



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
ELETTRONICA

Telecentric Zoom Revolver

Laureando:

Sergio Dal Bello

Relatore:

Ch.mo Prof.

Gaudenzio Meneghesso

Anno accademico 2013/2014

Indice

1	Introduzione	5
2	Le leggi dell'ottica	9
2.1	Il modello lineare	13
2.2	Ottica gaussiana	15
2.2.1	Approssimazione parassiale	15
2.2.2	Elementi cardinali nell'ottica gaussiana	18
2.2.3	Stop e pupille	20
2.3	Parametri fondamentali	22
2.3.1	Rapporto di ingrandimento e f-number	22
2.3.2	Profondità di campo	24
2.4	Distorsioni	25
2.5	Applicazione del modello gaussiano con il modello lineare	27
3	Lenti telecentriche	31
3.1	Modello teorico di Gauss nelle ottiche telecentriche	31
3.2	Vantaggi nell'utilizzo di lenti telecentriche	34
3.2.1	Ingrandimento costante	34
3.2.2	Luminosità costante	36
3.2.3	Eliminazione dell'errore prospettico	37

3.2.4	Bassa distorsione	38
3.3	Ambiti di utilizzo	39
4	Telecentric Zoom Revolver	43
4.1	Descrizione del progetto	43
4.2	Elettronica	49
4.2.1	Driver	53
4.2.2	Sensori e codifica	56
4.3	Test degli obiettivi	58
4.3.1	Postazione di misura	58
4.3.2	Operazioni preliminari	61
4.3.3	Svolgimento dei test	66
4.3.4	Regolazione della back-focal length	73
4.3.5	Test di ripetibilità	76
4.3.6	Risultati e analisi	79
5	Conclusioni	95

Capitolo 1

Introduzione

Il ruolo dell'ottica al giorno d'oggi sta assumendo sempre di più un aspetto rilevante nel mondo industriale dal punto di vista tecnologico.

Negli ultimi vent'anni i sistemi di controllo e l'automazione hanno fatto passi in avanti enormi, permettendo alle industrie di controllare e quindi automatizzare i processi produttivi.

E' quindi evidente che, data la necessità di sistemi sempre più pronti e efficienti, sia stato indispensabile sviluppare nuove tecnologie in ambito ottico; per quanto riguarda l'automazione industriale, infatti, il bisogno di reperire immagini per una successiva elaborazione ha acquisito un'importanza fondamentale.

Si pone quindi il problema di ottenere delle immagini che rispecchino la realtà nella maniera più fedele, almeno nei parametri che servono per un particolare processo produttivo.

Uno di questi aspetti è certamente rappresentato dalla reale determinazione delle dimensioni degli elementi che si vogliono controllare. Basti pensare ad un normalissimo sistema di controllo automatizzato per verificare difetti di fabbricazione (ad esempio verificare che delle

viti in una catena di montaggio siano state realizzate in maniera corretta).

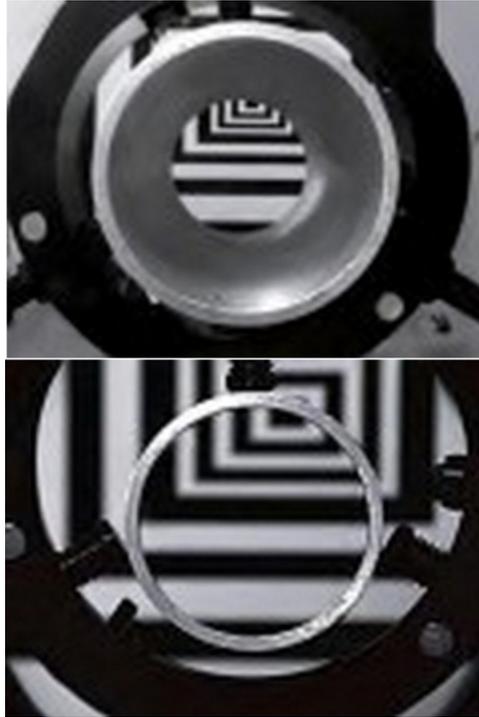


Figura 1.1: Differenza tra ottiche telecentriche e non telecentriche

In questo ambito le leggi della prospettiva rappresentano l'aspetto cruciale; infatti la componente spaziale influenza direttamente la percezione della dimensione dell'oggetto, rendendo necessario l'utilizzo di algoritmi di elaborazione di immagini molto sofisticati. Questo metodo, tuttavia, è soggetto ad una serie di complicazioni (oltre ad un costo molto elevato), rendendone l'utilizzo in ambito industriale poco conveniente.

Per ovviare questo problema, si è pensato ad un sistema che permettesse questa operazione direttamente dal punto di vista ottico, ossia mediante l'utilizzo di lenti particolari; queste prendono il nome di lenti **telecentriche**.

Il principio che sta alla base è quello di utilizzare un sistema ottico che vada ad eliminare la prospettiva, in modo da avere la certezza (con una certa tolleranza) che l'immagine acquisita sia fedele all'immagine reale, almeno per quanto riguarda l'aspetto dimensionale. In questa maniera non è necessario l'utilizzo di complicati sistemi di elaborazione immagine con conseguente abbattimento dei costi da parte delle imprese.

Il mio progetto di tesi sarà suddiviso principalmente in due sezioni. I primi due capitoli comprendono uno studio teorico sui principi di ottica e sulla teoria che sta alla base del funzionamento delle lenti ottiche, esplicando i principali modelli matematici. Si vedrà inoltre l'applicazione di tali principi all'ottica telecentrica, cercando di illustrarne dinamiche, vantaggi e ambiti di utilizzo.

La seconda parte, invece, riguarda la descrizione della collaborazione tra me e la società Opto-Engineering di Mantova nell'ambito della realizzazione di un progetto dal titolo "Telecentric Zoom Revolver". Il progetto prevede la realizzazione di un obiettivo telecentrico, formato da quattro oculari con ingrandimento diverso. Il vero vantaggio di questo particolare obiettivo è il fatto di poter utilizzare quattro ingrandimenti diversi (mediante l'utilizzo degli oculari) senza il bisogno di ricalibrazione.

Descriverò obiettivi, finalità e metodi di realizzazione di tale progetto, concentrandomi sulla mia attività lavorativa che comprende principalmente la progettazione del prototipo per quanto riguarda la parte elettronica, e in particolar modo la fase di testing. Verranno

infatti presentate le tipologie di test utilizzati, andando a descriverne i metodi e i risultati.

Capitolo 2

Le leggi dell'ottica

Per conoscere e capire l'utilità dell'ottica telecentrica bisogna innanzitutto partire dalle leggi della prospettiva. Dall'esperienza comune è facile notare come, fotografando uno stesso soggetto con obiettivi diversi, l'immagine prodotta possa risultare più o meno “schiacciata”; si vede in pratica come l'immagine risultante sia deformata sia nelle dimensioni che nella profondità di spazio.

Per descrivere questo tipo di fenomeni viene normalmente utilizzato un procedimento fotografico noto con il nome di stenoscopia. Il dispositivo utilizzato viene chiamato camera oscura (in inglese pinhole camera) ed è composto da una scatola oscurata sul cui lato anteriore è presente un foro chiamato foro stenopeico (dal greco *stenos opaios*, ossia foro stretto). Nel lato posteriore è presente un piano di proiezione dell'immagine, ossia il piano dove viene proiettata l'immagine stessa che passa attraverso il foro stenopeico.

Dall'immagine si può vedere il principio base di funzionamento della camera oscura. Il foro stenopeico è il punto dove tutti i raggi convogliano e si incrociano; per questa motivazione viene anche chiamato **centro di proiezione**. La distanza che invece intercor-

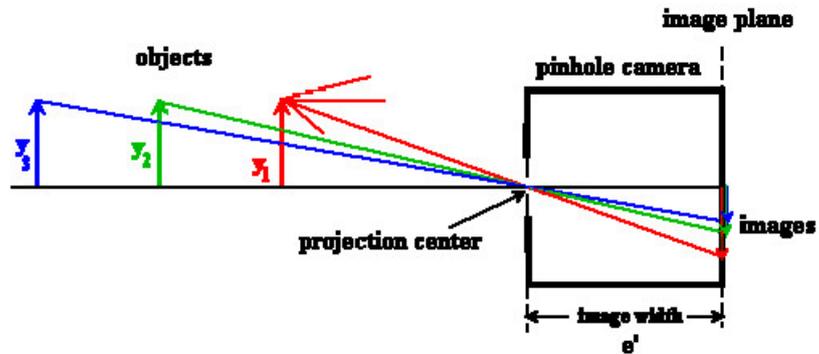


Figura 2.1: Pinhole camera

re tra il centro di proiezione e il piano di proiezione dell'immagine rappresenta l'ampiezza dell'immagine. La caratteristica principale di questa prospettiva è che più l'oggetto è distante, più l'immagine risulta avere dimensione minore. Osserviamo invece l'immagine 2.2

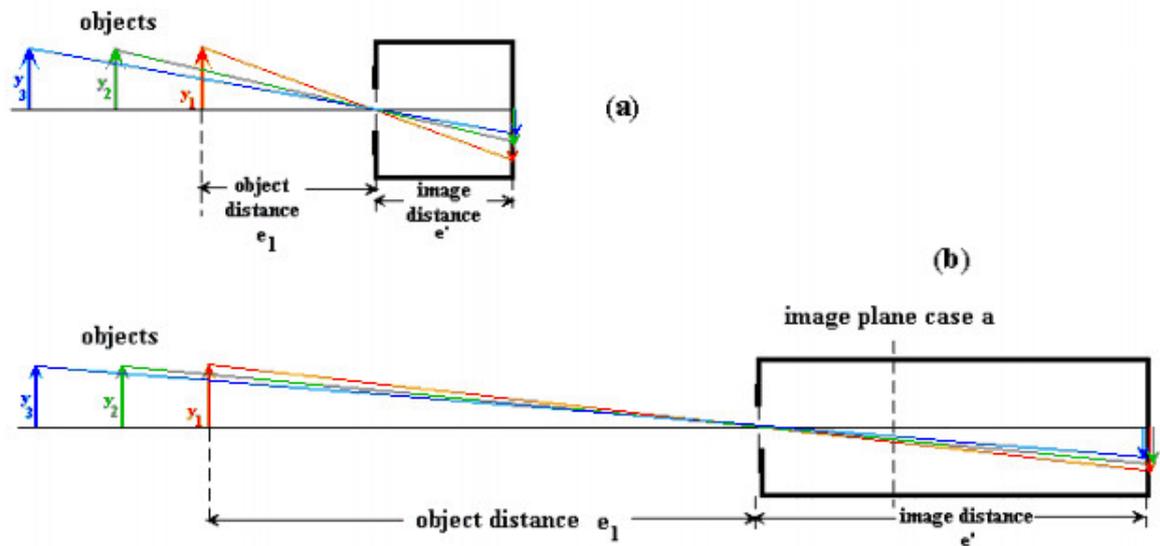


Figura 2.2: Prospettiva nel modello pinhole

Nell'immagine 2.2(b) la distanza e_1 è 3.5 volte la medesima distanza nell'immagine 2.2(a); questo vale anche per quanto riguarda il rapporto $\frac{e'}{e_1} = 3.5$.

Come si può vedere la dimensione degli oggetti proiettati sul piano immagine è uguale; si può quindi dedurre che il rapporto tra le dimensioni dell'immagine dell'oggetto e dell'oggetto stesso dipende esclusivamente dalla distanza di questi dal centro di proiezione.

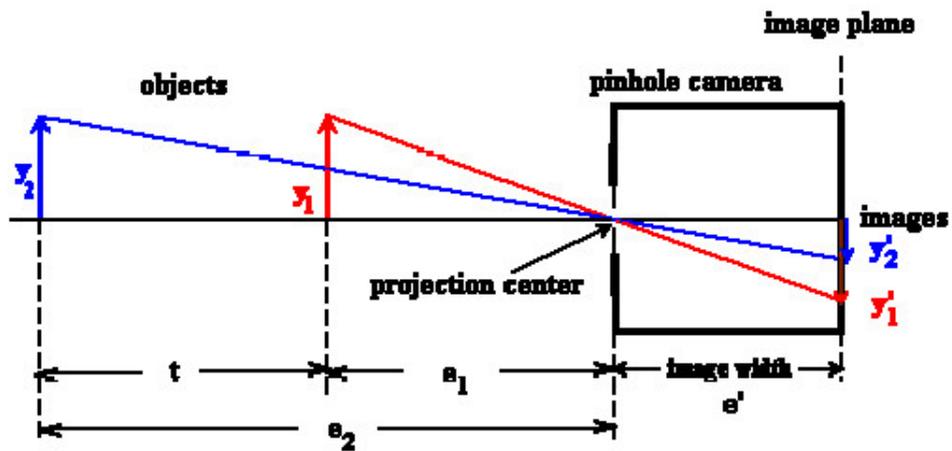


Figura 2.3: Relazioni tra le distanze

Espresso in termini matematici possiamo quindi dire che

$$\frac{y'_1}{y_1} = \frac{e'}{e_1}$$

$$\frac{y'_2}{y_2} = \frac{e'}{e_2}$$

Se le dimensioni degli oggetti sono uguali risulta che

$$\frac{y'_1}{y'_2} = m = \frac{e'_2}{e'_1} \quad (2.1)$$

ovvero che le dimensioni delle immagini di oggetti della stessa dimensione sono inversamente proporzionali alla loro distanza dal centro di proiezione.

Inoltre, sempre guardando l'immagine possiamo dire che, definendo

$$t = e_2 - e_1 = y'_1 m - y'_1$$

abbiamo che

$$e_1 = \frac{t}{m - 1}$$

$$e_2 = \frac{mt}{m - 1}$$

da cui si ricava

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{t + e_1}{e_1} \quad (2.2)$$

Facendone ora il limite per e_1 tendente a ∞ si ottiene che

$$\lim_{e_1 \rightarrow \infty} \frac{e_2}{e_1} = \lim_{e_1 \rightarrow \infty} \frac{t + e_1}{e_1} = 1 \quad (2.3)$$

Questa è la condizione che otteniamo utilizzando un obiettivo telecentrico. Ovviamente il raggiungimento di questo risultato è possibile esclusivamente con l'utilizzo di particolari lenti. Infatti, guardando le immagini sopra e le equazioni appena scritte, è facile vedere come la distanza dal centro di proiezione vada ad influire in maniera pesante sulla dimensione dell'immagine. Con la distanza tendente all'infinito, infatti, le dimensioni degli oggetti proiettati sul piano immagine tenderebbero a zero.

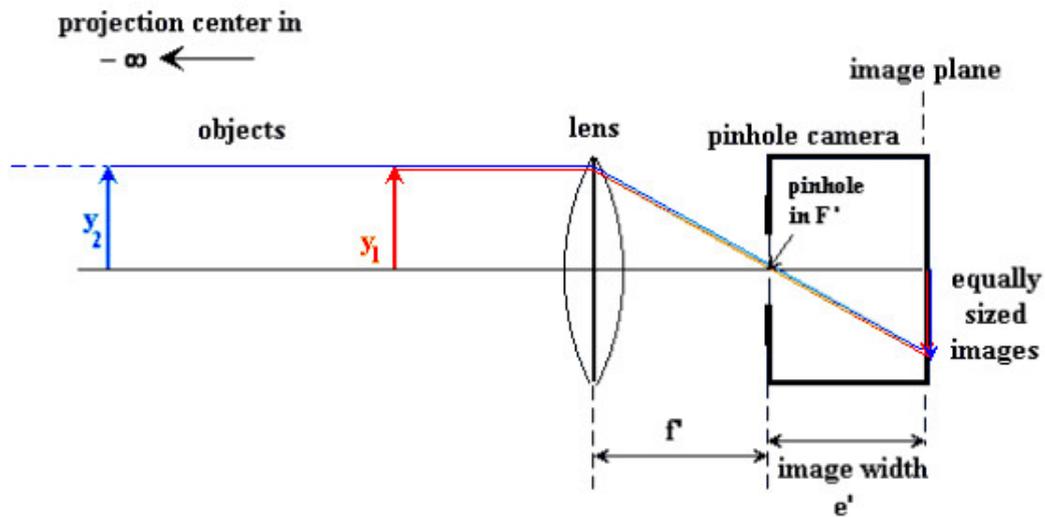


Figura 2.4: Principio di funzionamento di un ottica telecentrica

Come si può vedere da questa immagine, con l'utilizzo di una lente telecentrica solo i raggi paralleli all'asse di simmetria della camera oscura passano attraverso il foro stenopeico. In questa maniera i centri di proiezione diventano due; uno, quello situato dalla parte dell'oggetto, che giace all'infinito, mentre l'altro che giace ad una distanza e' dal piano immagine.

Questa situazione viene chiamata prospettiva telecentrica.

2.1 Il modello lineare

L'esperimento di cui si è appena parlato può essere descritto matematicamente come una trasformazione rotazionale che mappa ogni punto (l'oggetto) in un altro punto (rappresentato da l'intersezione con il piano immagine).

In pratica possiamo rappresentarlo geometricamente come una linea che collega il punto rappresentante l'oggetto con il punto che

si forma con l'intersezione della linea stessa con il piano immagine; la linea deve ovviamente passare per il centro di proiezione.

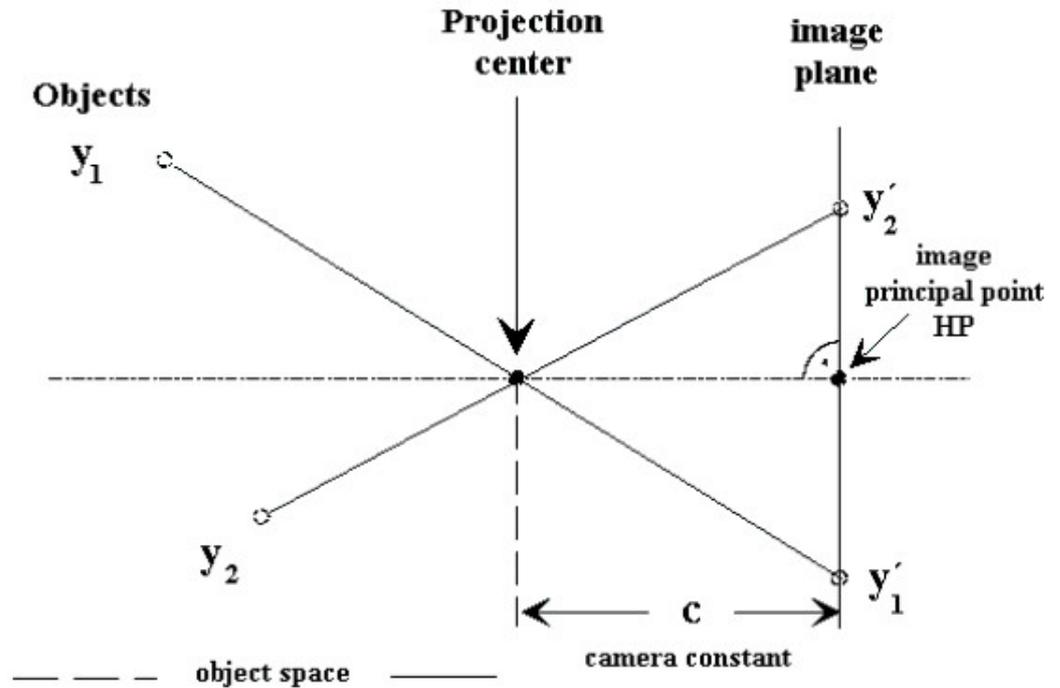


Figura 2.5: Modello della trasformazione rotazionale

Come si può vedere dall'immagine (2.5) e si può capire osservando il sistema, la normale passante per il centro di proiezione rappresenta l'asse per la trasformazione. Quindi ogni punto nello spazio degli oggetti viene mappato su un punto nello spazio immagine.

Da come si può intuire, però, non vale il contrario; infatti ogni punto nello spazio immagine può essere l'immagine di infiniti punti nello spazio degli oggetti, e, più precisamente, può essere l'immagine

di tutti i punti che giacciono sulla retta passante per il punto stesso e il centro proiezione.

Questo modello matematico rappresenta certamente un' approssimazione che non può valere in contesto reale; infatti il centro di proiezione viene modellizzato come un punto senza dimensioni, senza quindi contare la reale larghezza dell'apertura dove passano i raggi di proiezione.

Inoltre bisogna anche considerare la natura stessa di questi raggi; stiamo parlando di onde elettromagnetiche con una loro energia e che rispondono a determinate leggi di propagazione e che subiscono una serie di effetti dovuto a diffrazioni e rifrazioni.

Per questa motivazione introduciamo le leggi dell'ottica gaussiana.

2.2 Ottica gaussiana

2.2.1 Approssimazione parassiale

Come prima approssimazione possiamo considerare i raggi elettromagnetici come raggi di luce, ossia raggi con una lunghezza d'onda molto piccola (all'incirca 0.5 μm). Questi raggi rispondono alle leggi di diffrazione.

La legge della diffrazione è non lineare (infatti vale la relazione di Snell $n \sin \alpha = n' \sin \alpha'$); possiamo tuttavia considerare solamente i raggi che formano un angolo piccolo con la normale alla superficie della lente.

In questo caso $\sin \alpha = \alpha$, e quindi possiamo considerare la trasformazione lineare.

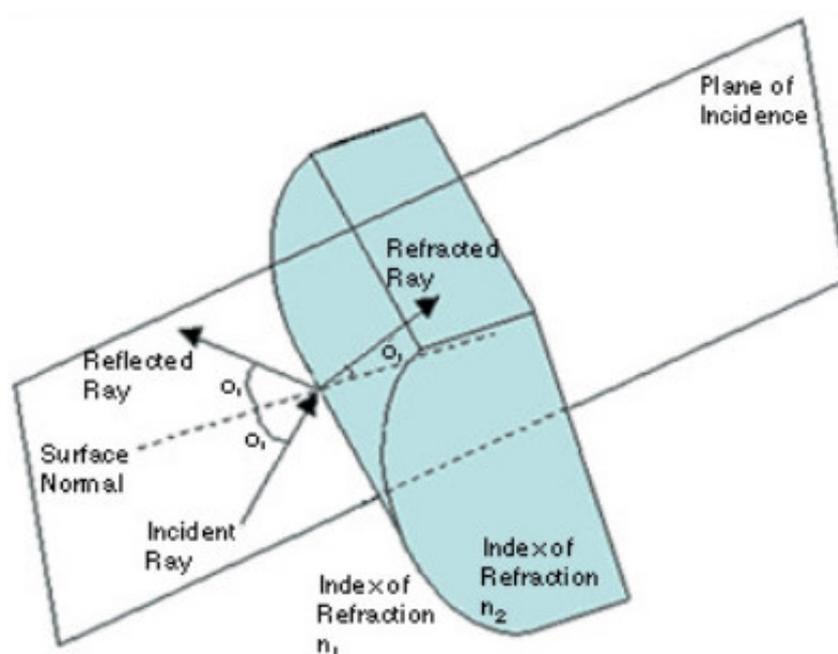


Figura 2.6: Legge di Snell

Nella realtà, inoltre, a causa dell'apertura con dimensione finita, non si possono più considerare raggi di propagazione, bensì fasci di raggi; questi passano per l'apertura e subiscono un fenomeno di diffrazione come abbiamo appena visto.

