

dr hab. inż. Sławomir Biruk, prof. PL<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4392-8426

dr hab. inż. Piotr Jaśkowski, prof. PL<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-1661-3373

dr inż. Krzysztof Kaczorek<sup>2)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-4262-7077

dr hab inż. Michał Krzemiński, prof PW<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-6352-5942

prof. dr hab. inż. Edyta Plebankiewicz<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0003-0892-5027

dr inż. Łukasz Rosicki

ORCID: 0000-0002-7293-6671

# Application of passive infrared sensors in monitoring the dynamics of workers' movement in indoor environments

## *Zastosowanie pasywnych czujników podczerwieni w monitorowaniu dynamiki ruchu pracowników w przestrzeni zamkniętej*

DOI: 10.15199/33.2025.10.20

**Abstract:** The article presents the results of research on the application of Passive Infrared (PIR) sensors for monitoring workplace movement dynamics in indoor spatial domains. The designed system, based on a Raspberry Pi Pico microcontroller, enables detection of presence, estimation of locomotion velocity and analysis of movement trajectories. Field tests conducted in university buildings confirmed the high effectiveness and resistance of the sensors to interference, indicating their potential in workplace spatial optimization and human traffic flow management. The measured average walking speeds in the workplace ranged from 1.27 to 1.60 m/s, with the average occupancy of the analyzed traffic areas ranging between 13 and 14.

**Keywords:** passive detection; motion analysis; workplace environment modelling; indoor monitoring systems; spatial organization optimization.

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki badań nad zastosowaniem pasywnych czujników podczerwieni (PIR) do monitorowania dynamiki ruchu osób w przestrzeni zamkniętej. Zaprojektowany system, bazujący na mikrokontrolerze Raspberry Pi Pico, umożliwia detekcję obecności, szacowanie prędkości oraz trajektorii ruchu. Próby polowe w budynkach uczelnianych potwierdziły dużą skuteczność i odporność czujników na zakłócenia, wskazując ich potencjał w zarządzaniu przestrzenią pracy i optymalizacji przepływu osób. Pomierzona średnia prędkość ruchu w miejscu pracy wyniosła 1,27–1,60 m/s przy średnim zapełnieniu analizowanych stref ruchu 13÷14 osób.

**Słowa kluczowe:** detekcja pasywna; analiza ruchu; modelowanie środowisk pracy; systemy monitorowania wewnętrznego; optymalizacja organizacji przestrzeni.

Conducting research on employee behavior in the construction environment encounters numerous methodological, organizational, and legal limitations. Traditionally applied survey methods, such as questionnaires and interviews, although classified as non-invasive techniques, are characterized by limited objectivity and susceptibility to systematic errors, including the interviewer effect and sample non-representativeness [1, 2]. Furthermore, their usefulness in the context of evaluating complex production processes is limited to subjective assessments by employees and simple quantitative parameters. In the conditions of a construction site, characterized by high variability and the uniqueness of processes, these limitations significantly reduce the diagnostic value of the data obtained. In light of these shortcomings, non-invasive in-situ methods focused on the direct measurement of workers' behavior parameters are gaining increasing importance. Particular attention is devoted to solutions employing image analysis – both in a retrospective approach and in real time – which are applied, among others, in

rowadzenie badań nad zachowaniami pracowników w środowisku budowy napotyka na liczne ograniczenia natury metodologicznej, organizacyjnej i prawnej. Tradycyjnie stosowane metody sondażowe, takie jak ankiety i kwestionariusze, mimo że zaliczane do technik nieinwazyjnych, cechują się ograniczoną obiektywnością oraz podatnością na błędy systematyczne, m.in. efekt ankietiera czy niereprezentatywność próby badawczej [1, 2]. Dodatkowo, ich użyteczność w kontekście oceny złożonych procesów produkcyjnych jest ograniczona do subiektywnych ocen pracowników i prostych parametrów ilościowych. W warunkach placu budowy, charakteryzujących się dużą zmiennością i niepowtarzalnością procesów, wskazane ograniczenia znacznie obniżają wartość diagnostyczną uzyskiwanych danych. W świetle tych niedoskonałości coraz większe znaczenie zyskują nieinwazyjne metody in situ, zorientowane na bezpośredni pomiar parametrów zachowania pracowników. Szczególną uwagę poświęca się rozwiązaniom wykorzystującym analizę obrazu – zarówno w ujęciu retrospektywnym, jak i w czasie rzeczywistym, która znajduje zastosowanie m.in. w systemach wspomagających bezpieczeństwo pracy z użyciem ciężkiego sprzętu [3]. Uzupełnieniem tych technik są systemy lokalizacji czasu rzeczywistego (RTLS), na bazie komunikacji radiowej UWB, umożli-

<sup>1)</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>3)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>\*)</sup> Correspondence address: krzysztof.kaczorek@pw.edu.pl

systems supporting occupational safety when operating heavy machinery [3]. Complementing these techniques are real-time location systems (RTLS), based on UWB radio communication, which enable precise tracking of movement trajectories and workers' physiological parameters [4]. The described technologies, by providing high-quality empirical data, open new perspectives for the quantitative analysis of work processes and the automation of organizational supervision.

Despite the high technological entry threshold, significant implementation costs, and legal restrictions related to personal data protection, advanced measurement tools – such as RTLS, automated image analysis, and telemetry systems – offer a real opportunity to overcome the existing research barriers in construction process engineering. The introduction of integrated systems for monitoring human activity in the production environment may constitute the foundation for future interdisciplinary research combining the achievements of construction engineering, applied computer science, and organizational and management sciences.

The selection of technologies used to monitor the activity of construction workers must be preceded by an analysis, taking into account the specific nature of the construction environment and operational constraints. This environment is characterized by variable spatial geometry, a high level of interference (including electromagnetic and mechanical), and the unpredictability of environmental phenomena.

The analysis of workers' movement in the workplace constitutes a sensitive area that requires particular consideration of the applicable legal regulations related to privacy protection and personal data security. The collection and processing of information that enables the identification of individuals are subject to numerous restrictions arising from national and international regulations, in particular the General Data Protection Regulation (GDPR) [5].

According to the applicable provisions, the monitoring of workers' movements may be conducted only on the basis of the employer's legitimate interest or the explicit, informed, and voluntary consent of the individuals subject to the supervision system (GDPR, Art. 6, Sec. 1) [5]. This requires not only formally informing employees about the scope, methods, and purpose of data collection, but also developing a transparent internal policy regulating the manner of information processing and protection.

The aim of the conducted research was to assess the validity and perform a preliminary verification of the effectiveness of a proprietary measurement system based on passive infrared (PIR) sensors for monitoring the dynamics of human movement in enclosed spaces. Owing to its simple architecture, low operating costs, and limited impact on user privacy, this system constitutes a potentially effective tool for supporting the analysis of human activity in the work environment. A key element of the research was the verification of the possibility of using PIR sensors for the approximate measurement of pedestrian movement speed and the registration of their trajectories, which may have practical applications in optimizing spatial organization and improving safety in high-traffic environments.

wiające precyzyjne śledzenie trajektorii ruchu oraz parametrów fizjologicznych pracowników [4]. Opisywane technologie, przez dostarczanie danych empirycznych bardzo dobrej jakości, otwierają nowe perspektywy w zakresie ilościowej analizy procesów pracy oraz automatyzacji nadzoru organizacyjnego.

