

SZYBKIE ZMIANY ROZKŁADU KRZYWIZNY ROGÓWKI PODCZAS BEZKONTAKTOWEGO BADANIA TONOMETREM CORVIS ST – ANALIZA NUMERYCZNA

FAST CHANGES OF CORNEAL CURVATURE DISTRIBUTION DURING NON-CONTACT EXAMINATION USING CORVIS ST TONOMETER – NUMERICAL ANALYSIS

Agnieszka Boszczyk*, Henryk Kasprzak

Politechnika Wrocławska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki,
Katedra Optyki i Fotoniki, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

*e-mail: agnieszka.boszczyk@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE

Kształt rogówki oka wpływa bezpośrednio na właściwości optyczne oka oraz na jakość widzenia. Geometria przedniej powierzchni rogówki, a głównie rozkład jej promieni krzywizn, jest uwarunkowana przez wartość ciśnienia wewnątrzgałkowego oraz przez osobniczo zmienne właściwości biomechaniczne przedniego odcinka oka. Właściwości te mają wpływ na pomiar tonometryczny ciśnienia wewnątrzgałkowego. W pracy używano nowoczesnego, bezkontaktowego tonometru Corvis ST. Urządzenie to pozwala na rejestrację bardzo szybkich zmian kształtu poziomego profilu rogówki wywołanych impulsem strumienia powietrza. Celem niniejszej pracy jest analiza szybkich zmian rozkładu krzywizny profilu rogówki w czasie wywołanych podmuchem powietrza, wykonana na podstawie sekwencji zdjęć uzyskanych z tonometru Corvis ST. W badaniu uczestniczyło dziesięciu zdrowych ochotników. Każdy z nich został poddany serii 9 pomiarów na jedno oko. Uzyskane sekwencje zdjęć przeanalizowano numerycznie za pomocą pakietu Matlab. Czasowo-przestrzenne rozkłady krzywizny wyznaczono na podstawie dwóch metod wygładzania krawędzi rogówki: funkcją wielomianową oraz filtrem gaussowskim. Następnie wyznaczono szereg parametrów opisujących krzywiznę i jej rozkład oraz poddano je analizie statystycznej pod kątem powtarzalności dla poszczególnego pacjenta.

Słowa kluczowe: krzywizna rogówki, tonometr Corvis ST, ciśnienie wewnątrzgałkowe

ABSTRACT

The shape of the cornea has a direct impact on the optical properties of the eye and vision quality. The geometry of the anterior surface of the cornea and its curvature distribution is determined by the value of the intraocular pressure (IOP) and by individual biomechanical properties of the anterior segment of the eye. These properties influence measurement of IOP. The impact of these properties can be observed during the IOP examination. In this study, the modern, non-contact Corvis ST tonometer was used. This device records ultra-fast changes in the shape of a horizontal profile of the cornea, which are caused by air blast. Our purpose was to numerically analyze changes of the corneal profile curvature distributions, which occur during deformation caused by an

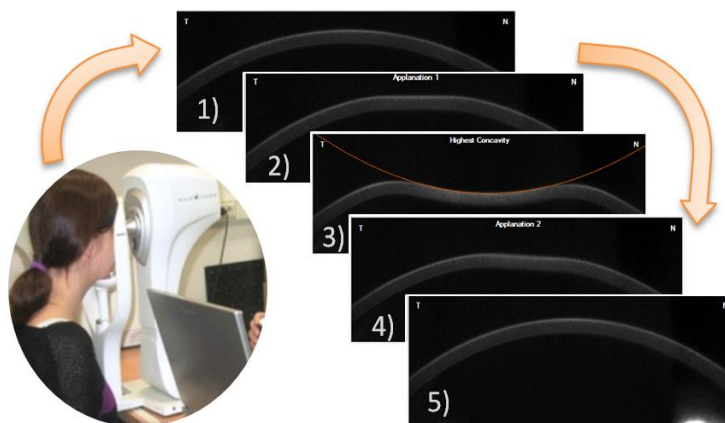
air-puff tonometric examination. Ten healthy volunteers were examined using the Corvis ST. One eye of each subject was measured nine times. On the basis of two different smoothing methods (polynomial fitting and gaussian filtering), time-spatial distributions of corneal curvature profiles were obtained. Further, a number of parameters describing these distributions was calculated and statistically analyzed in terms of reproducibility for the individual patient.

