



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

—
TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA BIOMEDICA

*Correzione di immagini tramite ottica adattiva
sensorless*

RELATORE: RICERCATORE CNR-IFN PELIZZO MARIA-GUGLIELMINA

CORRELATORE: TECNOLOGO CNR-IFN BONORA STEFANO

LAUREANDO: FEDERICA SAVARINO

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

Indice generale

INTRODUZIONE.....	4
1. SISTEMA ADATTIVO.....	6
1.1 Wavefront.....	8
1.2 Misure del fronte d'onda	11
1.3 Tecnologia a specchi.....	18
1.4 Image-sharpening.....	28
1.4.1 CORREZIONE DELLA DISTORSIONE ATMOSFERICA ATTRAVERSO L'IMAGE-SHARPENING DI UN TELESCOPIO.....	33
2. CORREZIONE MEDIANTE ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE.....	36
2.1 ANT COLONY OPTIMIZATION.....	36
2.1.1 ACO METAEURISTICA.....	38
2.1.2 VARIANTI DELL' ALGORITMO ACO	41
2.1.3 PROBLEMA DEL COMMESSE VIAGGIATORE(TSP).....	47
2.1.4 ESPERIMENTO DEL PONTE DOPPIO	51
2.2 ALGORITMI GENETICI(GA).....	54
3. SPERIMENTAZIONI IN LABORATORIO.....	60
4. APPLICAZIONI AO IN CAMPO BIOMEDICO.....	74
4.1 Fundus Camera.....	74
4.2 Anomalie.....	80
4.3 Sistemi di Ottica Adattiva.....	85
4.3.1 NO WAVEFRONT SENSOR ADAPTIVE OPTICS SYSTEM FOR COMPENSATION OF PRIMARY ABERRATION BY SOFTWARE ANALYSIS OF A POINT SOURCE IMAGE.....	88
CONCLUSIONI.....	96
BIBLIOGRAFIA:.....	98

INTRODUZIONE

Questa tesi tratta l'analisi delle prestazioni degli specchi deformabili a elettrodi continui e segmentati, attraverso algoritmi di ottimizzazione. In particolare, mediante gli Algoritmi Genetici(GA) e gli Ant Colony Optimization(ACO).

Il primo dei quali, più conosciuto, è un metodo euristico appartenente ad una classe di algoritmi applicati nel campo dell'intelligenza artificiale e il secondo una tecnica probabilistica per risolvere problemi computazionali, appartenente ai metodi swarm intelligence.

Si è, dunque, provato a migliorare la qualità di un sistema ottico agendo attraverso gli specchi deformabili, che presentano come vantaggio principale la loro natura riflettente che comporta basse perdite di fotoni.

L'Ottica Adattiva è una tecnica sviluppata in astronomia per rimuovere l'effetto delle turbolenze atmosferiche delle lenti e migliorare la qualità delle immagini stellari. Da qui, si è avuto uno sviluppo dell' OA in diversi settori, tra cui l'oftalmologia, abbastanza di recente, per correggere le aberrazioni dell'occhio umano. In tal modo è possibile ottenere immagini nitide della retina e, conseguentemente, dare diagnosi più accurate.

Le immagini del fondo oculare, ottenuto in questo campo, mostrano delle risoluzioni mai riscontrate prima e permettono di osservare un mosaico fotorecettoriale foveale ben distinto dalla superficie esterni dei coni. Inoltre, l'impiego clinico di un sistema di OA in grado di misurare e correggere le aberrazioni dell'intero sistema ottico oculare, integrato con i dati aberrometrici corneali, potrà implementare gli algoritmi dei sistemi laser per la correzione dei difetti di vista allo scopo di disegnare un'ablazione personalizzata della cornea ed ottimizzare la performance visiva del paziente fino al limite imposto dal proprio sistema visivo.

Presento, dunque, un excursus dell'esperienza intrapresa in laboratorio con una introduzione riguardo il sistema adattivo, in tutte le sue proprietà e in particolar modo sulla tecnologia degli specchi deformabili. Successivamente, si sono esaminati nello specifico gli algoritmi di ottimizzazione, per concludere con un'analisi delle patologie retiniche ad alta risoluzione mediante fundus camera.

1. SISTEMA ADATTIVO

L'Ottica Adattiva (AO) è una tecnologia che consente di migliorare la qualità di un sistema ottico agendo attivamente sul fronte d'onda del fascio luminoso. Essa mira a correggere i disturbi legati al sistema ottico stesso, come le aberrazioni, e quelli dovuti a fattori atmosferici esterni, quali effetti di calore, turbolenza..

Le applicazioni dell'ottica adattiva ricoprono una vasta gamma di settori, che riguardano l'uso di essa per ottenere una migliore qualità delle immagini(*applicazioni di imaging*) e altre che spaziano dall'ottimizzazione e controllo dei sistemi laser alla reiezione del rumore(*non imaging*).

Per quanto riguarda le prime, troviamo applicazioni nel settore oftalmologico biomedicale per correggere le aberrazioni dell'occhio umano e visualizzare immagini nitide della retina, nella Microscopia per la correzione statica delle lenti, in Astronomia per la correzione della turbolenza atmosferica, in applicazioni di Visione e di imaging tridimensionale per aumentare la profondità di scansione.

Le seconde invece si sviluppano nella lavorazione dei materiali tramite laser e nelle comunicazioni ottiche ad alta velocità, dove si ha la riduzione dei fattori di rumore.

La qualità delle immagini della terra, basata sui telescopi, soffre della turbolenza atmosferica dovuta alla miscelazione di aria con diverse temperature nell'atmosfera. In tal modo, un'onda perfettamente piana proveniente da una stella all'infinito è aberrata prima che arrivi al telescopio. Lo stesso effetto può essere constatato nell'ottica non perfetta dell'occhio umano e nei sistemi di imaging, dove le aberrazioni contribuiscono a un'immagine deteriorata.

Il principio di base di ottica adattiva convenzionale è quello di misurare le aberrazioni di un fronte d'onda in arrivo e applicare le aberrazioni di compensazione in tempo reale. Per fare ciò è importante capire la natura e l'origine delle aberrazioni.

Un intero campo della ricerca ottica adattiva è guidato dal comprendere meglio il profilo della turbolenza atmosferica con tecniche come SCIDAR e SLODAR:

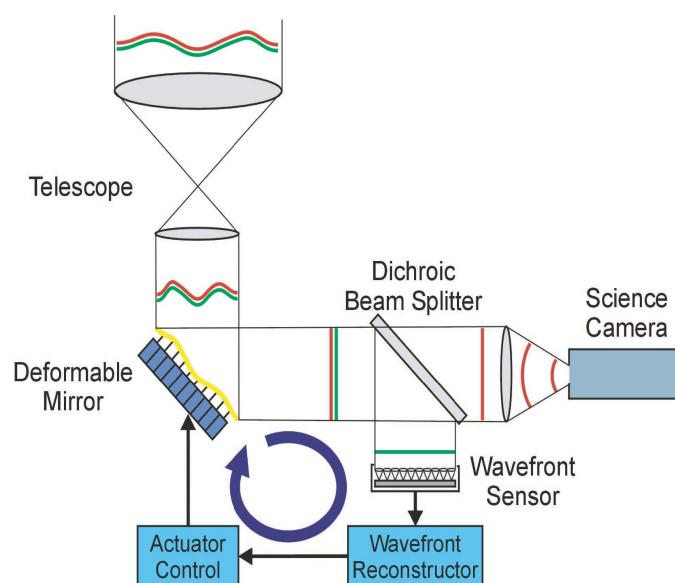
-SCIDAR(SCIntillation Detection and Ranging) consiste nel misurare l'effetto di scintillazione nella pupilla del telescopio: osservando una stella binaria e calcolando la correlazione automatica del risultante pattern di scintillazione sulla pupilla del telescopio, può essere recuperato il cosiddetto profilo C_N^2 . Questo profilo è la funzione costante di struttura dell'indice di rifrazione e descrive l'ampiezza delle sue variazioni .

-SLODAR(Slope Detection And Ranging) rappresenta un nuovo metodo per misurare l'altitudine e la velocità degli strati turbolenti in atmosfera, che provocano lo 'scintillio' delle stelle. E' dunque un metodo di triangolazione, in cui il profilo di turbolenza è recuperato dalle osservazioni di stelle luminose binarie usando un sensore di fronte d'onda Shack-Hartmann .

Gli elementi di ottica adattiva, come gli specchi deformabili, introducono differenze nel cammino ottico(OPL) in modo da modificare il fronte d'onda.

In principio, H. Babcock (1953) propose l'idea di utilizzare uno specchio deformabile per correggere le aberrazioni atmosferiche e ottenere immagini di diffrazione limitata.[1]

Uno specchio deformabile, un sensore di fronte d'onda e una macchina fotografica sul fuoco, costituiscono gli elementi principali.



Il sensore misura le aberrazioni del fronte d'onda con un frame rate elevato e invia i segnali di controllo allo specchio deformabile al fine di correggere le aberrazioni. Poi, la messa a fuoco corretta può essere registrata da una telecamera con un tempo di esposizione in gran parte indipendente della turbolenza atmosferica. Un fronte d'onda può essere visto come una superficie su cui un disturbo ottico ha una fase costante.

Come si può vedere dalla figura sopra riportata, l'idea che sta alla base dell'ottica adattiva è relativamente semplice.

Nella maggior parte dei casi le aberrazioni di un fronte d'onda in arrivo sono determinati da un "senor" fronte d'onda ed i comandi necessari da applicare al dispositivo di compensazione sono determinati da un computer di controllo. Tuttavia, le misurazioni del fronte d'onda, il calcolo dei comandi di gestione a una velocità abbastanza alta per la correzione in tempo reale, sono la radice della complessità di questi sistemi di ottica adattiva.

I requisiti tecnici per i sistemi di ottica adattiva includono il frame rate e la sensibilità della fotocamera dotata di sensore di fronte d'onda, e la frequenza massima che può essere applicata all'elemento da correggere. A seconda del tempo di coerenza del mezzo aberrato in un dato sistema di ottica adattiva, le correzioni si devono apportare a un ritmo elevato (ordine del kHz), le misurazioni devono essere effettuate a una velocità 5-10 volte in più rispetto al tempo di coerenza della aberrazione.

1.1 Wavefront

La forma del fronte d'onda può essere corretta mediante la modifica del profilo ottico di fase. Il principio chiave è che il profilo di correzione di fase deve essere otticamente coniugato con l'aberrazione di fase misurata. La correzione con il profilo della fase coniugata risultata in un "flat" di fronte d'onda ideale.

Tuttavia, se il fronte d'onda non può essere accuratamente determinato o se gli effetti di diffrazione dominano, la coniugazione di fase non può essere utilizzata e la correzione viene limitata. La coniugazione della aberrazione è essenziale per

correggere l'immagine, ciò è ottenuto mediante un correttore di fronte d'onda , modificando la fase del fronte d'onda.

Per meglio descrivere un wavefront, consideriamo una sorgente puntiforme che emette raggi di luce in tutte le direzioni e di questi soltanto quelli con una certa *lunghezza di percorso ottico certo*(OPL):[2]

$$OPL=(lunghezza) \times (\text{indice di rifrazione})$$

$$OPL = \int n ds \quad (1)$$

L'OPL è un raggio e le punte dei raggi giacciono sulla superficie di una sfera, che rappresenta quindi il fronte d'onda.

Un raggio può essere pensato come un percorso lungo il quale l'intensità del campo elettrico si propaga in modo sinusoidale, con velocità c:

$$u = u_0 \sin\left(2\pi \frac{(x - ct)}{\lambda}\right) = u_0 \sin \phi \quad (2)$$

l'ampiezza del campo u è ciclica e ϕ la fase . Generalmente, in un sistema ottico, la variazione temporale del campo elettrico viene ignorata. Di notevole interesse, risulta invece la *differenza di fase o di cammino ottico*(OPD) tra parti diverse di un percorso o tra raggi diversi, che risulta essere costante nel tempo. Tutti i raggi provenienti dalla stessa sorgente puntiforme hanno la stessa fase iniziale. Se l'origine viene posta all'infinito, allora il fronte d'onda osservato sarà piano e i raggi, normali a questa superficie, devono essere paralleli in modo da formare un fascio collimato.

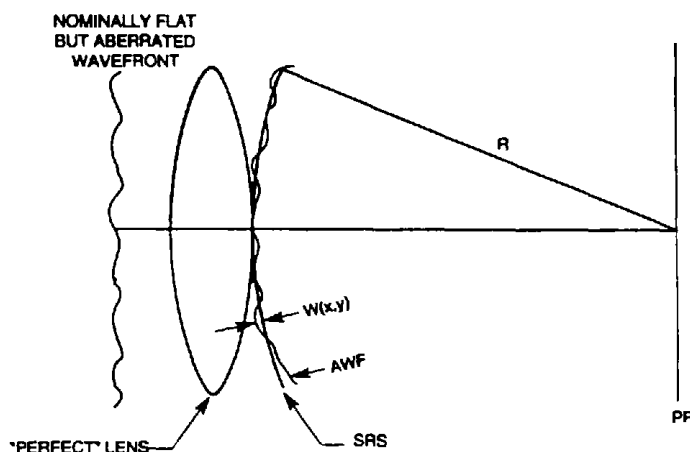
Il fronte d'onda sferico e piano sono costruzioni ideali di wavefront, rispetto ai quali vengono comparati quelli reali. Un sistema di imaging ottico perfetto è tale che la OPL dalla sorgente all'immagine, attraverso il sistema, è la stessa per qualsiasi percorso del raggio. Solo un fronte d'onda con una superficie sferica può convergere in un punto.

Contrariamente, in un sistema ottico imperfetto i raggi non terminano su di una superficie sferica, quindi non viene formata nessuna immagine e il fronte d'onda è aberrato.

L'immagine formata dal fronte d'onda aberrato sarà distribuita in un volume molto piccolo rispetto al punto immagine ideale in modo tale da comportare una perdita di risoluzione.

Per descrivere quest'ultimo fronte d'onda, si misura la differenza di cammino ottico(W) tra la superficie sferica di riferimento(SRS) e il fronte d'onda aberrato(AWF).

La funzione W(x,y) di OPD può essere espressa nella forma matematica di un polinomio, utile in quanto ogni termine di questo descrive un'aberrazione specifica.



Tradizionalmente sono state usate due serie di polinomi per descrivere le aberrazioni:

-Seidel, usato solitamente nella progettazione ottica per la determinazione di OPL (1);

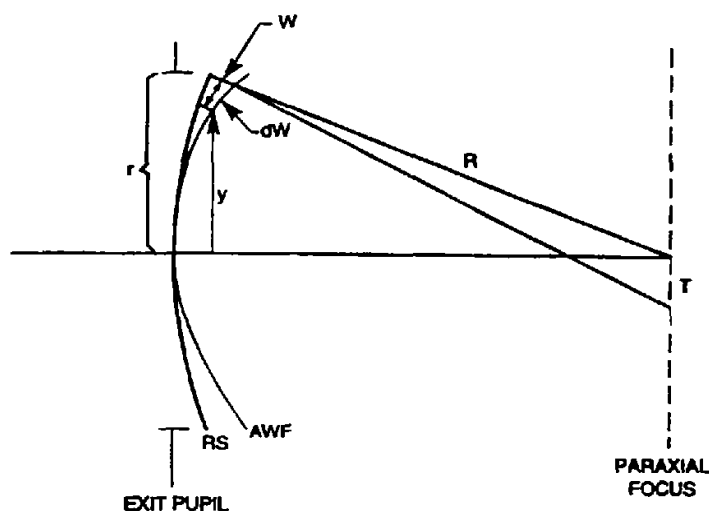
-Zernike, usato nella procedura di decifrazione del contenuto di aberrazione con lo scopo di adattare i dati con un polinomio di questo tipo, u(2);

L'equazione relativa l'inclinazione del fronte d'onda locale nella pupilla è data da

$$\frac{dW}{d\rho} = -\left(\frac{nr}{R}\right)T$$

dove il primo membro indica proprio l'inclinazione(dW è la differenza di fase tra punti adiacenti della pupilla), R è il raggio di curvatura della sfera di riferimento, n

l'indice di rifrazione, r il raggio della pupilla e T l'aberrazione del raggio trasversale.



1.2 Misure del fronte d'onda

I sensori di fronte d'onda (WFS) stimano la forma complessiva attraverso un numero finito di misurazioni discrete. Dato che, in realtà, il fronte d'onda è continuo le inclinazioni locali devono essere cucite insieme, in modo che il profilo generato risulti contiguo. Questo processo è chiamato ricostruzione del fronte d'onda e dà una stima di W .

Di seguito, riporto due importanti tecniche di misurazione del wavefront.

I metodi diretti forniscono informazioni sulla fase del fronte d'onda che vengono usate per guidare un correttore, mentre quelli indiretti non misurano il fronte d'onda ma usano informazioni ad esso relative per fornire il segnale necessario all'elemento correttivo, senza ricostruzione. Quest'ultimi non sono, in questo senso, sensori di fronte d'onda ma un elemento di un sistema a ciclo chiuso che operano al fine di migliorare la qualità dell'immagine e correggere le aberrazioni.[2]

Misure dirette del fronte d'onda presentano come dato fondamentale la forma di un interferogramma generato dall'interazione di due fronti d'onda, quello di riferimento e quello dell'oggetto. Ogni qual volta si sovrappongono due fronti coerenti, I_1 e I_2 , danno luogo al principio dell'interferenza.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi(x, y))$$

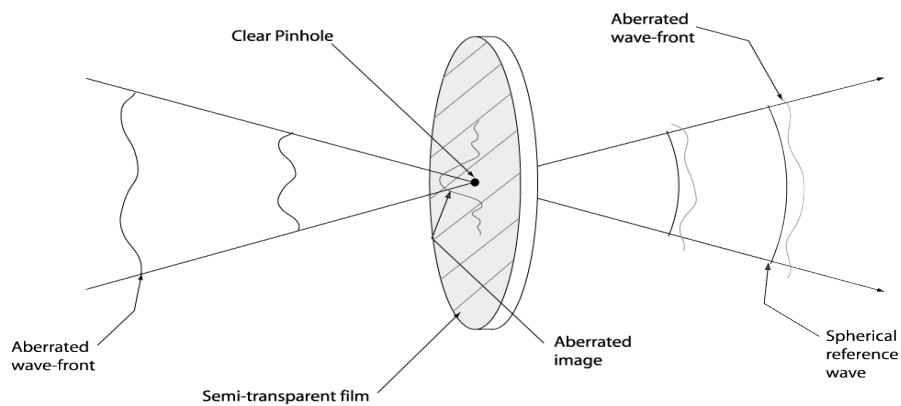
Ogni frangia nel modello di interferenza è un contorno di costante OPD o

$$W(x, y) = m\lambda$$

dove m è il numero d'ordine della frangia e λ la lunghezza d'onda:

$$\Phi(x, y) = kW(x, y), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Un semplice interferometro di percorso comune, capace di misurare direttamente le differenze del percorso ottico(OPD), è la piastra PDI.

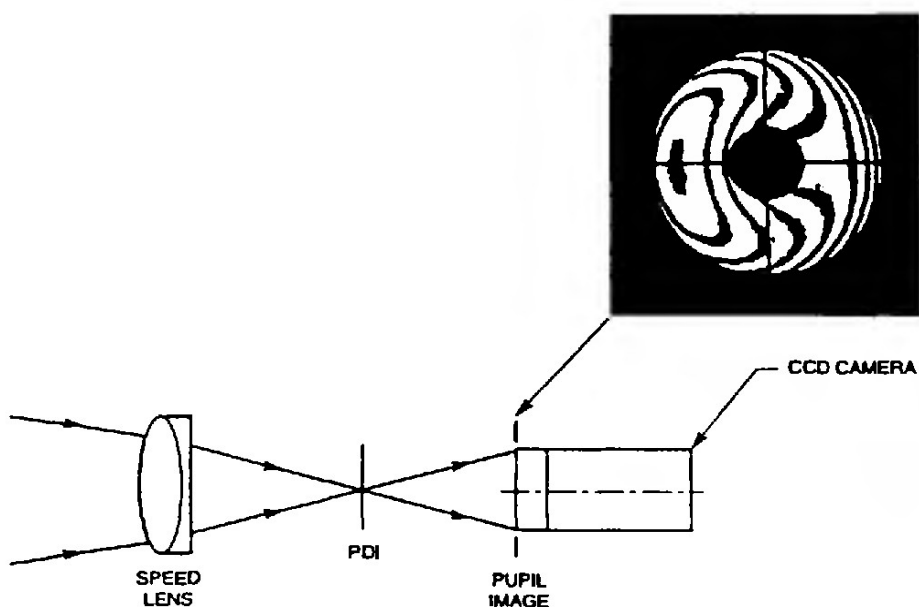


Il cuore della WFS PDI è la piastra PDI(point diffraction interferometer), un dispositivo monolitico costituito da due cerchi concentrici. L'anulare nella regione è semitrasparente e agisce come un filtro a densità neutra. Il piccolo cerchio

interno (pinhole) è una chiara apertura di diffrazione e svolge un ruolo di filtraggio spaziale.

Il fronte d'onda aberrato è focalizzato sul disco PDI. La maggior parte del fascio attraversa senza ostacoli, il resto del fascio va ad interagire con il foro stenopeico (pinhole) ed è diffratto in un fronte d'onda sferico pulito e diventa, dunque, l'onda di riferimento del fronte. Sul lato opposto della PDI, si crea l'interferenza tra il fascio aberrato e il fascio di riferimento.

Il contrasto di frangia si verifica in modo ottimale quando le intensità dei due fronti d'onda sono circa uguali. Per i PDI, questo dipende dalla dimensione del nucleo di diffrazione, che dipende dal numero-F e dalla quantità di aberrazione del fronte d'onda incidente.



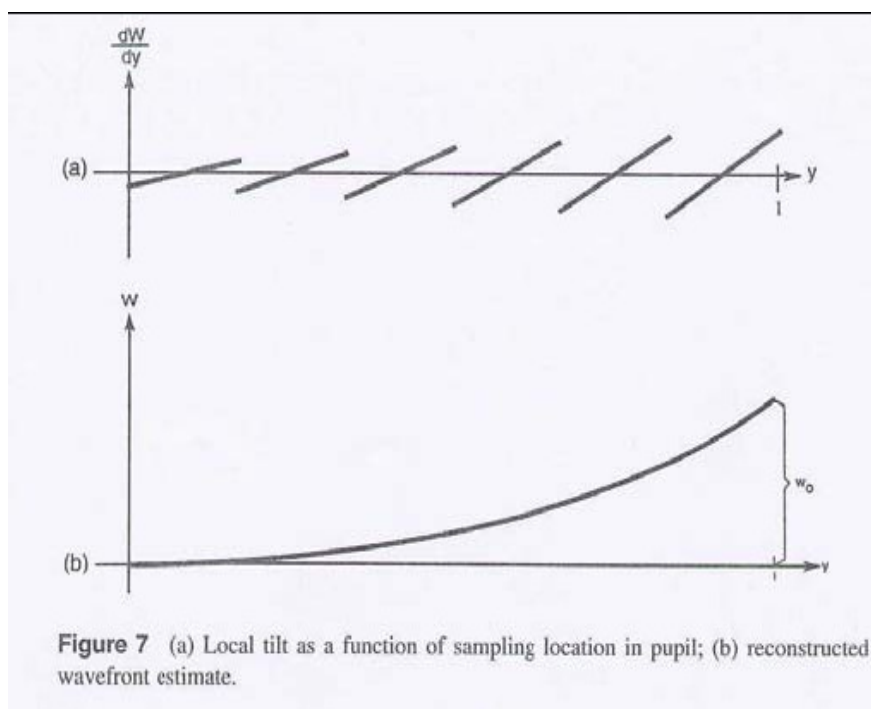
In questo schema, la lente (SPEED LENS) posta davanti al PDI ha due funzioni: diminuire il numero di F ($f/\#$) del fascio incidente (o aumentare la velocità); formare l'immagine della pupilla del sistema ottico responsabile per il fascio convergente.

Un aspetto negativo riguarda le aberrazioni raccolte dalla "lente di velocità" che vanno a sommarsi a quelle del fascio incidente. Questa difficoltà può essere eliminata con la progettazione di un obiettivo correttore di velocità, in modo tale che le aberrazioni intrinseche siano trascurabili.

