

LOCALIZZAZIONE IN TEMPO REALE DELLE RISORSE DI CANTIERE: APPLICAZIONI E POTENZIALITÀ

Giuseppe Ruscica

Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate
giuseppe.ruscica@unibg.it

SOMMARIO

Il problema della localizzazione delle risorse di cantiere, siano esse costituite da manodopera, macchine o materiali da costruzione, sta assumendo sempre maggiore importanza in questi ultimi anni. I motivi vanno ricercati innanzitutto in una digitalizzazione che sta coinvolgendo sempre più aspetti del processo edilizio, in modo da ottenere un più attento controllo di quanto ci si appresta a costruire ed evitare inconvenienti dovuti a errate procedure di approvvigionamento, di messa in opera dei componenti edili e di coordinamento delle attività. Altre ragioni sono legate all'ottimizzazione delle lavorazioni e dei percorsi delle maestranze migliorandone, al contempo, le condizioni di sicurezza. Le tecnologie per la localizzazione in tempo reale hanno ormai raggiunto un livello di maturità tale da consentirne l'adozione nella realtà lavorativa quotidiana. Andrebbero intese come estensione del BIM 4D e 5D per facilitare il controllo di quanto avviene durante le fasi di costruzione, senza tralasciare i vantaggi derivanti da una gestione digitale di quanto realizzato.

La scelta del sistema da adottare dipende sia da ciò che deve essere monitorato, sia dalle aree di cantiere in cui deve avvenire il posizionamento.

Vengono qui analizzate le tecnologie di localizzazione più idonee per i cantieri edili, con l'indicazione di quelle più adatte per macchine, materiali e manodopera, illustrandone vantaggi e svantaggi anche in relazione all'impiego in luoghi aperti o chiusi.

ABSTRACT

REAL-TIME LOCALIZATION OF RESOURCES IN CONSTRUCTION: APPLICATIONS AND POTENTIAL

The positioning of construction site's resources, like workers, vehicles or building materials, has been getting great attention in these recent years. The reasons are mainly related to a process of digitalisation which is involving more and more aspects of the building process. In this way, it is possible to achieve a better control of what is going to be built, in order to avoid issues due to wrong procedures of materials provisioning and assembling together with task planning. Other reasons are connected to the optimisation of workers' paths and activities, also considering their health and safety conditions. Real-time localisation technologies have reached such a level of maturity that it is possible to adopt them in daily work. They should be intended as 4D and 5D BIM extensions in order to allow a better control of what is going to happen during construction phases, taking advantage of a digital management of the building.

The choice of the proper system depends both on what it is going to be monitored and on the building site areas in which the positioning has to occur.

The most suitable localisation technologies for construction sites are here presented, pointing out the most adequate for vehicles, materials and workers, and also showing advantages and disadvantages in relation to open and enclosed spaces.

PAROLE CHIAVE | KEYWORDS

Sistemi di localizzazione in tempo reale, automazione, BIM, gestione delle costruzioni

Real-time locating systems, automation, BIM, construction management

INTRODUZIONE

Il processo di realizzazione di un edificio si è evoluto sotto molti aspetti rispetto al passato e rappresenta un elemento di unicità rispetto ad un'altra costruzione con pari caratteristiche. Ciò che differenzia una "fabbrica" da un'altra è proprio il luogo su cui essa sorgerà. Un cantiere, infatti, presenta caratteristiche tali da renderlo unico anche quando si fa ampio uso della prefabbricazione, che riesce a rendere controllabile e ripetibile il processo di creazione degli elementi costruttivi solo fino all'uscita dei componenti dallo stabilimento di produzione. Da quel punto in poi, ogni cantiere rappresenta una storia a sé. Fin dalle fasi di progettazione si cerca di tener conto dell'aleatorietà che contraddistingue le fasi di realizzazione dell'opera, in modo da evitare che imprevisti di varia natura possano trasformarsi in ritardi irrecuperabili. Un'adeguata programmazione dei lavori, anche in sinergia con strumenti di Building Information Modeling (BIM), può consentire un attento controllo delle fasi lavorative, evidenziandone eventuali discrepanze rispetto a quanto previsto al momento dell'inizio dei lavori. Un costante monitoraggio consente di intervenire in tempi rapidi, evitando il costituirsi di criticità che andrebbero a vanificare una pianificazione ben fatta. Infatti, alcune situazioni che solitamente potevano comportare ritardi nell'esecuzione dei lavori possono essere adesso identificate, così da consentire interventi più rapidi rispetto a quanto avvenuto finora. Un esempio può essere costituito dalle verifiche effettuate sui materiali in ingresso al cantiere. Velocizzare e rendere più affidabili i controlli di accettazione che devono essere attuati dalla Direzione Lavori può costituire un valido aiuto nell'espletamento delle funzioni previste dalla legge. Con l'avvento del BIM, infatti, la possibilità di identificare univocamente tutti i componenti di un edificio sin dalle prime fasi progettuali può favorirne la tracciabilità a partire dal modello digitale, per poi passare alla produzione in stabilimento ed alla consegna in cantiere. Quest'ultima fase può avvantaggiarsi dell'affidabilità e della velocità relative all'identificazione automatica degli elementi costruttivi che le attuali tecnologie mettono a disposizione.

Lo sviluppo di nuovi sistemi di identificazione e localizzazione, che in quest'ultimo decennio sono stati perfezionati e impiegati in edilizia, consente infatti di automatizzare e velocizzare molte delle operazioni che, tuttora, vengono eseguite in maniera totalmente manuale, con un maggiore rischio di errori e aumento dei tempi di svolgimento. Vengono di seguito passate in rassegna le modalità di localizzazione più mature e classificate in base alle tecnologie impiegate. Successivamente se ne evidenzieranno le applicazioni ai cantieri edili, mettendone in luce pregi e difetti unitamente alle potenzialità per impieghi più di frontiera.

