

doi:10.15199/48.2022.01.40

## Możliwości i ograniczenia monitorowania otoczenia z wykorzystaniem czujnika LiDAR

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę możliwości i ograniczeń wykorzystania czujnika LiDAR do monitorowania otoczenia. Omówiono zasadę działania skanera laserowego służącego do mapowania środowiska 2D oraz na przykładzie modułu SLAMTEC RPLIDAR A1M8, przedstawiono istotne parametry, które należy uwzględnić przy projektowaniu systemu przeznaczonego do obserwacji środowiska. Przeprowadzono eksperymenty sprawdzające poprawność pomiaru odległości oraz zależności przestrzennych obiektów w różnych konfiguracjach.

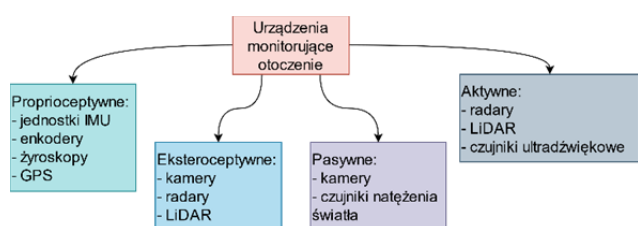
**Abstract.** The article presents an analysis of the possibilities and limitations of using the LiDAR sensor to monitor the environment. The principle of operation of a laser scanner used to map the 2D environment was discussed based on SLAMTEC RPLIDAR A1M8 module to present important parameters that should be taken into account when designing a system intended for environmental observation. Experiments were carried out to verify the correctness of measuring distances and spatial relationships of objects in various configurations. (**Possibilities and limitations of environment monitoring with usage of LiDAR scanner**).

**Słowa kluczowe:** skaner LiDAR, monitorowanie otoczenia, detekcja przeszkód/obiektów, pomiar odległości

**Keywords:** LiDAR scanner, environment monitoring, object/obstacle detection, distance measurement

### Wstęp

Monitorowanie otoczenia jest zadaniem wymagającym dokładnej analizy różnego rodzaju przeszkód w środowisku. W specjalistycznych zastosowaniach np. w urządzeniach pomiarowych, niezbędne jest użycie bardziej zaawansowanego systemu do obserwacji otoczenia w celu poprawy precyzji otrzymywanych wyników [1,2]. W większości przypadków niezbędne jest zatem dokonywanie dokładnych pomiarów odległości z wykorzystaniem technik zdalnych. Istnieją różne metody dokonywania oceny wartości dystansu od obiektów np. z wykorzystaniem czujników ultradźwiękowych, radarowych czy optycznych. Niezwykle rozwijają się dziedziny wymagające niezawodnych i dokładnych rozwiązań są pojazdy autonomiczne. Fakt ich wprowadzenia na rynek konsumencki pozostaje jedynie kwestią najbliższych kilku lat oraz odpowiednich regulacji prawnych. Wiele koncernów prowadzi już na zamkniętych torach testy swoich rozwiązań oraz zapowiada wejście na rynek swoich pojazdów o zaawansowanym poziomie autonomiczności już w 2025 roku [3].



Rys. 1 Podział urządzeń monitorujących otoczenie wraz z przykładami

Uzyskanie coraz wyższych poziomów automatyzacji jazdy dla pojazdów jest możliwe dzięki integracji danych sensorycznych i wizyjnych pochodzących z różnego rodzaju czujników. Pełnią one rolę źródła danych o otoczeniu w konkretnych systemach wspomagających np. aktywny tempomat, awaryjne hamowanie, mapowanie otoczenia, cyfrowe lusterka boczne i wsteczne, asystent parkowania, asystent pasa ruchu [4]. Sensory jak również systemy wizyjne dzielą się na cztery kategorie (rys.1). Pierwsza z nich to czujniki proprioceptywne, czyli odpowiadające za rejestrowanie i pomiar wewnętrznych wartości dynamiki pojazdu. Ich odpowiednikiem dotyczącym pomiarów otoczenia obiektu są czujniki eksteroceptywne, które wykrywają i gromadzą informacje takie jak np. pomiary

odległości. Dodatkowo systemy monitorujące można podzielić ze względu na sposób działania na pasywne i aktywne. Pierwsze z nich jedynie odbierają energię emitowaną z otoczenia i na jej podstawie wytwarzają swój sygnał wyjściowy. Do tej grupy należą między innymi kamery wizyjne. Czujniki aktywne opierają swoje działanie na emitowaniu energii do środowiska i dokonaniu pomiaru reakcji otoczenia na tę energię [4].