Keywords: corneal curvature, Corvis ST tonometer, intraocular pressure

1. Wstęp

Ze względu na dużą moc optyczną rogówki, około 2/3 mocy całego oka, pełni ona istotną rolę w procesie widzenia [1, 2]. Jej parametry optyczne i mechaniczne są ze sobą nawzajem powiązane: jakakolwiek zmiana własności biomechanicznych powoduje zmianę krzywizny rogówki oraz położenie ogniska, a zatem wpływa na jakość obserwowanych obrazów. Zaburzenia właściwości biomechanicznych rogówki mogą prowadzić do licznych patologii oka i – w efekcie – do upośledzenia widzenia [3]. Przykładowo, stożek rogówki jest schorzeniem pojawiającym się na skutek ścienienia wierzchołka rogówki oka, co prowadzi do jej uwypuklenia oraz powoduje zniekształcenie obserwowanych obrazów, których nie można skorygować w prosty sposób [4]. W związku z tym potrzeba badań i opisu właściwości rogówki istnieje nie tylko w celach poznawczych, ale i diagnostycznych.

Tonometr Corvis ST jest urządzeniem, które wyznacza wartość ciśnienia wewnątrzgałkowego oraz szereg parametrów związanych z biomechaniką rogówki. W tym celu, podczas pomiaru trwającego 32 ms tonometr rejestruje sekwencję wideo (4375 obrazów/s), przedstawiającą uginanie się poziomego profilu rogówki na skutek podmuchu powietrza. Pomiar ciśnienia oraz zarejestrowane obrazy przedstawiające przekrój rogówki w pięciu charakterystycznych stadiach procesu deformacji pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Pomiar ciśnienia za pomocą tonometru Corvis ST oraz pięć charakterystycznych kształtów profilu rogówki zarejestrowanych podczas badania: 1) przed deformacją 2) podczas pierwszej aplanacji (wypłaszczenie w trakcie wgłębienia rogówki), 3) maksymalne wgłębienie, 4) podczas drugiej aplanacji, 5) po powrocie do pierwotnego kształtu.

Tonometr Corvis ST stał się dostępny komercyjnie w 2010 roku. Od tego czasu powstało wiele publikacji na temat powtarzalności parametrów uzyskanych za jego pomocą oraz ich korelacji wzajemnej, z wiekiem lub chorobami oka [5, 6, 7, 8, 9]. Ponadto, możliwość wyeksportowania sekwencji wideo i ich niezależna analiza pozwala rozszerzyć zakres informacji na temat dynamiki rogówki podczas pomiaru tonometrem Corvis ST. Na podstawie tych sekwencji stworzono modele biomechaniczne rogówki [10, 11], zaproponowano szereg nowych parametrów opisujących jej dynamikę [12, 13], a także opisano dynamiczne zmiany rozkładu krzywizn na profilu rogówki [14, 15].

Krzywiznę profilu rogówki można wyznaczyć dwoma metodami. Pierwszą z nich jest zaprezentowany przez Ji *et al.* podział profilu rogówki na segmenty i dopasowanie łuku do każdego z nich [14]. Zaletą tej metody jest eliminacja wpływu szumów i dyskretności krzywej profilu bez konieczności jego wygładzania. Z drugiej strony, ze względu na dopasowanie łuku do całego segmentu, metoda ta może

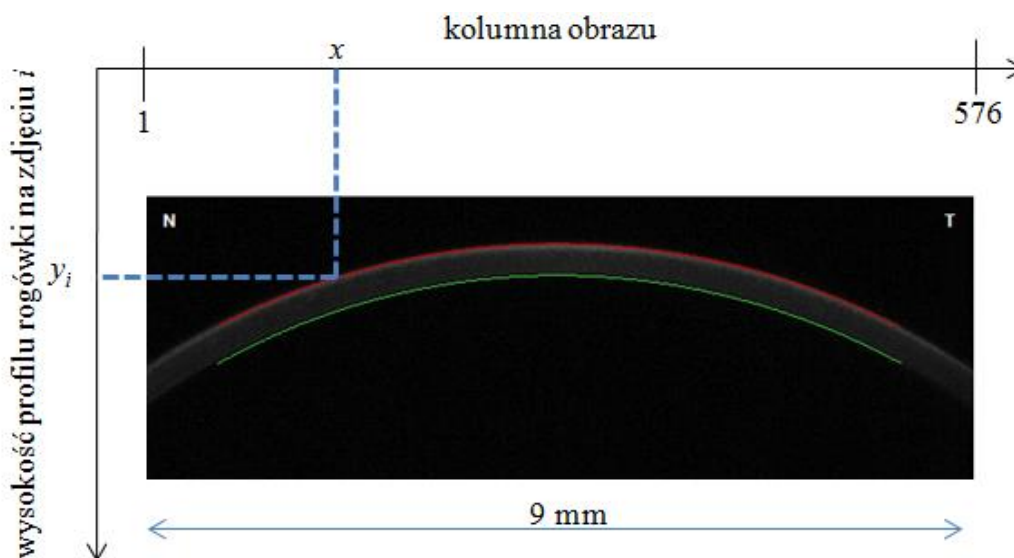
nie uwzględnić niewielkich, lokalnych zmian krzywizny. W drugim podejściu należy najpierw wygładzić dyskretną krzywą profilu rogówki, a następnie obliczyć krzywiznę metodą analityczną. W tym przypadku trudność polega na doborze odpowiedniej metody wygładzania, gdyż krzywizny wyznaczone na podstawie nawet – na pierwszy rzut oka – niewiele różniących się krzywych mogą być istotnie różne. Zaletą jest jednak możliwość wyznaczenia krzywizny w każdym punkcie profilu rogówki.

