



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea Triennale in

Ottica e Optometria

Le lenti a focale variabile

Relatore

Prof. Michele Merano

Laureando

Stefano Giansin

Anno Accademico 2015 / 2016

INDICE

Riassunto

Capitolo 1: Evoluzione in natura ed evoluzione tecnologica.

Introduzione

1.1 L'evoluzione dell'apparato visivo

1.2 L'accomodazione

1.3 L'occhio umano: anatomia, accomodazione e formazione dell'immagine retinica.

1.4 L'evoluzione delle tecnologie

1.4.1 L'evoluzione degli schermi

1.4.2 L'evoluzione delle lenti

Capitolo 2: La Fisica delle lenti a focale variabile.

Introduzione

2.1 Lenti liquide

2.2 Fenomeni alla base

2.2.1 Tensione superficiale

2.2.2 Angolo di contatto

2.2.3 Superficie idrofila

2.2.4 Superficie idrofoba

2.3 Tecnologie utilizzate

2.3.1 L'elettrowetting

2.3.2 La pressione

Capitolo 3: Le lenti a focale variabile sul mercato.

Introduzione

3.1 Caratteristiche tecniche delle lenti liquide

3.1.1 L'apertura

3.1.2 L'indice di rifrazione

- 3.1.3 Temperatura di utilizzo
- 3.1.4 Corrente di controllo
- 3.1.5 Energia consumata
- 3.1.6 Tempi di risposta
- 3.1.7 Focale
- 3.1.8 Trasmissione

Capitolo 4: Applicazioni industriali e mediche.

Introduzione

4.1 Applicazioni industriali in commercio

- 4.1.1 Fotocamere
- 4.1.2 Il mercato dei lettori di codici a barre
- 4.1.3 Webcam
- 4.1.4 Sistemi di riconoscimento e di allarme
- 4.1.5 Illuminazione di ambienti
- 4.1.6 Lavorazioni con laser

4.2 Applicazioni mediche

- 4.2.1 Endoscopie e applicazioni dentali
- 4.2.2 Oftalmologia

4.3 Applicazioni in microscopia

4.4 Vantaggi delle lenti liquide

- 4.4.1 Sistema di auto focus e di stabilizzazione immagini
- 4.4.2 Poca usura
- 4.4.3 Velocità
- 4.4.4 Messa a fuoco
- 4.4.5 Basso consumo di energia

Conclusioni

Bibliografia

Riassunto

Questa tesi illustra una nuova tecnologia di lenti che negli ultimi anni sta prendendo piede in svariate applicazioni: le lenti a focale variabile.

Inizieremo raccontando come si è evoluto il sistema visivo andando ad analizzare le varie tappe fino ad arrivare a descrivere l'occhio umano. Fatto questo andremo a raccontare l'evoluzione delle tecnologie degli schermi (utilizzati per salvare un'immagine) e delle lenti (per la focalizzazione dei raggi luminosi). Faremo una sorta di confronto e potremmo notare che l'evoluzione tecnologica si avvicina sempre più ai risultati dell'evoluzione naturale. Nascono così, grazie ai nuovi processi industriali, le lenti a focale variabile. Vedremo i principi di funzionamento e i dati tecnici di queste lenti in grado di variare la lunghezza focale all'interno di un intervallo senza traslazioni meccaniche; un po' come fa il cristallino nell'occhio umano. Andremo poi a fare un'analisi per vedere cosa ci offre il mercato in questo momento e dove è possibile, o lo sarà in futuro, applicare questa tipologia di lenti.

Capitolo 1: Evoluzione in natura ed evoluzione tecnologica.

Introduzione:

In questo capitolo racconteremo prima il processo di evoluzione del sistema visivo negli animali, a partire dagli occhi più semplici fino ad arrivare al sistema visivo dell'uomo, soffermandoci principalmente su due aspetti: la capacità di accomodare e la formazione delle immagini in retina; poi tratteremo l'evoluzione della tecnologia parlando degli schermi sulla quale resta impressa un immagine e delle lenti per focalizzare i raggi luminosi.

Noteremo che la tecnologia e la visione in natura, grazie agli ultimi studi, hanno caratteristiche sempre più simili.

1.1 L'evoluzione dell'apparato visivo

L'occhio è l'organo di senso che presenta una sensibilità specifica per le radiazioni elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda rimane compresa nel cosiddetto spettro della luce visibile.

Eccetto che nelle sue forme più grezze, consente agli animali di localizzare la distanza e la direzione degli oggetti e di apprezzarne forma e movimento.

Il problema dell'evoluzione dell'occhio nella scala animale riveste un grande interesse se non altro perché l'organo della vista è quello che offre la più incontestabile apparenza alla finalità: l'occhio è strutturato per vedere e la relazione della visione è attuata attraverso complessi e ingegnosi dispositivi.

Descriviamo questa evoluzione nelle sue linee generali soffermandoci sugli esempi più importanti (1).

L'occhio è sempre andato incontro a miglioramenti soprattutto sotto due aspetti essenziali: da una parte, l'accomodazione, che, per dislocazione e deformazione del cristallino, consente la messa a fuoco sulla retina di un immagine nitida qualunque sia la distanza alla quale si trova l'oggetto; dall'altra, l'ulteriore complessità strutturale della retina, sorta di piccolo encefalo periferico che assomma molteplici funzioni.

Negli stadi più precoci della scala evolutiva dell'apparato visivo, le cellule recettrici della luce sono distribuite ovunque. Nei Lombrichi se ne trovano migliaia in numero considerevole soprattutto in corrispondenza delle estremità del corpo. Nel corso del processo evolutivo si ha un raggruppamento di queste cellule in ocelli: ciascun ocello contiene un numero variabile di cellule sensibili, sovente pigmentate, cioè contenenti numerosi granuli scuri.

L'ocello piatto non fornisce che un'informazione grossolana sulla direzione da cui proviene la luce; quando l'ocello risulta scavato a formare una fossetta, come in alcuni Molluschi, la direzione da cui provengono i raggi luminosi viene determinata con maggiore precisione grazie all'azione asimmetrica dei raggi che arrivano ai recettori senza seguire l'asse della fossetta.

La trasformazione dell'ocello concavo in una cavità praticamente chiusa costituisce il primo tipo di occhio che si riscontra nel Nautilus, cefalopode che rimane l'unico rappresentante di un gruppo estremamente diffuso negli oceani circa 450 milioni di anni fa. La luce penetra nella cavità attraverso un piccolo foro, la pupilla, e non esiste alcun elemento ottico. Questo apparato funziona come una classica camera oscura.

L'occhio della chiocciola di mare Littorina Littorea è costituito da una vescicola chiusa; l'acqua non penetra, quindi, all'interno come nel Nautilo. Questo organo evoca già, per numerose caratteristiche di cui è dotato, l'occhio dei Vertebrati: è provvisto infatti di due tonache esterne trasparenti (cornea e congiuntiva), di un cristallino e un corpo vitreo che tiene separato il cristallino dalla retina.

Per quanto riguarda i molluschi particolarmente attivi, esempio la Piovra, non essendo protetti da una conchiglia, sono costretti sia per sfuggire ai loro nemici che per assalire le loro prede, a eseguire dei movimenti rapidi supportati da una buona vista. L'occhio della Piovra è sorprendentemente simile a quello dei mammiferi. La pupilla, di forma rettangolare, è molto mobile e, esposta a luce intensa, si riduce a una sottile fessura orizzontale. La cornea che viene bagnata dall'acqua di mare, non ha potere di rifrazione e il cristallino, nettamente più rifrangente, è la struttura più importante per la proiezione dell'immagine sulla retina.

L'occhio perfezionato dalla Piovra va incontro, nei vertebrati, a un ulteriore miglioramento sotto due aspetti essenziali: da una parte l'accomodazione e dall'altra l'ulteriore complessità strutturale della retina.

Andiamo ora a vedere come si svolge e come si è evoluto il processo di accomodazione.

1.2 L'accomodazione

Nei Pesci, il potere diottrico della cornea risulta annullato dal mezzo liquido e solo il cristallino contribuisce alla formazione dell'immagine retinica. Così, quest'ultimo è sferico ed è dotato di un indice di rifrazione elevato che cresce procedendo dall'anello periferico verso il nucleo centrale.

Nei Pesci Teleostei, la posizione di riposo delle strutture oculari corrisponde alla visione ravvicinata e l'accomodazione per vedere lontano si realizza grazie all'intervento di un muscolo retrattore che avvicina il cristallino in blocco alla retina.

Negli Anfibi, il cristallino ha una forma sferica nelle forme larvali acquatiche, mentre si appiattisce negli adulti e l'accomodazione si realizza anche in questo caso per uno spostamento in blocco del cristallino, questa volta verso l'avanti, sotto la spinta di un muscolo protrusore, per vedere da vicino.

In alcuni serpenti, si ritrova ancora questo movimento del cristallino in direzione anteriore, probabilmente sotto l'effetto di un aumento di pressione all'interno del corpo vitreo. Ma, nella maggior parte di Rettili, negli Uccelli e nei Mammiferi, è la forma lenticolare del cristallino che modifica il potere di accomodazione senza che si verifichi alcuno spostamento evidente dello stesso. Il meccanismo con cui si verifica la modificazione di forma del cristallino ha dato luogo a controversie per più di un secolo: secondo H. Von Helmholtz, la visione da vicino si verifica grazie a un rilassamento della zonula, membrana che connette il cristallino al muscolo ciliare, e la superficie anteriore assumerebbe un aspetto più bombato per un ritorno elastico alla forma naturale; secondo M. Tschernig, al contrario, la zonula si tenderebbe nella visione da vicino e modellerebbe le parti molli del cristallino sul nucleo centrale più duro e bombato.

Le successive ricerche hanno dato ragione a H. Von Helmholtz ed E. F. Fincham ha dimostrato che hanno un'importanza cardinale le variazioni di spessore della capsula elastica cui il cristallino sarebbe vincolato.

Oltre alle modificazioni della curvatura, durante l'accomodazione si determina uno scivolamento reciproco degli strati del cristallino la cui struttura a cipolla favorisce questo cambiamento che determina, come dimostrato da A. Gullstrand, un aumento dell'indice di rifrazione totale.

1.3 L'occhio umano: anatomia, accomodazione e formazione dell'immagine retinica.

Uno dei sistemi visivi più evoluti sia sotto l'aspetto dell'accomodazione che quello dell'acquisizione dell'immagine è sicuramente quello dell'uomo.

L'occhio umano è costituito dal bulbo oculare, una struttura sferoidale elastica, piena di liquido, le cui pareti sono formate da tre membrane sovrapposte e concentriche: una membrana esterna, comprendente la sclera e la cornea, una membrana intermedia, comprendente la coroide, il corpo ciliare e l'iride e una membrana interna, la retina (2).

La maggior parte del bulbo oculare è racchiuso da una membrana esterna robusta, la sclera, che forma la parte bianca visibile dell'occhio. Anteriormente la membrana esterna è rivestita dalla cornea, trasparente, che è attraversata dai raggi luminosi diretti all'interno dell'occhio; la cornea è fondamentale per far convergere i raggi in retina essendo la parte con potere diottrico maggiore del sistema visivo.