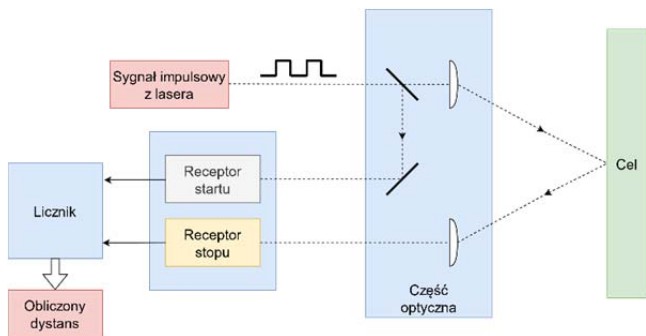
Obecnie w literaturze można wymienić trzy główne nurty w podejściu do fuzji sensorycznej w kontekście wykrywania przeszkód:

- CL – kamera - LiDAR
- CR – kamera – radar
- CLR – kamera – LiDAR – radar.

Wynika zatem, że bardzo często stosowanym rozwiązaniem sensorycznym wspomagającym systemy wizyjne jest zastosowanie LiDARu. Taka kombinacja pozwala uzyskać większą rozdzielczość pomiaru w większym zakresie oraz precyzyjnie rozpoznać otoczenie na podstawie analizy chmury punktów i informacji o mapie głębokości. Znacząco poprawia to redundancję bezpieczeństwa całego systemu autonomicznego. Firmy bazujące na takim rozwiązaniu przy implementacji swoich rozwiązań w pojazdach autonomicznych to Waymo oraz Navya [4-8].

### LiDAR w użyciu do pomiaru odległości od obiektów

Czujnik LiDAR (ang. Light Detection and Ranging) jest eksteroceptywnym aktywnym urządzeniem służącym między innymi do monitorowania otoczenia. Wynikiem działania sensora jest uzyskanie informacji o chmurze punktów stanowiących odwzorowanie środowiska, w którym LiDAR się znajduje. Zasada pomiaru wykorzystywana do obrazowania to metoda time-of-flight (ToF). Głębokość otoczenia jest mierzona poprzez zliczanie opóźnień czasowych w zdarzeniach w świetle emitowanym przez źródło. Ta bezkontaktowa technika pozwalająca na pomiar odległości jest możliwa do realizacji dzięki rzutowaniu sygnału optycznego (wiązki laserowej) na obiekt, który jest nazywany celem, a następnie wykryciu odbitego lub wstecznie rozprószanego sygnału i przetworzeniu go w celu określenia dystansu. W ten sposób tworzone są dwu- lub trójwymiarowe mapy otoczenia w postaci chmur punktów [9].



Rys. 2 Schemat zasady pomiaru odległości w sensorze LiDAR bazującym na impulsowej modulacji wiązki laserowej

Najbardziej powszechnym podejściem do wyznaczania odległości w sensorach ToF takich jak LiDAR jest bazowanie na modulacji impulsowej emitowanej wiązki laserowej (rys. 2). Wynik pomiaru określa się poprzez zależność między prędkością światła w danym ośrodku a czasem potrzebnym impulsowi wiązki na pokonanie dystansu do celu. Prędkość światła jest stałą wartością fizyczną, a gdy obiekt znajduje się w tym samym ośrodku to odległość do badanego obiektu jest wprost proporcjonalna do połowy okresu potrzebnego na powrót wiązki do czujnika. Czas zmierzony przez sensor jest reprezentacją dwukrotności odległości od celu, ponieważ emitowany sygnał laserowy musi przebyć zarówno drogę od emitera jak również z powrotem do odbiornika. Zależność obliczonej odległości wyrażona jest równaniem (1), gdzie  $R$  oznacza obliczony dystans,  $c = 299792458 \left[ \frac{m}{s} \right]$  to prędkość światła, a  $t_{oF}$  jest zmierzoną wartością czasu potrzebnego na powrót impulsu laserowego emitowanego przez czujnik po odbiciu od obiektu (równanie (2)), gdzie  $t_{start}$  to początkowy czas emisji wiązki, a  $t_{stop}$  to czas powrotu do odbiornika [10-12].

