

Zjawisko pozornego zwiększania się ostrości w miarę przymykania przysłony bardzo łatwo można zaobserwować na matówce dowolnej kamery. Pytanie, które czasem pozostaje bez odpowiedzi, to jak bardzo należy przymknąć przysłonę, by wszystko wydawało się ostre. W rozdziałach „Podstawy optyki” i „Przesuw, pokłon i obrót” zazaczyłem zaledwie temat. To tylko wierzchołek góry lodowej. Prawdziwej góry lodowej, bo bez matematyki tutaj już się nie obejdzie. Zdaję sobie sprawę, że rozdział ten przez to może być pomijany, ale ten kto to zrobi dostanie wyniki, na jakie sobie zasłuży niewiedzą i ignorancją. Szczególnie niepokojące fotografów informacje zawarłem w końcówce rozdziału „Przesuw, pokłon i obrót”. Nadeszła więc pora by rozwiązać wszystkie wątpliwości i pytania.

Głębina ostrości.

Czas więc na odstonę zjawiska nazywanego głębią ostrości. U jego podstaw leży projekcja trójwymiarowej przestrzeni obrazowej w dwuwymiarowy obszar filmu. Ponieważ wadą każdej projekcji są błędy, w tym przypadku błędem, który nas nie zachwyca, jest odwzorowanie punktów leżących poza płaszczyzną filmu jako nieostrych krążków, a dla znacznie od osi odchylonych promieni – elips. Winowajcą jest źrenica robocza obiektywu, czyli wartość przysłony. Z doświadczenia każdy sięga po obiektyw jak najjaśniejszy by móc fotografować w trudnych warunkach. Z tej samej przyczyny czułość filmów rośnie z pokolenia na pokolenie. Przymykanie przysłony powoduje pozorne wyostrzenie się obrazu. Pozorne, bo tak naprawdę zmniejszają się jedynie krążki rozproszenia. W momencie, gdy ich wielkość stanie się albo akceptowalna, albo mniejsza niż ziarno lub rozdzielczość materiału rejestrującego (może to być przecież matryca kamery cyfrowej), dalsze przymykanie przysłony nie ma już sensu. Pozostaje tylko próba odpowiedzi na pytanie, jaka jest akceptowalna wielkość krążka rozproszenia. Pokolenia fotografów wypracowały taką miarę, nie będą dociekał czy jest ona słuszna. Każdy ma swoją miarkę – własne oko. I tak:

Format negatywu lub diapozytywu	Przekątna [mm]	Jakość przeciętna	Jakość dobra	Jakość b. dobra	Jakość super
Film 35mm 24x36mm	43,267	0,043	0,029	0,022	0,014
Film zwojowy 6x4,5	69,701	0,070	0,046	0,035	0,023
Film zwojowy 6x6	79,196	0,079	0,053	0,040	0,026
Film zwojowy 6x7	88,091	0,088	0,059	0,044	0,029
Film zwojowy 6x8	96,021	0,096	0,064	0,048	0,032
Film zwojowy 6x9	104,307	0,104	0,070	0,052	0,035
Film zwojowy 6x12	138,798	0,139	0,093	0,069	0,046
Film arkuszowy 4x5"	153,052	0,153	0,102	0,077	0,051
Film arkuszowy 5x7"	210,060	0,210	0,140	0,105	0,070
Film arkuszowy 8x10"	310,788	0,311	0,207	0,155	0,104

Wartości zaznaczone na czerwono lub zbliżone podają poradniki fotografii.

Optymalną wielkością mogłaby być rozdzielczość materiału przy dużym kontraście. Dla materiałów średniczułych rozdzielczość mieści się w granicach od 120 do 320 linii/mm. Dla przykładu: Velvia – 160 l/mm (0,006 mm), Astia – 135 l/mm (0,007 mm), Technical Pan – 320 l/mm (0,003 mm), Tmax 100 – 200 l/mm (0,005 mm). Dojście do granicy materiału nie pozwala już nic poprawić. Mogłoby się jednak wtedy okazać, że brakuje skali przysłony, lub otwór przysłony jest tak mały, że następuje dyfrakcja światła zdecydowanie pogarszając rezultaty. Inny problem to względnie niska rozdzielczość optyki, głównie małoobrazkowej – najlepsze konstrukcje osiągają rozdzielczości 100–130 l/mm (100 l/mm oznacza krążek rozproszenia wielkości 0,01 mm). Współczesne obiektywy wielkoformatowe wykazują w tym względzie lepsze rezultaty. Niestety nie dotyczy to obiektywów serii „digital” do fotografii cyfrowej, ponieważ ich rozdzielczość jest „skrojona” na miarę matrycy, czyli zdecydowanie

