

Spis treści

1.1.	Średnie czasy pomiarów dla poszczególnych układów	2
1.2.	Wyniki pomiarów przy zastosowaniu Raspberry Pi Zero	5
1.3.	Odchylenia standardowe przy pomiarach z Raspberry Pi Zero	10
1.4.	Wyniki pomiarów przy zastosowaniu Arduino Uno	15
1.5.	Odchylenia standardowe przy pomiarach z Arduino Uno	20
1.6.	Wyniki pomiarów przy zastosowaniu STM32F411CEU6	25
1.7.	Odchylenia standardowe przy pomiarach z STM32F411CEU6	30
2.	Analiza wyników	35
2.1.	Czasy pomiarów	37
2.2.	Czujnik PIR	38
2.3.	Czujniki – analiza odchylenia standardowego	38
3.	Podsumowanie	48
3.1.	Wnioski z badań – działanie układów	48
3.2.	Wnioski z badań – czujniki hipersoniczne	48
3.3.	Wnioski z badań – czujnik PiR i ToF	49

1.1. Średnie czasy pomiarów dla poszczególnych układów

Średnie wyniki czasu pomiarów dla poszczególnych układów prezentują się następująco:

Tabela 1.1. Średni czas pomiarów (Raspberry PI Zero) [s] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250 (gładka)	3	6,4	8,5	6,5
250 (lustrzana)	3,2	6,4	6,4	6,4
250 (włosowata)	3,2	6	6,6	2,4
250 (chropowata)	3,2	6,4	6,4	6,4
2000 (gładka)	2,8	9,6	9,5	9,3
2000 (lustrzana)	2,9	9,4	9,5	9,1
2000 (włosowata)	2,8	Poza zakres	Poza zakres	9,3
2000 (chropowata)	2,9	9,5	9,5	9

Wnioski z tabeli 1.1:

- Czujnik VL53L0X ma najkrótszy średni czas pomiaru dla wszystkich rodzajów powierzchni.
- Czujniki HC-SR04, Velleman WPSE306N i HY-SRF05 mają podobne średnie czasy pomiarów dla większości rodzajów powierzchni. Różnice między nimi są niewielkie.
- Czujnik HY-SRF05 wyróżnia się znacznie krótszym czasem pomiaru dla powierzchni włosowatej w porównaniu do innych czujników hipersonicznych.
- Dla odległości 250 mm, czasy pomiarów są dość stabilne i niezależne od rodzaju powierzchni.
- Dla odległości 2000 mm, czasy pomiarów również pozostają relatywnie stabilne, chociaż w przypadku HC-SR04 i Velleman WPSE306N doszło do przekroczenia czasu oczekiwania na sygnał zwrotny t.j. nie radzą sobie z taką powierzchnią i odległością.

Tabela 1.2. Średni czas pomiarów (Arduino Uno) [s] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC- SR04	Velleman WPSE306N	HY- SRF05
250 (gładka)	1,5	13	13	13
250 (lustrzana)	1,5	13	13	13
250 (włosowata)	1,5	23	13	14
250 (chropowata)	1,5	13	13	13
2000 (gładka)	1,5	15	13	13
2000 (lustrzana)	1,5	14	12	14
2000 (włosowata)	1,5	13	13	13
2000 (chropowata)	1,5	13	13	13

- Czujniki charakteryzują się podobną wydajnością i stabilnością pomiarów przy użyciu Arduino Uno (tabela 1.2).
- Oznacza to, że wybór konkretnego czujnika może zależeć od innych czynników, takich jak dostępność, cena lub specyficzne wymagania aplikacji.
- Ważne jest również zwrócenie uwagi na dodatkowe cechy, takie jak zakres pomiarowy, precyzja i łatwość integracji z innymi elementami systemu.

Tabela 1.3. Średni czas pomiarów (STM32F411CEU6) [s] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250 (gładka)	3	8,4	8,5	8,5
250 (lustrzana)	3,2	8,4	6,4	8,4
250 (włosowata)	3,2	7	6,6	5,4
250 (chropowata)	3,2	8,4	8,4	8,4
2000 (gładka)	2,8	9,4	9,5	9,3
2000 (lustrzana)	2,9	9,4	9,5	9,1
2000 (włosowata)	2,8	Poza zakres	Poza zakres	Poza zakres
2000 (chropowata)	2,9	9,5	9,5	9

Wnioski z tabeli 1.3:

- Czujnik VL53L0X wykazuje krótsze czasy pomiarów niż pozostałe czujniki dla większości przypadków.
- Czujnik HC-SR04 ma najdłuższe czasy pomiarów dla większości przypadków.
- Czujniki Velleman WPSE306N i HY-SRF05 mają zbliżone czasy pomiarów dla większości powierzchni.
- Dla odległości 250 mm, czasy pomiarów są zazwyczaj krótsze niż dla odległości 2000 mm.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym.

1.2. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu Raspberry Pi Zero

Wyniki pomiarów dla poszczególnych powierzchni prezentują się następująco:

Tabela 1.2 Średni wynik pomiaru (powierzchnia gładka) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	341,67	250,09	256,63	242,04
500	568,01	470,68	473,04	462,24
750	791,56	706,91	710,35	700,65
1000	1112,17	979,34	983,52	972,46
1250	3273,87	1237,04	1243,88	1228,22
1500	5776,55	1445,03	1455,77	1439,21
1750	7721,25	1741,06	1749,62	1716,08
2000	7448,90	1973,50	1986,40	1957,35

Wnioski uzyskane z tabeli 1.4:

- Czujnik HC-SR04 wykazuje najmniejsze błędy pomiarów (wartości są najbardziej zbliżone do faktycznej odległości) pomiarowe dla większości odległości.
- Czujniki VL53L0X zaczyna uzyskiwać nieprawidłowe pomiary dla odległości od 1250 mm i dalej.
- Odległości hipersoniczne wskazują dosyć dokładnie średnie odległości na każdym dystansie dla tego rodzaju powierzchni.

Tabela 1.25. Średni wynik pomiaru (powierzchnia lustrzana) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	333,93	268,47	275,28	259,34
500	590,90	505,77	505,92	492,80
750	2728,44	742,49	750,07	732,57
1000	6020,57	1012,36	1020,38	1002,37
1250	7605,46	1257,01	1269,80	1248,14
1500	6631,25	1463,96	1476,58	1457,32
1750	6214,59	1758,00	1768,47	1731,61
2000	7485,79	1960,13	1984,08	1943,99

Wnioski uzyskane z tabeli 1.5:

- Czujnik HC-SR04 wykazuje najmniejsze średnie odległości pomiarowe dla większości wartości odległości na powierzchni lustrzanej.
- Czujniki VL53L0X, Velleman WPSE306N i HY-SRF05 mają zbliżone średnie odległości pomiarowe dla większości wartości odległości na powierzchni lustrzanej.
- Czujniki VL53L0X zaczyna uzyskiwać nieprawidłowe pomiary dla odległości od 1000 mm i dalej.

Tabela 1.26. Średni wynik pomiaru (powierzchnia włosowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	315,03	537,34	151,01	826,91
500	516,72	1017,55	506,12	498,36
750	759,68	2643,58	0,00	1704,74
1000	2709,99	978,21	0,00	973,69
1250	6369,33	1239,61	0,00	1223,38
1500	7301,66	1488,53	0,00	1489,30
1750	7658,60	1679,55	0,00	1804,32
2000	7685,93	0,00	0,00	1946,00

Wnioski uzyskane z tabeli 1.6:

- Czujnik HC-SR04 wykazuje największe średnie wartości pomiarów dla wszystkich odległości na powierzchni włosowatej. Dla niektórych odległości, takich jak 750 mm, 1500 mm i 1750 mm, wartości pomiarów tego czujnika są znacznie wyższe niż pozostałych czujników.
- Czujnik VL53L0X ma relatywnie dokładne wartości pomiarów w porównaniu do pozostałych czujników do odległości 1000 mm. Później, tak jak na wcześniejszych powierzchniach zaczyna pokazywać znacznie zawyżone wartości.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje wartość pomiaru 0,00 mm dla wszystkich odległości powyżej 500 mm na powierzchni włosowatej. Może to wskazywać na trudności w dokładnym pomiarze na takiej powierzchni za pomocą tego czujnika.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje zróżnicowane wartości pomiarów, ale ogólnie są one zbliżone do wartości rzeczywistej.