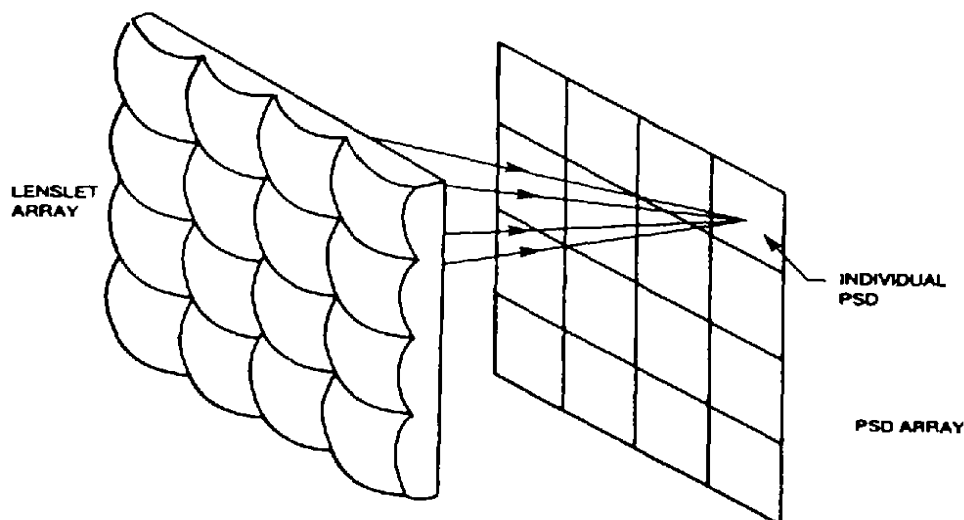
Misure indirette del fronte d'onda esaminano i regimi del sensore di fronte d'onda che misura la pendenza locale dW/dy , o il fronte d'onda differenziale dW , in funzione delle coordinate della pupilla in uscita.

Shack-Hartmann Wavefront Sensor è una variante del classico test di Hartmann, normalmente utilizzato per testare le primarie astronomiche. Il test di Hartmann misura il parametro T ovvero l'aberrazione del raggio trasversale.

Nello Shack-Hartmann WFS si ha la ricostruzione di un fronte d'onda tramite il campionamento della sua inclinazione, tilt, su subaperture: nel grafico in alto(a) abbiamo la rappresentazione dell'inclinazione del fronte campionata per subapertura e in basso(b) il fronte d'onda ricostruito.

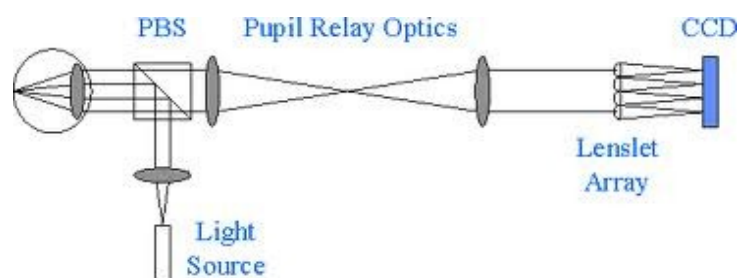


Uno schematico semplificato della tecnica Shack-Hartmann presenta una piastra, anziché il piccolo foro, contenente un array di fori ognuno con la propria piccola lente:



I Lenslet, piccole lenti che costituiscono l'array, sono identici e ad essi sono associati rilevatori sensibili di posizione (PSD). Il raggio di ogni Lenslet colpisce la sua PSD con un T, offset, direttamente connesso con la pendenza locale del fronte d'onda in corrispondenza della posizione del Lenslet.

Esempio di WFS Shack-Hartmann:



La messa a fuoco di una lente di collimazione è fatta coincidere con la messa a fuoco del sistema di prova. Il fascio è collimato e trasferito in una matrice di Lenslet. La collimazione della lente e delle immagini della pupilla all'uscita del

sistema avviene sulla matrice Lenslet, mentre una lente Relay forma la matrice di punti focali sul CCD.

In un fronte d'onda curvo, l'inclinazione del fronte d'onda locale corrisponde alla quantità che un sensore Hartmann misura indirettamente attraverso T:

$$\frac{dW}{dy} = 2 W_{020} * y$$

Prendendo la derivata seconda si produce una costante, che è la differenza di irraggiamento

$$\frac{(d^2 W)}{dy^2} = 2 W_{020}$$

Quindi esiste una relazione tra la derivata seconda del fronte d'onda e la differenza di irraggiamento tra due piani di misura equidistanti.

Lateral Shear Interferometer Wavefront Sensor

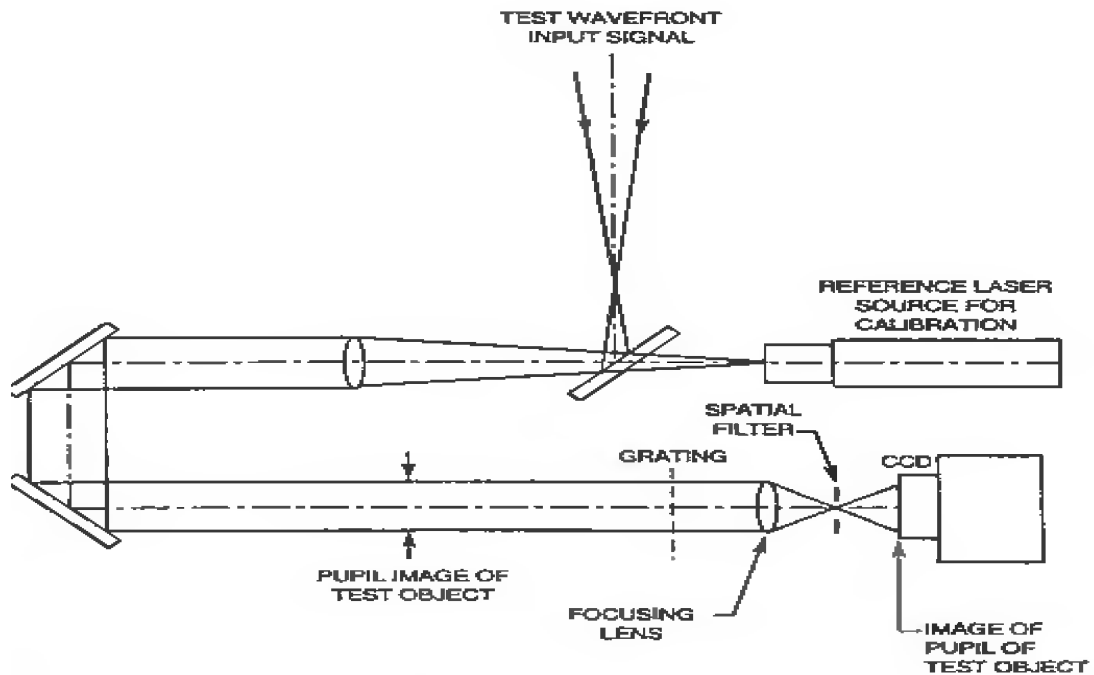
Sono basati su interferometria a taglio laterale, di cui l'esempio più semplice è fornito da una piastra parallela.



I due raggi riflessi sono paralleli, ma spostati lateralmente, e nella regione di sovrapposizione c'è una figura di interferenza al taglio laterale. Questo modello fornisce informazioni sulle differenze OPD solo nella direzione di taglio. Per

ricostruire un fronte d'onda, sono necessari due campioni comuni in direzioni ortogonali.

Un esempio di sensore di fronte d'onda basato sull'interferometria di taglio laterale è rappresentato nella figura sotto: un raggio focalizzato da un simulatore di Hubble viene catturato da un ausiliare ottico che collima il fascio indirizzato a una grata, che crea diversi ordini di diffrazione, raccolti da una lente.



Nel piano focale il filtro blocca tutti gli ordini, tranne lo zero e i primi ordini. Questi ordini, passati sotto forma di interferogramma laterale, formano un'immagine sulla pupilla dove la CCD registra le informazioni di frangia.

1.3 Tecnologia a specchi

DISPOSITIVI DI CORREZIONE DEL FRONTE D'ONDA:

SPECCHI DEFORMABILI[1][3]

La funzione del correttore di fronte d'onda sta nell'accettare comandi di posizione dal sensore di fronte d'onda e nel formare la figura del correttore ottico come comandato, con l'errore minimo possibile. La maggior parte dei correttori sono specchi deformabili o mobili e constano di due parti: lo specchio deformabile stesso, sofisticato dispositivo elettromeccanico, e una matrice amplificatrice di elementi(motori), un driver per ogni attuatore del correttore se il sistema corregge qualcosa di diverso dagli effetti termici.

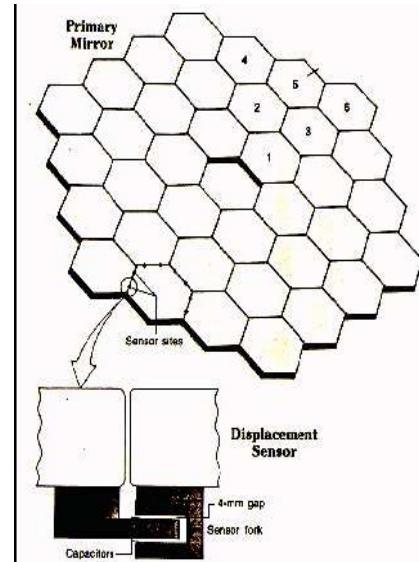
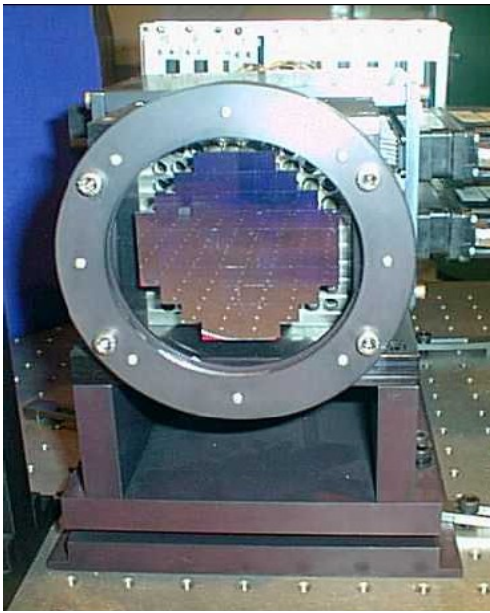
Bisogna, quindi, far assumere agli specchi una conformazione tale da annullare le perturbazioni dovute alla turbolenza. Un vantaggio di questi dispositivi riguarda infatti la loro natura riflettente che consente le perdite di scarsa visibilità, funzione importante nei sistemi astronomici che presentano un numero limitato di fotoni.

Categorie principali di specchi deformabili:

1.SPECCHI SEGMENTATI

Sono dei pannelli riflettenti distinti aventi al massimo tre attuatori per movimentarli. In questi, lo specchio è costituito da una serie di specchietti affiancati, ognuno dei quali è libero di muoversi indipendentemente dagli altri. Ciò implica quindi un vantaggio, anche se non devono essere sottovalutate eventuali interferenze nel movimento degli specchietti. Per determinare la posizione di quest'ultimi, se approssimati a corpi rigidi, sono sufficienti tre attuatori e quindi non è necessario studiare la loro dinamica.

Tuttavia, a questa tipologia di specchi viene spesso preferita quella di tipo continuo poiché introducono ulteriori distorsioni all'immagine, quindi possibili diffrazioni, a causa dei bordi che rendono discontinuo il fronte d'onda raccolto.



In figura: a sinistra, NAOMI (William Herschel Telescope, UK), uno specchio segmentato a 76 elementi; a destra, lo specchio primario del telescopio KECK di base alla Hawaii.

2. SPECCHI CONTINUI

Sono costituiti da una lastra continua movimentata da attuatori sul retro.

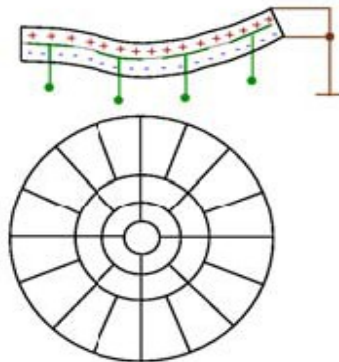
Se la superficie è spessa permette la lucidatura, se è sottile la flessione.



Gli specchi continui vengono deformati dall'applicazione di forze, eliminano la distorsione provocata dai segmentati ma comportano complicazioni di controllo relative ai forti accoppiamenti fra i gradi di libertà strutturali.

3.SPECCHI BIMORFI

Sono costituiti da due membrane piezoelettriche(wafer PZT), di cui una riflettente, separate da un mosaico di elettrodi che generano le deformazioni.



Dalla figura si può vedere che la tensione applicata sugli elettrodi comporta l'espansione di un wafer e la contrazione dell'altro, con le superfici esterne connesse a terra. La curvatura della superficie è proporzionale alla tensione applicata. L'applicazione di una curvatura al fronte d'onda rende gli specchi bimorfi l'equivalente naturale del sensore di curvatura.

La scelta di questi specchi è la più comune per quanto riguarda le applicazioni dei laser, perché possono essere associati facilmente ai dissipatori di calore.

4.SPECCHI MEMBRANALI :MEMs (micro-electro-mechanical system)

Differenziano dai continui per la mancata rigidità intrinseca che richiede l'applicazione di una tensione per mantenere la forma piana.

Questi specchi consistono in una superficie sottile di membrana che può essere manipolata se viene applicata una tensione.

Un vantaggio molto consistente riguarda il costo relativamente basso che permette il loro utilizzo in diverse applicazioni, con un limite dovuto alla soglia di danno bassa .

5.DISPOSITIVI OPTOELETTRONICI(LCD)

Materiali con indice di rifrazione variabile con la tensione applicata.

Questi dispositivi hanno il vantaggio di essere compatti, leggeri e meno costosi degli altri specchi deformabili. Ci sono una serie di cristalli liquidi(LC) correttori che presentano una struttura in pixel di attuatori con un funzionamento simile a quello di tipo segmentato. Solitamente esistono due tipi di modulatori di luce

spaziali:

- otticamente indicati modulatori di luce spaziale(OA-spatial light modulator), nei quali un'immagine a due dimensioni controlla l'intensità in uscita, la fase o il profilo di polarizzazione;
- elettricamente indicati modulatori di luce spaziale(EA-spatial light modulators), in cui la modulazione è controllata da segnali elettrici.

La scelta della tipologia dello specchio utilizzata influisce sulla scelta dell'attuatore. L'uso di specchi membranali, per esempio, necessita di attuatori di tipo elettrostatico in grado di applicare piccole forze di controllo e gestire dunque la flessibilità intrinseca di questi specchi. Gli attuatori elettrostatici sono ottenuti inserendo lo specchio deformabile fra due elettrodi che applicano una differenza di potenziale elettrico.

Agli specchi continui e segmentati è possibile applicare due tipologie di attuatori quali attuatori in posizione, come i *piezoelettrici*, e in forza, come per esempio gli *elettromagnetici*.

Gli *attuatori in posizione* mostrano una rigidità intrinseca superiore a quella della struttura controllata e permettono di raggiungere la posizione voluta senza un ciclo di controllo. Ciò porta alla realizzazione di specchi monolitici, costituiti da una sottile lastra di materiale riflettente posta su un blocco omogeneo di materiale piezoelettrico in cui vengono immersi degli elettrodi che ne determinano le deformazioni e quindi gli spostamenti. La loro rigidità implica il trasmettere allo specchio anche le deformazioni del supporto, che deve essere massiccio. Un altro aspetto negativo riguarda le dilatazioni termiche e i cicli d'isteresi relative ai materiali utilizzati, che comportano l'inserimento di un sistema di controllo a catena chiusa.

Gli specchi piezoelettrici, appartenenti alla sottoclasse dei segmentati, sono specchi continui costituiti da un array di attuatori piezoelettrici disposti perpendicolarmente alla superficie dello specchio. La tensione tipica necessaria per spostare gli attuatori è inferiore a 100V e la larghezza di banda è nel range del KHz.

Gli *attuatori in forza* necessitano di un sistema di controllo ad anello chiuso per il raggiungimento della posizione, poiché presentano una rigidità inferiore a quella della struttura.

L'utilizzo di attuatori elettromagnetici è fondamentale nel caso in cui si vogliono applicare correzioni al fronte d'onda del tipo tip-tilt, non possibile con attuatori piezoelettrici (non forniscono spostamenti in ampiezza sufficienti).

Array di attuatori correggono errori specifici del fronte d'onda come la messa a fuoco e l'aberrazione sferica che può essere rimossa usando un unico attuatore e un facesheet. Tuttavia, per gli errori casuali, come quelli prodotti dalla turbolenza atmosferica, è rilevante il numero di attuatori da impiegare ovvero il numero di gradi di libertà per la correzione.

I requisiti tratti per un correttore di fronte d'onda devono essere ridotti al minimo. Ciò vuol dire che gli errori del sistema devono essere rimossi da correttori passivi e l'inclinazione (tilt) del fronte deve essere corretto usando un correttore a punta/inclinazione, costruito usando solo un paio di attuatori e di sensori capacitivi montati ortogonalmente su uno specchio rigido.

Nella scelta di una frequenza operativa massima bisogna considerare un alto tasso di funzionamento del sistema. Gli specchi bimorfi deformabili tendono ad avere risonanze a bassa frequenza in quanto la frequenza fondamentale è legata al diametro complessivo delle piastre sottili. La risonanza fondamentale di un correttore utilizzando una matrice discreta è determinata dal diametro del disco definito dalla distanza tra due attuatori.

L'elettronica, in genere, limita la risposta del correttore del fronte e l'attuatore è un puro condensatore con corrente di picco pari a

$$I_p = 2\pi fCV \quad [2]$$

Dal momento che gli attuatori hanno capacità alta e operano a basse frequenze, non producono significative interferenze elettromagnetiche.

Gli specchi deformabili sono la tecnologia principale per correttori di fronte d'onda e modulano Δz , operando in modalità riflessiva. I cristalli liquidi (LC) sono modulatori di fase che rappresentano una alternativa a basso costo agli specchi, il loro funzionamento è basato sulla modulazione di n dello strato LC, sotto il campo elettrico è applicato in modo trasparente o riflettente.

Studi [4] dimostrano che uno specchio deformabile può correggere le aberrazioni di ordine ridotto, quali astigmatismo, coma ed aberrazione sferica, attraverso l'utilizzo

di tre elettrodi con nove contatti, che conducono alla realizzazione di un dispositivo ideale per applicazioni sensorless. Questi specchi deformabili sono basati sulla distribuzione continua di tensione su di uno strato resistivo. Lo specchio deformabile, in tal caso, è stato guidato da un driver elettronico multicanale, che può fornire fino a 260 V e oltre 32 canali, di cui ne sono stati utilizzati 9.

Lo specchio è attuato da una pressione elettrostatica $p(x,y)$, esistente fra gli azionatori e la membrana metallizzata, che deforma lo specchio $M(x,y)$ secondo l'equazione di Poisson:

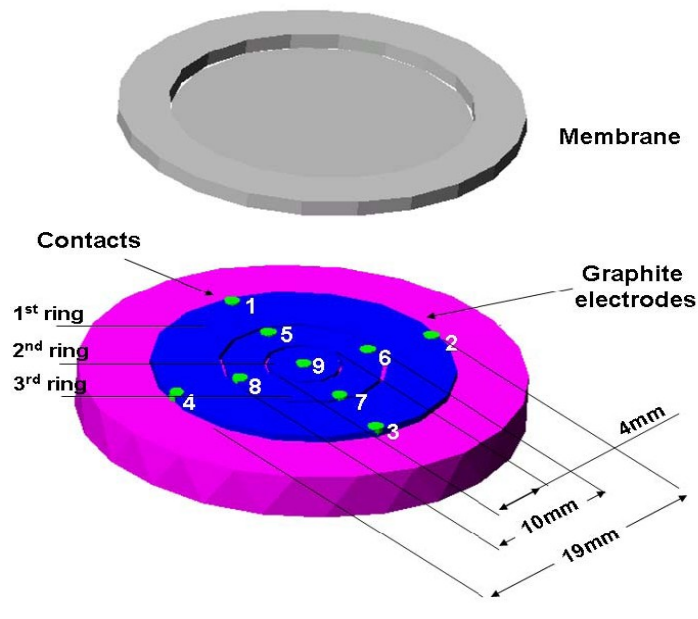
$$\Delta M(X, y) = \left(\frac{1}{T}\right) p(x, y)$$

La distribuzione di tensione sullo strato resistivo, con resistività ρ , può essere calcolata risolvendo l'equazione di Poisson per il potenziale elettrico scalare U :

$$\left(\frac{1}{\rho}\right) \Delta U(x, y) = 0$$

Al fine di generare l'aberrazione a basso ordine, senza alcuna caratterizzazione preliminare dello specchio, il dispositivo è composto da 3 attuatori collocati su tre anelli concentrici. Il primo e il secondo hanno 4 contatti ciascuno, il terzo ha un solo contatto.

Il primo attuatore può essere utilizzato per la generazione del pistone, dell'inclinazione e dell'astigmatismo, il secondo per generare il coma e il “defocus”(aberrazione in cui l'immagine è fuori fuoco), il terzo è usato per l'aberrazione sferica.



Le simulazioni hanno mostrato come la tensione di un singolo attuatore sia legata alla forma dello specchio. Nello specifico, al di fuori della zona attiva sono necessari $2N+1$ attuatori per generare N ordini di aberrazione.

Sfruttando il fatto che la pressione elettrostatica è proporzionale al quadrato della tensione e guidando lo specchio sia con tensioni positive che negative, è possibile usare meno attuatori.

Le misurazioni sono state effettuate attraverso una tecnica interferometrica della superficie dello specchio deformabile e le prestazioni sono state valutate calcolando l'errore RMS residuo rispetto al target, l'entità del termine Zernike e la purezza spettrale secondo la formula:

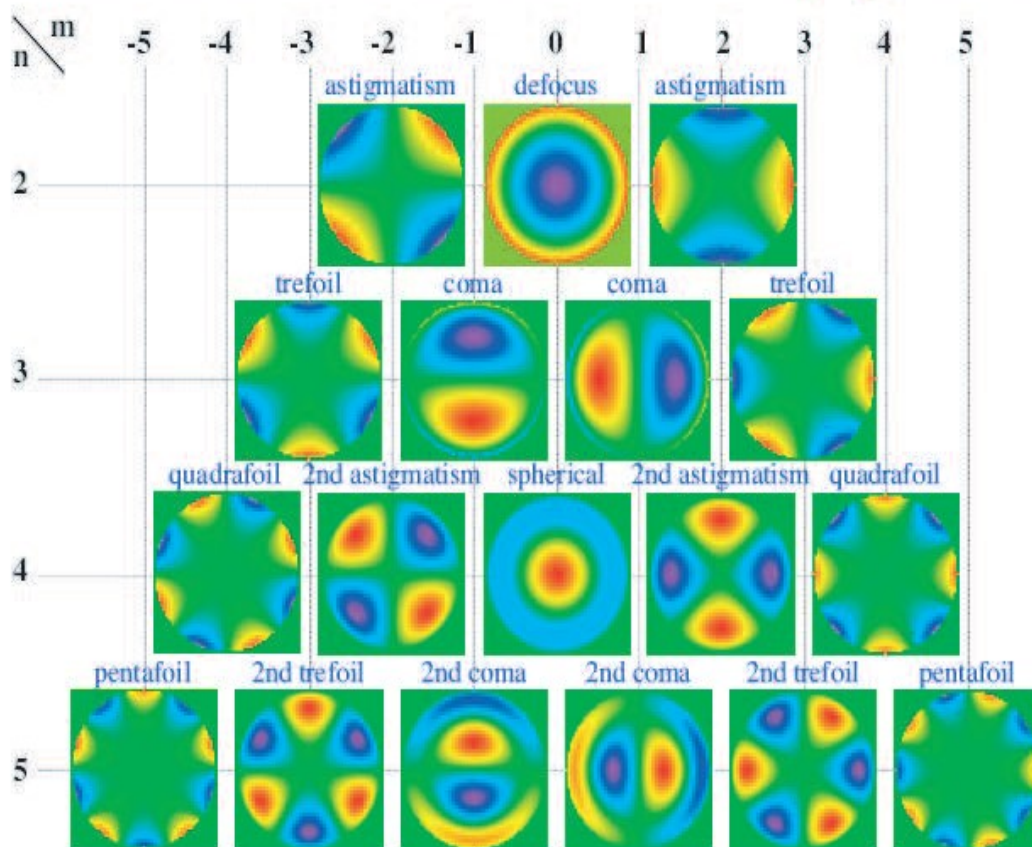
$$P_i = \frac{Z_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^N Z^2 j}}$$

dove i è l'indice dell'aberrazione Zernike e Z_j lo spettro di Zernike delle misurazioni.

In conclusione, si è dimostrato che la tecnica del “Distributed actuator deformable mirror“ può essere impiegata per realizzare gli specchi deformabili non 'pixellati', introducendo un controllo diretto di aberrazioni di ordine basso.

Nella teoria delle aberrazioni ottiche, i polinomi di Zernike sono molto spesso utilizzati per descrivere quest' ultime dal momento che presentano il vantaggio di essere matematicamente ben definiti. Solitamente, i termini di ordine inferiore sono legati alle aberrazioni 'classiche' quali astigmatismo, coma e aberrazione sferica, ma a volte anche per rappresentare il fronte d'onda. I progettisti ottici sono più consueti usare i polinomi di Seidel, introdotti per spiegare l'aberrazione geometrica monocromatica dei sistemi ottici centrati, vale a dire i difetti provenienti da immagini perfette in sistemi ottici che hanno un asse ottico. A questi tipi di aberrazione sono stati dati i nomi di aberrazione sferica, coma, astigmatismo, curvatura del campo e distorsione.