E' comunque possibile imporre un ulteriore vincolo, ossia quello di considerare l'apertura con una dimensione finita, ma comunque abbastanza piccola. Come conseguenza si ottiene che i fasci di raggi acquisiscono un'importante caratteristica, ossia l'omocentricità. Questo significa che i raggi appartenenti allo stesso fascio convergono in un punto; questo rappresenterà l'immagine dell'oggetto nello spazio immagine.

Tutto questo è comunque causato dalla approssimazione lineare studiata ad inizio capitolo, e quindi vale esclusivamente per angoli di rifrazione piccoli.

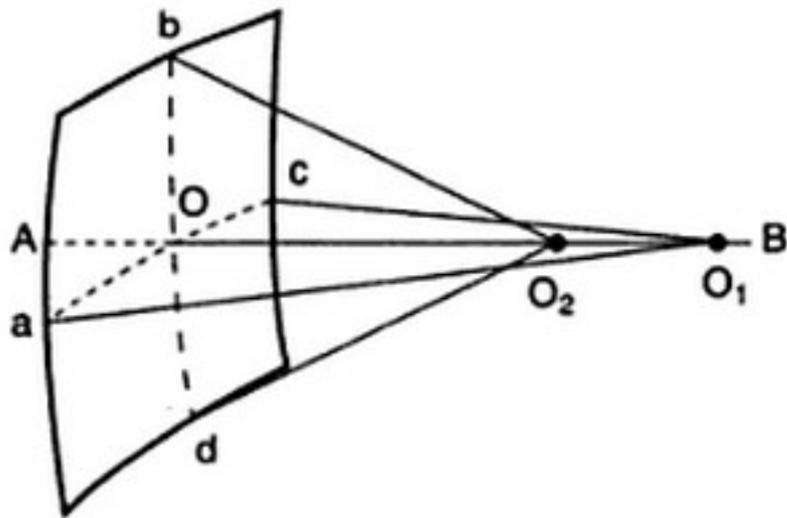


Figura 2.7: Esempio di raggi omocentrici

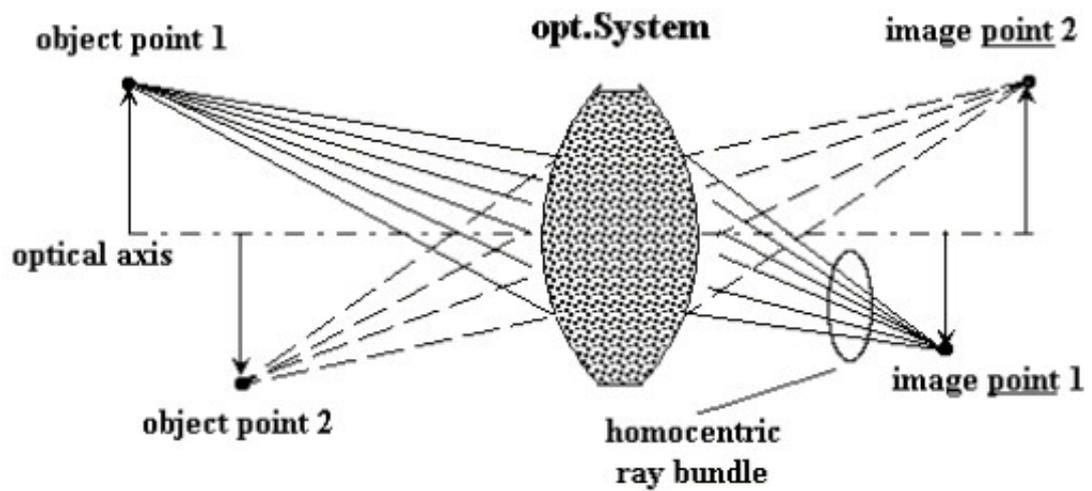


Figura 2.8: Raggi omocentrici nella formazione della immagine

Lo spazio fisico nel quale è possibile compiere questo viene chiamato **regione parassiale**. Questa approssimazione, chiamata approssimazione parassiale è l'aspetto fondamentale nell'ottica gaussiana ed è necessaria affinché valgano i principi che andremo a descrivere in seguito

2.2.2 Elementi cardinali nell'ottica gaussiana

Vediamo ora quali sono gli elementi cardinali e come avviene la costruzione dell'immagine nell'ottica gaussiana.

Con riferimento all'immagine (2.9) definiamo quindi:

Assi ottici (optical axis): queste è la linea perpendicolare alla superficie della lente passante per il suo centro.

Piani principali H e H': piani situati nello spazio degli oggetti e nello spazio immagine che sono coniugati tra di loro e che comportano un ingrandimento unitario e positivo.

Due piani si dicono coniugati quando i raggi che partono da entrambi i piani convergono nel medesimo punto.

Punti focali F e F': punti di intersezione tra l'asse ottico e la linea che congiunge l'intersezione tra il piano H' e la linea parallela all'asse ottico che parte dall'oggetto nello spazio degli oggetti con il punto di convergenza dei raggi omocentrici nel caso del punto F' e la linea che congiunge l'intersezione tra il piano H e la linea parallela all'asse ottico che parte dal punto di convergenza dei raggi omocentrici e la posizione dell'oggetto nello spazio degli oggetti nel caso del punto F.

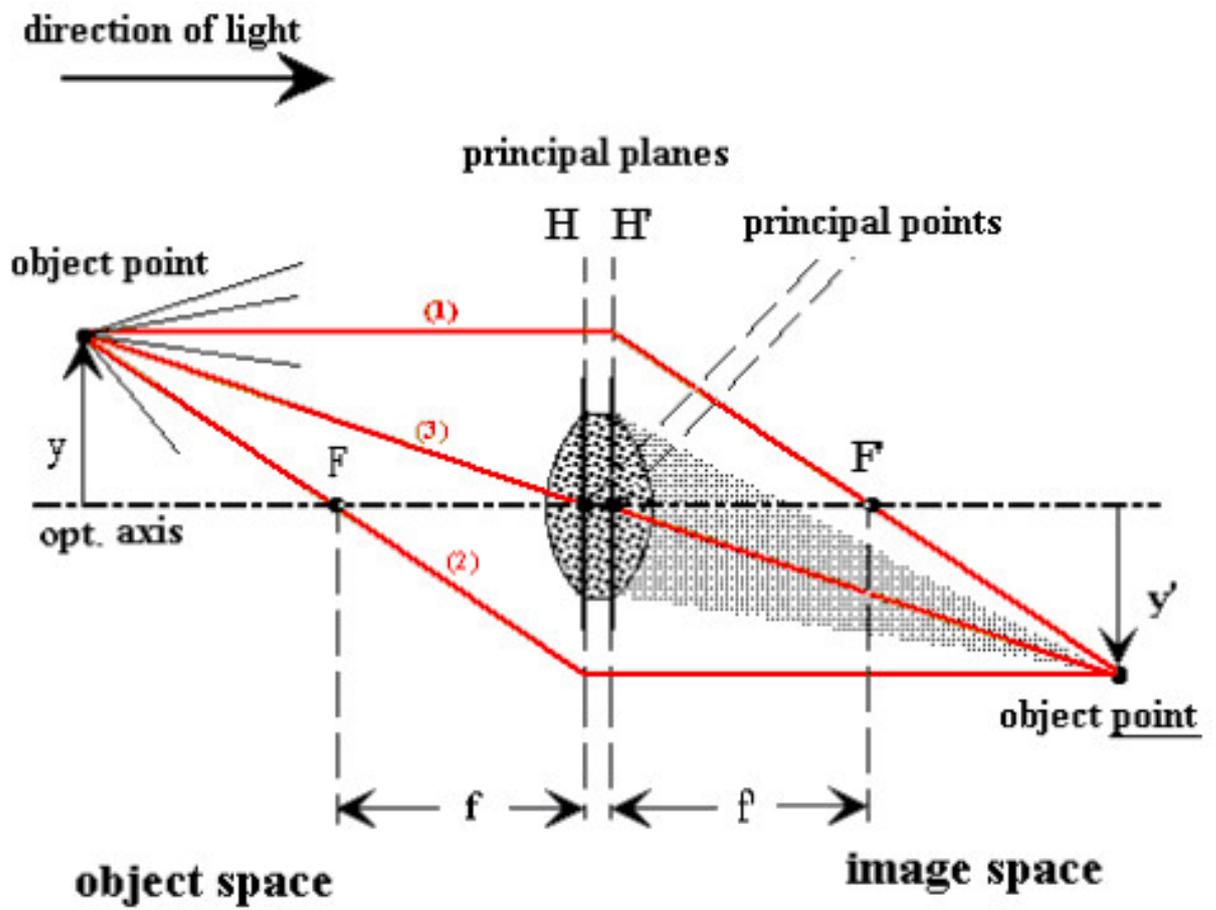


Figura 2.9: Elementi cardinali

Lunghezza focale f e f' : rappresentano la distanza HF e $H'F'$; vengono chiamate lunghezza focale frontale (**front-focal length**) e lunghezza focale posteriore (**back-focal length**). Queste due lunghezze sono fondamentali nel campo dell'ottica, in quanto indicano i punti dove convergono i raggi sia nel piano proiezionale che nel piano focale.

Questi elementi permettono di caratterizzare i raggi che verranno considerati nei sistemi in studio.

2.2.3 Stop e pupille

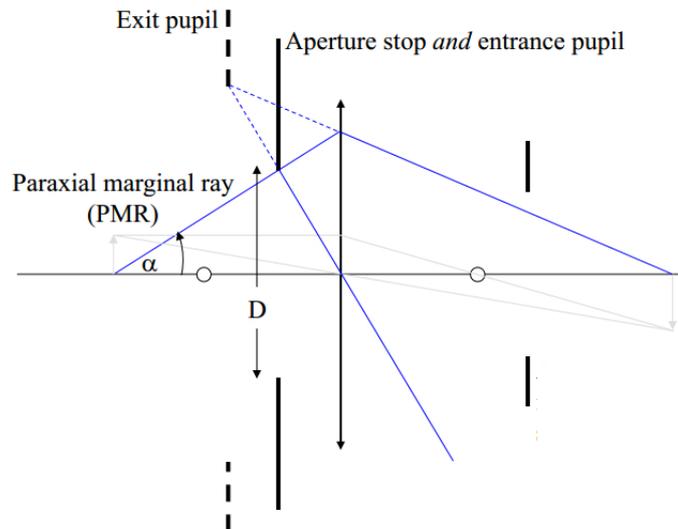


Figura 2.10: Stop e pupille nel modello teorico

In un qualsiasi sistema ottico il numero di raggi che lo possono attraversare per andare a formare l'immagine è limitato di numero.

Ciò che limita i raggi passanti viene chiamato stop di apertura (aperture stop), mentre ciò che limita la regione del piano focale che accoglie i raggi viene chiamato stop di campo (field stop).

Dagli stop di apertura e di campo si passa invece alle pupille di entrata (**entrance pupil**) e le pupille di uscita (**exit pupil**), che rappresentano, invece, rispettivamente l'immagine dello stop di apertura prodotta dalla parte del sistema ottico che lo precede e l'immagine dello stop di apertura del sistema ottico che lo segue.

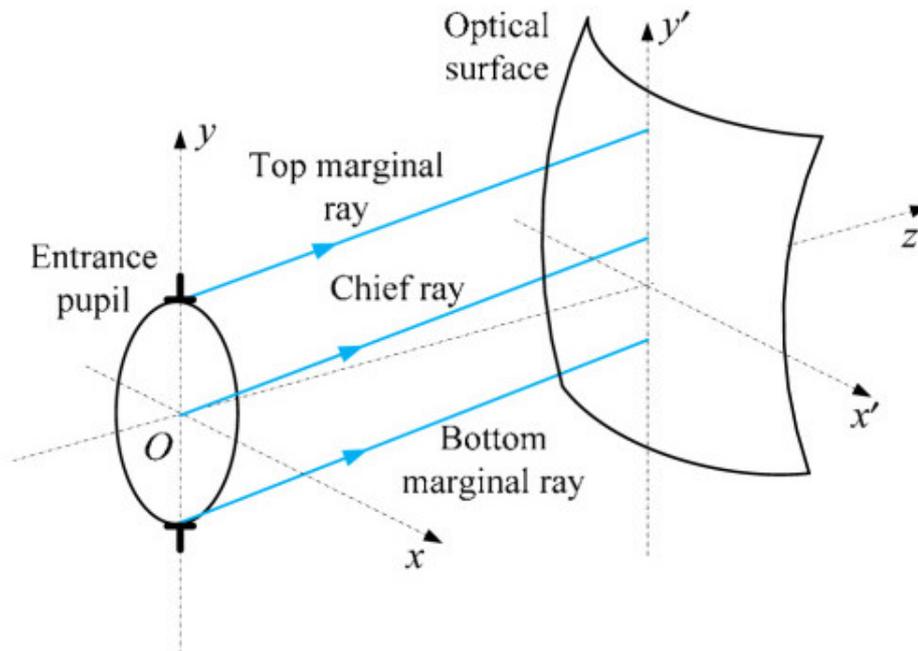


Figura 2.11: Percorso dei raggi ottici

I **raggi marginali** dell'immagine soprastante rappresentano il limite del pennello di raggi che possono entrare nella pupilla di entrata e che possono uscire dalla pupilla di uscita. Il raggio centrale

del pennello viene chiamato **raggio principale** e procede dall'oggetto fino al centro della pupilla di entrata e dal centro della pupilla di uscita fino all'immagine.

2.3 Parametri fondamentali

2.3.1 Rapporto di ingrandimento e f-number

Definiamo ingrandimento angolare il rapporto tra il diametro della pupilla di uscita e il diametro della pupilla di entrata

$$\beta_P = \frac{d_{XP}}{d_{EP}} \quad (2.4)$$

Abbiamo già visto definendo gli elementi cardinali dell'ottica gaussiana cosa sia la lunghezza focale. Considerando quindi f' (chiamato lunghezza focale effettiva) definiamo quindi l'**f-number** K come

$$K = \frac{f'}{d_{EP}} \quad (2.5)$$

Questo rappresenta il cono di raggi che raggiunge l'immagine e viene considerato un numero molto importante in quanto da informazioni su due elementi principali, ossia la distanza dell'oggetto dall'obiettivo e il fascio di raggi che andranno a formare l'immagine.

E' utile anche definire l'**f-number effettivo** K_e come

$$K_e = \frac{e'}{d_{EP}} = K \left(1 - \frac{\beta}{\beta_P}\right) \quad (2.6)$$

In pratica possiamo dire che l'**f-number** nominale K equivale all'**f-number** effettivo quando la lente è focalizzata all'infinito.

Alternativamente si può usare l'apertura numerica che però non tiene in considerazione la distanza dell'oggetto; questa è definita come

$$A = n \sin \alpha \quad (2.7)$$

Solo nel caso in cui $n = 1$ e l'oggetto si trovi a distanza infinita vale la relazione (che o vedremo essere molto utile nell'ottica telecentrica)

$$K = \frac{1}{2A} \quad (2.8)$$

L'aspetto fondamentale che comunque notiamo e che rappresenta il vero motivo dello studio dell'ottica gaussiana applicata alle lenti telecentriche è che in questo caso i centri di proiezione sono diventati due. Infatti i raggi convergono al punto P della pupilla di entrata e nel punto P' della pupilla di uscita.

Quindi tutta l'ottica Gaussiana può essere descritta da due sistemi di coordinate, uno "lato oggetto" con centro il punto P e l'altro "lato immagine" con centro lato P'.

Valgono le relazioni:

$$e' = f'(\beta - \beta_P) \quad (2.9)$$

$$e = f'\left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_P}\right) \quad (2.10)$$

Da cui segue che

$$e'e = \beta\beta_P \quad (2.11)$$

Inoltre si ha che

$$\frac{\tan \omega}{\tan \omega'} = \beta_P \quad (2.12)$$

con β che rappresenta il rapporto di ingrandimento e vale

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (2.13)$$

2.3.2 Profondità di campo

Un altro aspetto importante che deriva dalla non idealità del sistema, e principalmente causato dai fenomeni di diffrazione è il cerchio di confusione. Con questo termine si va ad indicare il cerchio di dimensione minima che l'uomo riesce a distinguere, ed è un parametro fondamentale per determinare la nitidezza dell'immagine. Infatti i raggi, a causa appunto della diffrazione, vengono visti come un cono di luce, avendo quindi come effetto quello di bassa nitidezza.

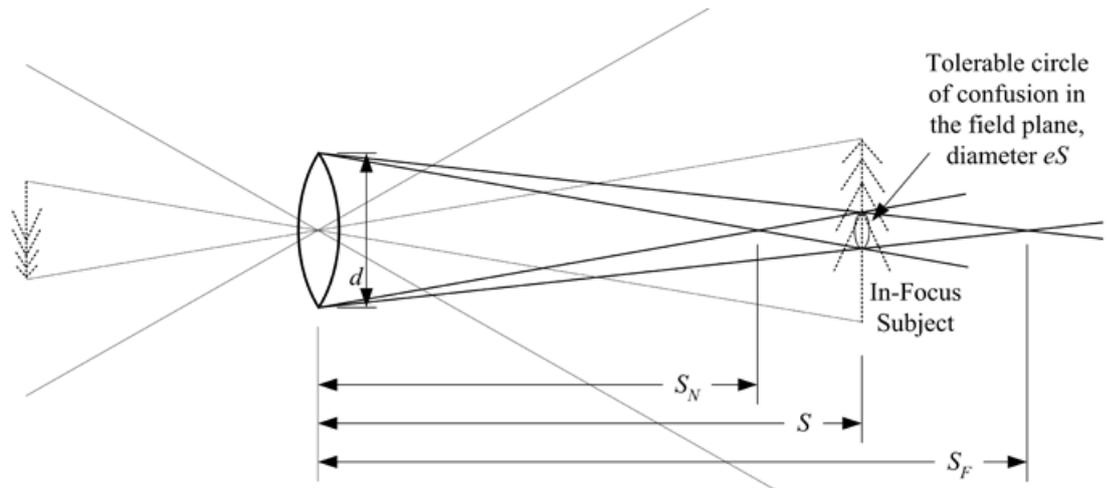


Figura 2.12: Profondità di campo

Questo fenomeno viene rappresentato da un parametro fondamentale, la profondità di campo, che rappresenta la distanza massima per la quale si riesce a vedere un'immagine nitida.

Possiamo esprimere la profondità di campo come

$$T = \frac{2f'^2 d'_G K (e + \frac{e'}{\beta_P}) e}{f'^4 - d_G'^2 K^2 (e + \frac{e'}{\beta_P})^2} \quad (2.14)$$

Esistono varie approssimazioni che dipendono principalmente dalla distanza e dell'oggetto; inoltre si nota la dipendenza dal f-numero K e dalla lunghezza focale. Come vedremo in seguito la profondità di campo è un parametro molto importante nello studio delle ottiche telecentriche, in quanto ci permetterà di calcolare la bontà della telecentricità di una determinata lente. Lo spazio che viene visto dall'obbiettivo prende il nome di **vista di campo (Field Of View)**.

2.4 Distorsioni

Tutto quello che abbiamo visto fino ad adesso è valido fintanto che i raggi rimangono confinati nella regione parassiale.

Infatti questo ci ha permesso di approssimare al primo ordine il polinomio dello sviluppo del seno nell'equazione di Snell. Ovviamente questo non è sempre valido nel modello reale, comportando una serie di effetti che vengono chiamati **aberrazioni**.

Sarebbe possibile calcolare analiticamente questo fenomeno, ma ciò richiederebbe di conoscere esattamente la dimensione della regione parassiale; a questo punto sarebbe possibile determinare quanti raggi escono da tale regione e quindi quanto l'immagine si discosta da quella considerata fino ad adesso. Naturalmente questa è un'opera-

zione troppo complessa e necessiterebbe di una notevole quantità di lavoro.

Seidel è riuscito a semplificare questo processo, sfruttando principalmente la simmetria del sistema ottico, ed è riuscito a categorizzare le varie aberrazioni; per questa motivazione queste vengono chiamate **aberrazioni di Seidel**.

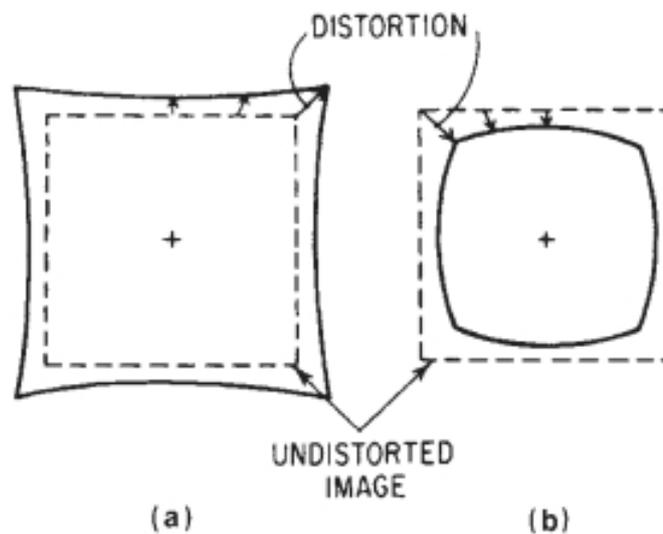


Figura 2.13: Diversi tipi di distorsione

Una di queste aberrazioni è la **distorsione**; questa è definita come la differenza (espressa come percentuale) tra la distanza tra l'immagine reale ed il centro e la medesima calcolata quando il sistema è in assenza di distorsione. In pratica rappresenta lo sfasamento dell'altezza dell'immagine rispetto alla regione parassiale, e si calcola in rapporto all'altezza ideale dell'immagine che, per un oggetto

posto all'infinito, vale $h' = f \tan \theta$.

Normalmente la distorsione aumenta con l'aumentare dell'altezza della immagine, e più precisamente è direttamente proporzionale al quadrato della stessa.

2.5 Applicazione del modello gaussiano con il modello lineare

Avendo visto che nel modello gaussiano si hanno due centri di proiezione, è lecito domandarsi come questo si possa applicare al sistema studiato inizialmente; infatti abbiamo visto come questo, in realtà, sia descritto correttamente dal modello lineare, senza però considerare gli aspetti reali appena citati.

Questo può essere fatto andando a riconsiderare il centro di proiezione nel piano dell'immagine. Bisogna considerare l'angolo del raggio principale ω , che si forma con l'intersezione con la normale alla superficie della lente; generalmente abbiamo però che ω' è diverso da ω .

