



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura

**Sviluppo di un sistema ibrido GNSS RTK e SLAM  
per la Realtà Mixata Outdoor**

---

**Development of a Hybrid GNSS RTK and SLAM  
outdoor Mixed Reality System**

RELATORE:

Prof. Berardo Naticchia

TESI DI LAUREA DI:

Matteo Corradi

CORRELATORI:

Ing. Massimo Vaccarini

Ing. Alessandra Corneli

---

*Ai miei nonni*

# CONTENTS

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>2</b>
<b>LETTERATURA</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 IL PROCESSO EDILIZIO DI OGGI</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Il processo edilizio in Italia .....	5
2.1.2 Gli obiettivi del processo .....	6
2.1.3 Le fasi del processo.....	6
<b>2.2 IL CANTIERE</b> .....	<b>8</b>
2.2.1 Il cantiere, evoluzione nel tempo .....	8
2.2.2 Il cantiere storico .....	9
2.2.3 Il cantiere moderno .....	10
2.2.4 Il cantiere contemporaneo o del futuro .....	12
2.2.5 Le fasi del processo edilizio .....	13
<b>2.3 LE METODOLOGIE PER LA GESTIONE DEL PROCESSO EDILIZIO</b> .....	<b>15</b>
2.3.1 La nascita del BIM .....	17
2.3.2 Che cos'è il BIM .....	19
2.3.3 I livelli del BIM .....	23
2.3.4 Principi metodologici del BIM.....	25
2.3.4.1 Elementi parametrici del BIM.....	26
2.3.4.2 Database.....	28
2.3.5 Interoperabilità.....	30
2.3.5.1 Common Data Environment (CDE).....	34
2.3.6 Le dimensioni del BIM .....	34
2.3.7 LOD.....	36
2.3.8 Vantaggi e svantaggi .....	42
<b>2.4 GEOREFERENZIAZIONE</b> .....	<b>46</b>
2.4.1 Sistema di coordinate geografiche .....	46
2.4.2 GPS e GPS-RTK, precisione estrema in tempo reale .....	47
2.4.3 WGS 84 .....	49
2.4.4 Raggio Geocentrico.....	52
2.4.5 Distanza Geodetica .....	53
<b>2.5 MIXED REALITY</b> .....	<b>55</b>
2.5.1 Capire la Mixed Reality.....	55
2.5.2 Strumenti che sostengono la Mixed Reality nelle costruzioni .....	55
2.5.3 Esempi reali e casi d'uso .....	56
2.5.4 Vantaggi e sfide .....	57
2.5.5 Il futuro della Mixed Reality nell'edilizia .....	59
2.5.6 Simultaneous Localization And Mapping - SLAM.....	59
2.5.6.1 Potenzialità della SLAM nell'edilizia .....	60
2.5.6.2 SLAM, Mixed Reality ed interazioni con IMU.....	60

<b>PROBLEMI.....</b>	<b>63</b>
<b>OBIETTIVI.....</b>	<b>67</b>
<b>SISTEMA INNOVATIVO PROPOSTO .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1 ALGORITMO DI TRACCIAMENTO.....</b>	<b>72</b>
<b>5.2 ALLINEAMENTO OGGETTI 3D NEL QUADRO LOCALE.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.1 Allineamento dell'inquadratura locale con il Nord.....</b>	<b>73</b>
5.2.1.1 Calcolo del Bearing .....	73
<b>5.2.2 Regolazione della posizione .....</b>	<b>75</b>
5.2.2.1 Haversine.....	76
5.2.2.2 Calcolo della Distanza Geodetica .....	78
5.2.2.3 Filtro della Latitudine.....	79
5.2.2.4 Filtro della Longitudine.....	79
<b>5.2.3 Regolazione dell'altitudine.....</b>	<b>80</b>
5.2.3.1 Filtro dell'Altitudine .....	82
<b>5.2.3 Regolazione dell'orientamento .....</b>	<b>82</b>
<b>5.2.4 Proiezioni equirettangolari .....</b>	<b>82</b>
<b>IMPLEMENTAZIONI.....</b>	<b>86</b>
<b>6.1 GPS-RTK .....</b>	<b>86</b>
<b>6.1.1 Base GPS-RTK.....</b>	<b>86</b>
6.1.1.1 Stazione radio RTK.....	88
6.1.1.2 Antenna GPS: GNSS Multi-Band L1/L2 Surveying Antenna (TNC).....	88
6.1.1.3 Ancoraggio .....	90
6.1.1.4 Cablaggio e connessioni .....	90
<b>6.1.2 U-Blox ZED-F9P Interface Description .....</b>	<b>92</b>
<b>6.1.3 Lettura dei dati GPS-RTK - NMEA.....</b>	<b>96</b>
6.1.3.1 Struttura dei messaggi NMEA .....	97
<b>6.2 MICROSOFT HOLOLENS .....</b>	<b>100</b>
<b>6.2.1 Supporto HoloLens 2 per antenna attiva .....</b>	<b>104</b>
<b>6.3 MIGLIORAMENTO DELL'ALLINEAMENTO .....</b>	<b>106</b>
<b>6.3.1 Precisione della posizione GPS-RTK.....</b>	<b>106</b>
<b>6.3.2 Precisione azimutale .....</b>	<b>107</b>
6.3.2.1 Filtro dell'azimuth.....	109
6.3.2.2 Calcolo della media.....	113

<b>RISULTATI .....</b>	<b>116</b>
<b>7.1 POSIZIONE .....</b>	<b>116</b>
<b>7.2 ALLINEAMENTO AL NORD .....</b>	<b>121</b>
<b>7.3 POSIZIONAMENTO OGGETTI 3D .....</b>	<b>125</b>
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>129</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>132</b>

# **INTRODUZIONE**



# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, il settore dell'edilizia ha subito una trasformazione radicale grazie all'evoluzione tecnologica. I processi di progettazione, costruzione e gestione delle opere sono stati rivoluzionati dall'introduzione di nuove metodologie e strumenti, tra cui il Building Information Modeling (BIM), il Global Positioning System (GPS) e la Mixed Reality (MR).

Il BIM rappresenta un metodo integrato per la gestione del processo edilizio, in cui le informazioni sulle caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio vengono modellate digitalmente e condivise tra tutti i professionisti coinvolti nel progetto. L'utilizzo del BIM consente una migliore comunicazione, collaborazione e coordinazione tra architetti, ingegneri, costruttori e altri attori del settore. Inoltre, il BIM facilita la gestione delle informazioni durante tutto il ciclo di vita di un edificio, dalla fase di progettazione fino alla costruzione e alla manutenzione.

Parallelamente, l'utilizzo del GPS ha reso possibile la georeferenziazione dei modelli virtuali, consentendo di posizzarli con precisione nel contesto geografico reale. Questo approccio è particolarmente utile nel settore dell'edilizia, dove le opere devono essere integrate nell'ambiente circostante in modo accurato.

Un altro sviluppo significativo nel settore delle costruzioni è l'utilizzo della Mixed Reality (MR) durante la cantierizzazione, la progettazione e la gestione dell'edificio. La MR combina il mondo reale con elementi virtuali, consentendo agli utenti di interagire e visualizzare oggetti digitali all'interno dell'ambiente fisico. Questa tecnologia offre numerosi vantaggi, come la possibilità di visualizzare in tempo reale i modelli BIM all'interno del contesto reale, di effettuare modifiche e correzioni direttamente sul campo e di migliorare la comprensione delle informazioni tecniche attraverso l'interazione tridimensionale.

Tuttavia, l'utilizzo della Mixed Reality all'aperto presenta ancora una serie di sfide. La precisione e l'allineamento tra il modello virtuale e quello reale possono essere influenzati da vari fattori, come la presenza di ostacoli, le condizioni ambientali e le limitazioni hardware dei dispositivi MR. Inoltre, i processi per raggiungere un corretto allineamento richiedono tempo e possono essere poco affidabili.

L'obiettivo di questa tesi è lo sviluppo di un sistema innovativo per l'allineamento geografico che permetta la visualizzazione ad alta precisione di ologrammi relativi a modelli BIM, georeferenziata ed allineata alla realtà in spazi outdoor in maniera continuativa tramite l'utilizzo di strumenti di Mixed Reality, basandosi sull'utilizzo della tecnologia RTK dei GPS, che consente una precisione millimetrica nella posizione e nella navigazione.

Attraverso l'implementazione di questo sistema, si mira a superare le limitazioni attuali dell'utilizzo della Mixed Reality all'aperto nel settore dell'edilizia. Si prevede che ciò consentirà una migliore visualizzazione e comprensione dei modelli virtuali, migliorando la comunicazione tra i diversi attori coinvolti nel processo edilizio e ottimizzando la gestione delle opere.



# LETTERATURA

## IL PROCESSO EDILIZIO OGGI

- Il processo edilizio in Italia
- Gli obiettivi del processo
- Le fasi del processo

## IL CANTIERE

- Il cantiere, evoluzione nel tempo
- Il cantiere storico
- Il cantiere moderno
- Il cantiere contemporaneo o del futuro
- Le fasi del processo edilizio

## LE METODOLOGIE PER LA GESTIONE DEL PROCESSO EDILIZIO

- La nascita del BIM
- Che cos'è il BIM
- I livelli del BIM
- Principi metodologici del BIM
  - Elementi parametrici del BIM
  - Database
- Interoperabilità
  - Common Data Environment (CDE)
- Le dimensioni del BIM
- LOD
- Vantaggi e svantaggi

## GEOREFERENZIAZIONE

- Sistema di coordinate geografiche
- GPS e GPS-RTK, precisione in tempo reale
- WGS 84
- Raggio Geocentrico
- Distanza Geodetica

## MIXED REALITY

- Capire la Mixed Reality
- Strumenti che sostengono la MR nelle costruzioni
- Esempi reali e casi d'uso
- Vantaggi e sfide
- Il futuro della Mixed Reality nell'edilizia
- Simultaneous Localization And Mapping - SLAM
  - Potenzialità della SLAM nell'edilizia
  - SLAM, MR ed interazioni con IMU

## Capitolo 2

# LETTERATURA

### 2.1 IL PROCESSO EDILIZIO DI OGGI

#### 2.1.1 Il processo edilizio in Italia

La norma UNI 10838, che sostituisce la norma 7867, definisce il processo edilizio come la sequenza organizzativa di fasi che portano dal rilevamento delle esigenze della committenza-utenza di un bene edilizio al loro soddisfacimento attraverso la progettazione, la produzione, la costruzione e la gestione del bene stesso. Il processo edilizio comprende quindi l'arco di tempo che va dal riconoscimento dei bisogni dell'uomo e della collettività fino al loro soddisfacimento, mediante la costruzione di opere edili.

Il processo edilizio relativo ad un'opera civile o di architettura è paragonabile ad un qualsiasi sistema produttivo nel settore industriale, che ha come obiettivo la realizzazione di un prodotto e la sua messa in vendita. Tuttavia al contrario del processo industriale, il cui sistema produttivo si sviluppa solo all'interno dell'industria, il processo edilizio si caratterizza per il grado molto elevato di interdipendenza con gli altri settori dell'economia.

Un'impresa edile difatti non può occuparsi di tutte le lavorazioni che riguardano il cantiere: le opere in ferro, in vetro, di idraulica, gli impianti elettrici, di condizionamento e trattamento d'aria, di carpenteria, la lavorazione dei marmi ecc. sono tutte lavorazioni che un'impresa edile subappalta ad altre imprese. Per questo motivo spesso si sente dire che l'edilizia è il "volano dell'economia".

Il processo edilizio, in sostanza, è costituito da un'organizzazione di attori con un compito ben preciso, che producono un risultato finale attraverso fasi ben delineate e obiettivi ben prefissati.

### *2.1.2 Gli obiettivi del processo*

La realizzazione di un'opera civile deve tener conto di diversi fattori per un corretto raggiungimento degli obiettivi. Tra questi bisogna garantire:

- la qualità complessiva della realizzazione;
- la sua realizzazione in tempi definiti;
- l'ottimizzazione delle risorse impegnate nei processi di ideazione, esecuzione e gestione;
- la pianificazione economica in relazione alle previsioni e alle condizioni di mercato.

### *2.1.3 Le fasi del processo*

Il processo edilizio relativo ad un'opera civile o architettonica si articola in fasi, un insieme di attività che hanno a capo uno o più attori. Le fasi si articolano in:

- fase strategica;
- fase ideativa;
- fase esecutiva;
- fase di gestione e controllo;
- dismissione (fase di riuso e riciclaggio).

Molto spesso in Italia le opere pubbliche sono caratterizzate da grandi ritardi nella fase di progettazione e nella fase di esecuzione. Questo accade perché non è detto che gli studi tecnici che partecipano alla fase strategica siano gli stessi della fase esecutiva. È chiaro che tutto ciò non può complicare l'elaborazione del progetto e provocare un allungamento dei tempi.

Un'altra fase critica è il passaggio dalla progettazione esecutiva al cantiere. Gli errori di progettazione, comprensione e trasmissione comportano ritardi sui tempi di realizzazione, maggiori costi di esecuzione e soprattutto risultati diversi da quelli prefissati.

Nel 2017 le opere pubbliche incompiute sono state 762 e tra le cause principali vi sono ragioni tecniche (oltre alla mancanza di fondi e al fallimento delle imprese).

La progettazione delle opere pubbliche con la legge quadro dei lavori pubblici 109/94 (legge Merloni) era articolata su quattro livelli: studio di fattibilità,

progettazione preliminare, progettazione definitiva, progettazione esecutiva. Il nuovo codice appalti (D.lgs. n. 50/2016) prevede invece che la progettazione sia articolata su tre livelli: studio di fattibilità, progettazione definitiva e progettazione esecutiva. Viene dunque eliminata la progettazione preliminare. Oltre a questo la novità consiste nell'obbligatorietà di specifici metodi e strumenti elettronici di progettazione per opere edili e civili. L'obbligo è entrato in vigore dal gennaio 2019 per le opere pubbliche con un importo a base di gara pario superiore a 100 milioni di euro e sarà poi obbligatorio per tutte le opere pubbliche a partire dal 2025.

È bene precisare che è impossibile pensare che in cantiere non vi possano essere imprevisti e contrattempi: la bellezza della fase realizzativa consiste anche nella risoluzione di problemi *in situ*. Oggi con le tecnologie a disposizione gli attori coinvolti hanno la possibilità di prevenire i rischi con una corretta modellazione tridimensionale e con lo scambio di informazioni sul progetto. La lentezza di esecuzione di un cantiere non può quindi aggiungersi ai problemi riguardanti la riduzione della domanda ed il ribasso delle offerte in un mercato ancora in crisi.

Il BIM gioca quindi un ruolo chiave nel processo edilizio, un processo ricco di attori e di problemi, derivanti per lo più da una scarsa organizzazione. Anche la burocrazia può trarne vantaggi, come nel caso del rispetto delle norme che possono essere dimostrate da plugin o da processi di *BIM Validation*.

## 2.2 IL CANTIERE

È una fase fondamentale del processo edilizio che consiste nella realizzazione dell'opera che necessita di collegamento e coordinamento con le fasi precedenti (ideazione, pianificazione, programmazione, progettazione), che richiede la gestione di mezzi (macchine, strumenti, materiali) di uomini (mano d'opera) tempi e denaro.

Con il sostantivo "cantiere" in italiano intendiamo esprimere due concetti ben distinti:

- LUOGO: Ovvero l'area attrezzata per eseguire i lavori.
- ATTIVITA': L'attività produttiva volta alla realizzazione delle opere.

### 2.2.1 Il cantiere, evoluzione nel tempo

La realizzazione dell'opera, per quanto riguarda l'evoluzione della Costruzione, si è sviluppata tramite una tecnologia empirica: le tecniche si sono evolute attraverso un processo lunghissimo di errori, tentativi e prove successive. Solo durante l'ultimo secolo e mezzo è apparsa la tendenza specifica per cambiare questo comportamento. Il processo evolutivo è stato molto lento nel tempo ed è stato necessario attendere diversi anni per valutare i risultati di una tecnica innovativa od un determinato materiale. Solo recentemente con le nuove scoperte tecnologiche, il cantiere è andato gradualmente modificandosi discostandosi quasi completamente dalle tecniche utilizzate in passato. Basti pensare come ha cambiato il modo di costruire e di progettare la scoperta del calcestruzzo armato alla metà del '800; portando allo sviluppo di un nuovo materiale che lavorasse bene a compressione, grazie all'utilizzo del cemento e degli inerti aggiunti, ma anche che lavorasse bene a trazione, dovuto alle proprietà della struttura in acciaio.

Considerando che per sedici secoli l'obbligo di rispettare la triade di Vitruvio, ovvero, che un edificio dovesse essere "robusto", "utile" e "bello" (firmitas, utilitas, venustas), ha determinato le fattezze dei corpi di fabbrica, limitando notevolmente le tecniche utilizzate fino a quel momento per costruire. Vitruvio, nel suo "De Architectura" ci illustra le tecniche per la corretta costruzione, per il sollevamento e il trasporto delle materie prime. Fino a che gradualmente questa corrente di pensiero andò a scemare, lasciando spazio a una visione che prediligesse

maggiormente l'interesse alla composizione, cioè "l'estetica", sebbene, in seguito si arriverà all'estremità opposta di pensiero, ovvero a un'eccessiva preoccupazione esclusivamente tecnologica.

Possiamo distinguere il tipo di cantiere in tre distinti gruppi:

- CANTIERE STORICO
- CANTIERE MODERNO
- CANTIERE CONTEMPORANEO O DEL FUTURO

### **2.2.2 Il cantiere storico**

Come abbiamo accennato prima, l'evoluzione costruttiva non è altro che un susseguirsi di prove ed errori che hanno portato grazie al metodo empirico alla risoluzione dei vari problemi costruttivi. In epoca antica, il compito della progettazione e della realizzazione degli edifici e delle sue problematiche, era affidato alla medesima persona che realizzava l'edificio, il capomastro. Il quale grazie alle sue competenze: tecniche e artistiche, era in grado di organizzare e gestire le varie forze lavoro. La parola "architecton" nel mondo della Grecia classica significava appunto "capomastro", o responsabile della costruzione. La sperimentazione e la definizione delle soluzioni tipologiche, tecnologiche e costruttive erano svolte in "situ", cioè direttamente sul cantiere. Non era prevista una progettazione previa, ma il capomastro, affrontava tutto secondo le necessità e le richieste del committente. Persino gli strumenti utilizzati per la realizzazione del cantiere erano realizzati in situ. Sappiamo che per la costruzione di ponti e di argani, usati per elevare pietre e mattoni ai vari piani, veniva utilizzato il legno. Le macchine adoperate venivano costruite e adattate secondo le varie necessità del costruttore.

Il materiale utilizzato per la costruzione era quasi sempre materiale proveniente da qualche cava vicina al cantiere o che si poteva reperire nelle vicinanze; in quanto il trasporto e l'utilizzo di altri materiali sarebbe stato un ingente impiego di risorse economiche e di tempo per i mezzi dell'epoca. La manodopera utilizzata per la realizzazione dell'opera era ovviamente a basso costo e raramente era specializzata; costretta anche a lavorare per più di dieci ore giornaliere in un ambiente privo di sistemi di sicurezza o di risarcimento in caso d'infortunio.

In sintesi:

- Sperimentazione e definizione in situ delle soluzioni: tipologica, tecnologica e costruttiva.
- Strumenti realizzati in situ.
- Materiali e componenti in situ.
- Mano d'opera a buon mercato.

### **2.2.3 Il cantiere moderno**

Per assistere a una notevole e radicale innovazione in campo edilizio, dobbiamo attendere il "boom" della Rivoluzione Industriale che, grazie alle nuove scoperte (macchina a vapore, elettricità, scoperta dell'acciaio), in seguito adottate nel campo delle costruzioni, hanno trasmesso un forte e rinnovato impulso al settore; cambiando ciò che è rimasto invariato per molti secoli. L'introduzione dell'alimentazione a vapore prima, e l'impiego del c.a. poi, segnano il radicale e definitivo mutamento del cantiere edilizio, decretando la sparizione di alcune attrezzature, e il declino di alcune figure professionali comuni. Basti pensare che molte delle macchine edili oggi utilizzate, erano impiegate in modo sperimentale già dalla seconda metà dell'Ottocento.

Nell'età moderna si moltiplicarono, ad opera degli stessi architetti progettisti, macchinari e mezzi d'opera atti a conferire maggiore snellezza alle operazioni. Sino alla seconda metà dell'800 però, nonostante lo sviluppo delle macchine, il cantiere non si discostava molto, nei metodi di lavoro, da quello romano e medievale. La costruzione delle grandi opere infrastrutturali, l'avvio della produzione industriale delle materie prime, lo sviluppo delle tecnologie, hanno promosso la meccanizzazione del cantiere a cui ha molto contribuito l'introduzione della macchina a vapore, dei motori a combustione interna e dell'energia elettrica. Da questo periodo ha inizio una notevole trasformazione del cantiere, a livello europeo, specialmente per le grandi opere infrastrutturali. Il continuo miglioramento delle tecnologie produttive, delle caratteristiche del ferro e della produzione, determina un'importante trasformazione dei sistemi costruttivi che incidono sull'organizzazione del cantiere. D'ora in avanti oltre alla progettazione del cantiere, verrà introdotta anche la tutela per l'incolumità dei lavoratori. Questi principi prendono piede anche grazie al nascere del Taylorismo atto all'ottimizzazione del lavoro, che negli anni 30

sviluppa una nuova teoria sul lavoro. Il taylorismo infatti è particolarmente attento a contrastare la normalità degli operai a non affaticarsi, facendo attenzione a non superare la soglia di resistenza a fine di non compromettere del tutto il rendimento, avvalendosi dell'utilizzo di macchine che in un qualche modo potessero sostituirsi all'uomo per lavori più faticosi. In questo periodo storico si verificò anche un altro sostanziale cambiamento nelle retribuzioni. La nuova tendenza consiste nel pagare gli operai in funzione al lavoro svolto più che del tempo impiegato.

In seguito al verificarsi della Rivoluzione Industriale assistiamo alla nascita di una nuova classe sociale: la massa operaia, all'inizio è priva di diritti, sfruttata e tratta come fosse un oggetto, ma che a forza di battaglie incomincia a farsi sentire ottenendo i primi risultati in campo di prevenzione, previdenza sociale e tutela sul lavoro. Nel 1822 in Inghilterra nascono i primi sindacati.

In questi anni iniziano anche a delinearsi in modo preciso le figure professionali dell'ingegnere e dell'architetto. Attori necessari per la progettazione e la coordinazione del cantiere. In Francia vengono fondate le prime scuole atte a formare i professionisti della costruzione, 'Ecole des Ponts et Chaussées, nascono i primi studi su materie innovative come la scienza delle costruzioni.

In sintesi, la prima rivoluzione industriale comporta essenzialmente due innovazioni: la meccanizzazione dei processi produttivi (ovviamente anche degli elementi costruttivi) e il relativo trasferimento delle stesse fasi di produzione dal cantiere ad altri luoghi. La produzione avviene in luoghi deputati a tale compito; i prodotti finiti o semi-finiti vengono successivamente trasportati in cantiere, ove si procede al montaggio e all'assemblaggio. Questa modificazione dei processi, ingenerale, si ripercuote in particolar modo nel processo edilizio.

- Meccanizzazione e digitalizzazione.
- Corretta programmazione.
- Razionale approvvigionamento dei materiali a piè d'opera.
- Disponibilità di un progetto costruttivo che riduca le possibilità di "variazioni" e varianti in corso d'opera.
- Definizione precisa delle responsabilità di lavorazione alle varie fasi.
- Affiatamento e motivazione delle risorse umane.



- Garanzia d'incolumità nel corso delle lavorazioni.

#### **2.2.4 Il cantiere contemporaneo o del futuro**

Oggigiorno l'elemento che contraddistingue l'inizio di qualsiasi lavoro edile, è sostanzialmente quello che pone come principio fondamentale, la razionale organizzazione del cantiere. Esso deve essere realizzato nell'ottica della prevenzione degli infortuni e della gestione dei costi, tenendo sotto controllo non solo i costi della mano d'opera e dei materiali che servono per costruire o ristrutturare, ma anche tenendo presente i costi di manutenzione ordinaria della fabbrica, della sua successiva demolizione e smaltimento a fine ciclo della struttura. E' questa la tendenza su cui si sta sviluppando il cantiere in tutti i paesi più avanzati. La costante necessità di affrontare costi minori mantenendo un approccio sostenibile nei rispetti dell'ambiente, che produca meno scarti e sprechi possibili.

Questo processo viene implementato grazie alle nuove scoperte in campo tecnologico e informatico. Il diffondersi di queste nuove tecnologie in questi ultimi decenni, ha portato e porterà in un futuro molto vicino, ad un radicale cambiamento nel concepire il mondo dell'edilizia e delle costruzioni. Grazie all'utilizzo delle nuove tecnologie sviluppate dalle grandi *software-house* in campo della programmazione e del disegno parametrico si riuscirà ad avere sotto controllo in interrelazione varie discipline che prima sembravano viaggiare su binari paralleli. Si riuscirà a gestire le fasi di un progetto in termini di pianificazione operativa e gestione del cantiere. Ciò porterà a gestire in maniera esemplare due aspetti importantissimi: tempo e costi. Grazie alle tecnologie 4D e 5D che gestiscono il tempo (4D) e i Costi (5D) si riesce a produrre direttamente il computo estimativo di ogni singolo materiale impiegato e il cronoprogramma delle opere.

L'impresa del futuro, data la rapidità dei cambiamenti del mercato e grazie all'integrazione di tecnologie all'avanguardia, vanterà l'utilizzo di lavoratori sempre più qualificati. Gli operai saranno formati sui principi della meccanica e dell'informatica e si dovranno confrontare con le logiche sempre più esigenti e concorrenziali del mercato globale. Pertanto l'elevata preparazione professionale concorrerà a un aumento del costo della manodopera. Tuttavia questi costi non incideranno negativamente sul trend edilizio, poiché saranno compensati e ammortizzati dal velocizzarsi delle prestazioni dovute alla meccanizzazione e

dall'automatizzazione del cantiere. Ciò favorirà teoricamente un aumento dei salari e un alleggerimento del carico di lavoro da parte degli operai.

Il quadro appena stilato sulle evoluzioni delle costruzioni, ci fa capire quanto sia radicalmente mutato il mondo del lavoro. Si è raggiunta la consapevolezza che, per ottenere la crescita produttiva, sia fondamentale valorizzare il lavoro umano investendo in formazione.

Il cantiere futuro rassomiglierà sempre di più a un'officina meccanica, perché:

- I tempi e i costi saranno sempre più sotto controllo.
- I manufatti edilizi saranno sempre più meccanizzati e automatizzati per cui la loro realizzazione sarà sempre più assimilata a quella di una macchina.
- La mano d'opera sempre più formata sui principi della meccanica e dell'informatica

### **2.2.5 Le fasi del processo edilizio**

Come precedentemente citato nella definizione del cantiere, il processo edilizio è composto da un susseguirsi di fasi operative che hanno lo scopo di realizzare e gestire l'opera, garantendo dei requisiti fondamentali:

- La qualità della realizzazione della fabbrica.
- L'ottimizzazione e la realizzazione in tempi stabiliti.
- Il raggiungimento del massimo risultato possibile in rapporto alle risorse disponibili. Risorse interne ed esterne.
- Il controllo dei costi della produzione e della gestione in relazione alle previsioni del mercato.

Possiamo distinguere le fasi del processo in quattro:

- Programmazione:  
In questa prima fase si esamina con il committente i requisiti che si vogliono soddisfare. Viene effettuata una programmazione preliminare, dove vengono scelte la modalità di costruzione in base alle fonti finanziarie disponibili.
- Progettazione:  
Le esigenze richieste dal committente sono espresse in termini progettuali, specificando la forma dell'opera e quale sarà la tecnica adottata per la

realizzazione. In aggiunta alla progettazione della forma, del funzionamento e della realizzazione del manufatto, in questa fase, si realizza una pianificazione economica, affiancando un cronoprogramma dei lavori.

- Realizzazione:

L'esecuzione dell'opera viene assegnata a una ditta appaltatrice che ha il compito di dare vita al progetto mantenendone la conformità e accertando l'idoneità dell'opera tramite il collaudo.

- Gestione:

Lo stadio finale, dopo la realizzazione, riguarda la manutenzione dell'opera. L'obiettivo di questa fase, è quello di salvaguardare sia l'integrità fisica che quella funzionale della struttura al fine di non pregiudicarne le prestazioni intrinseche. La manutenzione dell'opera viene realizzata grazie a piccoli accorgimenti che mantengono il manufatto integro ed efficiente, come: il corretto esercizio degli impianti tecnici, la puntuale manutenzione ordinaria e straordinaria nonché la programmazione. Questa fase comprende anche la gestione del fine ciclo della struttura. Lo smaltimento è un aspetto molto importante, fase decisionale al quale si accede sia con l'eventuale recupero della struttura per mezzo d'interventi finalizzati al riuso del opera con cambio di destinazione, o con la demolizione e quindi il successivo riciclo degli elementi. Un ulteriore, ma non meno importante aspetto da tenere presente nella gestione, è il mantenimento delle aspettative economiche e la correlata perdita di valore del manufatto nel corso del tempo.

## 2.3 LE METODOLOGIE PER LA GESTIONE DEL PROCESSO EDILIZIO

Le origini del disegno digitale sono riconducibili al 1950, data di invenzione del primo sistema numericamente controllato, CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Questo sistema innovativo, realizzato presso il *Servomechanism Laboratory of Massachusetts Institute of Technology*, consisteva nella produzione di semplici operazioni realizzate mediante un calcolatore.

Sempre nella stessa Università, dodici anni dopo, ha visto la luce il primo software basato su un sistema *Computer Aided Design* (CAD) denominato *Sketchpad*. La sua ideazione è da riferirsi allo scienziato e informatico Ivan Sutherland che fece sì che, per la prima volta, al contrario di quanto avveniva coi sistemi CAM, fosse possibile disegnare in due dimensioni direttamente sul calcolatore, senza che prima questo dovesse elaborarne le informazioni. Tuttavia *Sketchpad* oltre ad essere costoso era difficilmente utilizzabile ai più. Non si presentava nemmeno come un software adatto ai progettisti degli studi di architettura, abituati al tecnigrafo e a tutt'altre tecniche di rappresentazione. Il suo utilizzo era preferito unicamente nel campo militare e nella rappresentazione di componenti meccanici.

Negli Anni '70, con la diffusione dei primi sistemi operativi ad uso personale, ci fu un forte incremento nella Ricerca e Sviluppo di software. Le principali società informatiche iniziarono a interessarsi allo sviluppo di applicativi CAD nel settore progettuale, soffermandosi in particolare nel campo del rilievo, del disegno e della restituzione di modelli tridimensionali.

Nel 1982 nacque AutoCAD, il primo prodotto lanciato da John Walker sul mercato. Il suo successo fu esorbitante, tanto che in soli 4 anni AutoCAD arrivò ad avere 255 impiegati. Nonostante l'acquisizione del software fosse ancora troppo onerosa per molti studi di progettazione (sia per quanto riguarda l'applicativo che per la strumentazione necessaria), il suo funzionamento si presentava come semplice ed intuitivo: le linee del progetto venivano tracciate su due piani di riferimento (piano x e piano y) e su *layer* sovrapposti, che potevano essere spenti o accesi. Questo metodo di progettazione, definito appunto *layering*, finì con l'influenzare i principali progetti di architettura degli Anni '80. Il più importante tra questi è sicuramente il concorso del *Parc de la Villette* di Parigi.

