi dei marciapiedi. La sezione 3, materiali e metodi, descrive il caso di studio selezionato e il metodo, dall'estrazione degli attributi geometrici dei marciapiedi alla loro vettorializzazione e alle analisi usando il network vettoriale. La sezione 4, risultati, presenta i dati risultanti sul caso di studio; l'ultima sezione delinea le conclusioni e gli ulteriori sviluppi e lavori.

2. Lavori correlati

Il tema dell'analisi dei marciapiedi e delle loro interconnessioni (i.e. il network di marciapiedi) viene solitamente trattato in letteratura partendo da un dato vettoriale esistente fornito da comuni, uffici catastali o altri enti, che viene usato per calcolare percorsi accessibili tenendo conto delle esigenze dei diversi utenti. Un esempio in questo senso è il lavoro di (Verde et al., 2021), che si basa su un database vettoriale delle strade del centro storico, messo a disposizione dal Comune. Grazie

all'aiuto di due associazioni che si occupano di persone ipovedenti, le strade sono state classificate in base alla loro accessibilità, ed è stata sviluppata un'applicazione per telefoni cellulari che aiuta le persone a pianificare i percorsi all'interno della città in base alle proprie esigenze. Un altro esempio è il lavoro di (Li et al., 2018), in cui i dati vettoriali relativi alle forme degli edifici e delle linee stradali sono stati utilizzati per costruire un database vettoriale relativo ai marciapiedi. Nei loro test, gli autori hanno ricostruito i nodi e i legami del network di marciapiedi prendendo in considerazione anche gli incroci e gli attraversamenti pedonali, con l'obiettivo di generare un network completamente collegato. Gli attributi dei marciapiedi sono stati poi raccolti utilizzando specifiche applicazioni per smartphone e tablet compatibili con Android e IOS e quindi memorizzati all'interno del database. Il risultato è stato un database GIS utile per produrre mappe e calcolare i percorsi pedonali all'interno della città.

Nei lavori precedenti, il punto di partenza dei metodi era costituito da set di dati GIS preesistenti, che venivano elaborati e arricchiti con informazioni raccolte altrove, al fine di raggiungere lo scopo. Un altro approccio, invece, è quello di lavorare direttamente sulla nuvola di punti, acquisita con un sistema *Mobile Laser Scanning* (MLS). È il caso di (Hou e Ai, 2020), dove gli autori hanno utilizzato una rete neurale per segmentare semanticamente una nuvola di punti acquisita con MLS, integrando un algoritmo di individuazione dei marciapiedi basato su analisi effettuate dividendo il dato in fasce. Le informazioni ottenute sono state poi confrontate con normative in merito all'accessibilità per valutare le condizioni del network di marciapiedi.

Un'altra possibilità consiste nel combinare set di dati provenienti da fonti diverse, per calcolare i percorsi ottimali. È il caso di (Luaces et al., 2021), dove gli autori hanno utilizzato i dati di Open Street Map (OSM), hanno aggiunto informazioni elaborando le nuvole di punti ottenute con MLS, hanno individuato gli ostacoli utilizzando il crowdsourcing e hanno identificato i problemi di accessibilità analizzando i dati dei social network. Tutti questi dati sono stati poi utilizzati per produrre un'applicazione in grado di calcolare percorsi ottimali tenendo conto di diverse esigenze.

A differenza di quanto visto in letteratura scientifica, in questo lavoro il metodo prevede una elaborazione delle nuvole di punti che viene applicato in modo estensivo a una città storica, confrontandosi con tutte le peculiarità tipiche di un ambiente urbano storico, che risulta essere non standard, ma stratificato e organizzato per far fronte alle restrizioni e ai vincoli che derivano dal contesto della città storica stessa.

3. Materiali e metodi

Il metodo presentato necessita di una nuvola di punti classificata, dalla quale sia possibile individuare i marciapiedi della città. La nuvola di punti usata in questo articolo è stata segmentata implementando un metodo euristico basato sulle somiglianze dei punti e sulle informazioni topologiche (Treccani et al., 2021). Il dataset, quindi, è una nuvola di punti di un ambiente urbano storico già classificata con, tra le altre, la classe "marciapiede" che identifica i punti relativi alle superfici dei marciapiedi. La nuvola di punti è stata acquisita con un sistema MLS e le informazioni sulla traiettoria sono note.

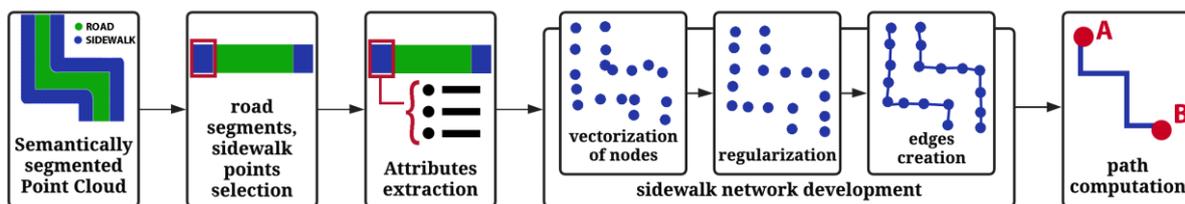


Figura 1 Flusso di lavoro del metodo. Partendo da una nuvola di punti segmentata semanticamente, i punti appartenenti alla classe "marciapiedi" sono stati estratti e utilizzati per calcolare gli attributi di accessibilità, per poi essere convertiti in un layer vettoriale con nodes e edges da utilizzare per il calcolo dei percorsi.

