

# Low-cost sensor network in cognitive buildings for maintenance optimisation

Juan Diego Blanco Cadena, Nicola Moretti\*, Tiziana Poli,  
Fulvio Re Cecconi

---

## Highlights

Facility Management services can be optimised in cognitive buildings through ultrasonic sensors-based occupancy monitoring. A low-cost ultrasonic sensor network can be employed for occupancy monitoring with sufficient accuracy and reliability. The proposed method allows to effectively monitor users' occupancy in a space of a building without jeopardizing occupants' privacy. Sensor-based occupancy monitoring can be encompassed in a smart contract for maintenance management fostering disintermediation. Sensor network configuration, set-up and latency are key factors for boosting reliability and accuracy.

---

## Abstract

Buildings cannot perform without a proper planning, execution and monitoring of Facility Management services. Moreover, occupancy monitor procedures for cognitive buildings are gaining momentum in performance optimization through dynamic adaption of indoor conditions (e.g. temperature, humidity, shadings). In this article, the application of a similar approach for automated execution of maintenance contracts (e.g. cleaning services) is presented. This approach is allowed by monitoring occupancy, through an ultrasonic sensor network. The methodology has been validated on a case study, concerning an office building in Milan, Italy.

---

## Keywords

Ultrasonic sensors, Arduino, Occupancy monitor, Cognitive buildings, Facility Management

---

## 1. INTRODUCTION

The use of sensors is growing exponentially in all economic sectors. This growth can be attributed to some factors as the ease of use, the flexible compatibility with available microcontroller systems (i.e. such as Arduino and Raspberry Pi) and the ease of purchase and reduced costs of all required components to set-up a sensor network. Considering the wide range of technologies available, the correct choice on the type of sensors to use is key to spare time and resources, and instead dedicate them to achieve a reliable calibration and integration into the desired network.

Nowadays, in the Architecture, Engineering, Construction and Operations (AECO), sensors are often installed to increase building performance

### Juan Diego Blanco Cadena

ABC Department - Politecnico di Milano, via Giuseppe Ponzio 31, Milano, 20133, Italia

### Nicola Moretti

ABC Department - Politecnico di Milano, via Giuseppe Ponzio 31, Milano, 20133, Italia

### Tiziana Poli

ABC Department - Politecnico di Milano, via Giuseppe Ponzio 31, Milano, 20133, Italia

### Fulvio Re Cecconi

ABC Department - Politecnico di Milano, via Giuseppe Ponzio 31, Milano, 20133, Italia

\* Corresponding author  
e-mail: nicola.moretti@polimi.it

efficiency during their operation phase. For instance, some of the objectives that can be achieved in this area concern the optimization of: the use of lighting appliances [1, 2], the control of the plant system's efficiency [3, 4], and occupancy control within building spaces [5]. However, although rising, still fewer sensor networks are installed for monitoring the occupants' behaviour, which certainly alters the operation of the building; for example, by opening/closing windows, activating/deactivating shading systems, changing the settings of the heating/cooling systems, etc. In the framework of building maintenance based on use, sensors are barely employed, either because of the high use stress conditions to which they are subjected, or due to the complexity of dealing with the occupants' privacy for surveying, processing and storing the data collected [6].

This article presents a methodology for occupancy real-time surveying within the premises of a building, through the use of an ultrasonic sensor network. The occupancy monitor procedure has been tested and validated through a case study concerning a building for tertiary use in Milan (i.e. office building). Within this building, an open-plan office room has been considered, and the number of people entering and leaving the room during the working day has been calculated, as well as the time they spent inside the room and the use calculated as described in the flowchart presented in Figure 3. The results of this monitoring are used to optimize the cleaning service, using a conditioned maintenance strategy that uses occupancy intensity as a maintenance threshold parameter (*occupancy-based maintenance*).

## 2. STATE OF THE ART

In the context of digital Asset Management, the Facility Management (FM) acquires primary relevance for the maintenance and management of the appropriate performance of the asset for carrying out properly its functions. In order to achieve a more effective management of the process, methods based on Building Information Modelling (BIM) are gaining momentum [7]. The BIM approach provides valuable support for handling the large amount of data related to planning managing and implementing FM services [8]. From the very beginning, FM has been linked to information management tools: from the first Computer Aided Facility Management (CAFM), followed by CAD tools, integrated Workplace Management Systems (IWMS), up to Computerised Maintenance Management Systems (CAFM) [9]. And recently, it has been witnessed the development of theories and practices (guidelines) that imply the use of BIM tools for FM [10, 11]. The implementation of this approach provides the possibility of integrating both maintenance and

## 1. INTRODUZIONE

*L'uso dei sensori è in crescita esponenziale in tutti i settori economici. Questa crescita può essere attribuita ad alcuni fattori come la facilità d'uso, la flessibilità per quanto concerne la compatibilità con sistemi di controllo quali Arduino e Raspberry Pi, la disponibilità sul mercato e la riduzione, negli ultimi anni, dei costi di gran parte dei componenti necessari per configurare una rete di sensori. Considerando l'ampia gamma di tecnologie disponibili, la corretta scelta del tipo di sensori è fondamentale per risparmiare tempo e risorse, che possono quindi essere dedicate all'ottenimento di una calibrazione affidabile e all'integrazione dei sensori.*

