Sensory laserowe w identyfikacji ruchomych obiektów

Jarosław MOCZARSKI¹

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę obserwacji oraz identyfikacji elementów taboru kolejowego i przewożonych ładunków. Opisano wykorzystanie punktowych dalmierzy laserowych w procesie monitorowania poruszających się obiektów oraz ich późniejszego rozpoznawania i kontroli położenia. Przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych przez autora na stanowisku badawczym Instytutu Kolejnictwa, dotyczących obserwacji obiektów o różnych kształtach, rozmiarach, fakturze powierzchni i optycznych właściwościach materiałów. Zaprezentowano wyniki eksperymentów przeprowadzonych za pomocą zestawu sensorów laserowych oraz algorytmów do tworzenia modeli cyfrowych badanych obiektów z zastosowaniem sieci neuronowych. Zwrócono uwagę na skuteczność i zakres stosowania przyjętej metody identyfikacji oraz wskazano występujące zależności i ograniczenia.

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

1. Wprowadzenie

Rozwój transportu kolejowego jest warunkowany wdrażaniem nowych rozwiązań technicznych i organizacyjnych. Z tego powodu wzrasta rola automatycznych systemów kierowania i sterowania ruchem. Podejmowanie efektywnych decyzji ułatwiają automatyczne systemy doradcze.

Skuteczność stosowanych narzędzi zależy od dostępu do wiarygodnych informacji o przebiegu procesu transportowego. Do podstawowych, można zaliczyć informacje dotyczące położenia taboru i ładunków na odcinkach linii, stacjach i przystankach pasażerskich, stacjach rozrządowych, bocznicach i punktach przeładunku. Dla bezpieczeństwa przewozów istotne są informacje o wykryciu przemieszczeń ładunków na powierzchni ładunkowej wagonu, przekroczeniu skrajni, pojawieniu się nieznanych obiektów w tunelach, na mostach lub przejazdach kolejowych. Do uzyskania takich informacji niezbędne są skuteczne środki i metody obserwacji oraz identyfikacji. Zbudowana w laboratorium Instytutu Kolejnictwa sprzętowo-programowa platforma pomiarowa [2] umożliwia realizację prac badawczych służących do weryfikacji różnych metod identyfikacji ruchomych obiektów.

Przemieszczające się na płaszczyźnie badawczej obiekty są obserwowane przez zestawy sensorów laserowych. W wyniku pomiarów są tworzone modele cyfrowe obserwowanych obiektów. Modele te są wzorcami służącymi do identyfikacji obiektów podczas kolejnych obserwacji. W przeprowadzonych badaniach stosowano dwie niezależne metody obserwacji i analizy kształtu wybranych fragmentów powierzchni poruszających się obiektów, a także zmiany ich położenia na płaszczyźnie badawczej.

W pierwszej metodzie wykorzystano punktowe dalmierze laserowe (w tym punktowe dalmierze triangulacyjne), skaner 2D i kurtynę pomiarową. Aplikacja komputerowa pod nazwą *akuipso* (akronim od: aplikacja komputerowa umożliwiająca identyfikację poruszających się obiektów), przygotowana do celów badawczych, służyła tworzeniu modeli matematycznych obserwowanych obiektów, a następnie ich rozróżnianiu oraz identyfikacji. W drugiej metodzie badawczej, identyfikacja poruszających się obiektów była realizowana za pomocą systemu wizyjnego, złożonego z konfigurowalnych, autonomicznych czujników laserowych, wykorzystujących metodę triangulacji laserowej (skanowanie 3D).

Prowadzone eksperymenty służyły ocenie możliwości wykorzystania sensorów laserowych w procesie tworzenia modeli cyfrowych obserwowanych obiektów, a następnie ich identyfikacji. W artykule przedstawiono wybrane eksperymenty wykonywane w trakcie realizacji prac badawczych z wykorzystaniem zestawu dalmierzy laserowych.

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

2. Tworzenie modeli cyfrowych obserwowanych obiektów z wykorzystaniem dalmierzy punktowych i aplikacji *akuipso*

Aplikacja *akuipso* funkcjonuje w środowisku programistycznym Matlab² i wykorzystuje niezbędne biblioteki (ang. *toolbox*)³, a w szczególności:

- Signal Processing Toolbox (służącej do przetwarzania sygnałów analogowych i cyfrowych uzyskiwanych z sensorów pomiarowych);
- Neural Network Toolbox (rozszerzającej środowisko Matlab o funkcje projektowania, implementacji, wizualizacji i symulacji sieci neuronowych);
- Parallel Computing Toolbox (umożliwiającej realizację obliczeń równoległych).

Interfejs graficzny aplikacji (rys. 1) umożliwia wprowadzanie wyników pomiarów (plików csv z danymi), informacji o konfiguracji bazy pomiarowej w trakcie wykonywania badań, wybór obiektów przeznaczonych do identyfikacji, znajdujących się w polu widzenia sensorów pomiarowych, a także wprowadzanie wartości parametrów realizowanych eksperymentów. W trakcie prób, odczyt danych pomiarowych z poszczególnych sensorów następuje w sposób synchroniczny jednocześnie ze wszystkich czujników. Aplikacja umożliwia dowolny wybór podzbioru sensorów wykorzystywanych w procesie identyfikacji.

Aplikacja *akuipso*, przygotowana na potrzeby prac badawczych i modyfikowana w trakcie ich realizacji, jest narzędziem umożliwiającym tworzenie modeli matematycznych obserwowanych obiektów. Na podstawie danych wskazanych przez użytkownika, a także wygenerowanych przez aplikację *akuipso*, jest tworzony model sieci neuronowych (realizacja w języku Python z wykorzystaniem biblioteki *Keras*). Każdy model jest hybrydą sieci CNN (konwolucyjnych), LSTM (*Long-Short Term Memory*) oraz MLP (*Multi Layer Perceptron*). Do podstawowych funkcji aplikacji należą:

- przetwarzanie danych pomiarowych otrzymywanych w wyniku eksperymentów realizowanych z wykorzystaniem istniejącej platformy (zapisanych w postaci plików w formacie csv),
- filtracja sygnałów pomiarowych,
- tworzenie bazy wzorców (modeli cyfrowych) obiektów obserwowanych przez zestaw sensorów,
- identyfikacja obserwowanych obiektów przez porównanie z zapisanymi w bazie modelami cyfrowymi.