Mimo wysokiego progu wejścia technologicznego, istotnych kosztów wdrożenia oraz rygorów prawnych związanych z ochroną danych osobowych, zaawansowane narzędzia pomiarowe – takie jak RTLS, automatyczna analiza obrazu czy systemy telemetryczne – oferują realną możliwość przełamania dotychczasowych barier badawczych w inżynierii procesów budowlanych. Wprowadzenie zintegrowanych systemów monitorowania aktywności ludzkiej w środowisku produkcyjnym może stanowić fundament przyszłych badań interdyscyplinarnych, łączących dorobek inżynierii budowlanej, informatyki stosowanej oraz nauk o organizacji i zarządzaniu. Wybór technologii monitorowania aktywności pracowników budowlanych musi być poprzedzony analizą, uwzględniającą specyfikę środowiska budowy oraz ograniczenia eksploatacyjne. Środowisko to charakteryzuje się zmienną geometrią przestrzenną, wysokim poziomem zakłóceń (w tym elektromagnetycznych i mechanicznych) oraz nieprzewidywalnością zjawisk środowiskowych.

Analiza ruchu pracowników w miejscu pracy stanowi wrażliwy obszar, który wymaga szczególnego uwzględnienia obowiązujących przepisów prawnych związanych z ochroną prywatności oraz bezpieczeństwem danych osobowych. Zbieranie i przetwarzanie informacji umożliwiających identyfikację osób jest obwarowane licznymi ograniczeniami wynikającymi z regulacji krajowych i międzynarodowych, w szczególności Rozporządzenia Ogólnego o Ochronie Danych Osobowych (GDPR) [5]. Zgodnie z obowiązującymi przepisami, monitorowanie ruchu pracowników może odbywać się jedynie na podstawie uzasadnionego interesu pracodawcy lub wyraźnej, świadomej i dobrowolnej zgody osób objętych systemem nadzoru (GDPR – art. 6, ust. 1) [5]. Wymaga to nie tylko formalnego poinformowania pracowników o zakresie, metodach i celu zbierania danych, ale również opracowania przejrzystej polityki wewnętrznej regulującej sposób przetwarzania i zabezpieczania informacji.

Celem przeprowadzonych badań była ocena zasadności oraz wstępna weryfikacja skuteczności autorskiego systemu pomiarowego bazującego na pasywnych czujnikach podczerwieni (PIR) w monitorowaniu dynamiki przemieszczania się osób w przestrzeni zamkniętej. System ten, dzięki prostej architekturze, niewielkim kosztom eksploatacyjnym oraz ograniczonemu wpływowi na prywatność użytkowników, stanowi potencjalnie efektywne narzędzie wspierające analizę aktywności ludzkiej w środowisku pracy. Kluczowym elementem badań była weryfikacja możliwości zastosowania czujników PIR do szacunkowego pomiaru prędkości ruchu pieszych oraz rejestracji ich trajektorii, co może znaleźć praktyczne zastosowanie w optymalizacji organizacji przestrzeni oraz poprawie bezpieczeństwa w środowiskach o dużym natężeniu ruchu. Przeprowadzone pomiary mają charakter próbny i pilotażowy, ukierunkowany na sprawdzenie rzeczywistych możliwości detekcyjnych zaprojektowanego systemu w warunkach zbliżonych do rzeczywistego środowiska pracy. Wstępne testy umoż-

The conducted measurements are of a preliminary and pilot nature, aimed at verifying the actual detection capabilities of the designed system under conditions approximating a real work environment. The initial tests made it possible to evaluate the technical parameters of the device, such as range, detection angle, and result repeatability, as well as to identify limitations and potential sources of measurement errors. The obtained results constitute a starting point for further, more advanced research focused on the development of integrated movement monitoring systems employing PIR sensors.

### Application of PIR sensors in workplace space management

Modern workplace management systems increasingly rely on technological solutions that allow for non-invasive monitoring of employee presence and activity. Among the most common devices of this type are **Passive Infrared (PIR)** sensors, which detect changes in infrared radiation emitted by the human body. These sensors have gained wide popularity due to their simplicity, low implementation costs, and relatively minimal interference with employee privacy. As researchers emphasize, PIR devices are among the most frequently used sensors for presence detection in buildings, mainly because of their low data processing complexity and the absence of direct image recording of individuals [6].

Although PIR sensors have traditionally been used primarily for simple presence detection, the development of machine learning algorithms and their integration with other technologies have enabled their application in more advanced monitoring systems. Increasingly, PIR sensors are used not only for motion detection but also for people counting, activity analysis, and user localization within office spaces, thereby supporting space management and improving resource utilization efficiency [6]. Such systems make it possible, for instance, to analyze which conference rooms are used most frequently, which office zones remain unoccupied, and how presence patterns vary throughout the day.

**To increase measurement accuracy and expand the range of collected data, PIR sensors are increasingly being integrated with other environmental sensors, such as temperature, humidity, and carbon dioxide concentration sensors.** Despite the numerous advantages of using PIR sensors in the workplace, their application also raises certain concerns related to privacy protection. Studies indicate that although PIR sensors do not directly record employees' images or identities, when combined with data from other systems, they may provide information about the behaviors and habits of individuals present in the workplace [7]. Therefore, it is of key importance to design such systems in compliance with data protection regulations, such as the GDPR, and to ensure full transparency toward employees.

In practice, PIR sensors are becoming an indispensable component of modern Building Management Systems (BMS) and tools supporting flexible workplace management. This technology is applied not only to increase energy efficiency and improve work comfort but also to enhance the safety and ergonomics of the office environment.

liwiły ocenę parametrów technicznych urządzenia (zasięgu, kąta detekcji czy powtarzalności wyników), oraz pozwoliły na identyfikację ograniczeń i potencjalnych źródeł błędów pomiarowych. Uzyskane rezultaty stanowią punkt wyjścia do dalszych, bardziej zaawansowanych badań, których celem będzie rozwój zintegrowanych systemów monitoringu ruchu z zastosowaniem czujników PIR.

### Zarządzanie przestrzenią miejsca pracy

Współczesne systemy zarządzania przestrzenią pracy coraz częściej bazują na rozwiązaniach technologicznych, które pozwalają monitorować obecność i aktywność pracowników w sposób nieinwazyjny. Do najpopularniejszych urządzeń tego typu należą **pasywne czujniki podczerwieni (PIR)**, wykrywające zmiany w promieniowaniu podczerwonym emitowanym przez ciało ludzkie. Zyskały one szeroką popularność dzięki swojej prostocie, niewielkim kosztom wdrożenia oraz relatywnie niewielkiej ingerencji w prywatność pracowników. Jak podkreślają badacze, urządzenia PIR są jednymi z najczęściej stosowanych czujników do wykrywania obecności w budynkach, głównie ze względu na małą złożoność przetwarzania danych oraz brak bezpośredniej rejestracji wizerunku osób [6].