Wavefront mode for each Zernike polynomial

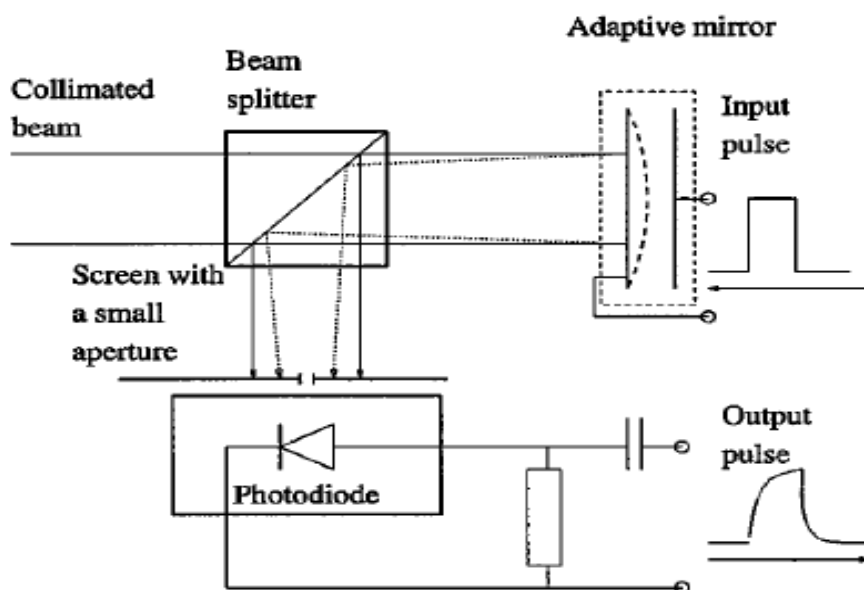


Un esempio inerente riguarda “Flexible mirror micromachined in silicon”, osservabile in figura. [5]



Questo specchio flessibile è costituito da una membrana di nitruro di silicio di spessore di 0.5micron, sospesa sui bordi di una finestra rettangolare di materiale anisotropo incisa attraverso una soluzione di KOH.

La scelta relativa al nitruro di silicio è fondamentale poiché questo materiale è meccanicamente resistente e compatibile con i processi semiconduttore-metallo-ossido. La risposta dinamica di questo specchio può essere misurata dal seguente setup:



Il fascio di luce collimato, riflesso dallo specchio adattivo, è diretto sul fotodiode che misura la quantità di luce. Può essere inoltre, dimostrato che, in determinate condizioni, la variazione dell'illuminazione del fotodiode è proporzionale al quadrato della deformazione dello specchio.

Nel corso degli anni, si sono sviluppate diverse ricerche nell'ambito dell'ottica adattiva sensorless che mirano, appunto, a correggere le aberrazioni.

Un articolo mostra come questa correzione viene eseguita attraverso l'ottimizzazione metrica dell'immagine, basata sulle basse frequenze spaziali contenute in essa.[6] Vengono acquisite sequenze di immagini, a ciascuna delle quali è applicata una differente aberrazione e le correzioni sono stimate grazie alle informazioni ricavate in questa sequenza. E' dimostrato che effetti di modalità differenti possono essere separati e l'ottimizzazione di ciascuna di esse, essendo indipendenti, può essere eseguita come la massimizzazione di una funzione quadratica, richiedendo solamente tre misurazioni per ogni modalità d'immagine.

Al fine di comprendere gli effetti dell'aberrazione, quest'ultima è stata rappresentata come combinazione di funzioni di Lukosz, espresse come il prodotto di un polinomio radiale e una funzione azimutale. L'ottimizzazione metrica g può essere espressa direttamente in termini di coefficienti di sviluppo dell'aberrazione $\{a_i\}$, in modo da ottenere

$$g(a_i) \sim q_0 - q_1 \sum_{i=4}^{(N+3)} a_i^2$$

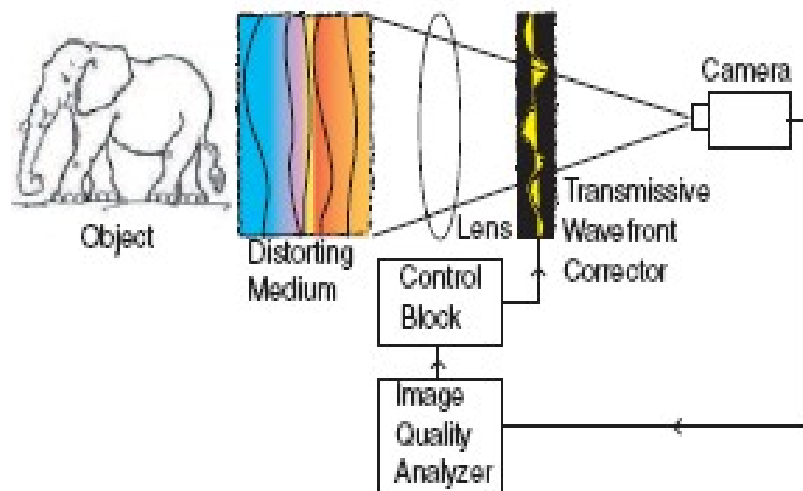
funzione che presenta un massimo parabolico, che permette l'uso di semplici algoritmi di massimizzazione.

1.4 Image-sharpening

La metrica della nitidezza delle immagini è una misura della qualità di un'immagine e, in generale, più elevata sarà questa metrica e migliore sarà la qualità dell'immagine.

Utilizzando una metrica adatta e un algoritmo di ricerca che determina la fase di sperimentazione da applicare al correttore, il sistema è portato a massimizzare la metrica della nitidezza e a minimizzare l'aberrazione.

In figura[1] è rappresentato uno schema di correzione della metrica di nitidezza dell'immagine che mostra la modalità di correzione senza sensore di fronte d'onda.



Prima di procedere all'esecuzione dei sensori moderni di fronte d'onda, Muller e Buffington, nel 1974, hanno proposto il concetto di correzione delle aberrazioni di un sistema ottico mediante metriche d'immagine.

Il principio stava nel massimizzare una metrica delle immagini che si riferivano ad aberrazioni del fronte d'onda e, quindi, nel migliorare la qualità dell'immagine. Tuttavia, con l'avvento di Shack-Hartmann e sensori di curvatura del fronte d'onda, che potrebbero essere utilizzati per correggere mediante l'alta frequenza temporale,

l'approccio Image Sharpening è stato trascurato a causa della limitata velocità di correzione e ai relativi problemi degli algoritmi di correzione.

Con l'avanzamento della tecnologia, i componenti chiave, quali le telecamere CCD e i computer, sono in grado di operare in un regime molto più veloce. Il vantaggio significativo delle tradizionali tecniche di rilevamento fronte d'onda è la determinazione diretta dei comandi necessari da applicare alla correzione del dispositivo. Questo, anche se calcolo matematico complesso, fornisce direttamente e rapidamente i comandi per correggere le aberrazioni.

Il problema generale è la determinazione della fase del fronte d'onda da una mappa del suo gradiente o Laplaciano. La massimizzazione della nitidezza non misura direttamente il fronte d'onda, ma ottimizza la nitidezza dell'immagine metrica attraverso una serie di misurazioni e correzioni di prova applicate al dispositivo di correzione, è un processo più lento. Centrale nel processo di massimizzazione della nitidezza e della sua velocità, è la necessità di un efficiente algoritmo di ricerca e intelligente che, sulla base del calcolo nitidezza precedente, determina la nuova serie di tensioni da applicare al correttore. L'obiettivo è quello di guidare il dispositivo di correzione del fronte d'onda per la sua forma ottimale per ridurre al minimo le aberrazioni del fronte d'onda.

Muller e Buffington basano la loro definizione di nitidezza S dicendo che la nitidezza di un'immagine è quella per cui la S raggiunge un massimo soltanto per un'immagine inalterata. Considerano soltanto l'apertura distorsione piana per la definizione di nitidezza, $W(u, v)$ rappresenta l'ampiezza complessa all'apertura del telescopio senza aberrazioni.

Se l'ampiezza complessa distorta $W'(u, v)$ è data da

$$W'(u, v) = W(u, v) \cdot \Delta(u, v)$$

allora abbiamo una distorsione piana $\Delta(u, v)$, che è la funzione complessa della posizione (u, v) nel piano dell'apertura. Un sistema con un elemento di correzione permetterà l'aggiunta degli sfasamenti supplementari a $\Delta(u, v)$, per riduzione o l'eliminazione della distorsione.

Muller e Buffington hanno cercato di definire la nitidezza S , in modo tale che qualsiasi $\Delta(u, v)$, a parte una semplice traduzione dell'immagine o un'ampiezza complessa costante, ridurranno il valore della S .

Esistono molte definizioni della S, un esempio è dato da

$$S = \int dx dy I^2(x, y)$$

dove $I(x, y)$ è l'irraggiamento dal punto (x, y) nel piano di immagine del telescopio. Muller e Buffington hanno dimostrato che, nel caso di luce monocromatica, la S raggiunge il relativo massimo soltanto quando $\Delta(u, v)$ non supera il valore definito dalla formula sopra. Ciò può essere constatato usando una versione dell'equazione del Fresnel-Kirchhoff per calcolare l'irraggiamento:

$$U(x_0) = \frac{jA_s}{\lambda} \iint_A \left[\frac{\exp(jk_0(r_s + r_0))}{(r_s * r_0)} \right] \left[(\cos(n, x_0 - x) \cos \frac{(n, x_s - x)}{2}) \right] ds$$

La metrica usata per la correzione dell'immagine potrebbe essere qualsiasi quantità che indica la qualità del sistema come influenzata da distorsione di fronte d'onda e che può essere calcolata rapidamente. La prestazione metrica potrebbe essere l'intensità di radiazione al fuoco, la nitidezza dell'immagine o momenti statistici sparsi del campo.

Feinup e Miller hanno esaminato le variazioni della metrica della nitidezza proposta da Muller e Buffington. La legge di potere metrica originale precisata da Muller e da Buffington è della forma

$$S = \int I^n(x, y) dx, dy$$

con $n=2,3,4$.

Feinup e Miller hanno esteso questa forma per includere la derivata seconda della trasformazione non lineare del punto, a causa dei livelli di rumore presenti nelle immagini.

Un'immagine con dispersioni significative sarà meno suscettibile al rumore perché prontamente corretta, dato che la legge di potere metrica amplificherà i valori prominenti delle dispersioni in maggior misura rispetto al rumore. Per contro, un'immagine senza dispersioni significative non sarà avvantaggiata poiché il rumore sarà ad un simile livello del segnale (non viene amplificato).

Si è trovato che il *comportamento di una metrica è determinato dalla derivata seconda della relativa non linearità del punto in funzione dell'intensità di immagine.*

E' dimostrato teoricamente e sperimentalmente che quella metrica, avendo simili derivate seconde, dà risultati simili una volta utilizzata in un algoritmo di definizione(nitidezza) delle immagini .

Metriche la cui derivata seconda aumenta con l'incremento dell'intensità danno risalto ai punti luminosi e, contrariamente, quelle la cui derivata seconda diminuisce col decremento dell'intensità enfatizzano le ombre e le zone di ritorno basse più scure.

Vorontsov e Cohen hanno applicato tecniche di definizione dell'immagine agli oggetti estesi alla formazione d 'immagine. In un'unica tecnica è usato un processore di ottica coerente in cui il segnale proveniente dall'immagine della macchina fotografica è usato per controllare un modulatore di luce spaziale illuminato da un fronte d'onda coerente. L'uscita dal modulatore di luce spaziale sarà poi modulata nello spazio secondo il segnale della macchina fotografica. Se questo è focalizzato su una lastra di vetro glassata girante si osserverà una macchiolina caratteristica.

Alcune metriche di Muller e Buffington:

$$- S_1 = \int I^2(x, y) dx dy$$

dimostrato per la luce monocromatica ed è massimizzato quando c'è distorsione zero sul piano d'apertura;

$$- S_2 = I(x_0, y_0)$$

irradianza dell'immagine in un particolare punto(x₀,y₀) sul piano d'immagine. Gli oggetti che hanno un punto più luminoso in S₂, sono massimizzati quando l'immagine di quel punto luminoso è spostata sopra (x₀,y₀)[max centrale];

$$- S_3 = \int |I(x, y)M(x, y)| dx dy$$

descritto da O'Meara.M, è una funzione della maschera:se replica inalterata la vera immagine, si elimina la distorsione e S₃ si riduce a S₁.

- $S_5 = \int_A (I dx dy)$

metrica di nitidezza comune, conosciuta come “potere nel pistone”. A sta ad indicare che l'integrale fornisce l'intensità di una certa regione dell'immagine, spesso un disco centrale o la massimizzazione della quantità che passa attraverso un foro stenopeico (pinhole).

La scelta della metrica della nitidezza dipende dall'oggetto. S_3 funziona bene per oggetti puntiformi, anche se M corrisponde solo approssimativamente all'immagine. Ma non va altrettanto bene per oggetti estesi, per i quali è opportuno applicare S_1 .

Per massimizzare la nitidezza dell'immagine, le correzioni, come le aberrazioni, possono essere ottenute grazie alla *science camera*.

L'utilizzo di una tecnica di rilevamento indiretto del fronte d'onda offre il vantaggio che le correzioni da applicare sono determinate dalla fotocamera scientifica, a differenza di quelle dirette in cui una parte della luce deve essere diretta al sensore di fronte d'onda. Ciò è importante per la formazione di immagini di livelli bassi di luce, in quanto preserva il flusso di fotoni. Vengono inoltre impiegati correttori trasmissivi, posti frontalmente alla telecamera, e usati per calibrare il percorso non comune dovuto agli errori.

Il calcolo della nitidezza è generalmente un semplice calcolo delle intensità misurate in corrispondenza della telecamera CCD e lette direttamente dal buffer (memoria).

Uno studio, sulla forma dello spazio di ricerca per immagini sottocampionate², ha mostrato che il campionamento alla velocità di Nyquist, o più elevata di questa, evita l'alterazione della variazione dell'immagine.

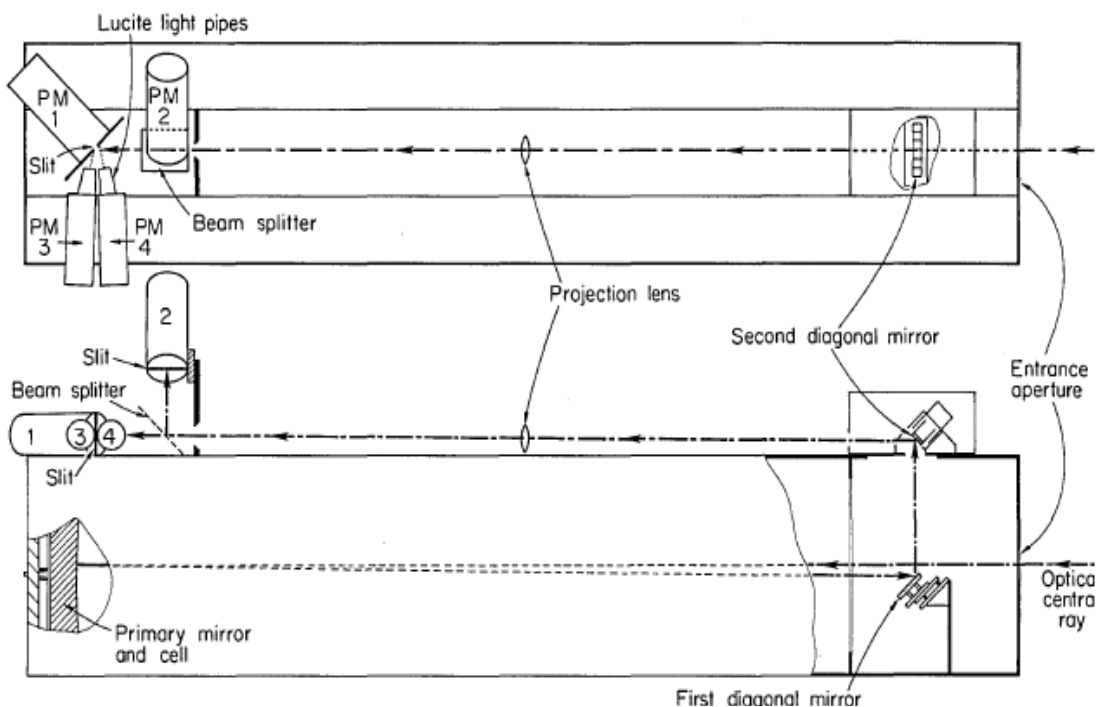
1.4.1 CORREZIONE DELLA DISTORSIONE ATMOSFERICA ATTRAVERSO L'IMAGE-SHARPENING DI UN TELESCOPIO

Una ricerca, risalente al 1976 [7], si occupò di costruire e testare un telescopio usando sei specchi mobili per compensare la distorsione di fase indotta dall'atmosfera.

Questo studio si rifà proprio ad un articolo di Muller e Buffington, in cui dimostrano che le funzioni di nitidezza dell'immagine raggiungono i loro massimi assoluti solo quando sono state rimosse le perturbazioni atmosferiche o quelle di altre fasi.

L'apparecchiatura era basata su un sistema a feedback in grado di regolare gli specchi in tempo reale, in modo tale da massimizzare l'intensità della luce che attraversa una stretta fessura nel piano dell'immagine.

L'esito ha mostrato prestazioni con diffrazioni limitate, nel caso di immagini laser e oggetti in luce bianca che attraversano 250m di turbolenza atmosferica.



In figura è rappresentato il layout dell'apparecchio: la luce incidente passa attraverso l'apertura d'ingresso, viene focalizzata dallo specchio primario, riflessa dagli specchi nelle due diagonali, fino ad arrivare di fronte alla lente di proiezione. L'elemento critico del sistema di image-sharpening è il secondo specchio diagonale, contenente sei elementi mobili che correggono la distorsione di fase atmosferica. Inoltre la montatura del telescopio consente la rotazione su tutto l'asse della canna, permettendo il riorientamento della direzione.

2. CORREZIONE MEDIANTE ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE

Il problema di ottimizzazione è un problema la cui soluzione si misura in termini di una funzione costo o obiettivo, che a seconda del problema deve essere massimizzata o minimizzata, in modo da essere ridotto ad una sequenza di problemi decisionali.

Algoritmi di ricerca sistemica sono metodi che collaudano ogni possibile combinazione o soluzione del problema. Un algoritmo di ricerca può essere utilizzato per massimizzare la nitidezza di una metrica, annullare l'aberrazione inerente del sistema, guidando lo specchio deformabile alla sua forma ottimale.

Di recente, hanno preso largo impiego tecniche innovative per risolvere problemi di progettazione ed ottimizzazione. Questi problemi chiedono di calcolare la soluzione ottimale per l'istanza in esame, quella che rende minimo o massimo un determinato criterio di valutazione, la funzione obiettivo.

2.1 ANT COLONY OPTIMIZATION

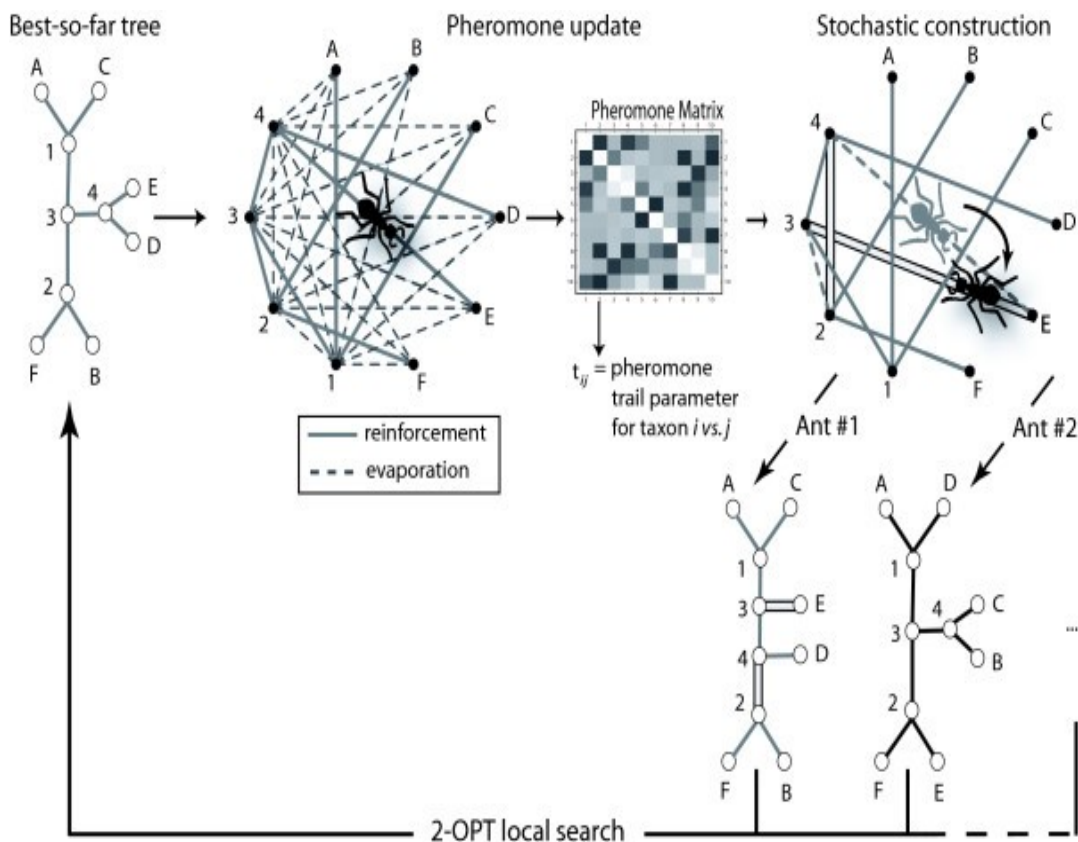
Uno dei più affascinanti fenomeni di organizzazione osservabili in natura è una colonia di formiche. Esse, infatti, per quanto piccole siano, il che comporta una mancata visuale dello spazio, trovano sempre la via più breve e più agevole per ritornare a casa.

L'algoritmo che dà forma al comportamento delle formiche prende il nome di Ant Colony Optimization (ACO) ed è stato introdotto nel 1992 da Marco Dorigo del Politecnico di Milano. ACO appartiene alla classe di metaeuristiche, gli algoritmi usati per ottenere un numero sufficiente di soluzioni a problemi di difficile ottimizzazione combinatoria in un ragionevole lasso di tempo.

La fonte ispiratrice di ACO è il comportamento di foraggiamento delle formiche reali. Durante la ricerca di cibo, le formiche inizialmente esplorano in modo casuale l'area circostante il loro nido. Non appena una formica trova una fonte di cibo, valuta la quantità e la qualità del cibo e porta alcuni di essi di nuovo al nido.

Durante il viaggio di ritorno, la formica deposita una scia chimica di feromoni sul terreno. La quantità di feromone depositata, che può dipendere dalla quantità e qualità del cibo, guiderà altre formiche alla fonte di cibo. La comunicazione indiretta fra le formiche attraverso percorsi di feromoni permette di trovare i percorsi più brevi tra il loro nido e le fonti di cibo. Questa caratteristica delle colonie di formiche reali è sfruttata in colonie di formiche artificiali al fine di risolvere i problemi di CO (ottimizzazione combinatoria).

Per applicare ACO, il problema di ottimizzazione è trasformato nel problema di trovare il miglior percorso su un grafico ponderato. Il processo di costruzione della soluzione è stocastico ed influenzato da un modello di feromone, un insieme di parametri associati ai componenti del grafico (bordi), i cui valori sono modificati in fase di esecuzione dalle formiche.



2.1.1 ACO METAEURISTICA

La metaeuristica consiste in un passo di inizializzazione e in tre componenti algoritmiche, ripetute fin quando il criterio di soddisfazione non è soddisfatto.

Componente centrale di un algoritmo ACO è un modello probabilistico parametrizzato, il modello di feromone. Questo modello è costituito da un vettore di parametri $T_i \in \mathcal{T}$ detti parametri del sentiero di feromoni, solitamente associati ai componenti delle soluzioni. Il modello di feromone viene, infatti, usato per generare soluzioni al problema dal punto di vista probabilistico.

L'approccio ACO tenta di risolvere un problema di ottimizzazione ripetendo due passaggi fondamentali:

- soluzione idonee sono costruite su un modello di feromone;
- soluzioni idonee sono utilizzate per modificare i valori di feromone, in modo da preferire soluzioni di alta qualità per i successivi campionamenti.

Il modello feromone può essere derivato da un problema CO, definito come segue:

“A model $P = (\mathcal{S}, \Omega, f)$ of a CO problem consists of:

- a search (or solution) space \mathcal{S} defined over a finite set of discrete decision variables and a set Ω of constraints among the variables;
- an objective function $f: \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}^+$ to be minimized. “[8]

La ricerca dello spazio \mathcal{S} è definita come un insieme di n variabili discrete $X_i (i=1, \dots, n)$ con valori $v_i^j \in D_i = \{v_i^1, \dots, v_i^{(|D_i|)}\}$. L'insieme delle soluzioni praticabili S_Ω è dato dagli elementi di \mathcal{S} che soddisfano tutti i vincoli

dell'insieme Ω . Ogni variabile istanziata $X_i = v_i^j$ è chiamata componente della soluzione c_{ij} , ad ognuna delle quali è associato un valore di traccia di feromone τ_{ij} . I valori di feromone, aggiornati durante la ricerca, consentono la distribuzione di probabilità delle diverse componenti della soluzione.