Dobbiamo quindi scegliere il centro di proiezione nel piano dell'immagine in modo che gli angoli dei raggi principali siano uguali sia nel piano degli oggetti che nel piano dell'immagine.

Espresso in termini matematici dobbiamo avere un centro di proiezione P^* tale che

$$\omega = \omega_P \quad (2.15)$$

Si ottiene quindi come risultato che

$$c = \frac{y'e}{y} = \beta\beta_P \quad (2.16)$$

con

$$\tan \omega = \frac{y}{e} = \tan \omega_P = \frac{y'}{c}$$

Questo sta a significare che la distanza dell'oggetto dal centro di proiezione viene adattata nel piano dell'immagine.

Il concetto che sta alla base consiste nell'adattare la posizione del centro di proiezione nel piano dell'immagine con la dimensione dell'immagine stessa.

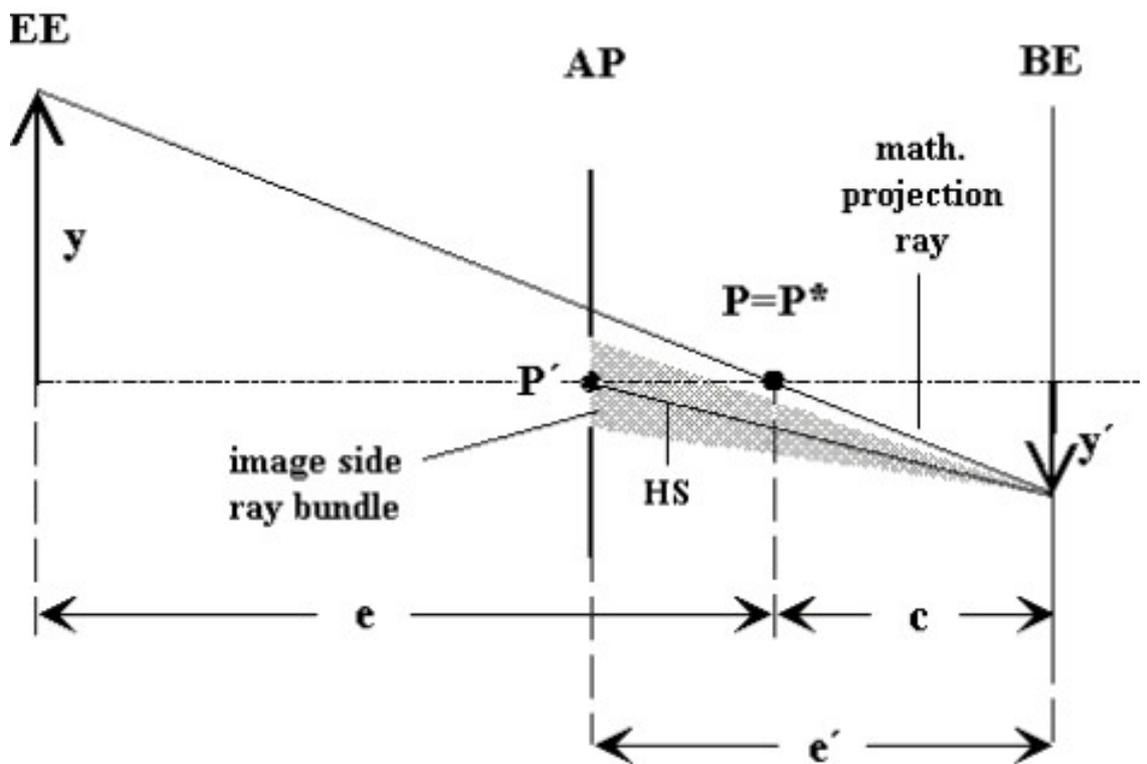


Figura 2.14: Leggi di Gauss nel modello pinhole

In pratica se l'immagine ha un ingrandimento β , bisogna cam-

2.5. APPLICAZIONE DEL MODELLO GAUSSIANO CON IL MODELLO LINEARE 29

biare la distanza e del centro di proiezione in modo che i raggi ω e ω_P abbiano la stessa angolazione.

Il centro di proiezione comune è $P = P^*$ e la sua distanza dal piano dell'immagine equivale alla distanza c del modello lineare.

Si ha, quindi, che

$$c = e\beta = f' \left(1 - \frac{\beta}{\beta_P}\right) \quad (2.17)$$

Capitolo 3

Lenti telecentriche

Vediamo ora come applicare il modello matematico appena studiato nella analisi delle ottiche telecentriche.

Considereremo in principio lenti telecentriche nelle quali la proprietà di telecentricità è realizzata nel piano focale, in quanto è il caso di studio più semplice e che permette di capire meglio come è possibile descrivere questo fenomeno. Esistono comunque altri tipi di lenti telecentriche, ossia quelle in cui la proprietà di telecentricità si sviluppa nel piano dell'immagine, oppure le lenti bitelecentriche, ovvero telecentriche sia lato oggetto che lato immagine.

3.1 Modello teorico di Gauss nelle ottiche telecentriche

Come si è già visto nel capitolo precedente, in un sistema telecentrico il centro di proiezione, e quindi la pupilla di entrata deve essere posizionata all'infinito.

Nell'applicazione del modello gaussiano, in pratica, questo è rappresentato del punto P.

Questo può essere fatto agendo sulla posizione dello stop di apertura, e fare quindi in modo che la pupilla di entrata (che ricordiamo essere l'immagine dello stop di apertura visto dal sistema focale che le precede) venga vista come tendente all'infinito dal sistema stesso.

Per fare questo basta posizionare lo stop di apertura nella posizione del punto focale f' del piano delle immagini.

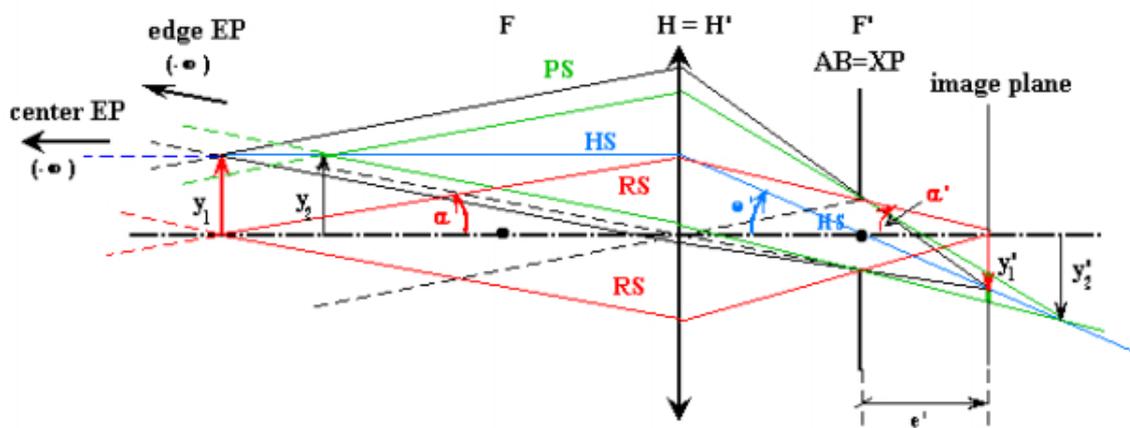


Figura 3.1: Posizione dello stop di apertura

In questa maniera lo stop di apertura è la pupilla di uscita e la pupilla di entrata vista dal piano degli oggetti è a distanza infinita ed è infinitamente grande.

Risulta quindi che

3.1. MODELLO TEORICO DI GAUSS NELLE OTTICHE TELECENTRICHE33

$$\beta_P = \frac{d_{XP}}{d_{EP}} = 0 \quad (3.1)$$

Come si può vedere dall'immagine il raggio principale (la linea blu) è parallelo all'asse ottico; questo passa dalla lente, poi dal centro della pupilla di uscita XP (che rappresenta lo stop di uscita) e infine sul piano immagine. Come conseguenza si ha che, preso un piano immagine fissato, la dimensione dell'immagine è indipendente dalla distanza dell'oggetto dal centro di proiezione.

Risulta però un problema che si evince guardando l'immagine sopra riportata: i raggi marginali hanno un angolo di apertura α che dipende dalla dimensione dello stop di apertura. Ne consegue che le dimensioni della lente telecentrica devono essere molto grandi, e almeno pari alla dimensione dell'oggetto più la dimensione calcolata vedendo l'angolo di apertura dei raggi marginali.

Quindi applicando il modello gaussiano si ottiene che

$$e' = -f' \beta \quad (3.2)$$

$$e = \infty \quad (3.3)$$

$$\frac{\tan \omega}{\tan \omega_P} = \beta_P = 0 \quad (3.4)$$

$$c = f' \left(1 - \frac{\beta}{\beta_P}\right) = \infty \quad (3.5)$$

Vediamo ora quanto valgono i parametri che abbiamo visto nel capitolo precedente. Partiamo innanzitutto dalla profondità di campo; il parametro $(1 - \frac{\beta}{\beta_P})$ risulta tendente all'infinito. Possiamo però riscrivere la formula come

$$T = \frac{2d'K(1 - \frac{\beta}{\beta_P})}{\beta^2} = \frac{2d'f'(\frac{1}{D_{EP}} - \frac{\beta}{D_{AP}})}{\beta^2}$$

Facendone ora il limite per $D_{EP} \rightarrow \infty$ otteniamo

$$\lim_{D_{EP} \rightarrow \infty} T = \frac{-2f'd'}{D_{AP}\beta} \quad (3.6)$$

3.2 Vantaggi nell'utilizzo di lenti telecentriche

Abbiamo appena visto come possiamo esprimere attraverso le leggi di Gauss le ottiche telecentriche. Vediamo ora quali sono i vantaggi che comportano l'uso di tali lenti e gli ambiti di utilizzo nei vari settori industriali.

3.2.1 Ingrandimento costante

L'ingrandimento costante, come già detto durante questa tesi è il motivo principale che ha portato all'aumento dell'utilizzo di lenti telecentriche in ambito industriale.

Infatti, in ambiti come la visione artificiale o il controllo automatico, il problema dell'ingrandimento non costante gioca un ruolo fondamentale.

Solitamente per risolvere tali problemi erano necessarie continue calibrazioni (a causa della relazione tra l'ingrandimento e la messa a fuoco, il **focus**); queste comportavano elaborazioni successive di notevole entità, e comunque portavano a grossi errori dovuti alla calibrazione di due parametri fisici contemporaneamente.

In precedenza abbiamo applicato il modello gaussiano nel caso in cui lo stop di apertura fosse posizionato sul piano focale f' , rea-

3.2. VANTAGGI NELL'UTILIZZO DI LENTI TELECENTRICHE 35

lizzando quindi una lente telecentrica. Il prossimo passo è quello di dimostrare il rapporto di ingrandimento costante tramite le leggi di Gauss.

Per far questo andiamo a riprendere le definizioni di f-number nominale e f-number effettivo. Come abbiamo già definito il primo dipende dalla lunghezza focale f' mentre il secondo dalla distanza effettiva e' del piano immagine dal centro di proiezione. Il rapporto di ingrandimento costante si può descrivere matematicamente vedendo come, nel caso degli obiettivi telecentrici, entrambi i numeri dipendano esclusivamente dalla lunghezza focale f' .

Questa invarianza può essere descritta come in questa maniera: il cono di raggi che passano dall'apertura è limitato dai raggi marginali e il raggio principale esce dallo stop di uscita parallelamente all'asse ottico. Se spostassimo il punto P, i raggi marginali che si formerebbero sarebbero comunque paralleli a quelli nel caso iniziale; in pratica questo comporta che l'f-number effettivo nel caso di ottiche telecentriche vale sempre $\frac{f'}{d_{EP}}$ come l'f-number nominale. Infatti la lente è focalizzata all'infinito, e i raggi marginali passano dalla pupilla di entrata per poi convergere sul punto focale ad una distanza f' .

Per capire numericamente questo fenomeno prendiamo l'immagine seguente.

L'angolo θ viene chiamato telecentric slope, e vale nelle più comuni lenti telecentriche all'incirca 0.1 gradi. La variazione di ingrandimento è calcolata, nel caso di lenti normali, dalla formula

$$dH = \frac{ds}{sH}$$

Per quanto riguarda invece le lenti telecentriche si ha che

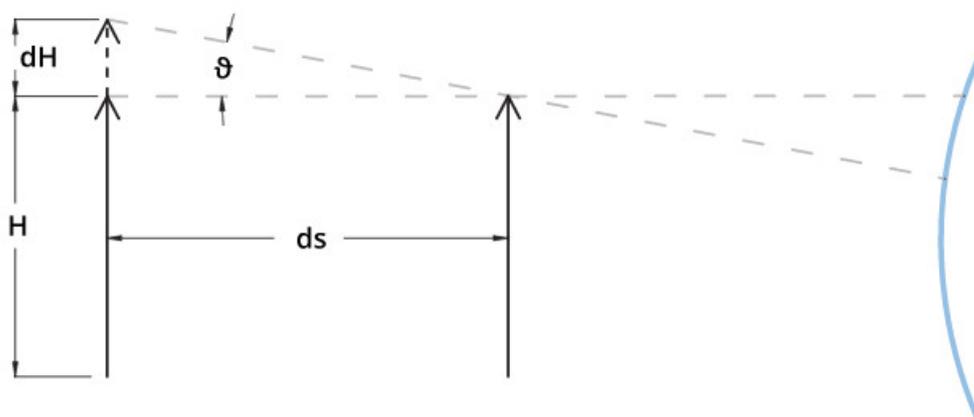


Figura 3.2: Telecentric slope

$$dH = ds\theta$$

Facendo un'esempio numerico, ad esempio con $H = 20mm$, $s = 200mm$ e $\theta = 0.1$ gradi si ha che nel primo caso $dH = 0.1mm$, mentre nel secondo caso $dH = 0.0017mm$. Risulta quindi, in generale, che l'errore dell'ingrandimento causato da lenti telecentriche risulta da 10 a 100 volte più piccolo rispetto alle normali lenti.

3.2.2 Luminosità costante

Il risultato appena ottenuto mette in luce un'altra caratteristica interessante degli obiettivi telecentrici; la luminosità rimane costante. Per vedere questo basta prendere l'equazione dell'irradiazione dell'immagine

$$E = L \frac{\pi \cos \omega'^4}{4 K_e} \quad (3.7)$$

Come si può vedere questa dipende dall'*f*-number effettivo e quindi dalla lunghezza focale effettiva. Abbiamo però appena descritto

3.2. VANTAGGI NELL'UTILIZZO DI LENTI TELECENTRICHE³⁷

nella sezione precedente come K_e nel caso di obiettivi telecentrici sia costante; in questa maniera pure E è costante (o comunque non dipende dalla distanza del piano focale).

L rappresenta la radianza della superficie nella direzione della lente, mentre w' rappresenta l'angolo del raggio principale con l'asse ottico.

3.2.3 Eliminazione dell'errore prospettico

Altro conseguenza, principalmente a causa del rapporto di ingrandimento costante è l'eliminazione dell'errore prospettico.

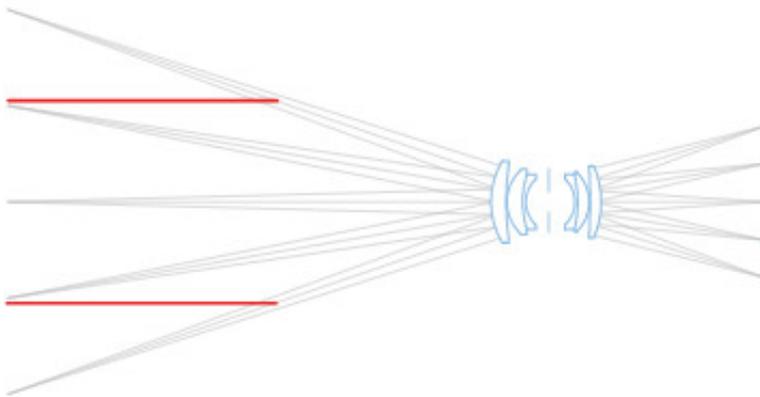


Figura 3.3: Le ottiche non telecentriche mantengono informazioni sulla posizione

Questo è causato principalmente dal percorso dei raggi, e dal ruolo che giocano i raggi marginali e principali con l'utilizzo di ottiche

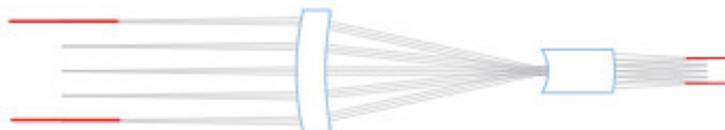


Figura 3.4: Le ottiche telecentriche non mantengono informazioni sulla posizione

telecentriche. In altre parole si ha che con gli obiettivi comuni la trasformazione che avviene è da uno spazio tridimensionale ad uno spazio bidimensionale; nel caso invece degli obiettivi telecentrici la componente spaziale che determina la profondità non è considerata.

3.2.4 Bassa distorsione

La distorsione è un problema che ha una valenza molto importante nelle ottiche telecentriche. Infatti, per l'uso comune (che vedremo nella prossima sezione), ossia nell'ambito della misura, anche il più piccolo discostamento può causare dei problemi. Le ottiche telecentriche hanno tipicamente valori di distorsione piuttosto bassi, di poco inferiori allo 0.1%. Questo può essere migliorato ulteriormente mediante calibrazione della ottica; infatti la distorsione, dipendendo anche dalla distanza dell'oggetto dalla lente, può essere compensata agendo sulla distanza di lavoro.

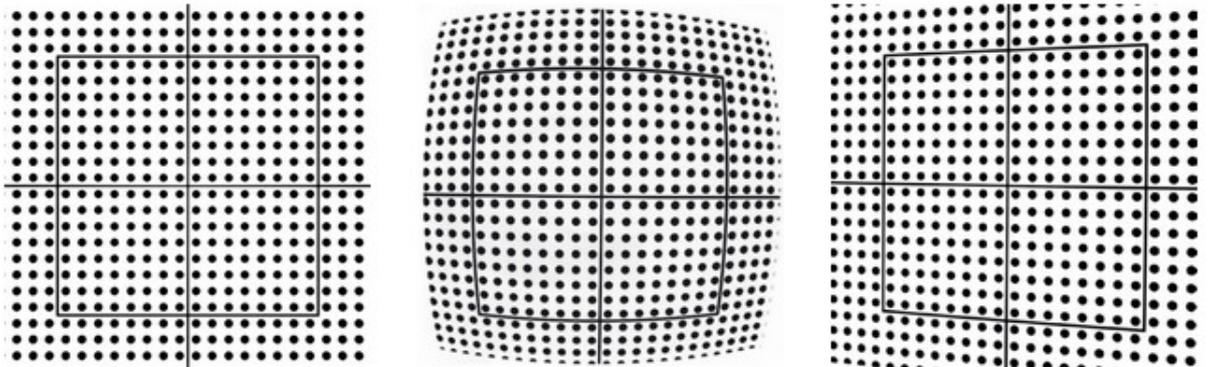


Figura 3.5: Differenza tra ottiche telecentriche (prima immagine) e ottiche normali. La seconda e la terza immagine rappresentano una distorsione dell'immagine del pattern di tipo rispettivamente radiale e trapezoidale

3.3 Ambiti di utilizzo

Sono svariati gli ambiti di utilizzo di obiettivi telecentrici. La maggior parte di essi, grazie alle caratteristiche descritte nella sezione precedente, riguardano principalmente sistemi di visione industriale.

Tra di essi i principali sono

- **controllo di qualità:** grazie all'eliminazione dell'errore prospettico, è possibile utilizzare tali obiettivi in linee di produzione per automatizzare il controllo di qualità di processi produttivi
- **metrologia:** questo è l'ambito di maggior utilizzo degli obiettivi telecentrici. Il riconoscimento di difetti fisici (come ad esempio anomalie di produzione) e delle imperfezioni è possibile con tali obiettivi senza l'ausilio di particolari algoritmi di elaborazione immagini posteriori.



Figura 3.6: Circuito elettronico misurato tramite un obiettivo telecentrico per rilevare imperfezioni

- **misurazione:** la misura di componenti meccaniche (ma anche elettroniche) si sposa perfettamente con i vantaggi descritti in questo capitolo. In ambito industriale, infatti, l'utilizzo di obiettivi telecentrici per determinare dimensioni di viti, ingranaggi e altri componenti meccaniche sta diventando sempre più d'uso comune.
- **misurazione componenti elettroniche:** anche la misurazione di componenti elettronici rientra nell'ambito di utilizzo di tali ottiche. Tra questi è inclusa la misurazione di transistor, celle solari o wafer di silicio per verificarne l'integrità

Sta prendendo sempre più peso l'utilizzo di lenti telecentriche anche nel settore della visione artificiale, in particolar modo per quanto riguarda edge detection, pattern recognition, o comunque tutti quegli ambiti nei quali le caratteristiche di invarianza dell'ingrandimento e della bassa distorsione possono essere sfruttate.



Figura 3.7: Esempio di obiettivo telecentrico usato per misurare componenti meccanici

Altre applicazioni, che citiamo esclusivamente per rendere l'idea della vastità di utilizzo di tali lenti sono

- analisi di particelle e controllo granulometrico
- controllo colorimetrico ad alta precisione delle stampe
- misura di maschere fotolitografiche
- controllo di filtri
- analisi di cellule sanguigne e conteggio delle cellule

Capitolo 4

Telecentric Zoom Revolver

Passiamo ora alla seconda parte di questo elaborato di tesi, nella quale descriverò il mio progetto di collaborazione con la ditta Opto Engineering di Mantova. Questo capitolo sarà suddiviso principalmente in tre sezioni.

La prima rappresenta una descrizione del progetto. Cercherò di focalizzare l'elaborato sulle specifiche di progetto.

La seconda comprende una descrizione della parte elettronica dell'obiettivo, che comprende principalmente il driver per il controllo e l'automazione del revolver.

La terza, invece, riguarda la fase di test delle ottiche. Verranno illustrati metodi e risultati, descrivendo inizialmente i test comuni eseguiti per le ottiche; infine ci si concentrerà sui test sullo Zoom Revolver, analizzando i risultati ottenuti.

4.1 Descrizione del progetto

Il Telecentric Zoom Revolver è un obiettivo telecentrico formato da quattro ottiche.

Il principio che sta alla base è quello di avere in un unico obiettivo quattro lenti diverse con altrettanti diversi ingrandimenti. Ciò che ha spinto la realizzazione di questo tipo di prodotto è stata



Figura 4.1: I 4 oculari sulla ruota che possono essere selezionati

la necessita di ottenere ingrandimenti diversi dallo stesso obiettivo senza il bisogno di continue ricalibrizioni e focalizzazioni.