*Oggi, nel settore Architecture, Engineering, Construction and Operations (AECO), i sensori sono spesso utilizzati per aumentare l'efficienza delle prestazioni dell'edificio durante la fase di uso. Alcuni degli obiettivi riguardano l'ottimizzazione dell'utilizzo degli apparecchi di illuminazione [1, 2], il controllo dell'efficienza degli impianti [3, 4] e il controllo dell'occupazione degli spazi dell'edificio [5]. Sebbene le applicazioni in tali ambiti siano in aumento, le reti di sensori per il monitoraggio del comportamento degli occupanti sono ancora poco utilizzate. L'implementazione di queste reti potrebbe alterare positivamente l'uso e il funzionamento dell'edificio e regolarne il comfort interno, ad esempio aprendo/chiedendo le finestre, attivando/disattivando i sistemi di ombreggiamento, modificando le impostazioni dei sistemi di riscaldamento/raffreddamento, ecc. Nell'ambito della manutenzione secondo condizione, i sensori sono generalmente poco utilizzati, a causa delle elevate condizioni di stress d'uso a cui sono sottoposti, della complessità nella gestione della privacy degli occupanti e a causa dell'elevata quantità di dati da memorizzare ed elaborare[6].*

*Questo articolo presenta una metodologia per il rilevamento in tempo reale dell'occupazione negli edifici, attraverso l'utilizzo di una rete di sensori ultrasonici. Questa metodologia è stata testata e convalidata attraverso un caso di studio relativo ad un edificio ad uso terziario a Milano. A tale scopo, è stato identificato un ambiente tipo all'interno dell'edificio. All'interno di questo spazio è stato determinato il numero di utenti che entrano ed escono dalla stanza durante la giornata lavorativa ed il tempo trascorso all'interno dell'ufficio. L'uso dello spazio è stato calcolato come descritto nel diagramma di flusso in Figura 3. I risultati del monitoraggio vengono utilizzati per la pianificazione e l'ottimizzazione del servizio di pulizia a partire da una strategia di manutenzione condizionata che vede l'intensità di occupazione come parametro di soglia di manutenzione (manutenzione basata sull'occupazione).*

## 2. STATO DELL'ARTE

*Nell'ambito dell'Asset Management (AM) digitale, il Facility Management (FM) acquisisce un'importanza*

management information of the asset and its components, in a collaborative and integrate environment, typical of the BIM approach [12]. This trend has resulted in the definition of a specific characterization of the BIM approach, that has been named BIM 6D [9].

The use of BIM for maintenance has also been promoted through the use of simplified models (e.g. COBie) [13, 14]. Nevertheless, these applications and past experiences, do not seem to be completely integrated and automated, within the context of cognitive buildings and the whole infrastructure of sensors and actuators that characterizes them. This exchange of information between users and building is common for cognitive buildings: assets able to autonomously adapt their operation according to specific performance levels, which have been defined through the interaction with the environment (both internal and external) and the building occupants. This process activates a bidirectional control flow between building and assets [15].

## 2.1. OCCUPANCY SURVEYING IN BUILDINGS

For surveying occupancy, it is possible to set-up a network by using sensors which are based on infrared lasers, image processing analysis, ultrasonic waves, temperature, pollutants and pressure gradients [16]. However, each of them have certain limitations depending on the main monitoring scope and context in which they are implemented; these should be considered for selecting them for the occupancy monitoring, as it has been presented by [17]: Infrared sensors might result unreliable due to double counting caused by incorrect frequency settings and/or reflections on materials surrounding the monitored area; those based on image processing analysis lose accuracy if the camera lens is soiled and may be biased to provide wrong positives when recognizing subjects, even shadows could be misinterpreted, which is more likely to occur when the lighting levels are low, requiring a proper location and computer processor to process all the data gathered; thermal based sensors (e.g. thermo-cameras) can be skewed by the current climate conditions when surveying and they tend to be more expensive than the rest; pressure-based sensors (e.g. pressure mats) must be positioned in such a way to enable proper counting (i.e. only one person sensed per activation) and reliable interpretation of their displacement direction in the studied area. Certomà C., et al [18] presented a comparison of the performance of available commercial people flow count products, their cost, advantages and disadvantages.

They also reported that commercial infrared-based sensors tend to undercount people, with differences between -9 and -19%; attributing this to the fact that people usually walk in groups, closely together. Liang R., et al [19] compared

*primaria per il mantenimento e la gestione delle performance dell'immobile e per il corretto svolgimento delle sue funzioni. Al fine di ottenere una gestione più efficace del processo, i metodi basati sul Building Information Modelling (BIM) sono sempre più riconosciuti [7]. L'approccio BIM, infatti, fornisce un supporto per la gestione di una grande mole di dati relativi alla pianificazione, gestione e implementazione dei servizi FM [8].*

*Il FM è sempre stato affiancato dall'uso di sistemi informativi: dal Computer Aided Facility Management (CAFM), ai CAD, agli Integrated Workplace Management System (IWMS), fino ai Computerised Maintenance Management Systems (CMMS) [9]. Più recentemente si è assistito allo sviluppo di teorie e pratiche (linee guida) che implicano l'uso di strumenti BIM per il FM [10, 11]. Questo approccio offre la possibilità di integrare le informazioni sulla manutenzione e la gestione dell'asset e dei suoi componenti, in un ambiente collaborativo e integrato, tipico dell'approccio BIM [12]. Questa tendenza ha portato alla definizione di una caratterizzazione dell'approccio BIM denominata BIM 6D [9].*

*L'uso del BIM per la manutenzione è stato promosso anche attraverso l'uso di modelli semplificati (ad es. COBie) [13, 14]. Tuttavia, queste applicazioni non sembrano essere completamente integrate e automatizzate nel contesto degli edifici cognitivi e dell'intera infrastruttura di sensori e attuatori che li caratterizza. Lo scambio di informazioni tra utenti ed edificio rappresenta uno dei punti salienti relativi agli edifici cognitivi. L'edificio deve essere in grado di adattare autonomamente il proprio funzionamento in base a specifici livelli prestazionali e al comportamento dell'utente (analisi del tipo di interazione dell'utente con gli spazi interni ed esterni dell'edificio). Questo processo attiva un flusso di controllo bidirezionale tra l'edificio e gli utenti [15].*