Le formiche artificiali costruiscono una soluzione per un problema di ottimizzazione combinatoria attraversando un grafo completamente connesso. Esse passano da un vertice a un altro lungo i bordi del grafico, depositando una certa quantità di feromone $\Delta \tau$.

Il processo per costruire la soluzione può essere sintetizzato col seguente algoritmo[8]:

Algorithm 1 The framework of a basic ACO algorithm

input: An instance P of a CO problem model $\mathcal{P} = (\mathcal{S}, f, \Omega)$.
InitializePheromoneValues(\mathcal{T})
 $s_{bs} \leftarrow \text{NULL}$
while termination conditions not met **do**
 $\mathcal{S}_{iter} \leftarrow \emptyset$
 for $j = 1, \dots, n_a$ **do**
 $s \leftarrow \text{ConstructSolution}(\mathcal{T})$
 if s is a valid solution **then**
 $s \leftarrow \text{LocalSearch}(s)$ {optional}
 if $(f(s) < f(s_{bs}))$ or $(s_{bs} = \text{NULL})$ **then** $s_{bs} \leftarrow s$
 $\mathcal{S}_{iter} \leftarrow \mathcal{S}_{iter} \cup \{s\}$
 end if
 end for
 ApplyPheromoneUpdate($\mathcal{T}, \mathcal{S}_{iter}, s_{bs}$)
end while
output: The best-so-far solution s_{bs}

Dove InitializePheromoneValues(T) sta ad indicare che all'inizio dell'algoritmo i valori di feromone sono inizializzati su un valore costante, $c > 0$.

Il processo di costruzione delle soluzioni, ConstructSolution(T), può essere pensato come un percorso sul grafico $G_c(V, E)$. I percorsi consentiti in G_c sono definite dall'insieme $N(s^p)$, rispetto ad una soluzione parziale s^p . Nella maggior parte degli algoritmi ACO, la probabilità di transizione, ovvero la probabilità del prossimo componente della soluzione, è definita come

$$p(c_{ij} | s^p) = \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{c_{il} \in N(s^p)} \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta}, \forall c_{ij} \in N(s^p)$$

dove τ_{ij} rappresenta il valore di feromone e η_{ij} il valore euristico, associati al componente c_{ij} , mentre α e β sono parametri positivi reali. Inoltre tutti i dati forniti da questa funzione sono chiamati informazioni euristiche.

LocalSearch(s) è una procedura di ricerca locale, che può essere applicata per migliorare le soluzioni costruite dalle formiche e ottimizzare le prestazioni complessive dell'algoritmo.

L'obiettivo del feromone di aggiornamento, PheromoneUpdate, è di incrementare i livelli di feromone associati alle buone soluzioni S_{upd} , riducendo gli altri attraverso l'evaporazione del feromone. L'evaporazione del feromone è necessaria per evitare una troppo rapida convergenza dell'algoritmo, favorendo l'esplorazione di nuove aree di ricerca.

Ciò può essere sintetizzato dalla seguente relazione[9]:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \sum_{s \in S_{upd}, c_{ij} \in s} F(s)$$

dove $\rho \in (0, 1]$ è il parametro relativo alla velocità di evaporazione e F è la funzione di fitness, tale che

$$f(s) < f(s') \Rightarrow F(s) \geq F(s'), \forall s \neq s' \in S$$

Diversi algoritmi ACO si differenziano per il modo di aggiornare il feromone.

Un esempio è la regola IB(iterazione migliore)-update:

$$S_{upd} \leftarrow \arg \max_{s \in S_{iter}} F(s)$$

Questa regola si differenzia da AS-update, in quanto introduce una distorsione più forte e aumenta la velocità con cui si trovano le buone soluzioni. Invece, è simile a BS-update, poiché sono entrambi dotati di meccanismi che evitano la convergenza prematura.

2.1.2 VARIANTI DELL' ALGORITMO ACO

Analizzo di seguito le caratteristiche dei principali algoritmi ACO.

- **ANT SYSTEM(AS)** è stato il primo algoritmo proposto da Dorigo nel 1991. La caratteristica principale è che i valori di feromone vengono aggiornati da tutte le formiche che hanno completato il tour. I componenti della soluzione c_{ij} sono i bordi del grafico e l'aggiornamento del feromone per τ_{ij} .

L'aggiornamento del feromone, che unisce i bordi della 'città'(si rifà al problema del commesso viaggiatore) i e j, è effettuato nel seguente modo

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k$$

dove ρ è il tasso di evaporazione, m è il numero di formiche e $\Delta \tau_{ij}^k$ è la quantità di feromone per unità di lunghezza prevista sul bordo(i,j) dalla formica k-esima.

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} \\ 0 \end{cases}$$

Se la formica k utilizza il bordo (i,j) nel suo tragitto vale il primo caso, altrimenti la quantità di feromone per unità di lunghezza risulta nulla. Q è una costante mentre L_k è la lunghezza del tour della formica k-esima.

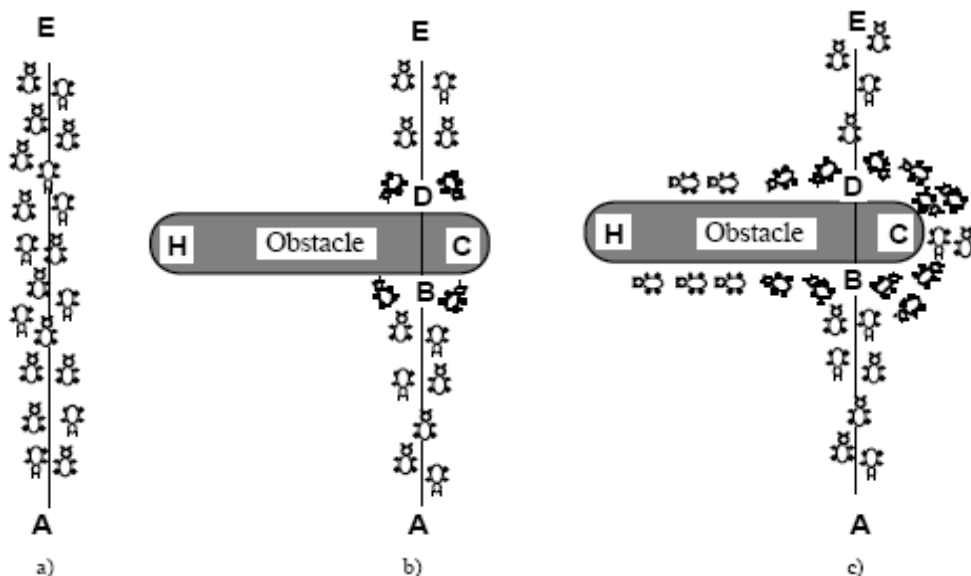
La probabilità di transizione della formica k-esima da i a j è data da:

$$p(c_{ij}, s_k^p) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{(\sum_{c_{ij} \in N(s_k^p)} \tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta)} \\ 0 \end{cases}$$

dove $N(s_k^p)$ è la lista delle città non ancora visitate dalla formica k , α e β sono i parametri che controllano l'importanza relativa del feromone rispetto alle informazioni euristiche date da $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$. Inoltre, la prima soluzione si riferisce a quando $j \in N(s_k^p)$, altrimenti, se non è valida questa condizione, la funzione risulta nulla.

In figura, è mostrato un esempio del comportamento delle formiche reali:

- esse seguono indisturbate un percorso tra i punti A e B;
- viene interposto un ostacolo con conseguente scelta dei due percorsi con uguale probabilità;
- nel percorso più breve è previsto più feromone.



- **ANT COLONY SYSTEM(ACS)**

Un importante sviluppo dell'algoritmo originale AS e' stato presentato da Dorigo e Gambardella nel 1997[10], attraverso la presentazione di Ant Colony System.

Il contributo più interessante fornito da ACS e' l'introduzione dell'*aggiornamento del feromone locale*, in aggiunta agli aggiornamenti di feromone eseguiti al termine di produzione del processo. Il feromone locale viene aggiornato da tutte le formiche, dopo ogni fase di costruzione.

Altri aspetti importanti riguardano la regola dello stato di transizione e la regola di aggiornamento globale. La prima fornisce un modo diretto di equilibrio tra l'esplorazione di nuovi bordi e lo sfruttamento a priori di conoscenze acquisite in merito al problema, la seconda è applicata solo ai bordi che appartengono al tour migliore della formica.

Funzionamento ACS: m formiche sono inizialmente posizionate su n città selezionate secondo una regola di inizializzazione. Ogni formica costruisce un tour e applica ripetutamente la regola stocastica della transizione di stato. In tal modo, applicando la regola dell'aggiornamento locale, la formica modifica la quantità di feromone sui bordi visitati. Quando tutte le formiche hanno completato il tour, la quantità di feromone viene modificata ancora una volta impiegando la regola di aggiornamento globale.

Le formiche sono guidate sia da informazioni euristiche, scegliendo i lati più brevi, che da informazioni di feromone.

Un bordo con un'elevata quantità di feromone è una scelta molto desiderabile.

The ACS algorithm: [10]

Initialize

Loop /* at this level each loop is called an iteration */

Each ant is positioned on a starting node

Loop /* at this level each loop is called a step */

Each ant applies a state transition rule to incrementally build a solution

and a local pheromone updating rule

Until all ants have built a complete solution

A global pheromone updating rule is applied

Until End_condition

La **regola della transizione di stato** e' riassunta della seguente formula, in cui una formica posizionata sul nodo r , sceglie la città s :

$$s = \begin{cases} \arg \max_{(u \in J_k(r))} \{ [\tau(r, u)] [\eta(r, u)]^\beta \} \\ S \end{cases}$$

La prima soluzione si ha nel caso in cui $q \leq q_0$, invece, la seconda è valida in tutti gli altri casi.

Questa regola favorisce la transizione verso i nodi collegati da bordi più corti e con una grande quantità di feromone.

q e' un parametro casuale distribuito in $[0, \dots, 1]$, q_0 determina l'importanza relativa dello sfruttamento a priori rispetto all'esplorazione, e S e' una variabile casuale selezionata in base alla distribuzione di probabilità $pk(r,s)$.

La regola risultante da s e $pk(r,s)$ viene detta *pseudo-random proportional rule*, in cui la probabilità di una formica di passare da una città ad un'altra dipende dal parametro casuale q . Tale regola favorisce lo sfruttamento delle informazioni di feromone ed è controbilanciata dall'aggiornamento del feromone locale, eseguito da tutte le formiche dopo ogni fase di costruzione.

Tutto ciò comporta una ricerca più diretta, in cui le formiche ricercano l'iterazione migliore nelle vicinanze dei migliori tour trovati.

Il livello di feromone viene aggiornato secondo **la regola di aggiornamento globale**[10]:

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot \tau(r, s) + \alpha \cdot \Delta \tau(r, s)$$

dove $\Delta \tau(r, s) = \frac{1}{L_{gb}}$ se (r,s) appartiene al global best tour, $\Delta \tau(r, s) = 0$

altrimenti. Nello specifico, α è il parametro di decadimento del feromone e L_{gb} è la lunghezza del tour mondiale all'inizio del processo.

Anche questa legge impone che solo i bordi appartenenti al tour globalmente migliore, riceveranno più feromone.

Mentre costruisce una soluzione, la formica che attraversa i bordi aggiorna il livello di feromone secondo la **regola di aggiornamento locale**

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(r, s) + \rho \cdot \Delta \tau(r, s)$$

dove ρ è un parametro distribuito su $(0,1]$.

Obiettivo principale dell'aggiornamento locale è diversificare la ricerca effettuata dalle formiche successive nel corso di una iterazione. Riducendo la concentrazione di feromone sui bordi, a seconda dell'attraversamento di un'iterazione, spinge le formiche successive a scegliere altri bordi e quindi a produrre soluzioni differenti.

L'aggiornamento **offline** (al termine del processo di costruzione) del feromone viene applicato alla fine di un'iterazione da una sola formica, quella che ha trovato la soluzione migliore[9]:

$$\tau_{ij} \leftarrow \begin{cases} (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \Delta \tau_{ij}^{best} \\ \tau_{ij} \end{cases}$$

Dove $\Delta \tau_{ij}^{best} = \frac{1}{L_{best}}$ se il bordo (i,j) appartiene al miglior tour trovato, altrimenti

$$\Delta \tau_{ij}^{best} = 0 \quad .$$

- **MAX-MIN ANT SYSTEM(MMAS)**

MMAS rappresenta un miglioramento rispetto il precedente algoritmo AS, introducendo queste principali differenze:

- solo la formica migliore è in grado di aggiornare i sentieri di feromone;
- i valori di minimo e massimo di feromone sono limitati, si riferiscono al risultato dell'algoritmo di lavoro piuttosto che al valore impostato in modo esplicito dal progettista.

La formula di aggiornamento del feromone prende la forma seguente[11]

$$\tau_{ij} \leftarrow [(1-\rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{best}] \cdot \frac{\tau_{max}}{\tau_{min}}$$

dove l'aggiornamento del feromone è definito da

$$\Delta \tau_{ij}^{best} = \begin{cases} \frac{1}{L_{best}} \\ 0 \end{cases}$$

dove la prima soluzione è valida nel caso in cui la formica 'migliore' usa il bordo (i,j) nel suo tour.

L_{best} è la lunghezza del tour della formica 'migliore', che può essere impostato sia come L_{ib} , miglior tour trovato nell'iterazione corrente, che come L_{bs} , migliore soluzione individuata dall' algoritmo.

I valori di feromone sono verificati dopo l'aggiornamento e dovrebbero esser scelti sperimentalmente in base al problema in questione. Il valore massimo può essere calcolato secondo

$$\tau_{max} = \left(\frac{1}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{1}{L^*}\right)$$

dove L^* è la lunghezza del tour ottimale, che nel caso in cui non sia noto è possibile approssimare con L_{bs} .

Il minimo valore di feromone dovrebbe esser scelto con cautela, si presenta infatti un approccio analitico alla ricerca di questo valore in base alla probabilità che una formica costruisce il miglior tour, p_{best} .

Inizialmente si ipotizza che la costruzione di ogni passo sia una costante k di opzioni disponibili, poi la probabilità che una formica faccia la scelta giusta (porti cioè alla costruzione del miglior tour) è data da:

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max} \cdot (1 - p_{dec})}{k \cdot p_{dec}} \quad \text{con} \quad p_{dec} = \sqrt[n-1]{p_{best}} \cdot$$

Il processo di aggiornamento del feromone si conclude con la verifica che tutti i valori di feromone rientrano nei limiti imposti:

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \tau_{max} & \text{if } \tau_{ij} > \tau_{max} \\ \tau_{min} & \text{if } \tau_{ij} < \tau_{min} \end{cases}$$

2.1.3 PROBLEMA DEL COMMESO VIAGGIATORE(TSP)

Un esempio molto diffuso per illustrare il funzionamento della metaeuristica ACO è dato dal problema del commesso viaggiatore. TSP consiste nel trovare un percorso chiuso, tour hamiltoniano, di lunghezza minima che visiti le città una sola volta.

L'idea principale è quella di avere un insieme di agenti, le formiche, alla ricerca di buone soluzioni per il TSP e che cooperano attraverso un intermediario, il feromone. Ogni formica costruisce una soluzione del TSP in modo iterativo, aggiungendo nuove città per una soluzione parziale e sfruttando informazioni ricavate dalle esperienze passate (date dalla memoria) e dall'euristica (data dalla lunghezza dei bordi).

Si consideri un grafico, grafico di costruzione, che associa l'insieme delle città con la serie di vertici del grafo. Dal momento che nel TSP è possibile passare da una città a qualsiasi altra, il grafico risulta completamente connesso e il numero di vertici corrisponde a quello delle città. Inoltre, le lunghezze degli spigoli tra i vertici sono proporzionali alle distanze delle città, rappresentate da questi vertici, e i valori di feromone e di euristica ai bordi del grafico.

I valori di feromone sono modificati in fase d'esecuzione, secondo l'esperienza cumulata dalle formiche, mentre i valori euristici dipendono dai valori del problema (inverso della lunghezza dei bordi).

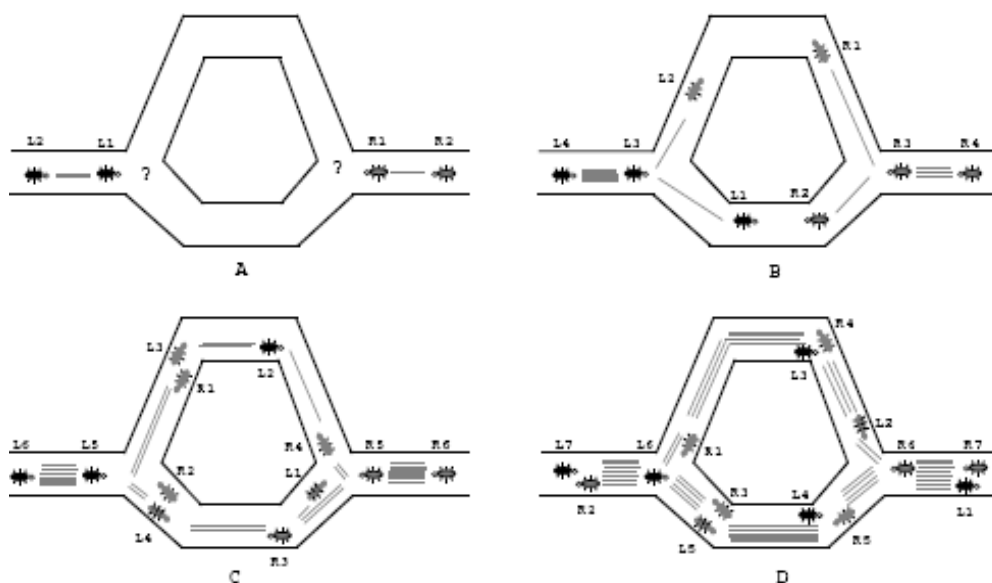
COSTRUZIONE DELLA SOLUZIONE:

Ogni formica parte da una città (vertice del grafico) in modo casuale e si muove lungo i bordi del grafico. Nei passaggi successivi sceglie i bordi che non portano a vertici già visitati, poiché conserva un ricordo del percorso già fatto. La soluzione è costruita quando la formica ha visitato tutti i vertici del grafico. Il feromone presente sui bordi viene aggiornato quando tutte le formiche hanno completato il tour.

La regola probabilistica è influenzata dai valori di feromone e di informazione euristica:

Maggiore è la quantità di feromone e il valore euristico associato al bordo, maggiore è la probabilità che la formica scelga questo bordo.

Un modo con cui le formiche sfruttano il feromone per trovare il percorso più breve tra due nodi è dimostrato in figura [10]:



In A, le formiche arrivano ad un punto in cui devono decidere se svoltare a destra o sinistra e, dal momento che non hanno idea su quale sia la scelta migliore, scelgono in modo casuale. In media, una metà si sposta verso destra e l'altra verso sinistra.

In B e C viene mostrato ciò che accade negli istanti immediatamente successivi, supponendo che tutte le formiche si muovano approssimativamente alla stessa velocità. Il numero di linee tratteggiate è in gran modo proporzionale alla quantità di feromone depositata sul terreno. Poiché il percorso inferiore, in figura, è più breve di quello superiore, lo visitano più formiche e il feromone si accumula più velocemente. Dopo un breve periodo, la differenza di quantità di feromone sui due sentieri è sufficientemente grande da influenzare la decisione delle nuove formiche(1D). Da questo momento, le formiche preferiscono probabilisticamente la via più bassa incrementando la quantità presente sul sentiero.

ALGORITHM TSP:

TSP

Let $V = \{a, \dots, z\}$ be a set of cities, $A = \{(r,s) : r,s \in V\}$ be the edge set, and $\delta(r,s) = \delta(s,r)$ be a cost measure associated with edge $(r,s) \in A$.

The TSP is the problem of finding a minimal cost closed tour that visits each city once.

In the case cities $r \in V$ are given by their coordinates (x_r, y_r) and $\delta(r,s)$ is the Euclidean distance between r and s , then we have an Euclidean TSP.

ATSP

If $\delta(r,s) \neq \delta(s,r)$ for at least one edge (r,s) then the TSP becomes an asymmetric TSP (ATSP).

Ogni formica genera un giro completo, scegliendo le città secondo una regola probabilistica di transizione di stato: le formiche si spostano nelle città collegate da bordi brevi con una grande quantità di feromoni.

Una volta che tutte le formiche hanno completato il tour, viene applicata la regola di aggiornamento globale del feromone. Così, una frazione del feromone evapora su tutti i bordi e, successivamente, ogni formica deposita una quantità di feromone sui bordi appartenenti al suo tour, proporzionalmente alla lunghezza di esso.

La **regola di transizione di stato** è data da:

$$p_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)] \cdot [\eta(r, s)^\beta]}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)^\beta]} & \text{se } s \text{ appartiene } J_k(r) \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove τ è il feromone, $\eta = \frac{1}{\delta}$ è l'inverso della distanza $\delta(r, s)$, $J_k(r)$ è l'insieme delle città che devono ancora essere visitate dalla formica k , posizionata sulla città r e β è un parametro positivo che determina l'importanza relativa al feromone in funzione della distanza. Moltiplicando il valore del feromone per il corrispondente valore euristico, al numeratore, si favorisce la scelta del percorso più breve. La **regola di aggiornamento globale** è implementata da

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot \tau(r, s) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_k(r, s)$$

dove $\Delta \tau_k(r, s) = \frac{1}{L_k}$ se (r, s) fa parte del tour della formica k , $0 < \alpha < 1$ è un parametro di decadimento del feromone, L_k la lunghezza del tour e m il numero di formiche.

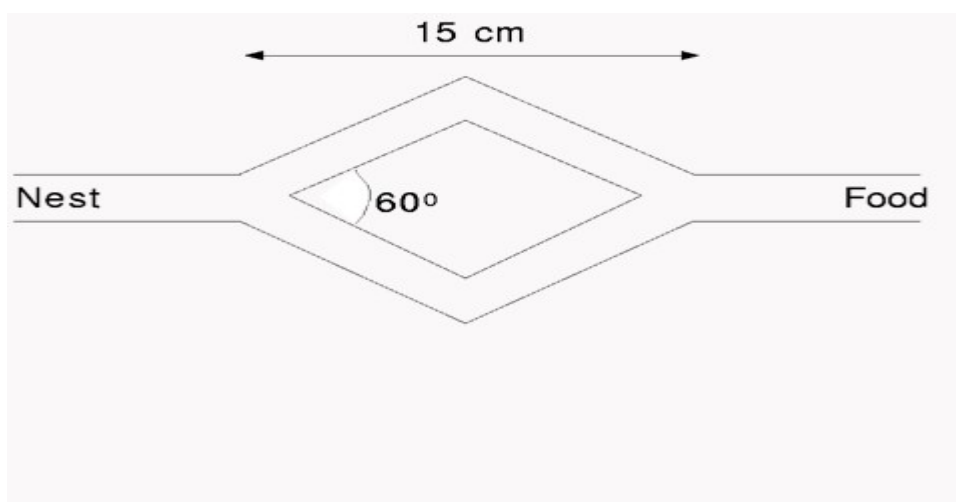
La formula di aggiornamento del feromone aveva lo scopo di simulare il cambiamento del livello di feromone, considerando sia l'aggiunta del nuovo depositato dalle formiche sia quello 'evaporato'. Il feromone posto sui bordi funge da memoria a lungo termine distribuita, che non è quindi memorizzata all'interno della formica ma sui bordi. Ciò consente una forma indiretta di comunicazione, la stigmergia, metodo di comunicazione utilizzato nei sistemi decentralizzati col quale gli individui del sistema comunicano fra loro modificando l'ambiente circostante.

2.1.4 ESPERIMENTO DEL PONTE DOPPIO

Nell'esperimento a doppio ponte, un nido di una colonia di formiche è collegato a una fonte di cibo attraverso due ponti. Le formiche possono raggiungere la fonte e ritornare al nido utilizzando entrambi i percorsi.

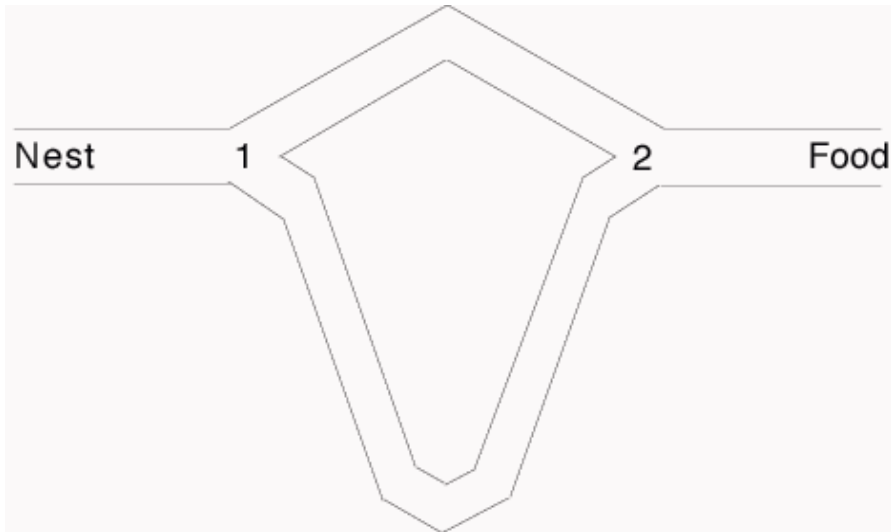
Considerando due casi, in cui la lunghezza dei ponti risulta essere uguale o significativamente diversa, analizziamo il differente comportamento delle formiche.