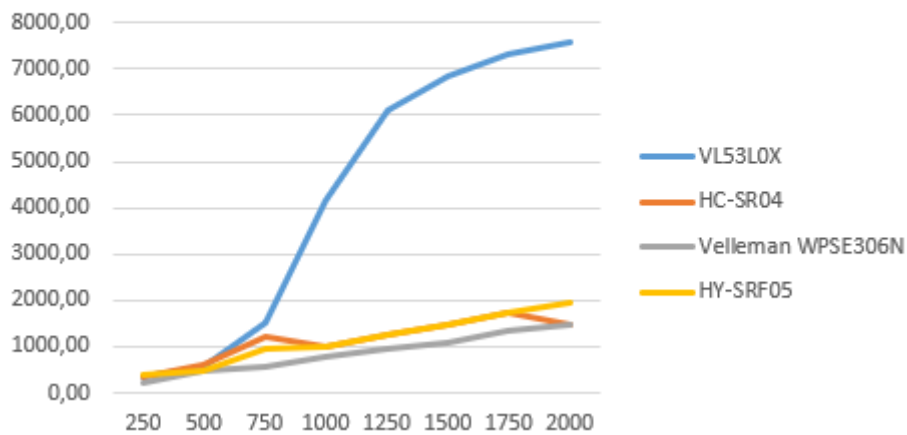
Tabela 1.7. Średni wynik pomiaru (powierzchnia chropowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	353,43	270,19	277,84	263,00
500	580,05	497,51	498,59	491,14
750	1753,51	750,60	754,30	742,28
1000	6741,30	1057,88	1068,89	1053,00
1250	7116,04	1258,09	1268,59	1254,91
1500	7603,82	1479,25	1486,37	1468,58
1750	7744,76	1763,03	1776,32	1759,07
2000	7768,54	1972,92	1980,96	1937,77

Wnioski uzyskane z tabeli 1.7:

- Czujnik HC-SR04 wykazuje wartości pomiarów zbliżone do wartości referencyjnych dla wszystkich odległości na powierzchni chropowatej. Jego wyniki są porównywalne z innymi czujnikami i wskazują na dość dokładne pomiary na takiej powierzchni.
- Czujnik VL53L0X wykazuje dobre wartości pomiarów w porównaniu do pozostałych czujników aż do odległości 1000 mm. Wtedy to zaczyna podawać błędne wyniki.
- Czujnik Velleman WPSE306N i HY-SRF05 mają podobne wartości pomiarów dla wszystkich odległości na powierzchni chropowatej. Wartości te są zbliżone do wartości referencyjnych, co sugeruje, że oba czujniki są stosunkowo skuteczne w pomiarze na takiej powierzchni.

Odległość dla mikrokomputera Raspberry Pi Zero uśredniona dla wszystkich powierzchni



Rysunek 1.1. Średnia ze średnich wyników

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1.1 średnie wartości pomiarów dla czujników hipersonicznych (HC-SR04, Velleman WPSE306N oraz HY-SRF05) są do siebie zbliżone. Wartości dla czujnika ToF (VL53L0X) mocno odbiegają od pozostałych od odległości 750 mm.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym.

1.3. Odchylenia standardowe przy pomiarach z Raspberry Pi Zero

Tabela 1.8. Odchylenia standardowe (powierzchnia gładka) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	2,37	2,27	14,57	2,32
500	5,50	2,25	2,05	6,35
750	10,23	4,17	9,13	5,81
1000	715,46	5,11	9,53	15,86
1250	3158,29	5,31	2,03	31,07
1500	3235,58	5,82	2,37	8,55
1750	1725,84	5,59	2,30	8,77
2000	2250,28	4,03	0,61	15,38

Wnioski uzyskane z tabeli 1.8:

- Czujnik HC-SR04 wykazuje stosunkowo niskie odchylenia standardowe dla wszystkich odległości na powierzchni gładkiej. Oznacza to, że pomiary tego czujnika są dość stabilne i występuje mała zmienność wyników.
- Czujnik VL53L0X wykazuje zmienność wyników pomiarów dla większości odległości na powierzchni gładkiej, z wyjątkiem odległości 250 mm. Dla większych odległości, odchylenia standardowe czujnika VL53L0X są znacznie większe, co sugeruje większą zmienność wyników pomiarów i mniejszą dokładność czujnika.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje dość duże odchylenia standardowe dla odległości 250 mm, 750 mm i 1000 mm na powierzchni gładkiej. Oznacza to, że wyniki pomiarów tego czujnika mogą być bardziej zróżnicowane i mniej stabilne w tych przypadkach.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje umiarkowane odchylenia standardowe dla wszystkich odległości na powierzchni gładkiej. Wyjątek stanowią odległości 1000 mm, 1250 mm oraz 2000 mm.

Tabela 1.39. Odchylenia standardowe (powierzchnia lustrzana) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	2,10	2,24	1,03	2,80
500	12,34	30,07	9,23	12,77
750	3253,87	3,36	1,94	15,08
1000	3331,65	5,13	46,77	15,43
1250	1997,69	4,77	1,21	4,14
1500	2868,64	5,95	4,77	7,15
1750	2963,50	5,15	1,34	16,52
2000	2132,97	7,78	2,05	8,09

Wnioski uzyskane z tabeli 1.9:

- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje najmniejsze odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni lustrzanej. Oznacza to, że pomiary tego czujnika są stosunkowo stabilne i mała jest zmienność wyników. Wyjątek stanowi jedynie odległość 1000 mm, gdzie odchylenia były znacznie większe niż w przypadkach innych odległości.
- Czujnik HY-SRF05 również wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni lustrzanej. Jednak dla odległości 500 mm, 750 mm, 1000 mm i 1750 mm, odchylenia standardowe są nieco wyższe, co sugeruje większą zmienność wyników pomiarów.
- Czujnik VL53L0X wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe dla różnych odległości na powierzchni lustrzanej. Dla odległości od 750 mm odchylenia standardowe są wysokie, co oznacza małą dokładność wyników pomiarów.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje umiarkowane odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni lustrzanej. Nie są one ani bardzo niskie, ani bardzo wysokie, co wskazuje na umiarkowaną stabilność wyników pomiarów (wyjątek stanowi odległość 500 mm, gdzie odchylenie jest znaczne).

Tabela 1.310. Odchylenia standardowe (powierzchnia włosowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	2,21	936,69	14,43	1100,40
500	5,25	1040,88	50,82	899,61
750	13,49	777,95	0,00	1349,43
1000	3095,41	79,70	0,00	16,51
1250	3088,37	8,47	0,00	16,35
1500	2313,72	14,48	0,00	14,99
1750	1954,46	130,74	0,00	622,69
2000	1853,25	0,00	0,00	14,66

Wnioski uzyskane z tabeli 1.10:

- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje umiarkowane odchylenia standardowe dla odległości do 500 mm na powierzchni włosowatej. Jednak później wartości odczytane wynoszą 0, co oznacza, że czujnik nie był w stanie odebrać sygnału odbitego od tej powierzchni.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje wysokie odchylenia standardowe dla wszystkich odległości na powierzchni włosowatej. Sugeruje to dużą zmienność wyników pomiarów i brak stabilności w ich odczytach ze względu na rodzaj powierzchni.
- Czujnik VL53L0X wykazuje niewielkie odchylenia standardowe dla odległości do 1000 mm na powierzchni włosowatej. Jednak dla innych odległości, takich jak 1500 mm, odchylenie standardowe jest dość wysokie.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje bardzo wysokie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni włosowatej. Sugeruje to dużą zmienność wyników pomiarów i brak stabilności w ich odczytach ze względu na rodzaj powierzchni.

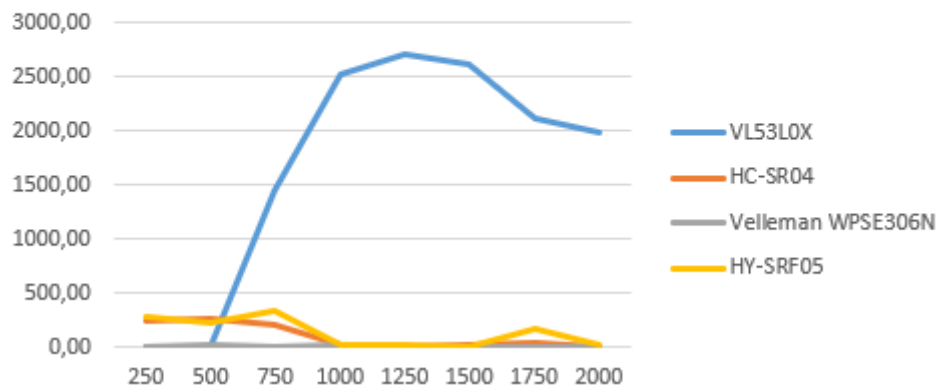
Tabela 1.311. Odchylenia standardowe (powierzchnia chropowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	3,13	2,02	0,93	1,80
500	8,58	2,22	6,75	9,48
750	2500,83	22,89	14,00	2,81
1000	2915,46	4,86	0,79	4,61
1250	2576,79	5,10	1,74	3,51
1500	2009,77	20,75	1,08	9,45
1750	1774,76	4,32	3,38	4,52
2000	1684,18	8,07	0,93	10,72

Wnioski uzyskane z tabeli 1.11:

- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje stosunkowo niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni chropowatej. Wyjątek stanowi jedynie odległość 750 mm, jednak to odchylenie jest umiarkowane.
- Czujnik HC-SR04 również wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni chropowatej, choć nieco wyższe niż w przypadku Velleman WPSE306N. Jest to szczególnie widoczne dla odległości 750 mm i 1500 mm.
- Czujnik VL53L0X wykazuje wyższe odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni chropowatej. Tak jak w poprzednich przypadkach, odchylenie standardowe ma największe wartości po dystansie 750mm.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje nieco wyższe odchylenia standardowe niż dla Velleman WPSE306N i HC-SR04, jednak nie są to aż tak znaczące różnice.

Średnia z odchyłeń standardowych dla pomiarów
uzyskanych z użyciem mikrokomputera Raspberry
Pi Zero



Rysunek 1.2. Średnia z odchyłeń standardowych

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1.2 średnie wartości odchyłeń standardowych dla czujników hipersonicznych (HC-SR04, Velleman WPSE306N oraz HY-SRF05) są dosyć zbliżone na każdym dystansie. Inaczej sprawa wygląda w przypadku czujnika ToF (VL53L0X), którego wyniki mocno odbiegają od pozostałych urządzeń.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym.

