

Artur Bal, Henryk Palus
Politechnika Śląska

KOREKCJA WINIETOWANIA OBRAZÓW CYFROWYCH Z WYKORZYSTANIEM DEFORMOWALNEGO WIELOMIANOWEGO MODELU RADIALNEGO

Streszczenie. Korekcja winietowania często bazuje na wielomianowym modelu radialnym (RP), który zakłada idealną symetrię kołową tego zjawiska. W artykule przedstawiono deformowalny wielomianowy model radialny (DRP) winietowania. Dzięki zastosowaniu transformacji odległości łączy on prostotę modelu RP z wszechstronnością bardziej złożonych modeli. Eksperymenty na rzeczywistych danych potwierdzają, że model DRP poprawia skuteczność korekcji (w zależności od miary zastosowanej do oceny) nawet o ponad 50% w porównaniu ze standardowym modelem RP.

DIGITAL IMAGE VIGNETTING CORRECTION WITH THE USE OF A DEFORMABLE RADIAL POLYNOMIAL MODEL

Summary. Image vignetting correction often relies on the Radial Polynomial (RP) model, which assumes the ideal circular symmetry of this phenomenon. This article presents the Deformable Radial Polynomial (DRP) vignetting model. By utilising a distance transformation, it combines the simplicity of the RP model with the versatility of more complex models. Real-data experiments confirm that, depending on the measure used for evaluation, the DRP model improves correction effectiveness by over 50% compared to the standard RP model.

1. Wprowadzenie

Winietowanie obrazu to zjawisko polegające na redukcji jasności obrazu, postępującej od jego środka optycznego w kierunku krawędzi. Charakterystyka winietowania występującego w konkretnym obrazie zależy od parametrów zastosowanego układu obiektyw-kamera oraz ustawionych parametrów jego akwizycji. Należy zaznaczyć, że z punktu widzenia większości zastosowań winietowanie jest zjawiskiem niepożądanym.

Występowanie tego efektu jest szczególnie niekorzystne, gdy zachodzi potrzeba przeprowadzenia radiometrycznej lub ilościowej analizy obrazów. Taki wymóg jest powszechny w wielu dziedzinach, m.in. w astronomii [19], mikroskopii [15, 24] i tele-detekcji [6, 16]. Zjawisko to jest także niepożądane w przypadku stosowania algorytmów fotografii obliczeniowej, takich jak tworzenie obrazów o dużej rozpiętości tonalnej (HDR) [23], łączenie obrazów w celu otrzymania obrazów panoramicznych [11] lub mozaikowych [18]. Winietowanie wpływa również na rezultaty analizy obrazów, w tym także na wyniki uzyskiwane przy użyciu sieci neuronowych [20].

Najlepszym sposobem na ograniczenie wpływu winietowania jest dążenie do eliminacji jego przyczyn. Cel ten można osiągnąć np. poprzez zastosowanie obiektywu o odpowiedniej charakterystyce oraz dobór właściwych parametrów ekspozycji na etapie akwizycji obrazów. W praktyce jednak takie działania nie zawsze są możliwe lub mogą nie przynieść spodziewanych rezultatów. W takich przypadkach rozwiązania sprzętowe muszą być wspierane przez obliczeniowe metody korekcji winietowania.

Na przestrzeni lat w literaturze zaprezentowano wiele różnych podejść do problemu korekcji winietowania. Metody te można zasadniczo podzielić na dwie grupy:

- metody, które nie wykorzystują obrazów referencyjnych,
- metody, w których takie dane są wykorzystywane.

W praktyce przemysłowej i wszędzie tam, gdzie wymagana jest możliwie duża dokładność, stosowane są metody należące do drugiej grupy.

W kontekście korekcji winietowania często przyjmuje się założenie, iż winietowanie ma symetrię kołową, co oznacza, że możliwe jest jego efektywne modelowanie z wykorzystaniem funkcji radialnych, często w postaci wielomianowych funkcji radialnych (ang. *Radial Polynomials*, RP), czyli takich, których wartość zależy od odległości analizowanego piksela $p(i, j)$ od przyjętego początku układu współrzędnych C . Stosowanie tego założenia znacznie upraszcza proces estymacji winietowania — problem ten, który zdefiniowany jest w dziedzinie 2D (wynikającej z operowania na współrzędnych (i, j) pikseli obrazu), sprowadza się do problemu 1D, tzn. do dziedziny odległości r analizowanego piksela od przyjętego środka C układu. Pomimo atrakcyjności tego rozwiązania, jego stosowanie często stanowi nadmierne uproszczenie w stosunku do rzeczywistych właściwości wykorzystywanych układów obiektyw-kamera. W praktyce bowiem, ze względu na niedoskonałości optyczne, brak idealnej współosiowości elementów obiektywu, mikroskopijne przesunięcia matrycy, a także celowe zabiegi konstrukcyjne, zjawisko winietowania rzadko wykazuje idealną symetrię kołową.

Próbą połączenia tych sprzecznych wymagań jest prezentowane w niniejszej pracy rozwiązanie w postaci deformowalnego wielomianowego radialnego modelu winietowania (ang. *Deformable Radial Polynomial Model*, DRP). Rozwiązanie to łączy małą złożoność modelu RP i relatywnie niski nakład obliczeniowy potrzebny do jego wyznaczenia z wymaganiem dokładniejszej estymacji rzeczywistego winietowania, charakteryzującego stosowane w praktyce systemy obrazowania. Model ten po raz pierwszy został przedstawiony przez autorów niniejszego artykułu w pracy [4]; niniejszy artykuł stanowi jego skondensowaną wersję, wzbogaconą o wybrane aspekty.

W dalszej części artykułu, w rozdziale 2, przedstawiono ogólną ideę stosowania obliczeniowych metod korekcji winietowania obrazów (w tym także ideę modelu RP). Na tym tle w rozdziale 3 opisano model DRP. W rozdziale 4 przedstawiono natomiast wyniki porównania wybranych modeli winietowania z modelem DRP wraz z ich dyskusją. Ostatni, 5., rozdział stanowi podsumowanie artykułu.