)gólne					Tole Wykresow
Nowy projekt	Wczytaj pro	jekt Zapisz projekt	Zapisz projekt	t jako	Utwórz wycinek
Konfiguracja cz	ujników Mer	nedżer modeli			Dodaj do obiektu
ksperymenty					
Wczytaj	2018071	6_081856_razem [2.	00]	^	
Usuń 1	2018071	6_081928_razem [2. 6_081958_razem [2]	00]		
Zmieć na zwo	2018071	6_082028_razem [2.	00]		
Zinien nazwę	2018071	6_082738_razem [2. 6_082810_razem [2]	00]		
Zmien probkow	2018071	6_082840_razem [2.	00]		
Otwórz Wyci	nki 2018071	6_082910_razem [2.	00]		
	2018071	6 083235 razem [2.	001	~	
Vycinki					
Jtwórz wycinek	20180716_0)81856_razem [682.1	-1698.3] [Obiekt 2		
w Polu wykresó	20180716_0 20180716_0	081928_razem [682.1	-1698.3] [Obiekt 2	2]	
Usuń	20180716_0)81958_razem (682.1)82840_razem (700.1	-1698.3] [Oblekt 2] -986.2] [Oblekt 2]	4	
Otwórz	20180716_0)83235_razem [682.1	-1698.3] [Obiekt 1	1	
^	20180716_0)83335_razem [682.1	-1698.3] [Obiekt 1	1	
				_	
	175			~	
)biekty		Wycinki obiektu		~	
Obiekty Obiekt 1 Obiekt 2		Wycinki obiektu	5. razem (682 1_1	v	
Dbiekty Obiekt 1 Obiekt 2		Wycinki obiektu 20180716_08323 20180716_08333	5_razem [682.1-1 5_razem [682.1-1	€98.3 ▲ 698.3	
Dbiekty Obiekt 1 Obiekt 2		Wycinki obiektu 20180716_083233 20180716_083333	5_razem (682.1-1) 5_razem (682.1-1)	698.3	
Dbiekty Obiekt 1 Obiekt 2		Wycinki obiektu 20180716_083233 20180716_083333	5_razem (682.1-1) 5_razem (682.1-1)	598.3 • 698.3	
Obiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur	j Bryła	Wycinki obiektu 20180716_083233 20180716_083333	5_razem (682.1-1 5_razem (682.1-1	✓ 698.3 698.3 ✓	
ibiekty Dhiekt 1 Dbiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwe	í Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_08323 20180716_08333 C	5 <u>razem (682.1-1</u> 5_razem (682.1-1 1510 - 100 -	✓ 698.3 ∧ 698.3 ∨ > >	
Dbiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę	í Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_08323 20180716_08333 <	5 <u>razem (682.1-1</u> 5_razem (682.1-1 Usuń z obiektu	✓ 698.3 ∧ 698.3 ∧ 698.3 ∨ > ↑ ↓	
obiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę iekwencje	i Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_083233 20180716_083333 <	5_razem (662_1-1 5_razem (662_1-1) Usuń z obiektu	↓ 598.3 ∧ 698.3 ↓ ↓	
biekty Dbiekt 1 Dbiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę ekwencje	i Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_083233 20180716_083333 < C Dodaj wycinek	<mark>5. razem (682.1-1)</mark> 5_razem (682.1-1) Usuń z obiektu vencji	y 598.≦ ∧ 698.3 y } ↑ ↓	
Dbiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę Sekwencje	i Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_08323 20180716_083333 < C Dodaj wycinek	5_razem (682.1-1) 5_razem (682.1-1) Usuń z obiektu vencji	v 598.≦ ∧ 598.3 v > t ↓	
Objekt y Objekt 1 Objekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę Sekwencje	i Bryła Otwórz	Vycinki obiektu 20180716_08323 20180716_083333 < Dodaj wycinek Obiekty sekw	5_razem (682.1-1) 5_razem (682.1-1) Usuń z obiektu vencji	v 598.3 > 1 ↓	
Dbiekty Dbiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę iekwencje	i Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_06323 20180716_063333 < Dodaj wycinek Obiekty sekw	5_razem (682.1-1 5_razem (682.1-1) Usuń z obiektu vencji	v 5883 5883 v 1 1	
Dbiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę iekwencje	i Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_08323 20180716_08333 < C Dodaj wycinek Obiekty sekw	5_razem (682.1-1 5_razem (682.1-1 Usuń z obiektu vencji	v 598.3 v > t +	
Obiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę iekwencje	i Bryła Otwórz	Wycinki obiektu 20180716_08323 20180716_08333 < Dodaj wycinek Obiekty sekw	5_razem (682.1-1 5_razem (682.1-1 Usuń z obiektu vencji	y 393.€ ∧ 698.3 y > ↑ ↓	
Obiekty Obiekt 1 Obiekt 2 Utwórz Usur Zmień nazwę iekwencje Utwórz	i Bryta Otwórz Usuń	Vycinki obiektu 20180716_08323 20180716_08333 < Dodaj wycinek Obiekty sekw V	5_razem (682.1-1 5_razem (682.1-1 Usuń z obiektu vencji	v 598.3 ↓ ↓ ↓	

Rys. 1. Interfejs graficzny, umożliwiający wprowadzanie danych pomiarowych i wybór obiektów do analizy [materiały autora]

Modele cyfrowe badanych obiektów powstają z wykorzystaniem danych pomiarowych, w procesie "uczenia" aplikacji (treningu), zarejestrowanych podczas wielokrotnego powtarzania eksperymentów (obserwacji) przy różnych parametrach ruchu obiektów (rys. 2).

Wytrenowany model umożliwia rozróżnianie oraz identyfikację znanych obiektów (a także analizę ich sekwencji) podczas przemieszczania się (z różnymi prędkościami) w obszarze obserwowanym przez sensory pomiarowe. Identyfikacja polega na porównaniu wyników obserwacji ze zbiorem wcześniej utworzonych modeli (z przechowywanymi w bazie danych wzorcami znanych obiektów).

Aplikacja *akuipso* umożliwia ręczne lub automatyczne wprowadzanie wartości istotnych parametrów eksperymentu, zarówno podczas tworzenia wzorców, jak też identyfikacji obiektów, a w szczególności:

² Matlab – program komputerowy będący interaktywnym środowiskiem do wykonywania obliczeń naukowych i inżynieryjnych oraz do tworzenia symulacji komputerowych. Nazwa programu pochodzi od angielskich słów *MATrix LABoratory*.

³ Toolbox – zbiór dodatkowych bibliotek (m-plików) do rozwiązywania specjalistycznych problemów z określonych dziedzin (automatyki, elektroniki, telekomunikacji, matematyki etc.). Biblioteki rozszerzają możliwości programu Matlab.

