



System monitorowania pracowników w środowisku przemysłowym: wyniki testu modułu lokalizacji

mgr inż. Marcel Maj^{a,b} (ORCID: 0009-0009-3277-5971)

mgr inż. Tomasz Molenda^{a,c} (ORCID: 0000-0002-4240-8675)



W artykule przedstawiono wyniki testu modułu lokalizacji, zaimplementowanego w systemie opracowanym w celu monitorowania i lokalizowania (z zakładaną dokładnością) pracowników wewnątrz pomieszczeń, tj. w miejscach, gdzie nie można wykorzystać urządzeń przeznaczonych do lokalizacji na otwartej przestrzeni. System ten jest przeznaczony zwłaszcza do zastosowania w środowisku przemysłowym. Przeprowadzony test modułu lokalizacji polegał na weryfikacji zastosowanego algorytmu lokalizacji w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: beacon, Bluetooth, lokalizacja, monitorowanie pracowników

Industrial employee monitoring system: localization module test results

This article presents the test results of a localization module implemented in a system designed to monitor and locate (with assumed accuracy) employees indoors, i.e., in locations where outdoor location devices cannot be used. This system is specifically designed for use in industrial environments. The localization module test verified the localization algorithm in real-world conditions.

Keywords: beacon, Bluetooth, localization, worker monitoring

^a Sieć Badawcza Łukasiewicz – EMAG.

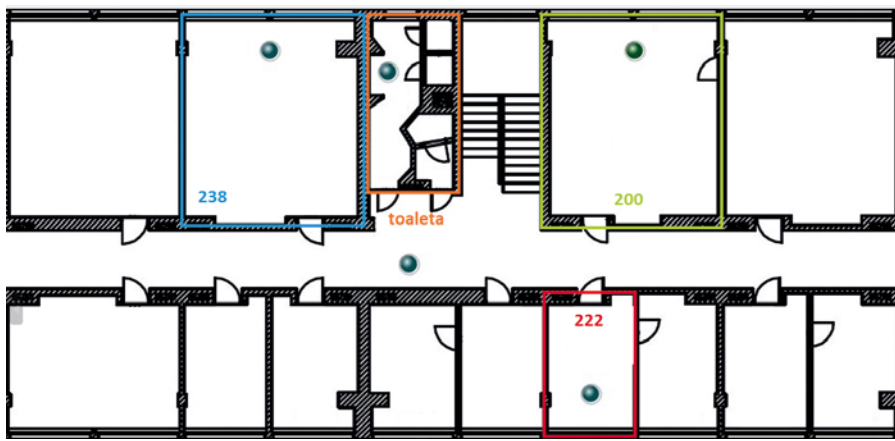
^b Kontakt: marcel.maj@ai.lukasiewicz.gov.pl.

^c Kontakt: tomasz.molenda@ai.lukasiewicz.gov.pl.

Wstęp

Osoby pracujące w halach produkcyjnych, elektrowniach czy hutach są narażone na wiele niebezpieczeństw, wynikających np. z ekspozycji na wysoką temperaturę, ryzyka kontaktu z ciekłym metalem lub z przebywania w pobliżu pracującej maszyny [1]. Wszystkie procesy wytwórcze są opisane procedurami, których należy przestrzegać w celu zapewnienia bezpieczeństwa, wydajności i ciągłości procesów. Niestety, niekiedy z powodu monotoności czynności i zmęczenia pracownika procedury nie są przestrzegane [2]. Innym powodem nieprzestrzegania procedur może być ich nieprawidłowe sformułowanie [3, 4]. To oznacza, że pomimo wdrażania procedur nadal istnieje ryzyko wystąpienia wypadku przy pracy. W takiej sytuacji najważniejsze jest to, by poszkodowany otrzymał pomoc w jak najkrótszym czasie [5]. Jednak aby to było możliwe, trzeba wiedzieć, gdzie dokładnie poszkodowany się znajduje. W związku z tym został opracowany system przeznaczony do monitorowania pracownika, pozwalający na określenie jego lokalizacji i podstawowych parametrów życiowych – temperatury, pulsu i aktywności ruchowej w danej chwili [6]. W literaturze opisano już podobne rozwiązania bazujące na koncepcji monitorowania pracownika [7–10].

