

Principi di topo-aberrometria e sue applicazioni in optometria

Ing. Renzo Mattioli - responsabile ricerca e sviluppo diagnostica topografica presso Optikon

Abstract: Scopo del corso è fornire le basi sulla Aberrometria Oculare e Corneale, calcolata dalla topografia altitudinale, entrambe misurabili con il topo-aberrometro Keratron Onda in condizioni ottimali per la realizzazione di LAC morbide FOOT (Fronte d'Onda Ottimizzato). Lenti che consentono di ottenere l'abbattimento delle aberrazioni in situazioni con cornee particolarmente difficili.

IL FRONTE D'ONDA

L'occhio umano, come qualsiasi sistema ottico non perfetto è affetto da **aberrazioni**, la cui misura fisica oggettiva può essere effettuata dalle distorsioni che esso produce sui **fronti d'onda**.

Il fronte d'onda (*wavefront*) è una superficie costituita da tutti i punti nello spazio che, nella propagazione della energia luminosa, si trovano in fase contemporaneamente. Un sistema ottico perfetto trasforma il fronte d'onda piano prodotto da una sorgente puntiforme lontana, in cui i raggi sono fra loro paralleli, in un fronte d'onda sferico ideale, in cui i raggi che attraversano la pupilla convergono tutti nello stesso punto.

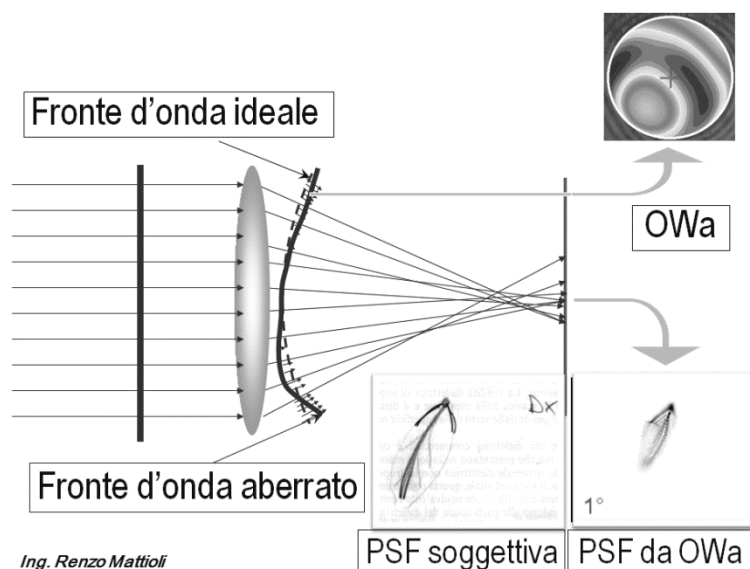


Figura 1

Le imperfezioni dell'occhio reale causano una deviazione dei raggi dalla posizione retinica ideale. Il fronte d'onda che si propaga nell'occhio, perpendicolare alle traiettorie dei raggi, è distorto in un sistema ottico aberrato come illustrato dalla *figura 1*. La differenza tra il fronte d'onda aberrato e la sua forma sferica ideale è chiamata **Aberrazione del fronte d'onda Oculare (OWa = Ocular Wavefront aberration)** distinguibile dalle sue componenti **Wavefront Corneale CWa** e **Interna IWa**. La aberrazione *WA* è misurata sul piano della pupilla, e può essere rappresentata con una mappa a colori analogamente alla topografia.

l'**aberrometria corneale CWa (Corneal Wavefront aberration)** ovvero *la componente della aberrometria oculare dovuta alla sola superficie corneale anteriore* può essere ottenuta dalla **topografia corneale** altimetrica eguendo un tracciamento virtuale della luce (**ray tracing**) sulle **mappe di elevazione corneale....**¹

¹Sulla definizione di aberrometria corneale e sui relativi metodi di ricostruzione dalla topografia, si rimanda a: "Mattioli R, Camellin M. La aberrometria corneale ed il link "topo aberrometrico. In: LASEK ASA M.Camellin (editor). Canelli (Italy):Fabiano 2004. pp. 231-253."

I POLINOMI DI ZERNIKE

Una maniera tipica di descrivere le aberrazioni del fronte d'onda Oculare Corneale o Interno è scomporla espandendola in **polinomi di Zernike**.^{2,3} I **coefficienti** (o **termini**) di Zernike rappresentano il "peso" nella somma di ciascuna di queste superfici elementari (polinomi di Zernike) nel fronte d'onda complessivo.

Gli **ordini bassi** (*Low Orders, LO*, icone su sfondo grigio scuro in *figura 2*) corrispondono agli errori refrattivi convenzionali che possono essere compensati con gli occhiali: i termini del 1° ordine rappresentano il prisma o *tilt*, ed i termini del 2° ordine la sfera+cilindro+asse, ovvero il *defocus* (=sfero-equivalente) e l'*astigmatismo*.