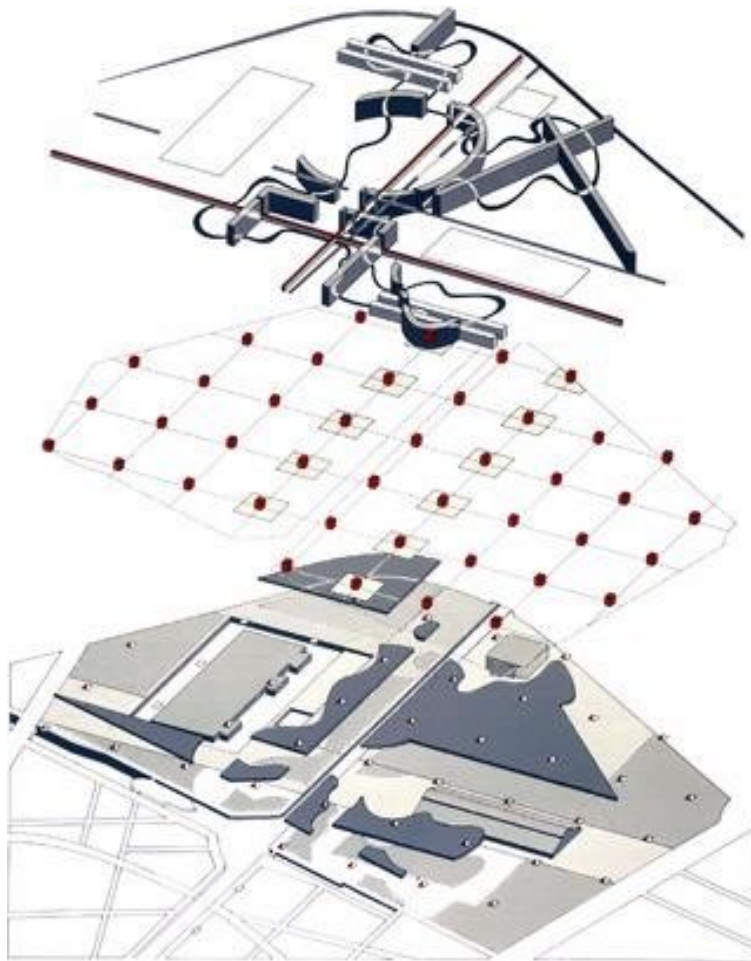


Fig.1 - Schema assonometrico del *Parc de la Villette* progettato da Bernard Tschumi

Fonte: [www.tschumi.com](http://www.tschumi.com)

Il Parc de la Villette è conosciuto come uno dei progetti più importanti nello scenario delle riqualificazioni industriali degli Anni '80. Il suo concorso è stato vinto dall'architetto svizzero Bernard Tschumi, il quale ha dimostrato che lavorando per punti, linee, e superfici su tre *layer* sovrapposti è possibile ottenere architetture complesse che superino gli schemi compositivi tradizionali. Una soluzione simile a quella del vincitore, concettualmente più complessa, è stata proposta da un giovane Rem Koolhaas, il quale ha realizzato un progetto basato su cinque *layer* anziché tre.

I software informatici col passare del tempo si sono sempre più imposti nella progettazione di architetture decostruttiviste, inserendosi a pieno diritto nel dibattito architettonico di fine '900.

Ad oggi la progettazione CAD è di due tipi: orizzontale e verticale.

I sistemi CAD orizzontali hanno un dominio molto ampio e sono utilizzabili in contesti diversi, spaziando dalla progettazione architettonica a quella meccanica. I comandi presenti in questi software sono perciò i medesimi utilizzabili in tutti i contesti. Ad esempio una linea può essere una parete di un edificio oppure la faccia di un componente meccanico.

Il CAD a sistema verticale, invece, ha un dominio ristretto ed i suoi comandi possono essere utilizzati solo in uno specifico settore. Un sistema CAD verticale in ambito architettonico presenta comandi per la progettazione di pareti, porte e finestre, comandi che non possono essere utilizzati qualora si abbia a che fare con la progettazione di componenti meccanici.

Alla progettazione CAD farà seguito la nascita del *Building Information Model* (BIM).

### **2.3.1 La nascita del BIM**

Nel 1974 un professore di nome Charles Eastman ha pubblicato una ricerca intitolata *An Outline of the Building Description System (BDS)* presso la Carnegie Mellon University, in Pennsylvania. In questo lavoro Eastman ha proposto un software nel quale si potessero gestire gli elementi di libreria singolarmente ma che, se sommati insieme, dessero come risultato finale un edificio completo; tutto ciò per mezzo di un unico database atto a raccogliere le informazioni. La progettazione avveniva attraverso un'interfaccia grafica studiata per modellare in proiezione ortogonale ed in assonometria. Ogni componente conteneva una propria descrizione geometrica ed alcune informazioni sul tipo di materiale di cui era composta.

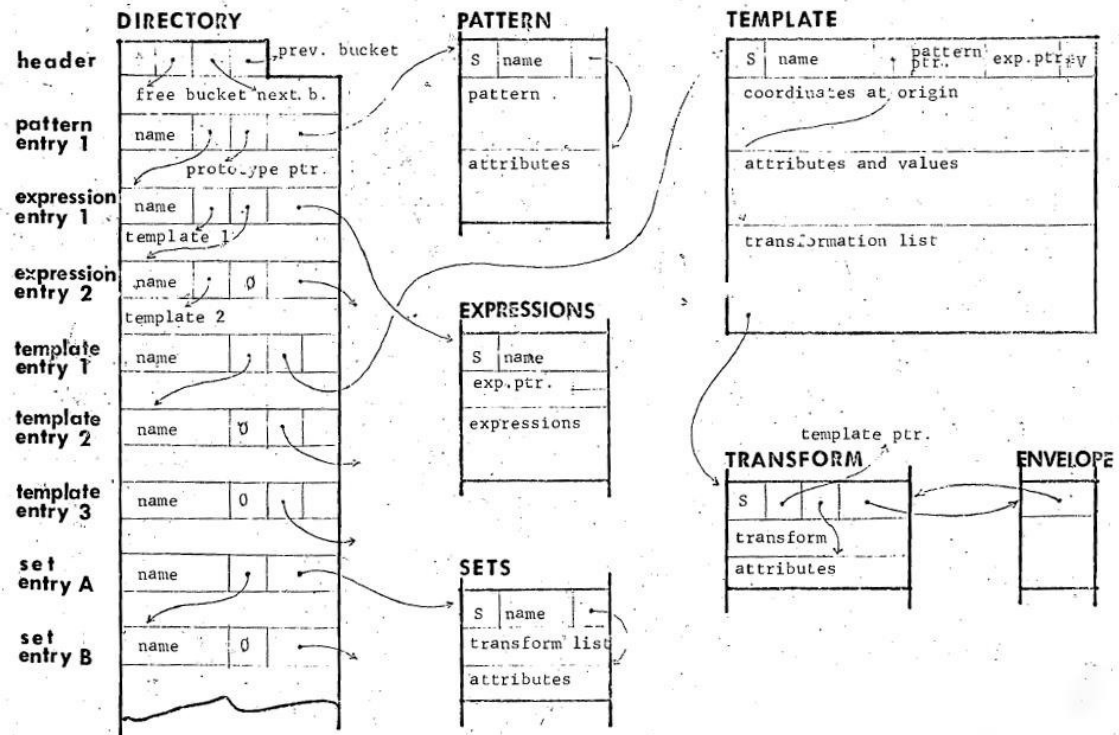


Fig.2 - Database del *Building Description System* (BDS) di C. Eastman  
 Fonte: *Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh*

A questa prima e importante ricerca ha fatto seguito, solo un anno più tardi, un nuovo articolo intitolato *Building Information Modelling* in cui Charles Eastman chiarisce che il BIM è un'attività di gestione informativa degli edifici e non la mera modellazione di un oggetto. A dire dello stesso Eastman il BIM è sempre stato un processo gestionale orientato al coordinamento di attività convergenti nella realizzazione delle costruzioni.

Messa a punto la tecnologia si è passati alla realizzazione dei software: il primo ad uscire sul mercato è stato *ArchiCAD*, prodotto della software house *Graphisoft*, nata nel 1985 grazie al fisico Gabor Bojar. Successivamente, nello stesso anno, è poi nato *Microstation* della casa *Bentley* e *Pro/ENGINEER* della *Parametric Technologies Corporation*. Solo nel 2000 i due programmatori Irwin Jungreis e Leonid Raiz hanno dato vita ad uno dei software BIM ad oggi maggiormente utilizzati: *Revit*. Il nome nasce dall'associazione dei termini *Revise* e *It* (letteralmente "rivedilo"), con l'idea di evidenziare la possibilità di apportare modifiche all'interno di un progetto.

Non esiste uno studio sul reale uso dei software BIM e CAD anche se nelle maggiori monografie trattanti questo argomento si prendono in considerazione le ricerche

effettuate sul principale motore di ricerca del web con lo scopo di quantificarne l'utilizzo.

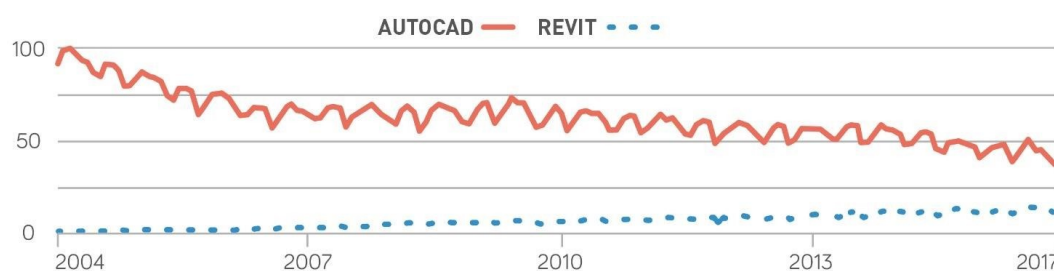


Fig.3 - Trend delle parole ricercate sul motore di ricerca di Google dal 2004 al 2017

Fonte: Google Trend

La fig.3 mostra come la tecnologia BIM sia in forte crescita rispetto a quella CAD. Quest'ultima ha subito dal 2004 in poi un cambio di rotta mentre le ricerche basate sul BIM hanno avuto una tendenza opposta, crescendo anno dopo anno.

### 2.3.2 Che cos'è il BIM

«Il *Building Information Modeling* è costituito dall'insieme dei processi applicati per realizzare, gestire, ricavare e comunicare informazioni tra soggetti a livelli differenti, utilizzando dei modelli creati da tutti i partecipanti al processo edilizio, in tempi diversi ed anche per scopi non uguali tra loro, per garantire qualità ed efficienza attraverso l'intero ciclo di vita di un manufatto (Osello 2012)». Spesso si utilizza l'acronimo BIM per *Building Information Model* o *Beyond Information Model*, soffermandosi esclusivamente sulle potenzialità del modello in quanto oggetto. Lo scopo di questa tecnologia è invece quello di soffermarsi sulle attività che ruotano intorno al processo edilizio, e di come con il BIM ci si possa occupare non solo della fase di progettazione, ma anche della fase di esecuzione e di gestione.

Molto spesso la progettazione in ambiente BIM viene utilizzata per velocizzare la modellazione dei componenti geometrici tridimensionali. Questa operazione anche se vera (BIM è anche modellazione 3D) è limitante, perché non tiene conto dell'I del BIM, ovvero *Information*. Il modello realizzato con software BIM deve essere la rappresentazione tridimensionale di un edificio ma più di ogni altra cosa deve contenere le proprietà degli oggetti oltre alla loro rappresentazione grafica.



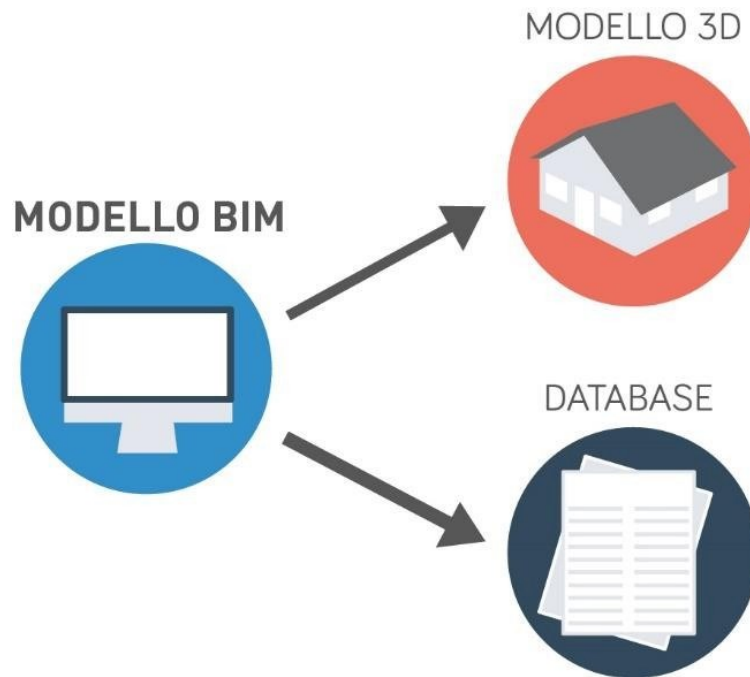


Fig.4 - Struttura di un Modello BIM

La modellazione di elementi geometrici ricchi di informazioni permette la creazione di un database comune, ovvero di un'unica piattaforma in cui i dati risultano sempre aggiornati. Questo database può essere arricchito e gestito da tutti gli attori del processo edilizio, i quali possono modellare le proprie geometrie e aggiungere le proprie informazioni. Il campo dell'edilizia presenta lavorazioni di tipo diverso ognuna delle quali prevede software con formati differenti. Questa pluralità di formati finisce col produrre forti ripercussioni sulla qualità del progetto. Il BIM invece incorpora i dati del prodotto all'interno di un modello tridimensionale che può essere utilizzato da tutti i membri del settore per una gestione efficace delle informazioni durante l'intero ciclo di vita del progetto.

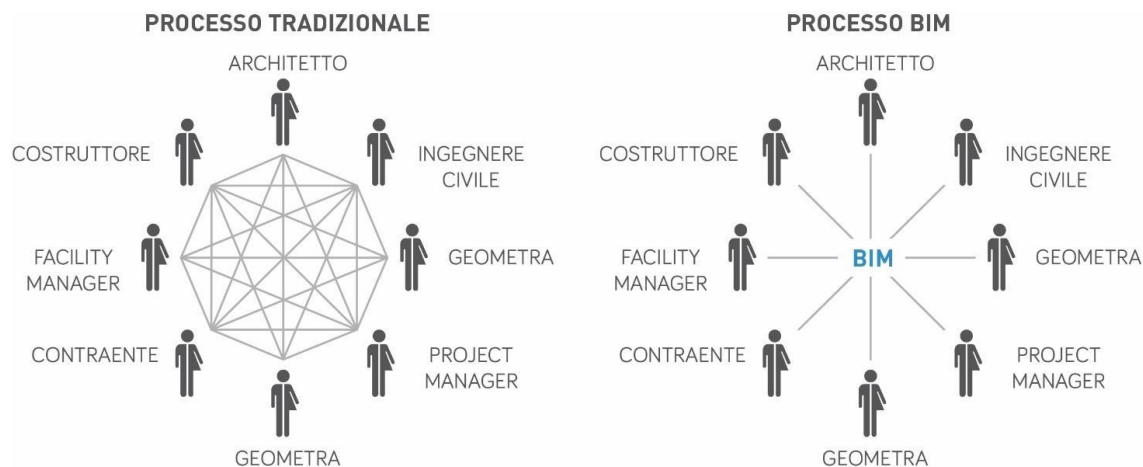


Fig.5 - Confronto dello scambio di dati nell'industria AEC con metodo di lavoro tradizionale e con metodo di lavoro integrato

Tutto ciò consente ai progettisti di poter prima avere a che fare con il modello tridimensionale, poi modellare il proprio progetto ed infine condividerlo al progettista successivo. In questo modo è possibile individuare varie sovrapposizioni e possibili interferenze in fase di progetto. Questa caratteristica propria del BIM viene chiamata "interoperabilità" ed è descritta in maniera più completa nel capitolo 2.3.5.

La creazione di un database comune e lo scambio di dati tra i diversi progettisti consentono quindi la gestione di un edificio lungo tutto il ciclo di vita. Questo permette di gestire un modello sia in fase di creazione sia nelle fasi di costruzione, manutenzione, gestione e ristrutturazione.



Fig.6 - Gestione di un progetto BIM durante tutto il ciclo di vita

Il BIM è quindi un'occasione per un'intera revisione del processo di investimento, di progettazione, di realizzazione e di gestione di un manufatto.

Il modello BIM può quindi essere usato per valutare i tempi e i costi di costruzione oltre che quelli di gestione e manutenzione.

Tali vantaggi sono rappresentati in un grafico elaborato da Patrick MacLeamy, architetto dello studio HOK e fondatore di *Building Smart*, organizzazione internazionale nata con lo scopo di migliorare lo scambio di informazioni nel BIM.

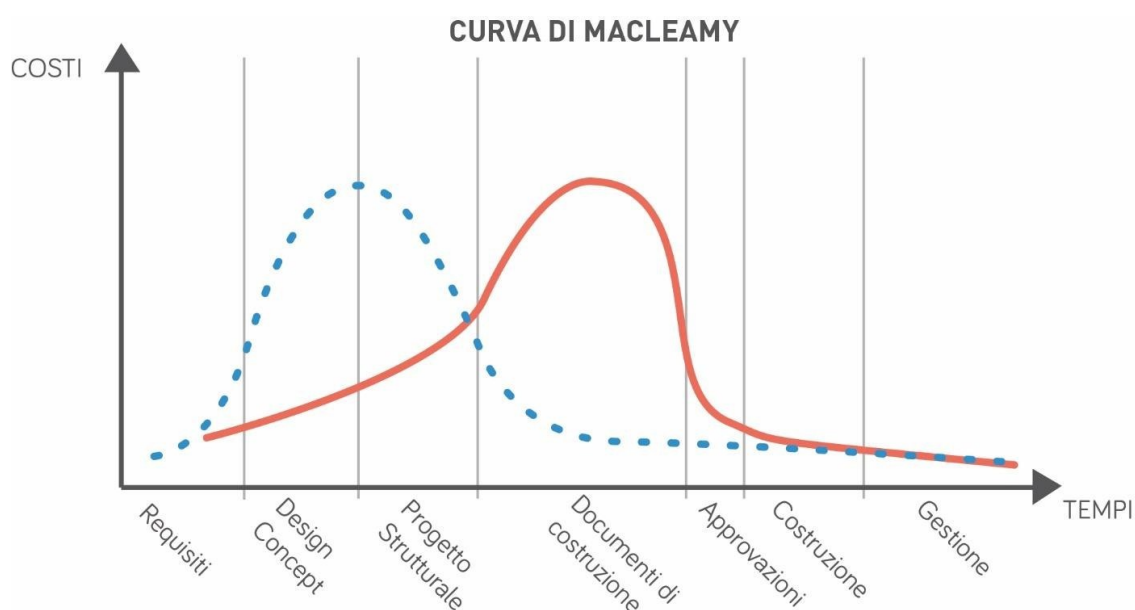


Fig.7 - Rielaborazione grafica della Curva di MacLeamy

Nella fig.7 sono rappresentati lungo l'asse delle ordinate i costi di un progetto e lungo l'asse delle ascisse le varie fasi del processo edilizio, ovvero i tempi. Ciò che fa il grafico è mettere in comparazione un processo di progettazione tradizionale (linea continua) con un processo di progettazione integrato (linea tratteggiata) come avviene nel caso del BIM. Entrambi i progetti, pensati con diversi processi, iniziano e finiscono nello stesso arco di tempo, quello che cambia è però l'incidenza dei costi sulle varie fasi del processo edilizio: il grafico mostra come i costi più elevati della progettazione in BIM siano maggiormente concentrati lungo la fase di progettazione, con costi molto ridotti nella fase di costruzione e approvazione; nella progettazione tradizionale invece si ha l'illusione di avere costi ridotti lungo la fase di progettazione, ma le possibili complicazioni in fase di cantiere possono comportare dei contrattempi, causando un aumento dei costi.

L'obiettivo di questo grafico non è quello di convincere i progettisti a ridurre gli sforzi progettuali bensì comunicare agli attori del processo edilizio che sforzi maggiori in fase di progettazione comportano minori costi in fase di costruzione.

### 2.3.3 I livelli del BIM

Un concetto fondamentale da acquisire per comprendere l'implementazione progressiva della metodologia BIM nell'industria delle costruzioni, riguarda i cosiddetti Livelli BIM, detti anche livelli di maturità. Spesso negli appalti pubblici che richiedono l'utilizzo della metodologia, viene specificata l'obbligatorietà dell'utilizzo di un grado specifico di BIM per lo sviluppo del progetto. Si tratta di un concetto che mira a definire i diversi stati evolutivi esistenti entro i quali si deve operare al fine di ottenere un prodotto integrato e collaborativo con i sistemi BIM. Il mondo della costruzione ha capito che qualsiasi cambiamento improvviso può compromettere le prestazioni e i risultati, anche se percepiti per ottenere un miglioramento. Ecco perché è necessario attuare un graduale ma deciso cambiamento nei modi di lavorazione per familiarizzare con le nuove tecnologie offerte, sia software che hardware. A tale scopo, sono state stabilite una serie di fasi fondamentali facilmente identificabili che formano i vari livelli di sviluppo BIM.

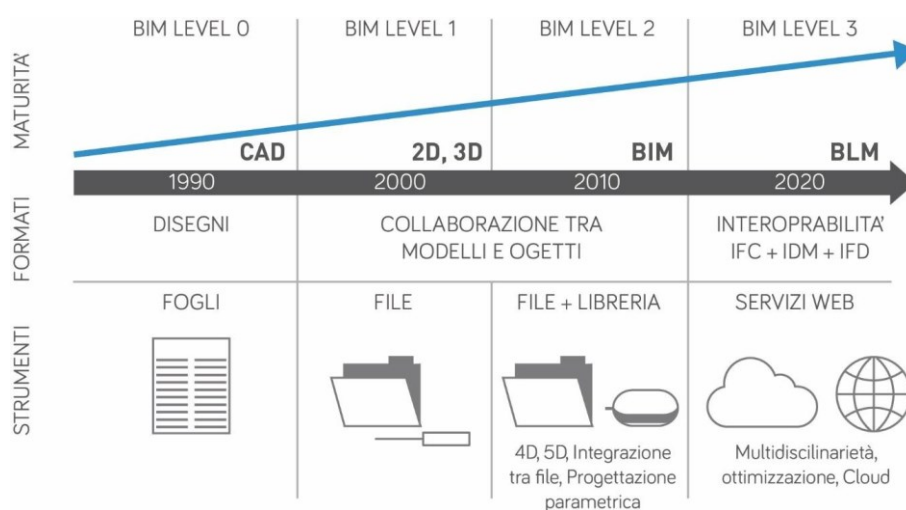


Fig.8 - Rielaborazione grafica dell'iBIM di Bew e Richards apparso nell' *UK Government Construction Client Group* (GCCG) nel 2011 e rielaborato da Neeley, Bernstein e Jezyk

Esistono quattro livelli diversi che definiscono il grado di maturità che vanno da zero a tre; a volte però il passaggio da un grado all'altro è questione di discussione. Tuttavia, possiamo definire i livelli come segue:

## **Livello 0**

Il livello 0 definisce lo stato di lavoro in cui non esiste alcun tipo di collaborazione, cioè dove ciascuno degli agenti coinvolti in un progetto elabora la propria documentazione, e il trasferimento di informazioni è limitato. Corrisponde alla metodologia tradizionale di lavoro, quella che è stata utilizzata per 15-20 anni. Il modo di disegnare e di rappresentare è totalmente in due dimensioni e il metodo di comunicazione e di presentazione utilizza la carta o planimetrie stampate mediante plotter. Lo scambio dell'informazione viene eseguito mediante documenti testuali. La tecnologia è basata sul software CAD. Possiamo sostenere che questo è il grado conosciuto dalla maggior parte dell'utenza, e non è considerato come un vero e proprio BIM.

## **Livello 1**

Al livello 1 troviamo già un mix di 2D e 3D con il software CAD. Lo scopo del disegno tridimensionale è quello di mostrare in modo più rappresentativo e di conseguenza più comprensivo i progetti, per avere una chiara concettualizzazione di ciò che viene disegnato e dall'impatto che comporta. D'altra parte, la documentazione 2D (le piante e i dettagli), fornisce informazioni di progetto da un punto di vista più tecnico e funzionale, per fronteggiare le richieste dei capitolati e quindi eseguire il lavoro stabilito. Questo modo di lavorare è ancora attualmente il più comune negli uffici di architettura e di ingegneria, poiché l'interdisciplinarietà fra i corpi partecipativi, viene attuata saltuariamente e i modelli progettuali non sono condivisi fra i partecipanti del team di progettazione.

## **Livello 2**

Il livello 2 è definito dall'introduzione di un'attività collaborativa nella metodologia del lavoro. E' il primo livello che davvero può essere considerato come una tecnologia BIM. Siamo in un processo di lavoro in cui tutti i partecipanti del team lavorano con strumenti CAD oppure già con BIM, ma non tutti utilizzano necessariamente lo stesso modello condiviso. Comunque questo livello è caratterizzato dalla collaborazione integrata da parte di tutti i membri del gruppo di lavoro (architetti, strutturisti, impiantisti), grazie allo scambio d'informazione tra i vari operatori del settore. Tutto il modello, o parte delle informazioni di

progettazione e della documentazione, è condiviso da un formato file collettivo: racchiuso in un archivio comune o individuale. Ciò consente a qualsiasi utente di utilizzarlo in caso di organizzazione combinata dei dati, e impiegarlo al fine di creare un modello BIM federato, in cui si possono effettuare verifiche e controlli interrogativi (clash detection) . Come vedremo più avanti, esistono vari tipi di file standard che consentono lo scambio di dati, soprattutto evidenziando i file di formato IFC e COBie.

### **Livello 3**

Infine, il livello 3 o anche conosciuto come Open BIM, è caratterizzato dalla collaborazione e l'interoperabilità tra i vari partecipanti, tramite lo sviluppo di un modello unico che è condiviso da un server centralizzato accessibile da qualsiasi operatore in qualsiasi luogo. Questo livello corrisponde alla destinazione finale di questa metodologia, ben lungi dall'essere raggiunto da tutti gli agenti coinvolti nella costruzione. Inoltre per prefigurare un quadro che sostenga questa forma di lavoro, manca ancora definire alcuni aspetti giuridici, ma soprattutto, occorre assimilare e consolidare la novità da parte del settore. Con il raggiungimento di questo livello sarà possibile lavorare su tutto il ciclo di vita di un edificio, ottenendo finalmente l'integrated BIM a tutti gli stati dell'edificio.

#### **2.3.4 Principi metodologici del BIM**

Il BIM è una tecnologia di modellazione dotata di un set di processi che ha come fine quello di produrre, comunicare ed analizzare un modello di edificio. Gli aspetti caratteristici sono i seguenti:

- i componenti della costruzione sono oggetti parametrici digitali che hanno una propria rappresentazione grafica e vari attributi che, identificati nei vari software attraverso norme parametriche, permettono loro di essere manipolati in maniera intelligente;
- gli elementi geometrici includono dati che descrivono il comportamento durante analisi o processi di lavoro (takeoff, prestazioni, analisi energetiche);
- i dati sono coerenti e non ridondanti in modo tale che le modifiche siano rappresentate in tutte le viste;

- i dati ed i riferimenti si richiamano ad un unico database comune, in modo tale che l'informazione sia sempre aggiornata e che il rischio di errore sia minimo.

#### 2.3.4.1 Elementi parametrici del BIM

Charles Eastman in *An Outline of the Building Description System* aveva già spiegato che la modellazione in ambiente BIM avviene tramite la creazione di alcuni elementi parametrici che includono informazioni circa le prestazioni strutturali, costruttive, di operatività o manutenzione.

In alcuni software BIM, come ad esempio *Revit*, è possibile raggruppare questi oggetti parametrici tramite dei parametri in comune, per facilitarne la modellazione e parametrizzazione. Una famiglia infatti rappresenta un insieme di elementi caratterizzati da proprietà comuni, denominati parametri, con una rappresentazione grafica correlata. Le variazioni dei parametri all'interno di una famiglia vengono chiamate "tipi" o "tipi di famiglia".

I tipi di famiglia sono tre:

- famiglia di sistema;
- famiglia caricabile;
- famiglia locale.

La famiglia di sistema, come lascia intuire il nome, è una famiglia già presente nel software che funge da famiglia "base". A partire da questa è possibile creare un elemento base (come un muro, un arredo, un pavimento) e cambiarne i suoi parametri. Partendo da una famiglia di sistema di un muro di solo laterizio è inoltre possibile duplicare la famiglia in questione, cambiarne le impostazioni ed ottenere un nuovo tipo di muro.



Fig.9 - Famiglie di sistema di un muro in Revit

Fonte: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)

Questo tipo di famiglia non è importabile o esportabile in altri software ma si presenta come la maniera più intelligente per una corretta modellazione parametrica.

La famiglia caricabile invece è un tipo di famiglia utilizzata per la creazione di tutti quegli oggetti parametrici digitali che non si trovano nelle famiglie di sistema.



Fig.10 - Famiglia caricabile di una sedia in Revit

Fonte: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)

Può quindi essere creata da zero per la modellazione di porte, finestre, arredi, impianti e alberi, oppure per la creazione di elementi di annotazione come simboli



e cartigli. La sua realizzazione incomincia da un layout, fornito dal software, più adatto alle esigenze di modellazione: il layout di una porta sarà quindi diverso da quello per gli impianti. Inoltre la modellazione può avvenire partendo da una famiglia caricabile esistente, in quanto è permessa l'esportazione tramite un file di tipo RFA. Per ultimo, la famiglia locale è un elemento creato per un oggetto unico all'interno del progetto, che non ha somiglianza geometrica con nessun altro elemento.

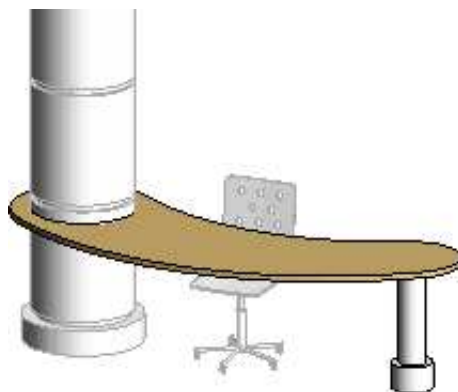


Fig.11 - Famiglia locale in Autodesk Revit

Fonte: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)

È il caso di muri rastremati, geometrie insolite come i tetti non standard oppure qualsiasi componente che non si intende riutilizzare. Anche questo tipo di famiglia viene creata da un template esistente e può essere esportata.

#### *2.3.4.2 Database*

Il programmatore Charles Eastman fu il primo a creare il software BIM nel 1974. All'interno della sua pubblicazione scriveva che la parametrizzazione degli elementi modellati era gestita attraverso un database in grado di raccogliere tutte le informazioni (e quindi i parametri) di tutte le famiglie modellate. Ad oggi i software BIM hanno ovviamente fatto notevoli passi avanti, rendendo visibili tutte queste informazioni tramite la stesura di abachi e computi metrici.

