Kompresja H265 HEVC

Autor: Karol Pisarski

W projekcie zrealizowano kompresję wideo przy użyciu bibliotek zewnętrznych w języku Python, w szczególności korzystając z biblioteki **imageio\_ffmpeg**, która integruje narzędzie **FFmpeg**. FFmpeg to popularne narzędzie open-source służące do przetwarzania multimediów, w tym kodowania i dekodowania wideo.

# Dostarczone materiały

Podczas realizacji projektu stwierdzono, że napisana wcześniej biblioteka przez autora poprzedniej pracy nie jest zbytnio użyteczna i czytelna. To zwiększa ryzyko błędnie przeprowadzonych badań, dlatego podjęto decyzję o zaimplementowaniu kodu w języku Python, który zniweluje to ryzyko i umożliwi przeprowadzenie szerszych badań.

Wraz z projektem od prowadzącego otrzymano materiały. Niestety, po głębszej analizie okazało się, że większość z dostarczonych zdjęć do testowania była już skompresowana w formacie .png. Kompresja zdjęć mogła wpłynąć na jakość wyników, co stanowiło istotny problem.

Kolejnym problemem były obrazy o nazwach 5.png, 6.png, 7.png, 8.png, 13.png, które miały niepoprawne rozmiary, co uniemożliwiało ich zakodowanie i dalsze użycie w badaniach.

Podczas badań wybrano trzy główne ścieżki tworzenia siatek z obrazu:

1. Rzędowa – polegająca na analizie i przetwarzaniu obrazu rząd po rzędzie.
2. Spiralna – oparta na przetwarzaniu obrazu w układzie spiralnym.
3. Krzywa Hilberta – używająca złożonej krzywej przestrzennej do kodowania obrazu.

Do badania dołączono również nowe cztery zdjęcia, które pozwoliły na poprawę zdolności oceny wyników eksperymentu, dzięki czemu uzyskano bardziej wiarygodne dane do analiz.

# Wstęp

Przeprowadzono testy kompresji bezstratnej i stratnej na zestawie obrazów za pomocą enkodera HEVC. Wyniki zostały porównane z innymi popularnymi metodami kompresji, takimi jak JPEG, PNG i JPEG 2000. Badano różne algorytmy kompresji (rzędowy, spiralny, Hilberta) oraz różne współczynniki kompresji (10:1, 30:1, 100:1).

# Biblioteka zewnętrzna:

Podczas projektu skorzystano z bibliotek zewnętrznych w języku Python opisanych poniżej:

## Opis biblioteki

Biblioteka imageio\_ffmpeg jest używana do integracji z FFmpeg, narzędziem open-source do przetwarzania multimediów, które obsługuje szeroki zakres operacji na plikach wideo i audio, w tym kodowanie i dekodowanie wideo. FFmpeg jest powszechnie stosowany w aplikacjach multimedialnych ze względu na swoją wszechstronność i wydajność.

## Zastosowanie w projekcie

W projekcie wykorzystano bibliotekę imageio\_ffmpeg do kodowania i dekodowania obrazów jako wideo za pomocą kodeka H.265 (HEVC). Poniżej przedstawiono szczegóły implementacji.

# **Kompresja bezstratna HEVC (H.265)**

W przypadku kompresji bezstratnej, efektywność HEVC została porównana z tradycyjnymi metodami kompresji (JPEG, PNG i JPEG 2000). Wyniki dla zdjęć zakodowanych w formacie .png nie były wysokie, co utrudnia ocenę efektywności tych metod. Poniżej przedstawiono wyniki kompresji bezstratnej dla różnych metod kompresji.

