

BADANIA WYBRANYCH SYSTEMÓW LOKALNEGO POZYCJONOWANIA W PRZESTRZENI

Sławomir ZATOR

Streszczenie: W pracy przedstawiono systemy lokalnego pozycjonowania obiektów w przestrzeni wykorzystujące różnice prędkości rozchodzenia się fali radiowej i ultradźwiękowej. Położenie obiektu w trójwymiarowej przestrzeni określono metodą trilateracji. Przedstawiono wyniki badań systemów opartych o moduły firmy Hexamite oraz wpływ położenie stacji bazowych na niepewność wyznaczania współrzędnych nieruchomego obiektu.

Słowa kluczowe: pozycjonowanie obiektów, pomiar ultradźwiękowy, niepewność pomiaru położenia

1. Wprowadzenie

Współcześnie testowanych i opracowywanych jest wiele systemów śledzenia i lokalizacji osób oraz obiektów. Ich użyteczność sprawia, że zaczęto opracowywać systemy dedykowane dla obiektów zamkniętych.

Jednymi z najdokładniejszych współcześnie stosowanych systemów, pozwalających uzyskać niepewność wyznaczania współrzędnych na poziomie poniżej 1 mm, są laserowe systemy optyczne (np. tachimetry śledzące), ale warunkiem uzyskania pomiaru tą metodą jest konieczność „widzenia” celu. Często warunki pomiaru, np. przemieszczający się ludzie sprawiają, że pojawiają się „martwe” strefy pomiaru [10].

Drugi rodzaj systemów wykorzystuje fale radiowe bądź podczerwone, które dobrze funkcjonują w przestrzeniach otwartych. We wnętrzach mogą występować błędne odczyty położenia, wskutek wielokrotnych odbić fal elektromagnetycznych.

Ostatnia grupa systemów lokalnego pozycjonowania to systemy wykorzystujące fale ultradźwiękowe. Są one przedmiotem opracowań w wielu ośrodkach naukowych [1,4,6,8]. Ze względu na ich przeznaczenie można wyróżnić systemy:

- nawigujące – określają bieżące położenie oraz drogę do celu przemieszczającym się obiektom na planie danego budynku;
- lokalizujące (śledzące) – określające położenie obiektu w przestrzeni, względem przyjętego układu odniesienia;
- nawigująco-lokalizujące – łączą mechanizmy umożliwiające jednoczesne śledzenie i nawigację obiektu.

Ze względu na zastosowanie systemy śledzące można podzielić na:

- zabezpieczenia mienia w systemach alarmowych, gdy potrzebny jest pełny nadzór nad położeniem zabezpieczonego przedmiotu;
- lokalizację osób w obrębie danego budynku np. dzieci w muzeum lub pilnie strzeżonych więźniów, mogących zmieniać swoje położenie jedynie w pewnym zakresie,

a w przypadku przekroczenia dozwolonej granicy system może pozwolić na bardzo szybkie zlokalizowanie konkretnej osoby;

- monitorowanie położenia narzędzi bądź przedmiotów pracy w przemyśle, gdzie potrzebny jest ciągły nadzór nad przebiegiem procesu produkcyjnego.

Zastosowania systemów nawigujących to m.in.:

- pomoc w odnalezieniu drogi do najbliższego wyjścia w budynkach użyteczności publicznej, pomoc w odnalezieniu najbliższej apteczki pierwszej pomocy bądź gaśnicy w nagłych sytuacjach, gdy liczy się każda minuta,
- pomoc w odnalezieniu szukanego pomieszczenia, bądź miejsca osobom nieznaną strukturą budynku, system umożliwia odnalezienie siedziby firmy w wielkim biurowcu, pokoju kierownika lub szukanego sekcji w magazynie.

Systemy tego typu mogą służyć nie tylko jako systemy nawigacji ludzi, ale także robotów. Opracowywane eksperymentalne systemy lokalnego pozycjonowania potrafią obecnie lokalizować położenie obiektu z niepewnością do kilku centymetrów.

2. Zasada działania systemów lokalizacji

2.1. Metody lokalizacji

Istniejące systemy lokalizacji korzystają z różnych sposobów określania położenia, bazując na informacji o punktach odniesienia oraz na:

- pomiarach odległości – jest to najczęściej stosowana technika określania położenia obiektu, wykorzystuje metodę trilateracji (tak jak GPS), w której wymagana jest znajomość minimum trzech odległości;
- pomiarach kątów – a do określania położenia obiektu wykorzystuje metodę triangulacji, w której wymagana jest znajomość minimum trzech kątów;
- pomiarach jednej odległości i dwóch kątów – stosowane w tachimetrach śledzących;
- pomiarze pomocy sygnału – punkty odniesienia wysyłają sygnał (najczęściej drogą radiową lub w podczerwieni) a położenie obiektu jest określane poprzez pomiar mocy odebranego sygnału.