Nel primo caso, i due ponti hanno la stessa lunghezza e si osserva che, ripetendo più volte l'esperimento, le formiche tendono a convergere verso uno dei due ponti nel 50% dei casi.



Inizialmente, le formiche scelgono probabilisticamente uno dei due ponti in quanto non vi è ancora feromone. Successivamente, uno dei due ponti presenta una maggiore concentrazione di feromone e attira dunque più formiche. Questo meccanismo autocatalitico porta la colonia a convergere verso l'uso dello stesso ponte.

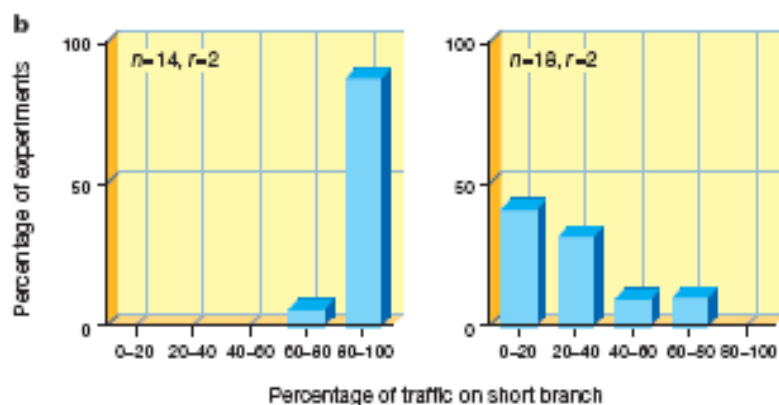
Nel caso di ponti di lunghezza differente, influisce un altro fattore: le formiche che scelgono casualmente il ponte più breve, raggiungono il cibo prima.



Quando queste stesse formiche devono ritornare al nido, punto 2, percepiscono una quantità di feromone superiore nel ponte più corto che viene scelto con maggiore probabilità.

Nel caso in cui viene selezionato per primo il ramo più lungo, il percorso più breve non sarà selezionato perché l'altro è già segnato da feromone. Questo problema può essere risolto introducendo un feromone di decadimento: quando il feromone evapora abbastanza velocemente, è più difficile mantenere una traccia di feromoni stabile su un percorso più lungo. In tal modo, il ramo più corto viene selezionato anche se intrapreso dopo quello più lungo.

Percentuale di traffico sul ramo breve[12] è rappresentata nel seguente grafico



In esso è rappresentata la distribuzione percentuale delle formiche che ha selezionato il ramo più corto, su un set di esperimenti.

A sinistra, il grafico rappresenta esperimenti(n=14) in cui entrambi i rami sono stati presentati simultaneamente. A destra, rappresenta esperimenti(n=18) in cui il ramo più breve è stato presentato alla colonia 30minuti dopo del ramo più lungo, l'unico ad essere sfruttato.

Goss et al.(1989), ha sviluppato un modello[13] di comportamento riguardante il ponte doppio, che mette in evidenza la probabilità di una formica di scegliere il primo ponte supponendo che, dopo un istante t dall'inizio della sperimentazione, m_1 formiche hanno usato il primo ponte e m_2 il secondo :

$$p_{1(m+1)} = \frac{(m_1 + k)^h}{(m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h}$$

dove k e h sono parametri forniti da dati sperimentali e la probabilità di scegliere il secondo ponte è $p_{2(m+1)} = 1 - p_{1(m+1)}$.

2.2 ALGORITMI GENETICI(GA)

Un algoritmo genetico è un metodo di ricerca globale e stocastico basato sulla metafora della selezione naturale di Charles Darwin . Gli Algoritmi Genetici (GA) operano su una popolazione di potenziali soluzioni applicando il principio della sopravvivenza del migliore, evolvendo verso una soluzione che si avvicina alla reale soluzione del problema.

Ad ogni generazione, un nuovo insieme di soluzioni è creato dal processo di selezione che, basandosi sul livello di adeguatezza (Fitness), seleziona i migliori membri della popolazione e li fa evolvere utilizzando una serie di operatori genetici mutuati dalla genetica naturale. Questo processo porta ad una evoluzione robusta verso individui che meglio si adattano all'ambiente, ovvero all'insieme di soluzioni che meglio rispondono al problema.

L'evoluzione delle generazioni viene ottenuta attraverso una parziale ricombinazione delle soluzioni, in cui ogni individuo trasmette parte del proprio patrimonio genetico ai discendenti, e mutazioni casuali nella popolazione di partenza.

Ogni individuo della popolazione è codificato da una stringa rappresentante il cromosoma, attraverso il sistema di codifica binario. Ogni soluzione, possiede una **funzione di Fitness**, ovvero una misura di quanto la soluzione è in grado di rispondere al problema posto, valuta infatti la qualità di un individuo.[14]

Un GA è una procedura di ricerca iterativa il cui scopo è ottimizzare la funzione di fitness.

L'algoritmo consiste in una serie di operazioni, quali: generazione di una popolazione iniziale, creazione di nuove sequenze(valutazione idoneità, fitness; ordinamento individui; selezione dei genitori; mutazione e cross over; generazione successiva) e interruzione dell'algoritmo una volta che il criterio risulta soddisfatto.[15]

Così come nella natura solamente gli individui che meglio si adattano all'ambiente sono in grado di sopravvivere e di riprodursi, anche negli algoritmi genetici le soluzioni migliori sono quelle che hanno la maggiore probabilità di trasmettere i propri geni alle generazioni future. Individui con fitness elevato probabilmente verranno selezionati come genitori per la futura generazione di

soluzioni. Dopo aver selezionato un numero n di individui, l'algoritmo genetico simula la riproduzione sessuata che avviene in natura e ricombina il materiale genetico dei genitori, dando vita ai figli, ovvero alla futura generazione di soluzioni.

La ricombinazione avviene tramite operatori genetici di Cross Over e Mutazione Puntuale. Il processo viene reiterato per un numero x di volte fino a quando o si raggiunge una approssimazione accettabile della soluzione al problema o si raggiunge il numero massimo di iterazioni prefissato.

Gli elementi costitutivi di un algoritmo genetico sono:

-POPOLAZIONE:

Costituita da un numero n di individui, ognuno dei quali rappresenta una possibile soluzione al problema.

-FUNZIONE FITNESS:

La funzione di Fitness è una funzione in grado di valutare quanto una soluzione è adatta a risolvere il problema dato. Ad ogni soluzione corrisponde quindi un valore di fitness. In un GA, i valori di fitness più alti sono associati ad individui migliori, sono dunque procedure di massimizzazione.

Nell'articolo "GA based neural network identification algorithm"[17] , in cui le sottopopolazioni si scambiano con meccanismi di migrazione e concorrenza, questa funzione viene descritta come

$$Fitness = 2 - SP + 2 \cdot \{SP - 1\} \frac{\{Pos - 1\}}{\{Nind - 1\}}$$

dove $Nind$ è il numero di individui della popolazione, Pos la posizione di un individuo ed SP la pressione selettiva.

-PRINCIPIO DI SELEZIONE:

Il principio di selezione ha il compito di selezionare gli individui della popolazione (le soluzioni) che meglio rispondono al problema da risolvere. La selezione si basa sulla fitness degli individui; le soluzioni con fitness maggiore avranno maggiori

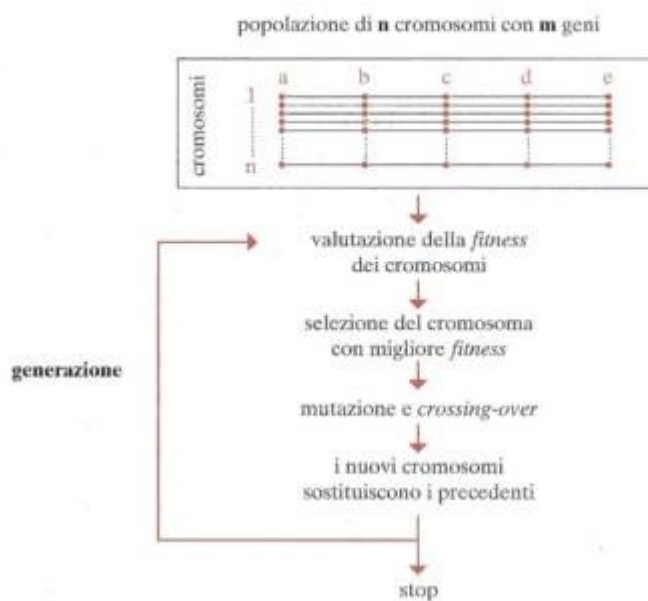
possibilità di partecipare alla riproduzione e quindi di trasmettere alle future generazioni i propri geni.

-OPERATORI GENETICI:

Gli operatori genetici combinano i geni delle diverse soluzioni al fine di esplorare nuove soluzioni. Una volta che un gruppo di soluzioni viene individuato come idoneo alla riproduzione, l'operatore genetico di **cross over**, simulando la riproduzione sessuata degli esseri viventi, combina i geni dei genitori e formula una nuova generazione di soluzioni.

Un altro operatore genetico largamente utilizzato è la **Mutazione puntuale**, che agisce direttamente sui figli, andando a modificare un gene a caso.

funzionamento di un algoritmo genetico:



La ricerca genetica realizza un compromesso tra exploitation della soluzione disponibile migliore ed exploration dello spazio di ricerca.

Exploitation ed exploration corrispondono, rispettivamente, a ricerca locale e ricerca globale: exploitation eccessiva può portare l'algoritmo a convergere ad una soluzione non accettabile (la ricerca resta in un ottimo locale), exploration eccessiva può non sfruttare appropriatamente la conoscenza già disponibile

rendendo il processo di ricerca molto lento.

Sono state avanzate diverse ricerche riguardo il tasso ottimale di mutazione degli GA, simili a quelli che agiscono in natura, basati ovvero su un metodo di codifica del DNA.

Esistono parecchie forme di mutazione, classificabili sulla base del loro comportamento:

- mutazioni a livello di gene, che si verificano all'interno di un gene e possono essere definite da sostituzioni di singole basi o possono essere aggiunte/rimosse dal DNA di un gene.

Gli inserimenti e le delezioni che interessano una o due basi e un numero elevato di aminoacidi vengono dette frame-shift.

- mutazioni a livello di cromosoma, che si riferiscono a cambiamenti nell'organizzazione dei cromosomi. Nel caso in cui si ha il trasferimento di un pezzo di un cromosoma ad un altro non omologo, si parla di traslocazione. L'operatore di mutazione di tipo traslocazione muove, infatti, segmenti di cromosomi da una locazione a un'altra in due cromosomi.

Quando, frammenti identici di cromosoma compaiono più volte, dopo la mutazione, si ha la duplicazione. Invece, se appare ancora lo stesso frammento ma in senso contrario, al modo in cui era presente prima, si parla di inversione.

- Mutazioni a livello di genoma, che riguardano i cambiamenti nel numero di cromosomi.

Riporto qui un esempio di GA basato sulla mutazione[16]:

Algoritmo Genetico basato su Mutazione (AGM):

begin

scegliere l'operatore di mutazione (o frame-shift o traslocazione)

inizializzare in maniera casuale una popolazione $P(t)$ di P elementi

while (un criterio di terminazione non e' soddisfatto)**do**

valutare $P(t)$ usando la funzione di fitness

for $i = 1$ to P **do**

scegliere casualmente un individuo in $P(t)$ con il torneo

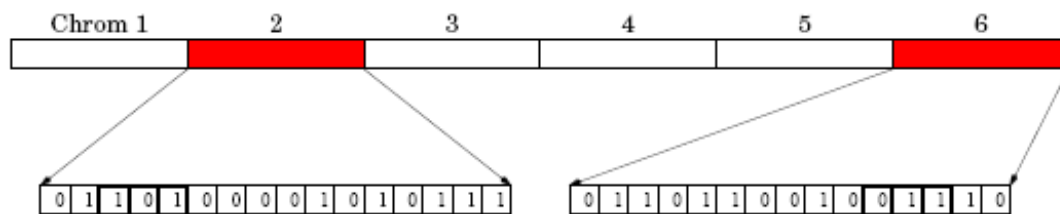
applicare ad esso l'operatore di mutazione scelto

end for

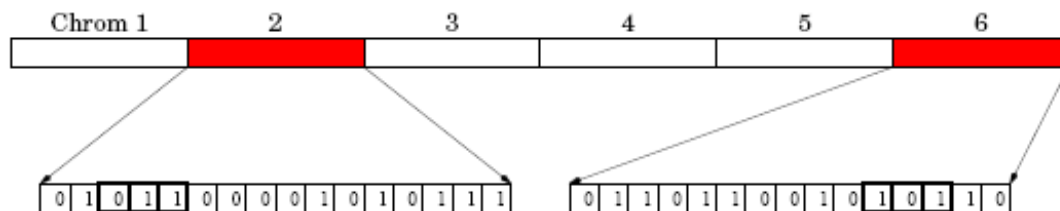
end while

aggiornare le variabili per la terminazione

end



(a) before translocation



(b) after translocation

3. SPERIMENTAZIONI IN LABORATORIO

Scopo dell'elaborato sta nel testare le prestazioni degli specchi DM con elettrodi continui e, successivamente, segmentati attraverso gli algoritmi di ottimizzazione, quali GA (Algoritmi Genetici) e ACO (Ant Colony Optimization), di cui si è già discusso nel secondo capitolo.

Inizialmente si è cercato di prendere confidenza con la struttura ottica a disposizione in laboratorio, analizzando degli elementi attraverso un programma, sempre in matlab, diverso dagli algoritmi sopra citati. Questo algoritmo applica una serie di funzioni all'immagine esaminata, in modo da ottimizzarla.

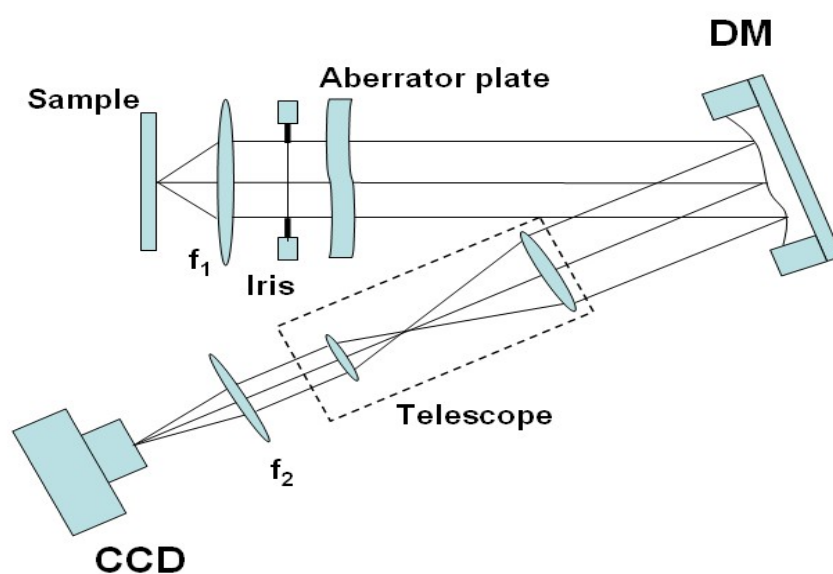
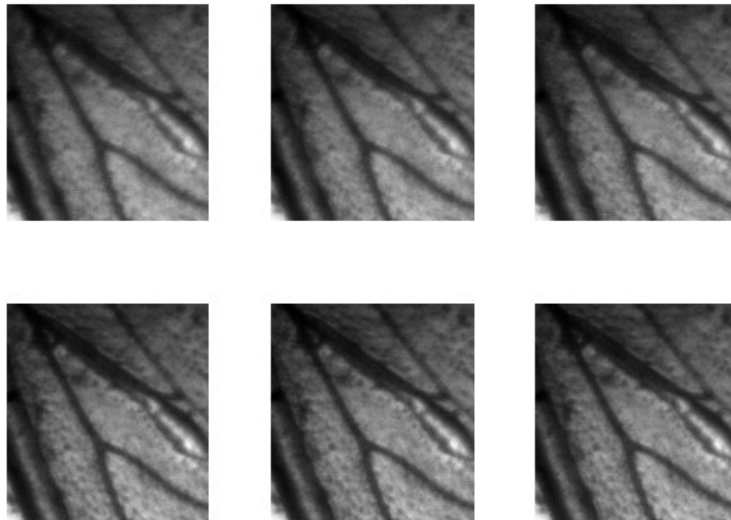


Fig: LAYOUT SPERIMENTALE USATO PER LE OTTIMIZZAZIONI

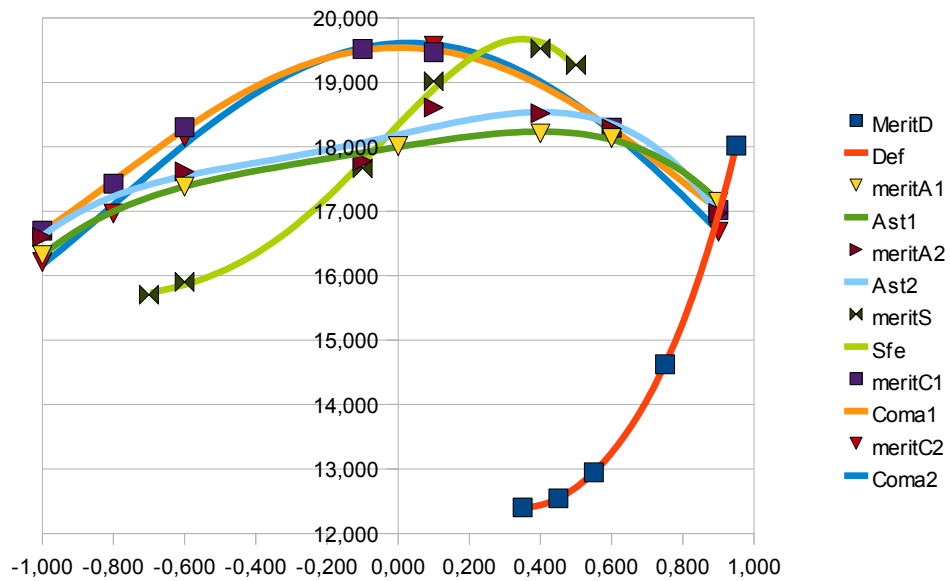
Si sono, dunque, acquisite diverse immagini e valutati i parametri degli indici relativi alle funzioni di merito, necessari per la realizzazione del grafico finale.

Espongo qui un esempio.

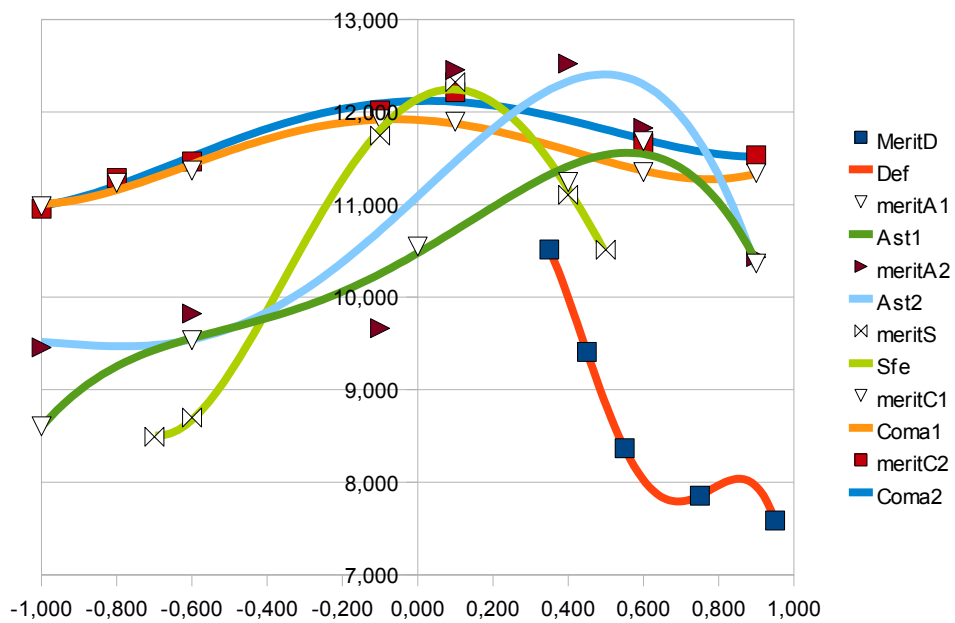
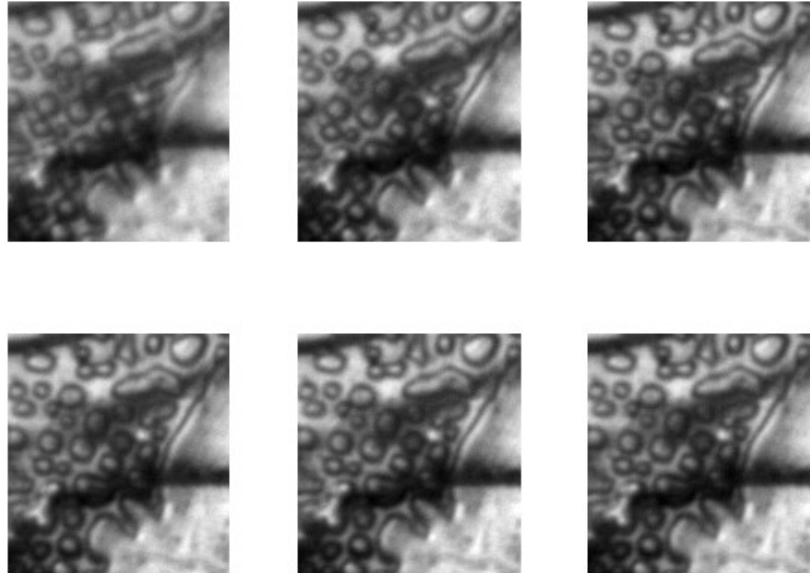


Questa serie di immagini rappresentano, appunto, le ottimizzazioni ottenute attraverso le funzioni applicate dall'algorithm(astigmatismo, aberrazione sferica, coma, defocus).

Importando i dati degli indici, si è ottenuto il seguente grafico:



Successivamente, si è aggiunto un laser alla struttura ottica, in modo tale da allineare al meglio il fascio. Anche questa volta si è utilizzato lo stesso programma per le acquisizioni, con le stesse procedure grafiche.



Utilizzando la stessa apparecchiatura ottica delle esperienze precedenti, si acquisiscono le immagini analizzate, poi, con il programma che si basa sul principio degli Ant Colonies Optimization.

Lasciando lo stesso oggetto davanti alla sorgente e non spostandolo, in modo tale da poter confrontare le diverse acquisizioni, cambio alcuni parametri interni del programma.

L'idea del programma si basa sui percorsi che può fare una colonia di formiche, prestando quindi attenzione al numero di ants e bridges, i ponti che migliorano il percorso.

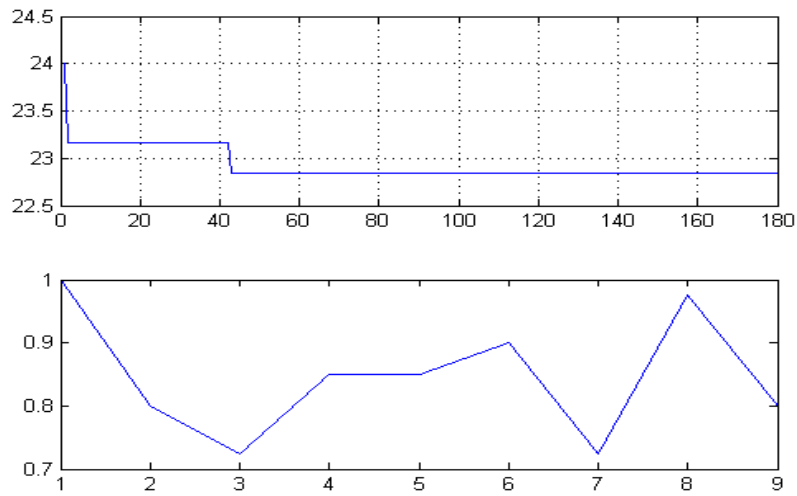
Nella prima esperienza, variando il parametro r_0 (persistenza, $0 \rightarrow 1$) e il numero di ants, verifico qual'è la configurazione migliore ai fini dell'ottimizzazione.

Da queste acquisizioni, si è potuto constatare che, variando r_0 e mantenendo costante il numero di formiche, non cambia in modo significativo il valore migliore.