CLASSIFICAZIONE IN BASE ALLE TECNOLOGIE DI LOCALIZZAZIONE

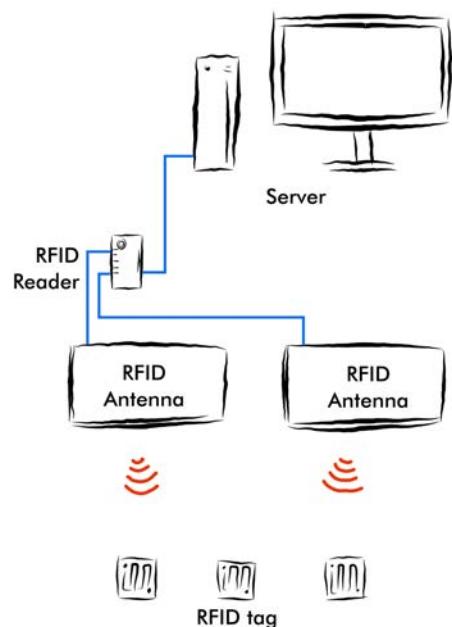
Global Navigation Satellite System (GNSS)

Con l'acronimo GNSS (dall'inglese Global Navigation Satellite System) si intende l'uso di un qualunque sistema di posizionamento globale basato sull'impiego di satelliti in orbita attorno alla Terra. Fino a qualche decennio fa, l'unico sistema satellitare che potesse essere impiegato per usi civili (inizialmente nato per scopi militari) era la rete americana GPS (Global Positioning System, adesso composta da 31 satelliti) [1], a cui recentemente si è aggiunta la costellazione russa GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System, costituita da 24 satelliti) [2]. La disponibilità per usi civili è pressoché totale, tanto che l'implementazione tecnologica comprende entrambi i sistemi di geolocalizzazione per l'utente finale: i sistemi professionali di localizzazione e, addirittura, i recenti smartphone consentono l'impiego simultaneo

delle reti GPS e GLONASS per ottenere migliore copertura del segnale e maggiore precisione e rapidità di localizzazione. Di prossima operatività a livello globale saranno anche la costellazione europea GALILEO e quella cinese BeiDou. La posizione del ricevitore a terra è ottenuta mediante triangolazione rispetto ai satelliti in orbita, calcolando la differenza di tempo che intercorre tra l'invio e la ricezione di un apposito segnale. Tutto ciò può avvenire solo se i satelliti rientrano nel campo visivo dell'unità ricevente. Da ciò deriva che il principale limite di tale tecnologia risiede nel fatto che è efficace solo negli spazi aperti. Negli ambienti chiusi, sebbene sia possibile "estenderne" l'utilizzo, la precisione e l'immediatezza d'uso ne risentono, consigliando l'impiego di altre tecnologie di localizzazione. Negli spazi aperti, tuttavia, la precisione dipende dal numero di ostacoli presenti (ad esempio edifici o folta vegetazione), i quali possono impedire la vista diretta dei satelliti, facendo rimbalzare i segnali satellitari e ingannando il ricevitore. Sperimentalmente [3] si è constatato che in zone prive di ostacoli la precisione media raggiungibile è di 1,1 m, mentre si può arrivare a poco più di 4 m in presenza di ostacoli. Per avere una maggiore accuratezza, magari per operazioni di monitoraggio strutturale, si può usare la geolocalizzazione attraverso il GPS differenziale (DGPS) [4], in cui l'errore nella ricezione del segnale satellitare viene corretto attraverso l'integrazione con le informazioni provenienti da stazioni ripetenti poste a terra, con posizione nota a priori.

Radio-Frequency IDentification (RFID)

L'identificazione a radiofrequenza è una tecnologia che permette di ottenere informazioni a distanza attraverso l'impiego di un campo elettromagnetico che viaggia tra un lettore e un "tag" RFID. Il lettore è connesso ad un'antenna che gli permette di comunicare con uno o più "transponder" o tag nei quali sono contenuti i dati da prelevare (figura 1). I tag possono essere di sola lettura o di lettura/scrittura (questi ultimi possono memorizzare dati) e, inoltre, possono essere distinti in passivi, attivi e semi-passivi [5]. I tag passivi si attivano attraverso il campo elettromagnetico generato dal lettore, ottenendo da esso l'energia per il loro funzionamento.



1. Schema di funzionamento di un sistema RFID.

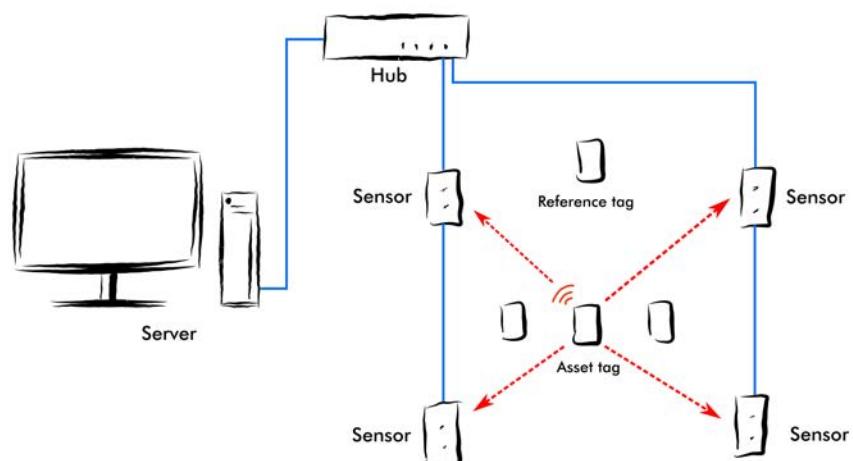
I tag attivi sono invece dotati di batterie che consentono un raggio d'azione più elevato rispetto ai primi. Quelli semi-passivi sono anch'essi dotati di batteria, ma il circuito viene attivato da un segnale emesso dal lettore, consentendo una maggiore durata della batteria stessa. La tecnologia RFID è molto più presente nell'uso quotidiano di quanto si possa credere. Basti pensare ai sistemi passivi antitaccheggio, il cui chip si attiva con l'energia emessa dai gate posti all'ingresso di un negozio, o alle tessere di abbonamento per la metropolitana [6]. In entrambi i casi, si tratta di sistemi che consentono di reperire le informazioni che si trovano all'interno del tag, consentendone l'elaborazione per fini specifici. Il raggio d'azione di un transponder a radiofrequenza può andare da un massimo di 15 m per i tag passivi, ai 60-80 m per quelli semi-passivi, fino ai 100 m per quelli attivi [7].

Ultra-Wideband (UWB)

I sistemi a banda ultra larga sono quelli che presentano le caratteristiche ideali per la localizzazione in tempo reale con un livello di precisione superiore rispetto ad altre tecnologie impiegabili in cantiere. Si tratta di un sistema basato sulla trasmissione di impulsi radio di durata brevissima, che non presenta problemi come quello del "multipath" (cammini multipli dell'onda che rimbalza sugli ostacoli) e che è capace di penetrare attraverso ostacoli, come quelli caratteristici degli spazi chiusi [8]. La tecnologia UWB consente un'accurata localizzazione in 3D, con la principale limitazione costituita dalla necessità di dover predisporre l'intera infrastruttura lungo l'estensione del cantiere. Una volta approntato il tutto, però, la conformazione può rimanere invariata fino al completamento dei lavori. La configurazione tipo di un sistema di localizzazione basato sulla banda ultra larga è composta in genere da [9]:

- un hub centrale, collegato a un computer, per l'elaborazione delle informazioni;
- ricevitori/sensori dotati di antenna;
- cavi di rete Ethernet/CAT 5e;
- tag attivi (in corrispondenza degli oggetti da localizzare), di cui alcuni di riferimento (usati per la calibrazione del sistema).