System przedstawiony w niniejszym artykule zawiera dwa główne moduły: moduł pomiaru biomedycznego parametrów pracownika oraz moduł lokalizacji pracownika. Fizycznie system składa się z trzech rodzajów urządzeń: urządzeń osobistych w formie inteligentnych opasek, urządzeń odniesienia w postaci urządzeń typu beacon oraz urządzenia nadrzędnego w postaci stacji roboczej PC. Moduł pomiaru biomedycznego znajduje się w opaskach inteligentnych. Jego zadaniem jest rejestracja temperatury, pulsu i przyspieszenia. Dane te są wysyłane za pomocą sieci bezprzewodowej do urządzenia nadrzędnego.



Rys. Miejsce realizacji testów: plan pomieszczeń (w pomieszczeniach znajdowały się podstawowe meble biurowe, tj. biurka, krzesła, szafy) wraz z zaznaczonym położeniem każdego z urządzeń odniesienia – beaconów (widok prezentowany przez aplikację systemu)

Fig. Testing location: floor plan (the rooms contained basic office furniture, i.e. desks, chairs, wardrobes) with the marked location of each reference device – beacon (view presented by the system application)

Z kolei moduł lokalizacji pracownika jest rozproszony w całym systemie, ponieważ za jego działanie odpowiada wiele elementów. W pierwszej kolejności w celu ustalenia położenia pracownika urządzenie osobiste rejestruje sygnały znajdujących się obok urządzeń odniesienia (beaconów). Następnie, po zarejestrowaniu sygnałów beaconów oraz zapisaniu ich unikatowych identyfikatorów, urządzenie osobiste za pośrednictwem sieci bezprzewodowej obiektu przekazuje te dane do urządzenia nadrzędnego, które ustala lokalizację urządzenia osobistego na podstawie najsilniejszego w danym momencie sygnału urządzenia odniesienia. Jest to możliwe dzięki temu, że urządzenia odniesienia mają stałą lokalizację. Po analizie lokalizacji pracownika dane są wyświetlane nadzorczy systemu w celu poinformowania o stanie pracownika (poprzez pomiary biomedyczne) i jego lokalizacji.

W tym artykule przedstawiono wyniki pracy modułu związanego z lokalizowaniem pracownika. Tym razem skupiono się na rozszerzeniu i ukierunkowaniu wstępnych testów opisanych we wcześniejszym artykule [6] oraz na weryfikacji skuteczności działania modułu lokalizacji pracownika w obiekcie. W tym celu przeprowadzono test w pełni symulujący przewidywane rzeczywiste warunki eksploatacyjne systemu.

Moduł lokalizacji pracowników

Opisany system służy do monitorowania określonego obszaru, w którym urządzenia odniesienia są rozmieszczone w sposób zapewniający realizowanie założonej funkcji (np. monitorowania pracowników w celu ustalenia, czy znajdują się oni w przypisanych im pomieszczeniach).

Nadzorowany obszar jest objęty bezprzewodową siecią internetową (będącą częścią infrastruktury obiektu), do której mają dostęp urządzenia osobiste, transmitujące dane do urządzenia nadrzędnego.