$$(1) \quad R = \frac{c}{2} t_{oF}$$

$$(2) \quad t_{oF} = \Delta t = t_{stop} - t_{start}$$

Równanie (1) pokazuje także ścisłą zależność rozdzielczości uzyskiwanych pomiarów odległości od rozdzielczości licznika służącego do pomiaru czasu. Głównym czynnikiem wpływającym na otrzymywane wartości są więc ograniczenia sprzętowe, polegające na doborze odpowiednio szybkich modułów odpowiedzialnych za wyznaczanie okresu. Typowo rozdzielczość pomiaru przedziału czasu mieści się w zakresie 0,1 ns co przekłada się na rozdzielczość pomiaru odległości z dokładnością do ok. 1,5 cm [6]. Są to wartości, które mogą być sprzętowo poprawione poprzez zastosowanie różnego rodzaju statystyk, które kalkulują punkt wynikowy na podstawie kilku impulsów na danym obszarze celu. Kosztem takiej operacji jest jednak mniejsza liczba klatek na sekundę, a także rozdzielczość przestrzenna. Teoretycznie można przyjąć, że maksymalna odległość, którą można zmierzyć za pomocą LiDARu jest ograniczona maksymalny zakres licznika, ale w praktyce zależy on od innych czynników, a głównie od rozproszenia wiązki lasera oraz szybkości emitowania impulsów. Stosując metodę modulacji impulsowej emitowanej wiązki laserowej do urządzeń ToF dąży się do wykorzystywania możliwie jak najkrótszych impulsów wynoszących kilka nanosekund. Ich cechami charakterystycznymi są także szybkie czasy narastania i opadania przy zachowaniu dużej mocy optycznej.

Kluczowe jest także zastosowanie odbiorników odbitej wiązki o bardzo czułym poziomie detekcji operujących na wysokich częstotliwościach tak, aby móc odpowiednio zinterpretować nawet słaby sygnał z otoczenia.

Dodatkowym utrudnieniem są także warunki środowiskowe w jakich pracuje urządzenie pomiarowe, które mogą spowodować pochłanianie impulsów laserowych przez np. chmury, mgłę, wodę, asfalt czy smołę, ale należy zaznaczyć, że poza wymienionymi czynnikami LiDAR jest niemalże niezależny od pogody i warunków oświetleniowych, jednak środowisko pracy jest definiowane przez producenta konkretnego modułu. Wpływ zakłóceń jest minimalizowany poprzez obserwację rozproszonych promieni za pomocą teleskopu. Następnie są one rejestrowane przez detektor badający przesunięcie fazowe między falą nadaną a odebraną, a także natężenie sygnału powrotnego [13]. Równanie (3) jest uzupełnionym równaniem (1) o wartość przesunięcia fazowego  $\Delta\varphi$  pomiędzy sygnałem nadanym a odebranym.

$$(3) \quad R = \frac{c}{2} \cdot t_{oF} \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$$

Podejście pulsacyjne pozostaje obecnie najczęściej stosowanym rozwiązaniem przez producentów LiDARów ze względu na prostotę działania przy zachowaniu wystarczającej dokładności w przypadku czujników monitorujących otoczenie pojazdów [9].

