

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki

Katedra Automatyki



PRACA MAGISTERSKA

Barbara Berek

***Usuwanie obiektów ruchomych z serii zdjęć
z zastosowaniem w fotografii HDR.***

Promotor:

dr inż. Paweł Rotter

Kraków, 2011

***AGH – University of Science and Technology
in Krakow***

*Faculty of Electrical Engineering, Automatics,
Computer Science and Electronics*



MASTER OF SCIENCE THESIS

Barbara Berek

***Removal of moving objects from series of
photographs with application in HDR
photography.***

Thesis Supervisor:

dr inż. Paweł Rotter

Cracow, 2011

Oświadczenie Autora Pracy

Oświadczam, świadoma odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę dyplomową wykonałam osobiście i samodzielnie, i nie korzystałam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Spis treści

<i>Abstrakt</i>	8
1. <i>Wprowadzenie</i>	9
2. <i>Tworzenie zdjęć HDR</i>	11
2.1. <i>Wyrównywanie ekspozycji</i>	12
2.2. <i>Otrzymanie krzywej odpowiedzi aparatu</i>	15
2.3. <i>Utworzenie mapy radiancji</i>	18
2.4. <i>Zastosowanie operatora mapowania tonalnego</i>	19
3. <i>Usuwanie ruchu ze zdjęć HDR w literaturze</i>	25
3.1. <i>Wybór najlepszej ekspozycji zastępującej fragment zdjęcia HDR z obecnym ruchem</i>	25
3.2. <i>Usuwanie ruchu podczas wyrównywania ekspozycji wejściowych</i>	27
3.3. <i>Usuwanie ruchu poprzez iteracyjne poszukiwanie wag pikseli ekspozycji wejściowych</i>	30
4. <i>Zaproponowana metoda usuwania obiektów ruchomych ze zdjęć HDR</i>	33
4.1. <i>Wykrywanie obszarów ruchu na zdjęciu HDR</i>	35
4.2. <i>Usuwanie obiektów ruchomych z wyznaczonych obszarów</i>	38
5. <i>Rezultaty</i>	42
6. <i>Wnioski i propozycje dalszego rozwoju pracy</i>	55
<i>Bibliografia</i>	56
<i>Dodatek A: Instrukcja obsługi programu</i>	57
<i>Dodatek B: Dokumentacja oprogramowania</i>	62
<i>Dodatek C: Spis zawartości dołączonego nośnika (płyta CD)</i>	76

Spis rysunków

- 3.1** Sąsiedztwo w metodzie usuwania ruchu opisanej w pracy [5].
- 4.1** Przykładowy histogram wariancji regionu ruchu oraz sposób odczytywania zakresu wariancji będącej częścią tła w wydzielonym obszarze ruchu.
- 5.1** Krzywa odpowiedzi aparatu *FUJIFILM FinePix S1600* uzyskana dla serii wyrównanych ekspozycji statycznej sceny.
- 5.2** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „dom”.
- 5.3** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek3”.
- 5.4** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek7”.
- 5.5** Obrazy wejściowe do obrazu HDR, opisane w tabeli 5.1 jako „ogród”.
- 5.6** Obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „ogród”.
- 5.7** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „balkon5”.
- 5.8** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „balkon3”.
- 5.9** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „rower3”.
- 5.10** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „rower5”.
- 5.11** Obrazy wejściowe do obrazu HDR, opisane w tabeli 5.1 jako „bobik7”.
- 5.12** Obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „bobik7”.
- 5.13** Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed i po usunięciu ruchu, opisane w tabeli 5.1 jako „bobik3”.
- 5.14** Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „dom”.
- 5.15** Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek3”.
- 5.16** Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek7”.

5.17 Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „ogród”.

5.18 Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „balkon3”.

5.19 Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „balkon5”.

5.20 Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą i metodą z podrozdziału 3.1, opisane w tabeli 5.1 jako „rower5”.

8.1 Okno aplikacji „*GhostLessHDRphotography*”.

8.2 Modyfikacja wielkości wykresów i pola wyświetlania obrazów w oknie aplikacji „*GhostLessHDRphotography*”.

Spis tabel

- 5.1** Dane dla przeprowadzonych eksperymentów.
- 9.1** Metody klasy BitmapConversions.
- 9.2** Metody klasy ImageProcessing.
- 9.3** Metody klasy Mat.
- 9.4** Metody klasy HDRImage.
- 9.5** Metody klasy HDRghostRemoval.

Abstrakt.

Obrazy HDR (ang. *High Dynamic Range*), czyli obrazy o dużej rozpiętości tonalnej mogą być tworzone poprzez połączenie wielu zdjęć danej sceny o różnym czasie naświetlenia. Wymaganiem jest tutaj, aby fotografowana scena była statyczna. Jednak podczas wykonywania serii zdjęć może pojawić się ruch w postaci przechodzących osób, zwierząt lub poruszających się przedmiotów. Na wynikowym zdjęciu HDR w takiej sytuacji powstają plamy lub rozmazane, częściowo przezroczyste postacie (ang. *ghosts*).

Celem tej pracy jest usunięcie obiektów ruchomych z serii zdjęć tworzących obraz HDR. Proces usuwania ruchu zostanie podzielony na dwa etapy, tzn. identyfikację obszarów ruchu na zdjęciu HDR oraz pominięcie tych obszarów na ekspozycji wejściowej, na której w ich obrębie znajdują się obiekty ruchome.

Dzięki wykorzystaniu tej techniki rygorystyczne wymaganie statycznej sceny może zostać osłabione i tworzenie zdjęć HDR staje się możliwe nawet w przypadku, gdy na fotografowanej scenie pojawi się ruch.

1. Wprowadzenie.

Technika **HDR** (ang. *High Dynamic Range*) zajmuje się generowaniem zdjęć o bardzo dużej rozpiętości tonalnej¹, poprzez zmieszanie z sobą kilku zwykłych zdjęć lub jednego wywołanego przy różnych korektach ekspozycji wyrażonej w jednostkach EV (ang. *Exposure Value*)². Technika ta pozwala na zwiększenie głębi zdjęcia, jednocześnie uwidaczniając na nim wiele szczegółów.

W przeciwieństwie do matryc większości aparatów fotograficznych, które nie są w stanie poprawnie uchwycić pełnego zakresu dynamiki fotografowanej sceny w pojedynczej ekspozycji, oko człowieka potrafi się dostosować do nawet skrajnych warunków oświetleniowych. Dlatego zdjęcia wykonywane w takich warunkach wyglądają inaczej niż może te same sceny zobaczyć człowiek. Przy większej rozpiętości tonalnej fotografowanej sceny pojawia się problem **niedoświetlenia** lub **prześwietlenia** części kadru. Problem ten może zostać rozwiązany podczas tworzenia zdjęcia HDR, ponieważ powstaje ono z wielu ujęć danej sceny, nazywanych dalej ekspozycjami wejściowymi. Poszczególne ekspozycje w sekwencji mogą mieć jedne piksele poprawnie naświetlone, natomiast inne prześwietlone lub niedoświetlone. Jednak każdy piksel jest poprawnie naświetlony w jednym lub więcej ujęciu.

Technika HDR staje się bardzo przydatna w następujących sytuacjach:

- ✓ zdjęcia pejzażowe robione pod słońce (prześwietlone niebo),
- ✓ zdjęcia wewnątrz ze światłem dziennym padającym z okien (przepalone okna),
- ✓ zdjęcia nocne i wieczorne, kiedy w kadrze są silne źródła sztucznego światła (otrzymamy albo same światła na czarnym tle, albo światła będą widoczne w postaci przepalonych plam).

¹ **Rozpiętość tonalna** w fotografii jest to różnica pomiędzy najjaśniejszym i najciemniejszym punktem fotografowanej sceny mierzona w jednostkach EV.

² **EV** jest to jednostka miary oraz skali ekspozycji fotograficznej, gdzie wartość 0 EV definiowana jest jako ekspozycja będąca efektem naświetlania materiału światłoczułego przez obiektyw o otworze względnym 1:1 (średnica otworu: ogniskowa) przez czas 1sekundy. Wzrost ekspozycji o jedną jednostkę EV osiąga się zwiększając dwukrotnie ilość światła naświetlającego materiał światłoczuły.

Tworzenie fotografii HDR z wielu ekspozycji danej sceny składa się z kilku kroków. Zanim zdjęcia wejściowe będą mogły być połączone konieczne jest sprawdzenie czy podczas ich wykonywania aparat fotograficzny nie został poruszony, co może się zdarzyć nawet w przypadku wykonywania zdjęć przy użyciu statywu. Algorytm przeznaczony do wyrównywania ekspozycji wejściowych tworzących obraz HDR został opisany w podrozdziale 2.1. Następnym krokiem jest obliczenie krzywej odpowiedzi aparatu, będącej funkcją wiążącą wartości kolorów z intensywnością światła. Funkcja ta może się różnić dla każdego z kanałów koloru i jest przechowywana jako tablica przyporządkowań, zawierająca 256 wartości. W podrozdziale 2.2 opisano podejście Debevec'a i Malika'a otrzymywania krzywej odpowiedzi aparatu z sekwencji wyrównanych ekspozycji wejściowych. Po tym kroku mapa radiancji HDR może zostać obliczona jako ważona suma wartości pikseli z obrazów o różnym czasie naświetlenia. Dokładny opis obliczania wartości radiancji pikseli należących do zdjęcia HDR, wynikający z użycia do rekonstrukcji krzywej charakterystycznej aparatu algorytmu Debevec'a i Malik'a, został przedstawiony w podrozdziale 2.3.

Jednak technika tworzenia fotografii HDR z wielu ekspozycji danej sceny ma kilka wad. Przede wszystkim wymagany jest, aby scena ta w trakcie wykonywania zdjęć była statyczna. Tymczasem w praktyce obiekty na scenie mogą się lekko przesuwać albo nawet wykonywać duże, wyraźne ruchy, np. przechodzący ludzie czy przejeżdżające pojazdy. Jeżeli na scenie podczas wykonywania kolejnych ujęć pojawi się ruch, poruszające się przedmioty znajdują się w różnych miejscach na kolejnych ekspozycjach w sekwencji wejściowej. Po utworzeniu zdjęcia HDR obiekty te widoczne będą w postaci „duchów” (ang. *ghosts*), czyli częściowo przezroczystych obiektów. W literaturze pojawia się kilka pomysłów na rozwiązanie tego problemu. Zostaną one opisane w rozdziale 3. Zaproponowany w ramach pracy algorytm usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych tworzących obraz HDR składa się z dwóch etapów. W pierwszym wykrywano obszary ruchu na zdjęciu HDR, natomiast w drugim następuje usunięcie ruchu poprzez pominięcie fragmentów ekspozycji wejściowych, na których znajdują się obiekty ruchome. Dokładny opis zaproponowanego rozwiązania i wyniki przeprowadzonych eksperymentów, sprawdzających jego poprawność, znajdują się kolejno w rozdziałach 4. i 5.

2. Tworzenie zdjęć HDR.

Pełen zakres dynamiki sceny może zostać uchwycony poprzez połączenie wielu zdjęć danej sceny, każdego z innym czasem naświetlenia. Jednak zanim to nastąpi należy uwzględnić następujące problemy:

- Aparat może zostać ruszony podczas wykonywania poszczególnych ujęć, co powoduje powstanie smug w wynikowym zdjęciu HDR.
- Krzywa odpowiedzi aparatu może być nieznana. W celu jej uzyskania należy najpierw wyrównać wykonane ekspozycje.

Po rozwiązaniu tych problemów pojawia się kolejny, dotyczący wyświetlenia uzyskanego zdjęcia o wysokiej dynamice na dostępnych urządzeniach. W tym celu stosowane są operatory mapowania tonów, których działanie opiera się na konwersji luminancji obecnej w rzeczywistej scenie do tej, którą jest w stanie wyświetlić większość używanych obecnie urządzeń.

2.1. Wyrównywanie ekspozycji.

Wykorzystywana technika wyrównywania ekspozycji [2] oparta jest na MTB (ang. *Median Threshold Bitmap*). Zaletą tej metody jest to, że nie wymaga ona znajomości krzywej odpowiedzi aparatu dla poprawnego wyrównania zdjęć wykorzystywanych do utworzenia obrazu HDR.

Wykorzystywanie MTB zamiast technik opartych na wykrywaniu krawędzi ma w przypadku zdjęć o dużej zmienności naświetlenia dodatkowe zalety:

- opiera się na operacjach bitowych, co znacznie przyspiesza działanie algorytmu,
- jest niewrażliwe na naświetlenie obrazu,
- zawiera filtrowanie szumów.

Danymi wejściowymi do omawianej metody jest seria N 8-bitowych obrazów w skali szarości. Obrazy te otrzymywane są z 24-bitowych sRGB, wykorzystując tylko kanał zielony lub równanie (2.1):

$$Y = (54R + 183G + 19B) / 256. \quad (2.1)$$

Jeden z obrazów wejściowych jest arbitralnie wybierany jako obraz odniesienia. Wyjściem jest seria $(N-1)$ obrazów przesuniętych o uzyskane wartości w pionie i w poziomie.

MTB obrazu wyznacza się w następujący sposób:

- Obliczamy histogram 8-bitowego obrazu w skali szarości.
- Wyznaczamy medianę z tego histogramu.
- Tworzymy obraz MTB sprawdzając wartości pikseli obrazu wejściowego. Jeżeli wartości te są mniejsze bądź równe medianie wówczas w obrazie wynikowym pojawiają się zera, jeżeli są większe od mediany będą to jedyneki.

Jak już zostało wspomniane, spośród obrazów wejściowych wybierany jest obraz odniesienia i to względem tego obrazu wyrównywane są pozostałe. Zatem algorytm działa na dwóch obrazach, jednym z nich jest obraz odniesienia a drugim kolejne obrazy wejściowe.

Kiedy dla obu obrazów wyznaczyliśmy już ich MTB, możemy przystąpić do wyrównywania. Operacja ta opiera się na tzw. **piramidzie obrazów**. Rozpoczynamy od utworzenia piramidy obrazów w skali szarości. Piramida ta składa się z $\log_2(\text{max_offset})$ poziomów, gdzie pierwszy to obrazy w ich oryginalnej rozdzielczości, a max_offset to maksymalne, zadane przesunięcie. Dla kolejnych poziomów piramidy dwukrotnie redukujemy rozdzielczość obrazu w skali szarości znajdującego się na poprzednim poziomie. Następnie dla otrzymanych obrazów na każdym poziomie piramidy tworzymy ich MTB.

W celu obliczenia przesunięć pikseli obrazu, zaczynamy od pary MTB o najniższej rozdzielczości i przesuwając MTB wyrównywanego obrazu w zakresie ± 1 piksela w każdym kierunku, obliczamy różnicę XOR pomiędzy obrazami. Na tym etapie xOffset i yOffset (przesunięcie obrazu w poziomie i pionie) przyjmują wartości odpowiadające najmniejszej uzyskanej różnicy obrazów. Przechodząc na następny poziom piramidy, tzn. o większej rozdzielczości obrazów, mnożymy xOffset i yOffset przez 2 i bazując na tych wartościach przesunięć zmieniamy je ponownie w zakresie ± 1 piksela, szukając wartości xOffset i yOffset odpowiadających najmniejszej różnicy XOR obrazów. Procedura ta powtarza się aż do najwyższego poziomu piramidy MTB, gdzie otrzymujemy finalne wartości obu przesunięć.

Opisany algorytm działa bardzo dobrze w sytuacji, gdy obrazy wejściowe mają bimodalny rozkład jasności pikseli, ale może mieć problemy dla ekspozycji, w której duża liczba pikseli ma wartości zbliżone do wartości mediany. Jednak i ten problem ma dość proste rozwiązanie. Ponieważ przypadek ten związany jest z pikselami, których wartości zbliżone są do wartości progowej (mediany), mogą być one wykluczone z obliczeń różnicy XOR obrazów na każdym poziomie piramidy. Wykonywane jest to za pomocą tzw. **bitmapy wykluczającej** EB (ang. *Exclusion Bitmap*). EB składa się z zer dla pikseli, których wartości w obrazie w skali szarości są w pewnej określonej odległości od mediany i z jedynek dla pozostałych pikseli.

EB obliczana jest na każdym poziomie piramidy obrazów. Modyfikacja podanego algorytmu o bitmapę wykluczającą polega na tym, że po obliczeniu różnicy XOR pary obrazów MTB, wykonujemy operację AND na obliczonej różnicy i EB obu obrazów w skali szarości na danym poziomie piramidy. W efekcie wartości pikseli obrazu różnicy mniejsze od poziomu tolerancji szumu są ignorowane.

Gdyby operacja AND na EB i MTB danego obrazu została wykonana przed wyznaczeniem różnicy XOR obrazów, stwierdzenie, która część różnicy jest szumem, a która nie stałoby się niemożliwe.

