

Unità ENE - FOTO	Classificazione ENE EGE 04045	Distribuzione: Libera
Commessa SOLTERM Ottica P00V: Progettazione e realizzazione di radiometri innovativi per impianti Solari Termodinamici.		Parole chiave: Concentratore solare termodinamico o Fotovoltaico, Caratterizzazione di Fasci Concentrati, Diffusore Lambertiano, Videocamera CCD, Elaborazione d'immagini
Attività: .Messa a punto di metodi per la caratterizzazione di fasci concentrati di radiazione.		

Titolo:

“Caratterizzazione di fasci luminosi concentrati per diffusione da superficie lambertiana e ripresa con videocamera CCD”

Autori:

Antonio Parretta, Giuseppe Nenna e Augusto Maccari.

Sommario:

E' descritta la metodologia di misura della radiazione solare concentrata, basata sulla diffusione (scattering) del fascio di luce da parte di un diffusore lambertiano, in riflessione o trasmissione, sulla ripresa dell'immagine con una videocamera digitale (CCD) e sulla successiva elaborazione di essa al computer. Nella relazione EGE04009 del 9/02/04 era stata descritto il metodo di caratterizzazione dei diffusori ottici al fine di individuare quelli con caratteristiche prossime a quella ideale di lambertianità. In questa relazione la descrizione del metodo di misura del fascio concentrato, metodo denominato LS-CCD (Light Scattering-CCD), viene sviluppata al caso dei diffusori piani, adatti alle applicazioni di tipo fotovoltaico e termodinamico. Sono riportati i risultati di misure effettuate a basse e medio-alte concentrazioni sia in laboratorio che in esterno su concentratori parabolici point-focus. Da queste esperienze risulta evidente l'adeguatezza del metodo LS-CCD per la caratterizzazione di fasci di radiazione solare concentrata, soprattutto in termini di bassa invasività, velocità di esecuzione e precisione delle misure.

4							
3							
2							
1							
0	Emissione	A. Parretta	19/11/04	C. Privato		C. Privato	
Rev	Descrizione	Redazione	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

Indice

1.	Introduzione.....
2.	Approccio teorico.....
2.2	Il metodo della trasmissione.....
2.1	Il metodo della riflessione.....
2.3	Elaborazione delle immagini CCD.....
3.	Parte sperimentale.....
3.1	Caratterizzazione ottica dei diffusori.....
3.2	Videocamera CCD.....
3.3	Configurazione sperimentale.....
4.	Risultati e discussione.....
5.	Conclusioni.....

1. Introduzione

Il presente lavoro si inserisce nella più vasta attività finalizzata alla messa a punto di nuove metodologie e di nuove apparecchiature per la caratterizzazione di fasci di luce solare concentrata. L'attualità del tema dello sviluppo delle fonti energetiche alternative, coniugata con il rinnovato interesse della comunità scientifica internazionale verso i sistemi a concentrazione per la conversione dell'energia solare, rende viepiù urgente lo sviluppo di nuove metodologie ottiche finalizzate alla caratterizzazione ed al monitoraggio della radiazione solare concentrata.

E' necessario sviluppare metodi di misura affidabili e precisi, da impiegare nella fase di progetto del sistema a concentrazione, di ottimizzazione in laboratorio delle prestazioni ottiche di prototipi e, allorché realizzato sul campo, di allineamento ottico e di monitoraggio nel tempo.

Queste molteplici esigenze spingono per un metodo poco invasivo, rapido, affidabile e preciso. La caratterizzazione riguarda sia la misura della potenza totale incidente sul ricevitore (fotovoltaico o termodinamico) che la misura della distribuzione spaziale dell'intensità. Nel caso attuale la nostra attenzione è focalizzata principalmente sulla determinazione del profilo spaziale relativo dell'intensità del fascio, essendo questa informazione importante sia per le applicazioni termodinamiche che per le applicazioni fotovoltaiche [1-11]. La conoscenza della potenza totale incidente può essere ricavata dalle suddette misure attraverso un passaggio di integrazione e di calibrazione della videocamera.

Il metodo qui illustrato risponde alle principali esigenze precedentemente descritte, e si può adattare facilmente alle diverse configurazioni del sistema a concentrazione.

Esso è basato sull'uso di un diffusore Lambertiano, interposto tra la sorgente e il ricevitore, il quale diffonde la radiazione concentrata, producendo sulla sua superficie un'immagine che è raccolta da una videocamera digitale. L'immagine registrata dalla videocamera porta l'informazione della distribuzione spaziale dell'intensità d'irraggiamento. Questa informazione è ricostruita a partire dalle immagini registrate via specifici codici Matlab e codici originali.

La luce, che generalmente è usata per investigare gli oggetti, è in questo modo a sua volta investigata attraverso degli oggetti particolari che sono i diffusori lambertiani.

Il metodo qui descritto è denominato LS-CCD (Light Scattering-CCD). Pur essendo già stato usato un metodo simile per il monitoraggio di grandi impianti fotovoltaici a concentrazione, quale l'Euclide situato a Tenerife, [8,12-15] in questo lavoro il metodo LS-CCD viene ampiamente sviluppato, analizzandone in dettaglio gli aspetti teorici e delineando le configurazioni alternative nelle quali può presentarsi in pratica.

Nella sua più semplice configurazione, il sistema LS-CCD appare come mostrato nelle Figg. 1 a, b, per le modalità operative in riflessione o in trasmissione, rispettivamente. La configurazione più idonea viene scelta in base alla geometria del sistema, tenendo conto dello spazio disponibile per l'inserzione della videocamera.

La distribuzione dell'intensità della radiazione è misurata sulla sezione S, in corrispondenza della posizione del ricevitore. Il ricevitore può essere rimosso e sostituito da un diffusore spesso nel modo in riflessione (Fig. 1 a) oppure da un diffusore sottile nel modo in trasmissione (Fig. 1 b).