Do pomiaru odległości d pomiędzy obiektem a punktami odniesienia obecnie stosowane są głównie dwie techniki [3, 5, 9]. Pierwsza metoda, zwana też pomiarem czasu przelotu TF (ang. time-of-flight), polega na pomiarze czasu t , jaki upłynął od wysłania sygnału z punktu odniesienia do odbioru w lokalizowanym punkcie.

$$d = V \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

V – prędkość sygnału,

d – odległość pomiędzy punktem odniesienia a obiektem.

W drugiej metodzie, pomiaru różnicy czasu odebrania sygnału TDA (ang. time difference of arrival), pomiar odległości pomiędzy punktem odniesienia i odbiornikiem odbywa się przy użyciu dwóch sygnałów (np. radiowego RF i ultradźwiękowego US), o różnych prędkościach. Rozpatrując sygnały RF i US propagujące z prędkościami V_{FR} i V_{US} , wysyłane równocześnie przez nadajnik, przy czym $V_{FR} > V_{US}$, otrzymuje się równanie (2):

$$d = \Delta t \frac{V_{RF} \cdot V_{US}}{V_{RF} - V_{US}} \quad (2)$$

w którym:

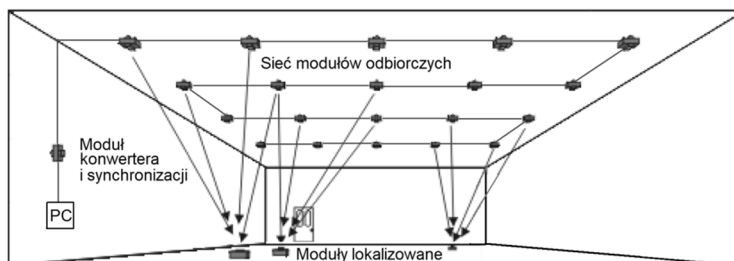
Δt – różnica czasu dotarcia sygnałów do odbiornika,

V_{US} – prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej,

V_{RF} – prędkość rozchodzenia się fali radiowej.

Systemy LPS wykorzystują dwa rodzaje modułów. W trybie śledzenia układ lokalizowany to zazwyczaj moduł nadawczy wysyłający cyklicznie krótki impuls ultradźwiękowy, docierający do przynajmniej trzech modułów odbiorczych. Na podstawie pomiaru czasu propagacji określone jest położenie obiektu wysyłającego sygnał akustyczny [1]. Układy odbiorcze muszą mieć zapewnioną łączność z jednostką centralną, która oblicza położenie obiektu. W trybie lokalizacji na obiekcie, który chce określić swoje położenie jest instalowany moduł odbiorczy, a sygnały akustyczne wysyła sieć modułów nadawczych, określane często mianem baz, stacji bazowych lub latarni (ang. *ultrasound beacon*). Konieczne jest zapewnienie synchronizacji układów nadawczych, z użyciem przewodów lub łącza radiowego. Spotkać można także rozwiązania, w których wykorzystuje się tzw. transceivery ultradźwiękowe (układy nadawczo-odbiorcze), dzięki czemu system może pracować w dowolnym trybie [8].

Systemy lokalizacji dedykowane dla obiektów zamkniętych wykorzystują sieć czujników (nadajników / odbiorników) zainstalowanych na ścianach lub sufitach danego pomieszczenia lub pomieszczeń budynku, tak jak to przedstawia rys 1.

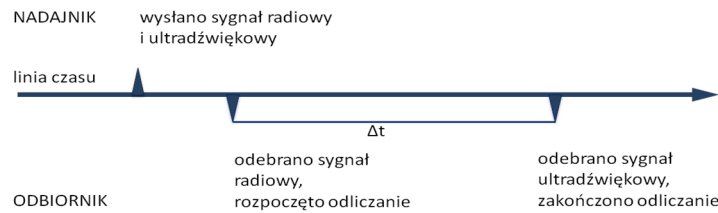


Rys. 1. Sieć modułów w LPS

3.1. Systemy ultradźwiękowo-radiowe

W istniejących doświadczalnych systemach do przekazywania sygnału referencyjnego wykorzystywany jest najczęściej sygnał radiowy. Podstawą obliczenia położenia jest pomiar czasu, w którym następuje detekcja sygnału przez kolejne odbiorniki. Uwzględniając opóźnienia, jakie występują pomiędzy wysłaniem przez nadajnik sygnałów a jego odbiorem przez poszczególne odbiorniki oraz różnicę prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych i elektromagnetycznych można z dużą dokładnością zlokalizować obiekt w przestrzeni.

