

# Analysis of the usability of daily LiDAR measurements performed using Apple devices

## Analiza użyteczności użycia codziennych pomiarów LiDAR wykonywanych urządzeniami firmy Apple

Rafał Porzuc\*, Piotr Kopniak

*Department of Computer Science, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Poland*

### Abstract

The subject of this paper is the analysis of the usability of daily measurements performed by Apple devices equipped with LiDAR sensors. The study focuses on conducting research and analyzing the obtained results in terms of aspects such as accuracy, measurement sensitivity to disturbances, as well as the ability to perform measurements in various, sometimes challenging, situations. The outcome of the conducted research is to determine to what extent daily life can rely on measurements performed using Apple devices, what measurement errors need to be prepared for, but also in what situations these devices can help and replace conventional measuring tools.

*Keywords:* LIDAR sensor; measurement accuracy; Apple devices

### Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę użyteczności użycia codziennych pomiarów wykonywanych urządzeniami firmy Apple wyposażonymi w czujnik LiDAR. Praca skupia się na wykonaniu badań i analizie uzyskanych wyników pod kątem takich aspektów jak dokładność, wrażliwość pomiarów na zakłócenia, ale także na możliwości wykonania pomiarów w różnych, czasem trudnych, sytuacjach. Wynikiem przeprowadzonych badań jest określenie w jakim stopniu w życiu codziennym można opierać się na pomiarach wykonywanych przy użyciu urządzeń Apple, na jakie błędy pomiarowe trzeba się przygotować, ale także w jakich sytuacjach urządzenia te mogą pomóc i zastąpić konwencjonalne narzędzia miernicze.

*Słowa kluczowe:* czujnik LiDAR; dokładność pomiarów; urządzenia Apple

\*Corresponding author

*Email address:* rafal.porzuc@pollub.edu.pl (R. Porzuc)

Published under Creative Common License (CC BY 4.0 Int.)

## 1. Wstęp

W życiu codziennym często napotykamy potrzebę pomiaru odległości w naszym otoczeniu, na przykład w domu, wykonujemy pomiar, aby poznać metraż danego pomieszczenia przed zakupem płytek bądź dywanu. Kiedy udajemy się na zakupy, pragniemy poznać wymiary mebli, pomieszczeń, ubrań czy sprzętów elektronicznych, aby mieć pewność czy są dostosowane do naszych potrzeb i warunków. Te proste, codzienne sytuacje ilustrują znaczenie pomiarów w naszym życiu.

Jednakże, nie zawsze mamy przy sobie tradycyjną miarkę, a nawet jeśli ją posiadamy, nie w każdej sytuacji jest możliwe jej użycie. Czasami ogranicza nas jej długość, innym razem problemem może być dotarcie do elementu, który chcemy zmierzyć. Na szczęście, dzięki postępowi technologicznemu, prawie w każdej chwili nosimy przy sobie smartfony, które stają się naszym wszechstronnym narzędziem. Smartfony wyposażone są w różnego rodzaju czujniki i akcesoria, które mogą być wykorzystane do zadań, o których w przeszłości nawet nie myśleliśmy. Jedną z takich innowacyjnych technologii jest LiDAR, który zyskuje coraz większą popularność w nowoczesnych smartfonach.

LiDAR, z angielskiego Light Detection and Ranging, umożliwia wykonywanie pomiarów odległości poprzez wysyłanie wiązki światła i zmierzenie czasu do jej powrotu. Dzięki tej technologii, smartfony wyposażone

w czujnik LiDAR, mogą służyć jako praktyczne narzędzie pomiarowe, które zawsze mamy pod ręką, i które pozwalają nam zmierzyć odległość za pomocą zaledwie kilku dotknięć ekranu. Jednym z producentów tak zaawansowanych smartfonów, posiadających czujnik LiDAR, jest firma Apple, która wprowadziła na rynek iPhone'y działające na systemie iOS.

Jednakże, zanim zaczniemy polegać na urządzeniach firmy Apple jako narzędziach pomiarowych, warto zastanowić się nad ich dokładnością oraz skutecznością. Przede wszystkim należałoby sprawdzić, czy pomiary dokonywane przy ich użyciu są wystarczająco dokładne, aby mogły sprostać naszym codziennym potrzebom i zastąpić tradycyjne miarki.

## 2. Cel pracy i hipotezy badawcze

Celem pracy jest weryfikacja tego, czy technologia LiDAR, zaimplementowana w urządzeniach Apple, umożliwia ich wykorzystanie jako narzędzi pomiarowych w codziennych sytuacjach, eliminując konieczność używania tradycyjnych miarek mechanicznych”. Aby zweryfikować postawioną tezę należy w pierwszej kolejności przeanalizować kilka hipotez przedstawionych poniżej.

H1: *Technologia LiDAR w iPhone'ach zapewnia pomiary o dużej dokładności, gdzie względny błąd pomiarowy w stosunku do wartości wzorcowej nie przekracza 1%.*

H2: Dokładność pomiarów urządzeniami Apple jest lepsza od pomiarów zwykłą miarką mechaniczną oraz od pomiarów laserowych wykonywanych przez dalmierze.

H3: Urządzenia Apple dają możliwość wykonywania pomiarów w trudno dostępnych obszarach i sytuacjach, gdzie konwencjonalne miarki mechaniczne oraz dalmierze mają utrudnione działanie lub całkowicie nie są w stanie zmierzyć dystansu, poprzez występowanie różnorodnych przeszkód.

H4: Urządzenia Apple wyposażone w LiDAR zachowują dokładność dla trudnych pomiarów, na podobnym poziomie co w przypadku standardowych pomiarów.