Riassumo i valori trovati in tabella e riporto il grafico di ottimizzazione per il valore migliore:

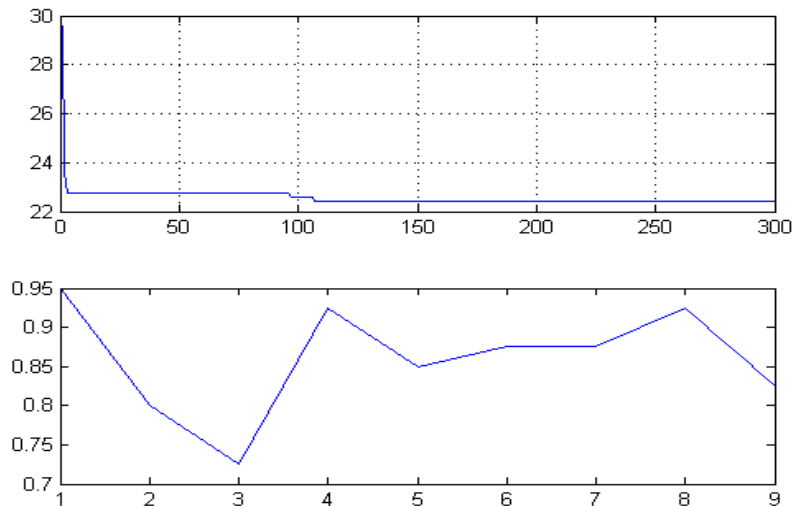
persistenza	15 ants:best value
$r_0=0.1$	22,84
$r_0=0.2$	23
$r_0=0.3$	23,12
$r_0=0.5$	22,84
$r_0=0.7$	23,19

GRAFICO OTTIMIZZAZIONE CON $r_0=0.1$:



Allora, tenuto fisso $r_0=0.1$, vario il numero di formiche e ottengo il valore migliore nel secondo caso, di cui mostro il grafico dell'ottimizzazione.

	Best value
15 ants	22,84
25 ants	22,4
35 ants	22,98



SPECCHIO CON ELETTRODI CONTINUI:

Considerando uno specchio con elettrodi continui, nelle successive esperienze, si sono confrontate le ottimizzazioni relative all' algoritmo genetico e agli Ant Colonies Optimization.

- Un tipico algoritmo genetico parte da un certo numero di possibili soluzioni (popolazione) e provvede a farle evolvere nel corso dell'esecuzione. Ad ogni iterazione, si opera una selezione degli individui della popolazione, che andranno a costituire la generazione successiva, evolvendo verso una soluzione ottimale del problema.

Lavorando con questo algoritmo, si possono variare parametri come xov e mut, al fine di migliorare le prestazioni.

Dunque, analizzate le immagini acquisite prima e dopo l'ottimizzazione, si è realizzata una tabella con i relativi indici:

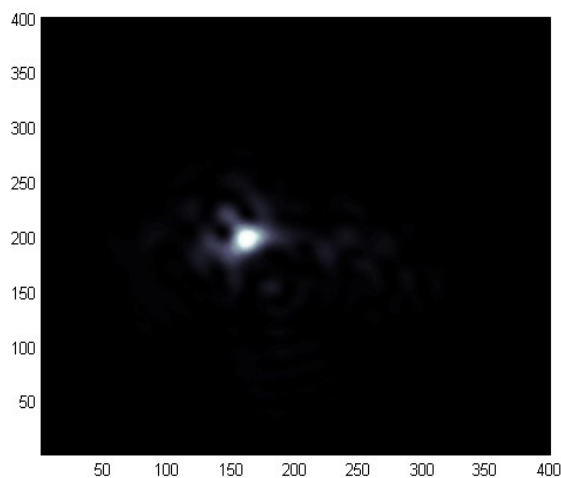
xov=numero di crossover (ricombinazione del materiale genetico);

mut=numero di mutazioni genetiche(modifica casuale di alcune parti di geni con valore di fitness più basso);

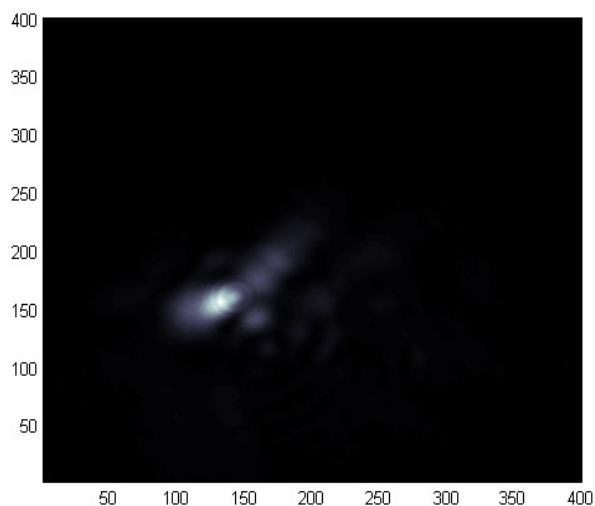
fit=best value; npop;

clon=npop-(xov+mut).

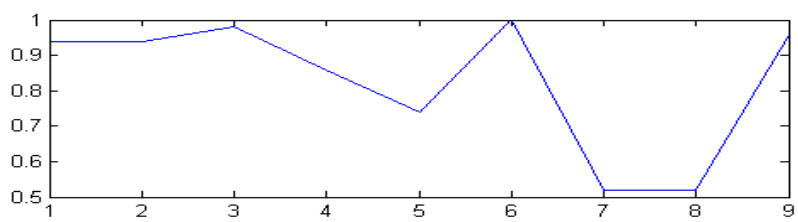
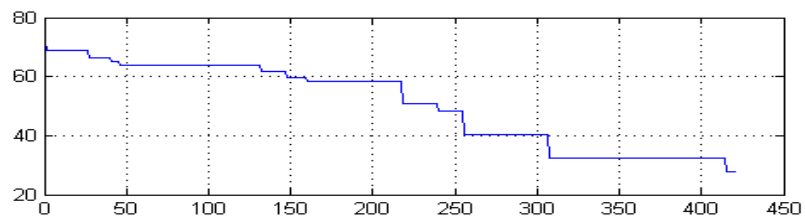
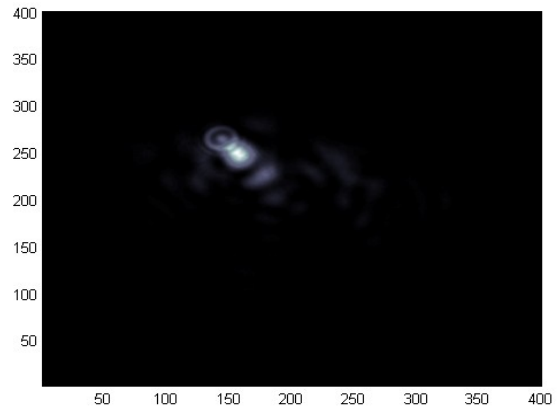
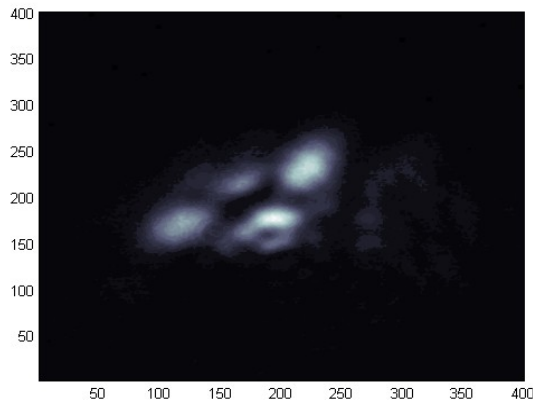
In tal caso, non si sono ottenuti valori accettabili, come lo si può vedere in questo esempio:



A sinistra, l'immagine prima dell'“ottimizzazione” e in basso, quella dopo.



- Utilizzando questa tipologia di specchio con elettrodi continui, si è provata l'ottimizzazione attraverso gli ACO, con risultati migliori. Ne faccio qui un esempio, mostrando l'immagine prima e dopo aver applicato l'algoritmo e il grafico che evidenzia il tempo che impiega a far l'ottimizzazione:



NOTA: ants=35; bridge=25; ans=27,82.

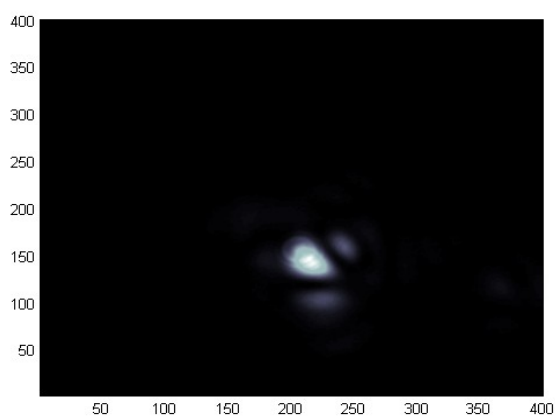
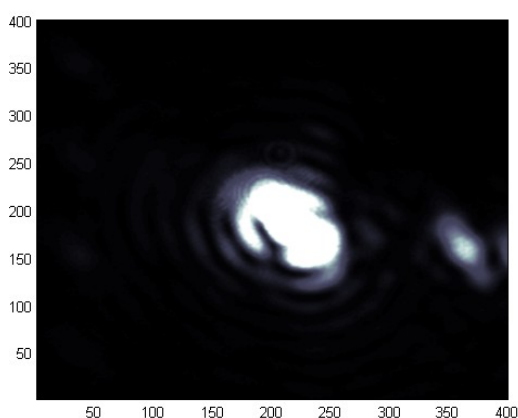
SPECCHIO CON ELETTRODI A SEGMENTI:

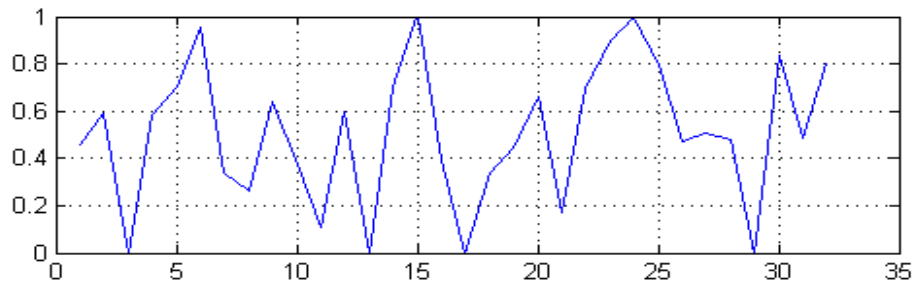
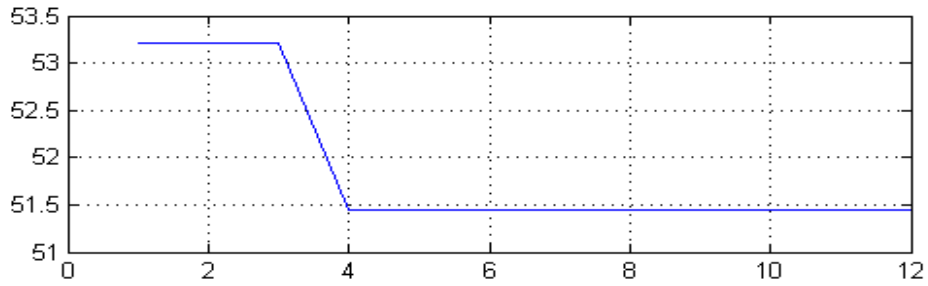
Valuto adesso le prestazioni dello specchio segmentato, attraverso i due algoritmi precedentemente utilizzati per il continuo.

•Attraverso l'impiego dell'algoritmo genetico, variando gli stessi parametri prima indicati, ottengo questi risultati:

	Xov	mut	clon	fit
Acq.1	15	5	10	54.45
Acq.2	20	10	0	-----
Acq.3	20	5	5	57.42. 00
Acq.4	20	1	9	51.45. 00
Acq.6	5	20	5	58.05

NOTA: npop=30.

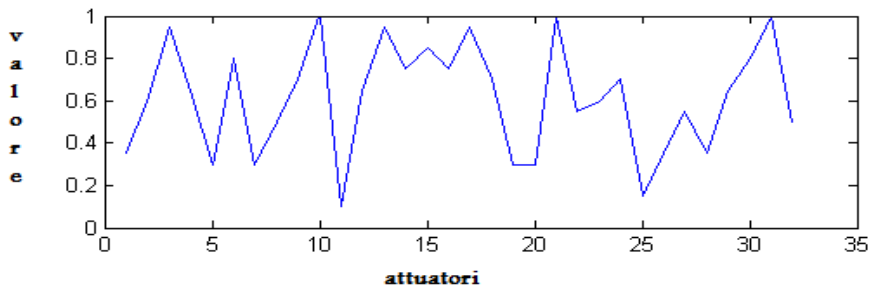
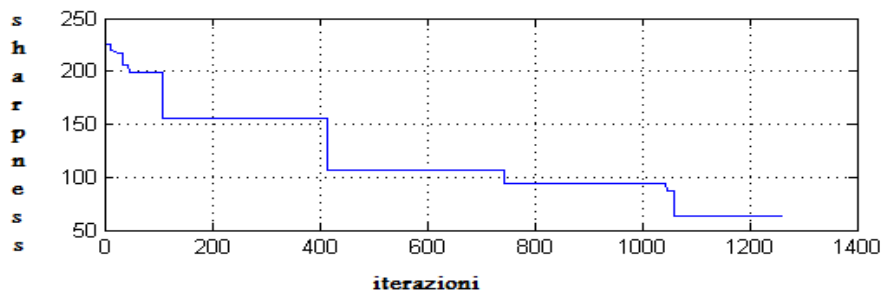
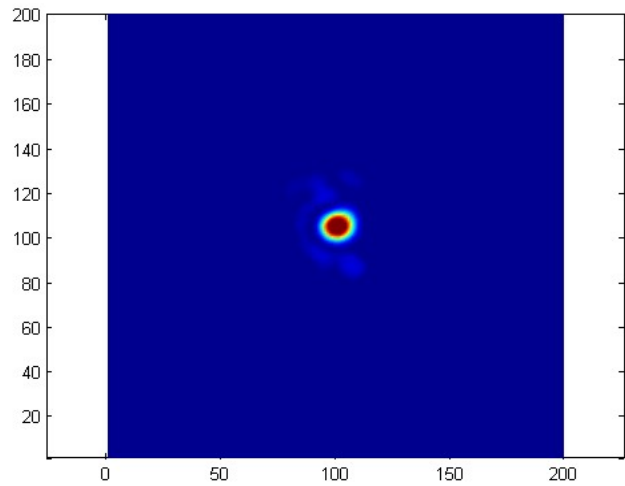
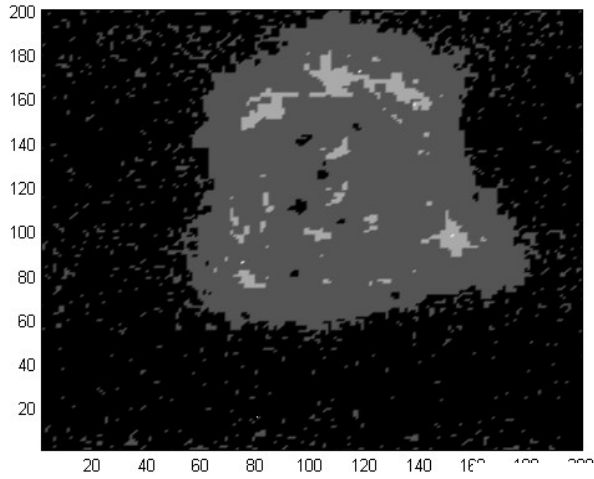




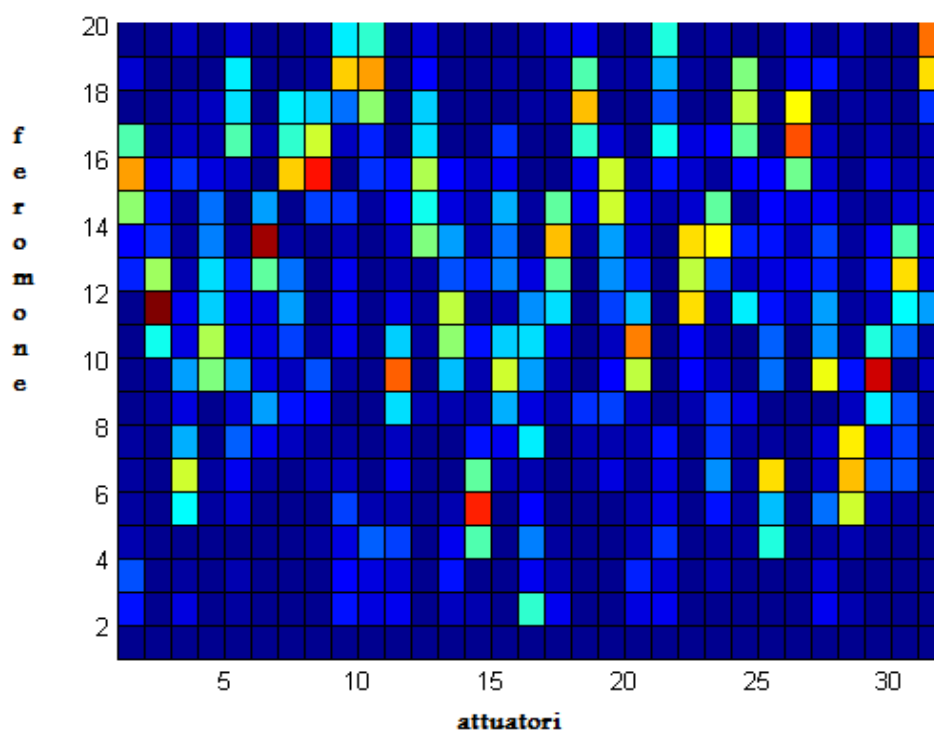
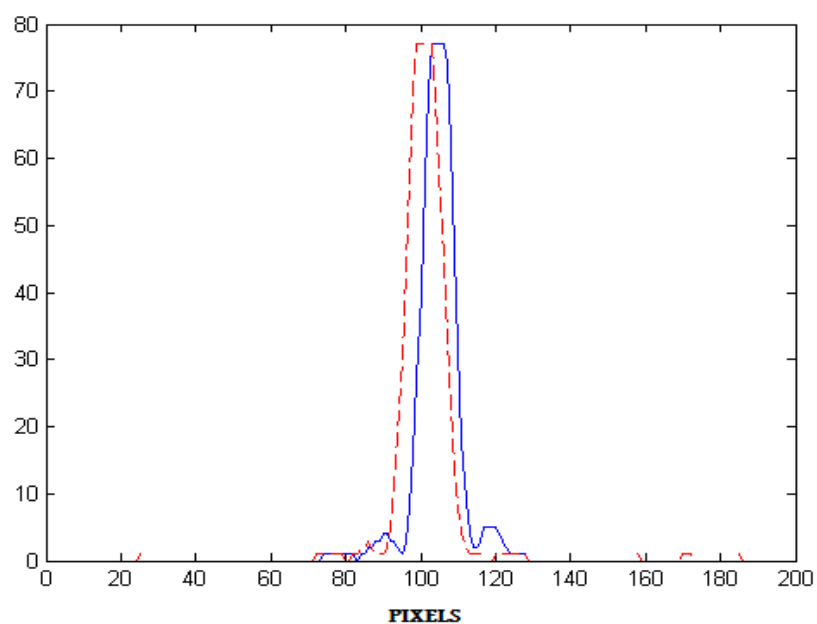
- Nel caso della valutazione delle prestazioni attraverso ACO, abbiamo trovato i seguenti valori:

	NUM. ANTS	NUM. BRIDGE	ANS
1_ACQ.	100	20	86,14
2_ACQ.	80	20	118,33
3_ACQ.	110	20	100
4_ACQ.	105	20	62
5_ACQ.	95	20	122,45
6_ACQ.	105	35	98
7_ACQ.	105	15	115,54
8_ACQ.	105	25	91,22

Della quarta acquisizione mostro l'immagine acquisita prima e dopo l'ottimizzazione, il grafico e la PSF risultante.



Di seguito riporto la Point Spread Function(PSF), funzione che misura la densità della luce proiettata da una sorgente luminosa ideale puntiforme (*impulso*), attraverso il forellino di una camera pinhole.



Quest'ultima immagine rappresenta, invece, una matrice in grado di stabilire il livello di feromone che rappresenta l'informazione di un pixel, secondo i movimenti delle formiche (Il rosso indica il livello di feromone più alto).

Concludendo, possiamo dire che, lo specchio segmentato presenta delle prestazioni migliori nell'ottimizzazione attraverso l'algoritmo ACO. Esso infatti fornisce immagini più nitide, rispetto allo specchio continuo, ma compie più iterazioni per raggiungere l'ottimizzazione, parliamo precisamente di 1200 contro le 400 del continuo.

Inoltre, vale la pena ricordare che questo sistema è stato testato sia per immagini che per punti luminosi, è dunque valido per entrambi.

4. APPLICAZIONI AO IN CAMPO BIOMEDICO

L'ottica adattiva ha svolto un ruolo importante nel miglioramento della capacità di imaging degli strumenti astronomici che ci permettono di esplorare e comprendere i fenomeni stellari. L'occhio è un sistema dinamico imperfetto, le cui aberrazioni sono dovute ad imperfezioni nella cornea e nel cristallino e le distorsioni provocate dal fluido che mantiene la forma degli occhi, durante l'attraversamento della luce.

Le applicazioni di ottica adattiva per la cura degli occhi sono destinate a migliorare la risoluzione tecnologica di imaging e a portare, quindi, ad una migliore comprensione delle patologie e sviluppo dei dispositivi medici, permettendo un'analisi retinica microstrutturale.

In chirurgia, le tecnologie adattive sono in grado di ridurre il punto focale del laser per il diametro di una cellula al microscopio, in modo da consentire il trattamento selettivo delle cellule malate senza danneggiare il tessuto circostante.

4.1 Fundus Camera

Il primo strumento che ha consentito di esaminare in modo diretto la retina è stato l'oftalmoscopio diretto, usato ancora oggi e proposto da Helmholtz alla fine del 19-esimo secolo.

Esso è composto da una sorgente luminosa e da un set di lenti :

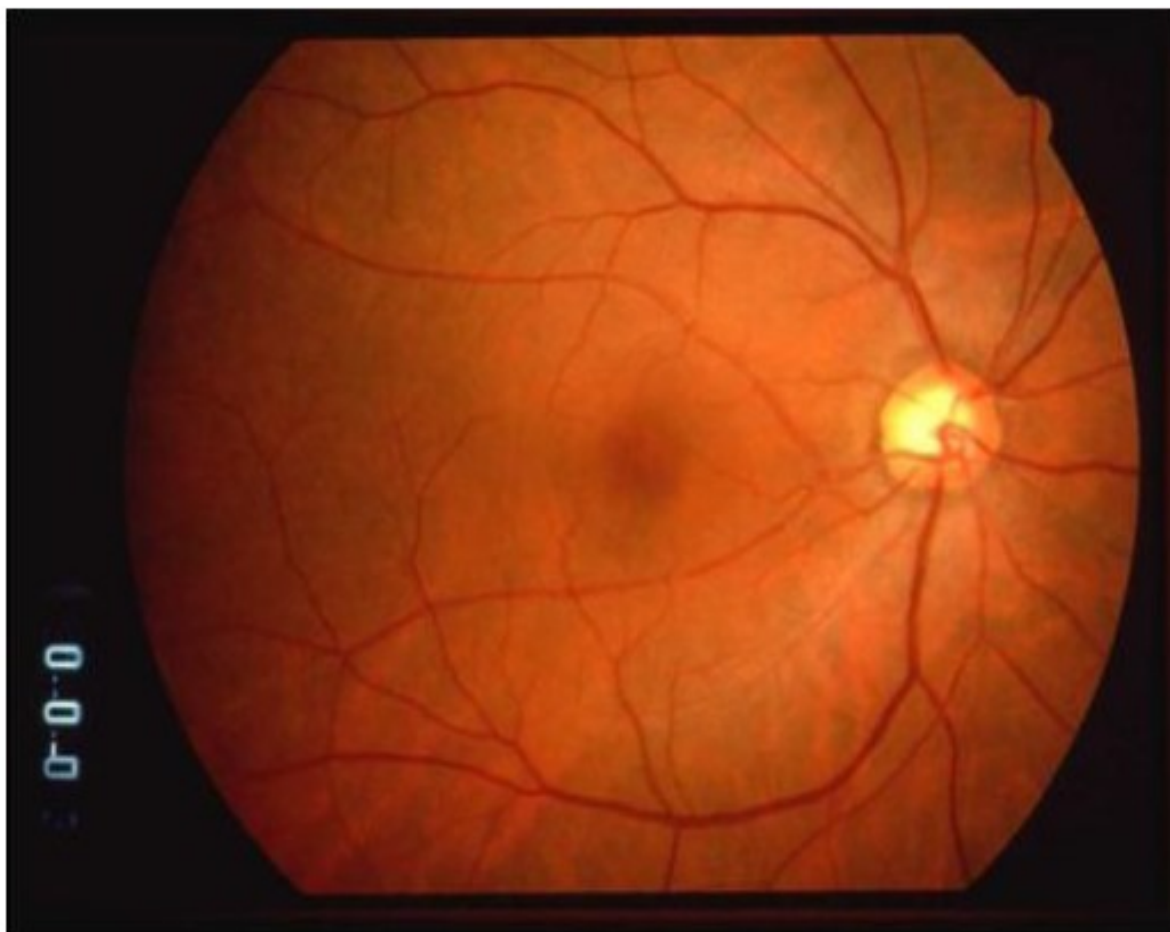
la luce viene proiettata, attraverso la pupilla dilatata, sulla retina e sul fuoco delle lenti, in modo che l'osservatore può guardare la retina. Il suo uso è molto diffuso nella pratica clinica, ma fornisce una scarsa sensibilità e risultati altamente dipendenti dall'esperienza dell'osservatore.