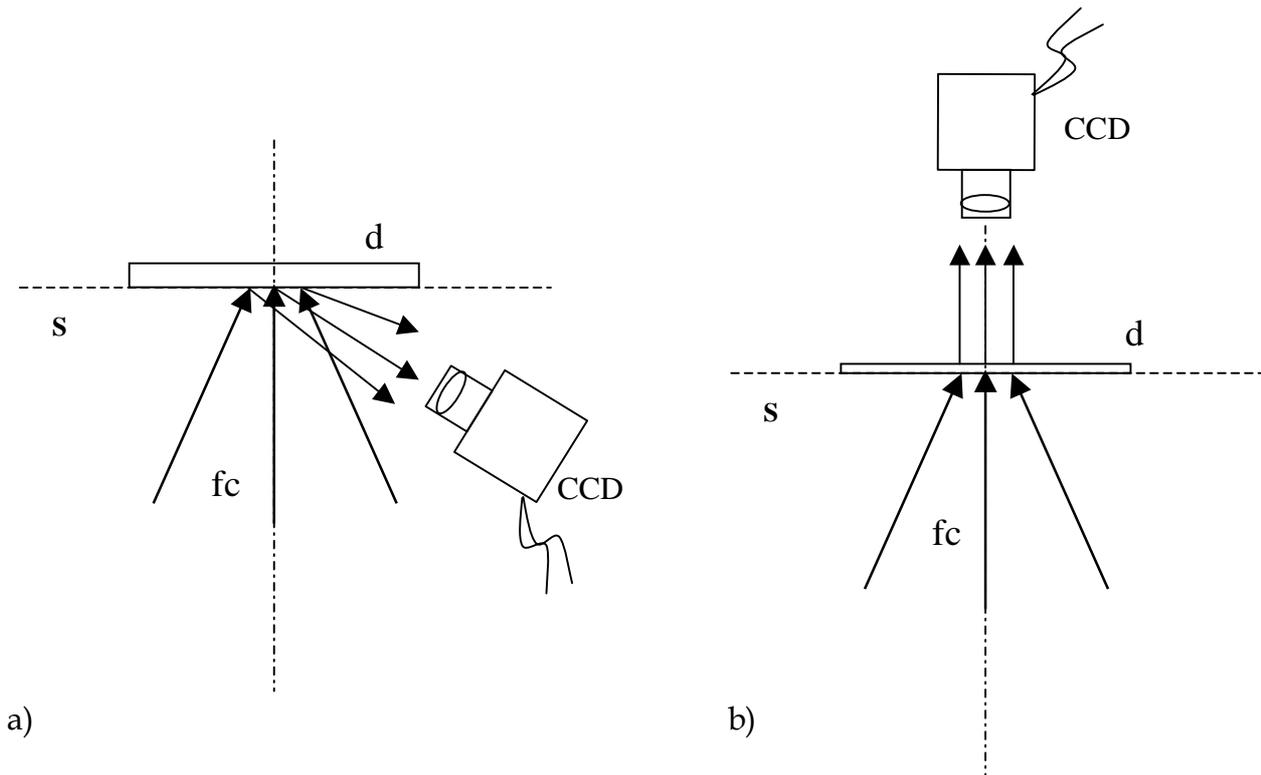


Figura 1. a) Schema di base del metodo LS-CCD (Light backscattering and CCD recording) nel modo in riflessione; b) Schema di base del metodo LS-CCD nel modo in trasmissione. Legenda: d = diffusore, s = sezione di test, fc = fascio concentrato, CCD = videocamera digitale.

Quando il ricevitore non può essere rimosso, o, più in generale, quando una configurazione meno intrusiva è preferita, si può adottare il sistema illustrato nelle Figg. 2 a, b.

Qui un separatore di fascio (beam splitter) (bs) divide il fascio in due mandandone una parte verso il ricevitore (r) e una parte verso il diffusore (d) in modo tale che il diffusore illuminato possa essere osservato dalla videocamera orientata ortogonalmente alla direzione del fascio concentrato (fc).

Nelle Figg. 2 a, b, se la distanza (bs)-(d) è mantenuta uguale alla distanza (bs)-(r), allora è possibile monitorare la distribuzione della luce sul ricevitore senza interferire con esso. Il vantaggio dello schema di principio delle Figg. 2 a, b, sta anche nel fatto che la CCD è in asse con il diffusore sia in riflessione che in trasmissione, e questo semplifica la ricostruzione del profilo di distribuzione dell'intensità a partire dall'immagine registrata, ponendo al contempo minori restrizioni alle proprietà ottiche del diffusore; ovvero in questo caso la necessità che il diffusore sia lambertiano è meno stringente (si veda la Sezione seguente).

La Fig. 3 mostra l'applicazione del metodo LS-CCD ad un concentratore termico lineare. Sul ricevitore tubolare è posto un anello, o collare diffusivo che diffonde la luce captata da una videocamera posizionata in prossimità degli specchi, in posizione decentrata laterale o assiale.

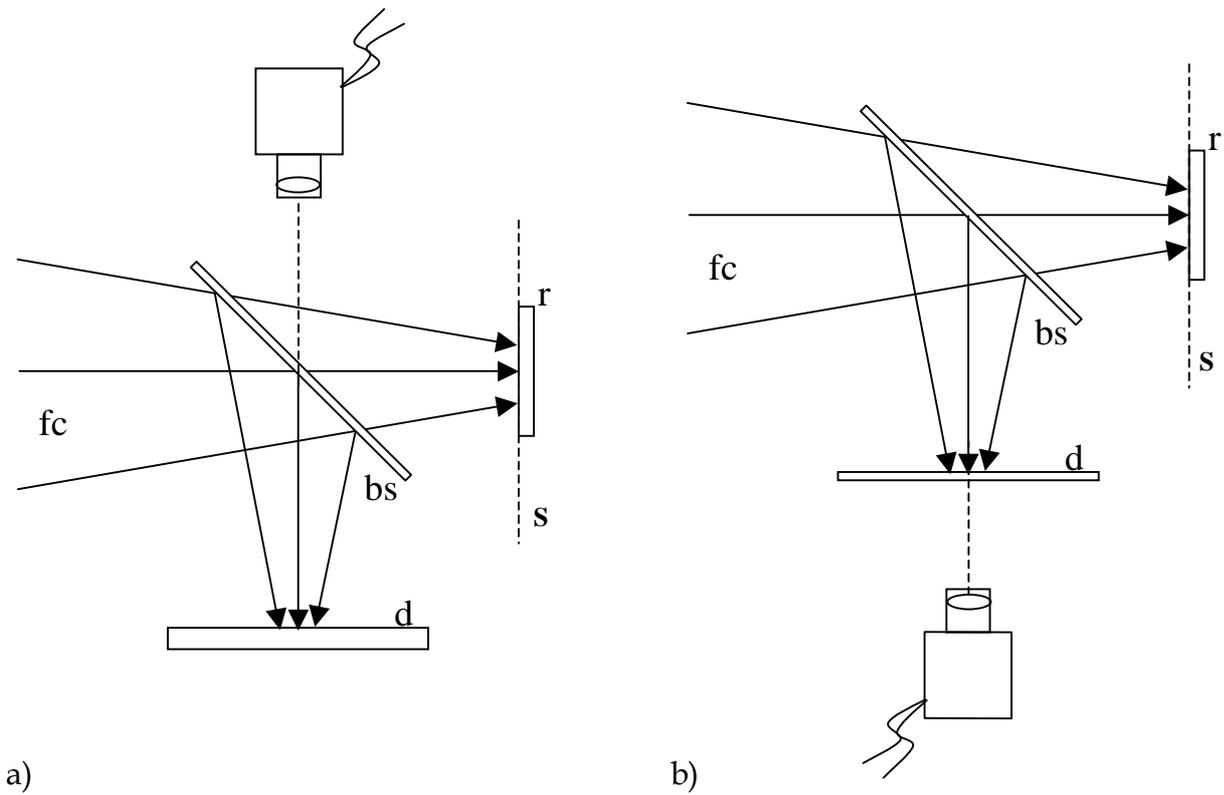


Figura 2. a) Schema alternativo per il metodo LS-CCD (modo in riflessione); b) Schema alternativo per il metodo LS-CCD (modo in trasmissione). Nello schema è inserito il divisore di fascio (bs).