<b>Abaco delle porte</b>			
Nome Locale	Famiglia e tipo	Altezza	Larghezza
1. Camera da letto	Pannello - Porta Singola in Vetro (1): 94 * 278	2.74	0.88
1. Dispensa	Scorrevole Semplice: 60 x 210 cm	2.10	0.60
1. Cucina	Pannello - Porta Singola in Vetro (1): 94 * 278	2.79	0.92
1. Cabina armadio	Porta - 1 Anta: 80x210 cm	2.10	0.80
1. Bagno in camera	Scorrevole Semplice: 60 x 210 cm	2.10	0.60
1. Soggiorno	Pannelli Scorrevoli: pannelli scorrevoli	2.00	1.00
2. Cucina	Pannello - Porta Singola in Vetro (1): 94 * 278	2.65	0.96
2. Camera matrimoniale	Porta - 1 Anta: 90x210 cm	2.10	0.90
2. Camera matrimoniale	Porta - 1 Anta: 90x210 cm	2.10	0.90
2. Camera matrimoniale	Porta - 1 Anta: 90x210 cm	2.10	0.90
1. Camera da letto	Porta - 1 Anta: 70x210 cm	2.10	0.70
1. Bagno	Scorrevole Semplice: 60 x 210 cm	2.10	0.60
2. Soggiorno	Porta - 1 Anta: 80x210 cm	2.10	0.80

Fig.12 - Esempio di un abaco di famiglie relativo alle porte

La fig.12 mostra come sia possibile avere in unica tabella tutti i tipi di porte presenti nel modello, catalogate in base al locale in cui esse sono presenti, al loro nome e alla loro larghezza e altezza. È possibile ottenere questo tipo di abaco con tutte le famiglie presenti nel modello, a seconda delle loro caratteristiche di parametrizzazione. Porte, finestre, portefinestre, arredi, elementi di illuminazione e via dicendo possono essere catalogati e disposti in un abaco, che poi può essere a sua volta esportato in software esterni.

Un'altra funzione molto utile è quella relativa al computo metrico. Ogni famiglia del software è costituita da un determinato tipo di elementi architettonici, che a loro volta sono costituiti da diversi materiali. Questi materiali presentano diverse caratteristiche di costo, volume, spazio, resistenza al rumore e calore. Con questa funzione è possibile capire la quantità di laterizi, di calcestruzzo o di pitture presenti all'interno del progetto, in modo da ricavare la quantità di materiali necessari per una futura realizzazione.

<b>Computo dei materiali cls</b>			<b>Computo dei materiali laterizio</b>			<b>Computo dei materiali pietra lav.</b>		
Nome materiale	Area	Volume	Nome materiale	Area	Volume	Nome materiale	Area	Volume
Calcestruzzo	67.41 m <sup>2</sup>	18.28 m <sup>3</sup>	Laterizio	178.12 m <sup>2</sup>	23.27 m <sup>3</sup>	Intonaco lava	53.22 m <sup>2</sup>	0.80 m <sup>3</sup>
10	67.41 m <sup>2</sup>	18.28 m <sup>3</sup>		178.12 m <sup>2</sup>	23.27 m <sup>3</sup>		53.22 m <sup>2</sup>	0.80 m <sup>3</sup>

Fig.13 - Es. di un computo di famiglie relativo a materiali come cls, laterizio e intonaco.

Queste funzioni sono rese possibili grazie allo schema generale con cui è costruito il database.

Il database è costituito da categorie di oggetti, elementi e simboli di annotazione catalogate in più classi denominate *class*. Ognuna ha un proprio campo specifico di applicazione: *platform, structure, architecture, MEP, obsolete, pre-existing, new, updated*. All'interno di queste classi sono presenti tutti i parametri che compongono il modello tridimensionale e contribuiscono a rendere il progetto un modello tridimensionale intelligente.

### **2.3.5 Interoperabilità**

Negli ultimi decenni si sono costituite diverse software house il cui intento è stato quello di produrre ed immettere nel mercato numerosi applicativi differenti tra loro.

Ogni studio acquista un software in base al prezzo o al tipo di lavoro da svolgere e riceve documenti e file da altri studi che utilizzano software diversi: il risultato finale è una grossa ragnatela ricca di formati. Ogni software house infatti assegna al proprio software un tipo di formato diverso da quelli delle altre case, obbligando l'utente a dover acquistare il proprio per poterne leggere i contenuti.

Se ipotizzassimo che nessun addetto ai lavori utilizzi carta e penna durante la fase di progettazione e assegnassimo un software diverso ad ogni attore del processo edilizio, verrebbe fuori che i formati file maggiormente utilizzati sarebbero DOC, PDF, DWG, DWF, RTF, DXF. Questa pluralità di formati comporta delle complicazioni nell' *Architecture, Engineering & Construction Industry* (AEC) settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni.

Per ovviare a questo problema, nel 1994 la software house *Autodesk* ha realizzato un consorzio cui hanno preso parte diverse aziende, con lo scopo di creare un formato file comune che supportasse lo sviluppo di applicazioni integrate. Tre anni dopo, nel 1997, l'organizzazione *Building Smart* (organizzazione internazionale che mira a migliorare lo scambio di informazioni tra applicazioni software utilizzate nel settore edile) ha espresso la volontà di sviluppare e promuovere il formato *Industry Foundation Class* (IFC) come modello dati neutro di prodotto dell'edilizia, utile a raccogliere informazioni lungo tutto il ciclo di vita di un edificio.

Si diffuse rapidamente una notevole risonanza sia sul mercato che tra società e professionisti, per cui l'anno successivo, fu istituita l'Industry Alliance for Interoperability (IAI). Lo scopo principale che s'imposero, era quello di sviluppare un "formato" di comunicazione in grado di contenere tutte le informazioni fondamentali degli elementi coinvolti nella produzione edilizia, con l'ambizione di gestire al meglio l'eterogeneità delle informazioni. L'IAI venne rinominata nel 2007 BuildingSMART e conta attualmente sedi regionali in Europa, Nord America, Australia, Asia e Medio Oriente.

Se è pur vero che nella teoria tutte le applicazioni BIM che supportano IFC possono leggere, creare e scambiare informazioni con altri programmi, molte volte, la realtà delle cose non è come ci vorrebbero far credere. Ci sono ancora vari problemi che intercorrono fra le varie piattaforme, la compatibilità non è totale tra le applicazioni, e spesso volte ci si imbatte in "bugs" o perdite di dati. Nonostante ci siano delle piccole avversità, questi problemi rimangono solo una questione di tempo per raggiungere le piene potenzialità del formato IFC, che rimane indubbiamente uno strumento molto valido ed efficace quando si tratta di sviluppare un progetto a larga scala su più software; consentendo di risparmiare tempo e ottenere un processo progettuale di alto profilo.

I dati relativi al modello di costruzione vengono definiti una sola volta da ciascun agente e quindi condivisi dagli altri agenti coinvolti nel processo. La metodologia di approccio cooperativo alla progettazione, viene denominata dalla BuildingSMART openBIM. Un processo "open" che consente ai soggetti che lavorano come parte del progetto di condividere dati con qualsiasi applicazione BIM che fa uso di standard IFC.

La complessità che si può raggiungere avendo un solo file per progetto, fa sì che stanno nascendo nuove figure professionali che si occupano di gestire il progetto in tutte le eventuali fasi:

- Bim Specialist

E' una figura professionale che si occupa di tutto ciò che riguarda la creazione e lo sviluppo del modello 3D e dell'esportazione della documentazione (piante e prospetti, ecc.). in pratica è colui che esegue

materialmente il progetto e si occupa anche delle analisi tecniche (computo, strutturale, impiantistico, di sostenibilità ambientale).

- Bim Coordinator

E' chi si occupa di aggiornare e sviluppare i contenuti BIM (standard e librerie) ed ha la funzione di coordinare i Bim Specialist coinvolti nel progetto che dovranno garantire l'applicazione degli standard e dei processi.

- Bim Manager

Ha il compito di dirigere e aggiornare il modello Bim in toto, intervenendo nel monitorare tutte le discipline che lo compongono e coordinando le attività delle altre due figure. Garantisce inoltre il coordinamento del progetto, attraverso la gestione dei ruoli e delle fasce previste, individua le eventuali interferenze riassegnando all'interno del team di progetto la relativa correzione.

L'utilizzo del formato IFC esportato per esempio dalla modellazione con REVIT, potrebbe essere utilizzato per essere importato con programmi di render 3dmax o LUMION, ma anche in programmi che creano diagrammi di Gantt, per la programmazione dei progetti o programmi come Acca Primus, o per la realizzazione di computi e preventivi.

Per garantire uno scambio d'informazioni tra applicativi la BuildingSmart si basa su una tecnologia che si appoggia su cinque standard di base:

- Process Standard - Information Delivery Manual (IDM)

*BuildingSMART processes (IDMs) capture (and progressively integrate) business process whilst at the same time providing detailed specifications of the information that a user fulfilling a particular role would need to provide at a particular point within a project.*

*To further support the user information exchange requirements specification, IDMs also propose a set of modular model functions that can be reused in the development of support for further user requirements.*

- Data Standard - Industry Foundation Class (IFC)

*Industry Foundation Classes (IFC) BuildingSMART is all about the sharing of information between project team members and across the software applications that they commonly use for design, construction, procurement, maintenance and operations. Data interoperability is a key enabler to achieving the goal of a buildingSMART process. BuildingSMART has developed a common data schema (IFC) that makes it possible to hold and exchange relevant data between different software applications.*

- **Change Coordination - BIM Collaboration Format (BCF)**  
*BCF is a 'simplified' open standard XML schema that encodes messages to enable workflow communication between different BIM (Building Information Modeling) software tools. Developed by Tekla Corporation and Solibri Inc, it is currently a pre-release that has been submitted to buildingSMART under the new "Affiliation Scheme" to become an official buildingSMART specification.*
- **Mapping of Terms - International Framework for Dictionaries (IFD)**  
*The Data Dictionary is one of the core components of the buildingSMART technology. The bSDD is a reference library based on the IFD standard and intended to support improved interoperability in the building and construction industry. The bSDD provides a flexible and robust method of linking existing databases with construction information to a buildingSMART based Building Information Model (BIM).*
- **Process Translation - Model View Definition (MVD)**  
*Model View Definitions (MVDs) define the subset of the IFC data model that is necessary to support the specific data exchange requirements of the AEC industry during the life-cycle of a construction project.  
A Model View Definition provides implementation guidance (or implementation agreements) for all IFC concepts (classes, attributes, relationships, property sets, quantity definitions, etc.) used within a particular subset. It thereby represents the software requirement specification for the implementation of an IFC interface to satisfy the exchange requirements.*

### 2.3.5.1 Common Data Environment (CDE)

Il Common Data Environment (CDE) è un sistema informatico utilizzato per la gestione dei dati e la documentazione relativa a un progetto edilizio. Questo fornisce una piattaforma centralizzata per la condivisione e la gestione dei dati tra tutte le parti coinvolte in un progetto edilizio, come progettisti, costruttori e proprietari.

L'utilizzo di un CDE può migliorare l'interoperabilità del processo edilizio in quanto consente una facile comunicazione e condivisione dei dati tra tutte le parti coinvolte. Ciò può contribuire a ridurre gli errori, migliorare l'efficienza e aumentare la qualità del progetto.

Il Building Information Modeling (BIM) è un processo che utilizza un modello digitale per la progettazione, costruzione e manutenzione degli edifici. Tale processo può essere utilizzato in combinazione con un CDE per creare un ambiente di lavoro collaborativo e condiviso per i progetti edili.

Il funzionamento di un CDE dipende dalla specifica piattaforma utilizzata, ma in generale consente di:

- Creare una struttura di cartelle per organizzare i dati del progetto, come i documenti, i disegni e i modelli BIM
- Condividere i dati del progetto con i membri del team, in modo che possano accedere e utilizzare i dati in modo efficace
- Registrare i cambiamenti dei dati del progetto, in modo da poter rintracciare eventuali modifiche o errori
- Impostare i permessi di accesso per i dati del progetto, in modo da garantire che solo i membri del team autorizzati possano accedere ai dati sensibili
- Integrare i dati del progetto con altri strumenti utilizzati dal team, come i calendari, i fogli di calcolo e i programmi di progettazione

### 2.3.6 Le dimensioni del BIM

Le dimensioni del BIM sono l'elemento peculiare che ha reso così importante questa metodologia. Per "dimensioni", in BIM, s'intende tutti i tipi d'informazione che possono essere gestite mediante l'utilizzo dei vari applicativi sotto un determinato aspetto. Per spiegarlo meglio in altre parole, come già detto precedentemente: il

BIM non è altro che un modello tridimensionale in cui possiamo aggiungere delle informazioni. Tuttavia a questo modello di dati integrato (3D) possono essere aggiunte più dimensioni come: il tempo, i costi, la gestione, le verifiche.

- BIM 4D

Al modello viene aggiunta la dimensione del tempo. Cioè, una sequenza di costruzione può essere assegnata a ciascun elemento. Ci consente di controllare le dinamiche del progetto, eseguire simulazioni delle diverse fasi di costruzione, progettare il piano di esecuzione e anticipare le possibili difficoltà, aumentando così la produttività e facilitando il rispetto delle scadenze inizialmente pianificate.

- BIM 5D

Questa dimensione riguarda il controllo dei costi e la stima delle spese di un progetto, esercitando così un maggiore controllo sull'informazione contabile e finanziaria e quindi migliorando la redditività del progetto e facilitando l'adempimento dei budget inizialmente previsti.

- BIM 6D

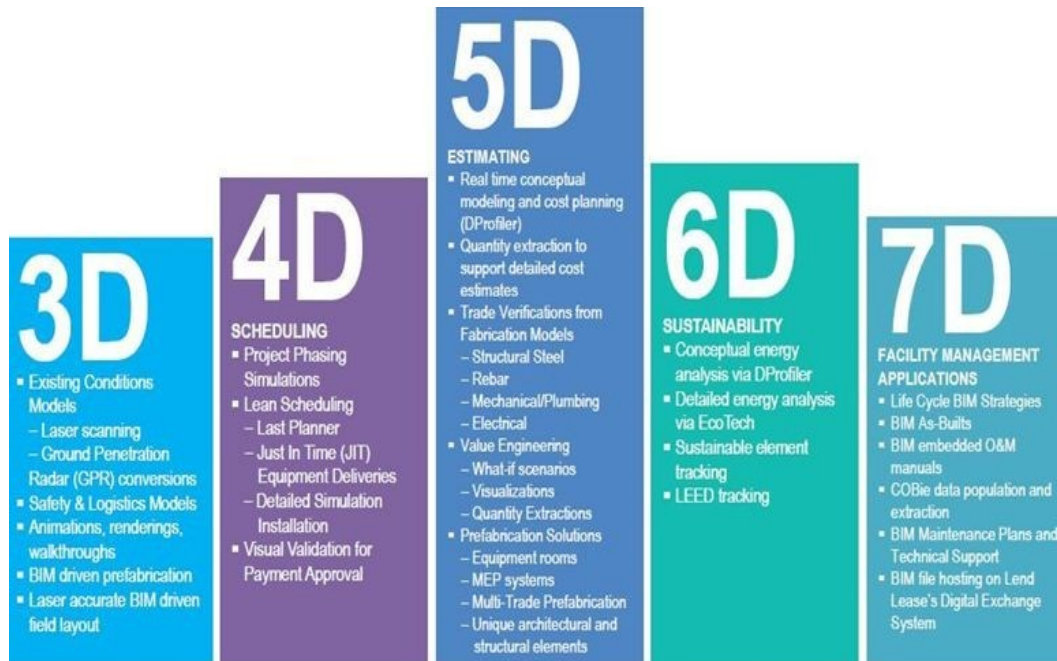
La sesta dimensione del BIM (detta anche Green BIM), è legata a un fattore di fondamentale importanza, la sostenibilità dell'edificio. Ciò ci dà l'opportunità di sapere quale sarà il comportamento del progetto prima della realizzazione. Prendendo in considerazione preventivamente la posizione, l'orientamento, la conduttività termica dei materiali, si potranno effettuare scelte progettuali più ponderate a favore della sostenibilità. Eseguendo queste analisi energetiche con un software specifico, il progetto può ridurre significativamente il consumo energetico.

- BIM 7D o Facility Management

È la dimensione utilizzata per le operazioni di manutenzione degli impianti durante la vita utile degli edifici, si tratta di un modello *as-built* della costruzione, ovvero la descrizione dell'opera com'è nella realtà. Questo permette di conoscere lo stato delle strutture, le specifiche sulla loro manutenzione, i manuali d'uso, le date di garanzia, ecc. È appunto tenendo sotto controllo l'edificio che si riesce a garantire ed ottimizzare la gestione dell'edificio fino alla sua demolizione a fine vita. Una volta che l'edificio è



stato costruito, il produttore inserisce le informazioni di costruzione, e via che si realizzano lavori, sostituzioni, modifiche il modello viene aggiornato in contemporanea.



### 2.3.7 LOD

Come ripetutamente evidenziato, quando realizziamo un progetto con la metodologia BIM, tutti gli elementi sono racchiusi in un unico modello che viene utilizzato da tutti gli attori coinvolti nella progettazione. Questo è considerato uno dei cavalli di battaglia di questa metodologia, ma come per la progettazione 2D, anche qui è fondamentale scegliere un grado di dettaglio per la realizzazione del modello tridimensionale, cercando di raggiungere un'integrità di progetto non contrastante fra gli elementi utilizzati da tutte le discipline.

Se nella progettazione 2D il livello di dettaglio veniva dettato dalla scelta della scala grafica e dalle convenzioni utilizzate, o nella peggiore delle ipotesi in caso non fosse specificata la scala, da un particolare del disegno e dalle sue parti quotate; qui le cose si complicano un po', difatti non è possibile capire il grado di complessità di un progetto solo prendendo un elemento singolo, ma si dovrà sottostare ad altre specifiche convenzioni.


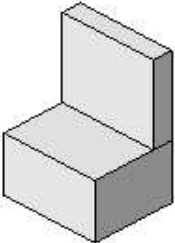


A prescindere dal software impiegato per la progettazione, il livello di dettaglio è definito in base all'inserimento di un'accurata e dettagliata descrizione delle informazioni. Più un modello è dettagliato d'informazioni, e più ci permette di stabilire la complessità del progetto, riuscendo così a comprendere quali sono le limitazioni o le eventuali potenzialità che possiamo sfruttare. In questo modo sapendo quali sono gli obiettivi da raggiungere nel progetto, riusciremo a definire un livello di dettaglio consono.

Con quest'ottica di pensiero non sarà più compito di una sola persona redigere un unico elaborato scegliendo il grado di dettaglio, ma verrà espresso chiaramente per tutti gli autori. Questo dà la possibilità di raggiungere così un grado di affidabilità maggiore, che permetterà una più facile cooperazione fra i vari addetti nella realizzazione del processo edilizio.

Per far fronte all'esigenza di raggiungere preventivamente un grado di dettaglio unico del progetto, l'American Institute of Architects (AIA), anche non ufficialmente, ha voluto specificare una sola gerarchia di standard di definizione del modello, al fine di garantire in ogni progetto un Level of Development (Livello di sviluppo, LOD) ben preciso. Tale Livello ci permette di stabilire a priori quali debbano essere le quantità, il grado di approfondimento e di precisione delle informazioni inserite nel piano di lavoro. Lo standard ha anche il compito di assicurare che le risorse impiegate per il compimento delle richieste della programmazione, vengano raggiunte efficientemente, senza correre il rischio di dissipare più energie del dovuto, comportando così una perdita di denaro inutile.



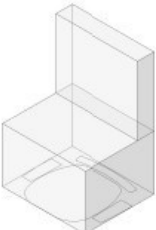


L'AIA con il documento E202 - 2008 ha definito distintamente i livelli di sviluppo, e tramite il sito Bimforum sulla quale si appoggia, fornisce nella sezione "LOD Specifications", tutte le informazioni dettagliate su ogni tipo livello e su come questi debbano essere usati nelle diverse fasi di un progetto: dal concept alla costruzione. Nella descrizione sul sito, l'AIA tiene a sottolineare le differenze che ci sono nel acronimo LOD, che stanno a indicare rispettivamente due concetti ben diversi: Level of Detail (Livello di Dettaglio) e Level of Development (Livello di Sviluppo). Il primo acronimo introdotto dall'azienda Vico Software, pioniera nel campo della computazione parametrica, indica la quantità di dettagli che sono inseriti nella modellazione; livelli di dettaglio grafico considerati come input.

# LEVEL of DETAIL

G0	G1	G2	G3
			
Schematic	Concept	Defined	Rendered
<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> <b>MODEL:</b>	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> <b>MODEL:</b>	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> <b>MODEL:</b>	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> <b>MODEL:</b>

Mentre il secondo, non indica solo la geometria in se dell'elemento, ma anche tutte le informazioni che sono state inserite relativamente al modello. Questa è la ragione che spinge gli utenti BIM a cercare, un modello affidabile e completo in cui si possano ricavare le informazioni, ecco perché è considerato come un modello che fornisce output.

# LEVEL of DEVELOPMENT

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
Concept (Presentation)	Design Development	Documentation	Construction	Facilities Management
<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> Herman Miller, Inc. <b>MODEL:</b> Mirra <b>LOD:</b> 100	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> Herman Miller, Inc. <b>MODEL:</b> Mirra <b>LOD:</b> 200	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> Herman Miller, Inc. <b>MODEL:</b> Mirra <b>LOD:</b> 300	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> Herman Miller, Inc. <b>MODEL:</b> Mirra <b>LOD:</b> 400	<b>DESCRIPTION:</b> Office Chair Arms, Wheels <b>WIDTH:</b> <b>DEPTH:</b> <b>HEIGHT:</b> <b>MANUFACTURER:</b> Herman Miller, Inc. <b>MODEL:</b> Mirra <b>PURCHASE DATE:</b> 01/02/2013

(Only data in red is useable)

practicalBIM.net © 2013

Ovviamente ogni modello che si rispetti, non contiene un unico grado di LOD che descrive l'opera, ma è composto dall'insieme di diversi elementi con grado di dettaglio e di sviluppo differenti. Nel documento fornitoci dall'AIA, i livelli che possono comporre un progetto sono descritti e classificati in maniera minuziosa e vanno dal livello 100 al 500:

- LOD100

Nel primo livello, il modello è costituito da una rappresentazione concettuale. La struttura è composta principalmente da volumi, altezze, aree, dall'orientamento e dalla posizione nello spazio. Questo volumetrico è la base di partenza del progetto, e da esso, già si è in grado di realizzare una stima approssimativa dei costi, in base alle superfici e ai volumi, nonché una stima generale sul tempo d'esecuzione dell'opera. Ovviamente questo livello non può essere considerato come un vero e proprio progetto, ma può essere molto utile come fase per uno studio previo di fattibilità da parte dei progettisti, e come modello decisionale da mostrare al cliente. Gli elementi utilizzati per la realizzazione, sono quelli predefiniti già forniti dal software. Ad esempio gli elementi muro, pilastro, plinto. Dall'informazione del volume di tutti gli elementi utilizzati, possiamo stimare benissimo un costo per mq costruito.

- LOD 200

Gli elementi di questo modello forniscono una vista generale d'insieme e possono essere rappresentati graficamente. Parliamo di: sistemi, oggetti e componenti generici, a cui vengono immesse quantità, dimensioni, forme, posizione e orientamento approssimativo. In questo livello, è anche possibile allegare agli elementi informazioni di natura non grafica, di solito utilizzate per eseguire analisi preliminari semplificate delle prestazioni. Il livello LOD 200, non si discosta molto da quello precedente, anzi, è pressoché identico, le uniche due differenze sono date dalla possibilità di determinare eventuali finiture esterne e scandire in maniera più chiara e dettagliata la divisione temporale di ciascuna fase del processo. Durante questa fase, vengono aperti i vuoti approssimativi per il passaggio della struttura e delle scale dell'edificio.

- LOD 300

In questo terzo livello le informazioni e le geometrie del modello sono molto dettagliate, sebbene esso sia privo di dettagli costruttivi. Tale accuratezza ci dà però la possibilità di creare i documenti necessari per la realizzazione di un progetto definitivo, definendo tutti i requisiti richiesti dalla normativa e fornendo un precisa giustificazione tecnica dei lavori. Inoltre possiamo computare con precisione i materiali utilizzati e fornire una programmazione per unità di lavoro. Anche le distribuzioni interne sono terminate, così come gli strati che compongono le mutature e le finiture. Grazie alle numerose informazioni presenti, si è in grado di eseguire simulazioni prestazionali dei sistemi modellati.

- LOD 350

Questo è un livello di sviluppo intermedio tra il LOD 300 e il LOD 400 che dà più specifiche tecniche rispetto al livello precedente. Se prima avevamo un modello già molto ricco d'informazioni, qui si entra ancora più nel particolare, riuscendo ad avere anche i dettagli costruttivi. Esaminando per esempio un pilastro, nel LOD 300 potevamo avere le informazioni riguardanti la forma, la struttura interna, il materiale e le dimensioni. Nel LOD 350 invece abbiamo anche le informazioni sul calcolo strutturale, dati che ci permettono di conoscere quali sono i rinforzi necessari e la loro distribuzione nel pilastro.

- LOD 400

Con questo livello, il modello raggiunge la specificità di dettaglio necessario per la realizzazione del progetto esecutivo dell'opera. Esso ci fornisce elementi fondamentali quali: informazioni dettagliate sulla fabbricazione, montaggio, assemblaggio e tutti i dettagli necessari per la costruzione dell'edificio. Possiamo verosimilmente realizzare una stima basata sugli elementi presenti nel modello molto simile alla realtà, e grazie all'accuratezza e chiarezza delle informazioni presenti, anche la programmazione temporale raggiungerà una precisione tale da avvicinarsi a quella reale. Dal modello si potrà estrapolare tutta la documentazione architettonica, strutturale, impiantistica, nonché la possibilità di eseguire la verifica delle eventuali interferenze fra elementi di costruzione e i diversi impianti (Clash detection). Indichiamo un esempio concreto prendendo in

considerazione un muro con più strati. Nel LOD 300 il muro è un unico elemento nel quale le informazioni che abbiamo specificano solo la composizione dei materiali, nel LOD 400 invece il muro viene analizzato come composto di vari strati che uniti lo compongono, e per ogni elemento viene specificato il produttore, e tutte le informazioni dettagliate del materiale.

- LOD 500

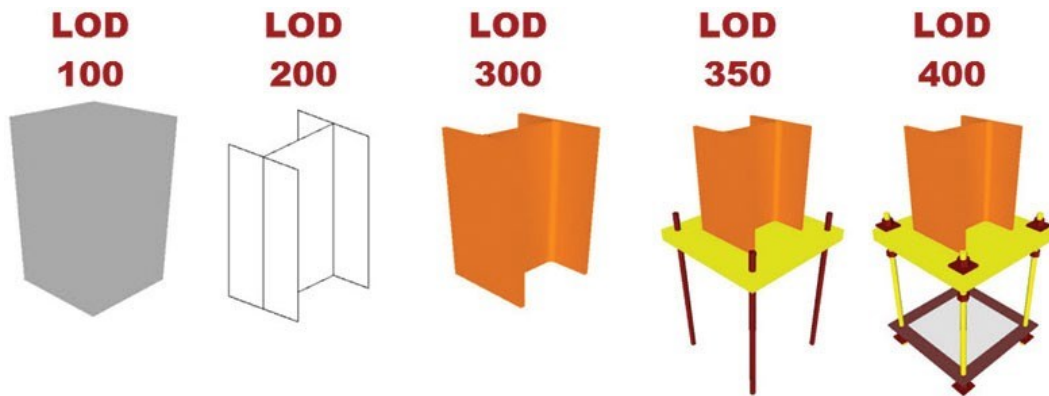
Con questo livello possiamo considerare terminata la fase progettuale dell'opera e passare alla fase di gestione. Qui abbiamo il progetto già costruito verificato e controllato in loco, per ciò che riguarda geometrie, dimensioni, posizione, quantità e orientamento. Questo è considerato lo strumento più affidabile e preciso che il Facility Management può adoperare per la gestione e la manutenzione della struttura. In esso vengono inseriti e registrati tutti i cambiamenti che la struttura ha riportato durante la sua vita. Grazie al LOD 500 siamo in grado di avere tutte le informazioni riguardanti i fornitori, i materiali utilizzati, il costo di ogni singolo elemento, la data di scadenza delle garanzie e dei rinnovi delle licenze. Sarà una copia virtuale e fedele della realtà.

- LOD 600

Recentemente, anche se nel documento E202 - 2008 fornitoci dall'AIA non viene specificato, si sente sempre di più parlare del livello LOD 600, riferito alla sostenibilità dell'opera. Grazie alla raccolta delle informazioni forniteci dal modello è possibile eseguire un'analisi energetica dettagliata e ottenere una valutazione. Chiaramente per ottenere le migliori prestazioni, è necessario che i livelli precedenti siano stati ben eseguiti e contengano informazioni verificabili ed attendibili.

- LOD 50

Si tratta di un livello poco utilizzato in campo architettonico, ma più a livello urbanistico e per valutazioni energetiche di massima. Fornisce solo una rappresentazione composta da volumi concettuali, escludendo le informazioni sui materiali e gli elementi tecnici che lo compongono.



<u>LOD 100</u>	<u>LOD 200</u>	<u>LOD 300</u>	<u>LOD 350</u>	<u>LOD 400</u>
<b>Geometria</b> Elemento architettonico verticale rappresentato mediante un simbolo 2D.	<b>Geometria</b> Solido generico per rappresentazione elemento architettonico verticale con forma, spessore e posizione approssimata.	<b>Geometria</b> Elemento architettonico verticale rappresentato con ingombri calcolati secondo la normativa tecnica.	<b>Geometria</b> Elemento architettonico verticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono modellate tutte le stratigrafie.	<b>Geometria</b> Elemento architettonico verticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono incluse tutte le stratigrafie, i dati specifici del fornitore dei materiali e le finiture.
<b>Rappresentazione</b> Grafica 2D (linee e campiture 2D)	<b>Rappresentazione</b> Solido 3D	<b>Rappresentazione</b> Solido 3D strutturato	<b>Rappresentazione</b> Solido 3D complesso	<b>Rappresentazione</b> Solido 3D complesso
<b>Attributi</b> Posizionamento di massima	<b>Attributi</b> Semplici geometrie d'ingombro	<b>Attributi</b> Definizione del sistema architettonico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spessore</li> <li>• Lunghezza</li> <li>• Larghezza</li> <li>• Volume</li> <li>• Definizione materiali</li> <li>• Definizione delle stratigrafie principali</li> </ul>	<b>Attributi</b> Dettaglio dei componenti per gruppi e senza riferimenti a singoli prodotti <ul style="list-style-type: none"> <li>• Definizione stratigrafie dettagliate</li> <li>• Spessori componenti</li> <li>• Struttura</li> <li>• Isolamento</li> <li>• Camera d'aria</li> <li>• Sottofondo supporto</li> <li>• Finitura</li> <li>• Dettagli costruttivi</li> </ul>	<b>Attributi</b> Dettaglio dei componenti con singolo prodotto.           Informazioni di montaggio           Schede tecniche singoli prodotti <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo finitura interna</li> <li>• Superficie finitura interna</li> <li>• Tipo finitura esterna</li> <li>• Superficie finitura esterna</li> <li>• Composizione Materiale/Componente</li> <li>• Presenza certificazioni</li> <li>• Capacità strutturale</li> <li>• Trasmissione acustica</li> </ul>

### 2.3.8 Vantaggi e svantaggi

Dopo aver eseguito un'analisi in maniera abbastanza approfondita per comprendere la situazione del settore delle costruzioni, e dopo aver dato uno sguardo pressoché unitario a tutto ciò che riguarda la metodologia BIM in

senso lato; Ora, abbiamo gli strumenti necessari che ci consentono di affrontare e sviluppare una metodologia BIM. Ciò ci consente di realizzare e gestire tutte le fasi di un processo edilizio: dalla fase di programmazione, progettazione, gestione e smantellamento. Come detto più e più volte, tutte le informazioni che ci permettono di sfruttare questa metodologia sono contenute in un unico modello che ci consente di estrapolare output di progetto.