Poiché i marciapiedi sono l'elemento urbano di interesse per questo lavoro, sono stati selezionati solo i punti appartenenti alla classe "marciapiedi". Poi la nuvola di punti dell'intera città è stata suddivisa in piccole porzioni seguendo la linea dell'asse stradale, analizzando una porzione di 2 metri di lunghezza alla volta. Per ogni porzione di marciapiede sono stati poi calcolati alcuni attributi geometrici ritenuti utili per una mappa di accessibilità. Ogni segmento di marciapiede è stato poi memorizzato in un layer vettoriale e il network risultante è stato utilizzato come base per il calcolo di percorsi, implementando processi già esistenti nel software QGIS (Pella e Ose, 2018). Una sintesi del flusso di lavoro è riportata nella Figura 1.

3.1 Caso di studio: il sito UNESCO di Sabbioneta

Il caso di studio selezionato per i test presentati in questo lavoro è la città storica di Sabbioneta, costruita tra il 1556 e il 1591 da Vespasiano Gonzaga, secondo i principi della "città ideale". La città presenta uno schema a scacchiera con una strada principale che collega le due porte fortificate della città, situate su due lati opposti. Il quadro viario è composto da strade di diversa larghezza, da molto strette a molto larghe; sono stati utilizzati diversi materiali per la pavimentazione, mattoni e pietra per i marciapiedi, acciottolato e sampietrini per la superficie carrabile e per le piazze. La nuvola di punti utilizzata per questo test è stata acquisita nel 2020 con un Leica Pegasus:Two, e come detto in precedenza è stata segmentata. Il risultato è quindi una nuvola di punti di tutte le superfici del terreno, con i punti classificati in funzione alla loro appartenenza alla superficie stradale o del marciapiede.

3.2 Calcolo degli attributi dei marciapiedi

La nuvola di punti è stata suddivisa in sotto-nuvole utilizzando *Bounding Boxes* create da segmenti di due metri di lunghezza estratti dalla linea di traiettoria dello strumento di acquisizione. In questo documento le sotto-nuvole saranno chiamate "segmenti". Per ogni segmento sono stati poi analizzati i punti dei marciapiedi di destra e di sinistra con lo scopo di calcolare alcuni attributi geometrici dei marciapiedi stessi. Gli attributi sono riassunti nella Figura 2 e qui descritti in dettaglio:

- larghezza (*width*): assumendo che la larghezza del marciapiede sia uniforme lungo il segmento analizzato e che il marciapiede sia parallelo alla linea dell'asse stradale, la larghezza è stata calcolata sfruttando la differenza tra il punto (sulla nuvola) più lontano e quello più vicino del marciapiede rispetto all'asse stradale (tenendo conto di eventuali punti rumorosi); il valore è stato poi arrotondato ai 5 centimetri più vicini;
- elevazione relativa marciapiede-strada (*elevation difference*): se presente, l'elevazione relativa è stata calcolata sfruttando la differenza tra il valore medio delle coordinate Z dei punti del marciapiede e quelle dei punti della strada in prossimità del marciapiede;

- pendenze trasversali e longitudinali (*slopes*): dopo aver calcolato la *Principal Component Analysis* (PCA) dei punti del marciapiede, e aver individuato gli autovettori del gruppo di punti, le pendenze degli autovettori più lunghi sono state utilizzate perché rappresentano la pendenza del marciapiede analizzato;
- materiale principale della superficie di pavimentazione (*paving material*): implementando uno strumento di machine learning è stato possibile prevedere il materiale della pavimentazione; nel caso di studio esaminato le pavimentazioni erano solo di due tipi: mattoni o pietra.

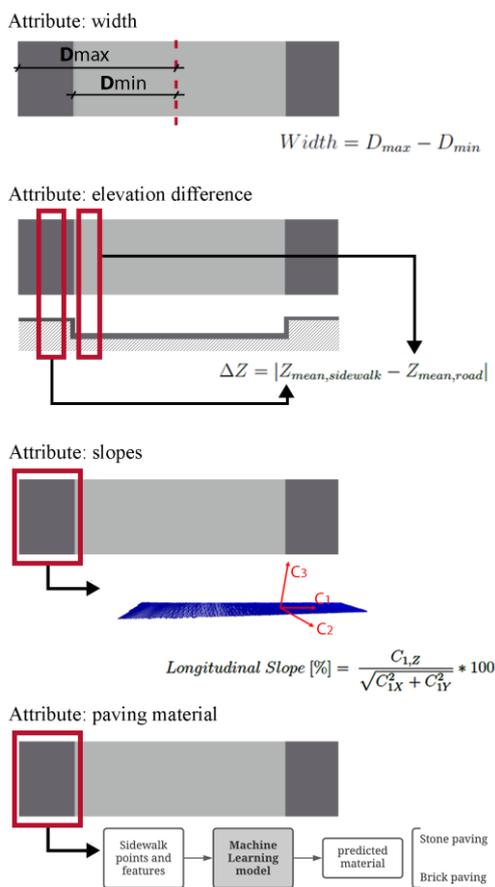


Figura 1 Spiegazione di tutti gli attributi geometrici dei marciapiedi ricavati dalla nuvola di punti e come sono stati calcolati.