W całym algorytmie znajduje się tylko jeden subtelny punkt, mianowicie co dzieje się na granicy wyrównywanego obrazu. Rozwiązaniem jest wprowadzenie zerowych wartości pikseli w nowych obszarach obrazów, powstających po ich translacji. Zastosowanie bitmapy wykluczającej do różnicy XOR wykluczy te nowe obszary i ostatecznie nie będą mieć one wpływu na obliczane najlepsze przesunięcie. To tłumaczy również dlaczego konieczne jest ograniczenie możliwego maksymalnego przesunięcia. W przypadku braku tego ograniczenia, minimalna różnica między obrazami powstanie kiedy wyrównywany obraz zostanie zupełnie przesunięty względem obrazu odniesienia. W praktyce najlepszym okazuje się ustawienie wartości `max_offset` na 64.

2.2. Otrzymanie krzywej odpowiedzi aparatu.

Łączenie ekspozycji LDR (ang. *Low Dynamic Range*) w obraz HDR wymaga znajomości tzw. krzywej odpowiedzi aparatu, aby zlinearyzować dane. Charakterystyka ta z reguły nie jest udostępniana przez producentów aparatów fotograficznych. Jednak jeżeli krzywa ta nie jest modyfikowana przez aparat pomiędzy kolejnymi ekspozycjami, jest możliwym jej odtworzenie wykorzystując odpowiednią sekwencję zdjęć.

W pracy tej do rekonstrukcji krzywej odpowiedzi aparatu z sekwencji wyrównanych ekspozycji wykorzystywane jest podejście **Debevec'a i Malika'a** [3]. Kluczową ideą tej techniki jest fakt, że wykonując kolejne ekspozycje statycznej sceny z różnym czasem naświetlenia jednocześnie próbujemy krzywą odpowiedzi aparatu. Sam algorytm opiera się na fizycznych właściwościach procesu tworzenia zdjęć, tzn. fotochemicznych i elektronicznych.

Przyjmuje się założenie, że uzyskiwana krzywa odpowiedzi aparatu f rośnie monotonicznie, dlatego jej odwrotność f^{-1} może być dobrze zdefiniowana i ekspozycja X dla każdego piksela jest ponownie obliczana jako $X = f^{-1}(Z)$, gdzie Z jest nieliniową funkcją oryginalnej ekspozycji.

Wejściem do algorytmu jest seria zdjęć o różnym czasie naświetlenia Δt_j . Zakłada się, że fotografowana scena jest statyczna i zmiany oświetlenia mogą być zignorowane, ponieważ proces jest wykonywany stosunkowo szybko. Dlatego wartości irradiancji E_i dla każdego piksela mogą być przyjmowane za stałe. Zgodnie z zasadą wzajemności, definiującą odwrotną proporcjonalność intensywności do czasu naświetlenia, oznaczając wartości pikseli jako Z_{ij} , można zapisać następujące równanie (2.2):

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \quad (2.2)$$

gdzie i jest numerem kolejnego piksela, a j kolejnej ekspozycji. Zgodnie z założeniem, że f jest monotoniczna, prawdziwe jest równanie (2.3).

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j \quad (2.3)$$

Logarytmując obie strony równania (2.3) otrzymujemy:

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (2.4)$$

gdzie \ln oznacza logarytm naturalny, natomiast funkcja g zdefiniowana jest jako $g = \ln f^{-1}$.

Wartości Z_{ij} oraz Δt_j są znane, natomiast E_i oraz funkcja g są nieznane, chociaż zakładamy, że g jest gładka i monotoniczna. Funkcja g oraz wartości irradiancji E_i , które najlepiej spełniają układ równań wynikający z równania (2.4) w sensie minimalizacji błędu metodą najmniejszych kwadratów, przyjmowane są za wynikowe. Przyjmując, że Z_{min} i Z_{max} oznaczają kolejno najmniejszą i największą wartość piksela obrazu, N jest liczbą pikseli, a P jest liczbą fotografii, formułujemy problem, którego celem jest znalezienie $(Z_{max} - Z_{min} + 1)$ wartości $g(Z)$ i N wartości $\ln E_i$, które minimalizują następującą kwadratową funkcję celu:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g^n(z)^2 \quad (2.5)$$

gdzie

$$g^n(z) = g(z-1) - 2g(z) + g(z+1) \quad (2.6)$$

natomiast λ jest wagą drugiego członu funkcji celu O , nazywaną współczynnikiem gładkości. Autorzy sugerują, że λ powinno być wybierane odpowiednio do ilości szumu oczekiwanego w wartościach pikseli obrazu. Minimalizacja funkcji O , jak zostało wspomniane, jest to problem najmniejszych kwadratów i w pracy Debevec'a i Malik'a do jego rozwiązania używana jest metoda SVD (ang. *Singular Value Decomposition*) [6].

Aby uzupełnić opis algorytmu należy omówić trzy dodatkowe punkty.

Po pierwsze, funkcja $g(z)$ i wartości irradiancji E_i mogą być podniesione używając współczynnika skalującego α . Jeżeli każda wartość $\ln E_i$ zostanie zastąpiona przez $\ln E_i + \alpha$ oraz funkcja $g(z)$ będzie zastąpiona przez $g(z) + \alpha$, równanie (2.4) oraz funkcja celu O (2.5) pozostaną bez zmian. Aby ustalić współczynnik skalujący α , wprowadzana jest dodatkowa stała $g(Z_{mid}) = 0$, gdzie $Z_{mid} = \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max})$. Przyjmowane jest zatem założenie, iż piksele o wartości Z_{mid} mają jednostkową ekspozycję.

Po drugie, przewidując podstawowy kształt krzywej odpowiedzi, rozwiązanie może być zdecydowanie bliższe rzeczywistemu przebiegowi funkcji odpowiedzi aparatu.

W celu takiej poprawy rozwiązania wprowadzana jest dodatkowa funkcja wagowa $\omega(z)$ (2.7), która podkreśla gładkość uzyskiwanej krzywej.

$$\omega(z) = \begin{cases} z - Z_{min}, & \text{gdzie } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z, & \text{gdzie } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Zmianie ulega również funkcja celu (2.5), przyjmując postać (2.8).

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{\omega(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]\}^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [\omega(z)g^n(z)]^2 \quad (2.8)$$

Po trzecie, algorytm nie potrzebuje wszystkich pikseli obrazów wejściowych w celu znalezienia krzywej odpowiedzi aparatu. Wystarczająco dobry rezultat uzyskiwany jest przy zachowaniu następującego warunku: $N(P - 1) > (Z_{max} - Z_{min})$. Piksele z obrazu powinny być rozsądnie wybierane, tzn. tak aby ich rozłożenie pomiędzy wartościami Z_{min} i Z_{max} było mniej więcej wyrównane oraz ich lokalizacje na obrazie były przestrzennie równomiernie rozmieszczone.

Przedstawiony algorytm uzyskuje optymalne wartości krzywej odpowiedzi aparatu $g(z)$ dla każdej możliwej wartości piksela Z , np. dla wartości od 0 do 255 dla 8-bitowego obrazu. Dla obrazów kolorowych każdy z kanałów RGB jest traktowany oddzielnie, otrzymując trzy niezależne krzywe. Zakłada się, że interakcje pomiędzy kanałami mogą być zaniedbane. Założenie to działa w praktyce bardzo dobrze.

2.3. Utworzenie mapy radiancji.

Kiedy krzywa odpowiedzi aparatu g została już odzyskana z sekwencji wyrównanych ekspozycji może zostać ona użyta do skonwertowania wartości pikseli do odpowiadających im wartości radiancji. Przyjmuje się przy tym, że czasy naświetlania kolejnych ujęć Δt_j są znane.

Raz uzyskana krzywa odpowiedzi aparatu może być użyta do obliczenia wartości radiancji każdego zdjęcia wykonanego przy użyciu tego właśnie aparatu, nie tylko dla zdjęć wykorzystanych do odzyskania tej charakterystyki.

Z równania (2.4) otrzymujemy:

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad (2.9)$$

Jednak dla utworzenia wartości radiancji o szerokim zakresie dynamiki, dla każdego piksela powinny zostać użyte wszystkie dostępne ekspozycje. Ponownie wykorzystywana jest funkcja wagowa $\omega(z)$. Ma ona za zadanie dać większą wagę ekspozycjom, w których wartości pikseli są bliżej środka krzywej odpowiedzi aparatu. Różnie zdefiniowana funkcja wagowa może przynieść nieco odmienne rezultaty. W pracy tej do utworzenia zdjęć HDR wykorzystano $\omega(z)$ przedstawioną w równaniu (2.10):

$$\omega(z) = \begin{cases} 8 \cdot \left(\frac{z}{255}\right)^2 & : \frac{z}{255} < \frac{1}{4} \\ 1 - 8 \cdot \left(\frac{z}{255} - \frac{1}{2}\right)^2 & : \frac{1}{4} \leq \frac{z}{255} \leq \frac{3}{4} \\ 8 \cdot \left(1 - \frac{z}{255}\right)^2 & : \frac{z}{255} > \frac{3}{4} \end{cases} \quad (2.10)$$

Wartości radiancji dla każdego piksela w tworzonej HDR obliczane są zgodnie z poniższym równaniem [3]:

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (2.11)$$

Łączenie w zdjęciu HDR wielu ekspozycji ma dodatkowy pozytywny efekt redukcji szumu w uzyskiwanych wartościach radiancji.

2.4. Zastosowanie operatora mapowania tonalnego.

W rzeczywistych scenach w przeciwieństwie do tych ujętych na fotografiach obecny jest bardzo szeroki zakres wartości luminancji. System wizyjny człowieka jest w stanie postrzegać sceny o rozpiętości tonalnej pięciu rzędów wielkości, natomiast przy stopniowej adaptacji nawet ponad dziewięciu.

Konwersja luminancji obecnej w prawdziwym świecie do tej, którą jest w stanie wyświetlić większość używanych obecnie urządzeń nazywana jest ***mapowaniem tonów***.

Wykorzystywany w tej pracy operator mapowania tonów Ward'a [7] jest operatorem globalnym, którego główną ideą jest modyfikacja histogramu logarytmu luminancji. Składa się on z następujących etapów:

1. kalibracja obrazu wynikająca ze sposobu widzenia człowieka,
2. obliczenie tzw. „obrazu przysłony”,
3. połączenie obrazu przysłony i obrazu skalibrowanego,
4. zastosowanie otrzymanego w poprzednim kroku obrazu do obrazu oryginalnego,
5. lokalne rozmycie obrazu na podstawie funkcji wizualnej ostrości,
6. zastosowanie do obrazu funkcji wrażliwości na kolor,
7. wygenerowanie histogramu logarytmu luminancji,
8. modyfikacja histogramu zgodnie z funkcją wrażliwości na kontrast,
9. zastosowanie zmodyfikowanego histogramu do obrazu,
10. konwersja do przestrzeni kolorów RGB.

Jednak, jeżeli głównym celem mapowania tonów jest optymalizacja widoczności i wyglądu obrazu bez dodatkowych efektów (np. przyciemnienie kolorów tak by odpowiadały one wieczornemu światłu), wówczas wszystkie kroki od 2 do 6 mogą zostać pominięte.

Kalibracja obrazu i obliczenie histogramu logarytmu luminancji.

Ponieważ celem jest optymalizacja mapowania tonów pomiędzy obrazem świata, który widzi człowiek, a tym co jest w stanie wyświetlić przeciętne urządzenie, zaczynamy od utworzenia histogramu luminancji dostosowanego obrazu HDR. Oko człowieka adaptuje się do najlepszego widzenia w dołku środkowym siatkówki,

dlatego każda wartość luminancji obliczana jest z uwzględnieniem kąta bryłowego o średnicy 1° korespondującego z potencjalnym punktem fiksacji wzroku na scenie.

Histogram ten tworzony jest w skali logarytmicznej, co wymaga przyjęcia jego wartości minimalnej i maksymalnej ($\log 0 = -\infty$). Jako wartość minimalna wybierana jest 10^{-4}cd/m^2 , czyli dolny próg zmysłu wzroku człowieka lub minimalna wartość odpowiadająca punktowi o średnicy 1° , a dokładnie większa z nich. Maksimum jest to po prostu wartość maksymalna dla 1° piksela.

Przed utworzeniem histogramu obraz HDR jest przepróbkowywany do rozdzielczości związanej z 1° pikselem. Równanie (2.12) pozwala wyznaczyć poprawną rozdzielczość dla nowych pikseli o średnicy 1° (**punkt 1. algorytmu**):

$$S = \frac{2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{0.01745} \quad (2.12)$$

gdzie S oznacza wysokość lub szerokość w pikselach, θ horyzontalny lub wertykalny pełny kąt widzenia, natomiast wartość 0.01745 jest to liczba radianów w 1° . Wartości luminancji nowych 1° pikseli są otrzymywane po uśrednieniu luminancji pikseli składowych.

Jeżeli obraz nie zostanie skalibrowany, nie będą działać obecne w algorytmie korekty związane z widzeniem człowieka. Jednak metoda Ward'a nadal może być używana do mapowania tonalnego obrazu HDR na odpowiedni do wyświetlenia zakres.

Dla zredukowanego obrazu, w równych przedziałach pomiędzy wyznaczonymi wartościami maksymalną L_{wmax} i minimalną L_{wmin} tworzony jest histogram logarytmu luminancji (**punkt 7. algorytmu**). Algorytm nie jest wrażliwy na liczbę N , przez którą podzielimy zakres $\log(\text{luminancji})$ (liczbę „słupków” histogramu).

Rozkład skumulowany.

Skumulowany rozkład wartości $\log(\text{luminancji})$ w histogramie obliczany jest zgodnie z wzorem (2.13):

$$P(b) = \frac{\sum_{b_i < b} f(b_i)}{T} \quad (2.13)$$

gdzie T to całkowita liczba próbek histogramu (2.14), b_i oznacza i -ty przedział w histogramie, natomiast $f(b_i)$ odpowiadającą mu wartość.

$$T = \sum_{b_i} f(b_i) \quad (2.14)$$

Jeżeli rozkład skumulowany jest numerycznym całkowaniem histogramu, jego pochodna będzie mieć po prostu postać histogramu z odpowiednim czynnikiem normalizującym (2.15).

$$\frac{dP(b)}{db} = \frac{f(b)}{T\Delta b} \quad (2.15)$$

gdzie Δb (2.16) jest przyjętym przedziałem, na który podzielony został zakres wartości logarytmu luminancji w celu utworzenia jej histogramu:

$$\Delta b = \frac{[\log(L_{wmax}) - \log(L_{wmin})]}{N} \quad (2.16)$$

Naiwne wyrównanie histogramu.

Opierając się na skumulowanym rozkładzie jasności, czyli logarytmu luminancji, możemy doprowadzić do wyrównania prawdopodobieństwa wystąpienia każdej z jasności w danym obrazie HDR. Oczywiście nie jest to celem mapowania tonów, będzie jedynie wykorzystane podczas modyfikacji histogramu $\log(\text{luminancji})$. Równanie (2.17) przedstawia formułę, za pomocą której wyrównywany jest histogram jasności.

$$B_{de} = \log(L_{dmin}) + [\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})] \cdot P(B_w) \quad (2.17)$$

gdzie L_{dmin} i L_{dmax} oznaczają kolejno minimalną (poziom czarny) i maksymalną wartość wyświetlanej luminancji (poziom biały), natomiast $B_w = \log L_w$ jest jasnością w obrazie HDR, a $B_{de} = \log L_d$ jest obliczaną wartością wyświetlanej jasności (**punkt 9. algorytmu**).

Problemem naiwnego wyrównywania histogramu jest to, że nie tylko kompresuje ono zakres dynamiki w regionach, gdzie mamy jedynie kilka próbek, ale również zwiększa kontrast w obszarach o znacznej reprezentacji w histogramie. Efektem jest wyolbrzymienie kontrastu w większości wyświetlanego obrazu.

Modyfikacja histogramu z liniowym ograniczeniem górnym.

Jeżeli uzyskiwany kontrast jest zbyt duży, wówczas podstawowym pytaniem jest jaki będzie najlepszy do reprezentacji cech obrazu. Najprostszym w takiej sytuacji jest przyjęcie, że wynikowy kontrast w żadnym z danych regionów nie powinien przekraczać kontrastu, będącego wynikiem zastosowania liniowego operatora mapowania tonów. Modyfikacja ta w większości wypadków może dawać zadowalające rezultaty.

Liniowe ograniczenie górne na kontrast uzyskiwany z omawianego operatora mapowania tonów można zapisać równaniem (2.18):

$$\frac{dL_d}{dL_w} \leq \frac{L_d}{L_w} \quad (2.18)$$

Wykorzystując omówione już równanie naiwnego wyrównywania histogramu (2.17), wyrażające wyświetlaną luminancję jako funkcję rzeczywistej luminancji, oraz równanie (2.15) otrzymujemy (2.19):

$$\exp(B_{de}) \cdot \frac{f(B_w)}{T\Delta b} \cdot \frac{\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})}{L_w} \leq \frac{L_d}{L_w} \quad (2.19)$$

Ponieważ $L_d = \exp B_{de}$, równanie (2.19) redukuje się do postaci (2.20) przedstawiającej stałe ograniczenie górne na $f(b)$.

$$f(b) \leq \frac{T\Delta b}{\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})} \quad (2.20)$$

Innymi słowy tak długo jak wartości histogramu nie przekraczają liniowego ograniczenia górnego, wynikowy kontrast nie będzie wyolbrzymiony.

