



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

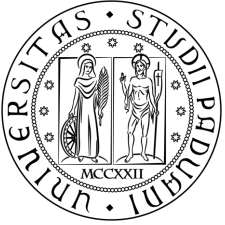
Relazione per la prova finale

Ricostruzione dell'Ambiente 3D per l'Autenticazione a Livello Fisico Basata su ISAC

Relatore: Prof Stefano Tomasin
Correlatore: Prof Francesco Ardizzon

Laureanda: Barison Alessia
Matricola n.: 2103043

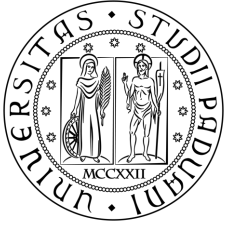
ANNO ACCADEMICO 2025/2026



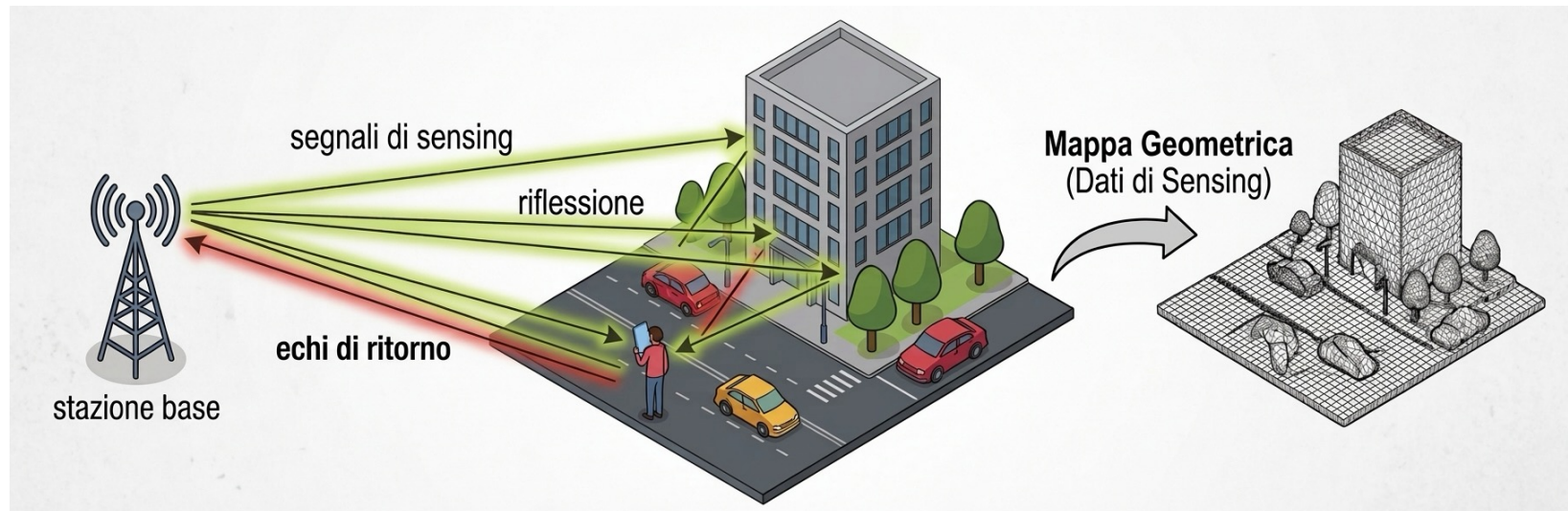
INTRODUZIONE

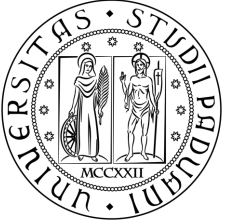
ISAC (Integrating Sensing and Communication) sfrutta i segnali wireless utilizzati per scopi di comunicazione per acquisire informazioni sull'ambiente circostante: nei segnali ISAC le Base station trasmettono e ricevono segnali allo stesso momento e, attraverso riflessioni e diffrazioni, consentono di ricavare informazioni sul mondo fisico.

Questa tecnologia è attesa come caratteristica tecnica fondamentale nelle reti cellulari di sesta generazione (6G), che quindi integreranno capacità di comunicazione con capacità di rilevazione.



Oltre alla trasmissione dei dati, l'ISAC consente quindi di acquisire informazioni sull'ambiente fisico in cui avviene la comunicazione, ricavandone superfici, geometria dello scenario e ostacoli.

