Stanowisko badawcze do weryfikacji metod identyfikacji ruchomych obiektów

Jarosław MOCZARSKI¹

Streszczenie

Wykorzystanie nowoczesnych technik pozyskiwania i analizy danych umożliwia tworzenie nowych, innowacyjnych rozwiązań w obszarze kolejowych systemów transportowych. Umiejętność identyfikacji elementów taboru oraz kontroli położenia przewożonych ładunków umożliwia również wykrywanie występujących nieprawidłowości, predykcję potencjalnych zagrożeń i wdrażanie procedur zapewniających bezpieczeństwo procesu transportowego.

Do oceny możliwości identyfikacji konturów taboru kolejowego i ładunków, z wykorzystaniem dostępnych na rynku sensorów oraz systemów wizualizacji sygnałów pomiarowych, zbudowano stanowisko badawcze wyposażone w punktowe i liniowe czujniki laserowe oraz laserowe systemy wizyjne. Konfiguracja stanowiska badawczego pozwala także na prowadzenie eksperymentów z wykorzystaniem sensorów analogowych i cyfrowych.

Słowa kluczowe: identyfikacja obiektów, sensory laserowe, ocena kształtu i położenia, rozpoznawanie taboru i ładunków

1. Wprowadzenie

Do kierowania i sterowania ruchem kolejowym niezbędne są informacje o aktualnym położeniu pociągów na liniach i na stacjach. Często wymagane są informacje dotyczące lokalizacji poszczególnych wagonów i ładunków (na sieci kolejowej, stacjach rozrządowych, terminalach kontenerowych, punktach ładunkowych itp.), ułatwiające bezpieczne i efektywne prowadzenie prac. Istotne dla bezpieczeństwa przewozów są informacje dotyczące ciągłości składu (stwierdzanie końca pociągu), skrajni taboru i ładunków, a także umiejętność wykrywania przesunięć (zmian położenia) ładunków na pojeździe.

W zagranicznych zarządach kolejowych stosowane jest precyzyjne pozycjonowanie wagonów pasażerskich na stacjach i przystankach. Szczególnie w warunkach dużego natężenia ruchu (np. w przewozach aglomeracyjnych), potrzebna jest dokładna identyfikacja pociągów: ich położenie (kolejność pociągów na linii), sekwencja wagonów, a także lokalizacja elementów taboru (np. drzwi wejściowych do wagonów) [2].

Aktualnie, wykrywanie obecności taboru w określonych miejscach stacji i linii polega na kontroli zajętości odcinków torów i rozjazdów. Lokalizacja taboru jest także realizowana w sposób punktowy przez wykrywanie zestawów kołowych, natomiast identyfikacja taboru i ładunków odbywa się wzrokowo, np. przez ocenę kształtu, koloru, rozmiarów, odczyt numeru ewidencyjnego, obserwację sygnałów końca pociągu i analizę dokumentów przewozowych.

Automatyczne wykrywanie i identyfikacja taboru lub innych obiektów (np. ładunków) z zastosowaniem bezkontaktowych metod detekcji umożliwia wdrażanie rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo ruchu kolejowego oraz wdrażanie automatyzacji procesów ładunkowych. Do identyfikacji poruszających się obiektów są wykorzystywane różne metody pozyskiwania i analizy danych. Najczęściej są stosowane kody paskowe lub technologia RFiD (*Radio Frequency Identification*). Ich zastosowanie w transporcie szynowym jest ograniczone koniecznością ocechowania każdego obiektu odpowiednim identyfikatorem. Istniejących ograniczeń można uniknąć stosując sensory laserowe, a w szczególności systemy wizyjne wykorzystujące metodę aktywnego skanowania laserowego. Umożliwiają one wykrywanie oraz identyfikację przemieszczających się obiektów przez ocenę ich kształtu i rozmiarów.

2. Stanowisko badawcze: sprzętowo--programowa platforma pomiarowa

Do oceny przydatności sensorów laserowych w procesie identyfikacji przemieszczających się obiektów zbudowano stanowisko badawcze wyposażone w barierę pomiarową, zespół dalmierzy punktowych oraz systemy wizyjne. Stanowisko ba-

¹ Dr hab. inż. prof. instytutu; Instytut Kolejnictwa; e-mail: jmoczarski@ikolej.pl.

dawcze zabudowane i uruchomione w pomieszczeniu laboratorium Instytutu Kolejnictwa tworzą: tor pomiarowy i ruchoma płaszczyzna badawcza (rys. 1) oraz sprzętowo-programowa platforma pomiarowa, wyposażona w sensory laserowe.



Rys. 1. Tor pomiarowy z ruchomą płaszczyzną badawczą [fot. autor]

Stanowisko badawcze jest przeznaczone do obserwacji poruszających się obiektów oraz badania możliwości ich automatycznej identyfikacji. Umożliwia ocenę przydatności różnych sensorów pomiarowych, a także określenie zasad ich konfiguracji przestrzennej w procesie identyfikacji poruszających się obiektów. Konstrukcja stanowiska badawczego umożliwia prowadzenie eksperymentów z wykorzystaniem sensorów analogowych i cyfrowych. Podczas obserwacji poruszających się obiektów, są tworzone ich modele cyfrowe, które stanowią wzorce, wykorzystywane następnie w procesie wykrywania oraz identyfikacji. Dokładność tworzonych modeli, a także efektywność identyfikacji zależą zarówno od parametrów poszczególnych sensorów, ich liczby, położenia względem powierzchni obserwowanych obiektów, konfiguracji przestrzennej, jak również kształtu obiektów, prędkości przemieszczania, materiału z którego są wykonane, faktury powierzchni i wielu innych czynników.