La membrana interna, sotto la sclera, è la coroide, altamente pigmentata contiene molti vasi sanguigni che nutrono la retina. La coroide si specializza anteriormente per formare il corpo ciliare e l'iride, che verranno descritti più avanti.

La membrana più interna, sotto la coroide, è la retina, costituita da uno strato pigmentato esterno, e uno strato interno di tessuto nervoso. Quest'ultimo contiene i bastoncelli e i coni, i fotorecettori che convertono l'energia luminosa in impulsi nervosi. Come le pareti nere in uno studio fotografico, il pigmento nella coroide e nella retina assorbe la luce dopo che essa è caduta sulla retina per impedire la sua riflessione o diffusione all'interno dell'occhio.

L'interno dell'occhio è costituito da due cavità piene di liquido, separate dal cristallino, che sono trasparenti per permettere alla luce di attraversare l'occhio dalla cornea alla retina. La cavità posteriore, più grande, posta tra il cristallino e la retina, è occupata dal corpo vitreo, costituito da un'impalcatura di fibre e da un gel viscoso, l'umore vitreo. L'umore vitreo è importante per il mantenimento della forma sferica del bulbo oculare.

La cavità anteriore, interposta tra la cornea e il cristallino, contiene un liquido acquoso trasparente, l'umore acqueo. L'umore acqueo trasporta nutrienti per la cornea e il cristallino, che sono entrambi privi di irrorazione sanguigna. La presenza di vasi sanguigni all'interno di queste strutture ostacolerebbe la trasmissione della luce diretta ai fotorecettori.

Non tutta la luce che attraversa la cornea raggiunge i recettori fotosensibili, per la presenza dell'iride, un muscolo liscio pigmentato sottile che forma una struttura anulare visibile entro l'umore acqueo. Il pigmento presente nell'iride è responsabile del colore dell'occhio. L'apertura circolare al centro dell'iride, attraverso il quale la luce entra nella porzione interna dell'occhio, è detta pupilla. Il diametro di questa apertura può essere regolato dalla contrazione variabile dei muscoli dell'iride per far entrare, secondo le necessità, più o meno luce.

Andiamo a vedere nello specifico come l'occhio umano ha evoluto il suo sistema di accomodazione prima e di formazione dell'immagine poi.

La capacità di regolare il potere diottrico del cristallino è detta accomodazione. Il potere diottrico del cristallino dipende dalla sua curvatura che, a sua volta, è regolata dal muscolo ciliare. Il muscolo ciliare è una parte del corpo ciliare, una specializzazione anteriore della coroide. Il corpo ciliare ha due componenti principali: il muscolo ciliare e la rete capillare che produce l'umore acqueo. Il muscolo ciliare è un anello circolare di muscolo liscio inserito sul cristallino dai legamenti sospensori. Quando il muscolo ciliare è rilassato i legamenti sono tesi e fanno assumere al cristallino una forma appiattita, debolmente rifrangente. Quando il muscolo si contrae, la sua circonferenza diminuisce, allentando la tensione nei legamenti sospensori. Quando i legamenti applicano al cristallino meno tensione, esso assume una forma più sferica, grazie alla sua elasticità intrinseca, e quindi una maggiore curvatura.

Per quanto riguarda la formazione delle immagini dobbiamo approfondire la parte posteriore dell'occhio ovvero la retina.

La principale funzione della cornea e del cristallino, è quella di fare convergere i raggi luminosi provenienti dall'ambiente sui bastoncelli e sui coni, i fotorecettori retinici. I fotorecettori convertono l'energia luminosa in segnali elettrici per la trasmissione al sistema nervoso centrale (SNC). La porzione di retina che contiene i fotorecettori è in realtà un'estensione del SNC e non un organo periferico distinto. La porzione nervosa della retina è costituita da tre strati di cellule eccitabili: lo strato più esterno contiene i coni e i bastoncelli, le cui estremità fotosensibili sono dirette verso la coroide; uno strato intermedio di cellule bipolari; uno strato interno di cellule gangliari. Gli assoni delle cellule gangliari si uniscono formando il nervo ottico, che emerge dalla retina da un'area lievemente decentrata. L'area retinica da cui emerge il nervo ottico e attraverso cui passano i vasi sanguigni è detta disco ottico o papilla; poiché il disco ottico è privo di bastoncelli e

di coni, questa area retinica non è in grado di formare immagini, la sua porzione nel campo visivo è detta macchia cieca.

Il nervo ottico trasmette poi il segnale ad organi più interni che elaborano il segnale fino ad avere l'immagine visiva finale.

Ci siamo soffermati principalmente su come l'occhio umano converte grazie alla retina l'energia del fronte d'onda luminoso in segnali nervosi da trasmettere al cervello, e su come i raggi vengono focalizzati sulla retina. Vediamo ora quali tecnologie ci permettono di svolgere queste due funzioni prima analizzando l'evoluzione degli schermi e poi delle lenti.

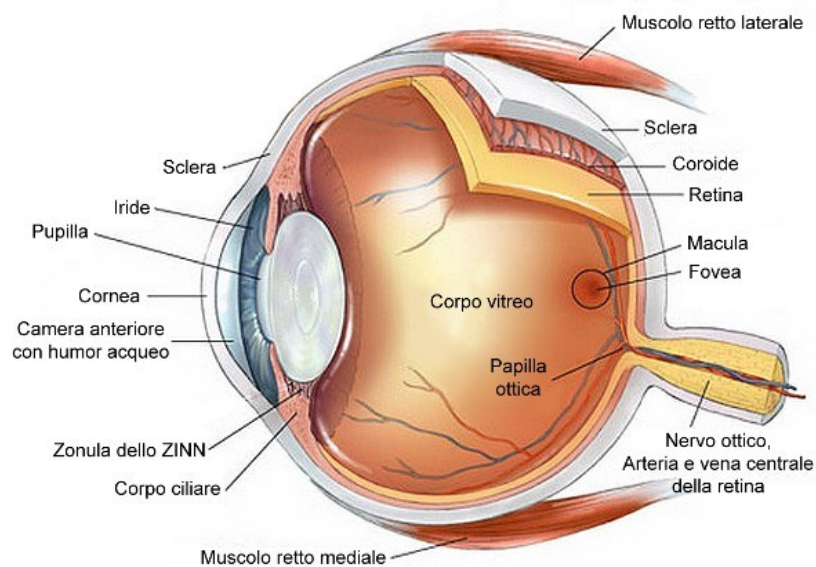


Figura 1.1 : Anatomia schematizzata di un occhio umano.

1.4 L'evoluzione delle tecnologie

Come i sistemi visivi con il tempo si sono evoluti, anche la tecnologia ha fatto dei grandi passi migliorando sempre di più la qualità delle immagini.

Noteremo in seguito che la tecnologia ha avuto una serie di cambiamenti molto simili a quelli del sistema visivo cercando di arrivare a produrre schermi che si avvicinano al funzionamento della retina dell'occhio umano e lenti sempre più simili al cristallino.

1.4.1 L'evoluzione degli schermi

1.4.1.1 Tavole con Sali d'argento

Il primo risultato di acquisizione di un'immagine, si fa risalire al francese Joseph Niepce. Egli infatti riuscì a registrare su tavole sensibilizzate con sali d'argento le immagini che si formavano in una camera oscura: ne otteneva una sola copia e direttamente in positivo; il processo però richiedeva lunghi tempi di esposizione e le immagini non erano durevoli.

Solo più tardi la società che Niepce fondò con il pittore e scenografo Louis Daguerre raggiunse risultati soddisfacenti con una lastra di metallo spalmata con uno strato di ioni d'argento.

Nel 1837, morto Niepce, Daguerre riuscì ad ottenere un'immagine (sempre in positivo) ancora più precisa, che da lui ha derivato il nome di dagherrotipo.



(a)



(b)

Figura 1.2 (a) : sistema per l'acquisizione di immagini chiamato dagherrotipo con sali d'argento.

Figura 1.2 (b) : fotografia fatta con questo dispositivo.

1.4.1.2 La pellicola

Nel 1839 l'inglese John Fox Talbot inventò il primo sistema in grado di ottenere copie positive da un'immagine negativa.

La pellicola fotografica è un materiale chimicamente reattivo che registra un'immagine quando la pellicola stessa viene esposta alla luce. Quando la luce colpisce la pellicola

l'immagine luminosa viene registrata nella pellicola ma non è direttamente visibile. E' infatti necessario svilupparla tramite processi chimici che permettono di fissare l'immagine e renderla visibile all'occhio umano. L'immagine visibile ottenuta è negativa: i colori brillanti dell'oggetto fotografato appaiono più scuri sul negativo in quanto il film, in quella zona, ha ricevuto la massima esposizione alla luce. L'immagine negativa viene quindi tramutata in positivo impiegando un altro tipo di trattamento chimico che finisce con la stampa dell'immagine su carta sensibile.

Una pellicola fotografica è composta dall'emulsione e dalla base. I materiali utilizzati per realizzare l'emulsione sono argento, acido nitrico, e gelatina, la base è costituita da cellulosa e solventi che si mescolano a formare un liquido denso chiamato droga.



Figura 1.3 : immagine di una normale pellicola.

1.4.1.3 Filtri Polaroid

La Polaroid Corporation ha brevettato e prodotto uno speciale foglio di plastica utilizzato per polarizzare la luce. Il brevetto venne registrato nel 1929 e sviluppato successivamente nel 1932 da Edwin H. Land, consiste in una serie di microscopici cristalli di iodochinina solfato o herapatite immersi in un film polimerico trasparente di nitrocellulosa. Durante il processo di fabbricazione i cristalli aghiformi sono allineati mediante l'applicazione di un campo magnetico. Tale foglio tende ad assorbire la luce polarizzata parallelamente alla direzione dell'allineamento dei cristalli, lasciando passare la luce perpendicolare ad essi.

Polaroid è una marca utilizzata per identificare una serie di prodotti della Polaroid Corporation, famosa soprattutto per la macchina fotografica istantanea con pellicole auto sviluppani.

1.4.1.4 Le CCD

Nel 1969 Willard S. Boyle e George E. Smith hanno per primi inventato una tecnologia per la registrazione delle immagini utilizzando sensori elettronici (digitali), i cosiddetti Charge Coupled Device (CCD) (3).

Il funzionamento dei sensori CCD si basa sull'effetto fotoelettrico, per cui Einstein ha ricevuto il premio Nobel nel 1921. Attraverso questo effetto la luce è trasformata in un segnale elettrico.

Si tratta di segnali molto deboli che devono essere prima amplificati e poi inviati a un convertitore che trasforma i segnali in bits. Questi bits vengono poi passati a un computer interno per l'elaborazione.

L'immagine digitale rimane immagazzinata nel dispositivo CCD fino a quando non viene trasferita a un supporto magnetico o di altro tipo.

Successivamente la memoria del dispositivo CCD viene cancellata in modo che il dispositivo sia in grado di produrre una nuova immagine. Le immagini salvate possono essere processate e visualizzate sul monitor di un computer o stampate.