Mimo że tradycyjnie czujniki PIR wykorzystywano głównie do prostego wykrywania obecności, rozwój algorytmów uczenia maszynowego i integracja z innymi technologiami umożliwiły ich zastosowanie w bardziej zaawansowanych systemach monitorujących. Coraz częściej czujniki PIR wykorzystuje się również do liczenia osób, analizy aktywności czy lokalizacji użytkowników w obrębie biura, co wspiera zarządzanie przestrzenią i zwiększa efektywność wykorzystania zasobów [6]. Tego typu systemy pozwalają m.in. analizować, które sale konferencyjne są najczęściej wykorzystywane, jakie strefy biurowe pozostają puste oraz jak kształtują się wzorce obecności w różnych porach dnia.

**W celu zwiększenia dokładności pomiarów oraz rozszerzenia zakresu zbieranych danych, czujniki PIR są coraz częściej integrowane z innymi sensorami środowiskowymi, takimi jak czujniki temperatury, wilgotności czy stężenia dwutlenku węgla.** Pomimo licznych zalet stosowania czujników PIR w środowisku pracy, ich wykorzystanie budzi również pewne kontrowersje związane z ochroną prywatności. Badania wskazują, że choć czujniki PIR nie rejestrują bezpośrednio wizerunku ani tożsamości pracowników, to w połączeniu z danymi z innych systemów mogą dostarczać informacji o zachowaniach i nawykach osób przebywających w miejscu pracy [7]. W związku z tym kluczowe znaczenie ma projektowanie takich systemów w sposób zgodny z przepisami dotyczącymi ochrony danych osobowych, takimi jak RODO, a także zapewnienie pełnej transparentności wobec pracowników. W praktyce czujniki PIR stają się nieodzownym elementem nowoczesnych systemów zarządzania budynkami (BMS) oraz narzędzi wspierających elastyczne zarządzanie przestrzenią pracy. Technologia ta znajduje zastosowanie nie tylko w zakresie zwiększenia efektywności energetycznej czy poprawy komfortu pracy, ale również w podnoszeniu bezpieczeństwa i ergonomii środowiska biurowego.



### Sensor setup

Based on the conducted analysis, **passive infrared (PIR) sensors** were identified as the most functional and economically justified solution. These sensors utilize the phenomenon of detecting thermal radiation emitted by objects with a temperature higher than the background – in this case, the human body. Their advantage over active technologies, such as ultrasonic or optical sensors, lies in the absence of self-emitted signals, which minimizes energy consumption and eliminates the risk of mutual interference.

The proprietary measurement system is based on the **Raspberry Pi Pico microcontroller**, a development platform featuring the RP2040 chip developed by the Raspberry Pi Foundation. The microcontroller is equipped with a dual-core ARM Cortex-M0+ processor and 26 GPIO ports, enabling integration with sensors and external devices. Additional communication interfaces such as SPI, I2C, UART, and USB significantly enhance design flexibility. The choice of the Raspberry Pi Pico was motivated by its availability, favorable price, compact design, and low power consumption, which make it suitable for use in mobile, battery-powered IoT systems.

The system employs PIR sensors responsible for motion detection, integrated with the microcontroller according to the developed schematic. The circuit is powered by three AAA batteries with a capacity of 950 mAh, providing mobility and independence of the setup.

The microcontroller has a built-in oscillator, eliminating the need for an external real-time clock, while synchronization of readings with the computer was performed each time data were retrieved. The measurement set consisted of the microcontroller, batteries, and one or two PIR sensors mounted within a masking strip. The system's task was to record the time of motion detection by saving timestamps in the internal memory. In the case of two sensors placed at a known distance, it was possible to determine the average speed of moving objects based on the difference in detection times.

The device software was developed in MicroPython. Upon system startup, a text file was generated in which timestamps corresponding to the activation or deactivation of motion sensors were recorded. For configurations with one or two PIR sensors, an algorithm was implemented to monitor changes in logical states on the microcontroller's input ports at 10 ms intervals. The recorded data enabled a detailed analysis of the number of interactions and, in the case of systems with two sensors, the determination of movement parameters such as the time of passage between sensors.

The sensor was integrated with a low-power microcontroller, allowing standby operation and immediate processing of input signals using interrupt handling. The system software was developed with mechanisms to eliminate accidental detections, including signals generated by movements not caused by a worker (e.g., material shifting or shadows cast by machines).

**Measurements conducted in a real-world environment demonstrated high repeatability and operational stability of the PIR sensor.** The detection efficiency was analyzed under varying thermal conditions, different levels of natural light intensity, and in the presence of disturbances such as airborne

### Przygotowanie czujnika

Na podstawie przeprowadzonej analizy, jako najbardziej funkcjonalne i ekonomicznie uzasadnione rozwiązanie wskazano **pasywne czujniki podczerwieni**, które wykorzystują zjawisko detekcji promieniowania ciepłego emitowanego przez obiekty o temperaturze wyższej od tła, w tym przypadku – przez ludzkie ciało. Ich przewagą nad technologiami aktywnymi typu czujniki ultradźwiękowe czy optyczne jest brak emisji sygnału własnego, co minimalizuje zużycie energii i eliminuje ryzyko wzajemnych zakłóceń.

**Autorski system pomiarowy bazuje na mikrokontrolerze Raspberry Pi Pico**, będącym rozwojową platformą z układem RP2040 opracowanym przez Raspberry Pi Foundation. Mikrokontroler wyposażono w dwurdzeniowy procesor ARM Cortex-M0+ oraz 26 portów GPIO umożliwiających integrację z czujnikami i urządzeniami zewnętrznymi. Dodatkowe interfejsy komunikacyjne, takie jak SPI, I2C, UART i USB, znacznie zwiększają elastyczność projektową. Zastosowanie Raspberry Pi Pico wynikało z jego dostępności, korzystnej ceny, kompaktowej budowy i niewielkiego zużycia energii, co pozwala na jego zastosowanie w mobilnych, baterijnych systemach IoT. W systemie zastosowano czujniki PIR odpowiedzialne za detekcję ruchu, które zintegrowano z mikrokontrolerem zgodnie z opracowanym schematem. Zasilanie układu było realizowane za pomocą trzech akumulatorów AAA o pojemności 950 mAh, co zapewniało mobilność i niezależność zestawu. Mikrokontroler ma wbudowany oscylator, dzięki czemu nie było konieczności stosowania zewnętrznego zegara czasu rzeczywistego, a synchronizacja odczytów z komputerem była wykonywana przy każdym pobraniu danych. Zestaw pomiarowy składał się z mikrokontrolera, akumulatorów i jednego lub dwóch czujników PIR umieszczonych w listwie maskującej. Zadaniem układu było rejestrowanie czasu detekcji ruchu przez zapis znaczników czasowych w pamięci wewnętrznej. W przypadku zastosowania dwóch czujników, rozmieszczonych w znanej odległości, możliwe było wyznaczenie średniej prędkości poruszających się obiektów na podstawie różnicy czasów detekcji.

Oprogramowanie urządzenia opracowano w języku MicroPython. Po uruchomieniu systemu generowany był plik tekstowy, w którym rejestrowano znaczniki czasowe związane z aktywacją lub dezaktywacją czujników ruchu. W przypadku układów z jednym lub dwoma czujnikami PIR zaimplementowano algorytm monitorujący zmianę stanów logicznych na portach wejściowych mikrokontrolera w interwałach co 10 ms. Zarejestrowane dane umożliwiały szczegółową analizę liczby interakcji oraz, w przypadku układów z dwoma czujnikami, wyznaczenie parametrów ruchu takich jak czas przejścia między czujnikami.