## Podstawowe kompresje

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | Współczynnik kompresji JPEG | Współczynnik kompresji PNG | Współczynnik kompresji JPEG 2000 |
| 1.png | 2,74 | 1,01 | 0,98 |
| 2.png | 2,74 | 1,01 | 1,05 |
| 3.png | 2,8 | 1,02 | 0,86 |
| 4.png | 3,42 | 1,03 | 0,77 |
| 9.png | 2,84 | 1,02 | 0,75 |
| 10.png | 2,85 | 1,05 | 0,84 |
| 11.png | 2,24 | 1 | 1,02 |
| 12.png | 2,27 | 1,03 | 1,22 |
| 14.png | 2,12 | 1,00 | 1,12 |
| 15.png | 2,14 | 1,02 | 0,95 |
| 16.png | 1,5 | 1,69 | 127,20 |
| 20.bmp | 4,93 | 24,79 | 2,50 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 4,66 | 1,96 | 1,51 |
| PIA04230.tif | 4,01 | 1,98 | 1,90 |
| PIA26149.tif | 0,93 | 4,98 | 1,52 |
| sunflower-field.bmp | 4,59 | 2,23 | 2,58 |

Tabela 1 -Wyniki kompresji bezstratnej dla tradycyjnych metod kompresji.

## Kompresja przy użyciu enkodera H265 HEVC

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | Współczynnik kompresji, dla algorytmu rzędowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmu kolumnowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmy spiralnego | Współczynnik kompresji dla algorytmu hilberta |
| 1.png | 1,79 | 1,78 | 1,79 | 1,78 |
| 2.png | 1,63 | 1,58 | 1,62 | 1,63 |
| 3.png | 1,3 | 1,29 | 1,3 | 1,3 |
| 4.png | 1,69 | 1,64 | 1,69 | 1,68 |
| 9.png | 1,12 | 1,11 | 1,12 | 1,11 |
| 10.png | 1,5 | 1,51 | 1,52 | 1,52 |
| 11.png | 1,44 | 1,42 | 1,41 | 1,43 |
| 12.png | 2,25 | 1,78 | 2,25 | 2,24 |
| 14.png | 1,98 | 1,96 | 1,94 | 1,95 |
| 15.png | 1,49 | 1,40 | 1,48 | 1,47 |
| 16.png | 9,91 | 9,91 | 9,91 | 9,91 |
| 20.bmp | 33,66 | 5,19 | 8,6 | 9,01 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 2,99 | 2,95 | 2,91 | 2,94 |
| PIA04230.tif | 3,02 | 2,94 | 2,74 | 2,96 |
| PIA26149.tif | 1,33 | 1,32 | 1,33 | 1,34 |
| sunflower-field.bmp | 4,74 | 4,74 | 4,76 | 4,75 |

Tabela 2 – Wyniki kompresji bezstratnej dla HEVC.

Rysunek 1 – Wykres zestawiający współczynniki kompresji poszczególnych zdjęć dla tradycyjnej kompresji.

Na rysunku 1 nie wzięto pod uwagę

Rysunek 2 - Wykres zestawiający współczynniki kompresji poszczególnych zdjęć w formacie .png dla HEVC.

Rysunek 3 – Wykres zestawiający współczynniki kompresji poszczególnych zdjęć dla HEVC.

## Wnioski

* HEVC oferuje wyższe współczynniki kompresji w porównaniu do PNG, JPEG i JPEG 2000.
* Wartości współczynników kompresji dla HEVC są zbliżone dla różnych algorytmów (rzędowy, spiralny, Hilberta), co sugeruje, że wybór konkretnego algorytmu ma minimalny wpływ na wynik kompresji.
* Wyniki HEVC są bardziej efektywne w porównaniu do tradycyjnych metod kompresji, szczególnie dla formatów takich jak BMP, TIFF i CR2.

# **Kompresja stratna**

## Wstęp

## Podczas analizy kompresji stratnej nie uwzględniono obrazu 16.png, ponieważ zawiera on jedynie białe tło, co skutkowało uzyskaniem maksymalnego współczynnika kompresji. Wyniki kompresji stratnej przy różnych współczynnikach kompresji (10:1, 30:1, 100:1) zostały przedstawione poniżej. Wyniki opracowano jedynie dla algorytmu rzędowego, ze względu na złożoność tematu.