Le CCD sono vere e proprie retine digitali, proprio come la retina sono in grado di convertire il fronte d'onda luminoso in impulsi elettrici. Come il nostro nervo ottico trasporta il segnale elettrico al cervello così un cavo trasporta il segnale della CCD al computer. Per questa scoperta Boyle e Smith hanno ricevuto il Premio Nobel per la fisica nel 2009.

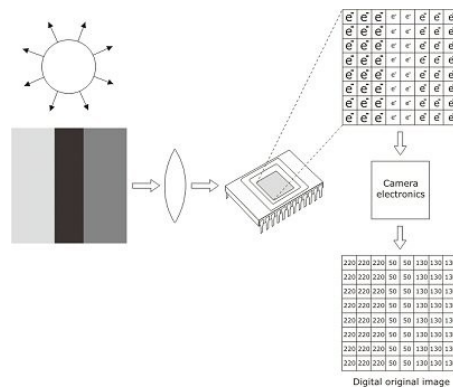


Figura 1.4 : schema di funzionamento di una CCD.

1.4.2 L'evoluzione delle lenti

1.4.2.1 Le lenti sferiche

Anche le lenti utilizzate sia per la correzione di difetti visivi che per la fabbricazione di apparecchi ottici hanno avuto un'evoluzione sia per quanto riguarda i materiali che le geometrie (4).

Le lenti sono prodotte in forma sferica, con il centro ottico corrispondente al centro geometrico, cioè entrambi centrali.

A seconda della loro curvatura vengono classificate in biconvesse, piano-convessa, menisco, piano-concava, biconcava, queste lenti hanno le superfici sferiche, come si può notare dalla figura 1.5.

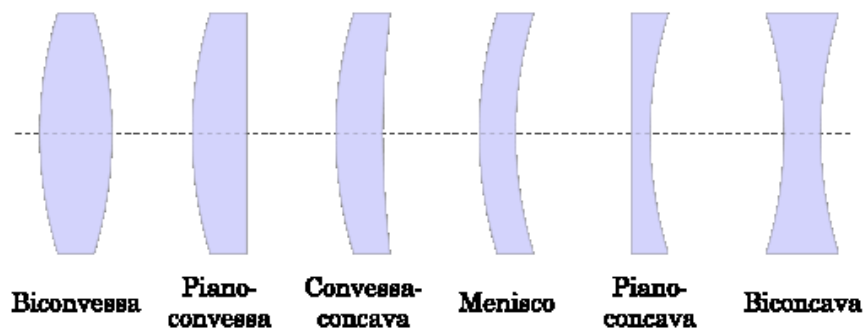


Figura 1.5 : classificazione delle lenti.

1.4.2.2 Le lenti astigmatiche

Nascono poi le lenti astigmatiche, le lenti astigmatiche formano due linee focali anziché un singolo punto. L'intervallo tra i due fuochi dà l'astigmatismo della lente. Tali lenti presentano due poteri uno massimo e uno minimo e anche la curvatura varia tra un massimo e un minimo. Queste lenti vengono usate per esempio per correggere difetti legati alla forma non regolare dei meridiani principali della cornea (5).

1.4.2.3 Le lenti asferiche

Un'altra lavorazione che viene fatta alle lenti è quella di dare un profilo asferico alla superficie. Questa lavorazione rende meno curva la porzione periferica delle lenti causando una caduta di potere verso il bordo. Così facendo viene diminuita l'aberrazione sferica.

L'aberrazione sferica è un difetto assosimmetrico per cui la focale varia con l'apertura.

Dalla figura 1.6 qui sotto, possiamo notare che i raggi periferici vengono deviati maggiormente rispetto a quelli centrali.

Se si posiziona uno schermo in F_i (fuoco parassiale) come in figura 1.6 l'immagine che si ottiene di un oggetto posto all'infinito è pari ad uno spot centrale brillante circondato da un alone simmetrico.

Se invece lo schermo si pone in Σ_{LC} (vedi figura 1.6), cioè in corrispondenza del cerchio di minor confusione, lo spot ha la minima dimensione trasversale: questo è il posto migliore per osservare l'immagine.

Si osservi che per ridurre l'aberrazione sferica si può diminuire l'apertura del sistema, a scapito però di avere un minor flusso di radiazione oppure creare una superficie asferica.

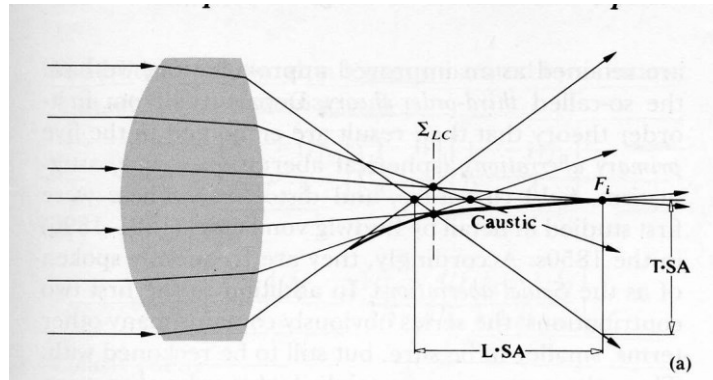


Figura 1.6 : Schema di aberrazione sferica.

1.4.2.4 Le lenti apocromatiche

Un altro tipo di lente, le Apocromatiche (APO), sono impiegate principalmente nei teleobiettivi. Queste lenti presentano aberrazioni cromatiche molto ridotte. Gli elementi APO hanno un vantaggio: focalizzano sullo stesso piano tre lunghezze d'onda della luce (normalmente il verde, blu e rosso) riducendo la distorsione.

Lenti di forme ancora più complicate le troviamo su sistemi ottici, per esempio, nelle macchine fotografiche per ridurre le aberrazioni in modo che le immagini siano nitide e prive di imperfezioni. Dalla figura notiamo la complessità del sistema (6).

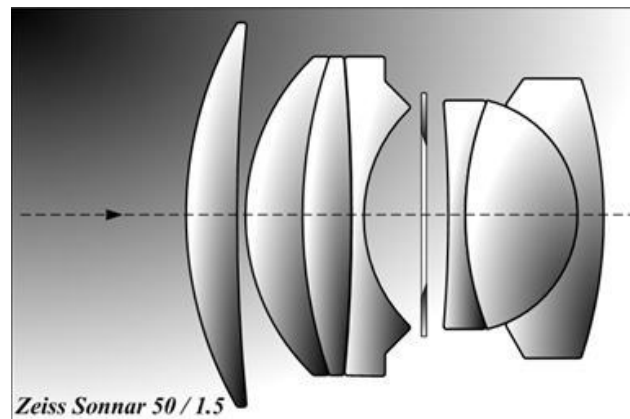


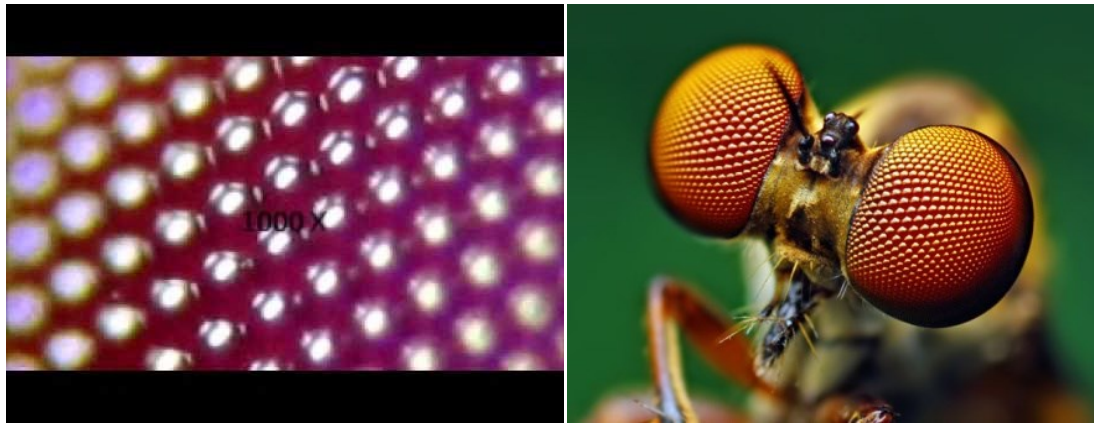
Figura 1.7 : lenti che possiamo trovare all'interno di un obiettivo fotografico.

1.4.2.5 Le matrici di micro lenti

Attualmente si producono a livello industriale wafers (sottili fino a pochi μm) contenenti milioni di microlenti, affiancate regolarmente in matrici quadrate o di qualsiasi altra forma. La singola lente può avere dimensioni che scendono fino a pochi μm , con una geometria e una lunghezza focale che, in linea di principio, potrebbero essere diverse per ogni elemento qualora richiesto sulla base di un preciso progetto.

Una matrice di microlenti opportunamente realizzata può avere proprietà ottiche macroscopiche alquanto singolari, potendo modificare lo stato di un fascio luminoso in modi inaccessibili a normali lenti (7).

L'aspetto più interessante, dal punto di vista concettuale, è che tali proprietà sono derivabili e facilmente descrivibili all'interno delle leggi dell'ottica classica (rifrazione e diffrazione) applicate a livello di una singola microlente, la quale produrrebbe da sola effetti ben noti. In natura troviamo occhi di alcuni insetti, per esempio la mosca, che sono formati da una serie di microlenti che le permettono di captare il movimento anche molto lieve in qualunque parte del campo visivo.



(a) (b)

Figura 1.8 (a) e (b) : viene messa a confronto la somiglianza di una matrice di lenti (a) e l'occhio di una mosca (b) che sono costituiti entrambi da una serie di microlenti una accanto all'altra.

1.4.2.6 Le lenti progressive

Queste lenti vengono utilizzate per la correzione di difetti visivi per la visione sia da lontano che da vicino. Esse sono costruite con complessi procedimenti di raccordi di varie curvature che permettono di avere nella parte superiore della lente la zona deputata alla visione da lontano, come quando si guida, si è al cinema o semplicemente si ammira il panorama o si passeggia.

Nella zona intermedia o corridoio di progressione è la parte centrale della lente, dove il potere correttivo ha una variazione graduale tra il potere da lontano e il potere da vicino, Questa è la parte più stretta della lente, ma permette di vedere chiaramente a distanze intermedie come ad esempio quando si sta guardando una vetrina e si vuole vedere i prezzi o il cruscotto dell'auto

La zona per vicino è posta nella parte inferiore della lente ed è preposta alla lettura o alla visione di oggetti siti a distanza ravvicinata. Nella parte bassa si ha il raggiungimento massimo del potere.

1.4.2.7 Le lenti liquide

L'evoluzione delle lenti e le nuove tecnologie hanno portato alla fabbricazione di lenti in grado di rivoluzionare il mondo dell'ottica.

L'obiettivo è quello di creare una lente molto simile alle caratteristiche dell'occhio umano che, grazie alle modifiche di curvatura del cristallino, è in grado di modificare la rifrazione.

È proprio questa la principale caratteristica di queste lenti che analizzeremo in maniera più dettagliata nel secondo capitolo.

