

Porównanie korekcji sferocylindrycznej dobranej w podmiotowym pomiarze refrakcji oka i korekcji obliczonej na podstawie pomiarów aberrometrycznych uwzględniających aberracje oka wyższych rzędów

Mgr MAŁGORZATA PATRYKONT, dr hab. MAREK KOWALCZYK-HERNÁNDEZ
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Wstęp

Zgodnie z zasadami optyki geometrycznej, obraz przedmiotu punktowego powstający na siatkówce oka miarowego i nieobarczonego żadnymi aberracjami powinien być punktem. Opisem lepiej oddającym fizyczne aspekty procesu formowania obrazu przez układ optyczny jest optyka falowa. Fala świetlna wyemitowana np. przez świecący przedmiot punktowy ulega dyfrakcji na brzegu źrenicy, tworząc ostatecznie na siatkówce oka miarowego tzw. plamkę dyfrakcyjną, a nie ognisko punktowe. Za to, że obraz punktu nie jest punktem, odpowiadają nie tylko efekty dyfrakcyjne, lecz również aberracje układu optycznego oka. Do opisu aberracji możemy stosować zarówno optykę geometryczną (mówimy wówczas o aberracji promieni), jak i optykę falową (mówimy wówczas o aberracjach falowych).

Aby wyjaśnić, czym są aberracje falowe, należy zdefiniować pojęcie 'front falowy'. Najkrócej mówiąc jest to powierzchnia stałej fazy fali świetlnej. Jest to zatem miejsce geometryczne, do którego należą punkty, w których wektor elektryczny fali elektromagnetycznej, jaką jest światło, znajduje się w tej samej fazie swoich oscylacji harmonicznym. Promienie świetlne optyki geometrycznej „przebijające” front falowy są prostopadłe do tego frontu. Jeśli punktowe źródło światła umieszczone jest w ośrodku optycznie jednorodnym, to fronty falowe w skończonych odległościach od źródła są powierzchniami sferocylindrycznymi. Z kolei front fali świetlnej wyemitowanej przez laser lub docierającej z odległej gwiazdy jest w przybliżeniu płaski.

W danym punkcie źrenicy wyjściowej układu obrazującego aberracja falowa ma wartość równą wielkości odchylenia rzeczywistego frontu falowego od idealnego frontu odniesienia. Wielkość tego odchylenia podana jest zwykle w mikrometrach lub w długościach fali światła. W wypadku oka front odniesienia jest sferocylindryczny, a jego środek krzywizny znajduje się na siatkówce. W literaturze przedmiotu

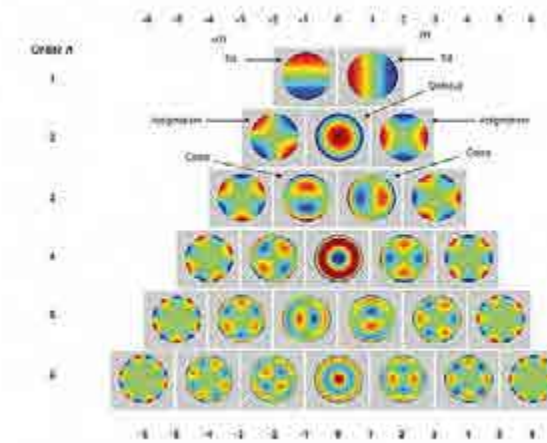
front ten nazywamy gaussowską sferą odniesienia. Rozkład natężenia w plamce rozmycia można wyliczyć, znając wielkość aberracji falowej, wielkość źrenicy wyjściowej układu i długość fali światła. Ponieważ odnosimy się tutaj do konkretnej długości fali, aberracje, do analizy których ograniczamy się w artykule, nazywamy monochromatycznymi. Seidel w roku 1857 wyróżnił pięć podstawowych aberracji monochromatycznych (Philipp Ludwig von Seidel 1821–1896) [1]:

1. Aberracja sferyczna
2. Koma
3. Astygmatyzm
4. Krzywizna pola
5. Dystorsja

W klasyfikacji aberracji przyjętej w optyce fizjologicznej do aberracji zaliczamy także rozogniskowanie, czyli błąd refrakcji korygowany soczewkami sferycznymi, a ponadto dzielimy aberracje na niskiego rzędu (rozogniskowanie i astygmatyzm) i wyższego rzędu (pozostałe aberracje).

