Artur BAL, Henryk PALUS Politechnika Śląska

KOREKCJA WINIETOWANIA OBRAZÓW CYFROWYCH Z WYKORZYSTANIEM MODELU SNILP

Streszczenie. Winietowanie obrazów jest jedną z głównych przyczyn występowania błędów radiometrycznych w układach obiektyw-kamera. Zjawisko to jest zwykle niepożądane, jednak jego wpływ można korygować metodami obliczeniowymi. Prawidłowa korekcja winietowania wymaga zastosowania odpowiednich modeli winietowania. W artykule opisano nowy model winietowania, tj. model SNILP (ang. *Smooth Non-Iterative Local Polynomial*). Wyniki przeprowadzonego eksperymentu pokazują, że model SNILP daje zwykle lepsze wyniki korekcji winietowania niż inne testowane modele. Co więcej, dla obrazów większych niż format UXGA (1600×1200) proponowany model jest również szybszy od innych testowanych modeli. Ponadto, w porównaniu do innych testowanych modeli, model SNILP wymaga również najmniejszych zasobów sprzętowych do jego wyznaczenia — ta cecha sprawia, że model SNILP nadaje się do wykorzystania w systemach o ograniczonej mocy obliczeniowej.

IMAGE VIGNETTING CORRECTION WITH THE USE OF THE SNILP MODEL

Summary. Image vignetting is one of the major radiometric errors, which occurs in lens-camera systems. Usually, it is an undesirable phenomenon, but it can be corrected using computational methods. A proper vignetting correction needs the usage of appropriate vignetting models. In the article, a new model of vignetting, i.e., the SNILP (Smooth Non-Iterative Local Polynomial) model is described. The results of the fulfiled experiment prove that the SNILP model usually gives better correction results than the other tested models. What's more, for images larger than UXGA format (1600×1200), the proposed model is also faster than other tested models. Among the tested models, the SNILP model also requires the least hardware resources for its application—this feature makes that the SNILP model is suitable for its usage in systems with limited computing power.

1. Wprowadzenie

Winietowanie obrazu jest zjawiskiem polegającym na redukcji jasności obrazu od jego środka optycznego w kierunku jego krawędzi. Winietowanie jest często zjawiskiem niepożądanym, a charakterystyka tego zjawiska zależy m.in. od parametrów optycznych stosowanego układu obiektyw-kamera. Negatywny wpływ winietowania jest szczególnie widoczny, gdy istnieje potrzeba łączenia obrazów w celu tworzenia obrazów panoramicznych [1, 10] lub obrazów mozaikowych [5, 18], a także radiometrycznej bądź ilościowej analizy obrazów [7, 20]. Potrzeby takie występują m.in. w takich obszarach jak: mikroskopia [15, 17, 18], obrazowanie techniką mikro tomografii rentgenowskiej (ang. *micro computed X-ray tomography, micro-CT*) [16], teledetekcja [6, 9].

Najlepszym sposobem na ograniczenie winietowania jest usunięcie jego przyczyn, np. poprzez stosowanie obiektywu o odpowiedniej charakterystyce lub dobór wielkości przysłony obiektywu z uwzględnieniem wpływu tego parametru na winietowanie. Stosowanie takich rozwiązań nie zawsze jest jednak możliwe i nie zawsze przynosi pożądany efekt. W takich przypadkach rozwiązaniem jest zastosowanie, na etapie przetwarzania pozyskanego obrazu, obliczeniowych metod korekcji winietowania.

Bardzo często spotykanym założeniem związanym korekcją winietowania jest założenie o radialności winietowania — w myśl tego założenia wartość winietowania dla analizowanego piksela obrazu zależy jedynie od odległości tego piksela od środka optycznego obrazu [4]. Stosowanie tego założenia znacznie upraszcza proces modelowania winietowania, z drugiej jednak strony znacząco ogranicza możliwość stosowania metod korekcji winietowania na nim bazujących. W wielu zastosowaniach konieczne jest stosowanie bardziej uniwersalnych modeli. Jednak w praktyce, poza klasyczną wielowymiarową aproksymacją wielomianową [3, 19], inne uniwersalne modele winietowania nie są właściwie obecne w literaturze przedmiotu.

Tę lukę, przynajmniej częściowo, ma w zamierzeniu autorów niniejszego artykułu, wypełnić gładki nieiteracyjny lokalnie wielomianowy (ang. *Smooth Non-Iterative Local Polynomial*, SNILP) model winietowania [2] — skrótowej prezentacji tego modelu i jego porównaniu z innymi znanymi z literatury modelami winietowania poświęcona jest niniejsza praca. Organizacja artykułu jest następująca. W rozdziale 2. w skrócie przedstawiono wybrane zagadnienia związane z korekcją winietowania. Rozdział 3. zawiera opis modelu SNILP, a rozdział 4. przedstawia wyniki porównania wybranych modeli winietowania z modelem SNILP wraz z ich dyskusją. Ostatni, 5. rozdział, stanowi podsumowanie.