Do obliczenia parametrów SSIM oraz PSNR wymagane było odtworzenie oryginalnego obrazu, z tego również powodu owe wartości zostały tylko obliczone dla algorytmu rzędowego oraz kolumnowego.

## Podstawowe kompresje

Podczas przeprowadzania kompresji stratnej, skrypt używał następujących parametrów:

1. **JPEG (stratny)**
   * Jakość: 20
   * Optymalizacja: Tak
2. **PNG (stratny)**
   * Konwersja: Paleta barw adaptacyjna
   * Optymalizacja: Tak
3. **JPEG2000 (stratny)**: Warstwy jakości: 20

Dzięki zastosowaniu powyższych parametrów możliwe było uzyskanie różnorodnych wyników kompresji, które zostały dokładnie przeanalizowane pod kątem efektywności oraz jakości uzyskiwanych obrazów.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | Współczynnik kompresji JPEG | Współczynnik kompresji PNG | Współczynnik kompresji JPEG 2000 |
| 1.png | 28,72 | 3,26 | 7,27 |
| 2.png | 25,73 | 3,24 | 10,91 |
| 3.png | 22,29 | 2,35 | 10,18 |
| 4.png | 23,79 | 1,85 | 4,6 |
| 9.png | 56,97 | 2,02 | 8,8 |
| 10.png | 33,05 | 1,04 | 5,59 |
| 11.png | 94,36 | 2,6 | 9,49 |
| 12.png | 76,16 | 2,47 | 6,85 |
| 14.png | 47 | 3,81 | 8,63 |
| 15.png | 34,94 | 4,39 | 6 |
| 20.bmp | 56 | 108,6 | 20 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 86,74 | 5,37 | 7,66 |
| PIA04230.tif | 65,52 | 4,24 | 20,02 |
| PIA26149.tif | 6,48 | 3,9 | 4,14 |
| sunflower-field.bmp | 57,03 | 6,22 | 20 |

Tabela 3 - Wyniki kompresji stratnej dla podstawowych kompresji.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | PSNR | | | SSIM | | |
|  | kompresja JPEG | kompresja PNG | kompresja JPEG 2000 | kompresja JPEG | kompresja PNG | kompresja JPEG 2000 |
| 1.png | 28,24 | 5,06 | 37,02 | 0,82 | 0,13 | 0,94 |
| 2.png | 28,85 | 6,06 | 30,86 | 0,85 | 0,07 | 0,88 |
| 3.png | 26,88 | 8,39 | 26,95 | 0,84 | 0,13 | 0,81 |
| 4.png | 35,07 | 3,2 | 40,66 | 0,84 | 0,08 | 0,95 |
| 9.png | 30,64 | 6,98 | 32,77 | 0,67 | 0,14 | 0,77 |
| 10.png | 34,58 | 6,41 | 42,04 | 0,91 | 0,23 | 0,97 |
| 11.png | 34,77 | 2,94 | 39,56 | 0,85 | 0,08 | 0,92 |
| 12.png | 36,26 | 3,73 | 46,67 | 0,88 | 0,09 | 0,98 |
| 14.png | 32,98 | 8,26 | 41,86 | 0,89 | 0,18 | 0,97 |
| 15.png | 31,07 | 7,61 | 38,80 | 0,87 | 0,23 | 0,96 |
| 20.bmp | 6.97 | 100 | 32,24 | 0,02 | 1 | 0,92 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 35,93 | 8,03 | 46,66 | 0,93 | 0,43 | 0,98 |
| PIA04230.tif | 30,83 | 9,64 | 33,47 | 0,82 | 0,06 | 0,87 |
| PIA26149.tif | 35,11 | 1,86 | 43,66 | 0,89 | 0,06 | 0,98 |
| sunflower-field.bmp | 31,38 | 6,63 | 39,72 | 0,82 | 0,04 | 0,96 |

Tabela 4 - Wartości PSNR i SSIM dla podstawowych kompresji.