### 2.1 RILIEVO DELLE PRESENZE NEGLI EDIFICI

*Al fine di monitorare la presenza di persone all'interno di un edificio, è possibile creare una rete utilizzando differenti tipologie di sensori: laser (infrarossi), a ultrasuoni, termici (gradienti di temperatura), di pressione o basati sull'analisi di immagini [16]. Tuttavia, ognuno di questi sistemi presenta alcune debolezze. L'analisi preliminare della tecnologia sensoristica rispetto alle condizioni d'uso e allo spazio risultano necessari al fine del corretto monitoraggio dell'occupazione [17]. I sensori a infrarossi potrebbero risultare inaffidabili a causa del doppio conteggio determinato da errate impostazioni di frequenza e/o riflessioni sui materiali che circondano l'area monitorata. I sensori basati sull'analisi di immagini perdono precisione se l'obiettivo della fotocamera è sporco e possono fallire nel riconoscimento dei soggetti. Anche la distribuzione dei livelli di illuminamento (zone d'ombra) potrebbe essere causa di interpretazioni scorrette. Inoltre,*

different methodologies to monitor people count with image processing in saved videos, finding discrepancies that go from ~5 to 22% compared to manual count; once again arguing that people displacement habits affects the outcome.

Meyn S., et al [20] presented an office building as study case in which the occupancy levels were deviated between 30% and 70% using automated camera counting and Passive Infrared Sensors (PIR).

The combination of 2 or more sensors is convenient only if an accurate control logic is established and reliable data acquisition is guaranteed. For instance, Petersen, S. et al. (2016) [21] demonstrated the possibility of achieving an accuracy of 98% during the stress test, 100% during a functional test, and 100% and 99.2% during tests without false positives neither false negatives, by using an Xbox Kinect, integrating image analysis, laser and infrared based sensors' data.

However, the use of such sensor network may cause high costs and requires a highly-performing processor for data management in real time, which normally means bigger data acquisitor size making it unsuitable for the application. Moreover, Meyn S., et al [20] presented a methodology named sensor-utility-network, based on a model which employes data gathered from cameras, CO2 and PIR sensors. This, enabled a reduction of the variance of predicted occupancy from 70% to 11%.

Aiming to overcome the mentioned issues, the research presented in this article proposes to employ sensors based on ultrasonic waves for monitoring occupancy within a building space, these sensors are relatively cheap in the market, they are easy to use and install; in addition, the data surveyed is not of great size allowing easy data handling.

questa tipologia di sensori richiede il controllo del posizionamento (per evitare coni d'ombra) e di ulteriori elaborazioni informatiche dei dati raccolti. I sensori termici (come le termocamere) possono essere disturbati dalle condizioni climatiche durante il rilevamento (alterazioni microclimatiche localizzate indoor/outdoor) e tendono ad essere più costosi rispetto alle altre tipologie di sensori. I sensori di pressione (a esempio i tappeti a pressione), se non vengono collocati correttamente rendono difficile l'interpretazione del numero di persone transitate e della direzione di spostamento. Certomà C., et al [18] hanno effettuato un confronto tra prestazioni, costi, vantaggi e svantaggi dei prodotti disponibili sul mercato per il conteggio dei flussi di persone. Lo studio ha dimostrato che i sensori a infrarossi tendono a sottostimare il numero di persone (-9 e -19%), attribuendo ciò al fatto che le persone spesso camminano in gruppo. Liang R., et al [19] hanno analizzato diverse metodologie per il conteggio delle persone grazie l'elaborazione delle immagini ricavate da video. Lo studio ha dimostrato discrepanze che vanno da ~5 al 22% rispetto al conteggio manuale. Ancora una volta, le abitudini di spostamento delle persone influiscono sul risultato. Meyn S., et al [20] presentano un edificio per uffici come caso di studio, in cui i livelli di occupazione rilevati utilizzando il conteggio automatico delle telecamere e i sensori a infrarossi passivi (PIR), presentano una discrepanza tra il 30% e il 70% rispetto al rilievo manuale. La combinazione di 2 o più sensori è conveniente solo se è stabilita una logica di controllo accurata e se è garantita l'acquisizione di dati affidabili. Ad esempio, Petersen, S. et al. (2016) [21] hanno dimostrato la possibilità di raggiungere una precisione del 98% durante lo stress test, del 100% durante un test funzionale e del 100% e del 99,2% durante i test senza falsi positivi e falsi negativi, utilizzando un Kinect Xbox, integrando l'analisi delle immagini, i dati dei sensori laser e a infrarossi. Tuttavia, l'uso di tale rete