2. Korekcja winietowania

Prawdopodobnie najczęściej stosowanym podejściem do korekcji winietowania jest podejście wykorzystujące ideę korekcji płaskiego pola (ang. *flat field correction*). W tym podejściu winietowanie szacowane jest na podstawie referencyjnego obrazu winietowania I_V przedstawiającego równomiernie oświetloną płaską powierzchnię o jednolitej barwie. Najważniejszymi źródłami różnic jasności w I_V są winietowanie zastosowanego układu obiektyw-kamera oraz szumy przetwornika. Sposób tworzenia obrazu I_V można opisać następującym wzorem

$$I_V(i,j) = V(i,j) \cdot I_{flat}(i,j) + \epsilon(i,j), \tag{1}$$

gdzie V to rzeczywiste winietowanie analizowanego układu obiektyw-kamera, I_{flat} to idealny obraz sceny o płaskiej powierzchni odniesienia, ϵ to szum, a (i, j) to współrzędne analizowanego piksela. Estymator winietowania \widetilde{V} jest ustalany podczas procesu aproksymacji dla założonego modelu winietowania VM i z obrazem I_V będącym daną wejściową do tego procesu, co można zapisać jako

$$\widetilde{V} = \operatorname{approx} \left(VM, I_V \right), \tag{2}$$

gdzie $\widetilde{V} \in (0, 1]$. W celu uzyskania obrazu \widetilde{I} ze skorygowanym winietowaniem, pozyskany obraz I zawierający winietowanie należy przekształcić zgodnie z wzorem

$$\widetilde{I}(i,j) = I(i,j) \cdot \widetilde{V}(i,j)^{-1}.$$
(3)

Aby otrzymać możliwie najlepsze wyniki korekcji, obrazy I_V i I powinny być uzyskiwane przy użyciu tego samego układu obiektyw-kamera, dla takich samych jego parametrów (np. ogniskowej w przypadku obiektywów zmiennoogniskowych) i zastosowanych parametrów ekspozycji (np. liczby przysłony obiektywu).

Korekcja płaskiego pola to oczywiście nie jedyne podejście, które wykorzystywane jest do korekcji winietowania. Jednak w porównaniu z innymi rozwiązaniami, podejście to jest najbardziej uniwersalne — można je stosować w przypadku praktycznie każdego systemu obiektyw-kamera. Dostosowanie metody płaskiego pola do analizowanego systemu polega bowiem na wykorzystaniu modelu winietowania, który jest odpowiedni dla winietowania występującego w tym systemie. Oznacza to przede wszystkim wykorzystanie modelu winietowania VM, dla którego założenia jego stosowania są zgodne z cechami winietowania analizowanego układu obiektyw-kamera.

W literaturze na przestrzeni lat prezentowane były różne modele winietowania oparte na idei aproksymacji parametrycznej, np.: model wielomianowy [3, 19], hiperboliczny model cosinusowy [22], funkcja Gaussa [14], czy też radialny model wielomianowy [4, 8]. Ostatnie trzy wspomniane modele winietowania należa do często stosowanego, i wspomnianego w poprzednim rozdziale, podejścia zakładającego, że rzeczywiste winietowanie układu obiektyw-kamera ma symetrię cylindryczną. Oznacza to, że winietowanie można modelować za pomocą funkcji radialnej, tzn. winietowanie V analizowanego układu obiektyw-kamera jest funkcją r, gdzie r jest odległością między analizowanym pikselem p(i, j) a środkiem optycznym C obrazu o współrzędnych (i_C, j_C) . Zastosowanie założenia o występowaniu w układzie winietowania radialnego upraszcza proces poszukiwania estymatora winietowania \widetilde{V} — aproksymacja funkcji dwóch zmiennych (funkcja 2D) zostaje zastąpiona przez aproksymację funkcji jednej zmiennej (funkcja 1D). Z drugiej jednak strony poszukiwanie środka optycznego nie jest zadaniem trywialnym [21] — jego realizacja wiąże się z dodatkowymi obliczeniami a błędna estymacja jego położenia jest istotnym źródłem błędów korekcji winietowania. Należy także podkreślić, o czym już wspomniano w rozdziale 1., że modelowanie winietowania jako funkcji radialnej znacząco ogranicza stosowalność takich modeli do pewnej ograniczonej grupy układów obiektyw-kamera.