Podczas badań wykorzystywano modele obiektów – bryły geometryczne imitujące rzeczywiste elementy taboru kolejowego i przewożonych ładunków. Do tworzenia modeli cyfrowych badanych obiektów oraz ich późniejszej identyfikacji przygotowano specjalizowaną aplikację komputerową, funkcjonującą w środowisku programistycznym Matlab. Aplikacja wykorzystuje funkcje projektowania, implementacji, wizualizacji i symulacji sieci neuronowych. Stanowisko badawcze oraz przeprowadzane eksperymenty umożliwiają weryfikowanie metod pomiarowych oraz ocenę przydatności stosowanych sensorów i systemów wizyjnych do identyfikacji obserwowanych obiektów.

3. Struktura stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów, których struktura jest pokazana na rysunkach 2, 3:

- tor, po którym porusza się płaszczyzna badawcza,
- moduł napędowy płaszczyzny badawczej,





Rys. 3. Struktura wizyjnego układu pomiarowego [opracowanie własne]

- moduł sterowania ruchem płaszczyzny badawczej,
- zestaw sensorów pomiarowych laserowych i ultradźwiękowych oraz konfigurowalnych, laserowych systemów wizyjnych,
- interfejs sprzętowy, umożliwiający fizyczne podłączanie sensorów do modułów pomiarowych,
- dodatkowy moduł pomiaru prędkości poruszających się obiektów (prędkości ruchu taboru w warunkach rzeczywistych),
- oprogramowany moduł zbierania i synchronicznego przetwarzania danych pomiarowych,
- moduł umożliwiający zadawanie wartości parametrów eksperymentów oraz zapewniający archiwizację i analizę danych pomiarowych,
- moduł wizualizacji graficznej bezpośrednich wyników pomiarów.

W przypadku realizacji pomiarów z zastosowaniem zestawu sensorów laserowych i ultradźwiękowych (dalmierze laserowe i ultradźwiękowe, kurtyna laserowa, skaner), wyniki eksperymentów są analizowane i przetwarzane z wykorzystaniem specjalizowanej aplikacji *akuipso*. Aplikacja służy także do tworzenia modeli cyfrowych obserwowanych obiektów oraz ich identyfikacji.

W układzie pomiarowym wykorzystującym laserowe systemy wizyjne (rys. 3), do przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych oraz zadawania parametrów realizacji eksperymentów służy interfejs użytkownika firmy SICK (producenta zastosowanego systemu wizyjnego) pod nazwą SOPAS ET.

Na rysunku 4 przedstawiono widok stanowiska badawczego zabudowanego w pomieszczeniu laboratorium Instytutu Kolejnictwa.



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego w pomieszczeniu laboratorium [fot. autor]

4. Funkcje realizowane przez poszczególne moduły układu pomiarowego

Płaszczyzna badawcza o wymiarach 1,0×0,5 m, porusza się po torze pomiarowym o długości 5 m (rys. 1). Do płaszczyzny mogą być mocowane obiekty (modele) o różnych kształtach. Wykorzystanie specjalnej nakładki umożliwia regulację położenia (kąta pochylenia) obiektów w stosunku do kierunku wiązek laserowych poszczególnych sensorów (rys. 5).



Rys. 5. Nakładka uchylna płaszczyzny badawczej [fot. autor]

Do napędu ruchomej płaszczyzny badawczej zastosowano silnik liniowy (z zabudowanym enkoderem), serwowzmacniacz i przekładnię planetarną. Moduł napędowy jest połączony z płaszczyzną badawczą za pomocą paska zębatego (rys. 6).

Układ napędowo-sterujący płaszczyzny badawczej umożliwia:

- ruch płaszczyzny: "w lewo", "w prawo" lub przemieszczanie się w sposób "cykliczny",
- automatyczne lub manualne sterowanie ruchem płaszczyzny,

- regulację prędkości przemieszczania płaszczyzny,
- regulację zakresu ruchu płaszczyzny oraz zakresu realizacji pomiarów.

Moduły przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych tworzą następujące, podstawowe elementy:

- programowalny sterownik logiczny PLC,
- moduł zasilacza do PLC,
- moduł przetworników A/D,
- dotykowy panel operatorski HMI,
- HDD, RAM, monitor.

Na rysunku 7 przedstawiono widok szafy sterowniczej z modułem przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych, a na rysunku 8 widok pulpitu operatora.