3.3 Vettorializzazione del network di marciapiedi

Ogni gruppo di punti identificato come marciapiede è stato convertito in un formato vettoriale per produrre e realizzare network. A tal fine, si è deciso di rappresentare ogni gruppo come un singolo punto (i.e. nodo), per fare ciò il punto centrale (calcolato con coordinate XYZ medie) di ogni cluster di punti è stato utilizzato come rappresentante del segmento di

marciapiede stesso e gli attributi del marciapiede precedentemente calcolati sono stati collegati a tale punto.

In questa fase, tutti i marciapiedi sono rappresentati da diversi punti, quasi allineati e paralleli all'asse stradale. Si è reso necessario un affinamento; tenendo conto delle informazioni relative al contesto, i punti sono stati leggermente spostati per ottenere un risultato più regolare. Per fare ciò (si veda la Fig. 3) sono stati analizzati i tre tipi di incroci stradali esistenti nel caso di studio, denominati "incrocio a X", "incrocio a T" e "zona d'angolo" (solitamente a 90°) e quindi denominato "incrocio a L". Per definire la posizione degli incroci è stato utilizzato il dataset di OSM; in particolare, sono state sfruttate le linee stradali e i loro vertici per definire la posizione dell'attraversamento e il suo tipo. Quindi, per ogni tipo di attraversamento sono stati selezionati i punti correlati sul layer vettoriale e, utilizzando un metodo ai minimi quadrati, è stata calcolata la curva di best fitting e i nodi sono stati leggermente spostati in X e Y per trovarsi infine sulla curva calcolata.

Infine, i punti consecutivi (i.e. nodi) sono stati collegati tra loro da linee (i.e. collegamenti) per formare un network. Per calcolare facilmente i percorsi, gli stessi attributi memorizzati nei nodi sono stati copiati ai collegamenti. Il network vettoriale risultante rappresenta un alto livello di informazione per i marciapiedi, in quanto dispone di informazioni sugli attributi dei marciapiedi, riferite ogni 2 metri lungo la struttura dei marciapiedi della città. È stato poi previsto un affinamento manuale finale; ad esempio, gli attraversamenti su strisce pedonali sono stati aggiunti manualmente. Anche se in letteratura esistono molte metodologie di riconoscimento delle strisce pedonali, in questo lavoro non è stato implementato un riconoscimento automatico di tali elementi, anche perché in generale nelle città storiche tali elementi non sono identificabili dai segni sulla superficie stradale, ma piuttosto utilizzando una pavimentazione diversa rispetto alla carreggiata. Al momento sono stati aggiunti manualmente al network vettoriale.

È necessario poi fare una ulteriore considerazione: nel caso di studio selezionato ci sono solo pochi (solo 3) attraversamenti pedonali su strisce pedonali, e nella maggior parte della città i pedoni possono attraversare la strada in ogni posizione. Per ricreare questo comportamento è stato sviluppato un secondo network vettoriale, collegando non solo i nodi vicini, ma anche nodi che si trovano ai lati opposti della strada.

3.4 Calcolo dei percorsi

Il network vettoriale dei marciapiedi, memorizzato in uno shapefile, è stato importato in QGIS. Sono stati importati due tipi di network: un primo rappresentante solo i marciapiedi, che può essere utilizzato per preparare una mappa tematica che mostri i loro attributi; e un secondo che tiene conto del fatto che, nel caso di studio considerato, in tutte le strade del centro città i pedoni possono attraversare la strada ovunque (facendo ovviamente attenzione al traffico veicolare). Questo accade perché all'interno del centro storico non ci sono strisce pedonali, quindi, secondo gli articoli 190 e 191 del Codice della Strada, in queste situazioni i pedoni *possono attraversare la strada solo in direzione perpendicolare, facendo attenzione a evitare situazioni che mettano in pericolo se stessi o altri*. Nel secondo network i collegamenti tra nodi sono effettuati anche attraversando la strada; in realtà, considerando la posizione dei nodi, al momento non è stato possibile aggiungere l'attraversamento in direzione perpendicolare, quindi nel generare i collegamenti "attraversando la strada" sono stati aggiunti solo quelli con la lunghezza minore.