Per ottenere questo risultato si è ripreso il principio delle famose pistole Revolver (da cui deriva il nome del prodotto); in pratica è

possibile meccanicamente selezionare l'ottica desiderata, in quanto le posizioni di queste ultime sono ripetibili.

La parte di controllo è gestita da un driver che rileva le posizioni delle ottiche e, tramite un solenoide, fornisce l'energia alla meccanica per selezionare quella desiderata.

I vantaggi quindi nell'utilizzo di tali obiettivi sono molteplici:

- mantenimento del fuoco con tutti gli ingrandimenti forniti dall'obiettivo
- il centro dell'immagine rimane costante; non si necessitano quindi ricalibrazioni quando viene cambiato l'ingrandimento
- ingrandimenti standard e ripetibili

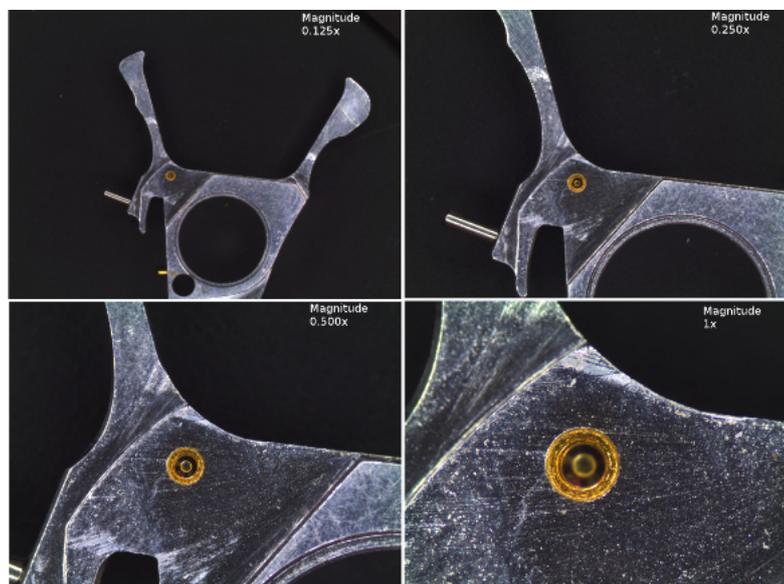


Figura 4.2: Braccio di un hard-disk meccanico attraverso i quattro ingrandimenti di un obiettivo TCZR72

Part number	TCZR 036				
Magnification	(x)	0.250	0.500	1.000	2.000
Object field of view					
with 1/3" detector (4.8 x 3.6)		19.2 x 14.4	9.6 x 7.2	4.8 x 3.6	2.4 x 1.8
with 1/2.5" detector (5.70 x 4.28)		22.8 x 17.1	11.4 x 8.5	5.7 x 4.2	2.8 x 2.1
with 1/2" detector (6.4 x 4.8)		25.6 x 19.2	12.8 x 9.6	6.4 x 4.8	3.2 x 2.4
with 1/1.8" detector (7.13 x 5.37)		28.5 x 21.4	14.2 x 10.7	7.1 x 5.3	3.5 x 2.6
with 2/3" - 5 Mpx detector (8.45 x 7.07)		33.7 x 28.2	16.8 x 14.1	8.4 x 7.0	4.2 x 3.5
Optical specifications					
WD	(mm)	68.0	...	...	...
f/# (1)		12	...	...	...
Telecentricity (2)	(deg)	< 0.05	...	...	...
Distortion	(%)	< 0.05	< 0.04	< 0.04	< 0.08
Field depth (3)	(mm)	11	2.8	0.7	0.2
CTF @ 70 lp/mm	(%)	> 40	> 35	> 40	> 35
Mechanical specifications					
Mount		C	...	...	...
Length	(mm)	218.0	...	...	...
Diameter	(mm)	79	...	...	...

Figura 4.3: TCZR36 Datasheet

Lo Zoom Revolver si presenta in due versioni distinte, che si differenziano per l'ingrandimento delle ottiche e per la field of view: queste sono il TCZR72 e il TCZR36. Entrambe forniscono un ingrandimento di 8x (rappresenta il rapporto tra il massimo e il minimo ingrandimento).

Part number	TCZR 072				
Magnification	(x)	0.125	0.250	0.500	1.000
Object field of view					
with 1/3" detector (4.8 x 3.6)		38.4 x 28.8	19.2 x 14.4	9.6 x 7.2	4.8 x 3.6
with 1/2.5" detector (5.70 x 4.28)		45.6 x 34.2	22.8 x 17.1	11.4 x 8.5	5.7 x 4.2
with 1/2" detector (6.4 x 4.8)		51.2 x 38.4	25.6 x 19.2	12.8 x 9.6	6.4 x 4.8
with 1/1.8" detector (7.13 x 5.37)		57.0 x 42.9	28.5 x 21.48	14.2 x 10.7	7.1 x 5.3
with 2/3" - 5 Mpx detector (8.45 x 7.07)		67.5 x 56.5	33.7 x 28.2	16.8 x 14.1	8.4 x 7.0
Optical specifications					
WD	(mm)	153.5	...	...	...
f/# (1)		12	...	...	...
Telecentricity (2)	(deg)	< 0.05	...	...	...
Distortion	(%)	< 0.1	< 0.08	< 0.05	< 0.07
Field depth (3)	(mm)	45	11	2.8	0.7
CTF @ 70 lp/mm	(%)	> 35	> 40	> 40	> 35
Mechanical specifications					
Mount		C	...	...	...
Length	(mm)	284.0	...	...	...
Diameter	(mm)	116	...	...	...

Figura 4.4: TCZR72 Datasheet

Questi sono i datasheet dei due Zoom Revolver.

Come possiamo vedere dalle tabelle gli ingrandimenti delle ottiche sono 0.125x, 0.250x, 0.5x e 1x per quanto riguarda il TCZR72, mentre sono 0.250x, 0.5x, 1x e 2x per il TCZR36.

Nella tabella è presente una distinzione delle field of view a seconda del detector utilizzato; ovviamente maggiore è l'ingrandimento minore sarà la corrispettiva field of view.

I detector utilizzati hanno tutti sensori con pixel di $6.45\mu m$; è quindi possibile calcolare la field of view andando a moltiplicare la dimensione del pixel per il numero di pixel.

Sempre nei datasheet si vedono alcuni parametri descritti nei capitoli precedenti. WD rappresenta la distanza di lavoro (**working distance**), ovvero la distanza tra l'oggetto e l'obbiettivo che garantisce la maggiore profondità di campo; possiamo inoltre veder descritti l'f-number, la telecentricità dell'ottica e la profondità di campo.

Come già visto in precedenza, la telecentricità è comunque garantita < 0.05 gradi, e quindi si ha la certezza che i raggi principali arrivino alla lente parallelamente.

Possiamo inoltre notare come la distorsione garantita sia molto bassa, inferiore al 0.04% nel caso peggiore; come si può vedere, dunque, i vantaggi espressi nei capitoli precedenti sono effettivamente verificati.

I datasheet sono stati creati utilizzando la lente con ingrandimento maggiore, quindi 2x nel caso del TCZR36 e 1x nel caso del TCZR72; in questa maniera si ha la certezza che le specifiche siano rispettate anche nel caso degli altri ingrandimenti.

4.2 Elettronica

La parte elettronica del progetto ha lo scopo di controllare il movimento meccanico del revolver.

Questa è composta principalmente da un driver che controlla un elettromagnete, il quale fornisce l'energia necessaria alla meccanica per muoversi e selezionare l'oculare desiderato. Abbiamo visto infatti come questi obiettivi permettono di avere quattro ingrandimenti (e quindi altrettante lenti) selezionabili dall'utente tramite una tastiera posizionata sull'obiettivo, oppure tramite computer via USB. Il funzionamento è in pratica il seguente: le lenti sono collegate ad



Figura 4.5: Solenoide e driver nel TCZR36

un perno che si muove su una ruota dentata. Questo, a seconda della sua posizione, va a determinare quale sia la lente (e quindi l'ingrandimento) disponibile.

La scheda elettronica è fondamentalmente formata da tre componenti.

La prima parte consiste in una scheda logica di controllo che ha lo scopo di interfacciare i vari componenti del circuito. In dettaglio controlla

- i sensori (per ricavare la posizione)
- il tasto centrale del tastierino posizionato sul corpo dell'obiettivo; questo permette di far muovere il perno e quindi andare a selezionare l'ingrandimento voluto.
- il driver del solenoide
- i led posti anch'essi sulla parte superiore dell'obiettivo; i led sono quattro ed identificano la posizione del perno (oltre che segnalare la presenza di errori, sia di posizionamento che circuitali)

La seconda parte invece ha la funzione di alimentazione/driver del solenoide.

Il suo scopo è quello di fornire l'alimentazione al solenoide stesso ed inviargli gli impulsi corretti per il funzionamento del circuito.

Queste due prime schede sono accoppiate tra di loro, in modalità piggy-back.

L'ultima parte, invece, contiene i sensori utilizzati per determinare la posizione del perno.



Figura 4.6: Driver, controller e scheda dei sensori

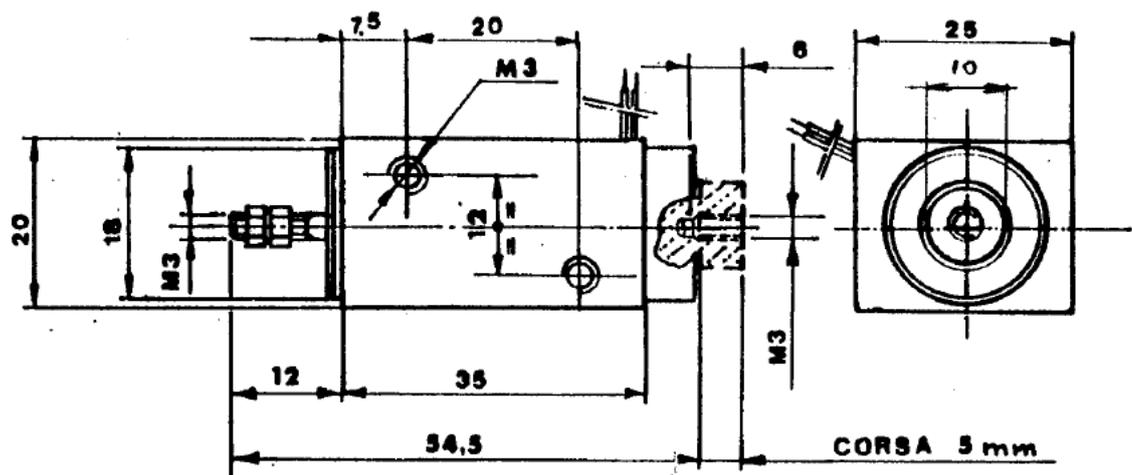


Figura 4.7: Circuito elettronico del solenoide utilizzato

Come abbiamo descritto sopra, il solenoide ha lo scopo di fornire l'energia al tamburo per muoversi e far girare il rototro contenente le lenti.

Il sistema non prevede un feedback della posizione, se non attraverso i sensori.

Questo vuol dire che l'energia fornita dall'elettromagnete deve essere sufficiente a far muovere il tamburo, ma nello stesso tempo non può essere arbitrariamente grande perchè si rischia che il sistema perda la posizione.

Quindi si è dovuto scegliere e calibrare bene la forza del solenoide stesso e i tempi degli impulsi forniti.

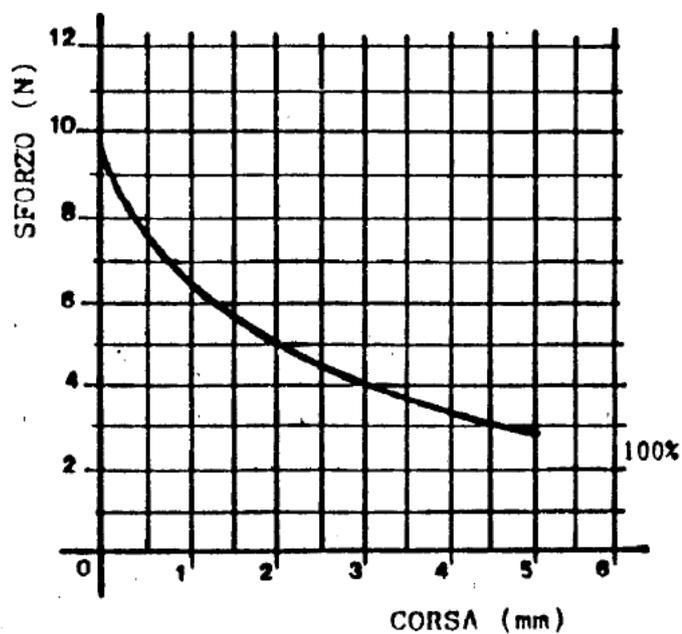


Figura 4.8: Sforzo del solenoide

L'elettromagnete utilizzato è a corrente continua di tipo **pull** (a spinta) e fornisce uno sforzo massimo di 10N.

4.2.1 Driver

La scheda adibita al controllo vero e proprio del sistema è la scheda del driver del solenoide. La funzione di questa parte è duplice: innanzitutto interfacciarsi con la scheda contenente i sensori di Hall e ricavare la posizione del rotore nel tamburo. A questo punto, una volta conosciuta la posizione attuale, e conoscendo la posizione del rotore (e quindi della lente) da selezionare, fornisce un comando al solenoide perchè possa fornire energia e muovere il perno nel tamburo.

Essendo l'elettromagnete il componente principale, il driver fornisce gli impulsi direttamente ad esso e tutte le azioni del software avranno come riferimento il controllo in tempo reale delle funzioni ad esso associate oltre che alla salvaguardia della integrità dello stesso. Innanzitutto sono state definite le specifiche riguardante l'impulso di comando da mandare all'elettromagnete.

- tre impulsi: t_1 , t_2 e t_3
- base dei tempi: 1 ms
- tempo massimo degli impulsi: 1000ms ($t_1 + t_1 + t_3$)

La base dei tempi di 1ms rappresenta in pratica il passo minimo degli impulsi.

L'impulso t_1 definisce il tempo a piena corrente; il suo valore è limitato dal valore ohmico della resistenza dell'avvolgimento (R_L), secondo la relazione $\frac{V_{in}}{R_L}$. La durata è imposta tramite un parametro



Figura 4.9: Driver del solenoide

programmabile sempre tramite USB.

Rappresenta in pratica un comando a piena potenza, come se il solenoide fosse direttamente collegato al generatore di tensione; serve a generare un campo magnetico sufficiente a spostare il perno all'interno del solenoide.

L'impulso t_2 definisce la durata della parte soft il cui controllo è effettuato con un segnale PWM per minimizzare l'energia e per non bruciare il solenoide stesso. Il segnale è unipolare a tre livelli (25%, 50%, 75%). In pratica il secondo tempo mantiene il campo magnetico, anche se fornisce ulteriore movimento; ovviamente serve molta meno energia, in quanto il movimento è quasi del tutto avvenuto durante il primo tempo.

Infine l'impulso t_3 definisce il tempo di OFF ed è anch'esso programmabile. Rappresenta la durata totale dei primi due impulsi; in caso si voglia attendere una pausa prima del successivo impulso basta aumentarne il valore.

Si può meglio capire il significato dei tre tempi appena descritti attraverso una metafora. Il sistema è molto simile alla situazione di un viaggio in bicicletta. Il primo tempo rappresenta la partenza da fermo in salita; servirà quindi molta energia, in quanto lo sforzo è molto grande.

Il secondo tempo, invece, rappresenta la pedalata in movimento una volta raggiunta la collina; ovviamente lo sforzo è molto minore e quindi serve molta meno energia.

Infine il terzo tempo rappresenta la discesa; non serve energia e la bicicletta scende la collina autonomamente.

Il driver fornisce una serie di funzioni i cui parametri sono programmabili tramite il collegamento USB e la cui gestione è affidata ad una DLL; ovviamente sono da ritenersi escluse le regolazioni manuali oltre che le variabili di emergenza che sono controllate a livello hardware. La programmazione è ad alto-livello; tali parametri sono salvati nella eeprom della scheda e sono quindi permanenti

Il circuito non prevede un sistema di feedback per la gestione degli errori; infatti essendo il sistema di movimento completamente meccanico (il perno agisce come attuatore), eventuali anomalie del circuito ne provocano il non funzionamento dell'obiettivo.

Questi errori riguardano principalmente la posizione del rotore e il movimento del perno; in caso fossero presenti il sistema genererà una serie di messaggi a video oltre che mediante l'utilizzo dei LED presenti sull'obiettivo. Le situazioni anomale saranno quindi segnalate mediante questi warning:

- **TRILLO**: definisce un impulso speciale di pre-funzionamento; tale comando imposta $t1=0$; $t2 = \text{parametro}(t2\text{trillo}) \cdot 25\%$ e $t3 = \text{parametro}(t3\text{trillo})$.
- **I2tmax**: Valore del parametro riguardante l'immagine termica, il cui superamento blocca il funzionamento del driver
- **VinWrong**: valore limite della tensione ingresso (sia valore massimo che minimo)
- **Impmax**: superamento del numero impulsi totali per il raggiungimento posizione ($N + Tolleranzamax$); in pratica non si riesce a stabilire una posizione coerente.
- **ErrPosiz**: definisce la situazione in cui non è possibile trovare una codifica PC/LED

4.2.2 Sensori e codifica

Come scritto precedentemente, una parte della scheda contiene i sensori per determinare la posizione del rotore contenente le lenti. Questi sono **sensori ad effetto Hall**; il principio di funzionamento si basa appunto sull'effetto Hall. Alla presenza di un campo magnetico, ai capi dei sensori si instaura una differenza di potenziale proporzionale al campo magnetico.

Le motivazioni che hanno spinto l'utilizzo di tali sensori sono sia economici che progettuali. Questi infatti garantiscono un corretto funzionamento anche in presenza di agenti esterni e sono ideali per lo scopo del progetto.

All'interno del tamburo sono presenti diversi magneti permanenti che identificano le quattro posizioni delle lenti corrispondenti agli

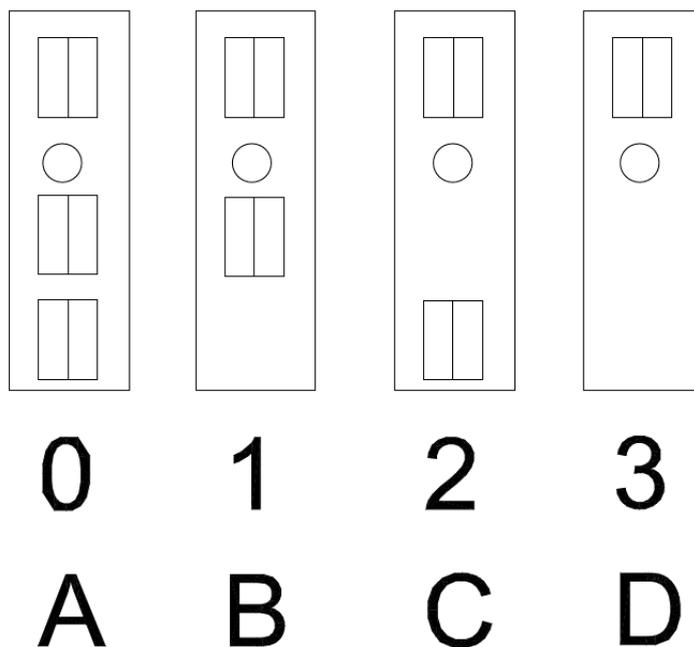


Figura 4.10: Codifica delle posizioni

ingrandimenti.

In pratica i sensori fungono da sensori di prossimità: quando si instaura una differenza di potenziale ai capi di essi, vuol dire che il tamburo in quel momento è in una posizione conosciuta, ossia una delle quattro posizioni sopracitate.

Ovviamente per lo scopo del progetto questo non è sufficiente; non basta capire che il tamburo sia una posizione coerente, ma bisogna anche determinare quale questa sia effettivamente.

Per questo basta una semplice codifica binaria; essendo quattro le posizioni da determinare, sono sufficienti $\log_2 4$ bit per poterle rappresentare univocamente.

Dalla figura possiamo vedere come sono state codificate le quattro posizioni delle lenti.

Sempre dalla figura vediamo come in realtà venga utilizzato un ulte-

riore bit che viene usato come **marker**; questo serve esclusivamente come bit di controllo per garantire la bontà della posizione e della codifica.

E' fondamentale capire che per il corretto funzionamento del sistema è necessario che il tamburo sia sempre in una posizione conosciuta, e per questa motivazione non è necessaria e non è prevista una situazione di reset. Può comunque capitare che il sistema (per una serie di motivazioni, come ad esempio un errato movimento del perno del tamburo) non sia in grado di riconoscere la posizione corrente del tamburo; in questo caso il sistema accende tutti e quattro i LED presenti sull'obiettivo e si porta alla prima posizione riconosciuta.

4.3 Test degli obiettivi

Passiamo ora alla sezione che riguarda il test degli obiettivi. Verranno innanzitutto presentati i sistemi di misura che sono stati utilizzati per i vari test delle ottiche, per poi vedere ed analizzare i risultati. Come primo passo verranno descritti i test comuni che si fanno con tutte le ottiche telecentriche e infine le peculiarità dello Zoom Revolver.

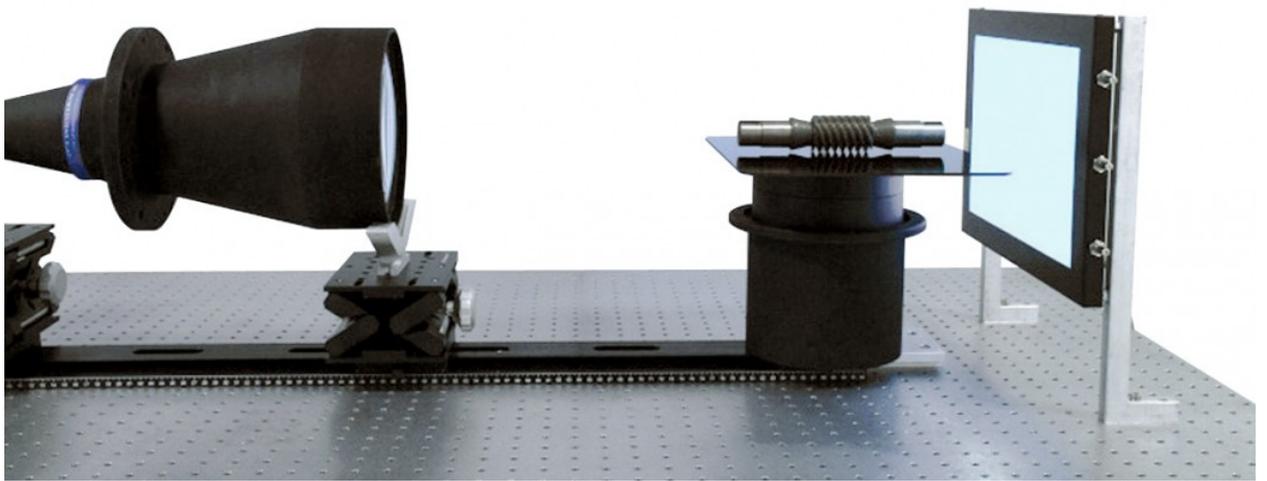
4.3.1 Postazione di misura

Questa sezione rappresenta una descrizione della postazione di misura usata per effettuare i test.