Czujnik został zintegrowany z mikrokontrolerem o niewielkim poborze mocy, umożliwiającym pracę w trybie czuwania oraz natychmiastowe przetwarzanie sygnału wejściowego w oparciu o obsługę przerw. Oprogramowanie systemowe opracowano z uwzględnieniem mechanizmów eliminacji przypadkowych detekcji, w tym sygnałów generowanych przez ruch niebędący efektem działania pracownika (np. przesuwanie materiałów lub cieniowanie od maszyn).

**Pomiary przeprowadzone w środowisku rzeczywistym wykazały dużą powtarzalność i stabilność działania czuj-**

contaminants (dust, vapors). It was found that the actual parameters of the sensor – in terms of detection angle and range – were consistent with the manufacturer's specifications. No significant decrease in performance was observed even under conditions of increased background heat emission, confirming the sensor's suitability for applications involving monitoring of human presence and activity in industrial environments.

The walking speed of workers constitutes an important indicator characterizing the dynamics of functioning within the occupational space. Due to the evolving nature of the work environment and the growing importance of organizational efficiency, this issue has gained increasing relevance, both in the context of historical analyses and real-time behavior prediction. Understanding employee movement speed can support not only process optimization but also effective management of workspace organization.

In the literature, there is a consensus regarding the approximate value of natural walking speed, with the most commonly accepted range being 1.3–1.5 m/s (Table 1). Studies indicate significant variability in results, arising from individual characteristics of workers – such as age and gender – as well as differing environmental conditions. The impact of load, typical for many workplace tasks, further reduces movement speed, which

**nika PIR.** Analizowano efektywność detekcji w zmiennych warunkach termicznych, przy różnym natężeniu światła naturalnego oraz obecności zakłóceń w postaci zanieczyszczeń powietrza (pyły, opary). Stwierdzono, że parametry rzeczywiste czujnika – w zakresie kąta oraz zasięgu detekcji – są zgodne z deklaracjami producenta. Nie zaobserwowano istotnego spadku skuteczności działania nawet w warunkach o podwyższonej emisji ciepła tła, co potwierdza jego przydatność w aplikacjach monitorujących obecność i aktywność ludzi w otoczeniu przemysłowym.

Prędkość przemieszczania się pracowników stanowi istotny wskaźnik charakteryzujący dynamikę funkcjonowania w przestrzeni zawodowej. Z uwagi na ewolucję środowiska pracy oraz wzrost znaczenia efektywności organizacyjnej, zagadnienie to zyskuje na aktualności, zarówno w kontekście historycznych analiz, jak i predykcji zachowań w czasie rzeczywistym. Zrozumienie prędkości ruchu pracowników może wspierać nie tylko optymalizację procesów, ale również skuteczne zarządzanie przestrzenią roboczą.

W literaturze istnieje konsensus dotyczący przybliżonej wartości prędkości naturalnego chodu, przy czym najczęściej przyjmowane tempo to 1,3÷1,5 m/s (tabela). Badania wskazują na istotne zróżnicowanie wyników, wynikające z indywidualnych

#### Measured walking speeds

*Pomierzona prędkość ruchu pieszych*

| Source/<br>Źródło | Measured speeds/<br>Prędkość pomierzona<br>[m/s]                             | Remarks/Uwagi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [8]               | 2,1 ± 0,7<br>1,5 ± 0,6                                                       | A distinction was made between hurried and normal walking, based on studies examining pedestrian behaviour when passing through narrow sections/<br>rozróżniono ruch w pośpiechu i normalny; badanie dotyczące zachowywania się pieszych przy przejściu przez przewężenie                                                                                                              |
| [9]               | 0,6 – 1,6                                                                    | Researchers indicated the natural walking speed observed under normal conditions/<br>naturalne tempo ruchu wskazane przez badaczy                                                                                                                                                                                                                                                      |
| [10]              | 1,35<br>0,70 – 0,75<br>1,34                                                  | Median walking speeds were reported for movement on a flat platform as well as for ascending and descending stairs, the average walking speeds were compiled from literature studies on pedestrian movement/<br>podano pomierzone mediany w prędkości ruchu na płaskiej platformie i po schodach (ruch w górę i ruch w dół); średnia z badań literaturowych dotyczących ruchu pieszych |
| [11]              | 1,19                                                                         | In unrestricted pedestrian flow, the average speeds were measured in covered walkways in Hong Kong/<br>w ruchu nieograniczonym w przypadku zadaszonych przejść w Hongkongu                                                                                                                                                                                                             |
| [12]              | 1,28<br>1,42                                                                 | The mean values of natural walking speeds were compared with laboratory-measured data/<br>średnie wartości prędkości w ruchu pieszym naturalnym i wartości pomierzone laboratoryjnie                                                                                                                                                                                                   |
| [13]              | 1,1 ± 0,1<br>1,6 ± 0,2<br>1,2 ± 0,2                                          | verage walking speeds and standard deviations were reported for self-selected walking speed, fast walking pace, and walking with an additional load (a backpack)/<br>średnie prędkości z odchyleniem standardowym dla prędkości wybranych samodzielnie przez badanych, szybkiego tempa marszu i marszu z obciążeniem w postaci plecaka                                                 |
| [14]              | 1,059 ± 0,144<br>1,058 ± 0,115                                               | A study was conducted on muscle activity during natural walking with load, involving adolescents and middle-aged adults/<br>badanie dotyczące zachowania się mięśni w trakcie ruchu naturalnego z obciążeniem w przypadku młodzieży i osób w średnim wieku                                                                                                                             |
| [15]              | 0,82 (0,77–0,86)<br>1,31 (1,27–1,35)<br>1,47 (1,44–1,49)<br>1,72 (1,64–1,81) | A meta-analysis of studies on walking speed in healthy individuals identified four categories: slow, normal, medium, and fast pace/<br>metaanaliza badań dotycząca tempa chodu u ludzi zdrowych; wyróżniono tempo wolne, normalne, średnie i szybkie                                                                                                                                   |
| [16]              | 1,3<br>1,4                                                                   | The average walking speed was measured on a pedestrian footbridge and on the upper floor of a shopping mall/<br>średnia prędkość na kładce do ruchu pieszego i piętrze galerii handlowej                                                                                                                                                                                               |
| [17]              | 1,44 ± 0,23<br>1,62 ± 0,22<br>1,38 ± 0,17<br>1,52 ± 0,23                     | Mean values and standard deviations of walking speeds were presented for pedestrians in the years 1965–1966 (no gender division), men in 1970, women in 1970, and the overall average/<br>średnia prędkość i odchylenie standardowe w przypadku ruchu pieszych kolejno w latach 1965–1966 bez podziału na płeć, mężczyzn w 1970 r., kobiet w 1970 r. i uśredniona wartość              |

in the case of carrying loads may result in velocities around 1.05–1.2 m/s. A speed exceeding 1.6 m/s is most often associated with a fast walking pace; however, these thresholds are approximate and highly dependent on terrain conditions and the individual physical capabilities of workers.

The variability of results in available studies highlights the need for precise measurements that take into account the specific characteristics of the particular work environment, which constitutes a significant challenge in designing ergonomic and efficient organizational solutions.