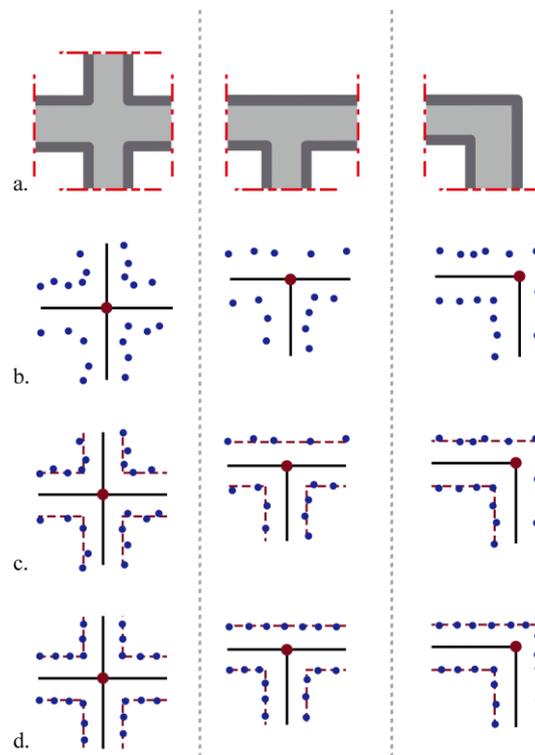


Figura 2 Fasi di regolarizzazione dei nodi vettoriali dei marciapiedi, in base a tre tipi di incroci stradali (a): a X, a T e a L. Dall'alto verso il basso: prima (b) è stato identificato il tipo di incrocio, poi (c) sono state calcolate le curve di riferimento e quindi (d) i punti sono stati leggermente spostati in modo da trovarsi su tali curve.

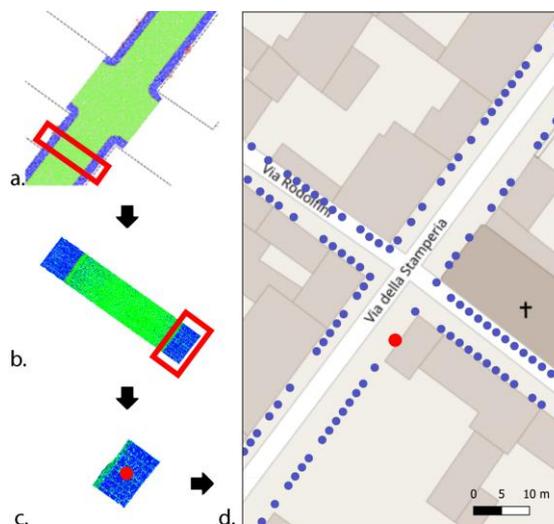


Figura 3 Esempio di vettorizzazione per un segmento di marciapiede. Selezione di un segmento di strada sulla nuvola di punti (a), selezione del gruppo di punti del marciapiede (b), calcolo del centro del gruppo (c) e visualizzazione del centro del gruppo (i.e. nodo) sovrapposto alla mappa della città (d).

Il calcolo dei percorsi è stato eseguita in QGIS utilizzando un algoritmo disponibile tra gli strumenti di elaborazione del software. Tra i numerosi strumenti disponibili in "Processing > network analysis", quello selezionato per i test è "Shortest path (point to point)", che è in grado di calcolare il percorso più breve o più veloce tra due punti selezionati direttamente sulla mappa.

Come detto, questo algoritmo può calcolare il percorso più breve o più veloce. Il "più breve" prende ovviamente in considerazione solo la lunghezza dei collegamenti nel network, mentre il "più veloce" utilizza il valore della "velocità" di ciascun collegamento per calcolare il percorso più rapido per raggiungere la destinazione finale. In questo lavoro, l'algoritmo del "percorso più veloce" è stato utilizzato per calcolare il percorso più accessibile. Creando una nuova colonna nel database e riempiendola con una velocità fittizia (la velocità agisce come un peso nel calcolo), basata sull'attributo geometrico del marciapiede, è stato possibile forzare l'algoritmo a calcolare un percorso che utilizza solo i bordi accessibili del marciapiede. Ad esempio, considerando accessibile un marciapiede di 0,9 m di larghezza (come previsto dalle leggi italiane), e assegnando una velocità di 1 Km/h a tutti i bordi con "larghezza" < 0,9 m e una velocità di 2 Km/h a tutti i bordi con "larghezza" > 0,9 m, è stato possibile calcolare il percorso "più veloce", che di fatto è stato forzato a percorrere il più possibile i marciapiedi con una larghezza considerata accessibile.

Come appena descritto, per raggiungere l'obiettivo di calcolare i percorsi accessibili è stato utilizzato un trucco, utilizzando l'algoritmo che calcola il percorso più veloce e inserendo un valore di velocità calcolato pesando il parametro di accessibilità (in questo caso la larghezza) rispetto al marciapiede. Allo stesso modo, il valore della velocità di ciascun collegamento può essere utilizzato per ridurre il numero di attraversamenti stradali utilizzati (semplicemente aumentando la velocità sui collegamenti che non sono di attraversamento). Considerando un percorso per persone in sedia a rotelle, gli attraversamenti dovrebbero essere utilizzati solo se la differenza di Z tra la strada e il marciapiede è inferiore a 2,5 centimetri (a tal fine, i bordi di attraversamento in cui la differenza di Z è maggiore del limite dovrebbero avere una velocità molto bassa).

4. Risultati

4.1 Estrazione degli attributi dei marciapiedi e creazione del network vettoriale

La nuvola di punti di Sabbioneta riguarda il centro storico della città e alcune aree esterne alle mura fortificate, per un totale di oltre 6 km di area stradale. La segmentazione semantica è stata eseguita per l'area all'interno del centro cittadino ed è stata descritta in un precedente lavoro (Treccani et al., 2021), mentre in questo lavoro viene descritta l'estrazione e la vettorializzazione dei dati.