Per sfruttare a pieno le potenzialità della tecnologia BIM, prima della creazione del modello, dobbiamo tenere ben a mente quali sono gli obiettivi che vogliamo raggiungere e stabilire quale sarà il livello di sviluppo appropriato. Questo può variare in base alla necessità che abbiamo di eseguire un progetto preliminare o un progetto esecutivo.

Consapevoli di ciò, possiamo riassumere brevemente quali sono le potenzialità e le limitazioni che emergono dall'analisi fin qui condotta, tirando così le somme finali su questa prima parte della nostra ricerca.

## **VANTAGGI**

La metodologia BIM presenta notevoli vantaggi in tutte le fasi del processo e per tutti gli agenti che vi intervengono. In sostanza emergono tre concetti fondamentali che apportano al progetto un contributo sostanziale: risparmio economico, risparmio di tempo, una migliore visualizzazione e comprensione del progetto.

- **Coerenza delle informazioni**  
Tutta la documentazione del progetto è contenuta in un unico modello, evitando errori derivanti da revisioni o copie eseguite a posteriori del modello. Qualsiasi modifica apportata al modello verrà aggiornata in tutte le viste e calcoli, rendendola sempre aggiornata, contenendo anche informazioni che non sono visibili nelle piante, come: costi, materiali e programma di esecuzione dei lavori.
- **Collaborazione**  
Lo scambio delle informazioni fra i diversi agenti che realizzano il modello è facilitato. Favorisce una collaborazione tra diverse discipline, evitando contraddizioni ed errori.
- **Visualizzazione 3D**



Il modello 3D è un ottimo strumento che dà l'immediatezza di comprensione dell'edificio ed è essenziale in fase di decisione progettuale prima dell'esecuzione dell'opera in quanto contiene già: materiali di finitura, elementi, ecc. Inoltre è autonomamente in grado di eseguire l'analisi dei conflitti fra gli elementi, arrivando a rilevarli ed anticiparli, correggendo le incoerenze del disegno prima della realizzazione. E' molto utile per la comprensione del progetto da parte del cliente e delle persone che non hanno familiarità con il settore.

- **Gestione**

Va da sé che tutti i vantaggi sopra elencati consentono un'amministrazione più efficiente durante la vita dell'edificio, facilitandone la riparazione e lo smantellamento. Ciò si traduce in una significativa riduzione dei costi e del tempo utilizzato nell'esecuzione dei lavori.

## **LIMITAZIONI**

Sebbene abbiamo visto che la tecnologia BIM ha molti vantaggi rispetto alla tecnologia tradizionale, è vero anche che presenta alcune criticità. Queste difficoltà ovviamente saranno risolte negli anni ad avvenire, ma per chi è a contatto con BIM nel quotidiano possono rappresentare un enorme perdita di tempo e di risorse .

- **Cambiamento di mentalità**

Ogni volta che avviene un cambiamento a livello lavorativo o di pensiero, non è facile intraprendere un nuovo modo di approcciarvisi abbandonando le vecchie abitudini. Ciò può rappresentare un ostacolo non da poco. Entrare nella filosofia BIM a discapito delle vecchie tecnologie è sicuramente uno sforzo considerevole, che si prefigura acquirerà solidità non prima di una decina d'anni.

- **Formazione richiesta**

Per entrare nella sfera del BIM e familiarizzare con questi nuovi strumenti, è quindi necessario impiegare numerose risorse sia economiche che temporali, investendo in macchine più performanti e acquistando licenze e corsi dei programmi.

- **Interoperabilità da perfezionare**

Sebbene l'interoperabilità sia il cavallo di battaglia della metodologia BIM, non possiamo ignorare che non ha ancora raggiunto un grado di efficienza tale da interagire con tutti i programmi coinvolti nel processo, in quanto si presentano ancora molte incompatibilità che costringono l'utente a passare da varie versioni del modello utilizzando diversi software. Questo comporta un calo delle prestazioni nel corso delle procedure e una perdita d'informazioni importanti.

I limiti di cui abbiamo parlato, riguardano in misura maggiore le piccole imprese, che sono meno competitive sul mercato e sono radicate alla metodologia tradizionale. Anche se il passaggio da CAD a BIM sta avvenendo lentamente, siamo fiduciosi di assistere ad una crescita esponenziale in tempi brevi, così come è successo con la tecnologia CAD.

## 2.4 GEOREFERENZIAZIONE

La georeferenziazione è il processo di associare dati o informazioni a specifiche coordinate geografiche sulla superficie terrestre. Consiste nell'assegnare una posizione geografica a un oggetto, un luogo o un dato per consentirne la localizzazione precisa sulla Terra.

La georeferenziazione è spesso utilizzata nei sistemi di informazione geografica (GIS), nella cartografia digitale, nella fotogrammetria, nella teledetenzione e in altre discipline che coinvolgono l'analisi e la gestione dei dati geografici.

Per effettuare la georeferenziazione, sono necessari punti di controllo o punti di riferimento noti che abbiano coordinate geografiche già definite. Questi punti vengono utilizzati per creare una trasformazione matematica o una griglia di coordinate che consente di assegnare coordinate geografiche ai punti sconosciuti o non georeferenziati. Una volta che l'immagine o i dati sono georeferenziati, diventa possibile visualizzarli in un contesto geografico, sovrapporli ad altre informazioni geografiche e condurre analisi spaziali.

La georeferenziazione è fondamentale per molte applicazioni, tra cui il monitoraggio ambientale, la pianificazione del territorio, la navigazione GPS, l'analisi del rischio, la gestione delle risorse naturali e molte altre attività che richiedono la conoscenza precisa della posizione geografica.

### 2.4.1 Sistema di coordinate geografiche

Il sistema di coordinate geografiche (GCS) è un sistema di coordinate sferiche o ellissoidali per misurare e comunicare le posizioni direttamente sulla Terra come latitudine e longitudine.

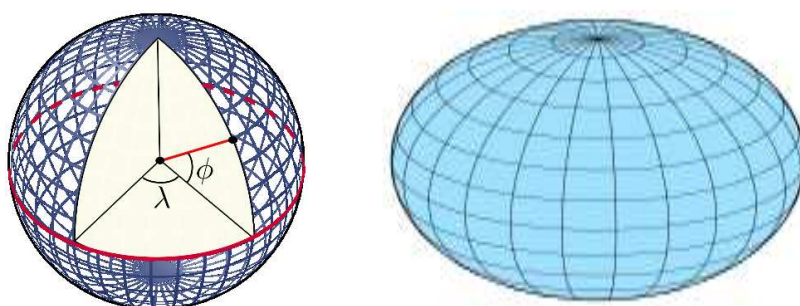
La "*latitudine*" (abbreviazione: Lat.,  $\phi$ , o phi) di un punto sulla superficie terrestre è l'angolo tra il piano equatoriale e la retta che passa per quel punto e per il centro della Terra (o quasi). Le linee che uniscono punti della stessa latitudine tracciano cerchi sulla superficie terrestre chiamati paralleli, poiché sono paralleli all'Equatore e tra loro. Il Polo Nord è a  $90^\circ$  N; il Polo Sud è a  $90^\circ$  S. Il parallelo di latitudine  $0^\circ$  è chiamato Equatore, il piano fondamentale di tutti i sistemi di coordinate geografiche.

La "longitudine" (abbreviazione: Long.,  $\lambda$ , o lambda) di un punto sulla superficie terrestre è l'angolo a est o a ovest di un meridiano di riferimento rispetto a un altro meridiano che passa per quel punto. Tutti i meridiani sono metà di grandi ellissi (spesso chiamate grandi cerchi), che convergono al Polo Nord e al Polo Sud. Il meridiano dell'Osservatorio reale britannico di Greenwich, a sud-est di Londra, in Inghilterra, è il meridiano primo internazionale. Il meridiano antipodale di Greenwich è sia 180°W che 180°E.

La combinazione di queste due componenti specifica la posizione di qualsiasi luogo sulla superficie della Terra, senza considerare l'altitudine o la profondità. Il reticolo visivo su una mappa formato dalle linee di latitudine e longitudine è noto come reticolo. L'origine/punto zero di questo sistema si trova nel Golfo di Guinea a circa 625 km a sud di Tema, in Ghana, una località spesso chiamata scherzosamente Null Island.

Per essere inequivocabili sulla direzione della superficie "verticale" e di quella "orizzontale" al di sopra della quale stanno effettuando le misurazioni, i cartografi scelgono un ellissoide di riferimento con un'origine e un orientamento determinati che meglio si adattano alle loro esigenze per l'area da cartografare.

Quindi scelgono la mappatura più appropriata del sistema di coordinate sferiche su tale ellissoide, chiamata sistema di riferimento terrestre o datum geodetico.



#### 2.4.2 GPS e GPS-RTK, precisione estrema in tempo reale

GPS, acronimo di Global Positioning System, è un sistema di posizionamento satellitare che consente di determinare la posizione esatta di un oggetto o di una persona sulla Terra. Il GPS è composto da una costellazione di satelliti in orbita intorno al pianeta e da ricevitori GPS che ricevono i segnali dei satelliti per calcolare la posizione.

Il GPS-RTK (Real-Time Kinematic) è una variante del GPS che offre una precisione molto più elevata rispetto al GPS tradizionale. Utilizza un'architettura composta da una stazione di base e uno o più ricevitori mobili. La stazione di base è posizionata in un punto con coordinate geografiche note e riceve segnali dai satelliti GPS. Utilizzando la differenza tra i segnali ricevuti dalla stazione di base e quelli ricevuti dai ricevitori mobili, viene calcolata una correzione in tempo reale che viene inviata ai ricevitori mobili per migliorare la precisione delle misurazioni. In questo modo, il GPS-RTK può fornire una precisione di posizionamento centimetrica o addirittura millimetrica.

Le principali differenze tra il GPS tradizionale e il GPS-RTK sono:

- Precisione: Il GPS tradizionale offre una precisione di posizionamento di solito nell'ordine di alcuni metri, mentre il GPS-RTK può fornire una precisione centimetrica o millimetrica.
- Tempo di elaborazione: Il GPS tradizionale fornisce la posizione dopo un certo ritardo di elaborazione dei segnali ricevuti dai satelliti. Il GPS-RTK, grazie alla correzione in tempo reale, può fornire una posizione immediata.
- Configurazione: Il GPS tradizionale richiede solo un ricevitore GPS per determinare la posizione, mentre il GPS-RTK richiede una stazione di base e uno o più ricevitori mobili per calcolare le correzioni in tempo reale.
- L'utilizzo del GPS tradizionale è diffuso in una vasta gamma di applicazioni, come la navigazione veicolare, l'orientamento all'aperto, il monitoraggio delle flotte, l'agricoltura di precisione, la geologia e molti altri settori che richiedono una precisione di posizionamento ragionevole.

Il GPS-RTK è utilizzato in applicazioni che richiedono una precisione molto elevata, come il rilevamento topografico, la progettazione e la costruzione di infrastrutture, il monitoraggio delle deformazioni del terreno, l'agricoltura di precisione avanzata e l'ispezione delle strutture. Grazie alla sua precisione elevata e alla capacità di fornire misurazioni in tempo reale, il GPS-RTK è particolarmente utile in situazioni in cui è necessaria una precisione estrema e tempi di risposta rapidi.

### 2.4.3 WGS 84

Il Sistema Geodetico Mondiale (WGS) è uno standard utilizzato in cartografia, geodesia e navigazione satellitare, compreso il GPS. È composto da un ellissoide di riferimento, un sistema di coordinate standard, dati di altitudine e un geoide. Si ritiene che l'errore del WGS84 sia inferiore a 2 centimetri rispetto al centro di massa.

La versione attuale, il WGS 84<sup>1</sup>, definisce un sistema di coordinate centrate sulla Terra e fissate sulla Terra e un datum geodetico, oltre a descrivere il Modello Gravitazionale della Terra (EGM) e il Modello Magnetico Mondiale (WMM) associati. Lo standard è pubblicato e gestito dalla National Geospatial-Intelligence Agency degli Stati Uniti.

L'origine delle coordinate del WGS 84 si intende situata al centro di massa della Terra; si ritiene che l'incertezza sia inferiore a 2 cm.

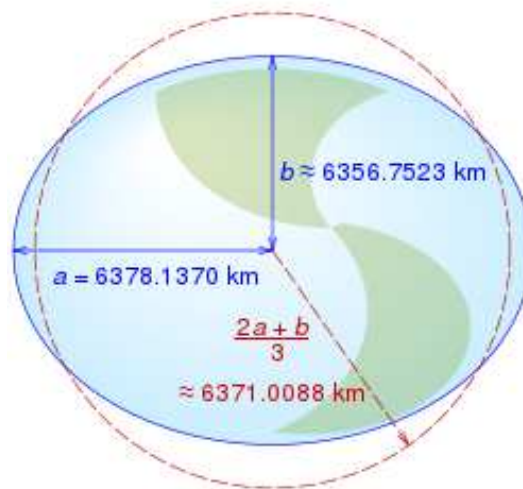
Il meridiano WGS 84 di longitudine zero è il meridiano di riferimento IERS, 5,3 secondi d'arco o 102 metri (335 piedi) a est del meridiano di Greenwich alla latitudine dell'Osservatorio Reale. Questo è legato al fatto che il campo gravitazionale locale a Greenwich non punta esattamente attraverso il centro di massa della Terra, ma piuttosto "manca a ovest" del centro di massa di circa 102 metri.

Definiamo  $a$  e  $b$  come i raggi equatoriale e polare rispettivamente:

- $a$  = raggio equatoriale della Terra, o semiasse maggiore, è la distanza dal suo centro all'equatore ed è pari a 6378,1370 km. Il raggio equatoriale viene spesso utilizzato per confrontare la Terra con altri pianeti.
- $b$  = raggio polare della Terra, o asse semiminore, è la distanza dal suo centro al Polo Nord e al Polo Sud ed è pari a 6356,7523 km.

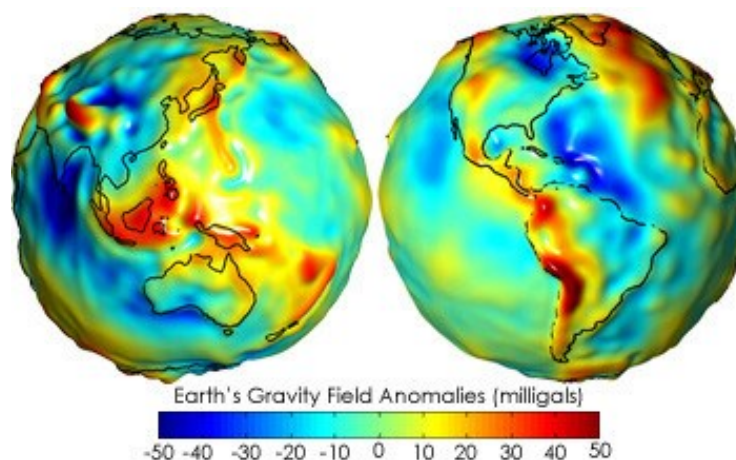
---

<sup>1</sup> GISGeography, World Geodetic System (WGS84)  
<https://gisgeography.com/wgs84-world-geodetic-system/>



La superficie di riferimento WGS 84 è uno sferoide oblato con raggio equatoriale  $a = 6.378.137m$  all'equatore e appiattimento  $f \triangleq \frac{a-b}{a} = 1/298.257223563$ . Questo porta a diversi parametri calcolati, come l'asse semiminimo polare  $b = a(1 - f) = 6356752.3142m$  e la prima eccentricità al quadrato,  $e^2 = 6.69437999014 \cdot 10^{-3}$ .

La velocità angolare della Terra è definita come  $\omega = 72.92115 \cdot 10^{-6}rad/s$ . Il valore raffinato della costante gravitazionale WGS 84 (inclusa la massa dell'atmosfera terrestre) è  $GM = 3986004.418 \cdot 10^8 m^3/s^2$ . Tuttavia, a causa delle diverse densità della Terra nei vari luoghi, ci sono molte anomalie gravitazionali in tutto il mondo. Ciò significa che il livello medio del mare non è così regolare come tutti pensano. Poiché il livello medio del mare (chiamato geoide) è spesso inteso come la base dei nostri alti e bassi, i dati verticali sono grumosi e irregolari.



L'altezza rispetto all'ellissoide è la versione più semplice dell'up-and-down. L'ellissoide<sup>2</sup> utilizza le dimensioni e la forma del datum orizzontale, come il WGS84. Fornisce una superficie liscia senza protuberanze o irregolarità. Il geoide lo descrive matematicamente. Per questo motivo, si adattano diversi ellipsoidi per approssimarlo, come il WGS84.

I geodeti hanno sviluppato per la prima volta un modello di ellissoide globale unificato solo dopo l'utilizzo dei sistemi di posizionamento globale (GPS). Le onde radio trasmesse dai satelliti GPS e la trilaterazione consentono misurazioni estremamente precise della Terra attraverso i continenti e gli oceani. I geodeti hanno potuto creare modelli di ellipsoidi globali grazie al miglioramento delle capacità di calcolo e della tecnologia GPS. Ciò ha portato allo sviluppo di modelli di ellipsoidi globali come WGS72, GRS80 e WGS84 (attuale). Il Global Positioning System utilizza il World Geodetic System (WGS84) come sistema di coordinate di riferimento.

WGS 84 utilizza il Modello Gravitazionale della Terra 2008 (EGM2008<sup>3</sup>). Questo geoide definisce la superficie nominale del livello del mare per mezzo di una serie di armoniche sferiche di grado 2160. Si tratta di un miglioramento rispetto al modello EGM96 del 1996, che a sua volta era un miglioramento rispetto al geoide WGS 84 originale, denominato EGM84. Le deviazioni del geoide EGM96 dall'ellissoide di riferimento WGS 84 vanno da circa -105 m a circa +85 m. Attualmente il WGS 84 utilizza anche il World Magnetic Model 2020. Il prossimo aggiornamento regolare (WMM2025) avverrà nel dicembre 2024.

*L'altezza ortometrica  $H$*  è l'altezza di un punto sulla superficie fisica della terra al di sopra o al di sotto del geoide, misurata lungo una linea che passa sia per il punto sulla terra sia per il punto sul geoide ed è normale alla superficie dell'ellissoide WGS-84 (lungo il filo a piombo). È l'altezza che di solito si trova sulle carte geografiche per l'elevazione del terreno.

---

<sup>2</sup> GISGeography, Ellipsoid/Spheroid - Our Oblate Spheroid Planet Earth  
<https://gisgeography.com/ellipsoid-oblate-ellipsoid-earth/>

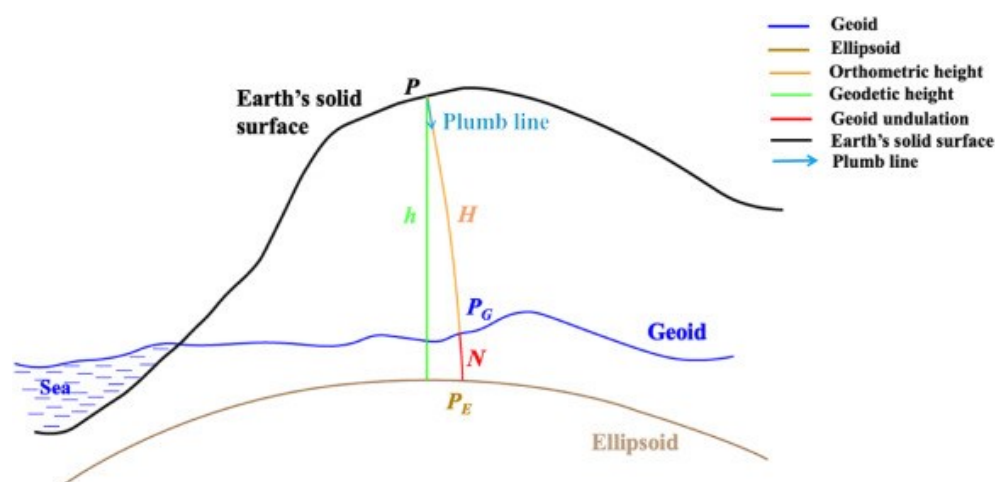
<sup>3</sup> Eye4Software, Using the EGM2008 geoid model  
<https://www.eye4software.com/hydrmagic/documentation/manual/utilities/egm2008-geoid/>



L'altezza geodetica  $h$  è l'altezza di un punto sulla superficie fisica della terra al di sopra o al di sotto dell'ellissoide, misurata lungo una linea passante per il punto sulla terra e normale alla superficie dell'ellissoide WGS-84.

L'ondulazione del geoid  $N$  o altezza del geoid è l'altezza del geoid, ovvero l'altezza di un particolare punto del geoid al di sopra o al di sotto dell'ellissoide WGS-84, misurata lungo una linea che passa per il punto del geoid ed è normale alla superficie dell'ellissoide.

Le tre misure sono correlate dall'equazione approssimata  $h = H + N$ .



Pertanto, l'altezza di un punto sulla superficie sopra il livello medio del mare  $H_{MSL}$  può essere ottenuta dall'altezza dell'ellissoide WGS84  $h_{WGS84}$  mediante (Youchao Xie, Wenbin Shen, Jiancheng Han, Xiaole Deng et al. 2021):

$$H_{MSL} = h_{WGS84} - N_{EGM2008}$$

#### 2.4.4 Raggio Geocentrico

Sebbene il valore medio globale di 6371 km sia solitamente considerato il raggio autentico della Terra (che significa "area uguale", quindi il raggio di un'ipotetica sfera perfetta che ha la stessa superficie dell'ellissoide di riferimento), un altro raggio globale importante è il raggio rettificante della Terra (che dà una sfera con circonferenza uguale al perimetro dell'ellisse descritta da una qualsiasi sezione trasversale polare dell'ellissoide), che sullo sferoide WGS 84 è  $M_r = 6367449m$ . È possibile utilizzare anche la media dei due assi  $M_r \approx \frac{a+b}{2} = 6367445m$ .

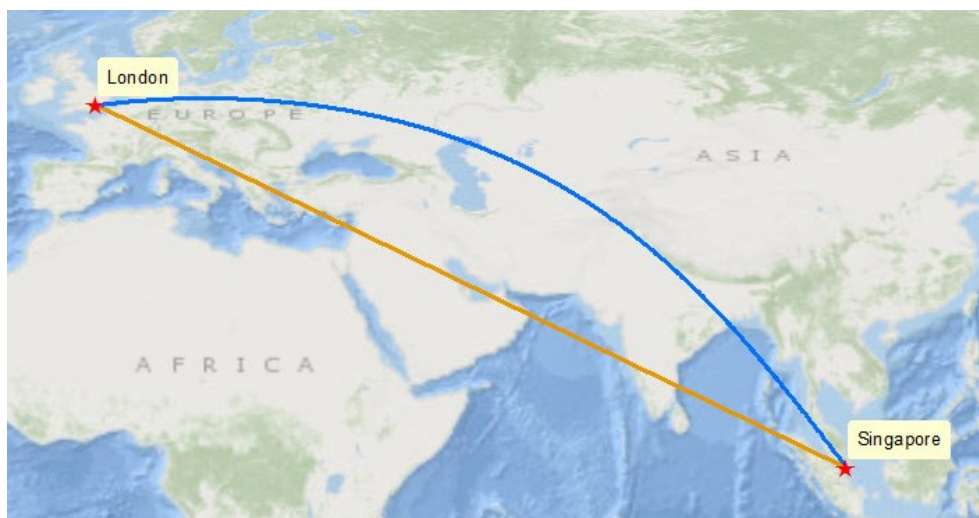
In generale, a una data latitudine  $\varphi$ , il raggio geocentrico è la distanza dal centro della Terra a un punto della superficie dello sferoide alla latitudine geodetica:

$$R(\varphi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cos \varphi)^2 + (b^2 \sin \varphi)^2}{(a \cos \varphi)^2 + (b \sin \varphi)^2}} \quad (1)$$

(per WGS84:  $a = 6378137m$ ,  $b = 6356752.3142m$ )

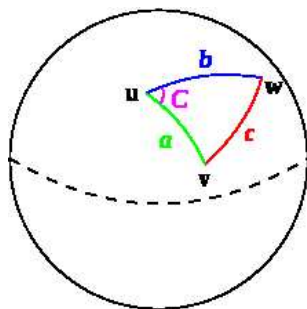
### 2.4.5 Distanza Geodetica

Una linea geodetica è il percorso più breve tra due punti su una superficie curva, come la Terra. L'immagine seguente mostra una distanza planare in arancione e la distanza geodetica di quella distanza planare in blu.



Per calcolare la distanza geodetica tra due punti a partire dagli angoli di latitudine e longitudine, è necessario risolvere un triangolo sferico.

In trigonometria sferica, la legge dei coseni è un teorema che mette in relazione i lati e gli angoli dei triangoli sferici, analogo alla legge ordinaria dei coseni della trigonometria piana. Data una sfera unitaria, un "triangolo sferico" sulla superficie della sfera è definito dai grandi cerchi che collegano tre punti  $u$ ,  $v$  e  $w$  della sfera:



Se le lunghezze dei tre lati sono  $a$  (da  $u$  a  $v$ ),  $b$  (da  $u$  a  $w$ ) e  $c$  (da  $v$  a  $w$ ) e l'angolo dell'angolo opposto a  $c$  è  $C$ , la (prima) legge sferica dei coseni stabilisce che:

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C \quad (2)$$

Trattandosi di una sfera unitaria, le lunghezze  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono semplicemente uguali agli angoli (in radianti) sottesi da quei lati rispetto al centro della sfera (per una sfera non unitaria, le lunghezze sono gli angoli sottesi moltiplicati per il raggio, e la formula è ancora valida se  $a$ ,  $b$  e  $c$  vengono reinterpretati come angoli sottesi).

Una variante della legge dei coseni, la seconda legge sferica dei coseni, [4] (chiamata anche regola del coseno per gli angoli [1]) afferma che:

$$\cos C = \cos A \cos B + \sin A \sin B \cos c \quad (3)$$

dove  $A$  e  $B$  sono gli angoli degli angoli opposti ai lati  $a$  e  $b$ .

Se si utilizza la legge dei coseni per risolvere  $c$ , la necessità di invertire il coseno amplifica gli errori di arrotondamento quando  $c$  è piccolo. JavaScript (e la maggior parte dei computer e dei linguaggi moderni) utilizza numeri in virgola mobile a 64 bit "IEEE 754", che forniscono una precisione di 15 cifre significative. Con questa precisione, la semplice formula della legge sferica del coseno fornisce risultati ben condizionati fino a distanze di pochi metri sulla superficie terrestre. In questo caso, è preferibile la formulazione alternativa della legge del coseno. A differenza dei calcoli basati sulla legge sferica dei coseni, la formula di haversine "rimane particolarmente ben condizionata per il calcolo numerico anche a piccole distanze".

## **2.5 MIXED REALITY**

La Realtà Mista o Mixed Reality (MR) non è più un frutto della nostra immaginazione, confinata a film e romanzi di fantascienza. Sta trasformando le industrie a livello globale e l'edilizia, un settore ricco di tradizione, non è rimasta indietro. Sovrapponendo informazioni digitali a oggetti fisici, la risonanza magnetica consente di creare un ambiente immersivo e interattivo che colma in modo ingegnoso il divario tra realtà virtuale e fisica.

### **2.5.1 Capire la Mixed Reality**

In primo luogo, è essenziale definire la Mixed Reality. La MR fonde il mondo fisico e quello digitale ancorando i contenuti digitali nel nostro ambiente fisico. A differenza della Realtà Virtuale, che crea un ambiente completamente digitale, o della Realtà Aumentata, che sovrappone informazioni digitali al mondo fisico, la Mixed Reality permette all'utente di interagire con contenuti digitali perfettamente integrati nell'ambiente circostante.

La Mixed Reality consente una migliore consapevolezza spaziale, percezione della profondità e interazione, rendendola una tecnologia ideale per il settore delle costruzioni, dove sono richieste una forte comprensione spaziale e l'interazione con dati complessi.

### **2.5.2 Strumenti che sostengono la Mixed Reality nelle costruzioni**

Diversi strumenti e dispositivi stanno trasformando in realtà le applicazioni di MR nel settore delle costruzioni. Un esempio su tutti è l'HoloLens di Microsoft, un computer olografico autonomo che consente all'utente di interagire con contenuti digitali e ologrammi nel mondo fisico. Allo stesso modo, l'XR10 con HoloLens 2 di Trimble integra la tecnologia MR con un elmetto certificato per la sicurezza, una necessità in qualsiasi ambiente di costruzione.

Questi strumenti offrono un ambiente di Mixed Reality scansionando l'ambiente circostante e sovrapponendo modelli digitali al mondo fisico. Questo processo consente di migliorare l'interazione e la comprensione di progetti e strutture complesse nel settore delle costruzioni.

### 2.5.3 Esempi reali e casi d'uso

La Mixed Reality sta trasformando le pratiche edilizie in molti modi. Ecco alcuni esempi di rilievo:

- Pianificazione del cantiere e visualizzazione dei progetti  
Il gigante delle costruzioni Skanska è stato un pioniere nell'uso della Realtà Mista nelle costruzioni. L'uso di Microsoft HoloLens consente di sovrapporre progetti BIM (Building Information Modeling) a cantieri fisici. Le parti interessate possono "camminare" attraverso il progetto in scala reale prima dell'inizio della costruzione, facilitando una comprensione più profonda dei piani di progettazione e identificando potenziali problemi in anticipo. Questa rappresentazione spaziale in tempo reale riduce gli errori di progettazione, fa risparmiare tempo nel processo decisionale e garantisce a tutti gli stakeholder una comprensione unitaria del progetto.
- Collaborazione e assistenza remota  
Lo Smart Helmet di Daqri, dotato di funzionalità di visione termica e di visualizzazione dei dati, è un esempio di come la risonanza magnetica possa facilitare la collaborazione e l'assistenza a distanza. Gli esperti di altre sedi possono fornire assistenza in tempo reale ai lavoratori in loco, guidandoli attraverso processi complessi e risolvendo i problemi. L'accesso immediato alle conoscenze degli esperti non solo migliora l'efficienza, ma consente anche di risparmiare tempo e costi di viaggio.
- Ispezioni e garanzia di qualità  
AECOM sta sfruttando la risonanza magnetica per i controlli di qualità e le ispezioni. Sovrapponendo i modelli digitali alla struttura fisica, i lavoratori possono facilmente individuare le discrepanze tra il progetto previsto e la costruzione effettiva. Questo metodo migliora significativamente l'accuratezza delle ispezioni, snellendo il processo di garanzia della qualità e assicurando che qualsiasi incongruenza venga affrontata tempestivamente.
- Manutenzione e riparazione  
La risonanza magnetica non si limita alle nuove costruzioni, ma sta rivoluzionando anche la manutenzione e la riparazione degli edifici. Per

esempio, la risonanza magnetica può semplificare le ispezioni e la manutenzione dei sistemi HVAC. Utilizzando gli occhiali MR, i tecnici possono visualizzare il funzionamento interno di un sistema, visualizzare dati in tempo reale e ricevere istruzioni guidate per la riparazione e la manutenzione. Questo approccio innovativo non solo riduce i tempi di inattività dei sistemi, ma migliora anche la qualità e l'efficienza degli interventi di manutenzione.