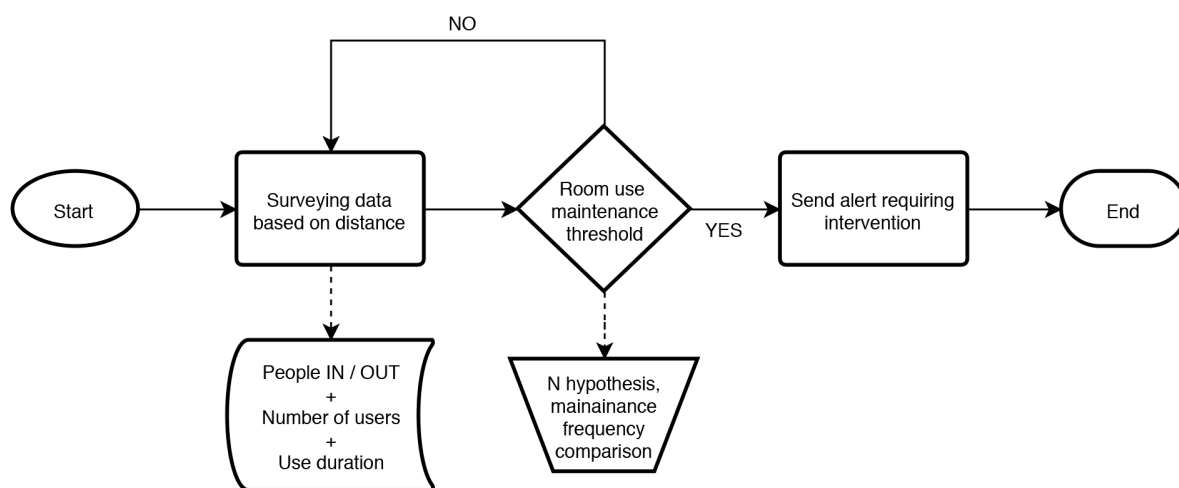


Figure 1. Flow chart – Optimized maintainance.

### 3. METHODS AND TOOLS

In this article a sensor-based methodology for enabling automatic activation of Facilities Management services is presented. Such methodology is based on surveying occupancy (people presence) within the rooms of a building, through interpretations of data coming from ultrasonic sensors. Once the maintenance plan has been defined and the contract has been signed with the responsible company, it will be possible to implement a condition-based maintenance strategy given the process illustrated in Figure 1.

Monitoring the room occupancy, it is possible to compute, for a specific period of time, the number of people that go in and out, and their dwell time. The occupancy, in this article, is employed as a correlated indicator describing the cleanness of the rooms of the building. Once the occupancy threshold defined in the maintenance plan is reached, a request for intervention is sent to the responsible company. This process is meant to be part of a wider context of automated management of FM in cognitive buildings.

#### 3.1. INSTALLATION OF THE SENSORS AND SURVEYING LOGIC

The process illustrated in Figure 1, has been implemented and exemplified using a sensor network composed by two ultrasonic sensor SRF005 and an Arduino microcontroller as data logger.

The sensors and Arduino are positioned near to the only door of the monitored space, as described in Figure 2. One sensor is located inside the room, the other is outside. Both sensors have been fixed at a  $60^\circ$  tilt angle from the vertical plane of the wall, at 0.31 m from the edge of the door's frame and at 0.56 m from the floor (see Figure 2).

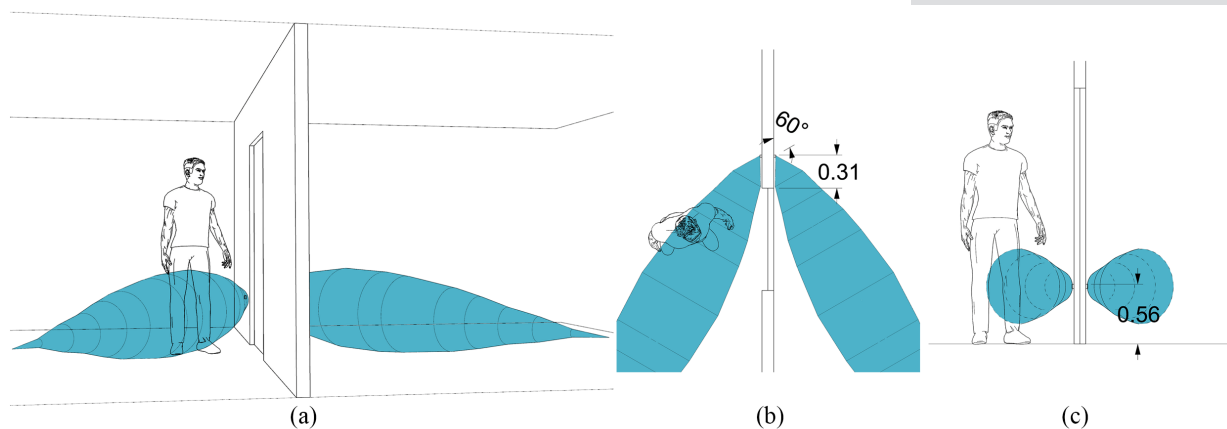


Figure 2. Sensors field of view and location (a) Axonometric (b) Plan (c) section .

di sensori ha costi elevati e richiede un processore altamente performante per la gestione dei dati in tempo reale. Inoltre, Meyn S., et al [20] hanno presentato una metodologia denominata sensor-utility network, basata su un modello che utilizza dati raccolti da telecamere, sensori CO2 e PIR. Tale approccio ha permesso di ridurre la varianza nella stima dell'occupazione prevista dal 70% all'11%. Con l'obiettivo di superare i limiti di applicazione menzionati, il presente lavoro di ricerca propone di monitorare l'occupazione degli ambienti mediante l'utilizzo di una sola tipologia di sensori ultrasonici. L'attività di misura su caso di studio ha permesso di determinare l'accuratezza del risultato e di validarne l'impiego rispetto all'uso. Il vantaggio nell'uso dei sensori ultrasonici è di tipo economico (costo del sensore e integrazione nella rete); inoltre sono facili da utilizzare, da installare, da programmare e le dimensioni dei file e la mole dei dati da gestire sono limitate. Questi fattori permettono una semplice e rapida applicazione del sistema.