el	•						Pole modelu					
Nowy Usuń Otw		Otw	brz			Trenuj N	lazwa		nowy csv			
	Nazwa	Typ	p		Dane	Skuteczność	Pokaż test T	Гур: стр	filter			
	nowy csv	cmpfilter		10% - 12006666	5 - [2,3,4,5,6,7]	30.0%	Identyfikuj Skuteczność: 30.0%					
2 nowy csv		cnn 🗸		10% - 30769084	448 - [2,3,4,5,6,7]	95.6%/100.0%	Zamknij	Przywróć parametry z poprzedniego treningu				
					Zakończon	10	- 0	×	metr		Wartość	
									1.111		0	0.5500
						ОК	1					
						ок	Dane Ziarno 14484 Svnteza	26007	Losuj ziarno	% dan	lych na test	10
	6	Trenín	g			ОК	Dane Ziarno 14484 Synteza	26007	Losuj ziarno	% dan Czujniki	iych na test	10
	[Trenin	9	Tava	-	<u>ок</u>	Dane Ziarno 14484 Synteza N	26007	Losuj ziarno	% dan Czujniki CZUJNII	ych na test	10
	1	Trenin	9	Trwa	trening	<u>ок</u>	Dane Ziarno 14484 Synteza N Rozciąganie X	26007 30 0.05	Losuj ziarno	% dan Czujniki CZUJNII CZUJNII CZUJNII CZUJNII	Nych na test	10
		Trenin	9	Trwa	trening	<u>ок</u>	Dane Ziarno 14484 Synteza N Rozciąganie X Rozciąganie Z	26007 3(0.05	Losuj ziarno 0 00 00	% dan Czujniki CZUJNIK CZUJNIK CZUJNIK CZUJNIK	11 11 12 12 13 13 14	10
		Trenin	9	Trwa	trening	OK X	Dane Ziarno 14484 Synteza N Rozciąganie X Rozciąganie Z Przesuwanie Z	26007 30 0.05 2 0.05	Losuj ziarno 00 00 00	% dan Czujniki □ CZUJNIK ☑ CZUJNIK ☑ CZUJNIK ☑ CZUJNIK ☑ CZUJNIK	(1 (1 (2 (3 (3 (4 (5	10
		Trenin	g	Trwa	trening	OK X	Dane Ziarno 14484 Synteza N Rozciąganie X Rozciąganie Z Przesuwanie Z Przesuwanie Z	26007 3(0.05 2 0.05 7 0.05	Losuj ziarno 0 00 00 00 00	% dan Czujniki CZUJNIK CZUJNIK CZUJNIK CZUJNIK CZUJNIK BARIER	ych na test [(1 (2 (3 (4 (5) (5) (4)	10.

Rys. 2. Interfejs graficzny służący tworzeniu modeli, prowadzeniu treningu oraz identyfikacji wybranych obiektów [materiały autora]

- prędkości ruchu obserwowanego obiektu,
- częstotliwości pobierania danych z czujników, wyrażonej w jednostce czasu [ms] lub drogi [mm] (przesunięcia obiektu),
- konfiguracji bazy pomiarowej (odległości między czujnikami w kierunku ruchu obiektu), a
- etykiet wykorzystanych czujników, baz pomiarowych (zastosowanej przestrzennej konfiguracji czujników) oraz wzorców i identyfikowanych obiektów.

Na rysunku 3 przedstawiono wprowadzone do aplikacji akuipso informacje o sekwencji obserwowanych obiektów



Rys. 3. Zobrazowanie wyników obserwacji obiektów typu (od prawej): kula, stożek, prostopadłościan i walec, na ekranie interfejsu graficznego aplikacji akuipso [materiały autora]

•



Rys. 4. Przykładowe zobrazowanie danych pomiarowych: kolorem czerwonym oznaczono wycinek, definiujący w systemie jeden z obiektów (walec) obserwowanych przez poszczególne sensory pomiarowe [materiały autora]

oraz zobrazowanie wyników pomiarów tych obiektów obserwowanych przez dalmierze punktowe DT50 i DT500 (kolejno od prawej: kula, stożek, prostopadłościan i walec).

W przypadku jednoczesnej obserwacji kilku poruszających się obiektów, aplikacja umożliwia tworzenie tzw. wycinków, reprezentujących wybrany obiekt "widziany" przez poszczególne sensory pomiarowe. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe zobrazowanie danych pomiarowych uzyskanych z wykorzystaniem (od góry): czterech punktowych dalmierzy laserowych, kurtyny pomiarowej i skanera laserowego 2D oraz wycinek (kolor czerwony) obejmujący obiekt typu walec. W zaprezentowanym przykładzie, kurtyna (bariera) oraz dalmierze laserowe obserwują poruszające się obiekty "z boku" (w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu platformy badawczej), skaner 2D obserwuje obiekt "z góry", plamka skanera przemieszcza się w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do kierunku ruchu. Kurtyna pomiarowa umożliwia rejestrowanie wewnętrznych i zewnętrznych konturów poszczególnych elementów [2].

Aplikacja *akuipso* umożliwia identyfikację w zbiorze poruszających się obiektów:

- pojedynczego, wybranego obiektu,
- kilku wybranych obiektów,
- sekwencji znanych obiektów.

Interfejs graficzny daje możliwość wyboru obiektów przeznaczonych do identyfikacji (rys. 1), znajdujących się w polu widzenia układu pomiarowego. Po identyfikacji, na ekranie monitora wyświetla się informacja o wykryciu poszukiwanego obiektu (obiektów, sekwencji obiektów).

3. Typologizacja badanych obiektów oraz konfiguracja przestrzenna sensorów pomiarowych

Rysunek 5 ilustruje przykład kilku obiektów (o kształcie: walca, prostopadłościanu o podstawie kwadratowej oraz prostopadłościanu o podstawie sześciokątnej, usytuowanych w pozycji pionowej), których rzut na płaszczyznę pionową, równoległą do kierunku ruchu, jest podobny lub identyczny [3].



Rys. 5. Ruchoma scena pomiarowa z obiektami typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej oraz prostopadłościan o podstawie sześciokątnej ustawionymi pionowo [fot. autor]

Kurtyna pomiarowa umożliwia ocenę zewnętrznych konturów obiektów [2]. Obserwuje scenę pomiarową w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu płaszczyzny badawczej. Zobrazowanie danych uzyskanych z kurtyny nie daje jednak możliwości rozróżnienia i identyfikacji tych obiektów (rys. 6).



Rys. 6. Zobrazowanie danych uzyskanych z kurtyny pomiarowej podczas obserwacji obiektów typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej i prostopadłościan o podstawie sześciokątnej (usytuowanie obiektów jak na rysunku 5) [materiały autora]

Obserwacja obiektów (rys. 5) za pomocą skanera 2D w pozycji "z góry" (plamka lasera przemieszcza się w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do kierunku ruchu sceny) umożliwia ich rozróżnienie ze względu na niejednakowy kształt podstawy. Wynik obserwacji przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zobrazowanie danych uzyskanych ze skanera 2D podczas obserwacji obiektów typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej oraz prostopadłościan o podstawie sześciokątnej (usytuowanie obiektów jak na rysunku 5) [materiały autora]

Obserwując obiekty ułożone poziomo na płaszczyźnie badawczej (rys. 8) za pomocą kurtyny (w kierunku "z boku") oraz skanera 2D (w kierunku "z góry"), otrzymuje się wyniki (rys. 9 i 10) podobne do przedstawionych na rysunku 6 (obserwacja z wykorzystaniem kurtyny). Także w tym przypadku nie jest możliwe rozróżnienie tych obiektów.