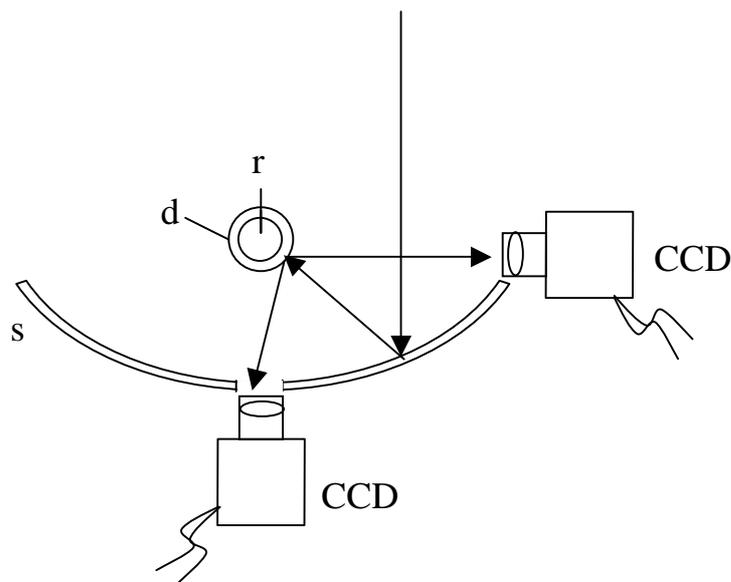


Figure 3. Metodo LS-CCD applicato ad un concentratore termodinamico lineare.
Legenda: r = tubo ricevitore, d = diffusore, s = specchio.

L'applicazione del metodo LS-CCD richiede l'uso di diffusori ottici con caratteristiche di lambertianità [16], almeno in riferimento agli attuali angoli d'incidenza del fascio concentrato e agli attuali angoli di osservazione del diffusore attraverso la CCD. L'uso di diffusori lambertiani, infatti permette, come vedremo nella prossima sezione, di semplificare al massimo l'elaborazione delle immagini registrate con la CCD ed estrarre da esse la distribuzione d'intensità del fascio. I diffusori lambertiani diffondono la luce secondo una semplice legge geometrica. Una estesa analisi delle caratteristiche ottiche di diffusori commerciali è stata esposta con la relazione EGE04009 [17]; nella presente relazione invece ci limitiamo a riportare i principali risultati raggiunti attraverso misure di distribuzione angolare dell'intensità radiante.

2. Approccio teorico

2.1 Il metodo della riflessione

Il metodo LS-CCD operante con luce retrodiffusa (backscattering), denominato anche "metodo della riflessione", è illustrato in dettaglio in Fig. 4. Il fascio di radiazione concentrata produce uno spot di luce sul diffusore (o target), la cui distribuzione è $I(P, \lambda)$, dove $P(x, y)$ è il generico punto nel piano (x, y) del riferimento cartesiano definito sul target e λ rappresenta la lunghezza d'onda d'interesse.

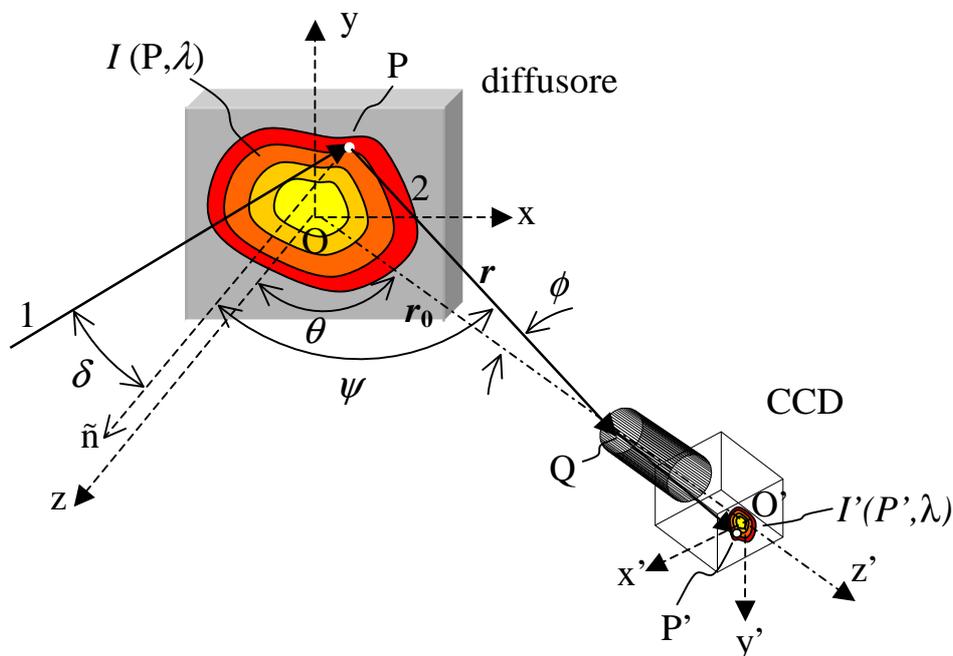


Figura 4. Rappresentazione schematica della diffusione della luce concentrata da parte di un diffusore piano e della ripresa dell'immagine prodotta su di esso da parte di una videocamera digitale CCD.

La camera CCD si muove sul piano (x, z) ed è orientata verso l'origine O formando un angolo θ con l'asse z . Un nuovo riferimento cartesiano (x', y', z') è definito sulla CCD e l'immagine è prodotta sul piano (x', y') di questo riferimento. A causa dell'angolo formato tra l'asse z e la normale al piano della camera CCD, l'immagine registrata sarà affetta da una deformazione prospettica di cui si dovrà tener conto in fase di elaborazione dell'immagine per la ricostruzione del profilo dell'intensità incidente. A tal fine ci si avvarrà delle leggi della geometria proiettiva e della prospettiva.

Cominciamo considerando un raggio o fascio elementare di luce, 1, che colpisce il target nel punto $P(x, y)$ incidendo con angolo δ . La luce diffusa da P sarà distribuita nell'emisfero frontale del target. Una porzione di questa luce, rappresentata dal raggio 2, sarà diffusa da $P(x, y)$ ad un angolo ψ ed inciderà sulla camera con un angolo di osservazione off-axis ϕ . Altri parametri importanti per sviluppare la teoria sono la distanza $Q-O=r_0$, dove Q rappresenta la posizione dell'obiettivo della CCD, la distanza $Q-P=r$, e la distanza $Q-O'=f$, dove O' è l'origine del sistema di riferimento della CCD e la distanza f è data dalla relazione generali per le lenti:

$$1/r_0 + 1/f = 1/F \quad (1)$$

dove F è la distanza focale dell'obiettivo.

Una corrispondenza biunivoca esiste tra i punti $P(x,y)$ della superficie del diffusore e i punti $P'(x', y')$ dell'array di pixels della CCD. L'intensità luminosa sulla CCD nel punto $P'(x', y')$, $I'(P', \lambda)$, indicata anche come l'intensità del segnale CCD, può essere espressa come:

$$I'(P', \lambda) \propto f_{scatt}(P) \cdot f_{lightcoll}(P) \cdot I(P, \lambda) = \dots$$

$$\dots = R_d(\delta, \psi, \lambda) \cdot \left[\frac{R_o(\phi, \lambda) \cdot \cos(\phi) \cdot f_{focal}(P)}{r^2(P)} \right] \cdot I(P, \lambda) \quad (2)$$

dove abbiamo introdotto i fattori $f_{scatt}(P)$ e $f_{lightcoll}(P)$ che rappresentano rispettivamente le proprietà di diffusione ("scattering") della luce da parte del diffusore e di raccolta della luce ("light collection") da parte della videocamera. Il termine $R_o(\phi, \lambda)$ rappresenta la perdita ottica per riflessione da parte dell'obiettivo della CCD. Esso si può considerare indipendente da ϕ in quanto nelle condizioni sperimentali adottate $\phi \leq 3^\circ$, e quindi diventa una funzione della sola lunghezza d'onda. Per semplicità, ma d'altra parte per l'impossibilità di quantificarlo, esso verrà nel seguito trascurato. La grandezza $R_d(\delta, \psi, \lambda)$ rappresenta la riflettanza spettrale del diffusore, funzione dell'angolo d'incidenza δ , dell'angolo di scattering ψ , e della lunghezza d'onda λ .