1.4. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu Arduino Uno

Wyniki pomiarów dla poszczególnych powierzchni prezentują się następująco:

Tabela 1.412. Średni wynik pomiaru (powierzchnia gładka) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	326,7	232,3	240	238,6
500	589,1	483,4	479,1	481,5
750	857,45	701,1	738,7	738,3
1000	1098,97	975,3	979	845,5
1250	7152,96	1242,2	1230	1217,1
1500	8190	1464,4	1057,6	1460,4
1750	8190,05	1667,7	1700	1692,6
2000	8190,32	1963,2	1970	1965,5

Wnioski uzyskane z tabeli 1.12:

- Dla odległości powyżej 1000 mm czujnik VL53L0X wykazuje maksymalne możliwe dla siebie wyniki pomiarów. Jednak nawet na mniejszych odległościach dokładność nie jest zbyt duża, ponieważ zwracane wyniki są średnio o 100 mm większe niż powinny.
- Czujniki HC-SR04, Velleman WPSE306N oraz HY-SRF05 wykazują zbliżone średnie wyniki pomiarów dla większości odległości. Różnice między nimi są niewielkie, co sugeruje podobną dokładność i precyzję pomiarów.

Tabela 1.413. Średni wynik pomiaru (powierzchnia lustrzana) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	329,81	249,1	240	226
500	1003,72	505,3	508,8	434,7
750	814,77	753,5	755,2	708,9
1000	5732,46	1039,7	606,7	1053,4
1250	8040,29	1227,3	1240	1238,5
1500	8190,59	1478,1	1470	1458,7
1750	8037,96	1687,3	1770,4	1754,9
2000	7954,94	2002,8	2000	1184,9

Wnioski uzyskane z tabeli 1.13:

- Czujnik VL53L0X wykazuje znacznie odległe od właściwych średnie wyniki pomiarów dla większości odległości na powierzchni lustrzanej. Jest to szczególnie widoczne dla odległości 500 mm, 750 mm, 1250 mm, 1500 mm i 1750 mm.
- Czujnik HC-SR04 i Velleman WPSE306N również wykazują stabilne i podobne średnie wyniki pomiarów dla większości odległości na powierzchni lustrzanej. Różnice między nimi są niewielkie, co sugeruje podobną dokładność i precyzję pomiarów.
- Czujnik HY-SRF05 wydaje się wykazywać niższe średnie wyniki pomiarów dla większości odległości. W szczególności, dla odległości 2000 mm, średnie wyniki pomiarów są znacznie niższe niż dla pozostałych czujników. Może to sugerować mniejszą skuteczność czujnika na powierzchni lustrzanej.

Tabela 1.14. Średni wynik pomiaru (powierzchnia włosowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	249,35	20840,8	5580,2	295,8
500	519,55	1196,6	420	21355,3
750	809,37	18819,6	758,5	660,5
1000	2376,14	5291	989,9	1004,8
1250	6716,34	2813,6	1250	3046,8
1500	8048,09	1456,8	5580,2	1460,3
1750	7720,32	1291,2	3217,8	1473
2000	8190,56	1355,2	5580,3	1934,5

Wnioski uzyskane z tabeli 1.14:

- Czujnik VL53L0X wydaje się dawać stabilne i dokładne średnie wyniki pomiarów dla odległości mniejszych niż 1000 na powierzchni włosowatej. Na dalszych odległościach niestety pokazuje maksymalny dla siebie możliwy do uzyskania wynik.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje znaczne odchylenia od oczekiwanych wartości pomiarów zwłaszcza dla odległości 250 mm i 750 mm na powierzchni włosowatej. Może to wskazywać na trudności czujnika w dokładnym pomiarze na powierzchni włosowatej.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje duże odchylenia od oczekiwanych wartości pomiarów dla wszystkich odległości na powierzchni włosowatej. Średnie wyniki pomiarów dla tego czujnika są znacznie różne od wartości oczekiwanych, co sugeruje niską dokładność lub trudności w pomiarze na tego rodzaju powierzchni.
- Czujnik HY-SRF05 również wykazuje znaczne odchylenia od oczekiwanych wartości pomiarów dla wszystkich odległości na powierzchni włosowatej. Średnie wyniki pomiarów dla tego czujnika są znacznie różne od wartości oczekiwanych, co wskazuje na trudności w dokładnym pomiarze na tego rodzaju powierzchni.

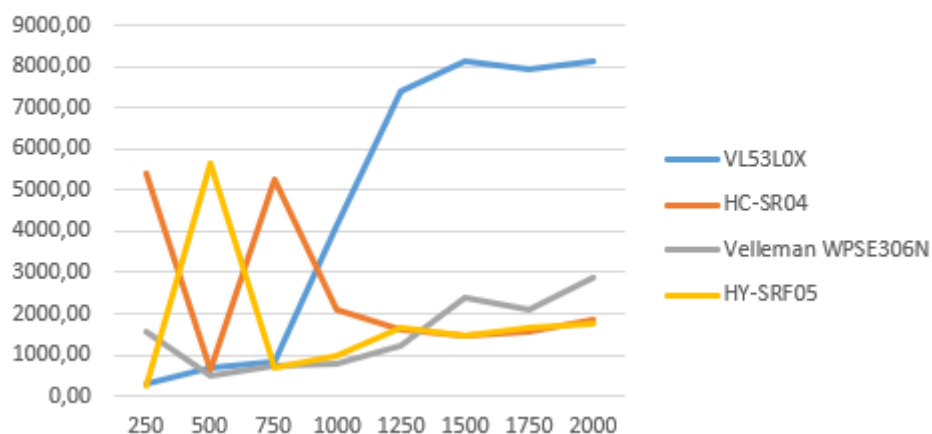
Tabela 1.415. Średni wynik pomiaru (powierzchnia chropowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	360,08	270,1	270	274,7
500	591,81	432,6	479,9	430
750	832,83	732,7	682,5	719,5
1000	7335,42	1040,5	624,2	1049,9
1250	7681,51	1245,6	1230,2	1224,8
1500	8120,39	1378,9	1481	1461,1
1750	7800,76	1612,5	1784,9	1691,9
2000	8190,69	2020,3	2040,1	1962,3

Wnioski uzyskane z tabeli 1.15:

- Czujnik VL53L0X wydaje się dawać stabilne i dokładne średnie wyniki pomiarów dla odległości do 750 mm na powierzchni chropowatej. Dalej niestety, typowo dla tego czujnika, wyniki znacząco odbiegały od oczekiwanych.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje zbliżone średnie wyniki pomiarów do wartości oczekiwanych na powierzchni chropowatej. Odchylenia od oczekiwanych wartości są stosunkowo niewielkie, co sugeruje, że ten czujnik może być stosunkowo skuteczny w pomiarach na powierzchni chropowatej.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje nieznaczne odchylenia od oczekiwanych wartości pomiarów dla wszystkich odległości na powierzchni chropowatej. Wyjątek stanowi jedynie odległość 1000 mm.
- Czujnik HY-SRF05 również wykazuje nieznaczne odchylenia od oczekiwanych wartości pomiarów dla większości odległości na powierzchni chropowatej.

Odległość dla mikrokontrolera Arduino Uno uśredniona dla wszystkich powierzchni



Rysunek 1.3. Średnia ze średnich wyników

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1.3 średnie wartości pomiarów dla czujników hipersonicznych (HC-SR04 oraz HY-SRF05) są dosyć zróżnicowane na dystansie do 1000 mm. Inaczej sprawa wygląda w przypadku czujnika Velleman WPSE306N, który praktycznie cały czas zachowuje stabilność pomiarów. Wartości dla czujnika ToF (VL53L0X) mocno odbiegają od pozostałych od odległości 750 mm.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym.

1.5. Odchylenia standardowe przy pomiarach z Arduino Uno

Tabela 1.16. Odchylenia standardowe (powierzchnia gładka) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	1,80	4,23	0,00	3,49
500	3,74	4,76	9,00	3,59
750	12,51	47,82	13,00	12,15
1000	15,01	5,02	3,02	58,82
1250	2481,18	6,60	0,00	19,71
1500	0,00	5,56	458,14	17,69
1750	0,22	124,53	0,00	4,41
2000	0,47	5,10	0,00	5,92

Wnioski uzyskane z tabeli 1.16:

- Czujnik VL53L0X wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni gładkiej, co sugeruje stosunkowo stabilne pomiary. Niemniej jednak, dla odległości 1250 mm odchylenie standardowe jest niezwykle wysokie, co wskazuje na znaczną zmienność pomiarów w tej konkretnej sytuacji.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości. W wyjątek stanowią odległości 750 mm i 1750 mm, gdzie odchylenia standardowe są bardzo wysokie, co wskazuje na duże rozproszenie wyników pomiarów.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości. Wyjątkiem jest odległość 1500 mm, gdzie odchylenie standardowe jest wyjątkowo duże.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje umiarkowane odchylenia standardowe dla różnych odległości na powierzchni gładkiej (wyjątek stanowi dystans 1000 mm).

