

Michał BRZOZOWSKI¹, Krzysztof PARCZEWSKI²

BADANIE WPLYWU NIESPRZYJAJĄCYCH WARUNKÓW ATMOSFERYCZNYCH NA LIDAR Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNEJ MGŁY

Streszczenie: W artykule przedstawia się wpływ sztucznej mgły na działanie LiDARu. Wykazuje się, że nawet gęsta mgła nie paraliżuje całkowicie działania urządzenia. Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają przewagę LIDARu nad kamerą pod kątem działania w złych warunkach atmosferycznych. Badania sygnalizują obniżenie wskaźnika odbłaskowości celów oświetlanych LiDARem z powodu wzrostu zadymienia.

Słowa kluczowe: lidar, sztuczna mgła, systemy wspomaganie kierowcy, samochody autonomiczne

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF ADVERSE WEATHER CONDITIONS ON LIDAR WITH THE USE OF ARTIFICIAL FOG

Summary: The article presents the effect of artificial fog on the performance of LiDAR. It has been shown that even dense fog does not completely paralyze the operation of the device. The conducted experiments show the advantage of LIDAR over the camera in terms of operation in bad weather conditions. It is shown, there is a decrease in the reflectivity of LiDAR-illuminated targets due to the increase in smoke.

Keywords: lidar, artificial fog, advanced driver assistance systems, autonomous cars

1. Systemy wspomaganie kierowcy

System wspomaganie kierowcy, w języku angielskim przedstawiany akronimem ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) jest w jakiejś formie obecny w każdym nowym samochodzie osobowym i ciężarowym. Elementy tego systemu, takie jak na przykład: asystent hamowania, aktywny tempomat, asystent utrzymania na pasie ruchu czy automatyczne rozpoznawanie znaków drogowych, obecnie są oferowane

¹ mgr inż. Michał Brzozowski, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, mbrzozowski@ath.bielsko.pl

² dr hab. Inż. Krzysztof Parczewski, prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, kparczewski@ath.bielsko.pl

nawet w podstawowych wersjach wyposażenia. Wynika to z faktu, że celem wprowadzania tych technologii jest przede wszystkim podniesienie poziomu bezpieczeństwa oraz odciążenie kierowcy. Rozwijanie tych systemów stało się priorytetem zarówno dla producentów samochodów jak i dla naukowców. Systemy te do swojego prawidłowego działania wymagają wykorzystania szeregu zaawansowanych czujników, a przede wszystkim: radaru, kamery i/lub LiDARu. Radar jest z powodzeniem wykorzystywany jako sensor służący do określania prędkości pojazdów poprzedzających, a tym samym jest niezbędnym składnikiem np. systemu awaryjnego hamowania. Kamery, wykorzystuje się np. do rozpoznawania znaków lub układach utrzymania pojazdu na pasie ruchu. LiDAR jest czujnikiem, który stosunkowo niedawno pojawił się w komercyjnych samochodach osobowych. Technologia ta, została bezpośrednio zapożyczona z koncepcyjnych samochodów autonomicznych, gdzie LiDAR odpowiada przede wszystkim za lokalizowanie samochodu w otoczeniu i rozpoznawanie obiektów. Przykładem samochodu osobowego wykorzystującego wszystkie trzy wymienione czujniki, może być Mercedes Benz EQS.

Ogólna zasada działania LiDARu pulsacyjnego polega na mierzeniu czasu od emisji do powrotu wiązki promieni lasera odbitej od celu oraz mierzeniu energii tej wiązki. Skuteczny zasięg działania wynosi nawet do 250 m. Na podstawie odbitych wiązek, LiDAR generuje dane w postaci chmury punktów, która zawiera informacje o położeniu oraz intensywności odbicia wiązki od punktów otoczenia (co wynika z energii wiązki) [7]. Na dalszym etapie, na podstawie tych informacji swą pracę rozpoczyna system percepcji. System ten, jest odpowiedzialny za syntezę informacji pozyskanych dzięki sensorom otoczenia. Wykorzystując dane z LiDARu i pozostałych sensorów, tworzy on wirtualną mapę otoczenia, identyfikując znajdujące się w nim obiekty i infrastrukturę, a następnie lokalizuje samochód w ramach tej mapy. Dodatkowym zadaniem systemu percepcji jest śledzenie ruchomych obiektów znajdujących się w polu widzenia czujników.