H5: Urządzenia Apple posiadające czujnik LiDAR są niewrażliwe na środowisko i powierzchnię podczas wykonywania pomiarów.

H6: Wykonywanie pomiarów urządzeniami Apple, wyposażonymi w LiDAR, jest dużo łatwiejsze niż zwykłymi miarkami mechanicznymi.

H7: Urządzenia Apple dysponują większym zasięgiem pomiarowym niż standardowe miarki.

Aby dokładnie zbadać przedstawione hipotezy, opracowano zestaw kryteriów, które należy uwzględnić podczas analizy urządzeń Apple wyposażonych w technologię LiDAR. W skład tego zbioru wchodzi następujące kryteria:

- dokładność pomiarów,
- wrażliwość na zakłócenia,
- łatwość wykonywania pomiarów,
- zakres pomiarów.

Badania będą przeprowadzone na telefonach firmy Apple wyposażonych w czujnik LiDAR oraz na innych ogólnie dostępnych urządzeniach pomiarowych, takich jak dalmierze oraz miarka mechaniczna. Natomiast do uzyskania danych z czujnika LiDAR posłużą dwie aplikacje, pierwsza - natywna istniejąca na systemach iOS, druga - własna stworzona na potrzeby przeprowadzenia doświadczeń.

### 3. Przegląd literatury

Analizując dostępną literaturę, można zauważyć, że brakuje artykułów dotyczących systemu iOS w kontekście najnowszych technologii LiDAR wprowadzonych na urządzeniach firmy Apple. Pierwsze informacje dotyczące technologii LiDAR można odnaleźć w publikowanych przez firmę Apple danych dotyczących konkretnych wydań systemu iOS oraz iPadOS [1]. W tych dokumentach zawarte są wszystkie wzmianki dotyczące elementów, które pojawiają się w systemach operacyjnych urządzeń Apple. Niestety, pomimo informacji o dodanej technologii LiDAR, brakuje konkretnych danych dotyczących chociażby dokładności czujnika zastosowanego w tych urządzeniach. Kolejne źródło [2] opisujące szereg funkcjonalności systemu iOS oraz iPhone'a, wspomina o technologii LiDAR umieszczonej w iPhone 12 Pro, ale opisuje je tylko jako rozwiązanie, które usprawnia działanie aparatu, aplikacji polegających na rozszerzonej rzeczywistości oraz systemowej miarki. Tutaj także nie znajdują się konkretne wartości z pomiarów, do których można byłoby się odnieść. Trzecia publikacja [3], która została wydana po wprowadzeniu przez firmę Apple

czujnika LiDAR do swoich urządzeń, opisuje go wyłącznie w aspekcie pracy z aparatem. Prawdą jest, że ta technologia zdecydowanie zwiększa potencjał działania takich elementów jak aparat, ale mimo wszystko ten fakt nie pomaga w określeniu jaką dokładnością charakteryzują się pomiary wykonane na urządzeniach Apple wspieranych przez LiDAR. Kolejne dwie prace [4, 5] opisują pod podobnym kątem zastosowany LiDAR w iPhone'ach. Zwracają przede wszystkim uwagę na takie aspekty jak szybsze ustawianie ostrości w aparacie, lepsze zdjęcia nocne czy też dokładniejsze ustawianie pierwszego planu podczas wykonywania zdjęć portretowych. Są to publikacje, gdzie można znaleźć pomocne informacje w tym jak wykorzystać potencjał LiDAR-u w fotografii, ale niestety nie dostarczają żadnych innych informacji o czujniku zastosowanym w urządzeniach Apple. Kolejna publikacja [6], która skupia się na odkrywaniu możliwości iPhone'a, wspomina tylko w minimalnym stopniu o istnieniu czujnika LiDAR. Opisuje jego lokalizację w urządzeniu oraz ponownie fakt, że kamera wykorzystuje dane pochodzące z tego sensora do ustalenia odległości obiektów na pierwszym planie oraz w oddali. Ostatnią pozycją literaturową [7] jest dokumentacja techniczna firmy Apple, która dostarcza najwięcej konkretnych informacji o zastosowanej technologii. Można znaleźć w niej informacje na przykład o tworzonych mapach głębokości, mapach pewności, możliwości wykrywania płaszczyzn pionowych oraz poziomych, sposobie weryfikacji czy czujnik LiDAR istnieje w danym urządzeniu Apple oraz o wielu innych programistycznych aspektach. W dokumentacji brakuje jednak danych, które dałyby odpowiedź na kluczowe pytania, na przykład o ile myli się czujnik LiDAR w urządzeniach Apple albo czy potrafi działać w każdych warunkach.

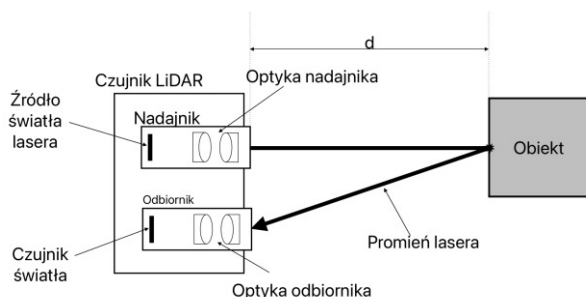
Na podstawie wspomnianych źródeł można jednoznacznie stwierdzić, że aktualnie brakuje dokładnych informacji, również od firmy Apple, dotyczących ograniczeń, słabych stron czy przede wszystkim precyzji pomiarów wykonywanych za pomocą urządzeń z wbudowanym czujnikiem LiDAR.

### 4. Omówienie technologii

Ponieważ praca dotyczy analizy użycia technologii LiDAR zastosowanej w urządzeniach Apple, takich jak iPhone oraz iPad, należało w pierwszej kolejności zapoznać się z tym jak działa czujnik LiDAR, a także w jaki sposób system iOS umożliwia korzystanie z danych pochodzących z tego sensora.