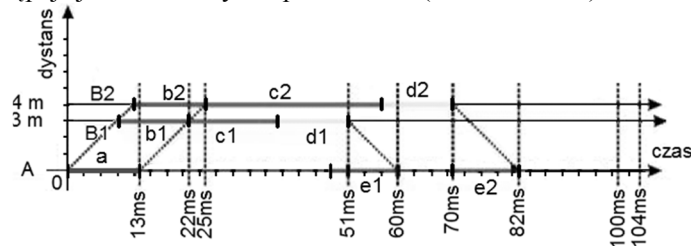
Diagram czasowy przedstawiony na rys. 2 pokazuje, w jaki sposób wyznacza się różnicę czasu Δt , który upłynął pomiędzy odbiorem sygnału ultradźwiękowego i radiowego przez odbiornik.



Rys. 2. Detekcja sygnałów przez odbiornik oraz wyliczanie różnicy czasów Δt

3.2. System ultradźwiękowy

Ideę pomiaru odległości, pozwalającą na wyznaczanie współrzędnych przestrzennych, bez korzystania z dodatkowego kanału (radiowego, optycznego), na podstawie których są wyznaczane czasy propagacji ultradźwięków pomiędzy obiektem lokalizowanym a bazami, przedstawiono na rys. 3. Z przetwornika ultradźwiękowego lokalizowanego modułu wysyłany jest sygnał o częstotliwości nośnej (zwykle 40 kHz) zmodulowany „zapytaniem” zawierającym numer modułu A, oraz dodatkową pustą ramkę, który trwa łącznie około 13 ms (odcinek a). Dociera on do modułów B1 i B2 (odcinki b1 i b2) z opóźnieniem zależnym od odległości, tu 3 i 4 metry (asynchronicznie). Moduły odbierają sygnał, dodają do niego własny kod, w miejscu pustej ramki i wysyłają (odcinki d1 i d2). Wysłanie następuje jednak z różnymi opóźnieniami (odcinki c1 i c2).



Rys. 3. Idea pomiaru czasu propagacji z użyciem tylko sygnału ultradźwiękowego

Dzięki temu, do układu, który określa swoją pozycję odpowiedzi nie docierają równocześnie (odcinki e1 i e2). Aby nie zachodziła koincydencja sygnałów muszą być zachowane odpowiednie zależności czasowe, wiążące maksymalne opóźnienie i czas propagacji. Odejmując od czasu zakończenia odbierania sygnału z danej bazy czas zakończenia wysyłania zapytania oraz czas opóźnienia przypisany danej bazie otrzymujemy podwojony czas propagacji sygnału ultradźwiękowego.

Ze względu na to, że podczas pracy systemu może następować przesłanianie baz ultradźwiękowych, mogą występować okresowe zaniki odpowiedzi. Dla zapewnienia ciągłości wyznaczania współrzędnych konieczne jest zatem zainstalowanie większej ich liczby i takie ich rozlokowanie, aby przypadki braku jednoczesnego dostępu do 3 baz były sporadyczne.

3.3. Określanie położenia w systemach z 3 bazami

Położenie obiektu w trójwymiarowej przestrzeni, określa się metodą trilateracji. Aby wyznaczyć współrzędne położenia obiektu tą metodą wymagana jest znajomość położenia,

co trzech punktów referencyjnych (stacji bazowych) o współrzędnych x_i, y_i, z_i . Znając odległości, jakie dzieli lokalizowany obiekt od detektorów oraz ich współrzędne można wyznaczyć jego położenie rozwiązując układ równań (1). Rozwiązanie jest poprawne jeżeli nie występują błędy pomiarów. W przestrzeni problem trilateracji sprowadza się do znalezienia punktów przecięcia się trzech sfer.

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2)} \\ d_2 &= \sqrt{((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2)} \\ d_3 &= \sqrt{((x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2)} \end{aligned} \quad (1)$$

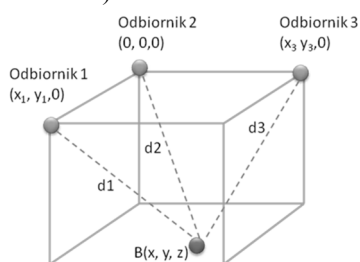
gdzie:

x, y, z – współrzędne obiektu,

x_i, y_i, z_i – współrzędne punktów odniesienia, dla $i=1, 2, 3$,

d_i, d_i, d_i – odległość od punktów odniesienia do obiektu.