Gli attributi dei marciapiedi sono stati calcolati per tutta l'area del centro città, analizzando la strada per segmenti di 2 metri di lunghezza. I risultati di questo calcolo sono presentati nella Tabella 1, dove per tutti gli attributi geometrici viene presentato l'intervallo del valore calcolato e il valore più frequente. Confrontando poi tutti i valori con quello di riferimento (proveniente dalla normativa italiana), è stato possibile calcolare la percentuale di collegamenti nel network che possono essere considerati accessibili.

Successivamente, la posizione spaziale dei segmenti dei marciapiedi è stata calcolata e aggiunta a un layer vettoriale (vedere Fig. 4). Il network vettoriale di output è composta da 1780 nodi e 1720 collegamenti ed è stata calcolata in 3,5 minuti su un computer di media qualità (16 GB di RAM, NVIDIA GeForce 950m). È stato calcolato anche un secondo tipo di collegamenti: considerando la possibilità di attraversare la strada ovunque. Questo secondo network è composto dagli stessi 1780 nodi, ma con 1357 nuovi bordi, per un totale di 3077. Una porzione dei due network è visibile nella Figura 5.

Dopo il calcolo è stato necessario un affinamento manuale per risolvere alcuni errori minori, come l'inserimento di alcuni collegamenti mancanti o l'eliminazione di alcuni collegamenti errati. Come misura delle prestazioni dell'algoritmo, si osserva che solo 23 collegamenti hanno richiesto una modifica, e corrispondono all'1,3% del totale; ne deriva quindi un'accuratezza del 98,7%. Inoltre, considerando che la nuvola di punti rappresentava quasi tutto il centro della città, ma non tutto, alcune strade non sono state rilevate e per questo motivo i loro marciapiedi non sono stati inseriti nel network. Sono stati aggiunti manualmente.



Figura 4 Una porzione della città di Sabbioneta, i punti verdi sono i nodi (*nodes*), che rappresentano i segmenti di marciapiede, le linee blu sono i collegamenti (*edges*) tra i nodi lungo il percorso del marciapiede, e le linee viola sono i collegamenti che attraversano la strada (*cross-edges*),

Attribute	Ranges	Most frequent	Reference value	Percentage of accessible edges in the sidewalk network
Width	0.45 m ÷ 2.20 m	0.95 m	≥0.90 m	72.30%
Transverse slope	0.05% ÷ 9.75%	1.25%	≤1%	8.60%
Longitudinal slope	0.10% ÷ 9.77%	2.10%	≤5%	79.30%
Relative Z difference	0 m ÷ 0.12 m	0 m	≤0.025 m	66.50%

Tabella 1 Risultati del calcolo degli attributi dei marciapiedi. La tabella mostra gli intervalli di valori degli attributi e il valore più frequente. I risultati vengono poi confrontati con i valori di riferimento specificati dalla legge.

considerando la possibilità per i pedoni di attraversare ovunque all'interno del centro storico della città.

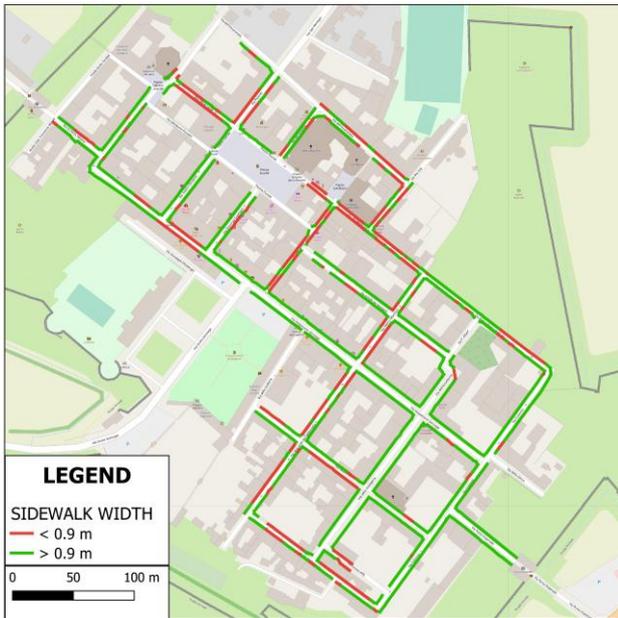


Figura 5 Mappa tematica dell'intera città di Sabbioneta sviluppata utilizzando i collegamenti del network e i loro attributi. In verde i segmenti di marciapiede con larghezza > 0,9 m (considerati accessibili dalla legge italiana) e in rosso quelli con larghezza < 0,9 m (non accessibili).

A partire dal network sviluppato e utilizzando gli strumenti di QGIS, è stato possibile produrre diverse mappe tematiche che potrebbero essere utilizzate dalla pubblica amministrazione, dai tecnici pianificatori, ma anche dagli utenti della città, per ottenere informazioni sugli attributi dei marciapiedi. A titolo di esempio, la Figura 6 mostra i segmenti di marciapiede accessibili (in verde) e inaccessibili (in rosso) in base alla loro larghezza. Per la legge italiana, infatti, i marciapiedi sono accessibili se la loro larghezza è superiore a 0,9 metri.

4.2 Calcolo dei percorsi

Il calcolo dei percorsi è stato testato su due casi diversi. Nel primo caso, il percorso più breve e quello più veloce sono stati calcolati tenendo conto della larghezza dei marciapiedi. Nel secondo caso, per il calcolo del percorso è stata considerata la presenza di rampe su marciapiedi posti ad una quota maggiore rispetto alla strada.