Działanie modułu lokalizacji pracownika opiera się na współpracy urządzeń osobistych i urządzeń odniesienia. W celu określenia aktualnego miejsca pobytu pracownika w monitorowanym obszarze system analizuje dane dotyczące lokalizacji w urządzeniu nadrzędnym. Najsilniejszy zarejestrowany sygnał beacona jest identyfikowany przez system jako aktualne miejsce lokalizacji urządzenia osobistego. Urządzenia odniesienia – beacony – rozsyłają sygnał Bluetooth w formie ramki rozgłoszeniowej. Urządzenie osobiste rejestruje wykryte w pobliżu sygnały Bluetooth, w tym dane z ramek rozgłoszeniowych, np. adres MAC (ang. *media access control*) beacona. Siła sygnału beaconów jest uśredniana (na podstawie pięciu ostatnich próbek) przez urządzenie osobiste, aby zapewnić stabilność i dokładność jego lokalizacji. Dane o zarejestrowanych beaconach są przesyłane do urządzenia nadrzędnego, w którym dokonywana jest analiza w celu ustalenia lokalizacji pracownika.

System, który został wykorzystany do testów, składał się z:

- urządzenia nadrzędnego – komputera PC (stanowiska z monitorem, myszką

i klawiaturą), z zainstalowaną aplikacją modułu lokalizacji oraz bazą danych przeznaczoną do akwizycji danych z systemu;

- urządzeń odniesienia – beaconów (MOKO SMART H2) rozmieszczonych w wyznaczonych miejscach monitorowanego obszaru;
- urządzeń osobistych (opasek T-watch z dedykowanym oprogramowaniem) noszonych na nadgarstku przez osobę testującą system.

Urządzenia systemu wykorzystywały dostęp do sieci bezprzewodowej, która była udostępniona w monitorowanym obszarze. Należały do niego pokoje 200, 222 i 238, toaleta oraz fragment korytarza (zob. rys.). W każdym pokoju i na korytarzu beacony umieszczono na wysokości ok. 1,5 m, a w toalecie – na wysokości ok. 1,7 m. Urządzenie osobiste poprzez sieć bezprzewodową wysyłało informacje o zarejestrowanych beaconach oraz dane biomedyczne. Informacje te były zapisywane w bazie danych na urządzeniu nadrzędnym. Zainstalowana na nim aplikacja przetwarzała dane w celu określenia lokalizacji pracownika (w tym przypadku: osoby testującej system) i wyświetlenia tej informacji.

Metodyka testów

W ramach testu przeprowadzono weryfikację działania modułu lokalizacji na podstawie zebranych danych rzeczywistych. W obiekcie wyznaczono trasę, którą miał pokonać pracownik (osoba testująca system). Zadaniem systemu było określenie lokalizacji tego pracownika podczas jego poruszania się – zgodnie z harmonogramem – po ściśle zaplanowanej ścieżce, przebiegającej przez poszczególne pomieszczenia (tab. 1).

Po przebyciu tej ścieżki przez pracownika i zarejestrowaniu danych dokonano ich analizy w celu ustalenia poprawności działania systemu. W teście porównano wyniki analizy lokalizacji przeprowadzonej przez system z faktycznym przebiegiem trasy pracownika. Dodatkowo, aby zweryfikować współpracę systemu z większą liczbą urządzeń osobistych jednocześnie,

Tabela 1. Ścieżka, po której pracownik przemieszczał się w trakcie testu
Table 1. The path the employee followed during the test

Kolejność przemieszczania się	Pomieszczenie	Czas
1	pokój 238	11:20–11:24
2	WC	11:25–11:26
3	pokój 200	11:26–11:28
4	pokój 222	11:29–11:32
5	pokój 238	11:32

podczas testu ustawiono dwa takie statyczne urządzenia (w pokojach 200 i 222).
W chwili, gdy pracownik powinien się znaleźć w danym pomieszczeniu, osoba obsługująca aplikację wykonywała rzut ekranu aplikacji z danymi prezentowanymi przez system. Dane o lokalizacji uzyskane z systemu zostały następnie odniesione do rzeczywistej lokalizacji osoby przeprowadzającej test. W przypadku wystąpienia błędu w teście wnioskowano, że wynikał on z metody analizy lokalizacji realizowanej przez samą aplikację działającą na urządzeniu nadrzędnym.