Tabela 1.5. Odchylenia standardowe (powierzchnia lustrzana) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	5,27	2,88	0,00	4,92
500	1657,29	6,88	9,13	21,01
750	7,67	4,79	11,68	9,31
1000	3366,67	6,88	180,69	4,76
1250	1059,69	16,01	0,00	3,86
1500	0,49	4,86	0,00	5,06
1750	1071,64	15,95	1,97	51,26
2000	1345,70	4,73	0,00	208,44

Wnioski uzyskane z tabeli 1.17:

- Czujnik VL53L0X wykazuje duże zróżnicowane odchylenia standardowe dla różnych odległości na powierzchni lustrzanej. Szczególnie dla odległości 1000 mm odchylenia standardowe są bardzo wysokie.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje niskie odchylenia standardowe na powierzchni lustrzanej, sugerując stosunkowo stabilne pomiary.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni lustrzanej, co wskazuje na stabilność pomiarów. Jednak dla odległości 1000 mm odchylenia standardowe są znacznie wyższe, sugerując większą zmienność w pomiarach w tym przypadku.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe dla różnych odległości na powierzchni lustrzanej. W niektórych przypadkach odchylenia są względnie niskie, sugerując stabilność pomiarów. Jednak dla odległości 2000 mm odchylenie standardowe wynosi 208,44 mm, co jest bardzo wysoką wartością i wskazuje na duże rozproszenie wyników pomiarów w tej sytuacji.

Tabela 1.518. Odchylenia standardowe (powierzchnia włosowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	1,42	2,73	1,41	60,56
500	3,06	196,02	0,00	2108,69
750	8,25	5857,16	695,33	32,76
1000	2737,97	6710,21	1,00	43,59
1250	2874,64	5381,81	0,00	3112,42
1500	1001,56	12,13	1,41	9,89
1750	1870,33	204,00	1898,31	296,61
2000	0,50	315,85	1,71	74,68

Wnioski uzyskane z tabeli 1.18:

- Czujnik VL53L0X wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe na powierzchni włosowatej. Dla odległościach do 750 mm wartości te są stosunkowo niewielkie, jednak w przedziale 1000-1750 mm odchylenie standardowe jest ogromne.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje bardzo wysokie odchylenia standardowe dla odległości od 750 mm do 1250 mm na powierzchni włosowatej. Sugeruje to duże rozproszenie wyników pomiarów w tych sytuacjach. Dla pozostałych odległości odchylenia standardowe są relatywnie niskie.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni włosowatej, sugerując stabilność pomiarów. Jednak dla odległości 750 mm odchylenie standardowe wynosi 695,33 mm, co wskazuje na większą zmienność w pomiarach w tej sytuacji.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje bardzo wysokie odchylenia standardowe dla wszystkich odległości na powierzchni włosowatej, szczególnie dla odległości 500 mm (2108,69 mm) i 1250 mm (3112,42 mm). Sugeruje to znaczne rozproszenie wyników pomiarów i niestabilność pomiarów na tej powierzchni.

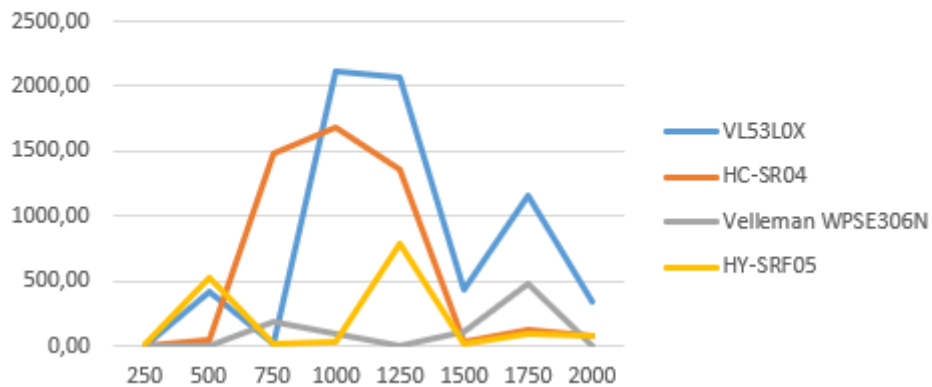
Tabela 1.19. Odchylenia standardowe (powierzchnia chropowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	2,62	1,00	0,00	5,02
500	6,78	5,79	1,00	0,00
750	25,29	4,46	29,86	12,74
1000	2327,82	10,29	208,28	15,54
1250	1865,88	6,25	1,41	5,22
1500	701,35	133,79	3,02	12,94
1750	1708,27	170,55	5,02	33,63
2000	0,46	7,31	1,00	17,57

Wnioski uzyskane z tabeli 1.19:

- Czujnik VL53L0X wykazuje zmienne odchylenia standardowe dla różnych odległości na powierzchni chropowatej. Dla większości odległości odchylenia standardowe są stosunkowo niskie, co wskazuje na stabilność pomiarów. Jednak dla odległości 1000 mm, 1250 mm oraz 1750 mm odchylenie standardowe jest duże, co wskazuje na znaczną zmienność w pomiarach w tych przypadkach.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje relatywnie niskie odchylenia standardowe dla większości odległości na powierzchni chropowatej, co sugeruje stabilność pomiarów. Jednak dla odległości 1500mm i 1750 mm odchylenie standardowe jest większe.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje niskie odchylenia standardowe, z wyjątkiem odległości 1000 mm wynoszącej 208,28 mm. Sugeruje to dużą zmienność w pomiarach w tej sytuacji.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje zmienne odchylenia standardowe dla różnych odległości na powierzchni chropowatej. Dla większości odległości odchylenia standardowe są stosunkowo niskie, sugerując stabilność pomiarów.

Średnia z odchyłeń standardowych dla pomiarów
uzyskanych z użyciem mikrokontrolera Arduino
Uno



Rysunek 1.4. Średnia z odchyłeń standardowych

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1.4 średnie wartości odchyłeń standardowych dla czujników HC-SR04 i VL53L0X są wyjątkowo duże. HY-SRF05 wykazuje dużo mniejsze zróżnicowanie w pomiarach, jednak to Velleman WPSE306N wydaje się pracować najbardziej stabilnie i dokładnie.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym..

1.6. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu STM32F411CEU6

Wyniki pomiarów dla poszczególnych powierzchni prezentują się następująco:

Tabela 1.20. Średni wynik pomiaru (powierzchnia gładka) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	334,12	241,32	247,45	240,36
500	578,09	477,06	475,74	471,77
750	824,29	698,83	724,63	719,76
1000	1139,56	977,51	981,50	907,94
1250	5282,56	1240,18	1236,73	1222,06
1500	6906,43	1454,53	1268,87	1449,37
1750	8044,13	1707,88	1724,48	1704,15
2000	7811,06	1968,97	1978,16	1960,50

Wnioski uzyskane z tabeli 1.20:

- Czujnik VL53L0X wykazuje relatywnie stabilne pomiary dla różnych odległości na powierzchni gładkiej. Wyjątek po raz kolejny stanowią dystanse powyżej 1250 mm.
- Czujnik HC-SR04 również wykazuje stabilność pomiarów na powierzchni gładkiej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości.
- Czujnik Velleman WPSE306N również wykazuje stabilność pomiarów na powierzchni gładkiej, ze średnimi wynikami zbliżonymi do oczekiwanych wartości.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje także stabilność pomiarów na powierzchni gładkiej, ze średnimi wynikami zbliżonymi do oczekiwanych wartości.

Tabela 1.21. Średni wynik pomiaru (powierzchnia lustrzana) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	331,60	258,39	257,42	242,34
500	911,17	503,87	507,26	465,15
750	1700,96	748,33	753,19	720,64
1000	5904,33	1026,57	819,34	1028,42
1250	8033,80	1242,94	1254,88	1243,87
1500	7368,85	1471,55	1473,50	1457,68
1750	7285,81	1723,05	1769,39	1737,99
2000	7611,76	1981,73	1991,92	1569,62

Wnioski uzyskane z tabeli 1.21:

- Czujnik VL53L0X wykazuje relatywnie stabilne pomiary dla różnych odległości na powierzchni gładkiej. Wyjątek po raz kolejny stanowią dystanse powyżej 1000 mm.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje stabilność pomiarów na powierzchni lustrzanej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości.
- Czujnik Velleman WPSE306N również wykazuje stabilność pomiarów na powierzchni lustrzanej, ze średnimi wynikami zbliżonymi do oczekiwanych wartości.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje również stabilność pomiarów na powierzchni lustrzanej, ze średnimi wynikami zbliżonymi do oczekiwanych wartości.

Tabela 1.22. Średni wynik pomiaru (powierzchnia włosowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	281,77	10909,12	2892,72	439,56
500	518,73	992,47	472,83	10778,09
750	784,52	10839,06	329,40	1299,73
1000	2257,51	4467,17	494,90	990,13
1250	6441,85	2419,46	625,00	2168,21
1500	7645,19	1475,58	2790,20	1473,71
1750	7809,71	1471,31	1434,20	1659,52
2000	7901,26	711,00	2790,20	1935,21

Wnioski uzyskane z tabeli 1.22:

- Czujnik VL53L0X wykazuje relatywnie stabilne pomiary dla różnych odległości na powierzchni gładkiej. Wyjątek po raz kolejny stanowią dystanse powyżej 1000 mm.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje znaczną zmienność pomiarów na powierzchni włosowatej. Średnie wyniki pomiarów dla tego czujnika są wyraźnie różne od oczekiwanych wartości. Może to wynikać z trudności w dokładnym pomiarze na tego rodzaju powierzchni, gdzie włoski mogą wpływać na odbicie dźwięku.
- Czujnik Velleman WPSE306N również wykazuje pewną zmienność w pomiarach na powierzchni włosowatej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości, ale występują różnice między pomiarami dla niektórych odległości.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje również pewną zmienność w pomiarach na powierzchni włosowatej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości, ale występują różnice między pomiarami dla niektórych odległości.