Rys. 8. Ruchoma scena pomiarowa z obiektami typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej i prostopadłościan o podstawie sześciokątnej rozmieszczonymi w pozycji poziomej [fot. autor]



Rys. 9. Zobrazowanie danych uzyskanych z kurtyny pomiarowej podczas obserwacji (w kierunku "z boku") obiektów typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej oraz prostopadłościan o podstawie sześciokątnej (usytuowanie obiektów jak na rysunku 8) [materiały autora]



Rys. 10. Zobrazowanie danych uzyskanych ze skanera 2D podczas obserwacji (w kierunku "z góry") obiektów typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej oraz prostopadłościan o podstawie sześciokątnej (usytuowanie obiektów jak na rysunku 8) [materiały autora]

Podobny problem może wystąpić w przypadku wykorzystania dalmierzy punktowych. Efektem obserwacji są w tym przypadku krzywe odwzorowujące kształty obserwowanych fragmentów powierzchni obiektów [2]. Na rysunku 11 przedstawiono zbiór obiektów umieszczonych na płaszczyźnie badawczej, a na rysunku 12 zobrazowanie danych uzyskanych z sensorów punktowych, obserwujących te obiekty kolejno: w płaszczyźnie nachylonej do powierzchni sceny pomiarowej pod kątem 30°, w płaszczyźnie poziomej oraz w płaszczyźnie pionowej.



Rys. 11. Obiekty na ruchomej scenie pomiarowej: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej, stożek oraz kula [fot. autor]



Rys. 12. Wynik obserwacji obiektów: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej, stożek oraz kula (od góry: w płaszczyźnie nachylonej pod kątem około 30°, w płaszczyźnie poziomej oraz w płaszczyźnie pionowej) [materiały autora]

Na rysunku 14 zaprezentowano wyniki obserwacji z wykorzystaniem dalmierzy punktowych (w kierunku pionowym i poziomym) oraz sceny pomiarowej przedstawionej na rysunku 13 (obiekty: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej, prostopadłościan o podstawie sześciokątnej, ustawione w pozycji pionowej oraz kula).



Rys. 13. Ruchoma scena pomiarowa z obiektami typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej, prostopadłościan o podstawie sześciokątnej, ustawionymi w pozycji pionowej oraz kula [fot. autor]



Rys. 14. Wynik obserwacji obiektów o kształcie (kolejno od lewej) walca, prostopadłościanu o podstawie kwadratowej, prostopadłościanu o podstawie sześciokątnej oraz kuli (zgodnie z sekwencją przedstawioną na rysunku 13) przez sensory punktowe (od góry: kierunek pionowy oraz kierunek poziomy) [materiały autora]

Na rysunku 15 przedstawiono ruchomą scenę pomiarową z obserwowanymi obiektami, a na rysunku 16 pokazano wyniki obserwacji obiektów ułożonych na scenie pomiarowej (rys. 15), odpowiednio w kierunku "z góry" oraz "z boku" pod kątem 30°.



Rys. 15. Ruchoma scena pomiarowa z obiektami typu: walec, prostopadłościan o podstawie kwadratowej, prostopadłościan o podstawie sześciokątnej oraz kula usytuowanymi poziomo [fot. autor]



Rys. 16. Wyniki obserwacji obiektów o kształcie (kolejno od lewej) walca, prostopadłościanu o podstawie kwadratowej, prostopadłościanu o podstawie sześciokątnej oraz kuli, zgodnie z sekwencją przedstawioną na rysunku 15 (kierunek pionowy – wykres górny oraz pomiar w płaszczyźnie nachylonej pod kątem około 30°) [materiały autora]

Obserwacja powierzchni bocznych obiektów, przedstawionych na rysunku 5 z wykorzystaniem kurtyny, skanera 2D i dalmierzy punktowych, daje podobny wynik. Obserwacja tych obiektów przez dalmierze punktowe w kierunku "z góry", także uniemożliwia ich rozróżnianie.

Obserwacja obiektów, przedstawionych na rysunku 11, przez dalmierze punktowe w kierunku "z boku" (w poziomie) daje identyczne wyniki (z wyjątkiem prostopadłościanu), a obrazy ("z góry") uzyskane ze skanera 2D dla walca, stożka i kuli mają kształt koła (rzuty tych brył na powierzchnię płaszczyzny badawczej). Podobne wyniki obserwacji występują dla przykładów zaprezentowanych na rysunkach 13 i 15.

Jak widać, pojedyncze sensory stosowane w układzie pomiarowym uniemożliwiają jednoznaczną identyfikację obserwowanych obiektów. Dopiero jednoczesna obserwacja sceny pomiarowej z różnych kierunków z wykorzystaniem zestawu kilku (kilkunastu) sensorów oraz synchroniczne odwzorowanie różnych fragmentów powierzchni przemieszczających się obiektów, zdecydowanie poprawiają dokładność modelowania oraz zwiększają trafność identyfikacji obiektów.

W procesie identyfikacji następuje rozróżnianie i wykrywanie obiektów, dla których wcześniej, w procesie treningu, utworzono ich modele cyfrowe. W aplikacji *akuipso*, model matematyczny każdego obiektu jest opisany zbiorem wartości charakteryzujących kształty fragmentów powierzchni uzyskanych w procesie pomiaru. Użycie dodatkowych parametrów opisujących obserwowane obiekty ułatwia rozróżnianie przedmiotów o podobnych kształtach.

W zmodyfikowanej wersji aplikacji zastosowano typologizację obiektów, wprowadzając atrybut określający podobieństwo badanego obiektu do podstawowych brył geometrycznych, takich jak walec, kula, stożek oraz prostopadłościany prawidłowe o różnych podstawach, rozróżniając przy tym ich zasadnicze orientacje przestrzenne (rys. 17).



Rys. 17. Przykładowe bryły geometryczne oraz ich podstawowe orientacje przestrzenne, wykorzystywane w aplikacji *akuipso* w procesie trenowania modelu oraz identyfikacji obiektu [materiały autora]

W interfejsie użytkownika istnieje możliwość zadeklarowania podobieństwa obiektu do jednej z typowych brył (opcja bryła – rys. 18). Ta informacja jest wykorzystywana przez aplikację zarówno na etapie tworzenia modelu cyfrowego, jak również podczas rozróżniania obiektów i ich identyfikacji.



Rys. 18. Deklarowanie podobieństwa badanego obiektu do typowej bryły geometrycznej oraz jej orientacji przestrzennej w procesie trenowania modelu [materiały autora]

Zastosowanie atrybutu podobieństwa skróciło czas potrzebny do utworzenia modelu i jego wytrenowania oraz przyspieszyło proces identyfikacji, zwiększając jednocześnie jego skuteczność.