2. Metodologia

Chociaż LiDARy są uznawane za niezawodne i precyzyjne, a także dane uzyskiwane z LiDARu są mniej zakłócone przez złe warunki atmosferyczne niż np. w przypadku kamery, to warunki pogodowe mogą również istotnie ograniczyć skuteczność ich działania [8, 9]. Ze względu na dynamicznie rosnącą powszechność stosowania LiDARów w zagadnieniach automotive, pojawia się konieczność testowania tego typu urządzeń. Wiąże się to zarówno z testowaniem samych urządzeń jak i z zwiększaniem możliwości algorytmów (sztucznych sieci neuronowych) dedykowanych do rozpoznawania otoczenia i detekcji obiektów. Do badań i walidacji wydajności LiDARów stosuje się testy na stanowiskach badawczych [13].

Stanowisko badawcze musi pozwalać na możliwie wiarygodne symulowanie warunków drogowych przy jednoczesnym zapewnieniu powtarzalności tych warunków. Atutem jest także możliwość dodawania nowych elementów do badanej sceny, co stwarza możliwość poszerzenia zakresu badań. Sama budowa stanowiska jest zadaniem niełatwym, ponieważ wymaga odpowiedniej wiedzy, przestrzeni, czasu oraz środków finansowych. Dlatego wielu badaczy decyduje się na przeprowadzenie badań w gotowej, specjalnie przygotowanej komorze, takiej jak np. Komora

Klimatyczna CERMA w Clermont w Francji. [1, 13]. Taka komora pozwala na stworzenie stabilnej mgły o konkretnych parametrach przejrzystości (od 5 do 200 metrów).



Rysunek 1. Komora CERNA [1]

3. Budowa stanowiska badawczego

Zbudowanie komory badawczej o długości odpowiadającej skutecznemu zasięgowi LiDARu byłoby przedsięwzięciem wymagającym finansowo i infrastrukturalnie, ponieważ maksymalny zasięg testowanego urządzenia wynosi do 260 metrów. Nawet w pełni profesjonalna komora CERNA (rysunek 1) ma długość zaledwie 25 metrów. Dlatego w ramach tej pracy postanowiono wykorzystać istniejące już laboratorium (garaż) o długości 9 metrów.

W celu umożliwienia określenia poziomu widoczności, na posadzce ustawiono 9 odblaskowych słupków referencyjnych oddalonych od siebie o 1 metr. Tym samym, stanowisko pozwala na symulowanie gęstej mgły, niemalże całkowicie ograniczającej widoczność. Empiryczne określenie poziomu widoczności nie jest w badaniach nowym zjawiskiem. Badacze [Daniel i inni, 2017] z uniwersytetu w Birmingham wykorzystali w tym celu krążek Secchiego³, którego funkcjonalność jest identyczna jak odblaskowych słupków referencyjnych.

Do wytworzenia mgły, wykorzystano wytwornicę dymu o mocy 1000W. Takie urządzenie, wykorzystujące roztwór glikolu i wody, jest w krótkim czasie, w stanie wygenerować stabilną mgłę.

Za cele do naświetlania obrano wcześniej przygotowane makiety samochodu oraz znaków drogowych (wykonane w skali 1:5). Dodatkowo, obok makiet w skali umieszczono tarczę znaku o średnicy 50cm. Makiety zostały przygotowane

³ Krążek Secchiego - przyrząd do pomiaru przezroczystości wody. Składa się z białego (lub biało-czarnego) krążka opuszczanego na wyskalowanej linii z podziałką centymetrową. Odczyt głębokości, na której krążek przestaje być widoczny, wskazuje na stopień zmętnienia wody.

z materiału o bardzo wysokim współczynniku odbłaskowości (odbicie Lambertowskie) oscylującym w okolicach 255.00 (maksymalne możliwe do uzyskania). Kolor odpowiadający takiemu odbiciu to czerwony. Zostało to potwierdzone w referencyjnym badaniu przy braku zamglenia. Najmniejsze możliwe do uzyskania odbicie oscyluje nieco powyżej zera. Kolor, który mu odpowiada to niebieski.