Rys. 7. Widok szafy sterowniczej z modułem przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych [fot. autor]





Rys. 6. Elementy modułu napędowego ruchomej płaszczyzny badawczej [fot. autor]



Rys. 8. Widok pulpitu operatora wraz z ekranem HMI, umożliwiającym wybór parametrów prowadzonych eksperymentów [fot. autor]

W układzie pomiarowym przedstawionym schematycznie na rysunku 2, wyzwalanie odczytu z czujników i rejestracja danych pomiarowych mogą być realizowane w funkcji drogi (według wskazań enkodera), co określoną jednostkę długości drogi, w funkcji czasu, co określoną jednostkę czasu lub w funkcji czasu – po zajściu określonych, kolejnych zdarzeń. Interfejs graficzny daje możliwość wyboru czujników, z których dane pomiarowe będą rejestrowane podczas eksperymentu (rys. 9).

RRWAutomatic PLCProxy 1.8.14					
Aktywne urządzenia					
₽ C1 ₽ C2-DT50	₽ C3-DT500 ₽ C4-E	DT50 ₽ C5-C	0T50 🔽 C6-Opto 🖓	C7-Opto 🖙 Bariera	I⊽ Skaner
Sterownik PLC			Skaner		
Port:	12401		Adres IP:	192.168.0 .199	
			Port:	2112	
Liczba pomiarow: Śr. okres danych [ms]:		0	Liczba pomiarów:		(
Maglolé miedzy czylaikami C	Conta C2 Onto Imm.)	0.0	Sr. okres danych [ms]:		0.0
older wynikowy: Commo	o opto - C7 opto [mm]:	12773			
onder riffinkonfy, jerfond f				-	Wybierz
					Start
					Wykres

Rys. 9. Ekran operatora systemu pomiarowego [fot. autor]

Wyniki pomiarów są zapisywane do plików w formacie csv (co umożliwia analizę i wizualizację danych w arkuszu kalkulacyjnym Excel) oraz prezentowane graficznie na wykresach (rys. 10). Wizualizacja następuje w trakcie przemieszczania się obserwowanego obiektu oraz po zakończeniu pomiarów. Istnieje możliwość wyboru przebiegów z poszczególnych sensorów do ich prezentacji graficznej.

W procesie modelowania i identyfikacji niezbędna jest informacja o prędkości przemieszczania się badanych obiektów. Moduł napędowy płaszczyzny badawczej (na stanowisku laboratoryjnym) jest wyposażony w enkoder umieszczony w bloku silnika liniowego. Do przeprowadzenia eksperymentów w terenie w warunkach rzeczywistych zbudowano odrębny moduł, umożliwiający pomiar prędkości poruszającego się taboru kolejowego. W skład tego modułu wchodzą:

- zespół baz pomiarowych, wyposażonych w fotoelektryczne czujniki światłowodowe,
- układ pomiaru i rejestracji prędkości, wykorzystujący samodzielny sterownik PLC,
- przyłącza baz pomiarowych do stanowiska badawczego.



Rys. 10. Wyniki pomiarów wizualizowane w trakcie eksperymentów na monitorze ekranowym platformy [fot. autor]

Moduł pomiaru prędkości jest zintegrowany konstrukcyjnie i funkcjonalnie ze stanowiskiem badawczym. Bazy pomiarowe są mocowane do stopki szyny jezdnej za pomocą magnesów neodymowych. Ich konstrukcja umożliwia mocowanie zarówno do szyn UIC60, jak i S49 (rys. 11).



Rys. 11. Bazy pomiarowe zamocowane do szyn jezdnych (możliwość pracy w rzeczywistych warunkach terenowych) [fot. autor]

Moduł umożliwia wykonywanie pomiarów prędkości rzeczywistego taboru w warunkach terenowych i może być także wykorzystany w laboratorium (rys. 12).

Podczas przejazdu kolejnych osi taboru przez poszczególne bazy następuje pomiar prędkości ruchu. Każdy kolejny wynik pomiaru (uzyskany z dowolnej bazy pomiarowej) powoduje aktualizację zapisu w rejestratorze prędkości. Do pomiaru prędkości może być wykorzystywana dowolna liczba baz pomiarowych, a konstrukcja modułu umożliwia jego rozbudowę o kolejne bazy.



Rys. 12. Bazy modułu pomiaru prędkości zamocowane do toru pomiarowego w laboratorium [fot. autor]

Sprzętowo-programowa platforma pomiarowa, a także jej poszczególne moduły umożliwiają realizację następujących funkcji:

- wybór czujników do wykonania pomiarów, bez konieczności ich fizycznego odłączania od układu pomiarowego;
- wybór kierunku i prędkości przemieszczania płaszczyzny badawczej;
- pomiar prędkości przemieszczania płaszczyzny badawczej;
- wyzwalanie rozpoczęcia i zakończenia pomiarów, a także ustalanie zakresu ruchu płaszczyzny badawczej:
 - zajściem odpowiedniego zdarzenia (np. wykryciem obiektu),
 - zajęciem ustalonej pozycji (położenia) przez obiekt badany,
 - momentem czasu zadanym automatycznie lub określonym manualnie przez operatora;
- synchronizację odczytów z różnych zastosowanych urządzeń i sensorów pomiarowych oraz ich wspólną wizualizację w trakcie realizacji pomiaru;
- wybór kąta otwarcia skanera dla 2D, przy którym będą rejestrowane dane pomiarowe;
- ręczne zatrzymanie płaszczyzny badawczej w każdym momencie, niezależnie od jej położenia;
- ręczne sterowanie napędem (lewo / prawo) i ustawienie płaszczyzny w wybranym położeniu;
- tworzenie, zapamiętywanie i wybór scenariuszy realizacji pomiaru (w scenariuszu są określane: prędkość przemieszczania płaszczyzny pomiarowej z badanym obiektem, częstotliwość odczytu wyników pomiarów z sensorów w funkcji czasu lub przemieszczenia, zakres ruchu płaszczyzny pomiarowej, zakres odczytu danych pomiarowych w funkcji położenia płaszczyzny pomiarowej, liczba cykli badawczych);
- zapis danych pomiarowych (w formacie csv) w pamięci wewnętrznej modułu zbierania i przetwarzania danych oraz na nośniku wymiennym, a także transmisja danych

i sterowanie platformą (dwukierunkowa wymiana danych) z użyciem łącza Ethernetowego.

W zależności od miejsca i charakteru prowadzonych eksperymentów, możliwy jest wybór jednego z trzech trybów pracy stanowiska badawczego:

- tryb JOG umożliwia ręczne sterowanie przemieszczaniem płaszczyzny badawczej (z możliwością wyboru prędkości ruchu płaszczyzny),
- tryb LAB przeznaczony do badań w laboratorium (automatyczne przemieszczanie płaszczyzny badawczej, zgodnie z wybranym scenariuszem pomiarów, określającym prędkość przemieszczania platformy, zakres jej ruchu, obszar dla którego będą rejestrowane dane pomiarowe, a także liczbę cykli pomiarowych),
- tryb TEREN umożliwiający realizację badań w terenie, z wykorzystaniem rzeczywistych obiektów ruchomych (taboru), bez udziału płaszczyzny badawczej i toru pomiarowego, z zastosowaniem odrębnego modułu pomiaru prędkości.

Konstrukcja platformy umożliwia zastosowanie dodatkowych sensorów oraz jej rozbudowę o kolejne moduły pomiarowe.

5. Sensory pomiarowe

Platforma sprzętowo-programowa została wyposażona w następujące sensory firmy SICK:

- punktowe dalmierze laserowe typu DT50 oraz DT500 (rys. 13),
- skaner pomiarowy laserowy 2D LMS511 (rys. 14),
- czujnik ultradźwiękowy UM30 (rys. 15),
- zaawansowaną kurtynę pomiarową Pro-MLG10N (rys. 16, 17),
- laserowe czujniki triangulacyjne optoNCDT ILDI 1710 (rys. 18),
- konfigurowalne, autonomiczne czujniki laserowe Tri-Spector 1060, jako elementy systemu wizyjnego (rys. 19).



Rys. 13. Dalmierze laserowe punktowe typu DT500 (czujnik c3) oraz DT50 [fot. autor]



Rys. 14. Skaner laserowy 2D na stanowisku pomiarowym [fot. autor]



Rys. 15. Czujnik ultradźwiękowy UM30 zamocowany na wózku prowadnicy liniowej giętej [fot. autor]



Rys. 16. Nadajnik i odbiornik kurtyny (bariery pomiarowej) Pro-MLG10N [z dokumentacji kurtyny Pro-MLG10N]



Rys. 17. Nadajnik kurtyny (bariery) pomiarowej na stanowisku badawczym [fot. autor]

Na rysunkach 18, 19 zaprezentowano laserowe czujniki triangulacyjne optoNCDT ILD1710 oraz konfigurowalne, autonomiczne czujniki laserowe TriSpector 1060, wykorzystujące metodę triangulacji laserowej, zabudowane na stanowisku pomiarowym.



Rys. 18. Czujnik triangulacyjny ILD1710 z układem regulacji położenia [fot. autor]



Rys. 19. Dwa niezależne elementy systemu wizyjnego TriSpector: a) element górny, b) element boczny [fot. autor]

Dalmierze laserowe i ultradźwiękowe, w różnych konfiguracjach umieszczono na ruchomych wózkach z blokadą, odpowiednio na prowadnicach liniowych prostych (rys. 20) oraz prowadnicy liniowej giętej (rys. 21).



Rys. 20. Dalmierze DT50 oraz ILD1710 zamocowane na wózkach prowadnicy liniowej prostej [fot. autor]

Aktualna konfiguracja platformy pomiarowej umożliwia realizację eksperymentów z wykorzystaniem czujników analogowych i cyfrowych. Możliwe jest podłączenie:

- 4 czujników analogowych,
- 8 czujników cyfrowych,
- enkodera,
- zaawansowanej kurtyny pomiarowej,
- skanera 2D,
- systemu wizyjnego TriSpector 1060.