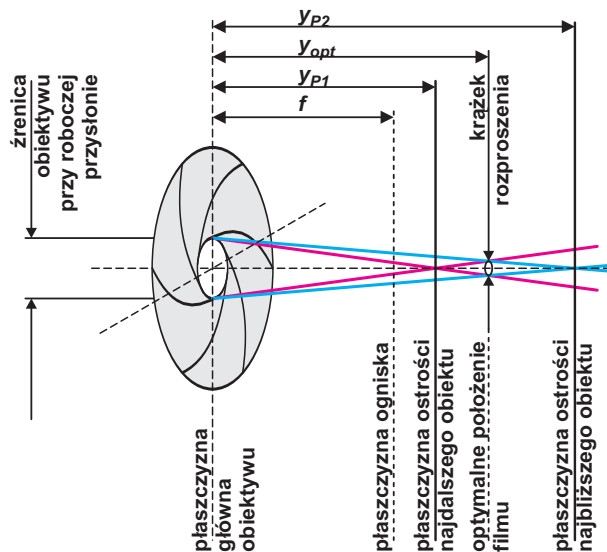
okrojona. Wykazują się za to bardzo dobrym przeniesieniem kontrastu (MTF). Innymi słowami są przeostrzone. Dla większości osób parających się fotografią (w odróżnieniu od fotografów) kontrast oznacza ostrość. Niestety to nie jest to samo. Podsumowując ostrość obrazu jest od góry ograniczona jasnością obiektywu, a od dołu taką wielkością przysłony, która nie powoduje dyfrakcji światła.

Zagadnienie głębi ostrości składa się z dwóch powiązanych ze sobą wielkości: optymalnej odległości obrazowej i (lub) przedmiotowej oraz optymalnego otworu przysłony. Punktem wyjścia do rozważań jest transformacja trójwymiarowej przestrzeni obrazowej w płaski obraz. Wynik tych rozważań „przefiltrowany przez równanie soczewki, które działa w obie strony pozwoli nam na ustalenie rzeczywistego rozkładu obszaru ostrości na obiekcie. Dokładniej obszaru, który skłonni jesteśmy uznać za ostro odwzorowany. Opis odwzorowania daje nam para równań:

$$\frac{1}{x_{P1}} + \frac{1}{y_{P1}} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{x_{P2}} + \frac{1}{y_{P2}} = \frac{1}{f}$$

Do rozważań przyjmijmy parę punktów jednakowo i nieznacznie odchylonych od osi optycznej soczewki. Łatwiej będzie nam rozpatrywać podobieństwa trójkątów. Tak naprawdę nie ma to żadnego znaczenia. W miarę wzrostu kąta odchylenia krążek rozproszenia przybiera kształt elipsy. Powoduje to „geometryczne” powiększenie się krążka rozproszenia. Z punktu widzenia obrazu objawia się to nieznacznym pogorszeniem ostrości w kierunku do brzegów obrazu. Znaczne pogorszenie wynika z nienajlepszego skorygowania szkła.



Rys. 1 Wyrównanie krążków rozproszenia obrazów dwóch punktów.

Punkt bardziej oddalony od obiektywu będzie tworzył po stronie obrazowej większy krążek rozproszenia. Wynika to z bardzo prostego zjawiska: przy tej samej podstawie stożka, a jest nim otwór przysłony, jego rozwartość jest funkcją wysokości. Im mniejsza wysokość tym większa rozwartość stożka. Wysokość stożka to dokładnie odległość obrazowa danego punktu. Nas jednak interesuje wpływ podstawy stożka na krążek rozproszenia. Z podobieństwa trójkątów otrzymujemy odpowiednie wzory. Jeżeli krążki rozproszenia dla obrazów obu punktów są takie same, położenie filmu jest optymalne i dzieli przestrzeń obrazową na dwie różne wielkości, za to jednakowo nieostre części.