2. Obliczeniowa korekcja winietowania

2.1. Sformułowanie problemu

Tak jak wcześniej wspomniano, w przypadku konieczności przeprowadzenia możliwie dokładnej korekcji winietowania, stosowane są metody wymagające użycia

obrazów referencyjnych. W praktyce metody te sprowadzają się do wykorzystania idei „korekcji płaskiego pola” (ang. *flat-field correction*).

W tym podejściu rzeczywiste winietowanie V występujące w obrazie I jest estymowane na podstawie referencyjnego obrazu winietowania I_V , który przedstawia równomiernie oświetloną płaską powierzchnię o jednolitej barwie i właściwościach możliwie zbliżonych do powierzchni lambertowskiej [8, 22]. Zakłada się, że głównym źródłem różnic jasności w I_V jest winietowanie V zastosowanego układu obiektyw-kamera; ponieważ jednak obraz ten jest rejestrowany przez rzeczywisty system, zawiera on również szum. Proces powstawania obrazu I_V opisuje wzór

$$I_V(i, j) = V(i, j) \cdot I_{\text{flat}}(i, j) + \varepsilon(i, j), \quad (1)$$

gdzie $V(i, j) \in (0, 1]$ to rzeczywiste winietowanie analizowanego układu obiektyw-kamera dla piksela o współrzędnych (i, j) , przy czym 1 oznacza brak winietowania, a 0 oznacza całkowite zablokowanie światła, I_{flat} to idealny obraz sceny z płaską powierzchnią odniesienia, $\varepsilon(i, j)$ to szum, a (i, j) to odpowiednio poziome i pionowe współrzędne analizowanego piksela.

Ze względu na obecność szumu, estymatę winietowania $\hat{V}$ obrazu I_V wyznacza się w procesie aproksymacji $\text{approx}(\cdot)$, przy użyciu przyjętego modelu winietowania VM o parametrach $\mathbf{p}$, co opisuje zależność:

$$\hat{V}(i, j) = \text{approx} \left(\text{VM}(\mathbf{p}), I_V(i, j) \right), \quad (2)$$

gdzie $\hat{V}(i, j) \in (0, 1]$. Skorygowany obraz $\tilde{I}$ wyznacza się ze wzoru:

$$\tilde{I}(i, j) = I_V(i, j) \cdot \hat{V}(i, j)^{-1}. \quad (3)$$

W celu uzyskania najlepszych wyników korekcji, obrazy I_V oraz I powinny być rejestrowane przy użyciu tego samego układu obiektyw-kamera, przy zachowaniu identycznych parametrów tego układu (np. ogniskowej w przypadku obiektywów zmienneogniskowych) i parametrów ekspozycji (np. wartości liczby przysłony). Ponadto, dla osiągnięcia optymalnych efektów, procedura ta powinna być poprzedzona korekcją ciemnej klatki (ang. *dark frame correction*). Kamera użyta do pozyskania obrazów I_V i I powinna mieć liniową charakterystykę odpowiedzi (ang. *camera response function*, CRF), a w przypadku jej braku, należy przeprowadzić linearyzację obu obrazów na podstawie uprzednio wyznaczonej krzywej CRF tej kamery. W przypadku kamer barwnych operacje te najlepiej przeprowadzić niezależnie dla każdego kanału barwnego obrazu (tzn. R, G i B) [13, 17]. Często jednak stosowane jest rozwiązanie polegające na wspólnej korekcji winietowania dla wszystkich trzech kanałów barwnych obrazu [9, 10, 28].

Uzyskanie odpowiedniej jakości estymacji winietowania $\hat{V}$, a tym samym wysokiej jakości korekcji, sprowadza się w opisywanym podejściu do wyboru odpowiedniego modelu VM oraz jego parametrów $\mathbf{p}$. Kryterium doboru powinno brać pod uwagę właściwości rzeczywistego winietowania występującego w analizowanym układzie obiektyw-kamera oraz wymagania dotyczące dokładności estymacji. Literatura przedmiotu oferuje duży wybór modeli zarówno parametrycznych [3, 9, 10, 12, 21], jak i nieparametrycznych [5, 7, 21].

2.2. Radialne modele winietowania

Przykładem modeli parametrycznych są radialne modele winietowania. W modelach tych problem aproksymacji 2D, którym de facto jest problem estymacji winieto-

wania, jest sprowadzany do problemu aproksymacji 1D dzięki zastosowaniu przekształcenia

$$r = \sqrt{(i - x_C)^2 + (j - y_C)^2}, \quad (4)$$

gdzie r jest odległością między pikselem o współrzędnych (i, j) a środkiem optycznym C obrazu o współrzędnych (x_C, y_C) .

W dużym uproszczeniu można przyjąć, że środek optyczny C obrazu pokrywa się z jego środkiem geometrycznym. Jednak ze względu na niedokładności związane z procesem wytwarzania, takie podejście prowadzi do powstawania błędów. Z tego względu współrzędne środka optycznego powinny być każdorazowo wyznaczone przy użyciu odpowiednich metod obliczeniowych [25, 27].

W literaturze można spotkać co najmniej kilka propozycji modeli winietowania zakładających radialność tego zjawiska, takich jak modele bazujące np. na prawie $\cos^4$ opisującym naturalne winietowanie [2], funkcji Gaussa [14], czy cosinusie hiperbolicznym [26]. Najpopularniejszym rozwiązaniem jest jednak wielomianowy model radialny

$$\hat{V}(r) = 1 + \sum_{k=1}^s a_k r^k, \quad (5)$$

gdzie a_k to współczynniki wielomianu tworzące wektor parametrów $\mathbf{p} = [a_1, a_2, \dots, a_s]$ modelu, a s to stopień wielomianu. Często, ze względu na zachowanie gładkości funkcji $\hat{V}$ dla $r = 0$, stosuje się wielomiany zawierające jedynie parzyste potęgi, tzn.

$$\hat{V}(r) = 1 + \sum_{k=1}^s a_k r^{2k}. \quad (6)$$

Parametry wielomianu radialnego, zarówno w postaci określonej równaniem (5), jak i (6), wyznaczone są najczęściej z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów (MNK). O popularności modelu RP może świadczyć fakt, że wielomian radialny w postaci (6) dla $s = 10$ jest stosowany w standardzie cyfrowego negatywu (ang. *Digital Negative*, DNG), wprowadzonym przez firmę Adobe [1]. W literaturze jednak często spotyka się ograniczenie stopnia wielomianu do $s = 6$.

