



Małgorzata Okrasa

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Zakład Ochron Osobistych

ul. Wierzbowa 48, 90–133 Łódź

e-mail: maokr@ciop.lodz.pl

SYSTEMY LOKALIZACJI W CZASIE RZECZYWISTYM JAKO NARZĘDZIE WSPOMAGANIA EWAKUACJI

Streszczenie. Obserwowany w ostatnich latach gwałtowny rozwój technologii komunikacji bezprzewodowej niesie ze sobą wzrost zapotrzebowania na usługi związane z monitorowaniem położenia ludzi, materiałów i urządzeń w niemalże wszystkich aspektach życia codziennego, w tym w środowisku pracy. W praktyce przemysłowej znajomość choćby przybliżonej lokalizacji osób znajdujących się w danej chwili w budynku jest szczególnie istotna w przypadku wystąpienia zdarzenia o znamionach poważnej awarii przemysłowej wiążącej się z koniecznością niezwłocznego opuszczenia budynku przez pracowników narażonych na niebezpieczeństwo. Szczególne znaczenie w tym kontekście mają systemy i techniki umożliwiające bieżące monitorowanie położenia osób ewakuowanych/ewakuujących się z budynku, jak również strażaków biorących udział w akcji ratowniczej. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie szerokiego przeglądu literatury w obszarze związanym z wykorzystaniem tego typu rozwiązań technicznych jako narzędzia wspomagającego prowadzenie akcji ratowniczych podczas takich zdarzeń niebezpiecznych, jak np. pożary, wybuchy lub nagła emisja substancji toksycznych lub szkodliwych.

Słowa kluczowe: systemy lokalizacji w czasie rzeczywistym, lokalizacja wewnątrzbudynkowa, monitorowanie położenia przedmiotów i osób, wspomaganie ewakuacji, awarie przemysłowe.

REAL-TIME LOCATION SYSTEMS AS AN EVACUATION SUPPORT TOOL

Abstract. The rapid development of wireless communication technologies observed in recent years has led to an increased demand for services related to the continuous monitoring of the location of people, materials and devices in almost every aspect of every-

day life, including the work environment. In the industrial practice, knowledge of at least the approximate location of people currently present in the building is particularly important in the event of major-accidents involving dangerous substances, which should be followed by an immediate evacuation of all exposed employees. Of particular importance are systems and techniques enabling continuous monitoring of the position of evacuated/evacuating workforce as well as firefighters participating in the rescue operation. The purpose of this article is to present a broad review of literature in the area related to the use of those types of technical solutions as a tool supporting rescue operations during fires, explosions or sudden emission of toxic or harmful substances that may occur in case of major accident.

Keywords: real-time locating systems, indoor positioning systems, location tracking, evacuation support, major-accident hazards.

Wprowadzenie

Katastrofalne w skutkach awarie przemysłowe stanowią jedno z istotnych zagrożeń dla życia i zdrowia ludzi oraz środowiska naturalnego, szczególnie, w krajach rozwiniętych przemysłowo. Według danych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska na dzień 31 grudnia 2015 r., liczba zakładów stwarzających zagrożenie wystąpieniem poważnej awarii przemysłowej w Polsce wynosiła 408 (w tym 182 zakładów o dużym ryzyku i 226 zakładów o zwiększonym ryzyku) [1]. Wśród przyczyn tego typu awarii wyróżnić można m.in.: zawodność urządzeń, błąd ludzki, efekt domina, zdarzenia zewnętrzne (np. katastrofy naturalne) oraz działania celowe [2]. W ich wyniku dochodzi do powstawania pożarów, wybuchów lub uwolnienia niebezpiecznych substancji chemicznych wykorzystywanych w procesach technologicznych. Konieczne jest wówczas podjęcie działań zmierzających do ograniczenia skutków tego typu zdarzeń dla ludności i środowiska naturalnego.

W krajach Unii Europejskiej regulacje prawne w zakresie przeciwdziałania poważnym awariom przemysłowym i ograniczania ich skutków zawarte są w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/18/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie kontroli zagrożeń poważnymi awariami związanymi z substancjami niebezpiecznymi, zmieniającej, a następnie uchylającej dyrektywę Rady 96/82/WE (Dyrektywa Seveso III) [3]. Zgodnie z wymaganiami dyrektywy 2012/18/UE, wystąpienie zdarzenia o znamionach poważnej awarii wiąże się z koniecznością realizacji w zakładzie pracy planów operacyjno-ratowniczych, w tym niezwłocznego opuszczenia budynku przez pracowników narażonych na niebezpieczeństwo.

Z uwagi na specyficzny charakter substancji chemicznych stosowanych w zakładach zagrożonych wystąpieniem poważnej awarii przemysłowej, szczególnie istotne jest zapewnienie pracownikom dostępu do sprzętu ochrony indy-

widualnej, stosownego do charakterystyki zagrożeń pożarowych, wybuchowych i toksycznych mogących wystąpić podczas ewakuacji. W szczególności konieczne jest zabezpieczenie pracowników przed działaniem dymu i toksycznych produktów spalania, które wchłaniane są do organizmu przez drogi oddechowe. Kaptury ucieczkowe stanowią doskonałe rozwiązanie w tym zakresie, ponieważ ze względu na swoją uniwersalność, mogą być stosowane przez użytkowników noszących okulary korekcyjne, posiadających zarost lub nietypową budowę twarzy. Funkcja ochronna kaptura realizowana jest dzięki zastosowaniu nagłowia, wykonanego z materiałów o właściwościach fluorescencyjnych i odbłaskowych odpornych na działanie płomienia, wyposażonego w elementy oczyszczające powietrze z substancji szkodliwych. Obecnie dostępne na rynku produkty wyposażone są w większości filtropochłaniacze chroniące użytkownika przed zagrożeniami w postaci par, gazów, pyłów, dymów i mgieł. Sprzęt taki powinien być dostępny dla pracowników (umieszczony w wyznaczonych miejscach, przy stanowiskach pracy lub noszony na pasku przez pracownika) tak, aby w sytuacji zagrożenia mógł być zastosowany jeszcze przed przybyciem na miejsce służb ratunkowych, umożliwiając tym samym bezpieczne opuszczenie budynku.

