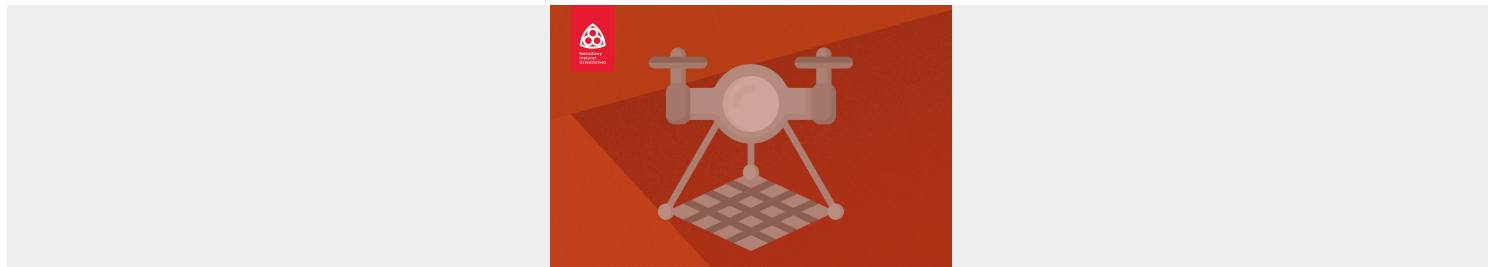


# CO TO ZNACZY „OSTRE”? – KRĄŻEK ROZPROSZENIA W KONTEKŚCIE FOTOGRAMETRII

Posted on 14 lipca 2025



Poniżej znajdziesz szczegółowe opracowanie dotyczące uzyskania odpowiedniej ostrości przy wykonywaniu zdjęć do fotogrametrii oraz sprawdzisz, jaka jest „prawdziwa” głębia ostrości dla Twojego zestawu aparat i obiektyw.

Kluczowe definicje:

**CoC (Circle of Confusion)** – krążek rozproszenia opisujący umowną średnicę plamki powstającej, gdy punkt sceny nie leży w płaszczyźnie ogniskowania. Odsunięcie od tej płaszczyzny powiększa CoC, a punkt „rozlewa się” na coraz więcej pikseli. Im mniejszy CoC względem wielkości piksela, tym większa lokalna ostrość i liczba wykrywanych cech w fotogrametrii. CoC rośnie z kwadratem odległości od płaszczyzny ostrości i liniowo z otworem względnym ( $f\text{stop}$ ).

**PSF (Point Spread Function)** – pełna funkcja rozmycia punktu obejmująca efekty dyfrakcji, defokusu (CoC) i aberracji optycznych. PSF opisuje, jak energia świetlna wychodząca z jednego punktu sceny jest rozkładana na matrycy. Szerokość pełnego PSF wpływa na obecność aliasingu i mory – im szerszy PSF, tym lepsze wygładzenie wysokich częstotliwości przestrzennych (mniej aliasingu), ale mniejsza ostrość najwyższych detali (niższe MTF).

Poniżej znajdziesz szczegółowe opracowanie dotyczące **uzyskania odpowiedniej ostrości** przy wykonywaniu zdjęć do fotogrametrii oraz sposób, w jaki możesz sprawdzić nominalną głębnię ostrości według przyjętej wartości CoC dla swojego zestawu (aparat + obiektyw).

Światło dociera do matrycy przez cały **układ optyczny** – soczewki, przysłonę, powłoki antyrefleksyjne, ewentualny filtr AA. To, jak bardzo pojedynczy punkt sceny „rozleje się” na piksele, opisuje funkcja rozmycia punktu (PSF, Point Spread Function). W warunkach idealnych PSF przyjmuje postać dyfrakcyjnego dysku Airy’ego, ale w praktyce powiększają go aberracje, mikro przesunięcia oraz defokus.

Gdy dany punkt leży dokładnie w płaszczyźnie ogniskowania, jego plamka jest najmniejsza; każde odsunięcie od tej płaszczyzny poszerza ją i tworzy krążek rozproszenia (CoC, circle of confusion). W fotografii portretowej szeroko otwierając przysłonę, celowo

pozwala się CoC urosnąć, żeby tło rozmyło się w estetyczny bokeh; w fotogrametrii chcemy czegoś przeciwnego – jak najdrobniejszej plamki i jednoznacznych krawędzi.