### Czujnik LiDAR A1M8

Przykładowym modelem LiDARu do zastosowania w monitorowaniu otoczenia w warunkach laboratoryjnych jest podstawowy sensor RPLIDAR A1M8 produkowany przez firmę SLAMTEC (rys. 3). Pozwala on na dwuwymiarowe skanowanie środowiska w zasięgu 12 m, a dzięki zastosowaniu obrotowej głowicy pomiar pokrywa pełne 360 stopni. Otrzymane dane wynikowe mogą stanowić podstawę do mapowania, ustalania lokalizacji, modelowania obiektów i środowiska w tym wykrywania przeszkód na podstawie pomiaru odległości oraz ich pozycjonowania dzięki określeniu kąta. Producent zapewnia, że LiDAR może być użytkowany wewnątrz budynków oraz w przestrzeni otwartej pod warunkiem braku bezpośredniej ekspozycji na światło dzienne [14].



Rys. 3 Moduł skanera laserowego SLAMTEC RPLIDAR A1M8

Urządzenie składa się z dwóch części: głowicy z optyką laserową, która jest odpowiedzialna za sam proces skanowania dwuwymiarowego oraz części napędowej. Całość została zamontowana na grubej płycie PCB, która oprócz połączeń elektronicznych stanowi podstawę dla poszczególnych podzespołów w tym ruchomej głowicy.

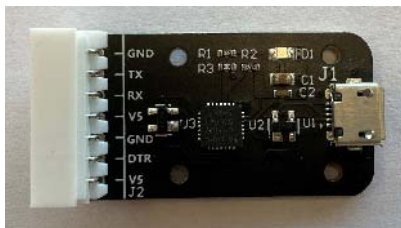
Skaner jest przykładem budżetowego sprzętu (cena oscyluje w okolicach 500 zł) w swojej klasie urządzeń pomiarowych przy zachowaniu bardzo dobrych parametrów technicznych (tabela 1). Należy zaznaczyć, że maksymalny zasięg pomiaru odległości wynoszący 12 m jest możliwy do uzyskania podczas skanowania białych obiektów. Zwiększenie częstotliwości skanu do 10 Hz jest możliwe

poprzez dołączenie dodatkowego źródła zasilania silnika o napięciu maksymalnie 9 V. Podstawowa wartość częstotliwości wynosząca 5.5 Hz jest osiągana przy jednoczesnym zasilaniu obu części urządzenia ze źródła o napięciu 5 V.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne skanera laserowego SLAMTEC RPLIDAR A1M8 [14]

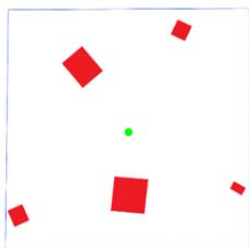
Parametr	Wartość
Zasięg odległości [m]	0.15 - 12
Zasięg kątowy [°]	0 – 360
Płaskość pola skanowania [°]	-1.5 – 1.5
Rozdzielczość odległości [mm]	<0.5 dla odległości <1.5 m <1% zmierzonej odległości
Rozdzielczość kątowna [°]	≤1 dla częstotliwości 5.5 Hz
Czas trwania próbki [ms]	0.125
Szybkość próbkowania [Hz]	≥8000 (max. 8010)
Częstotliwość skanu [Hz]	5.5 - 10

Dodatkowo czujniki z serii A1 są wyposażone w pomiar prędkości obrotowej i system adaptacyjny, który automatycznie dostosowuje częstotliwość lasera do aktualnej prędkości obrotowej silnika. Istnieje także możliwość odczytania wartości tej prędkości przez użytkownika. Wykorzystywany laser stanowi modulowane impulsowe światło podczerwone z zakresu między 775 a 795 nm. Moc emitowanej wiązki mieści się w przedziale 3-5 mW, a długość impulsu zależna od prędkości obrotowej silnika typowo wynosi 110  $\mu$ s do maksymalnie 300  $\mu$ s [14].



Rys. 4 Konwerter UART USB dołączonego do modułu skanera laserowego SLAMTEC RPLIDAR A1M8

Urządzenie wykorzystuje do transmisji danych protokół komunikacyjny UART działający z prędkością 115200 bps z napięciem 3.3 V. W celu uproszczenia połączeń pomiędzy komputerem a skanerem laserowym można skorzystać z dołączonego konwertera UART na USB (rys. 4). Pozwala on na systemowe wykrycie urządzenia poprzez port COM. Ramka danych przesyłanych przez czujnik zawiera informacje o zmierzonej odległości, orientacji kątowej LiDARu względem danego punktu w przestrzeni oraz jakości pomiaru. Poszczególne punkty pomiarowe są od siebie oddzielane flagą startu, która jest wartością typu boolean.