Il primo test è riportato nella Figura 7. In questo esempio viene calcolato un percorso da una generica zona della città (punto A, un incrocio tra due strade) verso un PI della città: la Galleria degli Antichi (punto B). Nella Figura 7b viene calcolato il percorso più breve, mentre nella 7c viene calcolato il percorso più veloce considerando l'accessibilità (larghezza). Per questo secondo caso, è stata data una velocità diversa ai marciapiedi con larghezza considerata accessibile (4 Km/h) e a quelli considerati inaccessibili (0,001 Km/h). Data la grande differenza tra le due velocità, nel calcolare il percorso più veloce l'algoritmo ha evitato il più possibile i marciapiedi con larghezza non accessibile. Infatti, si può notare (confrontando il percorso previsto in 7c con la mappa tematica in 7a) che il percorso suggerito evita di utilizzare una piccola porzione di

marciapiede inaccessibile nell'angolo in alto a destra, e per questo motivo attraversa la strada anche solo per pochi metri.

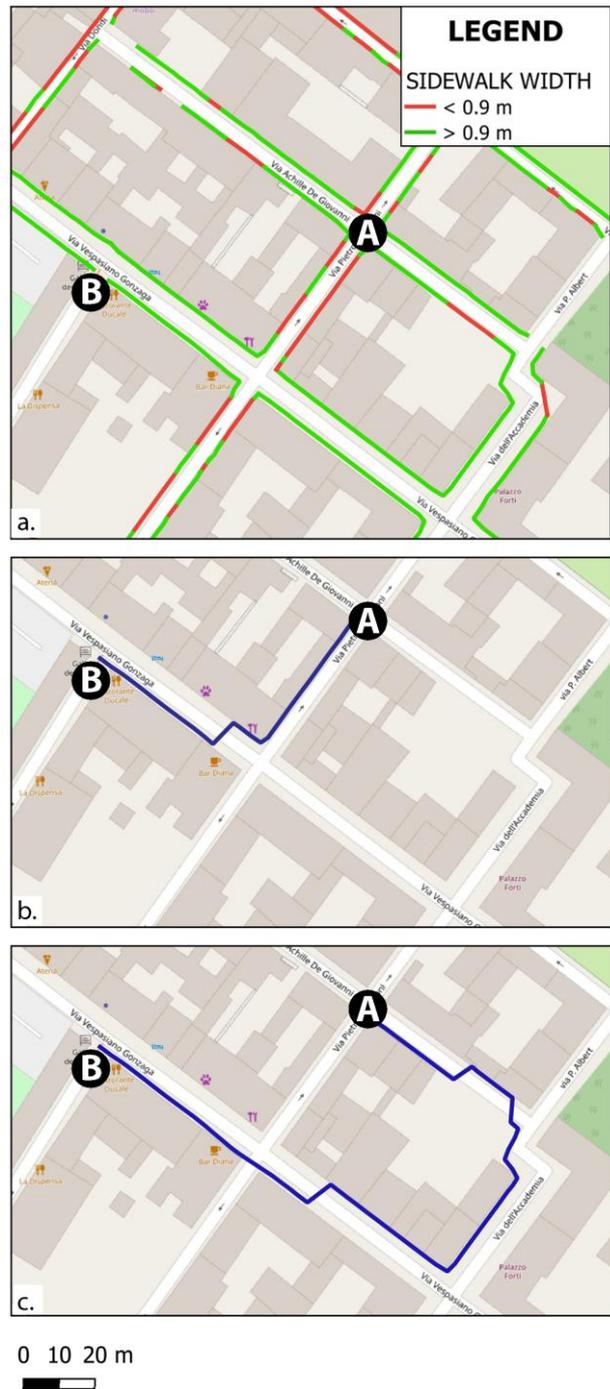
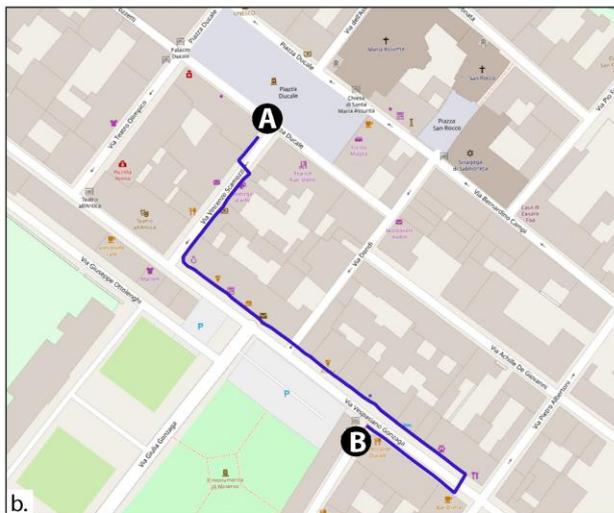


Figura 6 Test 1: calcolo del percorso considerando la larghezza dei marciapiedi come un vincolo. Il percorso viene calcolato dal punto A al punto B. (a) mappa tematica della larghezza dei marciapiedi; (b) percorso più breve; (c) percorso più veloce considerando la larghezza accessibile.