Przyjętą modyfikację histogramu wykonuje się poprzez obcięcie jego „słupków”. Jediną komplikacją jest fakt, że kiedy słupki histogramu są obcinane, zmienia się T , co zmienia ograniczenie górne. Rozwiązaniem jest zastosowanie iteracyjnego obcinania „słupków” histogramu, wprowadzając przy tym kryterium tolerancji, zgodnie z którym liczba odciętych próbek nie może przekroczyć 2,5% z początkowej wartości T .

Metoda ta nazywana jest modyfikacją, a nie wyrównywaniem histogramu, ponieważ końcowy rozkład jasności nie jest wyrównany. W rezultacie szeroki zakres dynamiki

sceny zostaje zmapowany do mniejszego, możliwego do wyświetlenia, minimalizującego widoczne zniekształcenia kontrastu.

Zaprezentowana metoda jest całkiem użyteczna. Może ona pokonać ograniczenia w zakresie dynamiki typowych urządzeń służących do wyświetlania zdjęć, nie wprowadzając przy tym niedopuszczalnych artefaktów związanych z kompresją kontrastu. W sytuacji, kiedy chcemy uzyskać dobre, naturalnie wyglądające zdjęcie bez uwzględniania tego jak scenę tą widziałby obserwator w rzeczywistych warunkach, jest to optymalne rozwiązanie. Jednak jeżeli jesteśmy zainteresowani oddaniem rzeczywistej, widzianej przez obserwatora sceny jak i jego subiektywnego odczucia w otrzymywanym obrazie, wówczas należy uwzględnić również ograniczenia zmysłu wzroku człowieka.

Modyfikacja histogramu oparta na wrażliwości oka na kontrast.

Chociaż oko człowieka może dostosować się do bardzo szerokiego zakresu dynamiki (rzędu 10^9), niestety nie tak samo dobrze na wszystkich poziomach oświetlenia. Kiedy światło zostaje przyciemnione, mamy coraz większe problemy z detekcją kontrastu.

Równanie (2.21) przedstawia funkcję wyrażającą wrażliwość oka na kontrast od dolnego limitu wzroku człowieka do wrażliwości w świetle dziennym (**punkt 8. algorytmu**). Funkcja ta jest odpowiedzią zarówno pręcików jak i czopków.

$$\Delta L_t(L_a) = \begin{cases} -2.86, & \log_{10}(L_a) < -3.94 \\ (0.405 \log_{10}(L_a) + 1.6)^{2.18} - 2.86, & -3.94 \leq \log_{10}(L_a) < -1.44 \\ \log_{10}(L_a) - 0.395, & -1.44 \leq \log_{10}(L_a) < -0.0184 \\ (0.249 \log_{10}(L_a) + 0.65)^{2.7}, & -0.0184 \leq \log_{10}(L_a) < 1.9 \\ \log_{10}(L_a) - 1.255, & \log_{10}(L_a) \geq 1.9 \end{cases} \quad (2.21)$$

Aby zagwarantować, że wyświetlana reprezentacja obrazu HDR nie uwydatni kontrastu ponad ten obecny w rzeczywistej scenie, wprowadzane jest ograniczenie, wyrażone jako iloraz wartości funkcji ΔL_t odpowiednio dla wyświetlanej i rzeczywistej luminancji (2.22). Nowe ograniczenie górne może być zapisane w postaci:

$$\frac{dL_d}{dL_w} \leq \frac{\Delta L_t(L_d)}{\Delta L_t(L_w)} \quad (2.22)$$

Podobnie jak dla liniowego ograniczenia górnego, wykorzystujemy równania (2.17) oraz (2.15), otrzymując (2.23) na podstawie (2.22):

$$\exp(B_{de}) \cdot \frac{f(B_w)}{T\Delta b} \cdot \frac{\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})}{L_w} \leq \frac{\Delta L_t(L_d)}{\Delta L_t(L_w)} \quad (2.23)$$

Tym razem ograniczenie nie redukuje się do stałego ograniczenia górnego dla $f(b)$. Jego wartość zależy od $P(b)$ oraz L_w , co przedstawia równanie (2.24):

$$f(B_w) \leq \frac{\Delta L_t(L_d)}{\Delta L_t(L_w)} \cdot \frac{T\Delta b L_w}{[\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})]L_d} \quad (2.24)$$

Modyfikacja histogramu, dokładnie jak dla liniowego ograniczenia górnego, wykonywana jest w sposób iteracyjny. Kryterium tolerancji, zgodnie z którym liczba odciętych próbek nie może przekroczyć 2,5% z początkowej wartości T , również pozostaje niezmienione.

Ograniczenia zmysłu wzroku człowieka.

W dotychczas omówionej metodzie modyfikacji histogramu, której celem jest dopasowanie kontrastu wyświetlanego do tego widzianego w rzeczywistej scenie, zostały zignorowane trzy istotne ograniczenia zmysłu wzroku człowieka: oślepiające światło (np. słoneczne), ograniczenie wrażliwości na kolory i ostrości widzenia.

Zdolność rozróżniania barw jest tracona przy braku oświetlenia, nocą czy w ciemnych pomieszczeniach. To samo dzieje się z ostrością naszego widzenia. Dokładny opis tych zjawisk oraz sposób ich implementacji w operatorze mapowania tonów znajduje się w pracy [7].

Jeżeli głównym celem mapowania tonów jest optymalizacja jasności i wyglądu obrazu bez dodatkowych efektów (np. przyciemnienie kolorów tak by odpowiadały one wieczornemu światłu), wpływ wspomnianych ograniczeń zmysłu wzroku człowieka na widziany obraz może zostać pominięty.

3. Usuwanie ruchu ze zdjęć HDR w literaturze.

3.1. Wybór najlepszej ekspozycji zastępującej fragment zdjęcia HDR z obecnym ruchem.

Podejście przedstawione w [1] oparte jest na obserwacji, z której wynika, że każda ekspozycja z sekwencji jest wewnętrznie spójna. Oznacza to, że usunięcie ruchu może odbywać się poprzez wybranie jednej z wejściowych ekspozycji i umieszczenie jej w obszarze ruchu. Tak długo jak „duchy” są lokalne i zwarte, obraz jako całość nadal zachowuje pełny zakres tonalny.

W celu wykrycia ruchu tworzony jest obraz tzw. *wariancji*, definiowany jako ważona suma kwadratów z wartości pikseli w poszczególnych ekspozycjach podzielona przez ważoną średnią, od wyniku odejmowana jest wartość jeden. Do obliczenia średniej ważonej i tym samym utworzenia zdjęcia HDR używana jest odwrotność krzywej odpowiedzi aparatu, czyli f^{-1} oraz każda ekspozycja wejściowa mnożona jest przez współczynnik związany z jej czasem naświetlenia.

Wariancja obliczana jest niezależnie dla każdego kanału, tzn. dla czerwonego, zielonego i niebieskiego, po czym dla każdego piksela wybierane jest maksimum z tych wartości.

Następnie na podstawie obrazu wariancji wykrywano są poruszające się na scenie elementy. Procedura ta opisana jest w następujących krokach:

- Redukcja (sugerowane jest dziesięciokrotne zmniejszenie rozdzielczości) obrazu wariancji w celu skrócenia czasu obliczeń.
- Obliczenie bitmapy progowanej z obrazu wariancji. Podawany próg to 0.18, wartości mniejsze od progu są zerowane.
- Rozmycie pikseli utworzonej bitmapy w promieniu 3 sąsiadujących pikseli w celu połączenia przylegających obszarów ruchu oraz zakrycia ich krawędzi.
- Utworzenie tzw. bitmapy tła poprzez połączenie sąsiadujących regionów o niskiej wariancji, gdzie każdy z nich musi pokrywać co najmniej 0,1% obrazu.

- Zidentyfikowanie segmentów ruchu jako oddzielnych obszarów „zanurzonych” w bitmapie tła, przy czym każdy segment powinien pokrywać co najmniej 0,1% obrazu.

Wybór ekspozycji wejściowych dla zdefiniowanych segmentów ruchu odbywa się na podstawie histogramów z obrazu wariacji obejmujących piksele danego segmentu. Po utworzeniu histogramu dla danego segmentu ruchu ignorowane jest 2% jego wartości poprzez obcięcie najwyższych wierzchołków. Następnie wyznaczane jest 2% maksymalnych wartości z poprawionego histogramu i ekspozycja wejściowa o najdłuższym czasie naświetlenia, która je zawiera, zostaje wybrana dla tego segmentu. Czynności te wykonujemy niezależnie dla wszystkich segmentów ruchu. Wyznaczone fragmenty ekspozycji mnożone są przez współczynnik związany z ich czasem naświetlenia i poprzez interpolację liniową łączone z oryginalnym zdjęciem HDR. Jako współczynniki łączenia wykorzystywane są wartości wariacji pikseli.

3.2. Usuwanie ruchu podczas wyrównywania ekspozycji wejściowych.

Menzel i Guthe zaproponowali dwustopniowy algorytm usuwania ruchu ze zdjęć HDR [4], którego główną ideą jest nieliniowe wyrównywanie ekspozycji wejściowych oraz obliczanie dla każdego piksela wartości określającej pewność, że w danym miejscu nie pojawił się ruch.

Pierwszym krokiem algorytmu jest nieliniowe wyrównywanie obrazów wejściowych. Rozpoczyna się ono od wybrania obrazu oznaczonego jako r , będącego obrazem odniesienia dla wszystkich pozostałych. Ponieważ dostępna w większości aparatów fotograficznych funkcja AEB (ang. *Automatic Exposure Bracketing*) umożliwia wykonanie sekwencji kolejno optymalnie naświetlonego, niedoświetlonego oraz prześwietlonego ujęcia, stąd zdjęcie optymalnie naświetlone wybierane jest na obraz odniesienia r . W omawianej pracy przyjęto, że zdjęcie HDR jest tworzone z trzech zdjęć i wszystkie omawiane metody dotyczą trzech ekspozycji wejściowych.

Podstawową ideą kompensacji ruchu jest to, że dla danego makrobloku M w obrazie r przesuwany odpowiedni makroblok w obrazie i będzie miał lokalnie maksymalną korelację krzyżową $C_i(M, \delta)$ przedstawioną w równaniu (3.1). Wektory nie są normalizowane przed obliczaniem korelacji krzyżowej, co pozostawia położenie maksimum niezmienione.

$$C_i(M, \delta) = \frac{\sum_{p \in M} \tilde{c}_i(p + \delta) \cdot \tilde{c}_r(p)}{N(M) \sqrt{\sum_{p \in M} \|\tilde{c}_i(p + \delta)\|^2}} \quad (3.1)$$

gdzie $\tilde{c}_i(p + \delta)$ oraz $\tilde{c}_r(p)$ zdefiniowane są kolejno w (3.2) oraz (3.3):

$$\tilde{c}_i(p + \delta) = c_i(p + \delta) - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{\sum_{p \in M} \|c_i(p + \delta)\|_1}{3N(M)} \quad (3.2)$$

$$\tilde{c}_r(p) = c_r(p) - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{\sum_{p \in M} \|c_r(p)\|_1}{3N(M)} \quad (3.3)$$

$c_k(p)$ oznacza wektor kolorów RGB piksela p , natomiast $N(M)$ jest liczbą pikseli zawartych w makrobloku M .

Niestety wybór wielkości makrobloku, która pasuje dla każdej sekwencji wejściowej jest niemożliwy. Dlatego wyrównywanie obrazu i zaczyna się hierarchicznie od makrobloku wielkości 2^n , wystarczającej aby cały obraz znalazł się w jego wnętrzu. Środek tego makrobloku jest umieszczony w środku obrazu. Po znalezieniu najlepszego dopasowania, makroblok dzielony jest na 4 podbloki i dla każdego z nich ponownie poszukiwane jest najlepsze wyrównanie, bazując na dopasowaniu znalezionym w poprzednim kroku.

Takie hierarchiczne wyrównywanie niestety nie jest niezawodne w przypadku obecności ruchów o dużym zakresie, wykonywanych przez małe przedmioty. Aby zapobiec losowym przemieszczeniom kiedy makroblok zawiera jedynie szum, dany blok nie jest przesuwany jeżeli jego korelacja krzyżowa jest mniejsza niż 10% korelacji krzyżowej jego bloku macierzystego. W trakcie rekurencyjnego wyrównywania, kolejne makrobloki zmniejszane są o połowę w obu wymiarach, dopóki nie osiągną wymiaru 16x16 pikseli. Rozmiar ten pozwala na kompensację rotacji do 14 stopni.

Na każdym poziomie rekurencji, przemieszczenie jest przenoszone z wyższego poziomu poprzez bilinearną interpolację pomiędzy czterema przyległymi węzłami macierzystymi. Następnie wykonywane jest iteracyjne poszukiwanie najlepszego wyrównania dla każdego makrobloku, rozpoczynając z jego przesunięciem obliczonym w poprzednich poziomach rekurencji oraz tymi należącymi do jego ośmiu sąsiednich makrobloków. Dla każdego początkowego przesunięcia następane maksimum lokalne jest obliczane używając metody najszybszego spadku ze stałym rozmiarem kroku równym jednemu pikselowi. Dla pierwszego, największego makrobloku szukamy maksimum globalnego z krokiem o wartości czterech pikseli. Poszukiwanie jest kończone wraz z osiągnięciem maksymalnej liczby iteracji lub znalezieniem maksimum lokalnego. Kiedy maksima lokalne są już obliczone dla każdego z dziewięciu początkowych przesunięć, dla obecnego makrobloku wybierane jest przesunięcie o najwyższej wartości korelacji krzyżowej. Jeżeli maksimum zostało osiągnięte dla więcej niż jednego przesunięcia, wybierana jest wartość przesunięcia bliższa wartości początkowej. Ma to zapobiec przemieszczeniom makrobloków, które nie zachowują lokalnych detali.

Po obliczeniu wektorów przemieszczeń dla makrobloków ostatniego poziomu rekurencji, obliczany jest wyrównany obraz. Piksele z każdego makrobloku kopiowane są na ich nowe lokalizacje odpowiadające korespondującym pikselom

w obrazie odniesienia r . W ten sposób elementy aktualnego obrazu zostają wyrównane w stosunku do tych samych elementów w obrazie odniesienia.

Po wyrównaniu ekspozycji wejściowych przy użyciu opisanego algorytmu, wykonywane jest ich łączenie w zdjęcie HDR. Odbywa się to zgodnie z podejściem Debevec'a i Malik'a, wykorzystując równanie (2.11) oraz funkcję wagową (2.10).

Drugim krokiem zaproponowanej przez Menzel'a i Guthe'go metody usuwania ruchu jest obliczenie dla każdego piksela wszystkich ekspozycji wejściowych, oprócz obrazu odniesienia r , wartości pewności otrzymanej na podstawie korelacji krzyżowej. Wokół każdego piksela p obrazu i tworzone jest niewielkie sąsiedztwo N_p , wartość pewności $K_i(p)$ obliczana jest zgodnie z równaniem (3.4):

$$K_i(p) = \frac{\sum_{j \in N_p} c_i(j) \cdot c_r(j)}{\sqrt{\sum_{j \in N_p} \|c_i(j)\|^2} \sqrt{\sum_{j \in N_p} \|c_r(j)\|^2}} \quad (3.4)$$

Jeżeli pewność $K_i(p)$ jest mniejsza od progu t_K , jego waga jest ustawiana na zero. Jedyny wyjątek dotyczy obrazów o najkrótszym lub najdłuższym czasie naświetlenia, tzn. jeżeli jedyna informacja o pikselu jest zawarta w jednym z tych obrazów (np. wartości kolorów są poniżej czarnego poziomu szumu t_b lub powyżej saturacji t_s we wszystkich pozostałych obrazach). Wówczas test pewności jest pomijany i waga piksela nie jest modyfikowana. Otrzymujemy w ten sposób funkcję wagową zdefiniowaną w równaniu (3.5):

$$\omega_i(p) = \begin{cases} 0 & : K_i(p) < t_K, t_b < c_i(p) < t_s \\ \omega_i(p) \text{ z równania (2.10)} & : \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (3.5)$$

Zaproponowane przez autorów sąsiedztwo N_p wynosi 11x11 pikseli, natomiast wartości progów są równe: $t_K = 0.95$, $t_b = 0.05$ oraz $t_s = 0.95$.

3.3. Usuwanie ruchu poprzez iteracyjne poszukiwanie wag pikseli ekspozycji wejściowych.

W pracy [5] przedstawiono jeszcze inne podejście do problemu usuwania ruchu ze zdjęć HDR. Nie ma tutaj potrzeby detekcji ani estymacji ruchu. Całość opiera się na odpowiednim dobraniu wag pikseli zdjęć wejściowych, czyli określeniu ich wkładu w zdjęcie HDR.