W niniejszej pracy zaprezentowano, jak sposób wygładzenia profilu rogówki wpływa na rozkład krzywizny i powtarzalność jej parametrów. Porównano dwie metody: często stosowane dopasowanie wielomianu do profilu rogówki [13, 14, 16] oraz wygładzenie profilu za pomocą filtru gaussowskiego, opisane przez autorów w pracy [15]. Parametry rozkładu krzywizn rogówki mogą być w przyszłości wykorzystane do opisu właściwości biomechanicznych rogówki oka, które jak dotychczas nie są podawane przez tonometr Corvis ST.

2. Metoda

Do badania za pomocą tonometru Corvis ST zgłosiło się dziesięciu ochotników: siedem kobiet i dwóch mężczyzn w wieku 22–31 lat oraz jeden mężczyzna w wieku 67 lat. Pacjenci zostali poinformowani o celu badań oraz ich przebiegu. Każdy z nich został poddany serii 9 pomiarów w odstępach kilkuminutowych. Mierzone było jedno oko – prawe lub lewe. Za pomocą oprogramowania Corvis ST (ver. 6.07r24) wyeksportowane zostało 9 sekwencji obrazów przedstawiających poziomy przekrój rogówki uginającej się pod wpływem podmuchu powietrza. Następnie sekwencje obrazów poddano analizie numerycznej w programie Matlab.

Pierwszym etapem analizy było wykrycie położenia zewnętrznej krawędzi rogówki. W tym celu posłużono się metodą Canny'ego oraz szeregiem operacji morfologicznych. Każda z sekwencji trwa około 32 milisekundy i zawiera 140 obrazów o rozmiarach 200×576 pikseli. Wysokość zewnętrznej krawędzi rogówki na obrazie numer i opisano funkcją $y_i(x)$, gdzie x – numer kolumny w obrazie (p. rys. 2). Wysokość profilu rogówki wyznaczona została poprzez numery pikseli w poszczególnych kolumnach obrazu, w których wykryto obecność krawędzi rogówki, zatem funkcja $y_i(x)$ jest dyskretna i przyjmuje wartości całkowite.



Rys. 2. Wyznaczenie położenia zewnętrznej krawędzi poziomego profilu rogówki:
 y_i – wysokość profilu w obrazie i w kolumnie obrazu x

Krzywiznę profilu rogówki zdefiniowano jako:

$$k_i(x) = \frac{\frac{d^2}{dx^2} y_i(x)}{\left(1 + \left(\frac{d^2}{dx^2} y_i(x)\right)^2\right)^{3/2}} \quad (1)$$

gdzie:

i – numer obrazu,

x – numer kolumny w obrazie,

$y_i(x)$ – wysokość zewnętrznej krawędzi rogówki na obrazie numer i w kolumnie obrazu x ,

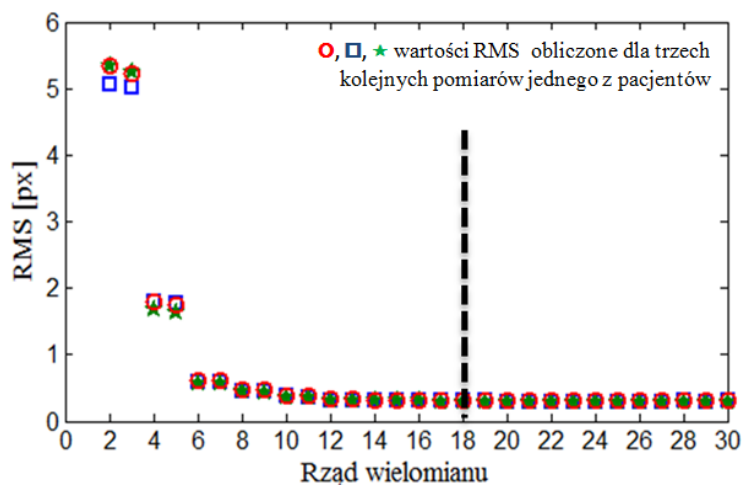
$k_i(x)$ – wartość krzywizny profilu rogówki w obrazie i oraz kolumnie obrazu x .