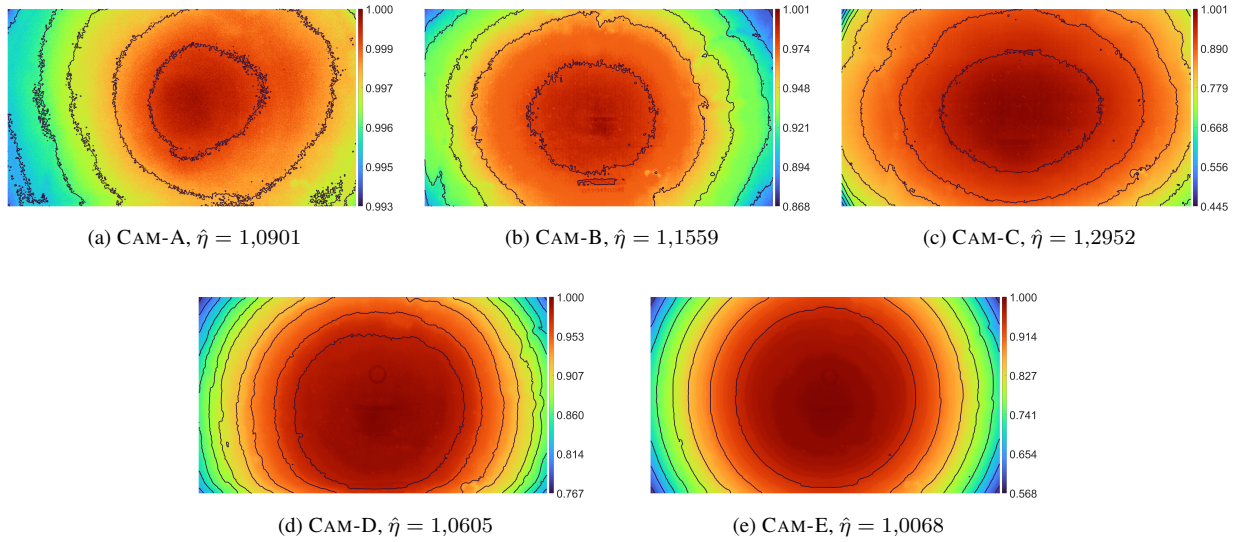
3. Model DRP

Jak już wcześniej wspomniano, w rzeczywistych systemach obrazowania winietowanie zwykle nie wykazuje symetrii kołowej, która pozwalałaby na zastosowanie radialnych modeli winietowania. W praktyce zjawisko to znacznie częściej przypomina „ściśniętą” funkcję radialną. Efekt ten można zaobserwować na rysunku 1, który przedstawia winietowanie przykładowych rzeczywistych systemów obrazowania.

Z tej obserwacji wywodzi się kluczowa idea modelu DRP. Polega ona na wprowadzeniu do wzoru (4) współczynnika η , który modyfikuje wpływ odległości w poszczególnych kierunkach na ostateczną wartość r . Efektem tej modyfikacji jest zastosowanie w modelu DRP następującego przekształcenia:

$$r_\eta = \sqrt{(i - x_C)^2 + (\eta(j - y_C))^2}, \quad (7)$$

gdzie współczynnik η można traktować jako miarę efektywnej nieradialności winietowania. Dla układu o idealnie radialnym winietowaniu $\eta = 1$, natomiast dla winietowania



Rys. 1. Porównanie kształtów winietowania dla kamer CAM-A–CAM-E. Wartość $\hat{\eta}$ stanowi miarę efektywnej nieradialności winietowania poszczególnych systemów obrazowania — im większa wartość $|\hat{\eta} - 1|$, tym stopień tej nieradialności jest wyższy. Wyniki przedstawiono dla obrazów I_V po normalizacji do zakresu $(0, 1]$.

nieradialnego $\eta \neq 1$ — przykładowo, dla $\eta > 1$ winietowanie w kierunku pionowym (y) jest silniejsze niż w kierunku poziomym (x). Znając wartości r_η dla wszystkich pikseli obrazu, można dokonać transformacji wartości I_V z kartezjańskiego układu współrzędnych 2D do układu 1D i zapisać je jako zmienną pomocniczą $v_{r_\eta}(i, j)$.

Aby wyznaczyć estymatę winietowania $\hat{V}$ dla analizowanego systemu obrazowania, wartość η należy wyznaczyć numerycznie. Dla danych współrzędnych (x_C, y_C) środka optycznego obrazu można to zrealizować, rozwiązując następujące zadanie optymalizacji nieliniowej:

$$\hat{\eta} = \arg \min_{\eta} \left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(v_{r_\eta}(i, j) - \text{approx} \left(\text{VM}(\mathbf{p}), r_\eta(i, j) \right) \right)^2 \right), \quad (8)$$

gdzie $M \times N$ to rozdzielczość analizowanego obrazu I_V , a jako model winietowania VM można wykorzystać modele wielomianowe określone wzorami (5) oraz (6), a ich parametry $\mathbf{p}$ można wyznaczyć, stosując MNK. Następnie, na podstawie parametrów $\hat{\mathbf{p}}$ uzyskanych z aproksymacji $\text{approx} \left(\text{VM}(\mathbf{p}), r_\eta(i, j) \right)$ dla optymalnego $\hat{\eta}$, obliczana jest wstępna estymata winietowania $\tilde{V}$.

Ponieważ akwizycja obrazu I_V powinna być przeprowadzona w taki sposób, aby w pozyskanym obrazie nie zachodziło zjawisko nasycenia, obraz ten musi spełniać warunek $\max(I_V) < 1$ (przy założeniu, iż wartości pikseli są reprezentowane w znormalizowanym przedziale $[0, 1]$). W efekcie otrzymana estymata $\tilde{V}$ również spełnia warunek $\max(\tilde{V}) < 1$. W konsekwencji użycie takiej wstępnej estymaty prowadzi do uzyskania obrazów o obniżonej jasności. Stąd konieczna jest normalizacja zakresu $\tilde{V}$ do przedziału $(0, 1]$, która realizowana jest zgodnie ze wzorem:

$$\hat{V}(i, j) := \frac{\tilde{V}(i, j)}{\max_{i,j} (\tilde{V}(i, j))}, \quad (9)$$

gdzie $:=$ jest operatorem przypisania. Otrzymana w ten sposób macierz $\hat{V}$ jest końcowym wynikiem estymacji winietowania za pomocą modelu DRP.