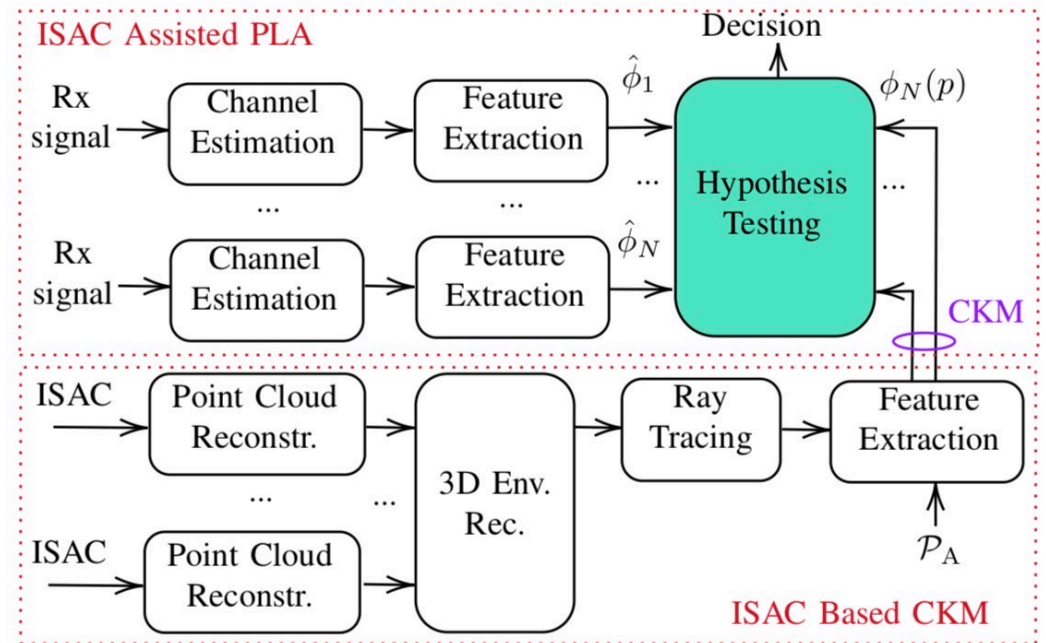


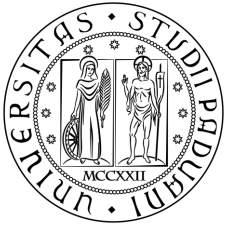


OBIETTIVO DEL LAVORO

- 1) Ottenere una ricostruzione 3D dell'ambiente basata su ISAC
- 2) Utilizzarla per contribuire ad una pubblicazione scientifica: ISAC-Assisted Channel Knowledge Map Generation for Physical Layer Authentication

<https://arxiv.org/abs/2607.20176>





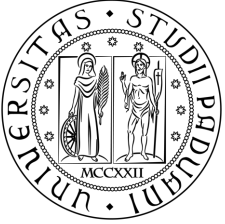
DA POINT CLOUD A RICOSTRUZIONE 3D: PIPELINE



La pipeline di lavoro implementata prevede le seguenti fasi:

- Si parte da una Point Cloud
- Si applica un algoritmo di ricostruzione
- Si ottiene una superficie tridimensionale

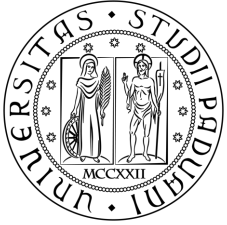
Software utilizzato: MATLAB



COSA E' UNA POINT CLOUD

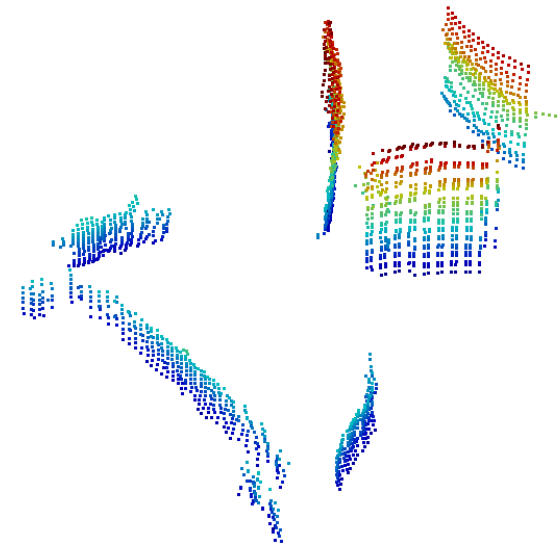
Una point cloud è un insieme di punti distribuiti nello spazio tridimensionale, ciascuno definito dalle proprie coordinate X, Y e Z; non contiene però informazioni su come questi punti sono collegati tra loro.