## Współczynnik kompresji 10:1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | Współczynnik CRF | Współczynnik kompresji, dla algorytmu rzędowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmu kolumnowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmy spiralnego | Współczynnik kompresji dla algorytmu hilberta |
| 1.png | 21 | 9,96 | 9,92 | 9,88 | 10 |
| 2.png | 22 | 9,96 | 9,77 | 9,95 | 9,95 |
| 3.png | 25 | 10,04 | 9,96 | 10,14 | 10,15 |
| 4.png | 22 | 9,83 | 9,96 | 9,91 | 10,06 |
| 9.png | 22 | 10,68 | 10,74 | 10,72 | 10,7 |
| 10.png | 18 | 9,66 | 9,65 | 9,72 | 9,66 |
| 11.png | 15 | 10,28 | 10,31 | 10,32 | 10,38 |
| 12.png | 11 | 10,61 | 10,69 | 10,63 | 10,67 |
| 14.png | 17 | 10,9 | 10,77 | 11,02 | 11,1 |
| 15.png | 23 | 10,45 | 9,77 | 10,25 | 10,18 |
| 20.bmp | 4 | 34,44 | 6,49 | 9,63 | 10,25 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 12 | 10,62 | 10,62 | 10,39 | 10,56 |
| PIA04230.tif | 18 | 10,9 | 10,75 | 10,72 | 11,3 |
| PIA26149.tif | 31 | 10,66 | 10,48 | 10,47 | 10,7 |
| sunflower-field.bmp | 9 | 10,55 | 10,18 | 10,48 | 10,56 |

Tabela 3 - Wyniki kompresji stratnej dla współczynnika kompresji 10:1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | PSNR | | SSIM | |
| Algorytm | Algorytm rzędowy | Algorytm kolumnowy | Algorytm rzędowy | Algorytm kolumnowy |
| 1.png | 33,36 | 33,38 | 0,9 | 0,91 |
| 2.png | 25,46 | 25,45 | 0,86 | 0,86 |
| 3.png | 23,02 | 23,01 | 0,76 | 0,76 |
| 4.png | 32,07 | 32,07 | 0,9 | 0,91 |
| 9.png | 29,22 | 29,21 | 0,7 | 0,71 |
| 10.png | 38,45 | 38,45 | 0,95 | 0,95 |
| 11.png | 33,05 | 33,05 | 0,90 | 0,90 |
| 12.png | 40,96 | 40,97 | 0,98 | 0,98 |
| 14.png | 35,21 | 35,22 | 0,95 | 0,95 |
| 15.png | 28,11 | 28,05 | 0,9 | 0,9 |
| 20.bmp | 52 | 43,97 | 0,99 | 0,99 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 42,34 | 16,20 | 0,86 | 0,72 |
| PIA04230.tif | 23,79 | 23,77 | 0,76 | 0,79 |
| PIA26149.tif | 29,95 | 29,98 | 0,85 | 0,85 |
| sunflower-field.bmp | 23,59 | 23,59 | 0,93 | 0,93 |

Tabela 4 - Wartości PSNR i SSIM dla współczynnika kompresji 10:1.

Rysunek 4 – Zestawienie współczynników kompresji dla kompresji stratnej 10:1.

Rysunek 5 – Wykres miary PSNR dla skompresowanych obrazów dla kompresji stratnej 10:1.

Rysunek 6 - Wykres miary SSIM dla skompresowanych obrazów dla kompresji stratnej 10:1.