$$\text{przysłona } \frac{y_{P2}}{f} = \frac{y_{P2} - y_{opt}}{kr_{P2}}$$

$$\text{przysłona } \frac{y_{P1}}{f} = \frac{y_{opt} - y_{P1}}{kr_{P1}}$$

Po podzieleniu wzorów stronami otrzymujemy:

$$\frac{y_{P2}}{y_{P1}} = \frac{y_{P2} - y_{opt}}{y_{opt} - y_{P1}}$$

$$y_{opt} = 2 \frac{y_{P1} y_{P2}}{y_{P1} + y_{P2}}$$

Równanie komplementarne dla odległości przedmiotowej jest idealnie symetryczne i wynika z transformacji przestrzeni przez równanie soczewki.

$$x_{opt} = 2 \frac{x_{P1} x_{P2}}{x_{P1} + x_{P2}}$$

Interpretacja równań zapisanych w tej postaci nie jest prosta. Jednak przekształcenie ich do postaci „analogicznej” z równaniem soczewki w sformułowaniu Gaussa daje nam zdecydowanie więcej informacji.

$$\frac{1}{x_{opt}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{P1}} + \frac{1}{x_{P2}} \right)$$

$$\frac{1}{y_{opt}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{y_{P1}} + \frac{1}{y_{P2}} \right)$$

Zadanie optymalnego ustawienia ostrości wygodnie jest rozbić na dwa odrębne zagadnienia.

1. Problem ustawienia optymalnej ostrości w kamerze sztywnej można sprowadzić do ustalenia ostrości po stronie przedmiotowej. Ze względu na krótkie ogniskowe trudno jest mierzyć niewielkie różnice wyciągu obiektywu. Znacznie wygodniej jest pomierzyć odległość aparatu (obiektywu) od skrajnych elementów planu zdjęciowego, tych które mają być odwzorowane jako „ostre”. Po wyliczeniu odległości optymalnej ustawiamy ostrość na tę odległość.
2. W kamerze wielkoformatowej opartej na ławie optycznej, przy stosunkowo długich ogniskowych obiektywów, o wiele łatwiej jest zmierzyć odległości obrazowe punktów skrajnych. Ostrząc na punkt dalszy a następnie na punkt bliższy mierzymy odległość pomiędzy ustawieniami standardów. Tę odległość traktujemy jako 100%. Wyliczenie optymalnego położenia filmu powinno dać procentowy podział tego odcinka.

Geometryczna rozpiętość planu zdjęciowego wyznacza dwie krańcowe wartości odległości przedmiotowej drugiego planu. Pierwszy przypadek graniczny występuje wtedy, gdy głębia ostrości ma sięgać do nieskończoności. Wtedy:

$$x_{P1} \rightarrow \infty$$

$$x_{opt} = 2x_{P2}$$

Tak więc odległość hiperfokalna, czyli taka jaką należy ustawić gdy dalszy z obiektów znajduje się w nieskończoności, jest dokładnie podwojoną odległością najbliższego obiektu. I to jest jedyny prawdziwy wzór, który wypracowały pokolenia fotografów w materii głębi ostrości. Drugi przypadek graniczny występuje, gdy odległość obu punktów zbliża się do siebie. Wtedy:

$$x_{p1} \rightarrow x_{p2}$$

$$x_{opt} = x_{p2}$$

Optymalna odległość przedmiotowa jest ZAWSZE zawarta pomiędzy pierwszym planem i podwojoną odległością pierwszego planu.

Problem pierwszy jest w zasadzie rozwiązany. Dotychczas podręczniki serwowały różne metody szacowania optymalnej odległości przedmiotowej:

1. średnią geometryczną odległości punktów skrajnych, oznacza to, że odległość optymalna jest pierwiastkiem iloczynu odległości punktów. Niestety nie jest to prawdziwe.
2. bardziej powszechny jest podział planu przez płaszczyznę optymalnej ostrości jak 1:2 – 1/3 przed odległością optymalną i 2/3 za nią. To stwierdzenie jest prawdziwe tylko w jednym przypadku, kiedy odległość drugiego planu jest dokładnie dwukrotnie większa od odległości pierwszego planu. Z taką sytuacją mamy do czynienia nie za często, więc ta „miara” również powinna znaleźć się pomiędzy bajkami
3. optymalna odległość obrazowa znajduje się w połowie pomiędzy skrajnymi położeniami płaszczyzny filmu ustawionymi dla ostrego odwzorowania najbliższego i najdalszego planu zdjęciowego. Jest to najczęściej praktykowana metoda w kamerach LF. Również należy do mitologii