Przyjmując założenie, że sfery znajdują się w jednej płaszczyźnie ($z=0$) oraz środek jednej z nich umiejscowiony jest w początku przyjętego układu współrzędnych (rys. 4), układ równań oraz rozwiązania układu można sprowadzić do mniej skomplikowanych postaci (2). Rozwiązując równanie otrzymuje się dwie pary współrzędnych (x, y, z). Eliminuje się to rozwiązanie, które znajduje się po niewłaściwej stronie płaszczyzny odniesienia (na zewnątrz pomieszczenia).



Rys. 4. Założenia dotyczące rozmieszczenia detektorów

$$\begin{aligned} x &= \frac{d_2^2 \cdot (y_3 - y_1) - d_1^2 \cdot y_3 + d_3^2 \cdot y_1 - y_3(y_3 \cdot y_1)}{2 \cdot (y_3 \cdot x_1 - x_3 \cdot y_1)} \\ y &= \frac{d_2^2 \cdot (x_3 - x_1) - d_1^2 \cdot x_3 + d_3^2 \cdot x_1 - x_3^2 \cdot x_1 + x_3(x_1^2 + y_1^2) - y_3^2 \cdot x_1}{2 \cdot (x_3 \cdot x_1 - x_3 \cdot x_1)} \\ z &= \sqrt{d_1^2 - x^2 - y^2} \end{aligned} \quad (2)$$

3.4. Określanie pozycji obiektu w systemach wieloma bazami

W przypadku większej liczby baz oraz w obecności nieuchronnych błędów pomiaru, formułuje się układ równań (3) opisujący odległości od baz do obiektu.

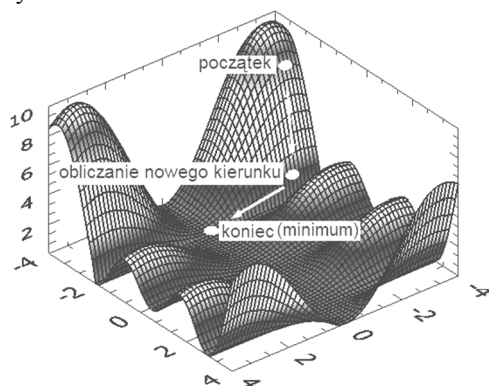
$$d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \text{ dla } i = 4 \dots N \quad (3)$$

Aby wyznaczyć położenie poszukiwanego punktu wykorzystuje się optymalizację nieliniową, definiując residuum (4) dla każdego i -tego detektora oraz błąd średni kwadratowy E zgodnie z równaniem (5),

$$e(i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - d_i \text{ dla } i = 3 \dots N, \quad (4)$$

$$E = \sum_{i=1}^n e(i)^2, \quad (5)$$

którego minimum określa z największym prawdopodobieństwem poszukiwaną współrzędną x, y, z . Rozpoczęcie obliczeń metodą iteracyjną można rozpocząć dla położenia wyznaczonego na podstawie rozwiązania układu równań (2) wybierając dowolne trzy bazy z pośród N . Do wyznaczania minimum błędu średniego kwadratowego położenia E zaimplementowano metodę gradientową Fletchera-Reevesa, której zasadę działania graficznie przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Działanie metody gradientowej Fletchera-Reevesa

4. Niepewność wyznaczenia pozycji

4.1. Niepewność pomiaru wynikająca z warunków mikroklimatu pomieszczenia

W systemach ultradźwiękowych dominującym źródłem niepewności jest nieznaną dokładnie prędkość dźwięku, ponieważ zależna jest ona od przestrzennego rozkładu temperatury, a ten nie jest dokładnie znany. Dla suchego powietrza przy ciśnieniu atmosferycznym 0,1 MPa, prędkość dźwięku od temperatury t (w 0°C) opisuje zależność (6) [2]:

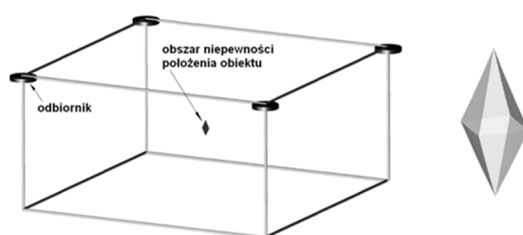
$$c = 331,82(1 + 1,83 \cdot 10^{-3} t) \quad (6)$$

Wraz ze wzrostem ciśnienia gazu, będącego z dala od punktu krytycznego, prędkość dźwięku zwiększa się. Dla powietrza wzrost ten wynosi około $2 \text{ ms}^{-1}\text{MPa}^{-1}$, chociaż zależność ta nie jest ściśle liniowa. Ponadto prędkość dźwięku wzrasta prawie liniowo wraz

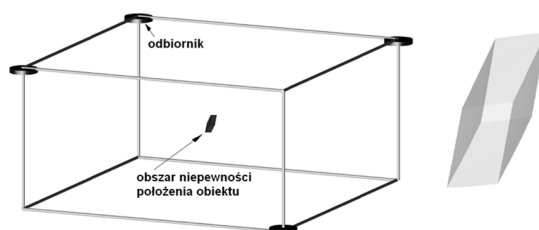
ze zwiększaniem się zawartości pary wodnej. Wzrost prędkości dźwięku spowodowany maksymalną wilgotnością jest mniejszy niż 1%. Wymienione wyżej czynniki nie pozwalają na dokładne obliczeniowe skorygowanie przyjmowanej do obliczeń prędkości dźwięku.