## Field trials

In one of the experimental models, a scenario of linear movement of the tested object along a wall with two passive infrared sensors positioned along it was adopted. The movement took place parallel to the line of sensors, and although its speed was not constant, it could be estimated based on the time differences between the object's entry and exit from consecutive detection zones. To estimate the average speed, an analysis of the detection time intervals assigned to each sensor was conducted, which made it possible to determine the movement components within segments of the active space. Additionally, using geometric relationships resulting from the angular detection layout, the actual distance of the object from the sensor at the moment of activation was calculated. This allowed not only for the determination of the trajectory but also for the assessment of the influence of the entry angle into the detection zone and the duration of presence on detection accuracy.

In the second experimental model, an oblique movement was adopted relative to the plane of the wall where the sensors were installed, reflecting more realistic motion conditions in the work environment. The movement path intersected the detection zones at an angle  $\alpha$ , introducing additional variables related to the exposure time within the sensor's field and the variation between the actual trajectory length and the reference lines. Using trigonometric analysis of the relationships between the movement path angle and the exposure time in individual detection zones, it was possible to precisely calculate both the actual velocity of the object and its angle of incidence relative to the sensor system. This method enabled the reconstruction of movement parameters while accounting for detection asymmetry and varied response times, significantly increasing the usefulness of PIR sensors in analyzing dynamic behavior within the workspace.

As part of the conducted research, **the effectiveness of using PIR sensor sets for monitoring human movement in enclosed spaces – including the assessment of movement intensity and speed – was analyzed.** Measurement data obtained from three sensor sets made it possible to determine, among other things, the average movement speed, trajectory length, and distance from the wall. The results showed high consistency between the speeds determined in two independent computational models, confirming the repeatability and reliability of the measurements. The obtained average speed values, ranging from 1.27 to 1.60 m/s, are consistent with values reported in the literature for pedestrian movement in both public and office environments.

cech pracowników, takich jak wiek czy płeć, a także odmiennych warunków środowiskowych. Wpływ obciążenia, typowy dla wielu zadań w środowisku pracy, powoduje dodatkowe obniżenie tempa ruchu, co w przypadku przenoszenia ładunków może skutkować prędkością zbliżoną do 1,05–1,2 m/s. Prędkość przekraczająca 1,6 m/s jest najczęściej utożsamiana z szybkim tempem poruszania się, ale granice te mają charakter orientacyjny i są silnie uzależnione od warunków terenowych oraz indywidualnych możliwości fizycznych pracowników. Różnorodność wyników w dostępnych badaniach podkreśla potrzebę prowadzenia precyzyjnych pomiarów uwzględniających specyfikę konkretnego środowiska pracy, co stanowi istotne wyzwanie w kontekście projektowania ergonomicznych i efektywnych rozwiązań organizacyjnych.

## Próby polowe

**W jednym z modeli eksperymentalnych** przyjęto scenariusz liniowego ruchu badanego obiektu wzdłuż ściany, przy której rozmieszczono dwa pasywne czujniki podczerwieni. Ruch ten odbywał się równolegle względem linii czujników, a jego prędkość, choć niestała, mogła być estymowana na podstawie różnic czasowych wejścia i wyjścia obiektu z kolejnych stref detekcji. W celu oszacowania średniej prędkości zastosowano analizę przedziałów czasowych detekcji przypisanych każdemu z sensorów, co umożliwiło wyznaczenie składowych ruchu w segmentach przestrzeni aktywnej. Dodatkowo, przy użyciu zależności geometrycznych wynikających z układu kąтового detekcji, obliczono rzeczywistą odległość obiektu od czujnika w momencie aktywacji. Pozwoliło to nie tylko na określenie trajektorii, ale również na ocenę wpływu kąta wejścia w strefę oraz czasu przebywania na dokładność detekcji.

**W drugim modelu badawczym** przyjęto ruch ukośny względem płaszczyzny ściany, w której zainstalowano czujniki, co odzwierciedlało bardziej realistyczne warunki ruchu w środowisku roboczym. Ścieżka przemieszczania się przecinała strefy detekcji pod kątem  $\alpha$ , co wprowadzało dodatkowe zmienne związane z czasem ekspozycji w polu czujnika oraz zróżnicowaniem długości rzeczywistej trajektorii w stosunku do linii referencyjnych. Z wykorzystaniem analizy trygonometrycznej zależności między kątem toru ruchu a czasem ekspozycji w poszczególnych strefach możliwe było precyzyjne obliczenie zarówno rzeczywistej prędkości obiektu, jak i kąta jego natarcia względem układu czujników. Metoda pozwalała na rekonstrukcję parametrów ruchu z uwzględnieniem asymetrii detekcji i zróżnicowanego czasu odpowiedzi, co znacznie zwiększa użyteczność czujników PIR w analizie dynamicznego zachowania w przestrzeni roboczej.

W ramach przeprowadzonych badań **analizowano skuteczność zastosowania zestawów czujników PIR do monitorowania ruchu osób w przestrzeni zamkniętej**, w tym **oceny natężenia i prędkości ruchu**. Dane pomiarowe pozyskane z trzech zestawów czujników pozwoliły określić m.in. średnią prędkość ruchu, długość ścieżki przemieszczania się oraz odległość od ściany. Wyniki wykazały dużą zgodność prędkości wyznaczonych w dwóch niezależnych modelach

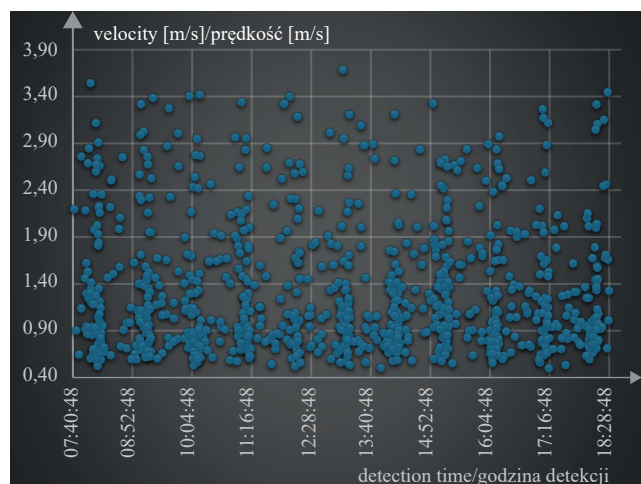


Complementing the point-based measurements were **two-day continuous studies conducted at the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology**, covering six measurement stations located at critical communication points within the building. Figure 1 presents a schematic division of the facility into three zones along with the migration balance between them.

The analysis of detection times and movement speeds revealed distinct patterns of increased traffic intensity during the time intervals preceding the start of academic classes. For example, on the first day of measurements, 63% of detections were recorded between the 55th and 15th minute of each hour, which correlates with the anticipated flows of individuals heading to classes (Figure 1).

The relative occupancy of the zones is presented in Figure 2. The nature of the graph allows observation of the flows between zones and confirms that the total migration balance remains constant. This confirms that the system enables accurate estimation of migration between the designated zones of the building.

The experimental results confirm that PIR sensor technology can be effectively used not only for presence detection but also for the approximate estimation of the speed and direction of human movement within buildings. It was observed that the layout of corridors and the natural behavior of pedestrians favor movement parallel to walls, which aligns with findings in the literature concerning the dynamics of movement in enclosed spaces.