Rys. 21. Prowadnica liniowa gięta z sensorami pomiarowymi [fot. autor]

6. Przeznaczenie i możliwości pomiarowe platformy

Platforma pomiarowa umożliwia przemieszczanie obiektów (modeli obiektów rzeczywistych) z różnymi prędkościami oraz ocenę ich kształtu z wykorzystaniem zestawu sensorów laserowych i ultradźwiękowych. Stanowisko pomiarowe jest przeznaczone do prowadzenia badań ukierunkowanych na tworzenie cyfrowych modeli obiektów rzeczywistych oraz identyfikację tych obiektów w trakcie ich przemieszczania się. Obserwację obiektów można prowadzić dwoma niezależnymi systemami pomiarowymi: za pomocą zestawu dalmierzy laserowych (łącznie z kurtyną pomiarową) oraz systemu wizyjnego wykorzystującego autonomiczne, konfigurowalne czujniki TriSpector, których działanie jest oparte na metodzie triangulacji laserowej¹. Niezwykle istotną cechą stanowiska jest możliwość synchronicznego odczytu danych pomiarowych generowanych przez poszczególne sensory.

6.1. Badania za pomocą zestawu dalmierzy

Obiekty zamocowane na płaszczyźnie badawczej przemieszczają się w polu widzenia sensorów pomiarowych. Obserwacja wybranych fragmentów powierzchni obiektów odbywa się równocześnie z kilku kierunków za pomocą zespołu punktowych sensorów i skanera 2D (rys. 22).



Rys. 22. Obserwacja przemieszczającego się obiektu przez zespół dalmierzy [rys. autor]

Dalmierze DT50 oraz DT500, a także czujniki triangulacyjne ILD1710 są sensorami typu punktowego. Na powierzchnię badanego obiektu pada wiązka laserowa i obrazuje punkt, który przemieszcza się po powierzchni wzdłuż linii wyznaczanej kierunkiem ruchu płaszczyzny, na której znajduje się badany obiekt. Pomiar odległości punktu na powierzchni obiektu od nadajnika wiązki laserowej jest wykonywany z określoną częstotliwością (rys. 23).

Zakres pomiarowy dalmierzy typu DT wynosi odpowiednio:

- dla dalmierza DT50: od 0,2 do 30 m przy minimalnym czasie odpowiedzi 0,83 ms,
- dla dalmierza DT500: od 0,2 do 7 m przy czasie odpowiedzi 150 ms.

Dalmierz triangulacyjny ILD1710 może wykonywać pomiary w zakresie od 1000 do 2000 mm z maksymalną

częstotliwością pomiaru 2,5 kHz. Dokładność pomiaru odległości wynosi około 100 µm. Na stanowisku badawczym zabudowano dwa dalmierze typu ILD1710, które można skonfigurować w taki sposób, aby mierzyć z dużą precyzją zmiany grubości przemieszczających się obiektów. W praktyce, za pomocą dalmierzy punktowych, można np. kontrolować zmiany położenia (kształtu powierzchni) przewożonych materiałów sypkich (rys. 24).



Rys. 23. Pomiar odległości do powierzchni poruszającego się obiektu za pomocą punktowego sensora laserowego [rys. autor]



Rys. 24. Przewóz materiałów sypkich osłoniętych konturem wagonu [fot. autor]

Czujnik ultradźwiękowy UM30 był traktowany jako element pomocniczy z powodu niezbyt dużej precyzji działania i stosunkowo szerokiej wiązki pomiarowej w porównaniu do sensorów laserowych. Dane pomiarowe z tego czujnika nie wnosiły istotnych informacji przydatnych do oceny kształtu i wymiarów obserwowanych obiektów.

Skaner laserowy 2D "omiata" otoczenie wiązką laserową, mierząc odległości do wykrytych obiektów (rys. 25). Zakres pomiarowy skanera wynosi od 0,7 od 80 m, naj-

² Metoda triangulacji laserowej polega na projekcji wiązki lasera. Znając odległość pomiędzy nadajnikiem i kamerą oraz kąt pomiędzy wiązką lasera i płaszczyzną obrazu kamery można określić odległość punktu pomiarowego od obiektywu kamery.

większa częstotliwość skanowania 25 Hz, a maksymalny kąt obserwacji wynosi 190°. Do badań na stanowisku pomiarowym, kąt obserwacji skanera ograniczono programowo do kilkunastu stopni (w zależności od rodzaju pomiaru) tak, aby w polu widzenia sensora były widoczne tylko obiekty poddawane pomiarom, zabudowane na ruchomej płaszczyźnie badawczej.



Rys. 25. Obserwacja otoczenia z wykorzystaniem skanera laserowego LMS 511 [z dokumentacji skanera LMS 511]

W porównaniu do zastosowanych dalmierzy punktowych, skaner 2D typu LMS 511 jest urządzeniem bardzo powolnym, a przy tym jest przystosowany do obserwacji rozległego obszaru przestrzeni (zakres pomiaru odległości do 80 m). Zdecydowanie najbardziej efektywne w procesie obserwacji ruchomych obiektów są dalmierze punktowe typu triangulacyjnego (do badań zastosowano dalmierz ILD1710-1000).

Zaawansowana kurtyna pomiarowa Pro-MLG10N składa się z precyzyjnie ustawionych względem siebie nadajnika oraz odbiornika. Dziewięćdziesiąt wiązek laserowych rozmieszczonych w odległości co 10 mm wykrywa obiekty znajdujące się między nadajnikiem i odbiornikiem, a przerwanie wiązki (przysłonięcie obiektem) wskazuje położenie obiektu w obszarze obserwacji.