Tworzenie obrazu HDR opiera się na równaniu (3.6). Wykorzystując krzywą odpowiedzi aparatu tworzone są mapy radiancji dla każdego zdjęcia wejściowego, następnie odbywa się ich normalizacja poprzez podzielenie przez odpowiadający im czas naświetlenia. Zdjęcie HDR jest średnią z tak znormalizowanych map radiancji obrazów wejściowych:

$$E(i, j) = \frac{\sum_{r=1}^R \omega(Z_r(i, j)) \left(\frac{g^{-1}(Z_r(i, j))}{\Delta t_r} \right)}{\sum_{r=1}^R \omega(Z_r(i, j))} \quad (3.6)$$

gdzie $E(i, j)$ jest to wartość radiancji dla piksela o lokalizacji (i, j) , R jest liczbą obrazów wejściowych, $Z_r(i, j)$ jest wartością piksela (i, j) w obrazie r (zmieniającą się w zakresie od 0 do 255), a Δt_r jest czasem naświetlenia obrazu r .

Proponowana przez autorów metoda determinuje wartości wag pikseli nie tylko ze względu na ich prawdopodobieństwo bycia poprawnie naświetlonymi, ale również uwzględniając fakt, że są one częścią tła. W przeciwieństwie do naświetlenia, które można bez problemu określić na podstawie wartości piksela, nie ma metody, która jest w stanie określić czy piksel jest częścią poruszającego się przedmiotu. Autorzy postawili sobie za cel określenie zestawu $I \times J \times R$ wag dla R obrazów o rozmiarach $I \times J$, które będą określać wkład każdego piksela z sekwencji ekspozycji wejściowych w zdjęcie HDR pozbawione ruchu.

Po sprowadzeniu problemu do zagadnienia znalezienia prawdopodobieństwa tego czy piksel jest częścią tła, jego obliczenie opiera się na jądrowym estymatorze gęstości. Aby znaleźć prawdopodobieństwo, że wektor x należy do klasy F , oszacowanie może być obliczane za pomocą równania (3.7):

$$P(x|F) = M^{-1} \sum_{m=1}^M K_H(x - y_m) \quad (3.7)$$

gdzie M jest liczbą wektorów w klasie, y_m jest m -tym wektorem klasy, H jest dodatnią, symetryczną macierzą o rozmiarze $d \times d$, natomiast $K_H(x)$ przedstawia równanie (3.8):

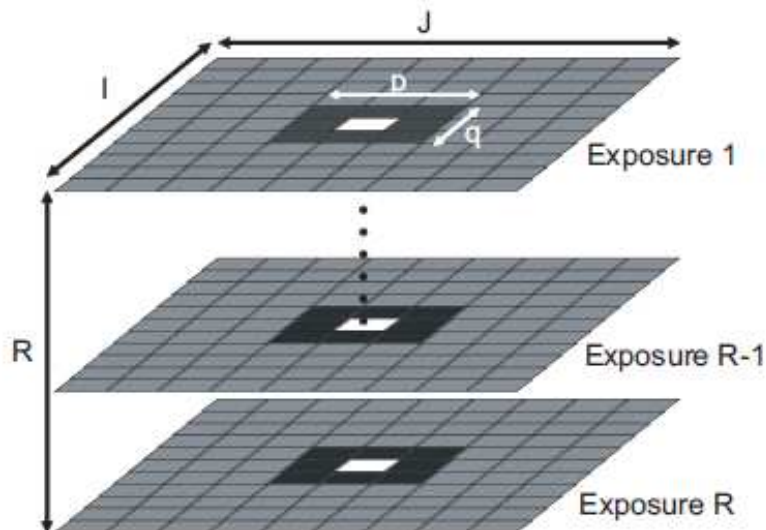
$$K_H(x) = |H|^{-\frac{1}{2}} K\left(H^{-\frac{1}{2}}x\right) \quad (3.8)$$

gdzie K jest wybranym jądrem, przy czym najczęściej wybierane jest jądro Gaussa przedstawione poniżej (3.9):

$$K_H(x) = |H|^{-\frac{1}{2}} (2\pi)^{-\frac{d}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^T H^{-1}x\right) \quad (3.9)$$

W swojej pracy Khan, Akyuz i Reinhard reprezentują każdy piksel jako wektor w przestrzeni cech $x_{ijr} \in \mathbb{R}^5$, $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$, $r = 1, 2, \dots, R$. Trzy wymiary reprezentują kolor, a dwa lokalizację piksela na obrazie. Do reprezentacji kolorów używana jest przestrzeń kolorów Lab.

Dla wektora x_{ijr} tło jest reprezentowane przez sąsiedztwo N o rozmiarze $p \times q \times s$ wokół niego. W ten sposób, dla każdego x_{ijr} , $F = \{y_{pqs} | (p, q, s) \in N(x_{ijr}), (p, q) \neq (i, j), s = 1, 2, \dots, R\}$, co przedstawia rysunek 3.1. Reprezentacja tła jest identyczna dla wszystkich pikseli o lokalizacji (i, j) , w każdej ekspozycji wejściowej r .



Rysunek 3.1. Rysunek przedstawia R ekspozycji tej samej sceny. Dla każdego wektora x_{ijr} zaznaczonego kolorem białym, y_{pqs} składa się z sąsiedztwa $p \times q$ wokół piksela (i, j) we wszystkich R ekspozycjach (oznaczone kolorem ciemno szarym).

Jak dotąd zostało założone, że wszystkie wektory y_{pqs} są w tym samym stopniu częścią tła. W praktyce wiadomo, że wiele z tych wektorów reprezentuje piksele prześwietlone lub niedoświetlone, inne natomiast mogą być częścią poruszających się obiektów, a co za tym idzie nie stanowią one dobrej reprezentacji tła. Początkowo, kiedy nie jest wiadomym, które wektory przedstawiają ruch na scenie, wkład nieprawidłowo naświetlonych pikseli zredukowany jest poprzez użycie w jądrowym estymatorze gęstości funkcji wagowej $\omega(z)$ przedstawionej w równaniu (3.10), gdzie z stanowi wartość piksela.

$$\omega(z) = 1 - \left(2 \cdot \frac{z}{255} - 1\right)^{12} \quad (3.10)$$

W ten sposób tworzone są trzy wagi dla każdego piksela. Końcowa waga ω_{pqs} jest średnią tych trzech wag. Prawdopodobieństwo, że wektor x_{ijr} należy do tła, po zastosowaniu wag ω_{pqs} przedstawione jest w równaniu (3.11).

$$P(x_{ijr}|F) = \frac{\sum_{p,q,s \in N(x_{ijr})} \omega_{pqs} K_H(x_{ijr} - y_{pqs})}{\sum_{p,q,s \in N(x_{ijr})} \omega_{pqs}} \quad (3.11)$$

Jeżeli sąsiedztwo każdego piksela stanowi w większości tło, wektory, które reprezentują poruszające się obiekty będą mieć mniejsze prawdopodobieństwo niż te, które reprezentują tło. Stąd kiedy prawdopodobieństwa dla wszystkich wektorów x_{ijr} zostały już obliczone, mogą zostać one użyte jako wagi dla korespondujących z nimi pikseli podczas tworzenia obrazu HDR. „Duchy” w miejscach ruchu na zdjęciu HDR utworzonym z nowo zdefiniowanymi wagami będą słabiej widoczne niż na zdjęciu z wagami zależnymi jedynie od wartości pikseli.

Po uzyskaniu lepszego zestawu wag, cały opisany proces może zostać powtórzony, przyjmując, że wagami wektorów y_{pqs} , będą te obliczone w poprzedniej iteracji. Nowe wagi przedstawia równanie (3.12):

$$\omega_{pqs,t+1} = \omega(Z_s(p,q)) \cdot P(x_{pqs}|F) \quad (3.12)$$

gdzie $\omega(Z_s(p,q))$ jest początkową wagą dla piksela o położeniu (p,q) z czasem naświetlenia s , $P(x_{pqs}|F)$ jest wagą piksela obliczoną w procesie jądrowej estymacji gęstości, natomiast $\omega_{pqs,t+1}$ jest wagą, która zostanie użyta w iteracji $t+1$. Jak poprzednio celem jest zmniejszenie prawdopodobieństwa dla pikseli niedoświetlonych lub prześwietlonych, nowo obliczone wagi są mnożone przez wagi początkowe otrzymane z równania (3.10) przed użyciem ich w kolejnej iteracji.

4. Zaproponowana metoda usuwania obiektów ruchomych ze zdjęć HDR.

Kiedy już ekspozycje używane do utworzenia zdjęcia HDR są wyrównane i krzywa odpowiedzi aparatu jest znana, można bez przeszkód połączyć wszystkie ujęcia w zdjęcie HDR. Jednak podczas wykonywania kolejnych ekspozycji na fotografowanej scenie może pojawić się ruch w postaci przechodzących osób, zwierząt lub poruszających się przedmiotów. Z uwagi na ich zmieniające się położenie, a co za tym idzie różne umiejscowienie na kolejnych ujęciach, na wynikowym zdjęciu HDR obiekty te pojawiają się w postaci „duchów” lub rozmazanych plam. Każda z omówionych w poprzednim rozdziale metod usuwania obiektów ruchomych ze zdjęć HDR ma swoje wady i zalety.

Pierwsza z nich opiera się na wyborze najlepszej ekspozycji z sekwencji wejściowej zastępującej fragment zdjęcia HDR z obecnym ruchem. Wyznaczone fragmenty ekspozycji mnożone są przez współczynnik związany z ich czasem naświetlenia i poprzez interpolację liniową łączone z oryginalnym zdjęciem HDR. Główną wadą tej metody jest to, że wykryte duże regiony ruchu często zawierają więcej niż jeden obiekt ruchomy. Wówczas wybrana ekspozycja może zawierać jeden z tych obiektów i ostatecznie zostaje on jeszcze bardziej uwidoczniony na wynikowym zdjęciu HDR. Z drugiej strony nawet jeżeli wybrane zostaną najlepsze ekspozycje nie zawierające ruchu, zdarza się, że „duchy” na zdjęciu HDR stają się jedynie niewyraźne i słabiej widoczne, lecz nadal na nim obecne. Niestety metoda ta zawsze zmniejsza zakres dynamiki obrazu HDR w wybranych jego regionach.

Metoda opisana w podrozdziale 3.2 łączy wyrównywanie ekspozycji wejściowych z usuwaniem ruchu. Pomysł jest naprawdę obiecujący, gdyż umożliwia wykonywanie zdjęć bez użycia statywu. Wyrównywane są zdjęcia, na których obecny jest ruch (najczęściej w postaci poruszających się roślin czy chmur), z czym słabo radzi sobie np. używana w tej pracy metoda wyrównywania ekspozycji oparta na MTB (podrozdział 2.1). Dodatkowo wagi pikseli modyfikowane są zgodnie ze zdefiniowaną przez autorów wartością pewności. Niestety podejście to ma dwie zasadnicze wady. Zdjęcie HDR tworzone jest tylko z trzech ekspozycji wejściowych i dla takiej ich liczby zostały opracowane wszystkie omówione zależności. Poza tym modyfikowanie wag ekspozycji wejściowych a tym samym usuwanie ruchu nie dotyczy obrazu odniesienia. Co więcej na obrazie tym nie powinien pojawić się ruch.

Ostatnia z zaprezentowanych w poprzednim rozdziale metod usuwania ruchu nie wzbudza wyraźnych zastrzeżeń i mimo, że nadal wymaga wykonywania zdjęć przy użyciu statywu jej efekty w usuwaniu ruchu są zaskakująco dobre. Metoda ta polega na iteracyjnym poszukiwaniu wag pikseli ekspozycji wejściowych tak, aby zmniejszyć wkład w zdjęcie HDR pikseli, których prawdopodobieństwo tego, że należą do obiektu ruchomego jest największe. Jednak z pewnością można spróbować uzyskać ten sam efekt w prostszy niż zaproponowany przez autorów sposób.

Omówiona w tym rozdziale zaproponowana metoda usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych tworzących obraz HDR zakłada, że poprawne usunięcie obiektów ruchomych wymaga ich uprzedniego zidentyfikowania w sekwencji zdjęć wejściowych. Identyfikacja ta rozpoczyna się od określenia obszarów, w których na zdjęciu HDR pojawiają się rozmazane plamy. Następnie należy poprawnie wybrać ekspozycję wejściową, odpowiadającą za powstawanie tych plam i ponownie utworzyć obraz HDR z pominięciem odrzuconych fragmentów wybranych ekspozycji.

4.1. Wykrywanie obszarów ruchu na zdjęciu HDR.

W pracy tej detekcja obszarów ruchu na zdjęciu HDR odbywa się na podstawie wspomnianych w podrozdziale 3.1 tzw. *obrazów wariancji*, które w bezpośredni sposób wyrażają zmiany wartości pikseli pojawiające się w ekspozycjach wejściowych tworzących obraz HDR. Jednak różne metody definiowania wariancji prowadzą do uwydatnienia innych elementów ruchu.

W celu poprawnego wykrywania obiektów ruchomych przyjęto dwa różne sposoby obliczania obrazów wariancji. Obraz, oznaczany dalej jako $varR$, traktowany jest jako główny, ze względu na wykrywanie znacznych części obiektów ruchomych. Z kolei obraz $varS$ jest obrazem pomocniczym, często zachowującym się jako uzupełnienie pierwszego poprzez wykrywanie pozostałych elementów obiektów ruchomych.

Podczas definiowania obu obrazów wariancji przyjęte zostało założenie, że nasz aparat fotograficzny jest urządzeniem idealnie liniowo mierzącym ilość docierającego do niego światła. Wówczas piksele wszystkich ekspozycji mogą być porównywane po ich podzieleniu przez czas naświetlenia danej ekspozycji.

Obraz wariancji $varR$.

Tworzenie obrazu wariancji $varR$ rozpoczyna się od obliczenia średniej ważonej (4.1) z wartości radiancji odpowiadających sobie pikseli w kolejnych ekspozycjach wejściowych. Radiancja dla poszczególnych pikseli jest ilorazem funkcji odpowiedzi aparatu f z wartości piksela oraz logarytmu naturalnego z czasu naświetlenia ekspozycji go zawierającej.

$$E_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ijk}) \left(\frac{f(Z_{ijk})}{\ln \Delta t_j} \right)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ijk})} \quad (4.1)$$

gdzie i jest numerem kolejnego piksela, a j kolejnej ekspozycji, k oznacza jeden z kanałów koloru RGB, E_{ik} jest to wartość radiancji, P jest liczbą obrazów wejściowych, natomiast Δt_j jest czasem naświetlenia ekspozycji j . Zastosowana w równaniu (4.1) funkcja wagowa wyrażona została zależnością (2.10).

W przeciwieństwie do zależności (2.11), zgodnie z którą tworzone jest zdjęcie HDR, wykorzystywana jest tutaj funkcja f otrzymywana z funkcji g zdefiniowanej jako $g = \ln f^{-1}$ (rozdział 2.2).

Wartości radiancji liczone są dla każdego kanału koloru RGB niezależnie, wykorzystując odpowiadającą mu krzywą odpowiedzi aparatu f .

Ostatecznie wariancja $varR$ zdefiniowana jest jako maksimum z wartości otrzymywanych dla poszczególnych kanałów RGB (4.2).

$$varR_i = \max_k \left(\frac{\frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \left(\frac{f(Z_{ijk})}{\ln \Delta t_j} \right)^2}{E_{ik}^2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Obraz wariancji $varS$.

W celu utworzenia obrazu wariancji $varS$ wartości pikseli wszystkich ekspozycji dzielone są przez odpowiadające tym ekspozycjom czasy naświetlenia. Tak uzyskane piksele wykorzystywane są podczas obliczania średniej ważonej z ich wartości (4.3) oraz średniej ważonej z kwadratów ich wartości (4.4) w kolejnych ekspozycjach.

$$av_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ijk}) \cdot \frac{Z_{ijk}}{\Delta t_j}}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ijk})} \quad (4.3)$$

$$avSqr_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ijk}) \cdot \left(\frac{Z_{ijk}}{\Delta t_j} \right)^2}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ijk})} \quad (4.4)$$

Tak jak w przypadku wariancji $varR$ i tutaj wartości wariancji $varS$ dla każdego piksela definiowane są jako maksimum z wartości obliczonych oddzielnie dla poszczególnych kanałów czerwonego, zielonego i niebieskiego (4.5):

$$varS_i = \max_k \left(\frac{av_{ik}}{avSqr_{ik}^2} - 1 \right) \quad (4.5)$$

Przy obliczaniu wariancji tą metodą ponownie pojawia się funkcja wagowa $\omega(z)$. Bez przeszkód można użyć tutaj równania (2.10), jednak w pracy tej wykorzystano funkcję zdefiniowaną zależnością (3.10).

Identyfikacja obszarów ruchu na podstawie obrazów wariancji.

Kolejnym krokiem do identyfikacji obszarów ruchu na zdjęciu HDR jest ustalenie odpowiednich progów dla otrzymanych obrazów wariancji. Określenie progu pozwala oddzielić części obrazu o wysokiej i niskiej wariancji. Obszary o niskiej wariancji tworzą tło na obrazie HDR.