Questa principalmente comprende

- una guida metallica scorrevole
- un clamp

- un pattern
- una telecamera
- un computer



Il clamp non è nient'altro che una postazione di fissaggio per l'obiettivo. In pratica è formato da un cilindro metallico vuoto dove viene fissato e agganciato l'obiettivo.

E' posto al di sopra della guida metallica che gli permette di scorrere lungo di essa; lo spostamento del clamp è motorizzato ed è controllato dal computer (è possibile comunque uno spostamento manuale). Il pattern è composto da un rettangolo bianco forellato appoggiato su di un supporto, ed è l'immagine che l'obiettivo deve inquadrare.

Dietro l'obiettivo è fissato una telecamera che ha lo scopo di catturare l'immagine vista dall'obiettivo e fornirla al computer per le

successive elaborazioni. Il sensore utilizzato è un 2/3 Basler A400f, della dimensione di 8.80x6.60mm e i cui pixel sono di larghezza di $6.45\mu\text{metri}$. Il sensore stesso va a determinare la field of view (FoV) dell'obiettivo che varia ovviamente a seconda dell'ingrandimento della lente.

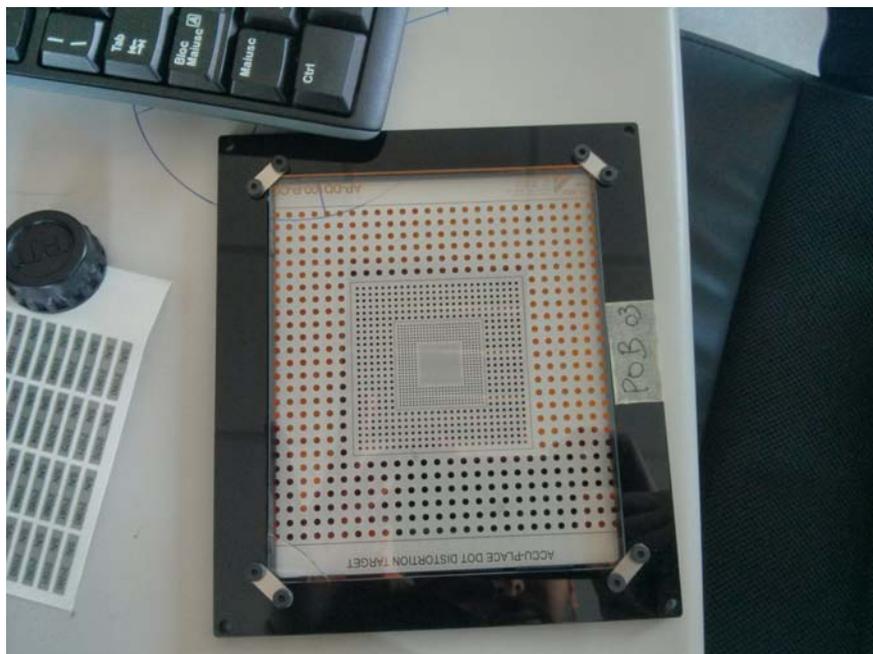


Figura 4.11: Uno dei pattern utilizzati durante il test

L'elaborazioni vengono eseguite dal computer tramite il software LabView, che le effettua tramite un **pattern matching**. In pratica si carica un'immagine del pattern sul computer che effettua un confronto con l'immagine vista prelevata dal sensore; vengono quindi confrontati pixel per pixel per l'immagini ed è possibile quindi compiere le elaborazioni necessarie.

Il computer quindi a questo punto controlla la guida metallica per effettuare le operazioni necessarie, in modo tale che la precisione sia più alta possibile.

La focalizzazione, invece viene invece effettuata manualmente dall'operatore, come verrà descritto successivamente nelle prossime sezioni.

4.3.2 Operazioni preliminari

Guardiamo innanzitutto le operazioni da compiere prima che il dispositivo possa essere ritenuto pronto per la successiva fase di test. Le operazioni da compiere sono principalmente ottiche; innanzitutto bisogna verificare che la lente sia stata realizzata in maniera conforme e che non si presentino alcune deformazioni.



Figura 4.12: Frange di Newton viste direttamente dalla lente

Una di queste, sicuramente la più comune è il fenomeno dell'**interferenza**; per fortuna è facilmente notabile, in quanto si nota la presenza di alcuni segni sull'immagine del pattern (in realtà i segni si vedono anche osservando la lente frontale).

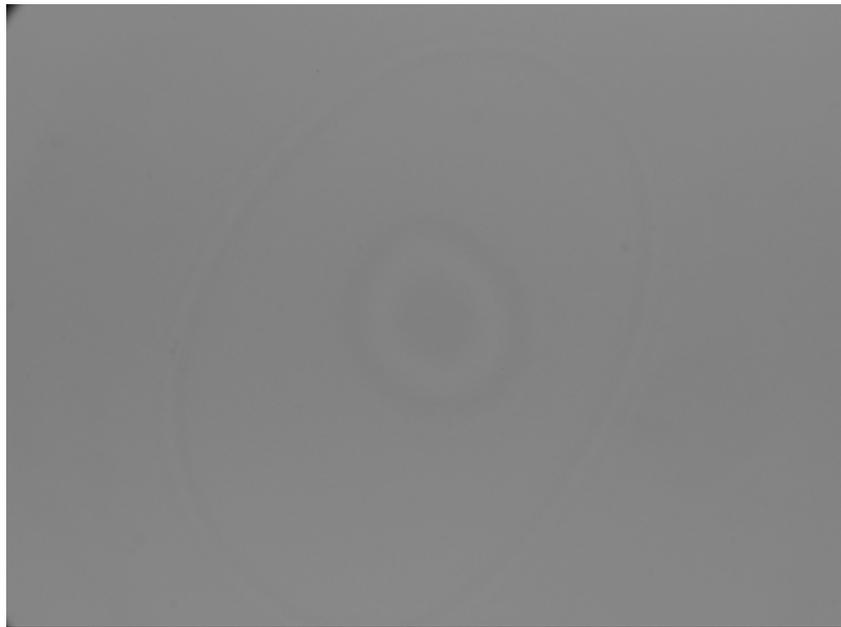


Figura 4.13: Frange di Newton viste tramite la telecamera

La causa di questo fenomeno è dovuta principalmente dalla costruzione stessa della lente.

La struttura infatti prevista per l'obiettivo è composta da quattro lenti frontali dietro alle quali sono presenti gli oculari contenenti gli ingrandimenti. Dopo svariati test si è visto come il fenomeno dell'interferenza è dovuto dalla presenza di aria tra la seconda e la terza lente frontali; queste sono una lente convessa-piana ed una



Figura 4.14: Lente senza la presenza di frange

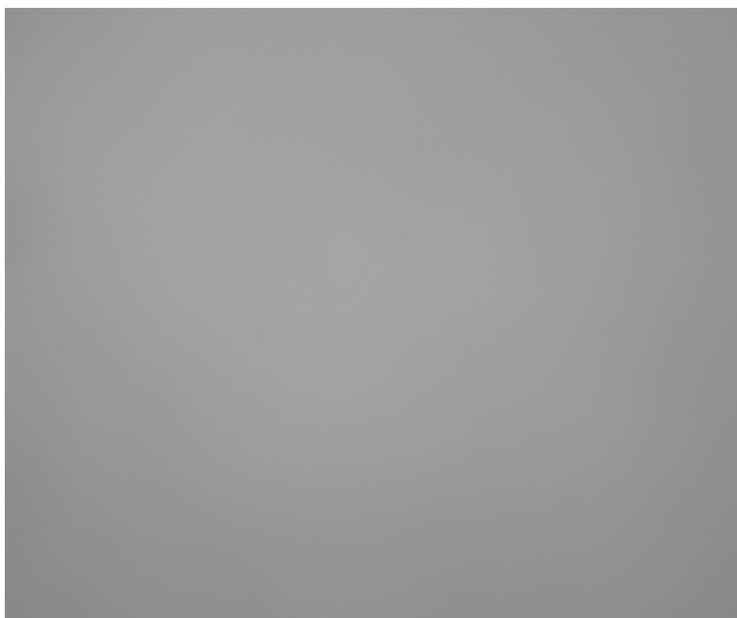


Figura 4.15: Verifica dell'interferenza dalla postazione di test

lente piana-concava (la prima lente e l'ultima sono lenti convesso-concave). Quindi è necessario avvicinar le due lenti centrali e fissarle, fino ad arrivare al contatto per poter veder sparire il fenomeno dell'interferenza. Per far questo è stato necessario rimuovere la lente frontale e il doppietto centrale (la coppia di lenti) in modo da poterle reinserire correttamente. Per verificare al meglio che il problema sia stato effettivamente risolto si è guardato che l'immagine risulti senza difetti anche osservando l'immagine dalla telecamera; per fare questo viene tolto direttamente il pattern, lasciano comunque l'illuminazione, e utilizzando anche un filtro verde, per rendere l'immagine più scura.



Figura 4.16: Per verificare l'interferenza viene tolto il pattern dalla postazione di misura

Come si può vedere dalle immagini, a questo punto la lente non presenta alcun problema di interferenza.

Bisogna tuttavia compiere un'ulteriore operazione, ossia l'**allineamento**.

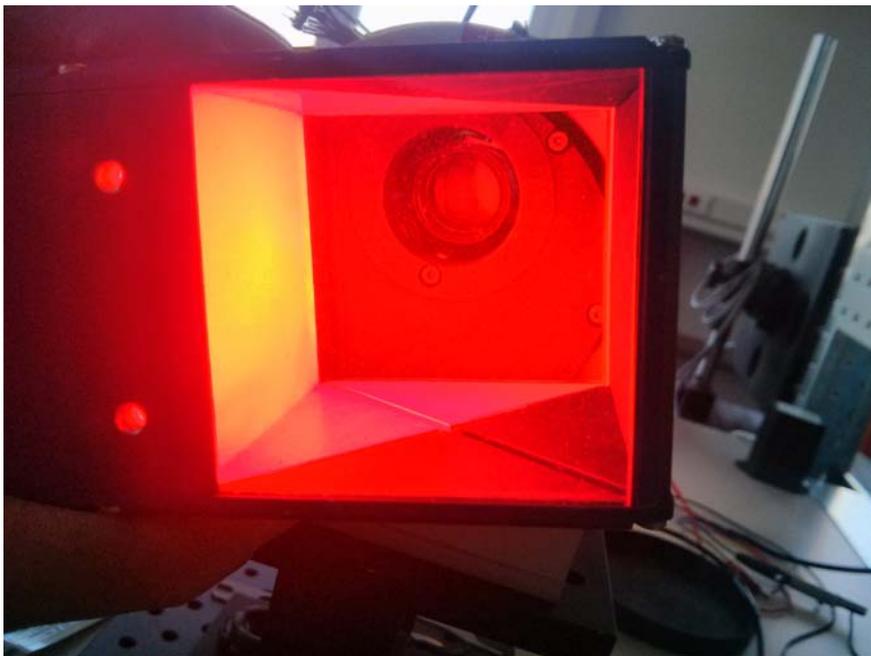


Figura 4.17: Allineamento per l'obiettivo TCZR72

Si vuole infatti che il pattern sia perfettamente allineato con l'obiettivo, in modo da garantire che i risultati dei test siano effettivamente coerenti.

Per fare questo è stato utilizzato un altro strumento, ossia un coassiale; questo consiste praticamente in una scatola contenente una serie di led rossi. La scatola presenta un foro nella parte posteriore, mentre la faccia anteriore è aperta.

Questo viene utilizzato rimuovendo la telecamera dall'obiettivo, fissandolo al suo posto; il pattern risulta allineato quando dal foro è possibile vedere la luce rossa.

Per la regolazione, nella postazione di misura il pattern risulta regolabile tramite le viti, potendo quindi agire sull'inclinazione dello stesso.

A questo punto sono state compiute le operazioni preliminari; sono state eliminate le frange di Newton e il sistema risulta perfettamente allineato. E' quindi possibile iniziare con il test vero e proprio.

4.3.3 Svolgimento dei test

Per iniziare tutto abbiamo messo l'obiettivo sul clamp nella postazione di misura. Adesso verificheremo che l'obiettivo rispetti le specifiche imposte dai datasheet e che sia stato progettato in maniera corretta.

Il testo va eseguito per tutti gli oculari, e quindi per ogni ingrandimento possibile.

Prima di tutto è necessario calcolare la working distance effettiva; per fare questo viene utilizzato l'oculare D, ossia quello che presenta l'ingrandimento maggiore (1x per il TCZR72 e 2x per il TCZR36). Questo perchè l'ingrandimento maggiore è ovviamente quello meno tollerante per quanto riguarda la messa a fuoco; infatti la più piccola differenza della distanza dal pattern può comportare la perdita della messa a fuoco dell'obiettivo. Bisogna quindi calcolare la working distance effettiva con l'oculare D, avendo quindi la certezza che l'immagine sarà a fuoco anche con gli altri oculari.

Si monta quindi il pattern dell'oculare D dell'obiettivo (ogni ingrandimento ha il proprio pattern, anche se quelli relativi agli oculari B

e C sono identici) e si posiziona l'obiettivo ad una distanza da esso pari alla working distance nominale mediante l'utilizzo di un metro e di una dima, ossia un contenitore cilindrico cavo della lunghezza uguale alla working distance nominale.



Figura 4.18: Calcolo della working distance di test

Il software esegue quindi le sue operazioni, avvicinando e allontanando il pattern tramite la guida mobile; il tutto viene quindi fatto automaticamente.

Una volta calcolato il valore della working distance bisogna vedere se tale valore rientra nella tolleranza prevista, ossia del 3%. Spesso questo non succede, per cui è necessario compiere ulteriori operazio-

ni che verranno meglio descritte nella sezione successiva, in quanto di fondamentale importanza e soprattutto molto delicate.

A questo punto si passa al calcolo dei parametri fondamentali per determinare se le specifiche sono effettivamente rispettate. In serie vengono fatte le varie misurazioni partendo sempre dall'oculare con ingrandimento maggiore fino a quello con ingrandimento più piccolo (quindi D-C-B-A). Il tutto viene fatto posizionando l'obiettivo alla distanza pari alla working distance appena calcolata.

Per ogni oculare il software compie 9 passi di distanza predefinita che variano tra i 0.07mm ai 0.125mm; per ognuno degli ingrandimenti va utilizzato il pattern corrispondente, facendo eseguire il test. I calcoli eseguiti quindi sono:

- ingrandimento: il confronto che viene fatto in questo caso riguarda le dimensioni stesse dei punti del pattern; in pratica viene calcolata e rappresentata la distanza di ogni punto dal centro del pattern. La pendenza della linea che interpola questi punti rappresenta il valore di ingrandimento misurato.
- telecentricità: rappresenta quanto i raggi siano effettivamente paralleli; il valore mostrato è espresso in gradi e viene calcolato prendendo l'immagine ai bordi del pattern e al centro (un valore di 0 gradi rappresenterebbe una telecentricità perfetta).
- distorsione trapezoidale: anche questa è espressa in gradi; il valore che si ottiene rappresenta in pratica l'angolo che si forma tra la linea che unisce i centri dei punti del pattern e la linea parallela al pattern stesso.
- distorsione radiale: questa è calcolata invece in maniera percentuale, andando a vedere il rapporto tra la posizione di ogni

punto nell'immagine campionata con la rispettiva posizione nell'immagine reale, che come abbiamo già detto in precedenza, è conosciuta dal software stesso.

Viene quindi mostrato un grafico che rappresenta la distorsione dei punti lungo la diagonale del pattern.

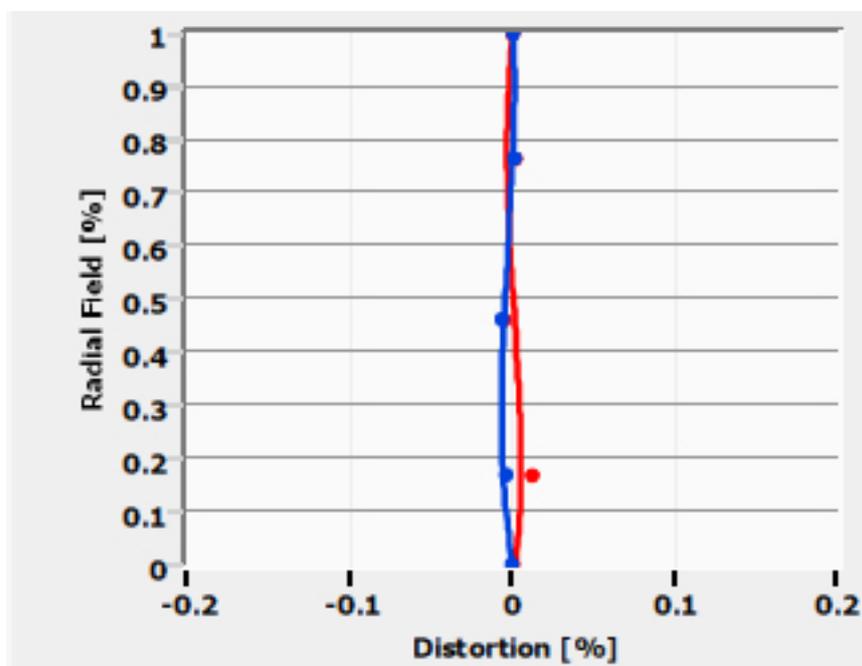


Figura 4.19: Grafico di distorsione radiale in un test di esempio

- transizione bianco/nero: è l'ultimo test che viene eseguito e riguarda il passaggio dal colore bianco al colore nero nella misura dei pallini del pattern.

In pratica questi test rappresentano il numero di pixel (o meglio la distanza espressa in μm che servono all'immagine per

passare dal colore bianco al colore nero.

Come prevede infatti l'esperienza comune, guardando ad esempio un normalissima immagine in uno schermo di un computer, il passaggio di transizione tra il colore bianco e il colore nero avviene tramite una scala di grigi, a causa principalmente del campionamento.

La misura della transizione nei test viene effettuata in cinque punti differenti, ovvero i quattro angoli e il centro.

Il grafico standard mostra in ascisse la distanza in micrometri, mentre in ordinate il livello di grigio (che parte da un valore di 0 per il colore nero ad un valore di 255 per il colore bianco). La transizione bianco/nero viene eseguita sia in direzione tan-

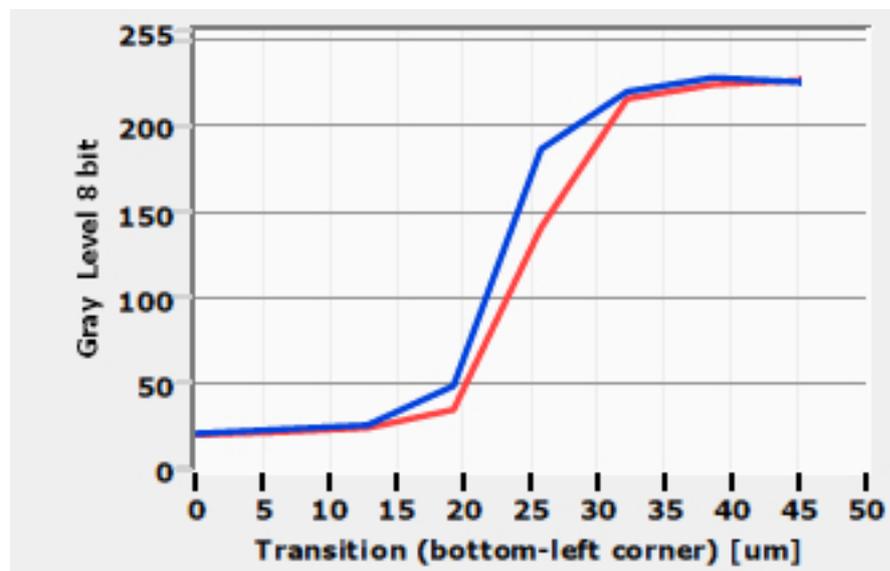


Figura 4.20: Grafico di transizione bianco-nero in un test di esempio

genziale (riga rossa nell'immagine) che nella direzione sagittale (riga blu nell'immagine).

E' necessario fare alcune considerazioni riguardanti gli ingrandimenti più grandi e quelli più piccoli.

Nel primo caso, specie per il TCZR36 che presenta un oculare D con ingrandimento 2x, i risultati ottenuti sono stati spesso scadenti; la motivazione è, tuttavia, piuttosto semplice e non riguarda un problema di ottica, bensì un problema di misurazione. Infatti, anche nella misura ottica è presente un rumore di fondo che in prima approssimazione può essere considerata gaussiano (quindi bianco e a media nulla). Risulta però che l'errore massimo con questo ingrandimento sia spesso equiparabile numericamente con il rumore di fondo, per cui la misura può a volte risultare fuori dai parametri.

Nel secondo caso, nel quale viene testato l'ingrandimento più piccolo (e quindi in particolar modo con il 0.125x del TCZR72) si vede come la Field of View sia molto più piccola rispetto al pattern utilizzato. L'effetto che si ottiene risulta in pratica in una zona d'ombra ai bordi dell'immagine che ne compromette la misura; questo fenomeno viene chiamato **vignettamento**.

Per risolvere il problema è necessario un'intervento manuale.

Come abbiamo già spiegato nella descrizione iniziale dell'obiettivo, gli oculari contenenti gli ingrandimenti sono attaccati ad un rotore, il quale a sua volta è attaccato alla ruota dentata. Ovviamente i due oggetti agiscono in blocco unico, per cui le rotazioni dell'uno comportano nello stesso tempo le rotazioni dell'altro. In questo caso, però, è presente un disallineamento tra l'oculare e ruota dentata, provocando quindi questo effetto.