Należy przyjąć, że im wyższy jest wskaźnik odbłaskowości tym lepiej LiDAR jest w stanie określić położenie danego celu. Zdecydowano się wykorzystać w pełni odbłaskowe cele, ponieważ referencyjny maksymalny zasięg urządzenia deklarowany przez producenta, również podawany jest w odniesieniu do mocno odbłaskowych obiektów. Parametry LiDARu Livox Horizon, wykorzystanego do badań, przedstawia tabela 1:

Tabela 1 Wybrane parametry LiDARu Livox Horizon

Livox Horizon	
Długość fali	905nm,
Zasięg	260m @ 80% odbłaskowości,
Pole widzenia	81.7 pionowo x 25.1 poziomo,
Ilość generowanych punktów	240 000 punktów/sekundę,
Norma IP	IP 67.

Zdjęcia przedstawione w pracy to obraz chmury punktów generowanej przez LiDAR, widziany w programie LivoxViewer (software wykonany przez producenta LiDARu - Livox).

4. Badania eksperymentalne

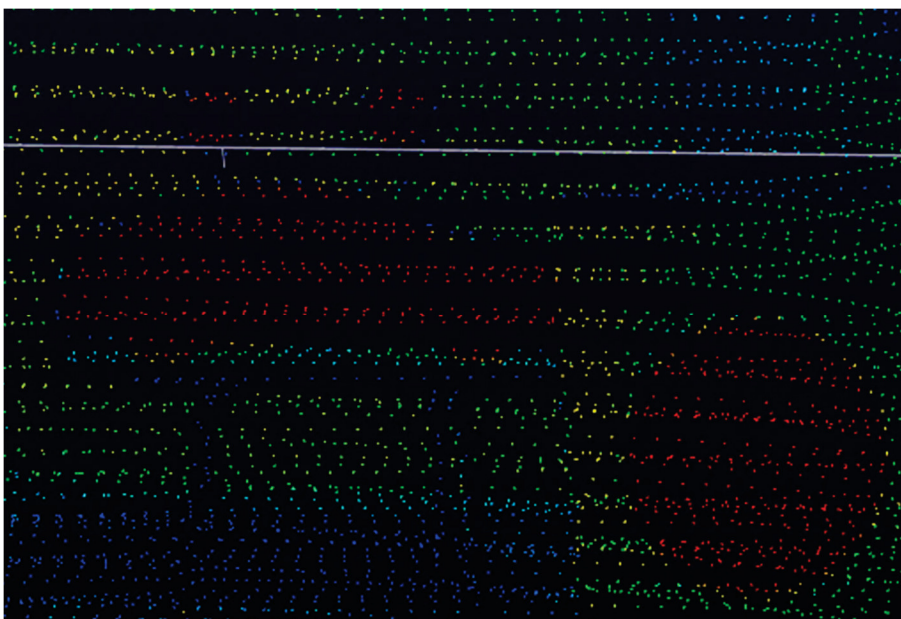
Celem jaki postawiono sobie podczas tego badania, było przetestowanie wpływu sztucznej mgły na działanie LiDARu, oraz próba odnalezienia poziomu widoczności przy którym oświetlane cele staną się niewidoczne. Do wykonania zdjęć referencyjnych wykorzystano aparat o matrycy 12MP i przesłonie $f = 1.8$. Makiety umieszczono w odległości 5 metrów od urządzenia. Celem zwiększenia czytelności, zdjęcia wykonane w programie Livox Viewer zostały poddane korekcji kontrastu oraz jasności. W trakcie trwania eksperymentu, stopniowo zwiększano zadymienie pomieszczenia. Jako, że przed dokonaniem każdego z pomiarów, czekano aż sztuczna mgła równomiernie się rozłoży, obserwowany spadek widoczności nie był równomierny. Stąd, uznano że prawidłowe warunki umożliwiające przeprowadzenie rzetelnego badania, wystąpiły przy widoczności: pełnej, 6 metrów, 4 metry, 1 metr oraz przy całkowitym zamgleniu.

4.1. Pełna przejrzystość powietrza

a)



b)



b)

Rysunek 2. a) Zdjęcie przedstawiające stanowisko badawcze przy pełnej przejrzystości powietrza. b) Zdjęcie z programu Livox Viewer, ukazujące cele przy pełnej przejrzystości powietrza