Rys. 5 Stanowisko testowe do monitorowania otoczenia za pomocą LiDARu

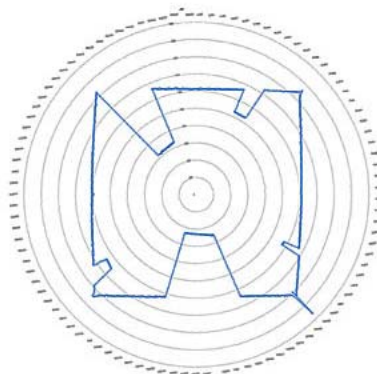
### Badanie jakości monitorowania

W ramach badań ograniczeń i możliwości zastosowania LiDARu do monitorowania otoczenia przetestowano skaner

laserowy SLAMTEC RPLIDAR A1M8. Jego działanie zostało zweryfikowane w trzech zaaranżowanych sytuacjach środowiskowych. Wokół modułu rozstawiono przeszkody w postaci kartonów o różnej wielkości, a następnie sprawdzono poprawność odczytu odległości z wartością rzeczywistą oraz odwzorowanie przestrzenne związane z ich kątem ustawienia względem osi urządzenia.

W pierwszej kolejności badanie przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, gdzie przedmioty znajdowały się w zakresie odległości deklarowanym przez producenta (rys. 5).

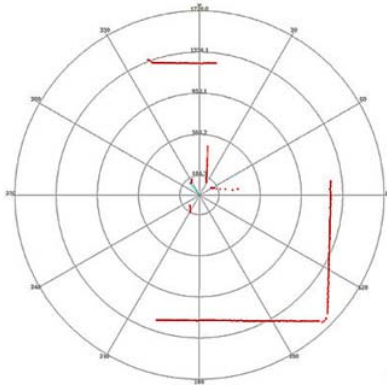
Niebieskie linie oznaczają ściany, które wydzieliły obszar badań w postaci kwadratu o boku równym 2,41 m. LiDAR został umieszczony w centralnym punkcie środowiska (zielony punkt), a obiekty zaznaczone czerwonymi prostokątami stanowiły przeszkody o różnych wymiarach. Wartości otrzymane po wykonaniu skanu każdorazowo zostały zweryfikowane poprzez pomiar ręczny od osi skanera do środka płaszczyzny przeszkody i wynosiły one (rozpoczynając od lewej górnej przeszkody zgodnie z ruchem wskazówek zegara): 62,8 cm, 105 cm, 114,3 cm, 45,8 cm oraz 128,5 cm. Wszystkie otrzymane wyniki były prawidłowe. Pomiarów dokonano w trzech różnych trybach pracy LiDARu, które różnią się liczbą punktów pomiarowych: 2000, 4000 oraz 8000. Mapa utworzona na podstawie pomiarów zeskanowanego obszaru z największą dokładnością została przedstawiona na rys. 6. Wnioski płynące z jej analizy to przede wszystkim bardzo dokładne odzwierciedlenie położenia oraz ustawienia kątownego przeszkód. W prawym dolnym rogu można także zaobserwować zniekształcenie przy ścianach. Pokazuje to jak dokładny jest skaner, ponieważ przy konstrukcji obszaru testowego nie zauważono niewielkiej szczeliny w narożniku, która była wielkości kilku milimetrów. Należy także zwrócić uwagę, że monitorowanie otoczenia tylko za pomocą LiDARu niesie za sobą pewne ograniczenia w postaci cienia, jaki pozostawiają przeszkody. Zjawisko to uniemożliwia dokładne zbadanie całego środowiska bez przemieszczania sensora.