Niezbędnym elementem wspomagającym ewakuację ludzi, ale także uwzględniającym bezpieczeństwo ekip ratowniczych podczas tego rodzaju zdarzeń jest spełnienie wymagań technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie określonych w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. [4]. Zawarto w nim wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego budynków i ich części, wynikające z ich przeznaczenia i sposobu użytkowania, wysokości lub liczby kondygnacji, a także położenia w stosunku do poziomu terenu oraz do innych obiektów budowlanych. Regulacje w zakresie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych zawarto w Rozporządzeniu Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r [5]. Określa ono obowiązki właścicieli, zarządców i użytkowników, co do zapewnienia i wdrażania instrukcji bezpieczeństwa pożarowego, która powinna zawierać m.in. informacje na temat: (i) warunków ochrony przeciwpożarowej, wynikających z przeznaczenia budynku, sposobu jego użytkowania, prowadzonego procesu technologicznego, magazynowania (składowania) i warunków technicznych obiektu, w tym zagrożenia wybuchem; (ii) wymaganych urządzeń przeciwpożarowych i gaśnic; (iii) postępowania na wypadek pożaru i innego zagrożenia; (iv) zabezpieczenia prac niebezpiecznych pod względem pożarowym, jeżeli takie prace są przewidywane oraz (v) warunków i organizacji ewakuacji ludzi.

Ponadto istotne jest, aby instrukcje bezpieczeństwa pożarowego zawierały plany obiektów z uwzględnieniem graficznych danych dotyczących m.in.: powierzchni, wysokości i liczby kondygnacji budynku; kategorii zagrożenia ludzi oraz przewidywanej liczby osób na każdej kondygnacji i w poszczegól-

nych pomieszczeniach; lokalizacji pomieszczeń i przestrzeni zewnętrznych zaklasyfikowanych jako strefy zagrożenia wybuchem; warunków ewakuacji, ze wskazaniem kierunków i wyjść ewakuacyjnych.

Nawet w sytuacji spełnienia wszystkich wymagań określonych w opisanych powyżej aktach prawnych scenariusze postępowania w przypadku wystąpienia poważnej awarii nie są w stanie uwzględnić wszystkich czynników społecznych i środowiskowych wpływających na sposób i czas ewakuacji ludzi z budynku [6]. W przypadku wystąpienia awarii przemysłowej istnieje szereg czynników wpływających na sprawność procesu ewakuacji, szczególnie w przypadku, gdy budynek jest poważnie uszkodzony [7]. W stanie paniki, dochodzi częstokroć do niekontrolowanych i gwałtownych zakłóceń w ruchu strumieni ludzkich spowodowanych chęcią jak najszybszego wydostania się z miejsca zdarzenia lub też stanem odrętwienia [6, 8, 9]. Standardowo stosowane znaki ewakuacyjne i mapy dróg ewakuacyjnych mogą zostać w takiej sytuacji łatwo przeoczone [10]. Powstawanie dymu i brak oświetlenia może dodatkowo pogorszyć sytuację. Nawet pracownicy, którzy są zaznajomieni z układem budynku i są wyposażeni w standardowy sprzęt ucieczkowy (np. kaptur) mogą mieć wówczas trudności z odnalezieniem wyjścia. Z tego względu, celowe jest prowadzenie prac zmierzających do opracowania rozwiązań wspomagających prawidłowy przebieg lub usprawnienie tych procesów, ale także uwzględniających bezpieczeństwo ekip ratowniczych. Szczególne znaczenie w tym kontekście mają systemy i techniki umożliwiające bieżące monitorowanie położenia osób ewakuowanych/ewakuujących się z budynku, jak również strażaków biorących udział w akcji ratowniczej.

Celem artykułu jest przedstawienie szerokiego przeglądu literatury w obszarze związanym z wykorzystaniem tego typu rozwiązań technicznych, jako narzędzia wspomagającego prowadzenie akcji ratowniczych podczas takich zdarzeń niebezpiecznych, jak np. pożary, wybuchy lub nagła emisja substancji toksycznych lub szkodliwych.

Bezprzewodowe systemy do lokalizacji obiektów w czasie rzeczywistym

Bezprzewodowe systemy lokalizacji (ang. Wireless Positioning/Locating Systems lub Real-Time Locating Systems (RTLS)) są to systemy pozwalające na monitorowanie położenia obiektów w przestrzeni fizycznej w czasie zbliżonym do czasu rzeczywistego [11]. Najczęściej składają się one z nadajnika i odbiornika sygnału (pełniącego rolę sensora położenia) oraz z oprogramowania rejestrującego dane i przetwarzającego je w celu wyznaczenia bezwzględ-

nego lub względnego położenia obiektów [12]. Istnieje wiele klasyfikacji dzielących systemy lokalizacji [13], m.in. ze względu na:

- rodzaj topologii; systemy samopozycjonujące (ruchomy odbiornik wykonuje pomiary sygnału z nadajników znajdujących się w ustalonych lokalizacjach, a następnie wykorzystuje je w celu określenia swojego położenia) i systemy zdalnego pozycjonowania (jeden lub kilka odbiorników znajdujących się w ustalonych lokalizacjach wykonuje pomiary sygnału pochodzącego od lokalizowanego obiektu, następnie przesyła zgromadzone dane do jednostki centralnej, gdzie wyznaczane jest położenie obiektu) [14];
- zapotrzebowanie sprzętowe; systemy zależne i niezależne od infrastruktury znajdującej się na terenie, w którym odbywa się lokalizacja obiektów [15, 16];
- sposób implementacji; systemy mobilne i stacjonarne [17];
- rodzaj elementu, w którym generowany jest sygnał, na podstawie którego określone jest położenie; systemy aktywne (informacja generowana przez urządzenie mobilne) i systemy pasywne (urządzenie znajdujące się w ruchu jest odbiornikiem sygnału) [18];
- stan wiedzy na temat obszaru, w którym odbywa się lokalizacja; systemy parametryczne i nieparametryczne [19].