4. Badanie wpływu prędkości obiektu i częstotliwości rejestracji danych pomiarowych na jakość sygnału pomiarowego

Stanowisko badawcze umożliwia przemieszczanie obiektów z różnymi prędkościami. Operator może zadawać wartości prędkości ruchu płaszczyzny badawczej w zależności od scenariusza przeprowadzanego eksperymentu. Jednocześnie istnieje możliwość wyboru częstotliwości odczytu i rejestracji danych pomiarowych z sensorów. Zadana częstotliwość pobierania danych może być wyrażona w jednostce czasu [ms] (np. co 1 ms, co 5 ms) lub drogi [mm] (np. co 1 mm przesunięcia obiektu). W systemie pomiarowym ten parametr nosi nazwę podziałki.

Na rysunku 19 przedstawiono przykładowy wynik obserwacji obiektów umieszczonych na płaszczyźnie badawczej, poruszającej się z prędkością 50 mm/s, przy częstotliwości odczytu danych pomiarowych z sensorów odpowiednio, co 2 mm (p = 2 mm) oraz co 10 mm przesuwu płaszczyzny (p = 10 mm).

Mimo niewielkiej prędkości ruchu płaszczyzny badawczej, można dostrzec różnice w zobrazowaniu wyników pomiarów. W obydwu przypadkach czujnik ultradźwiękowy UM30 (wykres pierwszy od góry) nie rozróżnia wszystkich przemieszczających się obiektów. Dla dalmierzy punktowych (DT50 i DT500) oraz dla czujnika ultradźwiękowe-



Rys. 19. Zobrazowanie wyników obserwacji obiektów poruszających się z prędkością 50 mm/s, z częstotliwością odczytu danych pomiarowych odpowiednio, co 2 mm (*p* = 2 mm) oraz co 10 mm (*p* = 10 mm); od góry: czujnik ultradźwiękowy UM30 (czujnik 1), dalmierz DT 50 (czujnik 2), dalmierz DT500 (czujnik 3), kurtyna (bariera) pomiarowa, skaner 2D; kierunek obserwacji – poziomy, prostopadły do kierunku ruchu obiektów [materiały autora]

go UM30 wraz ze wzrostem podziałki następuje zmiana pochylenia obrazów krawędzi zewnętrznych obiektów (kształt prostokątny, zgodny z rzutem bryły na płaszczyznę, przyjmuje postać trapezu). Dalmierz punktowy DT500 reaguje w obydwu przypadkach w podobny sposób. Stosunkowo długi czas odpowiedzi sensora powoduje "wygładzenie" kształtu obserwowanej powierzchni obiektu, jednak w przypadku wystąpienia lokalnych nierówności powierzchni, nie będą one zidentyfikowane przez czujnik.

Należy zwrócić uwagę, że dla wszystkich sensorów (także dla kurtyny i skanera 2D) widoczne zmiany w zobrazowaniu wyników pomiarów dotyczą przede wszystkim obiektu 2 (od prawej). Jest to powodowane strukturą powierzchni tego obiektu oraz właściwościami materiału, z którego został wykonany (zdolnością odbijania światła laserowego). Ze względu na dokładność tworzonego modelu (wzorca) oraz skuteczność późniejszej identyfikacji obiektów, najbardziej korzystne są "małe" podziałki (jak największa częstotliwość odczytu i rejestracji danych pomiarowych).

Maksymalna częstotliwość wykonywania pomiarów jest jednak ograniczona parametrami technicznymi poszczególnych sensorów, dlatego wybór zbyt małej wartości podziałki (zbyt dużej częstotliwości odczytu danych pomiarowych), w praktyce może spowodować kilkukrotną rejestrację tych samych wartości zmierzonej odległości (przechowywanych w buforze sensora). Tak się dzieje np. w przypadku skanera 2D, który jest urządzeniem stosunkowo wolnym (przede wszystkim ze względu na przyjętą metodę wysyłania telegramów z danymi pomiarowymi oraz szybkość transmisji danych). Ustawienie podziałki odczytu np. co 1 mm, w przypadku znacznej prędkości przemieszczania się obiektów (płaszczyzny badawczej) spowoduje w praktyce odczyt nowych wartości, np. co 2 mm. Takie sytuacje są automatycznie sygnalizowane na stanowisku badawczym po dokonaniu wyboru wartości parametrów realizacji eksperymentu. Z zastosowanych dalmierzy, najszybszym i najdokładniejszym urządzeniem pomiarowym jest czujnik triangulacyjny ILD1710 (z częstotliwością pomiaru 2,5 kHz) a najwolniejszym skaner 2D (częstotliwość 25 Hz).

Należy jednocześnie pamiętać, że duża częstotliwość wykonywania pomiarów prowadzi do tworzenia plików z danymi o znacznej objętości, a do ich rejestracji i analizy jest potrzebny moduł pomiarowy o dużej mocy obliczeniowej. Duża podziałka (mała częstotliwość rejestracji wyników) może być stosowana w przypadku obserwacji obiektów o odpowiednio dużych wymiarach (jako kryterium wyboru podziałki można przyjąć wartość współczynnika *l/p* [mm/mm], gdzie: *l* – długość obserwowanej powierzchni bocznej, *p* – podziałka) i regularnej strukturze obiektu (regularny kształt, brak istotnych nieciągłości powierzchni, kształt bliski typowym bryłom geometrycznym lub kształt nietypowy, niepowtarzalny, zdecydowanie odbiegający od innych, możliwych do zaobserwowania, w praktyce wykluczający błędną interpretację). Na rysunkach 20–23 przedstawiono wyniki obserwacji grupy obiektów poruszających się z różnymi prędkościami odpowiednio: 20 mm/s, 200 mm/s, 800 mm/s i 1200 mm/s (przy jednakowej podziałce odczytu p = 1 mm). Pomiary wykonano (kolejno od góry) z wykorzystaniem sensorów: DT500 (obserwacja powierzchni bocznych obiektów), DT50 (obserwacja powierzchni bocznych obiektów). DT50 (obserwacja powierzchni górnych obiektów) oraz ILD1710 (obserwacja powierzchni górnych obiektów).

Z rysunków wynika, że spośród wykorzystywanych sensorów, dla stosowanego zakresu prędkości najmniej dokładny jest dalmierz DT500 (czas odpowiedzi 150 ms). Przy prędkości 20 mm/s wyraźnie widać, że powierzchnie boczne (kolejno od lewej) nr 1, 3 i 4 obiektu mają kształt walca. Przy prędkości 200 mm/s kształt walca został zarejestrowany przez czujnik DT500 (wykres pierwszy od góry) tylko dla obiektu nr 4. Przy prędkości 800 mm/s czujnik DT500 zdążył zarejestrować w polu widzenia obecność tylko dwóch obiektów (nie rozróżniając przy tym obiektów o numerach 1, 2 i 3). Obiekt nr 4 (o największej średnicy) został zarejestrowany, jednak kształt powierzchni bocznej nie został odwzorowany w sposób prawidłowy. Przy prędkości 1200 mm/s czujnik DT500 zarejestrował ostatnią krawędź obiektu nr 3 oraz obecność obiektu nr 4.



