

(167)

Systemy aberrometryczne w laserowej chirurgii refrakcyjnej

Aberrometer systems in laser refractive surgery

Dorota Wyględowska-Promieńska

Z I Katedry i Kliniki Okulistyki Śląskiej Akademii Medycznej w Katowicach
Kierownik: prof. dr hab. n. med. Ariadna Gierek-Łapińska

Summary: The wavefront sensing device provides a new and objective way of mapping the profile of refraction and of higher order defocus. Higher-order optical errors of the human eye are often responsible for reduced visual acuity, in spite of an optimal spherical or cylindrical refraction. These optical aberrations are of natural origin or can result from operations on the eye, involving optical structures. Nowadays, there are four different methods of wavefront technology available: Concept of „Outgoing” Reflective Aberrometry, Concept of „Retinal Imaging” Aberrometry, Concept of „Ingoing” Adjustable Aberrometry (Spatially Resolved Refractometer), Concept of „Double Pass” Aberrometry. Wavefront analysis is a more sophisticated method of defining aberrations that the surgeon is trying to correct through refractive surgery.

Słowa kluczowe: systemy aberrometryczne, laserowa chirurgia refrakcyjna.

Key words: aberrometer systems, laser refractive surgery.

Wstęp

W ostatnich latach we współczesnej chirurgii refrakcyjnej obserwuje się zwiększone zainteresowanie problemami pomiaru, oceny i ewentualnych możliwości korekcji całkowitej aberracji układu optycznego oka. W konsekwencji doprowadzić to ma do uzyskania przez pacjentów ostrości wzroku lepszej niż dotychczasowa ostrość optymalna, czyli do tzw. sokolego wzroku.

Aberracja może być ujęta ilościowo zarówno w stosunku do oczekiwanego położenia punktu, jak i w stosunku do czoła fali świetlnej odpowiadającej temu punktowi. Jeśli porówna się czoło fali wychodzącej z układu optycznego z przypadkiem idealnym (czoło fali pozbawione zniekształceń), to różnicę między nimi nazywa się aberracją czoła fali. Ogólnie rzecz biorąc, im bardziej aberracja czoła fali różni się od zera, tym bardziej otrzymany obraz różni się od idealnego, a zatem gorsza jest również jakość obrazu otrzymanego na siatkówce oka.

Hartmann i Tschering jako jedni z pierwszych u schyłku XIX wieku przeprowadzili próby pomiarów aberrometrycznych. Doktorzy Bille i Liang z uniwersytetu w Heidelbergu rozpoczęli badania nad pomiarami, analizą i korekcją aberracji wyższego rzędu w astronomii, kładąc tym samym podwaliny pod współczesną aberrometrię okulistyczną (2). Dotychczasowe korekcje sferocylin-dryczne dokonywane za pomocą szkieł okularowych, soczewek kontaktowych, soczewek falkijnych czy też lasera ekscymerowego nie rozwiązywały tego problemu. Nadal bowiem pozostawały nieskorygowane aberracje wyższego rzędu, utrudniające niejednokrotnie w znacznym stopniu uzyskanie przez pacjenta maksymalnej ostrości wzroku. Ostrość wzroku jest limitowana przez rozmiar, ułożenie i biologiczne odmiany fotoreceptorów, dlatego też nie

wszyscy mogą uzyskać widzenie rzędu 2,0. Niemniej jednak znaczna część pacjentów, gdyby mogła mieć skorygowane do minimum aberracje wyższego rzędu, uzyskałaby lepszą docelową ostrość wzroku.

Aberracja jest wadą układu optycznego przejawiającą się tym, że otrzymane w jej wyniku obrazy są nieostre, zniekształcone lub zabarwione.

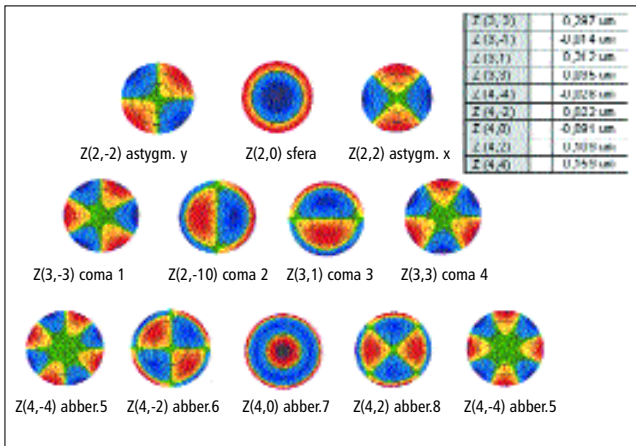
Aberrometr to urządzenie diagnostyczne służące do oceny całkowitej wady refrakcji oka z uwzględnieniem aberracji wyższego rzędu.