Szacowanie położenia danego obiektu w przestrzeni opiera się w ogólności na zastosowaniu trzystopniowego algorytmu [20]. Najpierw dochodzi do sygnalizacji i pomiaru położenia (nadajnik generuje sygnały, a odbiornik mierzy ich charakterystykę bądź rejestruje ich wystąpienie). Bazując na zgromadzonych danych, odbywa się szacowanie odległości pomiędzy określonymi urządzeniami wchodzącymi w skład systemu, z wykorzystaniem jednej lub kombinacji kilku podstawowych technik: (i) triangulacji, (ii) technik bazujących na bliskości odbiornika i nadajnika sygnału (ang. proximity) oraz (iii) tzw. analizie sceny (ang. fingerprinting) [21]. Jest to podstawą do wyznaczania położenia obiektu w przestrzeni.

Omówione metody wyznaczania położenia mogą być realizowane za pomocą technologii bazujących m.in. na wykorzystaniu sygnałów dźwiękowych (ultradźwięki i dźwięki słyszalne), optycznych (m.in. promieniowanie podczerwone, systemy działające w paśmie światła widzialnego), sygnałów o częstotliwości radiowej (technologia RFID, ang. Radio-Frequency Identification; bezprzewodowe sieci lokalne WLAN, ang. Wireless Local Area Network; bezprzewodowe sieci osobiste WPAN, ang. Wireless Personal Area Network obejmujące takie technologie, jak Bluetooth, ZigBee i UWB, ang. Ultra-Wideband) oraz pól magnetycznych (np. systemy bazuje na pomiarach natężenia naturalnego pola magnetycznego Ziemi). Poza rodzajem sygnału, omówione powyżej technologie różnią się w takich aspektach, jak zasięg i dokładność lokalizacji, złożoność, ska-

lowalność, niezawodność, zapotrzebowanie energetyczne i powiązany z tym sposób zasilania oraz koszty implementacji i konserwacji. Wynika to przede wszystkim z zastosowania odmiennej infrastruktury i odrębnych metod wyznaczania położenia zależnych od docelowej aplikacji [20].

Techniki stosowane do monitorowania położenia służb ratowniczych

Z uwagi na niezwykle złożoność akcji ratowniczo-gaśniczych związaną z ograniczonym dostępem do informacji, dynamicznie zmieniającym się otoczeniem oraz ekstremalnymi obciążeniami fizycznym i psychicznym, zadanie wyjścia z budynku w warunkach niewielkiej lub żadnej widoczności może okazać się trudne, nawet dla doświadczonych pracowników służb ratowniczych [22]. Główną funkcją rozwiązań służących do monitorowania położenia poszczególnych członków ekip ratowniczych jest ułatwienie im przeprowadzenia akcji ratowniczo-gaśniczej i umożliwienie sprawnego opuszczenia budynku w razie niebezpieczeństwa. Standardowo do tego celu używane są proste i stosunkowo niezawodne metody poprawiające orientację w przestrzeni o niskiej widoczności.

Jednym ze stosowanych sposobów poszukiwania wyjścia z ciemnego lub zadymionego budynku jest „trzymanie się” linii gaśniczej lub zastosowanie do samoasekuracji linki strażackiej przymocowanej w punkcie znajdującym się poza strefą niebezpieczną. Podobnie, zapalona latarka pozostawiona w drzwiach pomieszczenia pomaga zlokalizować wyjście i wskazuje pozostałym członkom grupy ratunkowej, że pokój jest przeszukiwany [23]. Systematyczne przeszukiwanie pomieszczeń przeprowadza się częstokroć, przytrzymując rękę w kontakcie ze ścianą, co pomaga w zachowaniu orientacji w przestrzeni. Pomoc w lokalizacji osób poszkodowanych lub zagrożonych oraz efektywnym poszukiwaniu drogi wyjścia z palących się budynków zapewnia również zastosowanie technik termowizyjnych, dzięki którym możliwa jest wizualizacja rozkładu pomieszczenia i znajdujących się w nim źródeł ciepła [24]. Podczas akcji istotne jest także zachowanie ciągłej komunikacji radiowej z dowódcą nadzorującym przebieg akcji i śledzącym położenie poszczególnych rot względem strefy zagrożenia [25]. Innym rozwiązaniem stosowanym przez wszystkich strażaków wchodzących do strefy zagrożenia są w osobiste sygnalizatory bezruchu (ang. *Personal Alert Safety System*, PASS) podłączone do aparatu oddechowego. Urządzenia tego typu generują alarm dźwiękowy i/lub świetlny w przypadku braku aktywności użytkownika w zadanym przedziale czasowym. Generowane alarmy pozwalają na zlokalizowanie unieruchomionego lub nieprzytomnego strażaka nawet w warunkach zerowej widoczności [26]. Z doniesień literaturowych i danych statystycznych wynika, że opisane powyżej metody są niezwykle efektywne i w większości

przypadków wystarczające do sprawnego przeprowadzenia akcji ratowniczo-gaśniczej. Zdarzają się jednak sytuacje, w których zastosowanie bardziej wyrafinowanych technik lokalizacji, takich jak systemy RTLS, pozwoliłoby na uniknięcie tragicznych w skutkach wypadków [23, 27, 28].

Pomimo tego, że bezprzewodowe systemy służące do lokalizacji obiektów w czasie rzeczywistym są coraz częściej stosowane przez ogół społeczeństwa i wdrażane do praktyki przemysłowej, to ich wykorzystanie w ekstremalnych warunkach akcji ratowniczo-gaśniczych niesie ze sobą konieczność spełnienia szczególnych wymagań. Ciemność, dym, ogień, brak zasilania, obecność wody i hałas mogą uniemożliwić pracę systemu, a konieczność użycia przez ratowników ciężkiej odzieży ochronnej, rękawic i sprzętu ochrony układu oddechowego sprawiają, że możliwość stosowania standardowych komputerów przenośnych jest znacznie ograniczona [23]. Niemniej jednak, w ciągu ostatnich lat naukowcy podjęli wiele prób rozwiązania tego problemu. Zestawienie wybranych rozwiązań technicznych z tego obszaru przedstawiono w Tabeli 1.