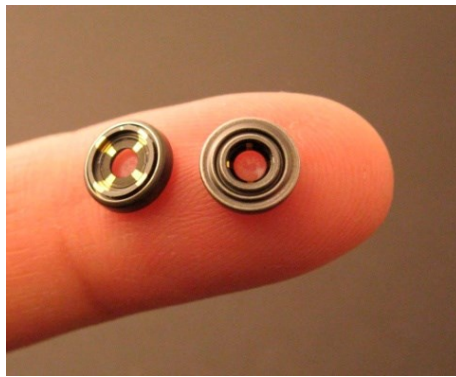


Figura 1.9 : in figura si possono vedere due esempi di lenti liquide messe su un dito per rendere l'idea delle dimensioni di queste lenti.

Capitolo 2: La fisica delle lenti a focale variabile.

Introduzione:

In questo capitolo tratteremo l'argomento principale di cui si vuole occupare questa tesi. Spiegheremo come sono composte e i principi di funzionamento di particolari lenti con caratteristiche molto simili alla capacità di accomodare dell'occhio umano le cosiddette lenti liquide a focale variabile.

2.1 Lenti liquide

Alla fine del VXIII secolo, Stephen Gray, un astronomo britannico, aveva accuratamente posizionato delle gocce di acqua su dei fogli di ottone. Ha notato che queste piccole gocce erano in grado di piegare i raggi luminosi ed era possibile magnificare oggetti.

Tuttavia nonostante l'iniziale successo di Gray nel manipolare le proprietà ottiche di queste lenti utilizzando dei piccoli aghi per modificarne la curvatura, ci vollero altri tre secoli affinché questo processo fosse studiato e applicato.

Nei prossimi anni sarà probabile un cambiamento di materiali utilizzati per la costruzione di lenti dal classico vetro o materiali plastici verso l'utilizzo di lenti liquide.

L'obbiettivo è quello di creare una lente molto simile alle caratteristiche dell'occhio umano che, grazie alle modifiche di curvatura del cristallino, è in grado di modificare la rifrazione.

2.2 Fenomeni alla base

Prima di iniziare a parlare di come sono costruite e come funzionano queste lenti è opportuno precisare i fenomeni fisici su cui sono basate:

2.2.1 Tensione superficiale

Uno dei concetti fondamentale necessari alla descrizione di fenomeni che coinvolgono volumi ridotti di liquido è quello di tensione superficiale.

Le molecole di un fluido subiscono l'attrazione da parte delle molecole a loro prossime. In un fluido la somma di tutte le forze di attrazione è nulla. Sulla superficie tali forze si compongono fino a diventare una forza di attrazione verso l'interno. Questo si traduce in un'azione di compressione.

Per questo motivo il liquido si comporta come se ci fosse una pellicola invisibile che lo tiene unito.

In realtà si tratta dell'azione di una forza di origine molecolare. A questo fenomeno, come preciseremo meglio in seguito mediante una definizione operativa, si dà il nome di tensione superficiale.

L'intensità della tensione superficiale dipende dal tipo di liquido considerato e da quale altra sostanza è circondato.

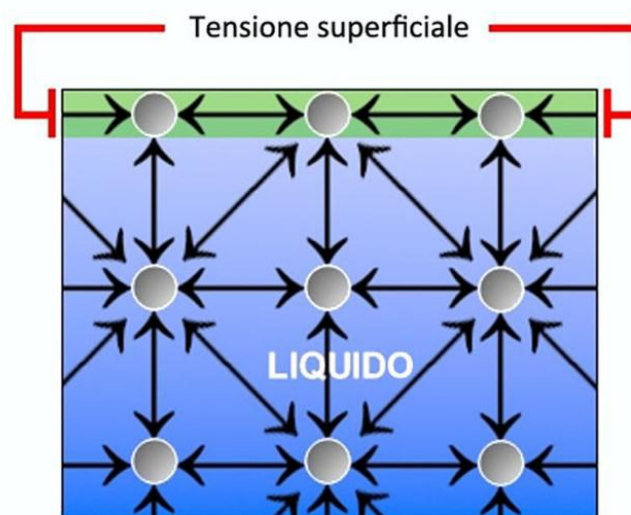


Figura 2.1 : Rappresentazione grafica dell'origine della tensione superficiale. Le molecole di un liquido che si trovano sulla superficie formano meno legami rispetto a quelle interne, e si trovano pertanto in una situazione energeticamente svantaggiata

Può essere pensata sia in termini di forza per unità di lunghezza (N/m) sia in termini di energia per unità di superficie (J/m^2) e si indica con il simbolo γ . Tali due punti di vista portano a due definizioni, una in ambito fluidico e una in ambito termodinamico.

Quindi dal punto di vista fluidodinamico, è una particolare tensione meccanica che si sviluppa lungo la superficie di separazione tra un fluido ed un materiale di un'altra natura,

ad esempio un solido, un liquido o un gas; dal punto di vista termodinamico può essere definita come il lavoro necessario per aumentare la superficie del liquido di una quantità unitaria.

La tensione superficiale è anche la causa della formazione delle gocce, che sono tenute insieme proprio da questa forza. Si prenda come esempio il mercurio, un liquido dotato di una elevata tensione superficiale: si può notare che il mercurio rovesciato su un tavolo si raccoglie sempre in piccole sferette compatte (8).

Il concetto di energia superficiale non si applica solo all'interfaccia tra un liquido ed una fase gassosa (energia superficiale libera), ma anche a interfacce liquido-liquido, liquido-solido e solido-solido. Si parla in questi casi di tensione interfacciale (o energia interfacciale). In questo caso l'origine del fenomeno è da ricercare nella differenza delle forze di attrazione intermolecolare che agiscono nelle due fasi.

2.2.2 Angolo di contatto

Si consideri ora una piccola quantità di liquido a contatto con una superficie solida (Figura 2.2). Nella maggior parte dei casi il liquido non bagnerà completamente il solido, ma assumerà la forma di una goccia con un ben definito angolo di contatto (9). Il valore dell'angolo di contatto, indicato con θ_c , dipende esclusivamente dalle energie superficiali tra le fasi in gioco: l'energia superficiale libera del liquido, l'energia superficiale libera del solido e l'energia interfacciale tra liquido e solido.

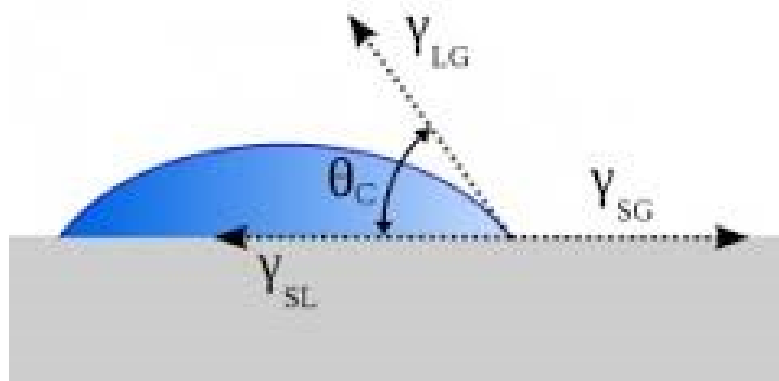


Figura 2.2 : il valore dell'angolo di contatto (indicato con θ_c) assunto da una goccia di liquido su una superficie solida è il risultato dell'equilibrio tra le tensioni superficiali in gioco.

L'angolo di contatto è un indice utile per caratterizzare la bagnabilità di una superficie e indicare se questa è idrofila o idrofobica.

2.2.3 Superficie idrofila

Per idrofilia dal greco hydros, "acqua", e philia, "amicizia" si intende la proprietà fisica dei materiali o di singole specie chimiche ad esempio molecole a legarsi con l'acqua. In senso più ampio, si intende anche la proprietà di alcuni materiali di assorbire o trattenere acqua al loro interno o sulla loro superficie.

Non tutti i materiali idrofili sono solubili. Le sostanze insolubili si classificano più o meno idrofile misurando la bagnabilità, ovvero l'angolo di contatto, come visto sopra l'angolo formato da una goccia di acqua posta a contatto con esse. Minore è l'angolo di contatto cioè più schiacciata è la goccia, più elevata è l'idrofilicità del materiale.

In generale se un liquido su di una superficie dà origine ad un angolo di contatto minore di 90° si afferma che la superficie è bagnabile dal liquido. Se il liquido in esame è l'acqua, si parla rispettivamente di superficie idrofilica o idrofobica.

2.2.4 Superficie idrofoba

Per idrofobia o idrofobicità dal greco hydor, acqua, e phobos, paura, si intende la proprietà fisica di specie chimiche ad esempio di molecole, di essere respinte dall'acqua.

Si utilizza inoltre il termine in senso più ampio per indicare la proprietà di materiali di non assorbire e non trattenere acqua al loro interno o sulla loro superficie.

Una superficie si dice idrofobica quando una goccia d'acqua sulla sua superficie forma un angolo di contatto superiore ai 90° . In tal caso il materiale si dice comunemente idrorepellente. Se tale angolo è superiore ai 150° la superficie è detta superidrofobica.

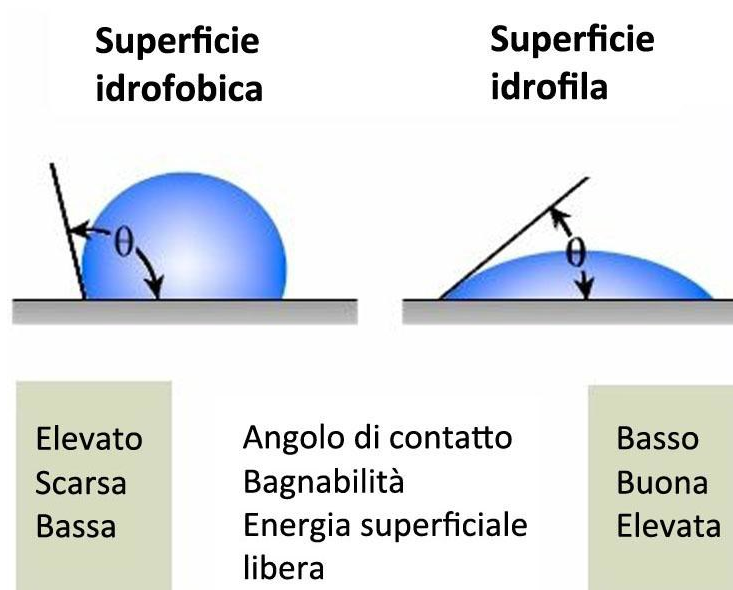


Figura 2.3 : classificazione di una superficie idrofobica o idrofila a seconda dell'angolo di contatto.

2.3 La tecnologia delle lenti liquide

Abbiamo appena visto alcuni principi fisici importanti per capire il funzionamento di queste lenti liquide. Ora possiamo analizzare le diverse tecnologie utilizzate per fare variare l'angolo di contatto e quindi la curvatura della nostra lente liquida. Modificando la curvatura siamo in grado di modificare la focale caratteristica che contraddistingue questa nuova tecnologia di lenti.

Principalmente per fare questa operazione abbiamo due metodi: l'elettrowetting e la variazione di pressione.