Wyniki testu

Uzyskane rezultaty są zgodne z oczekiwanymi – system poprawnie określał lokalizację osoby biorącej udział w teście.
W tab. 2 przedstawiono dane prezentowane przez aplikację podczas testu. Dla każdej chwili, w której pracownik przebywał w określonym pomieszczeniu, zamieszczono po dwie informacje: 1) czas systemowy i informacje o pracowniku (karta pracownika) oraz 2) dane na temat lokalizacji (tabela danych). Całość posegregowano chronologicznie z podziałem na pokoje.

Analiza wyników

Wyniki analizy zarejestrowanych danych lokalizacyjnych, przeprowadzonej przez aplikację systemu, porównano z rzeczywistą lokalizacją osoby testującej system. Aplikacja wskazywała najsilniejszy sygnał beacona, rejestrowany przez urządzenie osobiste w danym momencie. Był on identyfikowany jako aktualna lokalizacja pracownika, ponieważ ów pracownik znajdował się wtedy najbliżej danego beacona, który jest statyczny i przypisany do danej lokalizacji. Na podstawie danych zawartych w tab. 2 można stwierdzić, że w przypadku urządzenia osobistego o numerze dev_id a8:42:e3:8f:e8:41 numer beacona jest niezmienny – c5:2e:31:52:63:52. To samo dotyczy urządzenia osobistego dev_id a8:42:e3:90:fe:b1, gdzie zarejestrowany beacon ma numer da:3a:7b:15:5b:ec. Podczas testu te dwa urządzenia osobiste były statycznie ustawione w pokojach 222 i 200. Z kolei dla noszonego przez pracownika urządzenia osobistego o numerze dev_id b0:b2:1c:61:1a:71 zarejestrowany beacon zmieniał się z każdą zmianą pozycji pracownika.
Porównanie danych z tab. 1 i 2 wskazuje, że te dane są spójne. System prezentuje zatem dane o lokalizacji zgodne z rzeczywistym miejscem, w którym przebywa pracownik (tab. 3).

Podsumowanie

Test potwierdził poprawność działania modułu lokalizacji. Najlepiej działał on w przypadku wyraźnej dominacji sygnału pojedynczego beacona, typowej dla sytuacji statycznego przebywania w pomieszczeniu, do którego dany beacon był przypisany. Zaobserwowane ograniczenia dotyczą określania lokalizacji tam, gdzie urządzenie osobiste rejestruje jednocześnie większą liczbę beaconów o zbliżonym poziomie sygnału – np. w przejściach pomiędzy pomieszczeniami, a zwłaszcza podczas przemieszczania się korytarzem. Analogiczna sytuacja może wystąpić w większych pomieszczeniach, wymagających zastosowania większej liczby beaconów, a także przy niedostatecznym tłumieniu

sygnałów beaconów znajdujących się w innych pomieszczeniach. Kolejnym ograniczeniem jest możliwa do śledzenia przez system dynamika zmian lokalizacji, co częściowo wynika z celowego uśredniania siły sygnałów, aby zwiększyć precyzję lokalizacji kosztem dokładności śledzenia zmian jej dynamiki. Obszarem do dalszych badań i rozwoju systemu może być poprawa skuteczności i optymalizacja algorytmów realizujących funkcję lokalizacji i funkcje pomocnicze (np. uśrednianie poziomu RSSI – odbieranej siły sygnału beacona). Tego rodzaju badania mogłyby zostać przeprowadzone w sposób analogiczny do opisanego w tym artykule testu (tj. poprzez rejestrację poziomu RSSI beaconów w odniesieniu do rzeczywistego położenia urządzenia osobistego w danej chwili)

Tabela 2. Dane prezentowane przez system podczas testu
Table 2. Data presented by the system during the test