Systemy stosowane do monitorowania położenia osób ewakuowanych

Kolejny obszar wykorzystania systemów RTLS jako narzędzia wspomagającego prawidłowy przebieg ewakuacji z budynków stanowi ich zastosowanie do wyznaczania położenia osób narażonych na niebezpieczeństwo w wyniku powstania pożaru, wybuchu lub emisji substancji niebezpiecznych. W tym przypadku wyróżnić można kilka sposobów wykorzystania informacji o położeniu osób znajdujących się w budynku. Dane lokalizacyjne mogą być na przykład udostępniane odpowiednim służbom ratowniczym w celu skrócenia czasu poszukiwania poszkodowanych. Mogą one również stanowić część danych dostarczanych do kompleksowego systemu monitorowania ewakuacji. Istnieją również rozwiązania wykorzystujące informacje o lokalizacji ludzi do wyznaczania optymalnych ścieżek ewakuacji z budynku oraz interaktywnego informowania o tym poszkodowanych.

Prosty przykład systemu pozwalającego na monitorowanie położenia osób znajdujących się w budynkach opisał Cheng i współpracownicy [36]. Opracowane przez nich rozwiązanie, działające z wykorzystaniem komunikacji ZigBee, składało się z trzech typów urządzeń: (i) stacji bazowej, (ii) routera wyposażonego w czujniki dymu i temperatury oraz (iii) znacznika noszonego przez użytkownika wyposażonego w akcelerometr. Monitorowanie parametrów środowiska możliwe było dzięki sensorom umieszczonym w routerach.

Tabela 1. Przegląd wybranych systemów lokalizacji stosowanych do monitorowania położenia ratowników

Nazwa systemu	Zastosowana technika pozycjonowania	Elementy składowe systemu	Opis funkcjonowania systemu	Ograniczenia	Dodatkowe funkcje
LifeNet [29]	względny kierunek propagacji ultradźwięków	<ul style="list-style-type: none"> znaczniki rozmieszczone w otoczeniu (co kilka metrów) elementy elektroniki noszonej 	Funkcjonowanie analogiczne, jak w przypadku zastosowania linki strażackiej. System wykorzystuje urządzenia noszone do wykrywania obecności znaczników rozmieszczonych w otoczeniu dzięki czemu możliwe jest nawigowanie użytkownika za pomocą instrukcji prezentowanych na wyświetlaczu mocowanym do hełmu strażackiego. Znaczniki nawigacyjne są automatycznie opuszczane w odpowiednich odstępach czasu z urządzenia przymocowanego do aparatu oddechowego, nakreślając tym samym trajektorie, po której porusza się użytkownik.	znaczniki mogą zostać przemieszczone lub zniszczone	monitorowanie otoczenia i komunikacja
SmokeNet [22]	fingerprinting sygnałów radiowych	<ul style="list-style-type: none"> układ znaczników zainstalowanych w budynku (jeden znacznik na pomieszczenie) odbiornik noszony przez użytkownika 	Układ znaczników zainstalowanych w budynku pozwala na uzyskanie lokalizacji na poziomie poszczególnych pomieszczeń. Dodatkowe czynniki dymu i temperatury monitorują stan otoczenia i przekazują dane do stanowiska dowodzenia. Bezpieczna droga ewakuacji sygnalizowana jest za pomocą kolorowych diod LED. Plan budynku i krótkie informacje ze stanowiska dowodzenia mogą być przesyłane do wyświetlacza zamontowanego wewnątrz maski pełnotwarzowej. Dowódcą ma możliwość monitorowania stanu ratowników oraz otoczenia.	wrażliwość na dynamicznie zmieniające się warunki otoczenia	monitorowanie otoczenia i komunikacja
PathFinder [30]	względny kierunek propagacji ultradźwięków	<ul style="list-style-type: none"> znaczniki rozmieszczone przy wyjściach z budynku/strefy zagrożenia odbiornik noszony przez użytkownika elementy elektroniki noszonej (znaczniki) 	System składa się z przenośnego odbiornika, który wykrywa impulsy ultradźwiękowe emitowane przez sygnalizatory umieszczone przy wyjściu z budynku/strefy zagrożenia, oraz noszone przez strażaków.	ograniczona precyzja pozwalająca na określenie przybliżonego kierunku	brak
System do precyzyjnej lokalizacji personelu (ang. <i>Precision Personnel Location, PPL</i>) [31]	wskaźniki RSSI sygnału radiowego i czynniki	<ul style="list-style-type: none"> układ odbiorników zlokalizowanych na zewnątrz budynku przenośny nadajnik 	System wykorzystuje odbiorniki radiowe umieszczone w zadanych lokalizacjach celem śledzenia położenia personelu przenoszącego nadajnik wewnątrz budynku. Położenie nadajnika może być określone na podstawie wskaźników RSSI sygnału radiowego. Dodatkowo dokładność oszacowania położenia może zostać zwiększona poprzez zastosowanie czynnika ustalającego położenie za pomocą pomiarów prędkości i kierunku ruchu użytkownika (ang. <i>Pedestrian Dead Reckoning, PDR</i>).	ekranowanie sygnału radiowego przez metalowe elementy konstrukcji budynków ogranicza możliwość lokalizacji	brak