**Fig. 1. Individual velocity results over time – first day of measurements**

*Rys. 1. Jednostkowe wyniki prędkości w czasie – pierwszy dzień pomiarów*

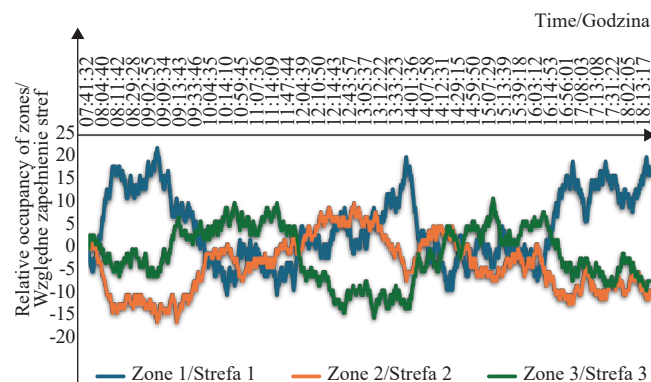
A similar study was conducted at the Cracow University of Technology. A set of four passive infrared sensors was installed along the main communication corridor of the building. The placement of the sensors was designed to enable the registration of user movement directions and the detection of stops within the monitored section (Figure 3). Through the application of a multi-point detection system, it was possible to track movement trajectories and estimate parameters such as dwell time within the measurement field, instantaneous speed, and distance from the wall line. This allowed for a more com-

obliczeniowych, co potwierdza powtarzalność i wiarygodność pomiarów. Uzyskane średnie wartości prędkości na poziomie 1,27–1,60 m/s są zbliżone z wynikami z literatury w przypadku ruchu pieszego zarówno w przestrzeni publicznej, jak i biurowej.

Uzupełnieniem punktowych pomiarów były **dwudniowe badania ciągle prowadzone na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej**, obejmujące sześć stanowisk rozmieszczonych w niewralgicznych punktach komunikacyjnych budynku. Rysunek 1 przedstawia schemat podziału obiektu na 3 strefy wraz z saldem migracji pomiędzy strefami. Analiza czasów detekcji i prędkości poruszania się wskazała wyraźne wzorce zwiększonego natężenia ruchu w przedziałach czasowych poprzedzających rozpoczęcie zajęć akademickich. Przykładowo, w pierwszym dniu pomiarów 63% detekcji odnotowano w okresie od 55 do 15 minuty każdej godziny, co koreluje z przewidywanymi przepływami osób udających się na zajęcia (rysunek 1). Zaobserwowano również minimalne różnice w średniej prędkości poruszania się w różnych porach dnia, ale wartości te pozostawały w granicach norm przyjętych dla ruchu w zamkniętych przestrzeniach komunikacyjnych.

Względne zapełnienie stref przedstawiono na rysunku 2. Charakter wykresu pozwala dostrzec przepływy pomiędzy strefami i potwierdza sumaryczne saldo migracji utrzymujące się na stałym poziomie. Potwierdza to, że system pozwala na poprawne oszacowanie migracji pomiędzy wyznaczonymi strefami budynku.

Wyniki eksperymentów potwierdzają, że **technologia czujników PIR może być skutecznie wykorzystywana nie tylko do wykrywania obecności, ale także do szacunkowej oceny prędkości i kierunku ruchu osób w budynkach**. Zauważono, że układ korytarzy i naturalne zachowania pieszych sprzyjają ruchowi równoległemu do ścian, co znajduje potwierdzenie w literaturze dotyczącej dynamiki przemieszczania się w przestrzeni zamkniętej. Uzyskane rezultaty stanowią podstawę do projektowania bardziej rozbudowanych systemów monitoringu bazujących na czujnikach PIR, które w przyszłości mogą być stosowane na większą skalę, w tym do zarządzania ruchem w budynkach użyteczności publicznej lub biurach.

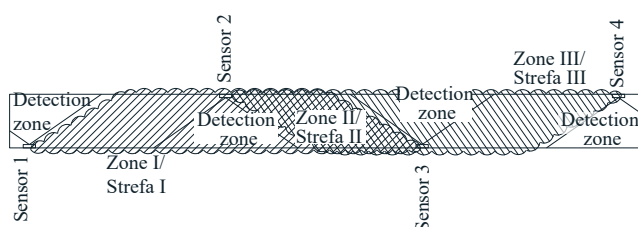


**Fig. 2. Flows of people between individual zones designated within the building**

*Rys. 2. Przepływy osób pomiędzy poszczególnymi strefami wydzielonymi w budynku*

prehensive assessment of pedestrian movement dynamics in a space of limited width.

The designated zones included three segments of a single corridor, each of similar length and number of adjacent rooms. Zone I comprised the entrance from the main staircase, administrative rooms, and a small number of offices; Zone II – the central zone – contained office rooms and a social area; and Zone III included the remaining offices and the entrance from a secondary auxiliary staircase. The geometry of the three designated zones was identical – all were located along the same corridor of constant width. The differences between the zones were primarily functional in nature: one could distinguish an entrance zone, a central communication-social zone, and a “rear” zone serving a secondary entrance function.

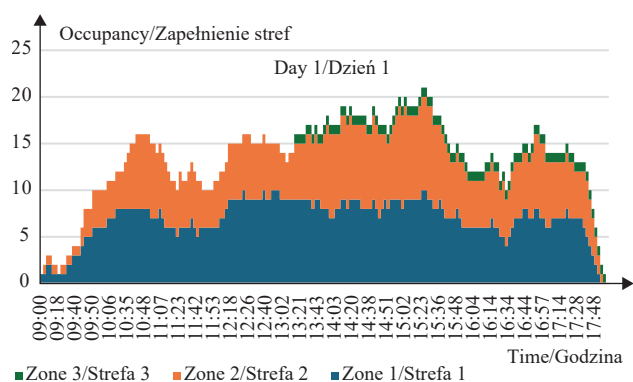


**Fig. 3. Scheme of detection zones and sensor placement in the corridor of the Cracow University of Technology**

*Rys. 3. Schemat stref detekcji i rozmieszczenia czujników na korytarzu Politechniki Krakowskiej*

On the first day of measurements (Figure 4), the average instantaneous occupancy of Zone 1 was 6.99 persons, while in Zone 2 the average value reached 6.00 persons. Zone 3 was characterized by a significantly lower level of utilization, with an average instantaneous occupancy of 0.56 persons. The maximum recorded values were 10 persons in Zone 1, 10 persons in Zone 2, and 1 person in Zone 3, respectively. The total instantaneous occupancy of the corridor, accounting for the sum of individuals present in all three zones, averaged 13.55 persons, with a maximum of 21 persons at one time.