4.2. Oszacowanie niepewności wynikającej z położenia baz

Na liczbę wyliczanych pozycji i geometryczny kształt obszaru niepewności istotny wpływ ma wybór położenia baz. Kształty obszarów wyznaczonych dla niepewności granicznej poszukiwanej współrzędnej, obliczone dla takiego samego położenia wyznaczonego z równań (3) i (4) i dla takiej samej niepewności wyznaczania odległości są różne. Uwidaczniają je powierzchnie graniczne brył widocznych na rysunkach 6 i 7 [12].



Rys. 6. Położenie lokalizowanego obiektu dla czterech odbiorników w jednej płaszczyźnie oraz kształt obszaru niepewności granicznej



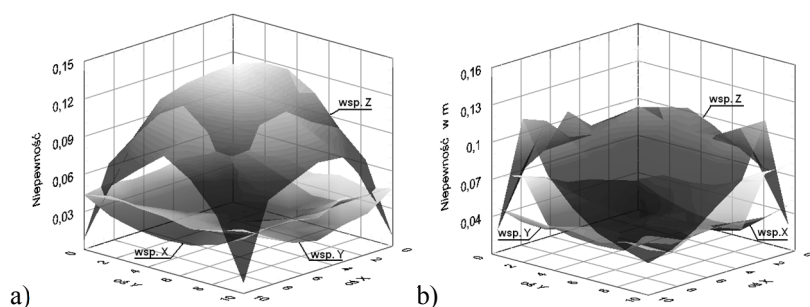
Rys. 7. Położenie lokalizowanego obiektu dla czterech odbiorników w dwóch płaszczyznach oraz kształt obszaru niepewności granicznej

W opublikowanych informacjach o zbudowanych systemach zwykle niepewność pomiaru podawana jest dla ustalonych położenia baz, a wyniki dotyczą warunków pomiaru zbliżonych do idealnych. Podawane są jedynie wyniki maksymalnej niepewności określania położenia jako promień sfery. Często położenie obiektu, które LPS ma wyznaczyć, ma określoną jedną ze współrzędnych (np. płaszczyznę Z).

Do oszacowania niepewności położenia w takich warunkach wykorzystano środowisko LabView, w którym obliczenia wykonano dla obszaru w kształcie sześcianu o boku 10 m. Przy szacowaniu niepewności uwzględniono multiplikatywne składniki związane z niepewności prędkości dźwięku i jej fluktuacją wynikającą z nieznanego rozkładu temperatury powietrza. Przyjęto niepewność graniczną wyznaczania prędkości dźwięku na poziomie 0,1% (przez pomiar bezpośredni czasu i przy znanej odległości) i niepewność rozkładu temperatury 2°C. Składnik addytywny niepewności mierzonej odległości wynika z niepewności pomiaru czasu propagacji impulsu ultradźwiękowego. Do obliczeń przyjęto

ją jako połowę okresu, dla typowej częstotliwości $f = 40$ kHz. Obliczenia wykonano dla 4 baz.

Na rys. 8a przedstawiono wyniki obliczeń niepewności pomiaru współrzędnych X , Y i Z wykonanych dla stałej wartości współrzędnej $Z=9$ m i baz leżących w jednej płaszczyźnie.



Rys. 8. Porównanie niepewności wyznaczania współrzędnej Z z niepewnościami współrzędnych X i Y (w metrach) dla czterech odbiorników w jednej płaszczyźnie (a) i dwóch płaszczyznach (b) dla współrzędnej $Z=9$ m

W analizowanym przypadku, gdy lokalizowany obiekt znajduje się w płaszczyźnie odległej o 9 metrów od płaszczyzny czujników, niepewności wyznaczenia współrzędnych X oraz Y wahają się od 2 do 5 cm. Dla baz leżących w dwóch płaszczyznach (rys. 8b) wartości niepewności wszystkich współrzędnych z tego samego przedziału osiąga wartości od (1-7) cm. Wartość niepewności jest też o około 15% mniejsza niż w przypadku, gdy wszystkie detektory znajdują się w jednej płaszczyźnie.