I termini di **ordine elevato** (*High Orders, HO*, su sfondo azzurro in *figura 2*) includono altre aberrazioni, non correggibili con gli occhiali, fra cui l'**aberrazione sferica** che produce cambiamenti nella messa a fuoco con la dimensione pupillare, la **coma** che produce una visione sfumata dei punti luminosi simile a una "cometa" e tante altre non rotazionalmente simmetriche.

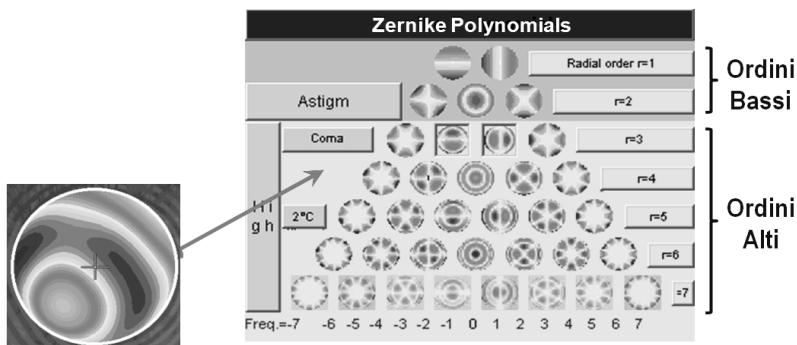


Figura 2

GLI EFFETTI COMBINATI DELLA PUPILLA E DELLE ABERRAZIONI HO SUL FRONTE D'ONDA

La **dimensione della pupilla** determina il contributo relativo della diffrazione e delle aberrazioni alla qualità dell'immagine. Con una pupilla molto piccola, la qualità ottica è dominata dalla diffrazione. Con occhi aberrati e pupille dilatate, il contributo della diffrazione diventa trascurabile ma l'effetto delle aberrazioni ottiche diviene rilevante aumentando, tipicamente, al quadrato del diametro pupillare. Il diametro pupillare ottimale (cioè quello che fornisce la risoluzione migliore) dipende dalla effettiva quantità e distribuzione delle aberrazioni, ma in un occhio normale è intorno ai 3 mm⁴.

Gli effetti delle aberrazioni combinate tra di loro, e con la diffrazione a una data pupilla, è prevedibile solo con una analisi complessa FFT del fronte d'onda che permette di simulare sia la PFS esattamente come la vede il paziente (Point Spread Function, es. *figura 3* e *figura 1* in basso a destra) che un ottotipo (es. *figura*

²Mahajan VN, "Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupil," Applied Optics **33**, 8121-8124 (1994)

³Tripoli NK, "The Zernike polynomials" . In: *The Aberrometers* ed.: F.Caimi, R.Brancato, Canelli (Italy), Fabiano 2003; Chap.3: 51-64

⁴Artal P, Navarro R, "Monochromatic modulation transfer function of the human eye for different pupil diameters: an analytical expression," Journal of the Optical Society of America A. **11**, 246-249 (1994).

5) ed ottimizzare quindi il Visus. Per le aberrazioni difatti non vale la sovrapposizione degli effetti e la rimozione parziale o totale di una singola aberrazione può difatti addirittura peggiorare l'acuità ed il comfort visivo

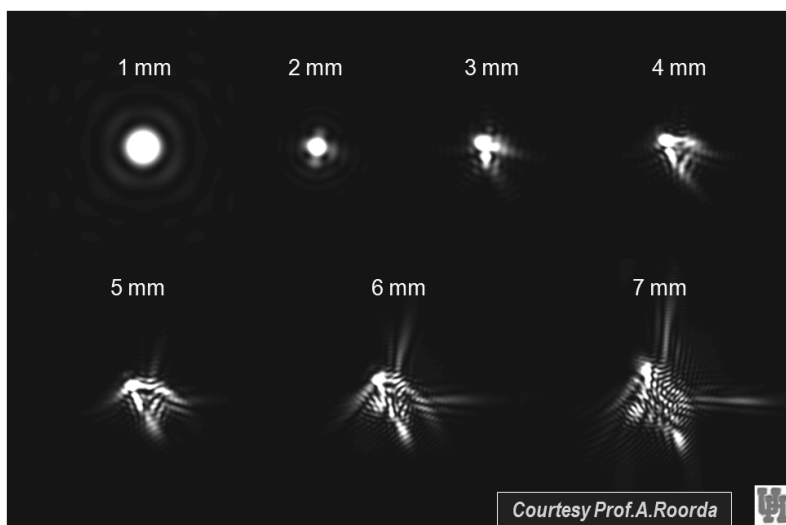


Figura 3

IL KERATRON ONDA

Il *Keratron Onda* è uno strumento progettato e prodotto dalla Optikon 2000 SpA (Roma, Italia) per la misura contemporanea della **topografia corneale** e delle **aberrazioni del fronte d'onda oculare** o totale.