Aby wyznaczyć $k_i(x)$, funkcję $y_i(x)$ należy wygładzić. Do rozwiązania tego zagadnienia można podejść na kilka sposobów. Jednym z nich jest dopasowanie wybranej funkcji analitycznej tak, by jej kształt przypominał funkcję wygładzaną. Tę metodę zastosowano dopasowując do funkcji $y_i(x)$ funkcję wielomianową, oznaczając ją jako $yw_i(x)$.

Aby wybrać odpowiedni rząd wielomianu, dla trzech pomiarów wyznaczono wartość średniokwadratową RMS (ang. *root mean square*) różnicy pomiędzy funkcją $y_i(x)$ oraz $yw_i(x)$:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{140} \sum_{x=1}^{576} (y_i(x) - yw_i(x))^2}{140 \cdot 576}} \quad (2)$$

Zależność RMS od rzędu wielomianu przedstawia rysunek 3. Od około 12 rzędu wartość RMS w każdym z pomiarów zmienia się tylko nieznacznie, przyjmując wartość około 0,3 piksela. W dalszej części pracy do wygładzania profilu rogówki wykorzystywano 18 rząd wielomianu. Wyznaczony na jego podstawie rozkład krzywizny oznaczono jako $kg_i(x)$. Źródła literaturowe podają różne wielkości piksela w sekwencjach zdjęć z tonometru Corvis ST [14, 17, 18]. W niniejszej pracy przyjęto, że jednemu pikselowi odpowiada 0,016 mm.

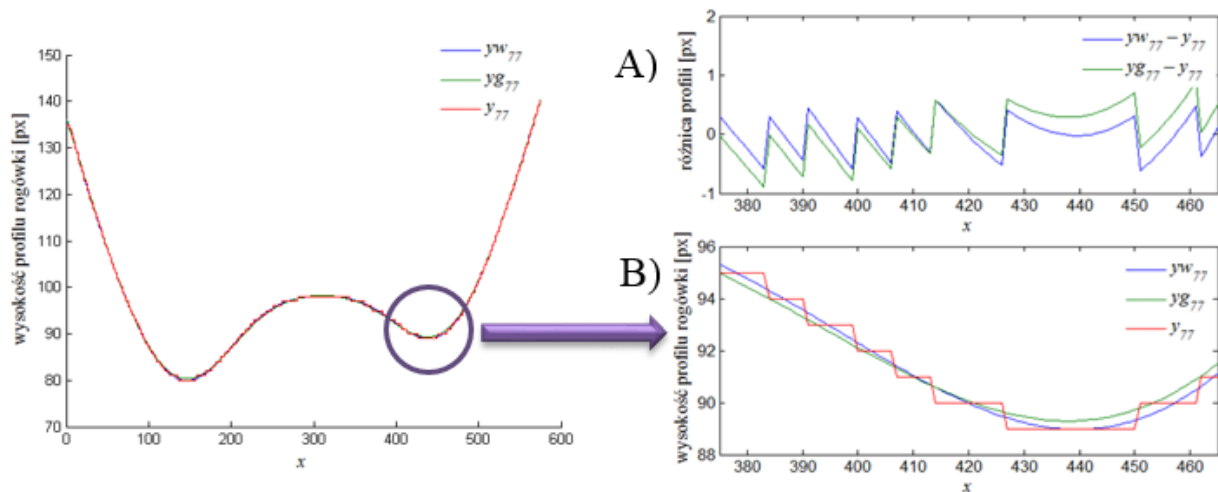


Rys. 3. Zależność średniej kwadratowej RMS od stopnia wielomianu wygładzającego.

W celu wygładzenia funkcji można zastosować również szeroką gamę filtrów sygnałowych, które wykorzystują lokalne uśrednianie danych. Jednym z nich jest filtr gaussowski. Dokładna procedura opisująca wygładzanie profilu rogówki tym filtrem opisana została w pracy [15]. Funkcja $y_i(x)$ wygładzona za jego pomocą oznaczona będzie jako $yg_i(x)$, a jej krzywizna jako $kg_i(x)$.