2.3.1 L'Elettrowetting

In un laboratorio di Lione, in Francia, all'inizio degli anni 2000, il fisico Bruno Berge ha creato una lente liquida in grado di variare la sua focale elettronicamente evitando dunque ogni stress meccanico (10).

All'interno della lente sono presenti due liquidi che non si mescolano tra loro, comportandosi cioè come l'acqua e l'olio. Stimolati elettronicamente questi liquidi si

spostano, grazie al principio dell'elettrowetting, modificando la curvatura della lente, un po' come il cristallino nell'occhio umano.

Per esempio una telecamera provvista di questa lente è in grado di mettere a fuoco senza l'ausilio di alcun motore e senza dover muovere l'obiettivo manualmente.

Nel disegno qui sotto, figura 2.4, Elettrowetting è spiegato in una configurazione di base: una goccia di olio viene depositato su una superficie piana, e facendo variare con degli elettrodi la tensione tra la goccia e il piano possiamo notare il cambiamento di forma della goccia stessa.

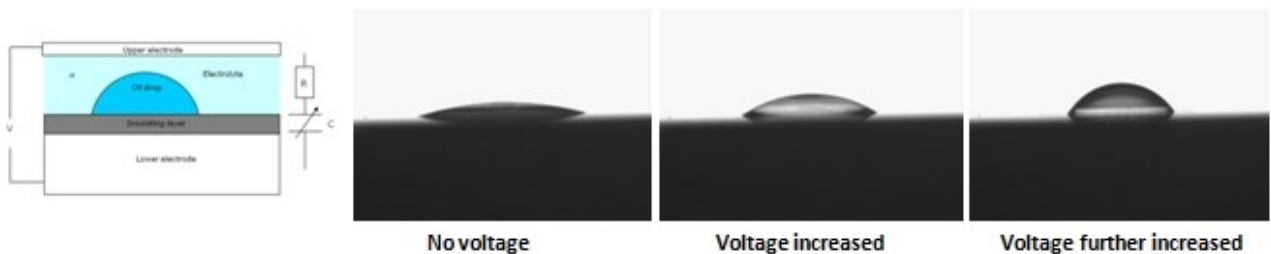


Figura 2.4 : schema dell'elettrowetting, possiamo notare come cambia la superficie di una goccia in funzione alla differenza di potenziale applicata tra goccia e superficie.

Applicando un campo elettrico attraverso un rivestimento idrofobico è possibile controllare l'idrofobicità grazie a questo effetto.

Se sigilliamo in un contenitore rivestito con questo materiale un liquido conduttore a base di acqua e un liquido isolante a base di olio il menisco o la superficie dei due liquidi può essere manipolato.

Con nessuna corrente il rivestimento rimane idrofobico e l'acqua cerca di evitare il contatto con i bordi del contenitore. Questo costringe l'olio a diffondersi intorno al bordo e agire come copertura. Come risultato, l'acqua tende a restare all'interno del contenitore e il sistema agisce come una lente divergente concava (figura 2.5a).

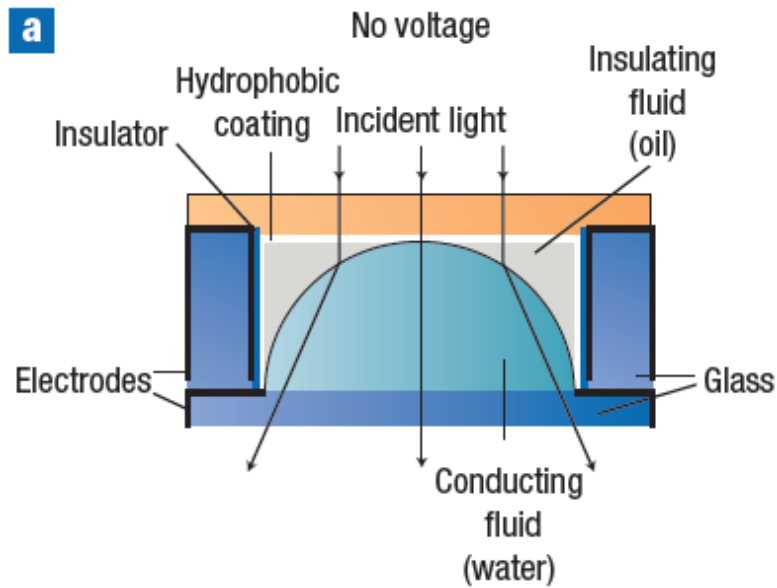


Figura 2.5 (a) : vediamo raffigurato uno schema di lente liquida. In questa situazione, come si vede dall'immagine, la superficie del materiale è idrofobica e l'acqua evita il contatto con il bordo. Il liquido a base di olio (in grigio) ha indice di rifrazione maggiore di quello acquoso (in azzurro), abbiamo quindi una lente divergente.

Quando un campo elettrico viene applicato il rivestimento perde le sue proprietà idrofobiche e la tensione superficiale tra le due liquidi lascia che l'olio si rilassi, permettendo all'acqua di toccare i lati (11). Di conseguenza il rigonfiamento scompare e il menisco si appiattisce per formare un leggero rigonfiamento nella direzione opposta creando una lente convessa (figura 2.5 b).

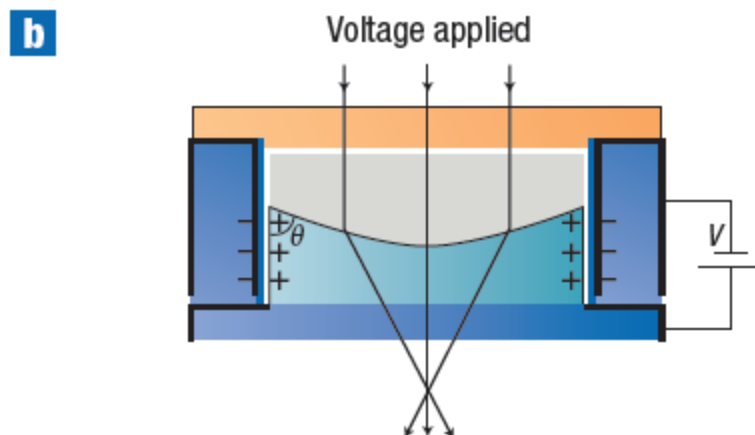


Figura 2.5 (b) : in questo caso il rivestimento, con il passaggio di corrente, perde le sue proprietà idrofobe e la nuova configurazione della lente sarà convergente.

2.3.2 La Pressione

Un altro principio per modificare il raggio di curvatura del liquido si basa sulla pressione. Per controllare la pressione sono state sviluppate due categorie di lenti:

2.3.2.1 Lenti a pressione con pompa idraulica

La lente a pressione sviluppata dalla ditta Imre è formata da un liquido sigillato all'interno di un canale con due aperture che servono come apertura della lente. Quando una pompa piezoelettrica applica pressione al liquido, la tensione superficiale del liquido nell'apertura può essere manipolata.

Aumentando la pressione ho un rigonfiamento del liquido verso il fuori creando una lente convessa. Diminuendo la pressione il liquido viene risucchiato in modo da formare una lente divergente concava (12).

Unendo due di queste lenti insieme si può creare uno zoom ottico senza dover spostare lenti meccanicamente.

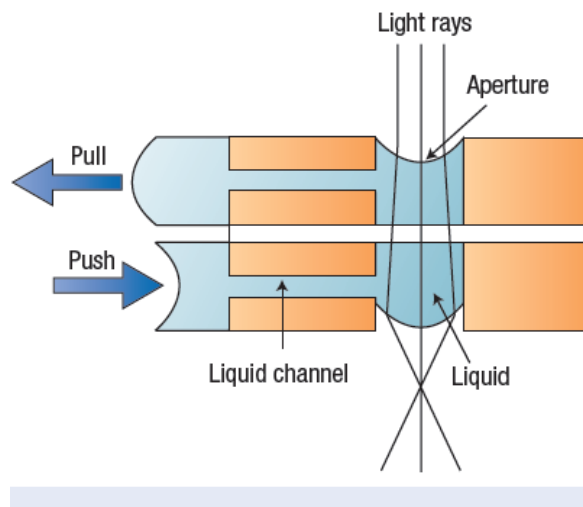


Figura 2.7: funzionamento di una lente con pompa idraulica. La pressione applicata modifica la curvatura superficiale del liquido e quindi il potere della lente.

2.3.2.2 Lenti polimeriche

Nelle lenti polimeriche un liquido ottico è inserito in un contenitore con un lato appoggiato in una membrana elastica di polimeri. Una variazione di pressione nel contenitore provoca una deformazione della membrana, formando così una lente.

I polimeri sono una grande famiglia di materiali con proprietà molto diverse. Alcuni polimeri sono in grado di offrire eccellenti proprietà ottiche e meccaniche. Questo significa che questi materiali hanno elevata elasticità, un grande allungamento a rottura, bassa opacità, sono trasmissivi, non assorbenti, stabili a lungo termine e facili da lavorare.

Il principio di base delle lenti polimeriche è il seguente: una membrana sottile costruisce l'interfaccia tra due camere ciascuna contenente un materiale otticamente trasparente, con diverso indice di rifrazione (Figura 2.8).

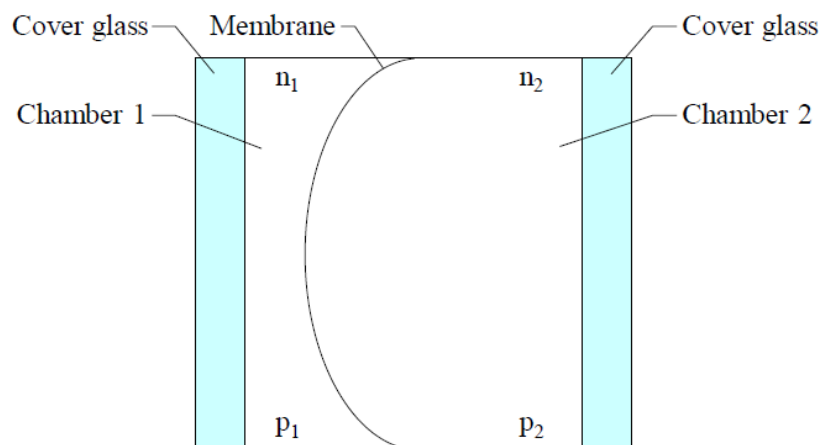


Figura 2.8 : schema di una lente polimerica. Possiamo vedere le due camere separate da una membrana polimerica contenenti due liquidi con indice di rifrazione differente oppure una camera riempita con liquido e l'altra con aria.

Nel caso più semplice, una camera viene riempita con un liquido, l'altra con l'aria; anche una lente con entrambi le cavità piene di fluidi è fattibile. La differenza di pressione tra le due camere definisce la deflessione della membrana e quindi una modifica del raggio di curvatura.

Nel 2010, a Zurigo, in Svizzera, la ditta Optilux ha lanciato due lenti in grado di modificare la forma di un polimero; una meccanicamente e l'altra elettricamente (13).

Lenti con membrana polimerica controllate meccanicamente

Questa lente è in grado di modificare la curvatura della membrana polimerica meccanicamente. Il nucleo della lente è costituito da una camera riempita di fluido ottico e sigillata con una membrana polimerica elastica.