Rys. 20. Obserwacja czterech obiektów przez sensory (od góry) DT500, DT50 (obserwacja powierzchni bocznych) oraz DT50 i ILD 1710 (obserwacja powierzchni górnych) podczas ruchu płaszczyzny pomiarowej z prędkością 20 mm/s, przy podziałce odczytu *p* = 1 mm [materiały autora]



Rys. 21. Obserwacja czterech obiektów przez sensory (od góry) DT500, DT50 (obserwacja powierzchni bocznych) oraz DT50 i ILD 1710 (obserwacja powierzchni górnych) podczas ruchu płaszczyzny pomiarowej z prędkością 200 mm/s, przy podziałce odczytu *p* = 1 mm [materiały autora]



Rys. 22. Obserwacja czterech obiektów przez sensory (od góry) DT500, DT50 (obserwacja powierzchni bocznych) oraz DT50 i ILD 1710 (obserwacja powierzchni górnych) podczas ruchu płaszczyzny pomiarowej z prędkością 800 mm/s, przy podziałce odczytu *p* = 1 mm [materiały autora]



Rys. 23. Obserwacja czterech obiektów przez sensory (od góry) DT500, DT50 (obserwacja powierzchni bocznych) oraz DT50 i ILD 1710 (obserwacja powierzchni górnych) podczas ruchu płaszczyzny pomiarowej z prędkością 1200 mm/s, przy podziałce odczytu *p* = 1 mm [materiały autora]

We wszystkich przedstawionych eksperymentach wyniki obserwacji obiektów przez czujniki DT50 oraz ILD1710 są praktycznie jednakowe. Czasy odpowiedzi tych czujników są wystarczająco krótkie do pomiarów z podziałką 1 mm w zastosowanym zakresie prędkości ruchu płaszczyzny badawczej (do 1200 mm/s). Parametry techniczne sensorów (przede wszystkim czas odpowiedzi) wprowadzają praktyczne ograniczenia i warunkują efektywność obserwacji poruszających się obiektów. Scenariusz planowanego eksperymentu powinien także uwzględniać wymiary, kształt i strukturę powierzchni poszczególnych obiektów. Od częstotliwości rejestracji danych pomiarowych oraz prędkości ruchu płaszczyzny badawczej zależy dokładność określania kształtu obiektów (w szczególności powierzchni bocznych brył obrotowych – walców i stożków), a także wykrywania konfiguracji przestrzennej krawędzi brył. Do obserwacji obiektów poruszających się ze znacznymi prędkościami (na przykład taboru kolejowego w warunkach rzeczywistych) niezbędne są sensory o dużych częstotliwościach pomiaru, co wiąże się ze znacznymi nakładami finansowymi, zarówno na zakup sensorów i kart pomiarowych, jak również na budowę odpowiedniego układu przetwarzania i analizy zarejestrowanych danych.

5. Badanie wpływu kąta padania wiązki lasera oraz faktury materiału obserwowanego obiektu na jakość sygnału pomiarowego

Wykorzystanie zalet synchronicznej obserwacji różnych fragmentów powierzchni obiektu przez kilka sensorów jednocześnie wymaga ich odpowiedniego skonfigurowania w przestrzeni badawczej, ponieważ jakość sygnału pomiarowego oraz skuteczność odwzorowania kształtu obiektu są niejednakowe dla różnych kątów padania wiązki dalmierza laserowego na powierzchnię badanego obiektu.

Wpływ pozycji przestrzennej sensora na jakość otrzymanego sygnału pomiarowego sprawdzano, powtarzając obserwacje wybranych obiektów przez czujniki umieszczane pod różnym kątem w stosunku do badanych fragmentów powierzchni (rys. 24).



Rys. 24. Sprawdzanie zależności jakości sygnału pomiarowego od kąta padania wiązki lasera na powierzchnię obiektu [opracowanie własne]

Wymagane nachylenie sensorów w stosunku do badanych obiektów uzyskiwano, przemieszczając głowicę z sensorami na ruchomych wózkach prowadnicy giętej (rys. 25) lub zmieniając kąt pochylenia nakładki uchylnej płaszczyzny badawczej (rys. 26).



Rys. 25. Ruchoma głowica z sensorami zamocowana na wózku prowadnicy giętej [fot. autor]



Rys. 26. Sensory zamocowane poziomo, na wózku prowadnicy prostej; obiekty w pozycji pochylonej, na nakładce uchylnej płaszczyzny badawczej [fot. autor]

Na rysunkach 27–32 przedstawiono przykładowe wyniki badań zrealizowanych z wykorzystaniem obiektów oznaczonych etykietami: RD1, RSz oraz RB1. Wszystkie obserwowane obiekty mają kształt walca i różne średnice. Sensory obserwują obiekty "z boku" (obserwacja powierzchni bocznych walców), prostopadle do kierunku ruchu płaszczyzny badawczej. Podstawowe parametry obiektów zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1 Parametry obserwowanych obiektów o kształcie walca

Parametry	Oznaczenie obiektu					
obiektów	RD1	RSz	RB1			
średnica [mm]	ø110	ø76	ø160			
materiał	tworzywo	metal	tworzywo			
kolor	szary	jasny, metaliczny	brązowy			
powierzchnia	matowa	odblaskowa, lustrzana	matowa			

[Opracowanie własne].

Pomiary wykonywano za pomocą sensorów: dalmierza DT500 (c3), dalmierza DT50 (c5) oraz dalmierza ILD1710 (c6) kolejno dla kąta padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektów (rys. 24): 90°, 75°, 60° oraz 45° (w płaszczyźnie pionowej). We wszystkich przypadkach, warunki pomiaru były jednakowe: prędkość platformy badawczej 100 mm/s, podziałka 1 mm. Na rysunkach 27–29 zaprezentowano zobrazowanie pomiarów dla podstawowego usytuowania sensorów, gdy kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektów (kolejno: RD1, RSz i RB1) wynosi 90°.

Eksperymenty powtórzono przy zmienionym kącie padania wiązek laserowych czujników c3, c5 i c6 na powierzchnie boczne obiektów RD1, RSz oraz RB1. Na kolejnych wykresach zobrazowano dane pomiarowe dla sekwencji obiektów (od lewej: RB1, RSz oraz RD1) przy kątach padania wiązek laserowych odpowiednio: 75° (rys. 30), 60° (rys. 31) oraz 45° (rys. 32).