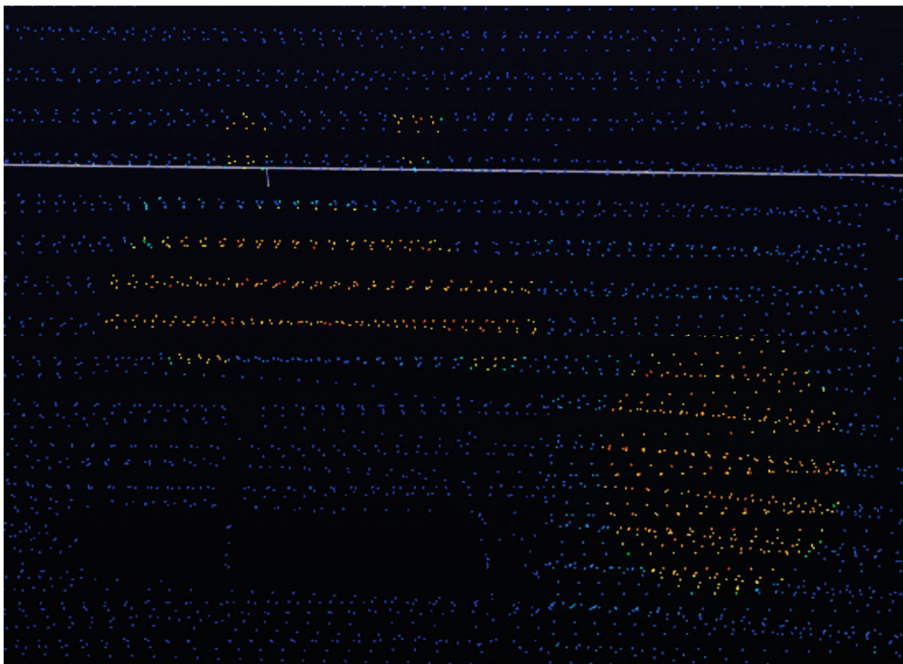
Jak widać, LiDAR rozpoznał odbłaskowe makiety i oznaczył je na czerwono. Kolejny etap eksperymentu stanowiło stopniowe zwiększanie zadymienia aż do uzyskania całkowitego braku przejrzystości powietrza, to jest sytuacji w której nie widać końca wyciągniętej ręki.

4.2. Widoczność 6 metrów

a)



b)



Rysunek 3. a) Zdjęcie przedstawiające stanowisko badawcze przy widoczności 6 metrów b) Zdjęcie z programu Livox Viewer, ukazujące cele przy widoczności 6 metrów

Jak widać na rysunku 3a, cele stają się już słabo widoczne. Na obrazie z LiDARu widać natomiast, że chociaż cele są nadal łatwe do zidentyfikowania to kolor

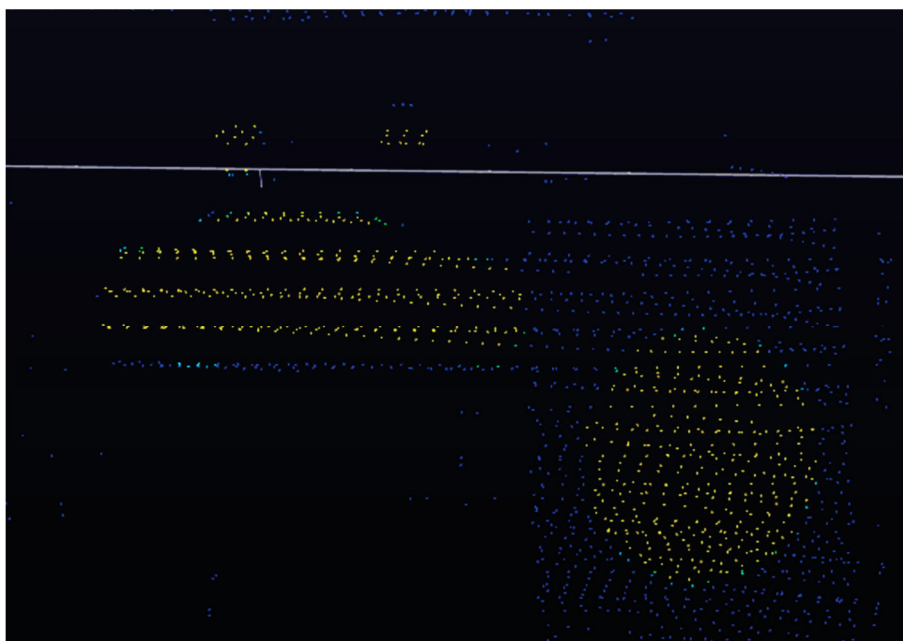
odpowiadający poziomowi odbiaskowości zmienił się, tym samym, mgła spowodowała, że obiekty stały się gorzej widoczne.