#### 4.1. Technologia LiDAR

LiDAR z ang. Light Detection and Ranging co w tłumaczeniu oznacza wykrywanie światła i zasięgu. Jest to technologia wykorzystująca światło laserowe do mierzenia odległości [8]. Instrument pomiarowy LiDAR składa się z dwóch części (Rysunek 1): nadajnika, który wysyła wiązkę światła oraz odbiornika, który dokładnie mierzy czas, po którym odbita wiązka światła laserowego powróci do urządzenia.



Rysunek 1: Schemat czujnika LiDAR [8].

Czujnik LiDAR bazuje na świetle laserowym, dlatego też, aby obliczyć odległości od obiektu należy posłużyć się poniższym wzorem (1), który w uproszczonej formie opiera się na przemnożeniu prędkości światła przez czas, po którym wiązka powróciła do odbiornika. Następnie otrzymany iloczyn należy podzielić przez 2 ze względu na fakt, że światło musi pokonać dwa razy tę samą drogę, najpierw do badanego obiektu i z powrotem do odbiornika.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

Gdzie  $d$  oznacza obliczony dystans,  $c$  oznacza prędkość światła, a  $t$  oznacza czas od wysłania wiązki światła do jej powrotu.

Istnieje wiele rodzajów laserów o zróżnicowanej mocy oraz zasięgu, jednak najczęściej spotykanym podziałem jest to, czy LiDAR jest topograficzny czy batymetryczny [9]. Pierwszy rodzaj, czyli topograficzny jest powszechniej wykorzystywany. Charakteryzuje się tym, że emituje światło bliższe podczerwieni, które służy do mapowania terenów, budynków oraz mierzenia odległości do różnych obiektów. Natomiast LiDAR batymetryczny wykorzystuje zielone światło lasera, które doskonale przenika przez wodę, dzięki czemu umożliwia pomiary głębokości np. koryta rzeki czy dna morskiego. Technologia ta znajduje szerokie zastosowanie zarówno w przemyśle jak i komunikacji, na przykład w samolotach, helikopterach, dronach, pojazdach autonomicznych, urządzeniach pomiarowych i w wielu innych miejscach [10].

#### 4.2. LiDAR w iPhone i iPad

Sensor LiDAR po raz pierwszy pojawił się w urządzeniach Apple w 2020 roku i został określony przez wiceprezesa Apple jako zaawansowana technologia, która nigdy wcześniej nie była dostępna w urządzeniach mobilnych [11]. Od tego czasu jest umieszczany w modelach iPhone'a [12] i iPad'a w wersjach Pro [13]. Aktualnie firma Apple wypuściła na rynek 14 urządzeń, które otrzymały wbudowany skaner LiDAR, począwszy od iPhone'a 12 Pro i iPad'a Pro 11 cali (2 gen.) aż do iPhone'a 15 Pro Max i iPad'a Pro 12,9 cala (6 gen.). Biorąc pod uwagę historię czujnika LiDAR to ani czas, w którym firma Apple zaczęła montować go w swoich urządzeniach ani sama technologia nie są czymś odkrywczym. Na uwagę zasługuje jednak fakt jak bardzo udało się zmminiaturyzować urządzenie pomiarowe, aby zmieściło się w telefonie, a na dodatek było w stanie pracować

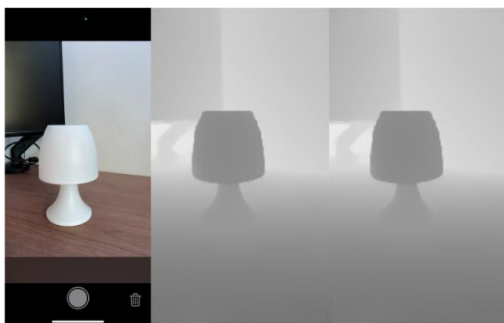
w czasie rzeczywistym i badać odległość nie tylko do jednego punktu, ale do całej siatki punktów. W porównaniu do dużych czujników na przykład montowanych w pojazdach autonomicznych, które mają najczęściej wielkość kilkunastu czy kilkudziesięciu centymetrów, to ten znajdujący się w telefonie jest bardzo mały i wymiar całego czujnika jest mniejszy niż 1 centymetr.

#### 4.3. Dostęp do danych z LiDAR-u oraz ich zawartość

Czujnik LiDAR mierzy odległość telefonu do obiektu korzystając z wzoru opierającego się na prędkości światła oraz czasie po jakim wiązka światła laserowego powróci do odbiornika. Dzięki temu jest w stanie bardzo dokładnie oszacować odległość do badanego obiektu. Pomimo, że wzór na obliczenie odległości obiektu od czujnika LiDAR jest względnie prosty to ręczne wyliczanie wartości byłoby bardzo trudne ze względu na fakt, że należy uwzględnić wszystkie dodatkowe aspekty takie jak na przykład zastosowana optyka w nadajniku oraz odbiorniku. Z pomocą w tym przypadku przychodzi system iOS, który dostarcza szereg funkcji gotowych do wykorzystania, dzięki którym można w łatwy sposób posłużyć się technologią LiDAR umieszczoną w urządzeniach mobilnych Apple.