3. Opis modelu SNILP

Model SNILP jest rozwinięciem modeli winietowania, które zostały opracowywane przy współudziale autorów i zostały zaprezentowane w pracach [11, 12, 13]. Cechą wspólną wszystkich tych modeli jest dekompozycja pojedynczego problemu aproksymacji, na podstawie obrazu I_V , funkcji 2D winietowania na wiele zadań aproksymacji funkcji 1D poszczególnych profili winietowania wzdłuż poziomych i pionowych linii analizowanego obrazu. Wynikiem tego procesu są estymaty obrazu oznaczane dalej jako \widetilde{V}_x (dla estymat otrzymanych na podstawie profili wzdłuż linii poziomych) oraz \widetilde{V}_y (dla estymat otrzymanych na podstawie profili wzdłuż linii pionowych). Estymaty profili są wyznaczane z wykorzystaniem aproksymacji wielomianowej o stopniu *s*. Różnica między modelem SNILP a do tej pory opracowanymi modelami polega na innym sposobie wyznaczania wynikowej estymaty winietowania \widetilde{V} na podstawie \widetilde{V}_x i \widetilde{V}_y . W dotychczasowych modelach wartość $\widetilde{V}(i, j)$ dla piksela o współrzędnych (i, j)wyznaczana była poprzez uśrednianie wartości $\widetilde{V}_x(i, j)$ i $\widetilde{V}_y(i, j)$ zgodnie z wzorem

$$\widetilde{V}(i,j) = \frac{1}{2} \Big(\widetilde{V}_x(i,j) + \widetilde{V}_y(i,j) \Big).$$
(4)

W opisywanych modelach estymaty \widetilde{V}_x i \widetilde{V}_y zależą tylko od wartości obrazu wejściowego I_V oraz wybranego stopnia *s* wielomianu aproksymującego, a wartości \widetilde{V}_x i \widetilde{V}_y są wyznaczane niezależnie od siebie.

Opracowane do tej pory modele różnią się między sobą maksymalnym stopniem *s* wykorzystywanych wielomianów aproksymujących (w przypadku lokalnego modelu parabolicznego [11] s = 2, natomiast w lokalnym modelu wielomianowym [12] brak jest ograniczeń na wartość *s*), a także zastosowaniem iteracyjnej poprawy gładkości uzyskanej estymaty \widetilde{V} w przypadku gładkiego lokalnego wielomianowego (ang. *Smooth Local Polynomial*, SLP) modelu winietowania [13]. Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, iż pomimo ogólnie bardzo dobrej dokładności korekcji winietowania uzyskiwanej przy wykorzystaniu modelu SLP (dla odpowiednio dużej liczby iteracji *k*), stosowanie tego modelu ma wadę wynikającą z rekurencyjnego charakteru tego modelu. Wadą tą jest długi czas obliczeń, który jest proporcjonalny do *k* [2].

W przypadku modelu SNILP przyjęto odmienne niż do tej pory podejście do wyznaczenia wartości estymat \widetilde{V}_x i \widetilde{V}_y . W modelu tym wartości \widetilde{V}_x i \widetilde{V}_y są bowiem wyznaczane sekwencyjnie tzn. przykładowo jako pierwsza wyznaczana jest estymata \widetilde{V}_x na podstawie profili winietowania wzdłuż linii poziomych obrazu wejściowego I_V , a następnie obliczana jest estymata \widetilde{V}_y na podstawie profili wzdłuż linii pionowych wcześniej wyznaczonego obrazu \widetilde{V}_x . Schemat ten może być formalnie zapisany jako

$$\widetilde{V}_x = \operatorname{PolyReg}_x^s (I_V), \tag{5}$$

$$\widetilde{V}^* = \widetilde{V}_y = \operatorname{PolyReg}_y^s\left(\widetilde{V}_x\right),\tag{6}$$

gdzie PolyReg^s_x(I) i PolyReg^s_y(I) oznaczają procedury wyznaczania estymat analizowanego obrazu I na podstawie profili dla linii, odpowiednio, poziomych i pionowych z wykorzystaniem wielomianów aproksymacyjnych stopnia s, a \widetilde{V}^* to wstępna estymata winietowania. Ponieważ w praktyce parametry akwizycji obrazu I_V dobierane są tak, aby nie występowało w nim zjawisko nasycenia, zatem zachodzi $\max(I_V) \leq 1$ a w konsekwencji $\max(\widetilde{V}^*) \leq 1$. W związku z tym, aby możliwe było stosowanie wzoru (3) konieczne jest znormalizowanie zakresu \widetilde{V}^* do zakresu (0, 1] zgodnie z wzorem

$$\widetilde{V}(i,j) = \frac{\widetilde{V}^*(i,j)}{\max_{i,j} \left(\widetilde{V}^*(i,j) \right)}.$$
(7)

Wartość \widetilde{V} jest poszukiwaną estymatą winietowania.