Il secondo test è riportato nella Figura 8. In questo caso, è stato calcolato il percorso da Piazza Ducale (punto A) alla Galleria degli Antichi (punto B). Il percorso è stato calcolato tenendo conto della diversa quota dei marciapiedi rispetto alla strada, che rende impossibile alle persone in sedia a rotelle attraversare la strada ovunque. Come si può vedere nella Figura 8a, i marciapiedi che collegano il punto A al punto B sono tutti

caratterizzati da una differenza di Z tra strada e marciapiede superiore al valore accettabile (per la legge italiana è di 2,5 cm).



0 10 20 m

Figura 7 Test 2: calcolo del percorso considerando come vincoli la differenza Z tra marciapiedi e strade. Il percorso viene calcolato dal punto A al punto B. (a) mappa tematica della differenza Z dei marciapiedi; (b) percorso più breve considerando anche la presenza di rampe sui marciapiedi.

Per consentire il calcolo del percorso in questo caso è stato necessario aggiungere al network due collegamenti supplementari, in corrispondenza delle rampe sui marciapiedi. Tali collegamenti aggiuntivi sono visibili nella Figura 8a (in blu, vicino al punto A e a destra rispetto al punto B). Come mostra la Figura 8b, il percorso calcolato utilizza le due rampe per superare il problema dell'inaccessibilità dell'altezza del marciapiede.

5. Discussione e conclusioni

Questo lavoro presenta un metodo per calcolare automaticamente i percorsi accessibili all'interno di un sito storico a partire dalla nuvola di punti. L'accessibilità è stata valutata sfruttando gli attributi geometrici del network di marciapiedi e confrontandoli con la normativa italiana. Il punto di partenza del lavoro è stata una nuvola di punti segmentata

semanticamente, i cui punti sono stati classificati in strade e marciapiedi. I marciapiedi sono stati poi suddivisi in segmenti di 2 metri di lunghezza e sono stati estratti alcuni dei loro attributi geometrici (larghezza, quota rispetto alla strada, pendenze, materiale della pavimentazione). Quindi sono stati vettorializzati per creare i nodi di un network. I nodi sono stati regolarizzati considerando le informazioni contestuali (posizione e forma degli incroci tra le strade) ricavate da OSM. I nodi sono stati poi collegati seguendo due approcci: collegare i marciapiedi più vicini e collegare i marciapiedi attraversando la strada. Il secondo approccio è stato motivato dal fatto che nel caso di studio selezionato, ma anche in molti altri casi, non ci sono attraversamenti pedonali su strisce pedonali, quindi i pedoni possono attraversare la strada ovunque.

Il calcolo degli attributi dei marciapiedi è stata eseguita seguendo semplici formulazioni; i risultati forniti in Tabella 1 mostrano che i valori calcolati hanno intervalli affidabili. Per tutti gli attributi è stato implementato un affinamento per tenere conto dei punti rumorosi nella nuvola di punti, ad esempio larghezze superiori a 10 metri sono sintomo di un problema nel calcolo. In questi casi il valore è stato modificato o rimosso manualmente. Si nota che gli attributi dei marciapiedi estratti, confrontati con i valori di riferimento, mostrano che per la maggior parte della città il limite di pendenza trasversale non è rispettato; si tratta di una questione importante che dovrebbe essere approfondita in seguito, in particolare si potrebbe implementare un metodo più raffinato per il calcolo della pendenza trasversale.

Il risultato mostra che la vettorializzazione automatica dei nodi dei marciapiedi e l'estrazione degli attributi hanno un'accuratezza del 98,7%, il che significa che è stata eseguita solo una piccola rifinitura manuale alla fine del processo. Naturalmente, un limite di questo metodo è che è stato in grado di vettorializzare solo i marciapiedi rilevati dal sistema MLS, quindi le strade che non sono state rilevate devono essere aggiunte manualmente. Nonostante alcune strade minori, quasi tutto il network di marciapiedi della città è stato realizzato correttamente e gli attributi dei marciapiedi sono stati utilizzati per produrre mappe tematiche che possono essere adatte per una futura valutazione delle condizioni dei marciapiedi, ma anche per aiutare gli amministratori e i pianificatori nel processo decisionale.

Per il calcolo dei percorsi è stato utilizzato lo strumento di calcolo preinstallato in QGIS. Esso consente di calcolare il percorso più breve, lungo il network di marciapiedi, tra due punti selezionati sulla mappa. Questo secondo algoritmo è stato implementato per calcolare il percorso accessibile agendo sul valore della velocità di ciascun collegamento e usandolo come peso. Sono stati effettuati due test, considerando un peso per la larghezza del marciapiede e un peso per l'altezza del marciapiede rispetto alla strada. In entrambi i casi l'algoritmo è stato in grado di prevedere un percorso che utilizza solo su marciapiedi considerati accessibili per gli specifici attributi selezionati per il peso. Facendo riferimento al primo test, sono state implementate due diverse velocità: 0,001 Km/h e 4 Km/h, è importante notare che con una differenza di velocità minore (ad esempio, 1 Km/h e 2 Km/h) il risultato dell'algoritmo non sarebbe stato soddisfacente. La grande differenza tra le due velocità ha fatto sì che il percorso calcolato fosse completamente accessibile.