Każdy rzeczywisty układ optyczny, w tym oko ludzkie, jest obarczony aberracjami. Zazwyczaj układ optyczny obarczony jest kilkoma aberracjami. Pomiaru aberracji falowej oka dokonujemy za pomocą różnego rodzaju aberrometrów. Aberrometr z detektorem frontu falowego typu Shacka-Hartmanna mierzy, za pomocą macierzy mikrosoczewek, odchylenia frontu falowego opuszczającego badane oko od frontu odniesienia. Wynik podawany jest zazwyczaj w postaci szeregu wielomianów Zernikego (Frits Zernike 1888–1966). Jest to szereg wielomianów ortogonalnych w kole o promieniu jednostkowym, szczególnie przydatny do opisu aberracji falowych oka. Przydatność wielomianów Zernikego ma swoje źródło w tym, że wielomiany niskich rzędów są tożsame z aberracjami

optycznymi wprowadzonymi przez Seidela, a także z wieloma innymi, np. z rozogniskowaniem i trefoilem [2]. Do sklasyfikowania wielomianów Zernikego stosujemy system podwójnego indeksowania (m, n) . Porządkując je ze względu na wskaźniki m i n , otrzymamy schemat piramidalny (ryc. 1). Wskaźnik n informuje nas o rzędzie, a wskaźnik m o kolumnie, w której umiejscowiony jest dany wielomian w piramidzie.



Ryc. 1. Wielomiany Zernikego od pierwszego do szóstego rzędu, ułożone w formie piramidalnej. Rozogniskowanie i astygmatyzm opisywane są wielomianami drugiego rzędu

Całkowita aberracja W danego układu optycznego to suma ważona wielomianów Zernikego $Z_n^m(\rho, \theta)$ z wagami C_n^m , które, podane zazwyczaj w mikrometrach, określają wkład danej aberracji do całkowitej aberracji falowej układu [3]:

$$W(\rho, \theta) = \sum_n \sum_m C_n^m Z_n^m(\rho, \theta)$$

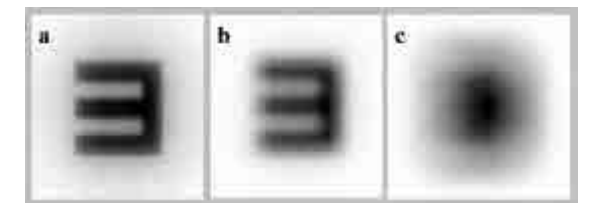
Zmienne ρ, θ są współrzędnymi biegunowymi w płaszczyźnie źrenicy wyjściowej, n jest rzędem części radialnej wielomianu, a m jest liczbą miejsc zerowych wielomianu na okręgu jednostkowym, gdy zmieni azymutalna θ zmienia się od zera do π . Jeśli mierzymy aberrację falową oka za pomocą aberrometru, to jako wynik otrzymujemy skończony ciąg wartości C_n^m . Całkowita aberracja falowa, czyli suma poszczególnych rodzajów aberracji uwzględniająca ich wagi, często przedstawiana jest w postaci barwnej mapy dwuwymiarowej lub pseudotrójwymiarowej, na której wielkość lokalnego odchylenia zmierzonego frontu falowego od idealnego czoła fali została zakodowana za pomocą skali barw. Parametrem liczbowym charakteryzującym aberrację globalnie, tj. w obrębie całej źrenicy wyjściowej, jest aberracja średniokwadratowa RMS (RMS – Root Mean Square) obliczana zgodnie z formułą przedstawioną w konwencji graficzno-alfanumerycznej na rycinie 2 [3,4].