I ricevitori vengono collegati tra loro in serie e poi all'hub attraverso i cavi di rete (figura 2). Un sistema del genere ha un raggio d'azione fino a 200 m e una precisione di localizzazione dei tag che può arrivare fino a 30 cm. Se si riduce la frequenza di campionamento (ad esempio, si comunica la posizione una volta al secondo, cioè con frequenza di 1Hz), le batterie dei tag riescono a raggiungere la durata di 6-7 anni.



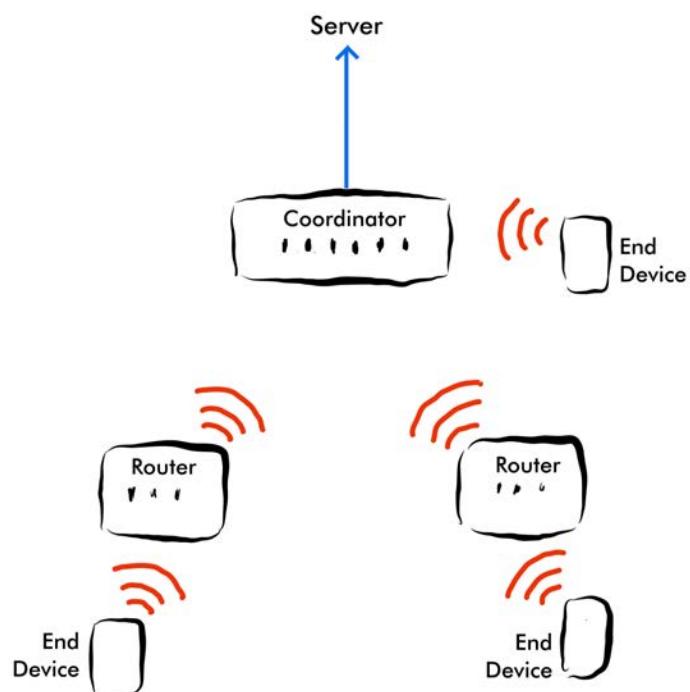
2. Schema di funzionamento di un sistema UWB.

ZigBee

ZigBee rappresenta uno standard di comunicazione caratterizzato dal fatto di operare su distanze ridotte e con bassi consumi energetici, ideato dalla ZigBee Alliance [10] proprio per cercare di superare alcune limitazioni insite in altri apparati quali Bluetooth e WiFi, più complessi e costosi. Una rete ZigBee è composta da tre tipi di dispositivi [11] (figura 3):

- ZigBee Coordinator, che si occupa di gestire l'intera rete;
- ZigBee Router, che ha un ruolo intermedio all'interno della rete;
- ZigBee End Device, più economico rispetto ai precedenti e capace di comunicare solo con un router o un coordinator.

Nato principalmente per applicazioni di domotica, il protocollo ZigBee si rivela utile anche per la localizzazione in real-time, con opportuni accorgimenti. Il vantaggio è dato dalla facilità di implementazione (non è necessario cablare nulla, trattandosi di un protocollo di trasmissione senza fili) e dall'economicità rispetto alle altre soluzioni. La precisione di un sistema del genere, comunque inferiore a quella offerta dalla tecnologia UWB, migliora con l'aumentare del numero di dispositivi dislocati nell'area da monitorare.



3. Schema di funzionamento di un sistema basato sul protocollo ZigBee.

Bluetooth

Il Bluetooth [12] rappresenta uno standard di comunicazione senza fili che opera su brevi distanze. Introdotto nel 1994, attualmente è gestito dal Bluetooth Special Interest Group (SIG) e tale protocollo di trasmissione dati è ormai implementato in ogni smartphone, tablet e computer portatile in commercio. Recentemente è stato introdotto il Bluetooth Low Energy (BLE), che consente di ottenere un minor consumo energetico, permettendone l'integrazione in una moltitudine di dispositivi e sensori, che possono così dialogare tra loro. Attraverso algoritmi di RSS (Received Signal Strength, ovvero legati all'intensità del segnale) e tecniche di "fingerprinting" è possibile localizzare degli oggetti prevalentemente in spazi chiusi (sotto i 10 metri e in assenza di ostacoli)[13, 14].

WLAN

La Wireless local area network (rete locale senza fili), la cui implementazione più nota è costituita dal marchio commerciale WiFi [15], è una tecnologia che consente la connessione e l'interoperabilità tra più dispositivi mediante radiofrequenza. L'infrastruttura che permette di far comunicare tutti questi dispositivi tra loro e verso l'esterno è costituita dagli Access Point (spesso abbreviati in AP), i quali possono essere impiegati proprio per localizzare un terminale wireless attraverso tecniche di trilaterazione o algoritmi di radio "fingerprinting" [16, 17]. La sua precisione, oscillante tra 1 m e 20 m, risente molto della presenza di ostacoli e pertanto tale tecnologia non è adeguata per l'impiego nei cantieri edili.

Ultrasuoni

I sistemi di posizionamento basati sugli ultrasuoni usano la velocità del suono e il tempo di propagazione delle onde tra degli emettitori e dei ricevitori [18]. L'impiego principale è relativo ai luoghi chiusi [19], ma c'è da dire che il posizionamento può avvenire solo a brevi distanze e non funziona se vi sono dei muri ad ostacolare il percorso delle onde sonore. Inoltre, il segnale viene distorto dalle riflessioni causate da oggetti metallici; pertanto l'impiego è ristretto solo ad applicazioni di nicchia.