W tym miejscu należy zauważyć, że ze względu na to, że wszystkie operacje niezbędne do wyznaczenia \widetilde{V} zgodnie modelem SNILP są liniowe to kolejność wyznaczania aproksymacji w poszczególnych kierunkach nie ma znaczenia, a zatem zachodzi

$$\widetilde{V}^* = \operatorname{PolyReg}_y^s \left(\operatorname{PolyReg}_x^s \left(I_V \right) \right) = \operatorname{PolyReg}_x^s \left(\operatorname{PolyReg}_y^s \left(I_V \right) \right), \tag{8}$$

co na drodze eksperymentu obliczeniowego potwierdzono w pracy [2].

4. Eksperymentalne porównanie wybranych modeli winietowania

4.1. Założenia i warunki eksperymentu

Celem przeprowadzonego eksperymentu było porównanie, na rzeczywistych danych, jakości korekcji winietowania będącej wynikiem stosowania modelu SNILP z wynikami uzyskanymi dla innych, znanych z literatury, modeli winietowania. Jakość modelu winietowania można ocenić analizując obrazy

$$\widetilde{I}_{flat} = I_V \cdot \widetilde{V}^{-1},\tag{9}$$

tj. wyniki korekcji obrazu winietowania I_V , z wykorzystaniem oszacowań winietowania \tilde{V} uzyskanych przy użyciu różnych modeli winietowania. W idealnym przypadku wszystkie piksele obraz \tilde{I}_{flat} powinny mieć tą samą wartość. Oczywiście w przypadku danych rzeczywistych taki idealny wynik nie może zostać osiągnięty np. z powodu obecności szumu ϵ w obrazie wejściowym I_V (co wynika z modelu (1)). W takiej sytuacji, w przypadku prawidłowej korekcji winietowania, piksele w obrazie \tilde{I}_{flat} powinny mieć jak najbardziej podobne wartości tzn. rozrzut (dyspersja) ich wartości powinien być minimalny. Dobrymi miarami dyspersji wartości są odchylenie standardowe (STD) oraz rozstęp międzykwartylowy (IQR). Te właśnie miary te zostały wykorzystane do ilościowej oceny wyników korekcji winietowania — mniejsze wartości STD (\tilde{I}_{flat}) oraz IQR (\tilde{I}_{flat}) oznaczają lepszą zdolność adaptacji analizowanego modelu winietowania do rzeczywistego winietowania, a tym samym lepszą jego korekcję.

Dane analizowane w eksperymencie zostały pozyskane za pomocą trzech różnych kamer internetowych, a mianowicie: Logitech C920, Xiaomi IMILAB CMSXJ22A oraz A4Tech PK-910H (rys. 1) — oznaczanych odtąd jako odpowiednio: CAM-A, CAM-B i CAM-C. Kamery użyte w eksperymencie zostały dobrane tak, aby różniły się parametrami, w szczególności polem widzenia i zniekształceniami geometrycznymi porównanie podstawowych danych technicznych użytych kamer przedstawia tabela 1.



Rys. 1. Kamery wykorzystane do badań, od lewej do prawej: Logitech C920 (CAM-A), Xiaomi IMILAB CMSXJ22A (CAM-B), A4Tech PK-910H (CAM-C).

Jako scenę wykorzystano jednolicie podświetlony biały mleczny panel ze szkła akrylowego (pleksi) grubości 2,5 mm, a jako źródło światła wykorzystano monitor graficzny Asus PA248QV wyświetlający biały ekran o jasności 300 lx. Panel pleksi został umieszczony równolegle do powierzchni ekranu monitora, zadbano również o równoległe ustawienie kamer względem panelu. W celu zredukowania szumu obecnego w przechwyconych obrazach, w eksperymencie wykorzystano obraz \overline{I}_V , będący średnią ze 100 pozyskanych obrazów I_{V_e} .

Tabela 1

	Kamera internetowa					
	Сам-А	Сам-В	САМ-С			
Parametr	Logitech C920	Xiaomi IMILAB CMSXJ22A	A4Tech PK-910H			
Diagonalny kąt widzenia	78°	85°	70°			
Maksymalna rozdzielczość	1920×1080	1920×1080	1920×1080			
Liczba klatek na sekundę przy 1080p	$30\mathrm{fps}$	$30\mathrm{fps}$	$30\mathrm{fps}$			
System ustawiania ostrości	auto focus	stała ostrość	stała ostrość			
Zakres ustawienia ostrości	brak danych	brak danych	$> 60 \mathrm{cm}$			

Podstawowe dane techniczne kamer wykorzystanych w eksperymencie.