Rozróżniamy następujące rodzaje aberracji: geometryczną – zależną od kształtu soczewek lub zwierciadeł i sposobu ich oświetlenia (aberracja sferyczna, koma, astygmatyzm, dystorsja) oraz chromatyczną – stanowiącą wadę soczewkowych układów optycznych, spowodowaną zależnością współczynnika załamania światła materiału soczewek od długości fali świetlnej. Na całkowitą aberrację oka składają się aberracje niższego rzędu (sfera, nieźorność) oraz aberracje wyższego rzędu, opisane za pomocą polinomiali Zernika. Obraz zniekształceń wyższego rzędu wywołanych przez aberrację przedstawia ryc. 1 (2).

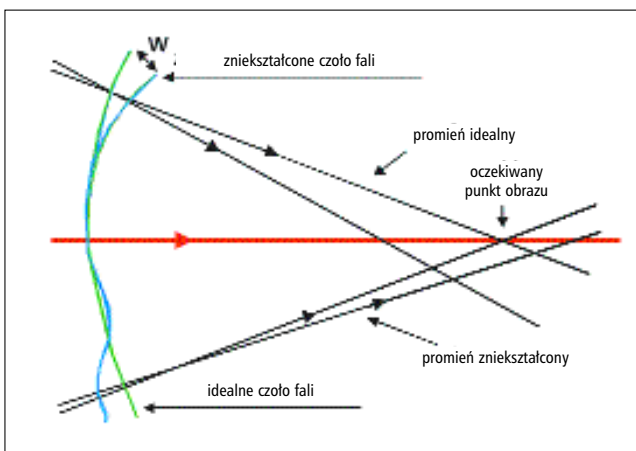
Schematycznie zniekształcenie czoła fali wywołane aberracją pokazano na ryc. 2 (2).

Rozróżniamy kilka podstawowych metod pomiaru aberracji (2):

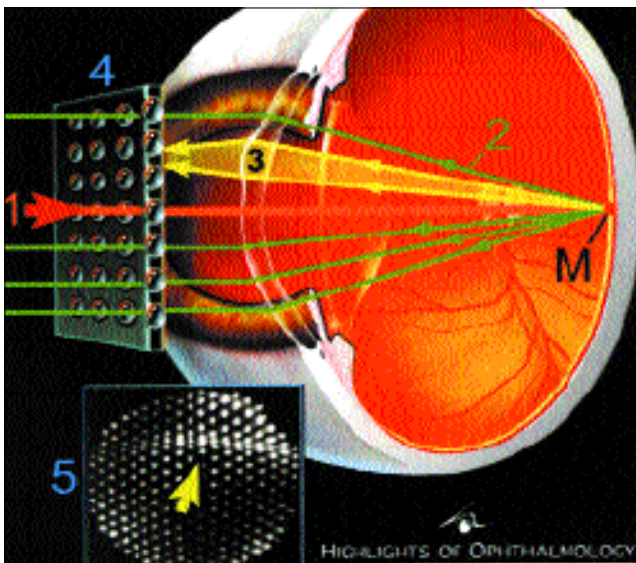
- ❖ metodę pomiaru fali odbitej od siatkówki (urządzenia Shacka-Hartmanna),
- ❖ metodę „obrazowania na siatkówce” (urządzenia Tscheringa),
- ❖ metodę refraktometrii przestrzennej (regulowana aberrometria),
- ❖ metodę „podwójnego przejścia” (OPD Scan).



Ryc. 1. Polinomiale Zernika.
Fig. 1. Zernike Polynomials.



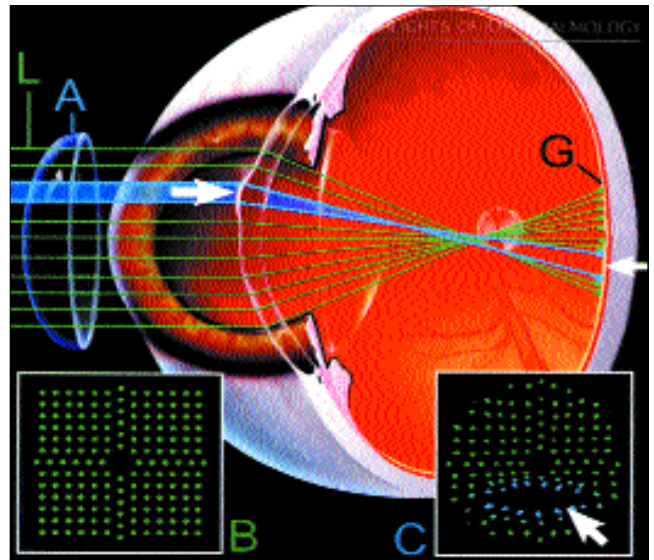
Ryc. 2. Zniekształcenie czoła fal wywołane aberracją.
Fig. 2. Wavefront aberration.