Rys. 6 Mapa otoczenia LiDARu w eksperymentalnym otoczeniu badawczym

Kolejne eksperymenty miały za zadanie sprawdzenie działania urządzenia w skrajnych przypadkach tj. przy przekroczeniu dolnego zakresu pomiarowego oraz zbliżenie się do górnego zakresu pomiarowego. Dane przedstawione przez producenta określają te granice w odległościach odpowiednio 15 cm oraz 12 m [14]. Zbyt bliskie ustawienie przeszkody sprawia, że obiekt staje się niewidoczny dla skanera (rys. 7). Jest to bardzo niebezpieczne zjawisko szczególnie dla środowisk z obiektami ruchomymi, gdzie przestrzenie między przeszkodami mogą się zmieniać bardzo dynamicznie. W przypadku obiektów statycznych znajdujących się w obszarze badawczym zaobserwowano

brak widoczności narożnika przeszkody (obiekt po prawej stronie) oraz przy równoległym ustawieniu w stosunku do LiDARu – częściowe ograniczenie widzialności fragmentu płaszczyzny bocznej. Dodatkowo wyraźnie widać jak blisko ustawione obiekty w znaczący sposób wpływają na ograniczenie możliwości monitoringu całego środowiska badawczego. Niewidoczne dla modułu były przeszkody w odległości poniżej 15 cm, co potwierdza deklaracje producenta urządzenia.



Rys. 7 Skan otoczenia LiDARu z blisko umiejscowionymi dwiema przeszkodami

Badanie zasięgu maksymalnego pomiaru odległości przeprowadzono na pustej przestrzeni ograniczonej trzema ścianami, umieszczając na dystansie 12 m przeszkodę. Do tej granicy wszelkie pomiary odległości były poprawne i odzwierciedlały rzeczywisty dystans. Przy zbliżeniu się do deklarowanej przez producenta górnej wartości granicznej nastąpiły zakłócenia w postaci zaników obiektu, a po przekroczeniu bariery 12 m przeszkoda stała się zupełnie niewidoczna. W przypadku dokonywania pomiarów dla dużych odległości niezbędne jest także ustawienie skanowania z jak największą rozdzielczością, ponieważ dla 2000 i 4000 punktów zakłócenia były znacznie bardziej zauważalne.

### Podsumowanie

Testowany układ LiDAR pozwolił na dokładne mapowanie widocznego obszaru – dotyczyło to zarówno pomiaru odległości (dokładność do 1% zmierzonego dystansu) jak również orientacji kątowej obiektów (z precyzją do 1°).

Istnieją jednak ograniczenia, które należy wyeliminować, aby zminimalizować ryzyko wystąpienia braku bądź błędnego wykrycia przeszkód. Dotyczą one przede wszystkim zakresu pomiarowego danego urządzenia. W przypadku przebadanego skanera RPLIDAR A1M8, poniżej 15 cm pomiar jest niemożliwy, więc dobrym uzupełnieniem byłby inny czujnik laserowy o mniejszym zasięgu lub tańsza alternatywa w postaci sensora ultradźwiękowego, który bez problemu działa w tak małym zakresie.

Podobne uwagi dotyczą górnego zakresu pomiarowego, który należy mieć na uwadze projektując system do monitoringu otoczenia. Przeszkody znajdujące się w odległości większej niż przewidział to producent także stają się niewidoczne dla skanera. Działając w przewidzianym zakresie pomiarowym otrzymywane dane są bardzo

precyzyjne i w odpowiedni sposób odzwierciedlają parametry środowiska.

Zbyt silne natężenie światła dziennego jest negatywnym czynnikiem wpływającym na poprawność wyników. Sprawia ono, że pojawiają się zakłócenia w postaci znikających obiektów. Należy więc zwrócić uwagę, czy dany moduł jest przewidziany do pracy wewnątrz budynków czy w środowisku zewnętrznym. Przetestowany moduł skanera pozwala na uzyskanie pomiaru w 2D, natomiast zwiększenie precyzji pomiaru i wyeliminowanie problemów związanych z rzuceniem cienia przez niektóre niskie obiekty może zostać wyeliminowane poprzez użycie bardziej zaawansowanego urządzenia pozwalającego na skanowanie otoczenia w 3D.