5. Przegląd systemów LPS

5.1. System Bat

System Bat jest eksperymentalnym projektem opracowanym w Cambridge [6]. Jest to system ultradźwiękowo-radiowy, służący do lokalizacji i monitorowania osób w rozległych obiektach zamkniętych. System Bat wykorzystuje metodę trilateracji. Lokalizowany obiekt czy osoba posiada osobisty nadajnik (ang. Bat), skąd nazwa systemu, który emituje krótkie sygnały ultradźwiękowe odbierane przez statyczne sensory znajdujące się na sufitach danego pomieszczenia. Detektory rozmieszczone są w odległości 1,2 m od siebie i połączone są w sieć, przy pomocy interfejsu szeregowego. Każdy identyfikator (Bat) noszony przez użytkownika, posiada unikalny 48 bitowy kod, dwukierunkowy radio-nadajnik 433 MHz, który umożliwia komunikowanie się z głównym kontrolerem systemu.

Nadrzędny system, który pełni rolę kontrolera nadzoruje działanie identyfikatorów oraz czujników w systemie. Kiedy dany obiekt ma być zlokalizowany komputer sterujący wysyła drogą radiową unikatowy identyfikator obiektu, który ma wyemitować sygnał ultradźwiękowy, w określonym momencie. Kontroler łączy dane dotyczące numeru identyfikowanego obiektu z jego położeniem i przesyła je do aplikacji. Autorzy systemu podają, że system Bat pozwala na jednoczesne lokalizowanie 75 obiektów na przestrzeni 1000 m^2 z dokładnością do 3 centymetrów.

5.2. System Cricket

Cricket jest system lokalizacji opracowanym w MIT [1, 4, 7], który pozwala na precyzyjne określenie położenie obiektu i dostarcza tę informację aplikacjom, uruchomionym na przenośnych urządzeniach, takich jak: laptop, palmtop, PDA. Działanie systemu opiera się na rozmieszczeniu czujników: nadajników i odbiorników na ścianach lub sufitach pomieszczeń danego budynku, podobnie jak w systemie Bat. Aby określić położenie obiektu, wykorzystuje się identyfikatory przestrzeni oraz współrzędne kartezjańskie. Nadajniki wysyłają z zadaną częstotliwością dane dotyczące swojego położenia do odbiornika, wykorzystując do tego kanał radiowy. Równocześnie z sygnałem radiowym jest nadawany sygnał ultradźwiękowy odbierany przez odbiornik. Do określenia odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem jest wykorzystywana różnica prędkości rozchodzenia się fali radiowej i ultradźwiękowej.

Odbiornik określa swoje położenie na podstawie odległości, dzielących go od poszczególnych nadajników, których lokalizacja jest znana. W ten sposób działa system śledzenia oparty o konfigurację wielu nadajników i odbiornik. System dostarcza informacji o odległości z precyzją pozycjonowania od 1 do 3 centymetrów, przy zerowej prędkości obiektu. Zarówno system Bat jak i Cricket wymagają przewodowego połączenia latarni ultradźwiękowych.

5.3. Systemy Hexamite

System Hexamite najnowszej generacji HX19 [8] jest systemem ultradźwiękowo-radiowym z bezprzewodowym systemem komunikacji pomiędzy latarniami ultradźwiękowymi. Poprzednie wersje HX900, HX5 i HX11 wymagały podobnie jak systemy Bat i Cricket przewodowego łączenia baz. Od systemu HX5 została udoskonalona technika pozycjonowania, poprzez dwóch trybów pracy (określanych jako asynchroniczny i synchroniczny), dzięki którym każdy czujnik w sieci mógł określać swoją odległość od sąsiadujących z nim czujników.

Systemy firmy Hexamite umożliwiają zarówno lokalizowanie się obiektów w zadanym obszarze, jak i monitorowanie ich położenia przez układ nadrzędny. Komputery typu laptop lub PDA przyłączone do dowolnego czujnika w sieci, mogą uzyskać dane o wszystkich pomiarach.