Na rysunku 4 pokazano dwa sposoby wygładzenia: wielomianowe oraz filtrem gaussowskim

w odniesieniu do dyskretnego profilu zdeformowanej rogówki (numer obrazu $i = 77$). Aby różnice między nimi były dostrzegalne, wykres zawężony został do szerokości 100 kolumn obrazu. Oba wygładzenia nieznacznie się od siebie różnią, choć każde z nich wydaje się wiernie odwzorowywać kształt profilu rogówki. Jednak ze względu na obecność pochodnych we wzorze na krzywiznę, te nieznaczne rozbieżności mogą skutkować znacząco odmiennymi rozkładami krzywizn obliczonymi na ich podstawie.



Rys. 4. Porównanie wygładzania wielomianem oraz filtrem gaussowskim w obrazie $i = 77$: A) jako różnica między profilami wygładzonymi a dyskretnym oraz B) w odniesieniu do dyskretnego profilu zdeformowanej rogówki

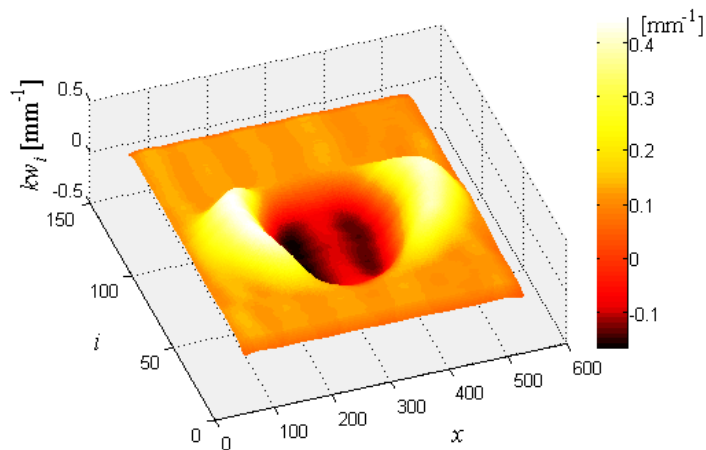
W celu ustabilizowania niewielkich wahań pomiędzy rozkładami krzywizn w sąsiednich obrazach sekwencji, autorzy publikacji [15] posłużyli się filtrem uśredniającym (okno o rozmiarze 13 obrazów \times 7 pikseli). W niniejszej pracy również rozkład krzywizny wyznaczony na podstawie profili wygładzonych wielomianem został dodatkowo wygładzony takim samym filtrem.

Aby określić jak metoda wygładzania wpływa na kształt rozkładów krzywizny, wybrane parametry rozkładów $kw_i(x)$ i $kg_i(x)$ poddano analizie statystycznej. W celu ilościowego porównania powtarzalności zastosowano współczynnik korelacji wewnątrzklasowej ICC (ang. *intraclass correlation coefficient*) w modelu losowym ANOVA dla grup niezależnych. W zależności od jego wartości powtarzalność uznaje się jako niską ($ICC < 0,40$), średnią ($0,40 \leq ICC < 0,60$), dobrą ($0,60 \leq ICC < 0,75$) lub wysoką ($0,75 \leq ICC < 1$) [19].

3. Wyniki

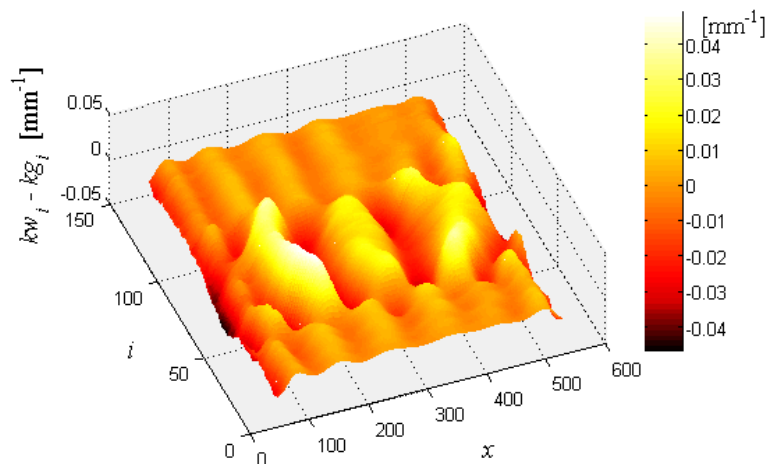
Przykładowy, trójwymiarowy rozkład czasowo-przestrzenny krzywizny profilu deformującej się rogówki pokazano na rysunku 5. Można na nim zaobserwować sposób, w jaki zmienia się krzywizna w poszczególnych etapach pomiaru:

- 1) na początku, w obrazach i od 1 do około 30 (0–8 ms) wartość krzywizny na całym profilu jest podobna i wynosi około $0,1 \text{ mm}^{-1}$;
- 2) następnie, gdy wierzchołek rogówki zaczyna się wgłębiać, krzywizna po bokach zwiększa się do około $0,4 \text{ mm}^{-1}$, a w centrum profilu rogówki przyjmuje wartości ujemne;
- 3) pod koniec pomiaru, w obrazach i od około 100 do 140 (23–32 ms), gdy rogówka wraca do swojego pierwotnego kształtu, krzywizna również wraca do swojej początkowej wielkości.