W teorii **obraz uchodzi za ostry**, gdy CoC jest tak mały, że ludzkie oko, patrząc na docelowy wydruk lub ekran, nie potrafi odróżnić plamki od punktu. Przyjmuje się wówczas, że wzrok rozdziela około  $1'$  (około  $\approx 0,0003$  rad), a wydruk będzie powiększony  $8-10\times$  i oglądany z odległości  $30-35$  cm. Z takiej konstrukcji wynika praktyczne, często spotykane w kalkulatorach DoF,  $CoC \approx 0,03$  mm dla pełnej klatki,  $\approx 0,02$  mm dla APS-C i  $\approx 0,015$  mm dla  $\mu 4/3$ . To dobry punkt wyjścia dla zwykłej fotografii – nie konieczne dla fotogrametrii.

Dlaczego? Bo programy Structure-from-Motion i Multi-View-Stereo pracują na natywnych pikselach. Testy pokazują, że już przy CoC (FWHM) większym niż  $1$  px liczba prawidłowo wykrywanych narożników i cech może spaść nawet o  $30-50\%$  przy pikselach  $\approx 4$   $\mu$ m a średni błąd reprojekcji rośnie.

Jednak **mała wartość CoC** to zaledwie połowa sukcesu.

Druga połowa to **szerokość pełnego PSF**. Jeśli całkowita plamka – dyfrakcja wraz z defokusem i aberracjami – nadal mieści się w około dwóch pikselach, obraz wygląda „żyłkowo”, bo wysokie częstotliwości dochodzą aż do granicy Nyquista. Ponieważ jednak ich energia nie zostaje całkiem wytłumiona, na regularnych detalach może pojawić się aliasing (mora). Aliasing zaczyna ustępować już przy  $PSF \approx 2-3$  px; wartości rzędu  $4-5$  px prawie całkowicie go likwidują, kosztem dalszej utraty MTF dla najwyższych częstotliwości. Dla pikseli  $4$   $\mu$ m odpowiada to przymknięciu w okolicy  $f/11-f/16$  na pełnej klatce albo  $f/8-f/11$  na APS-C.

Zgodnie z prawem Nyquista: żeby odtworzyć najdrobniejsze szczegóły, musimy próbować dwukrotnie szybciej niż wynosi ich częstotliwość przestrzenna. Oznacza to dwa piksele na pełny cykl sinusoidy – nie na średnicę pojedynczej plamki. Spełnienie warunku  $2$  px/cykl jest konieczne, lecz nie wystarczające; bez odpowiednio szerokiego PSF aliasing wciąż może się ujawnić.

Co się dzieje, gdy  $CoC \leq 2$  px, a PSF ma zaledwie  $\approx 2$  px (typowo: jasna przysłona  $f/4$  i brak filtra AA)? Na pierwszy rzut oka linie wydają się ostre, lecz na powtarzalnych teksturach – siatkach, dachówkach, tkaninach – pojawiają się barwne prążki aliasingu. W pipeline SfM spada liczba tie-points, a RMS błędu reprojekcji rośnie. Dzieje się tak dlatego, że artefakty aliasingu wprowadzają fałszywe krawędzie i regularne wzory, które tylko pozornie zwiększają kontrast; w praktyce maskują drobne detale i przesuwają lokalizację narożników. Na etapie SfM/MVS zniekształca to pola dopasowania, redukuje liczbę poprawnie zmatchowanych punktów i podnosi błąd reprojekcji, co bezpośrednio pogarsza dokładność końcowego modelu fotogrametrycznego.

### Co możesz wtedy zrobić?

- sposób właściwy - przymknąć przysłonę, aby dyfrakcja naturalnie poszerzyła PSF do  $\approx 4$  px.
- możliwe obejście - zastosować lekki filtr Gaussa  $0,5-0,7$  px przed eksportem – cyfrowy odpowiednik OLPF.
- możliwe obejście - downsampling  $2\times$  – zmniejszenie rozdzielczości usuwa częstotliwości powyżej Nyquista kosztem liczby pikseli.

Focus-stacking pomoże tylko na defokus (CoC); na morę nie działa.

**Powtórzymy:** samo  $CoC \approx 1 \text{ px}$  oznacza, że defokus nie rozmywa punktów bardziej niż jeden piksel, ale aliasing może się pojawić, jeśli PSF (dyfrakcja + defokus + aberracje) wciąż mieści się  $\approx 2 \text{ px}$  lub mniej. Dopiero przy  $PSF \approx 4-5 \text{ px}$  (dla pikseli  $\approx 4 \mu\text{m}$  odpowiada to  $f/11-f/16$  w pełnej klatce) aliasing praktycznie zanika, dlatego wiele systemów celuje w te wartości.

