

Spis treści

| | |
|--|----|
| Spis ważniejszych oznaczeń | 7 |
| 1. Wprowadzenie | 9 |
| 1.1. Zdefiniowanie problemu badawczego | 9 |
| 1.2. Istniejące rozwiązania bezstratnej kompresji obrazów | 10 |
| 1.3. Cel i zakres pracy | 12 |
| 1.4. Podstawy modelowania obrazów i sekwencji wideo | 16 |
| 1.5. Redukcja zakresu odcieni | 19 |
| 1.6. Domyślne założenia przyjęte w pracy | 19 |
| 2. Stała i statyczna predykcja liniowa | 21 |
| 2.1. Stałe modele predykcyjne | 21 |
| 2.2. Wyznaczanie współczynników predykcji metodą MMSE | 23 |
| 2.3. Dobór predyktora statycznego | 24 |
| 2.3.1. Metoda prostej selekcji oparta na predyktorach stałych | 24 |
| 2.3.2. Metoda uśredniania współczynników | 26 |
| 2.4. Metoda poszukiwania współczynników | 26 |
| 2.4.1. Pierwsza propozycja | 26 |
| 2.4.2. Druga propozycja | 30 |
| 2.4.3. Trzecia propozycja | 31 |
| 2.5. Wyznaczanie współczynników predykcji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych | 33 |
| 2.5.1. Wiadomości ogólne | 33 |
| 2.5.2. Podstawy projektowania algorytmu genetycznego | 34 |
| 2.5.3. Badania eksperymentalne | 36 |
| 2.6. Metody modelowania predykcyjnego z podziałem blokowym | 41 |
| 3. Adaptacyjna predykcja z przełączanym modelem | 43 |
| 3.1. Stałe predyktory nieliniowe | 43 |
| 3.1.1. Adaptacyjny predyktor medianowy | 43 |
| 3.1.2. Metoda predykcji z podziałem kontekstowym GAP | 45 |
| 3.1.3. Metoda predykcji z wagami gradientowymi | 46 |
| 3.1.4. Metoda predykcji oparta na logice rozmytej | 47 |
| 3.1.5. Propozycja metody wielokontekstowej | 48 |
| 3.2. Podział kontekstowy stosowany w złożonych metodach predykcyjnych | 50 |
| 3.2.1. Zasada efektywnego doboru kontekstu głównego | 50 |
| 3.2.2. Kontekst uzupełniający w metodzie statycznej predykcji liniowej | 52 |
| 3.2.3. Konteksty uzupełniające w metodzie ALCM | 53 |
| 3.2.4. Konteksty uzupełniające w metodzie CoBALP | 53 |
| 3.2.5. Konteksty uzupełniające w metodzie RLS | 54 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4. | Skumulowany błąd predykcji | 55 |
| 4.1. | Metody korekcji skumulowanego błędu predykcji | 55 |
| 4.2. | Typy podziałów wielokontekstowych | 57 |
| 4.2.1. | Pierwsza metoda..... | 57 |
| 4.2.2. | Druga metoda | 58 |
| 4.2.3. | Trzecia metoda | 59 |
| 4.2.4. | Czwarta metoda | 60 |
| 4.3. | Mieszana metoda korekcji skumulowanego błędu predykcji | 60 |
| 4.4. | Metoda statyczna z podziałem kontekstowym | 61 |
| 4.5. | Dobór współczynników predykcji metodą minimalizacji średniej bitowej | 63 |
| 5. | Metody prostej adaptacji modelu predykcji | 67 |
| 5.1. | Wprowadzenie | 67 |
| 5.2. | Podstawowa metoda adaptacji – LMS | 68 |
| 5.3. | Metoda adaptacji ALCM i jej udoskonalenie | 71 |
| 5.4. | Metoda adaptacji CoBALP i jej udoskonalenie | 72 |
| 5.5. | Metoda mieszana M-LMS | 73 |
| 5.6. | Analiza prostych metod adaptacyjnych | 75 |
| 6. | Złożone metody adaptacji współczynników predykcji | 77 |
| 6.1. | Metoda RLS | 77 |
| 6.2. | Metoda OLS | 78 |
| 6.3. | Metoda WLS | 79 |
| 6.4. | Metoda AVE-WLS | 81 |
| 6.5. | Metoda NLMS | 82 |
| 6.6. | Analiza rezultatów badań | 84 |
| 6.7. | Analiza złożoności obliczeniowej | 85 |
| 7. | Zastosowanie sieci neuronowych | 91 |
| 7.1. | Adaptacyjna sieć neuronowa | 91 |
| 7.2. | Analiza parametrów sieci AdNN | 94 |
| 7.3. | Zwiększanie wydajności sieci AdNN | 97 |
| 8. | Adaptacyjny koder arytmetyczny z podziałem kontekstowym | 101 |
| 8.1. | Długookresowa forma adaptacji rozkładu prawdopodobieństwa | 101 |
| 8.2. | Podział kontekstowy w koderze arytmetycznym | 102 |
| 8.3. | Kwantyzacja błędów predykcji | 104 |
| 8.4. | Kodowanie bitu znaku | 106 |
| 9. | Metoda mieszania predykcyjnego | 107 |
| 9.1. | Wprowadzenie | 107 |
| 9.2. | Dobór subpredyktorów | 107 |
| 9.3. | Zasada działania metody mieszania predykcyjnego | 108 |
| 9.4. | Cechy szczególne metod Blend-13 i Blend-17 | 109 |
| 9.5. | Metoda dopasowania teksturowanego | 111 |
| 9.6. | Metoda Blend-19 | 115 |