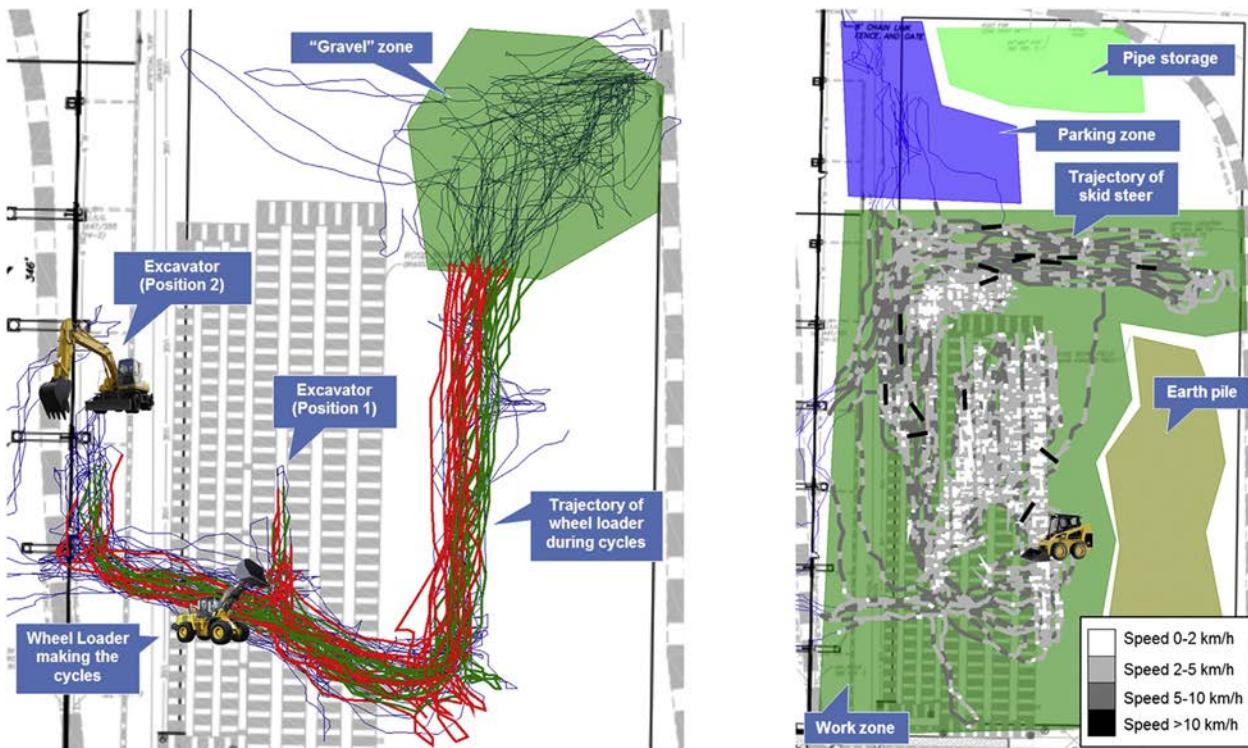
APPLICAZIONE DELLE TECNOLOGIE DI LOCALIZZAZIONE IN TEMPO REALE AI CANTIERI

Presentata la panoramica delle tecnologie di posizionamento più diffuse e più indicate per il mondo della produzione edilizia, se ne presentano di seguito le implementazioni più riuscite che, di fatto, possono essere riproposte e impiegate anche ora in un cantiere ben progettato e organizzato.

Posizionamento delle macchine di cantiere

I benefici di una localizzazione in tempo reale delle macchine di cantiere vanno oltre il semplice posizionamento e andrebbero inquadrati in un'ottica più ampia di gestione del cantiere, quando le condizioni ambientali possono metterne a rischio la sicurezza o impedire il normale svolgimento delle varie fasi lavorative. In Giappone, già a metà degli anni '90, è stato sperimentato con successo l'utilizzo di macchine da cantiere con guida remota per eseguire degli scavi [4]. L'assenza dell'operatore era dettata dal fatto che tali mezzi avrebbero dovuto lavorare in condizioni di sicurezza estremamente variabili, a causa del pericolo di eruzioni vulcaniche. La percezione dello spazio è naturalmente diversa se ci si trova dentro il mezzo o se si vede l'ambiente circostante attraverso delle telecamere. Nasceva, pertanto, il problema di evitare la collisione tra le macchine anche in presenza di condizioni non ottimali di visibilità. La soluzione implementata ha fatto uso di un sistema GPS differenziale, la cui precisione è tale da essere compatibile con un algoritmo deputato alla prevenzione delle collisioni durante le operazioni di scavo. In questo modo, gli operatori potevano lavorare con un minore stress, non dovendo guardare in continuazione diversi schermi per evitare incidenti durante le fasi lavorative.

Il GPS può essere impiegato anche come tecnologia a basso costo per analizzare in maniera automatica il tasso di utilizzo dei mezzi d'opera, tenendo traccia di tutti gli spostamenti, individuati temporalmente, durante tutta la durata dei lavori. Lo scopo è quello di poter valutare l'efficienza dei vari cicli di lavorazione per poter apportare le necessarie correzioni qualora se ne riscontrasse la necessità [3] (figura 4).



4. Uso del GPS per l'analisi dell'impiego delle macchine di cantiere (fonte: [3]).

Nel caso in cui i mezzi d'opera si trovino in aree urbane densamente abitate, i sistemi di localizzazione satellitare mostrano i propri limiti, specialmente quando devono essere percorsi dei lunghi tratti in galleria. In questa eventualità, il GPS può essere affiancato da tecniche di "dead reckoning", basate sull'impiego di sensori che danno una stima approssimativa degli spostamenti del veicolo quando si ha una ridotta o assente copertura satellitare. Inoltre, possono essere aggiunti dei sistemi correttivi basati sulla tecnologia Bluetooth. Quest'ultima, sebbene abbia un raggio d'azione estremamente limitato, può essere impiegata per "agganciare" dei punti, di coordinate note, disposti opportunamente lungo il tragitto stradale [20].