Dla obu obrazów wariancji $varR$ i $varS$ progi ustalane są niezależnie. Następnie piksele o wartości mniejszej od progu są zerowane. Wśród pozostałych pikseli o wysokiej wariancji poprzez segmentację wykrywane są obszary ruchu. Progowanie nie wyróżnia idealnie obiektów ruchomych od tła. Często elementy tła mogą mieć wariancję przekraczającą próg, czyli porównywalną z wariancją w miejscach, w których na obrazie HDR pojawiają się duchy. W takiej sytuacji segmentacja jest w stanie wykluczyć te elementy o ile nie zajmują one dużej, zwartej powierzchni na obrazie HDR.

W pracy zaimplementowano metodę segmentacji przez rozrost obszaru, przy czym wydzielone obszary o powierzchni mniejszej niż 0,1% oraz większej niż 80% powierzchni obrazu HDR są uznawane za element tła.

Regiony obrazu HDR uzyskane w wyniku segmentacji każdego z obrazów wariancji są następnie rozmywane w promieniu trzech pikseli w celu połączenia przylegających obszarów ruchu oraz zakrycia krawędzi obiektów ruchomych. Wydzielone na jednym obrazie wariancji regiony mogą się częściowo lub całkowicie pokrywać z obszarami wykrytymi na drugim obrazie. Przed ich scaleniem konieczne jest więc sprawdzenie czy występują takie sytuacje, aby umożliwić poprawne połączenie oraz jednoznaczny identyfikację poszczególnych obszarów ruchu.

W tej części algorytmu zostają określone obszary ruchu, najczęściej rozmazane poza granice występującej w obrazie HDR plamy. Ponieważ poszczególne plamy i „duchy” mogą być tworzone przez obiekty ruchome będące na więcej niż jednej ekspozycji wejściowej, w dalszej części algorytmu, podczas usuwania ruchu może się zdarzyć, że wykryte teraz regiony zostaną podzielone na mniejsze części składowe.

4.2. Usuwanie obiektów ruchomych z wyznaczonych obszarów.

Usuwanie obiektów ruchomych z wydzielonych regionów zdjęcia HDR odbywa się w sposób iteracyjny, przy czym już w pierwszej iteracji udaje się prawidłowo wyznaczyć ekspozycje wejściowe odpowiadające za znaczną część ruchu na obrazie HDR. W szczególnym przypadku kiedy dany region ruchu tworzą obiekty ruchome z wielu ekspozycji wejściowych, w kolejnych iteracjach region ten jest dzielony wraz z kolejno wyznaczanymi ekspozycjami odpowiedzialnymi za fragmenty ruchu.

W przypadku kiedy fotografowana scena jest tylko pozornie statyczna, oprócz dużych obiektów takich jak przechodzący ludzie czy zwierzęta, ruch może pojawić się w postaci poruszanych wiatrem roślin. Wówczas żadna z ekspozycji wejściowych nie odpowiada za nieprawidłowy wkład w zdjęcie HDR i aby algorytm działał prawidłowo liczba jego iteracji musi zostać ograniczona.

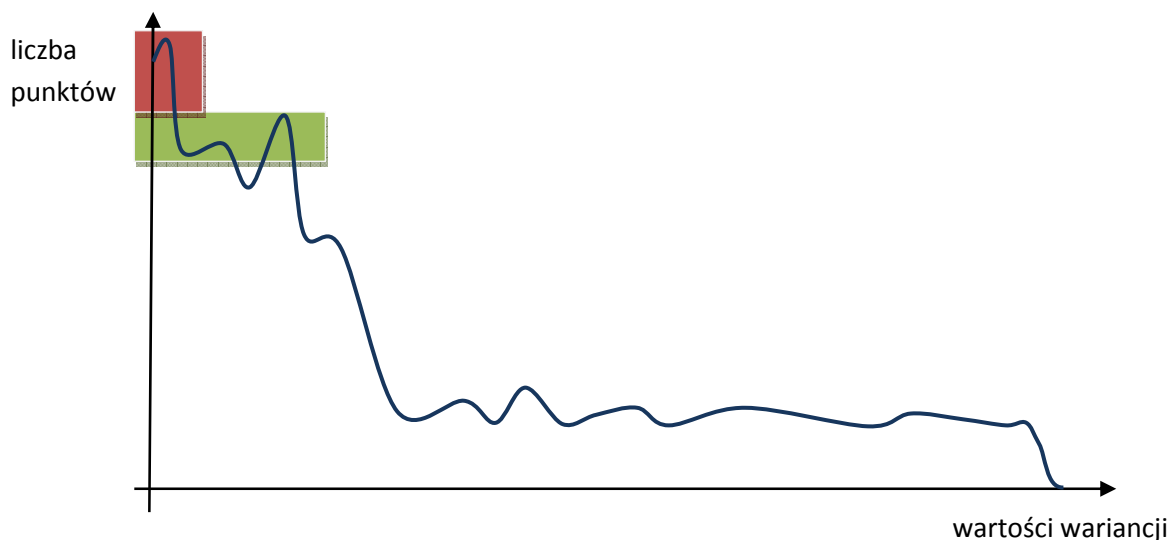
Histogramy wariancji obszarów ruchu.

Usuwanie obiektów ruchomych z serii zdjęć tworzących obraz HDR podobnie jak wybór ekspozycji zakrywającej powstałe „duchy” w pracy [1] opiera się na histogramach obrazów wariancji. Algorytm rozpoczyna się od utworzenia histogramów wydzielonych regionów ruchu na podstawie obrazu wariancji $varR$. Każdy z obszarów uzyskanych w wyniku segmentacji zawiera w sobie obiekt ruchomy oraz część tła. Na histogramie tło wyróżnione jest w postaci maksimum dla niedużych wartości wariancji.

Następnie histogramy są modyfikowane, tak aby 2% pikseli tworzących dany region, którym odpowiadają największe wartości w histogramie (zaznaczone kolorem czerwonym na rys. 4.1), zostało pominięte. Ponieważ maksimum w histogramie tworzą piksele tła, kolejne jego części zostają odrzucone.

Wybór ekspozycji wejściowej zawierającej obiekt ruchomy odbywa się na podstawie tak zmodyfikowanych histogramów. Obcięcie wierzchołków histogramu powoduje jego obniżenie, a co za tym idzie poszerza zakres wartości wariancji, którym odpowiadają największe wartości w histogramie. Zakres ten jest odczytywany poprzez wybór kolejnych 2% pikseli, którym odpowiadają największe wartości w zmodyfikowanym histogramie (kolor zielony na rys. 4.1). Jeżeli wybrane maksimum

są od siebie oddalone, przedział wartości wariancji się powiększa. Opisaną procedurę przedstawia rysunek 4.1.



Rysunek 4.1. Rysunek przedstawia przykładowy histogram wariancji regionu ruchu oraz sposób odczytywania zakresu wariancji będącej częścią tła w wydzielonym obszarze ruchu.

Wybór ekspozycji wejściowej zawierającej obiekt ruchomy.

Po wybraniu zakresu wariancji dla każdego obszaru ruchu następuje znalezienie ekspozycji wejściowej zawierającej obiekt ruchomy. Dla każdej ekspozycji wejściowej tworzona jest jej mapa radiancji zgodnie z zależnością (2.9).

Dla każdego wydzielonego obszaru ruchu wyznaczane są odpowiednie przedziały wartości pikseli się w nim znajdujących, niezależne dla każdego kanału koloru RGB. W przypadku obrazu HDR do wyznaczenia omawianych zakresów wybierane są piksele o wartościach wariancji w obrazie $varR$ mieszczących się w wyznaczonym wcześniej zakresie wariancji. W przypadku każdej z map radiancji ekspozycji wejściowych przedziały wartości pikseli wyznaczane są w różny sposób w zależności od iteracji algorytmu. W pierwszej iteracji odbywa się to na podstawie wszystkich pikseli, tzn. obejmujących cały obszar ruchu, nie tylko piksele z wybranego zakresu wariancji. W kolejnych iteracjach przedziały te są zawężane i dokładnie jak dla obrazu HDR wybierane są piksele o wartościach wariancji w obrazie $varR$ mieszczących się w wyznaczonym wcześniej zakresie wariancji.

Ta ekspozycja wejściowa, której zakres wartości pikseli dla danego regionu ruchu w najmniejszym stopniu lub w ogóle nie zawiera przedziału wyznaczonego dla tego

samego regionu na obrazie HDR, jest wybierana jako ekspozycja zawierająca obiekt ruchomy. W pracy zaimplementowano badanie stopnia pokrywania się odpowiednich przedziałów dla każdego koloru RGB, następnie wyniki te się sumuje i wybierana jest ekspozycja, dla której uzyskana suma jest najmniejsza. Wykluczanie się zakresów wartości pikseli wynika z omówionego już faktu. Poszukiwany jest obiekt ruchomy, a wybrane dla danego obszaru ruchu na obrazie HDR piksele są częścią tła, zawartą w tym obszarze ruchu. Jeżeli dana ekspozycja w obszarze ruchu nie zawiera tego tła, ma największe prawdopodobieństwo tego, że to do niej należy poszukiwany obiekt.

Kolejne iteracje.

Ponieważ początkowo położone w niewielkiej odległości na obrazie HDR obiekty ruchu tworzą większe, połączone obszary, niemożliwym jest ich usunięcie w jednym kroku. W kolejnych iteracjach regiony ruchu są dzielone i wykrywane są ekspozycje, na których ruchome przedmioty, zwierzęta lub ludzie zostali bezpośrednio uchwyceni.

Po każdym kroku iteracji tworzone są ponownie obrazy wariancji $varR$ i $varS$. Odbywa się to na podstawie omówionych już równań, z jedną istotną zmianą. Jeżeli dany obraz wejściowy został wybrany jako obraz zawierający obiekt ruchomy, jego piksele należące do danego obszaru ruchu zostają wykluczone z tworzenia obrazu HDR oraz wariancji $varR$ i $varS$. Następnie wybór ten jest sprawdzany poprzez opisane już progowanie obrazów wariancji.

Próg dla obrazu wariancji $varS$ pozostaje niezmienny, natomiast próg dla obrazu $varR$ po pierwszej iteracji zostaje zmniejszony o 25% i ta wartość wykorzystywana jest w dalszych iteracjach algorytmu.

Dodatkowo bardzo istotny jest fakt, że jedynie w pierwszym przebiegu algorytmu poszukiwanie obszarów ruchu odbywa się na całym obrazie HDR. W kolejnych iteracjach dla ponownie obliczonych obrazów wariancji stosowane są ustalone progi, a sama segmentacja odbywa się już jedynie w obrębie obszarów ruchu wydzielonych w pierwszej iteracji.

Jeżeli dla danego obszaru lub jego fragmentu wybrana została ekspozycja wejściowa nie zawierająca obiektu ruchomego, wówczas należy ją wykluczyć z wyboru w kolejnych iteracjach, jednocześnie przywracając jej piksele jako prawidłowe (nie zawierające ruchu a stanowiące tło) podczas tworzenia obrazu HDR.

Ograniczenie liczby iteracji.

Maksymalna liczba iteracji to liczba obrazów wejściowych. Jednak jeżeli pojedyncze plamy są utworzone przez obiekt ruchomy znajdujący się w tym obszarze tylko na jednej ekspozycji wejściowej, wówczas algorytm powinien zakończyć swoje działanie wcześniej. W tym celu w każdej iteracji sprawdzane jest wyzerowanie się obrazów wariancji $varR$ i $varS$. Następuje to gdy wszystkie piksele mają wartości mniejsze od ustalonych progów, co oznacza, że obiekty ruchome zostały już usunięte ze zdjęcia HDR.

Obraz HDR po usunięciu obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych.

Po wykryciu i usunięciu obiektów ruchomych z sekwencji zdjęć wejściowych tworzony jest nowy obraz HDR, pozbawiony ruchu. Wartości radiancji dla każdego piksela w tworzonym zdjęciu HDR obliczane są zgodnie z poniższym równaniem:

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (4.6)$$

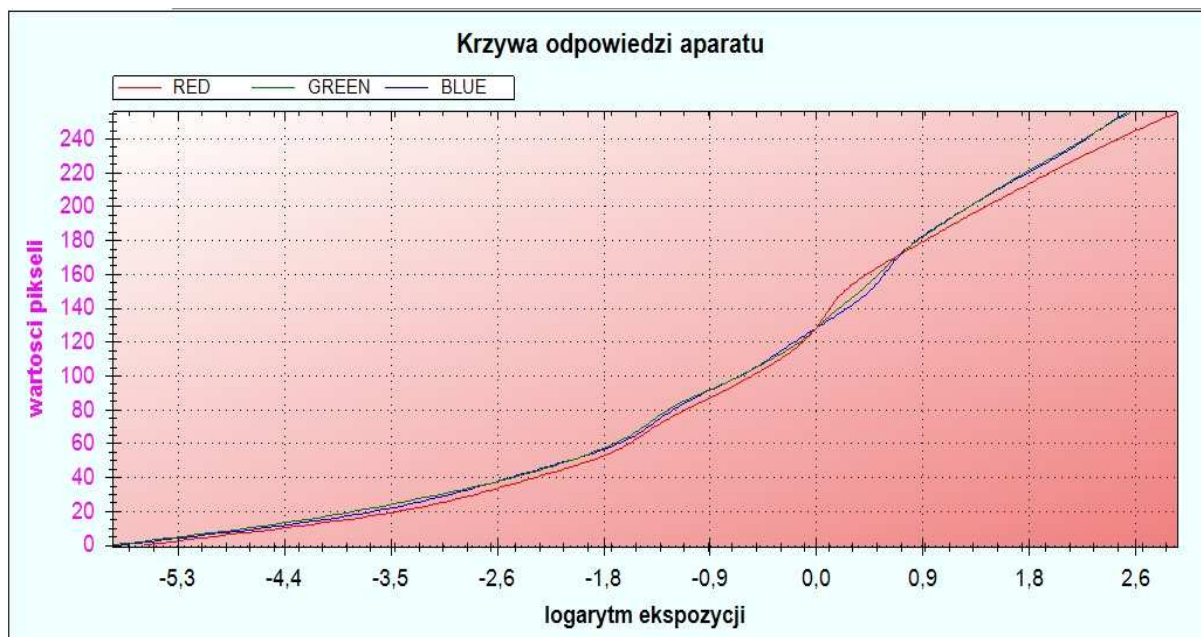
Zastosowaną funkcję wagową przedstawia równanie (2.10).

5. Rezultaty.

Sekwencje ekspozycji wejściowych do zdjęcia HDR wykonywane były przy użyciu aparatu fotograficznego *FUJIFILM FinePix S1600* i dostępnej w nim funkcji AEB (ang. *Automatic Exposure Bracketing*). Funkcja ta umożliwia wykonanie sekwencji kolejno optymalnie naświetlonego, niedoświetlonego oraz prześwietlonego ujęcia, co ogranicza liczbę zdjęć wejściowych do trzech. Użycie statywu i ręczna zmiana ustawień ekspozycji spośród dostępnych opcji $\pm\frac{1}{3}EV$, $\pm\frac{2}{3}EV$, $\pm 1EV$ pozwoliła na zwiększenie liczby ujęć danej sceny, a tym samym liczby zdjęć wejściowych.

Zanim utworzone zostanie zdjęcie HDR wymagane jest wyrównanie serii zdjęć wejściowych. W tym celu zaimplementowany został algorytm przedstawiony w podrozdziale 2.1.

Konieczna jest również znajomość krzywej odpowiedzi aparatu. Do rekonstrukcji krzywej odpowiedzi aparatu z sekwencji wyrównanych ekspozycji zaimplementowany został algorytm Debevec'a i Malika'a opisany w podrozdziale 2.2. Ponieważ raz uzyskana krzywa może być użyta do obliczenia wartości radiancji każdego zdjęcia wykonanego przy użyciu danego aparatu, nie tylko dla zdjęć wykorzystanych do jej odtworzenia, najlepiej jest w tym celu wykorzystać serię zdjęć, na której nie pojawiły się żadne obiekty ruchome. Pojawienie się ruchu na fotografowanej scenie prowadzi do znacznych zniekształceń otrzymywanej krzywej odpowiedzi aparatu, zależnych od liczby pikseli zakłóconych przez ten ruch. Utworzona aplikacja sprawdza model aparatu, którym wykonana została wprowadzona sekwencja zdjęć. Zapisuje ona raz uzyskaną krzywą dla danego modelu aparatu fotograficznego i wykorzystuje ją dla wszystkich zdjęć HDR, utworzonych ze zdjęć wejściowych wykonanych dowolnym egzemplarzem tego właśnie modelu. Rysunek 5.1 przedstawia krzywą wykorzystywaną w omówionych dalej eksperymentach.



Rysunek 5.1. Rysunek przedstawia krzywą odpowiedzi aparatu *FUJIFILM FinePix S1600* uzyskaną dla serii wyrównanych ekspozycji statycznej sceny.

Zastosowany algorytm usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych do zdjęcia HDR wymaga od użytkownika wyspecyfikowania dwóch wartości progu w obrazach wariancji $varR$ i $varS$, po czym usuwanie ruchu jest w pełni automatyczne.