Każdy, kto fotografuje na potrzeby fotogrametrii, wie, jak trudne bywa uzyskanie wystarczającej głębi. Spełnienie wymogu  $CoC \approx 1 \text{ px}$  w całym kadrze bywa wyzwaniem.

Stąd  $CoC = 1 \text{ px}$  traktuje się jako kryterium maksymalistyczne. Jeżeli jednak zależy nam na wierności geometrii powierzchni, warto przyjąć  $CoC$  rzędu jednego piksela lub nieco większy, jeśli ryzyko aliasingu zostało już ograniczone dyfrakcją.

Reasumując min / max:

**Minimalny standard:** Zapewnij, że defokus ( $CoC$ ) nie przekracza wartości przyjętej w klasycznym kalkulatorze  $DoF - 0,03 \text{ mm}$  dla pełnej klatki,  $0,02 \text{ mm}$  dla APS-C itd. – oraz że cały obiekt w kadrze mieści się w wyliczonej głębi ostrości.

**Optymalna wierność geometryczna:** dąż do  $CoC \leq 1 \text{ px}$  i  $PSF \approx 2,5-3 \text{ px}$  – tłumisz aliasing przy Nyquistcie, zachowując jeszcze sporo MTF dla najwyższych detali.

**Pełne bezpieczeństwo przed aliasingiem:**  $PSF \geq 4 \text{ px}$ ; używaj, gdy scena ma bardzo regularne faktury lub algorytm SfM jest wrażliwy na morę (kosztem mikrodetalu).

W praktyce fotogrametrycznej uważa się, że zdjęcia są „bezpieczne”, gdy RMS/Mean reprojection error mieści się poniżej  $0,5 \text{ px}$ , a w zastosowaniach wysokoprecyzyjnych – poniżej  $0,3 \text{ px}$ .

-----

### Jak policzyć samodzielnie $CoC$ dla swojego zestawu aparat + obiektyw?

Tutaj znajdziesz [Kalkulator DOF alg v 2.3](#), w którym możesz sprawdzić, jaka jest „prawdziwa” głębia ostrości dla Twojego zestawu aparat + obiektyw przy  $CoC = 1 \text{ px}$ .

Wypróbuj trzy scenariusze:

-  $CoC = 1 \text{ px}$  – ostrość pikselowa.

-  $CoC \approx 2 \text{ px}$  – wpisz w polu pixel/pitch wartość podwojoną (np.  $0,0032 \text{ mm}$  i  $0,0064 \text{ mm}$ ) – luźniejsze kryterium.

-  $PSF \approx 5 \text{ px}$  – pomnóż pixel/pitch  $\times 5$ , aby zasymulować brak aliasingu.

Dzięki temu szybko porównasz, jak zmiana kryterium ostrości wpływa na głębię i czy konieczne jest zastosowanie focus stackingu.

Autor opracowania: Ryszard Zimek, NID / Dział Digitalizacji

### Proponowana bibliografia naukowa:

1. Webb E.K., Robson S., Evans R. (2020). Quantifying Depth of Field and Sharpness for Image-Based 3D Reconstruction of Heritage Objects. ISPRS Archives, XLIII-B2-2020, 911-918. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-911-2020> isprs-archives.copernicus.org

- Bezpośrednio analizuje wpływ DOF i ostrości na SfM/MVS w kontekście dziedzictwa.

2. James M.R., Robson S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117(F3). <https://doi.org/10.1029/2011JF002289> AGU Publications

- Klasyczna praca walidująca dokładność SfM – odniesienie do błędu reprojekcji.

3. Bragagnolo A. et al. (2022). The Influence of Image Properties on High-Detail SfM Photogrammetric Surveys of Complex Geometric Landforms. Remote Sensing, 14(15), 3528. <https://doi.org/10.3390/rs14153528> MDPI

- Nowsze badanie wpływu jakości obrazu (w tym nieostrości) na gęstość i precyzję chmury punktów.

4. Remondino F., El-Hakim S. (2006). Image-Based Surface Measurement for Close-Range Heritage Documentation. The Photogrammetric Record, 21(115), 269-291. ResearchGate

- Wciąż aktualny przegląd metod obrazowych w dokumentacji zabytków.

5. Remondino F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing, 3(6), 1104-1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104> MDPI

- Kompleksowe omówienie technik rejestracji i modeli 3D – dobry kontekst.

6. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. (2013). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter. ISBN 978-3110302691

-Podręcznik-fundament: geometria, błąd pomiaru, praktyka scan-to-mesh.

7. Hecht E. (2017). Optics (5th ed.). Pearson. ISBN 978-0133977226