Rys. 27. Wynik obserwacji walca RD1, przez czujniki (od góry) DT500 (c3), DT500 (c5) oraz ILD 1710 (c6); kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektu – 90° [materiały autora]



Rys. 28. Wynik obserwacji walca RSz, przez czujniki (od góry) DT500 (c3), DT50 (c5) oraz ILD 1710 (c6); kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektu – 90° [materiały autora]



Rys. 29. Wynik obserwacji walca RB1, przez czujniki (od góry) DT500 (c3), DT50 (c5) oraz ILD 1710 (c6); kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektu – 90° [materiały autora]



Rys. 30. Wynik obserwacji sekwencji obiektów (od lewej: RD1, RSz, RB1) przez czujniki (od góry) DT500 (c3), DT50 (c5) oraz ILD1710 (c6) (kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektu – 75°) [materiały autora]



Rys. 31. Wynik obserwacji sekwencji obiektów (od lewej: RD1, RSz, RB1) przez czujniki (od góry) DT500 (c3), DT50 (c5) oraz ILD1710 (c6) (kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektu – 60°) [materiały autora]



Rys. 32. Wynik obserwacji sekwencji obiektów (od lewej: RD1, RSz, RB1) przez czujniki (od góry) DT500 (c3), DT50 (c5) oraz ILD1710 (c6) (kąt padania wiązki laserowej na powierzchnię obiektu – 45°) [materiały autora]

Przy zadanych parametrach ruchu płaszczyzny badawczej, wyniki obserwacji obiektów RD1 oraz RB1 (powierzchnie matowe) przez czujnik DT500 (c3) są podobne dla wszystkich zastosowanych kątów padania wiązki laserowej. Również w przypadku pomiaru z wykorzystaniem dalmierza DT50 (c5), kształt sygnału dla obiektów RD1 i RB1 nie ulega zmianie wraz ze zmianą kąta pochylenia wiązki. Sensor ILD1710 (c6) daje identyczne wyniki obserwacji obiektu RD1 (niezależnie od kąta pochylenia). Dla obiektu RB1 dokładność odwzorowania wzrasta i jest najlepsza dla kątów 60° oraz 45°

Dla obiektu RSz, o lustrzanej powierzchni, zmiana wyników obserwacji wraz z pochylaniem wiązki lasera jest niejednakowa dla poszczególnych sensorów. Jako szczególnie wyraźny przykład zależności wyniku pomiaru od położenia czujnika względem powierzchni obiektu RSz można wskazać zmianę kształtu sygnału uzyskanego z dalmierza DT500 (rys. 33). W miarę pochylania wiązki, następuje zniekształcanie sygnału pomiarowego, a następnie brak odwzorowania kształtu obiektu.

Wyniki uzyskane dla obiektu RSz przy zastosowaniu czujnika DT50 (c5) są podobne, niezależnie od kąta obserwacji. Natomiast w przypadku czujnika ILD1710 (c6) dla kolejnych kątów pochylenia wiązki, następuje coraz lepsze odwzorowanie kształtu obiektu RSz. Najlepszy wynik uzyskano dla kąta 45° (rys. 32). Jest to jednocześnie obraz najbliższy rzeczywistości dla wszystkich obserwowanych obiektów przy zastosowaniu sensora ILD1719. Przeprowadzone eksperymenty w sposób jednoznaczny wskazu-

ją, że efekt obserwacji zależy od przestrzennego położenia sensora. Jak wynika z przedstawionej analizy, każdy z zastosowanych dalmierzy punktowych wymaga jednak innego usytuowania względem obserwowanych obiektów.

Należy zwrócić uwagę, że niezależnie od ukierunkowania wiązki w płaszczyźnie pionowej, kąt jej padania na powierzchnię obiektu może ulegać zmianom także w płaszczyźnie równoległej do kierunku ruchu. Na rysunku 34 przedstawiono przykłady obiektów o różnych kształtach powierzchni bocznych. Kąt padania wiązki na powierzchnię każdego z nich może być stały lub zmieniać się, wraz z ruchem obiektu w polu widzenia sensora, w sposób ciągły lub skokowy.

Zmiana kąta padania promienia na powierzchnię obiektu (oraz kierunku jego odbicia) powoduje, że zmienia się natężenie światła odbitego powracającego do odbiornika sensora. Jest to rejestrowane jako rozbieżna ze stanem faktycznym zmiana odległości. Efekty rozpraszania wiązki laserowej są widoczne na rysunkach 27–32 dla czujników DT50 (c5) oraz ILD1710 (c6), szczególnie w przypadku obserwacji obiektu RSz.

Przeprowadzone eksperymenty wskazują jednocześnie, że jakość sygnału pomiarowego zależy nie tylko od kąta padania wiązki laserowej, ale także od rodzaju materiału, z którego obserwowany obiekt został wykonany oraz faktury jego powierzchni. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy kąt padania wiązki zmienia się wraz z ruchem obiektu.



Rys. 33. Wynik obserwacji obiektu RSz (powierzchnia lustrzana) przez dalmierz DT500 kolejno pod kątem: 90°, 75°, 60° oraz 45° [materiały autora]



Na rysunku 35 przedstawiono przykładowe wyniki obserwacji trzech różnych obiektów o zbliżonym kształcie i wymiarach, lecz wykonanych z różnych materiałów. Obiekty oznaczono etykietami RE, RSz i RK.



Rys. 35. Wynik obserwacji trzech różnych obiektów typu walec (oznaczonych etykietami RE, RSz i RK), z wykorzystaniem kolejno (przebiegi od góry): sensora ultradźwiękowego UM30, punktowych dalmierzy laserowych DT50 i DT500, kurtyny pomiarowej oraz skanera 2D [materiały autora]

Podstawowe parametry, charakteryzujące poszczególne obiekty, zestawiono w tablicy 2.

	lablica 2
Parametry o	bserwowanych obiektów o kształcie walca

Parametry	Oznaczenie obiektu					
obiektów	RE	RSz	RK			
średnica [mm]	ø75	ø76	ø75			
materiał	tworzywo	metal	tworzywo			
kolor	szary	jasny, metaliczny	czarny			
powierzchnia	matowa	odblaskowa, lustrzana	błyszcząca			

[Opracowanie własne].

Wszystkie obserwowane obiekty mają kształt walca i podobną średnicę. Sensory obserwują obiekty "z boku" (obserwacja powierzchni bocznych walców), prostopadle do kierunku ruchu płaszczyzny badawczej. Wiązki laserowe poszczególnych dalmierzy punktowych oraz kurtyny są ukierunkowane poziomo (kąt padania każdej wiązki w płaszczyźnie pionowej jest stały i wynosi 90°). Wiązka skanera 2D przemieszcza się w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do kierunku ruchu obiektów.

W przykładzie przedstawionym na rysunku 35, na szczególną uwagę zasługują wyróżnione przebiegi uzyskane z punktowego dalmierza laserowego DT50 o stosunkowo krótkim czasie odpowiedzi (0,83 ms). Czujnik ten dobrze odwzorowuje kształt powierzchni obiektu RE (szary, matowy). Dla obiektu RSz (o jasnej, lustrzanej powierzchni) zmiana kierunku odbicia promienia laserowego została zarejestrowana dla krawędzi "wstępującej" (pierwszej, napotkanej przez promień lasera krawędzi obiektu). Krawędź "zstępująca" (ostatnia widziana krawędź obiektu) została zobrazowana prawidłowo. Dla obiektu RK, pokrytego czarnym, błyszczącym tworzywem, rozproszenie wpłynęło jednakowo na wynik pomiaru zarówno w przypadku krawedzi "wstępującej" jak również "zstępującej". Uzyskano symetryczny efekt rozproszenia promienia laserowego dla obydwu zakrzywionych powierzchni bocznych. Podobny efekt jest widoczny w przypadku skanera 2D. Należy także zwrócić uwagę, że wpływ na natężenie światła odbitego ma zarówno stopień pochłaniania promienia laserowego, jak również charakter jego załamania w wierzchnich warstwach materiału.