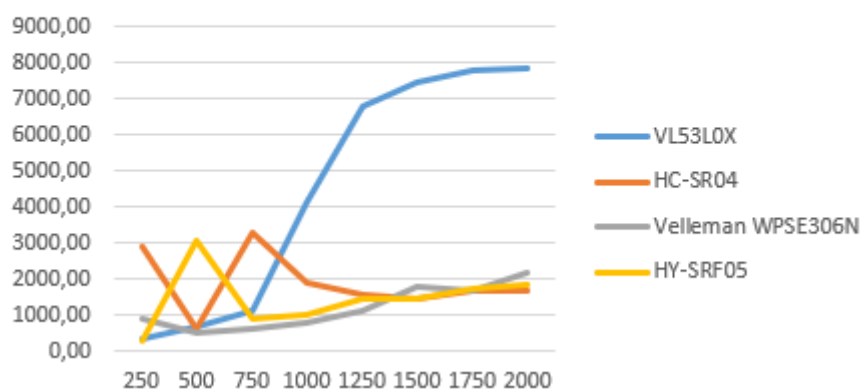
Tabela 1.23. Średni wynik pomiaru (powierzchnia chropowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość (mm)	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	356,72	270,02	273,94	267,86
500	586,12	465,74	489,55	461,07
750	1184,66	742,45	720,94	731,31
1000	7111,19	1049,35	834,74	1050,35
1250	7325,90	1251,88	1249,36	1239,45
1500	7960,05	1422,04	1484,19	1464,35
1750	7893,39	1684,14	1779,97	1726,77
2000	7916,57	1997,09	2010,51	1946,47

Wnioski uzyskane z tabeli 1.23:

- Czujnik VL53L0X wykazuje relatywnie stabilne pomiary dla różnych odległości na powierzchni gładkiej. Wyjątek po raz kolejny stanowią dystanse powyżej 1000 mm.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje dobre wyniki pomiarów na powierzchni chropowatej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości. Odchylenia między kolejnymi odległościami są relatywnie niewielkie.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje pewną zmienność w pomiarach na powierzchni chropowatej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości, ale występują różnice między pomiarami dla niektórych odległości.
- Czujnik HY-SRF05 również wykazuje pewną zmienność w pomiarach na powierzchni chropowatej. Średnie wyniki pomiarów są zbliżone do oczekiwanych wartości, ale występują różnice między pomiarami dla niektórych odległości.

Odległość dla mikrokontrolera
STM32F411CEU6 uśredniona dla wszystkich
powierzchni



Rysunek 1.5. Średnia ze średnich wyników

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1.5 średnie wartości pomiarów dla czujników hipersonicznych (HC-SR04 oraz HY-SRF05) są dosyć zróżnicowane na dystansie do 1000 mm. Inaczej sprawa wygląda w przypadku czujnika Velleman WPSE306N, który praktycznie cały czas zachowuje stabilność pomiarów. Wartości dla czujnika ToF (VL53L0X) mocno odbiegają od pozostałych od odległości 750 mm.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym.

1.7. Odchylenia standardowe przy pomiarach z STM32F411CEU6

Tabela 1.24. Odchylenia standardowe (powierzchnia gładka) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	7,75	9,47	16,38	3,58
500	10,98	7,55	9,42	11,94
750	35,43	37,14	17,90	20,87
1000	713,19	5,43	4,55	78,17
1250	3434,15	5,98	6,94	31,19
1500	2664,33	11,60	375,47	19,61
1750	1034,68	81,94	24,66	13,30
2000	1667,62	7,26	8,21	12,39

Wnioski uzyskane z tabeli 1.24:

- Czujnik VL53L0X wykazuje stosunkowo duże odchylenia standardowe dla większości badanych odległości. Oznacza to, że pomiary tego czujnika na powierzchni gładkiej mogą być bardziej zróżnicowane i mniej stabilne. Największe wartości odchyłeń standardowych są dla dystansu powyżej 1000 mm.
- Czujnik HC-SR04 również wykazuje odchylenia standardowe dla pomiarów na powierzchni gładkiej, jednak zdecydowanie nie tak duże jak VL53L0X.
- Czujnik Velleman WPSE306N ma najwyższe odchylenia standardowe na dystansie 1500 mm.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje dość zbliżone odchylenia standardowe w porównaniu do pozostałych czujników. Oznacza to, że pomiary tego czujnika na powierzchni gładkiej są stosunkowo stabilne.

Tabela 1.25. Odchylenia standardowe (powierzchnia lustrzana) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	3,47	9,96	17,71	17,34
500	1493,64	6,00	9,10	32,61
750	2408,46	7,10	5,06	18,21
1000	3350,06	15,40	246,14	25,77
1250	1102,25	15,11	14,99	6,03
1500	2237,35	9,63	3,56	3,86
1750	2257,12	36,74	1,77	50,56
2000	1978,65	21,21	8,27	402,33

Wnioski uzyskane z tabeli 1.25:

- Czujnik VL53L0X wykazuje ogromne odchylenia standardowe dla większości badanych odległości. Oznacza to, że pomiary tego czujnika na powierzchni lustrzanej są wyjątkowo nieprecyzyjne.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje umiarkowane odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje dosyć jednolite odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości. Wyjątkiem stanowi odległość 1000 mm, która ma wyjątkowo dużą wartość odchylenia.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości. Dla niektórych odległości odchylenia standardowe są relatywnie wysokie, co sugeruje większą zmienność wyników pomiarów na powierzchni lustrzanej.

Tabela 1.26. Odchylenia standardowe (powierzchnia włosowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	33,10	10113,28	2728,40	678,40
500	4,34	665,59	53,12	10637,64
750	27,73	9133,61	334,36	1129,93
1000	2699,46	6790,60	497,39	30,69
1250	3044,28	4710,80	628,15	2404,81
1500	1861,06	21,60	2804,26	19,78
1750	1670,97	272,02	1915,52	449,57
2000	1430,83	750,28	2804,26	74,82

Wnioski uzyskane z tabeli 1.26:

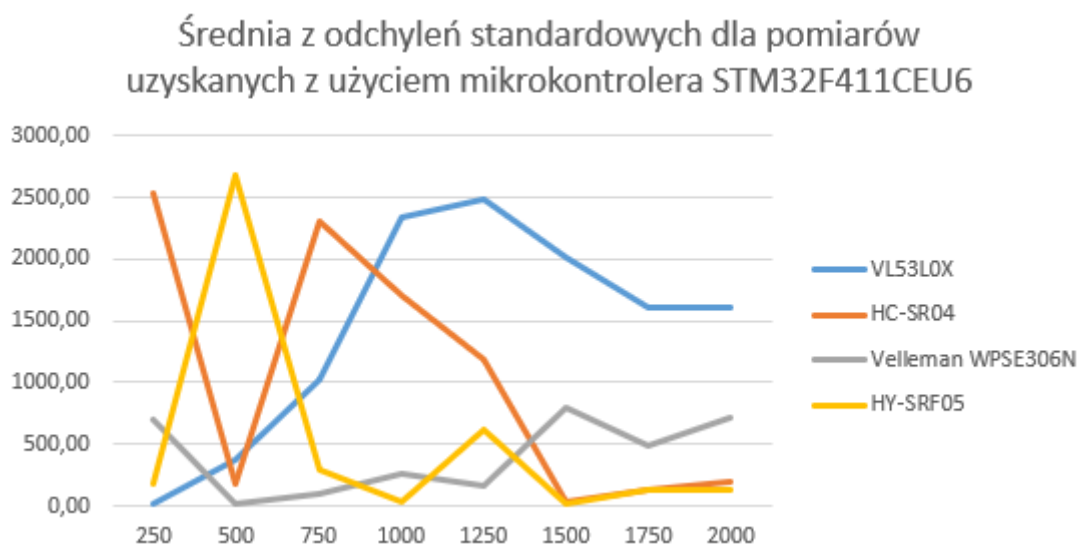
- Czujnik VL53L0X wykazuje bardzo wysokie odchylenia standardowe dla większości badanych odległości. Oznacza to, że pomiary tego czujnika na powierzchni włosowatej są bardzo niestabilne i nieprecyzyjne.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje różne odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości. Warto zauważyć, że odchylenia standardowe dla tego czujnika są znacznie wyższe w porównaniu do Velleman WPSE306N i HY-SRF05, co może wpływać na precyzję i powtarzalność pomiarów.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje duże odchylenia standardowe, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów na powierzchni włosowatej.
- Czujnik HY-SRF05 również wykazuje duże odchylenia standardowe, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów na powierzchni włosowatej.

Tabela 1.27. Odchylenia standardowe (powierzchnia chropowata) [mm] dla 100 pomiarów

Odległość	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
250	4,71	1,35	4,03	6,01
500	10,10	32,51	9,64	31,26
750	1615,65	25,15	38,21	14,69
1000	2583,83	14,40	272,47	15,76
1250	2357,49	8,74	19,53	15,92
1500	1320,37	119,30	3,70	16,11
1750	1462,86	163,44	6,51	32,65
2000	1353,30	24,87	29,86	14,48

Wnioski uzyskane z tabeli 1.27:

- Czujnik VL53L0X wykazuje znaczne odchylenia standardowe w odległości od 750 mm. Dla większości odległości odchylenia standardowe są stosunkowo wysokie, co sugeruje większą zmienność wyników pomiarów na powierzchni chropowatej.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości. Dla niektórych odległości odchylenia standardowe są wysokie, co sugeruje większą zmienność wyników pomiarów na powierzchni chropowatej.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości. Dla większości odległości odchylenia standardowe są umiarkowane, co sugeruje mniejszą zmienność wyników pomiarów na powierzchni chropowatej.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe w zależności od badanej odległości.