## Współczynnik kompresji 30:1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | Współczynnik CRF | Współczynnik kompresji, dla algorytmu rzędowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmu kolumnowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmy spiralnego | Współczynnik kompresji dla algorytmu hilberta |
| 1.png | 29 | 29,53 | 29,81 | 29,46 | 30,16 |
| 2.png | 30 | 29,38 | 28,83 | 29,41 | 29,4 |
| 3.png | 32 | 29,86 | 29,40 | 30,1 | 30,16 |
| 4.png | 29 | 29,06 | 29,35 | 29,18 | 29,8 |
| 9.png | 26 | 32,84 | 33,21 | 33 | 32,75 |
| 10.png | 27 | 29,66 | 29,68 | 29,96 | 29,98 |
| 11.png | 20 | 28,02 | 28,07 | 28,08 | 28,27 |
| 12.png | 18 | 30,19 | 30,39 | 30,27 | 30,44 |
| 14.png | 27 | 31,27 | 30,70 | 31,66 | 31,92 |
| 15.png | 31 | 33,27 | 30,51 | 32,19 | 32,8 |
| 20.bmp | 19 | 71,57 | 23,20 | 29,42 | 29,72 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 19 | 30,6 | 29,99 | 28,87 | 29,86 |
| PIA04230.tif | 26 | 30,94 | 30,04 | 30,52 | 32,15 |
| PIA26149.tif | 41 | 32,52 | 32,67 | 31,2 | 33,32 |
| sunflower-field.bmp | 20 | 30,82 | 29,42 | 30,29 | 30,87 |

Tabela 5 - Wyniki kompresji stratnej dla współczynnika kompresji 30:1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | PSNR | | SSIM | |
| Algorytm | Algorytm rzędowy | Algorytm kolumnowy | Algorytm rzędowy | Algorytm kolumnowy |
| 1.png | 29,35 | 29,37 | 0,83 | 0,83 |
| 2.png | 23,56 | 23,54 | 0,74 | 0,74 |
| 3.png | 21,17 | 21,16 | 0,65 | 0,65 |
| 4.png | 30,4 | 30,42 | 0,81 | 0,81 |
| 9.png | 28,63 | 28,64 | 0,63 | 0,63 |
| 10.png | 33,72 | 33,73 | 0,90 | 0,9 |
| 11.png | 32,61 | 32,61 | 0,87 | 0,87 |
| 12.png | 39,98 | 40 | 0,96 | 0,96 |
| 14.png | 32,42 | 32,44 | 0,88 | 0,88 |
| 15.png | 27,03 | 26,82 | 0,84 | 0,83 |
| 20.bmp | 41,53 | 32,26 | 0,98 | 0,92 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 38,24 | 16,21 | 0,86 | 0,73 |
| PIA04230.tif | 23,46 | 23,44 | 0,62 | 0,69 |
| PIA26149.tif | 26,88 | 26,89 | 0,67 | 0,66 |
| sunflower-field.bmp | 23,48 | 23,48 | 0,87 | 0,87 |

Tabela 6 - Wartości PSNR i SSIM dla współczynnika kompresji 30:1.

Rysunek 5 – Zestawienie współczynników kompresji dla kompresji stratnej 30:1.

Rysunek 6 – Wykres miary PSNR dla skompresowanych obrazów dla kompresji stratnej 30:1.

Rysunek 7 - Wykres miary SSIM dla skompresowanych obrazów dla kompresji stratnej 30:1.

## Współczynnik kompresji 100:1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | Współczynnik CRF | Współczynnik kompresji, dla algorytmu rzędowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmu kolumnowego | Współczynnik kompresji, dla algorytmy spiralnego | Współczynnik kompresji dla algorytmu hilberta |
| 1.png | 39 | 101,5 | 101,38 | 99,96 | 103,67 |
| 2.png | 40 | 99,86 | 96,42 | 100,34 | 100,16 |
| 3.png | 41 | 104,95 | 98,95 | 104,35 | 103,52 |
| 4.png | 36 | 93,2 | 96,96 | 94,83 | 98,33 |
| 9.png | 30 | 100,53 | 102,55 | 100,42 | 101,82 |
| 10.png | 37 | 95,78 | 96,51 | 98,18 | 98,82 |
| 11.png | 28 | 96,02 | 97,13 | 97,59 | 98,08 |
| 12.png | 29 | 104,96 | 106 | 106,19 | 106,86 |
| 14.png | 37 | 103,7 | 101,05 | 105,95 | 107,41 |
| 15.png | 40 | 108,23 | 97,77 | 107,06 | 100,2 |
| 20.bmp | 30 | 188,79 | 98,68 | 104,17 | 105,32 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 28 | 109,98 | 100,97 | 100,39 | 106,33 |
| PIA04230.tif | 34 | 98,6 | 98,08 | 98 | 102,56 |
| PIA26149.tif | 51 | 65,156 | 64,78 | 58,66 | 64,3 |
| sunflower-field.bmp | 32 | 100,01 | 92,50 | 96,45 | 98,1 |