Rys. 5. Wygładzony rozkład czasowo-przestrzenny krzywizny profilu deformującej się rogówki $k_w(x)$

Rysunek 6 przedstawia różnicę pomiędzy krzywiznami: $k_w(x)$ wyznaczoną na podstawie wielomianu 18 rzędu oraz $k_g(x)$ wyznaczoną na podstawie profilu wygładzonego filtrem gaussowskim. Wartości tych różnic zawierają się w przedziale $\pm 0,04 \text{ mm}^{-1}$, co może skutkować nie tylko odmiennymi wartościami krzywizny w poszczególnych kolumnach obrazu, ale również innym położeniem punktów o maksymalnej, minimalnej i zerowej krzywiznie na profilu rogówki.



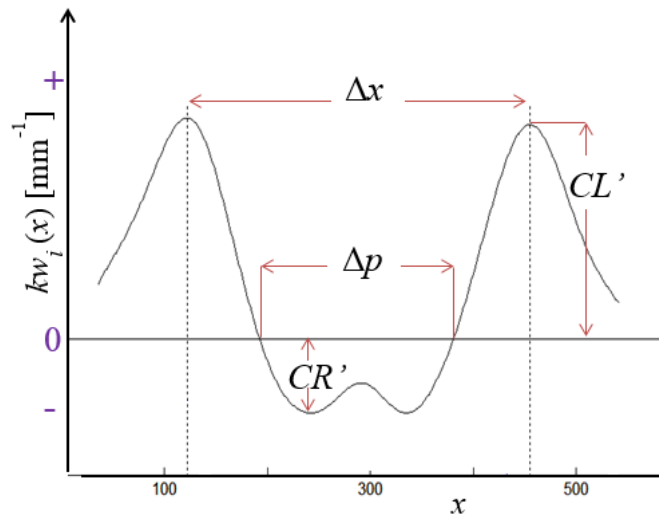
Rys. 6. Różnica pomiędzy czasowo-przestrzennymi rozkładami krzywizny profilu rogówki $k_w(x)$ oraz $k_g(x)$

Wartość średniego promienia krzywizny niezdeformowanej rogówki R_0 obliczono jako odwrotność średniej wartości krzywizny pierwszych dziesięciu obrazów sekwencji pomiaru na obszarze ± 150 pikseli na prawo i lewo od wierzchołka rogówki:

$$R_0 = \left(\frac{1}{2 \cdot 150 \cdot 10 \sum_{i=1}^{10} \sum_{x=288-150}^{288+150} k_i(x)} \right)^{-1} \quad (3)$$

Podczas wglębnienia wierzchołka rogówki rozkład krzywizny przyjmuje charakterystyczny kształt odwróconego kapelusza. Na rysunku 7 przedstawiającym przykładowy rozkład krzywizny w chwili maksymalnego przemieszczenia wierzchołka rogówki oznaczono szereg parametrów opisujących jego kształt: Δp – odległość punktów przegięć profilu rogówki (punkty o zerowej krzywiznie), Δx – odległość

punktów o największej dodatniej krzywiznie, CL' – najbardziej dodatnia wartość krzywizny, CR' – najbardziej ujemna wartość krzywizny.