Tabela 5.1 zawiera wartości progów przyjęte w poszczególnych eksperymentach, natomiast rysunki od 5.2 do 5.13 przedstawiają sekwencje zdjęć wejściowych, zdjęcia HDR z obecnym ruchem oraz po usunięciu obiektów ruchomych. Kolejność danych zawartych w kolumnach 3. i 4. tabeli 5.1, czyli wartości ekspozycji w jednostkach EV oraz czasy naświetlenia, odpowiada przedstawionej na rysunkach kolejności zdjęć wejściowych.

Wyświetlane zdjęcia HDR przed i po usunięciu ruchu skompresowane zostały przy użyciu funkcji logarytmicznej, a następnie znormalizowane.

Tabela 5.1. Dane dla przeprowadzonych eksperymentów.

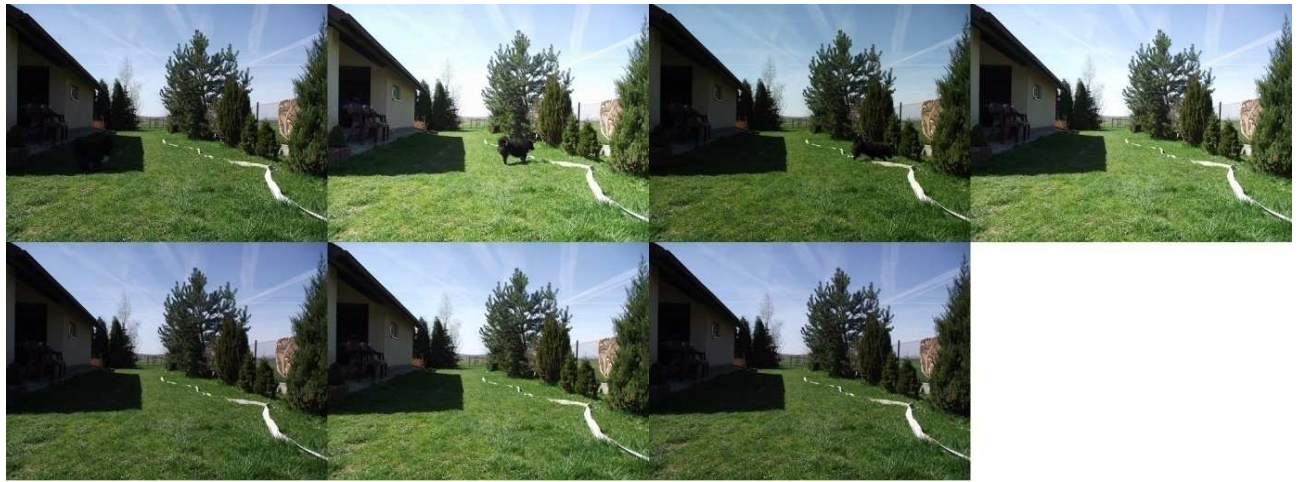
Seria	Liczba zdjęć wejściowych	Wartości ekspozycji [EV]	Czasy naświetlenia [s]	Próg R	Próg S
1 „dom”	3	0, +2/3, -2/3	1/1200, 1/1100, 1/1200	0.5	0.05
2 „kajtek3”	3	0, +1, -1	1/950, 1/480, 1/1200	7.0	0.65
3 „kajtek7”	7	0, +1, -1, +2/3, -2/3, +1/3, -1/3	1/950, 1/480, 1/1200, 1/600, 1/1200, 1/750, 1/1200	7.0	0.4
4 „ogród”	5	0, +2/3, -2/3, +1/3, -1/3	1/170, 1/110, 1/280, 1/120, 1/180	3.5	0.65
5 „balkon3”	3	0, +2/3, -2/3	1/750, 1/450, 1/1100	6.5	0.45
6 „balkon5”	5	0, +1/3, -1/3, +2/3, -2/3,	1/480, 1/300, 1/750, 1/450, 1/1100	6.5	0.4
7 „rower3”	3	0, +1/3, -1/3	1/105, 1/85, 1/125	0.9	0.65
8 „rower5”	5	0, +1, -1, +1/3, -1/3	1/105, 1/52, 1/210, 1/85, 1/125	1.0	0.9
9 „bobik7”	7	0, +1/3, -1/3, +2/3, -2/3, +1, -1	1/200, 1/160, 1/250, 1/125, 1/320, 1/100, 1/400	6.0	0.15
10 „bobik3”	3	0, +1/3, -1/3	1/200, 1/160, 1/250	4.0	0.25



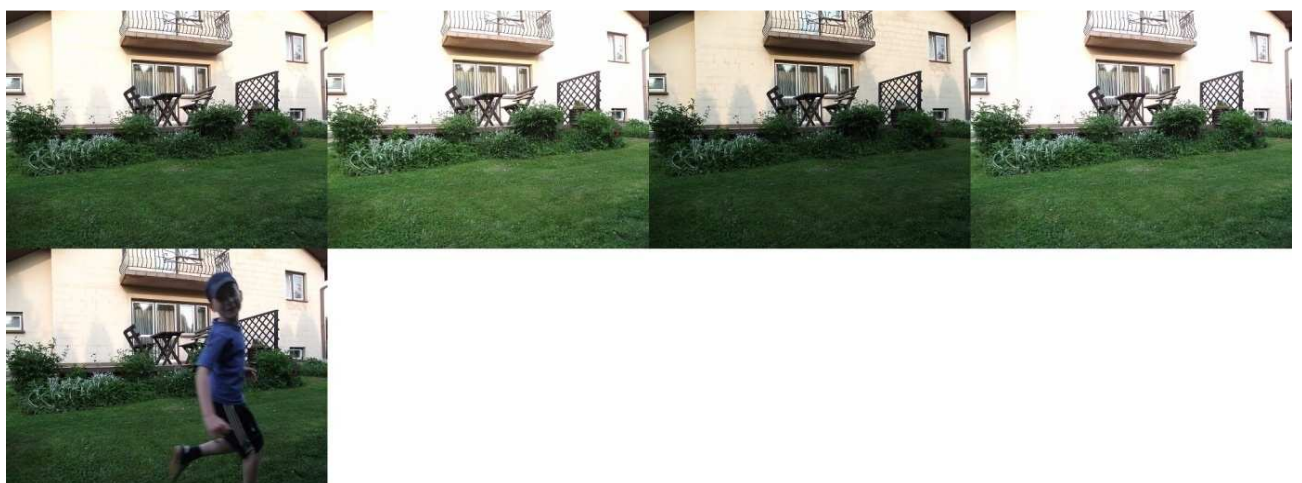
Rysunek 5.2. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „dom”.



Rysunek 5.3. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek3”.



Rysunek 5.4. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek7”.



Rysunek 5.5. Obrazy wejściowe do obrazu HDR, opisane w tabeli 5.1 jako „ogród”.



Rysunek 5.6. Obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „ogród”.



Rysunek 5.7. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „balkon5”.



Rysunek 5.8. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „balkon3”.



Rysunek 5.9. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „rower3”.



Rysunek 5.10. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „rower5”.



Rysunek 5.11. Obrazy wejściowe do obrazu HDR, opisane w tabeli 5.1 jako „bobik7”.



Rysunek 5.12. Obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „bobik7”.



Rysunek 5.13. Obrazy wejściowe oraz obraz HDR przed (po lewej) i po usunięciu ruchu (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „bobik3”.

Kolejne serie opisane w tabeli 5.1 przedstawiają różny wpływ ruchu obecnego podczas wykonywania sekwencji ekspozycji na zdjęcie HDR oraz jego widoczność na tym zdjęciu. Często ruch ten jest niemal niezauważalny jak w seriach „bobik3” i „bobik7” z rysunków 5.13 i 5.12, mimo to jego wariancja jest bardzo duża.

Pierwszym co można zauważyć po analizie wszystkich serii jest prosty fakt, że większa liczba zdjęć wejściowych zdecydowanie poprawia efekt końcowy i obszary, z których usunięto jedną z ekspozycji wejściowych zachowują podobny poziom jasności co reszta obrazu HDR (rysunki 5.4 i 5.7). Jednak nie wynika to jedynie z liczby zdjęć wejściowych. Decydujący wpływ na zamazanie granicy pomiędzy obszarami, z których usunięto ruch a resztą obrazu ma czas naświetlenia kolejnych ekspozycji. W sytuacji kiedy różnice w czasach naświetlenia pomiędzy kolejnymi obrazami w sekwencji są niewielkie, wycięcie fragmentu jednego z obrazów jest zupełnie niewidoczne. Idealnym przykładem takiej sytuacji jest seria „dom” z rysunku 5.2, ma ona zaledwie trzy zdjęcia wejściowe. Inne serie zdjęć, tzn. „kajtek3” i „kajtek7” z rysunków 5.3 i 5.4 również potwierdzają tę tezę. W pierwszej z tych serii obecne są tylko trzy zdjęcia wejściowe, ale o skrajnych ekspozycjach. Zwiększenie liczby zdjęć, a co za tym idzie zmniejszenie różnic w czasach naświetlenia sprawia, że usunięcie obiektu ruchomego nie pozostawia śladu na zdjęciu HDR.

Najtrudniejszą sytuacją w wykrywaniu i usuwaniu obiektów ruchomych okazał się niepozorny ruch roślin powodowany choćby przez słaby wietrzyk. Jego wariancja jest jednak niższa od wariancji powodowanej przez przechodzące osoby. Taki rodzaj ruchu może wydłużyć działanie algorytmu, ale przy poprawnie dobranych wartościach progów, oddzielających wariancje tych dwóch rodzajów ruchu, nie ma on dużego wpływu na prawidłowy wybór ekspozycji wejściowej, na której znajduje się obiekt ruchomy. Serie „ogród”, „rower3” i „rower5” z rysunków 5.6, 5.9 i 5.10 przedstawiają efekty usunięcia obiektów ruchomych mimo dużych zakłóceń w postaci ruszanych wiatrem roślin.

Poruszany już problem różnicy jasności pomiędzy obszarami, z których usunięto ruch a pozostałą częścią obrazu HDR na większości obrazów nie występuje. Najgorszy wynik usunięcia obiektu ruchomego widoczny jest na rysunku 5.8 po usunięciu cienia. Powstały artefakt wynika z rozmycia wydzielonego obszaru ruchu o trzy piksele, rozmycie to jest częścią algorytmu. Rozwiązaniem w takiej sytuacji jest zwiększenie progów, co zmniejszy wydzielony obszar i zlikwiduje wyraźne w tej sytuacji otoczenie usuniętego cienia. Wynik tej operacji przedstawiony jest na pierwszym obrazie z rysunku 5.18.

W celu porównania wyników z zaproponowanego rozwiązania z metodą, z której zaczerpnięto pomysł wykorzystania obrazów wariancji, poniżej zamieszczone są

zdjęcia HDR, będące rezultatem „przybliżonej” implementacji podejścia z podrozdziału 3.1. Ponieważ autorzy nie sprecyzowali sposobu obliczania obrazu wariacji, wydzielenie regionów ruchu odbywa się zgodnie z zaproponowanym w podrozdziale 4.1 algorytmem. Następnie, już dokładnie jak to zostało opisane w podrozdziale 3.1, w obszarach ruchu wybierane są fragmenty ekspozycji wejściowych.

Rysunki od 5.14 do 5.20 zawierają zestawienie zdjęć HDR uzyskanych po usunięciu ruchu obiema metodami. Wszystkie parametry dla wykorzystanych serii zdjęć zostały zachowane zgodnie z tabelą 5.1.



Rysunek 5.14. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „dom”.



Rysunek 5.15. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek3”.



Rysunek 5.16. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „kajtek7”.



Rysunek 5.17. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „ogród”.



Rysunek 5.18. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „balkon3”. Zmieniona względem tabeli 5.1 wartość prognozy S wynosi 0,55.



Rysunek 5.19. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „balkon5”.



Rysunek 5.20. Obraz HDR po usunięciu ruchu zaproponowaną metodą (po lewej) i metodą z podrozdziału 3.1 (po prawej), opisane w tabeli 5.1 jako „rower5”.

Mimo, że rysunek 5.20, tzn. seria „rower5” przedstawia najlepszy efekt zastosowania do usuwania ruchu metody z podrozdziału 3.1, można na nim zauważyć zmniejszenie dynamiki obrazu HDR w zastępowanych przez wybraną ekspozycję fragmentach obrazu. Obrazy z rysunków 5.14 do 5.17 nie wyglądają już tak dobrze, dla nich metoda ta daje zdecydowanie gorsze wyniki w usuwaniu ruchu niż rozwiązanie zaproponowane w tej pracy.

Rezultaty zaproponowanego algorytmu wykrywania i usuwania ruchu są zadowalające. Przedstawione przykłady eksperymentów pokazywały dobre i złe strony zastosowanego podejścia oraz rozwiązania pojawiających się problemów.

6. Wnioski i propozycje dalszego rozwoju pracy.

W pracy tej została przedstawiona metoda usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych tworzących obraz HDR. Wydzielenie obszarów ruchu na zdjęciu HDR odbywa się na podstawie obrazów wariancji, następnie w sposób iteracyjny wybierana jest ekspozycja wejściowa zawierająca obiekt ruchomy. Zdjęcie HDR tworzone jest po usunięciu wybranych fragmentów obrazów wejściowych. Dużą zaletą tej metody jest prawidłowy wybór ekspozycji wejściowej nawet w przypadku obecności ruchu w postaci poruszających się roślin czy chmur, który stanowi istotne zakłócenie podczas poszukiwania obiektów ruchomych, takich jak przechodzące osoby, zwierzęta lub poruszające się przedmioty. Dodatkowo okazuje się, że usunięcie fragmentów ekspozycji wejściowych nie pozostawia widocznych śladów na zdjęciu HDR.

Ograniczeniem metody jest konieczność wykonywania zdjęć z użyciem statywu. Zaimplementowany w utworzonej aplikacji algorytm wyrównywania ekspozycji wejściowych działa zdecydowanie gorzej właśnie dla zdjęć, na których pojawia się ruch. Dlatego dobrym rozwinięciem pracy byłoby utworzenie algorytmu wyrównywania sekwencji zdjęć zawierających obiekty ruchome.

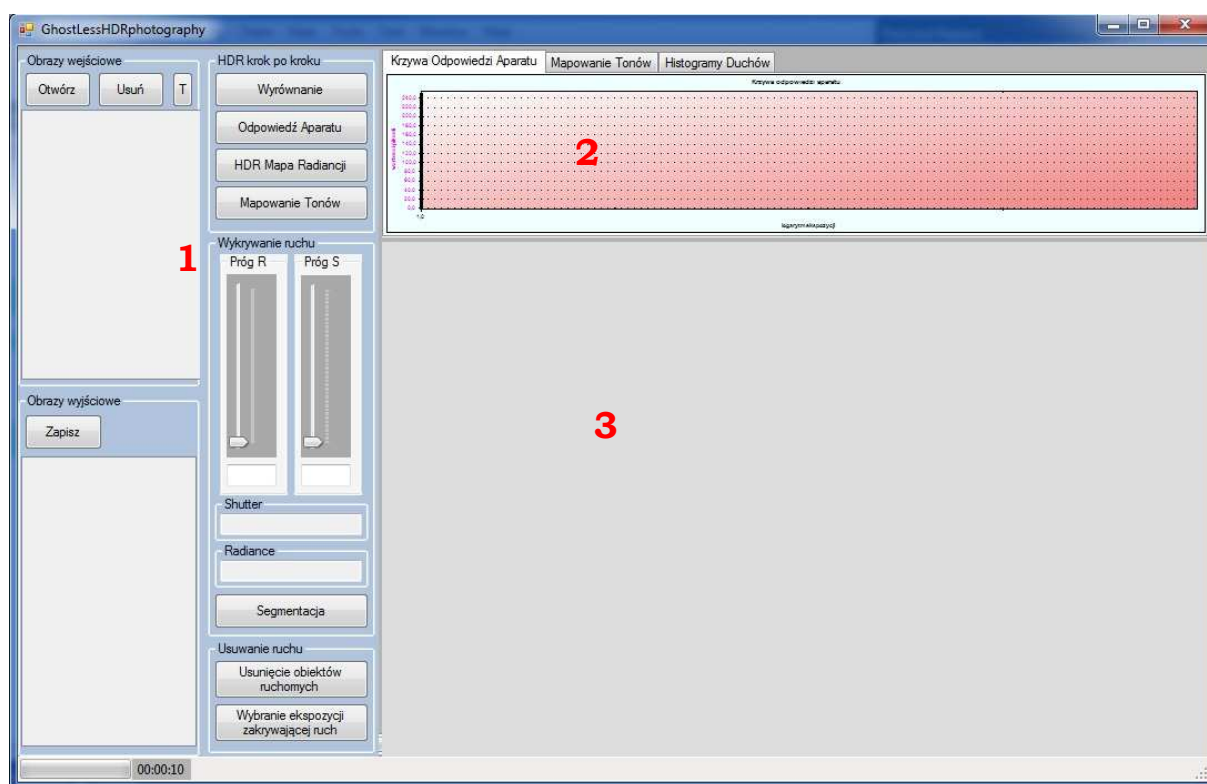
Dodatkowym pomysłem jest wykorzystanie idei zmiany wag, niekoniecznie całkowitego usuwania fragmentu zdjęcia wejściowego. Taka zmiana byłaby bardzo korzystna w sytuacjach, kiedy sekwencja zdjęć wejściowych zawiera tylko kilka ujęć danej sceny.