Podejmowałem wiele prób uproszczenia tych wzorów. Niestety bezskutecznie. Taka postać jest najprostsza. I znów we wzorach nie ma ogniskowej. Dziwne. Prawda? Optymalna odległość przedmiotowa nie zależy od ogniskowej użytego obiektywu. Krążek rozproszenia tak. Zabierzmy się zatem do zagadnienia drugiego. Dotychczasowy stan wiedzy nakazywał ustawiać ostrość w połowie pomiędzy skrajnymi przeostrzeniami tylnego standardu. Problem, że coś jednak jest nie tak, zauważyła firma Sinar i podjęła próbę rozwiązania zagadnienia. W wydawnictwie „Sinar Info” nr XXX przedstawiono wzory, według których obliczenia dawały wyniki zarówno dodatnie jak ujemne. Niestety odległości w równaniu soczewki dodatniej w użytecznym obszarze jej pracy nie mogą dawać ujemnych wyników. Wzory te należy zatem odrzucić jako nieprawdziwe. Jeżeli odcinek wyznaczony skrajnymi położeniami płaszczyzny filmu przy ostrzeniu na najbliższy i najdalszy punkt przestrzeni przedmiotowej przyjmiemy za 100% to optymalne ustawienie płaszczyzny ostrości zawarte jest pomiędzy tymi położeniami. Zatem na tym odcinku położenie optymalne będzie odpowiadało ściśle określonej wartości procentowej. Nie może wyjść poza obustronnie domknięty zakres [0, 100%] a tak naprawdę [0, 50%]. Po przekształceniach otrzymujemy następujący wzór

$$OPT = \frac{y_{opt} - y_{P1}}{y_{P2} - y_{P1}} = \frac{y_{P1}}{y_{P1} + y_{P2}} = \frac{1}{1 + \frac{y_{P2}}{y_{P1}}} = \frac{1}{1 + \frac{f}{\frac{y_{P2}}{y_{P1}}}} = \frac{1}{1 + \frac{pow_{P2}}{pow_{P1}}}$$

W tym przypadku również możemy rozpatrzeć graniczne przypadki, kiedy głębokość planu zdjęciowego z jednej strony zbliża się do pierwszego planu a z drugiej sięga nieskończoności. W pierwszej sytuacji otrzymamy:

$$y_{P1} \rightarrow y_{P2}$$

$$OPT \rightarrow \frac{1}{2}$$

W sytuacji drugiej obraz punktu w nieskończoności znajdzie się dokładnie w ognisku soczewki. Wtedy:

$$y_{P1} = f$$

$$OPT = \frac{1}{1 + \frac{y_{P2}}{f}} = \frac{1}{pow_{P2} + 2} < \frac{1}{2}$$

Powyższy wzór jest może trochę zaskakujący, ale pozwala bardzo szybko oszacować przesunięcie standardu w przypadku gdy głębokość planu sięga do nieskończoności. Wystarczy zmierzyć skalę odwzorowania pierwszego planu. Dla obiektów o niedużej rozpiętości ustawienie w połowie przeostrzenia standardów mieści się w granicy tolerancji – przesunięcie jest ułankowo procentowe. Problem zaczyna się przy planach skrajnie rozległych, tych najtrudniejszych. Przesunięcie tylnego standardu może wynosić nawet kilkanaście procent od położenia środkowego. To jest dość dużo. W codziennej praktyce fotograficznej trzymam się żelaznej zasady: im trudniejsze zdjęcia tym mniejszy margines błędu na pomyłki i niedopatrzeń.

To jest pierwsza część zagadnienia głębi ostrości. Optymalne ustawienie ostrości. Druga część to optymalna przysłona. Warunkiem optymalnego położenia filmu jest zrównanie się krążków rozproszenia od punktów najdalszych i najbliższych obiektów. Zatem wystarczy policzyć jeden z nich. Z podobieństwa trójkątów otrzymujemy:

$$\frac{y_{opt} - y_{P1}}{kr} = \frac{y_{P1}}{średnica_robocza_obiektuwu} = \frac{przysłona}{ogniskowa} \times y_{P1}$$

$$P_{opt} = \frac{f}{kr} \times \left(\frac{y_{opt}}{y_{P1}} - 1 \right) = \frac{f}{kr} \times \frac{y_{P2} - y_{P1}}{y_{P1} + y_{P2}}$$

Przykład.