Identificazione e posizionamento dei materiali da costruzione

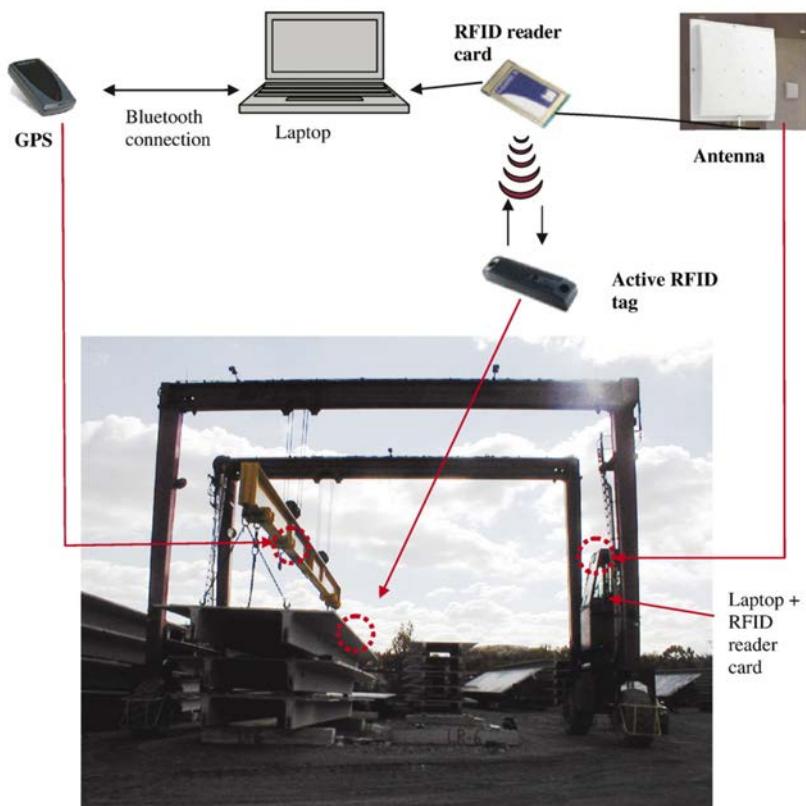
Una corretta gestione del flusso dei materiali da costruzione è fondamentale per evitare ritardi con ricadute sul processo di realizzazione di un'opera edile, qualunque sia la sua entità. La responsabilità sulla conformità dei prodotti prescritti o impiegati ricade sulle figure del progettista, dell'appaltatore, del direttore dei lavori, del direttore dell'esecuzione e del collaudatore.

Per tali motivi, è sempre auspicabile l'introduzione di soluzioni che consentano maggiore affidabilità nei controlli di accettazione dei materiali in cantiere.

In tal senso può essere utile stabilire delle procedure di identificazione dei prodotti da costruzione in modo che tali informazioni possano essere trasferite da una fase a quella successiva, passando dal progettista all'appaltatore, poi al prefabbricatore e, infine, al direttore dei lavori e alle eventuali squadre di montaggio. Un processo del genere, non banale, serve a garantire che quanto giunge in cantiere sia coerente con quanto precedentemente progettato. Pertanto, supponendo che sia già avvenuta in fase di progettazione una codifica di tutti i componenti edili appartenenti a un'opera edile, è auspicabile che durante la gestione della commessa da parte del prefabbricatore questi sforzi iniziali non siano vanificati. Questo è un problema ancor più sentito se lo stabilimento di produzione è di grandi

dimensioni, con il rischio che errori nella produzione, nella movimentazione e nella localizzazione dei componenti prodotti vengano notati solo al momento della consegna in cantiere, con ovvie conseguenze per le fasi successive. A tal riguardo, in questi anni sono avvenuti diversi studi e sperimentazioni proprio per far sì che una gestione digitale e automatica degli ordini possa eliminare molti degli errori dovuti a operazioni ripetitive condotte in maniera manuale.

È stato ad esempio proposto [29] (figura. 5) un sistema per migliorare la tracciabilità di componenti prefabbricati in calcestruzzo stoccati in un grande deposito all'aperto, evitandone lo smarrimento e le movimentazioni non necessarie. Ciò è stato ottenuto con il minimo intervento di operazioni manuali, che notoriamente costituiscono una delle cause più frequenti di errori nella gestione degli ordini. La sperimentazione è stata condotta in un piazzale di 190.000 m², presso un'azienda che era solita stoccare la merce per un periodo variabile da 3 settimane a 6 mesi prima della consegna. Questi dati fanno già capire quanto sia importante un sistema che consenta l'automazione di tutte le fasi immediatamente successive alla produzione degli elementi prefabbricati, considerando che questi vengono movimentati e ispezionati più volte prima della spedizione e che la trascrizione di ogni cambiamento avviene spesso su carta o, nel migliore dei casi, attraverso le scansioni di codici a barre che devono essere eseguite per ogni elemento da registrare. Il sistema di immagazzinamento proposto si è avvalso di una gru a cavalletto mobile sulla quale sono stati posizionati un lettore RFID e un localizzatore GPS. Ad ogni componente prefabbricato è stato applicato un tag RFID che ne conteneva i relativi dati. Nel momento in cui tale elemento veniva movimentato attraverso la gru, il lettore RFID lo identificava e ne registrava la posizione di stoccaggio attraverso il segnale GPS. Queste informazioni venivano così inviate al database aziendale in maniera automatica, memorizzandone la posizione per tutti gli usi futuri, fino alla fase di spedizione.