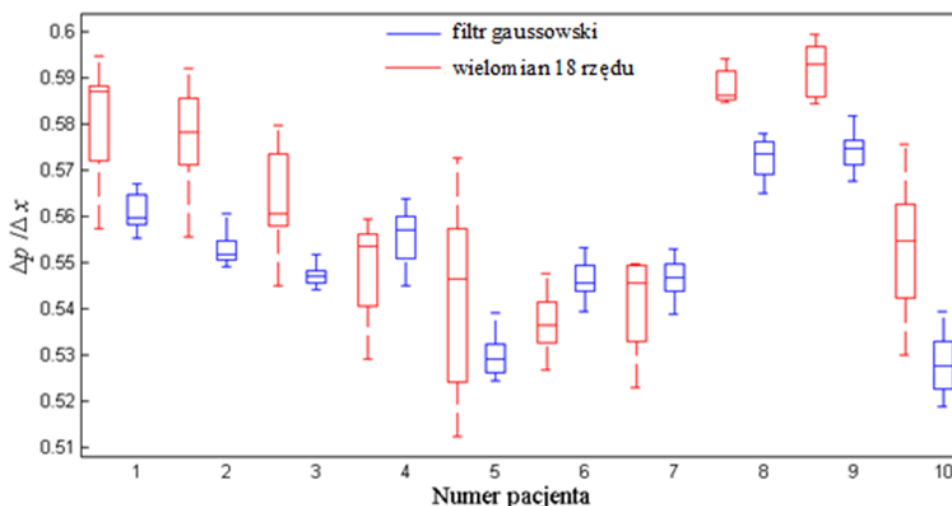


Rys. 7. Rozkład krzywizny $k_{w_i}(x)$ w chwili maksymalnego przemieszczenia wierzchołka rogówki oraz parametry opisujące jego kształt.

W tabeli 1 zamieszczono wartości współczynnika ICC dla opisanych parametrów rozkładu krzywizny wyznaczonych na podstawie dwóch metod wygładzania funkcji $y_i(x)$. Dla czterech z nich: R_0 , CL' , Δx , Δp powtarzalność jest podobna – różnice pojawiają się na drugim miejscu po przecinku. Dla CR' oraz $\Delta p/\Delta x$ występuje większa różnica na korzyść wygładzania filtrem gaussowskim. Rozrzuty wartości parametru $\Delta p/\Delta x$ dla poszczególnych pacjentów porównano na rysunku 8 za pomocą wykresu pudełkowego: kolorem czerwonym oznaczono wartości parametru obliczonego na podstawie funkcji $y_i(x)$ wygładzonej wielomianem, kolorem niebieskim wartości uzyskane na podstawie funkcji $y_i(x)$ wygładzonej filtrem wielomianowym.

Tabela 1. Wartości współczynnika ICC wraz z 95% przedziałem ufności CI dla sześciu parametrów rozkładu krzywizny wyznaczonych na podstawie dwóch metod wygładzania funkcji $y_i(x)$

Parametry krzywizny	ICC (95%CI) dopasowany wielomian 18 rzędu	ICC (95%CI) wygładzenie filtrem gaussowskim
R_0	0,974 (0,943–0,992)	0,989 (0,977–0,997)
CL'	0,932 (0,857–0,979)	0,953 (0,898–0,986)
Δx	0,775 (0,591–0,923)	0,741 (0,545–0,910)
Δp	0,827 (0,671–0,943)	0,823 (0,664–0,942)
CR'	0,799 (0,627–0,933)	0,890 (0,778–0,966)
$\Delta p/\Delta x$	0,747 (0,553–0,912)	0,907 (0,809–0,97)



Rys.8. Wykres pudełkowy parametru $\Delta p/\Delta x$ dla poszczególnych pacjentów – porównanie wpływu dwóch metod wygładzania

4. Podsumowanie

Promień krzywizny w wierzchołku maksymalnie wgłębionej rogówki jest jedynym parametrem krzywizny wyznaczanym przez oprogramowanie tonometru Corvis ST. Na podstawie sekwencji obrazów profilu rogówki można jednak uzyskać informacje o całym rozkładzie krzywizny i jego zmian w czasie na każdym obszarze profilu rogówki. W tym celu należy dobrać odpowiednią metodę przetwarzania obrazów i wygładzania krawędzi tak, by wydobyć informacje na jej temat z cyfrowego obrazu. Można ustalić kilka kryteriów doboru metody, np. złożoność obliczeniowa lub wielkość różnicy między wygładzonym i niewygładzonym profilem rogówki.

W niniejszej pracy dwie wybrane metody wygładzania profilu rogówki porównano pod kątem powtarzalności parametrów rozkładu krzywizny. Powtarzalność parametrów przy niezmiennych warunkach badania jest cechą pożądaną w diagnostyce, umożliwiającą charakteryzowanie i rozróżnianie poszczególnych pacjentów. Powtarzalność czterech z sześciu parametrów (R_0 , CL' , Δx , Δp) była podobna w obu metodach, natomiast dla CR' oraz $\Delta p/\Delta x$ powtarzalność była wyższa przy wygładzaniu filtrem gaussowskim.

W związku z tym, że wyniki różnią się w zależności od zastosowanej metody wygładzania, przy porównywaniu poszczególnych parametrów należy zwrócić uwagę na to, by w poszczególnych pomiarach były one wyznaczone tą samą metodą.