Uwaga: wszystkie dane podano na podstawie informacji uzyskanych od producentów kamer.

Ponieważ celem eksperymentu było tylko porównanie jakości korekcji winietowania dla różnych modeli, jako obraz wejściowy dla każdej kamery wykorzystano obraz achromatyczny

$$I_V = 0,299\overline{R} + 0,587\overline{G} + 0,114\overline{B},\tag{10}$$

gdzie \overline{R} , \overline{G} , \overline{B} są poszczególnym kanałami barwnymi obrazu \overline{I}_V uzyskanego dla danej kamery. Parametry ekspozycji dla każdej kamery zostały ustawione automatycznie dla pierwszego obrazu w serii i zachowane podczas akwizycji wszystkich pozostałych obrazów z tej kamery. W celu eliminacji ewentualnego wpływu otoczenia na wyniki eksperymentu akwizycja wszystkich obrazów została przeprowadzona w ciemni.

W eksperymencie porównano cztery modele winietowania, tj.: wielomianowy model 2D (ang. *Polynomial 2D*, P2D) [3, 19], wielomianowy model radialny (ang. *Ra-dial Polynomial*, RP) [4, 8], model SLP [2, 13] i model SNILP [2]. Dla modelu SLP wyniki korekcji wyznaczono dla k = 25 iteracji. Dla wszystkich modeli stosowano różne stopnie wielomianów aproksymujących $s \in \{2, ..., 10\}$. Pełniejsze informacje na temat warunków przeprowadzenia eksperymentu zawiera praca [2].

4.2. Wyniki eksperymentu i ich dyskusja

Na rysunku 2 przedstawiono w pseudokolorach uzyskane dla poszczególnych kamer obrazy I_V . Liczbowe wyniki eksperymentu w postaci wartości STD (\tilde{I}_{flat}) oraz IQR (\tilde{I}_{flat}) przedstawiono w tabelach 2 i 3. Dodatkowo, na rysunku 3 przedstawiono



Rys. 2. Porównanie pozyskanych obrazów I_V ; w celach ilustracyjnych obrazy przedstawione są w peseudokolorach i po normalizacji zapewniającej, że $\max(I_V) = 1$.

porównanie obrazów I_V w znormalizowanym zakresie (0, 1], a także wyznaczonych estymat winietowania \widetilde{V} , a na rysunku 4 przedstawiono efekty korekcji w postaci obrazów \widetilde{I}_{flat} ; wszystkie wyniki prezentowane na rysunkach 3 i 4 otrzymano dla s = 10.

Porównanie otrzymanych wartości STD (\tilde{I}_{flat})

Tabela 2

Tabela 3

				-	-		('	, ,		
Camera	Model	Stopień s wielomianu aproksymującego								
	1120401	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сам-А	P2D	0,483	0,480	0,393	0,337	0,293	0,284	0,275	0,268	0,258
	RP	0,618	0,618	0,586	0,586	0,584	0,584	0,583	0,583	0,581
	SLP	0,449	0,439	0,325	0,315	0,280	0,273	0,252	0,249	0,246
	SNILP	0,449	0,434	0,325	0,315	0,280	0,273	0,252	0,249	0,246
Сам-В	P2D	2,789	2,750	0,979	0,940	0,930	0,922	0,615	0,602	0,545
	RP	2,814	2,814	1,230	1,230	1,232	1,232	1,042	1,042	1,014
	SLP	2,262	2,228	0,927	0,922	0,682	0,667	0,530	0,518	0,497
	SNILP	2,262	2,228	0,927	0,922	0,682	0,667	0,530	0,518	0,497
Сам-С	P2D	2,080	1,899	1,728	1,695	0,881	0,822	0,706	0,686	0,579
	RP	2,876	2,876	2,654	2,654	2,282	2,282	2,251	2,251	2,250
	SLP	2,072	1,883	1,514	1,479	0,658	0,645	0,564	0,541	0,438
	SNILP	2,072	1,883	1,514	1,479	0,658	0,645	0,564	0,541	0,438

Uwaga: kolor tła komórek określa uszeregowanie, na podstawie wartości STD (\tilde{I}_{flat}), wyników korekcji winietowania uzyskanych dla poszczególnych kamer i stopni wielomianów od najlepszego (kolor ciemnoniebieski) do najgorszego (kolor ciemnoczerwony).