Per ottenere una rappresentazione tridimensionale dell'ambiente è quindi necessario un passaggio preliminare che ricostruisca la connettività tra i punti (surface reconstruction).



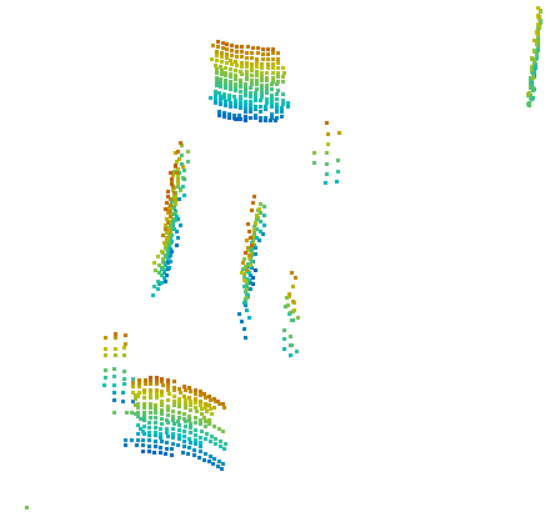
DATI A DISPOSIZIONE

- ❖ Point cloud con rumore di -130dB
ottenuta posizionando quattro Base
Station attorno ad una porzione ristretta
di edifici situati a Londra. Questa point
cloud è stata utilizzata per la stesura
della pubblicazione scientifica.





- ❖ Point cloud con rumore di -130dB
ottenuta posizionando quattro Base
Station attorno ad una porzione
ristretta di edifici situati a Berlino.



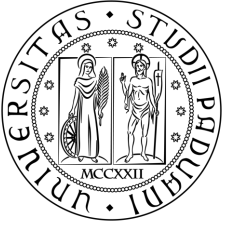


GENERAZIONE DELLA MESH

Per ricostruire la connettività tra i punti è stata utilizzata la funzione *pc2surfacemesh(ptCloudIn, 'poisson', inputDepth)* di MATLAB, che, a partire dalla point cloud, genera una mesh di superficie.

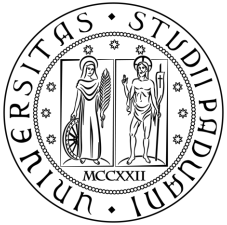
Una mesh è una struttura geometrica composta da vertici, che corrispondono ai punti della point cloud, spigoli, ovvero i segmenti che collegano due vertici adiacenti, e facce, le superfici piane delimitate dagli spigoli chiusi: nel loro insieme, questi elementi definiscono esplicitamente come i punti sono collegati tra loro.

Alla fine si ottiene una superficie continua dell'ambiente acquisito.



Più nello specifico la funzione *pc2surfacemesh(ptCloudIn, 'poisson', inputDepth)* :

- *ptCloudIn* rappresenta la point cloud di partenza
- 'poisson' indica l'algoritmo di ricostruzione utilizzato
- *inputDepth* controlla il livello di dettaglio della mesh. All'aumentare del parametro *depth* aumenta il numero di triangoli generati per connettere i vertici e, di conseguenza, il livello di dettaglio della ricostruzione



ALGORITMO DI RICOSTRUZIONE

MATLAB mette a disposizione due algoritmi di ricostruzione della superficie: Poisson e Ball-Pivot.

Algoritmo di Poisson

Ricostruisce la superficie in tre fasi. Prima trasforma i punti campionati in un campo vettoriale continuo, che si estende in tutto lo spazio. Poi risolve un sistema di equazioni di Poisson per trovare una funzione il cui andamento descriva nel modo più fedele possibile la nuvola di punti di partenza. Infine, la superficie viene ricostruita a partire proprio da questa funzione.

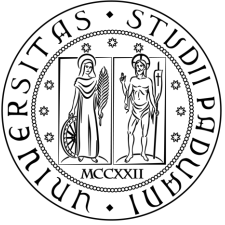
Algoritmo di Ball-Pivot

Costruisce la mesh facendo rotolare virtualmente una sfera di raggio r sulla nuvola di punti: ogni volta che tocca tre punti forma un triangolo, e continua a pivotare sui bordi dei triangoli già creati per aggiungerne di nuovi, finché copre tutta la superficie raggiungibile. Il procedimento viene poi ripetuto con sfere di raggio maggiore per ricostruire anche le zone più irregolari.