Kamera małoobrazkowa

Obiektyw 50 mm

Pierwszy plan w odległości 0,5m

Rozkład głębi ostrości będzie następujący:

Drugi plan [m]	Odległość ustawiona	Przysłona				Funkcja OPT[%]
		Jakość przeciętna	Jakość dobra	Jakość b. dobra	Jakość super	
1000,000	1,000	61,2	90,7	119,6	187,9	47,37
562,341	0,999	61,1	90,7	119,5	187,8	47,37
316,228	0,998	61,1	90,6	119,4	187,7	47,37
177,828	0,997	61,0	90,5	119,3	187,5	47,38
100,000	0,995	60,9	90,3	119,1	187,1	47,38
56,234	0,991	60,7	90,0	118,6	186,4	47,39
31,623	0,984	60,3	89,4	117,8	185,2	47,41
17,783	0,973	59,6	88,3	116,4	183,0	47,44
10,000	0,952	58,3	86,4	113,9	179,0	47,49
5,623	0,918	56,0	83,1	109,5	172,1	47,59
3,162	0,863	52,0	77,0	101,5	159,6	47,77
1,778	0,781	44,7	66,2	87,3	137,1	48,08
1,000	0,667	31,4	46,6	61,4	96,5	48,65
0,562	0,529	7,1	10,6	13,9	21,9	49,69

Jeden rzut oka na wartości przysłon od razu dyskwalifikuje kamerę sztywną do fotografowania planów o znacznej rozpiętości. W takiej sytuacji zdecydowanie najkorzystniej jest zastosować kamerę LF na szynie i kasetę na film zwojowy. Co do optyki wielkoformatowej to widywałem skale przysłon kończące się na 256 (!!!), a przysłona 64 jest raczej normą niż wybrykiem natury.

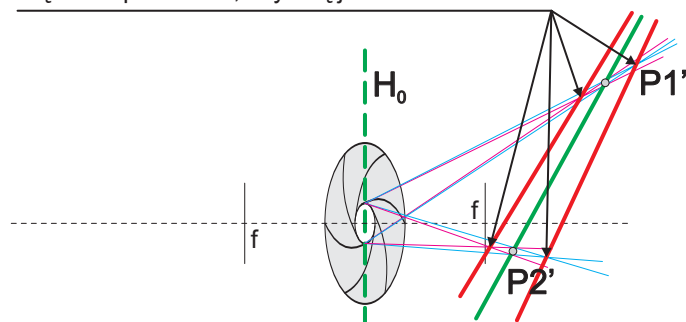
Podsumujmy dotychczasowe wyliczenia. Z dotychczas stosowanych środków wyznaczania pożądanej głębi ostrości zarówno skala głębi ostrości na obiektywach, jak i podział bieźni kamery wielkoformatowej przy skrajnych przeostrzeniach na połowy ma zastosowanie ograniczone do niewielkich głębi planu zdjęciowego. Plany o znaczącej głębi wymagają dokładnego wyliczenia albo korekty istniejących ustawień. Przyczyną jest uśrednianie arytmetyczne odwrotności odległości skrajnych. To wszystko dla równoległego położenia standardów. Dla ekstremalnie głębokich planów jedyną możliwością jest kamera wielkoformatowa ze znacznymi pokłonami obu standardów.

Głębina ostrości dla skręconych standardów.

A teraz podkreślamy piłeczkę (czytaj skręcamy standardy). Na początek, spróbujemy przeanalizować samo zjawisko bez zagłębiania się w skomplikowane wzory. Kiedy już będziemy wiedzieli o co tutaj chodzi wtedy wzory będą stanowiły tylko dodatek do rozumienia zjawiska. Kluczem do zrozumienia jest rozkład głębi ostrości. W kamery sztywnej było to proste: wszystkie płaszczyzny są do siebie równoległe i wyliczyć musimy tylko w jednym wymiarze. Przy skręconych standardach jeden wymiar nie wystarcza. Teoretycznie powinniśmy liczyć w trzech wymiarach, ale każde ustawienie standardów poprzez odpowiedni obrót całej kamery zawsze daje się sprowadzić do dwóch wymiarów. Chyba, że kamera jest rozjustowana.