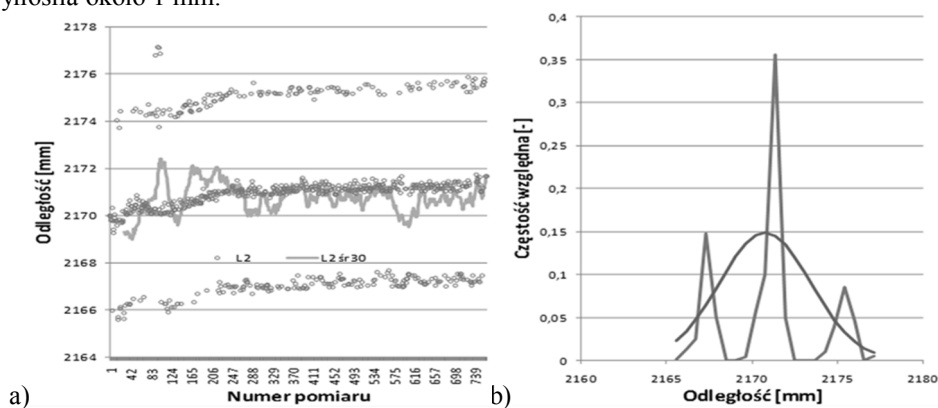
6. Badania systemów Hexamite

6.1. System HX11

Wg danych technicznych producenta, system HX11 pozwala na określenie położenia obiektu z niepewnością 9 mm, przy czym możliwa jest rejestracja do 20 położen na sekundę przez każdy odbiornik, na przestrzeni nawet pół kilometra kwadratowego. Komponenty systemu Hexamite są obecnie jedynymi dostępnymi komercyjnie elementami (OEM), pozwalającymi zbudować ultradźwiękowy systemem lokalnego pozycjonowania.

W trakcie testowania okazało się, że wykonywanie dłuższych serii pomiarów nie poprawia, tak jak oczekiwano dokładności wyników określania pozycji znaczników. Ze względu na dyskretyzację odczytów uzyskany rozkład częstości nie podlegał rozkładowi normalnemu. (rys. 9b). Dla ustalenia wyniku pomiaru można wykorzystać centralne maksimum rozkładu, o największej amplitudzie, odpowiadające średniej wartości

mierzonej odległości. Niepewność pomiaru odległości na podstawie serii pomiarów wynosiła około 1 mm.



Rys. 9. Wyniki pomiarów systemu HX11 odległości (a) i rozkład częstości (b) dla stałej odległości

6.2. System HX19

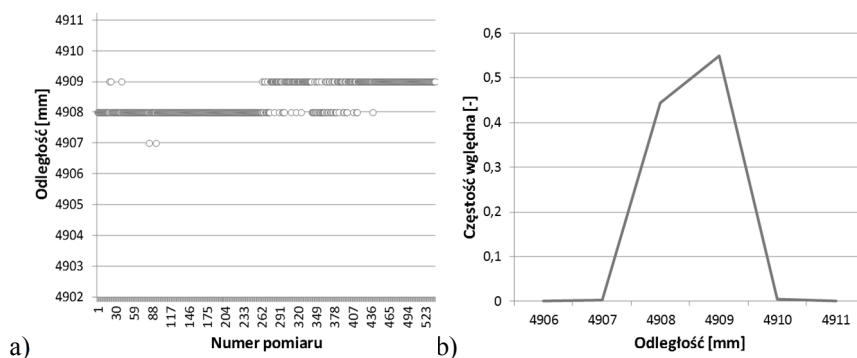
Druga wersja testowanego ultradźwiękowego systemu pozycjonowania opierała się na modułach serii HX19 (rys. 10). Do precyzyjnego określenia pozycji aktywnego modułu system wykorzystuje technikę radiową RFID (ang. radio frequency identification) połączoną z systemem ultradźwiękowym USID (ang. ultrasonic identification). Praktycznie uzyskiwany zasięg systemu wynosi 14 metrów, przy standardowo 1 mm niepewności wyznaczenia odległości. Liczba jednocześnie lokalizowanych markerów, dla rozległego systemu, może wynosić ponad tysiąc. Określenie pozycji tzw. taga HX19TX (nadajnika), w systemie

o niewielkim zasięgu, wymaga minimum trzech odbiorników HX19RX (wskazane jest użycie czterech dla uzyskania redundancji) oraz układu do synchronizacji HX19MS, który komunikuje się poprzez port szeregowy USB z PC.



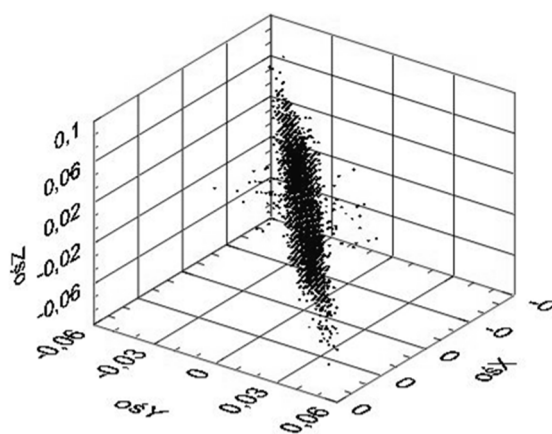
Rys. 10. Elementy systemu Hexamite HX19

W systemie HX19 na podstawie serii pomiarów czasu propagacji obliczone odległości podlegają rozkładowi normalnemu (rys. 11b). Wielokrotnie wykonywane pomiary potwierdziły wysoką dokładność pomiaru odległości w warunkach referencyjnych (przy stałej i znanej temperaturze).