4.3. Widoczność 4 metry

a)



b)



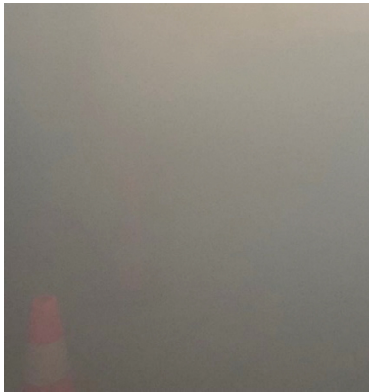
b)

Rysunek 4 a) Zdjęcie przedstawiające stanowisko badawcze przy widoczności 4 metrów. b) Zdjęcie z programu Livox Viewer, ukazujące cele przy widoczności 4 metrów

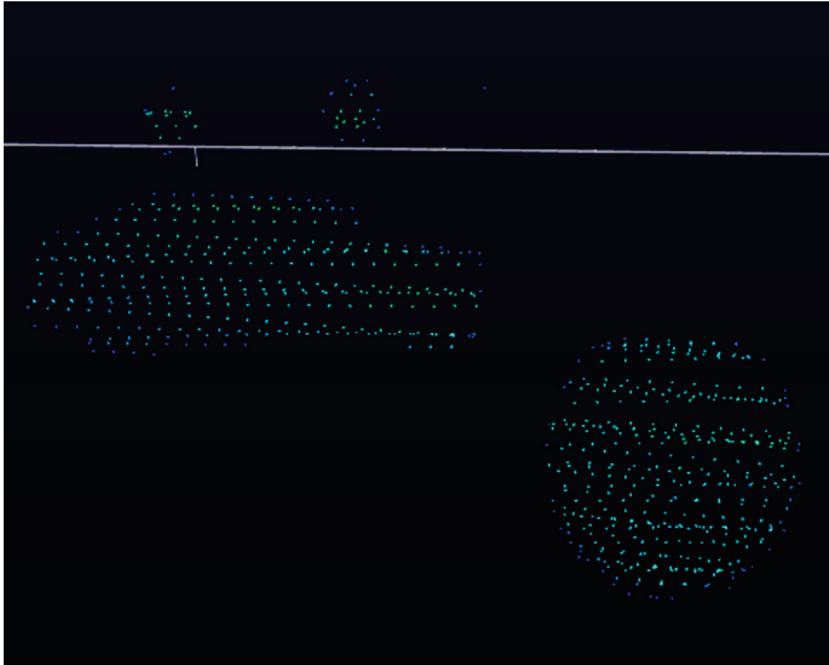
Gdy widoczność spadła do poziomu 4 metrów, cele stały się niewidoczne dla obserwatora. Na obrazie z Lidaru cele nadal są widoczne, jednakże ponownie zmieniły kolor – spadł wskaźnik odblaskowości. Dodatkowo, niektóre wcześniej słabo widoczne elementy stały się już niewidoczne.

4.4. Widoczność 1 metr

a)



b)

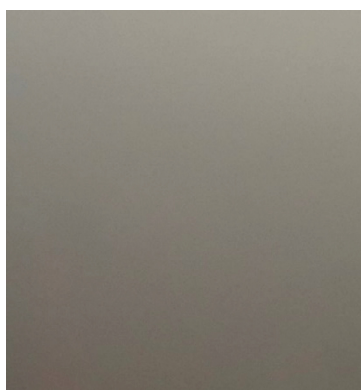


Rysunek 5 a) Zdjęcie przedstawiające stanowisko badawcze przy widoczności 1 metr. b) Zdjęcie z programu Livox Viewer, ukazujące cele przy widoczności 1 metr