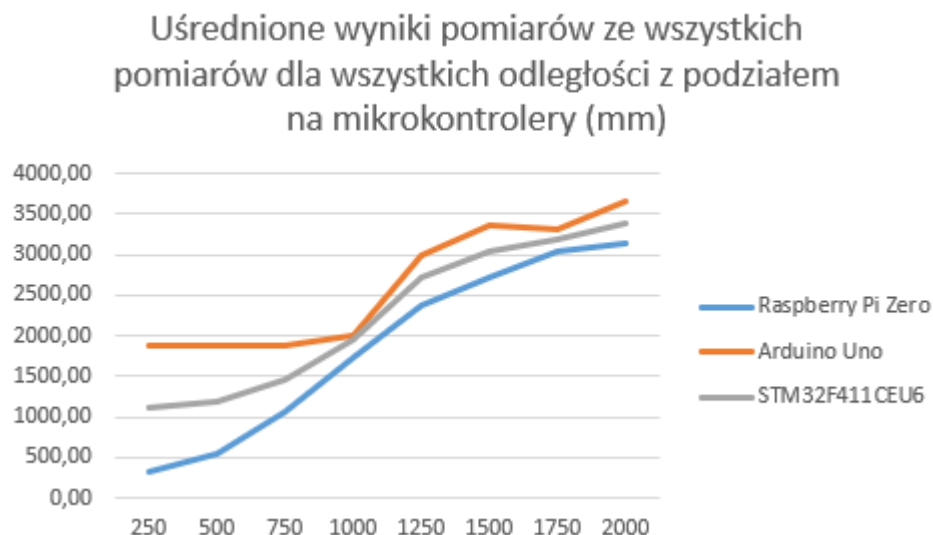
Rysunek 1.6. Średnia z odchyłeń standardowych

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1.6 średnie wartości odchyłeń standardowych dla wszystkich czujników są zróżnicowane. Wyjątek stanowi Velleman WPSE306N, który wydaje się mieć najmniejsze wartości odchyłeń.

Finalne wnioski dotycząca porównania poszczególnych czujników zostaną przedstawione w rozdziale siódmym.

2. Analiza wyników

Jako wynik zgodny z oczekiwaniami przyjęto margines błędu ± 5 cm od punktu testowego. Wynika to z założenia, że podstawowym celem wykorzystania tego typu czujników w praktyce jest wykrywanie obiektów, nie wykonywanie konkretnych obliczeń opartych o odległość.



Rysunek 2.1. Uśrednione wyniki pomiarów (mikrokontrolery)

Na rysunku 2.1 widać na osi poziomej faktyczną odległość od przedmiotu, natomiast na osi pionowej odległości mierzone. Rozwiązaniem idealnym byłaby zatem linia prosta przechodząca przez te same punkty na obu osiach. Uzyskane wyniki nie są aż tak dokładne jak rozwiązanie optymalne, co wynika z zastosowania różnych materiałów, błędów pomiarów czy specyfikacji czujników. Najbardziej zbliżone do optymalnych wyników udało się uzyskać przy wykorzystaniu Raspberry Pi Zero, następnie dla STM32F411CEU6. Wyniki dla Arduino Uno są najmniej dokładne, szczególnie dla mniejszych odległości poniżej 750 mm. Wybór mikrokontrolera ma zatem duże znaczenie i jest wart rozważenia przy tworzeniu konkretnego projektu i jego wymagań.

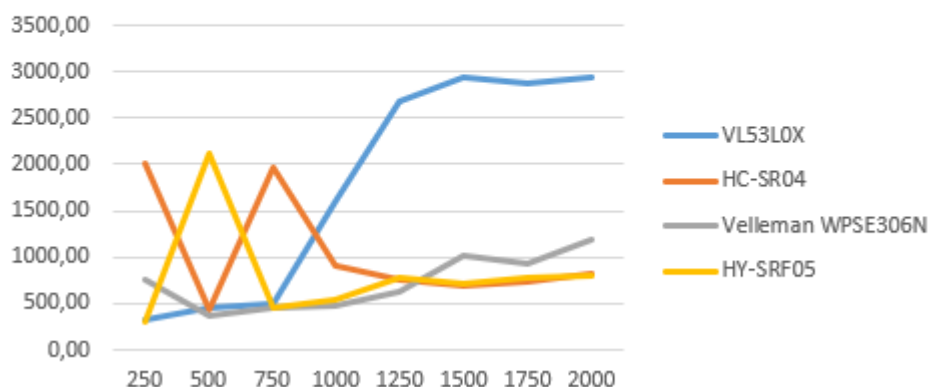
Uśrednione wartości odchyłeń standardowych ze wszystkich pomiarów dla wszystkich odległości z podziałem na mikrokontrolery



Rysunek 2.2. Uśrednione wartości odchylenia standardowego (mikrokontrolery)

Ten wykres (rysunek 2.2) pokazuje, że zróżnicowanie odchyłeń standardowych było znaczące dla wszystkich mikrokontrolerów (niezależnie od rodzaju czujnika). Największe średnie odchylenie wystąpiło dla mikrokontrolera STM32F411CEU6, natomiast ogólnie najgorzej czujniki radziły sobie przy odległości bliskiej 1000 mm.

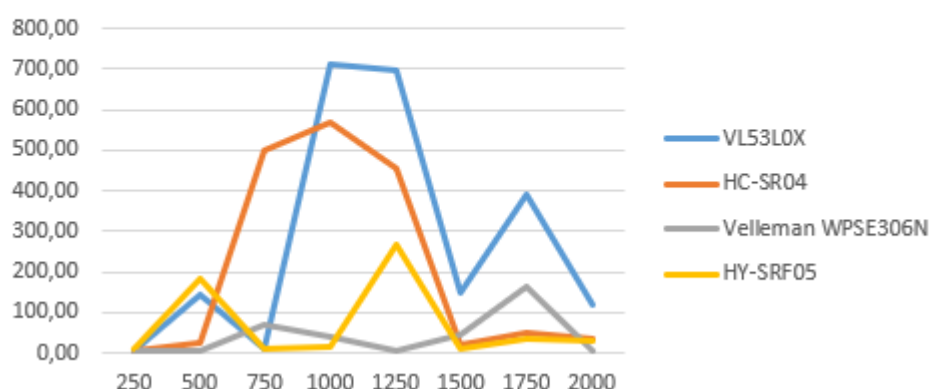
Uśrednione wyniki ze wszystkich pomiarów dla wszystkich odległości z podziałem na czujniki odległości (mm)



Rysunek 2.3. Uśrednione wyniki pomiarów (czujniki)

Na powyższym wykresie (rysunek 2.3) widać, że uśrednione wyniki ze wszystkich pomiarów są bardzo zróżnicowane dla odległości do 750 mm. Dla większych odległości czujnik ToF (VL53L0X) pokazuje znacznie wyższe średnie wartości niż czujniki hipersoniczne.

Uśrednione wartości odchyłeń standardowych ze wszystkich pomiarów dla wszystkich odległości z podziałem na czujniki odległości



Rysunek 2.4. Uśrednione wartości odchylenia standardowego (czujniki)

Średnie wartości odchyłeń standardowych czujników (rysunek 2.4) są bardzo zróżnicowane, chociaż największą stabilność wydaje się mieć Velleman WPSE306N.

2.1. Czasy pomiarów

Porównując wyniki z trzech analizowanych tabel (dla Raspberry Pi Zero, Arduino Uno oraz STM32F411CEU6) dotyczących średnich czasów pomiarów dla różnych czujników w zależności od odległości i rodzaju powierzchni, można wysunąć kilka wniosków:

- Czujniki hipersoniczne (HC-SR04, Velleman WPSE306N, HY-SRF05) mają zbliżone czasy pomiarów we wszystkich trzech układach. W przypadku większości powierzchni i odległości, średnie czasy pomiarów wynoszą około 6-8 mikrosekund.
- Czujnik ToF VL53L0X w przypadku Raspberry Pi Zero i STM32F411CEU6 osiągał podobne czasy pomiarów. W przypadku Arduino Uno brak było dokładnych czasów pomiarów dla tego czujnika.
- Mikrokontrolery STM32F411CEU6 i Arduino Uno wykazywały podobne czasy pomiarów do Raspberry Pi Zero dla większości czujników i rodzajów powierzchni. Wszystkie mikrokontrolery osiągały relatywnie niskie czasy pomiarów, co sugeruje ich efektywność w przetwarzaniu danych z czujników odległości.
- W przypadku powierzchni włosowatej, czujniki hipersoniczne często zwracały czas pomiaru wychodzący poza ich zakres czasu oczekiwania (niezależnie od mikrokontrolera). Czujnik ToF VL53L0X nie miał takich problemów.

Podsumowując, wnioskiem z porównania wyników z trzech analizowanych tabel dotyczących średniego czasu pomiaru jest to, że czas pomiarów był właściwie zbliżony do siebie bez względu na rodzaj układu. Natomiast możliwy czas pomiaru może być krytyczny w bardziej zaawansowanych zastosowaniach.

2.2. Czujnik PIR

W ramach badań przetestowania również działania czujnika PIR, który jak wspomniano wykrywa jedynie ruch i przez to nie dokonano dla niego takich samych pomiarów jak dla czujników przedstawionych w rozdziałach 1.3-1.9.