Rys. 11. Wyniki pomiarów sytemu HX19 odległości (a) i rozkład częstości (b) dla stałej odległości

Różnica wskazań dalmierza laserowego i układu pomiarowego Hexamite HX19 wynosiła maksymalnie 2 mm dla odległości 14 metrów, przy niepewności pomiaru odległości dalmierzem wynoszącym 1 mm. Na podstawie serii ponad tysiąca pomiarów wyznaczono obszar błędów wyznaczania współrzędnych, otrzymany dla nierównomierności rozkładu temperatury wynoszącego 2 K (rys. 12). Obszar, w którym wystąpił rozrzut błędów pomiaru, odpowiadał wyznaczonym numerycznie obszarowi niepewności pokazanej na rys. 6.



Rys. 12. Wyznaczony obszar niepewności wyznaczania współrzędnych (w metrach) otrzymany dla nierównomierności rozkładu temperatury, wynoszącego 2 K

Aby uzyskać wysoką dokładność pomiaru, przy zmiennych i nieznanymi warunkach termicznych, zastosowano autokalibrację systemu. W tym celu wprowadzono do systemu pomiarowego dodatkowy nadajnik w znanej odległości od jednego z odbiorników. Powinien on znajdować się w pobliżu nadajników, których pozycja jest monitorowana, lecz nie powinien się przemieszczać. Informację o tej odległości wprowadzono do systemu pomiarowego, co pozwoliło uzyskać niepewność wyznaczania współrzędnych poniżej 3 mm.

7. Podsumowanie

Przedstawione wyniki oszacowania zarówno obszaru przestrzennego, w którym może znajdować się lokalizowany obiekt, jak i wartości niepewności tej lokalizacji, wskazują na istotny problem wyboru położenia układów odbiorczych, na które to zagadnienie należy zwrócić uwagę. Zaproponowana metoda rozwiązania tego problemu oraz stworzone narzędzie pozwalają przewidzieć skutki przyjętego rozmieszczenia układów odbiorczych w systemach LPS. W przypadku, gdy współrzędne lokalizowanego obiektu mają ustaloną jedną współrzędną korzystniejszym rozwiązaniem jest rozmieszczenie detektorów ultradźwiękowych w jednej płaszczyźnie. Wykorzystanie typowego rozmieszczenia nadajników w węzłach regularnej sieci nie zawsze jest możliwe, a dla niektórych położen uzyskuje się znacznie większe niepewności od oczekiwanych. Niepewność określania współrzędnych zmienia się dwu a nawet trzykrotnie.

Literatura

1. Baliga R. B.: Coordinate System Creation and Mapping Using Crickets, M. Eng. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 06.2004, strona internetowa: <http://cricket.csail.mit.edu/roshan-thesis.pdf>
2. Malecki I.: Teoria fal i układów akustycznych, PWN, Warszawa, 1964
3. Obraz J.: Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT, Warszawa, 1983
4. Priyantha B.: The Cricket Indoor Location System, Massachusetts Institute of Technology, 06.2005, strona internetowa: <http://nms.lcs.mit.edu/papers/bodhi-thesis.pdf>
5. Smith A., Balakrishnan H., Goraczko M., Priyantha N.: Tracking Moving Devices with the Cricket Location System, Proc. 2nd Usenix/acm Mobisys Conf., Boston, MA, 06.2004, strona internetowa: http://nms.lcs.mit.edu/papers/tracking_mobisys04.pdf
6. System BAT, witryna internetowa: <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>
7. System CRICKET, witryna internetowa: <http://cricket.csail.mit.edu/>
8. System HEXAMITE, witryna internetowa: <http://www.hexamite.com/>
9. Welch M.: Techniques for angle estimation in ultrasonic positioning systems, 29.11.2005, strona internetowa: <http://ubicomp.lancs.ac.uk/~martyn/welch05.pdf>
10. Zator S.: Hybrydowy system lokalnego pozycjonowania w przestrzeni, Energetyka, nr 10/2008, s. 677-679
11. Zator S.: Systemy lokalnego pozycjonowania w gospodarce remontowej kotłowni, Zeszyty Naukowe Pol. Opolskiej Nr 295/2006, Seria Elektryka z.59 t.2, Wyd. Politechniki Opolskiej, s. 733-739
12. Zator S.: Wpływ położenia detektorów na niepewność określania pozycji obiektu w systemach lokalnego pozycjonowania, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 12/2007, s. 67-69

Dr hab. inż. Sławomir Zator

Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów / Katedra Zarządzania Energetyką

Politechniki Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki

45-036 Opole, ul. Luboszycka 5

tel.: (+48) 77 44 98 746

e-mail: s.zator@po.opole.pl