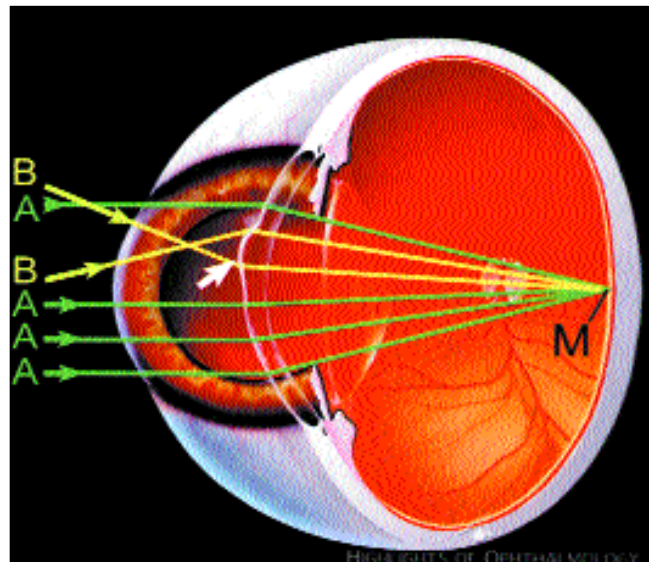
Ryc. 3. Urządzenie Shacka-Hartmanna.
Fig. 3. Shack-Hartmann Device.

Urządzenie Shacka-Hartmanna

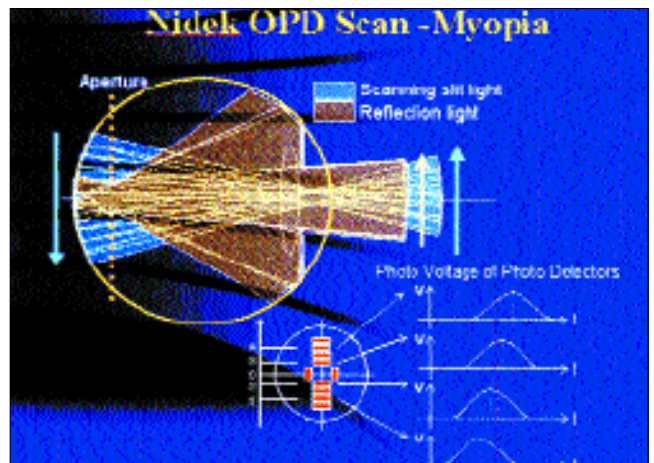
System Shacka-Hartmanna (SH) jest systemem najczęściej stosowanym przez producentów aberometrów. Zmodernizowany sensor Hartmann-Shack został wprowadzony do diagnostyki okulistycznej



Ryc. 4. Urządzenie Tscheringa.
Fig. 4. Tschering Device.



Ryc. 5. Refraktometr przestrzenny.
Fig. 5. Spatially Resolved Refractometer.



Ryc. 6. System skanujący OPD.
Fig. 6. OPD Scan Device.

w 1994 roku przez naukowców Lianga, Williamsa i wsp. Wieloletnie prace nad problemem aberracji układu optycznego oka dowiodły, że aby uzyskać „idealne widzenie”, trzeba usunąć aberrację czoła fali. Urządzenie Shacka-Hartmanna opiera się na koncepcji promieni wychodzących (5). Zasada pomiaru analizatora polega na wysyłaniu do oka pacjenta płaskiej fali generowanej przez laser podczerwony o niskiej mocy (1 – promień czerwony). Fala ta rzutowana jest przez kolejne ośrodki optyczne oka aż do plamki żółtej (M), gdzie jest odbijana i, powracając (2 – promień zielony) poprzez ciało szkliste, soczewkę, komorę przednią, tylną i przednią powierzchnię rogówki, kierowana jest na sensor Shacka-Hartmanna (4), a dalej na detektor przetwarzający sygnał świetlny na sygnał elektryczny. Sensor SH składa się z matrycy mikrosoczewek, która po oświetleniu falą powracającą z ośrodków optycznych oka generuje na detektorze CCD, umieszczonym w ognisku soczewek sensora, obraz składający się z szeregu punktów świetlnych (5). Analizie poddawane jest odchylenie zogniskowanych punktów od ich idealnej pozycji. Otrzymane w ten sposób informacje poddaje się obróbce komputerowej w celu wyliczenia aberracji optycznej. Na ryc. 3 pokazano przykład aberracji wywołanej miejscowym zniekształceniem powierzchni rogówki (3 – promień żółty), które powoduje odchylenie wyjściowego promienia odbitego w stosunku do promieni przechodzących przez regularną część rogówki (2) (ryc. 3).