E' necessario quindi separare ruota dentata con rotore, svitando i

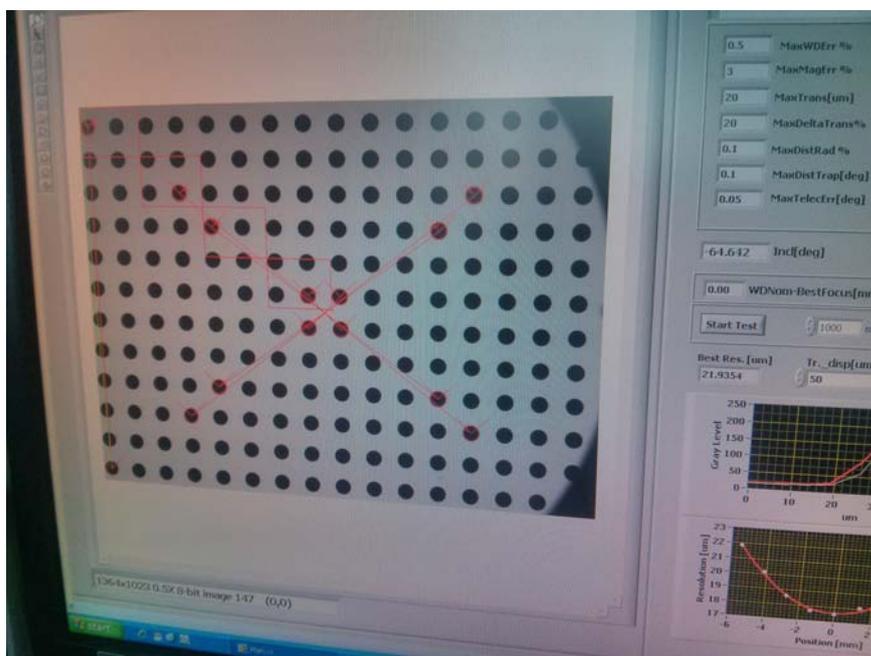


Figura 4.21: Vignettamento con oculare A nel TCZR72

grani presenti nella ruota; a questo punto è possibile ruotare esclusivamente il rotore in modo da raggiungere l'allineamento e quindi ottenere l'immagine desiderata.

Un'ulteriore considerazione riguarda l'illuminazione del pattern. Per garantire che l'immagine sia nitida è infatti necessario che la Field of View sia ben illuminata; difatti tali obiettivi sono quasi sempre venduti assieme a degli illuminatori a luce collimata. I pattern utilizzati per il test sono autoilluminati ed è possibile regolarli sia da software che tramite l'alimentazione (massimo 24 volt). Bisogna però stare attenti a fare in modo che la luce non saturi, altrimenti il risultato ottenuto non è corretto; per questa motivazione le postazioni di test sono dotate di un otturatore (**shutter**) regolabile via software che permette la più completa regolazione. La velocità dello shutter utilizzato nei test è in media di $1/2250$ s.

4.3.4 Regolazione della back-focal length

Durante il test è spesso capitato che le specifiche non fossero rispettate; questo è normale, in quanto un dispositivo di questo tipo necessita sicuramente di alcune scelte che comportano un compromesso in fase progettuale. Basti pensare infatti che l'obiettivo ha la pretesa di agire sotto condizioni piuttosto restrittive, la più importante delle quali è il mantenimento della focalizzazione di tutti i quattro ingrandimenti con la stessa working distance.

E' evidente come questo porti al bisogno di regolazioni manuali molto precise per poter garantire il risultato richiesto.

Esistono, e sono state necessarie nell'eseguire i test elaborati, tre tipi di regolazioni per attuare questa stringente specifica.

La prima è un'operazione piuttosto semplice, e consiste nel aumentare o diminuire la working distance effettiva rispetto a quella nominale. Per farlo è sufficiente avvicinare/allontanare il pattern cercando di stare sempre nel range di tolleranza (che è del 3%). Questo non significa che è possibile spostare il pattern di una tale lunghezza, bensì che è necessario che, durante i test, tutti gli oculari si ritrovino dentro queste specifiche; il calcolo infatti è eseguito dal software che quindi avviserà in caso di parametri al di fuori dei parametri. Tuttavia tale metodo non è stato sufficiente, ed è stato necessario completare l'operazione con ulteriori accorgimenti manuali.

Queste prevedono la regolazione della **back-focal length**; non potendo infatti agire direttamente sulla working distance è necessario agire sulla distanza che intercorre tra la telecamera e gli oculari. Questo permette di ottenere una messa a fuoco maggiore, non andando ad intaccare la working distance utilizzata. Per effettuare

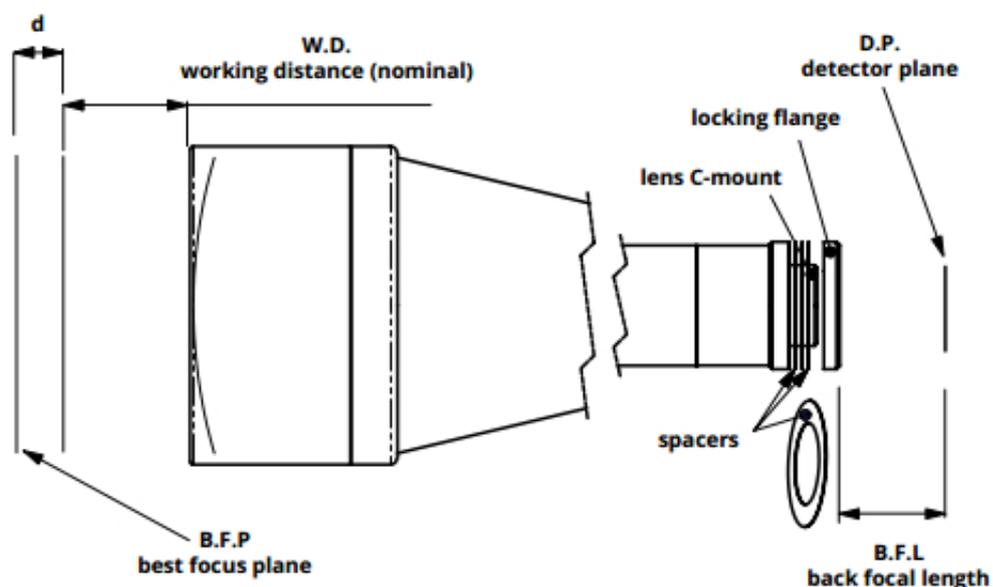


Figura 4.22: Struttura dell'obiettivo TCZR

questa operazione vengono utilizzati dei dischetti metallici, gli **spacers**, che permettono di aumentare la distanza tra la telecamera e gli oculari. Per inserirli è necessario togliere la telecamera ed inserire gli spacers fino a raggiungere la distanza desiderata (gli spacers hanno dimensione fissa). Ovviamente la differenza tra la working distance nominale e quella effettiva può essere negativa o positiva, comportando il bisogno di aggiungere oppure rimuovere (in caso ce ne fossero) gli spacers.

Queste due regolazioni, però, comportano una modifica della working distance, o della back-focal length, che vale per tutti gli oculari; infatti queste regolazioni vanno ad influire sulla messa a fuoco di tutti e quattro gli ingrandimenti.

E' stato necessario tuttavia utilizzare pure la terza regolazione, che invece agisce esclusivamente su un oculare alla volta. Questo succede

perchè magari non è possibile aggiungere o rimuovere altri spacers, o perchè gli altri oculari sono già in condizioni ottimali da non dover esser modificate.

Per far questo è necessario rimuovere la flangia posteriore ed agire sulla distanza tra il passo-c (c-mount), ossia l'attaccatura standard della telecamera, e l'oculare stesso. Infatti questi sono avvitati al rotore, ma è stato lasciato apposta per questo un po' di gioco della vite. Prima di tutto è necessario rimuovere lo smalto utilizzato come fissante per prevenire eventuali movimenti futuri, dopodichè è stato possibile avvicinare o allontanare l'oculare di quanto desiderato. Questa regolazione è molto sensibile ed una variazione di pochi millimetri comporta una modifica sostanziale della messa a fuoco dell'oculare, anche se questo dipende molto dall'oculare che si vuole modificare. Nel nostro caso questa regolazione è stata necessaria per l'oculare A del TCZR72, per cui è evidente, trattandosi di un ingrandimento molto piccolo, che questa sensibilità sia stata accentuata.

E' evidente come la questione più importante in questo tipo di regolazione, come già detto ad inizio della sezione, sia il compromesso tra rispetto delle specifiche e corretto funzionamento dell'obiettivo, stando ovviamente dentro i range di tolleranza.

Un'importante questione in questo senso riguarda la tolleranza stessa della working distance, che è nominalmente di $\pm 3\%$; trattandosi comunque di quattro obiettivi distinti, tuttavia, è importante che gli oculari mostrino una certa coerenza tra di loro per questo tipo di dato. Per questa motivazione durante le regolazioni si è preferito che lo scarto rispetto alla working distance nominale sia positivo o negativo per tutti gli ingrandimenti.

4.3.5 Test di ripetibilità

Arrivati a questo abbiamo che l'obiettivo rispetta le specifiche che abbiamo appena descritto nelle sezioni precedenti.

Rimane tuttavia un'ultima caratteristica fondamentale per il Telecentric Zoom Revolver, ossia il fatto di non dover ricalibrare l'obiettivo ogni volta che si cambia oculare. In parole povere questo significa che il centro della Field Of View deve rimanere costante anche cambiando l'ingrandimento desiderato.

Questa non è una specifica puramente di ambito ottico: infatti è solamente necessario che la meccanica funzioni correttamente, e che quindi le posizioni degli oculari siano costanti al cambio degli stessi. In pratica bisogna verificare che il solenoide fornisca la giusta forza al perno per spostarsi tra le unghie della ruota dentata, e che il sistema elettronico riesca a ricevere correttamente la posizione dai sensori di Hall: per fare questo viene fatto il test della ripetibilità. Questo test in pratica compie la seguente operazione: il software continua a far girare il perno lungo la ruota dentata e quindi continua a cambiare oculari; per ognuno di essi ricava il centro dell'immagine e ne traccia la distribuzione andando a vedere quanto questo si discosti da i precedenti valori.

Vediamo ora come si svolge nello specifico il test. Il pattern utilizzato è unico per tutti e quattro gli oculari, in quanto il processo è automatizzato e quindi non è possibile cambiarlo durante la fase di test; in ogni caso questo non è nemmeno necessario, visto che l'obiettivo deve inquadrare esclusivamente un pallino del pattern stesso. Viene quindi messo al di sopra dello stesso un pezzo di cartone bianco con un foro, in modo che l'unica immagine vista dall'obiettivo sia questo punto.

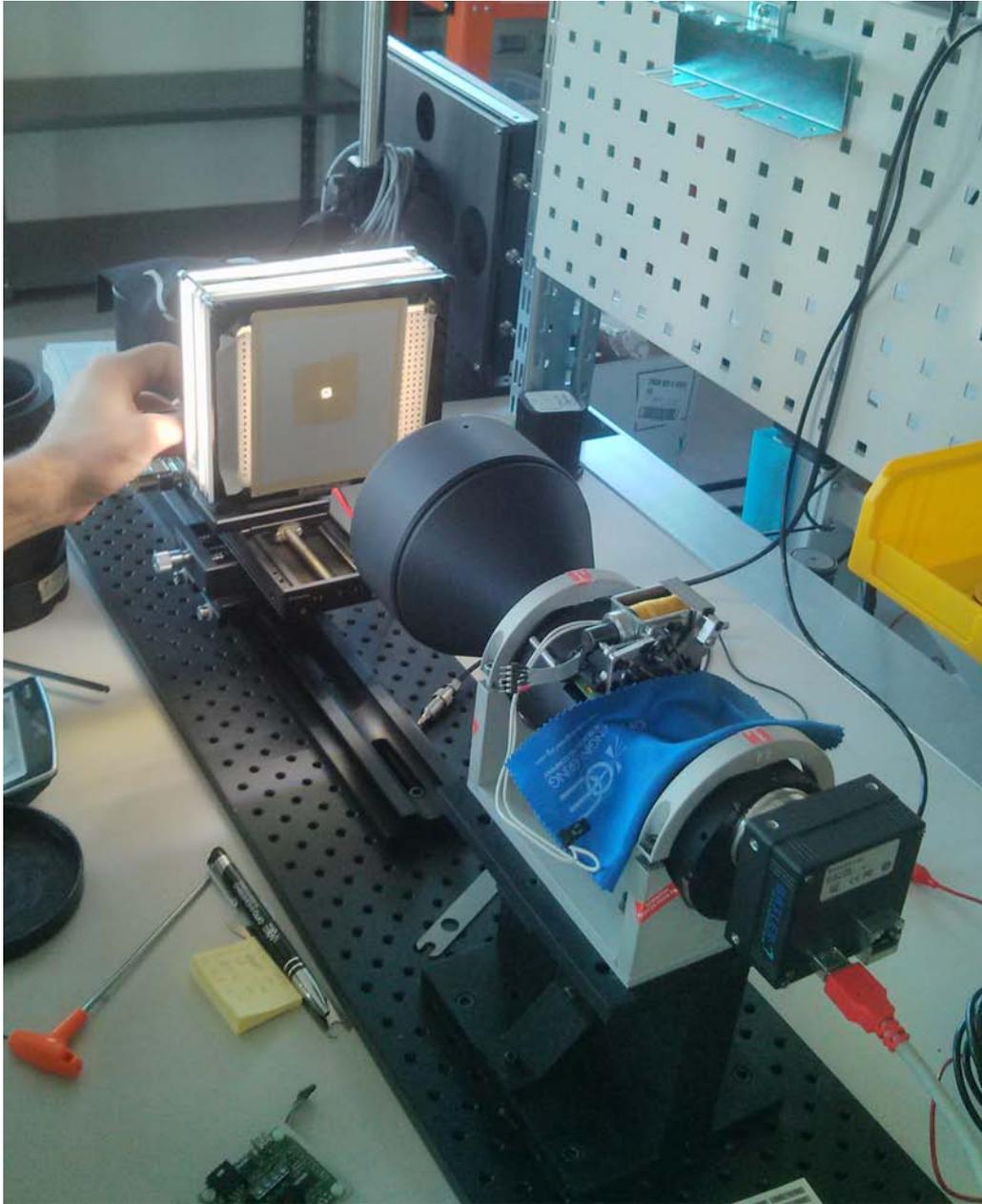


Figura 4.23: Postazione di misura durante il test di ripetibilità

Si vanno quindi a definire il numero di passi che deve compiere il perno lungo la ruota dentata e il tempo di attesa per ogni passo, tutto tramite software. Sono stati scelti 20 passi per ogni oculare (e quindi 80 campionamenti) con un tempo di attesa di 6000ms.

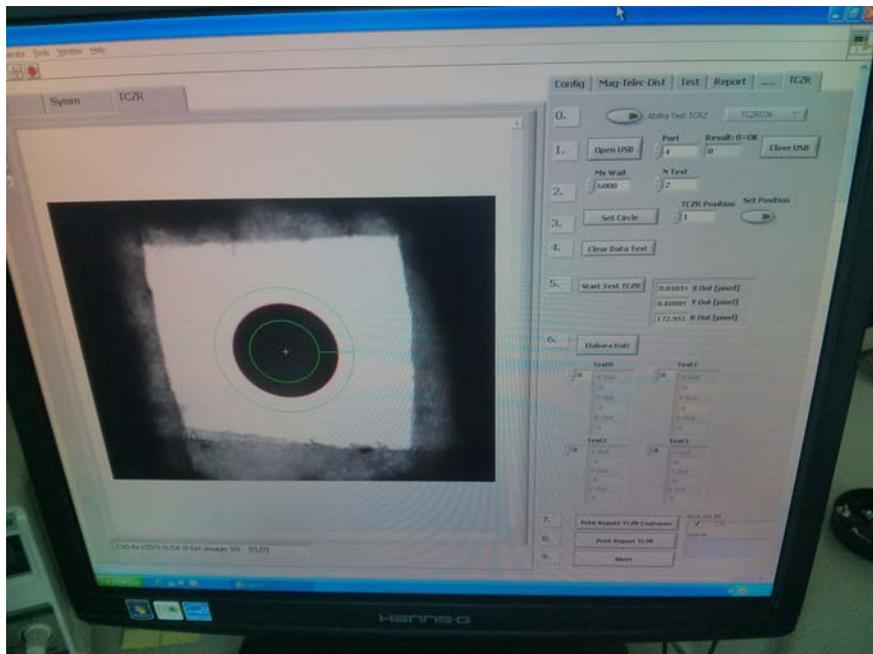


Figura 4.24: Immagine campionata dall'obiettivo con i rispettivi settaggi e calcoli

Il software compie quindi i passi e per ogni oculare calcola il centro dell'immagine, considerando la prima immagine con coordinare (0,0). Una volta acquisiti tutti i dati calcola media e varianza delle posizioni andando a posizionare in un grafico la distribuzione dei

centri immagine; automaticamente vengono scartati i quattro ingrandimenti che si discostano maggiormente dalla media.

4.3.6 Risultati e analisi

Vediamo ora i risultati dei test sia del modello TCZR36 che del modello TCZR72.

Partiamo innanzitutto dal primo, ossia il TCZR36.

Possiamo vedere fin da subito come la working distance di test in tutte e quattro le lenti dell'obiettivo risulti molto vicina alla working distance nominale, con un valore che si attesta comunque sempre al di sotto dello 0.2%; sicuramente questo dato rappresenta la bontà dell'idea nella realizzazione di questo progetto. Infatti, nonostante vengano usati quattro ingrandimenti diversi, non si ha la necessità effettivamente di focalizzare il sistema ogni volta che si cambia la lente.

E' interessante vedere anche il dato riguardante la telecentricità. Come avevamo scritto in maniera teorica, un valore dell'angolo θ dei raggi tipico e che può considerarsi ragionevole deve essere inferiore al 0.1%. I datasheet riportano valori inferiori allo 0.05%; è da notare come questa specifica sia rispettata, ma con valori che raggiungono quasi il limite massimo. C'è da dire che i valori riportati sui datasheet sono piuttosto stringenti e quindi ci si può ritenere soddisfatti del risultato ottenuto.

Un dato che, invece, mostra dei valori piuttosto elevati è l'ingrandimento delle lenti. Infatti possiamo notare come il valore dell'ingrandimento di test e quello nominale risultino diversi fino a quasi un 3%. In ogni caso la grandezza minima è garantita, in quanto

possiamo vedere come la differenza tra i valori è sempre in eccesso.

I dati di distorsione, che sui datasheet si intendono riguardanti sia per quanto riguarda la distorsione radiale che trapezoidale, rientrano perfettamente nelle specifiche. Da notare soprattutto il valore di distorsione per l'ingrandimento 2x che presenta un valore di distorsione radiale di massimo 0.04% e trapezoidale di 0.01%; questi risultano ben al di sotto delle specifiche descritte che rappresentano un valore inferiore allo 0.08%. Questo risultato è veramente ottimo e dimostra come i fenomeni di distorsione siano veramente minimi utilizzando gli oculari di questo obiettivo. D'altronde non ci sono stati seri problemi durante i test, e tali risultati sono infatti prevedibili.

Lo stesso discorso si può fare guardando anche il test di ripetibilità; possiamo benissimo vedere dal grafico come la distribuzione dei punti per tutti e i quattro gli oculari sia veramente densa, dimostrando quindi che il sistema riesce a mantenere la calibrazione anche dopo numerosi cambi di oculari (che ricordiamo essere venti per ognuno di essi). Il valore che più mostra il buono stato dell'obiettivo è sicuramente la varianza che riporta un dato massimo di $4.432\mu m^2$, valore sicuramente molto buono. Anche i valori di media sono piuttosto buoni, dimostrando quanto il centro della FOV sia mantenuto al meglio.

Risultato invece molto diverso invece per quanto riguarda il TC-ZR72.

Guardando i risultati dei test si vede come questi in molti casi siano effettivamente al limite. Ci sono stati infatti parecchi problemi durante la regolazione degli oculari, e sono state fatte molte scelte di compromesso che hanno evidentemente degradato la qualità dell'obiettivo.

I dati più allarmanti sono sicuramente due e riguardano principalmente l'oculare A. Possiamo infatti notare come il valore della telecentricità, ossia di 0.049 gradi, e il valore della massima distorsione radiale (0.10 %) risultano effettivamente al limite delle specifiche. I risultati derivano dai problemi di regolazione della working distance e della back-focal length descritti in precedenza, che hanno portato ad una regolazione manuale che ha fatalmente compromesso le caratteristiche dell'oculare.

Guardando gli altri oculari, tuttavia, si può constatare come i valori di telecentricità siano comunque uniformi e abbastanza in linea anche con l'obiettivo TCZR36; ciò sta praticamente a significare che, data l'alta complessità dell'obiettivo, valori inferiori siano realmente difficili da ottenere.

Discorso a parte invece per la distorsione radiale; qua si nota come invece sia esclusivamente l'oculare A a mostrare dati al limite. Gli altri obiettivi mostrano risultati molto buoni, il che ci fa presupporre che i problemi descritti precedentemente abbiamo influito in maniera preponderante sulle caratteristiche dell'oculare.

Analizziamo infine il test di ripetibilità del TCZR72. Sono mostrati due report; il primo riguarda il test eseguito prima delle regolazioni manuali, mentre il secondo rappresenta il test del prodotto finale.

Il primo test mostra dei dati veramente pessimi; la varianza riporta valori estremamente alti, raggiungendo il picco di $43.126\mu m^2$, valore ben al di sopra per essere ritenuto accettabile. Anche la distribuzione dei punti del grafico risulta estremamente sparsa, mostrando come quindi il dispositivo avesse bisogno di una serie di regolazioni. Guardando infatti il test di ripetibilità finale si vede come i risultati siano molto buoni, con un valore massimo (sempre per l'oculare A) di $1.532\mu m^2$.