#### 3. METODI E STRUMENTI

In questo articolo viene presentata una metodologia per la pianificazione dei servizi di Facility Management, basata sull'utilizzo di una rete di sensori (ad ultrasuoni) capaci di rilevare lo stato di occupazione (presenza di persone) in un ambiente open-space. Definito il piano di manutenzione e stipulato il contratto con il il soggetto manutentore, sarà possibile l'implementazione/ottimizzazione delle azioni di manutenzione (sotto-condizione) seguendo il processo illustrato in Figura 1. Il monitoraggio permette di determinare il profilo di occupazione per un dato periodo dello spazio e quindi di definire la durata dell'occupazione e il numero di persone presenti e la frequenza di ingresso e uscita e il tempo di permanenza. Il grado/tipo di occupazione è l'indicatore indiretto che permette di determinare la frequenza delle attività di pulizia dell'ambiente. Una volta raggiunta la soglia di occupazione definita nel piano di manutenzione, viene inviata una richiesta di intervento

This configuration has been established by ensuring that the detection field (established by [22]) is not registering any adjacent object, but the person passing through the door.

Each sensor reads the distance to the nearest surface, thanks to the ultrasound emission and reception devices. If this distance is within the ranges defined by the authors (throughout trial and error tests) the presence of a person is considered and recorded (see Table 1). An inward or outward flow is considered only when both sensors are activated under a certain time gap. The direction of the flow is determined by the positive or negative sign of the time of activation difference (time sequence) comparing both sensors. A detailed description of the algorithm used for the logic to compute the flow from the space is presented in Figure 3.

al manutentore. Questo processo si inserisce in un contesto più ampio di gestione automatizzata di FM negli edifici cognitivi.

### 3.1 INSTALLAZIONE DEI SENSORI E LOGICA DI RILIEVO

Il processo, illustrato in Figura 1, è stato implementato e semplificato utilizzando un dispositivo costituito da due sensori ad ultrasuoni SRF005 e un microcontrollore Arduino con funzione di data logger. I sensori e la piattaforma Arduino sono posti in corrispondenza della porta di ingresso dello spazio monitorato, come descritto in Figura 2. I due sensori sono disgiunti: il primo è posto sul lato esterno della parete su cui incide la porta e il secondo è sul lato interno. Entrambi i sensori sono orientati verso il varco della porta con un angolo di inclinazione di 60° rispetto al piano della parete, sono arretrati di 0,31 m rispetto al montante della

	Sensor 1 (S1)		Sensor 2 (S2)	
	Max	Min	Max	Min
Delta time [s]	1.7	0.55	1.7	0.55
Detection limit [cm]	5	135	12	125

Table 1. Time and distance thresholds to distinguish between true positive and false positive presences.

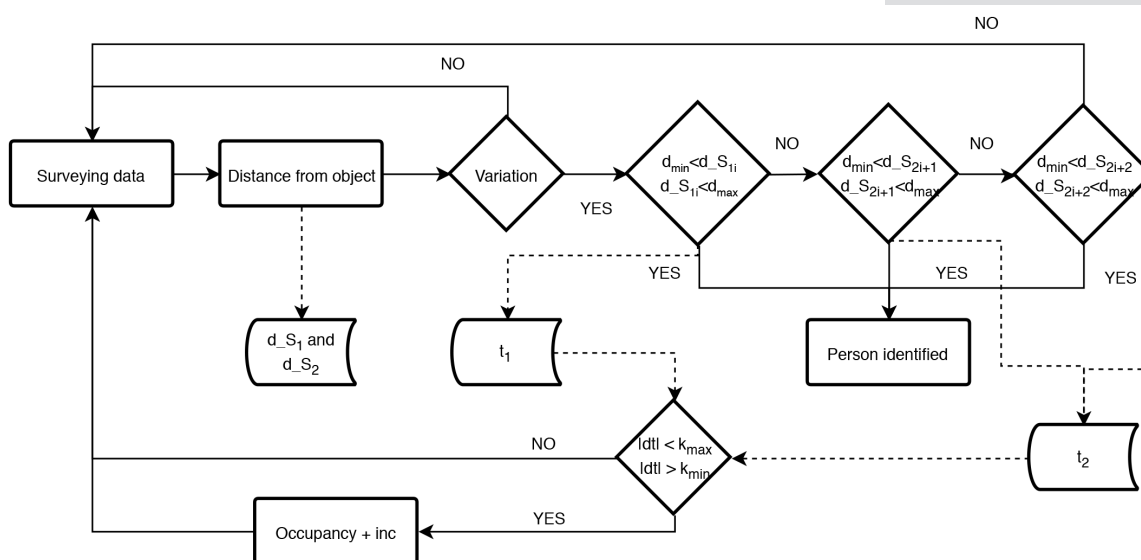


Figure 3. Flowchart of occupancy monitoring algorithm -  $d_{S1}$  and  $d_{S2}$  are the distances measured by sensors S1 and S2,  $d_{min}$  and  $d_{max}$  are the lower and upper thresholds defined by the authors,  $dtl$  are the timestamps of the distances registered,  $k_{max}$  and  $k_{min}$  are the upper and lower temporal thresholds defined by the authors.

## 4. CASE STUDY

Once the sensor network has been installed, the data acquisition latency was set at 500 ms. Nevertheless, due to the latency time settings, the presence of people is not recorded if the passage takes place in a time interval shorter than

porta e sono ad una altezza di 0,56 m dal pavimento (vedi Figura 2). Questa configurazione tiene conto dell'area di osservazione (stabilito da [22]) e dell'assenza di interferenze fisiche che potrebbero alterare la rilevazione del dato ossia la persona che passa dalla porta.