Nella prima metà del 20-esimo secolo, è apparso il primo strumento in grado di acquisire fotografie della retina, 35 mm collegati a un sistema ottico che si concentra sul fondo dell'occhio, illuminato da un lampo coassiale. Questa fotocamera consente la fotografia di diverse porzioni della retina con gamme di ingrandimento diverse.

Intorno al 1990, è apparsa la prima fundus camera digitale. Il sistema ottico non

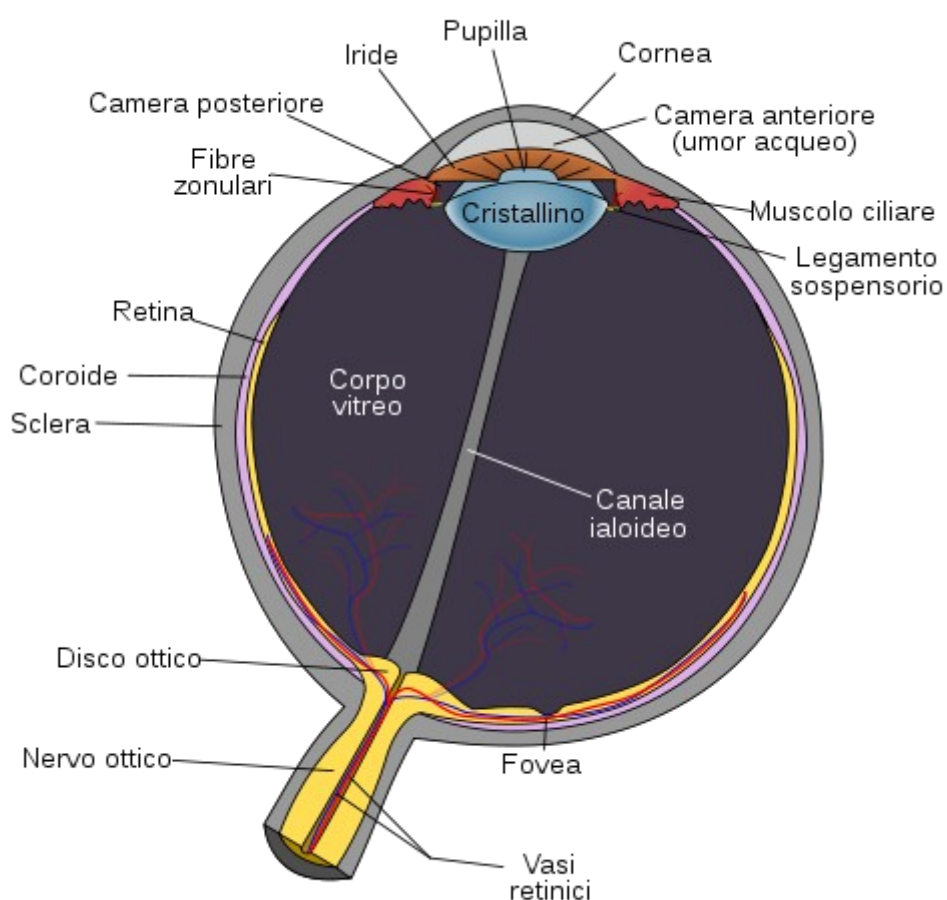
è più collegato ad una macchina fotografica tradizionale, ma ad un CCD, e l'immagine viene inviata a un computer per la visualizzazione e archiviazione.

Le attuali fundus camera sono in grado di compensare l'aberrazione di defocus, introdotta dall'occhio tramite sistemi mobili interni, ma non possono correggere l'astigmatismo oppure le aberrazioni di ordine superiore. Il principale problema delle fundus camera convenzionali è che l'informazione necessaria all'adattamento della forma del DM, per compensare le aberrazioni presenti, è fornita da un complesso e costoso analizzatore di fronte d'onda. Una possibile soluzione consiste nel proiettare un pattern noto sul fondo della retina e di acquisirne l'immagine con un sensore dedicato.[18] Analizzando in tempo reale quest'immagine con opportuni algoritmi, è possibile ottenere le indicazioni su come l'ottica adattiva debba essere opportunamente deformata per ridurre l'aberrazione introdotta dall'occhio e permettere di acquisire immagini ad alta definizione. Le immagini del fondo oculare, sono analizzate con algoritmi in grado di ricavare importanti parametri clinici per la diagnosi delle retinopatie, con particolare attenzione a quelle ipertensiva e diabetica.



In figura è rappresentata l'immagine di un occhio in condizioni normali, acquisita attraverso una fundus camera .

La parte visibile è costituita dalla retina con la sua rete vascolare, dalla macula e dalla testa del nervo ottico. La coroide è la struttura al di sotto della retina ed è spesso oscurata da essa.



La retina si presenta come una struttura multistrato, trasparente, ad esclusione dello strato più profondo costituito dall'epitelio pigmentato, responsabile del colore rossastro. Gli assoni delle cellule gangliari, presenti nell'epitelio pigmentato, gestiscono la papilla, detta anche disco ottico o testa del nervo ottico. L'arteria oftalmica entra nel bulbo ottico, a partire dal centro del disco ottico, e successivamente le diramazioni provvedono alla vascolarizzazione della maggior

parte della retina.

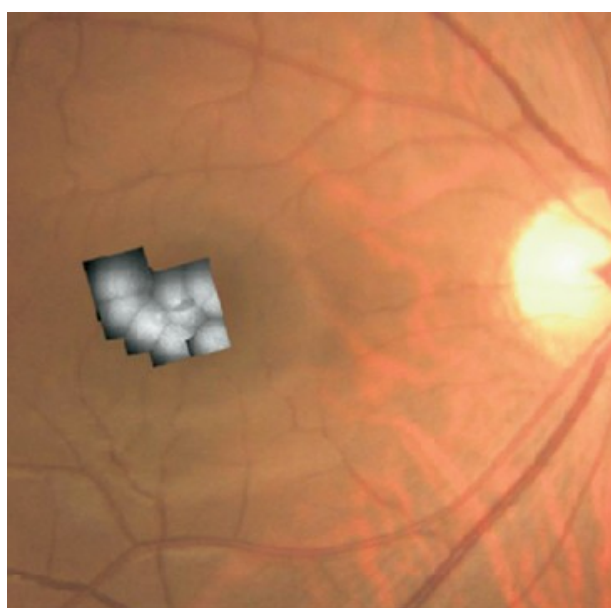
La zona centrale della retina è rappresentata dalla macula, preposta alla visione distinta e alla percezione dei dettagli, grazie alla concentrazione dei coni.

La macula si mostra come una macchia ovale di colore bianco giallastro, infatti non è alimentata da vasi retinici ma dai vasi della coroide.

Ciascuna parte dell'occhio ha una sua caratteristica fisiologica. Nello svolgere la sua funzione, l'occhio si comporta come la camera di una macchina fotografica, originando la formazione dell'immagine posteriormente, a livello della retina, eccitando la sensibilità delle cellule presenti che, attraverso il nervo ottico, raggiungono i centri gnostici e mnemonici a livello corticale.

La fundus camera, in ottica adattativa, è stata usata per esaminare i cambiamenti localizzati nello strato dei fotorecettori della fovea, attraverso la combinazione con la tomografia a coerenza ottica del dominio di Fourier[20].

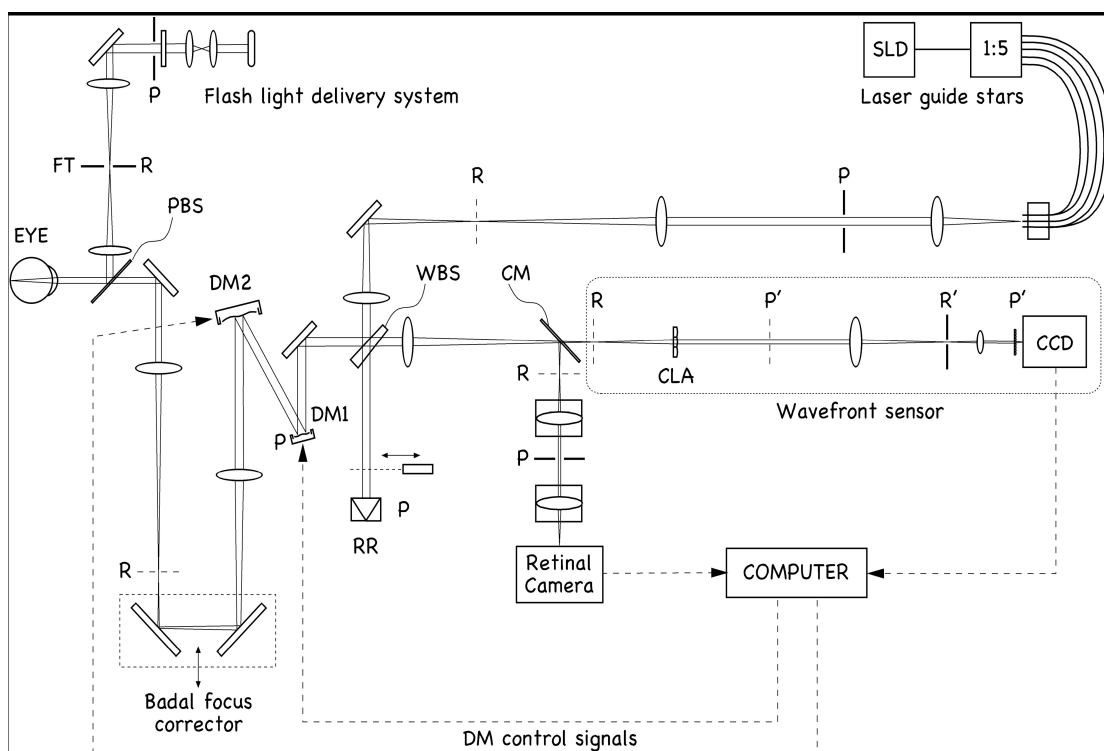
Questo studio ha sottoposto tre pazienti a un esame oftalmologico completo, compresa la misurazione della corretta acuità visiva, fotografia del fondo oculare, grafico di Amsler, angiografia fluoresceinica(FA) e biomicroscopia con lampada a fessura del fondo. Si è trovato che la fundus camera AO può acquisire immagini della retina a due dimensioni, con una risoluzione di circa 2m. Questa risoluzione permette la rilevazione di disturbi delle cellule visive altamente



localizzati, combinando appunto fundus camera AO e FD OCT. I risultati hanno indicato che nei pazienti riportanti metamorfosie, si possono presentare rotture localizzate delle cellule visive nella fovea.

In figura è mostrato il montaggio dell'immagine AO sovrapposta alla fotografia del fondo oculare.

I medici che vogliono ottenere un'alta risoluzione di immagini della retina, si trovano ad affrontare la costante evoluzione dei mezzi che causano le aberrazioni, attraverso i quali viene eseguita l'imaging (tomografia).



Nel layout in figura è rappresentato un sistema DCAO (Dual -conjugate adaptive optics), che permette imaging ad alta risoluzione della retina in vivo.[21]

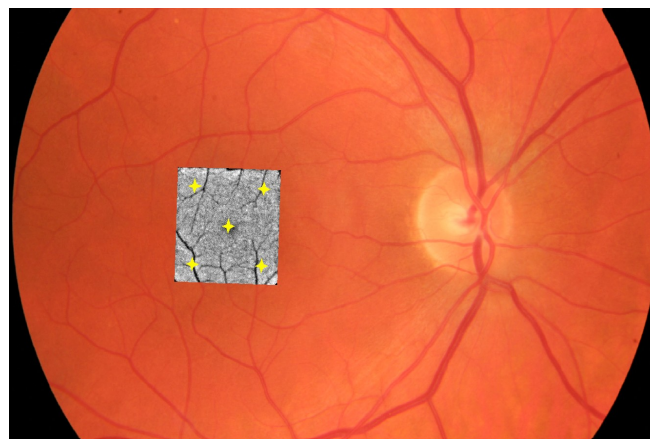
Il sistema è composto da cinque sub-unità: trasferimento della luce GS, rilevamento del fronte d'onda, imaging, riflettore di luce e unità correttiva DCAO comprendente i due DM e la messa a fuoco Badal.

La luce GS proviene da un diodo super-luminescente (SLD), alimentato da uno

splitter di 5 fibre, ed ha una banda molto vicina all'infrarosso($834 \pm 13 \text{ nm}$). I fasci collimati passano attraverso una coppia di lenti relay e sono accoppiati, nel resto del sistema, da un beamsplitter cuneo(WBS). Il 50% della luce GS passa attraverso il WBS, è riflessa da un catadiottro(RR) ed usata per la calibrazione. Il resto della luce è riflessa dal WBS verso specchi di membrana deformabili micromachined DM1 e DM2. Successivamente, la luce passa per il correttore di fuoco Badal, in modo da correggere gli errori di rifrazioni sferiche di un soggetto. La regolazione Badal serve quindi a conservare il potere correttivo.

Poi la luce entra nell'occhio attraverso uno specchio e una piastra beamsplitter(PBS).

La fotografia risultante del fondo dell'occhio è rappresentata in figura con un inserto del FOV(campo di vista) reale e le posizioni GS, inoltre i segnali sulla retina sono disposti a croce.



Nonostante il limitato potere correttivo del DM, risultati indicano che DCAO è un metodo fattibile per l'imaging a grande campo ad alta risoluzione della retina.

4.2 Anomalie

Malattie come l'ipertensione e il diabete colpiscono, anche se con modalità e decorso temporale differente, il microcircolo sanguigno comportando spesso come conseguenza la retinopatia .

Nonostante anche altri organi siano sensibili ad alterazioni del microcircolo sanguigno, la retina ha il grande vantaggio di essere facilmente disponibile ad un controllo non invasivo. Tale caratteristica suggerisce un modo efficiente ed efficace per seguire il decorso di malattie sistemiche associate alla retinopatia. Inoltre, con riguardo alla prevenzione della perdita della vista, il riconoscimento della retinopatia al suo insorgere è il punto più critico per evitare che degeneri in cecità. Ciò è particolarmente importante nella retinopatia diabetica in cui, allo stato attuale della farmacologia, i danni alla retina non recedono con il trattamento farmacologico o col controllo del diabete.

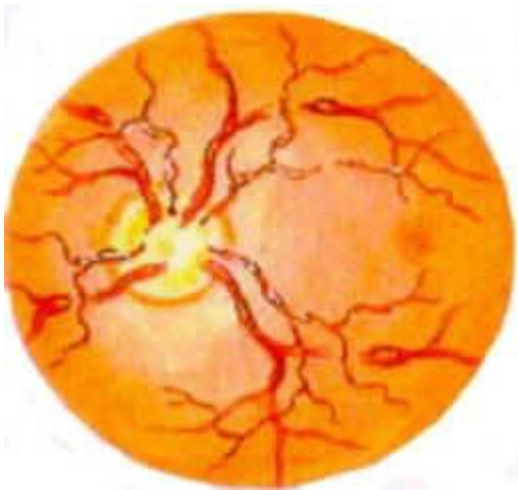
La **retinopatia diabetica** è una malattia che interessa a livello retinico le arteriole precapillari, i capillari e le venule, ossia i vasi più piccoli del nostro sistema vascolare. Tuttavia, anche i vasi più grandi possono essere interessati dalla malattia. Le caratteristiche principali della retinopatia diabetica sono la diffusione e l'occlusione microvascolare. La prima aumenta la permeabilità vasale e causa la fuoriuscita di liquidi dai vasi (edema retinico) e la fuoriuscita di sangue (emorragia). La seconda causa invece una ischemia ed una ipossia(mancanza di apporto di ossigeno) retiniche, che potranno portare se non adeguatamente trattate alla formazione di neovasi (o vasi neoformati), nel tentativo di ripristinare una perfusione.



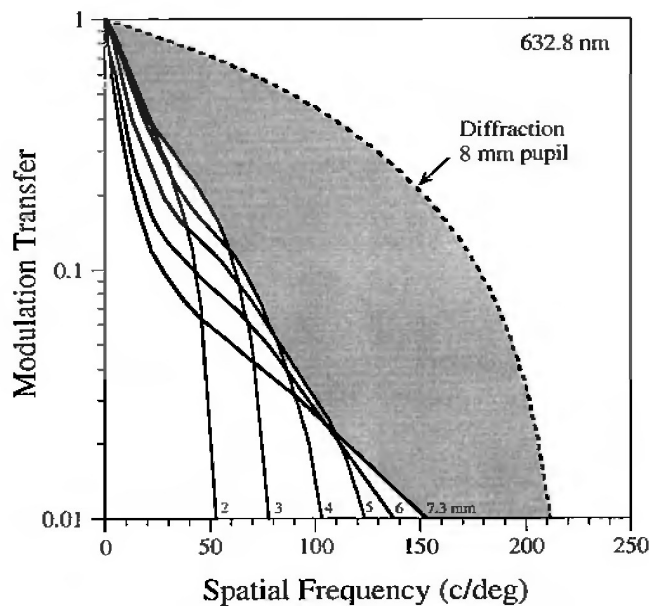
La **retinopatia ipertensiva** è una malattia oculare che interessa le arterie e le vene della retina, la coroide e il nervo ottico. Può provocare, nei casi più gravi, una visione annebbiata e distorta. La causa di questa patologia è l'ipertensione arteriosa. Infatti, nei soggetti che presentano una pressione del sangue al di sopra dei valori normali (80 mmHg per la minima e 120 mmHg per la massima) col passare del tempo si modificano le arterie, restringendosi, mentre le vene si dilatano e tendono ad assumere un decorso tortuoso. Questo tipo di evoluzione patologica porta alla formazione di aree ischemiche della retina, con essudati dalla caratteristica forma a batuffolo di cotone e piccole emorragie. Anche la coroide va incontro alla formazione di aree non irrorate. La diagnosi avviene attraverso l'esame del fondo oculare previa instillazione di un collirio che faccia dilatare* le pupille.

È possibile, in questo modo, valutare il calibro e il decorso dei vasi (arterie e vene) e la presenza di microemorragie e dell'edema.

A seconda del grado di alterazione di queste strutture si determina lo stadio della patologia. Nelle forme più avanzate della malattia può essere di aiuto una fluorangiografia (si inietta per via endovenosa una sostanza fluorescente e si eseguono delle fotografie della retina in tempi diversi).



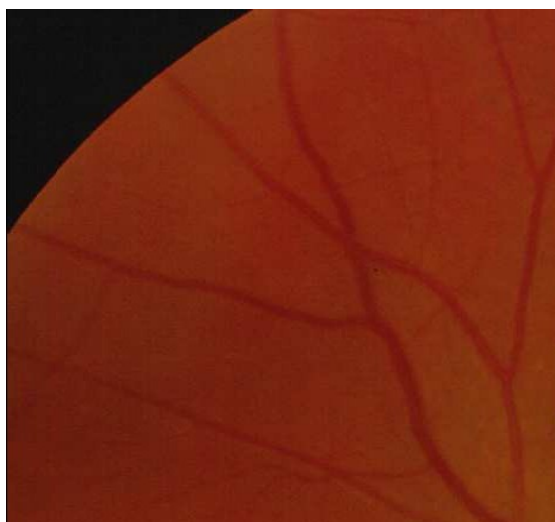
*Un guadagno sostanziale ,in termini di qualità delle immagini retiniche, potrebbe essere ottenuto se tutte le aberrazioni dell'occhio fossero corrette attraverso la pupilla dilatata. Infatti, per una pupilla completamente dilatata di 8mm,



la larghezza della PSF potrebbe essere ridotta di un fattore 2,7 volte maggiore rispetto ad una pupilla in condizioni normali di 3mm.[2]

In presenza di alta pressione sanguigna, i vasi possono aumentare in lunghezza e le pareti diventano più spesse, con conseguente TORTUOSITA' delle arterie. In figura si può vedere il normale corso dei vasi(a) e il caso di tortuosità(b):

a



b



Il primo cambiamento causato dall'ipertensione è l' ASSOTTIGLIAMENTO DELLE ARTERIOLE della retina, ovvero il restringimento di esse proporzionalmente al grado della pressione arteriosa.

L'analisi quantificata di tale restringimento, esame clinico oftalmoscopico, risulta tuttavia impreciso in quanto è necessaria una stima della larghezza dei vasi in condizioni normali.

Le irregolarità del calibro dei vasi si mostrano attraverso un assottigliamento focale della colonna di sangue, il restringimento, dunque, aumenta fin quando i vasi diventano filiformi.

Altre anomalie riguardano le BIFORCAZIONI, i cui meccanismi di cambiamento sono poco note. Il diametro delle arterie a una biforcazione deve essere conforme a un rapporto di potere e con l'aumento dell'ipertensione gli angoli di biforcazione sono ridotti.



Nella figura sopra sono rappresentate variazioni anomale artero-venose, causa di ipertensione e sclerosi, associate al CROSSING. Ciò è dovuto alla compressione della vena da parte dell'arteria, comportando quindi l'oscuramento della colonna di sangue venoso e impedendo il flusso di esso verso periferiche .

I MICROANEURISMI RETINICI, piccole dilatazioni delle pareti capillari, costituiscono la principale lesione causata dalla retinopatia diabetica. Essi appaiono come macchie brillanti iperfluorescenti nella fluoroangiografia retinica e nelle immagini a colori del fondo oculare come macchie rosse.



EMORRAGIE RETINICHE sono depositi di sangue sulla retina e sono dovute alla rottura di una parete del vaso.

4.3 Sistemi di Ottica Adattiva

L'AO è stata recentemente utilizzata per lo sviluppo di dispositivi oftalmici, con l'obiettivo di ottenere immagini ad alta risoluzione per scopi diagnostici o per stimare le aberrazioni di ordine superiore dell'occhio.

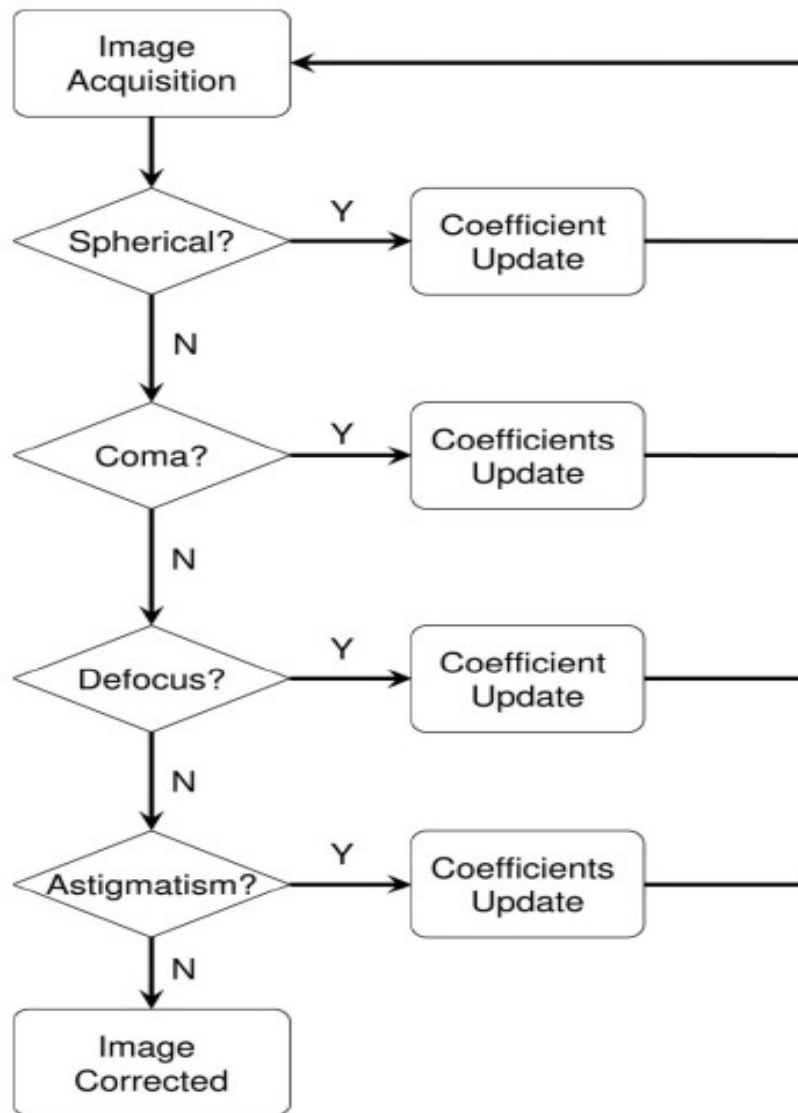
Il nucleo di ogni sistema AO è un dispositivo ottico in grado di modificare la forma d'onda della luce che entra nel sistema. Se si conosce la forma del fronte d'onda in arrivo, è possibile correggere le aberrazioni introdotte nel percorso ottico dalla sorgente all'immagine.