Czujnik tego typu zawsze wskazywał wartość pozytywną przy każdych pomiarach. Nie jest on czujnikiem typowym do mierzenia odległości, jednakże skutecznie wykrywał zmiany ciepła w swoim polu widzenia niezależnie od odległości. Dla kogoś, kto nie potrzebuje znać dokładnej odległości od obiektu a jedynie wiedzieć, czy był ruch czy nie jest on bardzo dobrą opcją. Jednakże, jeśli ktoś chciałby wykorzystać ten czujnik do wykrywania ruchu obiektów (np. na taśmie ruchomej) to wtedy ten czujnik może się nie sprawdzić przez fakt, że on tylko reaguje na zmiany stanu ciepła.

2.3. Czujniki – analiza odchylenia standardowego

Raspberry Pi Zero

Analizując cztery tabele przedstawiające odchylenia standardowe dla mikrokomputera Raspberry Pi Zero dla różnych czujników odległości na różnych powierzchniach (gładkiej, lustrzanej, włosowatej i chropowatej), można wysnuć następujące wnioski:

- Czujnik ToF VL53L0X wykazuje stabilność pomiarów na powierzchniach gładkiej i lustrzanej, gdzie odchylenia standardowe są stosunkowo niskie. Jednak dla powierzchni włosowatej i chropowatej, odchylenia standardowe są znacznie większe. Dodatkowo po przekroczeniu odległości 1000 mm odchylenia standardowe znacząco wzrastają dla tego typu czujnika, co może sugerować jego wadliwość dla takich odległości.
- Czujniki HC-SR04, Velleman WPSE306N oraz HY-SRF05 wykazują dość niskie odchylenia standardowe na powierzchni gładkiej i lustrzanej, co sugeruje relatywną stabilność pomiarów. Jednak dla powierzchni włosowatej i chropowatej, odchylenia standardowe są znacznie wyższe, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów.

- W przypadku wszystkich czujników, odchylenia standardowe rosną wraz ze zwiększaniem odległości pomiarowej, szczególnie na powierzchniach włosowatej i chropowatej.

Arduino Uno

Analizując cztery tabele przedstawiające odchylenia standardowe dla mikrokontrolera Arduino Uno dla różnych czujników odległości na różnych powierzchniach (gładkiej, lustrzanej, włosowatej i chropowatej), można wysnuć następujące wnioski:

- Czujnik ToF VL53L0X wykazuje stosunkowo niskie odchylenia standardowe na powierzchniach gładkiej i chropowatej, co sugeruje relatywną stabilność pomiarów. Jednak dla powierzchni lustrzanej i włosowatej, odchylenia standardowe są znacznie wyższe, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów.
- Czujnik HC-SR04 wykazuje dość wysokie odchylenia standardowe na wszystkich badanych powierzchniach, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów. Wyjątkiem jest powierzchnia chropowata, gdzie odchylenia standardowe są niższe.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje niskie odchylenia standardowe na powierzchniach gładkiej i włosowatej, co sugeruje stosunkowo stabilne pomiary. Jednak na powierzchni lustrzanej odchylenia standardowe są wysokie, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje różne odchylenia standardowe w zależności od powierzchni. Na powierzchni gładkiej i chropowatej odchylenia standardowe są dość niskie, sugerując stabilność pomiarów. Jednak na powierzchni lustrzanej i włosowatej odchylenia standardowe są wyższe, co wskazuje na większą zmienność wyników pomiarów.
- Ogólnie rzecz biorąc, odchylenia standardowe dla większości czujników rosną wraz ze wzrostem odległości pomiarowej. Jednak istnieją pewne wyjątki, gdzie niektóre czujniki wykazują niższe odchylenia standardowe na większych odległościach.

STM32F411CEU6

Analizując cztery tabele przedstawiające odchylenia standardowe dla mikrokontrolera STM32F411CEU6 dla różnych czujników odległości na różnych powierzchniach (gładkiej, lustrzanej, włosowatej i chropowatej), można wysnuć następujące wnioski:

- Czujnik ToF VL53L0X wykazuje stosunkowo wysokie odchylenia standardowe na wszystkich badanych powierzchniach, co sugeruje znaczną zmienność wyników

pomiarów. Wyjątkiem jest powierzchnia chropowata, gdzie odchylenia standardowe są nieco niższe.

- Czujnik HC-SR04 wykazuje dość wysokie odchylenia standardowe na większości badanych powierzchni, co wskazuje na znaczną zmienność wyników pomiarów. Wyjątkiem jest powierzchnia gładka, gdzie odchylenia standardowe są nieco niższe.
- Czujnik Velleman WPSE306N wykazuje zróżnicowane odchylenia standardowe w zależności od powierzchni. Na powierzchniach gładkiej, lustrzanej i chropowatej odchylenia standardowe są dość wysokie, sugerując większą zmienność wyników pomiarów. Jednak na powierzchni włosowatej odchylenia standardowe są znacznie wyższe, co wskazuje na większą zmienność wyników.
- Czujnik HY-SRF05 wykazuje różne odchylenia standardowe w zależności od powierzchni. Na powierzchni gładkiej, lustrzanej i chropowatej odchylenia standardowe są względnie wysokie, sugerując większą zmienność wyników pomiarów. Natomiast na powierzchni włosowatej odchylenia standardowe są znacznie wyższe.
- Ogólnie rzecz biorąc, odchylenia standardowe dla większości czujników rosną wraz ze wzrostem odległości pomiarowej. Istnieją jednak pewne wyjątki, gdzie niektóre czujniki wykazują niższe odchylenia standardowe na większych odległościach.

Podsumowanie

Na podstawie analizy wszystkich 12 tabel wyników odchyleń standardowych dla mikrokontrolerów Arduino Uno, STM32F411CEU6 i mikrokomputera Raspberry Pi, można wyciągnąć kilka wniosków dotyczących wykorzystania tych platform w pomiarach z czujników odległości.

Arduino Uno:

- Arduino Uno wykazuje stosunkowo niskie odchylenia standardowe dla czujników odległości na powierzchniach gładkich i lustrzanych.
- Jednakże, na powierzchniach włosowatych i chropowatych, odchylenia standardowe mogą wzrosnąć, szczególnie dla niektórych modeli czujników.
- Arduino Uno jest stabilną platformą do prostszych zastosowań, gdzie pomiar odległości nie wymaga dużej ilości danych i złożonych obliczeń.

STM32F411CEU6:

- STM32F411CEU6 może wykazywać większe odchylenia standardowe w porównaniu do Arduino Uno, zarówno na powierzchniach gładkich, jak i innych.

- Dla niektórych czujników odległości, odchylenia standardowe na STM32F411CEU6 mogą być znacznie wyższe.
- Pomimo większych odchyień, STM32F411CEU6 może być bardziej odpowiedni do bardziej zaawansowanych aplikacji, które wymagają większej ilości danych i złożonych obliczeń.

Raspberry Pi zero:

- Mikrokomputer Raspberry Pi może wykazywać większe odchylenia standardowe w porównaniu zarówno do Arduino Uno, jak i STM32F411CEU6.
- Może to być spowodowane większą mocą obliczeniową i bardziej zaawansowaną architekturą Raspberry Pi.
- W zależności od konkretnego modelu czujnika i interfejsu komunikacyjnego, odchylenia standardowe czujników odległości podłączonych do Raspberry Pi mogą się różnić.
- Pomimo większych odchyień, Raspberry Pi może być preferowane w bardziej zaawansowanych projektach, które wymagają większej mocy obliczeniowej i zaawansowanej funkcjonalności.

Wnioski ogólne:

- Wybór platformy mikrokontrolera lub mikrokomputera zależy od konkretnego zastosowania i wymagań projektu.
- Arduino Uno jest stabilnym wyborem dla prostszych aplikacji, gdzie precyzja pomiarów nie jest kluczowa.
- STM32F411CEU6 może być preferowany w bardziej zaawansowanych aplikacjach, gdzie występuje potrzeba większej mocy obliczeniowej.
- Raspberry Pi może być wyborem dla projektów, które wymagają zaawansowanej funkcjonalności i większej ilości danych, mimo że odchylenia standardowe mogą być większe.
- W przypadku wszystkich platform, należy dobrze zrozumieć specyfikacje czujników odległości i ich wpływ na odchylenia standardowe, a także uwzględnić rodzaj powierzchni pomiarowej.

Podsumowując, wybór odpowiedniej platformy mikrokontrolera lub mikrokomputera do pomiarów z czujników odległości zależy od złożoności projektu, wymagań dotyczących mocy obliczeniowej oraz oczekiwanej precyzji pomiarów. W ramach tej pracy udało się

przedstawić kilka wniosków i sugestii użycia konkretnych technologii, a zatem postawiony cel pracy można uznać za osiągnięty. Całość wniosków podsumowano dodatkowo w tabeli 2.1 oraz 2.2 znajdujących się na następnych stronach.