| | |
|--|-----|
| 9.7. Metoda Blend-20 | 116 |
| 9.8. Metody Blend-24 oraz Blend-25 | 120 |
| 9.8.1. Wprowadzenie | 120 |
| 9.8.2. Udoskonalenie metody TCM | 121 |
| 9.8.3. Trzecia metoda mieszania | 121 |
| 9.8.4. Dobór fazy obrotu | 122 |
| 9.8.5. Dobór parametrów kodera arytmetycznego | 123 |
| 9.9. Analiza efektywności proponowanych metod | 125 |
| 10. Zastosowania kodowania mieszanego | 131 |
| 10.1. Wprowadzenie | 131 |
| 10.2. Kodowanie w trybie prawie bezstratnym | 131 |
| 10.3. Bezstratna kompresja obrazów astronomicznych i satelitarnych | 143 |
| 10.4. Bezstratna kompresja sekwencji wideo..... | 145 |
| 10.5. Kodowanie obrazów kolorowych..... | 149 |
| 10.5.1. Korygowanie błędów predykcji | 149 |
| 10.5.2. Dekorelacja transformacyjna | 149 |
| 10.5.3. Badania eksperymentalne | 152 |
| 11. Podsumowanie | 157 |
| Literatura | 163 |
| Summary | 173 |
| Zusammenfassung | 175 |

1. Wprowadzenie

1.1. Zdefiniowanie problemu badawczego

W dobie w pełni cyfrowej struktury obróbki obrazów cyfrowych i sekwencji wideo istotnym problemem są wysokie wymagania pamięciowe związane z przechowywaniem danych wizyjnych. Zmniejszenie wymagań pamięciowych jest możliwe dzięki kompresji. Na przykład zapis 60 minut filmu jakości telewizyjnego standardu PAL (25 klatek na sekundę o rozdzielczości SD 720×576 pikseli, co daje 9,89 Mpikseli/s, gdy każdą ze składowych RGB traktujemy jako liczbę ośmiobitową) wymaga 104,28 GB miejsca na dysku (lub innym nośniku danych).

Kompresję można podzielić na stratną i bezstratną, przy czym w tej pracy skupiono się głównie na tym drugim typie. Do istotnych zastosowań bezstratnej kompresji obrazów i sekwencji wideo należy między innymi archiwizacja obrazów medycznych 2D, 3D oraz 4D (trójwymiarowe sekwencje wideo) [52, 97, 100, 106, 144], astronomicznych, a także kompresja zdjęć satelitarnych [21, 69]. Ponadto często tryb bezstratny jest wymagany na etapie graficznej obróbki zdjęć, materiałów reklamowych oraz przy produkcji audycji telewizyjnych, filmów (ang. *post-production* [7]) itp. W takiej sytuacji nie można korzystać ze stratnych wersji metod kompresji, takich jak JPEG, JPEG2000 (dla obrazów statycznych) czy MPEG2, MPEG4 (dla sekwencji wideo). Choć te standardy mają odpowiednie tryby bezstratne, to nie można ich zaliczyć do kategorii najwydajniejszych, co zostało przebadane na wstępnym etapie, przed postawieniem tezy zawartej w tej pracy. Pewnym kompromisem między kodowaniem bezstratnym a stratnym jest tryb prawie bezstratny, pozwalający na zdefiniowanie maksymalnych błędów w obrazie zdekodowanym (patrz podrozdział 10.2).