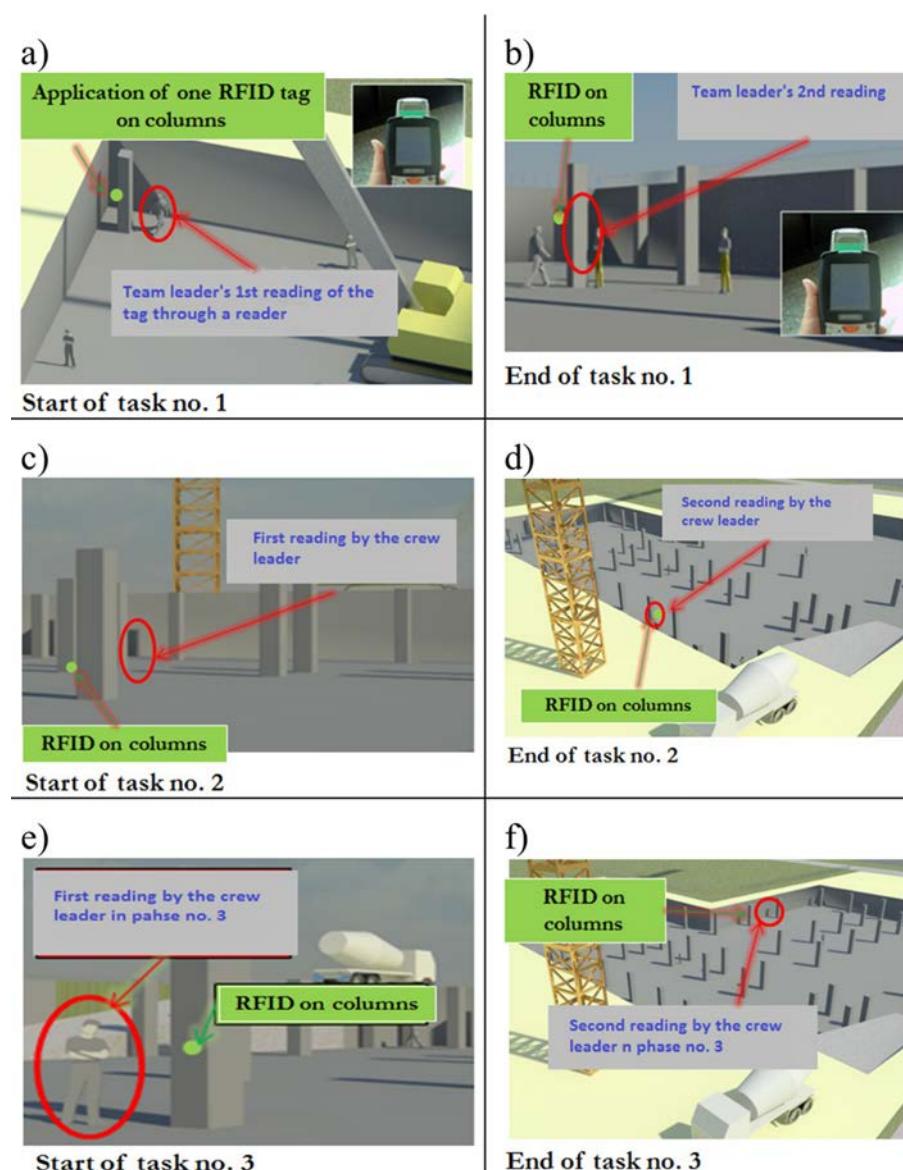


5. Prototipo di un sistema combinato GPS+RFID per la localizzazione di elementi prefabbricati (fonte: [29]).

Analoga sperimentazione [30] è stata condotta per la localizzazione degli strumenti di lavoro all'interno di più cantieri. In questo caso si è fatto ricorso all'impiego di tag RFID attivi, in modo da poter localizzare pure gli elementi posti a notevole distanza dal lettore.

La tecnologia a radiofrequenza è stata impiegata con profitto anche in una sperimentazione [31] sull'identificazione automatica di tubazioni prefabbricate in stabilimento, fino alla fase di spedizione.

L'integrazione tra il modello BIM di un edificio e la tecnologia RFID può essere proficuamente utilizzata per il monitoraggio delle fasi di costruzione [32] (figura 6). L'impiego di una serie di tag a radiofrequenza da applicare sugli elementi prefabbricati di una costruzione, infatti, può facilitare la verifica della corrispondenza tra quanto montato e quanto previsto dalla programmazione lavori. I componenti prefabbricati possono essere identificati anche all'ingresso dell'area di cantiere, per verificare in maniera automatica se tipologia e quantità rispondono a quanto indicato nel progetto.

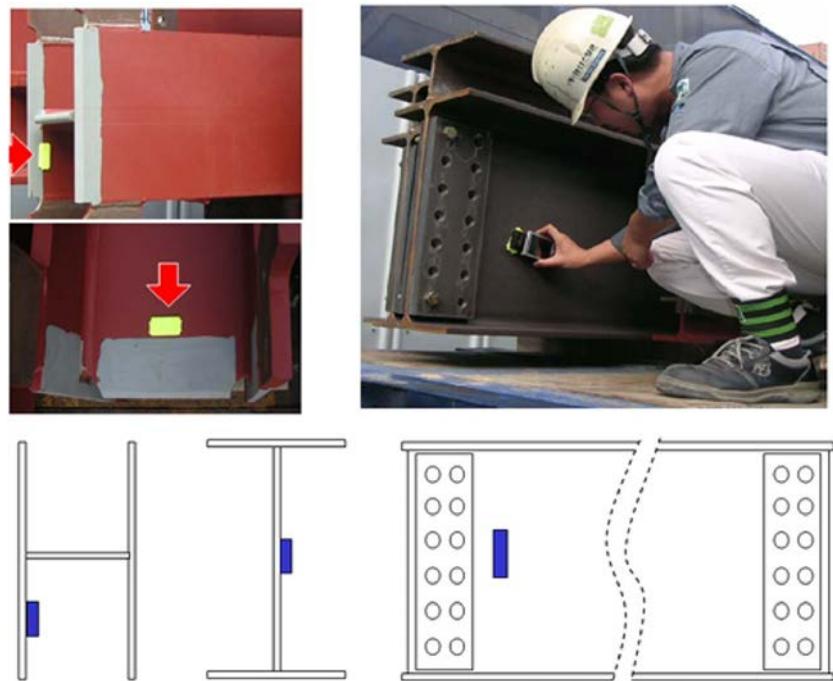


6. Monitoraggio delle fasi di montaggio di elementi prefabbricati: a) lettura del tag RFID relativo al primo pilastro del lotto da posizionare; b) seconda lettura dello stesso tag per indicare che il montaggio del lotto è stato completato; c-f) applicazione della medesima procedura ad altri due lotti di pilastri (fonte: [32]).

È stata portata avanti e documentata anche una sperimentazione con RFID [33] nella quale sono stati eseguiti dei test su profili in acciaio dotati di tag e posizionati su un rimorchio. Tale rimorchio è stato fatto passare sotto un piccolo portale dotato di lettore RFID, in modo da eseguire l'identificazione automatica simultanea di più elementi strutturali, con risultati incoraggianti per un'implementazione in cantieri reali.

Un controllo più efficace durante le fasi costruttive di una struttura portante in acciaio può avvenire affiancando la tecnologia RFID a quella del CAD 4D (precursore del BIM orientato alla gestione dei tempi di progetto), dotando i profili in acciaio di tag a radiofrequenza, avendone definito preventivamente la posizione all'interno del modello digitale dell'edificio [34] (figura 7). Affinché questa metodologia possa funzionare correttamente, è importante che tale modello venga condiviso tra gli attori dell'intera filiera già a partire dalle prime fasi di progettazione. I codici identificativi dei vari elementi costruttivi, infatti, devono essere introdotti sin dall'inizio ed essere così condivisi digitalmente tra i vari progettisti (architettonici, strutturali, ecc.), fino ad arrivare alla direzione lavori, alle imprese appaltatrici ed alle squadre di montaggio in cantiere.

In questo modo è possibile controllare con maggior velocità quali elementi siano già stati montati, col vantaggio di poter anche visualizzare lo stato di avanzamento dei lavori all'interno del modello tridimensionale dell'edificio, proprio secondo la logica del BIM 4D.



7. Posizionamento di tag RFID passivi su travi in acciaio (fonte: [34]).

Posizionamento delle maestranze

In cantieri con un gran numero di operai può diventare necessario localizzare il personale sia per ragioni di sicurezza, sia per motivi puramente organizzativi. Va ricordato che la maggior parte degli eventi infortunistici sul lavoro è causata da fattori umani, il che suggerisce come l'apporto fornito dalle nuove tecnologie possa aiutare ad affrontare il problema in maniera più incisiva.