Tabela 2.31. Podsumowanie mikrokontrolerów

	Raspberry Pi Zero	Arduino Uno	STM32F411CEU6
Zalety:	<p>Wsparcie dla wielu interfejsów (USB, HDMI, GPIO).</p> <p>Wysoka moc obliczeniowa w porównaniu do rozmiaru i ceny.</p> <p>Łatwość programowania</p>	<p>Prosta obsługa i programowanie (jak się zna język C, na którym bazują środowiska dedykowane),</p> <p>Niskie zużycie energii.</p> <p>Wsparcie dla szerokiego zakresu czujników i modułów.</p> <p>Stabilność działania i niezawodność</p>	<p>Wysoka moc obliczeniowa i pamięć w porównaniu do innych mikrokontrolerów.</p> <p>Obsługa zaawansowanych funkcji komunikacyjnych i interfejsów.</p> <p>Bardzo dobra wydajność w aplikacjach czasu rzeczywistego.</p>
Wady	<p>Ograniczenia w zakresie mocy i pamięci w porównaniu do bardziej zaawansowanych jednostek Raspberry Pi</p>	<p>Ograniczone zasoby pamięci i mocy obliczeniowej.</p> <p>Brak wbudowanej obsługi sieciowej (Ethernet, Wi-Fi).</p>	<p>Wyższy koszt w porównaniu do niektórych innych mikrokontrolerów.</p> <p>Większa złożoność programowania i konfiguracji.</p>
Problemy dotyczące pomiarów	- brak -	- brak -	- brak -
Koszt	Około 80 zł	Około 25 zł	Około 30 zł

Trudność oprogramowania	Ze względu na wykorzystanie frameworka Akka i języka C# tworzenie oprogramowania było trudniejsze niż w przypadku pozostałych mikrokontrolerów, ale za to możliwości rozwoju są większe.	Używanie języka Arduino, który jest uproszczoną wersją języka C++	Wyższy poziom trudności programowania w porównaniu do prostszych platform, wymaga umiejętności programowania w języku C/C++
Poziom dokumentacji technicznej	Wysoki poziom dokumentacji, dostępność wielu zasobów online i społeczności wsparcia	Duża społeczność Arduino i dostępność licznych tutoriali i dokumentacji	Dostępność dokumentacji technicznej zależy od producenta, ale dostępne są pełne specyfikacje, instrukcje obsługi i przykładowe projekty
Możliwości	Duże możliwości rozbudowy za pomocą dostępnych modułów i akcesoriów. Obsługa wielu protokołów komunikacyjnych (np. SPI, I2C).	Obsługa szerokiego zakresu czujników i modułów, umożliwiając różnorodne projekty	Wysoka wydajność i moc obliczeniowa, co czyni go odpowiednim do bardziej zaawansowanych aplikacji. Obsługa zaawansowanych protokołów komunikacyjnych,

			takich jak USB, Ethernet, CAN
Dodatkowe możliwości	Możliwość uruchamiania systemów operacyjnych, takich jak Linux, co umożliwia bardziej zaawansowane zastosowania	Łatwa integracja z innymi platformami i urządzeniami. Obsługa interfejsów komunikacyjnych, takich jak UART, I2C, SPI	Zintegrowane interfejsy komunikacyjne i przetworniki analogowo-cyfrowe.
Sugestia użycia	Raspberry Pi Zero jest idealny do zastosowań, które wymagają niewielkiego rozmiaru, niskiego kosztu i dostępności szerokiego zakresu funkcji i interfejsów. Może być stosowany w projektach IoT, automatyzacji domowej, monitoringu i wielu innych zastosowaniach, w których wymagana jest niewielka jednostka obliczeniowa z szerokimi	Arduino Uno jest doskonałym wyborem dla projektów prototypowych, edukacyjnych i hobbystycznych. Może być wykorzystywany do budowy prostych układów kontrolujących, automatyzacji domowej, systemów monitoringu i wielu innych projektów, w których wymagana jest prosta obsługa i niskie zużycie energii.	STM32F411CEU6 jest doskonałym wyborem do zaawansowanych projektów, które wymagają większej mocy obliczeniowej, większej ilości pamięci i obsługi zaawansowanych funkcji komunikacyjnych. Może być stosowany w aplikacjach czasu rzeczywistego, systemach sterowania, systemach wbudowanych i innych projektach, w których wydajność i zaawansowane funkcje są kluczowe.

	możliwościami rozszerzeń.		Jednak ze względu na większą złożoność programowania i wyższy koszt, może być bardziej odpowiedni dla zaawansowanych użytkowników i projektów komercyjnych.
--	------------------------------	--	--

Tabela 2.2. Podsumowanie czujników

	VL53L0X	HC-SR04	Velleman WPSE306N	HY-SRF05
Zalety	Szybki czas reakcji. Długi zasięg pomiarowy	Niska cena. Prosta obsługa. Popularność i dostępność.	Niskie odchylenia standardowe. Prosta obsługa.	Dobra wydajność na różnych powierzchniach
Wady	Niska precyzja na dystansach powyżej 1000 mm. Wysoka cena.	Mniejszy zasięg maksymalny pomiaru w porównaniu do innych czujników. Możliwość interferencji z innymi urządzeniami elektronicznymi	Możliwość interferencji z innymi urządzeniami elektronicznymi	Możliwość interferencji z innymi urządzeniami elektronicznymi
Problemy	Możliwość zakłóceń związanych z odbiciami światła.	Kompletnie niewiarygodne wyniki pomiarów na powierzchni włosowatej.	Kompletnie niewiarygodne wyniki pomiarów na powierzchni włosowatej.	Kompletnie niewiarygodne wyniki pomiarów na powierzchni włosowatej.
Koszt	Około 6 zł	Około 3 zł	Około 40 zł	Około 15 zł
Sugestia użycia	Systemy detekcji bliskich odległości.	Pomiar odległości w projektach, proste układy sensoryczne	Pomiar odległości w projektach, proste układy sensoryczne	Pomiar odległości w projektach, proste układy sensoryczne

3. Podsumowanie

3.1. Wnioski z badań – działanie układów

Podczas badań z wykorzystaniem mikrokontrolerów STM32F411CEU6, Arduino Uno oraz mikrokomputer Raspberry Pi Zero, stwierdzono, że wszystkie trzy układy miały bardzo zbliżony czas wykonania pomiarów. Różnice między nimi były marginalne, wynosiły kilka milisekund. W związku z tym, wszystkie trzy układy spełniły oczekiwania i wykonały to, co do nich należało - czyli dokonały pomiaru odległości za pomocą zainstalowanych czujników. Takie elementy mogą mieć większe znaczenie jedynie w bardziej wyspecjalizowanych projektach.

3.2. Wnioski z badań – czujniki hipersoniczne

Czujniki hipersoniczne wykazywały dobrą precyzję i dokładność w trakcie badań na powierzchni gładkiej, lustrzanej oraz chropowatej dostarczając wiarygodne wyniki. Jednak pojawiły się problemy, gdy przeprowadzano pomiary na powierzchniach włosowatych, takich jak np. szaliki czy swetry. Czujniki te w praktycznie każdym przypadku generowały błędne wyniki pomiaru. Prawdopodobnie wynikało to z rodzaju powierzchni, które wpływały na załamania fal ultradźwiękowych na włosach. W rezultacie czujniki nie były w stanie prawidłowo odebrać fali zwrotnej i dostarczały nieprawidłowe pomiary. Ten problem może wynikać z tego, że czujniki hipersoniczne działają na zasadzie emisji fali ultradźwiękowej i odbioru jej odbicia. Powierzchnia włosowata może powodować rozproszenie i załamania fali, utrudniając dokładne odbicie. W takich przypadkach może być konieczne zastosowanie innych rodzajów czujników, które są bardziej odporne na takie zakłócenia, lub dostosowanie parametrów pomiarowych dla danej powierzchni.

Podsumowując, czujniki hipersoniczne, takie jak HC-SR04, Velleman WPSE306N i HY-SRF05, sprawdzają się dobrze w pomiarze odległości na wielu różnych powierzchniach. Jednak na powierzchniach włosowatych należy być świadomym ich ograniczeń i rozważyć inne metody lub czujniki, aby uzyskać dokładne pomiary w takich warunkach.

3.3. Wnioski z badań – czujnik PiR i ToF

Czujnik ToF VL53L0X okazał się niepraktyczny w pomiarze odległości w porównaniu do czujników hipersonicznych. W większości przypadków czujnik ToF pokazywał wyniki o około 10 cm większe niż czujniki hipersoniczne. Jednak pojawiły się pewne wyjątki, zwłaszcza na powierzchniach włosowatych, gdzie czujniki hipersoniczne nie były w stanie poprawnie zmierzyć odległości i generowały błędne wyniki. W tych przypadkach czujnik ToF wykazywał się niezwykle dokładnymi pomiarami, lecz tylko do odległości 100 cm. Powyżej tej odległości zwracał jedynie maksymalną wartość, jaką był w stanie osiągnąć. Możliwe, że opisane problemy są charakterystyczne dla konkretnego modelu czujnika ToF VL53L0X, a nie ogólnych cech czujników tego typu.

Czujnik PIR natomiast sprawdził się jako skuteczne narzędzie do wykrywania ruchu w określonej odległości. Wybór odpowiedniego czujnika zależy od konkretnych wymagań i zastosowania, biorąc pod uwagę zarówno precyzję pomiaru odległości, jak i wykrywanie ruchu.

Perspektywa dalszych badań

W przyszłości można by rozszerzyć zakres badań o aspekty takie jak sprawdzenie różnego ustawienia obiektów testowych (np. lustro pod różnymi kątami). Można też dokładnie sprawdzić pola wykrywania obiektów przez czujniki, a także można dodać większą ilość obiektów testowych i przygotowanie różnych możliwych do wystąpienia w rzeczywistości scenariuszy. Kolejną kwestią byłoby sprawdzenie, czy te czujniki można schować za szybą zrobioną ze szkła itp. Innymi aspektami o które można rozszerzyć badania to maksymalna liczba pomiarów na sekundę, zużycie energii, wydajność urządzeń pod względem obliczeń oraz wykorzystanie innych języków programowania i technologii.