Za pomocą kurtyny można określić kształt obiektu (kontury zewnętrzne w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiązek laserowych), a także wykryć szczeliny lub otwory w strukturze obiektu, o ile są usytuowane w sposób umożliwiający przejście wiązki laserowej od nadajnika do odbiornika.

Na rysunku 26 zaprezentowano przykładowy wynik pomiaru, otrzymany za pomocą kurtyny pomiarowej (bariery), obrazowany na ekranie interfejsu użytkownika SOPAS ET (firmy SICK). Linie koloru czerwonego wskazują promienie laserowe blokowane przez kontur obiektu. Linia koloru zielonego oznacza przejście promienia laserowego od nadajnika do odbiornika bariery.

Kurtyna pomiarowa umożliwia wykrycie zmian kształtu obiektu (konturów) w stosunku do wcześniej zapamiętanych gabarytów. W praktyce kolejowej pozwala wykrywać przemieszczenia przewożonego ładunku, jego niekompletność lub brak, przekroczenie skrajni, położenie krawędzi taboru względem elementów infrastruktury itp. (rys. 27, 28).



Rys. 26. Wynik obserwacji obiektu o złożonym kształcie (z otworami) z wykorzystaniem zaawansowanej kurtyny pomiarowej Pro-MLG10N (wizualizacja na ekranie interfejsu użytkownika SOPAS) [materiały autora]



Rys. 27. Przewóz materiałów sypkich przekraczających kontur wagonu [fot. autor]



Rys. 28. Przewóz drewna [fot. autor]

Konstrukcja i zasada funkcjonowania stanowiska pomiarowego są wynikiem przyjętej metody obserwacji i identyfikacji poruszających się obiektów. Założono następujące warunki realizacji pomiarów [1, 2]:

- układ pomiarowy (zestaw sensorów w odpowiedniej konfiguracji przestrzennej) jest nieruchomy,
- obserwowane obiekty przemieszczają się w polu widzenia sensorów.

Wyniki pomiarów uzyskane za pomocą dalmierzy punktowych DT50, DT500, ILD1710 oraz czujnika ultradźwiękowego UM30 są obrazowane w trybie rzeczywistym na ekranie monitora z wykorzystaniem modułów przetwarzania i wizualizacji danych (stanowiących elementy składowe sprzętowo-programowej platformy pomiarowej).

Dane pomiarowe ze wszystkich sensorów (dalmierzy punktowych, a także skanera 2D oraz kurtyny pomiarowej) są zapisywane w plikach csv. Przykładowe wyniki pomiarów dla czujników UM30 (kolor żółty), DT50 (kolor czerwony) oraz DT500 (kolor zielony), obserwujących przestrzeń "z boku" – prostopadle do kierunku ruchu płaszczyzny (rys. 29) wizualizowane w trakcie eksperymentów na monitorze ekranowym sprzętowo-programowej platformy pomiarowej przedstawiono na rysunkach 30 i 31. Eksperymenty wykonywano przy różnych prędkościach ruchu obiektów oraz różnych "podziałkach" (częstotliwościach odczytu i rejestracji danych z sensorów pomiarowych).



Rys. 29. Czujniki DT50, DT500, UM30 oraz skaner 2D obserwujące obiekty w poziomie, w pozycji "z boku" (prostopadle do kierunku ruchu płaszczyzny pomiarowej) [fot. autor]



Rys. 30. Wizualizacja wyników pomiaru – obserwacja trzech, ustawionych szeregowo obiektów typu "walec" (o różnych średnicach). Prędkość przesuwu płaszczyzny badawczej v = 160 mm/s, podziałka 1 mm (odczyt danych z czujników pomiarowych, co 1 mm przesuwu płaszczyzny) [materiały autora]



Rys. 31. Wizualizacja wyników pomiaru – obserwacja trzech, ustawionych szeregowo obiektów typu "walec" (o różnych średnicach). Prędkość przesuwu płaszczyzny badawczej v = 300 mm/s, podziałka 20 mm [materiały autora]

Na rysunkach 32 i 33 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów zarejestrowane przez wybrane czujniki, zapisane w plikach csv i odtworzone w arkuszu kalkulacyjnym Excel.



Rys. 32. Wynik obserwacji trzech obiektów typu "walec" z wykorzystaniem dalmierza laserowego DT50 (konfiguracja układu pomiarowego jak na rysunku 29, odległości podane w milimetrach) [materiały autora]



Rys. 33. Wynik obserwacji trzech obiektów typu "walec" z wykorzystaniem skanera laserowego 2D (konfiguracja układu pomiarowego jak na rysunku 29, odległości podane w milimetrach) [materiały autora]

Plamka skanera 2D obraca się w płaszczyźnie pionowej, rejestrując wyniki pomiarów w wybranym sektorze (fragmencie koła), ustawionym za pomocą narzędzia konfiguracyjnego SOPAS ET. Wyniki kolejnych pomiarów są rejestro-



Rys. 34. Widok panelu aplikacji akuipso funkcjonującej w środowisku Matlab [materiały autora]

wane co określony kąt obrotu plamki. W przeprowadzonym eksperymencie, sektor w którym dokonywano pomiarów był podzielony na 21 wycinków.