Automatizzando la procedura di posizionamento, si possono ad esempio ridurre gli errori legati alla semplice distrazione sia degli operai, sia di chi ne è preposto al

controllo. Una buona soluzione può essere costituita dall'integrazione tra tecnologia RFID e BIM. In una sperimentazione di questo tipo [21], ogni lavoratore è stato dotato di un badge con identificativo RFID e l'ingresso all'area di cantiere è stato filtrato attraverso una serie di tornelli che identificavano in maniera univoca chi entrava e chi usciva dalla zona di lavoro. All'interno dell'edificio sono stati poi dislocati una serie di lettori RFID che potevano localizzare in tempo reale le persone presenti nelle varie zone della struttura. In generale, sebbene la tecnologia a radiofrequenza non sia capace di fornire l'esatta posizione delle maestranze, può tuttavia identificare le aree in cui si muovono, grazie all'integrazione dei dati di identità e posizione con il modello digitale dell'edificio all'interno di un sistema BIM. È possibile così sapere, in caso di emergenza, se sono ancora presenti operai all'interno delle aree di lavoro e, in caso affermativo, conoscere la zona del cantiere in cui si trovano per facilitarne l'eventuale evacuazione.

Una strategia simile [22] a quella appena proposta è stata impiegata disponendo lettori RFID in vari punti del cantiere per localizzare manodopera e materiali all'interno di un edificio di grande altezza, con ottimi risultati.

I casi considerati finora hanno trattato l'impiego di sistemi di localizzazione di tipo RFID che, per loro natura, non sono in grado di garantire letture a notevoli distanze (in caso di tag passivi) e livelli di precisioni elevati. Tuttavia, queste limitazioni sono state aggirate dividendo i cantieri in zone di lavoro e inserendo opportunamente una serie di varchi di ingresso in modo da rilevare con certezza l'avvenuto passaggio dei lavoratori da una zona all'altra. La buona riuscita di un sistema del genere è quindi legata alla qualità della piattaforma software che tiene in considerazione queste caratteristiche, filtrando le eventuali ambiguità di posizione in modo da renderle adatte agli scopi di gestione del cantiere. Nei casi in cui fosse necessaria una maggiore precisione nel posizionamento in tempo reale delle risorse, sarebbe consigliabile impiegare tecnologie differenti come, ad esempio, quelle basate sulla banda ultra larga (UWB). In questo caso, è degna di nota la sperimentazione condotta presso l'Università Politecnica delle Marche [23], che ha impiegato la tecnologia UWB affiancata da una piattaforma software per l'implementazione di algoritmi legati alla sicurezza proattiva. Sulla base della posizione degli operai, dopo aver definito delle zone di rischio per un determinato cantiere, il sistema è in grado di individuare in anticipo potenziali situazioni di pericolo per le persone.

In una successiva campagna di sperimentazione [24], alle coordinate degli operai è stato deciso di affiancare una rete di sensori per monitorare la qualità dell'aria in cantiere, in modo da individuare zone che potessero mettere a rischio la salute dei lavoratori in seguito a permanenza prolungata.

Sono stati elaborati altri modelli di predizione del rischio [25] e mostrati gli esiti di una sperimentazione [9] condotta in cantiere per il monitoraggio sia di manodopera sia di materiali mediante l'impiego della tecnologia UWB, in linea con quanto già mostrato negli altri casi analizzati. Si dimostra altrettanto efficace la localizzazione in tempo reale di una gru a torre e delle sue parti in movimento, sebbene appaia un po' forzato l'impiego dei tag UWB per la localizzazione di travi in acciaio. I tag a banda ultra larga sono infatti molto più costosi dei tag RFID e andrebbero recuperati alla fine delle attività di messa in opera dei profili strutturali. Il loro impiego può aver quindi senso se ci si riferisce alla sicurezza proattiva legata alle fasi di montaggio. Per la semplice identificazione di quanto è presente in cantiere sarebbe meglio, invece, affidarsi ai tag RFID.

Uno dei problemi riguardo all'approntamento di un sistema di localizzazione UWB in cantiere è legato alla presenza di collegamenti cablati che, oltre a rallentare la

preparazione dell'attrezzatura (collegamento tra elaboratore, hub, rete di sensori, ecc.), può rappresentare un ostacolo per gli operai che dovessero trovarsi a lavorare nei luoghi in cui è presente la strumentazione di controllo. Per superare questo limite, sebbene con una minor precisione rispetto alla modalità cablata, è possibile fare uso della tecnologia UWB "untethered" (senza fili), che consente di predisporre un sistema di localizzazione in tempo reale alimentato a batteria, in modo da adattarsi a situazioni in continua evoluzione come quelle rappresentate dai cantieri edili [26].

Volendo ridurre ulteriormente i costi e prolungare la durata delle batterie dei singoli componenti, la localizzazione in tempo reale degli operai può essere ottenuta affidandosi al protocollo ZigBee, così come mostrato in una sperimentazione [27] per il posizionamento delle maestranze in un grosso cantiere per la realizzazione di una diga. L'errore di posizionamento, in questo caso, è stato identificato in un range variabile tra 3 e 5 metri. Tale margine di incertezza fa rientrare l'impiego del protocollo ZigBee in un'analisi del comportamento delle squadre di operai in funzione delle varie fasi lavorative e non nella prevenzione di rischi imminenti, per i quali sarebbe necessaria una precisione maggiore.

Discorso analogo è avvenuto nelle prove sul campo condotte presso il comune di Fano [28], dove un cantiere è stato suddiviso in zone entro le quali valutare eventuali interferenze tra i gruppi di operai presenti, sempre utilizzando una rete di sensori wireless operanti con protocollo ZigBee. In questo modo si è resa possibile la localizzazione in real-time delle attività di cantiere senza la necessità di infrastrutture cablate che avrebbero reso necessaria un'attenta pianificazione del posizionamento di tutti gli apparati riceventi all'interno delle aree di lavoro.

CONCLUSIONI

Alcune delle tecnologie passate in rassegna esistono da tempo e sono state, negli anni, perfezionate. Altre sono di più recente introduzione e si stanno dimostrando promettenti per la localizzazione in tempo reale delle risorse di cantiere. È vero che non esiste un'unica tecnologia che possa essere utilizzata indifferentemente per il posizionamento di macchine, materiali e manodopera, in quanto vi sono delle peculiarità tali da rendere più idoneo, nelle diverse situazioni, un dispositivo di localizzazione piuttosto che un altro. L'impiego in spazi aperti o chiusi, la velocità di spostamento, la precisione e la distanza di localizzazione, la durata di eventuali batterie e i costi di impiego sono infatti variabili che devono sempre essere tenute in considerazione al momento di stabilire quale può essere il sistema migliore per un determinato cantiere.