Sottraendo la aberrometria corneale (CW) da quella oculare (OW) permette di tracciare la mappa di quella interna (IW), e ad esse applicare le varie funzioni di rappresentazione dei termini di Zernike (RMS, istogrammi e sommario aberrazioni) e le simulazioni visive (Visus, PSF, MTF) del software "Keratron Scout"

Grazie all'adozione di un cono con retro-mira, il Keratron Onda combina una misura della aberrometria oculare con metodo Shack-Hartman alla copertura topografica uniforme al centro sino all'80-90% della cornea,⁵ precisione altimetrica sub-micron del metodo arc-step,⁶ e l'ampio range di misura (da 0 a 130D) degli altri Keratron.^{7 8} Queste caratteristiche consentono di realizzare lenti a contatto topo-aberrometriche precise e confortevoli altamente personalizzate alla cornea misurata.

Il Keratron Onda insieme alla Topo-Aberrometria effettua anche misure della rifrazione, della accomodazione residua, pupillometria dinamica, gradienti del fronte d'onda, T-BUT non invasivo e delle opacità oculari

⁵ Per una descrizione più completa dei principi di funzionamento del Keratron Onda, si rimanda a: Mattioli R., Camellin M., Tripoli NK. "Topo-Aberrometry with Keratron Onda". In: Corneal Topography: A Guide for Clinical Application in the Wavefront Era, Second Edition ed.: Wang, M. & Swartz TS. Slack inc. (2011)

⁶ Tripoli NK, Cohen KL, Holmgren DE, Coggins JM. Assessment of radial aspheres by the Keratron keratoscope using an arc-step algorithm. *Am J Ophthalmol* 1995; 120: 658-664.

⁷ Mattioli, R. & Tripoli, NK. . Corneal Geometry Reconstruction with the Keratron Videokeratographer. *Optom Vis Sci* 1997, 74, 881-894

⁸ Mattioli R, Frondizi S., Rubeo A., Saldutti M., "The Keratron Scout and Wavefront Analysis". In: *The Aberrometers* ed.: F.Caimi, R.Brancato, Canelli (Italy), Fabiano 2003; Chap.14: 243-257

Inoltre il software “Keratron Scout” aggiornato gratuitamente in rete fornisce un supporto diagnostico completo: dal modulo per applicare lenti a contatto con vari metodi alle funzioni per spostare l’asse e controllare la ripetibilità, dagli indici di Maloney agli indici CLMI per la quantificazione e follow up del cheratocono.

IL KERATRON ONDA e LE LENTI a FRONTE d’ONDA OTTIMIZZATO (FOOT)

Le lenti FOOT realizzate da IMAGO Contact sono certamente uno dei migliori esempi di applicazione delle misure topo-aberrometriche con il Keratron Onda.

La figura seguente illustra l’applicazione in un caso tipico, in presenza di una situazione corneale complessa, con elevate aberrazioni di alto ordine non correggibili con occhiali o parzialmente con LAC tradizionali. Da sinistra a destra le mappe topografiche e del fronte d’onda Oculare, Corneale ed Interno. In alto le misure preliminari. In basso le stesse mappe indossando una lente FOOT.

Come si vede in particolare dalle simulazioni dalla OWa nella figura successiva, con la lente FOOT tutte le aberrazioni sono state praticamente azzerate, ottenendo un visus di 10/10 anche in condizioni notturne. A confronto la migliore correzione con gli occhiali tradizionali di $-6,75/-1,2@130^\circ$ non arriva a 7/10.

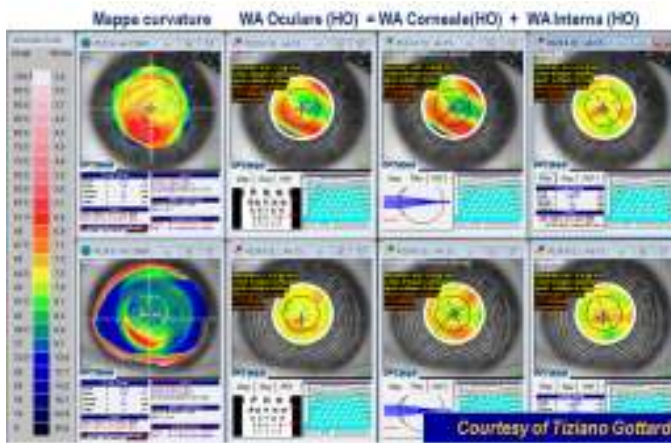


Figura 4

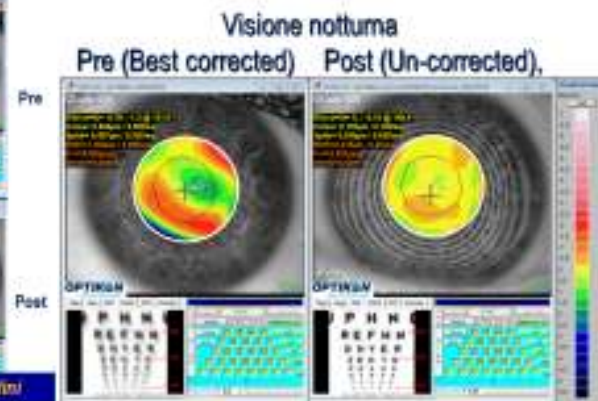


Figura 5

Metodo e risultati statistici delle lenti FOOT sono descritti nel prossimo intervento, a cura di Tiziano Gottardini della IMAGO Contact.