In questo lavoro è stato scelto il metodo di Poisson perché risulta particolarmente robusto in presenza di rumore e non richiede particolari restrizioni sulla forma della superficie da ricostruire.

Una criticità della ricostruzione mediante Poisson è la possibile comparsa di facce spurie in zone dello spazio prive di punti misurati, talvolta dovuta a una scarsa densità della point cloud in quelle regioni.



PRIMI RISULTATI

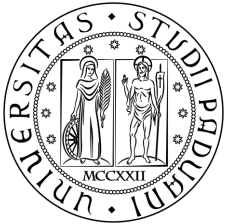
La figura mostra una prima ricostruzione tridimensionale della point cloud di Londra. Si nota che l'algoritmo di Poisson ha ricostruito abbastanza fedelmente la point cloud ma ha chiuso i due lobi laterali





Nel caso della città di Berlino invece si nota come l'algoritmo di Poisson sia stato meno fedele alla point cloud di partenza: per connettere la loro i punti e chiudere la superficie, ha creato delle facce inesistenti che non rappresentano correttamente l'ambiente reale





PROCEDURA DI FILTRAGGIO

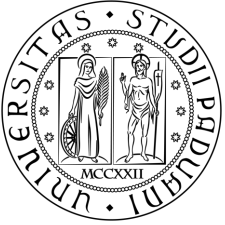
Per individuare ed eliminare tali facce è stata implementata una procedura di filtraggio.

Per ogni faccia della mesh è stato innanzitutto calcolato il centroide.

Successivamente, mediante la funzione MATLAB *findNearestNeighbors* (*ptCloud*, *points*, *k*), è stata determinata la distanza tra ciascun centroide e il punto più vicino appartenente alla point cloud originale.

L'idea alla base di questo metodo è che una faccia correttamente ricostruita debba trovarsi in prossimità dei punti acquisiti e che quindi il suo centroide risulti vicino alla point cloud. Al contrario, una faccia generata erroneamente tende ad avere un centroide significativamente distante dai punti misurati.

Sulla base dei risultati ottenuti è stata definita una soglia: tutte le facce il cui centroide presentava una distanza dal punto più vicino della point cloud superiore a tale valore sono state classificate come spurie e rimosse dalla mesh.



Più nello specifico la funzione *findNearestNeighbors* (*ptCloud*, *points*, *k*):

- ❖ *ptCloud* rappresenta la point cloud di partenza
- ❖ *Points* rappresentano i punti di cui si vogliono trovare i vicini più stretti, nel nostro caso *points* corrisponde ai centroidi
- ❖ *K* rappresenta il numero di vicini stretti che si vogliono trovare per ciascun punto (*points*)



RICOSTRUZIONE 3D

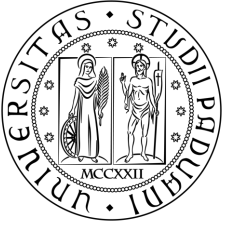
Dopo la procedura di filtraggio le ricostruzioni 3D ottenute sono le seguenti:

Ricostruzione di Londra



Ricostruzione di Berlino





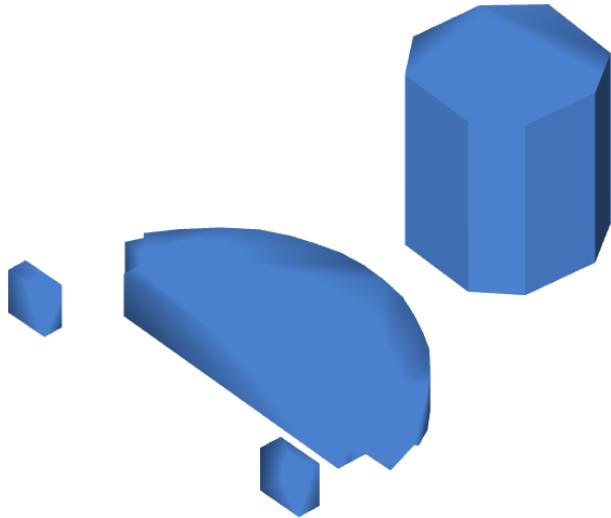
RISULTATI OTTENUTI

- I risultati mostrano che l'algoritmo di Poisson non ricostruisce correttamente tutte le superfici, in particolare quelle non direttamente visibili dalle Base Station.
- La procedura di filtraggio consente di ottenere una struttura 3D più accurata, ma non permette di ricostruire completamente la geometria dell'ambiente.
- La ricostruzione delle aree caratterizzate da una point cloud più densa risulta più fedele all'ambiente fisico reale