Ciò che è importante evidenziare è che questi strumenti dovrebbero essere impiegati all'interno di una metodologia BIM, rappresentandone un'estensione sia nella gestione del cantiere (fasi di approvvigionamento e di montaggio), sia nella gestione dell'edificio durante la sua vita utile (manutenzione delle strutture, degli impianti, ecc.). Tutto ciò dovrebbe essere inquadrato nell'ambito di una precisa strategia che sia definita e chiara sin dalle prime fasi di progettazione, con un dialogo sempre attivo tra gli attori dell'intero processo edilizio, in modo che le informazioni definite inizialmente non vadano disperse nel passaggio tra una fase e quella successiva, fino al momento della realizzazione e della gestione di quanto costruito.

BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

- [1] <https://www.gps.gov>, consultato il 10/03/2018.
- [2] <https://www.glonass-iac.ru/en/>, consultato il 10/03/2018.
- [3] Pradhananga, Nipesh, and Jochen Teizer. "Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data." *Automation in Construction* 29 (2013): 107-122.
- [4] Olooufa, Amr A., Masaaki Ikeda, and Hiroshi Oda. "Situational awareness of construction equipment using GPS, wireless and web technologies." *Automation in Construction* 12.6 (2003): 737-748.
- [5] Domdouzis, Konstantinos, Bimal Kumar, and Chimay Anumba. "Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction." *Advanced Engineering Informatics* 21.4 (2007): 350-355.
- [6] Lu, Weisheng, George Q. Huang, and Heng Li. "Scenarios for applying RFID technology in construction project management." *Automation in construction* 20.2 (2011): 101-106.
- [7] Valero, Enrique, Antonio Adán, and Carlos Cerrada. "Evolution of RFID applications in construction: A literature review." *Sensors* 15.7 (2015): 15988-16008.
- [8] Alarifi, Abdulrahman, et al. "Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances." *Sensors* 16.5 (2016): 707.
- [9] Teizer, Jochen, Davis Lao, and Menache Sofer. "Rapid automated monitoring of construction site activities using ultra-wideband." *Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Kochi, Kerala, India. 2007.
- [10] <http://www.zigbee.org>, consultato il 10/03/2018.
- [11] Chan, Hing Kai. "Agent-based factory level wireless local positioning system with ZigBee technology." *IEEE Systems Journal* 4.2 (2010): 179-185.
- [12] <https://www.bluetooth.com/specifications>, consultato il 10/03/2018.
- [13] Faragher, Ramsey, and Robert Harle. "An analysis of the accuracy of bluetooth low energy for indoor positioning applications." *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+'14)*. 2014.
- [14] Ionescu, Georgia, Carlos Martinez de la Osa, and Michel Deriaz. "Improving distance estimation in object localisation with bluetooth low energy." *SENSORCOMM 2014* (2014): 45-50.
- [15] <https://www.wi-fi.org>, consultato il 10/03/2018.
- [16] Reyero, Lionel, and Gilles Y. Delisle. "A Pervasive Indoor-Outdoor Positioning System." *JNW* 3.8 (2008): 70-83.
- [17] Bahl, Paramvir, and Venkata N. Padmanabhan. "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system." *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*. IEEE. Vol. 2. Ieee, 2000.
- [18] Zhang, Mingyuan, Tianzhuo Cao, and Xuefeng Zhao. "Applying Sensor-Based Technology to Improve Construction Safety Management." *Sensors* 17.8 (2017): 1841.
- [19] Qi, Jun, and Guo-Ping Liu. "A Robust High-Accuracy Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Wireless Sensor Network." *Sensors* 17.11 (2017): 2554.
- [20] Lu, Ming, et al. "Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites." *Automation in construction* 16.5 (2007): 647-656.
- [21] Costin, Aaron M., Jochen Teizer, and Bernd Schoner. "RFID and BIM-enabled worker location tracking to support real-time building protocol and data visualization." *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* 20.29 (2015): 495-517.
- [22] Costin, Aaron, Nipesh Pradhananga, and Jochen Teizer. "Leveraging passive RFID technology for construction resource field mobility and status monitoring in a high-rise renovation project." *Automation in Construction* 24 (2012): 1-15.
- [23] Carbonari, Alessandro, Alberto Giretti, and Berardo Naticchia. "A proactive system for real-time safety management in construction sites." *Automation in Construction* 20.6 (2011): 686-698.
- [24] Naticchia, Berardo, and Alessandro Carbonari. "Tecnologie innovative a supporto della gestione della sicurezza nei cantieri." *IN_BO. Ricerche e progetti per il territorio, la città e l'architettura* 4.2 (2013): 47-60.
- [25] Andolfo, Carlo, and Farnaz Sadeghpour. "Real-Time Accident Detection Using UWB Tracking." C. N.p., 30 June 2015. Web. 21 Mar. 2018. *International Construction Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering (ICSC)* (5th: 2015).
- [26] Cho, Yong K., Jong Hoon Youn, and Diego Martinez. "Error modeling for an untethered ultra-wideband system for construction indoor asset tracking." *Automation in Construction* 19.1 (2010): 43-54.
- [27] Lin, Peng, et al. "Real-time monitoring system for workers' behaviour analysis on a large-dam construction site." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9.10 (2013): 509423.
- [28] Naticchia, Berardo, Massimo Vaccarini, and Alessandro Carbonari. "A monitoring system for real-time interference control on large construction sites." *Automation in Construction* 29 (2013): 148-160.
- [29] Ergen, Esin, Burcu Akinci, and Rafael Sacks. "Tracking and locating components in a precast storage yard utilizing radio frequency identification technology and GPS." *Automation in construction* 16.3 (2007): 354-367.
- [30] Goodrum, Paul M., Matt A. McLaren, and Adam Durfee. "The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites." *Automation in Construction* 15.3 (2006): 292-302.
- [31] Song, Jongchul, et al. "Field trials of RFID technology for tracking pre-fabricated pipe spools." *ISARC 2004* (2004).
- [32] Giretti, Alberto, et al. "Interoperable approach in support of semi-automated construction management." *Proc. of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Seoul, Korea, June 29th. 2011.
- [33] Grau, David, Lei Zeng, and Yang Xiao. "Automatically tracking engineered components through shipping and receiving processes with passive identification technologies." *Automation in Construction* 28 (2012): 36-44.
- [34] Chin, Sangyo, et al. "RFID + 4D CAD for progress management of structural steel works in high-rise buildings." *Journal of Computing in Civil Engineering* 22.2 (2008): 74-89.