W celu wykorzystania funkcjonalności opartych na czujniku LiDAR należy użyć jednego z trzech frameworków, które dostarcza system iOS: AVFoundation, ARKit lub RealityKit. Pierwszy z nich, czyli AVFoundation, został stworzony głównie do obsługi multimediów i umożliwia przechwytywanie oraz przetwarzanie obrazu i dźwięku. Co prawda posiada on wsparcie dla LiDAR-u, ale nie umożliwia tworzenia rzeczywistości rozszerzonej oraz obsługi obiektów w 3D. Natomiast pozostałe dwa pakiety, czyli ARKit oraz RealityKit zawierają pełne wsparcie zarówno dla danych o głębi, pochodzących z czujnika LiDAR jak i rzeczywistości rozszerzonej [14]. To z którego pakietu skorzysta programista zależy przede wszystkim od aplikacji jaką tworzy, od jej wymagań oraz celów do osiągnięcia.

Niezależnie od wykorzystanego pakietu, programista ma dostęp do szeregu informacji pochodzących z czujnika, na przykład do mapy głębokości. Poniższe zrzuty ekranu pokazują w jaki sposób urządzenie z czujnikiem LiDAR "widzi" świat rzeczywisty (Rysunek 2). Pierwsze zdjęcie pokazuje zwykłe ujęcie z kamery, czyli obraz dwuwymiarowy, z którego nie można uzyskać informacji o odległości obiektów od obiektywu urządzenia. Drugi zrzut ekranu wyświetla mapę głębokości, która opiera się na pojedynczo przechwyconych danych z LiDAR-u dla jednej klatki. Ostatni zrzut pokazuje wygładzoną mapę głębokości, która powstaje poprzez uśrednienie wartości pomiarowych na przestrzeni kilku klatek. Dzięki temu obraz jest bardziej gładki i nie pojawiają się w nim pojedyncze błędy spowodowane przez zakłócenia urządzenia. Wizualizacja mapy głębokości jest przedstawiona w taki sposób, że obiekty znajdujące się bliżej urządzenia mają ciemniejszy kolor niż te w tle.



Rysunek 2: Zrzuty ekranu, od lewej: ujęcie z kamery, mapa głębokości, wyglądająca mapa głębokości.

## 5. Opis metodyki badań i narzędzi

### 5.1. Zbiór kryteriów badawczych

W celu przeanalizowania użyteczności użycia codziennych pomiarów wykonywanych urządzeniami firmy Apple wyposażonymi w czujnik LiDAR, stworzono następujące kryteria badawcze:

- dokładność pomiarów,
- wrażliwość na zakłócenia,
- łatwość wykonywania pomiarów,
- zakres pomiarów:
  - dolna granica zakresu,
  - górna granica zakresu.

Najważniejszą cechą pomiarów na jakiej należy się skupić, jest dokładność uzyskiwanych wyników, ponieważ nawet najbardziej zaawansowane urządzenia, posiadające wiele funkcji i udogodnień, ale wskazujące błędne wyniki są ostatecznie bezużyteczne.

Kolejnym aspektem, który bezpośrednio wpływa także na dokładność pomiarów, jest wrażliwość na zakłócenia. Należy pod tym pojęciem rozumieć wszystkie czynniki, które zakłócają wykonanie poprawnego pomiaru i powodują, że otrzymane wyniki są niezgodne z oczekiwanymi wartościami. Do takich czynników można zaliczyć zarówno materiały z jakich wykonane są obiekty, pomiędzy którymi wykonuje się pomiary, ale również i czynniki atmosferyczne takie jak na przykład opady deszczu, czy silne światło słoneczne.

Następnym kryterium jest łatwość wykonywania pomiarów. Ponieważ z każdego urządzenia mierniczego korzysta się w inny sposób to może się okazać, że niektóre urządzenia są trudniejsze w użyciu niż inne.

Ostatnie stworzone kryterium dotyczy zakresu pomiarów. Zakres ten opisany jest przez dwie wartości liczbowe. Pierwsza wartość mówi o minimalnej odległości, które dane urządzenie lub narzędzie jest w stanie zmierzyć, natomiast druga wartość mówi o maksymalnej odległości możliwej do zmierzenia. Kryterium to zakłada analizę wspomnianych wartości przy jednorazowym pomiarze.

### 5.2. Urządzenia, narzędzia i aplikacje

W celu przeprowadzenia badań, konieczne było w pierwszej kolejności ustalenie odległości wzorcowej pomiędzy obiektami, zgodnie z wartościami odpowiadającymi

danemu badaniu. W tym celu zarówno obiekt startowy, jak i końcowy, zostały najpierw ustawione na jednym poziomie za pomocą lasera samopoziomującego DeWALT DCE089D1G [15]. Laser ten umożliwia precyzyjne wyrównanie obiektów w płaszczyźnie poziomej, a także każdego obiektu osobno w płaszczyźnie pionowej, co jest kluczowe dla dokładności pomiarów.

Następnie, aby ustawić dokładną odległość między obiektami, zastosowano profesjonalny dalmierz LEICA DISTO X6 wyposażony w statyw oraz celownik. Dokładność tego dalmierza wynosi 1 mm natomiast zasięg jest równy 250 metrów [16]. Dzięki wykorzystaniu lasera samopoziomującego oraz profesjonalnego dalmierza, zapewniono solidne podstawy do prowadzenia eksperymentów, których celem było sprawdzenie jak z pomiarami radzą sobie badane urządzenia. Aby zweryfikować działanie urządzeń Apple posłużono się smartfonami:

- iPhone 14 Pro,
- iPhone 15 Pro Max.

Dodatkowo w badaniach zostały użyte konwencjonalne narzędzia i urządzenia miernicze, aby porównać wyniki oraz możliwości pomiarów z tymi wykonywanymi przy pomocy urządzeń firmy Apple. Są nimi:

- dalmierz laserowy Bosch GLM 40 [17],
- dalmierz laserowy Makita LD050P [18],
- klasyczna miara zwijana STANLEY CONTROL-LOCK 5M [19] (klasa II).