I termini $\cos\phi$ e r^2 sono invece legati alla geometria della collezione della luce da parte della videocamera.

Le grandezze r , ϕ e ψ si ricavano facilmente dalle coordinate del punto $P(x, y)$. Ci si può riferire, a tal proposito, alla Fig. 5 nella quale il sistema diffusore-CCD è mostrato schematicamente in pianta. E' da notare che, a parte l'angolo θ , gli altri due angoli mostrati in figura sono solo le rispettive proiezioni sul piano (x,z) .

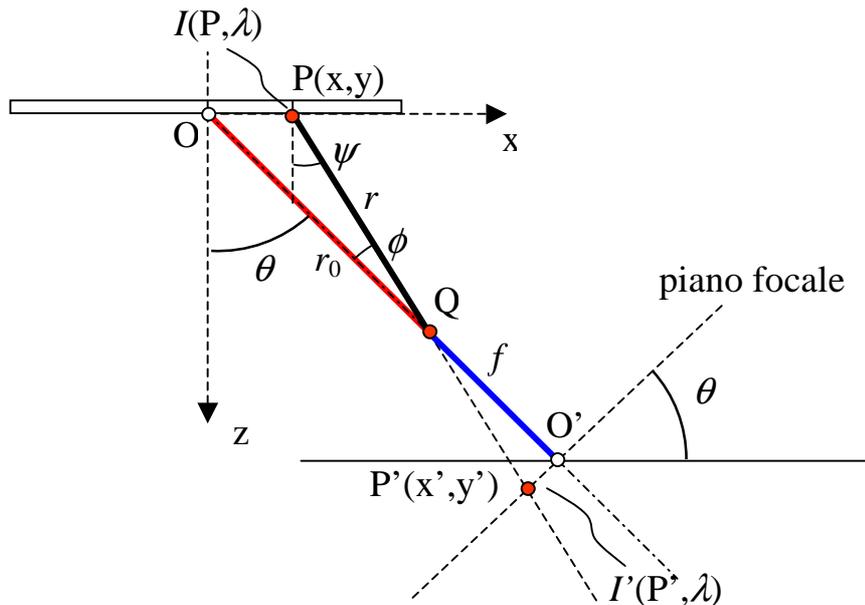


Figura 5. Rappresentazione schematica del sistema diffusore-CCD visto in pianta.

Si trova:

$$r^2(P) = r_0^2 + (x^2 + y^2) - 2 \cdot r_0 \cdot x \cdot \sin \theta \quad (3)$$

$$\phi(P) = \cos^{-1} \left[\frac{r^2 + r_0^2 - (x^2 + y^2)}{2 \cdot r \cdot r_0} \right] \quad (4)$$

$$\psi(P) = \cos^{-1} \left[\frac{r_0 \cdot \cos \theta}{2 \cdot r \cdot r_0} \right] \quad (5)$$

Il termine $f_{focal}(P)$, fattore di focalizzazione, è una grandezza che tiene conto del fatto che la formazione dell'immagine ha per effetto un innalzamento dell'intensità del segnale CCD, che varia da punto a punto e in relazione alle diverse condizioni di ripresa. In altri termini, focalizzare la luce del diffusore sulla CCD equivale a concentrare la luce stessa. Il fattore di focalizzazione è descritto in dettaglio nella Sezione 2.3 dove è discusso della deformazione dell'immagine per effetto della prospettiva. Il termine $f_{focal}(P)$ è unitario in

assenza di obiettivo; in questo caso infatti la CCD si comporta come un semplice fotorivelatore e ciascun "pixel" della matrice riceve luce da ciascun punto del diffusore. L'impiego della CCD senza obiettivo è stato effettivamente adottato, come è spiegato nella parte sperimentale, per investigare le proprietà diffusive del diffusore in termini di comportamento Lambertiano [16].

Dall' Eq. (2) risulta evidente che la conoscenza dell'angolo d'incidenza $\delta(P)$ in ogni punto del diffusore è necessaria quando si ha a che fare con un diffusore generico. Questo fatto pone un grosso limite al metodo LS-CCD, poichè la conoscenza di $\delta(P)$ è in pratica molto difficile. Soltanto un intervallo di valori di δ può essere dedotto a partire dalla specifica geometria del sistema a concentrazione impiegato. Questo problema è facilmente superato quando si impiega un diffusore Lambertiano (quasi-Lambertiano secondo la terminologia da noi introdotta), ovvero un diffusore la cui riflettanza è indipendente (quasi-indipendente) dall'angolo d'incidenza della luce e la cui intensità della luce diffusa segue la (è prossima alla) legge del coseno dell'angolo di osservazione, o angolo di diffusione (angolo di scattering). In tal caso è possibile esprimere la riflettanza come:

$$R_d(\delta, \psi, \lambda) = R_d(\psi, \lambda) = R_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \quad (6)$$

dove $\Lambda(\psi, \lambda)$ è qui definita come "funzione Lambertiana". Essa è pari a $\cos\psi$ per diffusori strettamente Lambertiani, mentre è prossima a $\cos\psi$ per diffusori quasi-Lambertiani. Una definizione precisa di diffusori quasi-Lambertiani non è stata ancora trovata, ma si sta lavorando su questo problema [18]). Le proprietà di Lambertianità di un diffusore si valutano attraverso misure combinate di riflettanza totale risolta nell'angolo d'incidenza e misure di intensità di luce diffusa in funzione dell'angolo d'osservazione (diffusione o scattering) (vedi parte sperimentale).

Fortunatamente, la maggior parte dei diffusori commerciali ad alta riflettività (>60%) mostrano un comportamento quasi-Lambertiano e quindi l' Eq. (6) si applica bene per essi. La dipendenza della riflettanza dalla lunghezza d'onda, $R_d(\lambda)$, si ottiene dalle tavole di calibrazione se il diffusore è uno standard di riflettanza, o da misure ad angolo d'incidenza fisso in un comune spettrofotometro.

Assumendo perciò che il diffusore sia Lambertiano o quasi-Lambertiano, possiamo scrivere per l'intensità del segnale CCD:

$$I'(P', \lambda) \propto R_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \cdot \left[\frac{\cos\phi \cdot f_{focal}(P)}{r^2(P)} \right] \cdot I(P, \lambda) \quad (7)$$

Dall' Eq. (7) si ricava infine la distribuzione dell'intensità luminosa sul diffusore:

$$I(P, \lambda) \propto f_{corr}(P, \lambda) \cdot I'(P', \lambda) = \frac{r^2(P)}{R_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \cdot \cos \phi \cdot f_{focal}(P)} \cdot I'(P', \lambda) \quad (8)$$

dove abbiamo introdotto il termine $f_{corr}(P, \lambda)$ come fattore da applicare per la correzione dell'intensità del segnale CCD.