- **Formazione e sicurezza**

Il tradizionale approccio in aula alla formazione sulla sicurezza si sta rapidamente evolvendo con l'integrazione della risonanza magnetica. Gilbane Building Company, ad esempio, utilizza la risonanza magnetica per la formazione sulla sicurezza, simulando i pericoli reali del cantiere. I lavoratori possono sperimentare e imparare a superare questi pericoli in un ambiente controllato e sicuro, riducendo i rischi associati alla formazione in cantiere. L'uso della risonanza magnetica nella formazione ha portato a un aumento dei tassi di ritenzione e a una migliore comprensione dei protocolli di sicurezza.

#### **2.5.4 Vantaggi e sfide**

La Realtà Mista offre diversi vantaggi convincenti al settore delle costruzioni:

- **Miglioramento della sicurezza**

La MR offre un ambiente immersivo per la formazione sulla sicurezza, simulando i pericoli del mondo reale senza rischi. Questo approccio interattivo alla formazione aiuta i lavoratori a capire meglio i potenziali pericoli e come affrontarli, rendendo i cantieri più sicuri.

- **Migliore collaborazione**

La risonanza magnetica consente ai team di visualizzare e interagire con i modelli 3D in tempo reale, indipendentemente dalla loro posizione. Questo approccio interattivo migliora la comunicazione e la comprensione, riducendo gli errori e le incomprensioni.

- **Risparmio sui costi**

La capacità di MR di visualizzare i progetti nell'ambiente reale prima

dell'inizio della costruzione consente di individuare e correggere tempestivamente i costosi errori di progettazione. Inoltre, la capacità di assistenza remota riduce i costi di viaggio e migliora l'efficienza.

- Miglioramento della qualità

L'uso della risonanza magnetica nelle ispezioni e nel controllo qualità migliora l'accuratezza. La possibilità di sovrapporre i modelli digitali alle strutture fisiche consente di effettuare controlli di qualità precisi e di individuare facilmente eventuali discrepanze tra i progetti e la costruzione effettiva.

Tuttavia, il percorso verso l'adozione diffusa della risonanza magnetica non è privo di sfide:

- Limitazioni dell'hardware

L'attuale generazione di hardware per la risonanza magnetica può essere ingombrante e quindi scomoda per un uso prolungato. Inoltre, i costi elevati delle apparecchiature di risonanza magnetica avanzate possono essere proibitivi per alcune aziende.

- Qualità dei dati

La risonanza magnetica richiede dati accurati e di alta qualità per creare sovrapposizioni digitali efficaci. Garantire questa qualità, soprattutto in progetti edilizi complessi, può essere impegnativo.

- Adozione da parte degli utenti

Come per ogni nuova tecnologia, può esserci una certa resistenza da parte dei dipendenti. Il successo dell'implementazione della tecnologia MR richiede una formazione adeguata e un cambiamento della mentalità tradizionale.

- Limitazioni tecniche

Le applicazioni di risonanza magnetica possono presentare problemi di latenza, tracciamento inadeguato o scarsa risoluzione, che possono influire sull'esperienza complessiva dell'utente. Per superare questi problemi sono necessari progressi tecnologici e miglioramenti nel software e nell'hardware.

Sebbene le sfide esistano, i potenziali benefici della risonanza magnetica per il settore delle costruzioni sono significativi. Man mano che la tecnologia matura e diventa più accessibile, possiamo aspettarci di vedere un aumento dell'adozione della MR in tutto il settore.

### **2.5.5 Il futuro della Mixed Reality nell'edilizia**

Il futuro della Realtà Mista in edilizia è promettente. Probabilmente assisteremo a continui miglioramenti dell'hardware, che renderanno i dispositivi più leggeri, più comodi e più robusti per gli ambienti di costruzione. Inoltre, la MR potrebbe estendersi al di là del lavoro in cantiere in aree come il coinvolgimento degli stakeholder, consentendo ai clienti e al pubblico di "camminare attraverso" i progetti nelle prime fasi di un progetto.

La capacità della risonanza magnetica di facilitare la collaborazione a distanza sarà fondamentale anche per la continua globalizzazione del settore, consentendo agli esperti di tutto il mondo di "essere in cantiere" senza lasciare il proprio ufficio.

La Realtà Mista sta diventando un fattore di svolta nel settore delle costruzioni, fornendo strumenti senza precedenti per la visualizzazione, la collaborazione e il controllo della qualità. Abbracciando questa tecnologia, le imprese edili possono essere all'avanguardia nella corsa al digitale, aprendo la strada a un futuro più efficiente, più sicuro e più interattivo dell'edilizia. La Mixed Reality è più di una semplice tendenza tecnologica: è uno strumento potente che sta ridisegnando il modo in cui costruiamo il nostro mondo.

### **2.5.6 Simultaneous Localization And Mapping - SLAM**

La tecnologia di localizzazione e mappatura simultanea (SLAM) ha rivoluzionato l'industria edilizia introducendo un nuovo approccio alla progettazione e alla costruzione.

L'edilizia è un settore in cui la precisione e l'efficienza sono fondamentali. La tecnologia SLAM, originariamente sviluppata per la robotica, ha trovato applicazione nell'ambito dell'edilizia grazie alla sua capacità di creare mappe tridimensionali precise e localizzare oggetti nello spazio in tempo reale. Questo ha aperto nuove opportunità per migliorare la pianificazione, la progettazione e la costruzione di strutture edilizie complesse.



La tecnologia SLAM è un sistema che consente a un dispositivo di costruire una mappa dell'ambiente circostante e di localizzarsi all'interno di questa mappa utilizzando sensori come telecamere, sensori di profondità e scanner laser. La SLAM utilizza algoritmi complessi per elaborare i dati provenienti dai sensori e stimare la posizione e l'orientamento del dispositivo rispetto all'ambiente circostante.

#### *2.5.6.1 Potenzialità della SLAM nell'edilizia*

La tecnologia SLAM ha molteplici potenzialità nell'ambito dell'edilizia. Innanzitutto, consente di creare mappe dettagliate degli ambienti in fase di progettazione, fornendo una panoramica precisa delle strutture esistenti e facilitando la pianificazione di modifiche e ristrutturazioni. Inoltre, la SLAM può essere utilizzata per monitorare il progresso dei lavori durante la costruzione, consentendo una verifica accurata delle misure e una valutazione dell'aderenza al progetto.

#### *2.5.6.2 SLAM, Mixed Reality ed interazioni con IMU*

La mixed reality (MR) combina elementi del mondo reale con elementi virtuali, creando un ambiente interattivo e immersivo. La SLAM e la MR si integrano perfettamente, consentendo agli operatori nell'edilizia di visualizzare modelli virtuali delle strutture all'interno dell'ambiente fisico in tempo reale. Ciò permette una migliore comprensione delle interazioni tra gli elementi reali e virtuali e facilita la collaborazione tra i diversi attori del progetto.

Le unità di misura inerziali (IMU) sono sensori che misurano l'accelerazione lineare e l'orientamento angolare di un dispositivo. Nella tecnologia SLAM, le IMU sono spesso utilizzate per migliorare la precisione delle stime di posizione e orientamento. Le informazioni fornite dalle IMU vengono integrate con i dati provenienti dagli altri sensori utilizzati nella SLAM, come le telecamere o i sensori di profondità, per ottenere una stima più accurata della posizione e dell'orientamento del dispositivo.

La combinazione di SLAM, MR e IMU apre la strada a una serie di applicazioni nell'edilizia. Ad esempio, gli operatori possono utilizzare dispositivi indossabili con sensori SLAM e IMU per visualizzare in tempo reale i modelli virtuali delle strutture durante la costruzione, consentendo una migliore comprensione dei dettagli architettonici e facilitando il controllo di qualità. Inoltre, la SLAM può essere utilizzata

per la scansione di ambienti esistenti e la creazione di modelli BIM (Building Information Modeling) precisi e aggiornati.

**PROBLEMI**



## Capitolo 3

### PROBLEMI

L'evoluzione dei modelli BIM ha introdotto nuove possibilità nella progettazione e gestione dei cantieri e delle strutture costruite. Uno dei vantaggi più interessanti offerti da questi modelli è la capacità di visualizzarli in sito, in allineamento con la realtà geografica, sfruttando la tecnologia MR (Mixed Reality).

La MR, che combina elementi reali e virtuali, ha il potenziale per rivoluzionare la gestione delle verifiche di progetto e la stessa progettazione. Tuttavia, uno dei limiti significativi attuali è rappresentato dalla georeferenziazione, ovvero l'allineamento geografico in relazione all'azimuth, nonché il posizionamento preciso dei modelli BIM.

I limiti degli strumenti di mixed reality nell'ambito dell'outdoor rappresentano una sfida significativa per la diffusione e l'efficacia di questa tecnologia in ambienti esterni. Mentre la mixed reality offre un'enorme potenzialità nel creare esperienze immersive e interattive che combinano il mondo reale con elementi virtuali, l'affidabilità e la precisione di tali strumenti all'aperto si riducono considerevolmente.

Uno dei principali problemi che affliggono gli strumenti di mixed reality in ambiente esterno è la perdita di affidabilità nella localizzazione e nell'allineamento del modello virtuale con il mondo reale. Questo si traduce in un'esperienza utente distorta e poco accurata. A differenza degli spazi indoor, dove l'uso di sensori come telecamere e sensori di profondità può consentire un allineamento relativamente preciso tra gli oggetti virtuali e quelli reali, all'aperto si presentano molte variabili che complicano notevolmente il processo di allineamento.

L'ambiente esterno è caratterizzato da fattori come la luce solare, la presenza di oggetti in movimento come alberi, veicoli e persone, e le variazioni del paesaggio. Questi elementi rendono difficile per gli strumenti di mixed reality mantenere una

tracciabilità accurata degli oggetti e delle superfici del mondo reale. Anche una leggera deviazione può causare un'interazione distorta tra gli oggetti virtuali e quelli reali, compromettendo l'esperienza complessiva.

Attualmente, il processo di allineamento e posizionamento geografico richiede una serie di operazioni manuali che comportano un notevole dispendio di tempo e rendono questa tecnologia poco utilizzabile. Le tecniche più comuni utilizzate includono:

- Allineamento manuale o semi-automatico (Manual/Semi-manual alignment)
- Allineamento basato su RFID (RFID-based alignment)
- Allineamento basato su marker (Marker-based alignment)

La tecnica di allineamento basata su marker, in particolare, prevede l'associazione di posizioni geografiche ai marker. Ciò implica l'applicazione fisica di un tag nello spazio, il suo posizionamento tramite un sistema GPS-RTK e successivamente l'allineamento del modello BIM al nord geografico. Tuttavia, uno dei problemi con questa tecnica è che l'utilizzo di strumenti avanzati di MR, come ad esempio l'HoloLens2 di Microsoft, richiede che ci si mantenga entro una distanza limitata dal tag, generalmente compresa tra 5 e 7 metri. Oltre tale distanza, il dispositivo rischia di perdere l'allineamento e quindi compromettere l'esperienza utente dovendo ricominciare la procedura da capo.

Questa limitazione è particolarmente problematica in contesti di cantiere, dove gli operatori devono spostarsi e lavorare in diverse aree. La necessità di rimanere entro una distanza limitata dal marker può risultare molto restrittiva e può limitare l'utilità pratica della tecnologia MR nella gestione del cantiere e delle attività di progettazione.

A causa di questi problemi, gli strumenti di mixed reality sono spesso utilizzati principalmente in spazi indoor più controllati, dove l'ambiente è più prevedibile e gli strumenti di localizzazione possono funzionare in modo più affidabile.

I modelli BIM offrono notevoli vantaggi nella progettazione e gestione dei cantieri e delle strutture costruite. Tuttavia, la georeferenziazione e l'allineamento geografico dei modelli BIM rappresentano ancora una sfida significativa, specialmente quando si utilizzano tecnologie MR avanzate.

Nonostante i limiti attuali, la ricerca e lo sviluppo nel campo della mixed reality stanno cercando costantemente soluzioni innovative per affrontare questi problemi. Nuovi sensori, algoritmi di tracciamento e approcci di mappatura avanzati stanno emergendo per migliorare l'affidabilità degli strumenti di mixed reality all'aperto.

**OBIETTIVI**



## Capitolo 4

### OBIETTIVI

L'evoluzione delle tecnologie di Mixed Reality ha aperto nuove possibilità nell'ambito della visualizzazione e interazione con i modelli Building Information Modeling (BIM). L'obiettivo di questa tesi è quello di sviluppare un sistema innovativo per l'allineamento geografico che permetta la visualizzazione ad alta precisione di ologrammi relativi a modelli BIM, georeferenziata ed allineata alla realtà in spazi outdoor in maniera continuativa tramite l'utilizzo di strumenti di Mixed Reality.

Ciò avrà come obiettivo principale l'eliminazione dei target tradizionalmente utilizzati per l'allineamento della Mixed Reality, ottimizzando il processo di allineamento; raggiungere un'accuratezza centimetrica nella visualizzazione ed in ultimo luogo risolvere il problema della perdita di allineamento continuativa riuscendo a conoscere istante-istante la posizione dell'HoloLens2, strumento di Mixed Reality adibito allo sviluppo del sistema.

I modelli BIM importati saranno allineati con precisione alla realtà georeferenziata, consentendo agli utenti di vedere virtualmente gli elementi del modello sovrapposti al contesto fisico in tempo reale.

Al posto di target specifici, l'applicazione sfrutterà algoritmi di riconoscimento dell'ambiente e di tracciamento visivo per allineare i modelli virtuali alla realtà circostante.

Per garantire un'accuratezza centimetrica nella visualizzazione della realtà mista, l'applicazione utilizzerà una combinazione di tecnologie avanzate, tra cui il riconoscimento spaziale 3D, il tracciamento visivo, la mappatura dell'ambiente e l'integrazione con i dati georeferenziati. Queste tecnologie consentiranno di creare un ambiente virtuale allineato in modo preciso con la realtà fisica, garantendo una rappresentazione fedele dei modelli BIM sovrapposti all'ambiente esterno.



- **Benefici e vantaggi:** L'utilizzo di un'applicazione per Common Data Environment basata sulla Mixed Reality per la visualizzazione di ologrammi BIM offre numerosi benefici e vantaggi:
  - Eliminazione dei target fisici: L'applicazione permette di eliminare la necessità di posizionare target fisici specifici, semplificando il processo di allineamento della Mixed Reality e offrendo maggiore flessibilità nell'utilizzo degli ologrammi BIM.
  - Ottimizzazione del processo di allineamento e georeferenziazione: Grazie all'utilizzo di algoritmi di riconoscimento dell'ambiente e di tracciamento visivo, l'applicazione semplifica e ottimizza il processo di allineamento e georeferenziazione dei modelli BIM alla realtà.
  - Accuratezza centimetrica: L'integrazione con tecnologie avanzate consente di raggiungere un'accuratezza centimetrica nella visualizzazione della realtà mista, garantendo una rappresentazione precisa e dettagliata degli elementi virtuali sovrapposti all'ambiente esterno.
  - Esperienza utente immersiva: L'utilizzo degli occhiali HoloLens 2 di Microsoft offre un'esperienza utente immersiva e interattiva, consentendo agli utenti di esplorare i modelli BIM allineati alla realtà in modo intuitivo e coinvolgente.

# **SISTEMA INNOVATIVO PROPOSTO**

## **ALGORITMO DI TRACCIAMENTO**

### **ALLINEAMENTO OGGETTI 3D**

Allineamento dell'inquadratura locale con il Nord

Calcolo del Bearing

#### **Regolazione della posizione**

Haversine

Calcolo della distanza geodetica

Filtro della Latitudine

Filtro della Longitudine

#### **Regolazione dell'altitudine**

Filtro dell'Altitudine

#### **Regolazione dell'orientamento**

Proiezioni equirettangolari

## Capitolo 5

# SISTEMA INNOVATIVO PROPOSTO

Il sistema innovativo proposto è un sistema che si avvale dell'utilizzo della tecnologia ad alta precisione RTK di un GPS, unita a quella di uno strumento di Mixed Reality, identificato, nel nostro caso, dalla tecnologia della HoloLens 2 di Microsoft.

Tale sistema si avvarrà della conoscenza di 6 gradi di libertà incogniti, quali la latitudine, la longitudine, l'altitudine e le tre rotazioni rpy che descrivono l'insieme delle rotazioni di un corpo rigido rispetto agli assi del sistema di riferimento cartesiano: yaw, pitch e roll (rispettivamente rotazioni di angolo intorno all'asse z, y e x).

Tra le componenti di cui si avvale il comparto di georeferenziazione del GPS, vi è un rover, posizionato in maniera prossimale alla HoloLens, ciò ci permetterà di avere i dati di longitudine, latitudine ed altitudine ben precisi, determinati dai satelliti in orbita nella zona di accensione del dispositivo. A questi dati verranno assegnate delle correzioni RTK, ricevute dalla base RTK, installata in cima alla Torre dell'Università di Ingegneria di Ancona, zona Montedago, che presenta una latenza di accuratezza delle correzioni nell'arco di circa 10km.

Da questo primo momento sarà quindi possibile conoscere la reale posizione di un modello digitale, georeferenziato precedentemente in un Common Data Environment, con una precisione centimetrica nel mondo reale. Questo allineamento prodotto sarà continuativo anche allo spostamento dello strumento di MR, in quanto la base RTK è stata tarata in modo tale da comunicare con cadenza del secondo eventuali correzioni di posizione.

Questa prima fase lascia però incogniti i tre gradi di libertà delle tre rotazioni rpy.

Sarà quindi necessario un allineamento delle coordinate locali della HoloLens a quelle del sistema geografico.

Ciò sarà permesso dall'utilizzo della piattaforma inerziale IMU (Inertial Measurement Unit), basata su sensori inerziali, come accelerometri e giroscopi, che permettono un monitoraggio della dinamica di un mezzo in movimento.

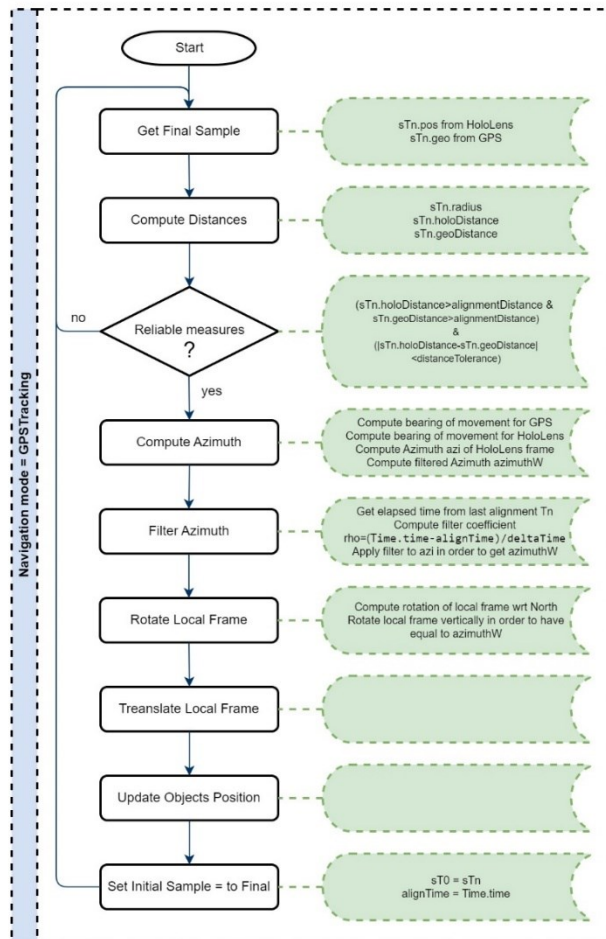
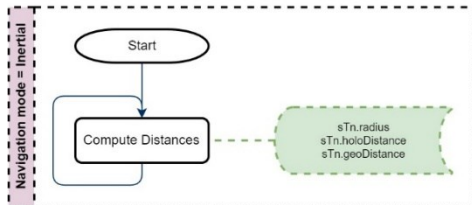
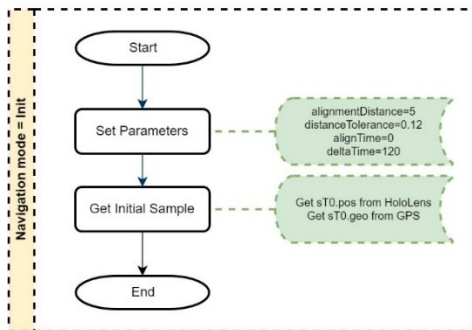
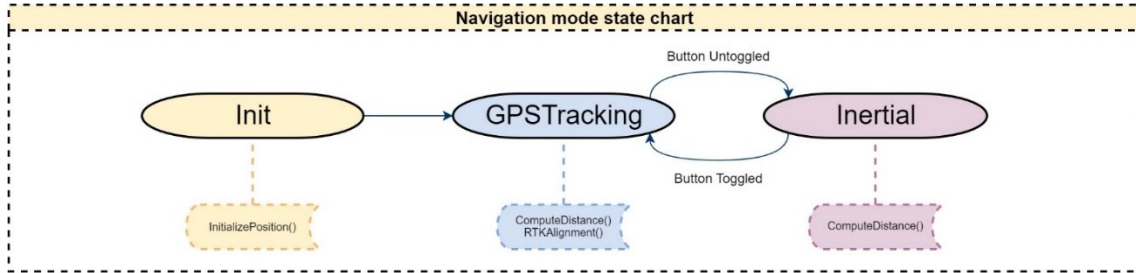
A questo punto la HoloLens, che presenterà tutto un altro sistema di riferimento, andrà ad integrare i dati inerziali IMU con i dati SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), un insieme di algoritmi e tecniche che consentono al dispositivo di localizzarsi e creare una mappa 3D dell'ambiente circostante, integrando gli oggetti virtuali nel mondo reale in modo realistico e coerente, riuscendo quindi a comprendere la geometria e la disposizione degli oggetti reali nell'ambiente, posizionando quelli virtuali in modo appropriato.

Andando quindi ad allineare la direzione degli assi della HoloLens con la direzione degli assi geografici, determiniamo una compatibilità di allineamento tra i due spostamenti.

Questi due sistemi però per quanto possano essere simili non andranno mai a combaciare perfettamente.

La metodologia in questione si avvarrà quindi di algoritmi e calcoli matematici che si occuperanno di raggiungere quella precisione centimetrica necessario affinché il modello virtuale venga registrato per ottenere il massimo e più coerente allineamento al modello reale preso in esame.

## 5.1 ALGORITMO DI TRACCIAMENTO



## 5.2 ALLINEAMENTO OGGETTI 3D NEL QUADRO LOCALE

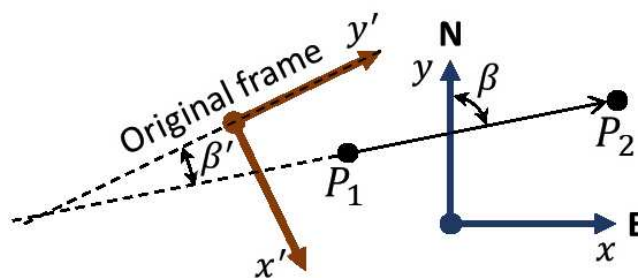
Un oggetto 3D generico ha un proprio quadro di riferimento situato nel mondo, completamente specificato dalle sue coordinate geografiche e dal suo orientamento rispetto al nord:

- Latitudine ( $^{\circ}$ )
- Longitudine ( $^{\circ}$ )
- Altitudine (m)
- Rilevamento ( $^{\circ}$ )

Il problema può essere suddiviso in tre sottoproblemi, illustrati in dettaglio nelle seguenti sottosezioni.

### 5.2.1 Allineamento dell'inquadratura locale con il Nord

Il primo problema da affrontare per realizzare una proiezione equirettangolare locale è che il fotogramma locale deve avere l'asse  $y$  diretto verso il Nord. All'inizio, il quadro locale ha un orientamento arbitrario e sconosciuto rispetto al Nord. Quando si sposta tra due posizioni, il segmento eseguito ha un orientamento  $\beta'$  rispetto all'asse  $y'$ , ma lo stesso movimento forma un angolo di rilevamento  $\beta$  rispetto al Nord. Pertanto, una volta noto il rilevamento (calcolato come mostrato in precedenza), il fotogramma locale può essere regolato per far sì che l'asse  $y$  guardi verso Nord semplicemente ruotando (in senso antiorario) il fotogramma locale rispetto all'asse verticale per un angolo pari a  $\beta - \beta'$ .



#### 5.2.1.1 Calcolo del Bearing

In generale, la prua attuale varia man mano che si segue un percorso a grande cerchio (ortodromo); la prua finale differirà dalla prua iniziale di vari gradi a seconda

della distanza e della latitudine (se si dovesse andare, ad esempio, da 35°N,45°E (≈ Baghdad) a 35°N,135°E (≈ Osaka), si inizierebbe con una prua di 60° e si finirebbe con una prua di 120°!)



Applicando la legge dell'haversine (3) o la legge dei coseni, ponendo  $u$  nel punto iniziale,  $w$  nel polo Nord e  $v$  nel punto finale e applicando le formule della trigonometria sferica, si può calcolare l'angolo di rilevamento iniziale. Date la latitudine e la longitudine del punto iniziale  $\varphi_1, \lambda_1$  e la latitudine e la longitudine del punto finale  $\varphi_2, \lambda_2$ , il rilevamento iniziale (talvolta indicato come azimut di avanzamento) che, se seguito in linea retta lungo un arco di grande cerchio, porterà dal punto iniziale al punto finale è:

$$S = \sin(\lambda_2 - \lambda_1) \cos(\varphi_2) \quad (4)$$

$$C = \cos(\varphi_1) \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (5)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(\frac{S}{C}\right) \quad (6)$$

L'angolo di rilevamento corrispondente, espresso in gradi, è quindi il seguente:

$$B_{deg} = \left(\beta * \frac{180}{\pi} + 360\right) \% 360 \quad (7)$$





planari locali  $(x, y)$ , la posizione geografica del suo quadro di riferimento può essere calcolata invertendo la proiezione inversa:

$$\lambda_0 = \frac{x}{R \cos \varphi_1} - \lambda'$$

$$\varphi_0 = \frac{y}{R} - \varphi'$$

D'altra parte, quando la posizione locale del fotogramma  $(\varphi_0, \lambda_0)$  e le coordinate geografiche dell'oggetto  $(\varphi'', \lambda'')$  sono note, le corrispondenti coordinate planari locali possono essere calcolate mediante la proiezione in avanti:

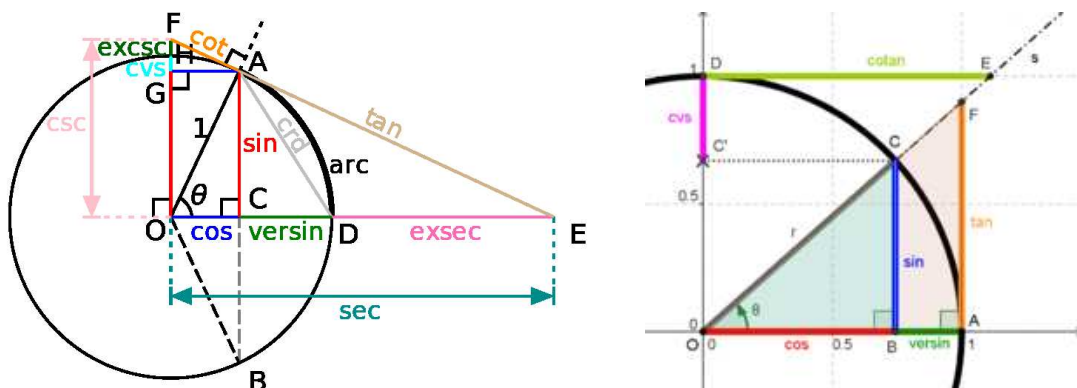
$$x = R(\lambda'' - \lambda_0) \cos \varphi_1$$

$$y = R(\varphi'' - \varphi_0)$$

Quando l'osservatore si allontana troppo dall'origine, il riferimento locale deve essere traslato nella nuova posizione e gli oggetti 3D devono essere posizionati rispetto al nuovo sistema di riferimento riapplicando le equazioni precedenti.

### 5.2.2.1 Haversine

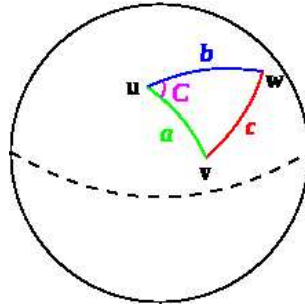
Le funzioni trigonometriche aggiuntive a quelle standard sono versine, haversine, coversine, hacoversine, exsecante ed excosecante. Tutte queste funzioni possono essere espresse semplicemente in termini di funzioni trigonometriche più note. Ad esempio,  $\text{haversine}(\theta) = \sin^2(\theta/2)$ . Le funzioni sopra elencate risalgono a un'epoca priva di calcolatrici o di efficienti processori per computer, in cui l'utente calcolava a mano angoli e direzioni utilizzando tavole logiche.



$$\text{Versine: } \text{ver } \theta \triangleq 1 - \cos \theta = 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

La funzione haversine calcola il mezzo versino dell'angolo  $\theta$ .

$$\text{Haversine: } \text{hav } \theta \triangleq \frac{\text{ver } \theta}{2} = \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \cos(\theta)}{2} \quad (9)$$



Data una sfera unitaria, un "triangolo" sulla superficie della sfera è definito dai grandi cerchi che collegano tre punti  $u$ ,  $v$  e  $w$  della sfera. Se le lunghezze dei tre lati sono  $a$  (da  $u$  a  $v$ ),  $b$  (da  $u$  a  $w$ ) e  $c$  (da  $v$  a  $w$ ) e l'angolo dell'angolo opposto a  $c$  è  $C$ , allora la *legge dell'haversine* afferma che:

$$\text{hav}(c) = \text{hav}(a - b) + \sin(a) \sin(b) \text{hav}(C) \quad (10)$$

Trattandosi di una sfera unitaria, le lunghezze  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono semplicemente uguali agli angoli (in radianti) sottesi da quei lati rispetto al centro della sfera (per una sfera non unitaria, ciascuna di queste lunghezze d'arco è uguale all'angolo centrale moltiplicato per il raggio  $R$  della sfera).

Per ottenere la formula dell'haversine<sup>5</sup> è sufficiente considerare il caso particolare in cui  $u$  è il polo nord, mentre  $v$  e  $w$  sono i due punti di cui si vuole determinare la separazione  $d$ . In questo caso,  $a$  e  $b$  sono i punti di separazione  $d$ . In questo caso,  $a$  e  $b$  sono  $\pi/2 - \varphi_{1,2}$  (cioè le co-latitudini),  $C$  è la separazione in longitudine  $\lambda_2 - \lambda_1$  e  $c$  è l'angolo desiderato  $\theta$  tra i due punti. Considerando che  $\sin \pi/2 - \varphi = \cos \varphi$ , segue immediatamente la formula di haversine.