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_n | \int_{\text{źrenica}} W(\rho, \theta) |^2}$$

Ryc. 2. Wzór prezentujący istotę obliczania aberracji średniokwadratowej na podstawie N próbek aberracji falowej i średniej aberracji falowej. Próbkę rozmieszczone są równomiernie w źrenicy wyjściowej

Jeśli w oku występują aberracje, należy tak dopasować soczewki korekcyjne, aby zmaksymalizować ostrość widzenia. W praktyce

mamy możliwość dopasowania jedynie soczewek sferycznych i sferocylindrycznych, korygujących rozogniskowanie i astygmatyzm. Oczywiście aberrometrem możemy zmierzyć wielkość astygmatyzmu i błędu sferycznego, co pozwoliłoby na dobranie korekcji, która całkowicie by je eliminowała. Co więcej, w zdecydowanej większości wypadków astygmatyzm i rozogniskowanie rzeczywiście mają największy udział w całkowitej aberracji falowej, a zatem największy wpływ na jakość wytwarzanego obrazu. Zatem z punktu widzenia ograniczonych możliwości korekcyjnych, dane z pomiaru aberrometrycznego zawierające również informacje na temat aberracji wyższych rzędów, mogłyby wydawać się nieużyteczne. Okazuje się, że tak nie jest. Liczne badania [5,6,7] wskazują, że skorygowanie jedynie rozogniskowania i astygmatyzmu zmierzonego aberrometrem nie zawsze jest najlepszą strategią. Wynika to z faktu, że współistniejące w układzie aberracje wyższych i niższych rzędów, chociaż formalnie ortogonalne, to jednak oddziałują na siebie wzajemnie w tym sensie, że skorygowanie tylko jednej aberracji bez wzięcia pod uwagę pozostałych może paradoksalnie doprowadzić do pogorszenia ostrości widzenia (ryc. 3).



Ryc. 3. Obraz haka Snellena a) przy współistniejącej aberracji sferycznej i rozogniskowaniu (RMS=0,52 μm); b) po skorygowaniu rozogniskowania. Pozostała aberracja sferyczna o RMS=0,16 μm ; c) po skorygowaniu aberracji sferycznej. Pozostało rozogniskowanie o RMS=0,50 μm . Współistniejące rozogniskowanie i aberracja sferyczna dają czytelniejszy obraz niż przypadku istnienia każdej z tych aberracji z osobna. Zatem skorygowanie jednego tylko rodzaju aberracji falowej może prowadzić do pogorszenia ostrości widzenia. W tym wypadku za efekt ten odpowiedzialne jest wzajemne kompensowanie się aberracji sferycznej i rozogniskowania. Widzimy, że znając jedynie średniokwadratowe aberracje dwóch układów optycznych nie potrafimy przewidzieć, który z nich da czytelniejszy obraz

W związku z tym sferocylindryczna korekcja wady refrakcji powinna uwzględniać występowanie aberracji wyższych rzędów. W celu wyznaczenia takiej korekcji zostały stworzone metody obliczeniowe, które na podstawie pomiaru aberracji (do którego rzędu włącznie – zależy to od klasy aberrometru) optymalizują wartości korekcji sferocylindrycznej ze względu na przyjęte kryterium optymalizacyjne. Kryterium optymalizacyjnym przyjętym w dalszej części artykułu będzie zminimalizowanie średniokwadratowego odchylenia aktualnego zaberrowanego frontu falowego nie od gaussowskiej sfery odniesienia, lecz w tym wypadku od sferocylindrycznego frontu falowego. Innymi słowy będziemy poszukiwać takiej sferocylindrycznej wady refrakcji, która najmniej, w sensie średniokwadratowym, różni się od aktualnej wady przedstawionej w postaci skończonego szeregu wielomianów Zernikego, zawierającego aberracje wyższych rzędów. Tak znaną wadę potrafimy skorygować klasyczną korekcją sferocylindryczną. Możemy mówić tu o sferocylindrycznym ekwiwalencie aberracji całkowitej, ponieważ dobrana korekcja w najlepszy możliwy sposób odpowiada mapie aberracji wynikającej z pomiaru, minimalizując odchylenia rzeczywistego frontu falowego od frontu idealnego. Widzimy, że wykonując odpowiednie pomiary i obliczenia, możemy w standardowej korekcji uwzględnić występujące u danego pacjenta aberracje wyższych rzędów.