Przytoczony wybrany przykład nie wyczerpuje zagadnienia odbicia i rozproszenia światła laserowego na powierzchniach obserwowanych obiektów. Wskazuje jedynie, że w trakcie obserwacji i pomiaru występują zakłócenia zależne od właściwości optycznych materiału, z którego wykonano obiekt, koloru lub stopnia gładkości powierzchni. Istotny jest przy tym stosunek występujących nierówności do długości fali świetlnej [1].

Wśród dalmierzy laserowych zastosowanych w badaniach, najbardziej "odpornymi" na zakłócenia wynikające z rodzaju materiału obiektu oraz faktury powierzchni okazały się czujniki stosunkowo "wolne" tzn. laserowy dalmierz punktowy DT500 oraz skaner 2D. Sensory "szybsze" – DT50, a także ILD1710 rejestrują zdecydowanie więcej zakłóceń. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż wyniki pomiarów z poszczególnych sensorów zaprezentowane na rysunku 35 poddano filtracji i modyfikacji przez odpowiednie biblioteki środowiska Matlab.

Wyniki badań wskazują, że dla każdego obserwowanego obiektu należy indywidualnie dobierać konfigurację przestrzenną dalmierzy, uwzględniając takie parametry obiektów jak kształt, materiał, faktura powierzchni oraz prędkość przemieszczania się. Jednocześnie parametry obiektu determinują dobór typu sensora oraz wybór częstotliwości pomiaru odległości. Sensory "wolniejsze" są bardziej odporne na zakłócenia, lecz przy odpowiednio dużych prędkościach ruchu niedokładnie odwzorowują kształty powierzchni lub nie rejestrują obecności badanych obiektów.

6. Podsumowanie

Skuteczność pomiaru odległości do wybranych fragmentów powierzchni poruszających się obiektów zależy od charakteru oddziaływania światła laserowego z materiałem, z którego obiekt został wykonany.

Padając na badaną powierzchnię, światło lasera zostaje częściowo odbite, częściowo załamane, a częściowo pochłonięte. Natężenie światła odbitego od obserwowanych obiektów zależy od właściwości optycznych powierzchni – od stopnia chropowatości, w szczególności w stosunku nierówności powierzchni do długości fali światła padającego [1], rodzaju materiału warstwy wierzchniej elementu oraz kąta padania promienia laserowego (rys. 34). Od ilości światła odbitego, powracającego do odbiornika sensora, zależy dokładność wykonywanego pomiaru i tym samym dokładność odwzorowania kształtu obserwowanego fragmentu powierzchni.

W praktyce powierzchnie elementów taboru kolejowego lub przewożonych ładunków odbijają światło nierównomiernie, w różnych kierunkach. Z powodu zanieczyszczenia powierzchni, część światła laserowego zostaje pochłonięta.

Przyjęta metoda identyfikacji zakłada wcześniejsze utworzenie i wytrenowanie modeli cyfrowych znanych obiektów, a następnie ich rozróżnianie i identyfikację w procesie kolejnych obserwacji.

Dla każdego obiektu, już na etapie modelowania należy określić rodzaj materiału oraz właściwości optyczne powierzchni, a następnie dobrać liczbę sensorów i ich konfigurację przestrzenną (kąty padania promienia lasera na wybrane fragmenty powierzchni) w celu zapewnienia zarówno wystarczającej dokładności odwzorowania (w modelu), jak również wymaganej efektywności identyfikacji. W zależności od parametrów stosowanych sensorów, a także liczby, rozmiarów i kształtu powierzchni obserwowanych obiektów oraz prędkości ich przemieszczania, należy zastosować odpowiednią wartość podziałki pomiaru (częstotliwości odczytu i rejestracji danych pomiarowych).

System złożony z punktowych dalmierzy laserowych, skanera 2D i kurtyny pomiarowej (oraz aplikacji *akuipso*) wymaga treningu, polegającego na wielokrotnej obserwacji każdego z badanych obiektów poruszających się z różnymi prędkościami. Niezbędna jest także wielokrotna obserwacja jak największej liczby innych obiektów, różnych od obiektów będących przedmiotem późniejszej identyfikacji. W ten sposób system "uczy się" odróżniać obiekty "istotne" od innych, niepodlegających identyfikacji.

Metoda pomiarowa, wykorzystująca dalmierze laserowe oraz algorytmy tworzenia modeli cyfrowych obiektów z zastosowaniem sieci neuronowych, może być stosowana do obserwacji oraz identyfikacji typowych, powtarzalnych elementów taboru kolejowego.

Dokładność tworzonych modeli oraz skuteczność identyfikacji obserwowanych obiektów zależą od liczby zastosowanych sensorów oraz ich konfiguracji przestrzennej. Umiejscowienie poszczególnych sensorów w stosunku do badanych elementów powinno uwzględniać ich kształt, zróżnicowanie powierzchni, kąt padania promienia lasera na powierzchnię (w przypadku powierzchni wielościennych – na poszczególne wielokąty bryły).

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że zestaw sensorów, odpowiednio skonfigurowany przestrzennie, umożliwia tworzenie efektywnych modeli obserwowanych obiektów, a po ich wytrenowaniu (w efekcie wielokrotnie powtarzanych obserwacji i pomiarów) – wykrywanie poszukiwanych elementów, a także rozpoznawanie ich sekwencji.

Typologizacja obiektów oraz wprowadzenie możliwości kojarzenia badanych elementów z typowymi bryłami geometrycznymi w odpowiedniej orientacji przestrzennej, przyspieszają proces obliczeń oraz zwiększają skuteczność prowadzonej identyfikacji.

Algorytmy aplikacji *akuipso* umożliwiają wytrenowanie modeli z uwzględnieniem powtarzalności zakłóceń determinowanych właściwościami optycznymi materiału, z którego jest wykonana powierzchnia badanego obiektu.

Zastosowanie systemu w warunkach rzeczywistych wymaga użycia odpowiednio szybkich sensorów laserowych, a także szybkich sterowników oraz kart pomiarowych.

Bibliografia

- 1. Kolek Z.: *Barwa powierzchni z połyskiem*. Prace Instytutu Elektrotechniki, 2008, z. 237, s. 191–200.
- Moczarski J.: Stanowisko badawcze do weryfikacji metod identyfikacji ruchomych obiektów. Prace Instytutu Kolejnictwa, 2020, z. 165, s. 30–44.
- Moczarski J.: Typologizacja modeli elementów taboru kolejowego w procesie ich identyfikacji. Autobusy, 2019, nr 1–2, s. 109–112.