La formula dell'haversine permette di calcolare l'haversine di  $\theta$  ( $\text{hav}(\theta)$ ) direttamente dalla latitudine ( $\varphi$ ) e dalla longitudine ( $\lambda$ ) dei due punti:

$$\text{hav}(\theta) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (11)$$

oppure, per evitare l'uso di coseni che causano una degradazione della risoluzione a piccoli angoli

---

<sup>5</sup> Movable Type Scripts, Calculate distance, bearing between Latitude/Longitude points, Distance <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>

$$\text{hav}(\theta) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + (1 - \text{hav}(\varphi_1 - \varphi_2) - \text{hav}(\varphi_1 + \varphi_2)) \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (12)$$

dove:

- $\varphi_1, \varphi_2$  sono la latitudine del punto 1 e la latitudine del punto 2
- $\lambda_1, \lambda_2$  sono la longitudine del punto 1 e la longitudine del punto 2

### 5.2.2.2 Calcolo della Distanza Geodetica

Sostituendo la definizione di haversine nell'equazione (4) otteniamo:

$$h = \sin^2 \frac{\theta}{2} = \sin^2 \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{2} + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{2} \quad (13)$$

Per risolvere l'angolo  $\theta$ , applicare l'arcaversine (inversione dell'haversine) a  $h = \text{hav}(\theta)$  o utilizzare la funzione arcsina (inversione del seno):

$$\theta = \text{ahav}(h) = 2 \text{asin}(\sqrt{h}) \quad (14)$$

Una versione più stabile dell'espressione precedente utilizza la funzione atan2 e si ottiene dividendo entrambi i termini della definizione di haversine (2) per  $\cos^2 \frac{\theta}{2}$ :

$$\frac{h}{\cos^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2}}{\cos^2 \frac{\theta}{2}} \rightarrow \frac{h}{1 - \sin^2 \frac{\theta}{2}} = \tan^2 \frac{\theta}{2} \rightarrow \frac{h}{1-h} = \tan^2 \frac{\theta}{2} \rightarrow \theta = 2 \text{atan2} \left( \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{1-h}} \right) \quad (8)$$

Poiché la distanza geodetica tra due punti sulla superficie della sfera è definita da  $\theta = \frac{d}{r}$ , dove:

- $d$  è la distanza tra i due punti lungo un grande cerchio della sfera,
- $r$  è il raggio della sfera.

Considerando che il raggio  $r$  della Terra è noto (per esempio si può usare in prima approssimazione il raggio meridiano medio della Terra  $M_r = 6367449m$ , oppure il raggio dell'ellissoide alla latitudine corrispondente più l'altitudine misurata per essere più precisi), la formula di Haversine per calcolare la distanza geodetica sul grande cerchio è la seguente:

$$h = \sin^2 \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{2} + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{2} \quad (15)$$

$$\theta = 2 \text{atan2} \left( \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{1-h}} \right) \quad (16)$$

$$d = \theta r \quad (17)$$

Codice Javascript:

```
const R = 6371e3; // metres
const phi1 = lat1 * Math.PI/180; // φ, λ in radians
const phi2 = lat2 * Math.PI/180;
const Δphi = (lat2-lat1) * Math.PI/180;
const Δlambda = (lon2-lon1) * Math.PI/180;

const h = Math.sin(Δphi/2) * Math.sin(Δphi/2) +
    Math.cos(phi1) * Math.cos(phi2) *
    Math.sin(Δlambda/2) * Math.sin(Δlambda/2);
const theta = 2 * Math.atan2(Math.sqrt(h), Math.sqrt(1-h));

const d = R * theta; // in metres
```

### 5.2.2.3 Filtro della Latitudine

Calcolo della media

La latitudine di una posizione sulla Terra rappresenta un angolo che varia continuamente da -90° a 90°. Tuttavia, quando ci si sposta localmente i suoi valori cambiano molto poco e per apprezzare la variazione è necessaria una doppia precisione. In teoria si potrebbe usare una somma vettoriale come nel caso dell'azimut, ma gli errori numerici degraderebbero notevolmente il risultato.

In questo caso è più opportuno utilizzare una media semplice per implementare il filtro della media mobile:

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

### 5.2.2.4 Filtro della Longitudine

Calcolo della media

La longitudine di una località della Terra rappresenta un angolo compreso tra  $-180^\circ$  e  $180^\circ$  e presenta una discontinuità a  $180^\circ$  (nel mezzo dell'Oceano Pacifico). Pertanto, se si vuole calcolare la media in ogni località della Terra come si fa per la latitudine, la discontinuità deve essere evitata.

Quando ci si trova nell'emisfero del Pacifico, per garantire che la discontinuità sia lontana dalla posizione attuale, si deve usare una longitudine spostata invece di quella attuale  $\lambda' = (\lambda + 360) \% 360 - 180$ , dove l'operatore  $\%$  sta per il resto della divisione.

Pertanto, il valore medio spostato per la longitudine  $\bar{\lambda}'$  è calcolato da:

$$\bar{\lambda}' = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \lambda'_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \lambda'_i = \begin{cases} \lambda_i, & \text{if } |\lambda_n| < 90 \\ (\lambda_i + 360) \% 360 - 180, & \text{if } |\lambda_n| \geq 90 \end{cases}$$

e il valore medio effettivo per la longitudine  $\bar{\lambda}$  si ottiene applicando nuovamente la stessa correzione basata sull'emisfero:

$$\bar{\lambda} = \begin{cases} \bar{\lambda}', & \text{if } |\lambda_n| < 90 \\ ((\bar{\lambda}' + 360) \% 360 - 180), & \text{if } |\lambda_n| \geq 90 \end{cases}$$

### 5.2.3 Regolazione dell'altitudine

Definiamo l'altitudine di un punto come l'altitudine geodetica<sup>6</sup>, cioè la distanza del punto al di sopra o al di sotto dell'ellissoide misurata lungo una linea che passa attraverso il punto e normale alla superficie dell'ellissoide WGS-84.

Quando si utilizza un GPS per localizzare un punto nello spazio, il valore di altitudine restituito rappresenta l'altezza geodetica dell'antenna dall'ellissoide WGS84, che qui chiamiamo "altitudine vera". L'altitudine prevista da un riferimento arbitrario (ad esempio, il livello medio del mare (geoide), l'ellissoide o l'attuale livello del suolo) è allegata come attributo agli oggetti 3D. Indipendentemente dal riferimento scelto, l'altitudine reale sarà sempre diversa da quella prevista. Pertanto, la regolazione verticale deve essere effettuata manualmente sul posto e il suo risultato deve essere mantenuto.

---

<sup>6</sup> Radartutorial.eu, Vertical Height and Altitude Definitions, Christian Wolff  
<https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb64.en.html>

Ciò implica che a ogni oggetto 3D deve essere associato un altro parametro: l'altitudine reale.

Attributi dell'oggetto:

- Latitudine (°) (zero al parallelo equatoriale)
- Longitudine (°) (zero al meridiano di Greenwich)
- Altitudine (m) (prevista)
- Altitudine vera (m) (valore vero misurato tramite GPS)
- Direzione (°) (in senso orario rispetto al Nord)

Supponiamo che un osservatore voglia vedere oggetti 3D virtuali entro una distanza limitata intorno a lui. Questa distanza è quella per cui gli effetti della curvatura terrestre non sono tangibili.

Per tracciare il valore reale dell'altitudine dell'osservatore, ogni volta che viene acquisita una misura GPS per l'altitudine  $h'$  dell'osservatore, la sua altezza nel sistema di coordinate locali può essere memorizzata per un uso successivo come altezza dell'origine del quadro locale:

$$h_0 = h'$$

Di conseguenza, quando sono note la posizione del quadro locale ( $h_0$ ) e l'altitudine di un oggetto ( $h''$ ), la corrispondente coordinata verticale  $z$  di un oggetto può essere calcolata mediante:

$$z = h'' - h_0$$

Quando l'osservatore si allontana troppo dall'origine, il riferimento locale deve essere traslato verticalmente nella nuova quota e gli oggetti 3D devono essere posizionati rispetto al nuovo sistema di riferimento riapplicando le equazioni precedenti.

Se l'osservatore sposta verticalmente gli oggetti a  $z'$  per farli coincidere con la loro altezza reale dal suolo, l'altitudine reale risultante deve essere calcolata e memorizzata:

$$h''' = z' + h_0$$

### 5.2.3.1 Filtro dell'Altitudine

Calcolo della media

L'altitudine di una località rispetto al livello medio del mare è espressa in metri e va da -413 m (Mar Morto) a 8.848 m (Everest). Per rappresentarla è sufficiente un numero a precisione singola. La media mobile di un insieme di misure di altitudine può essere calcolata semplicemente con una somma ponderata:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

### 5.2.3 Regolazione dell'orientamento

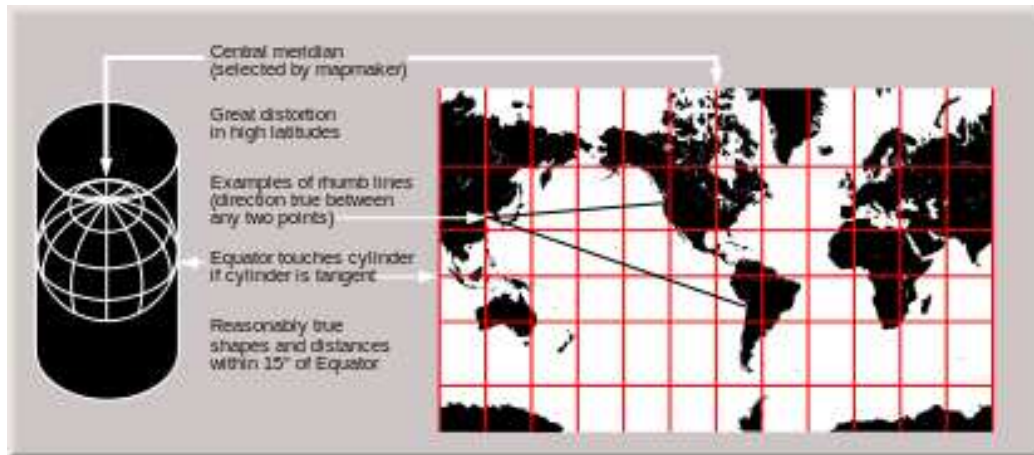
Se per un oggetto 3D viene specificato l'angolo di orientamento, è sufficiente ruotarlo di quell'angolo intorno all'origine prima di visualizzarlo.

### 5.2.4 Proiezioni equirettangolari

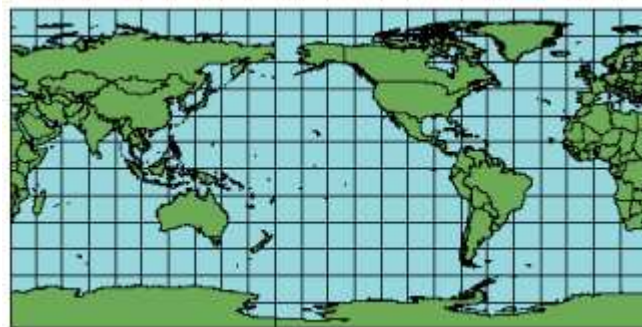
Se la parte della superficie terrestre che si vuole disegnare è relativamente piccola, si può utilizzare la proiezione equirettangolare. È sufficiente utilizzare l'asse orizzontale  $x$  per indicare la longitudine  $\lambda$  e l'asse verticale  $y$  per indicare la latitudine  $\varphi$ . Il rapporto tra questi due assi non deve essere 1:1. Si dovrebbe invece usare  $\cos(\varphi_1)$  come rapporto di aspetto, dove  $\varphi_1$  indica una latitudine vicina al centro della mappa. Inoltre, per convertire gli angoli (misurati in radianti) in lunghezze, si moltiplica per il raggio terrestre.

La proiezione equirettangolare è una semplice proiezione cartografica cilindrica che mappa i meridiani in linee rette verticali a spaziatura costante (per intervalli meridionali a spaziatura costante) e i cerchi di latitudine in linee rette orizzontali a spaziatura costante (per intervalli costanti di paralleli). La proiezione non è né di area uguale né conforme. A causa delle distorsioni introdotte da questa proiezione, è poco utilizzata nella navigazione o nella cartografia catastale e trova il suo principale impiego nella cartografia tematica.

Questa semplice proiezione cilindrica converte il globo in una griglia cartesiana.



Il parallelo centrale può essere qualsiasi linea, ma la proiezione tradizionale Plate Carrée utilizza l'equatore. Quando si utilizza l'equatore, le celle della griglia sono quadrati perfetti, ma se si utilizza qualsiasi altro parallelo, le griglie diventano rettangolari<sup>7</sup>. In questa proiezione, i poli sono rappresentati come linee rette che attraversano la parte superiore e inferiore della griglia.



Le formule presuppongono un modello sferico e utilizzano le seguenti definizioni:

- $\lambda$  è la longitudine della località da proiettare;
- $\varphi$  è la latitudine della località da proiettare;
- $\varphi_1$  sono i paralleli standard (a nord e a sud dell'equatore) dove la proiezione è in scala reale;
- $\varphi_0$  è il parallelo centrale della mappa;
- $\lambda_0$  è il meridiano centrale della mappa;
- $x$  è la coordinata orizzontale della posizione proiettata sulla mappa;

<sup>7</sup> ArchGIS for Desktop, ArcMap, Equirectangular  
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guide-books/map-projections/equirectangular.htm>



- $y$  è la coordinata verticale della posizione proiettata sulla mappa;
- $R$  è il raggio del globo.

Le variabili longitudine e latitudine sono definite in termini di radianti.

Proiezione in avanti:

$$x = R(\lambda - \lambda_0) \cos \varphi_1$$

$$y = R(\varphi - \varphi_0)$$

Proiezione inversa:

$$\lambda = \frac{x}{R \cos \varphi_1} + \lambda_0$$

$$\varphi = \frac{y}{R} + \varphi_0$$

La proiezione in avanti trasforma le coordinate sferiche in coordinate piane. La proiezione inversa trasforma dal piano alla sfera. Nella maggior parte dei casi, sarà possibile calcolare  $\cos(\varphi_1)$  una sola volta, il che semplifica i calcoli successivi di un gran numero di punti.

# IMPLEMENTAZIONI

## GPS-RTK

### Base GPS-RTK

- Stazione radio RTK
- Antenna GPS: GNSS Multi-Band
- Ancoraggio
- Cablaggio e connessioni

### U-Blox ZED-F9P

#### Lettura dei dati GPS-RTK

- Struttura dei messaggi NMEA

## MICROSOFT HOLOLENS

- Supporto HoloLens 2 per antenna attiva

## MIGLIORAMENTO DELL'ALLINEAMENTO

### Precisione della posizione GPS-RTK

#### Precisione azimutale

- Filtro dell'azimuth
- Calcolo della media

## Capitolo 6

# IMPLEMENTAZIONI

### 6.1 GPS-RTK

#### 6.1.1 Base GPS-RTK

Si è provveduto all'installazione della stazione base GPS-RTK in oggetto (visibili in Fig.1) sulla copertura della torre della Facoltà di Ingegneria a Q200, con relativo cablaggio fino alle prese di alimentazione e rete disponibili a Q195.

La base riceve i segnali radio satellitari per la geolocalizzazione, calcola le correzioni RTK e le invia tramite internet ad un servizio NTRIP per consentire ai dispositivi mobili di ricevere tali correzioni.

I dispositivi installati (visibili in Fig.2) sono di seguito elencati nel dettaglio.



Fig.1 - Immagine dell'installazione terminata



(a)



(b)

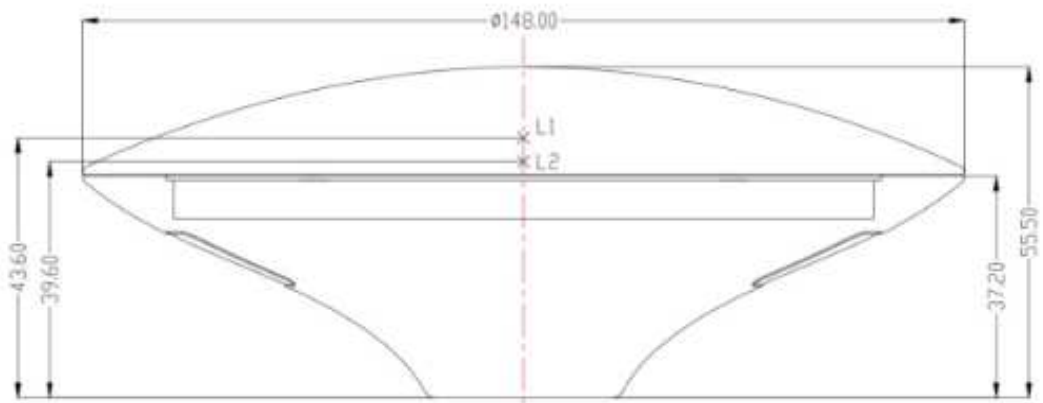
Fig.2 - Vista dell'interno della stazione base GPS-RTK (a) e della relativa antenna esterna (b)

#### 6.1.1.1 Stazione radio RTK

- Quadro cieco in vetroresina IP66 Bocchiotti, modello B04605
- Dimensioni: 650x540x260
- Fissaggio: 4x alette con staffe e collari per palo Ø35mm
- Tensione di alimentazione: 220Vac
- Assorbimento elettrico: 50W circa
- Elenco dei dispositivi all'interno della stazione Radio RTK
  - Intel® Compute Stick STK1AW32SC
  - Techole Hub USB 3.0 Ethernet
  - USB to Serial Converter
  - SparkFun GPS-RTK2 Board / GPS-RTK-SMA
  - Cable SMA to U.FL ed SMA to TNC
  - SparkFUN BLACK Board C
  - Back-UPS\_BE650G2-IT
  - Relé smart WIFI/LAN/Bluetooth Shelly Pro 1

#### 6.1.1.2 Antenna GPS: GNSS Multi-Band L1/L2 Surveying Antenna (TNC)

- Gain: ≥5dBi
- LNA Gain: 40dB
- Reception Frequencies: L1: 1555 to 1615MHz / L2: 1198 to 1278MHz
- Impedance: 50 Ohm Antenna
- Overall antenna weight: 335g
- Dimensions: 148 x 55mm
- Protection: Waterproof IP67
- Cavo di connessione con Box: cavo con connettori SMA - Tipo N (lunghezza 1,5m)
- Lunghezza dell'asta di supporto: 1m



### 1. Antenna characteristics

频率范围 (Frequency Range)	1555~1615MHz / 1198~1278MHz
端口阻抗 (port Impedance)	50 Ohm
极化方式 (Polarization)	右旋圆极化 (RHCP)
天线轴比 (Axial Ratio)	≤3dB
水平面覆盖角度 (Elevation Coverage)	360°
电压驻波比 (VSWR)	≤2
天线单元增益 (Gain of Antenna)	≥5dBi
相位中心误差 (Phase Center Error)	±2mm
低噪放增益 (LNA Gain)	40±2dB
噪声系数 (Noise Figure)	≤1.5dB
输出驻波 (VSWR)	≤1.5
输入驻波 (VSWR)	≤1.5
增益平坦度 (Gain Flatness)	±1dB
输出P1dB压缩点 (Pout at 1dB Gain Compression Point)	≥0dBm
工作电压 (LNA Drain Voltage)	3.3~12VDC
工作电流 (LNA Current Consumption)	≤45mA
差分传输延迟 (delay) 差分传输延迟 (delay)	<5ns
体积 (Dimension)	148×55.5mm
射频输出接头(RF output Connector)	TNC-C-K
安装方式 (Mounting Method)	5/8-11螺纹安装
防水等级 (Waterproof Grade)	IP67
防震等级(Shockproof Grade)	IK08
工作温度 (Operating Temp.)	-40°C ~ +85°C
存储温度 (Storage Temp.)	-40°C ~ +85°C

### 6.1.1.3 Ancoraggio

Il fissaggio al parapetto dell'armadio e dell'antenna è stato realizzato tramite palo in acciaio e 2 zanche. Il tutto è stato stabilizzato ancorando il palo alla ringhiera di acciaio con un collare a fascia incrociato e 2 tiranti in acciaio (vedi Fig.1 e Fig.3).

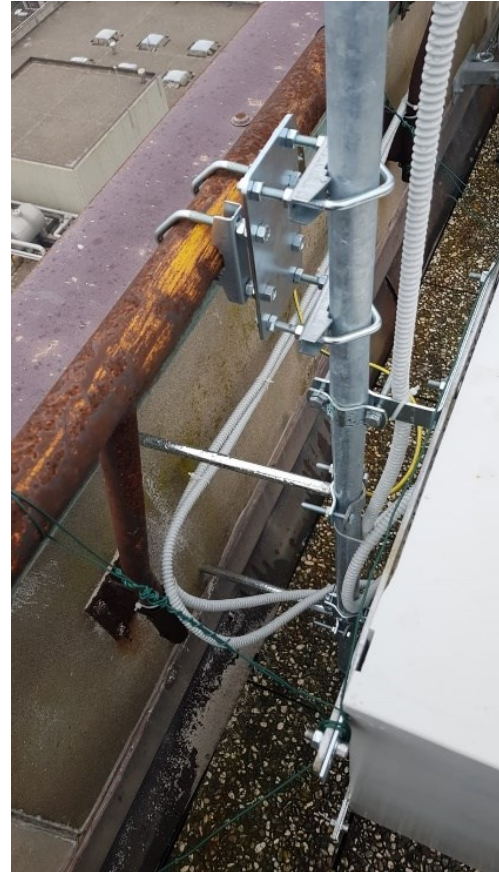


Fig.3 - Ancoraggi al parapetto e alla ringhiera

### 6.1.1.4 Cablaggio e connessioni

Il cablaggio elettrico (per una lunghezza di circa 20 metri) è stato eseguito lungo il parapetto attraverso delle opportune guaine di protezione lungo il parapetto e sotto le piastrelle fino all'apertura di collegamento con il piano sottostante. Il palo di sostegno e tutta la struttura metallica è stata cablata alla linea di terra preesistente con cavo in rame e morsetti (Fig.4). Le connessioni di alimentazione e della rete LAN sono state eseguite senza interessare i quadri elettrici ma sfruttando semplicemente le prese di rete e di alimentazione già disponibili a quota 195 (Fig.5).



Fig.4 - Messa a terra

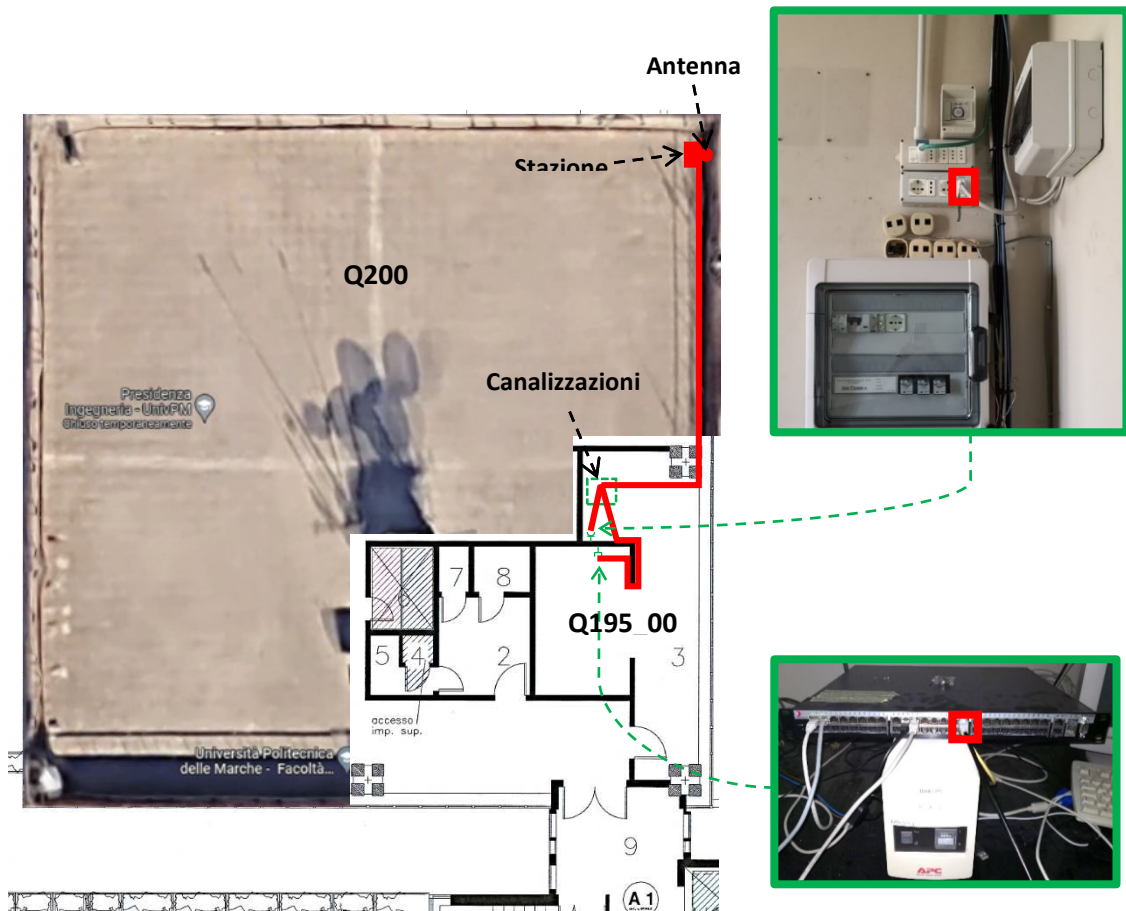


Fig.5 - Cablaggi



## 6.1.2 U-Blox ZED-F9P Interface Description

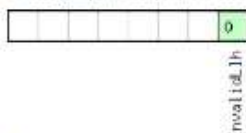
### 5.14.6 UBX-NAV-HPPOSSLH (0x01 0x14)

#### 5.14.6.1 High Precision Geodetic Position Solution

Message	UBX-NAV-HPPOSSLH					
Description	High Precision Geodetic Position Solution					
Firmware	Supported on: • <a href="#">u-blox 9 with protocol version 27.11</a>					
Type	Periodic/Polled					
Comment	See important comments concerning validity of position given in section Navigation output filters in <a href="#">Integration manual</a> . This message outputs the Geodetic position in the currently selected ellipsoid. The default is the WGS84 Ellipsoid, but can be changed with the message <a href="#">CFG-NAVSPG-USE_USRDAT</a> .					
Message Structure	Header	Class	ID	Length (Bytes)	Payload	Checksum
	0xB5 0x62	0x01	0x14	36	see below	CK_A CK_B
Payload Contents:						
Byte Offset	Number Format	Scaling	Name	Unit	Description	
0	U1	-	version	-	Message version (0x00 for this version)	
1	U1[2]	-	reserved1	-	<a href="#">Reserved</a>	
3	X1	-	flags	-	Additional flags (see <a href="#">graphic below</a> )	
4	U4	-	iTOW	ms	GPS time of week of the navigation epoch. See the section iTOW timestamps in <a href="#">Integration manual</a> for details.	
8	I4	1e-7	lon	deg	Longitude	
12	I4	1e-7	lat	deg	Latitude	
16	I4	-	height	mm	Height above ellipsoid.	
20	I4	-	hMSL	mm	Height above mean sea level	
24	I1	1e-9	lonHp	deg	High precision component of longitude. Must be in the range -99..+99. Precise longitude in deg * 1e-7 = lon + (lonHp * 1e-2).	
25	I1	1e-9	latHp	deg	High precision component of latitude. Must be in the range -99..+99. Precise latitude in deg * 1e-7 = lat + (latHp * 1e-2).	
Byte Offset	Number Format	Scaling	Name	Unit	Description	
26	I1	0.1	heightHp	mm	High precision component of height above ellipsoid. Must be in the range -9..+9. Precise height in mm = height + (heightHp * 0.1).	
27	I1	0.1	hMSLHp	mm	High precision component of height above mean sea level. Must be in range -9..+9. Precise height in mm = hMSL + (hMSLHp * 0.1)	
28	U4	0.1	hAcc	mm	Horizontal accuracy estimate	
32	U4	0.1	vAcc	mm	Vertical accuracy estimate	

#### Bitfield flags

This graphic explains the bits of flags



- signed value
- unsigned value
- reserved

Name	Description
invalidLh	1 = invalid lon, lat, height, hMSL, lonHp, latHp, heightHp and hMSLHp



### **MagmaX2 Active Multiband GNSS Magnetic Mount Antenna - AA.200**

L'antenna a montaggio magnetico GNSS multibanda Taoglas AA.200 MagmaX2 è destinata all'uso nella maggior parte delle principali costellazioni, tra cui GPS (L1/L2/L5), GLONASS (G1/G2/G5), Galileo (E1/E5a/E5b) e BeiDou(B1/B2).

L'antenna AA.200 è un'antenna GNSS GNSS a montaggio magnetico multibanda attiva che presenta un guadagno eccellente e una buona stabilità del modello di radiazione. La combinazione di questi elementi aiuta a garantire la migliore precisione di posizionamento possibile per i sistemi in cui RTK è abilitato e disabilitato. Con l'antenna GNSS multibanda Taoglas AA.200 MagmaX2, la navigazione è ideale per il posizionamento ad alta precisione, veicoli autonomi e sistemi RTK.



### **SparkFun GPS-RTK2 Board - ZED-F9P**

Con il GPS sei in grado di sapere dove sei, dove stai andando e come arrivarci ovunque sulla Terra entro 30 secondi. Ciò significa che maggiore è la precisione, meglio è! GPS Real Time Kinematics (RTK) ha imparato la composizione della precisione sui loro moduli GPS a pochi millimetri, ed è per questo che abbiamo dovuto metterlo su questa scheda!

SparkFun GPS-RTK2 alza il livello del GPS ad alta precisione ed è l'ultimo di una linea di potenti schede RTK dotate del modulo ZED-F9P di u-blox. Lo ZED-F9P è un modulo top di gamma per soluzioni di localizzazione GNSS e GPS ad alta precisione, tra cui RTK, in grado di raggiungere una precisione tridimensionale di 10 mm. Con questa scheda, sarai in grado di sapere dove si trova la tua posizione X, Y e Z (o di qualsiasi oggetto) all'incirca alla larghezza dell'unghia! La ZED-F9P è unica in quanto è in grado di operare sia con il rover che con la stazione base. Utilizzando il nostro pratico sistema Qwiic, non è necessaria alcuna saldatura per collegarlo al resto del sistema. Tuttavia, abbiamo ancora rotto i pin distanziati da 0,1 "nel caso in cui si preferisca utilizzare una breadboard.

Abbiamo anche incluso una batteria di backup ricaricabile per mantenere disponibile l'ultima configurazione del modulo e i dati satellitari per un massimo di

due settimane. Questa batteria aiuta ad avviare a caldo il modulo riducendo drasticamente il tempo necessario per la prima riparazione. Questo modulo dispone di una modalità di rilevamento che consente al modulo di diventare una stazione base e produrre dati di correzione RTCM 3.x.

Il numero di opzioni di configurazione dello ZED-F9P è incredibile! Geofencing, variabile I<sup>2</sup>Indirizzo C, frequenze di aggiornamento variabili, anche la soluzione RTK ad alta precisione possono essere aumentati a 20Hz. Il GPS-RTK2 ha anche cinque porte di comunicazione che sono tutte attive contemporaneamente: USB-C (che enumera come porta COM), UART1 (con 3.3V TTL), UART2 per la ricezione RTCM (con 3.3V TTL), I<sup>2</sup>C (tramite i due connettori Qwiic o pin rotti) e SPI.

Abbiamo anche scritto un'ampia [libreria Arduino per i moduli you-blox](#) [per](#) semplificare la lettura e il controllo del GPS-RTK2 sul nostro [sistema Qwiic Connect](#). Lasciatevi alle spalle NMEA! Inizia a utilizzare un'interfaccia binaria molto più leggera e dai una pausa al tuo microcontroller (e alla sua porta seriale). La libreria SparkFun Arduino mostra come leggere latitudine, longitudine, persino direzione e velocità su I<sup>2</sup>C senza la necessità di un polling seriale costante.