Innym kryterium optymalizacyjnym dobierania korekcji sferocylindrycznej uwzględniającej występowanie aberracji wyższych rzędów może być maksymalizacja ułamka Strehla (Karl Strehl 1864–1940), będącego powszechnie stosowanym parametrem przy ocenie jakości odwzorowywania optycznych układów obrazujących. Jest to jednak zagadnienie matematycznie znacznie trudniejsze od przedstawionego powyżej i według wiedzy autorów nie doczekało się jeszcze rozwiązania. Spadek wielkości ułamka Strehla w funkcji odległości osiowej od gaussowskiej płaszczyzny obrazowej jest coraz powszechniej wykorzystywany do oceny głębi ostrości układu optycznego oka.

Metodologia

Celem przeprowadzonego badania było porównanie korekcji dobranej w podmiotowym badaniu optometrycznym oraz obliczonej na podstawie pomiaru aberracji oka wyższych rzędów.

W pierwszej części badania wykorzystano metodę obliczenia korekcji na podstawie pomiaru aberracji, bazującą na opisanej powyżej zasadzie. Wykorzystano wyprowadzone przez Atchinsona wzory na zoptymalizowanie korekcji sferocylindrycznej z wykorzystaniem współczynników odpowiednich wielomianów Zernikego uzyskanych w pomiarze aberrometrem [8,2]. Wzory te są rozwiązaniami zagadnienia wariacyjnego na poszukiwanie minimum funkcjonatu, w którym minimalizowane jest średniokwadratowe odchylenie aberracji całkowitej od jej ekwiwalentu sferocylindrycznego zsumowane (scatłowane) po powierzchni źrenicy wyjściowej. Rozwiązania te mają następującą postać [9]:

$$M = \frac{-(4C_2^0\sqrt{3} - 12C_4^0\sqrt{5} + 24C_6^0\sqrt{7} - 40C_8^0\sqrt{9} + \dots)}{R^2}$$

$$J_{180} = \frac{-(2C_2^2\sqrt{6} - 6C_4^2\sqrt{10} + 12C_6^2\sqrt{14} - 20C_8^2\sqrt{18} + \dots)}{R^2}$$

$$J_{45} = \frac{-(2C_2^{-2}\sqrt{6} - 6C_4^{-2}\sqrt{10} + 12C_6^{-2}\sqrt{14} - 20C_8^{-2}\sqrt{18} + \dots)}{R^2}$$

Zgodnie z terminologia przyjętą w literaturze przedmiotu, M jest ekwiwalentem sferycznym, J_{180} jest cylindrem skrzyżowanym Jacksona o danej mocy w osi 180° lub 90° w zależności od znaku, podobnie J_{45} to cylinder skrzyżowany Jacksona w określonej mocy w osi 45 lub 135 w zależności od znaku. C_n^m to odpowiednie współczynniki wielomianów Zernikego, występujących w szeregu, którego suma daje całkowitą aberrację falową, zaś R to średnica źrenicy. Po uzyskaniu tych wartości kolejnym krokiem jest przeliczenie ich w celu uzyskania wielkości standardowo używanych do zapisu korekcji sferocylindrycznej.

C jest mocą ujemnego cylindra korygującego, S mocą sferyczną, a α jest kierunkiem osi cylindra w skali

tabo. Istnieje kilka dodatkowych zasad dotyczących ustalania kierunku osi cylindra (tab. 1).

Znak J_{180}	Znak J_{45}	Zapisana oś
+	0	180
+	+	α
0	+	45
-	+	$\alpha+90$
-	0	90
-	-	$\alpha+90$
0	-	135
+	-	$\alpha+180$

Tab. 1. Obliczanie kierunku osi cylindra korygującego w zależności od znaków współczynników J_{180} i J_{45}

Aberracje mierzono aberrometrem Visionix L80 Wave+, który mierzy aberrację falową detektorem Shacka-Hartmanna. Fabryczne oprogramowanie urządzenia pozwala uzyskane wyniki przedstawić za pomocą współczynników wielomianów Zernikego do siódmego rzędu. Zatem w powyższych formułach obliczających M , J_{180} i J_{45} mogliśmy wykorzystać jedynie trzy pierwsze wyrazy szeregu. Jednocześnie z pomiarem aberracji dokonywany był przez ten sam przyrząd pomiar średnicy źrenicy.