On the second day of observations (Figure 5), a decrease in the average instantaneous occupancy of Zone 1 was recorded, down to 4.34 persons, while Zone 2 remained stable at an average of 5.91 persons. Zone 3 showed a clear increase in utilization, reaching an average instantaneous oc-



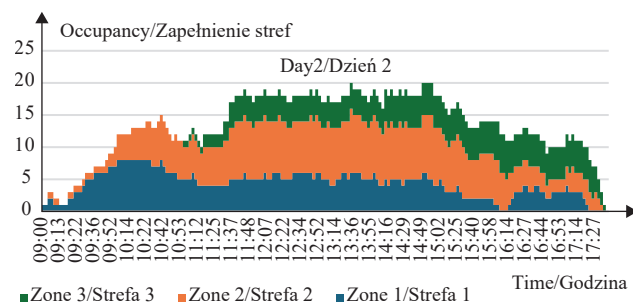
**Fig. 4. Occupancy of individual zones on the first day of measurements**

*Rys. 4. Zapełnienie poszczególnych stref w pierwszym dniu pomiarów*

Analogicznie badanie przeprowadzono w gmachu Politechniki Krakowskiej. Zestaw czterech czujników pasywnych podczerwieni został zainstalowany wzdłuż głównego ciągu komunikacyjnego w obrębie przestrzeni korytarzowej budynku. Rozmieszczenie czujników zostało dobrane w sposób umożliwiający rejestrację kierunków przemieszczania się użytkowników oraz detekcję zatrzymań w obrębie monitorowanego odcinka (rysunek 3). Dzięki zastosowaniu wielopunktowego układu detekcji możliwe było śledzenie trajektorii ruchu oraz estymacja parametrów, takich jak czas przebywania w polu pomiarowym, prędkość chwilowa oraz odległość od linii ściany, co pozwalało na bardziej kompleksową ocenę dynamiki ruchu pieszego w przestrzeni o ograniczonej szerokości. Wydzielone strefy obejmowały trzy odcinki jednego z korytarzy o zbliżonej długości i liczbie przylegających pomieszczeń. Strefa I: wejście z głównej klatki schodowej, pomieszczenia administracji i mała liczba gabinetów; strefa II – środkowa – gabinety biurowe i część socjalną, natomiast strefa III pozostałe gabinety i wejście z drugorzędnej pomocniczej klatki schodowej. Geometria trzech wydzielonych stref była identyczna – wszystkie znajdowały się w tym samym korytarzu o stałej szerokości. Różnice między strefami miały charakter przede wszystkim funkcjonalny – można wyróżnić strefę wejściową, strefę centralną o charakterze komunikacyjno-socjalnym oraz „tylną”, pełniącą drugorzędną funkcję wejściową

W pierwszym dniu pomiarów (rysunek 4) średnie chwilowe zapełnienie strefy 1 wynosiło 6,99 osób, natomiast w strefie 2 osiągnięto średnią wartość 6,00 osób. Strefa 3 charakteryzowała się znacznie niższym poziomem wykorzystania, ze średnim chwilowym zapełnieniem 0,56 osoby. Wartości maksymalne zarejestrowano odpowiednio na poziomie 10 osób w strefie 1, 10 osób w strefie 2 oraz 1 osoby w strefie 3. Całkowite chwilowe zapełnienie korytarza, uwzględniające sumę osób przebywających we wszystkich trzech strefach, wynosiło średnio 13,55 osób, osiągając maksymalnie 21 osób w jednym czasie.

Drugiego dnia (rysunek 5) zaobserwowano spadek średniego chwilowego zapełnienia strefy 1 do poziomu 4,34 osoby, natomiast w strefie 2 utrzymało się ono na stabilnym poziomie 5,91 osób. Strefa 3 wykazała wyraźny wzrost wykorzystania, osiągając średnie chwilowe zapełnienie 3,21 osoby oraz wartość maksymalną 6 osób. Średnia liczba osób przebywających w całym korytarzu wyniosła w tym dniu 13,46 osoby, z maksymalnym jednorazowym zapełnieniem 20 osób.



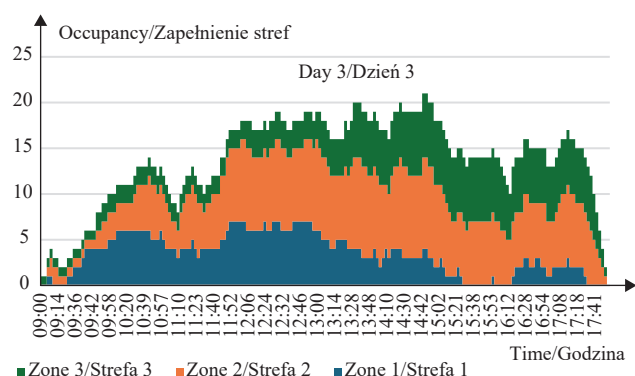
**Fig. 5. Occupancy of individual zones on the second day of measurements**

*Rys. 5. Zapełnienie poszczególnych stref w drugim dniu pomiarów*



cupancy of 3.21 persons and a maximum of 6 persons. The average number of people present in the entire corridor on that day was 13.46 persons, with a maximum one-time occupancy of 20 persons.

During the third measurement day (Figure 6), a further decrease in the average occupancy of Zone 1 was observed, amounting to 3.47 persons, while Zone 2 showed an increase to an average instantaneous occupancy of 6.38 persons. Zone 3 continued its upward trend, reaching an average instantaneous occupancy of 4.08 persons and a maximum of 7 persons. The average instantaneous occupancy of the entire corridor on the third day was the highest among the analyzed periods, amounting to 13.93 persons, with a maximum recorded occupancy of 21 persons.



**Fig. 6. Occupancy of individual zones on the third day of measurements**

*Rys. 6. Zapelnienie poszczególnych stref w trzecim dniu pomiarów*

Based on the data obtained from the sensors, an approximate analysis of the occupancy of individual spatial zones within the building was carried out, enabling the determination of the so-called migration balance between the designated functional areas. Preliminary results indicate distinct cycles of increased movement correlated with the academic class schedule. The obtained results indicate the validity of further applying this method in research on optimizing the organization of communication spaces in facilities with high pedestrian traffic intensity.

## Summary and Findings

The conducted research and field experiments confirmed the high effectiveness of passive infrared (PIR) sensors in monitoring human movement and presence in enclosed spaces. Owing to their simplicity, low energy consumption, and limited impact on user privacy, this technology represents an optimal tool for supporting workspace management, particularly in buildings with complex communication structures and high pedestrian traffic intensity.

The experimental results demonstrate that PIR sensors, when combined with appropriate hardware and software configurations, enable not only presence detection but also approximate estimation of movement parameters such as average walking speed, dwell time within the monitored zone, and movement trajectory relative to the measurement layout. The developed

W trzecim dniu pomiarów (rysunek 6) odnotowano dalszy spadek średniego zapelnienia strefy 1, które wyniosło 3,47 osoby, przy jednoczesnym wzroście średniego chwilowego zapelnienia strefy 2 do poziomu 6,38 osoby. Strefa 3 miała tendencję wzrostową, osiągając średnie chwilowe zapelnienie 4,08 osoby, a maksymalnie 7 osób. Średnie chwilowe zapelnienie całego korytarza w trzecim dniu było największe spośród analizowanych okresów i wyniosło 13,93 osoby, przy maksymalnym zarejestrowanym zapelnieniu równym 21 osób.

Na podstawie uzyskanych danych z czujników, dokonano szacunkowej analizy zapelnienia poszczególnych stref przestrzennych budynku, co umożliwiło określenie tzw. salda migracji pomiędzy wyodrębnionymi obszarami funkcjonalnymi. Wstępne wyniki wskazują na wyraźne cykle wzmożonego ruchu, powiązane z harmonogramem zajęć akademickich, oraz potwierdzają, że technologia PIR, mimo pasywnego charakteru działania, pozwala na efektywne monitorowanie natężenia przepływu oraz detekcję miejsc o zwiększonej kumulacji osób. Uzyskane rezultaty wskazują na zasadność dalszego wykorzystania tej metody w badaniach nad optymalizacją organizacji przestrzeni komunikacyjnej w obiektach o dużym natężeniu ruchu pieszych.