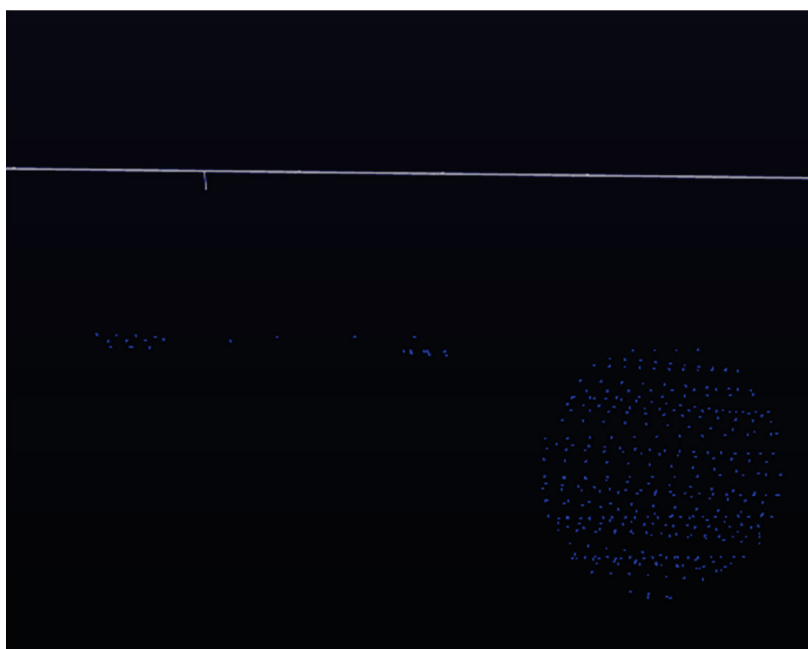
Gdy widoczność spadła do 1 metra, bezpieczne poruszanie się człowieka przez komorę nie było już możliwe. Na obrazie z LiDARu cele nadal są widoczne i raz jeszcze zmieniły kolor – wraz z spadkiem wskaźnika odbiaskowości. Pozostałe elementy tła nie są już widoczne.

4.5. Całkowity brak widoczności (widoczność 0 metrów)

a)



b)



Rysunek 6 a) Zdjęcie przedstawiające stanowisko badawcze przy całkowitym braku widoczności. b) Zdjęcie z programu Livox Viewer, ukazujące cele przy całkowitym braku widoczności

Jak widać na rysunku 6a, poziom zadymienia był tak duży, że nie widać nawet konturu słupka referencyjnego ustawionego w odległości 1 metra. Na obrazie z LiDARu można wyraźnie dostrzec tarczę znaku o średnicy 50cm oraz fragmenty makiety pojazdu. Tarcze znaków wykonane w skali 1:5 nie są już widoczne. Warto zauważyć, że ponownie spadł wskaźnik odbłaskowości.

4.6. Zwiększenie odległości od celów

W przypadku celów oddalonych o 5 metrów od urządzenia oraz maksymalnego zadymienia komory, jeden z znaków nadal pozostawał widoczny. Postanowiono stopniowo zwiększać odległość od urządzenia, szukając momentu w którym żadna z makiet nie będzie już widoczna. Efekt ten osiągnięto w okolicach 8 metrów i 50 centymetrów.



Rysunek 7 Zdjęcie z programu Livox Viewer, ukazujące brak widoczność celów przy całkowitym zadymieniu, po zwiększeniu odległości od celów do 8 metrów i 50 centymetrów

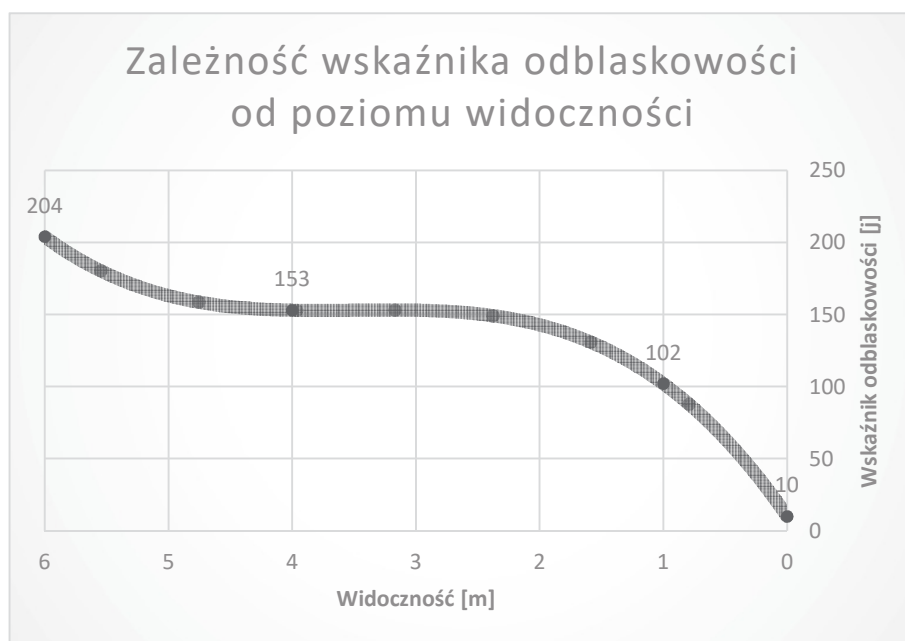
Jak widać na rysunku 7, żaden z celów nie jest widoczny ponieważ do LiDARu nie wraca już niemalże żadna z emitowanych wiązek. Widoczna jedynie linia siatki odległości – sztucznie dodana w programie Livox Viewer.