Urządzenie Shacka-Hartmanna stosowane jest między innymi w systemach LADARWave firmy Alcon, WaveScan firmy Visx, Zywave firmy Bausch & Lomb oraz WASCA firmy Carl Zeiss-Meditec.

Urządzenie Tscheringa

W latach 70. XX wieku Howland i Howland rozwinęli metodę opracowaną przez Tscheringa w końcu XIX wieku. Z kolei Theo Seiler przystosował tę metodę dla użytku klinicznego. W urządzeniu Tscheringa światło lasera (L) w postaci wzorca przestrzennego (B) przechodzi przez soczewkę aberoskopową (A), skupiającą promień lasera przed siatkówką oka, i pada na siatkówkę (G). Każde, spowodowane aberracją, odchylenie biegu promieni od wzorca pozwala na obliczenie profilu aberracji (3,4). Na uproszczonym przykładzie pokazanym na ryc. 4 zniekształcenie rogówki (biała strzałka) powoduje zmianę kierunku załamania światła lasera padającego na siatkówkę. W wyniku tego następuje odchylenie od wzorca (C), które jest rejestrowane i obliczane (2) (ryc. 4).

Urządzenie Tscheringa zastosowały w swych aberrometrach firmy Wavelight i Schwind.

Refraktometria przestrzenna

Regulowana na wejściu aberrometria opiera się na rejestracji wchodzących do oka promieni światła, które są ręcznie sterowane przez

pacjenta tak, by została zniesiona aberracja oka. Na przykładzie prezentowanym na ryc. 5 pacjent steruje punktami światła (A) wyświetlanymi w różnych miejscach na rogówce. Światło kierowane jest do plamki żółtej (M). W obszarze aberracji (biała strzałka) pacjent subiektywnie zmienia położenie punktu świetlnego (B) tak, aby mógł go zaobserwować, kompensując tym samym aberrację. Rejestrując te odchylenia, można wyznaczyć rozkład czoła fali na poziomie rogówki (2) (ryc. 5).

Zasada „podwójnego przejścia”

W metodzie tej światło w postaci szczeliny jest kierowane do oka pacjenta wzdłuż określonego południka. Czas i szybkość skanowania odbitego światła mierzone są za pomocą fotodetektorów. Jako wynik uzyskujemy pomiar aberracji fali wzdłuż danego południka. Analiza całego obszaru źrenicy polega na rejestrowaniu aberracji fal dla wielu południków (1). Metodę podwójnego przejścia (ryc. 6) zastosowano w systemie OPD Scan firmy Nidek (2).

Dzięki wprowadzeniu aberrometrów do okulistyki lekarze są w stanie określić, jakim zmianom należy poddać krzywiznę rogówki, aby pacjent uzyskał perfekcyjne widzenie. Kolejnym krokiem było połączenie wyników pomiarów aberrometrycznych z wykonywaniem laserowych zabiegów refrakcyjnych. Większość firm produkujących lasery ekscymerowe ma własne systemy aberrometryczne, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie korekcji wady refrakcji indywidualnie dla każdego pacjenta z uwzględnieniem mapy krzywizny rogówki oraz aberracji wyższego rzędu.

Korekcja aberracji wyższego rzędu jest wyzwaniem XXI wieku.

PIŚMIENICTWO:

1. Artal P.: *Understanding aberrations by using double-pass techniques*. J. Refract. Surg., 2000; 16 (5): 560-562.
2. Boyd B. F., Agarwal A., Alio J. L., Krueger R. R., Wilson S. E.: *Wavefront analysis, aberrometers and corneal topography*. Highlights of Ophthalmology International, Clayton, 2003; 190: 265-271, 284.
3. Molebny V. V., Panagopoulou S. I., Molebny S. V., Wakil Y. S., Pallikaris I. G.: *Principles of ray tracing aberrometry*. J. Refract. Surg., 2000; 16 (5): 572-575.
4. Mrochen M., Kaemmerer M., Mierdel P., Krinke H., Seiler T.: *Principles of Tscherning Aberrometry*. J. Refract. Surg., 2000; 16 (5): 570-571.
5. Thibos L. N.: *Principles of Hartmann-Shack aberrometry*. J. Refract. Surg., 2000; 16 (5): 563-565.

Praca wpłynęła do Redakcji 19.05.2004 r. (599).

Zakwalifikowano do druku 30.09.2005 r.

Adres do korespondencji (Reprint requests to):
dr n. med. Dorota Wyględowska-Promieńska
Samodzielny Publiczny Szpital Kliniczny nr 5 ŚAM
ul. Ceglana 35
40-952 Katowice