Il calcolo del percorso è stato eseguito implementando uno strumento esistente e agendo sul valore "velocità" per ottenere il risultato. Il valore della velocità è stato ponderato in base a una

caratteristica di accessibilità dei bordi dei marciapiedi. In futuro si prenderà in considerazione una possibile combinazione di più pesi provenienti da tutti gli attributi geometrici. Verrà esaminata la possibilità offerta da altri algoritmi di calcolo dei percorsi esistenti e anche da un algoritmo fatto su misura.

Alla luce dei risultati presentati, alcuni possibili miglioramenti del metodo potrebbero includere lo sfruttamento della presenza di portici: infatti il percorso potrebbe essere calcolato sulla base del comportamento delle persone in diverse condizioni atmosferiche (sole, pioggia), utilizzando per il loro movimento tra i PI soprattutto aree coperte anziché non coperte. Un utile miglioramento del metodo potrebbe essere il rilevamento automatico di rampe e attraversamenti con strisce, invece di inserirli manualmente nell'ultima fase. In letteratura esistono metodi per rilevare le strisce pedonali o le rampe, e idealmente dovrebbero essere facilmente implementati nel metodo.

Il metodo è stato testato per una nuvola di punti MLS, per la quale erano disponibili i dati della traiettoria, ma, in alternativa, si potrebbe utilizzare la linea centrale della strada da OSM o da un database catastale, rendendo il metodo applicabile anche a nuvole di punti acquisite con altri strumenti (ad esempio, droni, laser scanner terrestre).

In futuro, i percorsi estratti e il layer vettoriale potrebbero essere utilizzati per lo sviluppo di un webGIS interattivo da utilizzare da molti utenti della città (cittadini e turisti) e da amministratori e pianificatori urbani. L'algoritmo di routing, insieme alle mappe vettoriali, potrebbe anche essere implementato in un'applicazione per telefoni cellulari.

Contributi dei singoli autori

Idea e concezione, D.T., L.D.V. e A.A.; metodologia, D.T., L.D.V.; software, D.T.; validazione, D.T.; analisi, D.T.; revisione, D.T., L.D.V., e A.A.; supervisione, L.D.V., e A.A.; acquisizione fondi, L.D.V., e A.A.

Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

Conflitti di interessi: Tutti gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse da riportare (oppure riportare in modo trasparente eventuali conflitti di interessi).

Fonti di finanziamento

Il secondo autore ha ricevuto finanziamenti attraverso la borsa di studio per le risorse umane RYC2020-029193-I finanziata da MCIN/AEI/10.13039/501100011033 e *FSE El FSE invierte en tu futuro*.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Leica Geosystem Italia per il supporto fornito durante il test con lo strumento Leica Pegasus:Two.

Bibliografia

Hou, Q., Ai, C., 2020. A network-level sidewalk inventory method using mobile LiDAR and deep learning. *Transportation*

Research Part C: Emerging Technologies, 119, 102772. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102772>.

Li, H., Cebe, J., Khoeni, S., Xu, Y., Dyess, C., Guensler, R., 2018. A Semi-Automated Method to Generate GIS-Based Sidewalk Networks for Asset Management and Pedestrian Accessibility Assessment. *Transportation Research Record*, 2672(44), 1-9. <https://doi.org/10.1177/0361198118757981>.

Luaces, M. R., Fisteus, J. A., Sánchez-Fernández, L., Munoz-Organero, M., Balado, J., Díaz-Vilariño, L., Lorenzo, H., 2021. Accessible Routes Integrating Data from Multiple Sources. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1). <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/1/7>.

Marconcini, S., Pracchi, V., 2019. Inclusive Cultural Heritage sites: ICT as a tool to support the design process and share knowledge. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, 793–800. <https://www.int-arch-photogramm-remotesens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W11/793/2019/>.

Marconcini, S., Treccani, D., Díaz-Vilariño, L., Adami, A., 2021. A data collection framework for managing accessibility and inclusion in urban heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, VIII-M-1-2021, 101–108. <https://www.isprs-ann-photogrammremotesens-spatial-inf-sci.net/VIII-M-1-2021/101/2021/>.

Pella, H., Ose, K., 2018. *Network Analysis and Routing with QGIS*. John Wiley Sons, Ltd, chapter 4, 105–144.

Saha, M., Saugstad, M., Maddali, H. T., Zeng, A., Holland, R., Bower, S., Dash, A., Chen, S., Li, A., Hara, K., Froehlich, J., 2019. Project Sidewalk: A Web-Based Crowdsourcing Tool for Collecting Sidewalk Accessibility Data At Scale. *Association for Computing Machinery*, New York, NY, USA, 1–14.

Treccani, D., Díaz-Vilariño, L., Adami, A., 2021. Sidewalk detection and pavement characterisation in historic urban environments from point clouds: preliminary results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIIIB4- 2021, 243–249. <https://www.int-arch-photogramm-remotesens-spatial-inf-sci.net/XLIIIB4-2021/243/2021/>.

Verde, D., Silva, T., Pereira, A. I., Paiva, S., 2021. Optimized routing for people with permanent or temporary mobility disability: a case study in viana do castelo. 2021 *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–6.

© 2021 by the authors. Open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

© 2021 degli autori. Pubblicazione open access come da termini e condizioni della licenza Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)