5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki uzyskane przy różnej przejrzystości powietrza spowodowanej mgłą zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Zestawienie wyników oceny działania LiDARu uzyskanych przy różnej przejrzystości powietrza dla celów oddalonych o 5 metrów od urządzenia

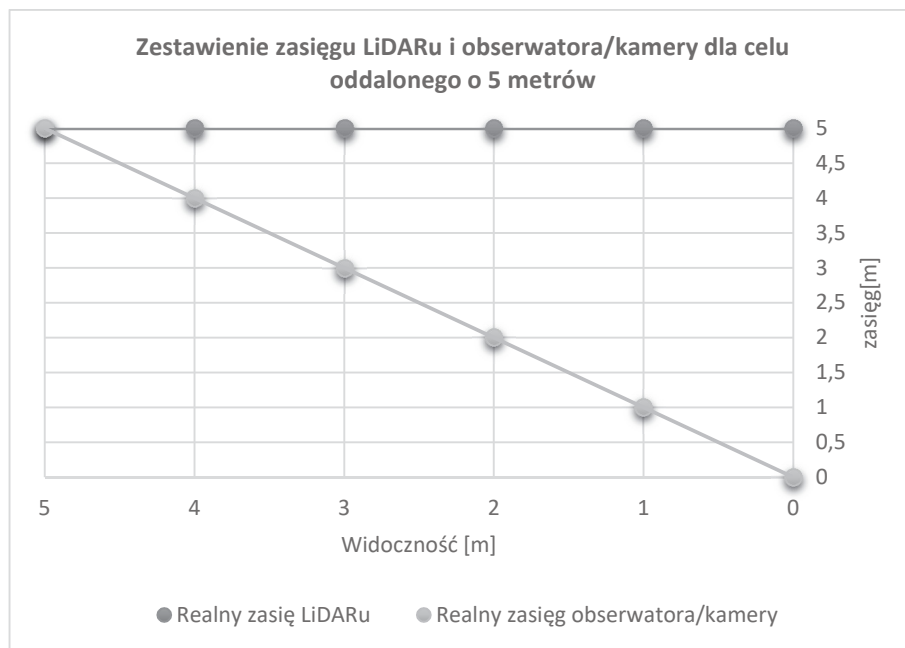
Pomiar	Zakres widoczności	Cel widziany przez obserwatora	Cel widoczny dla LiDARu	Wskaźnik odbłaskowości celu
0	Pełny	TAK	TAK	255
1	6 metrów	TAK	TAK	204
2	4 metry	NIE	TAK	153
3	1 metr	NIE	TAK	102
4	Całkowity brak	NIE	TAK	0



Rysunek 8 Zależność wskaźnika odbłaskowości celów od poziomu widoczności

Wyniki eksperymentu, ukazujące spadek poziomu odbłaskowości celów wraz z wzrostem zadymienia przedstawia wykres (rysunek 9). Dokonano aproksymacji wielomianem 3 stopnia w postaci: $y = 3,41x^3 - 35,79x^2 + 124,38x + 10$. Analiza wykresu wykazuje, że spadek odbłaskowości nie jest liniowy. W środkowym zakresie obserwujemy niewielki spadek, poniżej poziomu 2 metrów spadek jest gwałtowny.

Przeprowadzone badania pokazują, że LiDAR zachowuje sprawność działania, podczas gdy obserwator lub kamera nie mają już możliwości dostrzec otoczenia. Obserwacje te przedstawiają dane zestawione na wykresie (rysunek 9).



Rysunek 9 Zestawienie zasięgu LiDARu i obserwatora/kamery dla celu oddalonego o 5 metrów

Gdy widoczność spada do pięciu metrów, cel staje się już ledwo dostrzegalny dla obserwatora lub kamery. Jest to wartość krytyczna, po przekroczeniu, której obserwator lub kamera, nie są w stanie dostrzec celów. Chociaż wskaźnik odbiaskowości celów ulega degradacji, LiDAR nadal je dostrzega. Te kilka metrów przewagi zasięgu, które LiDAR posiada w stosunku do obserwatora czy kamery to zaleta nie do przecenienia w trudnych warunkach drogowych. Samochód poruszający się z prędkością 20km/h (jadąc w gęstej mgle) posiadający LiDAR ma dodatkową sekundę na reakcję na zagrożenie.