Bibliografia.

- [1] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta Pattanaik, Paul Debevec, *High Dynamic Range Imaging Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kauffman Publishers, 2005.
- [2] Gregory Ward, *Fast, Robust Image Registration for Compositing High Dynamic Range Photographs from Hand-held Exposures*, Journal of Graphics Tools, 8(2):17–30, 2003.
- [3] Paul E. Debevec, Jitendra Malik, *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*, in *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pp. 369–378, ACM SIGGRAPH, August 1997.
- [4] Nicolas Menzel, Michael Guthe, *Freehand HDR Photography with Motion Compensation*, Proceedings of the Vision, Modeling and Visualization Conference, VMV 2007.
- [5] Erum Arif Khan, Ahmet Oguz Akyuz, Erik Reinhard, *Ghost Removal in High Dynamic Range Images*, IEEE International Conference on Image Processing, 2006.
- [6] William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Second Edition, 1992.
- [7] Gregory Ward Larson, Holly Rushmeier, Christine Piatko, *A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3(4), 1997.
- [8] Stephen C. Perry, *Core C# i .Net*, Helion, 2006.

Dodatek A: Instrukcja obsługi programu.

Wszystkie opisane algorytmy służące do utworzenia zdjęcia HDR oraz przedstawiony algorytm usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć tworzących obraz HDR zostały zaimplementowane w omówionej w tym rozdziale aplikacji „*GhostLessHDRphotography*”. Aplikacja ta została utworzona w środowisku programistycznym Microsoft Visual Studio 2010 dla systemu operacyjnego Microsoft Windows 7. Za jej pomocą przeprowadzone zostały również eksperymenty opisane w rozdziale 5.



Rysunek 8.1. Okno aplikacji „*GhostLessHDRphotography*”.

Po uruchomieniu programu „*GhostLessHDRphotography*” zobaczymy okno przedstawione na rysunku 8.1. Jego obszar podzielony jest na trzy części, mające ściśle określone funkcje:

1. sterowanie programem,
2. przedstawienie uzyskanych danych w formie wykresów,
3. wyświetlanie obrazów.

Panel sterowania tworzy logiczną całość, wewnątrz dodatkowo podzieloną na pięć paneli składowych:

- Obrazy wejściowe,
- Obrazy wyjściowe,
- HDR krok po kroku,
- Wykrywanie ruchu,
- Usuwanie ruchu.

Rozpoczynamy od wczytania obrazów wejściowych za pomocą przycisku „**Otwórz**” w części „**Obrazy wejściowe**”. Jeżeli omyłkowo wczytaliśmy obraz nie należący do wybranej sekwencji zdjęć wejściowych, możemy go usunąć przyciskiem „**Usuń**”. Aplikacja uniemożliwia wczytanie zdjęć o różnej rozdzielczości czy wykonanych różnymi modelami aparatów fotograficznych. Trzeci przycisk znajdujący się w części „Obrazy wejściowe”, tzn. „**T**”, pozwala dopasować wielkość wyświetlanego obrazu. Dostępne są przy tym dwa tryby. Jeden przedstawiający zdjęcie w jego oryginalnej rozdzielczości oraz drugi dopasowujący rozmiar obrazu do rozmiaru panelu, na którym jest ono wyświetlane.

Uzyskiwane obrazy pojawiają się w części „**Obrazy wyjściowe**”. Nad nimi widoczny jest przycisk „**Zapisz**”, umożliwiający zapisanie obrazów wynikowych w formacie .jpg.

Aplikacja traktuje usuwanie ruchu jako samodzielny element, dostępny po utworzeniu obrazu HDR. Samo tworzenie zdjęcia HDR podzielone jest na cztery etapy (omówione w rozdziale 2.), ukryte pod następującymi przyciskami:

- **Wyrównanie,**
- **Odpowiedź Aparatu,**
- **HDR Mapa Radiancji,**
- **Mapowanie Tonów.**

Pierwszy i ostatni mogą zostać pominięte w zależności od potrzeb.

Jak już zostało wspomniane raz uzyskana krzywa odpowiedzi aparatu może być użyta do obliczenia wartości radiancji każdego zdjęcia wykonanego przy użyciu danego aparatu, nie tylko dla zdjęć wykorzystanych do jej odtworzenia. Utworzona aplikacja sprawdza zatem model aparatu, którym wykonana została wprowadzona sekwencja zdjęć i zapisuje uzyskaną charakterystykę w pliku tekstowym o nazwie

odpowiadającej nazwie modelu aparatu, w katalogu „**C:\krzywe odpowiedzi aparatow**”. Jeżeli w folderze tym istnieje już taki plik (dla tego modelu aparatu), jest on wykorzystywany do utworzenia mapy radiancji HDR bez konieczności ponownego obliczania krzywej odpowiedzi aparatu.

Kiedy zdjęcie HDR jest już gotowe i istnieje potrzeba usunięcia obiektów ruchomych, przechodzimy do kolejnego panelu składowego oznaczonego jako „**Wykrywanie ruchu**”. Panel ten obejmuje pięć elementów.

Za pomocą suwaków ustawiane są wartości progowe dla obrazów wariancji. Dla obrazu wariancji $varR$ jest to suwak „**Próg R**”, natomiast dla obrazu $varS$ suwak „**Próg S**”. Kiedy poruszamy jednym z suwaków w polu służącym do wyświetlania obrazów pojawia się sprogowany obraz wariancji.

Zgodnie z algorytmem wykrywania ruchu na obrazach wariancji zerowane są piksele o wartościach mniejszych od progu. Tutaj aby ułatwić wybór najlepszych wartości progów, obrazy te są odwrócone w przeciwieństwie do omówionych w podrozdziale 4.1, tzn. wyzerowane piksele mają wartości większe, a nie mniejsze od progu. W ten sposób obszary o wysokiej wariancji, czyli obszary ruchu widoczne są jako czarne pola. Zdecydowanie ułatwia to ich zawężenie, a tym samym wybór najlepszej wartości progu.

Pola tekstowe „**Shutter**” i „**Radiance**” służą celom informacyjnym. Zawierają one zakresy wartości wariancji na obrazach kolejno $varS$ i $varR$. Mogą stać się wskazówką podczas wyboru wartości progów.

Poniżej pól tekstowych, jako ostatni element panelu „Wykrywanie ruchu”, znajduje się przycisk „**Segmentacja**”. Jego zadaniem jest wydzielenie obszarów ruchu na podstawie obu obrazów wariancji z ustalonymi dla nich progami. Po tej operacji w części „Obrazy wyjściowe” pojawi się obraz z wykrytymi obszarami. Jeżeli nie odpowiadają one oczekiwaniom użytkownika, można ponownie ustalić progi i przeprowadzić segmentację.

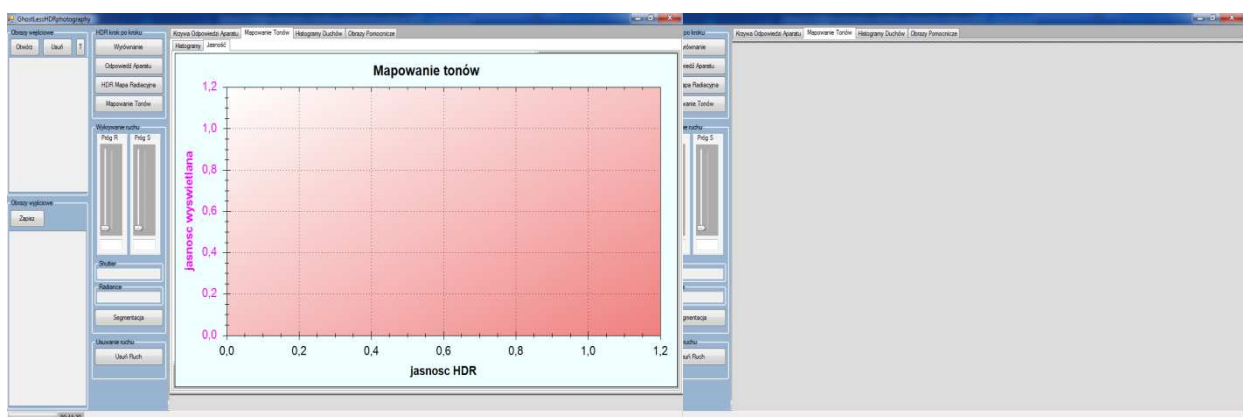
Ostatni panel w części służącej do sterowania to „**Usuwanie ruchu**”. Widoczne na nim przyciski pozwalają na usunięcie ruchu ze zdjęcia HDR na dwa różne sposoby. Pierwszy z nich, tzn. „**Usunięcie obiektów ruchomych**” uruchamia zaproponowaną metodę usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych, opisaną w rozdziale 4. Drugi, „**Wybranie ekspozycji zakrywającej ruch**” to implementacja podejścia przedstawionego w podrozdziale 3.1.

Kolejnym elementem aplikacji są widoczne w jej górnej części pola przygotowane do **wyświetlenia wykresów**. Zmieniając zakładki możemy przeglądać wszystkie uzyskane wykresy:

- Krzywa Odpowiedzi Aparatu,
- Mapowanie Tonów,
 - Histogramy,
 - Jasność,
- Histogramy Duchów.

Zakładka „**Krzywa Odpowiedzi Aparatu**” zawiera wykres funkcji odpowiedzi aparatu uzyskanej po kliknięciu przycisku „Odpowiedź Aparatu”. Z kolei w zakładce „**Mapowanie Tonów**” umieszczone są dwa pola wykresów. Pierwszy, oznaczony jako „**Histogramy**” przedstawia naniesione na siebie trzy przebiegi: histogram logarytmu luminancji obrazu HDR (kolor zielony), zmodyfikowany histogram po zastosowaniu operatora mapowania tonów Ward’a (kolor brązowy) oraz histogram obrazu uzyskanego po kompresji luminancji tym operatorem (kolor czerwony). Drugi, oznaczony jako „**Jasność**” zawiera wykres przedstawiający stosunek jasności (logarytmu luminancji) obrazu po mapowaniu tonów do jasności obrazu HDR. Kolory na tym wykresie odpowiadają kolorom przebiegów na wykresie „Histogramy”.

Ostatnia zakładka z wykresami „**Histogramy Duchów**” zawiera histogramy wariancji obszarów ruchu, uzyskanych po zakończeniu działania algorytmu usuwania obiektów ruchomych ze zdjęcia HDR.



Rysunek 8.2. Modyfikacja wielkości wykresów (po lewej) i pola wyświetlania obrazów (po prawej).

Trzeci obszar okna aplikacji to pole służące do **wyświetlania obrazów**. Kliknięcie na wybrany obraz powoduje jego wyświetlenie w tym właśnie polu. Jak już zostało wspomniane możliwe jest obejrzenie zdjęć w ich oryginalnej rozdzielczości lub dopasowanych do wielkości pola wyświetlania (przycisk „T”).

Jeżeli obraz jest zbyt duży i mimo to chcemy go zobaczyć w jego własnej rozdzielczości jest na to szansa poprzez powiększenie pola wyświetlania. Po ustawieniu kursora na linii oddzielającej obszar wykresów od pola wyświetlania powinien on zmienić swój wygląd. Jeżeli tak się stanie należy kliknąć na tą linię i przeciągnąć ją w górę lub w dół. Wówczas sąsiadujące ze sobą obszary ulegną powiększeniu lub zmniejszeniu. Możemy w ten sposób zwiększać pole wyświetlania lub zwiększać obszar odpowiadający wykresom (rys. 8.2). Jeżeli po takiej operacji zdjęcia nadal się nie mieszczą pozostaje już tylko oglądanie ich przy pomocy pojawiających się na obrzeżach pola wyświetlania suwaków lub użycie przycisku „T” i dopasowanie zdjęcia do obszaru pola.

Dodatek B: Dokumentacja oprogramowania.

Utworzony program „*GhostLessHDRphotography*” został zaimplementowany w języku C# [8]. Kod źródłowy składa się z następujących plików:

- BitmapConversions.cs,
- HDRghostRemoval.cs,
- HDRImage.cs,
- ImageProcessing.cs,
- Mat.cs,
- Panel.cs,
- Program.cs.

Klasa **Program** zawiera funkcję Main i uruchamia aplikację. Natomiast klasa **Panel** zawiera graficzny interfejs użytkownika. Pozostałe klasy są bezpośrednio związane z tworzeniem zdjęcia HDR i usuwaniem obiektów ruchomych z serii zdjęć wejściowych.

Klasy **BitmapConversions**, **ImageProcessing** oraz **Mat** to statyczne klasy pomocnicze. Tabele 9.1 do 9.3 zawierają opis metod tych trzech klas.

Tabela 9.1. Metody klasy **BitmapConversions**.

Nazwa	Opis
SetIndexedPixel	Ustawia wartość piksela w monochromatycznym obrazie 1-bitowym. Argumenty wywołania: <code>int</code> x, <code>int</code> y – współrzędne punktu, <code>bool</code> pixel – ustawiana wartość, <code>BitmapData</code> bmd – dane obrazu. Zwracana wartość: <code>void</code>
GetIndexedPixel	Pobiera wartość piksela z 1-bitowego obrazu. Argumenty wywołania: <code>int</code> x, <code>int</code> y – współrzędne punktu, <code>BitmapData</code> bmd – dane obrazu. Zwracana wartość: <code>byte</code> Pobrana wartość piksela.

MakeItGrey	<p>Na podstawie 24-bitowego obrazu RGB tworzy obraz 8-bitowy.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>coloredBM</code> – obraz RGB.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Monochromatyczny obraz 8-bitowy.</p>
FilterDown	<p>Zmniejsza rozdzielczość obrazu 8-bitowego.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>bm</code> – obraz 8-bitowy, <code>int</code> <code>factor</code> – liczba określająca ilu krotnie obraz zostanie zmniejszony.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Uzyskany obraz.</p>
CreateMTB	<p>Tworzy MTB obrazu 8-bitowego.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>bMapa</code> – obraz 8-bitowy, <code>int</code> <code>mediana</code> – mediana obrazu <code>bMapa</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Utworzony obraz MTB.</p>
ShiftGreyBitmap	<p>Przesuwa 8-bitowy obraz o określone wartości.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>right</code> – obraz 8-bitowy, <code>int</code> <code>xOff</code> – wartość przesunięcia w poziomie, <code>int</code> <code>yOff</code> – wartość przesunięcia w pionie.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Przesunięty obraz.</p>
ShiftColoredBitmap	<p>Przesuwa 24-bitowy obraz RGB o określone wartości.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>right</code> – 24-bitowy obraz RGB, <code>int</code> <code>xOff</code> – wartość przesunięcia w poziomie, <code>int</code> <code>yOff</code> – wartość przesunięcia w pionie.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Przesunięty obraz.</p>

Shift1bbBitmap	<p>Przesuwa 1-bitowy obraz o określone wartości.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>right</code> – obraz 1-bitowy, <code>int</code> <code>xOff</code> – wartość przesunięcia w poziomie, <code>int</code> <code>yOff</code> – wartość przesunięcia w pionie.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Przesunięty obraz.</p>
CreateExclusionBitmap	<p>Tworzy EB obrazu 8-bitowego.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> <code>bMapa</code> – obraz 8-bitowy, <code>int</code> <code>mediana</code> – mediana obrazu <code>bMapa</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Utworzony obraz MTB.</p>
ConvertRGBtoCIELAB	<p>Przeprowadza konwersje obrazu z przestrzeni kolorów RGB do Lab.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int</code>[, ,] <code>rgb</code> – 24-bitowy obraz RGB zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>int</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code>[, ,] 24-bitowy obraz Lab zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>int</code>.</p> <p>Przeciążona wersja tej funkcji przyjmuje argument <code>double</code>[, ,] <code>rgb</code> i zwraca <code>double</code>[, ,].</p>
ConvertCIELABtoRGB	<p>Przeprowadza konwersje obrazu z przestrzeni kolorów Lab do RGB.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int</code>[, ,] <code>lab</code> – 24-bitowy obraz Lab zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>int</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code>[, ,] 24-bitowy obraz RGB zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>int</code>.</p> <p>Przeciążona wersja tej funkcji przyjmuje argument <code>double</code>[, ,] <code>lab</code> i zwraca <code>double</code>[, ,].</p>

ConvertRGBtoYUV	<p>Przeprowadza konwersję obrazu z przestrzeni kolorów RGB do YUV.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double[, ,]</code> rgb – 24-bitowy obraz RGB zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>double</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double[, ,]</code></p> <p>24-bitowy obraz YUV zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>double</code>.</p>
ConvertYUVtoRGB	<p>Przeprowadza konwersję obrazu z przestrzeni kolorów YUV do RGB.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double[, ,]</code> yuv – 24-bitowy obraz YUV zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>double</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double[, ,]</code></p> <p>24-bitowy obraz RGB zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>double</code>.</p>
BitmapRGB2intTab	<p>Zapisuje obraz do tablicy wartości typu <code>int</code>.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> bm – 24-bitowy obraz RGB.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int[, ,]</code></p> <p>24-bitowy obraz RGB zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>int</code>.</p>
IntTabBitmapRGB	<p>Tworzy 24-bitowy obraz RGB na podstawie tablicy <code>int</code>.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int[, ,]</code> bm – 24-bitowy obraz RGB zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy wartości typu <code>int</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code></p> <p>24-bitowy obraz RGB</p>

Tabela 9.2. Metody klasy ImageProcessing.