Il movimento di rotazione del contenitore spinge un anello verso il fondo del contenitore quindi diminuisce il volume della camera contenente il liquido. Questo porta ad un rigonfiamento della membrana. Pertanto, la lunghezza focale della lente può essere controllata ruotando la sessione e modificando la posizione di questo anello.

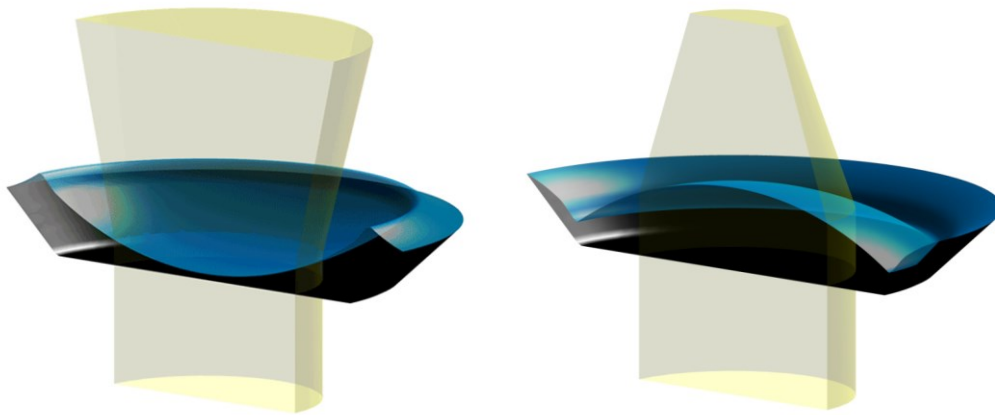


Figura 2.9: lente con membrana polimerica controllata meccanicamente. Possiamo notare che essa può variare la sua curvatura e formare sia una lente divergente che una lente convergente.

Lenti con membrana polimerica controllate elettricamente

In questo caso, il rigonfiamento della membrane è sempre dovuto dalla pressione del liquido all'interno della camera però, questa pressione, è esercitata da un anello controllato da un attuatore elettromagnetico che viene spinto verso il basso e sposta il liquido verso il centro della lente. Questo porta a un rigonfiamento della membrana.

Un attuatore elettromagnetico è integrato quindi nella lente e trasforma l'impulso elettrico in segnale di movimento per l'anello che esercita una pressione sulla membrana. Questo porta ad uno spostamento di fluido quindi a un rigonfiamento della membrana.

Pertanto, la lunghezza focale della lente può essere controllata dalla corrente che fluisce attraverso la bobina dell'attuatore.

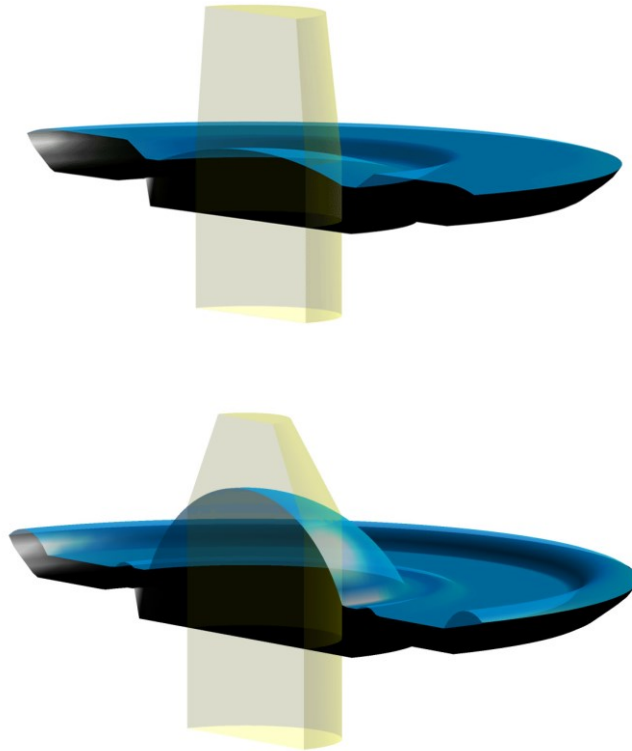


Figura 2.10: lente con membrana polimerica controllata con la corrente elettrica. In questo caso, a differenza di quella meccanica, la lente è sempre convergente ma cambia il potere diottrico.

Da una modifica delle proprietà meccaniche della membrana è possibile ottenere forme di lenti asferiche. Inoltre, utilizzando per esempio una piastra rettangolare, si può creare una lente cilindrica. La gamma di sintonizzazione focale può essere progettato in base alle esigenze applicative. Tuttavia, vi è sempre un compromesso tra dimensioni, gamma di sintonia e tempo di risposta.

Capitolo 3: Le lenti a focale variabile sul mercato.

Introduzione:

In questo capitolo si espone uno studio delle lenti liquide presenti attualmente sul mercato. Viene fatta una categorizzazione in base alle ditte produttrici e alle loro specifiche tecniche. Cercheremo di fare anche un confronto con l'occhio umano per vedere le somiglianze.

3.1 Caratteristiche tecniche

3.1.1 L'apertura (a)

Indica il diametro utile al passaggio della luce. Dato importante per regolare la quantità di luce che raggiunge in un determinato tempo di esposizione lo schermo fotografico. Ci da anche un'idea delle dimensioni (size) della lente, di solito le ditte forniscono anche i valori del diametro totale dello spessore e del peso.

3.1.2 L'indice di rifrazione (n)

La luce si propaga nel vuoto alla velocità c $3,00 \times 10^8$ m/s. La luce si propaga anche in altri mezzi, come l'aria, l'acqua e il vetro. Tuttavia gli atomi della materia in parte la assorbono, in parte la riemettono e in parte la diffondono. Perciò la velocità della luce in un mezzo diverso dal vuoto è minore di c e il suo valore dipende dalla natura del materiale (14).

L'indice di rifrazione n di un materiale è il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto c e la velocità della luce v nel materiale: $v = c / n$

3.1.3 Temperatura di utilizzo (T)

Il problema di queste lenti è che contenendo liquido, si può andare incontro a congelamento. Viene quindi indicato dal produttore l'intervallo di temperatura in cui è possibile utilizzare la lente e anche quello per conservarla.

3.1.4 Corrente di controllo (I)

Indica l'intensità di corrente da applicare alla lente per modificarne la curvatura, viene espressa in mA e avrà un intervallo compreso tra un valore minimo a un valore massimo a seconda del risultato che si vuole ottenere.

3.1.5 Energia consumata (P)

L'energia necessaria per il funzionamento della lente, è la potenza espressa in W

3.1.6 Tempi di risposta (t)

Il tempo che intercorre dalla partenza del segnale al riposizionamento della lente nella nuova configurazione.

3.1.7 Focale (f)

Per queste lenti la lunghezza focale non è un valore fisso ma sarà un intervallo di valori da un minimo a un massimo. Possiamo trovarlo indicato sia in millimetri che in diottrie.

3.1.8 Trasmissione (τ)

Indica la trasparenza della lente. Il raggio luminoso chiamato raggio incidente che colpisce la lente si divide in uno riflesso e l'altro rifratto. Quindi anche l'intensità del raggio si divide, maggiore sarà la trasmissione della lente maggiore sarà l'intensità del raggio rifratto. Quindi si esprime con una percentuale. La trasmissione non è la stessa ad ogni lunghezza d'onda, essa anche se di poco varia, in tabella abbiamo indicato la trasmissione a una lunghezza d'onda di 500nm che corrisponde all'intervallo di luce sul verde (15).

Azienda	Varioptics	Varioptics	Varioptics	Holochip	Optotune	Optotune	Optotune	Optotune	Optotune	Optotune	Optotune	Optilux	Philips	Lensvector	Occhio
	Artic 316	Artic 39N0	Baltic 617	ALP-1050	EL-6-18	EL-10-30	EL-10-30-C	EL-10-40-OF	ML-20-35	ML-25-50	818 liquid	FluidFocus	LVAf	umano	
Prodotto															
sviluppo	Elettrow.	Elettrow.	Elettrow.	Pressione controllo manuale	Pressione controllo elettrico	Pressione controllo elettrico	Pressione controllo elettrico	Pressione Controllo elettrico	Pressione controllo manuale	Pressione controllo manuale	Elettrow.	Elettrow.	Controllo elettrico	muscoli	
size [mm]	7,75 x 2	10x2.2	18x3.92	45.7x5	18x8.5	30x20.7	30x20.7	42x36	35x8	50x19	6x2	3x2.2	4.52x0.48	Diam. 22	
a [mm]	2,5	3,5	8	14.2	6	10	10	10	20	25	2,5	2	1.85	Da 2 a 5	
n	/	/	/	/	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3 o 1,559	1,3 o 1,382	/	/	/	1,336 / 1,406	
T [°C]	-20 / +60	-20 / +60	+10 / +40		-40 / +70	-20 / +65	-20 / +65	+10 / +40	-20 / +65	-20 / +85	-20 / +60	-40 / +80	-15 / +75	ambiente	
I [mA]	Ddp [V]= 0.7	Ddp [V]= 0.7	Ddp [V]= 0.7	manuale	0-200	0-400	0-400	0-350	manuale	manuale	/	/	/	/	
P [mW]	0-10	0-15	0-15	manuale	0-350	0-2000	0-2000	0-1500	manuale	manuale	0-15	0-10	80	/	
t [ms]	<10	<10	<10	/	<2	<2,5	<2,5	<10	/	/	<10ms	<10ms	<0,5sec	225	
focale max [mm]	+77	+77	+67	+1000	+50	+140	+170	+500	+40	Inf.	+66	inf	inf	+22	
focale min [mm]	-200	-200	-200	+30	-500	-600	-600	-500	-40	+37	-200	+5	+100	+17,5	
t [500nm]	97%	97%	96%	/	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	/	

Tabella 3.1 : sono state inserite in tabella le principale aziende e i modelli presenti nel mercato attuale delle lenti liquide con le specifiche tecniche fornite dalle aziende. Abbiamo inoltre inserito una colonna con alcuni dati dell'occhio umano fonte di ispirazione per la creazione di queste lenti.

Capitolo 4: Applicazioni industriali e mediche.

Introduzione:

Nel capitolo conclusivo di questa tesi descriveremo le possibili applicazioni di queste lenti e i vantaggi che può dare l'inserimento di nuove tecnologie negli apparecchi già esistenti.

4.1 Applicazioni industriali in commercio

4.1.1 Fotocamere

Quando si tratta di progettare un dispositivo di consumo compatto per applicazioni video, il solito problema è che si può sentire il rumore del sistema di focalizzazione nel microfono. Ciò è dovuto sia ad attuatori rumorosi che a qualche interferenza all'interno del sistema. Le lenti liquide non fanno alcun rumore, consentendo di messa a fuoco automatica, silenziosa e continua anche in modalità video.

Quando si utilizza l'auto focalizzazione in modalità video, l'utente si aspetta che la messa a fuoco automatica sia continua. Questo significa che la lente dovrebbe adattarsi senza vedere l'immagine che si sfuoca per poi tornare a fuoco. Questo è difficile da fare con soluzioni meccaniche per il fatto che la maggior parte di loro hanno isteresi significativa, la lente liquida avendo un'isteresi bassa rende più omogenea l'immagine (16).