Zarówno iPhone 14 Pro jak i iPhone 15 Pro Max są urządzeniami wyposażonymi w czujnik LiDAR. Aby wykonać pomiary za ich pomocą wykorzystano dwie aplikacje. Pierwszą z nich jest natywnie działająca w telefonach oraz tabletach firmy Apple aplikacja „Miarka”. Drugą aplikacją jest stworzona na potrzeby tej pracy aplikacja „Test Measure App”, która opiera swoje działanie na analizie informacji pochodzących z czujnika LiDAR oraz estymacji świata rzeczywistego zapewnianego przez pakiet ARKit.

Do przeprowadzenia części badań zostały użyte dwa obiekty testowe, „A” oraz obiekt „B”. Oba mają kształt prostopadłościanu o wymiarach 10 cm x 8 cm x 20 cm (długość x szerokość x wysokość) i są wykonane z drewna (Rysunek 3). Ścianki prostopadłościanów zostały odpowiednio oszlifowane i zabezpieczone, ale w taki sposób by ich powierzchnia nie wpływała w żaden sposób na wyniki pomiarów. Obiekty te zostały stworzone na potrzeby przeprowadzenia badań i umożliwiają bezproblemowe ustawienie ich w odpowiedniej odległości oraz konkretnej sytuacji, odpowiednio do sprawdzonego scenariusza.



Rysunek 3: Obiekty testowe A i B.

### 5.3. Scenariusze badań

Dla pierwszego kryterium, czyli dokładności pomiarów wykonywanych przy użyciu urządzeń firmy Apple z wbudowanym czujnikiem LiDAR zbudowano następujące scenariusze badawcze:

1. pomiar odcinka prostego o długości 1m, 3m, 6m, 10m, 15m,
2. pomiar odcinka prostego o długości 1m, 3m, 6m, 10m, 15m z umieszczoną przeszkodą na drodze pomiaru o nieregularnym kształcie, który powoduje, że zmierzenie szerokości tej przeszkody jest niemożliwe.

W celu przebadania kolejnego kryterium, a dokładniej wrażliwości na zakłócenia pochodzące ze świata zewnętrznego zbudowano następujące scenariusze badawcze:

3. pomiar odcinka prostego między zwykłą powierzchnią, a powierzchnią lustrzaną o długości 1m, 3m, 6m,
4. pomiar odcinka prostego między taflą wody a określonym poziomem o długości 1,5m,
5. pomiar odcinka prostego między zwykłymi powierzchniami o długości 3m, 6m z użyciem mocnego światła sztucznego symulującego wpływ słońca na wykonywany pomiar,
6. pomiar odcinka prostego między zwykłymi powierzchniami o długości 3m, 6m z użyciem wody symulującej wpływ opadów atmosferycznych na wykonywany pomiar.

Dla trzeciego kryterium, czyli łatwości wykonywania pomiarów zbudowano następujące scenariusze badawcze:

7. pomiar odcinka prostego o długości 3m, 5m, 10m, 20m,
8. pomiar odcinka prostego o długości 3m, 6m, 10m z uwzględnieniem sytuacji, że na drodze pomiaru znajduje się przeszkoda, która uniemożliwia wykonanie pomiaru w linii prostej, ale którą można obejść szerokim łukiem,
9. pomiar odcinka prostego o długości 3m, 6m, 10m z uwzględnieniem sytuacji, że na drodze pomiaru znajduje się przeszkoda, którą można obejść szerokim łukiem, ale jednocześnie nie uniemożliwia ona wykonania pomiaru w linii prostej, np. oczko wodne,
10. pomiar odcinka prostego o długości 3m, 6m, 10m z uwzględnieniem sytuacji, że na drodze pomiaru znajduje się przeszkoda, przez którą nie da się przejść, ale jednocześnie nie uniemożliwia wykonania pomiaru w linii prostej, np. rów melioracyjny,
11. pomiar obiektu o długości 2,5m z uwzględnieniem sytuacji, że dany obiekt znajduje się w środku stosu podobnych obiektów i możliwe jest dotarcie tylko do jego końców, np. drewniany bal na stosie,
12. pomiar odcinka o długości 2,5m z założeniem, że pomiar ten odbywa się w płaszczyźnie pionowej co sugeruje wykonywanie pomiaru np. wysokości pomieszczenia.

Dla ostatniego kryterium jakim jest zakres pomiarów możliwych do wykonania przy użyciu badanych

urządzeń i narzędzi zbudowano następujące scenariusze badawcze:

13. pomiar krótkiego odcinka prostego o długości od 0.5 cm do 40 cm w celu wyznaczenia dolnej wartości granicznej,
14. pomiar długiego odcinka prostego o długości od 5 m do 60 m w celu wyznaczenia górnej wartości granicznej.

### 6. Wyniki badań

Ze względu na fakt, iż w badaniach posłużono się kilkoma urządzeniami oraz różnymi aplikacjami w celu przedstawienia wyników w tabelach zastosowano krótkie kody do określenia urządzeń, a dokładniej:

- A4M - iPhone 14 Pro, aplikacja natywna
- A4T - iPhone 14 Pro, aplikacja własna
- A5M - iPhone 15 Pro Max, aplikacja natywna
- A5T - iPhone 15 Pro Max, aplikacja własna
- DB - dalmierz firmy Bosch
- DM - dalmierz firmy Makita
- MS - miara zwijana firmy STANLEY

Dodatkowo dla otrzymanej średniej arytmetycznej, z poniższego wzoru, został wyliczony względny błąd procentowy w stosunku do wartości referencyjnej.

$$\delta = \frac{|x - x_0|}{x} \cdot 100\% \quad (2)$$

Gdzie  $x$  oznacza wartość referencyjną, natomiast  $x_0$  oznacza obliczoną średnią arytmetyczną.