Nazwa systemu	Zastosowana technika pozycjonowania	Elementy składowe systemu	Opis funkcjonowania systemu	Ograniczenia	Dodatkowe funkcje
System lokalizacji opracowany w ramach projektu WearIt@Work [32]	czujniki	<ul style="list-style-type: none"> elementy elektroniki noszonej 	Działanie systemu opiera się na zastosowaniu do lokalizacji techniki PDR. Dodatkowo w celu wyeliminowania niepewności związanej z dużym błędem szacowania położenia z wykorzystaniem tej metody, zastosowano algorytm pozwalający na odfiltrowanie i skorygowanie pomiarów, które świadczyłyby o przeniknięciu użytkownika przez ścianę poprzez porównanie oszacowanych lokalizacji z planami budynku.	duży błąd lokalizacji związany z wykorzystaniem PDR	brak
System lokalizacji opracowany w ramach projektu Relate Trails [33]	czujniki i względy kierunku propagacji ultradźwięków	<ul style="list-style-type: none"> znaczniki rozmieszczone w otoczeniu elementy elektroniki noszonej 	System zapewnia pomoc nawigacyjną wewnątrz budynku objętego pożarem dzięki wyświetleniu w polu widzenia użytkownika sygnałów graficznych wskazujących drogę powrotną. Do lokalizacji użytkownika wykorzystywana jest technika PDR, której dokładność jest korygowana dzięki zastosowaniu znaczników emitujących sygnał ultradźwiękowy.	znaczniki mogą zostać przemieszczone lub zniszczone, duży błąd lokalizacji związany z wykorzystaniem PDR	monitorowanie otoczenia i komunikacja
HeadSLAM [34]	czujniki i skanowanie zasięgu lasera	<ul style="list-style-type: none"> elementy elektroniki noszonej przenośny skaner 	Do lokalizacji użytkowników system wykorzystuje technikę PDR oraz odczyty ze skanera laserowego zamontowanego na hełmie ochronnym. Skaner wykrywa kierunek i odległość od przeszkód i jednocześnie tworzy mapę obrazującą rozkład pomieszczeń.	problem z działaniem skanera w warunkach niskiej widoczności, duży błąd lokalizacji związany z wykorzystaniem PDR	monitorowanie otoczenia i komunikacja
Inteligentna odzież ochronna opracowana w ramach projektu PROcTEX [35]	triangulacja i czujniki	<ul style="list-style-type: none"> elementy elektroniki noszonej odbiornik sygnału GPS 	W skład systemu wchodzi odzież ochronna dla strażaków zintegrowana z siecią Body Area Network (BAN), która obejmuje moduł lokalizacji za pomocą sygnału GPS, czujniki przyspieszenia, temperatury i stężenia toksycznych gazów. Dodatkowo system wyposażony jest w moduły komunikacyjne bliskiego i dalekiego zasięgu, zapewniające niezbędne wsparcie informacyjne dla członków zespołu ratowniczego.	problem z zasięgiem GPS w budynkach	monitorowanie otoczenia i komunikacja

Źródło: opracowanie własne na podstawie [23].

Wzrost temperatury otoczenia i zadymienia powodował przesłanie do stacji bazowej informacji o uruchomieniu alarmu. Następnie zbierała ona dane awaryjne ze znaczników należących do poszczególnych użytkowników celem ich identyfikacji i uzyskania informacji o ich lokalizacji i stanie.

Inoue i współpracownicy opracowali system wykorzystujący sygnały radiowe generowane przez umieszczone na suficie nadajniki do lokalizacji osób ewakuujących się z budynku objętego pożarem [37]. Osoby te wyposażone w przenośny odbiornik otrzymywały graficzne instrukcje dotyczące dróg ewakuacyjnych w ich pobliżu. Podobne rozwiązanie wykorzystujące do lokalizacji aktywne znaczniki RFID małego zasięgu zaproponowali Chittaro i współpracownicy [38]. Opisane przez nich rozwiązanie pozwalało na dostarczanie użytkownikowi instrukcji odnośnie ewakuacji na telefon komórkowy dzięki zastosowaniu aplikacji zawierającej trójwymiarowy model budynku.

Z kolei Szwedko i współpracownicy rozważyli wykorzystanie do celów ewakuacji systemu hybrydowego składającego się ze znaczników RFID umieszczonych w kartach identyfikacyjnych pracowników, czytników znajdujących się w pobliżu wyjść z budynku oraz znaczników z kodami QR rozmieszczonych w budynku [39]. Znaczniki i czytniki RFID wykorzystywane były do wyznaczenia położenia osób znajdujących się w budynku. Z kolei kody QR po zeskanowaniu ich za pomocą telefonu komórkowego z dostępem do Internetu przekierowywały użytkowników na stronę internetową zawierającą aktualną informację o bezpiecznych drogach ewakuacyjnych. Inny system hybrydowy pozwalający na monitorowanie stanu otoczenia, lokalizację osób poszkodowanych oraz planowanie ewakuacji opracował Chu [40]. System składał się m.in. z bazy danych znajdującej się w centrum zarządzania, oprogramowania do wyznaczania ścieżki ewakuacji, aktywnych znaczników RFID zintegrowanych z czujnikiem temperatury, znaczników NFC służących do określenia położenia użytkownika oraz telefonu komórkowego z czytnikiem RFID i modułem komunikacji bliskiego zasięgu (ang. *Near Field Communication*, NFC), na który przekazywano informacje o ewakuacji za pośrednictwem krótkich wiadomości tekstowych. Ciekawe rozwiązanie stanowi również system wspomagania ewakuacji grupowej o nazwie GoFAST przeznaczony dla użytkowników smartfonów [41]. Architektura systemu, zakłada wykorzystanie punktów dostępowych Wi-Fi, znaczników iBeacon rozmieszczanych w zadanych lokalizacjach w budynku oraz telefonów komórkowych z funkcją skanowania BLE. Bieżące położenie każdego z użytkowników wykrywane było przez smartfon przy użyciu odebranych sygnałów ze znaczników, a identyfikator znacznika o największej sile sygnału wykorzystywany był do powiązania tej lokalizacji z planem budynku. Smartfon okresowo wysyłał wykryte położenie do serwera. Po wykryciu zdarzenia awaryjnego serwer przysyłał na smartfony informację o najszybszej drodze ewakuacji dla danej grupy użytkowników. Zaletą systemu GoFAST była możliwość uwzględnienia przepustowości i długości korytarzy oraz przepustowości wyjść ewakuacyjnych w powiązaniu

z aktualnym położeniem osób znajdujących się w pomieszczeniach w celu określenia optymalnych dla poszczególnych grup osób ścieżek ucieczki w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