Varioptic dichiara che la prima lente liquida della società è stata messa in commercio all'inizio del 2006. La società ha stipulato un contratto di licenza con SemCo (principale fornitore delle fotocamere per Samsung per il mercato dei telefoni cellulari) e ha istituito una partnership con Creative Sensor Inc., di Taiwan per la produzione delle lenti. La prima linea per la produzione di massa delle lenti liquide è stata avviata nel dicembre 2006, a Wuxi, Cina.



Figura 4.1 : esempio di integrazione di una lente liquida in una videocamera digitale.

4.1.2 Il mercato dei lettori di codici a barre

E' un altro bacino di utilizzo significativo delle lenti liquide: sono attualmente disponibili lettori in grado di leggere codici da distanze anche molto variabili fra loro, semplificando e velocizzando il processo di lettura.



Figura 4.2 : la ditta Cognex nella sua gamma di lettori di codici a barre fissi e mobili utilizza lenti liquide. Qui in figura è rappresentato un esempio di lettore mobile.

4.1.3 Webcam

Nate per trasmissioni a basso frame di immagini a limitata risoluzione, hanno subito un profondo mutamento, di pari passo con l'aumentare della banda di trasmissione a disposizione. Il mercato richiede quindi, oltre a una maggiore risoluzione, anche una migliore qualità dell'immagine e vede nell'utilizzo di dispositivi ad auto focalizzazione una soluzione per la generazione di immagini nitide di scenari in movimento.

4.1.4 Sistemi di riconoscimento e di allarme

Un altro ambito di estremo interesse è quello dei dispositivi di lettura in ambito biometrico. I sistemi di riconoscimento d'impronte digitali, dell'iride e dei tratti fisionomici costituiscono un mercato vasto per le forze di polizia, per le applicazioni militari, per le applicazioni di sorveglianza in strutture comuni (hotel, centri commerciali ecc.) e in abitazioni private. Una recente applicazione è quella di lettura delle impronte digitali senza contatto: in essa la condizione di focalizzazione non viene raggiunta meccanicamente (cioè posizionando le dita su una superficie posta a una certa distanza dalla lente), ma semplicemente avvicinandole al dispositivo di lettura. Naturalmente, in queste applicazioni servono alta ripetibilità, tempi di risposta bassi e semplice integrabilità del dispositivo autofocus nel sistema. Tutte caratteristiche che si possono trovare nelle lenti liquide.

4.1.5 Illuminazione di ambienti

Le lenti liquide associate a una fonte luminosa sono in grado di variare il fascio luminoso di un riflettore senza riduzione della qualità e con un'elevata efficienza. Questo rende le lenti liquide ideali per applicazioni per l'illuminazione di musei, negozi, luci da lettura.

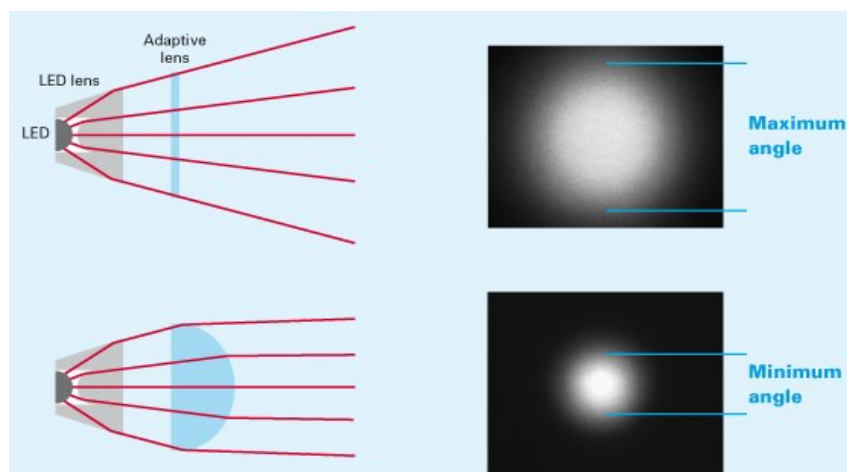


Figura 4.3 : vediamo come sia possibile rendere una fonte luminosa più o meno diffusa a seconda delle necessità.

4.1.6 Lavorazioni con laser

Un obiettivo a fuoco variabile è la scelta ideale per la lavorazione laser 3D. Tradizionalmente, la curvatura di campo degli scanner laser 2D è appiattita utilizzando lenti in movimento meccanico una lente in un espansore del fascio. La dimensione dell'area di scansione richiede che l'oggetto sia ad una distanza fissa dalla testa di scansione. Inoltre la lente è costosa e consente solo un piccolo volume di scansione da marcare. Infine la durata è limitata a causa delle parti in movimento.

Invece di utilizzare lenti meccaniche complesse e costose, un punto laser può essere controllato utilizzando una lente liquida. Ciò consente tempi di risposta rapidi, nella gamma di millisecondi, consentendo lavorazioni laser 3D molto rapida. Avendo meno parti in movimento il sistema globale diventa più compatto, affidabile e meno costoso e l'area di marcatura può essere aumentata.

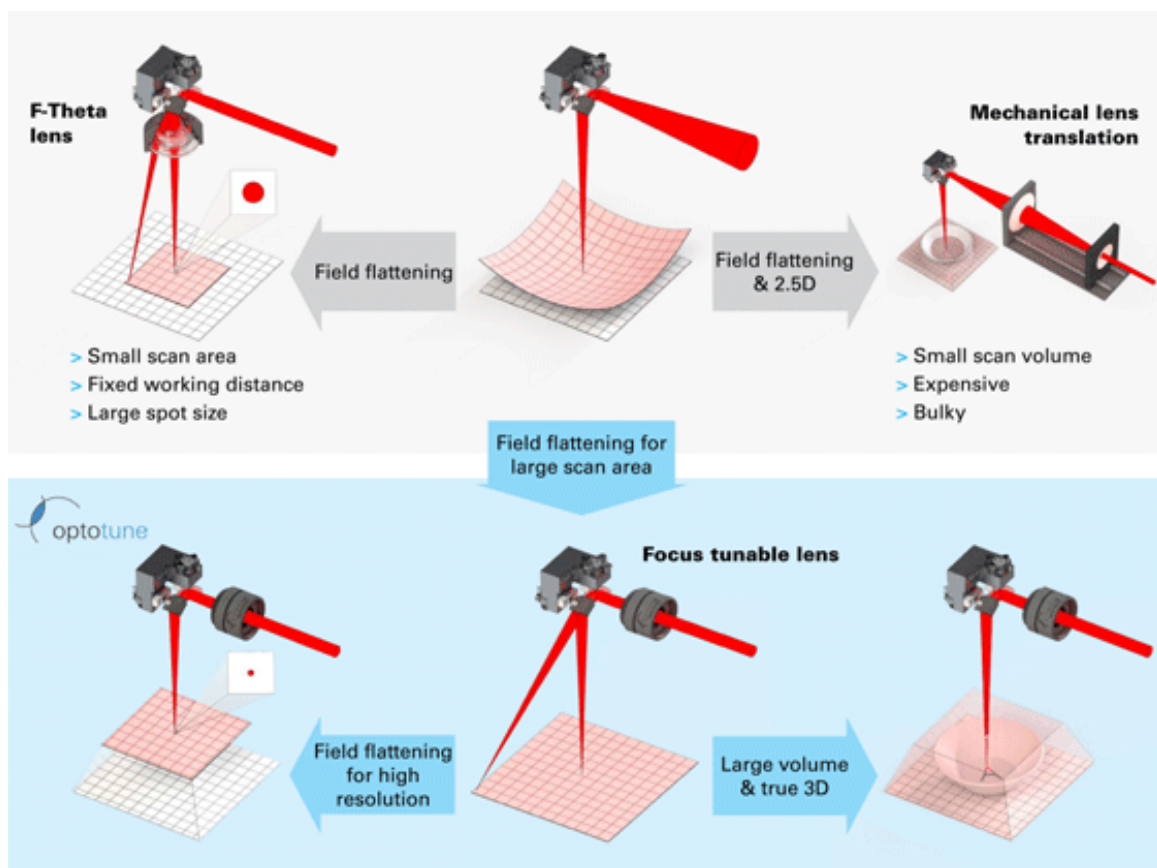


Figura 4.4 : in questa figura viene messa a confronto una lavorazione a laser con lenti a traslazione meccanica con una lavorazione laser con lente liquida.

4.2 Applicazioni mediche

4.2.1 Endoscopie e applicazioni dentali

Le applicazioni mediche sono un altro bacino di applicazione molto interessante. Si pensi, ad esempio, agli apparecchi per endoscopia, o a quelli che si utilizzano per le applicazioni dentali, in questi casi si ha a che fare con una telecamera montata su un supporto che inevitabilmente non può essere manovrato con la precisione necessaria a garantire che l'immagine acquisita sia a fuoco. L'utilizzo di lenti liquide, invece, consente di ottenere questo obiettivo, inoltre abbiamo dispositivi compatti caratteristica fondamentale in questo campo (17).



Figura 4.5 : esempio di fotocamera medica con lente liquida. Modello: “kodak 15000”, utilizzata dai dentisti per visualizzare e fotografare particolari all'interno della bocca.

4.2.2 Oftalmologia

Non c'è modo più naturale per compensare difetti visivi dell'occhio umano che usando lenti a focale variabile, che sostanzialmente operano secondo gli stessi principi. Attualmente, la maggior parte delle apparecchiature oftalmiche affidano a selezione manuale e allineamento di uno o più lenti in vetro per ottenere la correzione desiderata. Con le lenti liquide, la correzione può essere effettuata con una singola lente, che può essere regolata in modo continuo e preciso in tempo reale. Le lenti sferiche possono essere costruite con

aperture di fino a 40 mm e potenza ottica che vanno da -20 a +20 diottrie. Lenti cilindriche sono possibili anche, con aperture di fino a 20 mm a potenza ottica da -10 a 10 diottrie (questi sono valori indicativi poi dipende da azienda e prodotti) (18).

Applicazioni: Forottero, Autorefrattometro, Perimetri, Immagini retiniche.