Le scelte quindi compiute si sono rilevate quindi corrette e il dispositivo rispetta le specifiche, mostrando una buona funzionalità

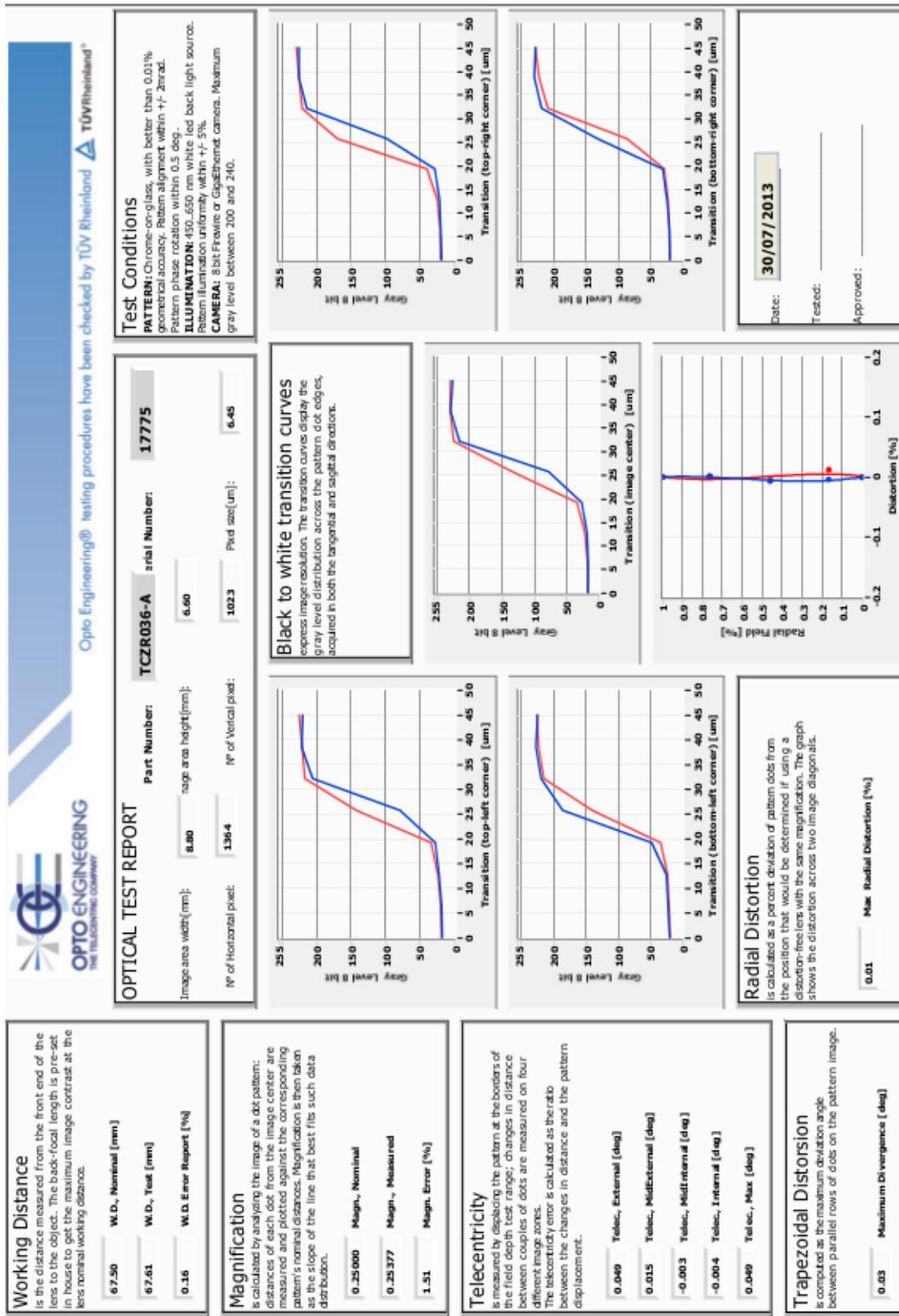


Figura 4.25: Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 0.25x

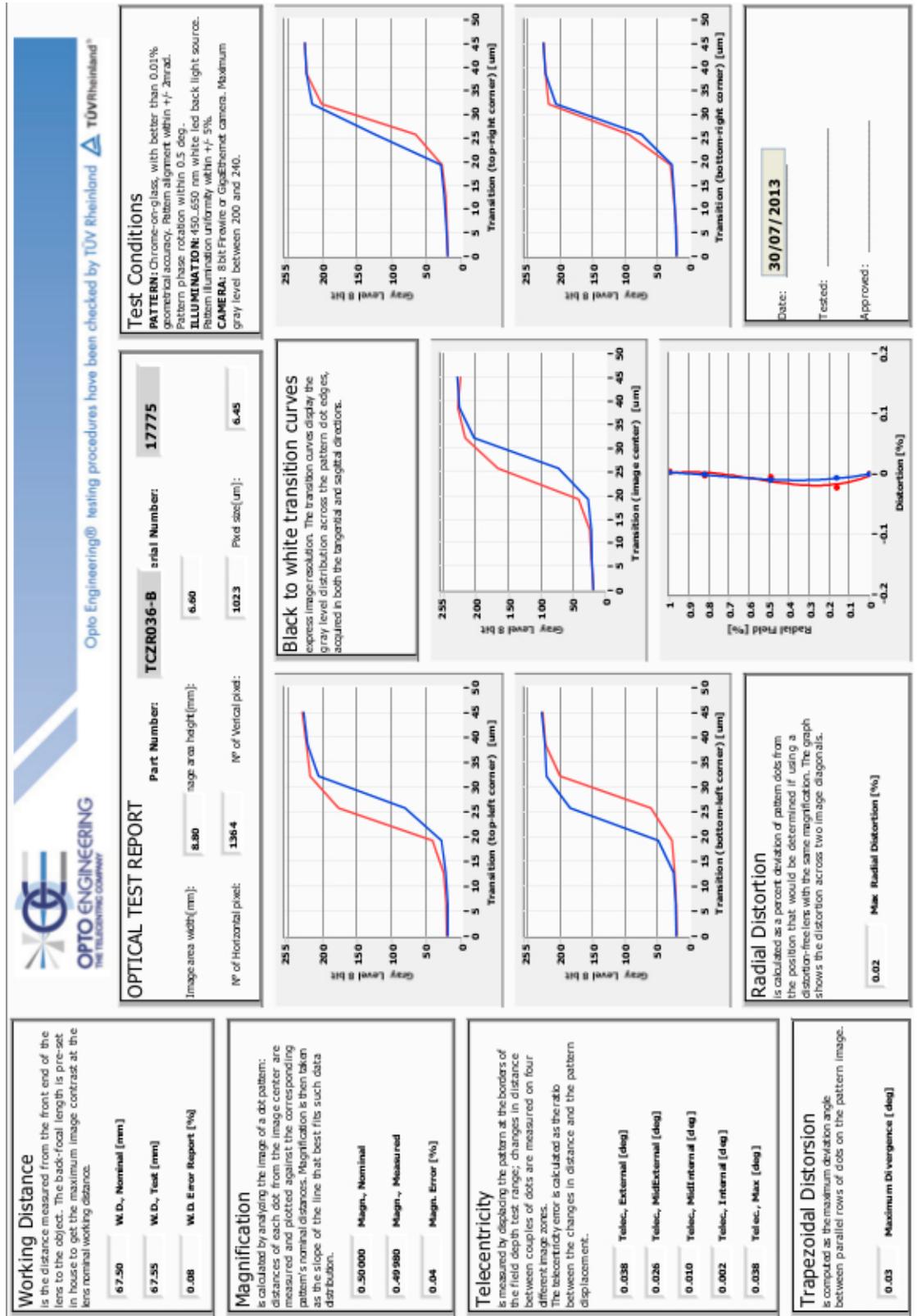


Figura 4.26: Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 0.5x

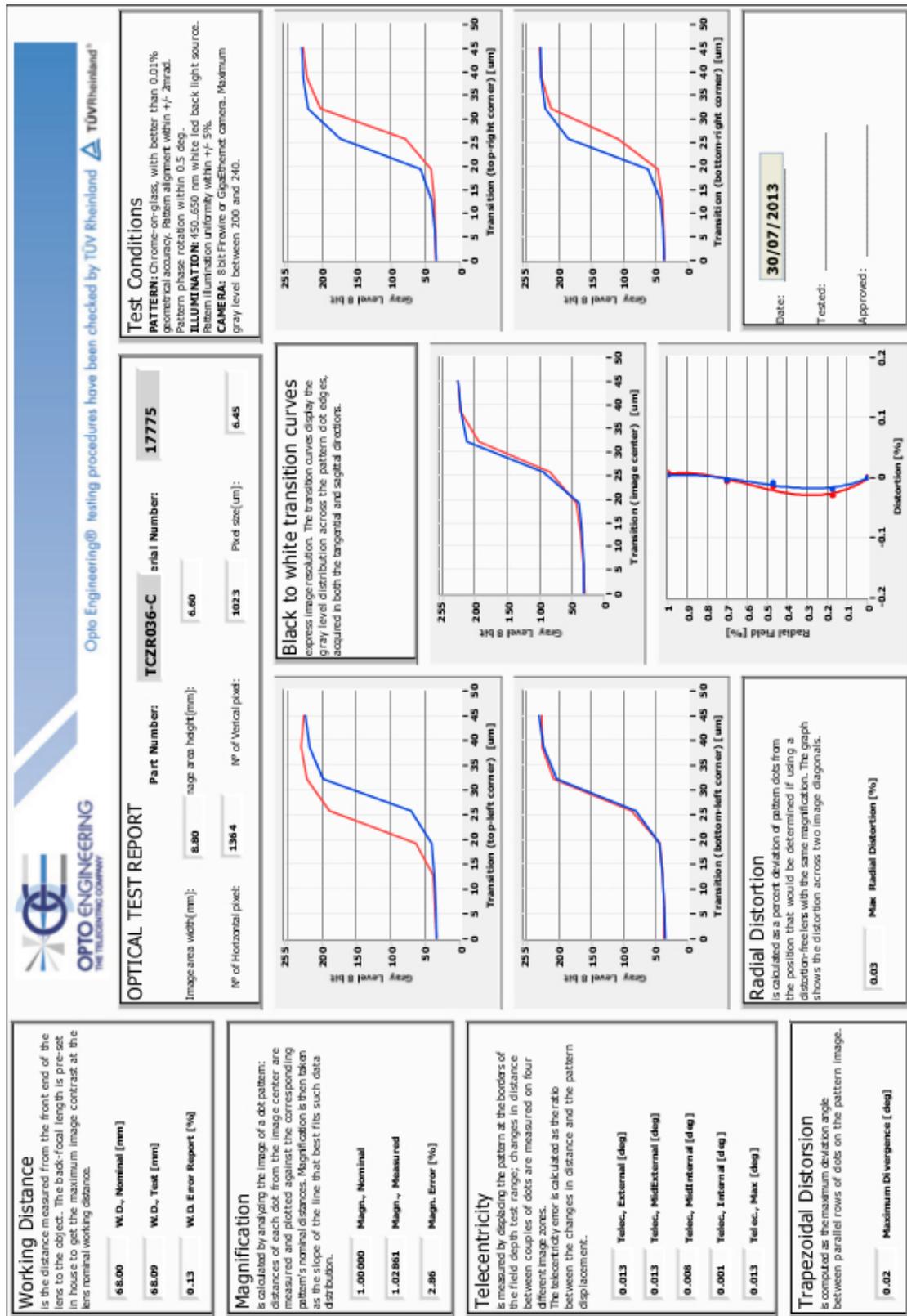


Figura 4.27: Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 1x

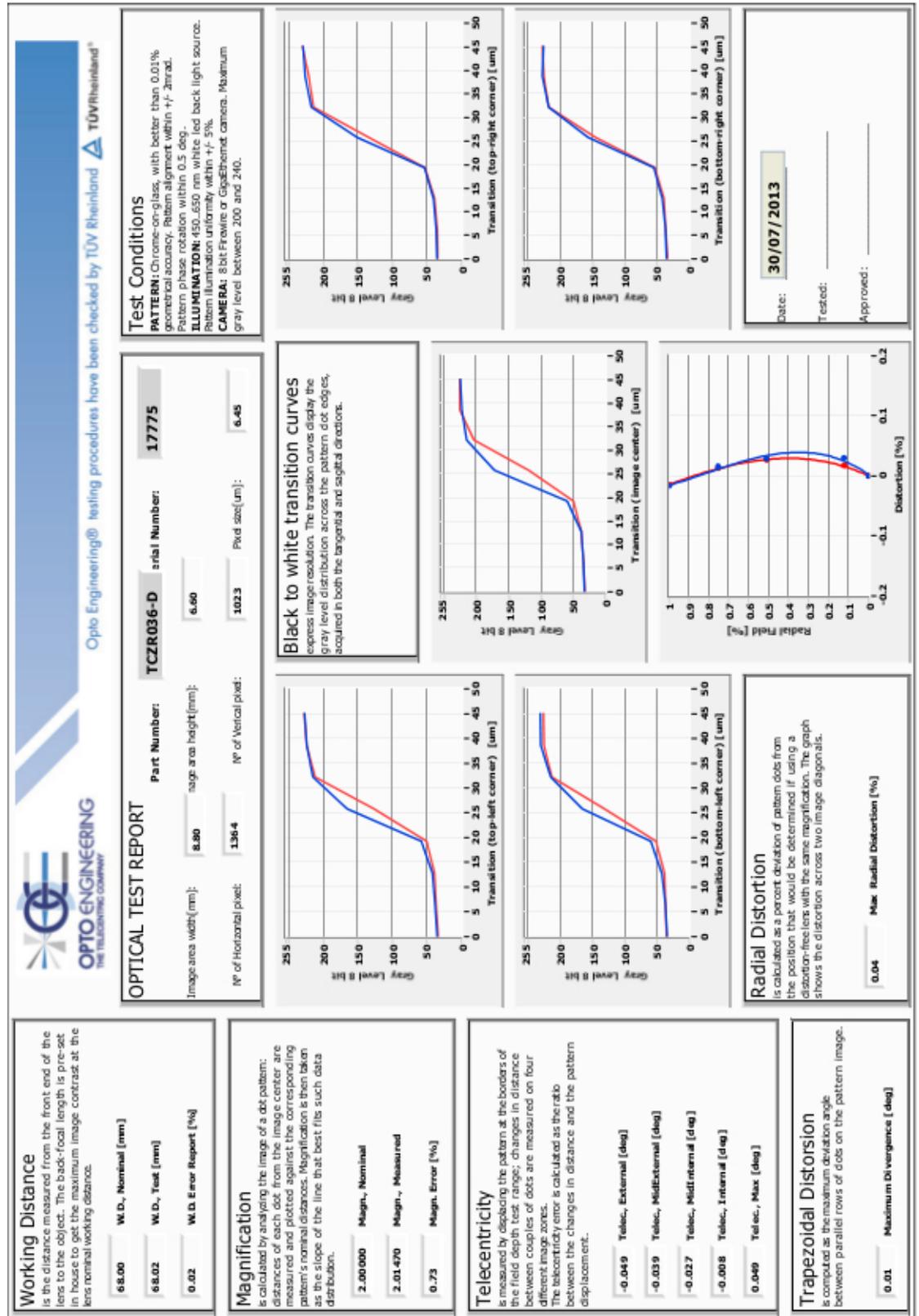


Figura 4.28: Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 2x

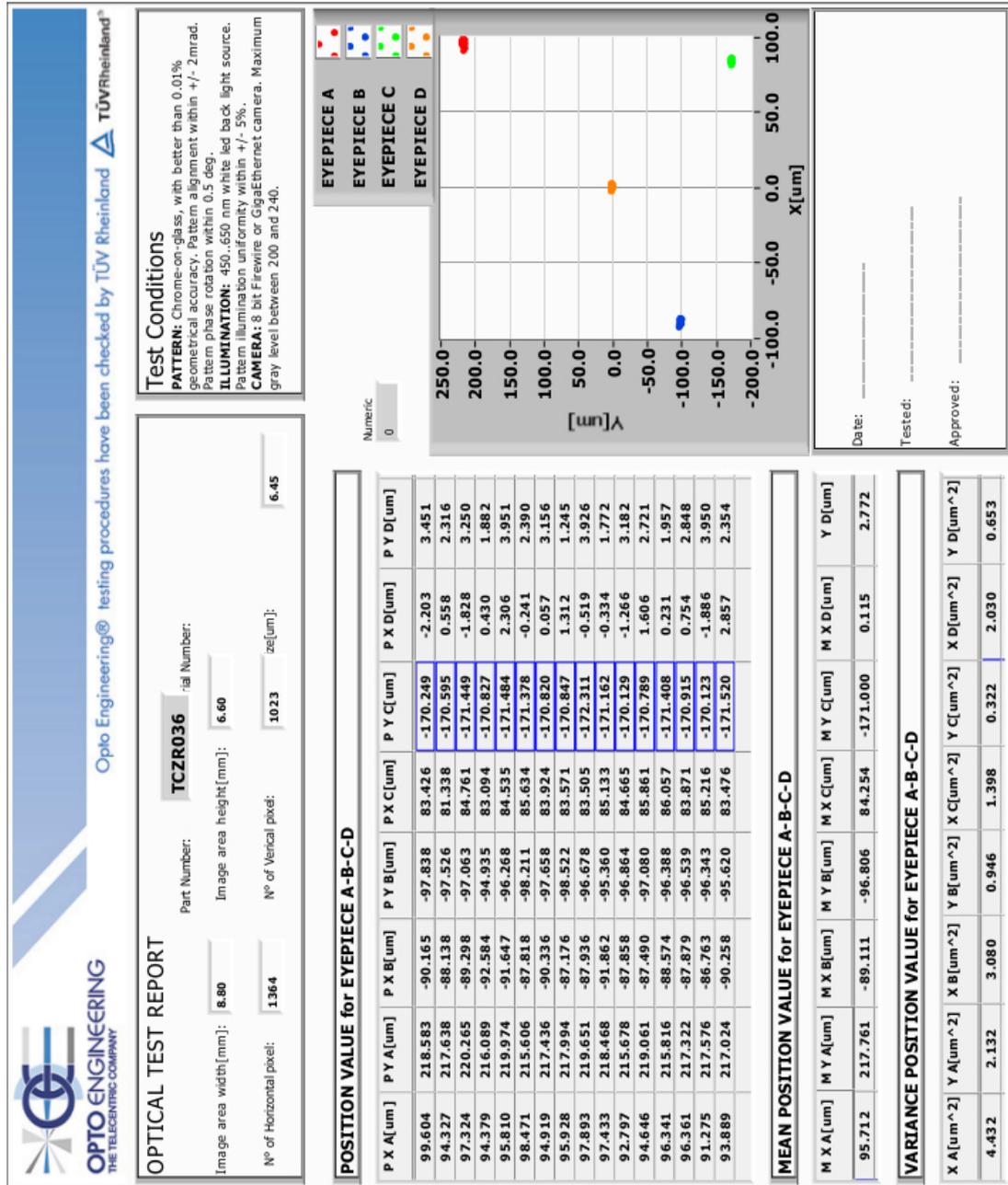


Figura 4.29: Test di ripetibilità del TCZR36

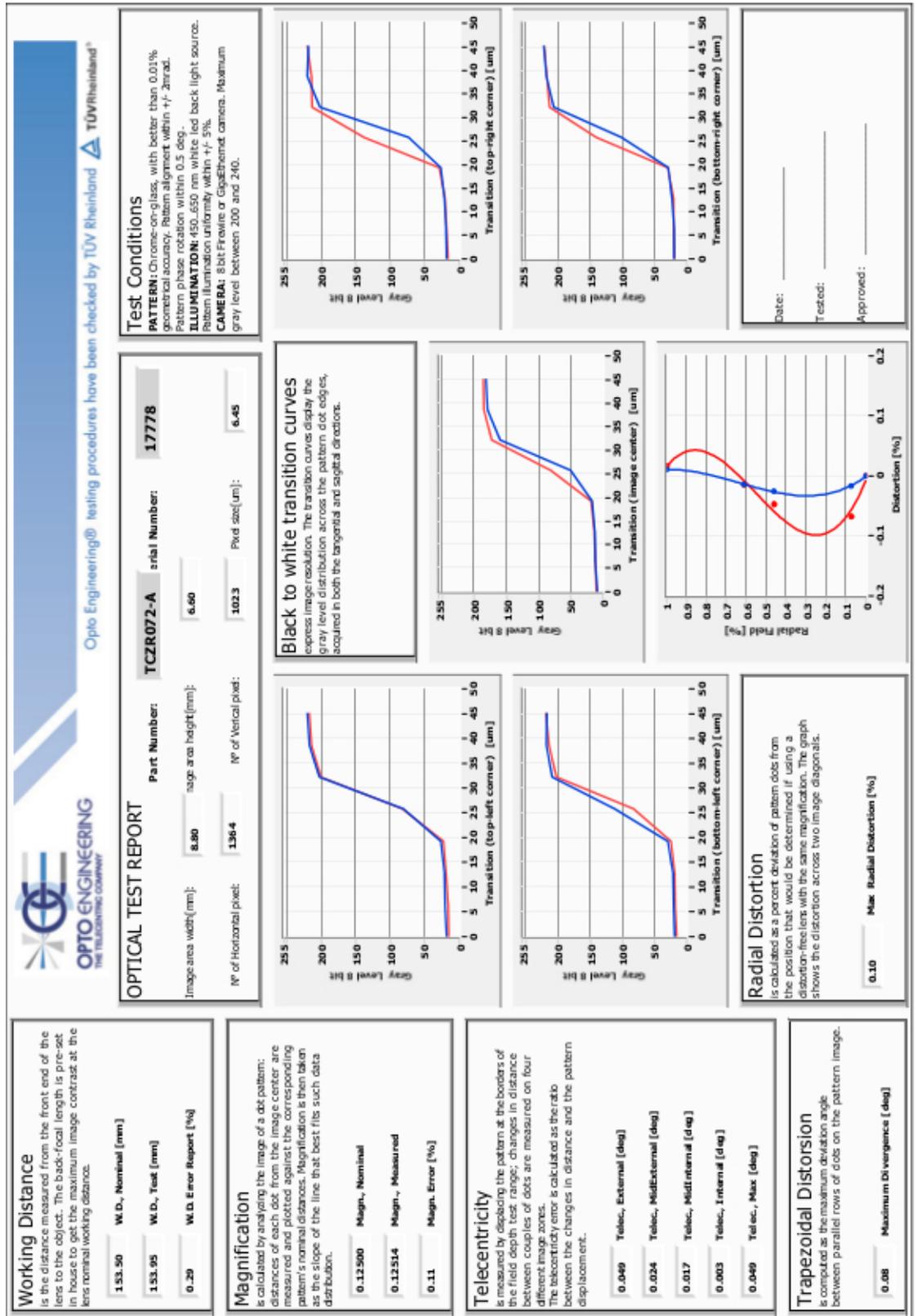


Figura 4.30: Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 0.125x

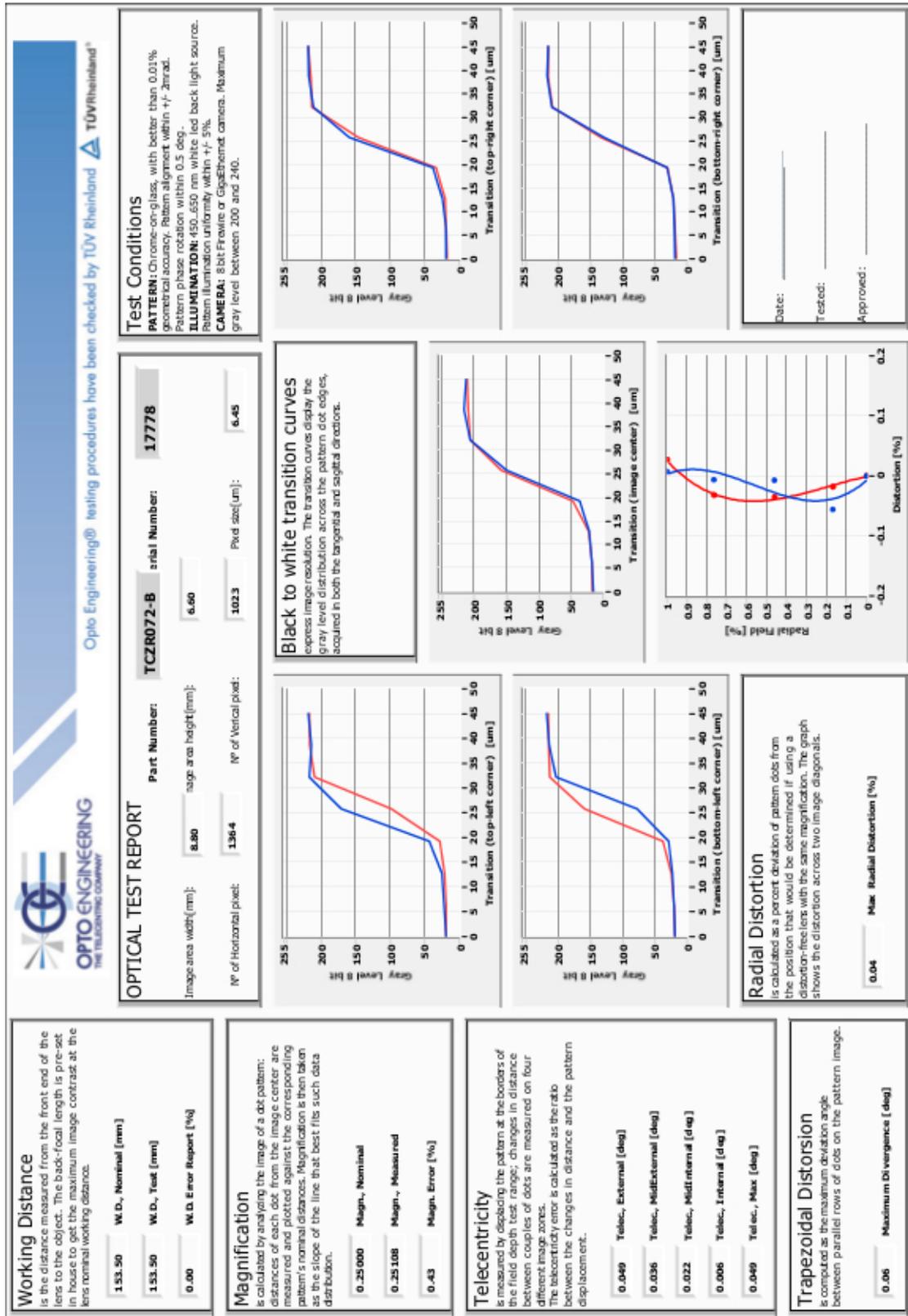


Figura 4.31: Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 0.25x

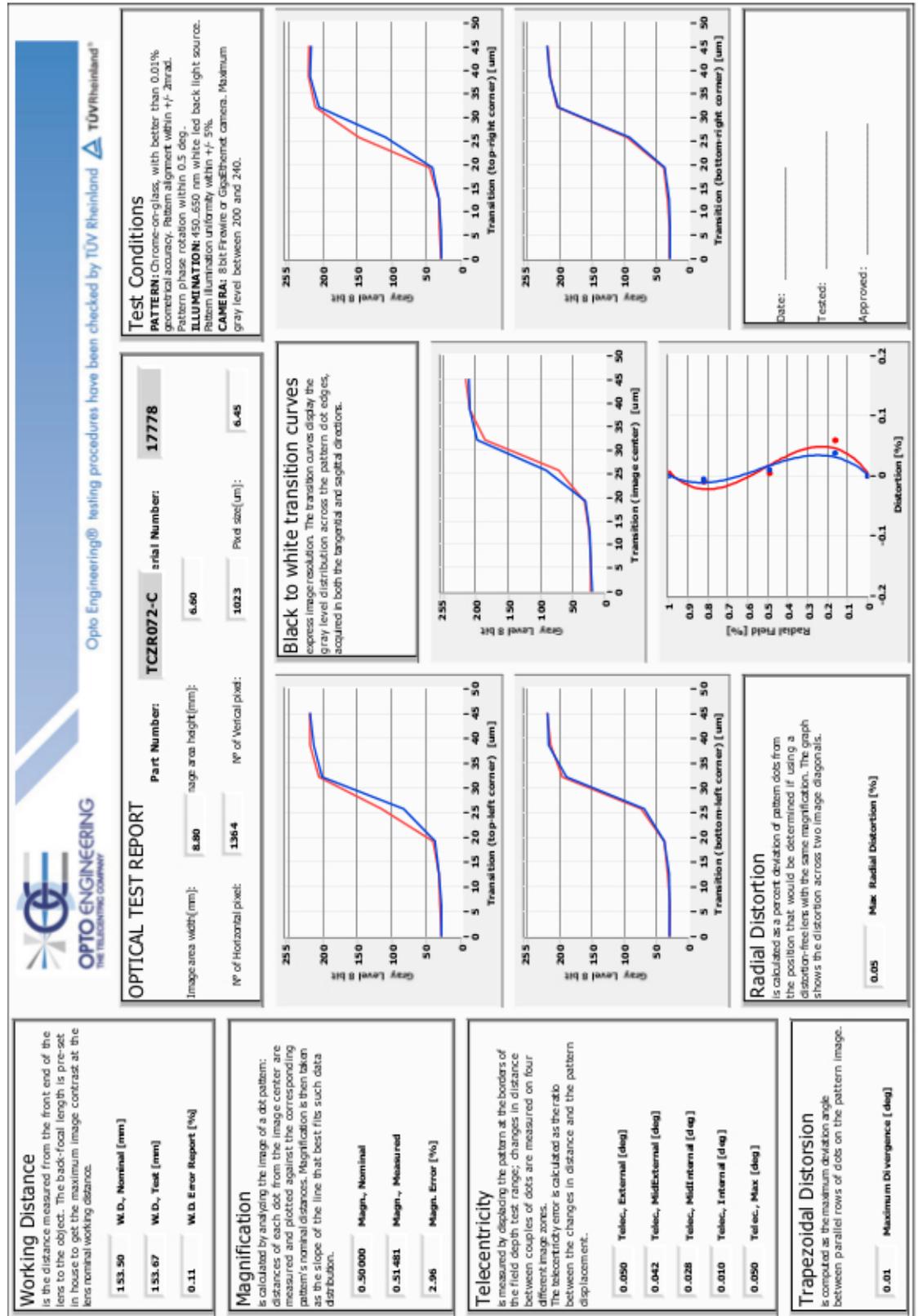


Figura 4.32: Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 0.5x

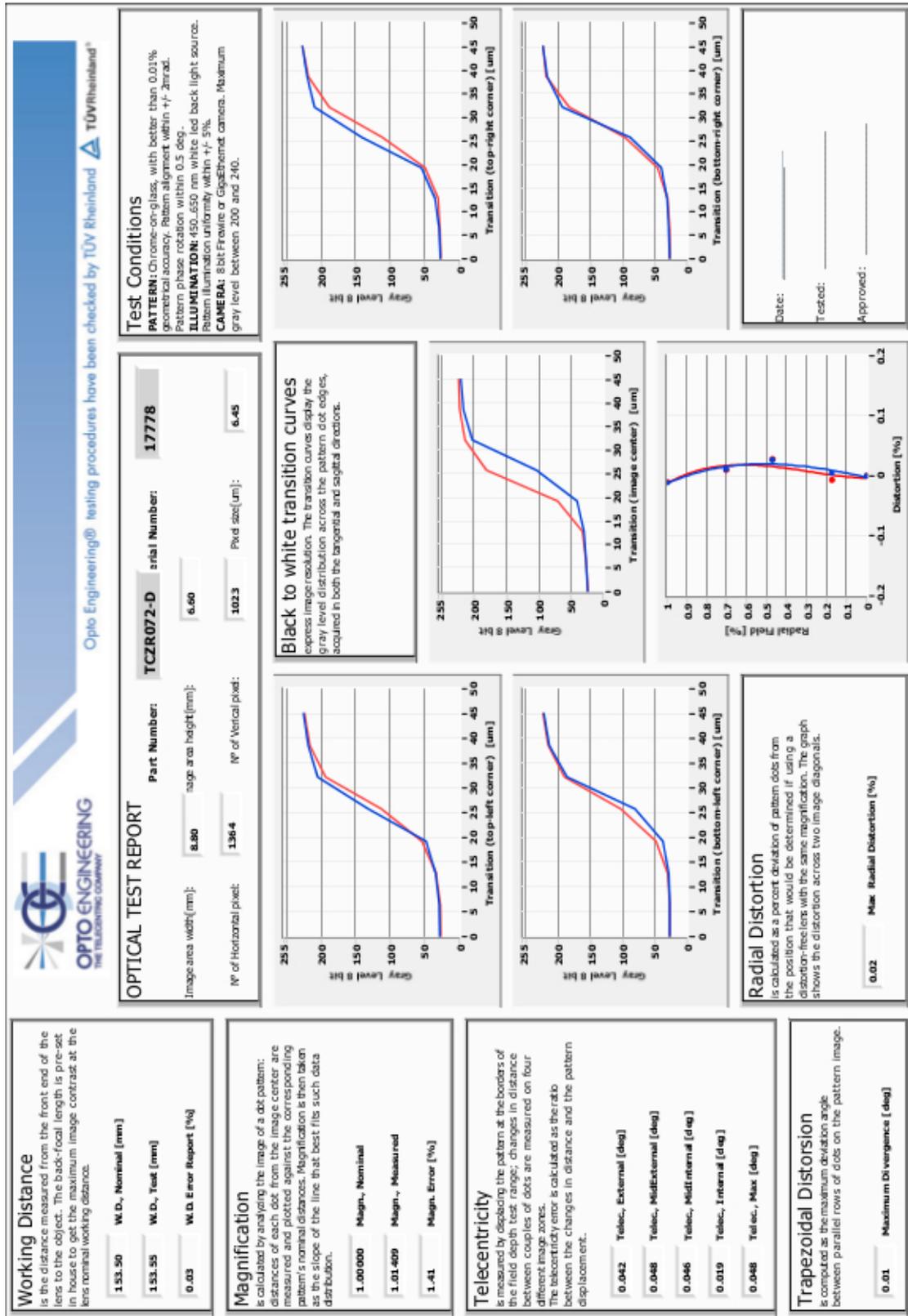


Figura 4.33: Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 1x

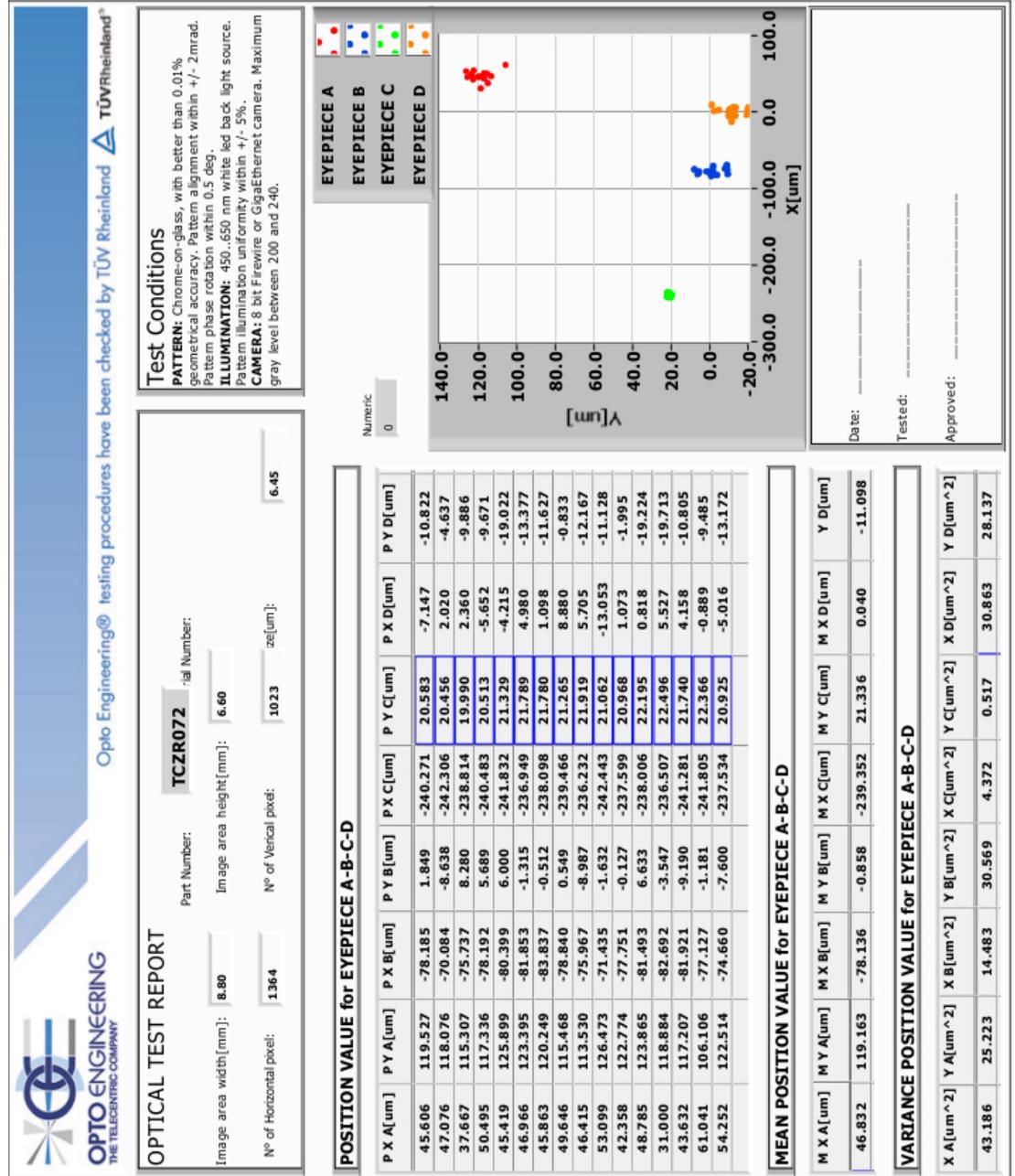


Figura 4.34: Primo test di ripetibilità del TCZR72

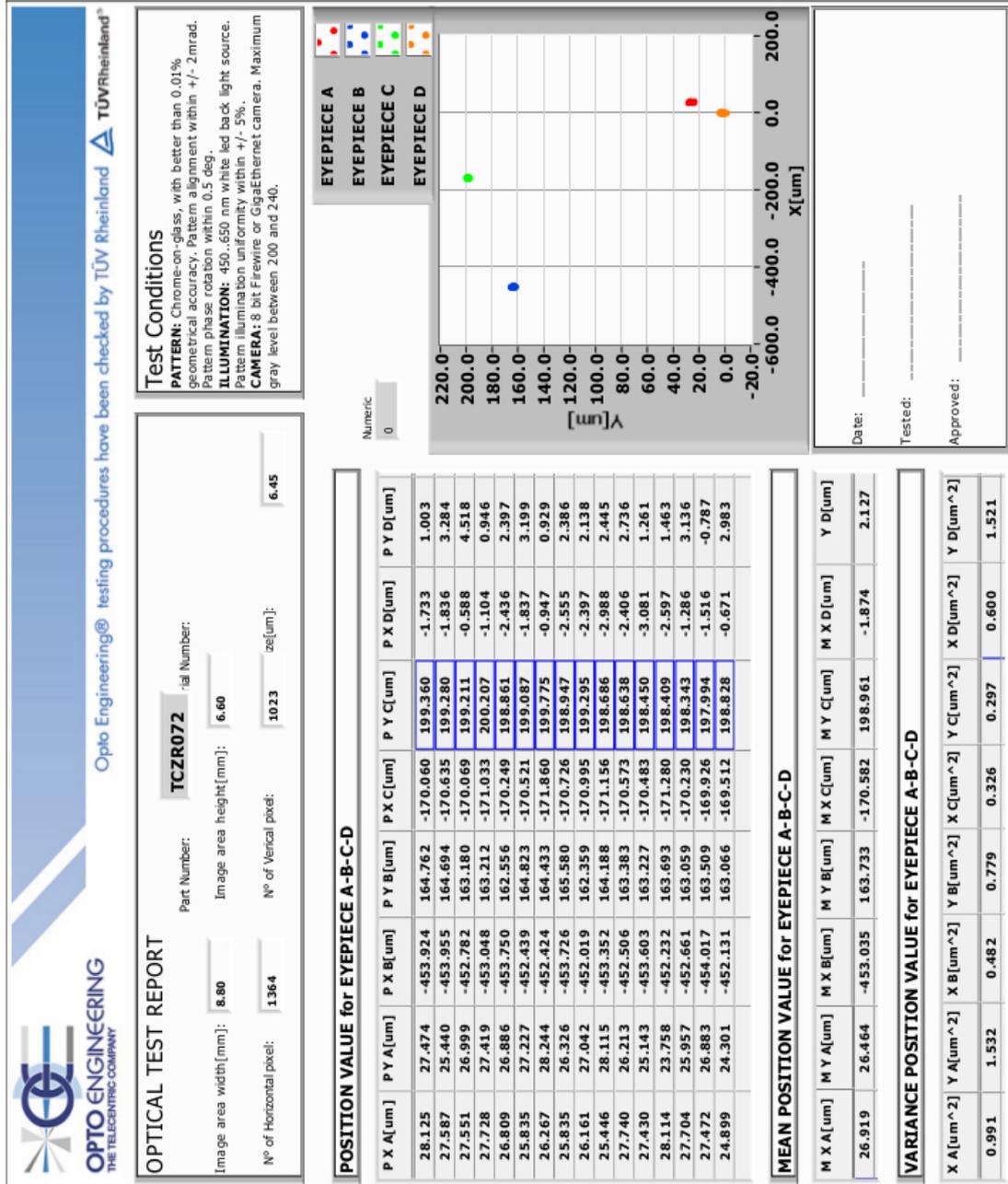


Figura 4.35: Test di ripetibilità finale del TCZR72

Capitolo 5

Conclusioni

Con questo elaborato ho voluto presentare il mondo dell'ottica telecentrica sia da un punto di vista teorico che da quello pratico.

Grazie allo stage compiuto presso la Opto-Engineering ho potuto conoscere questo settore che, nonostante sia ancora abbastanza di nicchia, sta raggiungendo livelli di crescita e di importanza sempre più rilevanti nel mondo industriale.

E' evidente come siano presenti ancora molte limitazioni e molti problemi (basti pensare alle dimensioni degli obiettivi), ma è chiaro che i passi in avanti siano stati molti e molto significanti.

Penso che il progetto con il quale ho avuto il piacere di collaborare porti una ventata di novità nel mondo delle ottiche telecentriche, e che risulti veramente innovativo; il fatto di avere un sistema così piccolo e nello stesso così flessibile penso che non possa far altro che giovare il settore per cercare di entrare in maniera prepotente nel mondo industriale.

Elenco delle figure

1.1	Differenza tra ottiche telecentriche e non telecentriche	6
2.1	Pinhole camera	10
2.2	Prospettiva nel modello pinhole	10
2.3	Relazioni tra le distanze nel modello pinhole	11
2.4	Principio di funzionamento di un ottica telecentrica .	13
2.5	Trasformazione rotazionale nel modello pinhole	14
2.6	Legge di Snell	16
2.7	Raggi omocentrici	17
2.8	Raggi omocentrici nella formazione della immagine .	17
2.9	Elementi cardinali nell'ottica gaussiana	19
2.10	Stop e pupille nel modello teorico	20
2.11	Percorso dei raggi ottici	21
2.12	Profondità di campo	24
2.13	Esempio di distorsione in un immagine	26
2.14	Leggi di Gauss nel modello pinhole	28
3.1	Posizione dello stop di apertura in lenti telecentriche	32
3.2	Telecentric slope	36