Tabela 7 - Wyniki kompresji stratnej dla współczynnika kompresji 100:1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nazwa obrazu | PSNR | | SSIM | |
| Algorytm | Algorytm rzędowy | Algorytm kolumnowy | Algorytm rzędowy | Algorytm kolumnowy |
| 1.png | 25,85 | 25,85 | 0,74 | 0,74 |
| 2.png | 21,53 | 21,52 | 0,59 | 0,58 |
| 3.png | 19,84 | 19,80 | 0,56 | 0,55 |
| 4.png | 28,61 | 28,60 | 0,72 | 0,72 |
| 9.png | 28,29 | 28,29 | 0,54 | 0,6 |
| 10.png | 29,19 | 29,13 | 0,82 | 0,82 |
| 11.png | 31,79 | 31,78 | 0,84 | 0,85 |
| 12.png | 37,20 | 37,23 | 0,93 | 0,93 |
| 14.png | 28,32 | 28,33 | 0,79 | 0,79 |
| 15.png | 25,53 | 25,63 | 0,78 | 0,78 |
| 20.bmp | 32,82 | 25,07 | 0,93 | 0,75 |
| Canon-5DMarkII-Shotkit-4.CR2 | 31,92 | 16,27 | 0,85 | 0,74 |
| PIA04230.tif | 22,9 | 22,87 | 0,56 | 0,56 |
| PIA26149.tif | 24,7 | 24,74 | 0,57 | 0,56 |
| sunflower-field.bmp | 22,85 | 22,85 | 0,75 | 0,75 |

Tabela 8 - Wartości PSNR i SSIM dla współczynnika kompresji 100:1.

Rysunek 8 – Zestawienie współczynników kompresji dla kompresji stratnej 100:1.

Rysunek 9 – Wykres miary PSNR dla skompresowanych obrazów dla kompresji stratnej 100:1.

Rysunek 10 - Wykres miary SSIM dla skompresowanych obrazów dla kompresji stratnej 100:1.

## Podsumowanie

* **Współczynnik kompresji 10:1**: HEVC zapewnia dobrą jakość obrazu, co potwierdzają wysokie wartości PSNR i SSIM.
* **Współczynnik kompresji 30:1**: Większość obrazów utrzymuje zadowalającą jakość przy wyższych współczynnikach kompresji.
* **Współczynnik kompresji 100:1**: Znaczące wzrosty współczynników kompresji prowadzą do wyraźnej utraty jakości, co jest widoczne w spadku wartości PSNR i SSIM.

# Predykcja między klatkowa

W celu analizy efektywności kompresji wideo, przeskalowano wszystkie obrazy do rozdzielczości 1920x1080 ze względu na ich pierwotne rozmiary. Poniżej przedstawiono wyniki dla różnych sekwencji wideo, uwzględniając podstawowe sekwencje powtarzalne, sekwencje ze zmieniającym się pojedynczym pikselem oraz sekwencje z przesuwającym się kwadratem.

**Przeskalowanie obrazów**

Ze względu na różnorodne rozmiary obrazów, wszystkie obrazy przeskalowano do rozdzielczości 1920x1080, aby zapewnić jednolitą bazę do testów kompresji.

## Podstawowa sekwencja powtarzalna

Sekwencje wideo utworzono poprzez powtarzanie zestawu obrazów. Długość sekwencji wynosiła odpowiednio 25, 50, 125, 250, 500, 1000 klatek.