Druga część badania polegała na dobraniu pacjentom korekcji w sposób podmiotowy. Odbywało się to zgodnie ze standardową procedurą optometryczną, z pominięciem testów widzenia obuocznego, ponieważ porównanie wyników odbywało się jednoocześnie. Wstępny pomiar refrakcji wykonywano autorefraktometrem wbudowanym w wykorzystywany aberrometr, a następnie przeprowadzano kolejno następujące procedury:

- dobór ekwiwalentu sferycznego metodą Dondersa;
- uściślenie ekwiwalentu sferycznego na teście czerwono-zielonym;
- dobór cylindra za pomocą cylindra skrzyżowanego Jacksona;
- zweryfikowanie korekcji za pomocą testu czerwono-zielonego.

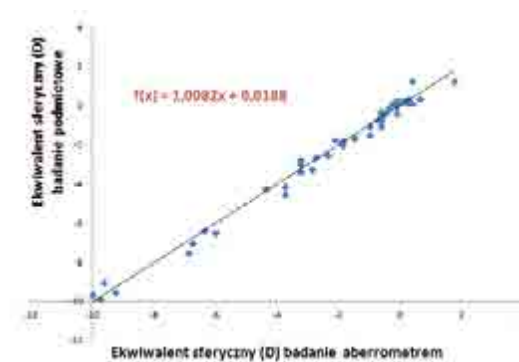
W powyższych procedurach wykorzystano manualny foropter oraz tablice optotypów i test czerwono-zielony wyświetlane z rzutnika optotypów.

W badaniu wzięło udział 26 osób, w tym 10 mężczyzn i 16 kobiet. Badane osoby były w wieku od 18 do 67 lat. U każdego pacjenta zmierzono dwiema metodami prawe i lewe oko.

Ponieważ celem badania było porównanie dwóch metod korekcji, w badanej grupie przeważały osoby mające znaczącą wadę refrakcji i na stałe noszące korekcję do dali. 16 pacjentów było już przed badaniem zdiagnozowanych jako krótkowzroczni, pozostałe 10 osób nie nosiło wcześniej żadnej korekcji, jednak wśród tej grupy cztery osoby skarżyły się na nieostre widzenie. Zgodnie z wynikami otrzymanymi każdą z metod, we wszystkich zbadanych oczach występowała wada refrakcji. Wśród osób nienoszących wcześniej korekcji u sześciu osób korekcyjne soczewki na tyle podniosły ostrość wzroku, że otrzymały one preskrypcje na okulary, u czterech pozostałych osób korekcja wady refrakcji nie przynosiła odczuwanej w znacznym stopniu poprawy jakości widzenia.

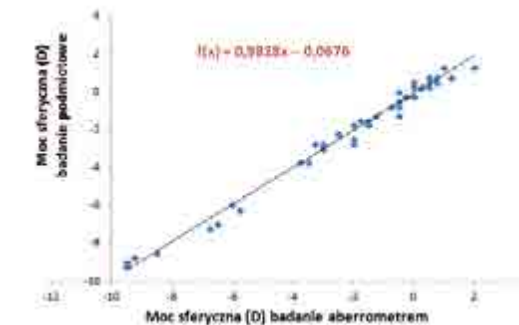
Wyniki i dyskusja

W wykonanym badaniu wykazana została znacząca korelacja dobranych oboma metodami ekwiwalentów sferycznych (ryc. 4). Również



Ryc. 4. Wykres rozrzutu ekwiwalentu sferycznego z zaznaczoną linią trendu

moce sferyczne korekcji obliczonych na podstawie pomiaru aberracji i dobranych w badaniu podmiotowym były silnie skorelowane (ryc. 5). Średnia wartość dobrego ekwiwalentu sferycznego była



Ryc. 5. Wykres rozrzutu mocy sferycznej dobranej oboma metodami z zaznaczoną linią trendu

w obu wypadkach jednakowa. Aż w 65% przypadków różnica w dobranym ekwiwalencie nie przekraczała 0,25D, a w zaledwie 7% przypadków była ona większa niż 0,50D. W przypadku mocy sferycznej dobrane wartości aż w 40% przypadków były identyczne, a w niemal 80% przypadków różnica nie przekraczała 0,25D. Największa różnica pomiędzy pojedynczymi pomiarami wyniosła 0,75D i wystąpiła ona w trzech przypadkach, co stanowi niecałe 6% badanej grupy.