				-	-		- ()			
Camera	Model	Stopień s wielomianu aproksymującego								
	inouci	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сам-А	P2D	0,657	0,663	0,510	0,410	0,356	0,351	0,336	0,330	0,309
	RP	0,837	0,837	0,754	0,754	0,746	0,746	0,742	0,742	0,742
	SLP	0,616	0,576	0,397	0,382	0,348	0,341	0,299	0,295	0,290
	SNILP	0,616	0,576	0,397	0,382	0,348	0,341	0,299	0,295	0,290
Сам-В	P2D	2,744	2,607	1,246	1,183	1,099	1,082	0,680	0,685	0,669
	RP	2,868	2,868	1,610	1,610	1,608	1,608	1,307	1,307	1,312
	SLP	3,238	3,271	1,164	1,169	0,841	0,810	0,668	0,655	0,628
	SNILP	3,238	3,271	1,164	1,169	0,841	0,810	0,667	0,655	0,628
Сам-С	P2D	2,990	2,932	2,233	2,233	1,054	1,008	0,922	0,894	0,772
	RP	4,080	4,080	3,166	3,166	2,766	2,766	2,646	2,646	2,634
	SLP	2,882	2,844	2,180	2,182	0,861	0,846	0,742	0,718	0,585
	SNILP	2,882	2,844	2,180	2,182	0,861	0,846	0,742	0,718	0,585

Porównanie otrzymanych wartości IQR (\tilde{I}_{flat})

Uwaga: kolor tła komórek określa uszeregowanie, na podstawie wartości IQR (I_{flat}) , wyników korekcji winietowania uzyskanych dla poszczególnych kamer i stopni wielomianów od najlepszego (kolor ciemnoniebieski) do najgorszego (kolor ciemnoczerwony).

Porównując otrzymane wyniki można zauważyć, że poza wynikami dla miary IQR uzyskanymi z CAM-B dla $s \in \{2, 3\}$, kolejność uszeregowania uzyskanych wyników (niezależnie zastosowanej miary) jest taka sama, tj. najlepsze wyniki dają modele



Rys. 3. Znormalizowane obrazy I_V i estymaty winietowania \widetilde{V} otrzymane dla modeli winietowania wykorzystujących wielomiany aproksymujące o stopniu s = 10.

SLP i SNILP, nieco gorsze wyniki daje model P2D, a znacznie gorsze wyniki uzyskuje się z modelu RP. Warto zauważyć, że np. dla miary STD i $s \ge 4$ wyniki z modeli SNILP i SLP są zwykle co najmniej 2-krotnie lepsze niż wyniki uzyskane z modelu RP, który to model jest bardzo często stosowany w literaturze.

Miary STD i IQR pokazują zagregowane informacje o jakości korekcji. Dodatkowe informacje na temat efektywności modeli dostarczają wykresy z rysunku 4. Porównując wyniki otrzymane dla modeli SPL i SNILP z wynikami uzyskanymi dla modeli P2D i RP można zauważyć, że przestrzenna jednorodność rozrzutu wartości pikseli na



Rys. 4. Porównanie obrazów \tilde{I}_{flat} otrzymanych dla modeli winietowania wykorzystujących wielomiany aproksymujące o stopniu s = 10.

obrazach \tilde{I}_{flat} jest różna. Dla obrazów \tilde{I}_{flat} uzyskanych dla modeli SLP i SNILP rozrzut ich wartości jest bardziej jednorodny przestrzennie, co wskazuje — przy założeniu, że średnia wartość szumu kamer $\bar{\epsilon}_{cam} = 0$ — na dobre dopasowanie estymat \tilde{V} do obrazów wejściowych I_V . Zakładając, że obrazy I_{flat} zostały pozyskane prawidłowo, oznacza to, że estymaty \tilde{V} uzyskane z tych modeli dokładniej przybliżają rzeczywiste winietowanie V poszczególnych kamer. W przeciwieństwie do tych wyników, w obrazach \tilde{I}_{flat} uzyskanych z modeli P2D i RP istnieją regiony, w których nie jest zachowana jednorodność przestrzenna rozrzutu wartości. Dotyczy to zwłaszcza wyników uzyskanych dla CAM-B (rys. 4 b,e) i CAM-C (rys. 4 c,f). Występowanie takich obszarów na obrazach \tilde{I}_{flat} wskazuje na to, że otrzymane estymaty winietowania \tilde{V} nie są dokładnie dopasowane do rzeczywistych winietowań V badanych kamer. Na tej podstawie można stwierdzić, że dla tych kamer modele P2D i RP nie pozwalają na uzyskanie dobrych jakościowo korekcji winietowania.

5. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pokazują, że opisywany model SNILP przewyższa wcześniej opracowany model SLP. Porównanie natomiast wyników uzyskanych z modelu SNILP z wynikami uzyskanymi dla modeli P2D i RP pokazuje, że proponowany model zapewnia lepszą korekcję winietowania, w sensie miar STD i IQR, niż oba modele znane z literatury. Podsumowując przedstawione wyniki, można stwierdzić, że model SNILP to uniwersalny model winietowania i w tym sensie jest on podobny do modeli P2D i SLP — w porównaniu jednak do tych modeli, model SNILP wyróżnia się większą dokładnością wyznaczonej estymaty \tilde{V} . Warto także zauważyć, że w porównaniu do zwykle używanego modelu RP model SNILP daje dla $s \ge 2$ lepsze, a dla $s \ge 4$ znacznie lepsze jakościowo wyniki i może być wykorzystany do korekcji winietowania praktycznie każdego systemu obiektyw-kamera, co nie zachodzi w przypadku modelu RP.

Jakość wyników korekcji winietowania nie jest jedynym kryterium, które należy brać pod uwagę przy wyborze modelu winietowania pod kątem konkretnego zastosowania. Pozostałe to m.in. złożoność obliczeniowa (wpływająca na szybkością obliczeń) i wymagany rozmiar pamięci (ograniczający maksymalny rozmiar obrazów, dla których dany model może być zastosowany w systemie o ograniczonych zasobach sprzętowych).

W przypadku modelu SNILP, w porównaniu do pozostałych analizowanych modeli, charakteryzuje się on mniejszą złożonością obliczeniową — wskazują na to mediany czasów obliczeń (tab. 4). Prezentowane wyniki pokazują, że model SNILP już dla

Tabela 4

Rozmiar obrazu	Wielkość obrazu	Nazwa formatu obrazu	Mediana czasu obliczeń [s]				
[Mpx]			P2D	RP	SLP	SNILP	
320×240	0,08	QVGA	0,03	0,02	0,10	0,01	
640×480	0,31	VGA	0,11	0,06	1,43	0,14	
800×600	0,48	Super VGA	0,17	0,10	1,81	0,18	
1024×768	0,79	XGA	0,30	0,18	2,44	0,24	
1280×1024	1,31	SXGA	0,54	0,30	3,42	0,33	
1600×1200	1,92	UXGA	0,74	0,44	4,14	0,40	
1920×1080	2,07	HDV	0,80	0,48	4,43	0,43	
2048×1080	2,21	2K Digital Cinema	0,94	0,50	4,68	0,45	
3840×2160	8,29	4K UHDTV	3,36	2,10	11,70	1,14	
4096×2160	8,85	Canon PowerShot G9 X Mark II	3,78	2,18	12,22	1,19	
5472×3648	19,96	4K Digital Cinema	20,85	4,60	23,40	2,29	
7680×4320	33,18	8K UHDTV	61,03	8,43	34,21	3,35	
8688×5792	50,32	Canon EOS 5DS	158,97	17,48	52,16	5,10	

Czasy obliczeń testowanych modeli dla wybranych formatów obrazu i stopnia wielomianów aproksymujących s = 5.

Uwagi: dla każdego formatu obrazu kolor tła (od niebieskiego, przez jasnoniebieski, jasnoczerwony, do czerwonego) reprezentuje kolejność uszeregowania czasów obliczeń od najkrótszego do najdłuższego. Podane czasy są medianą z 10 pomiarów czasów dla każdego formatu obrazu i modelu; dla modelu SLP przyjęto liczbę iteracji k = 10. Pomiary przeprowadzono na komputerze z procesorem AMD Ryzen 7 3800X, 16 GB RAM, dyskiem SSD M.2 PCIe NVMe, obliczenia prowadzono w środowisku MATLAB. Dodatkowe informacje przedstawiono w pracy [2] obrazów o rozdzielczości równej lub większej niż 1600×1200 jest modelem pozwalającym najszybciej znaleźć estymatę winietowania, a różnica w czasach obliczeń pomiędzy modelem SNILP a kolejnym pod względem szybkości modelem, czyli RP, rośnie wraz ze wzrostem rozdzielczości obrazu. Co więcej, model SNILP ma również mniejsze wymagania związane z pamięcią [2] — pozwala to na stosowanie tego modelu w systemach o ograniczonych zasobach sprzętowych. Jest to szczególnie ważne w przypadku systemów obliczeniowych stosowanych np. w: inteligentnych kamerach i czujnikach, wbudowanych systemach wizyjnych, pojazdach bezzałogowych (dronach).

Modele winietowania prezentowane do tej pory w literaturze można podzielić na dwie grupy: *modele uniwersalne* (np. model P2D), w których zastosowanie nie ogranicza się do określonego rodzaju winietowania, ale ich zastosowanie wymaga stosunkowo dużej mocy obliczeniowej i *modele dedykowane* (np. model RP), które mają stosunkowo niskie zapotrzebowanie na moc obliczeniową, jednak możliwości ich użycia są ograniczone. Nie było zatem do tej pory modelu, który łączyłby uniwersalność jego aplikacji z niską złożonością obliczeniową. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że opisany model SNILP spełnia te wymagania.