Do tworzenia modeli cyfrowych obserwowanych obiektów oraz późniejszej identyfikacji tych obiektów jest wykorzystywana specjalizowana aplikacja komputerowa pod nazwą *akuipso* (akronim od: aplikacja komputerowa umożliwiająca identyfikację poruszających się obiektów), funkcjonująca w środowisku programistycznym Matlab, z wykorzystaniem niezbędnych bibliotek (w szczególności Neural Network Toolbox), rozszerzających środowisko Matlab o funkcje projektowania, implementacji, wizualizacji i symulacji sieci neuronowych. Widok panelu aplikacji *akuipso* z wizualizacją przykładowych wyników obserwacji zaprezentowano na rysunku 34.

Aplikacja *akuipso* umożliwia analizę danych pomiarowych (zapisanych w plikach w formacie csv), uzyskanych w wyniku eksperymentów prowadzonych zarówno w laboratorium, jak również w terenie, z wykorzystaniem zbioru sensorów oraz modułu pomiaru prędkości przemieszczających się obiektów (enkodera układu napędowego płaszczyzny pomiarowej – w warunkach laboratoryjnych lub odrębnego modułu pomiaru prędkości – w rzeczywistych warunkach terenowych).

6.2. System wizyjny

Oddzielny i niezależny układ pomiarowy stanowią zabudowane na stanowisku badawczym systemy wizyjne TriSpector. Pomiary, rejestracja oraz obrazowanie danych są realizowane niezależnie od zestawu dalmierzy, skanera 2D oraz kurtyny. Konfigurowalne, autonomiczne czujniki laserowe TriSpector 1060 (rozdz. 5, rys. 19), wykorzystują metodę triangulacji laserowej. Są to czujniki typu liniowego. W przypadku obiektu zostającego w spoczynku, promień laserowy sensora "omiata" jego powierzchnię, podobnie jak skaner 2D, tworząc linię pomiarową (rys. 35, 36). Ruch obiektu powoduje, że obserwacji i pomiarowi odległości poddawany jest wycinek powierzchni o szerokości wynikającej z zakresu ruchu wiązki lasera.



Rys. 35. Zasada działania i zakres pomiarowy zastosowanego czujnika TriSpector 1060 [z dokumentacji systemu TriSpector]

W stosunku do opisanego skanera 2D zastosowany sensor typu TriSpector 1060 jest urządzeniem wysokiej precyzji i zdecydowanie większej szybkości działania. Zasięg *H* obszaru roboczego, w którym następuje pomiar odległości jest ograniczony (rys. 35) i wynosi od 291 do 800 mm od sensora (na rysunku w nawiasach podano wartości w calach), natomiast długość *W* linii laserowej w obszarze pomiarowym wynosi od 180 do 660 mm. Wiązka lasera "kreśli" linię pomiarową, przemieszczając się w obszarze ograniczonym kątem 67°, tworząc około 2500 profili powierzchni obiektu w ciągu sekundy.

Na rysunku 36 przedstawiono widok linii pomiarowych (kolor czerwony), generowanych przez dwa systemy wizyjne TriSpector podczas obserwacji obiektów, które są ustawione na ruchomej płaszczyźnie badawczej.



Rys. 36. Obiekty na płaszczyźnie badawczej w polu widzenia dwóch systemów wizyjnych TriSpector [fot. autor]

Jako narzędzie konfiguracyjne do wyboru wartości parametrów i ustawień poszczególnych sensorów, firma SICK udostępniła użytkownikowi interfejs pod nazwą SOPAS ET (*SICK Open Portal for Application and Systems Engineering Tool*). Oprogramowanie SOPAS ET jest także niezbędne do pomiarów z wykorzystaniem konfigurowalnych, autonomicznych czujników laserowych TriSpector 1060, wykorzystujących metodę triangulacji laserowej. W trakcie pomiarów wykonywanych przez system wizyjny TriSpector, kamera obserwuje generowaną przez sensor linię laserową, a wyniki są przesyłane do aplikacji SOPAS ET w celu rejestracji danych, ich analizy, a także wizualizacji wyników. Na rysunku 37 przedstawiono widok głównego okna panelu operatora aplikacji SOPAS ET.

Panel operatora aplikacji SOPAS ET służy do:

- uruchomienia programu do realizacji nowego projektu badawczego lub uruchomienia wcześniej zapisanych projektów i wywołania ostatnio zapamiętanych ustawień,
- wyboru obsługiwanych sensorów (w opisywanym stanowisku pomiarowym – TriSpector1 oraz TriSpector2, rozdz. 5, rys. 19),
- konfiguracji wybranych sensorów,



Rys. 37. Główne okno panelu operatora aplikacji SOPAS ET [materiały autora]

- ustawiania parametrów eksperymentu pomiarowego,
- wyboru parametrów obrazu systemu wizyjnego,
- wyboru i konfiguracji narzędzi do analizy obrazu / widoku obiektu 3D,
- konfiguracji sygnału wyniku,
- zapisania wyników oraz parametrów eksperymentu w pamięci stałej systemu.