L'Eq. (8) è valida nel caso generale. Essa può essere semplificata quando la camera CCD è posizionata lontano dal target in modo tale che sia $r, r_0 \gg x, y$. In questo caso l'angolo ψ si può considerare costante ed uguale a θ , mentre l'angolo $\phi \approx 0$, e l'intensità luminosa diventa:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{r_0^2}{R_d(\lambda) \cdot \Lambda(\theta, \lambda) \cdot f_{focal}(P)} \cdot I'(P', \lambda) \quad (8')$$

2.2 Il metodo della trasmissione

Il metodo LS-CCD operante in luce diffusa in avanti ("forward scattering"), denominato anche "metodo della trasmissione", è illustrato in dettaglio in Fig. 6. Esso opera con un target diffusivo molto sottile che trasmette una buona parte della luce incidente. La camera CCD è ora posizionata in opposizione alla sorgente di luce e quindi può essere allineata all'asse ottico del fascio incidente, evitando così l'effetto ombra che si sarebbe avuto col metodo della riflessione. Il fascio di luce concentrata produce uno spot di luce sul target sottile, che è visibile dalla parte opposta. L'immagine dello spot sul diffusore è ora registrato ruotato di 180° attorno all'asse y rispetto al metodo precedente.

Nel caso generale di una CCD orientata ad angolo θ rispetto all'asse z , l'intensità del segnale CCD per un diffusore generico è espressa da:

$$\begin{aligned} I'(P', \lambda) &\propto f_{scatt}(P) \cdot f_{lightcoll}(P) \cdot I(P, \lambda) = \dots \\ \dots &= T_d(\delta, \psi, \lambda) \cdot \left[\frac{R_o(\phi, \lambda) \cdot \cos(\phi) \cdot f_{focal}(P)}{r^2(P)} \right] \cdot I(P, \lambda) \quad (9) \end{aligned}$$

dove $T_d(\delta, \psi, \lambda)$ è la trasmittanza spettrale del diffusore, funzione dell'angolo d'incidenza δ , dell'angolo di scattering ψ , e della lunghezza d'onda λ . Anche in questo caso ignoriamo il termine $R_o(\phi, \lambda)$. Per un diffusore Lambertiano o quasi-Lambertiano, l'intensità del segnale CCD si semplifica:

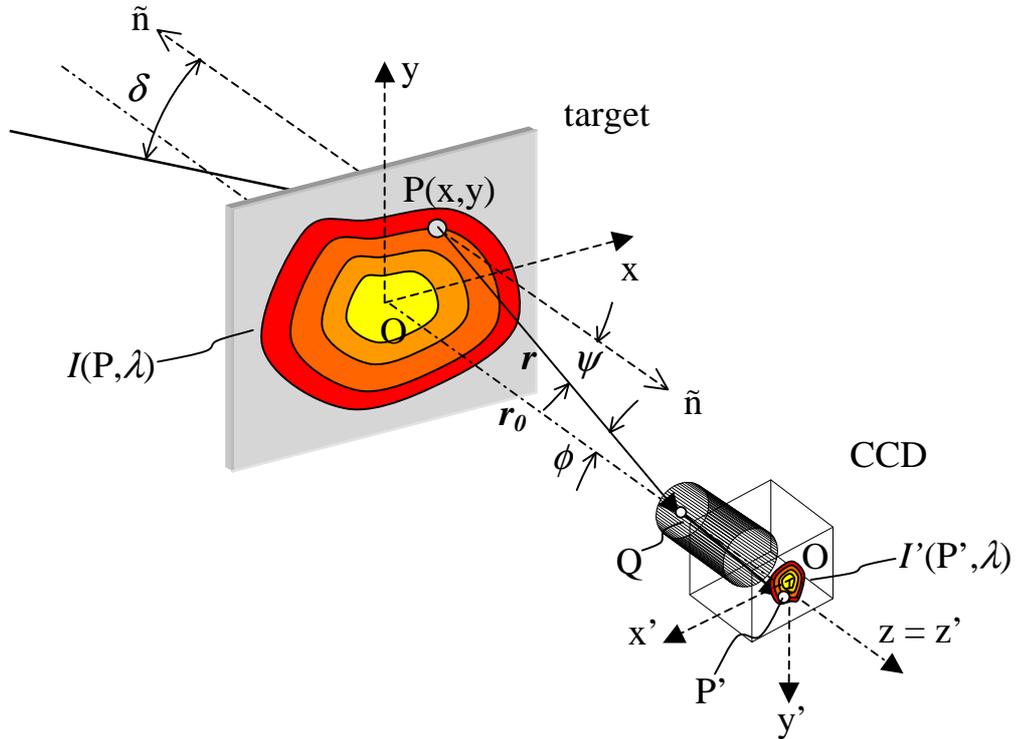


Figura 6. Rappresentazione schematica della diffusione in trasmissione della luce concentrata e della registrazione con la CCD dell'immagine prodotta sul target piano.

$$I'(P', \lambda) \propto T_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \cdot \left[\frac{\cos \phi \cdot f_{focal}(P)}{r^2(P)} \right] \cdot I(P, \lambda) \quad (9')$$

e l'intensità della luce sul diffusore diventa:

$$I(P, \lambda) \propto f_{corr}(P, \lambda) \cdot I'(P', \lambda) = \frac{r^2(P)}{T_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \cdot \cos(\phi) \cdot f_{focal}(P)} \cdot I'(P', \lambda) \quad (10)$$

Nel caso speciale di una CCD allineata con l'asse ottico z , come mostrato in Fig. 6, abbiamo $\theta = 0^\circ$, $\psi = \phi$, e l'Eq. (10) diventa:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{r^2(P)}{T_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \cdot \cos(\psi)} \cdot I'(P', \lambda) \quad (10')$$

Quando la camera CCD è posizionata lontano dal diffusore, ovvero $r, r_0 \gg x, y$, allora $\psi, \phi \sim 0, r \sim r_0$ e l' Eq. (10) diventa:

$$I(P, \lambda) \propto \frac{r_0^2}{T_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi, \lambda) \cdot f_{focal}(P)} \cdot I'(P', \lambda) \quad (10'')$$

2.3 Elaborazione delle immagini CCD

Diverse tecniche di calibrazione per videocamera sono disponibili in letteratura, generalmente applicate alla visione su computer e alla fotogrammetria [19-21]. Qui noi svilupperemo un semplice metodo di ricostruzione dell'immagine basato su concetti elementari di trigonometria.