Ogni sensore registra la distanza dalla superficie più vicina (emissione e

500 ms. The monitoring was carried out for a week (Monday to Friday). In some cases, the occupancy condition had to be set different from 0 as people were already inside before the survey could start. Thanks to the distance measured between the sensor and the person, it is possible to detect the presence of one or more people crossing the doorstep and to interpret the direction of motion. If S1 (external sensor) records a presence before, in terms of time, compared to S2 (internal sensor), a +1 is considered for the occupancy, while a -1 would be recorded if the opposite situation is encountered.

## 5. RESULTS

The control logic presented is applied to the data collection, and a validation procedure is carried out through in-site observation, to verify the reliability of the proposed procedure. A summary of the results can be found in Table 2. When the sensors are installed, they are calibrated to detect the distance between them and the closest surface. Whenever a person enters the sensors' detection field, a peak is recorded. This peak corresponds to the presence of a person crossing the doorstep (see bottom diagram in Figure 4).

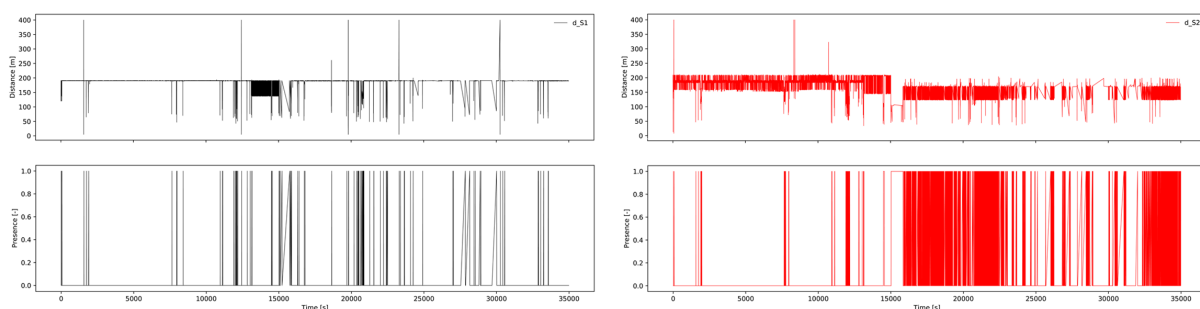


Figure 4. Results from the presence identification (bottom) from the measured distances (top).

The value of initial occupancy ( $Occi_{(real)}$ ) and final occupancy ( $Occf_{(real)}$ ) have always been added manually before starting surveying, in order to have an effective and direct feedback on the number of people occupying the monitored room when the measures started. As it can be seen in Table 2, final computed occupancy ( $OCCf_{(calc)}$ ), calculated through the proposed algorithm, is relatively close to the observed values, with a variation of  $\pm 1$  person, except for *Thursday* which would be an outlier (authors encountered problems with sensors' positioning resulting in wrong distance interpretations). For understanding the real use of the space, and determine if a cleaning service is required, the use intensity has been used ( $Usage_{(calc)}$ ), defined as the area under the curve, or the integral of the occupancy, throughout the day. Using the observation registered during the first day of the week (*Monday*), a comparison

ricezione degli ultrasuoni). Se questa distanza rientra nei range definiti dagli autori (a seguito di test preliminari per l'identificazione dell'errore della misura e delle condizioni standard di funzionamento), la presenza di una persona viene registrata (vedi Tabella 1). Il passaggio della persona, in entrata o in uscita, viene registrato solo quando entrambi i sensori sono attivati in un certo intervallo di tempo. La direzione è determinata dal segno positivo o negativo della differenza del tempo di attivazione dei sensori. Una descrizione dettagliata dell'algoritmo utilizzato per la logica di calcolo del flusso è presentata in Figura 3.

## 4. CASO DI STUDIO

Una volta installata la rete di sensori, la latenza di acquisizione dati è stata impostata a 500 ms. Tuttavia, a causa di tale impostazione, il passaggio di persone non viene registrato se esso avviene in un tempo minore a 500 ms (misurazioni successive dei sensori). Il monitoraggio è stato effettuato per una settimana (da lunedì a venerdì). In alcuni casi, la condizione di occupazione iniziale è stata impostata come diversa da 0 per presenza di persone all'interno della stanza prima dell'inizio dell'attività di monitoraggio. Il processo di acquisizione selezionato, grazie alla misura della distanza tra il sensore e la persona, permette di riconoscere

la presenza multipla e di interpretare la direzione del movimento. Se S1 (sensore esterno) registra una presenza prima, in termini di tempo, rispetto a S2 (sensore interno), si considera un +1 per l'occupazione, mentre un -1 viene registrato se si verifica la situazione opposta.

## 5. RISULTATI

La logica di controllo sviluppata è stata applicata ad un caso reale. La validazione ha permesso di verificare l'affidabilità della procedura proposta. In Tabella 2 è riportata la sintesi dei risultati.

I sensori, una volta installati, vengono calibrati per rilevare la distanza tra loro e la superficie più vicina. Ogni volta che una persona entra nel campo di rilevamento dei sensori, viene registrato un picco. Questo picco corrisponde alla presenza di una persona che attraversa la soglia della porta (si veda il diagramma in basso nella figura 4).

was made for the use intensity between the computed value obtained from the sensors ( $Usage_{(calc)}$ ) and the one obtained from the observation ( $Usage_{(real)}$ ), this confirmed the reliability of the proposed methodology by obtaining a relative variance of 15%.