Wyniki:

* **Total length = 25**
  + Total size of input files: 70.44 MB
  + Size of output file: 77.23 MB
  + Compression ratio: 0.91
* **Total length = 50**
  + Total size of input files: 141.11 MB
  + Size of output file: 156.48 MB
  + Compression ratio: 0.90
* **Total length = 125**
  + Total size of input files: 350.37 MB
  + Size of output file: 391.42 MB
  + Compression ratio: 0.90
* **Total length = 250**
  + Total size of input files: 698.24 MB
  + Size of output file: 782.04 MB
  + Compression ratio: 0.89
* **Total length = 500**
  + Total size of input files: 1396.48 MB
  + Size of output file: 1243.87 MB
  + Compression ratio: 0.89
* **Total length = 1000**
  + Total size of input files: 2792.96 MB
  + Size of output file: 2487.87 MB
  + Compression ratio: 0.89

## Zmiana piksela na czerwony

Sekwencje wideo utworzono, zmieniając kolor jednego piksela na czerwony na każdej kolejnej klatce. Długość sekwencji wynosiła odpowiednio 10, 25, 125, 250, 500, 1000 klatek.

Wyniki:

* **Total length = 10**
  + Total size of input files: 417.99 MB
  + Size of output file: 39.83 MB
  + Compression ratio: 10.49
* **Total length = 25**
  + Total size of input files: 1044.97 MB
  + Size of output file: 39.83 MB
  + Compression ratio: 26.24
* **Total length = 125**
  + Total size of input files: 5212.35 MB
  + Size of output file: 39.89 MB
  + Compression ratio: 130.99
* **Total length = 250**
  + Total size of input files: 10424.70 MB
  + Size of output file: 39.92 MB
  + Compression ratio: 261.81
* **Total length = 500**
  + Total size of input files: 20849.40 MB
  + Size of output file: 318.61 MB
  + Compression ratio: 65.44

## Kwadrat pomiędzy klatkami

ekwencje wideo utworzono, zmieniając pozycję kwadratu o rozmiarze 20x20 pikseli na każdej kolejnej klatce. Długość sekwencji wynosiła odpowiednio 10, 25, 125, 250, 500, 1000 klatek.

Wyniki:

* **Total length = 10**
  + Total size of input files: 417.98 MB
  + Size of output file: 39.82 MB
  + Compression ratio: 10.50
* **Total length = 25**
  + Total size of input files: 1044.97 MB
  + Size of output file: 39.84 MB
  + Compression ratio: 26.23
* **Total length = 125**
  + Total size of input files: 5212.35 MB
  + Size of output file: 39.87 MB
  + Compression ratio: 130.86
* **Total length = 250**
  + Total size of input files: 10424.70 MB
  + Size of output file: 39.92 MB
  + Compression ratio: 261.72
* **Total length = 500**
  + Total size of input files: 20849.40 MB
  + Size of output file: 318.68 MB
  + Compression ratio: 65.47
* **Total length = 1000**
  + Total size of input files: 41698.80 MB
  + Size of output file: 637.36 MB
  + Compression ratio: 65.41

## Wnioski

Analiza wyników pokazuje, że:

* **Podstawowe sekwencje powtarzalne** mają stosunkowo niski współczynnik kompresji, co jest oczekiwane przy prostym powtarzaniu tych samych obrazów.
* **Sekwencje ze zmieniającym się pojedynczym pikselem** osiągają znacznie wyższy współczynnik kompresji, co sugeruje, że kompresja HEVC jest bardzo skuteczna w kodowaniu minimalnych zmian między klatkami.
* **Sekwencje z przesuwającym się kwadratem** również pokazują wysoki współczynnik kompresji, podobny do sekwencji z pojedynczym pikselem, co wskazuje na efektywne kodowanie przez HEVC w przypadku małych, lokalnych zmian.

Przeprowadzone testy potwierdzają, że kompresja HEVC jest szczególnie efektywna w przypadku sekwencji z niewielkimi, ale regularnymi zmianami między klatkami.

# Bibliografia:

* <https://shotkit.com/free-raw-photos/>
* <https://ffmpeg.org/>
* <https://imagemagick.org/index.php>