Nieco mniej skorelowane, jednak wciąż dość porównywalne okazały się wyniki doboru cylindra korygującego. W 70% przypadków różnica wielkości cylindra dobrego w pomiarze aberrometrycznym i w badaniu podmiotowym mieściła się w granicach 0,25D. Jednak największa różnica wyniosła aż 1,25D.

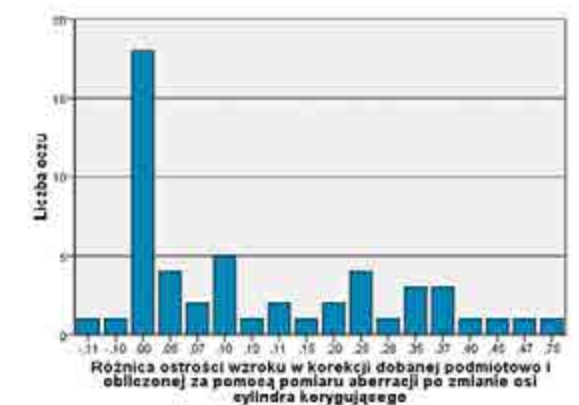
Niestety, wyniki porównawcze dotyczące kierunku osi cylindra korygującego nie okazały się skorelowane. Różnice pomiędzy kierunkami osi cylindra dobranymi oboma metodami okazały się nie tylko znaczące, ale również nie można wykazać żadnej prawidłowości rządzącej rozrzutem tych wyników, ponieważ różnice wahały się od 90° do pełnej zgodności. Wśród kierunków osi obliczonych na podstawie pomiaru aberracji niewiele było takich, których $\alpha \leq 70^\circ$, podczas gdy w badaniu podmiotowym takie kąty otrzymano w ponad 50% pomiarów. Z kolei w badaniu podmiotowym wyraźnie rzadziej dobierane były osie zorientowane pod kątem $\alpha \geq 100^\circ$, stanowiły one 20% wyników pomiarów, podczas gdy w badaniu z wykorzystaniem aberrometru ponad 60% pomiarów dało taki właśnie wynik.

Już przy pierwszych badaniach stało się jasne, że mimo podobieństw między sferą i cylindrem osie dobierane dwiema metodami istotnie się różnią. Z tego względu wykonano za każdym razem dodatkowy pomiar, w którym mierzono ostrość widzenia z mocą sferocylindryczną obliczoną na podstawie pomiaru aberrometrem jednocześnie tak dokorygując kierunek osi, by zmaksymalizować ostrość. Zmiana kierunku osi spowodowała poprawę ostrości widzenia w 19 przypadkach, czyli przy 38% badań. Biorąc pod uwagę wartość bezwzględną przesunięcia osi, a nie jego kierunek, osie zostały zmienione średnio o 25° .

Ostrość wzroku mierzona była na tablicy optotypów logMAR. W badaniu, aby uzyskać dokładniejsze wyniki, ostrość wzroku notowana była z uwzględnieniem pojedynczych liter przeczytanych w danym rzędzie, stąd też wśród podanych ostrości wzroku pojawiają się wielkości nieodpowiadające konkretnym rzędom na tablicy optotypów.

Ostrości wzroku uzyskiwane w korekcji dobranej podmiotowo były stosunkowo wysokie. Jedynie w trzech przypadkach ostrość wzroku wyrażona ułamkiem Snellena była poniżej 1,0, co stanowi niecałe 6% liczby zbadanych oczu. Zdecydowana większość pomiarów (niemal 50%) wykazywała ostrość wzroku na poziomie 1,25. Ogólnie ponad 80% przypadków została osiągnięta ostrość wzroku powyżej 1,0. W korekcji obliczonej na podstawie pomiaru aberracji, w 40% przypadków osiągnięta ostrość wzroku była poniżej 1,0, a w 13,5% ostrość wzroku wyniosła 1,0. W ponad 80% przypadków ostrość wzroku uzyskana w korekcji dobranej podmiotowo była wyższa, a średnia różnica visusa wyniosła 0,23.