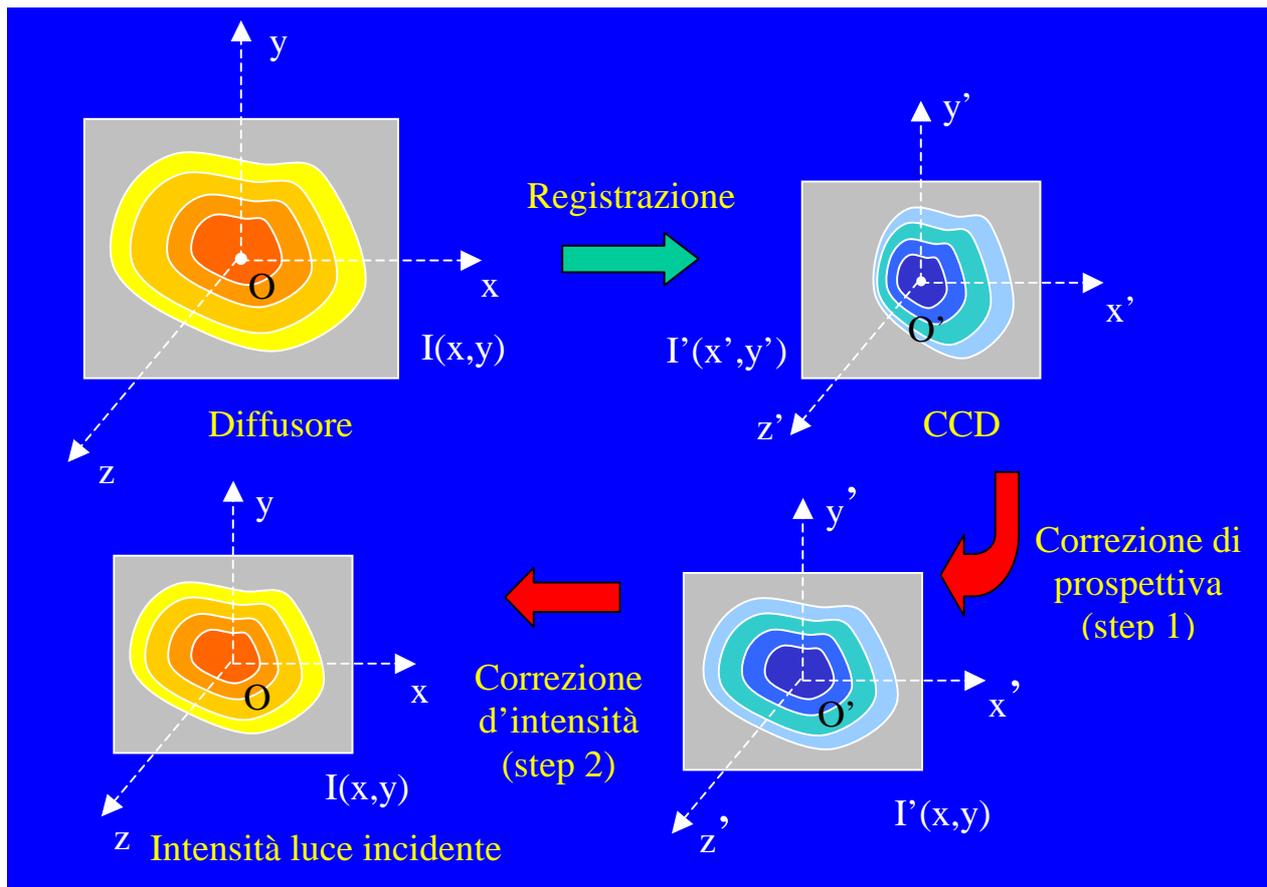


Figura 7. Rappresentazione schematica della procedura per la ricostruzione della mappa d'intensità della luce incidente sul diffusore. Il processo di registrazione CCD altera sia la forma dell'immagine che la sua intensità. Occorre allora correggere dapprima la deformazione prospettica (step 1) e poi l'intensità (step 2).

Le Eq. (8), (8') per la riflessione, o le Eq. (10)-(10'') per la trasmissione, assegnano un valore di intensità relative ai punti $P(x, y)$ del diffusore, che sono in una relazione biunivoca con i punti $P'(x', y')$ della matrice di pixels della CCD. In tal modo si è tracciata una procedura di correzione dell'intensità dei punti dell'immagine registrata. Per ottenere l'effettiva distribuzione spaziale dell'intensità luminosa sul diffusore, però, occorre ricostruire l'immagine dello spot di luce sul diffusore, che ha subito una deformazione prospettica, a partire dall'immagine sulla CCD.

Una rappresentazione schematica della procedura di ricostruzione della mappa d'intensità della luce incidente sul diffusore è mostrata in Fig. 7. Il processo di registrazione CCD altera sia la forma dell'immagine che la sua intensità. Occorre allora correggere dapprima l'immagine per effetto della deformazione prospettica (step 1) e poi l'intensità dei punti (step 2) secondo quanto stabilito con le Eq. (8), (8') per la riflessione o le Eq. (10)-(10'') per la trasmissione. Naturalmente i due step possono essere applicati in ordine inverso.

La deformazione geometrica o spaziale dell'immagine per effetto della prospettiva è illustrata in Fig. 8, dove è mostrato, come esempio, un reticolo quadrato di punti luminosi sul riferimento x - y , il quale è osservato da una videocamera CCD orientata ad un angolo $\theta=60^\circ$ rispetto all'asse z , e posta ad una distanza $r_0 = 2 x_{\max} = 2 y_{\max}$. Il reticolo quadrato è fortemente deformato dalla CCD e appare come è mostrato sulla parte destra di Fig. 8. La deformazione è stata calcolata precisamente applicando le leggi della prospettiva.

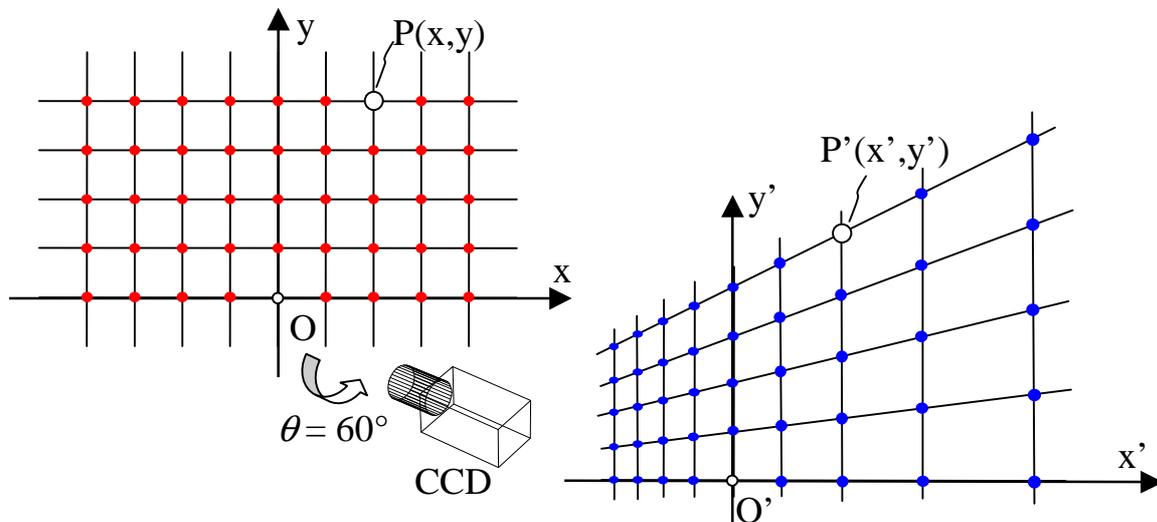


Figura 8. Rappresentazione schematica dell'effetto prodotto dalla prospettiva su un array quadrato di punti luminosi.

La deformazione dell'immagine per effetto della prospettiva è illustrata anche in Fig. 9, dove si evidenzia meglio la formazione dell'immagine sulla CCD e la sua orientazione rispetto agli assi del riferimento (x', y') . La formazione dell'immagine è accompagnata naturalmente da una rotazione di 180° delle coordinate (x, y) .