Tabela 1 przedstawia obliczoną średnią arytmetyczną wraz ze względnym błędem procentowym w stosunku do wartości referencyjnej dla wyników badań dotyczących pierwszego scenariusza z kryterium dokładności pomiarów. Scenariusz ten zakłada pomiar odcinka prostego o długości 1m, 3m, 6m 10m, 15m. Natomiast tabela 2 zawiera wyniki dotyczące drugiego scenariusza, który zakłada, że na drodze pomiaru znajdują się przeszkoda o nieregularnym kształcie.

Tabela 1: Średnia arytmetyczna dla wyników z 1 scenariusza

Urządzenie	średnia arytmetyczna (m) (górną wartość), względny błąd procentowy (dolną wartość)				
	1m	3m	6m	10m	15m
A4M	1,003 (0,3%)	2,992 (0,27%)	5,996 (0,07%)	9,986 (0,14%)	14,968 (0,21%)
A4T	0,994 (0,6%)	2,985 (0,5%)	5,968 (0,54%)	9,970 (0,3 %)	14,980 (0,13%)
A5M	1,000 (0,0%)	3,003 (0,1%)	5,992 (0,13%)	9,989 (0,11%)	14,971 (0,19%)
A5T	0,996 (0,4%)	2,989 (0,37%)	5,974 (0,44%)	9,981 (0,19%)	14,988 (0,08%)
DB	1,000 (0,0%)	3,000 (0,00%)	6,000 (0,0%)	10,000 (0,00%)	15,000 (0,00%)

DM	1,000 (0,0%)	3,000 (0,00%)	6,000 (0,0%)	10,000 (0,00%)	15,000 (0,00%)
MS	1,001 (0,1%)	3,003 (0,1%)	brak wyników - dystans większy niż maksymalny dystans dla badanej miarki		

Tabela 2: Średnia arytmetyczna dla wyników z 2 scenariusza

Urządzenie	średnia arytmetyczna (m) (górną wartość), względny błąd procentowy (dolna wartość)				
	1m	3m	6m	10m	15m
A4M	0,998 (0,2%)	2,985 (0,5%)	5,969 (0,52%)	9,967 (0,33%)	14,936 (0,43%)
A4T	0,998 (0,2%)	2,973 (0,9%)	5,965 (0,58%)	9,952 (0,48%)	14,927 (0,49%)
A5M	1,005 (0,5%)	2,981 (0,63%)	5,975 (0,42%)	9,966 (0,34%)	14,974 (0,17%)
A5T	0,999 (0,1%)	2,974 (0,87%)	5,969 (0,52%)	9,948 (0,52%)	14,966 (0,23%)
DB	brak wyników - nie można uzyskać wyników, ponieważ dalmierz nie ma możliwości zmierzyć dystansu, jeżeli na jego drodze stoi przeszkoda				
DM					
MS	brak wyników - nie można uzyskać wyników, ponieważ miarka nie ma możliwości zmierzyć szerokości nieregularnej przeszkody				

Jak pokazują powyższe wyniki pomiary wykonane przez urządzenia Apple charakteryzują się dużą dokładnością, a względny błąd procentowy nie przekracza wartości 1%, co potwierdziło słuszność hipotezy H1. Jednocześnie powyższa tabela pokazuje, że hipoteza H2 jest nieprawdziwa, ponieważ w badaniach urządzenia Apple nie osiągnęły lepszej dokładności niż dalmierze. Wyniki o podobnej dokładności zostały uzyskane także dla drugiego scenariusza, który polegał na wykonaniu pomiarów z umieszczoną przeszkodą (tabela 2), co potwierdziło słuszność kolejnej hipotezy dotyczącej zachowania dokładności nawet w trudnych sytuacjach (H4). Dodatkowo, w przypadku przeszkody o nieregularnym kształcie, to tylko urządzenia Apple miały możliwość zmierzyć odległość pomiędzy obiektami.

Kolejne wyniki dotyczą kryterium wrażliwości pomiarów na zakłócenia. W celu dopasowania poziomu wrażliwości do konkretnego pomiaru na podstawie prób utworzono zakresy przedstawione w tabeli 3. Przedziały zostały opracowane na podstawie takich wartości jak średnia arytmetyczna, mediana oraz odchylenie standardowe z uwzględnieniem najlepszej praktyki dotyczącej codziennych pomiarów.

Tabela 3: Poziomy wrażliwości na zakłócenia oraz ich kryteria

Wrażliwość na zakłócenia	kryterium		
	średnia arytm. - proc błąd względny (%)	mediana - proc. błąd względny (%)	odchylenie standardowe - proc. błąd względny (%)
0 - brak	[0, 2)	[0, 2)	[0, 1)
1 - mała	[2, 5)	[2, 5)	[1, 3)
2 - średnia	[5, 25)	[5, 25)	[3, 10)
3 - duża	[25, ∞)	[25, ∞)	[10, ∞)

Tabela 4 przedstawia uzyskane wartości poziomów wrażliwości na zakłócenia dla wszystkich przebadanych scenariuszy z tego kryterium (3,4,5,6). Nazwy skrótowe odpowiadają kolejnym utworzonym scenariuszom. Dodatkowo dla 3 scenariusza, w celu zaprezentowania podatności na zakłócenia, zostały przedstawione konkretne wyniki uzyskane w pomiarach (tabela 5).