**Autor:** mgr inż. Kacper Podbucki, Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, Zakład Układów Elektronicznych i Przetwarzania Sygnałów, ul. Jana Pawła II 24, 60-965 Poznań, E-mail: [kacper.podbucki@put.poznan.pl](mailto:kacper.podbucki@put.poznan.pl).

### LITERATURA

- [1] Suder J.; Maciejewski P.; Podbucki K.; Marciniak T.; Dąbrowski A.; Platforma pomiarowa do badania jakości działania lamp lotniskowych. Pomiary Automatyka Robotyka – 2019, nr 2, s. 5-13. [http://dx.doi.org/10.14313/PAR\\_232/5](http://dx.doi.org/10.14313/PAR_232/5)
- [2] Suder, J.; Podbucki, K.; Marciniak, T.; Dąbrowski, A. Low Complexity Lane Detection Methods for Light Photometry System. Electronics 2021, 10, 1665. <https://doi.org/10.3390/electronics10141665>
- [3] Graham Hope, „Volkswagen promises hands-free vans on the road by 2025”, 13.05.2021, AI Business, [https://aibusiness.com/document.asp?doc\\_id=769485&utm\\_source=infront&utm\\_medium=newsletter&utm\\_campaign=vw&utm\\_term=44330&utm\\_content=TAI2256&tracker\\_id=TAI2256&fbclid=IwAR1hb8K42etZKXkpwozo3cJFNclnDFvJmC8zal3uonyt0etHRooSn9HSUQ](https://aibusiness.com/document.asp?doc_id=769485&utm_source=infront&utm_medium=newsletter&utm_campaign=vw&utm_term=44330&utm_content=TAI2256&tracker_id=TAI2256&fbclid=IwAR1hb8K42etZKXkpwozo3cJFNclnDFvJmC8zal3uonyt0etHRooSn9HSUQ), dostęp: 24.05.2021
- [4] Yeong, D.J.; Velasco-Hernandez, G.; Barry, J.; Walsh, J. Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. Sensors 2021, 21, 2140. <https://doi.org/10.3390/s21062140>
- [5] Pollach, M.; Schiegg, F.; Knoll, A. Low Latency and Low-Level Sensor Fusion for Automotive Use-Cases. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Paris, France, 31 May–31 August 2020.
- [6] Abdelmohsen, Y.K. Camera-LIDAR Detection Fusion. Bachelor's Thesis, German University in Cairo, New Cairo City, Egypt, 2020.
- [7] Shahian Jahromi, B.; Tulabandhula, T.; Cetin, S. Real-Time Hybrid Multi-Sensor Fusion Framework for Perception in Autonomous Vehicles. Sensors 2019, 19, 4357.
- [8] Wang, Z.; Wu, Y.; Niu, Q. Multi-Sensor Fusion in Automated Driving: A Survey. IEEE Access 2019, 8, 2847–2868
- [9] Royo, S.; Ballesta-Garcia, M. An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles. Appl. Sci. 2019, 9, 4093. <https://doi.org/10.3390/app9194093>
- [10] Kolb, A.; Barth, E.; Koch, R.; Larsen, R. Time-of-flight cameras in computer graphics. Comput. Gr. Forum 2010, 29, 141–159.
- [11] Illade-Quinteiro, J.; Brea, V.; López, P.; Cabello, D.; Doménech-Asensi, G. Distance measurement error in time-of-flight sensors due to shot noise. Sensors 2015, 15, 4624–4642.
- [12] Sarbolandi, H.; Plack, M.; Kolb, A. Pulse Based Time-of-Flight Range Sensing. Sensors 2018, 18, 1679.
- [13] Pawłowski, P.; Jeske, M.; Kwiatkowski, S.; Kołodziejczyk, N. Zrobotyzowane mapowanie przestrzeni z wykorzystaniem czujnika LIDAR. Przegląd Elektrotechniczny 02/2021, s. 52-56
- [14] Shanghai Slamtec Co. Ltd, RPLIDAR A1 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Introduction and Datasheet Model: A1M8, 2020-10-15 rev.3.0