CONFRONTO CON LA GROUND TRUTH

Ground truth



Ricostruzione





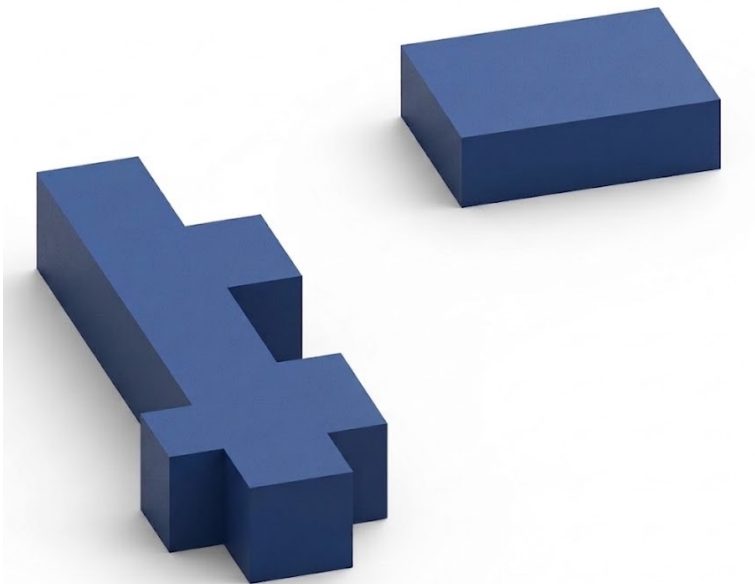
COMMENTO

La ricostruzione conferma quanto osservato nei risultati ottenuti: le superfici non direttamente visibili dalle Base Station risultano assenti o mal ricostruite, producendo una mesh frammentata in più porzioni disconnesse. La procedura di filtraggio ha permesso di rimuovere le facce spurie generate dall'algoritmo di Poisson nelle zone prive di dati, restituendo una struttura più pulita ma comunque incompleta rispetto alla ground truth. Si osserva inoltre come i frammenti meglio definiti corrispondano alle porzioni di edificio coperte da una point cloud più densa, a conferma della relazione diretta tra densità dei dati e fedeltà della ricostruzione.



CONFRONTO CON LA GROUND TRUTH

Ground truth



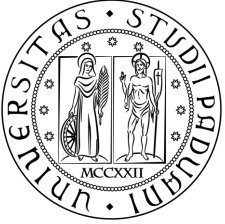
Ricostruzione





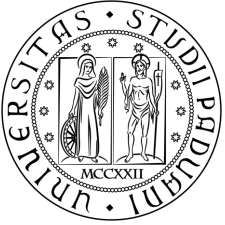
COMMENTO

Anche in questo caso la ricostruzione riflette i limiti evidenziati nei risultati ottenuti, in forma ancora più marcata: la maggiore complessità della pianta dell'edificio comporta un numero più elevato di superfici non visibili dalle Base Station, con una conseguente copertura più incompleta della point cloud. Il filtraggio riduce le geometrie inventate, ma non è in grado di compensare la mancanza di dati nelle zone occluse, portando a una perdita quasi totale della struttura originale. Questo esempio conferma che la qualità della ricostruzione dipende fortemente dalla densità della point cloud disponibile per ciascuna area dell'edificio.



APPLICAZIONE PRATICA

Le ricostruzioni 3D ottenute in questo lavoro sono state utilizzate per validare un meccanismo di Physical Layer Authentication (PLA), il cui scopo è quello di verificare la posizione di un trasmettitore e autenticarlo contro un device avversario che cerca di impersonarlo da una posizione differente.



CONCLUSIONI

- La procedura sviluppata permette di passare dalla point cloud a una rappresentazione tridimensionale dell'ambiente
- La qualità della ricostruzione è strettamente legata alla point cloud
- La ricostruzione ottenuta, pur presentando alcune limitazioni, fornisce una rappresentazione geometrica utile per la successiva parte di autenticazione