Najprościej taką analizę zrobić chyba od kuchni. Jeżeli wyjdziemy od planu przedmiotowego, będzie to zgadywanie. Proponuję aby przeprowadzić najpierw konstrukcję geometryczną zaczynając od zagadnienia wyznaczenia płaszczyzn obrazów punktów, ale takich płaszczyzn, które dają na płaskim filmie jednakową nieostrość, czyli taki sam krążek rozproszenia. Przedstawia to rysunek 2. Dla celów ilustracji zarówno skręcenie płaszczyzn jak i „wielkość krążka rozproszenia” narysowałem przesadnie duże. Pozwoli to intuicyjnie zrozumieć istotę zjawiska. Na obliczenia przyjdzie czas.

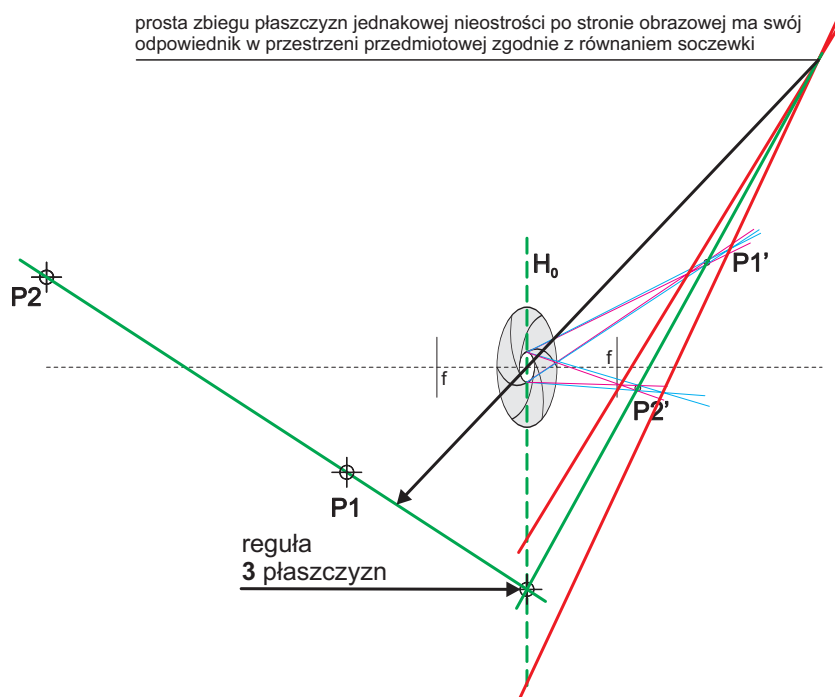
obrazy punktów przestrzeni przedmiotowej położone wzdłuż tych prostych dają takie same krążki rozproszenia, czyli są jednakowo nieostre



Rys. 2 Rozłożenie głębi ostrości po stronie obrazowej przy skręconych standardach

Zauważmy, że rysunek ten pokazuje od razu dwa zjawiska, o których milczą wszystkie uznane podręczniki, a większość firmowych materiałów producentów kamer LF wręcz pokazują je błędnie. Płaszczyzna H_0 i płaszczyzna filmu zbiegają się do prostej zgodnie z regułą 3 płaszczyzn¹. Niestety płaszczyzny jednakowej nieostrości na pewno wzdłuż tej samej prostej się nie przetną. Ponadto płaszczyzna filmu nie przebiega idealnie pośrodku pomiędzy tymi płaszczyznami, o czym była już mowa wcześniej. Poszerzmy zatem rysunek o dalsze elementy. Gdzie przetną się płaszczyzny jednakowej nieostrości? Jaki ostatecznie będzie rozkład ostrości po stronie przedmiotowej?