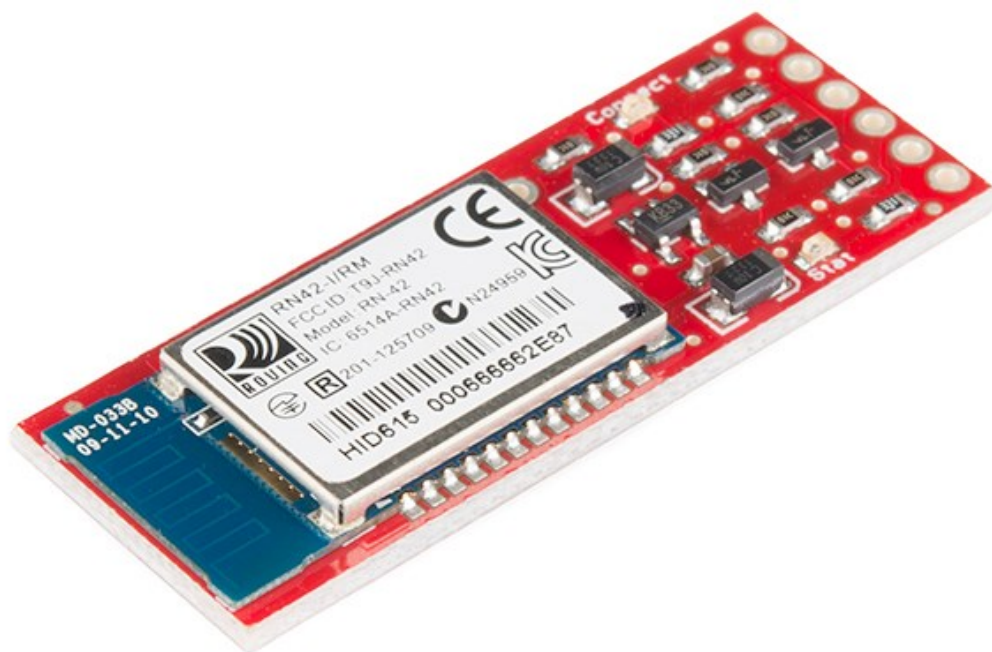
### **SparkFun Bluetooth Mate**

Il Bluetooth Mate è molto simile al nostro modem BlueSMiRF, ma è progettato specificamente per essere utilizzato con [i nostri Arduino Pro](#) e [LilyPad Arduinos](#). Questi modem funzionano come un tubo seriale (RX / TX) e sono un ottimo sostituto wireless per i cavi seriali. Qualsiasi flusso seriale da 2400 a 115200bps può essere passato senza problemi dal computer al target.

Bluetooth Mate ha lo stesso pin out dell'FTDI Basic ed è pensato per collegarsi direttamente a una scheda madre Arduino Pro, Pro Mini o LilyPad. Poiché abbiamo organizzato i pin per fare ciò, non è possibile collegare direttamente il Bluetooth Mate a una scheda FTDI Basic (dovrai scambiare TX e RX).

RN-42 è perfetto per applicazioni a corto raggio alimentate a batteria. L'RN-42 utilizza solo 26uA in modalità di sospensione pur essendo rilevabile e collegabile. Più modalità di alimentazione configurabili dall'utente consentono all'utente di comporre il profilo di alimentazione più basso per una determinata applicazione. Se hai bisogno di una portata maggiore, dai un'occhiata al Bluetooth Mate Gold.

Il Bluetooth Mate ha regolatori di tensione integrati, quindi può essere alimentato da qualsiasi alimentatore da 3,3 a 6VDC. Abbiamo impostato lo spostamento di livello in modo che i pin RX e TX sull'unità remota siano tolleranti a 3-6VDC.



### 6.1.3 Lettura dei dati GPS-RTK - NMEA

NMEA è l'acronimo di National Marine Electronics Association<sup>8</sup>.

NMEA esisteva ben prima che il GPS fosse inventato. Secondo il sito web NMEA, l'associazione è stata costituita nel 1957 da un gruppo di rivenditori elettronici per creare migliori comunicazioni con i produttori. Oggi nel mondo del GPS, NMEA è un formato di dati standard supportato da tutti i produttori di GPS, proprio come ASCII è lo standard per i caratteri digitali dei computer nel mondo dei computer.

Lo scopo di NMEA è quello di dare agli utenti delle apparecchiature la possibilità di combinare hardware e software. I dati GPS formattati NMEA semplificano inoltre agli sviluppatori di software la scrittura di software per un'ampia varietà di ricevitori GPS invece di dover scrivere un'interfaccia personalizzata per ciascun ricevitore GPS. Ad esempio, il software VisualGPS (gratuito), accetta dati in formato NMEA da qualsiasi

---

<sup>8</sup> GPS WORLD, GNSS positioning navigation timing, What exactly is GPS NMEA data, Eric Gakstatter  
<https://www.gpsworld.com/what-exactly-is-gps-nmea-data/>

ricevitore GPS e li visualizza graficamente. Senza uno standard come NMEA, sarebbe dispendioso in termini di tempo e denaro scrivere e mantenere tale software.

Inoltre, i dati NMEA possono essere trasmessi tramite diversi tipi di interfacce di comunicazione come RS-232, USB, Bluetooth, Wi-Fi, UHF e molti altri.

#### 6.1.3.1 Struttura dei messaggi NMEA

Per comprendere la struttura dei messaggi NMEA, esaminiamo il popolare messaggio \$GPGGA. Questo particolare messaggio è stato emesso da un ricevitore GPS-RTK:

```
$GPGGA,181908.00,3404.7041778,N,07044.3966270,  
W,4,13,1.00,495.144,M,29.200,M,0.10,0000  
*40
```

Tutti i messaggi NMEA iniziano con il carattere \$ e ogni campo dati è separato da una virgola.

**GP** rappresenta che si tratta di una posizione GPS (GL denoterebbe GLONASS).

**181908.00** è il timestamp: ora UTC in ore, minuti e secondi.

**3404.7041778** è la latitudine nel formato DDMM.MMMMM. Le cifre decimali sono variabili.

**N** indica la latitudine nord.

**07044.3966270** è la longitudine nel formato DDDMM.MMMM. Le cifre decimali sono variabili.

**W** indica la longitudine ovest.

**4** indica l'indicatore di qualità:

1 = Coordinate non corrette

2 = Coordinate differenzialmente corrette (ad esempio, WAAS, DGPS)

4 = Coordinate RTK Fix (precisione centimetrica)

5 = RTK Float (precisione decimetrica).

**13** indica il numero di satelliti utilizzati nella coordinata.

**1.0** indica l'HDOP (diluizione orizzontale della precisione).

**495.144** indica l'altitudine dell'antenna.

**M** indica unità di altitudine (es. metri o piedi).

**29.200** indica la separazione geoidale (sottraendola dall'altitudine dell'antenna per arrivare all'altezza sopra l'ellissoide (HAE).

**M** indica le unità utilizzate dalla separazione geoidale.

**1.0** indica l'età della correzione (se presente).

**0000** indica l'ID della stazione di correzione (se presente).

**\*40** indica il checksum.

Il \$GPGGA è un messaggio NMEA GPS di base. Esistono messaggi NMEA alternativi e complementari che forniscono informazioni simili o aggiuntive.

Ecco un paio di messaggi NMEA popolari simili al messaggio \$GPGGA con coordinate GPS in essi (questi possono eventualmente essere utilizzati come alternativa al messaggio \$GPGGA):

### **\$GPGLL, \$GPRMC**

Oltre ai messaggi NMEA che contengono una coordinata GPS, diversi messaggi NMEA complementari offrono informazioni aggiuntive oltre alla coordinata GPS. Di seguito sono riportati alcuni dei più comuni:

**\$GPGSA** - Informazioni dettagliate sul GPS DOP e dettagliate sul tracciamento satellitare (es. numeri satellitari individuali). \$GNGSA per ricevitori GNSS.

**\$GPGSV** - Informazioni satellitari GPS dettagliate come azimuth ed elevazione di ciascun satellite monitorato. \$GNGSV per ricevitori GNSS.

**\$GPVTG** - Velocità su terra e offset di tracciamento.

**\$GPGST** - Precisione orizzontale e verticale stimata. \$GNGST per i ricevitori GNSS.

Raramente il messaggio \$GPGGA ha abbastanza informazioni da solo. Ad esempio, la schermata seguente richiede: \$GPGGA, \$GPGSA \$GPGSV.

Per la mappatura e il rilevamento GPS ad alta precisione, il messaggio \$GPGST è particolarmente utile. In effetti, direi che è un requisito per gli utenti di alta precisione. Il motivo è che i metadati GPS sono molto importanti per l'utente ad alta precisione come metodo per aiutare a determinare la qualità di una particolare coordinata GPS. I tipici metadati GPS in tempo reale utilizzati per comprendere la qualità delle coordinate GPS includono: PDOP, # dei satelliti tracciati, metodo di correzione e valori di deviazione standard orizzontale / verticale. Se un utente di ricevitore GPS ha la possibilità di vedere queste informazioni sul campo durante la

raccolta dei dati, ha un livello di fiducia nella precisione dei dati GPS che sta raccogliendo. Se hai già utilizzato RTK, probabilmente richiami i familiari valori HRMS (RMS orizzontale) e VRMS (RMS verticale) visualizzati sul tuo dispositivo di raccolta dati. Il messaggio \$GPGST genera tali valori.

### **GG.MMMMMMM, GGMM.MMMMM o DDMMSS. SSSSS**

Una delle sfide nella gestione dei dati NMEA grezzi (dati che non utilizzano un software come VisualGPS per decodificarli per te) è il formato delle coordinate GPS. Non è facile da usare. È espresso in DDMM.MMMMM; gradi, minuti e minuti decimali.



## 6.2 MICROSOFT HOLOLENS

Microsoft HoloLens 2 ha aiutato le aziende del settore manifatturiero, edile, sanitario e della vendita al dettaglio a imbarcare più rapidamente i dipendenti, a completare più velocemente le attività e a ridurre notevolmente gli errori e gli sprechi. Stabilisce il punto di riferimento per i dispositivi edge intelligenti, sfruttando una moltitudine di sensori e un ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) dedicato per consentire l'esecuzione continua di più carichi di lavoro di computer vision in tempo reale. In modalità Ricerca, HoloLens 2 è anche un potente dispositivo di ricerca sulla computer vision.

Rispetto all'edizione precedente, la Modalità Ricerca per HoloLens 2 presenta i seguenti vantaggi principali:

- Oltre ai sensori esposti nella Modalità Ricerca di HoloLens 1, ora è disponibile anche l'accesso ai sensori IMU (che comprendono accelerometro, giroscopio e magnetometro).
- HoloLens 2 offre nuove funzionalità che possono essere utilizzate insieme alla Modalità Ricerca. In particolare, il tracciamento articolato delle mani e il tracciamento degli occhi, a cui si può accedere tramite API mentre si utilizza la modalità Ricerca, consentendo una serie più ricca di esperimenti.

Con la modalità Ricerca, il codice dell'applicazione non solo può accedere ai flussi video e audio, ma può anche sfruttare contemporaneamente i risultati degli algoritmi di computer vision integrati, come SLAM (localizzazione e mappatura simultanea) per ottenere il movimento del dispositivo e gli algoritmi di mappatura spaziale per ottenere mesh 3D dell'ambiente. Queste capacità sono rese possibili da diversi sensori di immagine integrati che integrano la videocamera a colori normalmente accessibile alle applicazioni.



Fig.6 - La modalità ricerca di HoloLens 2 consente di accedere alla scala di grigi, alla telecamera di profondità ed ai sensori IMU del dispositivo. Questo integra la fotocamera a colori normalmente disponibile per le applicazioni

La modalità di ricerca di HoloLens 2 consente di accedere alla scala di grigi, alla telecamera di profondità e ai sensori IMU del dispositivo. Questo integra la fotocamera a colori normalmente disponibile per le applicazioni.

HoloLens 2 dispone di quattro telecamere in scala di grigi per il tracciamento della testa e di una telecamera di profondità per rilevare l'ambiente ed eseguire il tracciamento articolato delle mani. Dispone inoltre di due ulteriori telecamere a infrarossi e dei relativi LED, utilizzati per il tracciamento degli occhi e il riconoscimento dell'iride. Come mostrato nella Fig.6, due delle telecamere in scala di grigi sono configurate come un impianto stereo, che cattura l'area di fronte al dispositivo in modo da poter determinare la profondità assoluta delle caratteristiche visive tracciate attraverso la triangolazione. Nel frattempo, le due telecamere in scala di grigi aggiuntive contribuiscono a fornire un campo visivo più ampio per tenere traccia delle caratteristiche. Queste telecamere sincronizzate a scatto globale sono molto più sensibili alla luce rispetto alla

telecamera a colori e possono essere utilizzate per acquisire immagini a una velocità fino a 30 fotogrammi al secondo (FPS).

La telecamera di profondità utilizza l'illuminazione attiva a infrarossi (IR) per determinare la profondità attraverso il tempo di volo basato sulla fase. La telecamera può funzionare in due modalità. La prima modalità consente il rilevamento ad alta velocità (45 FPS) della profondità, comunemente utilizzato per il tracciamento delle mani, mentre l'altra modalità è utilizzata per il rilevamento a bassa velocità (1-5 FPS) della profondità, attualmente utilizzato per la mappatura spaziale. Poiché le mani devono essere supportate solo fino a 1 metro dal dispositivo, HoloLens 2 risparmia energia riducendo il numero di illuminazioni, il che fa sì che la profondità si avvolga oltre il metro. Ad esempio, in questo caso qualcosa a 1,3 metri apparirà a 0,3 metri in HoloLens 2. Oltre alla profondità, questa telecamera fornisce anche immagini IR illuminate attivamente (in entrambe le modalità) che possono essere preziose in quanto illuminate dall'HoloLens e ragionevolmente non influenzate dalla luce ambientale.

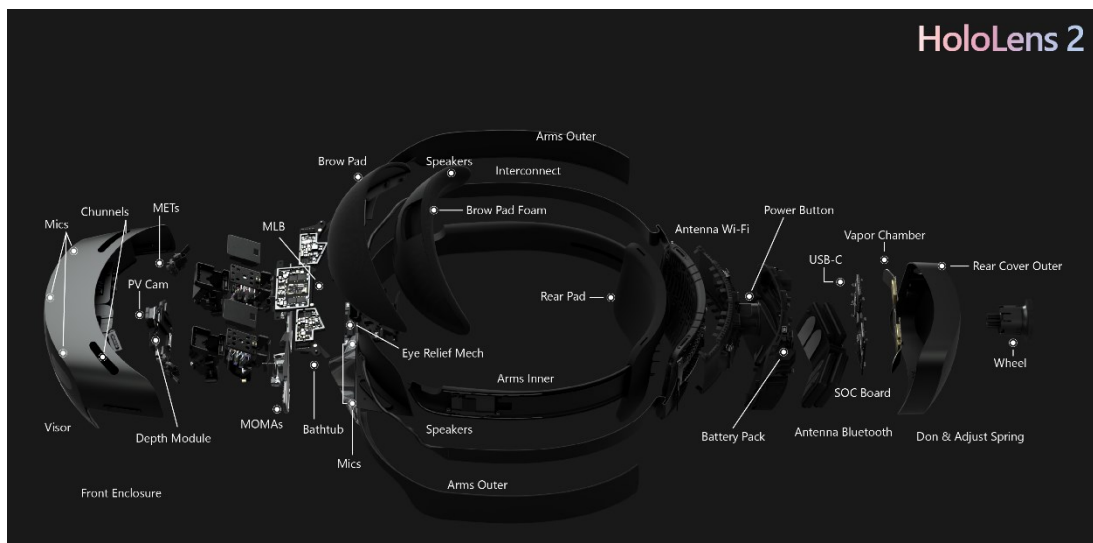


Con l'ultima versione Windows Insider di Windows 10 per HoloLens, i ricercatori hanno ora la possibilità di attivare la Modalità Ricerca sui loro dispositivi

HoloLens per accedere a tutti questi flussi di sensori di immagini grezze rivolti all'esterno. La modalità di ricerca per HoloLens 2 consente ai ricercatori di accedere anche alle letture dell'accelerometro, del giroscopio e del magnetometro. Per proteggere la privacy degli utenti, le immagini grezze della telecamera per il tracciamento oculare non sono disponibili in modalità Ricerca. I ricercatori possono accedere alla direzione dello sguardo attraverso le API esistenti.

Per gli altri flussi di sensori, i ricercatori possono continuare a utilizzare i risultati degli algoritmi di computer vision integrati e ora possono anche scegliere di utilizzare i dati grezzi dei sensori per i propri algoritmi.

I flussi dei sensori possono essere elaborati o archiviati sul dispositivo o trasferiti in modalità wireless a un altro PC o al cloud per attività più impegnative dal punto di vista computazionale. Questo apre un'ampia gamma di nuove applicazioni di computer vision per HoloLens 2. HoloLens 2 è particolarmente adatto come piattaforma per la ricerca sulla visione egocentrica, in quanto può essere utilizzato per analizzare il mondo dalla prospettiva dell'utente che indossa il dispositivo. Per queste applicazioni, la capacità dei dispositivi HoloLens di visualizzare i risultati degli algoritmi nel mondo 3D di fronte all'utente può rappresentare un vantaggio fondamentale.



### 6.2.1 Supporto HoloLens 2 per antenna attiva

L'idea e la realizzazione di un supporto che sostenga il l'antenna a montaggio magnetico GNSS, nasce dalla necessità di sapere istante-istante la posizione precisa della HoloLens.

Si è quindi proceduto con lo studio di un supporto che potesse essere integrato al design della HoloLens e che permettesse di alloggiare il rover, mantenendolo fisso ad una distanza calcolata in modo da non incorrere in eventuali problemi di disallineamento.



Il supporto si presenta di forma semicircolare, che non sia di intralcio al posizionamento dello strumento sul capo dell'utente, con, nella zona sommitale, un piatto quadrato con delle guide delle stesse dimensioni dell'antenna, sul quale vi è previsto l'alloggio. Lungo una delle due bande laterali sono stati inseriti tre incavi che permettono al cavo di alimentazione dell'antenna.

Nella zona di contatto tra il supporto della HoloLens e la HoloLens stessa è stata disposta un'asola, che con il passaggio del velcro permetterà al supporto di essere ben saldo allo strumento.

Il modello è stato poi stampato in 3D in resina e collaudato in sito.

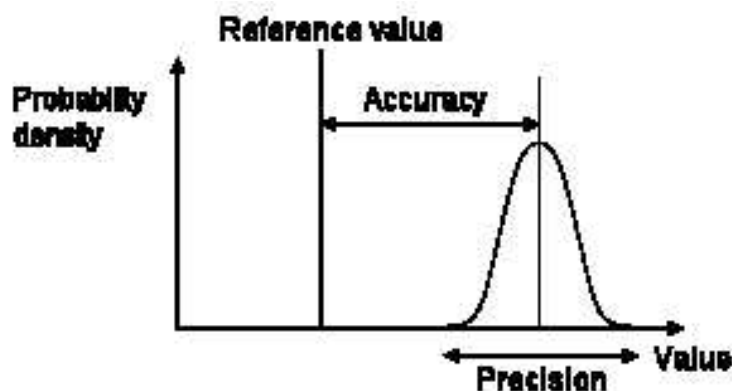


## 6.3 MIGLIORAMENTO DELL'ALLINEAMENTO

### 6.3.1 Precisione della posizione GPS-RTK

Quando si calcola l'angolo di rilevamento da due posizioni affette da incertezze, il rilevamento risultante è affetto da un'incertezza che dipende dalla precisione della posizione<sup>9</sup>.

- L'accuratezza si riferisce al raggio del cerchio sconosciuto attorno a un punto vero. Più piccolo è il raggio, maggiore è l'accuratezza. Un ricevitore con una precisione inferiore al metro può tracciare una posizione entro un raggio inferiore al metro dal punto vero. L'accuratezza della componente orizzontale (ad esempio, easting e northing) è espressa dall'errore circolare probabile (CEP) o dal doppio della distanza rms (2drms). CEP significa che esiste il 50% di probabilità che la posizione orizzontale vera si trovi all'interno di un cerchio di raggio pari al valore di CEP. Il corrispondente livello di probabilità del 2drms varia dal 95,4% al 98,2% a seconda dei valori relativi degli errori nelle componenti di easting e northing. Il rapporto tra il 2drms e il CEP varia da 2,4 a 3. Ciò significa che una precisione di 40 m (CEP) equivale a 100 m (2drms) per un rapporto di 2,5.
- La precisione si riferisce alla ripetibilità o alla frequenza con cui un ricevitore è in grado di tracciare un punto all'interno del cerchio di precisione e se tale cerchio è in grado o meno di coprire il punto vero.



<sup>9</sup> what-when-how, GPS Accuracy and Precision Measures  
<https://what-when-how.com/gps/gps-accuracy-and-precision-measures/>

### Precisione nominale

La precisione nominale del dispositivo GPS attualmente utilizzato è di circa  $a=0,02$  m in modalità RTK Fix.

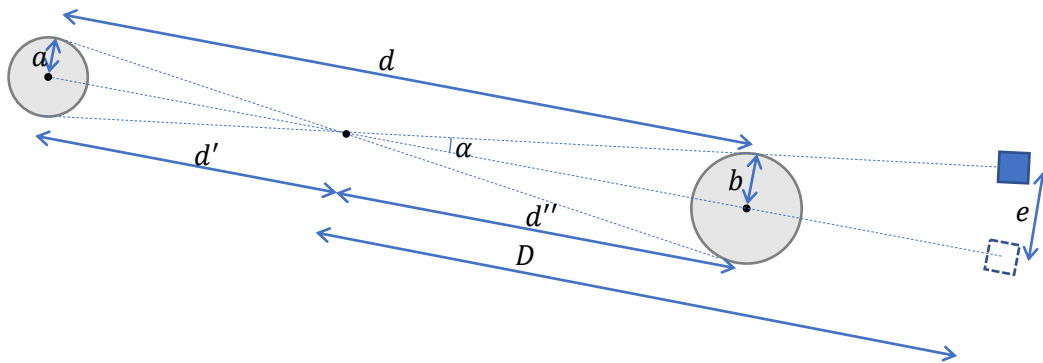
### Stima della precisione di bordo

Il ricevitore GPS fornisce anche stime di accuratezza sia orizzontale (hAcc) che verticale (vAcc). Il risultato di un test reale su queste accuratezze è riassunto nel seguente grafico che mette in relazione l'errore di posizione con l'accuratezza stimata.

### 6.3.2 Precisione azimutale

Quando si calcola l'angolo di rilevamento da due posizioni affette da incertezze, il rilevamento risultante è affetto da un'incertezza che dipende dalla precisione della posizione.

Con riferimento alla misura di precisione 2drms, se  $d$  è la distanza tra due punti di allineamento,  $a$  è il raggio di precisione nella prima posizione e  $b$  è il raggio di precisione nella seconda posizione, l'incertezza angolare  $\pm\alpha$  è data da:



$$a = d' \tan \alpha, \quad b = d'' \tan \alpha, \quad d = d' + d''$$

$$d = \frac{a + b}{\tan \alpha}, \quad \alpha = \arctan \frac{d}{a + b}$$

L'incertezza angolare corrispondente a un'incertezza di allineamento osservata  $\pm e$  quando un oggetto si trova alla distanza  $D$  dall'osservatore è tale che  $\tan \alpha = e/D$ . Pertanto, la distanza minima tra due punti di allineamento per ottenere tale precisione è:



$$d_{gps} = D \frac{a+b}{e} = \frac{a+b}{e_{\%}/100}$$

Dove  $e_{\%} = 100 e/D$  è  $e$  espresso come percentuale di  $D$  ( $e = e_{\%}D/100$ ).

Tuttavia, tutto questo considera solo l'incertezza del GPS, ma anche la posizione di HoloLens viene utilizzata per calcolare l'azimut. L'errore di localizzazione di HoloLens 1 durante l'esecuzione di percorsi lunghi è stato stimato in [1] pari a circa  $h_{\%}=0,8\%$  della distanza percorsa (2,39 m su 287 m). Supponendo che tale deriva sia costante, essa si aggiunge all'errore di misurazione GPS-RTK alla fine del percorso dove viene effettuato l'allineamento ( $b = a + dh_{\%}/100$ ). Pertanto, assumendo costante l'incertezza GPS  $a$ , l'espressione per calcolare la distanza di allineamento diventa:

$$d = \frac{2a + dh_{\%}/100}{e_{\%}/100} \rightarrow d = \frac{2a}{(e_{\%} - h_{\%})/100}, \quad e_{\%} = \frac{200a + dh_{\%}}{d}$$

e i risultati sono riportati nella tabella seguente:

$D$ (m)	$e$ (m)	$e_{\%}$	$\alpha$ (deg)	$a$ (m)	$h_{\%}$	$d_{gps}$ (m)	$d$ (m)
3	0,040	1,33%	0,76	0,020	0,80%	3	8
3	0,040	1,33%	0,76	0,015	0,80%	2	6
3	0,030	1,00%	0,57	0,020	0,80%	4	20
3	0,030	1,00%	0,57	0,015	0,80%	3	15
3	0,020	0,67%	0,38	0,020	0,80%	6	-30
3	0,020	0,67%	0,38	0,015	0,80%	5	-23
5	0,020	0,40%	0,23	0,020	0,80%	10	-10
5	0,020	0,40%	0,23	0,015	0,80%	8	-8
3	0,010	0,33%	0,19	0,020	0,80%	12	-9
3	0,010	0,33%	0,19	0,015	0,80%	9	-6
5	0,010	0,20%	0,11	0,020	0,80%	20	-7
5	0,010	0,20%	0,11	0,015	0,80%	15	-5

Sono quindi possibili solo alcune incertezze  $e$ , quelle con  $e_{\%} - h_{\%} > 0$ . Con i parametri ipotizzati sopra, la distanza di allineamento deve essere di almeno 6 metri per ottenere un errore di inclinazione inferiore a 0,76 gradi (4 cm per oggetti posti a 3 m dall'osservatore).

Viceversa, data una distanza di allineamento  $d = 10m$ ,  $a = 0.02m$ ,  $h = 0.8\%$ , la confidenza risultante è  $e_{\%} = \pm 1.2\%$  ( $\pm 12cm@10m$ ).

### 6.3.2.1 Filtro dell'azimuth

Per migliorare l'accuratezza dell'angolo azimutale stimato tramite GPS-RTK, per ridurre l'incertezza si possono utilizzare più misure di azimuth, ciascuna con intervallo di confidenza  $e$  pari alla media degli ultimi  $n$  campioni (media mobile): l'intervallo di confidenza della media si riduce a  $e/\sqrt{n}$ .

Si definisca  $n$  come numero di osservazioni indipendenti in un campione  $(x_1, \dots, x_n)$  estratto da una popolazione di  $N$  osservazioni con media non nota  $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  e la

deviazione standard  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$ .

La media e la deviazione standard del campione sono rispettivamente<sup>10</sup>:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Poiché la media effettiva  $\mu$  non è nota, il valore medio del campione  $\bar{x}$  deve essere calcolato come stima della media vera  $\mu$ . Tuttavia, tra i residui  $(x_1 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x})$  (residui, non errori perchè la media della popolazione è sconosciuta) solo  $n - 1$  di essi sono indipendenti poiché sommano a 0 a causa della definizione della media campionaria. Questo porta alla correzione di Bessel che Evita la distorsione della stima della deviazione standard. Il termine  $n - 1$  nel denominatore è spesso chiamato numero di gradi di libertà.

---

<sup>10</sup> CUEMATH, Standard deviation  
<https://www.cuemath.com/data/standard-deviation/>

La variazione campionaria non distorta che ne risulta è:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Uno degli approcci più comuni per migliorare l'affidabilità delle misure consiste nell'effettuare misure replicate della stessa grandezza. In questo caso, molto spesso il risultato della misurazione viene presentato come il valore medio delle misure replicate<sup>11</sup>.

Data la deviazione standard  $s$ <sup>12</sup> degli individui, e supponendo che la serie di misurazioni sia sufficientemente ampia (diciamo 10-15 campioni), la deviazione standard della media può essere calcolata come:

$$s_m = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Se prendiamo un campione di  $n$  osservazioni da una distribuzione normale  $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ , allora la variabile casuale  $\frac{\bar{x}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}$  ha una distribuzione standard ( $\mathcal{N}(0,1)$ ) e la variabile casuale  $\frac{\bar{x}-\mu}{s/\sqrt{n}}$  ha una distribuzione  $t$  di Student con  $n - 1$  gradi di libertà. Poiché l'unica grandezza non osservabile in quest'ultima espressione è  $\mu$ , si possono ricavare intervalli di confidenza per  $\mu$ .

$$CI_m = \frac{CI}{\sqrt{n}}$$

Per combinare le diverse fonti di incertezza, i diversi contributi devono essere convertiti in misure di incertezza standard  $u(x, SOURCE)$ .<sup>13</sup>

---

<sup>11</sup> Estimation of measurement uncertainty in chemical analysis, Mean, standard deviation and standard uncertainty  
<https://sisu.ut.ee/measurement/32-mean-standard-deviation-and-standard-uncertainty>

<sup>12</sup> Estimation of measurement uncertainty in chemical analysis, Standard deviation of the mean  
<https://sisu.ut.ee/measurement/33-standard-deviation-mean>

<sup>13</sup> Estimation of measurement uncertainty in chemical analysis, Quantifying uncertainty component  
<https://sisu.ut.ee/measurement/41-quantifying-uncertainty-components>

Le principali fonti di incertezza di una misura sono:

- Ripetitività  $u(x, REP)$
- Calibrazione  $u(x, CAL)$
- Temperatura  $u(x, TEMP)$
- Altre incertezze del modello

La parte dell'incertezza relativa alla ripetibilità può essere calcolata semplicemente a partire dalla deviazione standard  $s$ :

$$u(x, REP) = s$$

A causa della forma della distribuzione normale, la probabilità di osservare  $x$  nell'intervallo  $\bar{x} \pm s$  è di circa 68.3%.

$$\mathcal{P}\{\bar{x} \in [\bar{x} \pm s]\} = 68.3\%$$

Allo stesso tempo, la probabilità di osservare  $\bar{x}$  nell'intervallo  $\bar{x} \pm s(\bar{x})$  è di circa 68.3%.

$$\mathcal{P}\{\bar{x} \in [\bar{x} \pm s/\sqrt{n}]\} = 68.3\%$$

La probabilità può salire al 95,5% se l'intervallo di confidenza viene aumentato a due volte la deviazione standard:

$$\mathcal{P}\{\bar{x} \in [\bar{x} \pm 2s/\sqrt{n}]\} = 95.5\%$$

Concludendo, a condizione che si disponga di almeno 10-15 campioni e che gli effetti della calibrazione, della temperatura e di altro tipo siano trascurabili, l'intervallo di confidenza al 95,5% del valore medio delle misure è:

$$CI_{95.5\%} = \pm 2s/\sqrt{n}.$$

Utilizzando gli stessi parametri riportati sopra, data una distanza di allineamento  $d = 10m$ ,  $a = 0.02m$ ,  $h = 0.8\%$  e filtrando con  $n = 16$  campioni, la confidenza risultante della media è  $\bar{e}_\% = \pm 1.2\%/4 = \pm 0.3\%$  ( $\pm 3cm@10m$ ). Se l'utente può camminare a circa 0,5 m/s, l'allineamento si stabilizza dopo 200 secondi.