Badania przeprowadzone w małej komorze badawczej, z wykorzystaniem makiet w skali 1:5 mogą stanowić punkt odniesienia dla badań prowadzonych na większych odległościach. Widoczność pomniejszonych makiet została utracona dopiero na końcowych etapach eksperymentu. Tym samym, wydaje się, że stosowanie makiet pozwala znacząco obniżyć wymaganą długość komory. Jednakże, w celu potwierdzenia słuszności tych przypuszczeń, planuje się zbudować pełnowymiarową komorę badawczą.

Kolejnym ważnym wnioskiem płynącym z przeprowadzonego eksperymentu jest fakt, że LiDAR Livox Horizon, który jest relatywnie niedrogim urządzeniem, jest w stanie dostrzec odbiaskowe obiekty nawet przy zupełnym braku widoczności.

Graniczna wartość dla tego konkretnego urządzenia wynosi około 8 metrów 50 centymetrów.

Badania przeprowadzono w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Wydziału Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

LITERATURA

1. BIJELIC M., GRUBER T., RITTER W.: A Benchmark for Lidar Sensors in Fog: Is Detection Breaking Down? IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2018), s. 760-767.
2. BRUMMELEN J., O'BRIEN M., GRUYER D., NAJJARAN H.: Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. Transportation Research Part C, 89(2018), 384–406.
3. BRZozowski M., PARCZEWSKI K. The influence of adverse weather conditions on the operation of sensors used in autonomous cars. Projektowanie, badania i eksploatacja, University of Bielsko-Biala, (2021), s. 23-37.
4. BRZozowski M., PARCZEWSKI K.: Validating adverse weather influence on LiDAR with an outdoor rain simulator, 13th International Conference – TRANSBALTICA 2022: Transportation Science and Technology, 2022.
5. COLOMB M., DUTHON P., LAUKKANEN S.: Characteristics of Adverse Weather Conditions. DENSE, https://www.dense247.eu/fileadmin/user_upload/PDF/DENSE_D2.1_Characteristics_of_Adverse_Weather_Conditions.pdf. last accessed 2022.04.07
6. DANIEL L., PHIPPEN D., HOARE E., STOVE A., CHERNIAKOV M., GASHINOVA M.: Low-THz Radar, Lidar and Optical Imaging through Artificially Generated Fog International Conference on Radar Systems, (2017).
7. DRUML, N., MAKSYMOWA I., THURNER T., VAN LIEROP, D., HENNECKE M., FOROUTAN A.: 1D MEMS Micro-Scanning LiDAR. International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, Venice, (2018).
8. ESKANDARIAN A, Handbook of Intelligent Vehicles. Springer, London, 2(2012).
9. FILGUEIRA A., GONZÁLEZ-JORGE H., LAGÜELA S., DÍAZ-VILARIÑO L., ARIAS P.: Quantifying the influence of rain in LiDAR performance. Measurement, 95(2017), s.143-148.
10. GOODIN C., CARRUTH D., DOUDE M., HUDSON C.: Predicting the influence of rain on LIDAR in ADAS. Electronics. 8(2019), 89.
11. HASIRLIOGLU S., KAMANN A., DORIC I., BRANDMEIER T.: Test methodology for rain influence on automotive surround sensors. IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, (2016).
12. JOKELA, M., KUTILA M., PYYKÖNEN P.: Testing and Validation of Automotive Point-Cloud Sensors in Adverse Weather Conditions. Applied Sciences 9(2019)11, 2341.
13. KUTILA M., PYYKÖNEN P., HOLZHÜTER H., COLOMB M., DUTHON P.: Automotive LiDAR performance verification in fog and rain. 21st International

Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui Hawaii, (2018), s.1695-1701.

14. LEWANDOWSKI P.A., EICHINGER W.E., KRUGER A., KRAJEWSKI W.F.: Lidar-based estimation of small-scale rainfall: Empirical evidence. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(2009)3, 656-664.
15. LIVOX LIDAR Specs: <https://www.livoxtech.com/horizon/specs> last accessed 04.07.2022.