3.3	Prospettiva nelle ottiche non telecentriche	37
3.4	Prospettiva nelle ottiche telecentriche	38

3.5	Distorsioni radiali e trapezoidali	39
3.6	Obiettivo telecentrico per la misurazione di componenti elettronici	40
3.7	Obiettivo telecentrico per la misurazione di componenti meccanici	41
4.1	Oculari di un TCZR	44
4.2	Diversi ingrandimenti con un TCZR	45
4.3	TCZR36 Datasheet	46
4.4	TCZR72 Datasheet	47
4.5	Solenioide e driver nel TCZR36	49
4.6	Driver, controller e scheda dei sensori	51
4.7	Circuito elettronico del solenoide utilizzato	51
4.8	Sforzo del solenoide	52
4.9	Driver del solenoide	54
4.10	Codifica delle posizioni	57
4.11	Pattern utilizzato durante un test	60
4.12	Frange di Newton su una lente	61
4.13	Frange di Newton campionate	62
4.14	Lente senza Frange di Newton	63
4.15	Immagine campionata senza frange di Newton	63
4.16	Postazione di test per verificare l'interferenza	64
4.17	Allineamento per l'obiettivo TCZR72	65
4.18	Calcolo della working distance di test	67
4.19	Grafico di distorsione radiale in un test di esempio	69
4.20	Grafico di transizione bianco-nero in un test di esempio	70
4.21	Vignettamento con oculare A nel TCZR72	72
4.22	Back-focal length	74
4.23	Postazione di misura durante il test di ripetibilità	77

ELENCO DELLE FIGURE

99

4.24	Immagine campionata durante il test di ripetibilità .	78
4.25	Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 0.25x .	83
4.26	Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 0.5x . .	84
4.27	Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 1x . . .	85
4.28	Test del TCZR36 utilizzando l'ingrandimento 2x . . .	86
4.29	Test di ripetibilità del TCZR36	87
4.30	Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 0.125x	88
4.31	Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 0.25x .	89
4.32	Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 0.5x . .	90
4.33	Test del TCZR72 utilizzando l'ingrandimento 1x . . .	91
4.34	Primo test di ripetibilità del TCZR72	92
4.35	Test di ripetibilità finale del TCZR72	93

Bibliografia

- [1] Kingslake Rudolf. *Optical System Design*. Academic Press, New York, 1983.
- [2] Smith and Warren J. *Modern Optical Engineering, 3rd ed.* McGraw-Hill, New York, 2000.
- [3] Malcara Daniel. *Handbook of Lens Design*. Marcel Dekker, New York, 1994.
- [4] Lenhardt Karl and Bad Kreuznach. *Optical Measurement Techniques with Telecentric Lenses*. Schneider-Kreuznach, Germany, 2001.
- [5] Laikin Milton. *Lens Design, 2nd ed.* Marcel Dekker, New York, 1995.
- [6] Walker Bruce H. *Optical Engineering Fundamentals*. SPIE Press, Bellingham, WA, 1998.
- [7] Opto-Engineering. Telecentric lenses tutorial.
<http://www.opto-engineering.com/resources/telecentric-lenses-tutorial>.

- [8] Mashiro Watanabe and Shree K. Nayar. Telecentric optics for computational vision. Master's thesis, Department of Computer Science, Columbia University, New York, 1996.

- [9] Mashiro Watanabe and Shree K. Nayar. Telecentric optics for focus analysis. Master's thesis, Department of Computer Science, Columbia University, New York, 1997.