Pomieszczenie	Dane prezentowane przez system			
Pokój 238	Karta pracownika			
	czas systemowy	ID	bieżąca lokalizacja	tag osobisty
	24.09.2024 11:21:43	1156	238	b0:b2:1c:61:1a:71
	Tabela danych			
	stime	bea_id	bea_ssid	dev_id
	24.09.2024 11:21:32	c5:2e:31:52:63:52	-69	a8:42:e3:8f:e8:41
	24.09.2024 11:21:31	da:3a:7b:15:5b:ec	-66	a8:42:e3:90:fe:b1
	24.09.2024 11:21:31	ce:98:a6:52:70:74	-69	b0:b2:1c:61:1a:71
WC	Karta pracownika			
	czas systemowy	ID	bieżąca lokalizacja	tag osobisty
	24.09.2024 11:25:53	1156	WC2	b0:b2:1c:61:1a:71
	Tabela danych			
	stime	bea_id	bea_ssid	dev_id
	24.09.2024 11:25:41	c5:2e:31:52:63:52	-80	a8:42:e3:8f:e8:41
	24.09.2024 11:25:40	da:3a:7b:15:5b:ec	-70	a8:42:e3:90:fe:b1
Pokój 200	Karta pracownika			
	czas systemowy	ID	bieżąca lokalizacja	tag osobisty
	24.09.2024 11:28:14	1156	200	b0:b2:1c:61:1a:71
	Tabela danych			
	stime	bea_id	bea_ssid	dev_id
	24.09.2024 11:27:59	c5:2e:31:52:63:52	-87	a8:42:e3:8f:e8:41
	24.09.2024 11:28:04	da:3a:7b:15:5b:ec	-70	a8:42:e3:90:fe:b1
	24.09.2024 11:28:01	da:3a:7b:15:5b:ec	-69	b0:b2:1c:61:1a:71

Pomieszczenie	Dane prezentowane przez system			
Pokój 222	Karta pracownika			
	czas systemowy	ID	bieżąca lokalizacja	tag osobisty
	24.09.2024 11:29:33	1156	222	b0:b2:1c:61:1a:71
	Tabela danych			
	stime	bea_id	bea_ssId	dev_id
	24.09.2024 11:29:13	c5:2e:31:52:63:52	-83	a8:42:e3:8f:e8:41
	24.09.2024 11:29:08	da:3a:7b:15:5b:ec	-69	a8:42:e3:90:fe:b1
	24.09.2024 11:29:10	c5:2e:31:52:63:52	-75	b0:b2:1c:61:1a:71
Pokój 238	Karta pracownika			
	czas systemowy	ID	bieżąca lokalizacja	tag osobisty
	24.09.2024 11:38:55	1156	238	b0:b2:1c:61:1a:71
	Tabela danych			
	stime	bea_id	bea_ssId	dev_id
	24.09.2024 11:38:40	c5:2e:31:52:63:52	-72	a8:42:e3:8f:e8:41
	24.09.2024 11:38:46	da:3a:7b:15:5b:ec	-65	a8:42:e3:90:fe:b1
	24.09.2024 11:38:43	ce:98:a6:52:70:74	-94	b0:b2:1c:61:1a:71

- Objaśnienia:
- czas systemowy – czas aktualny w systemie;
 - stime – czas zapisania danej paczki danych w bazie danych;
 - ID – numer identyfikacyjny osoby testującej system;
 - bieżąca lokalizacja – aktualna lokalizacja osoby testującej system (zinterpretowana przez system);
 - tag osobisty – numer identyfikacyjny (MAC) urządzenia osobistego używanego przez osobę testującą system;
 - bea_id – numer identyfikacyjny (MAC) danego beacona;
 - bea_ssId – siła sygnału (najsilniejszego w danym momencie) zarejestrowanego urządzenia odniesienia (beacona) wyrażona w dbm;
 - dev_id – numer identyfikacyjny (MAC) urządzenia osobistego używanego przez osobę testującą system, które zarejestrowało dany beacon, z odpowiednią siłą sygnału w danym czasie.