Jednak po zmianie kierunku osi cylindra w korekcji obliczonej na podstawie pomiaru aberracji, aż w 70% przypadków została osiągnięta ostrość wzroku powyżej 1,0, zaś do 20% zmniejszyła się ilość przypadków, w których osiągnięta ostrość wzroku była poniżej 1,0. W przypadkach, w których zmieniony był kierunek osi korekcyjnej soczewki cylindrycznej, ostrość wzroku wzrosła średnio o 0,34. Po zmianie osi cylindra korygującego znacznie zmniejszyły się różnice pomiędzy ostrością wzroku w korekcji dobranej podmiotowo i obliczonej za pomocą pomiaru aberracji, jednak wciąż przy korekcji podmiotowej ostrości były wyższe (ryc. 6). Niemal trzykrotnie wzrosła liczba przypadków, w których ostrość wzroku okazała taka sama w obu korekcjach. Po zmianie osi cylindra korygującego takich przypadków było 18, podczas gdy przed zmianą jedynie 7.



Ryc. 6. Wykres liczebności uwzględniający różnice pomiędzy ostrością wzroku uzyskaną w korekcjach dobranych oboma metodami po zmianie kierunku osi cylindra korygującego dobrego w pomiarze aberrometrycznym

Wnioski

Odkąd powszechne stało się korygowanie wad wzroku, osoby zajmujące się tym tematem starały się ulepszyć i uprościć procedurę pomiaru refrakcji. W tym celu tworzone były specjalne urządzenia zawierające coraz bardziej zaawansowane technicznie układy optyczne. Kolejnym krokiem do udoskonalenia procedury badania optometrycznego może być rozpowszechnienie pomiaru aberracji.

Pomiar aberracji jest niezbędny przy wykrywaniu i korygowaniu aberracji wyższych rzędów. Jest to istotne zwłaszcza obecnie, gdy zaawansowane techniki chirurgii refrakcyjnej pozwalają na korygowanie różnego typu zniekształceń układu odzworowującego. Bezspornie pomiary aberracji oka mogą być niezwykle użyteczne w przypadku badania pacjentów, u których spodziewamy się dużego udziału aberracji wyższych rzędów występujących w układzie (np. stożek rogówki, stany po zabiegach chirurgicznych na rogówce). Jednak soczewki okularowe i powszechnie stosowane miękkie soczewki kontaktowe są w stanie skorygować bezpośrednio jedynie astygmatyzm i rozogniskowanie. Zatem warto zastanowić się, na ile pomiary wykonywane za pomocą aberrometru mogą być użyteczne w standardowej praktyce optometrycznej.

Po przeliczeniu wartości sfery i cylindra na ekwiwalent sferyczny wyniki uzyskane w badaniu podmiotowym i obliczone na podstawie pomiaru aberracji były do siebie bardzo zbliżone. Biorąc pod uwagę tę zbieżność można stwierdzić, że akomodacja ma bardzo ograniczony wpływ na wyniki uzyskane z pomiaru aberracji. Oznacza to przede wszystkim, że taki pomiar dostarcza dość szczegółowych informacji na temat wielkości wady refrakcji. Umożliwia to m.in. wykrycie nadwzroczności u młodych, silnie akomodujących osób już na wstępie badania optometrycznego. Może być to również bardzo pomocne w badaniach przesiewowych. Niestety, kąty określające kierunek osi cylindra, uzyskane w pomiarze aberrometrem, okazały się właściwie nieużyteczne. Nie tylko w znacznym stopniu odbiegały od tych uzyskanych w badaniu podmiotowym, ale również różnice między osiami w obu pomiarach za każdym razem były inne. Zatem różnice te nie były wynikiem jakiegoś systematycznego błędu pomiarowego. Do powstania rozbieżności pomiarowych mógł przyczynić się

brak możliwości zapewnienia wykonania pomiaru podmiotowego i przedmiotowego przy dokładnie tej samej średnicy źrenicy, chociaż staraliśmy się, by badania były przeprowadzane w tych samych warunkach oświetlenia.