Nowym rodzajem zastosowań jest technologia *slow motion video*, służąca do zapisu nagrań z eksperymentów naukowych z dokładnością nawet do kilkudziesięciu tysięcy klatek na sekundę. Na przykład nagranie sekundy sekwencji wideo (sygnał luminancji osiem bitów/piksel) przy 1000 klatkach na sekundę i rozdzielczości SD 720×576 pikseli wymaga 3955 MB pojemności pamięci. Obecnie kamery w trybie *slow motion* zapisują obraz bez kompresji i czas trwania sekwencji jest ograniczony maksymalną pojemnością pamięci kamery. Nagrywanie i archiwizacja plików o większych rozmiarach staje się problemem, który może zostać rozwiązany przez wprowadzenie szybkich sprzętowych zrównoleglonych realizacji kompresji np. w trybie prawie bezstratnym, co w połączeniu z macierzą wydajnych dysków SSD, może pozwolić na zwiększenie funkcjonalności stanowiska badawczego wykorzystującego szybkozmiennie zjawiska fizyczne.

W przypadku stosowania współczesnych metod kompresji wykorzystuje się zwykle dwa etapy: dekompozycję danych oraz kompresję za pomocą jednej z wydajnych metod entropijnych, wśród których najefektywniejsze to kodowanie arytmetyczne i kodowanie Huffmana [98]. Problemem badawczym poruszonym w tej pracy będzie zatem analiza możliwości dalszego wzrostu efektywności bezstratnej kompresji obrazów w odniesieniu do istniejących

rozwiązań znanych z literatury. Rozpoczynając prace nad rozwojem nowych metod, należało bowiem odpowiedzieć na pytanie, czy słuszna jest opinia o tym, że zdecydowana większość problemów badawczych w zakresie bezstratnej kompresji obrazów została już rozwiązana? Takie argumenty bowiem pojawiały się w rozmowach autora z naukowcami, a potwierdzać to miała znacząco spadająca liczba publikacji dotyczących zagadnienia bezstratnej kompresji obrazów.

Autor podjął się trudnego zadania, chcąc opracować nowe metody z wykorzystaniem najlepszych cech rozmaitych już istniejących rozwiązań. Projektowane tu metody będą wykorzystywać możliwość wspólnego stosowania wielu technik dekompozycji obrazu, jak i rozbudowaną metodę adaptacyjnego kodowania arytmetycznego.

1.2. Istniejące rozwiązania bezstratnej kompresji obrazów

Nieustanne dążenie do uzyskania coraz większej efektywności bezstratnej kompresji obrazu prowadzi do opracowywania metod o wzrastającej złożoności implementacyjnej. Lata 90. XX wieku były okresem największej aktywności projektantów nowych metod. Do dziś za jedną z najefektywniejszych metod uznaje się zaprezentowaną w roku 1996 CALIC (ang. *Context Based Adaptive Lossless Image Coding*) [141]. Na owe czasy metoda ta okazała się zbyt wymagająca obliczeniowo w porównaniu z metodą LOCO-I, której modyfikacja stała się standardem JPEG-LS [136].

Wśród najefektywniejszych algorytmów o wysokiej złożoności implementacyjnej można wyróżnić prace trzech zespołów badawczych: metoda TMW (1997) [86] i jej późniejsze rozwinięcie TMW^{LEGO} (2001) [87], WAVE-WLS (2002) [147] oraz najnowsza wersja MRP 0.5 zaprezentowana pod nazwą 'VBS & new-cost' (2005) [78]. Zakodowanie jednego obrazu z użyciem każdej z tych propozycji wymaga wielu minut (lub nawet godzin, jeśli nie dysponujemy najwydajniejszym obecnie procesorem dostępnym na rynku) pracy programu kodującego.

Oprócz wspomnianych wcześniej metod wykorzystujących modelowanie predykcyjne istnieją także bezstratne wersje koderów falkowych stosowane zarówno do kodowania w trybie *intraframe* (np. JPEG2000 [72]), jak i *interframe* [91]. Jednak uzyskiwane wyniki nie dorównują najlepszym metodom predykcyjnym. Podobnie wygląda sytuacja z kodowaniem hierarchicznym wykorzystanym w metodzie typu HINT i pierwotnej wersji kodera CALIC [138]. Z tego względu w tej pracy cechy charakterystyczne tych metod nie zostaną omówione. Informacje o różnych podejściach do kodowania bezstratnego można znaleźć w pracach przeglądowych [18, 26, 82]. Obecnie dość powszechnie stosowanym formatem jest PNG ze względu na jego uniwersalność w kodowaniu zarówno obrazów naturalnych, jak i sztucznie generowanych [93, 105]. Jednak jego efektywność jest niższa od metod takich jak JPEG-LS czy CALIC. Wersja PNG-crush koduje obraz kolejno dla wszystkich możliwych ustawień parametrów PNG, wybierając najlepszy rezultat. Wyniki działań tego oprogramowania, wraz z porównaniem efektywności innych metod znanych z literatury oraz opracowanych przez autora tej pracy, zaprezentowano w podsumowującej tab. 9.10. Warto przy tym zaznaczyć, że techniki oparte na kodowaniu słownikowym, takie jak choćby PNG czy archiwizery ogólnego