Tabela 4: Uzyskane poziomy wrażliwości pomiarów na zakłócenia

Urządzenie	poziom wrażliwości na zakłócenia dla scenariusza							
	S3 1m	S3 3m	S3 6m	S4 1,5m	S5 3m	S5 6m	S6 3m	S6 6m
A4M	3	3	3	3	0	0	0	0
A4T	3	3	3	3	0	0	0	0
A5M	3	3	3	3	0	0	0	0
A5T	3	3	3	3	0	0	0	0
DB	3	3	3	2	0	0	0	0
DM	3	3	3	3	0	0	0	0
MS	0	0	-	0	0	-	0	-

Tabela 5: Średnia arytmetyczna dla wyników z 3 scenariusza

Urządzenie	średnia arytmetyczna (m) (górną wartość), względny błąd procentowy (dolna wartość)		
	1m	3m	6m
A4M	2,098 (109,8 %)	4,095 (36,5 %)	7,847 (30,79 %)
A4T	2,363 (136,3 %)	4,083 (36,1 %)	7,222 (20,37 %)
A5M	2,063	3,755	7,602

	(106,3 %)	(25,17 %)	(26,7 %)
A5T	1,935 (93,5 %)	4,373 (45,77 %)	7,632 (27,2 %)
DB	1,680 (68,0 %)	5,281 (76,03 %)	8,143 (35,72 %)
DM	1,880 m (88,000 %)	4,046 (34,87 %)	7,453 (24,22 %)
MS	1,002 (0,2 %)	3,003 (0,1 %)	brak wyników - dystans większy niż maksymalny dystans dla badanej miarki

Jak pokazują wyniki scenariusza S3 i S4, urządzenia Apple charakteryzują się dużą wrażliwością w odniesieniu do powierzchni, co do której wykonują pomiar. Powierzchnie lustrzane (tabela 5) jak i tafla wody sprawiają, że czujnik LiDAR działa niepoprawnie i uzyskane wyniki charakteryzują się bardzo dużym błędem, czasami nawet ponad 100%, a więc takimi pomiarami nie można się sugerować. Te badania obaliły hipotezę H5, która mówiła o niewrażliwości urządzeń Apple na powierzchnię. Badania wykazały także, że zarówno światło słoneczne jak i symulowane opady atmosferyczne nie wpływają na dokładność wyników urządzeń Apple.

Kolejnym kryterium, które zostało sprawdzone w badaniach, była łatwość wykonywania pomiarów. W tym przypadku także została stworzona skala łatwości, przedstawiona w tabeli 6. Kryteria, które wpływają na ocenę poziomu łatwości to fakt czy udało się wykonać pomiar, średni czas potrzebny na wykonanie pomiaru oraz aspekt czy w badaniu była potrzebna pomoc - na przykład innej osoby albo innych narzędzi lub akcesoriów.

Tabela 6: Poziomy łatwości wykonywania pomiarów

Poziom łatwości	kryterium		
	pomiar wykonany	średni czas pomiaru (s)	potrzebna pomoc
0 - łatwy	tak	[0, 15)	nie
1 - średni	tak	[15, 30)	nie
2 - trudny	tak	[30, ∞)	tak
3 - niemożliwy	nie	-	-

Poniższe tabele 7 i 8 zawierają wyniki dotyczące kryterium łatwości wykonywania pomiarów.

Tabela 7: Uzyskane poziomy łatwości - scenariusz 7 i 8

Urządzenie	poziom łatwości dla scenariusza						
	S7 3m	S7 5m	S7 10m	S7 20m	S8 3m	S8 6m	S8 10m
A4M	0	0	0	1	0	0	1
A4T	0	0	1	1	0	0	1
A5M	0	0	0	1	0	0	1
A5T	0	0	0	1	0	0	1
DB	0	0	0	0	3	3	3
DM	0	0	0	0	3	3	3
MS	0	2	2	2	3	3	3

Urządzenie	poziom łatwości dla scenariusza							
	S9 3m	S9 6m	S9 10m	S10 3m	S10 6m	S10 10m	S11 2,5m	S12 2,5m
A4M	0	0	1	0	3	3	0	0
A4T	0	0	1	0	3	3	0	0
A5M	0	0	1	0	3	3	0	0
A5T	0	0	1	0	3	3	0	0
DB	0	0	0	0	0	0	3	0
DM	0	0	0	0	0	0	3	0
MS	0	3	3	0	3	3	3	0

Tabela 8: Uzyskane poziomy łatwości - scenariusz 9 - 12

Urządzenie	poziom łatwości dla scenariusza							
	S9 3m	S9 6m	S9 10m	S10 3m	S10 6m	S10 10m	S11 2,5m	S12 2,5m
A4M	0	0	1	0	3	3	0	0
A4T	0	0	1	0	3	3	0	0
A5M	0	0	1	0	3	3	0	0
A5T	0	0	1	0	3	3	0	0
DB	0	0	0	0	0	0	3	0
DM	0	0	0	0	0	0	3	0
MS	0	3	3	0	3	3	3	0

Przedstawione wyniki pokazują, że w większości przypadków łatwiej jest wykonać pomiary za pomocą urządzeń Apple niż przy użyciu standardowej miarki (H6). Nawet długie dystanse (S7) oraz umieszczone przeszkody (S8, S9) nie wpływają w znacznym stopniu na zmierzenie odległości a ponieważ urządzenia Apple działają w oparciu o czujnik LiDAR oraz rozszerzoną rzeczywistość, podczas pomiarów można poruszać się w dowolnym kierunku a urządzenie i tak wykona pomiar w linii prostej. Dzięki temu urządzenia Apple mają możliwość wykonywać pomiary nawet w takich warunkach, gdzie konwencjonalne narzędzia miernicze nie dały rady (H3). Tylko w przypadku scenariusza S10, który polega na pomiarze odległości z przeszkodą uniemożliwiającą przejście przez nią, urządzenia Apple nie zdołały zmierzyć odległości.