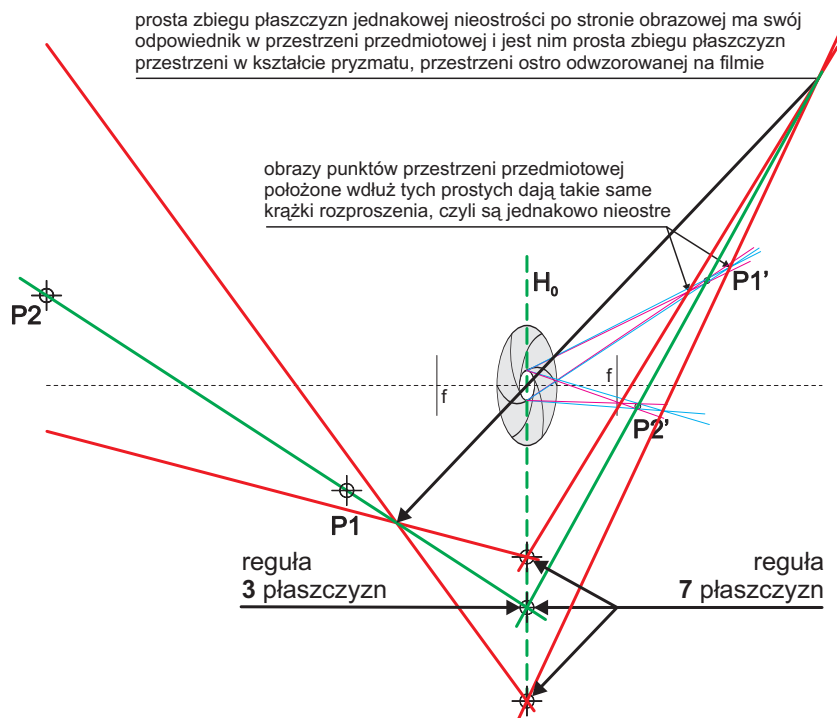
prosta zbiegu płaszczyzn jednakowej nieostrości po stronie obrazowej ma swój odpowiednik w przestrzeni przedmiotowej zgodnie z równaniem soczewki



Rys. 3 Linia zbiegu płaszczyzn jednakowej nieostrości zgodnie z równaniem soczewki i regułą 3 płaszczyzn musi znajdować się na płaszczyźnie ostrości po stronie przedmiotowej dokładnie w miejscu pokazanym strzałką

Dochodzimy więc do istoty zagadnienia: jak wygląda rozkład głębi ostrości po stronie przedmiotowej. Jeżeli znamy położenie prostej przecięcia się płaszczyzn ograniczających obszar, który możemy uznać za wystarczająco ostry oraz zastosujemy regułę 3 płaszczyzn otrzymamy konstrukcję jak na rysunku 5. Jest to reguła 7 płaszczyzn. Tak naprawdę stosowaliśmy regułę 3 płaszczyzn 3 krotnie i powinno ich być 9, ale ta sama płaszczyzna główna soczewki występuje za każdym razem, stąd tylko 7 różnych płaszczyzn.

¹ Nazywanej w krajach niemieckojęzycznych regułą Scheimpfluga. Po skomplikowanym w wymowie nazwisku najczęściej nie pozostaje w głowie żaden ślad z czym je skojarzyć. Jeżeli nazwa przybliży choć istotę zjawiska, o wiele łatwiej jest to zapamiętać i co najważniejsze nie zapomnieć.



Rys. 5 Rozkład głębi ostrości przy skręconych standardach – **reguła 7 płaszczyzn**

Dobrnęliśmy do końca, pora więc rozważania teoretyczne ująć w rzyzy ilościowe. Krótko mówiąc wiemy co, ale jak to policzyć? Kluczowe zdaje się być położenie prostych wzdłuż których przecinają się płaszczyzny jednakowej nieostrości (wersja pesymistyczna) lub krańcowe płaszczyzny ostrości (wersja optymistyczna) oraz punkty przecięcia tychże w płaszczyznę główną H_0 . Zauważmy, że po stronie obrazowej prosta ta może przebiegać co najwyżej w nieskończoności. Zatem po stronie przedmiotowej będzie na pewno w odległości nie mniejszej niż ogniskowa soczewki. Po drugie w pierwszej części dotyczącej kamery sztywnej badaliśmy rzeczywisty rozkład ostrości i położenie płaszczyzny na którą należy ustawić ostrość. Tu możemy to wykorzystać wprost.

Ciąg dalszy z obliczeniami pojawi się niedługo...

© Marek Madej
Warszawa, wrzesień 2004 – czerwiec 2006

Wykorzystanie powyższego materiału w całości lub części bez podania źródła w szkołach fotograficznych, a we wszelkich wydawnictwach bez pisemnej zgody autora stanowi naruszenie prawa autorskiego i pociągnie za sobą skutki przewidziane prawem. Publikacja ta jest przeznaczona dla wybranych przez autora witryn internetowych i jest dostępna w formacie pdf (Portable Document Format) do użytku indywidualnego bez możliwości dalszego rozpowszechniania na drodze elektronicznej i drukowanej.