System pomiarowy złożony z dalmierzy laserowych, kurtyny pomiarowej oraz skanera 2D daje możliwość identyfikacji poruszających się obiektów, a także rozpoznawania ich sekwencji. Tworzenie i trenowanie modeli obiektów (ładunków, wagonów) wymagają zdefiniowania zakresu pomiarowego oraz wielokrotnej obserwacji zbioru różnych obiektów. Jakość modelu (wzorca) zależy od liczby obserwacji wybranych obiektów dokonanych w procesie trenowania. Efektywność identyfikacji obiektów zależy od właściwego doboru konfiguracji przestrzennej sensorów oraz stopnia wytrenowania modelu. W praktyce, ta metoda jest łatwiejsza do zastosowania w przypadku identyfikacji obiektów o powtarzalnych kształtach (np. wagonów, ich elementów i podzespołów oraz ładunków o typowych kształtach).

Wykorzystanie systemu wizyjnego i technologii skanowania nie wymaga trenowania modelu przez wielokrotne powtarzanie obserwacji wybranych obiektów. Obraz obiektu (ładunku lub wagonu) powstaje w efekcie jednokrotnej obserwacji. Do utworzenia wzorca (modelu cyfrowego) niezbędne jest zdefiniowanie przez użytkownika aplikacji charakterystycznych wielkości (zmiennych, ograniczeń) opisujących model oraz zadeklarowanie dopuszczalnych przedziałów zmienności ich wartości [3].

7. Podsumowanie i wnioski

Platforma pomiarowa, sprzężona z ruchomą płaszczyzną badawczą, jest przeznaczona do bezkontaktowego pomiaru odległości, przemieszczenia i pozycji przestrzennej wybranych obiektów oraz akwizycji i obrazowania danych pomiarowych.

Stanowisko pomiarowe umożliwia prowadzenie badań ukierunkowanych na tworzenie modeli cyfrowych oraz identyfikację poruszających się obiektów. Na stanowisku możliwy jest montaż modeli obiektów rzeczywistych o różnych kształtach i wykonanych z różnych materiałów, wybór wartości parametrów ruchu płaszczyzny badawczej (prędkość, zakres przesuwu, długość bazy pomiarowej) oraz częstotliwości rejestracji danych pomiarowych (w jednostce czasu lub drogi), obserwacja ruchomych obiektów z wykorzystaniem sensorów analogowych i cyfrowych oraz wizualizacja i analiza wyników pomiarów. Istotną cechą sprzętowo-programowej platformy pomiarowej jest możliwość synchronicznego odczytu danych pomiarowych generowanych przez poszczególne czujniki. Zastosowane sensory laserowe oraz system zbierania i przetwarzania danych umożliwiają:

- obserwację konturów obiektów o różnych kształtach,
- pomiar prędkości ruchu obiektów w warunkach laboratoryjnych i terenowych,
- zapis wyników pomiarów z dalmierzy punktowych, skanera 2D, dalmierzy triangulacyjnych oraz kurtyny pomiarowej do plików csv,
- wizualizację wyników pomiarów na monitorze ekranowym platformy,
- dostosowanie liczby i konfiguracji przestrzennej sensorów do potrzeb prowadzonych obserwacji.

Eksperymenty mogą być realizowane dwiema niezależnymi metodami, za pomocą:

- zestawu dalmierzy, skanera 2D i kurtyny pomiarowej oraz aplikacji akuipso,
- systemu wizyjnego TriSpector wraz z oprogramowaniem SOPAS ET.

Stanowisko badawcze umożliwia:

- obserwację poruszających się pojedynczych obiektów oraz grupy (sekwencje),
- obserwację w różnych warunkach oświetlenia obiektów poruszających się z różnymi prędkościami,
- obserwację obiektów o różnych kształtach, kolorze i fakturze powierzchni,
- weryfikację oraz ocenę przydatności dostępnych detektorów do identyfikacji obserwowanych obiektów,
- ocenę skuteczności i zakresu stosowania sensorów różnych typów w tworzeniu modeli cyfrowych badanych obiektów,
- ustalenie efektywnej pozycji poszczególnych sensorów względem powierzchni obserwowanych obiektów, a także dobór korzystnej konfiguracji przestrzennej sen-

sorów pomiarowych, umożliwiającej skuteczną identyfikację obiektów różnych klas,

• rekonfigurację układów pomiarowych.

Zastosowane metody badawcze oraz systemy przetwarzania i analizy danych pomiarowych umożliwiają tworzenie modeli matematycznych obserwowanych obiektów, ich rozróżnianie i identyfikację oraz wykrywanie zmian położenia na płaszczyźnie badawczej.

Bibliografia

- 1. Moczarski J.: *Identyfikacja elementów taboru kolejowego z wykorzystaniem sensorów laserowych*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2017, nr 12, s. 111–114.
- 2. Moczarski J.: *Identyfikacja taboru w zarządzaniu transportem kolejowym*. Autobusy, 2018, nr 6, s. 176–179.
- Moczarski J.: Detection of Railway Cargo Shifts Using Laser Triangulation. Proceedings of 23rd International Scientific Conference Transport Means 2019, Part I, s. 160–164.