W opisanym algorytmie współrzędne punktu C muszą być znane lub przynajmniej oszacowane przed użyciem modelu DRP. Współrzędne te można także estymować łącznie z parametrem η — w tym celu należy rozwiązać następujący wielowymiarowy problem minimalizacji nieliniowej:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x}_C, \hat{y}_C \\ \hat{\eta} \end{bmatrix} = \arg \min_{\begin{bmatrix} x_C, y_C \\ \eta \end{bmatrix}} & \left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(v_{r[x_C, y_C]}(i, j) + \right. \right. \\ & \left. \left. - \text{approx} \left(\text{VM}(\mathbf{p}), r_{[x_C, y_C]}(i, j) \right) \right)^2 \right). \quad (10) \end{aligned}$$

Końcowa wartość $\hat{V}$ obliczana jest analogicznie jak w poprzednim wariancie modelu DRP — uzyskane wartości $\hat{\eta}$ oraz $(\hat{x}_C, \hat{y}_C)$ służą do określenia parametrów $\hat{\mathbf{p}}$ zastosowanego wielomianu. Na tej podstawie obliczana jest wstępna estymata $\tilde{V}$, która jest następnie normalizowana zgodnie ze wzorem (9), dając w efekcie końcową estymatę winietowania $\hat{V}$. Schemat blokowy tak realizowanej estymacji $\hat{V}$ z wykorzystaniem modelu DRP przedstawiono na rysunku 2.

Wiele metod optymalizacji wymaga podania wartości inicjalizujących, pozwalających na start procedury optymalizacyjnej. W przypadku estymacji winietowania jako wartości startowe można przyjąć, że położenie środka optycznego C pokrywa się ze środkiem geometrycznym obrazu, tzn. $(x_C, y_C) = (\frac{1}{2}M, \frac{1}{2}N)$, a samo winietowanie ma idealną symetrię kołową, tj. $\eta = 1$.

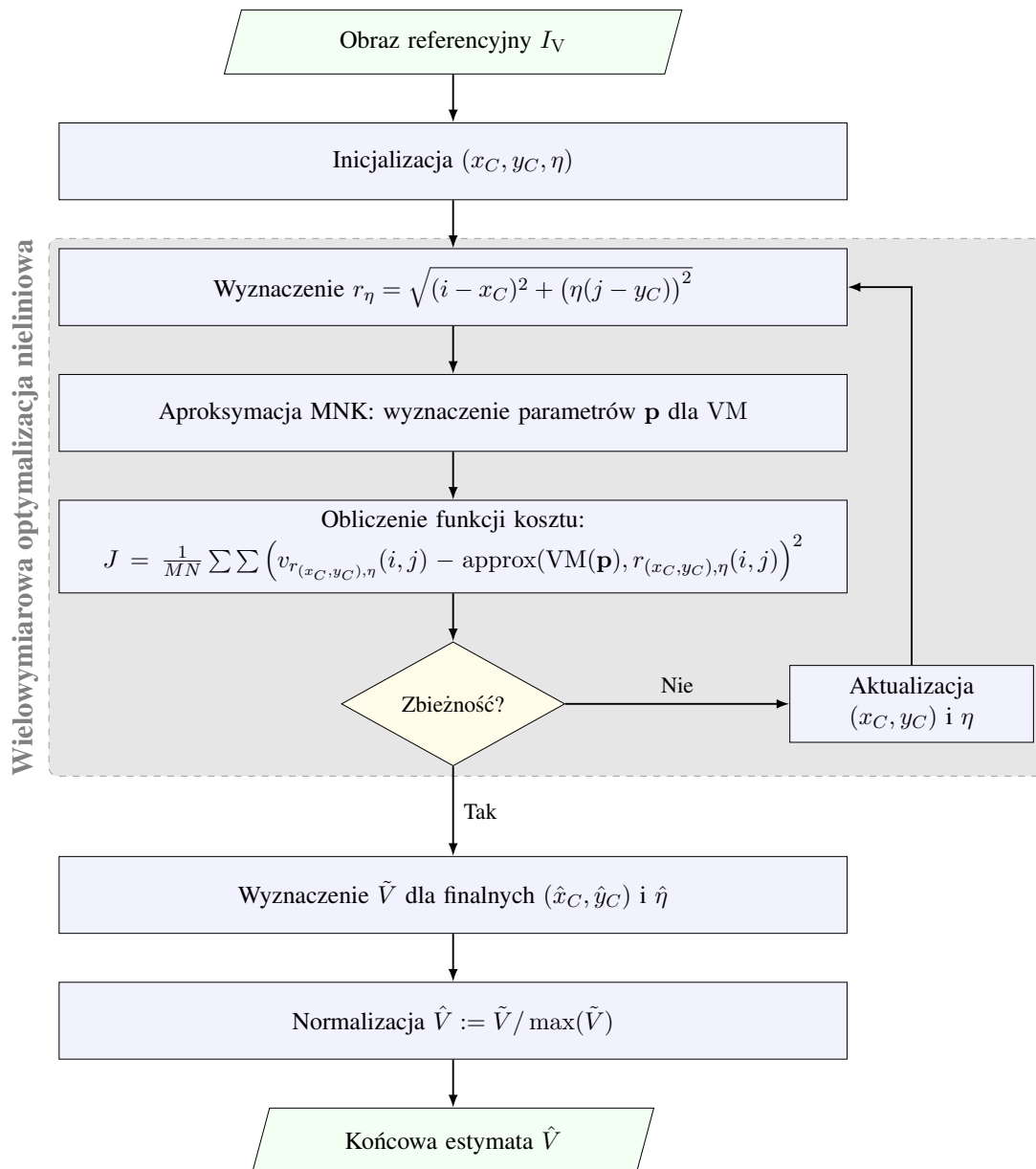
4. Eksperymentalne porównanie wybranych modeli winietowania

4.1. Założenia i warunki eksperymentu

Celem eksperymentu było porównanie, na rzeczywistych danych, wpływu wprowadzenia współczynnika η (odpowiadającego za deformację funkcji radialnej) na jakość korekcji winietowania. Wyniki uzyskane dla modelu DRP zostały zestawione z wynikami klasycznego wielomianowego modelu radialnego (RP) oraz bardziej zaawansowanych modeli, jakimi są wielomianowy model 2D (P2D) [9] oraz gładki nieiteracyjny lokalnie wielomianowy model winietowania (ang. *Smooth Non-Iterative Local Polynomial*, SNILP) [3]. Wszystkie modele porównano dla różnych stopni s ich wielomianów, tj. $s \in \{2, \dots, 10\}$.