Koncepcję systemu inteligentnej ewakuacji o nazwie DensIEGS, pozwalającego na bieżące monitorowanie parametrów środowiskowych i przepływów ludzkich w zabytkowych budynkach, opisali Bernardini i współpracownicy [42]. Zaproponowane przez nich rozwiązanie zakładało wykorzystanie informacji o lokalizacji osób znajdujących się w budynku oraz danych z systemu sygnalizacji pożarowej do dynamicznego wyznaczania dróg ewakuacyjnych. Następnie informacje o kierunku, w którym powinny przemieszczać się osoby opuszczające budynek wyświetlane były za pomocą podświetlanych znaków ewakuacyjnych. Podobny system bazujący na wykorzystaniu inteligentnych znaków ewakuacyjnych zaproponowali Hsu i współpracownicy [43]. W skład systemu wchodziły cztery moduły o zróżnicowanych funkcjach: (i) moduł ZigBee odpowiedzialny za monitorowanie informacji o środowisku przy użyciu sieci czujników bezprzewodowych pozwalających na pomiar temperatury, wilgotności i natężenia światła oraz komunikowanie informacji o alarmujących poziomach mierzonych parametrów; (ii) moduł lokalizacji RFID pozwalający na określenie liczby osób znajdujących się w danym pomieszczeniu i wyznaczanie drogi ewakuacji przy pomocy specjalnie opracowanego algorytmu; (iii) jednostki centralnej wyposażonej w interfejs do monitorowania przebiegu ewakuacji i kontrolującej przepływ informacji pomiędzy poszczególnymi modułami oraz (iv) moduł inteligentnych znaków ewakuacyjnych pozwalający na wyświetlenie bieżących poleceń związanych z ewakuacją osobom znajdującym się w budynku. Dodatkową funkcją systemu było przekazywanie informacji o warunkach panujących wewnątrz budynku w czasie rzeczywistym do służb ratowniczych w celu zapewnienia im dodatkowego wsparcia informacyjnego podczas akcji.

Interesujące rozwiązanie opierające się na interakcji z osobami ewakuowanymi zaproponowali D'Orazio i współpracownicy [44]. Jego podstawowym zadaniem było skrócenie czasu, w którym osoby znajdujące się w budynku podejmują ewakuację (skrócenie czasu trwania fazy wstępnej ewakuacji). Zaprojektowany przez nich system, składał się z urządzeń nasobnego wyposażonego w dwa moduły o zróżnicowanych funkcjach. Pierwszy z nich stanowił moduł ZigBee przeznaczony do wyznaczania położenia osób po uruchomieniu alarmu oraz określenia, czy przemieszczają się oni w kierunku wyjść ewakuacyjnych. Drugi moduł służył do wygenerowania bodźca (alarmu wibracyjnego), który stymulował użytkownika do opuszczenia budynku. Ferscha i Zia opracowali urządzenie przenośne o nazwie LifeBelt w postaci paska służące do wibracyjnego nawigowania osób podczas ewakuacji [45]. Po uzyskaniu z jednostki centralnej informacji o położeniu danego użytkownika, urządzenie to wykorzystywało zmiany bodźców wibracyjnych, takie jak intensywność, czas trwania

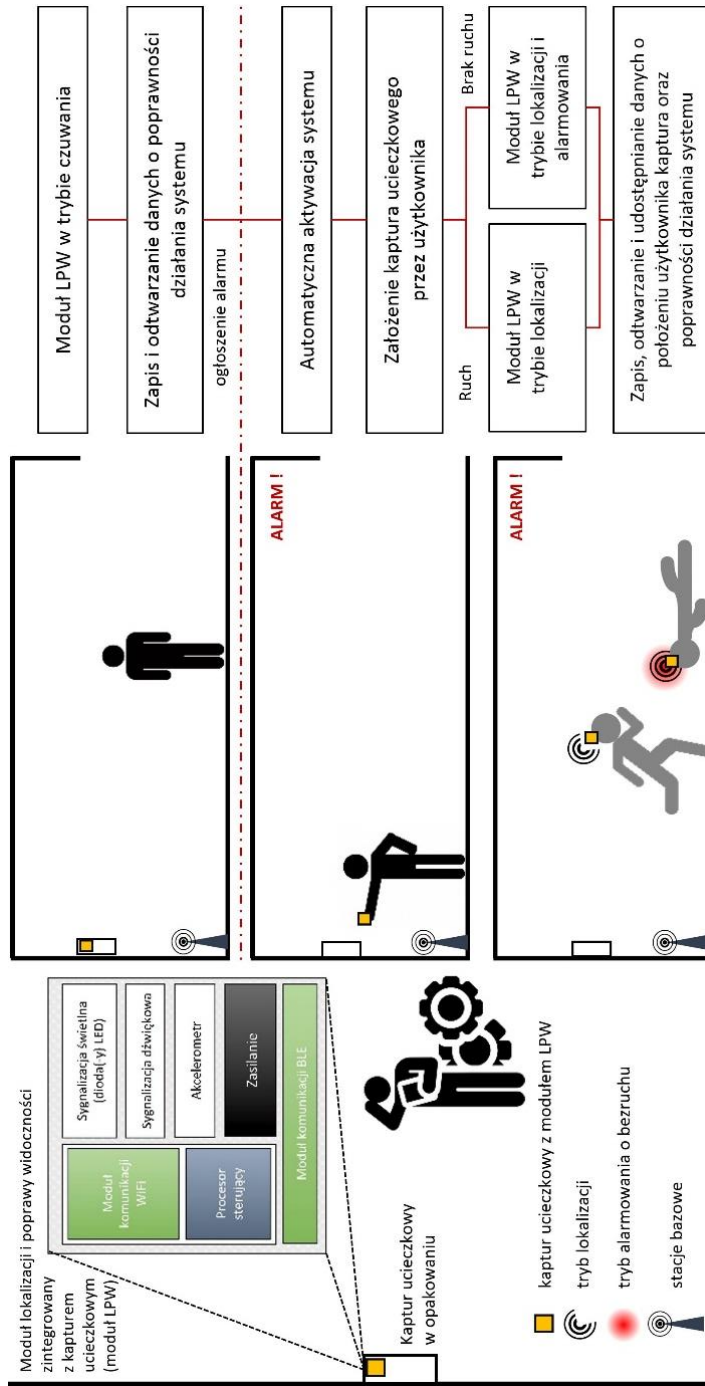
i częstotliwość, w celu wskazania kierunku, w którym powinien się on poruszać po usłyszeniu alarmu.