*Il valore dell'occupazione iniziale ( $Occ_i$  (real)) e dell'occupazione finale ( $Occ_f$  (real)) sono sempre stati inseriti manualmente prima di iniziare la rilevazione, in modo tale da avere un'informazione efficace e corretta in merito al numero di persone presenti nella stanza ad*

Day	$T_i$	$T_f$	$Occ_i$	$Occ_f$ (real)	$Occ_f$ (calc)	$Occ_{avg}$ (calc)	$Usage_{(real)}$ [p*hr]	$Usage_{(calc)}$ p*hr]
Mon	9:50	19:31	3	2	2	2.89	29.39	24.85
Tue	9:27	18:45	2	3	3	1.33		16.27
Wed	9:35	19:13	3	1	2	1.24		12.14
Thu	10:22	18:50	5	3	12	5.67		69.63
Fri	9:35	18:20	3	2	1	3.47		29.45

Table 2. Summary table of the surveying campaigns carried out.  $T_i$ : initial time of survey,  $T_f$ : final time of the survey.  $Occ_i$ : Initial occupancy.  $Occ_f$  (real): final observed occupancy.  $Occ_f$  (calc): final computed occupancy.  $Occ_{avg}$  (calc): average computed occupancy.  $Usage_{(real)}$ : real space use intensity.  $Usage_{(calc)}$ : computed space use intensity.

## 6. CONCLUSIONS

The proposed methodology has been used to demonstrate the possibility of reading inward and outward occupants flows from a building space by using 2 ultrasonic sensors and a datalogger. This methodology has been developed in order to contribute to the automation of cleaning services as part of Facility Management operations. This approach, combined with the definition of a maintenance plan developed following the condition-based maintenance strategy can significantly impact on the automation of maintenance operations, while exploiting low-cost, easy-to-install technology. Furthermore, this technology complies with privacy regulation, as no data from any occupant is surveyed, recorded or stored.

Some limitations of the proposed methodology have been identified and will be addressed in the following stages of the research: 1) The flows are determined on the basis of the time elapsed between consecutive presences detected by the sensors. These temporal thresholds must be further refined to estimate the motion speed of the occupants' flow in order to increase the precision in the identification of false positive events. 2) The proposed network is not capable of accurately detect fast consecutive passages of 2 or more occupants (either inwards or outwards), therefore a deeper analysis is foreseen regarding the number of sensors and their positioning to improve this drawback.

The system and the methodology used demonstrate acceptable reliability and precision in the automatic calculation of occupancy. Even after a week of use the sensors do not seem to lose precision. This furthers the integration of the proposed system for managing the maintenance of cognitive buildings. Also, it opens up the possibility to automate the management of requests for intervention, related to the implementation of the maintenance plan, through

*inizio misura. Come si può osservare in Tabella 2, l'occupazione finale ottenuta ( $Occ_f$  (calc)), calcolata attraverso l'algoritmo proposto, è prossima ai valori osservati, con una variazione di 1 persona, ad eccezione di un giorno (giovedì) che rappresenta una eccezione (per un non adeguato posizionamento dei sensori e una conseguente errata misurazione della distanza). Per comprendere l'uso reale della stanza e quindi per pianificare le eventuali attività di pulizia, è stato utilizzato l'indicatore di intensità d'uso giornaliera ( $Usage_{(calc)}$ ), definito come l'area sotto la curva, o l'integrale dell'occupazione. Utilizzando i dati relativi al primo giorno di monitoraggio (lunedì), è stato effettuato un confronto dell'intensità d'uso tra il valore calcolato ricavato dai sensori ( $Usage_{(calc)}$ ) e quello ottenuto dall'osservazione ( $Usage_{(real)}$ ) il che ha confermato l'affidabilità della metodologia proposta ottenendo una varianza relativa del 15%.*

## 6. CONCLUSIONI

*La metodologia proposta è stata utilizzata per dimostrare la possibilità di misurare i flussi di persone in entrata e in uscita da un ambiente, utilizzando 2 sensori a ultrasuoni e un datalogger. Tale metodologia è stata sviluppata al fine di contribuire all'automazione dei servizi di pulizia nell'ambito delle operazioni di Facility Management. Il metodo e il sistema (che sfrutta una tecnologia a basso costo e facile da installare) proposti, combinato con la definizione di un piano di manutenzione sotto-condizione, può avere un impatto significativo sull'automazione delle operazioni di manutenzione. Inoltre, questa metodologia di rilevamento è conforme alla normativa sulla privacy, in quanto nessun dato sensibile relativo agli occupanti viene rilevato, registrato o memorizzato. Alcuni limiti della metodologia proposta sono stati individuati e saranno risolti nelle fasi successive della ricerca: 1) I flussi sono determinati sulla base del tempo trascorso tra le presenze consecutive rilevate dai sensori. Queste soglie*



the integration of contract clauses into a maintenance *smart contract*: a particular contract type which exploits the warranties provided by blockchain, allowing secure and automatic transactions related to the payment of provided services, in a digital perspective of disintermediation [23, 24].

The technology proposed and employed, overcomes other systems' limits thanks to the users' privacy protection. The ultrasonic sensors in fact, allow to detect the presence of people, without detecting, recording or storing any sensitive information. Furthermore, no occupant is identified, neither there is a possibility of tracking who were entering or leaving the space. Future research developments could be related to the integration of the proposed approach into user satisfaction surveys on the service delivered by the service provider. The rating by occupants could be included as reward clauses into the smart contract. In this way, more information would be available on the actual condition of the space and on the building itself, plus data on the performance of the service provider.