Dane wykorzystane w eksperymencie pozyskano za pomocą pięciu kamer reprezentujących cztery modele konstrukcyjne (w jednym przypadku wykorzystano dwa egzemplarze tego samego modelu): Microsoft LifeCam Studio, Logitech C920, Hama C-600 Pro oraz Xiaomi IMILAB CMSXJ22A. W dalszej części pracy kamery te oznaczono, odpowiednio, od CAM-A do CAM-E. Wykorzystane kamery dobrano tak, aby różniły się parametrami, w szczególności polem widzenia oraz stopniem zniekształceń geometrycznych (porównanie podstawowych danych technicznych zawiera tabela 1).

Szczegółowy opis zastosowanej procedury akwizycji obrazów testowych przedstawiono w pracy [4]. W efekcie uzyskano pięć achromatycznych obrazów I_V — przed-



Rys. 2. Schemat blokowy modelu DRP — wariant ze zintegrowaną estymacją parametru $\hat{\eta}$ oraz współrzędnych $(\hat{x}_C, \hat{y}_C)$ środka optycznego C .

stawiono je na rysunku 1. Dla ułatwienia porównania obrazy zaprezentowano po normalizacji do zakresu $(0, 1]$, w pseudokolorach oraz z naniesionymi poziomiami.

Jakość estymacji winietowania oceniono na podstawie wyników korekcji otrzymanych przy zastosowaniu badanych modeli, tj. obrazów

$$\tilde{I}_{\text{flat}} = I_V \cdot \hat{V}^{-1} \quad (11)$$

będących wynikiem korekcji obrazów I_V (pozyskanych poszczególnymi kamerami) z wykorzystaniem estymat $\hat{V}$ wyznaczonych przy użyciu porównywanych modeli.

W idealnym przypadku wszystkie piksele obrazu $\tilde{I}_{\text{flat}}$ powinny mieć jednakową wartość. W przypadku danych rzeczywistych taki idealny wynik jest nieosiągalny, m.in. z powodu obecności szumu ϵ w obrazie wejściowym I_V . Zatem w przypadku prawi-



Rys. 3. Kamery wykorzystane w eksperymencie, od lewej: Microsoft LifeCam Studio (CAM-A), Logitech C920 (CAM-B), Hama C-600 Pro (CAM-C) oraz dwie kamery Xiaomi IMILAB CMSXJ22A (CAM-D i CAM-E).

Tabela 1

Podstawowe dane techniczne kamer użytych w eksperymencie

Parametr	Kamera			
	CAM-A	CAM-B	CAM-C	CAM-D& E
	Microsoft LifeCam Studio	Logitech C920	Hama C-600 Pro	Xiaomi IMILAB CMSXJ22A
Kąt widzenia (przekątna)	75°	78°	90°	85°
Rozdzielczość maks. [piksele]	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080
Liczba kl./s	30	30	30	30
Tryb ostrości	Auto	Auto	Auto	Stały
Zakres ostrości	> 10 cm	brak danych	brak danych	> 60 cm

dłowo przeprowadzonej estymacji winietowania, piksele w obrazie $\tilde{I}_{\text{flat}}$ powinny mieć zbliżone wartości, a zatem rozrzut (dyspersja) ich wartości powinien być minimalny.

Dobrymi miarami dyspersji wartości są odchylenie standardowe (STD) oraz rozstęp międzykwartyłowy (IQR) i właśnie te miary wykorzystano do ilościowej oceny wyników korekcji winietowania. Mniejsze wartości $\text{STD}(\tilde{I}_{\text{flat}})$ oraz $\text{IQR}(\tilde{I}_{\text{flat}})$ świadczą o lepszym dopasowaniu analizowanego modelu do charakterystyki winietowania.

4.2. Wyniki i ich dyskusja

W tabelach 2 oraz 3 przedstawiono wartości miar, odpowiednio, STD i IQR uzyskane w wyniku eksperymentu. Dla zachowania czytelności tabel przedstawiono w nich jedynie wyniki dla parzystych wartości s . Wizualne porównanie wyników estymacji winietowania przedstawiono na rysunku 4.

Wyniki eksperymentu jednoznacznie wskazują, że zastosowanie współczynnika η , wprowadzającego deformację do modelu radialnego, znacząco poprawiło jakość estymacji w stosunku do wyjściowego modelu radialnego. Poprawa jakości korekcji wynikająca ze stosowania modelu DRP względem RP przekracza 35% dla miary STD oraz 55% dla IQR (w obu przypadkach tak duża poprawa zachodzi dla CAM-C przy $s = 10$).

Tabela 2

Porównanie uzyskanych wartości STD ($I_V \hat{V}^{-1}$)