Tabela 3. Porównanie danych o lokalizacji pracownika prezentowanych przez testowany system z rzeczywistą lokalizacją
Table 3. Comparison of employee location data presented by the tested system with the actual location

Pomieszczenie	Czas rzeczywistego przejścia	Czas zaprezentowany przez system
Pokój 238	11:20–11:24	11:21:34
WC	11:25–11:26	11:25:44
Pokój 200	11:26–11:28	11:28:14
Pokój 222	11:29–11:32	11:29:14
Pokój 238	11:32	11:38:46

i mogłyby dotyczyć różnego typu rzeczywistych, reprezentatywnych obiektów o odmiennych charakterystykach.

Zapewniona przez system możliwość lokalizacji pracowników pozwala na znaczącą poprawę bezpieczeństwa w rzeczywistych warunkach pracy, zwłaszcza w przypadku obiektów rozległych, obiektów, w których pracownicy nie mają ze sobą bezpośredniego kontaktu, czy też obiektów wymagających przemieszczania się pracowników. W tych przypadkach system może się przyczynić do skrócenia czasu, w jakim pracownikowi zostanie

udzielona pomoc w sytuacji zagrożenia jego zdrowia lub życia [11, 12].

Zrealizowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr II.PN.07 pt. „Bezprzewodowy system monitorowania stanowiskowego pracowników wraz z pomiarem parametrów biometrycznych”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gihleb R. i in., *Industrial robots, workers’ safety, and health*, „Labour Economics”, 2022, 78: 102205.

[2] Wang Y. i in., *Identifying mental fatigue of construction workers using EEG and deep learning*, „Automation in Construction”, 2023, 151: 104887.

[3] Antonsen S., Almklov P., Fenstad J., *Reducing the Gap between Procedures and Practice – Lessons from a Successful Safety Intervention*, „Safety Science Monitor”, 2008, 12: 1–16.

[4] Bax E.H., Steijn B.J., De Witte M.C., *Risk management at the shopfloor: the perception of formal rules in high-risk work situations*, „Journal of Contingencies and Crisis Management”, 1998, 6(4): 177–188.

[5] Newgard C.D. i in., *Emergency medical services intervals and survival in trauma: assessment of the „golden hour” in a North American prospective cohort*, „Annals of Emergency Medicine”, 2010, 55(3): 235–246.

[6] Maj M., Molenda T., *System lokalizacji pracowników w środowisku przemysłowym: testy funkcji lokalizacji*, „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka”, 2025, 3: 22–27; doi: 10.54215/BP.2025.3.6.Maj.

[7] Benny W.J. i in., *Comprehensive IoT-Based Monitoring System for Improving Worker’s Health and Safety at the High-Risk Working Environment*, International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST), 2024, s. 87–93; doi: 10.1109/GECOST60902.2024.10474774.

[8] De Vito L. i in., *IoT-Based System for Monitoring the Well-Being of Industrial Operators Through Wearable Devices*, IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2024, s. 1–6; doi: 10.1109/MeMeA60663.2024.10596871.

[9] Mridha M.T., *IoT-Based Warehouse Management System: Enhancing Warehouse Efficiency and Worker Health Monitoring System*, 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.16212.82563.

[10] Aksüt G., Eren T., Alakaş H.M., *Using wearable technological devices to improve workplace health and safety: An assessment on a sector base with multi-criteria decision-making methods*, „Ain Shams Engineering Journal”, 2024, 15(2): 102423; doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102423>.

[11] Lemos J. i in., *System for Individual Environmental Risk Assessment and Management with IoT Based on the Worker’s Health History*, „Applied Sciences”, 2024, 14(3); doi: 10.3390/app14031021.

[12] Krishnamoorthy G. i in., *Enhancing Worker Safety in Manufacturing with IoT and ML*, „International Journal For Multidisciplinary Research”, 2024, 6(1), 1–11.

Czytaj też artykuł System lokalizacji pracowników w środowisku przemysłowym: testy funkcji lokalizacji
DOI: 10.54215/BP.2025.3.6.Maj