Podziękowania

Praca powstała przy wsparciu finansowym MEiN dla Politechniki Śląskiej w ramach grantów badawczych 02/070/BK_21/0022 i 02/070/BK_22/0035.

LITERATURA

- 1. Alomran M., Chai D.: Feature-based panoramic image stitching. In Proceedings of the 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Phuket, Thailand, 13–15 November 2016, pp. 1–6.
- 2. Bal, A., Palus, H.: A smooth non-iterative local polynomial (SNILP) model of image vignetting. Sensors, 21(21):7086, 2021.
- 3. Brady M., Legge G.E.: Camera calibration for natural image studies and vision research. J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis., 26(1), 2009, pp. 30–42.
- 4. Burt P. J., Adelson E. H.: A multiresolution spline with application to image mosaics. ACM Trans. Graph. TOG, 2(4), 1983, pp. 217–236.
- Chen C., Pan J., Wang M., Zhu Y.: Side-slither data-based vignetting correction of high-resolution. Spaceborne Camera with Optical Focal Plane Assembly. Sensors, 18(10):3402, 2018.
- 6. Cao H., Gu X., Wei X., Yu, T., Zhang H.: Lookup table approach for radiometric calibration of miniaturized multispectral camera mounted on an unmanned aerial vehicle. Remote Sens., 12(24):4012, 2020.
- 7. Cauwerts C., Bodart M., Deneyer A.: Comparison of the vignetting effects of two identical fisheye lenses. Leukos, 8(3), 2012, pp. 181–203.
- 8. Goldman D. B.: Vignette and exposure calibration and compensation. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 32(12), 2010, pp. 2276–2288.

- 9. Hakala T., Suomalainen J., Peltoniemi J. I.: Acquisition of bidirectional reflectance factor dataset using a micro unmanned aerial vehicle and a consumer camera. Remote Sens., 2(3), 2010, pp. 819–832.
- 10. Kim S. J., Pollefeys M.: Robust radiometric calibration and vignetting correction. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 30(4), 2008, pp. 562–576.
- 11. Kordecki A., Palus H., Bal A.: Practical vignetting correction method for digital camera with measurement of surface luminance distribution. Signal Image Video Process., 10(8), 2016, pp. 1417–1424.
- Kordecki A., Bal A., Palus, H.: Local polynomial model: a new approach to vignetting correction. In Proc. SPIE 10341, Ninth International Conference on Machine Vision (ICMV 2016), 10341, 2017, pp. 463–467.
- Kordecki A., Bal A., Palus H.: A smooth local polynomial model of vignetting. In Proceedings of the 2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, Poland, 28–31 August 2017, pp. 878–882.
- 14. Leong F. J., Brady M., McGee J. O.: Correction of uneven illumination (vignetting) in digital microscopy images. J. Clin. Pathol., 56, 2003, pp. 619–621.
- 15. Mignard-Debise L., Ihrke I.: A vignetting model for light field cameras with an application to light field microscopy. IEEE Trans. Comput. Imaging, 5(4), 2019, pp. 585–595.
- Park S. E., Kim J. G., Hegazy, M. A. A., Cho M. H., Lee S. Y.: A flat-field correction method for photon-counting-detector-based micro-CT. Proc. SPIE 9033, Medical Imaging 2014: Physics of Medical Imaging, 9033, 2014, pp. 1536–1542.
- 17. Piccinini F., Lucarelli E., Gherardi A., Bevilacqua A.: Multi-image based method to correct vignetting effect in light microscopy images. J. Microsc., 248(1), 2012, pp. 6–22.
- 18. Piccinini F., Bevilacqua A.: Colour vignetting correction for microscopy image mosaics used for quantitative analyses. Biomed Res. Int., 2018:7082154, 2018.
- 19. Sawchuk, A. A.: Real-Time Correction of intensity nonlinearities in imaging systems. IEEE Trans. Comput., 26(1), 1977, pp. 34–39.
- 20. Wagdy A., Garcia-Hansen V., Isoardi G., Pham K.: A parametric method for remapping and calibrating fisheye images for glare analysis. Buildings, 9(10):219, 2019.
- 21. Willson R. G., Shafer S. A.: What is the center of the image? J. Opt. Soc. Am. A, 11(1), 1994, pp. 2946–2955.
- 22. Yu, W.: Practical anti-vignetting methods for digital cameras. IEEE Trans. Consum. Electron., 50(4), 2004, pp. 975–983.