## 7. REFERENCES

- [1] Nagy Z, Yong FY, Schlueter A. Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption. *Energy Build* 2016; 126: 310–322.
- [2] Van De Meughevel N, Pandharipande A, Caicedo D, et al. Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation. *Energy Build* 2014; 75: 321–329.
- [3] D'Oca S, Hong T. Occupancy schedules learning process through a data mining framework. *Energy Build* 2015; 88: 395–408.
- [4] Gul MS, Patidar S. Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building. *Energy Build* 2015; 87: 155–165.
- [5] Ciribini ALC, Pasini D, Tagliabue LC, et al. Tracking Users' Behaviors through Real-time Information in BIMs: Workflow for Interconnection in the Brescia Smart Campus Demonstrator. In: *Procedia Engineering*. 2017, pp. 1484–1494.
- [6] Marelli L, Testa G. Scrutinizing the EU general data protection regulation. *Science* (80-) 2018; 360: 496–498.
- [7] Pärn EA, Edwards DJ, Sing MCP. The building information modelling trajectory in facilities management: A review. *Autom Constr* 2017; 75: 45–55.
- [8] Re Cecconi F, Maltese S, Dejacco MC. Leveraging BIM for digital built environment asset management. *Innov Infrastruct Solut* 2017; 2: 14.
- [9] Volk R, Stengel J, Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Autom Constr* 2014; 38: 109–127.
- [10] Chen W, Chen K, Cheng JCP, et al. BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders. *Autom Constr* 2018; 91: 15–30.
- [11] Dixit MK, Venkatraj V, Ostadalimakhmalbaf M, et al. Integration of facility management and building information modeling (BIM). *Facilities* 2019; 37: 455–483.
- [12] McArthur JJ. A building information management ( BIM ) framework and supporting case study for existing building operations , maintenance and sustainability. In: *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*. 2015, pp. 1104–1111.
- [13] BSI. BS 1192-4 : 2014 Collaborative production of information Part 4 : Fulfilling employer' s information exchange requirements using COBie - Code of practice. 2014; 58.
- [14] Lavy S, Jawadekar S. A Case Study of Using BIM and COBie for Facility Management. *Int J Facil Manag* 2014; 5: 13–27.
- [15] Rinaldi S, Bittenbinder F, Liu C, et al. Bi-directional interactions between users and cognitive buildings by means of smartphone app. In: *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [16] T. Teixeira, G. Dublon AS. A survey of human-sensing: Methods for detecting presence,

temporali devono essere ulteriormente affinate per stimare la velocità di movimento degli occupanti al fine di incrementare la precisione nel riconoscimento dei falsi positivi 2) Il sistema di sensori proposto non è in grado di rilevare con precisione i passaggi rapidi e consecutivi di 2 o più occupanti (verso l'interno o verso l'esterno); un'analisi più approfondita relativa al numero di sensori e al loro posizionamento è stata avviata per eliminare questo limite.

Il sistema e la metodologia utilizzati dimostrano un'accettabile affidabilità e precisione nel calcolo automatico dell'occupazione. Anche dopo una settimana di utilizzo i sensori non sembrano perdere precisione. Questo favorisce l'integrazione del sistema proposto per la gestione della manutenzione degli edifici cognitivi. Inoltre, si apre la possibilità di automatizzare la gestione delle richieste di intervento, relative all'implementazione del piano di manutenzione, attraverso l'integrazione di clausole contrattuali in forme di smart contract di manutenzione: una particolare tipologia contrattuale che sfrutta le garanzie fornite dalla blockchain, consentendo transazioni sicure e automatiche relative al pagamento dei servizi forniti, in una prospettiva digitale di disintermediazione [23, 24].

La tecnologia proposta e utilizzata supera i limiti di altri sistemi di sensori grazie alla protezione della privacy degli utenti. I sensori ultrasonici, infatti, permettono di rilevare la presenza di persone senza rilevare, registrare o memorizzare informazioni sensibili. Inoltre, non viene identificato nessun occupante, né vi è la possibilità di rintracciare chi entra o esce dall'ambiente oggetto di monitoraggio. Un possibile ulteriore sviluppo futuro della ricerca riguarda l'integrazione dell'approccio proposto con indagini sulla soddisfazione degli utenti, in merito al servizio fornito. La valutazione da parte degli occupanti potrebbe essere inclusa nello smart contract come clausola di rimodulazione economica. Questo sistema di monitoraggio garantirebbe una maggiore disponibilità di informazioni sulle effettive condizioni dello spazio e sulle prestazioni del fornitore di servizi.

- count, location, track, and identity. ENALAB Technical Report Yale University. *ENALAB Tech Rep 09-2010* 2010; 1: Vol.1, No.1.
- [17] Kuutti J. A Test Setup for Comparison of People Flow Sensors. 2012; 1–89.
- [18] Certomà C, Corsini F, Rizzi F. Crowdsourcing urban sustainability. Data, people and technologies in participatory governance. *Futures* 2015; 74: 93–106.
- [19] Liang R, Zhu Y, Wang H. Counting crowd flow based on feature points. *Neurocomputing* 2014; 133: 377–384.
- [20] Meyn S, Surana A, Lin Y, et al. A sensor-utility-network method for estimation of occupancy in buildings. In: *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. IEEE, 2009, pp. 1494–1500.
- [21] Petersen S, Pedersen TH, Nielsen KU, et al. Establishing an image-based ground truth for validation of sensor data-based room occupancy detection. *Energy Build* 2016; 130: 787–793.
- [22] Wickramasooriya A, Hamilan G, Jayawardena SIL, et al. Characteristics of sonar range sensor SRF05. *Proc 2008 4th Int Conf Inf Autom Sustain ICIAFS 2008* 2008; 475–480.
- [23] Li J, Greenwood D, Kassem M. Blockchain in the built environment and construction industry: A systematic review, conceptual models and practical use cases. *Autom Constr* 2019; 102: 288–307.
- [24] Wang J, Wu P, Wang X, et al. The outlook of blockchain technology for construction engineering management. *Front Eng Manag* 2017; 4: 67.