Kamera STD (I_V)	Model	Stopień wielomianu s				
		2	4	6	8	10
CAM-A 0,3028	RP	0,0553	0,0549	0,0547	0,0545	0,0544
	DRP	0,0541	0,0536	0,0533	0,0531	0,0530
	P2D	0,0606	0,0440	0,0402	0,0371	0,0346
	SNILP	0,0540	0,0410	0,0377	0,0349	0,0337
CAM-B 3,7551	RP	0,5630	0,5628	0,5331	0,5068	0,5010
	DRP	0,4549	0,4542	0,4167	0,3676	0,3547
	P2D	0,4533	0,4201	0,4005	0,3732	0,3523
	SNILP	0,4314	0,4143	0,3729	0,3340	0,2962
CAM-C 7,0446	RP	2,1317	1,8248	1,7242	1,6778	1,6740
	DRP	1,4452	1,2568	1,1424	1,0922	1,0852
	P2D	1,4144	1,2487	0,9663	0,7063	0,5633
	SNILP	1,3209	1,0207	0,6955	0,5582	0,4813
CAM-D 9,9096	RP	0,9308	0,8641	0,8217	0,7927	0,7933
	DRP	0,8267	0,7860	0,7434	0,7105	0,7087
	P2D	1,3315	0,6429	0,5923	0,4956	0,4396
	SNILP	1,1475	0,6123	0,5263	0,4284	0,4079
CAM-E 20,2225	RP	1,4106	1,0615	0,8295	0,8090	0,7364
	DRP	1,3534	1,0451	0,8198	0,7968	0,7297
	P2D	2,8814	1,0042	0,9913	0,6750	0,6339
	SNILP	2,1547	0,9763	0,7148	0,6072	0,5926
UWAGI: i) dla poszczególnych kombinacji kamera–stopień wielomianu s , kolor tła wskazuje kolejność (rangę) wyniku dla konkretnego modelu najgorszy najlepszy ii) pogrubiona czcionka wskazuje najlepszy, w sensie STD ($\hat{I}_{\text{flat}}$), wynik aproksymacji uzyskany dla kombinacji kamera–model.						

Ogólnie, stopień korekcji winietowania uzyskany przy zastosowaniu modelu DRP jest uzależniony m.in. od wartości efektywnej nieradialności winietowania $\hat{\eta}$ oraz intensywności winietowania, którą można przybliżyć parametrem

$$\nu = \min(I_V) \cdot \max(I_V)^{-1}, \quad (12)$$

przy czym mniejsza wartość ν oznacza bardziej intensywne winietowanie. W przypadku CAM-C współczynniki te wynoszą odpowiednio 1,295 oraz 0,445 (rys. 1c) i przyjmują największe wartości spośród wszystkich testowanych kamer.

Model DRP okazuje się lepszy od modelu RP także w przypadku układów obrazowania, w których winietowanie jest w praktyce radialne ($\hat{\eta} = 1,0068$ dla CAM-E) — w tym przypadku dla $s = 2$ poprawa jakości korekcji mierzona miarą STD wynosi ponad 4%. Dla większych wartości s przewaga DRP nad RP maleje, aż do ok. 1% dla $s = 10$, niemniej uzyskane wyniki wskazują, że w sensie miary STD dla dowolnej kamery i wartości s model DRP jest zawsze lepszy niż model RP.

W przypadku miary IQR relacja ta jest zachowana z wyjątkiem jednego przypadku, tj. estymacji winietowania dla CAM-E przy $s = 2$. Jest to jedyna sytuacja, w której model RP okazał się lepszy od modelu DRP (o prawie 2%). Należy jednak pamiętać, że

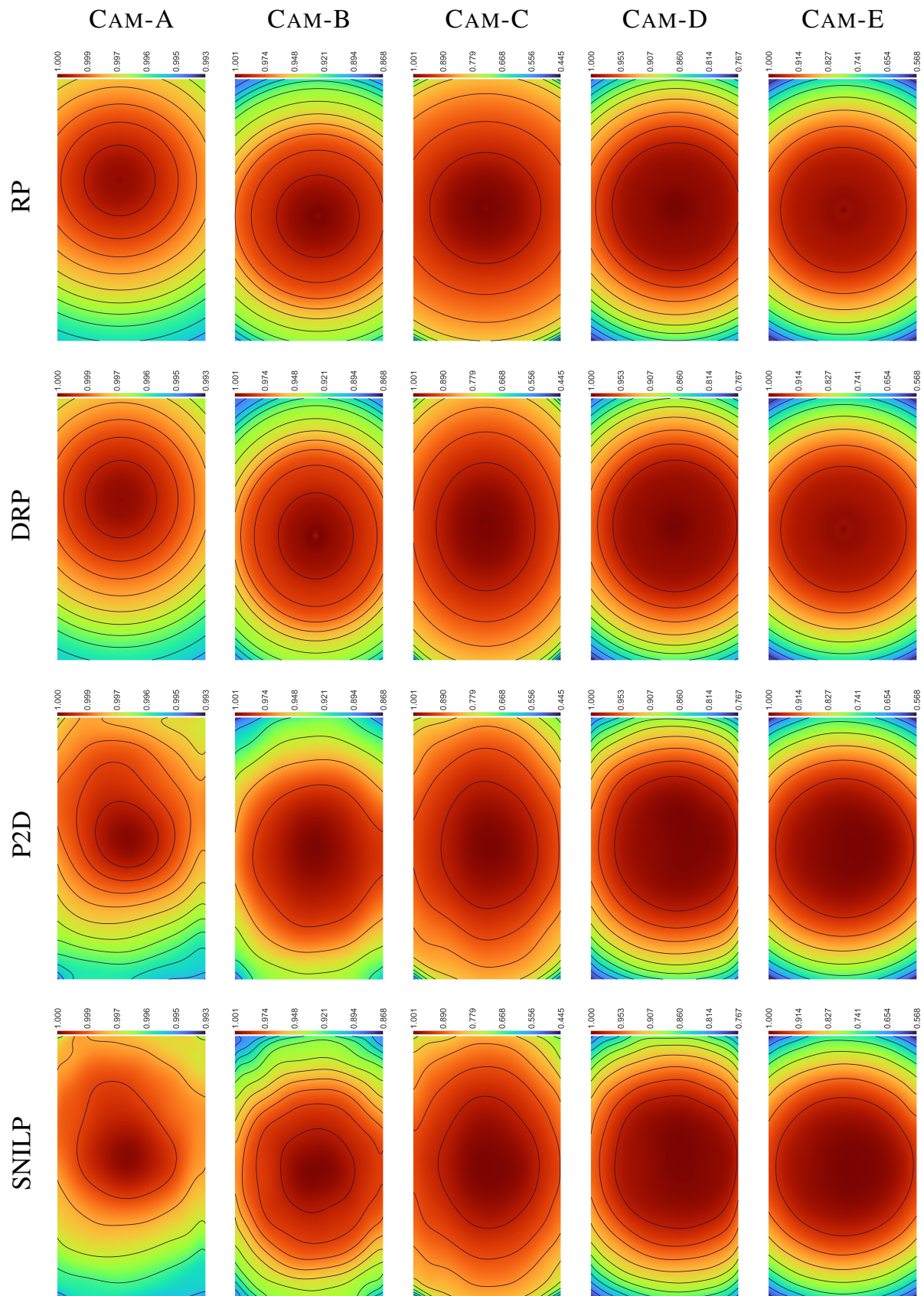
Tabela 3

Porównanie uzyskanych wartości IQR ($I_V \hat{V}^{-1}$)