Ostatnim badanym aspektem był zakres pomiarów możliwy do osiągnięcia przez urządzenia. Wyniki zakresów zostały przedstawione w tabeli 9. Wyniki te pokazują, że pomiary wykonywane przez urządzenia Apple nie mają ograniczenia co do zasięgu, a więc z pewnością przewyższają zasięgiem standardowe miarki mechaniczne (H7).



Tabela 9: Uzyskane wyniki dla zakresu pomiarów

Urządzenie	minimalny zmierzony dystans (m)	maksymalny zmierzony dystans (m)
A4M	0,01	dystans nieograniczony - smartfon działający w oparciu o LiDAR i AR estymuje pozycje w 3D, a więc nie istnieje limit maksymalnej odległości
A4T	0,01	
A5M	0,01	
A5T	0,01	
DB	0,15	40
DM	0,16	50
MS	0,001	5

## 7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że technologia LiDAR zaimplementowana w urządzeniach Apple rzeczywiście umożliwia ich skuteczne wykorzystanie jako narzędzi pomiarowych w codziennych sytuacjach. Praktycznie codziennie napotykamy potrzebę pomiaru odległości w różnych sytuacjach. Często zdarza się, że nie mamy przy sobie tradycyjnej miarki, a nawet jeśli ją posiadamy, jej użycie nie zawsze jest możliwe. W takich sytuacjach z pomocą przychodzą smartfony wyposażone w czujnik LiDAR. Urządzenia Apple w przeprowadzonych badaniach wykazały się wysoką dokładnością (błąd pomiarowy miał wartość poniżej 1%) oraz możliwością użycia w różnorodnych scenariuszach pomiarowych. Pomimo pewnych ograniczeń związanych z wrażliwością na określone warunki środowiskowe, mogą one skutecznie zastąpić tradycyjne miarki mechaniczne. Oferując użytkownikom zarówno łatwość użycia, jak i wszechstronność zastosowań, technologia LiDAR w smartfonach Apple staje się niezastąpionym narzędziem w codziennych pomiarach.

Podsumowując, teza mówiąca o tym, że "Technologia LiDAR, zaimplementowana w urządzeniach Apple, umożliwia ich wykorzystanie jako narzędzi pomiarowych w codziennych sytuacjach, eliminując konieczność używania tradycyjnych miarek mechanicznych" została potwierdzona.

Technologia LiDAR z pewnością będzie się dynamicznie rozwijać, dlatego warto zweryfikować te pomiary w kontekście nowszych generacji urządzeń w przyszłości. Uzyskane wyniki stanowią solidną podstawę nie tylko do bieżącego korzystania z istniejących aplikacji, ale również do tworzenia nowych rozwiązań opartych na technologii LiDAR w urządzeniach Apple.

## Literatura

- [1] iOS & iPadOS Release Notes, <https://developer.apple.com/documentation/ios-ipados-release-notes>, [15.11.2023].
- [2] D. Pogue, iPhone Unlocked, Simon & Schuster, New York, 2021.
- [3] P. McFedries, iPad and iPad Pro For Dummies, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2024.
- [4] J. Nino, Mastering the iPhone 12 Pro Max Camera, Tektime, Italy, 2020.
- [5] J. Nino, iPhone 13 Pro Max Camera Mastering, Tektime, Italy, 2021.
- [6] J. Carter, K. Schmid, K. Waters., L. Betzhold., B. Hadley, R. Mataosky, J. Halleran, Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications, NOAA Coastal Services Center, Charleston SC, 2012.
- [7] Apple Developer Documentation, <http://developer.apple.com/documentation>, [15.11.2023].
- [8] V. Varshney, LiDAR: the Eyes of an Autonomous Vehicle, <https://medium.com/swlh/lidar-the-eyes-of-an-autonomous-vehicle-82c6252d1101>, [14.11.2023].
- [9] C. Gomez, Point Cloud Technologies for Geomorphologists, Springer International Publishing (2022) 53-81, [http://doi.org/10.1007/978-3-031-10975-1\\_4](http://doi.org/10.1007/978-3-031-10975-1_4).
- [10] P. McManamon, LiDAR technologies and system, SPIE, Washington, 2019.
- [11] Apple unveils new iPad Pro with breakthrough LiDAR Scanner and brings trackpad support to iPadOS, <https://www.apple.com/pl/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>, [12.12.2023].
- [12] Compare iPhone Models, <https://www.apple.com/iphone/compare/>, [10.03.2024].
- [13] Compare iPad Models, <https://www.apple.com/ipad/compare/>, [10.03.2024].
- [14] AVFoundation Framework, <https://developer.apple.com/documentation/avfoundation>, [12.01.2024].
- [15] Laser samopoziomujący 3 wiązki 360° 10,8V zielony DCE089D1G, <https://www.dw.sklep.pl/lasery-i-niwelatory/411-dce089d1g-qw-5035048489628.html>, [15.12.2023].
- [16] Dalmierz laserowy LEICA DISTO X6 - Zestaw do pomiarów P2P [2D, 3D, DXF] (statyw, adapter, walizka), <https://leicashop.pl/dalmierze-laserowe/dalmierz-laserowy-miernik-odleglosci-leica-disto-x6-zestaw-do-pomiarow-p2p-statyw-adapter-walizka>, [15.12.2023].
- [17] Bosch GLM 40 Professional Laser Measure, <https://www.bosch-professional.com/eg/en/products/glm-40-0601072900>, [15.03.2024].
- [18] LD050P Laser Distance Measure, 164', <https://www.makitatools.com/products/details/LD050P>, [15.03.2024].
- [19] Miara STANLEY CONTROL-LOCK 5M, <https://www.stanleyworks.pl/produkt/stht37231-0/miara-stanley-control-lock-5m-25mm-szer>, [15.03.2024].