Recentemente, è stato dimostrato che la compensazione delle aberrazioni ottiche introdotte dall'occhio può migliorare notevolmente la qualità delle immagini retiniche.

Un sistema classico consente di correggere le aberrazioni progressivamente, a partire da quella più alta della gerarchia. Dunque, dopo l'acquisizione dell'immagine, viene corretta l'aberrazione sferica in modo da modificare iterativamente il coefficiente di Zernike*, fin quando non è possibile ottenere un ulteriore miglioramento.[18]

A questo punto, l'algoritmo rileva e corregge il coma, defocus e infine l'astigmatismo.

*I POLINOMI DI ZERNIKE SONO UTILIZZATI IN QUANTO CONTRIBUISCONO A SEMPLIFICARE LA TECNOLOGIA DEL FRONTE D'ONDA, COMBINANDO TUTTE LE ABERRAZIONI IN UNA SINGOLA MAPPA.

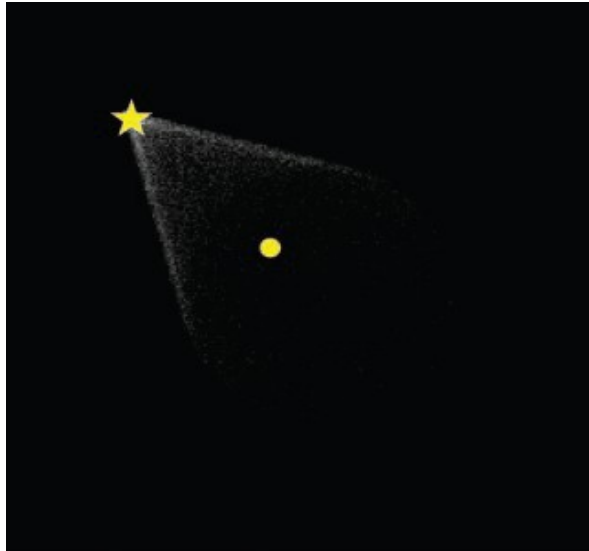


CORREZIONE ABERRAZIONE SFERICA :

Le aberrazioni sferiche causano la diffusione dell'immagine del punto della sonda e la diffusione del potere della luce si ha simmetricamente intorno al centro del punto. Per stimare la quantità di diffusione, si usano due metriche differenti a due stadi : la prima fase cerca di massimizzare la quantità di potere presente nell'immagine modificando il coefficiente di Zernike verso un aumento locale della metrica S_1 descritta da Muller; nella seconda fase, è massimizzato il valore dell'intensità media dei pixel dell'immagine diversi da zero .

CORREZIONE COMA :

L'immagine di una sorgente puntiforme affetta da coma, è caratterizzata dalla presenza di una coda lungo l'asse. La presenza di coma può essere rilevata osservando la distanza tra il baricentro dei pixel non nulli, rappresentato in figura dal cerchio bianco, e il baricentro dei pixel ponderati dai valori di livello di grigio, stella bianca.



CORREZIONE DEFOCUS :

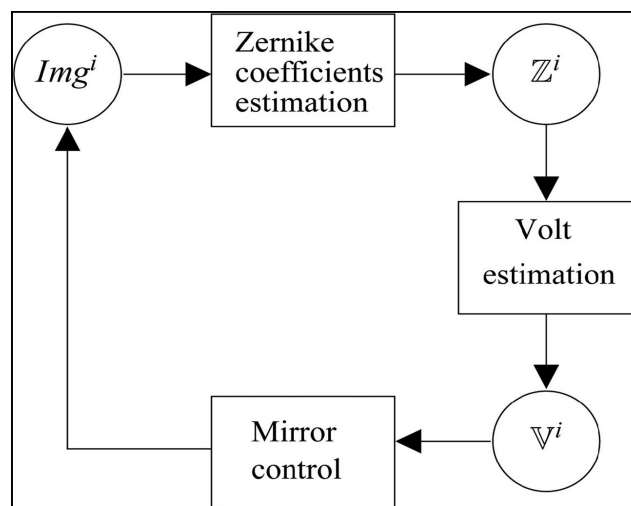
Una volta che le aberrazioni sferiche e di coma sono state corrette, si potrebbe pensare di passare direttamente all'astigmatismo. Se l'immagine acquisita è affetta solo da astigmatismo dovrebbe apparire come una macchia circolare, ma, nel caso in cui il sistema presenta qualche spostamento del fuoco, questa diverrebbe allungata. Al fine di correggere la messa a fuoco, l'algoritmo si propone di ottenere un'immagine più circolare e più piccola possibile. Ciò può essere ottenuto attraverso un'ottimizzazione min-max della matrice di covarianza, ovvero minimizzando il valore massimo: il primo stadio riduce al minimo l'opposto dell'intensità di immagine in un piccolo disco centrato sull'immagine, che corrisponde all'opposto della metrica S_5 ; nella seconda fase, è minimizzato il massimo della matrice di covarianza.

CORREZIONE ASTIGMATISMO :

Una volta corretto il defocus, non può essere ottenuta nessuna informazione riguardo l'astigmatismo sull'asse e quindi neanche una misura dell'influenza del coefficiente di Zernike. Quando l'immagine è perfettamente a fuoco, l'astigmatismo comporta la presenza di un cerchio e lo scopo della correzione sta nel ridurre le dimensioni di quest'ultimo. Per valutare le dimensioni, è usato il massimo autovalore della matrice di covarianza dei pixel più luminosi.

4.3.1 NO WAVEFRONT SENSOR ADAPTIVE OPTICS SYSTEM FOR COMPENSATION OF PRIMARY ABERRATION BY SOFTWARE ANALYSIS OF A POINT SOURCE IMAGE

Questo sistema si basa su di un software a ciclo chiuso[19], che analizza iterativamente una sorgente puntiforme, l'obiettivo, sul piano focale dello strumento e modifica il dispositivo.

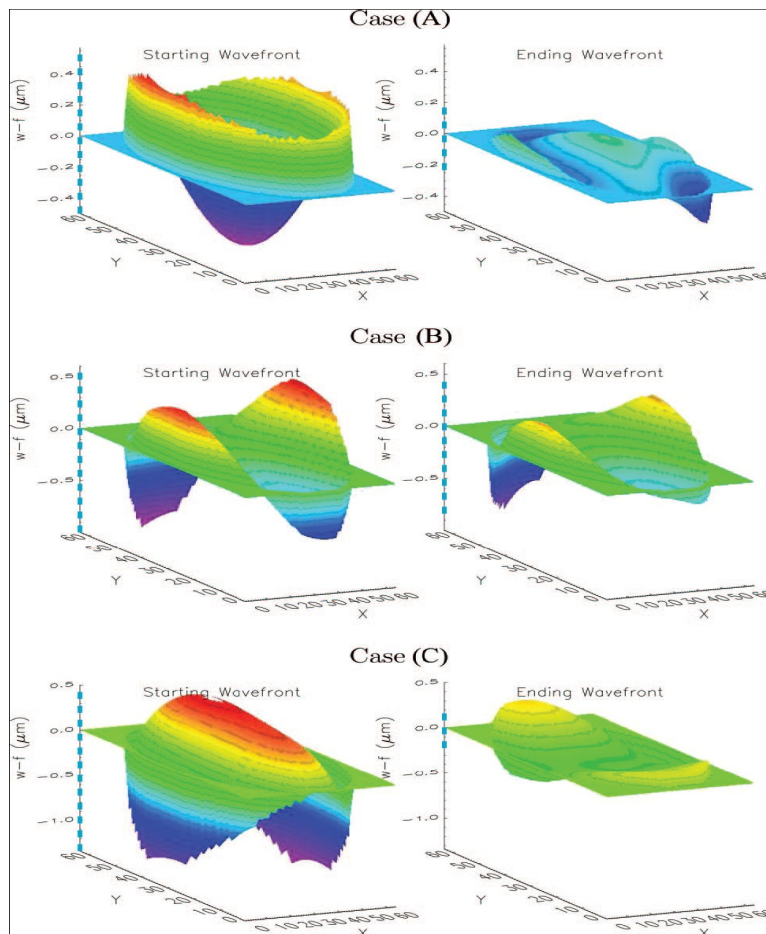


Il principio di funzionamento del sistema consiste nell'analizzare l'immagine di una sorgente puntiforme, che passa attraverso il sistema ottico in prova, e modificare la forma del DM(deformable mirror).

La sorgente non è spesso direttamente disponibile, come per l'analisi della retina dell'occhio attraverso la fundus camera, dove un pinhole illuminato è proiettato sulla retina. La luce diffusa dalla retina può essere analizzata per valutare le aberrazioni presenti lungo il cammino ottico.

La stima dell'aberrazione viene lasciata a un software che analizza la prima immagine *Img* prodotta dalla sorgente puntiforme con il DM, nella condizione di riposo, corrispondente alla forma descritta dai coefficienti di Zernike.

Successivamente, sono cambiati i coefficienti corrispondenti alle aberrazioni trovate e il nuovo vettore Z è indirizzato alla stima della tensione degli elettrodi dello specchio deformabile, che meglio approssima i coefficienti di Zernike. La variazione della deformazione dello specchio da luogo ad una nuova immagine e, in tal modo, la procedura viene iterata.

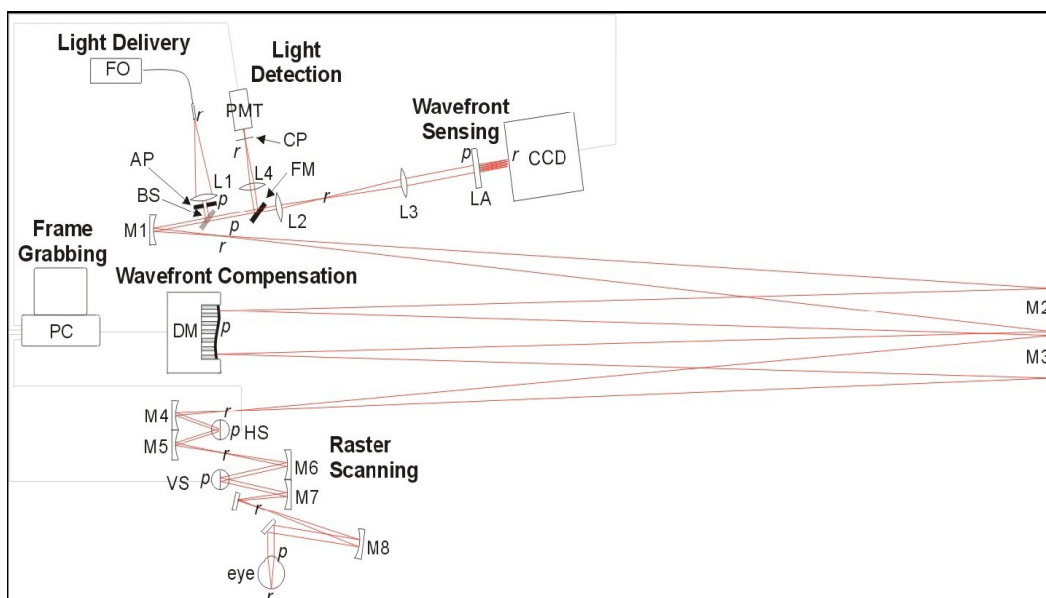


In figura, vengono mostrate le superfici del wavefront prima e dopo la correzione del DM, utilizzando questo setup, nel caso di correzione di defocus(A),

astigmatismo e coma(B), defocus e astigmatismo, presenti in quantità circa analoga(C). In tutti i casi, lo scarto quadratico medio(RMS) dell'aberrazione indotta è pari a $\lambda/2$, in modo tale di rimanere nella gamma delle possibili correzioni del DM.

Il sistema è limitato dalla progettazione del DM, la cui membrana non consente la correzione di alcune aberrazioni, ma presenta il vantaggio di poter essere applicato in tutti i campi in cui non è necessario un adattamento ottico in tempo reale.

Il primo oftalmoscopico a scansione laser che utilizza l'ottica adattiva(AOSLO) per correggere le aberrazioni di ordine superiore, dell'occhio umano, è stato presentato nel 2002 dalla School of Optometry(Canada)[22].



Lo schema di AOSLO è presentato in figura e comprende principalmente sei elementi principali, quali trasferimento di luce, rilevamento del fronte d'onda, compensazione del fronte, raster di scansione, rilevamento della luce e struttura di acquisizione.

La luce proviene da un laser a diodi ed è abbinata ad una fibra ottica monomodale. La pupilla in entrata è trasmessa dai telescopi a specchio allo specchio deformabile (DM), allo scanner orizzontale(HS), a quello verticale(VS) e infine

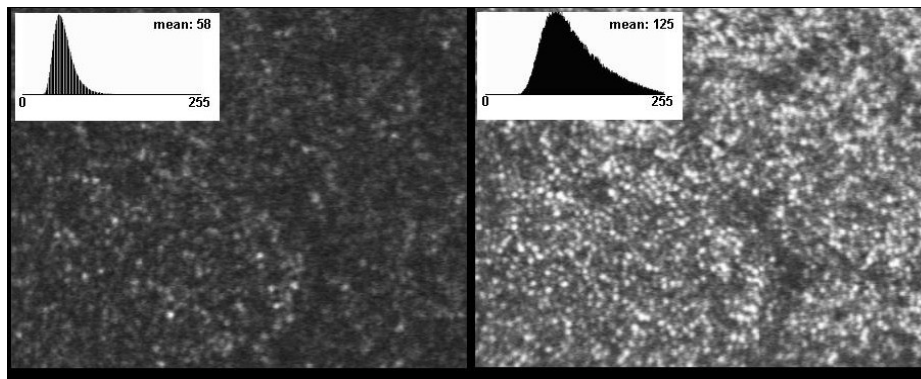
all'occhio. L'aberrazione d'onda è misurata con la stessa luce utilizzata per formare l'immagine, poiché essa è scansionata sul percorso di ritorno. Ciò permette al sensore del fronte d'onda Shack-Hartmann di vedere la luce come proveniente da un percorso unico e, quindi, di misurarla.

Uno specchio deformabile, a 37 canali, è posto sul percorso coniugato all'entrata della pupilla dell'occhio. In tal modo, posizionando lo specchio DM nella parte stazionaria del cammino ottico, la dimensione richiesta per gli specchi(per inoltrare la luce) è ridotta al minimo. Ciò permette angoli di riflessione piccoli e, dunque, la riduzione delle aberrazioni intrinseche del sistema.

Il fascio viene analizzato sulla retina attraverso uno scanner, che esegue la scansione di risonanza di esso in posizione orizzontale e in un andamento sinusoidale. Inoltre, lo scanner di risonanza è accoppiato a uno scanner galvanometrico, che opera in uno schema a dente di sega.

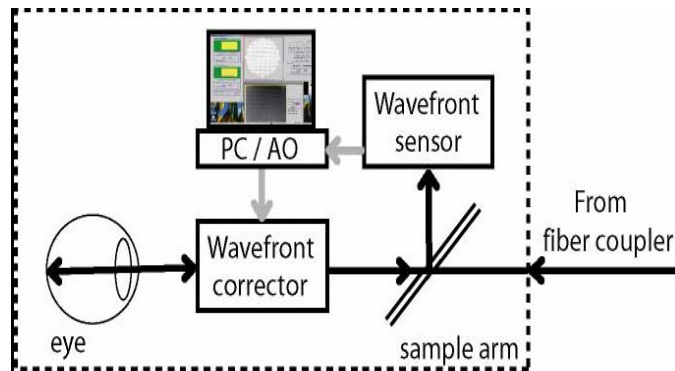
La luce è scansionata dalla retina, focalizzata su un pinhole con focale e ,successivamente, rilevata con un GaAs fotomoltiplicatore. Infine, la corrente viene convertita in tensione e il segnale amplificato viene mandato all'ingresso analogico del frame grabbing board.

Nella figura sotto, è mostrata la stessa aerea della retina con e senza correzione attraverso AO.



Si è visto come l'ottica adattiva aumenta sia la risoluzione laterale che assiale, permettendo il sezionamento assiale del tessuto retinico in vivo.

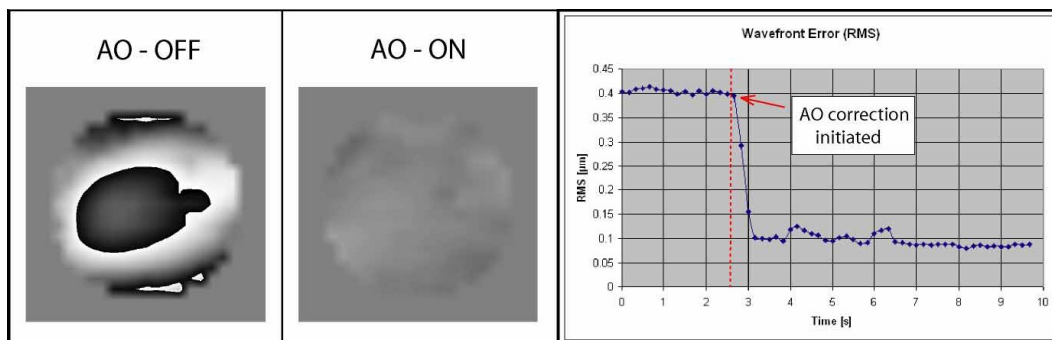
Lo strumento è stato utilizzato per visualizzare i fotorecettori, le fibre nervose e il flusso di globuli bianchi nei capillari della retina.



Come si vede in figura, il sistema di ottica adattiva è posizionato sul canale campione dello strumento AO-OCT, ovvero tra le fibre e gli occhi del soggetto in questione. Ciò comporta una correzione del fascio di imaging prima che entri nell'occhio e sul percorso di uscita dall'occhio al rivelatore.

Il PC/AO-control legge i dati dal sensore di S-H(matrice di lenslet e camera CCD sul piano focale) per la correzione del fronte d'onda.

Lo specchio bimorfo deformabile DM a 35 elementi, usato come correttore di fronte d'onda, è costituito da due strati di ceramica PMN(niobato magnesio di piombo) azionati da elettrodi incollati sul materiale.



Nella figura sopra è rappresentato il fronte d'onda, misurato da S-H, prima e dopo la correzione tramite ottica adattiva e il PSF(point spread function) ricostruito.

L'alta velocità di acquisizione del FD-OCT permette per la prima volta la raccolta di dati 3D e la valutazione delle immagini C-scan, importanti per il confronto con altri strumenti di imaging.

Test iniziali dimostrano un'eccellente correzione delle aberrazioni di ordine inferiore utilizzando lo specchio bimorfo, ma per le aberrazioni di ordine superiore sono necessari altri DM. Un vantaggio importante riguarda l'implementazione della correzione del movimento assiale degli occhi, così permettendo la visualizzazione di strati sottili retinici e delle giunzioni tra i livelli. Questo sistema risulta tuttavia lento rispetto al C-scan basato sulle tecniche di imaging(SLO) e presenta sempre l'errore macchiolina, sovrapposta all'immagine.

CONCLUSIONI

Dall'esperienza condotta, si evince che, ai fini del image sharpening, risulta più efficiente l'uso di uno specchio deformabile segmentato, le cui prestazioni sono ottimizzate mediante un algoritmo ACO.

In aggiunta, questo sistema risulta valido sia per immagini che per punti luminosi.

Le ottiche adattive sono, insieme allo speckle imaging, una delle tecniche moderne utilizzate dai telescopi terrestri per contrastare l'effetto dell'atmosfera, che degrada le immagini, distorcendo il fronte d'onda proveniente dalla sorgente.

Proprio la conoscenza della forma effettiva del fronte d'onda, che permette di recuperare la forma originaria mediante un sistema di specchi a deformazione controllabile, è il concetto che sta alla base dell'ottica adattiva.

L'ottica adattiva sta prendendo sempre più piede in svariati campi, dalle macchine industriali agli apparati medicali.

In questo momento la tecnologia dell'ottica adattiva è in fase avanzata di sviluppo di maturazione e di standardizzazione commerciale, con un ampio margine di miglioramento, soprattutto per quanto riguarda l'adattabilità agli strumenti medicali, anche dal punto di vista economico. L'aumentata qualità di risoluzione della nuova generazione di OCT(Optical Coherence Tomography) consentirà, in un futuro di varcare il limite dell'EPR ed arrivare alla coroide.

La diagnosi precoce ed il trattamento dei disturbi retinici sono stati, fino a pochi anni fa, in gran parte ostacolati dall'impossibilità di visualizzare le strutture microscopiche nell'occhio umano vivente. In molti casi la patologia retinica è rilevata spesso solo dopo la comparsa di danni ormai irreversibili.

La possibilità di superare con migliore risoluzione l'EPR, utilizzando le ottiche adattive, permetterà in modo più dettagliato lo studio della coroide, con la possibilità di avere risposte più precise sulle membrane neovascolari informazione, oltre che sulle alterazioni vascolari retiniche per patologie sistemiche.

L'avvento dell'ottica adattiva permetterà altre straordinarie possibilità di imaging e d'indagine tomografica nel panorama strumentale oftalmologico.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Larry P.Murray,B.Sc,M.Sc., ”*Smart optics: Wavefront sensor-less adaptive optics - Image correction through sharpness maximisation*”, National University of Ireland, Galway(2006)
- [2] Robert K.Tyson, “*Adaptive optics engineering handbook*”, 10, University of Rochester(New York), Marcel Dekker, Inc.(2000)
- [3] Giulio Maliverno, “*Un sistema di controllo decentralizzato per specchi secondari adattivi di grandi telescopi*”, (2005)
- [4]S.Bonora, “*Distributed actuator deformable mirror*“, arXiv:1004.2566v1 [physics.optics] , (2010)
- [5] Gleb Vdovin and P.M.Sarro, ” *Flexible mirror micromachined in silicon*”, APPLIED OPTICS(1995)
- [6] Delphine Débarre, Martin J.Booth and Tony Wilson, ” *Image based adaptive optics through optimisation of low spatial frequencies*”, Optical Society of America(2007)
- [7] A.Buffington, F.S. Crawford, R.A. Muller, A. J. Schwemin, and R. G. Smits, “*Correction of atmospheric distortion with an image-sharpening telescope*”, California(1976)

- [8] Marco Dorigo and Christian Blum, ”*Ant colony optimization theory:A survey*”, Elsevier(2005)
- [9] Marco Dorigo and Krzysztof Socha, “*An Introduction to Ant Colony Optimization*”, IRIDIA(2006)
- [10] Marco Dorigo and Luca Maria Gambardella, “*Ant Colony System:A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*”, IRIDIA,Belgium.(1996-5)
- [11] Marco Dorigo, Mauro Birattari and Thomas Stützle, “*Ant Colony Optimization: Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique*”, IRIDIA(2006)
- [12] E. Bonabeau, M. Dorigo and G. Theraulaz, “*Inspiration for optimization from social insect behaviour*”, Macmillan Magazines Ltd(2000)
- [13]S. Goss, S. Aron, J. Deneubourg, and J. Pasteels. “*Self-organized shortcuts in the Argentine ant. Natur-wissenschaften*”, 76:579-581,(1989).
- [14] Beatrice Lazzerini, “*Introduzione agli Algoritmi Genetici*”, Ingegneria dell'Informazione, Pisa.
- [15] <http://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_genetico >,(22/01/2011)

- [16] I. De Falco, E. Tarantino, A. Della Cioppa, “*I meccanismi di mutazione negli Algoritmi Genetici: verso una migliore imitazione della natura*”
- [17] S. Wang and F. Huang, “*GA-Based Neural Network to Identification of Nonlinear Structural Systems*”, ISNN(2007)
- [18] E. Poletti, “*PROGETTAZIONE, REALIZZAZIONE E VALUTAZIONE CLINICA DI UNO STRUMENTO AD OTTICA ADATTIVA PER L'ANALISI AUTOMATICA DELLA RETINA*”, CICLO XXII (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, indirizzo Bioingegneria)
- [19] G. Naletto, F. Frassetto, N. Codogno, E. Grisan, S. Bonora, V. Da Deppo and A. Ruggeri, “*No wavefront sensor adaptive optics system for compensation of primary aberrations by software analysis of a point source image. 2. Test*”, Optical Society of America(2007)
- [20] Yoshiyuki Kitaguchi et al. “*Adaptive Optics Fundus Camera to Examine Localized Changes in the Photoreceptor Layer of the Fovea*”, the American Academy of Ophthalmology(2008)
- [21] Per Knutsson et al., “*Dual-conjugate adaptive optics for wide-field high-resolution retinal imaging*”, Optical Society of America(2009)
- [22] Austin Roorda et al., “*Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy*”, Optical Society of America(2002)
- [23] Robert J. Zawadzki, “*Adaptive-optics optical coherence tomography*”

for high-resolution and high-speed 3D retinal in vivo imaging”,
Optical Society of America(2005)