Kamera IQR (I_V)	Model	Stopień wielomianu s				
		2	4	6	8	10
CAM-A 0,3985	RP	0,0704	0,0694	0,0698	0,0702	0,0702
	DRP	0,0690	0,0680	0,0681	0,0682	0,0683
	P2D	0,0749	0,0572	0,0522	0,0456	0,0431
	SNILP	0,0700	0,0540	0,0478	0,0436	0,0419
CAM-B 5,8670	RP	0,6843	0,6816	0,6503	0,6116	0,5952
	DRP	0,5943	0,5777	0,4994	0,4328	0,3961
	P2D	0,6065	0,5519	0,5194	0,4880	0,4437
	SNILP	0,5670	0,5524	0,4817	0,4199	0,3571
CAM-C 10,1281	RP	2,4640	2,2521	2,2693	2,1490	2,1480
	DRP	1,0903	1,1127	1,0709	1,0261	1,0192
	P2D	1,1020	0,8716	0,7357	0,6468	0,5950
	SNILP	1,0439	0,7671	0,6204	0,5807	0,5346
CAM-D 15,1372	RP	1,0876	1,1192	0,9727	0,9402	0,9505
	DRP	1,0375	1,1042	0,9302	0,8785	0,8871
	P2D	1,6181	0,9089	0,8626	0,6245	0,5837
	SNILP	1,7324	0,8850	0,7243	0,5549	0,5315
CAM-E 31,6573	RP	1,1565	1,2452	0,9915	1,0004	0,9216
	DRP	1,1773	1,2219	0,9797	0,9916	0,9102
	P2D	2,4993	1,3367	1,2036	0,8063	0,8022
	SNILP	3,1473	1,2073	0,9066	0,7716	0,7560
UWAGI: i) dla poszczególnych kombinacji kamera–stopień wielomianu s , kolor tła wskazuje kolejność (rangę) wyniku dla konkretnego modelu najgorszy najlepszy ii) pogrubiona czcionka wskazuje najlepszy, w sensie IQR ($\tilde{I}_{\text{flat}}$), wynik aproksymacji uzyskany dla kombinacji kamera–model.						

dla tych samych warunków wynik miary STD dla modelu DRP był o ponad 4% lepszy niż dla RP. Warto zauważyć, że w przypadku gdy wartość miary IQR ma decydujące znaczenie w procesie wyboru modelu, istnieje możliwość modyfikacji stosowanego kryterium jakości J (rys. 2) tak, aby to minimalizacja rozstępu międzykwartylowego stanowiła cel optymalizacji.

W porównaniu z bardziej złożonymi modelami, takimi jak P2D lub SNILP, model DRP dla $s \geq 4$ wykazuje ogólnie gorszą jakość korekcji. Jednak dla niektórych kamer (tj. CAM-C, a zwłaszcza CAM-B) przejście z modelu DRP na model P2D, a w przypadku CAM-C nawet na model SNILP, nie daje znaczącej poprawy dokładności estymacji, przy jednoczesnym znaczącym wzroście jakości estymacji obserwowanym przy przejściu z modelu RP na DRP. W przypadku tych dwóch kamer efektywna nieradialność winietowania jest stosunkowo duża — wynosi bowiem $\hat{\eta} \approx 1,15$ dla CAM-B i $\hat{\eta} \approx 1,3$ dla CAM-C — a samo winietowanie cechuje się dobrą symetrią punktową. Wprowadzenie zatem do modelu DRP możliwości deformacji modelu radialnego pozwoliło na względnie dobre przybliżenie charakterystyk winietowania tych kamer.



Rys. 4. Porównanie wyników estymacji winietowania $\hat{V}$ dla porównywanych modeli i testowanych kamer uzyskane dla $s = 10$.

Należy zauważyć, że dokładniejsza estymacja winietowania dostarczana przez bardziej złożone modele jest okupiona stosunkowo dużym wzrostem ich złożoności i związanym z nim znaczącym zwiększeniem liczby parametrów. Jednak w niektórych przypadkach model DRP (będący modelem relatywnie prostym) daje lepsze efekty niż bardziej złożony model P2D. Taka sytuacja zachodzi np. dla miary STD i CAM-B przy $s = 8$ oraz CAM-E przy $s = 6$, a w przypadku miary IQR do tej grupy dochodzi jeszcze przypadek CAM-B przy $s = 6$. Co więcej, dla $s = 2$ model DRP pozwala uzyskać najlepsze wyniki korekcji — tak jest w przypadku kamer CAM-D i CAM-E dla miary STD oraz CAM-A i CAM-D dla miary IQR.

5. Podsumowanie

Celem opracowania modelu DRP była poprawa zdolności adaptacyjnych modelu RP kosztem możliwie najmniejszego zwiększenia jego złożoności. Model DRP wykorzystuje tylko jeden parametr więcej niż model RP, lecz pozwala na uzyskanie znacznej poprawy jakości estymacji winietowania. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że w odpowiednich warunkach możliwe jest uzyskanie poprawy wyników nawet o ponad 30% (w przypadku oceny za pomocą miary STD), a w przypadku stosowania miary IQR poprawa ta jest jeszcze wyraźniejsza i sięga ponad 50%. Ten ostatni wynik jest o tyle ważny, że miara IQR odzwierciedla jakość korekcji uzyskanej w obrębie centralnej — a więc zazwyczaj najistotniejszej z punktu widzenia celu akwizycji — części obrazu, która obejmuje połowę jego pikseli.