LITERATURA

- [1] D. Miller, N. Atebara, R. Stegmann: *The role of the limbal cornea in vision*, Eye, vol. 3(2), 1989, s. 128–131.
- [2] M. Millodot, J. Sivak: *Contribution of the cornea and lens to the spherical aberration of the eye*, Vision Research, vol. 19(6), 1979, s. 685–687.
- [3] E. Spörl, N. Terai, M. Haustein, A.G. Böhm, F. Raiskup-Wolf, L.E. Pillunat: *Biomechanical condition of the cornea as a new indicator for pathological and structural changes*, Der Ophthalmologe: Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft, vol. 106(6), 2009, s. 512–520.
- [4] R.F. Hess, L.G. Carney: *Vision through an abnormal cornea: a pilot study of the relationship between visual loss from corneal distortion, corneal edema, keratoconus, and some allied corneal pathology*, Investigative Ophthalmology & Visual Science, vol. 18.5, 1979, s. 476–483.
- [5] S. Bak-Nielsen, I.B. Pedersen, A. Ivarsen, J. Hjortdal: *Repeatability, reproducibility, and age dependency of dynamic Scheimpflug-based pneumotonometer and its correlation with a dynamic bidirectional pneumotometry device*, Cornea, vol. 34(1), 2015, s. 71–77.
- [6] M. Haustein, E. Spoerl, L. Pillunat: *Correlation of Biomechanic Parameters Measured by Corvis ST (Oculus®) and by Ocular Response Analyzer (ORA, Reichert®)*, Investigative Ophthalmology & Visual Science, vol. 54(15), 2013, s. 1626–1626.
- [7] L. Tian, D. Wang, Y. Wu, X. Meng, B. Chen, M. Ge, Y. Huang: *Corneal biomechanical characteristics measured by the*

- CorVis Scheimpflug technology in eyes with primary open-angle glaucoma and normal eyes*, Acta Ophthalmologica, 2015.
- [8] S. Bak-Nielsen, I. B. Pedersen, A. Ivarsen, J. Hjortdal: *Dynamic Scheimpflug-based assessment of keratoconus and the effects of corneal cross-linking*, Journal of Refractive Surgery, vol. 30(6), 2014, s. 408–414.
- [9] V. Jhanji, G. Lai, M. Yu, C. K. Leung: *Test-retest variability of Corvis measurements in Normal and Keratoconus Eyes*, Investigative Ophthalmology & Visual Science, 55(13), 2014, s. 3712–3712.
- [10] M. A. Lago, M. J. Rupérez, F. Martínez-Martínez, C. Monserrat, E. Larra, J. L. Güell, C. Peris-Martínez: *A new methodology for the in vivo estimation of the elastic constants that characterize the patient-specific biomechanical behavior of the human cornea*, Journal of Biomechanics, 48(1), 2015, s. 38–43.
- [11] S. Kling, N. Bekesi, C. Dorronsoro, D. Pascual, S. Marcos: *Corneal viscoelastic properties from finite-element analysis of in vivo air-puff deformation*, PLoS One, vol. 9(8), 2014.
- [12] R. Koprowski, A. Lyssek-Boron, A. Nowinska, E. Wylegala, H. Kasprzak, Z. Wrobel: *Selected parameters of the corneal deformation in the Corvis tonometer*, Biomedical Engineering Online, vol. 13(1), 2014.
- [13] R. Koprowski: *Automatic method of analysis and measurement of additional parameters of corneal deformation in the Corvis tonometer*, Biomedical engineering online, vol. 13(1), 2014.
- [14] T. Li, L. Tian, L. Wang, Y. Hon, A.K. Lam, Y. Huang, Y. Wang, Y. Zheng: *Dynamic curvature topography for evaluating the anterior corneal surface change with Corvis ST*, Biomedical Engineering Online, vol. 14(1), 2015.
- [15] H. Kasprzak, A. Boszczyk: *Numerical analysis of corneal curvature dynamics based on Corvis tonometer images*, Journal of Biophotonics, vol. 9(5), 2016, s. 436–444.
- [16] M. Rogowska, D.R. Iskander: *Age-related changes in corneal biomechanics*, Proceedings of the VII European/I World Meeting in Visual and Physiological Optics, VPOptics, 2014.
- [17] T. Li, L. Tian, L. Wang, Y. Hon, A. K. Lam, Y. Huang, Y. Wang, Y. Zheng: *Correction on the distortion of Scheimpflug imaging for dynamic central corneal thickness*, Journal of Biomedical Optics, vol. 20, 2015.
- [18] R. Koprowski: *Open source software for the analysis of corneal deformation parameters on the images from the Corvis tonometer*, Biomedical Engineering Online, vol. 14(1), 2015.
- [19] D.V. Cicchetti: *Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology*, Psychological Assessment, vol.6(4), 1994, s. 284–290.

otrzymano / submitted: 24.11.2016
zaakceptowano / accepted: 12.12.2016