Inne ciekawe rozwiązanie stanowi projektowany obecnie w CIOP-PIB system lokalizacji i poprawy widoczności użytkownika kaptura ucieczkowego przeznaczony do stosowania podczas poważnych awarii przemysłowych, którego architekturę oraz koncepcję działania przedstawiono schematycznie na Rysunku 1.

Do opracowania systemu lokalizacji użytkownika kaptura ucieczkowego planuje się zastosowanie technologii Wi-Fi i/lub technologii BLE. Architektura systemu bazować będzie na zastosowaniu trzech rodzajów komponentów sprzętowych: stacji bazowych rozmieszczonych w odpowiedni sposób w budynku, serwerze uruchomionego lokalnie lub w tzw. chmurze (zawierającego plany budynku, otaczającej go infrastruktury i bazy danych z lokalizacją poszczególnych stacji bazowych w budynku) oraz modułów lokalizacji i poprawy widoczności użytkownika zintegrowanych z konstrukcją kapturek ucieczkowych stanowiących kluczowy element systemu. Moduły te zostaną dodatkowo wyposażone w podsystem służący do alarmowania o bezruchu. Rozważone zostaną dwie możliwości uruchomienia świetlnego i dźwiękowego sygnału alarmowego. Pierwsza z nich obejmowała będzie wykorzystanie do tego celu informacji pochodzących z systemu lokalizacji. Druga, zapasowa, opcja to zastosowanie akcelerometru. Po zarejestrowaniu informacji o bezruchu użytkownika kaptura, oprogramowanie modułu wymusi uruchomienie sygnału alarmowego celem zwiększenia widzialności użytkownika przez służby ratownicze. Równolegle zakłada się opracowanie oprogramowania z prostym interfejsem graficznym pozwalającego na bieżącą kontrolę poprawności działania systemu, zapewnienie poprawnej komunikacji pomiędzy jego elementami, wyznaczenie lokalizacji użytkowników kapturek i udostępnienie informacji o ich położeniu zainteresowanym podmiotom.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wskazuje na znaczny postęp w rozwoju systemów lokalizacji bezprzewodowej przeznaczonych do zastosowania w ekstremalnych warunkach środowiskowych panujących podczas pożarów jako narzędzia wspomagającego przebieg akcji ratowniczych. Główne kierunki badań w tym obszarze obejmują przede wszystkim: wykorzystanie do lokalizacji technologii hybrydowych, które posiadają wzajemnie uzupełniające się funkcje; stosowanie danych z systemów lokalizacji do wyznaczania optymalnych w danym momencie dróg ewakuacyjnych oraz wykorzystanie telefonów komórkowych jako interfejsów pozwalających na informowanie osób ewakuowanych o bezpiecznej drodze wyjścia z budynku.



Rys. 1. Schemat przedstawiający uproszczoną architekturę systemu lokalizacji i poprawy widoczności kaptura uciezkowego oraz koncepcję jego działania

Obserwowany jest również trend związany z integracją modułów elektronicznych stanowiących elementy architektury systemu lokalizacji z osprzętem, który stosowany jest standardowo przez członków ekip ratowniczych lub cywilnych użytkowników budynków (np. z odzieżą, obuwem, specjalistycznym sprzętem stosowanym przez strażaków). Wpisuje się on w stopniowo postępującą czwartą rewolucję przemysłową i, z uwagi na duży potencjał w zakresie poprawy bezpieczeństwa pracowników, zasługuje na zainteresowanie środowiska naukowego i przedstawicieli przemysłu.

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017–2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Literatura

- [1] Michalik J.S., Gajek A., Serwis nt. przeciwdziałania poważnym awariom przemysłowym, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P15000156221346925948558 (data dostępu: 14.07.2018).
- [2] Lesiak P., Porowski R., Ocena skutków awarii przemysłowej w instalacjach procesowych, w tym efektu domino – część 1. Bezpieczeństwo I Technika Pożarnicza. 2012;3:13–26.
- [3] 2012/16/EU. Commission Directive of 10 May 2012 amending Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council to include hydrochloric acid as an active substance in Annex I thereto. Off J Eur Union. 2012;L 124:36.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. DzU20131422. 2015.
- [5] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów. DzU2010719. 2010.
- [6] Kobes M., Understanding human behaviour in fire - Validation of the use of serious gaming for research into fire safety psychonomics. 2010.
- [7] Bohannon J., Building safety. Directing the herd: crowds and the science of evacuation. Science; 2005 Oct 14;310(5746):219–21.
- [8] Kosiński R., Grabowski A., Matematyczne modelowanie i badania symulacyjne zachowania się ludzi podczas ewakuacji z budynków. Bezpieczeństwo Pracy. 2013;1:20–5.
- [9] Kobes M., Helsloot I., de Vries B., Post J.G., Building safety and human

- behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*; 2010;45(1):1–11.
- [10] Merkel S., *Building Evacuation with Mobile Devices*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing; 2006.
- [11] Gu Y., Lo A., Niemegeers I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Commun Surv Tutor*. 2009;11(1): 13–32.
- [12] Vossiek M., Wiebking L., Gulden P., Wiegardt J., Hoffmann C., Heide P., *Wireless Local Positioning*. *IEEE Microw Mag*. 2003; December: 77–86.
- [13] Okrasa M., *Zastosowanie nowoczesnych systemów lokalizacji pracownika do poprawy bezpieczeństwa na stanowisku pracy*. [in:] *Nowe trendy w bezpieczeństwie pracy, środowisku i zarządzaniu*. Katowice: Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy; 2018. p. 279–94.
- [14] Drane C., Macnaughtan M, Scott C. Positioning GSM telephones. *IEEE Commun Mag*. 1998;36(4):46–59.
- [15] Alarifi A., Al-Salman A., Alsaleh M., Alnafessah A., Al-Hadhrami S., Al-Ammar M., et al. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. *Sensors*. 2016;16(5):707.
- [16] Collin J., Mezentsev O., Lachapelle G., Indoor positioning system using accelerometry and high accuracy heading sensors. *Proc ION GPS/GNSS 2003 Conf*. 2003;9–12.
- [17] Nuaimi K Al, Kamel H., A survey of indoor positioning systems and algorithms A Survey of Indoor Positioning Systems and Algorithms. [in:] *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*. 2016. p. 185–90.
- [18] Zhu L., Yang A., Wu D., Liu L., Survey of Indoor Positioning Technologies and Systems. *Life Syst Model Simul*. 2014;461:400–9.
- [19] Chóliz J., Eguizabal M., Hernandez-Solana A., Valdovinos A., Comparison of Algorithms for UWB Indoor Location and Tracking Systems. [in:] *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*. 2011. p. 1–5.
- [20] Brena R.F., García-Vázquez J.P., Galván-Tejada C.E., Muñoz-Rodríguez D., Vargas-Rosales C., Fangmeyer J., Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey. *J Sensors*. 2017;2017.
- [21] Hightower J., Borriello G., Location Sensing Techniques. *IEEE Comput*. 2001;34(july):1–8.
- [22] Wilson J., Bhargava V., Redfern A., Wright P., A wireless sensor network and incident command interface for urban firefighting. *Proc 4th Annu Int Conf Mob Ubiquitous Syst Comput Netw Serv MobiQuitous 2007*. 2007.
- [23] Fischer C., Gellersen H., Location and navigation support for emergency responders: A survey. *IEEE Pervasive Comput*. 2010;9(1):38–47.
- [24] Amon F., Hamins A., Thermal Imaging Research Needs for First Res-

- ponders : Workshop Proceedings NIST. Nist. 2005.
- [25] Kokot-Góra S., Nicoń W., Cytawa A., Grzyb P., Podstawy zabezpieczenia i ratowania strażaków podczas wewnętrznych działań gaśniczych. Szkoła Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej. Kraków; 2012.
 - [26] Report F. Evaluation and Enhancement of Fire Fighter PASS Effectiveness. 2015;(March).
 - [27] Statystyki Roczne Państwowej Straży Pożarnej. Warszawa; 2017.
 - [28] CDC – Fire Fighter Fatality Investigation and Prevention Program: Fatality Reports – NIOSH Workplace Safety and Health Topic, <https://www.cdc.gov/niosh/fire/investigations/completedinvestigations/completedinvestigations.html>, (data dostępu: 14.07.2018).
 - [29] Klann M. Tactical Navigation Support for Firefighters: The LifeNet Ad-Hoc Sensor-Network and Wearable System. Mobile Response, LNCS 5424. Springer; 2009. 41–56.
 - [30] Summit Safety, Inc. - Summit Safety Products, <http://www.summitsafetyinc.com/products/index.html>, (data dostępu: 14.07.2018).
 - [31] Amendolare V., Cyganski D., Duckworth R.J., Makarov S., Coyne J., Daempfling H., et al. WIP Precision personnel locator system: Inertial navigation supplementation. Rec - IEEE PLANS, Position Locat Navig Symp. 2008;350–7.
 - [32] Beaugregard S., Widyawan W., Klepal M., Indoor pdr performance enhancement using minimal map information and particle filters. Rec - IEEE PLANS, Position Locat Navig Symp. 2008;141–7.
 - [33] Ojeda L, Borenstein J. Non-GPS Navigation for Security Personnel and First Responders. J Navig. 2007;60(3):391.
 - [34] Cinaz B., Kenn H., Head SLAM - Simultaneous localization and mapping with head-mounted inertial and laser range sensors. Proc - Int Symp Wearable Comput ISWC. 2008;3–10.
 - [35] Voirin G., Working Garment Integrating Sensor Applications Developed Within the PROeTEX Project for Firefighter. 2015. 45-60 p.
 - [36] Cheng L., Wu C., Zhang Y., Chen L., A Rescue-Assist Wireless Sensor Networks for Large Building. 2013;(60874103):1424–8.
 - [37] Inoue Y., Sashima A., Ikeda T., Kurumatani K., Indoor emergency evacuation service on autonomous navigation system using mobile phone. Proc 2nd Int Symp Univers Commun ISUC 2008. 2008;79–85.
 - [38] Chittaro L., Nadalutti D., Presenting Evacuation Instructions on Mobile Devices by means of Location-Aware 3D Virtual Environments Evaluation design. MobileHCI 2008. 2008;1–4.
 - [39] Szwedko J., Shaw C., Connor A.G., Labrinidis A., Chrysanthis P.K., Demonstrating an evacuation algorithm with mobile devices using an e-scavenger hunt game. Proc Eighth ACM Int Work Data Eng Wirel Mob Access - MobiDE '09. 2009;49.

-
- [40] Chu L. A RFID-based hybrid building fire evacuation system on mobile phone. Proc - 2010 6th Int Conf Intell Inf Hiding Multimed Signal Process IHHMSP 2010. 2010;155–8.
 - [41] Chen LW, Chung JJ, Liu JX. GoFAST: A group-based emergency guiding system with dedicated path planning for mobile users using smartphones. Proc – 2015 IEEE 12th Int Conf Mob Ad Hoc Sens Syst MASS 2015. 2015;467–8.
 - [42] Bernardini G, Azzolini M, D’Orazio M, Quagliarini E. Intelligent evacuation guidance systems for improving fire safety of Italian-style historical theatres without altering their architectural characteristics. J Cult Herit. Elsevier Masson SAS; 2016;22:1006–18.
 - [43] Hsu HP, Yu KM, Chine ST, Cheng ST, Lei MY, Tsai N. Emergency evacuation base on intelligent digital signage systems. Proc - 2014 7th Int Conf Ubi-Media Comput Work U-MEDIA 2014. 2014;243–7.
 - [44] D’Orazio M, Longhi S, Olivetti P, Bernardini G. Design and experimental evaluation of an interactive system for pre-movement time reduction in case of fire. Autom Constr. Elsevier B.V.; 2015;52:16–28.
 - [45] Ferscha A, Zia K. On the efficiency of lifebelt based crowd evacuation. Proc - IEEE Int Symp Distrib Simul Real-Time Appl DS-RT. 2009;13–20.