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania oraz eksperymenty polowe potwierdziły dużą skuteczność zastosowanych pasywnych czujników podczerwieni (PIR) do monitorowania ruchu i obecności osób w przestrzeni zamkniętej. Technologia ta, dzięki swojej prostocie, małej energochłonności oraz ograniczonemu wpływowi na prywatność użytkowników, stanowi optymalne narzędzie wspomagające zarządzanie przestrzenią pracy, szczególnie w budynkach o złożonej strukturze komunikacyjnej i dużym natężeniu przepływów osób.

Wyniki eksperymentów dowodzą, że czujniki PIR, w połączeniu z odpowiednią konfiguracją sprzętową i programową, umożliwiają nie tylko wykrywanie obecności, ale również szacunkowe określanie parametrów ruchu, takich jak średnia prędkość przemieszczania się, czas przebywania w monitorowanej strefie czy trajektoria ruchu względem układu pomiarowego. Opracowane metody analizy bazujące na trygonometrii oraz pomiarach czasowych pozwalają z dużą precyzją odtwarzać dynamiczne zachowanie pieszych w środowisku pracy.

Zastosowanie czujników PIR w rzeczywistych warunkach środowiskowych, takich jak przestrzeń uczelni technicznych czy budynków administracyjnych, wykazało ich odporność na zakłócenia wynikające z wahań temperatury otoczenia, zmian natężenia światła czy obecności zanieczyszczeń powietrza. Analiza uzyskanych danych pozwoliła na identyfikację charakterystycznych wzorców ruchu: zwiększone natężenie przemieszczania się w przedziałach czasowych poprzedzających rozpoczęcie zajęć akademickich, co koreluje z rzeczywistą organizacją dnia pracy.

Istotnym aspektem badania była możliwość rekonstrukcji przepływu osób pomiędzy wyodrębnionymi strefami funkcjonalnymi budynków, co wskazuje na potencjał czujników PIR

analytical methods, based on trigonometry and time-based measurements, allow for high-precision reconstruction of pedestrian dynamic behavior in the work environment.

The analysis of the collected data made it possible to identify characteristic movement patterns—specifically, increased movement intensity during time intervals preceding the start of academic classes, which correlates with the actual organization of the workday.

An important aspect of the study was the ability to reconstruct the flow of individuals between designated functional zones within buildings, indicating the potential of PIR sensors as a tool supporting spatial management, movement organization optimization, and minimization of communication bottlenecks. Beyond traditional presence monitoring, this technology also enables modeling of collective behavior in public buildings and office spaces.

**Passive infrared sensors thus constitute an effective, scalable, and economically justified tool supporting modern systems for monitoring human activity in the workplace.** Further research should focus on integrating PIR sensors with analytical systems, artificial intelligence, and additional environmental sensors, enabling the development of comprehensive, integrated monitoring platforms aligned with the requirements of Industry 4.0.

Received: 07.04.2025  
Revised: 09.06.2025  
Published: 23.10.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.04.2025 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.06.2025 r.  
Opublikowano: 23.10.2025 r.

## Literature

- [1] Lisowski K. „Ankieter w terenie, problemy z jakością badań ilościowych Problem rzetelności badań surveyowych”, *Uniwersytet Zielonogórski RELACJE. Studia z nauk społecznych*, nr 3, ss. 67–77, 2017.
- [2] Baruch Y, Holtom BC. „Survey response rate levels and trends in organizational research”, *Human Relations*, t. 61, nr 8, ss. 1139–1160, 2008, DOI: 10.1177/0018726708094863.
- [3] Son H, Kim C. „Integrated worker detection and tracking for the safe operation of construction machinery”, *Automation in Construction*, t. 126, nr August 2020, s. 103670, 2021, DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103670.
- [4] Hwang S, Seo JO, Jebelli H, Lee SH. „Feasibility analysis of heart rate monitoring of construction workers using a photoplethysmography (PPG) sensor embedded in a wristband-type activity tracker”, *Automation in Construction*, t. 71, nr Part 2, ss. 372–381, 2016, DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.029.
- [5] *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE*. 2016.
- [6] Shokrollahi A, Persson JA, Malekian R, Sarkheyli-Hägele A, Karlsson F. „Passive Infrared Sensor-Based Occupancy Monitoring in Smart Buildings: A Review of Methodologies and Machine Learning Approaches”, *Sensors*, t. 24, nr 5, ss. 1–36, 2024, DOI: 10.3390/s24051533.
- [7] Abade B, Abreu DP, Curado M. „A non-intrusive approach for indoor occupancy detection in smart environments”, *Sensors (Switzerland)*, t. 18, nr 11, 2018, DOI: 10.3390/s18113953.
- [8] Boomers AK, Boltes M, Kersting UG. „How Approaching Angle, Bottleneck Width and Walking Speed Affect the Use of a Bottleneck by Individuals”, *Sensors*, t. 24, nr 6, ss. 1–21, 2024, DOI: 10.3390/s24061720.
- [9] Choi S, Ko C, Kong K. „Walking-Speed-Adaptive Gait Phase Estimation for Wearable Robots”, *Sensors*, t. 23, nr 19, 2023, DOI: 10.3390/s23198276.
- [10] Daamen W. *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*. Delft: DUP Science, 2004.
- [11] Lam WHK, Morral JF, Ho HH. „Pedestrian flow characteristics in Hong Kong”, *Transportation Research Record*, ss. 56–62, 1995, [Online]. Dostępne na: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 108128987>.
- [12] Kawai H i in. „Association between daily living walking speed and walking speed in laboratory settings in healthy older adults”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, t. 17, nr 8, ss. 1–10, 2020, DOI: 10.3390/ijerph17082707.
- [13] Marino G i in. „Influence of Backpack Carriage and Walking Speed on Muscle Synergies in Healthy Children”, *Bioengineering*, t. 11, nr 2, ss. 1–18, 2024, DOI: 10.3390/bioengineering11020173.
- [14] Fang S, Vijayan V, Reissman ME, Kinney AL, Reissman T. „Effects of Walking Speed and Added Mass on Hip Joint Quasi-Stiffness in Healthy Young and Middle-Aged Adults”, *Sensors*, t. 23, nr 9, 2023, DOI: 10.3390/s23094517.
- [15] Murtagh EM, Mair JL, Aguiar E, Tudor-Locke C, Murphy MH. „Outdoor Walking Speeds of Apparently Healthy Adults: A Systematic Review and Meta-analysis”, *Sports Medicine*, t. 51, nr 1, ss. 125–141, 2021, DOI: 10.1007/s40279-020-01351-3.
- [16] Pachi A, Ji T. „Frequency and velocity of people walking”, *Structural Engineer*, t. 83, nr 3, ss. 36–40, 2005.
- [17] Henderson LF, Lyons DJ. „Sexual Differences in Human Crowd Motion”, *Nature*, t. 240, nr 5380, ss. 353–355, 1972, DOI: 10.1038/240353a0.