Più in generale, se una persona che indossa il dispositivo cammina a  $v = 0.5m/s$ , in un tempo fisso  $T = 60s$  può percorrere al massimo  $vT = 30m$ . Il numero di campioni

disponibili per il calcolo della media è quindi  $n = vT/d$ . Pertanto, l'incertezza della media  $\bar{e}_{\%} = e_{\%}/\sqrt{n}$  è:

$$\bar{e}_{\%} = \frac{200a + dh_{\%}}{\sqrt{dvT}}$$

Il valore ottimale  $d^*$  che minimizza  $\bar{e}_{\%}$  rispetto a  $d$  si ottiene con:

$$d^* = \arg \min_d \bar{e}_{\%}(d, a, h_{\%}, v, T)$$

$$\bar{e}_{\%}^* = \min_d \bar{e}_{\%}(d, a, h_{\%}, v, T)$$

La prima condizione è verificata quando la derivate di  $\bar{e}_{\%}$  va a 0:

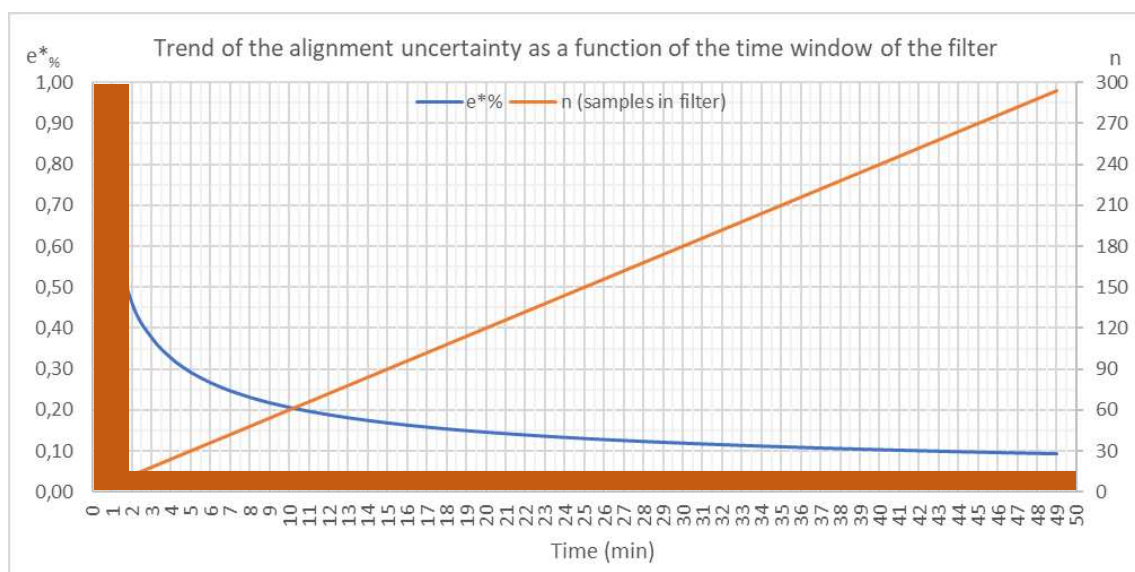
$$\frac{\partial \bar{e}_{\%}}{\partial d} = \frac{h_{\%}}{\sqrt{vTd}} - \frac{(200a + dh_{\%})vT}{2(\sqrt{vTd})^3} = 0$$

$$h_{\%} = \frac{(200a + dh_{\%})vT}{2(\sqrt{vTd})^2} \rightarrow h_{\%} = \frac{(200a + dh_{\%})}{2d} \rightarrow 2h_{\%}d = 200a + dh_{\%}$$

$$d^* = \frac{200a}{h_{\%}}$$

$$\bar{e}_{\%}^* = 100 \frac{4a}{\sqrt{vTd^*}}$$

Questo, produce per  $a = 0.02m$ ,  $h_{\%} = 0.8\%$ ,  $v = 0.5m/s$  una distanza di allineamento ottimale  $d^* = 5m$  e:



Per avere un campione significativo,  $n > 10-15$  campioni, quindi il filtro deve avere una finestra temporale di almeno  $T = 2$  minuti, che corrisponde ad un'incertezza inferiore a  $\bar{e}_0^* = \pm 0.5\%$  ( $\bar{e}^* = \pm 5cm@10m$ ).

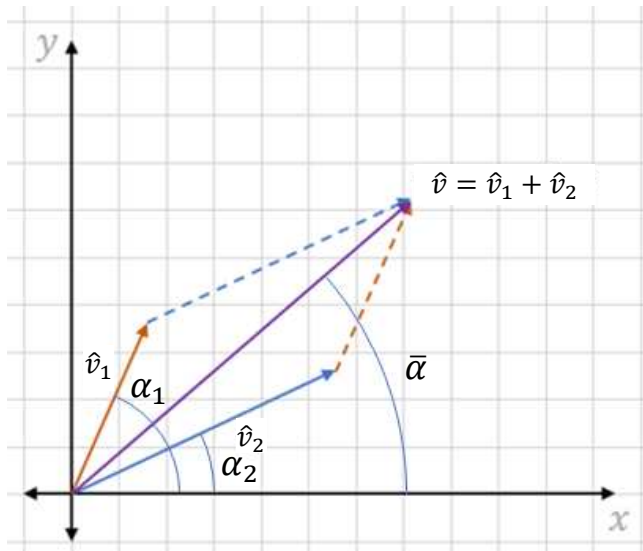
Quando si misurano le distanze relative tra due punti a distanza  $d^*$ , la massima deriva di HoloLens sarà inferiore a  $h = h_{\%} \cdot d^*/100 = 0.8 * 5/100 = 4cm$  che si aggiunge all'incertezza del GPS  $a = 2cm$ , dando così un'incertezza complessiva per la differenza tra la distanza misurata da HoloLens e quella misurata dal GPS pari a  $\Delta d = 2(a + h) = 12cm$ . Questa misura può essere utilizzata come tolleranza di distanza per confrontare le due misure ai fini dell'allineamento: se la differenza rientra in tale tolleranza, le misure possono essere considerate affidabili, altrimenti devono essere scartate.

Riassumendo, per  $a = 0.02m$ ,  $h_{\%} = 0.8\%$ ,  $v = 0.5m/s$ ,  $\bar{e}^* = \pm 5cm@10m$  I parametri di regolazione sono:

$$d^* = 5m, \quad \Delta d = 0.12m, \quad T \geq 120s$$

#### 6.3.2.2 Calcolo della media

Supponiamo che siano disponibili  $n$  misure di azimut  $\alpha_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  poiché ognuna di esse è un angolo periodico che rappresenta una direzione sul piano orizzontale, la media tra di esse non può essere calcolata come media semplice ma deve essere calcolata come somma di vettori 2D unitari  $\hat{v}_i = (\cos \alpha_i, \sin \alpha_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . I pesi  $w_i$  per il calcolo della media  $\alpha$  sono le grandezze dei vettori e devono essere associati all'affidabilità della misura. La direzione della somma vettoriale risultante rappresenta l'azimut filtrato e non è affetta dal problema della periodicità degli angoli.



$$\bar{\alpha} = \angle \left( \sum_{i=1}^n w_i \hat{v}_i \right)$$

Data una misura di precisione  $a_i$  che assume valori maggiori di 1 e un esponente costante  $k$ , un possibile peso per calcolare una somma ponderata tra più valori è:

$$w_i = \frac{1}{\max(a_i, 1)^k}$$

Utilizzando  $k = 4$ , il peso si avvicina a 1 in modalità RTK Fix, passa a 1/2 quando l'accuratezza aumenta a 1,2 e diventa 5 se l'accuratezza è 1,5, per aumentare molto rapidamente quando si perde il fix RTK.

# **RISULTATI**

**POSIZIONE**

**ALLINEAMENTO AL NORD**

**POSIZIONAMENTO OGGETTI 3D**





## Capitolo 7

### RISULTATI

Per verificare che il posizionamento e l'accuratezza del GPS fossero effettivamente precisi, ci si è spostati sul campo procedendo con degli esperimenti che potessero avvalorare gli algoritmi e le funzioni descritte in precedenza

#### 7.1 POSIZIONE

Sono state individuate e geolocalizzate due zone antistanti il plesso Universitario di Montedago, ad Ancona per effettuare i primi Test di tracciamento ed allineamento al Nord.

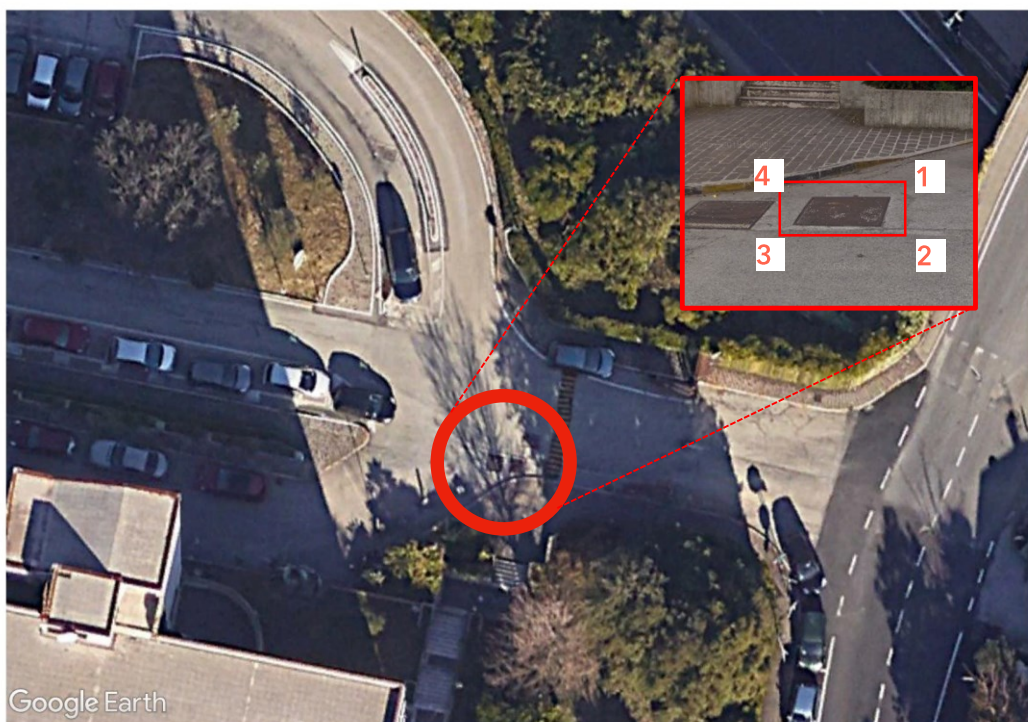


Fig.1 - Tombino \_ Geolocalizzazione e misurazione dei quattro vertici



Fig.2 - Parcheggio \_ Geolocalizzazione e misurazione dei quattro vertici interni dei quattro tombini che circoscrivono un rettangolo

### I Test \_ Coordinate Tombino - Antenna Attiva

0,017453293	RTK		GOOGLE		DISTANZE RTK		DISTANZE GOOGLE	
	Lat	Lon						
1	43,587852478027	13,517384529114	43,587851712843	13,517385035144	1,294744842113	0,977418715287		
2	43,587863922191	13,517387390137	43,587860398765	13,517387090890	1,013631604792	0,910587389420		
3	43,587860107422	13,517398834229	43,587858909751	13,517398191930	1,280747189794	0,949352979660		
4	43,587848663330	13,517396926880	43,587850471997	13,517396684382	1,082428936600	0,949352979660		

2

1

3

Si procede individuando e georeferenziando su mappa Google Earth (1) i quattro vertici del Tombino in esame ed inseriti in tabella, ci si sposta poi in situ procedendo con la geolocalizzazione attraverso GPS-RTK, posizionando il GPS a terra, in corrispondenza dei quattro vertici (2), e misurando con una staffale dimensioni reali del Tombino in esame (dimensione 1x1m).

Si passa quindi a calcolare le distanze tra i vari pin georeferenziati presi in esame e vediamo che la differenza tra il reale ed il calcolato è abbastanza sostanziale. Tale differenza verrà appianata nei successivi test, poiché l'errore è stato prendere i dati GPS posizionando il dispositivo a terra, il che non permetteva un giusto rilevamento delle coordinate.

## Il Test \_ Coordinate Tombino - Antenna Attiva

0,017453293	RTK		GOOGLE		DISTANZE RTK		DISTANZE GOOGLE	
	Lat	Lon						
1	43,587852478027	13,517385482788	43,587851712843	13,517385035144	1,280747189794		0,977418715287	
2	43,587863922119	13,517387390137	43,587860398765	13,517387090890	1,013631604792		0,910587389420	
3	43,587860107422	13,517398834229	43,587858909751	13,517398191930	0,870096377871		0,949352979660	
4	43,587852478027	13,517396926880	43,587850471997	13,517396684382	0,925314825166		0,949352979660	

2
1
3

Si procede con un secondo test:

Vengono riportati in tabella i precedenti dati presi attraverso Google Earth (1), procedendo con la stessa geolocalizzazione attraverso GPS RTK, posizionando, questa volta, l'antenna su un cavalletto in bolla ad un'altezza di 1m da terra, in corrispondenza dei quattro vertici (2).

Si passa quindi ad effettuare il calcolo le misure delle distanze tra i vari vertici, che questa volta risulta più veritiera alle misure reali, rispetto a quelle del test precedente (3).



### III Test \_ Coordinate Tombino - Antenna Attiva

0,017453293	RTK		GOOGLE		DISTANZE RTK	DISTANZE GOOGLE
	Lat	Lon				
1	43,587852830000	13,517384500000	43,587851712843	13,517385035144	0,986596556321	0,977418715287
2	43,587861500000	13,517387000000	43,587860398765	13,517387090890	0,968153873514	0,910587389420
3	43,587860000000	13,517398830000	43,587858909751	13,517398191930	0,986596556321	0,949352979660
4	43,587851330000	13,517396330000	43,587850471997	13,517396684382	0,963488045050	0,949352979660

2

1

3

### Coordinate Tombino - Antenna a Piatto

0,017453293	RTK		GOOGLE		DISTANZE RTK	DISTANZE GOOGLE
	Lat	Lon				
1	43,587852670000	13,517384170000	43,587851712843	13,517385035144	1,004700755322	0,977418715287
2	43,587861500000	13,517386670000	43,587860398765	13,517387090890	0,995689804342	0,910587389420
3	43,587860000000	13,517398830000	43,587858909751	13,517398191930	1,022484450671	0,949352979660
4	43,587851000000	13,517396170000	43,587850471997	13,517396684382	0,986596556321	0,949352979660

5

4

6

A questo punto per una maggiore correttezza di georeferenziazione si procede comparando i dati acquisiti dai calcoli precedenti con l'ausilio della nostra Antenna Attiva, con quelli estrapolati da un'Antenna a Piatto, strumento di georeferenziazione professionale.

Vengono applicate le stesse procedure precedenti, questa volta con maggiore accortezza con l'ausilio di filo a piombo che centra in maniera più corretta i pin in analisi. In questo Test si procede in un primo momento con il rilevamento dei dati con l'ausilio dell'Antenna Attiva (2), poi lo stesso procedimento viene eseguito utilizzando un'Antenna a piatto posto sullo stesso cavalletto (5);

Inseriti i dati nelle Tabelle e calcolate le distanze, è possibile verificare come i dati della prima e seconda tabella, eseguiti con strumenti GPS differenti, collimino con una minima imprecisione centimetrica. (3) (6)

### III Test \_ Coordinate Parcheggio - Antenna Attiva

0,017453293	RTK		GOOGLE		DISTANZE RTK	DISTANZE GOOGLE
	Lat	Lon				
5	43,587808500000	13,518433670000	43,587809282876	13,518433817822	4,051190734407	4,092140841080
6	43,587831500000	13,518472670000	43,587832362715	13,518473408588	24,279876454871	24,307885963971
7	43,588004830000	13,518289330000	43,588005868153	13,518289815131	4,023285795953	3,985021508220
8	43,587983000000	13,518249500000	43,587984691605	13,518249908408	24,423477727377	24,491098977524

2

1

3

### Coordinate Parcheggio - Antenna a Piatto

0,017453293	RTK		GOOGLE		DISTANZE RTK	DISTANZE GOOGLE
	Lat	Lon				
5	43,587808830000	13,518433670000	43,587809282876	13,518433817822	4,056748688263	4,092140841080
6	43,587831330000	13,518473330000	43,587832362715	13,518473408588	24,326973285480	24,307885963971
7	43,588004830000	13,518289330000	43,588005868153	13,518289815131	4,000821712602	3,985021508220
8	43,587983330000	13,518249500000	43,587984691605	13,518249908408	24,423662235434	24,491098977524

5

4

6

A questo punto si procede con l'individuazione e georeferenziazione attraverso Google Earth (1) dei pin di riferimento del parcheggio e per poi riportarli in tabella. Vengono poi geolocalizzati attraverso GPS-RTK, posizionando il GPS su un cavalletto in bolla ad un'altezza di 1m, in corrispondenza dei quattro vertici, con l'ausilio di filo a piombo. Anche in questo Testo si procede in un primo momento con il rilevamento dei dati con l'ausilio dell'Antenna Attiva (2), poi lo stesso procedimento viene eseguito utilizzando un'Antenna a piatto posto sullo stesso cavalletto (5).

Vengono misurate successivamente, con un misuratore metro laser, le distanze reali del rettangolo circoscritto dai Tombini in esame:

Distanza 7-8: 3,978 m

Distanza 5-6: 3,994 m

Inseriti i dati nelle Tabelle e calcolate le distanze, è possibile verificare come, anche in questo caso, i dati della prima e seconda tabella, eseguiti con strumenti GPS differenti, collimino con una minima imprecisione centimetrica. (3) (6)



Fig.2 - Esecuzione delle coordinate GPS con antenna a piatto posizionata su un cavalletto in bolla con l'ausilio di un filo a piombo

## 7.2 ALLINEAMENTO AL NORD

Observation points	Targets													
	Bell Tower		Ancient Lighthouse		Cathedral Dome		Antenna		Bastion		Prison			
	Azimuth	Measured Azimuth	Azimuth	Measured Azimuth	Azimuth	Measured Azimuth	Azimuth	Measured Azimuth	Azimuth	Measured Azimuth	Azimuth	Measured Azimuth		
Manhole cover_1	1,96	1	356,56	355			335,19	333	359,29	358				
Parking lot_n5							318,94	316						
Parking lot_n6			355,33	355			317,98	318			115,29	116		
Parking lot_n8			355,56	356,5			318,47	319						
			355,56	356			318,47	318						
			355,56	354							115,29	111		
ACCEPTABLE VALUES	1/1		3/7		0/1		5/7		0/1		1/1			

LEGENDA	
	$\Delta \leq 1^\circ$
	$1^\circ < \Delta \leq 2^\circ$
	$2^\circ < \Delta \leq 4^\circ$
	$4^\circ < \Delta$

Si procede ora a verificare che l'allineamento al Nord, determinato in precedenza con l'ausilio della Formula di Haversine unita al codice informatico, ci permetta di ottenere quella precisione al decimo di grado che stiamo cercando.

Il test è stato condotto nel Parcheggio collocato tra la Facoltà di Ingegneria e il Liceo Scientifico di Galileo Galilei di Ancona.

Come prima cosa è stato necessario verificare la complementarità degli angoli, perciò è stato necessario, all'accensione del dispositivo di Mixed Reality, HoloLens, posizionarsi inizialmente dal vertice del Tombino pin5, al vertice del Tombino pin6.

Nel primo spostamento, l'HoloLens mostra un angolo di 50°, corrispondente all'angolo che la direzione forma con la direzione del Nord misurato in senso orario a partire dal Nord; allo spostamento inverso invece, l'HoloLens mostra un angolo di 230°. Questo primo test ci ha permesso di verificare la complementarità degli angoli per cui avremo la sicurezza di muoverci e ruotare lungo i 360° senza alcun errore di allineamento.

Determinata la giusta complementarità, ci si è occupati di verificare il corretto allineamento al Nord.

In primo luogo è stato necessario accendere l'applicazione e attendere qualche secondo, muovendosi di qualche passo, affinché lo strumento riuscisse a stabilizzare le proprie coordinate GPS per poi geolocalizzarsi in maniera quasi immediata.

Per procedere con il Test è stato necessario verificare nuovamente la posizione dettate dal Test di Posizione del capitolo precedente per determinare la posizione dei vari Pin presi in esame (Pin5, Pin6, Pin7, Pin8). Successivamente sono stati scelti dei riferimenti noti, visibili in lontananza dal nostro punto di osservazione:

- Campanile;
- Vecchio Faro di Ancona;
- Cattedrale;
- Antenna;
- Bastione (antiche mura del Cardeto);
- Prigione di Montacuto.

Questi riferimenti sono poi stati individuati in su Mappa GIS, verificando a tre punti il grado definito tra il Nord geografico, la posizione dell'utente e la posizione dei

riferimenti, andando quindi a determinare il grado corrispondente all'angolo compreso tra la direzione del Nord e la posizione del riferimento in senso orario.

Tali dati sono stati inseriti in una Tabella, in corrispondenza del "Measured Azimuth).

A questo punto è stato necessario verificare che i dati estrapolati dal nostro strumento HoloLens collimi o per lo meno si discosti dalla posizione non oltre il decimo di grado.



Analizzando i risultati è possibile vedere come per una buona parte dei riferimenti il si riesca a raggiungere l'obiettivo sperato, mentre per altri si supera il grado di disallineamento.

Facendo però affidamento a quanto detto nel capitolo del "Miglioramento dell'allineamento", l'HoloLens presenta un'incertezza angolare corrispondente ad



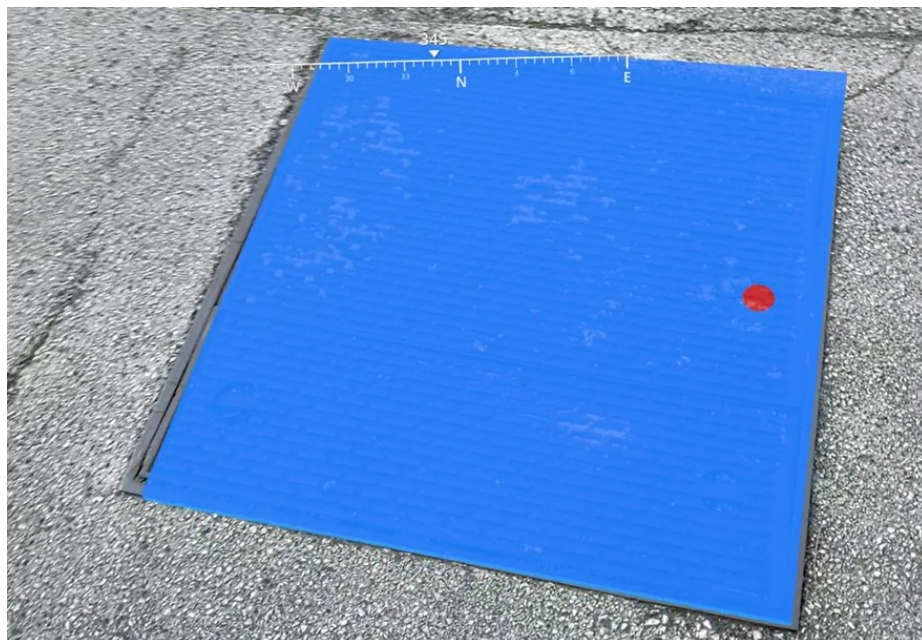
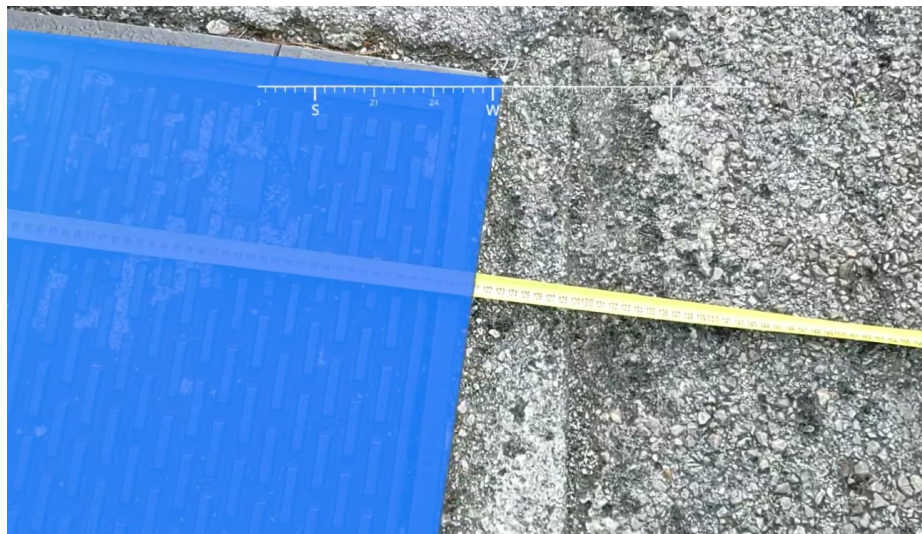
un'incertezza di allineamento osservata  $\pm e$  quando un oggetto si trova alla distanza  $D$  dall'osservatore è tale che  $\tan\alpha=e/D$ . Questa deriva è possibile risolverla attraverso il Filtro dell'Azimuth che, a condizione che si disponga di almeno 10-15 campioni e che gli effetti della calibrazione, della temperatura e di altro tipo siano trascurabili, l'intervallo di confidenza al 95,5% del valore medio delle misure è:

$$CI_{95,5\%} = \pm 2s/\sqrt{n}.$$

### 7.3 POSIZIONAMENTO OGGETTI 3D

Raggiunto il nostro obiettivo di precisione centimentrica ed orientamento nell'ordine del decimo di grado, si conclude con l'ultima applicazione, ovvero il posizionamento ed allineamento degli oggetti virtuali 3D nel mondo reale.

Come è possibile notare dalle immagini l'allineamento soddisfa le nostre richieste, mantenendo il giusto Bearing ed allineamento continuo come si evince dagli screenshot fatti dalla HoloLens durante l'esecuzione dei test.







# **CONCLUSIONI**



## Capitolo 8

# CONCLUSIONI

In conclusione, la presente tesi ha descritto l'utilizzo di una metodologia innovativa basata sull'integrazione di tecnologie avanzate per ottenere un elevato livello di precisione e accuratezza nella definizione dei parametri di posizione e orientamento di un modello digitale. L'approccio adottato ha sfruttato la tecnologia ad alta precisione RTK di un sistema GPS, combinata con lo strumento di Mixed Reality fornito dalle HoloLens di Microsoft.

Attraverso la fusione di queste tecnologie e l'impiego dell'unità di misura inerziale (IMU) incorporata nelle HoloLens, siamo stati in grado di definire in modo affidabile tutti e sei i gradi di libertà del modello digitale. Ciò ha permesso di ottenere un allineamento preciso tra il modello digitale e quello reale, garantendo una precisione inferiore al centimetro e un'approssimazione dell'orientamento inferiore al decimo di grado, come dimostrato dagli esperimenti condotti.

Le competenze di calcolo fornite da algoritmi e funzioni specifiche hanno giocato un ruolo fondamentale nell'elaborazione dei dati acquisiti e nella corretta regolazione della posizione e dell'orientamento al Nord geografico del modello digitale. L'uso della tecnologia RTK ha consentito di ottenere misurazioni di precisione elevata, mentre l'apporto della Mixed Reality delle HoloLens ha permesso di visualizzare in tempo reale il modello digitale allineato con il mondo reale, aprendo così nuove prospettive per applicazioni in diversi settori, come l'architettura, l'ingegneria civile e la progettazione urbana.

I risultati ottenuti dimostrano l'efficacia di questa metodologia integrata nel raggiungere livelli di precisione e accuratezza precedentemente inimmaginabili. L'implementazione di tali tecnologie può portare a notevoli vantaggi in termini di tempi e costi di progettazione, riducendo la necessità di operazioni manuali e i potenziali errori umani.

In conclusione, l'utilizzo combinato della tecnologia RTK, degli strumenti di Mixed Reality e dell'IMU ha dimostrato di poter migliorare significativamente la definizione dei parametri di posizione e orientamento di un modello digitale.

L'integrazione di queste tecnologie offre nuove possibilità per l'analisi, la progettazione e la visualizzazione nel campo dell'ingegneria e dell'architettura. Si tratta di un importante passo avanti nella ricerca di soluzioni sempre più precise e innovative per soddisfare le esigenze dei settori industriali e professionali.

# REFERENCES





## Capitolo 9

### REFERENCES

- <sup>1</sup> GISGeography, World Geodetic System (WGS84)  
<https://gisgeography.com/wgs84-world-geodetic-system/>
- <sup>2</sup> GISGeography, Ellipsoid/Spheroid – Our Oblate Spheroid Planet Earth  
<https://gisgeography.com/ellipsoid-oblate-ellipsoid-earth/>
- <sup>3</sup> Eye4Software, Using the EGM2008 geoid model  
<https://www.eye4software.com/hydromagic/documentation/manual/utilities/egm2008/>
- <sup>4</sup> Movable Type Scripts, Calculate distance, bearing between Latitude/Longitude points, Bearing  
<https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- <sup>5</sup> Movable Type Scripts, Calculate distance, bearing between Latitude/Longitude points, Distance  
<https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- <sup>6</sup> Radartutorial.eu, Vertical Height and Altitude Definitions, Christian Wolff  
<https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb64.en.html>
- <sup>7</sup> ArchGIS for Desktop, ArcMap, Equirectangular  
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guide-books/map-projections/equirectangular.htm>
- <sup>8</sup> GPS WORLD, GNSS positioning navigation timing, What exactly is GPS NMEA data, Eric Gakstatter  
<https://www.gpsworld.com/what-exactly-is-gps-nmea-data/>
- <sup>9</sup> what-when-how, GPS Accuracy and Precision Measures  
<https://what-when-how.com/gps/gps-accuracy-and-precision-measures/>
- <sup>10</sup> CUEMATH, Standard deviation  
<https://www.cuemath.com/data/standard-deviation/>

<sup>11</sup> Estimation of measurement uncertainty in chemical analysis, Mean, standard deviation and standard uncertainty  
<https://sisu.ut.ee/measurement/32-mean-standard-deviation-and-standard-uncertainty>

<sup>12</sup> Estimation of measurement uncertainty in chemical analysis, Standard deviation of the mean  
<https://sisu.ut.ee/measurement/33-standard-deviation-mean>

<sup>13</sup> Estimation of measurement uncertainty in chemical analysis, Quantifying uncertainty component  
<https://sisu.ut.ee/measurement/41-quantifying-uncertainty-components>

Xie, Y., Shen, W., Han, J., & Deng, X. (2021). Determination of the height of Mount Everest using the shallow layer method. *Geodesy and Geodynamics*, 12(4), 258-265.  
<https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.04.002>

Hogendijk, J. P. (2014). Glen Van Brummelen. Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry. xvi+ 192 pp., illus., tables, apps., index. Princeton, NJ/Oxford: Princeton University Press, 2013. \$35. *Isis*, 105(1).

Chauvenet, W. (1901). A treatise on plane and spherical trigonometry. JB Lippincott.

Casey, J. (2005). A treatise on spherical trigonometry and its application to geodesy and astronomy with numerous examples (Michigan Historical Reprint Series).

Hübner, P., Clintworth, K., Liu, Q., Weinmann, M., & Wursthorn, S. (2020). Evaluation of HoloLens tracking and depth sensing for indoor mapping applications. *Sensors*, 20(4), 1021.