Ostrości wzroku w korekcji dobranej za pomocą aberrometru były stosunkowo wysokie, chociaż niższe od tych w korekcji podmiotowej. Jednak w ponad 60% przypadków uzyskana ostrość wzroku była pełna lub wyższa, a po zmianie osi cylindra taka ostrość została osiągnięta w ponad 80% przypadków. Biorąc pod uwagę, że było to badanie przedmiotowe, uzyskane ostrości wzroku są na bardzo wysokim i zadowalającym poziomie. Z pewnością aberrometr może służyć jako doskonałe urządzenie do badań przesiewowych i jako wstępne badanie podczas procedury optometrycznej. Przy braku innych możliwości, wartości ekwiwalentu sferycznego czy nawet cała obliczona korekcja mogą zostać użyte do bezpośredniego skorygowania wady refrakcji. Jednak w takim wypadku niewątpliwie korzystne byłoby dodatkowe zweryfikowanie kierunku osi cylindra.

Korekcje obliczone przy uwzględnieniu aberracji wyższych rzędów i te dobrane na podstawie badania podmiotowego okazały się ze sobą silnie skorelowane. Może wydawać się to nieoczekiwane, ponieważ specjalista dobierający korekcję zazwyczaj skupia się głównie na skorygowaniu rozogniskowania i astygmatyzmu, nie biorąc pod uwagę pozostałych aberracji. Jednak najprawdopodobniej sam pacjent podczas procedury podmiotowego pomiaru refrakcji wybiera i „prosi” o soczewki, dzięki którym obraz na jego siatkówce jest najlepszy, tym samym nieświadomie uwzględnia w korekcji wpływ aberracji wyższych rzędów. ●

Piśmiennictwo

1. D. A. Atchinson and G. Smith. *Optics of the Humane Eye*. Edinburgh: Butterworth-Heinemann, 2000
2. D. A. Atchinson. Recent advances in representation of monochromatic aberrations of human eyes. *Clinical and Experimental Optometry*, no. 83, 2004
3. M. Zając. Aberracje oka – ich pomiar i korekcja. *Kontaktologia i Optyka Okulistyczna*, no. 1, 2007
4. D. Trusit. Wavefront aberrometry Part 1: Current theories and concepts. *Optometry Today*, 2004
5. R. Applegate, C. Ballentine, H. Gross, E.J. Sarver and C.A. Sarver. Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error. *Optometry and Vision Science*, no. 2, 2003
6. A. Guirao and D.R. Williams. A method to predict refractive errors from wave aberration data. *Optometry and Vision Science*, no. 1, 2003
7. L.N. Thibos, X. Hong, A. Bradley and X. Cheng. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. *Journal of the Optical Society of America*, 2002
8. A.D. Atchinson, H.D. Scott and J.M. Cox. *Mathematical Treatment of Ocular Aberrations: a User's Guide*. *Journal of the Optical Society of America*, 2000
9. M. Rosenfield and N. Logan. *Optometry: Science, Techniques and Clinical Management*. Butterworth Heinemann Elsevier, 2009

Ryciny: Autorzy

Dział „Optyka – nauka”: zapraszamy do współpracy!

Redakcja „Optyki”, realizując postulaty środowisk akademickich oraz organizacji reprezentujących środowiska optyków i optometrystów (KRIO, PTOO, ŚKA00i0), rozpoczyna wydawanie działu „Optyka – nauka”. To bezprecedensowe przedsięwzięcie ma na celu umożliwienie publikacji oryginalnych wyników badań naukowych przede wszystkim studentom, doktorantom oraz młodym pracownikom nauki. Nad merytorycznym poziomem nadsyłanych do druku prac czuwa Rada Naukowa dodatku „Optyka – nauka” w składzie:

Prof. dr hab. RYSZARD NASKRĘCKI (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu)

Dr hab. inż. D. ROBERT ISKANDER (Politechnika Wrocławska)

Prof. dr hab. HENRYK KASPRZAK (Politechnika Wrocławska)

Prof. dr hab. ANDRZEJ KOWALCZYK (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu)

Dr hab. MAREK KOWALCZYK-HERNANDEZ (Uniwersytet Warszawski)

Prof. dr hab. BOGDAN MIŚKOWIAK (Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu)

Rada korzysta także z pomocy zewnętrznych recenzentów.

Wszelkie informacje na temat wymogów przygotowywania manuskryptów znajdują się na naszej stronie internetowej: www.gazeta-optyka.pl.

SEIKO

EYEWEAR THAT PERFORMS

SEIKO Superior Xcel

Najbardziej zaawansowane
indywidualne soczewki
progresywne

Infolinia

☎ 22 242 87 55

www.soczewki-seiko.pl