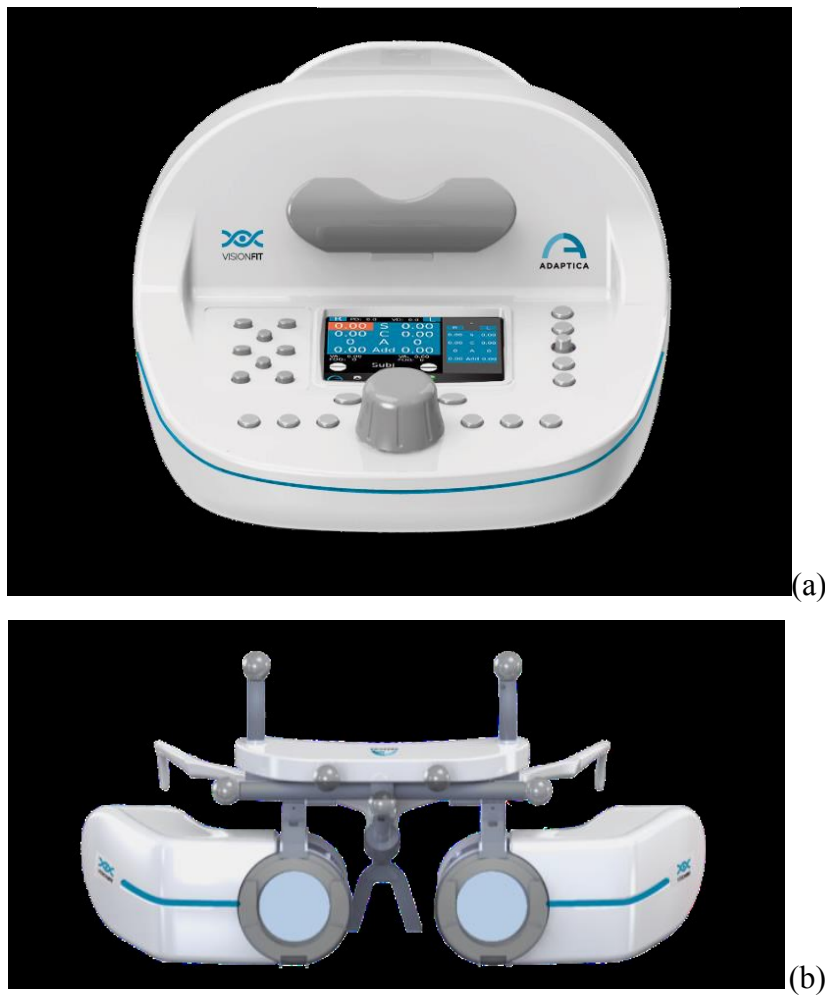


Figura 4.6 : Forottero di nuova generazione. Questo forottero: “VisionFit”, consente di unire le funzionalità dei forotteri manuali per l’esecuzione dei test, con la praticità di spostamento e la libertà di visione dell’occhiale di prova. E’ formato dall’ unità di controllo (a), dove abbiamo tutti i comandi, e la montatura indossabile (b), nella quale troviamo le lenti liquide regolabili.



Figura 4.7 : l'azienda Zeiss, in occasione dell'Assemblea annuale dell'American Glaucoma Society tenutasi a Coronado (California) nel 2015, ha annunciato il lancio mondiale del nuovo Humphrey® Field Analyser HFA TM3, che rappresenta la nuova generazione di perimetri in casa ZEISS.

In questa perimetria, una lente di prova fornisce la correzione refrattiva necessaria perché ciascun paziente possa vedere chiaramente durante il test. L'HFA3 sostituisce il vecchio processo manuale con una lente liquida che riduce i tempi di inizializzazione del paziente caricando automaticamente la correzione di rifrazione dello stesso dall'esame precedente.

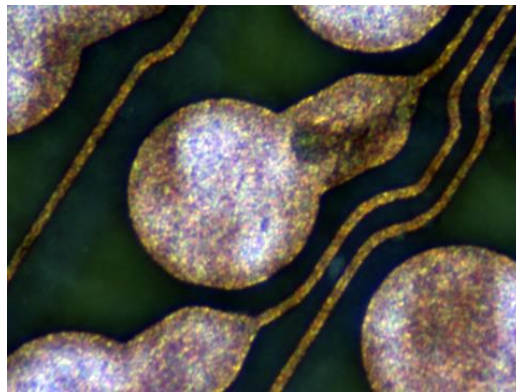
4.3 Applicazioni in Microscopia

Attualmente, la maggior parte delle soluzioni di messa a fuoco si basano su movimenti assiali meccanici, che possono rovinare il campione. Lo schema ottico di focalizzazione delle lenti elettricamente modificabili consente la messa a fuoco senza movimenti e in pochi millisecondi.



Optem® is a registered trademark of Qioptiq, Inc

(a)



(b)

Figura 4.8 : in (a) vediamo un sistema di ingrandimento in cui è stata inserita una lente liquida; in (b) un'immagine visualizzata grazie a questo tipo di ingrandimento.

4.4 Vantaggi delle lenti liquide

4.4.1 Sistema di auto focus e di stabilizzazione immagini

Una fotocamera può essere trasformata in af/ois (auto focus e sistema di stabilizzazione dell'immagine) semplicemente con l'aggiunta della componente lente liquida.

La lente liquida è collegata meccanicamente sulla lente della telecamera fissa ed è collegata elettricamente al pannello comandi con un circuito stampato flessibile (PCB).

La messa a fuoco automatica della telecamera può essere ottenuta con un comando ad anello chiuso della potenza ottica da dare alla lente liquida, stimata da un processore immagine in base alla nitidezza (19).

Il principio di stabilizzazione ottica dell'immagine consiste nel misurare l'inclinazione istantanea della telecamera con un giroscopio a due assi e generando un'inclinazione opposta con la lente liquida.

La correzione efficace della maggior parte della sfocatura dovuta ai movimenti della mano durante l'utilizzo: con il tempo di integrazione dell'immagine fino a 400 ms, il 90% delle immagini hanno la loro sfocatura massima all'interno della gamma di correzione dall'inclinazione della lente liquida (20)

Frequenze di risposta ottimizzati per la fotografia mobile.

Tempo di esposizione consentito abbastanza lungo (fino a 1s).

In modalità AF, la messa a fuoco viene mantenuta molto ampia, e consente un'ottima messa a fuoco a distanze da 5cm a infinito.

4.4.2 Poca usura

Nelle applicazioni industriali e non solo, spesso sono richiesti requisiti "pesanti". Tipico utilizzo di una telecamera industriale è un nastro trasportatore o un apparecchio di produzione automatizzato.

La tabella seguente dà un'idea del numero di cicli necessari a tali applicazioni:

	1 turno da 5 giorni / settimana	2 turni da 5 giorni / settimana	3 turni da 7 giorni / settimana
1 attuatore in movimento	7 M	14 M	31 M
3 attuatori in movimento	21 M	42 M	93 M

Tabella 4.1 : vediamo quanti cicli deve compiere a livello industriale un attuatore. La lettere M sta per milioni di cicli.

Modi convenzionali di focalizzazione di un obiettivo, come motori miniaturizzati, sono state ampiamente utilizzate per queste applicazioni. Tuttavia, la durata tipica di attuatori meccanici è intorno a 2 milioni di cicli, a seconda della tecnologia e il fornitore. Queste soluzioni avrebbero bisogno di una manutenzione dopo poche settimane o mesi in applicazioni industriali. La lente Liquida è stata testata con più di 100 milioni di cicli senza alcun cambiamento nelle prestazioni.

4.4.3 Velocità

La messa a fuoco oltre che precisa e duratura deve avere anche una buona velocità per non dover rallentare i processi. Questo aspetto viene ben soddisfatto dalle lenti liquide che possono raggiungere una buona focalizzazione in un tempo di 20ms o anche inferiore.

4.4.4 Messa a fuoco

Nelle applicazioni mediche, come ad esempio telecamere endorali o dispositivi di misurazione della pelle, richiedono la capacità di mettere a fuoco anche a distanze molto brevi. Alcuni sistemi meccanici sono limitati in termini di capacità di fuoco da vicino. La lente liquida permette di avere un immagine nitida a meno di 5 cm, le soluzioni meccaniche sono in genere più limitate.

4.4.5 Basso consumo

Un bel modo per collegare una fotocamera ad uno schermo è di utilizzare un cavo USB per visualizzare l'immagine su un computer, in tal caso, l'USB fornirebbe la corrente al dispositivo. Tuttavia, l'USB sono limitati come corrente massima, che rende il budget di potenza stretto nel caso di utilizzo di un attuatore di messa a fuoco meccanico. La lente liquida richiede solo pochi mA, fattore positivo anche se si usa uno strumento a batteria.

Conclusioni

In questa tesi abbiamo analizzato funzionamento, caratteristiche tecniche e applicazioni delle lenti a focale variabile. Abbiamo visto che da questa nuova tecnologia di lenti possiamo trarre diversi vantaggi in svariate applicazioni.

Le lenti a focale variabile sono le lenti che più si avvicinano al sistema di accomodazione del cristallino per l'occhio umano. E' possibile che queste lenti prendano sempre più piede facendosi conoscere sempre di più e trovando impiego in molti campi.

Bibliografia

- (1) Alberto Peruzzo; “*La grande enciclopedia*”; pag. 8742/8746; Libreria Larousse; (1990).
- (2) Laureale Sherwood; “*Fisiologia umana*”; pag. 190/196; Zanichelli (2008).
- (3) <https://www.astrogeo.va.it/astroном/asteroidi/camereccd.php>
- (4) Giuseppe Ruffo; “*Fisica per moduli*”; pag. 78/80; Zanichelli (2004).
- (5) Anto Rossetti e Pietro Gheller; “*Manuale di optometria e contattologia*”; pag.338/355; seconda edizione Zanichelli; (2012).
- (6) www.zeiss.it/camere-lenses
- (7) [http://www.treccani.it/enciclopedia/matrici-e-ottiche-adattive-microlenti_\(Lessico_del_XXI_Secolo\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/matrici-e-ottiche-adattive-microlenti_(Lessico_del_XXI_Secolo)/)
- (8) C.V. Boys; “*Le bolle di sapone e le forze che le modellano*”; Zanichelli; (1963).
- (9) http://www.funsci.com/fun3_it/esper2/esper2.htm
- (10) B Berge; “*Liquid Lens Technology: Principle Of Electrowetting Based Lenses And Application To Imaging*”; Ecole Normale Superieure de Lyon; (2004).
- (11) Bruno Berge; “*The liquid lens technology- how it works and what it is doing*”; Technology; (02/12/2010).
- (12) Duncan Graham-Rowe; “*Liquid lens make a splash*”; Nature photonics; (settembre 2006).
- (13) M. Blum, M. Büeler, C. Grätzel, M. Aschwanden; “*Compact optical design solutions using focus tunable lenses*”; SPIE Optical Design and Engineering IV, Proceedings; Vol. 8167; (2012).
- (14) http://online.scuola.zanichelli.it/cutnellelementifiles/pdf/RifrazioneLuce_Cutnell_Zanichelli.pdf
- (15) J D Cutnell, KW Johnson; “*Elementi di fisica*”; Zanichelli; (2010).
- (16) www.varioptic.com/application
- (17) www.optotune.com/application
- (18) http://www.esavision.it/doc/strumentazione/30/03c59-visionfit_1.pdf

- (19) E. Simon, B. Berge, F. Fillit, H. Gatton, O. Jacques-Sermet, M. Guillet, F. Laune, J. Legrand, M. Maillard, and N. Tallaron; “*Optical design rules of a camera module with a liquid lens and principle of command for AF and OIS functions*”, Proc. SPIE, Vol. 7849, 784903 (2010).
- (20) E. Simon, B. Berge, H. Gatton, O. Jacques-Sermet, F. Laune, J. Legrand, M. Maillard, D. Moine, N. Verplanck; “*Optical image stabilization with a liquid lens*”; Proc. Int'l Conf. Opt.-photon. Design Fabr. (ODF 2010).