Co ważne, skuteczność modelu DRP rośnie wraz ze wzrostem intensywności winietowania ν i zwiększaniem się efektywnej nieradialności winietowania η . Ta własność, w połączeniu z małą złożonością modelu i względną prostotą estymacji jego parametrów, predestynuje go do stosowania w systemach wbudowanych (ang. *embedded systems*). W tego typu rozwiązaniach często stosowane są układy obrazowania o niższej jakości, a ich moc obliczeniowa jest znacznie ograniczona. Z tego względu model DRP może stanowić użyteczny element wstępnego przetwarzania danych obrazowych na urządzeniach końcowych w ramach paradygmatu przetwarzania brzegowego (ang. *edge computing*), znajdując zastosowanie m.in. w robotyce mobilnej, bezzałogowych statkach powietrznych czy wreszcie w rozproszonych systemach wizyjnych.

Innym interesującym obszarem zastosowań modelu DRP są algorytmy, w których konieczne jest przyjęcie określonych założeń co do postaci winietowania — przykładem takich algorytmów są rozwiązania do korekcji winietowania bez znajomości obrazów referencyjnych [28, 27]. Możliwość odejścia w tych rozwiązaniach od bardzo restrykcyjnego modelu radialnego na rzecz modelu o większej elastyczności, bez konieczności wprowadzania istotnych zmian w samych algorytmach, wydaje się obiecującym kierunkiem przyszłych badań. Warto również zauważyć, że podejście wykorzystane w modelu DRP można z powodzeniem zastosować do dowolnego, niekoniecznie wielomianowego, modelu radialnego. Przykładem takich modeli w kontekście estymacji winietowania są modele proponowane m.in. w pracach [2, 14, 26].

Podziękowania

Praca powstała przy wsparciu finansowym MNiSzW dla Politechniki Śląskiej w ramach grantów badawczych 02/070/BK_22/0035 oraz 02/070/BK_26/0077.

LITERATURA

1. Adobe Inc., Digital Negative (DNG) Specification, Version 1.7.1.0 Sept. 2023.
2. Asada N., Amano A., Baba M.: Photometric calibration of zoom lens systems. *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*, 1996, p. 186–190.
3. Bal A., Palus H.: A Smooth Non-Iterative Local Polynomial (SNILP) model of image vignetting. *Sensors*, Oct. 2021, Vol.21(21).
4. Bal A., Palus H.: Image vignetting correction using a deformable radial polynomial model. *Sensors*, 2023, Vol.23(3).
5. Bal A., Palus H.: Automatic tuning of Gaussian filter for image vignetting correction. *Sensors*, 2026, Vol.26(9).
6. Bedrich K., Bokalič M., Bliss M., Topič M., Betts T. R., Gottschalg R.: Electroluminescence imaging of PV devices: Advanced vignetting calibration. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, Vol.8(5), p. 1297–1304.
7. Cao H., Gu X., Zhang M., Zhang H., Chen X.: Vignetting correction based on a two-dimensional Gaussian filter with harmony for area array sensors. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2022, Vol.8, p. 576–584.
8. Forsyth D. A., Ponce J.: *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson 2nd edition 2011.
9. Goldman D. B.: Vignette and exposure calibration and compensation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, Vol.32, p. 2276–2288.
10. Kim S. J., Pollefeys M.: Robust radiometric calibration and vignetting correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, Vol.30(4), p. 562–576.
11. Kinzig C., Feng G., Granero M., Stiller C.: Real-time vignetting compensation and exposure correction for panoramic images by optimizing irradiance consistency. *tm — Technisches Messen*, 2023, Vol.90(7-8), p. 435–444.
12. Kordecki A., Palus H., Bal A.: Practical vignetting correction method for digital camera with measurement of surface luminance distribution. *Signal, Image and Video Processing*, 2016, Vol.10(8), p. 1417–1424.
13. Lebourgeois V., Bégué A., Labbé S., Mallavan B., Prévot L., Roux B.: Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. *Sensors*, 2008, Vol.8(11), p. 7300–7322.
14. Leong F. J. W.-M., Brady M., McGee J. O.: Correction of uneven illumination (vignetting) in digital microscopy images. *Journal of Clinical Pathology*, 2003, Vol.56(8), p. 619–621.
15. Mignard-Debise L., Ihrke I.: A vignetting model for light field cameras with an application to light field microscopy. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2019, Vol.5(4), p. 585–595.

16. Minařík R., Langhammer J., Hanuš J.: Radiometric and atmospheric corrections of multispectral μ MCA camera for UAV spectroscopy. *Remote Sensing*, 2019, Vol.11(20).
17. Olsen D., Dou C., Zhang X., Hu L., Kim H., Hildum E.: Radiometric calibration for AgCam. *Remote Sensing*, 2010, Vol.2(2), p. 464–477.
18. Piccinini F., Bevilacqua A.: Colour vignetting correction for microscopy image mosaics used for quantitative analyses. *BioMed Research International*, 2018, Vol.2018.
19. Rosario A. C., Dubbeldam C. M., Sharples R., Bourgenot C., Diaz R., Stephens A. W.: The HR image slicer for GNIRS at Gemini North: optical design and performance. Evans C. J., Bryant J. J., Motohara K., editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX*, 2022, p. 121840L.
20. Saad K., Schneider S.-A.: Camera vignetting model and its effects on deep neural networks for object detection. 2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2019, p. 1–5.
21. Sawchuk A. A.: Real-time correction of intensity nonlinearities in imaging systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, Vol.C-26, p. 34–39.
22. Szeliski R.: *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer 2nd edition 2022.
23. Wagdy A., Garcia-Hansen V., Isoardi G., Pham K.: A parametric method for remapping and calibrating fisheye images for glare analysis. *Buildings*, 2019, Vol.9(10).
24. Wang Y., Gu Y., Li X.: A novel low rank smooth flat-field correction algorithm for hyperspectral microscopy imaging. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2022, Vol.41(12), p. 3862–3872.
25. Willson R. G., Shafer S. A.: What is the center of the image? *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, Vol.11(11), p. 2946–2955.
26. Yu W.: Practical anti-vignetting methods for digital cameras. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Nov 2004, Vol.50(4), p. 975–983.
27. Zheng Y., Kambhamettu C., Lin S.: Single-image optical center estimation from vignetting and tangential gradient symmetry. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009, p. 2058–2065.
28. Zheng Y., Lin S., Kambhamettu C., Yu J., Kang S. B.: Single-image vignetting correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, Vol.31(12), p. 2243–2256.