Le equazioni per la trasformazione prospettica, che trasformano le coordinate dei punti $P'(x', y')$ sulla CCD in quelle dei corrispondenti punti $P(x, y)$ sul diffusore, e viceversa, sono state ottenute applicando semplici concetti trigonometrici al sistema diffusore-CCD, come è stato delineato nelle Figg. 4-6.

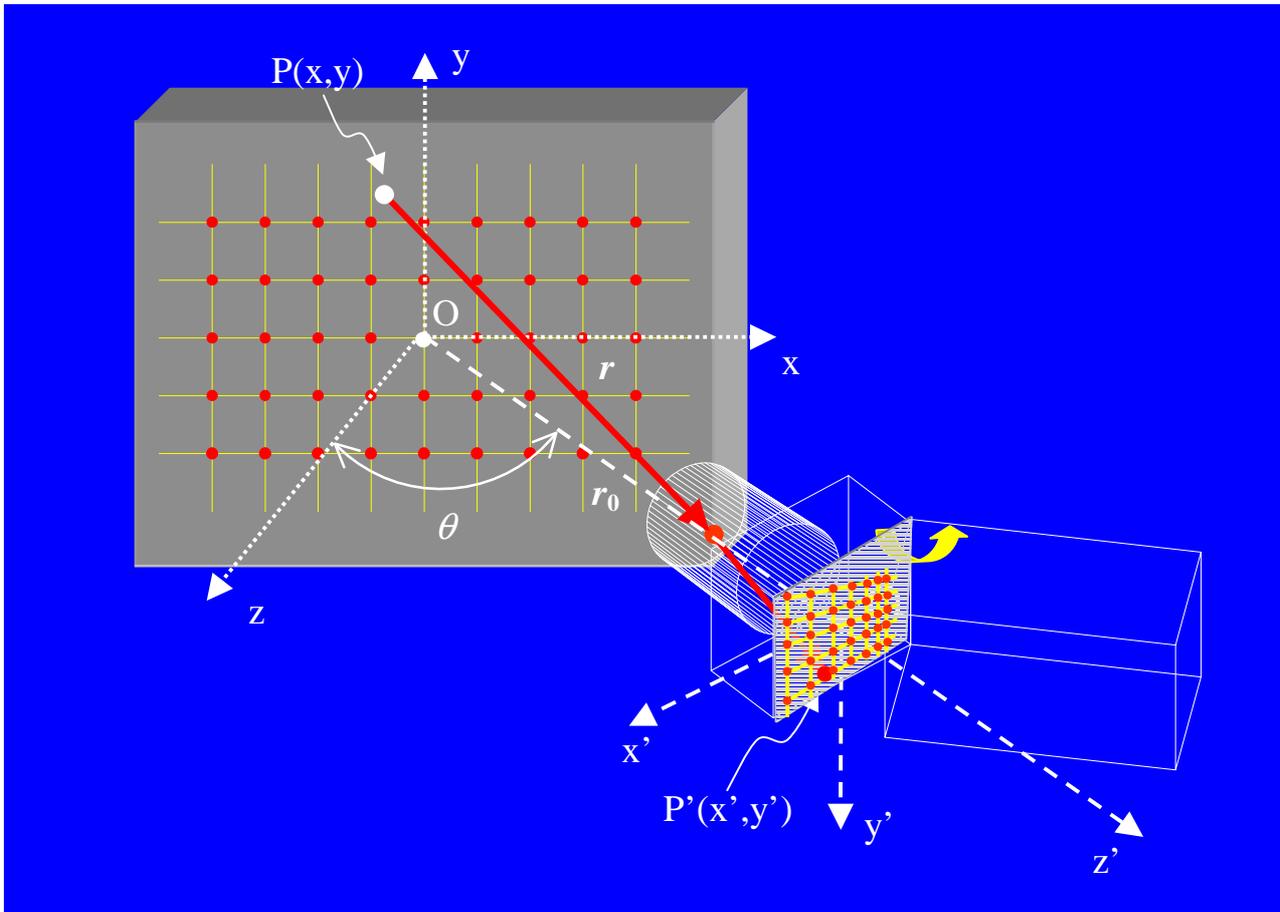


Figura 9. Formazione dell'immagine CCD a partire da un reticolo quadrato di punti luminosi.

Nel caso generale, la trasformazione delle coordinate è espressa dalle seguenti equazioni:

$$x = \frac{r_0 \cdot x'}{x' \cdot \sin \theta + f \cdot \cos \theta} \quad y = (y'/f) \cdot (r_0 - x \cdot \sin \theta) \quad (11')$$

$$x' = \frac{f \cdot x \cdot \cos \theta}{(r_0 - x \cdot \sin \theta)} \quad y' = \frac{f \cdot y}{(r_0 - x \cdot \sin \theta)} \quad (11'')$$

La grandezza f , già espressa nell'Eq. (1) come distanza tra obiettivo e matrice dei pixels della CCD, gioca il ruolo di un fattore di scala rispetto all'immagine registrata.

Le Eq.ni (11'') rappresentano la trasformazione geometrica operata dalla CCD sull'immagine dello spot luminoso, mentre le Eq.ni (11') rappresentano la trasformazione geometrica da operare per ritornare alle coordinate x e y a partire dalle coordinate x' e y' .

Le coordinate x e y sono alterate dal termine comune a denominatore, quello responsabile della deformazione lungo l'asse delle ordinate della griglia di Fig. 8 (figura di destra), mentre sulla coordinata x ha effetto, oltre al termine suddetto, anche il termine $\cos \theta$ a numeratore. Anche in questo caso, come per il calcolo dell'intensità, le equazioni possono

essere semplificate per grandi distanze diffusore-CCD ($r, r_0 \gg x, y$), e le corrispondenti equazioni diventano:

$$x \approx \frac{r_0 \cdot x'}{f \cdot \cos \theta} \quad y \approx \frac{r_0 \cdot y'}{f} \quad (12')$$

$$x' \approx \frac{f \cdot x \cdot \cos \theta}{r_0} \quad y' \approx \frac{f \cdot y}{r_0} \quad (12'')$$

In queste condizioni si ottiene una semplice relazione di linearità tra le coordinate. Dalle Eq.ni (11'), (11'') è possibile derivare il fattore di concentrazione dovuto alla focalizzazione, $f_{focal}(P)$, già introdotto con l' Eq. (2). Intanto notiamo che $f_{focal}(P)$ interviene sia nel confronto tra immagini prese a diverse angolazioni, che all'interno dell'immagine stessa. Naturalmente il fattore di focalizzazione è una grandezza relativa e quindi va usato sempre per confrontare tra loro immagini diverse, oppure zone diverse della stessa immagine CCD. Il primo caso è illustrato in Fig. 10, dove è mostrato come la ripresa di un'immagine ad angoli θ più alti comporta la riduzione dell'area interessata all'immagine sulla CCD e quindi una sorta di concentrazione della luce. Tale concentrazione risulta tanto più alta quanto maggiore è l'angolo θ .