Nazwa	Opis
DetermineMedian	<p>Wyznacza medianę dla 8-bitowego obrazu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> grey – 8-bitowy obraz.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code></p> <p>Wartość mediany.</p>
MakeImagePyramid	<p>Tworzy piramidę obrazów dla monochromatycznego, 8-bitowego obrazu, zmniejszając dwukrotnie rozdzielczość obrazu dla każdego poziomu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> bm – 8-bitowy obraz,</p> <p><code>int</code> levels – liczba poziomów piramidy.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>List<Bitmap></code></p> <p>Utworzona piramida obrazów.</p>
ComputeOffsetError	<p>Oblicza błąd wynikający z braku wzajemnego wyrównania dwóch obrazów.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> leftMTB – MTB pierwszego obrazu,</p> <p><code>Bitmap</code> leftEx – EB pierwszego obrazu,</p> <p><code>Bitmap</code> rightMTB – MTB drugiego obrazu,</p> <p><code>Bitmap</code> rightEx – EB drugiego obrazu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code></p> <p>Wartość błędu.</p>
ChoosePixels	<p>Wybiera piksele obrazów wejściowych (te same w każdym obrazie), na podstawie których rekonstruowana będzie krzywa odpowiedzi aparatu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>List<Bitmap></code> lBit – lista, składająca się z obrazów wejściowych, tworzących obraz HDR.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>List<List<List<int>>></code></p> <p>Zaczynając od zewnętrznej listy, otrzymujemy wartości pikseli dla trzech kolorów (RGB), P obrazów dla każdego koloru oraz N pikseli w każdym obrazie.</p>

GetExposureTime	<p>Odczytuje czas naświetlenia danego zdjęcia.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> bmp – 24-bitowy obraz RGB.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double</code> Czas naświetlenia.</p>
GetManufacturer	<p>Odczytuje model aparatu fotograficznego, którym wykonano sekwencje zdjęć wejściowych.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> bmp – 24-bitowy obraz RGB.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>string</code> Nazwa modelu aparatu.</p>
Display8bppNorMap Display24bppNorMap Display24bppMap	<p>Na podstawie tablicy wartości typu <code>double</code> tworzą kolejno znormalizowany obraz 8-bitowy, znormalizowany obraz 24-bitowy oraz nieznormalizowany obraz 24-bitowy.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code>[,] map – 8-bitowy obraz zapisany w postaci 2-wymiarowej tablicy <code>double</code>.</p> <p>lub</p> <p><code>double</code>[, ,] map – 24-bitowy obraz zapisany w postaci 3-wymiarowej tablicy <code>double</code>.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Utworzony obraz.</p>
SnearThresholdBitmap	<p>Przeprowadza rozmycie pikseli obrazu wariancji.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code>[,] thresMap – sprogowany obraz wariancji, <code>double</code> threshold – wartość progu, <code>int</code> radius – promień rozmycia.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double</code>[,] Obraz uzyskany po operacji rozmycia pikseli.</p>
SnearSegmentedMap	<p>Przeprowadza rozmycie wydzielonego obszaru ruchu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int</code>[,] segMap – obraz uzyskany w wyniku segmentacji sprogowanego obraz wariancji, <code>int</code> radius – promień rozmycia.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code>[,] Obraz uzyskany po operacji rozmycia pikseli.</p>

GhostSegmentation	<p>Segmentacja sprogowanego obrazu wariacji w celu wydzielenia obszarów ruchu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code> [,] <code>map</code> – sprogowany obraz wariacji, <code>double</code> <code>threshold</code> - wartość progu, <code>ref int</code> <code>ghostNumber</code> – liczba wykrytych obszarów ruchu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code> [,] Obraz zawierający wydzielone obszary ruchu.</p>
IntervalIncluding	<p>Określenie stopnia zawierania się dwóch zakresów wartości.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code> <code>aL</code>, <code>double</code> <code>aP</code> – końce pierwszego przedziału, <code>double</code> <code>bL</code>, <code>double</code> <code>bP</code> - końce drugiego przedziału</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double</code> Procentowy wynik zawierania się przedziału <code>a</code> w przedziale <code>b</code>.</p>
SegmentsConnection	<p>Ujednoczenie obrazów uzyskanych w wyniku segmentacji obrazów wariacji <code>varR</code> i <code>varS</code> z ewentualnym połączeniem częściowo lub całkowicie pokrywających się obszarów ruchu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int</code> [,] <code>segR</code> – obszary ruchu wydzielone w wyniku segmentacji obrazu <code>varR</code>, <code>int</code> <code>Rnum</code> – liczba obszarów ruchu na obrazie <code>segR</code>, <code>int</code> [,] <code>segS</code> – obszary ruchu wydzielone w wyniku segmentacji obrazu <code>varS</code>, <code>int</code> <code>Snum</code> – liczba obszarów ruchu na obrazie <code>segS</code>, <code>ref int</code> <code>ghostNumber</code> - liczba wykrytych obszarów ruchu po połączeniu <code>segR</code> i <code>segS</code>,</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code> [,] Obraz przedstawiający wydzielone obszary ruchu.</p>
SegmentsIncluding	<p>Sprawdza czy obszar wykryty jako regiony ruchu nie powiększył się w stosunku do poprzedniej iteracji. Jeśli tak, wówczas jest on odpowiednio przycinany.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>ref int</code> [,] <code>segNew</code> – obraz po segmentacji z wydzielonymi w obecnej iteracji obszarami ruchu,</p>

	<pre>ref int NewNum – liczba obszarów ruchu, int[,] segOld – obraz po segmentacji z wydzielonymi w poprzedniej iteracji obszarami ruchu. Zwracana wartość: void</pre>
--	--

Tabela 9.3. Metody klasy Mat.

Nazwa	Opis
Svdcmp	<p>Przeprowadza rozkład SVD danej macierzy, $A = U \cdot W \cdot V^T$.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <pre>ref double[,] a – macierz A, po zakończeniu algorytmu A zostaje zastąpione przez macierz U, int m, int n – wymiary macierzy A, ref double[] w – diagonalna macierz W, zawierająca wartości osobliwe macierzy A, jest zwracana jako wektor, ref double[,] v – macierz V.</pre> <p>Zwracana wartość: void</p>
Svbksb	<p>Rozwiązuje równanie $A \cdot X = B$ dla wektora X, gdzie macierz $A = U \cdot W \cdot V^T$ jest otrzymywana z funkcji Svdcmp.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <pre>ref double[,] u – macierz U. ref double[] w – macierz W. ref double[,] v – macierz V. int m, int n – wymiary macierzy A, ref double[] b – wektor B. ref double[] x – wyjściowy wektor X.</pre> <p>Zwracana wartość: void</p>
SVDsolve	<p>Rozwiązuje układ równań $A \cdot X = B$, wykorzystując funkcje Svdcmp oraz Svbkbsb.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <pre>double[,] matA – macierz A. double[] vecb – wektor B.</pre> <p>Zwracana wartość: double[]</p> <p>Otrzymywany wektor X.</p>

Klasa **HDRImage** jest implementacją opisanych w rozdziale 2. algorytmów stanowiących kolejne kroki podczas tworzenia zdjęcia HDR (tab. 9.4).

Tabela 9.4. Metody klasy HDRImage.

Nazwa	Opis
AlignImages	<p>Wyrównuje dane zdjęcie z sekwencji wejściowej względem podanego zdjęcia odniesienia. Jest to implementacja algorytmu z podrozdziału 2.1.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>Bitmap</code> left – obraz odniesienia, <code>Bitmap</code> right – wyrównywany obraz, <code>ref int</code> xOffset – wyznaczone przesunięcie w poziomie, <code>ref int</code> yOffset – wyznaczone przesunięcie w pionie.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>Bitmap</code> Wyrównany obraz.</p>
GetHatValue	<p>Funkcja wagowa $\omega(z)$ opisana równaniem (2.7).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int</code> z - wartość danego piksela obrazu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int</code> Obliczona waga.</p>
GetHatValue2	<p>Funkcja wagowa $\omega(z)$ opisana równaniem (3.10).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code> z - wartość danego piksela obrazu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double</code> Obliczona waga.</p>
WeightingFunction	<p>Funkcja wagowa $\omega(z)$ opisana równaniem (2.10).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code> z - wartość danego piksela obrazu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double</code> Obliczona waga.</p>

GetResponseCurve	<p>Rekonstrukcja krzywej odpowiedzi aparatu g dla wybranego kanału RGB (implementacja algorytmu z rozdziału 2.2).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>List<List<int>></code> Zwej - wartości pikseli dla wybranego z kolorów (RGB), P obrazów oraz N pikseli w każdym obrazie,</p> <p><code>List<double></code> Bwej – wektor zawierający logarytm czasu naświetlenia dla każdego obrazu w kolejności odpowiadającej kolejności obrazów wejściowych.</p> <p><code>int</code> lambda – współczynnik gładkości.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>List<double></code></p> <p>Krzywa odpowiedzi aparatu dla wybranego z kolorów RGB.</p>
CreateRadianceMap	<p>Utworzenie mapy radiancji HDR (2.11).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>List<Bitmap></code> lBit – sekwencja obrazów wejściowych,</p> <p><code>List<double></code> shutterSpeed – wektor zawierający logarytm czasu naświetlenia dla każdego obrazu w kolejności odpowiadającej kolejności obrazów wejściowych.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>void</code></p>
InvertCurve	<p>Otrzymuje krzywą odpowiedzi f na podstawie krzywej g, zgodnie z zależnością $g = \ln f^{-1}$.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>List<double></code> curve – funkcja g.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>List<double></code></p> <p>Funkcja f.</p>
SensitivityFunction	<p>Funkcja wyrażająca wrażliwość oka na kontrast, opisana równaniem (2.21).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double</code> La – wartość luminancji.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double</code></p> <p>Liczba określająca wrażliwość oka na kontrast.</p>

ToneMapping	<p>Implementacja algorytmu mapowania tonów opisanego w podrozdziale 2.4.</p> <p>Argumenty wywołania: brak</p> <p>Zwracana wartość: <code>List<double[]></code></p> <p>Otrzymane histogramy.</p>
NormalizeHDR	<p>Liniowy operator mapowania tonów. Normalizuje obraz HDR do 24-bitowego obrazu RGB.</p> <p>Argumenty wywołania: <code>double[, ,] rgbHDR</code> – obraz HDR.</p> <p>Zwracana wartość: <code>double[, ,]</code></p> <p>Znormalizowany obraz HDR.</p>

Ostatnia z utworzonych klas, to klasa ***HDRghostRemoval***, dziedzicząca po *HDRImage*. Jest ona implementacją zaproponowanego rozwiązania usuwania obiektów ruchomych z serii zdjęć tworzących obraz HDR (rozdział 4.) oraz przedstawionej w podrozdziale 3.1 metody usuwania ruchu poprzez wybór najlepszej ekspozycji zastępującej fragment zdjęcia HDR z obecnym ruchem (tabela 9.5).

Tabela 9.5. Metody klasy **HDRghostRemoval**.

Nazwa	Opis
CreateRadianceGhostMap	<p>Utworzenie mapy radiancji HDR (4.1).</p> <p>Argumenty wywołania: <code>List<Bitmap> lBit</code> – sekwencja obrazów wejściowych, <code>List<double> shutterSpeed</code> – wektor zawierający logarytm czasu naświetlenia dla każdego obrazu w kolejności odpowiadającej kolejności obrazów wejściowych.</p> <p>Zwracana wartość: <code>void</code></p>

CreateVarianceRMap	<p>Utworzenie obrazu wariacji <i>varR</i> (4.2).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>List<Bitmap> lBit</code> – sekwencja obrazów wejściowych,</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>void</code></p>
CreateVarianceSMap	<p>Utworzenie obrazu wariacji <i>varS</i> (4.5).</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>List<int[, ,]> bitmaps</code> – sekwencja obrazów wejściowych,</p> <p><code>List<double> shutterSpeed</code> – wektor zawierający wartości czasów naświetlenia dla każdego obrazu w kolejności odpowiadającej kolejności obrazów wejściowych.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>void</code></p>
FindGhostsSegments	<p>Funkcja służąca do wydzielenia obszarów ruchu na obrazie wariacji.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double threshold</code> – próg ustalony dla danego obrazu wariacji,</p> <p><code>double[,] variance</code> – obraz wariacji.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int[,]</code></p> <p>Wydzielone obszary ruchu.</p>
ComputeGhostsHist	<p>Utworzenie histogramów regionów ruchu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p>brak</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int[,]</code></p> <p>Utworzone histogramy.</p>
CorrectHistograms	<p>Obcięcie histogramów regionów ruchu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>ref int[,] hist</code> – histogramy wydzielonych obszarów ruchu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>void</code></p>

ChooseExposure	<p>Wybór ekspozycji zawierających obiekty ruchome.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int</code> loop – obecna iteracja algorytmu (numerowane od 0), <code>int[,]</code> hist – poprawione histogramy regionów ruchu, <code>double[, ,]</code> hdr – obraz HDR, <code>List<double></code> shutterSpeed – czasy naświetlania obrazów wejściowych, <code>List<double[, ,]></code> lBitExp – mapy radiancji odpowiadające kolejnym obrazom wejściowym (2.9).</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int[,]</code></p> <p>Wektor określający ekspozycje wejściowe wybrane jako zawierające obiekty ruchome w kolejnych obszarach ruchu.</p>
ImproveHDR	<p>Utworzenie mapy radiancji HDR (4.6) po wycięciu fragmentów ekspozycji wejściowych, wybranych jako zawierające obiekty ruchome w wydzielonych regionach ruchu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int[]</code> expCoef - wektor określający ekspozycje wejściowe wybrane jako zawierające obiekty ruchome w kolejnych obszarach ruchu, <code>ref List<int[, ,]></code> radBit – obrazy wejściowe, <code>List<double></code> shutterSpeed – czasy naświetlania obrazów wejściowych.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>void</code></p>
GhostsSeparation	<p>Tworzy obraz, na którym widoczne są regiony ruchu dodatkowo wewnątrz podzielone po zakończeniu wszystkich iteracji algorytmu.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p>brak</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int[,]</code></p> <p>Obraz z ostatecznie podzielonymi obszarami ruchu.</p>

ChooseBestExposure	<p>Wybór najlepszej ekspozycji zastępującej fragment zdjęcia HDR z obecnym ruchem.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int[,]</code> hist – poprawione histogramy regionów ruchu, <code>double[, ,]</code> hdr – obraz HDR, <code>List<double></code> shutterSpeed – czasy naświetlania obrazów wejściowych, <code>List<double[, ,]></code> lBitExp – mapy radiancji odpowiadające kolejnym obrazom wejściowym (2.9).</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>int[,]</code> Wektor określający wybrane ekspozycje wejściowe.</p>
MakePatchExposure	<p>Tworzy obraz składający się z map radiancji wybranych w regionach ruchu ekspozycji wejściowych. W obszarze tła piksele w obrazie są wyzerowane.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>int[]</code> expCoef – wektor określający wybrane w kolejnych obszarach ruchu ekspozycje wejściowe.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double[, ,]</code> Utworzony obraz.</p>
ImproveHDRMap	<p>Utworzenie mapy radiancji HDR zgodnie z podejściem opisanym w podrozdziale 3.1, bazującym na wyborze najlepszej ekspozycji zastępującej fragment zdjęcia HDR z obecnym ruchem.</p> <p>Argumenty wywołania:</p> <p><code>double[, ,]</code> patch - obraz składający się z map radiancji wybranych w regionach ruchu ekspozycji wejściowych, <code>int[,]</code> seg – obszary ruchu wydzielone w wyniku segmentacji obrazu.</p> <p>Zwracana wartość:</p> <p><code>double[, ,]</code> Mapa radiancji HDR po usunięciu ruchu.</p>

Dodatek C: Spis zawartości dołączonego nośnika (płyta CD).

Płyta CD dołączona do pracy zawiera:

- pracę magisterską w formie elektronicznej (plik PDF),
- kod źródłowy programu (projekt Microsoft Visual Studio 2010),
- skompilowaną wersję programu „*GhostLessHDRphotography*”,
- plik z krzywą odpowiedzi aparatu (FinePix S1600.txt), który należy umieścić w folderze "c:\krzywe odpowiedzi aparatow",
- wykorzystywane w testach zdjęcia,
- dodatkowe aplikacje, które należy zainstalować przed uruchomieniem programu „*GhostLessHDRphotography*”:
 - *Microsoft .NET Framework 3.5 Service Pack 1*,
 - *Windows Installer 3.1 Redistributable (v2)*.