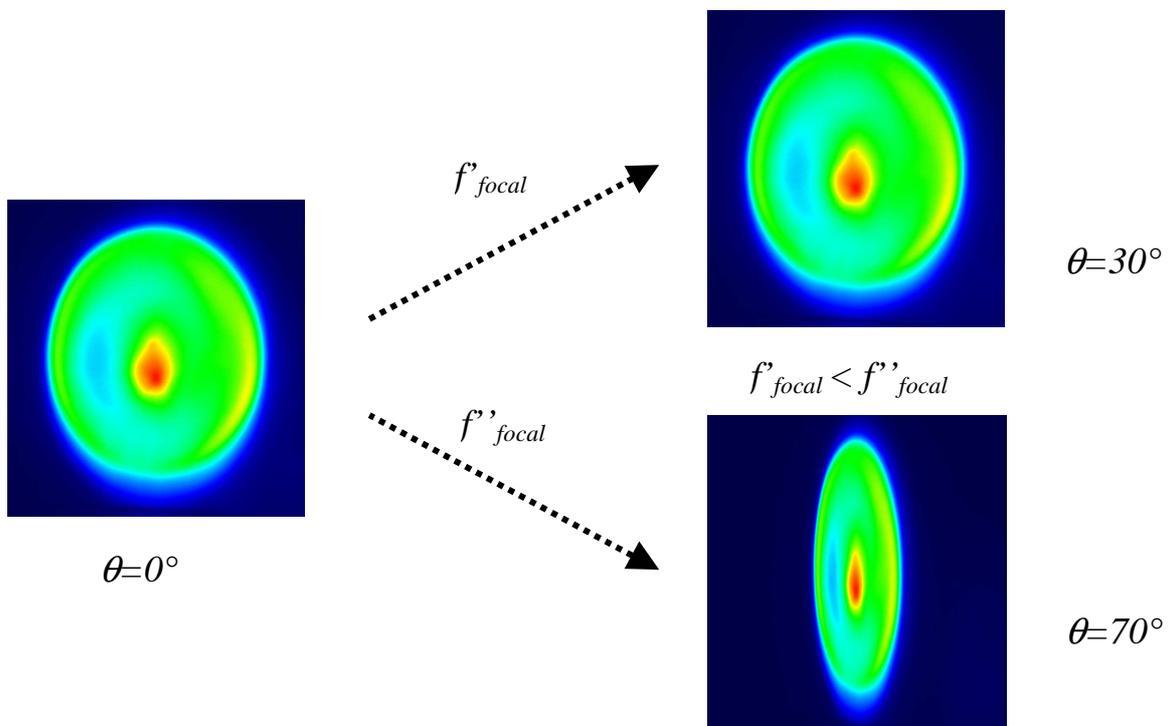


Figura 10. La formazione dell'immagine dello spot ad angoli θ più alti comporta la concentrazione della luce e quindi un aumento dell'intensità del segnale CCD.

In Fig. 10 l'immagine dello spot ha una larghezza che diminuisce essenzialmente come il fattore $\cos \theta$ e quindi il fattore di focalizzazione, e di conseguenza la concentrazione della luce, $f_{focal}(P)$, aumenta essenzialmente come il fattore $1/\cos \theta$. Ci aspettiamo quindi che,

registrando un'immagine a valori di θ più alti, si abbia un innalzamento dell'intensità del segnale CCD di un fattore $1/\cos\theta$. Come vedremo, però, questo innalzamento è bilanciato quasi esattamente dall'intensità della luce diffusa ad angolo θ , che per un diffusore Lambertiano diminuisce come $\cos\theta$.

Per illustrare l'effetto del fattore di focalizzazione all'interno della stessa immagine, riprendiamo il reticolo quadrato di Fig. 8, riprodotto per comodità in Fig. 11, e consideriamo un intorno elementare di dimensioni $\Delta x \cdot \Delta y$ del punto $P(x, y)$ generico. Questo intorno è trasformato dalla CCD in un elemento di superficie di dimensioni $\Delta x' \cdot \Delta y'$. Mentre l'area dell'intorno $\Delta x \cdot \Delta y$ è mantenuta costante sulla superficie del diffusore al variare del punto $P(x, y)$ (quadrato verde), l'intorno $\Delta x' \cdot \Delta y'$ varia con il punto $P'(x', y')$ sulla matrice CCD. Quest'ultimo è relativamente più piccolo laddove l'immagine è compressa ($x' < 0$) (quadrilatero rosso) e relativamente più grande laddove l'immagine è espansa ($x' > 0$) (quadrilatero blu).

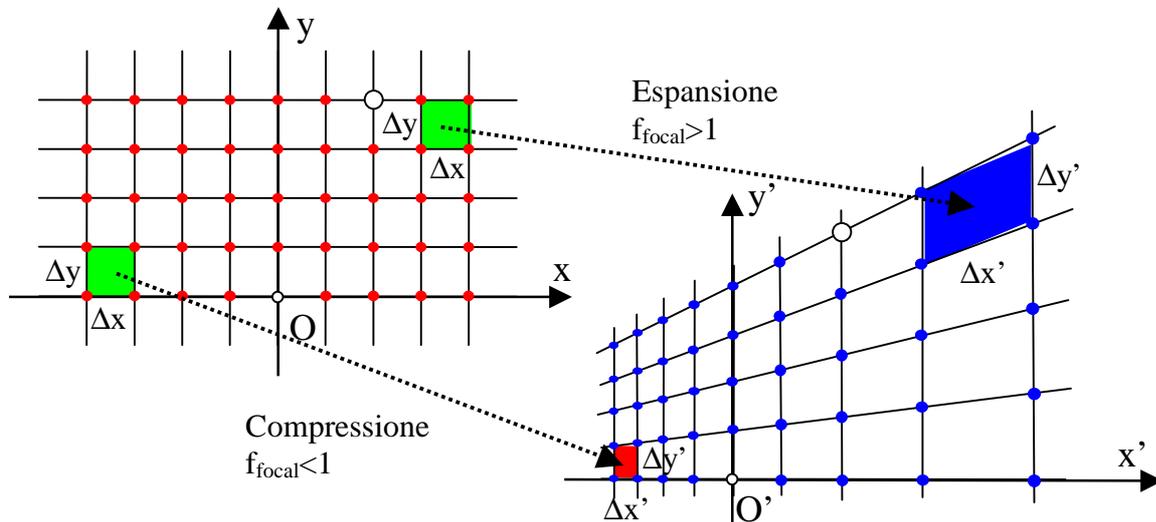


Figura 11. La riproduzione sulla CCD dello stesso intorno $\Delta x \cdot \Delta y$ porta ad un'immagine la cui dimensione $\Delta x' \cdot \Delta y'$ è diversa a seconda della posizione del punto, per effetto della prospettiva, e quindi si può avere una compressione (relativa) oppure una espansione (relativa) dell'intorno considerato.

La compressione o l'espansione dell'immagine del quadrato comporta rispettivamente un incremento oppure una riduzione del segnale CCD relativo alla zona considerata. Il fattore di focalizzazione è definito come:

$$f_{focal}(P) = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\Delta x'(P') \cdot \Delta y'(P')} = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\Delta x'(P) \cdot \Delta y'(P)} \quad (13)$$

Differenziando le funzioni $x'(x)$ e $y'(x, y)$ nell' Eq. (11''), e ponendo $\Delta x = \Delta y = \text{cost}$, $\Delta x^2 = \Delta x \cdot \Delta y$, perveniamo alla seguente espressione generale per $f_{focal}(P)$:

$$f_{focal}(P) = \frac{(r_0 - x \cdot \sin \theta)^4}{r_0 \cdot f^2 \cdot \cos \theta \cdot [(y - x) \cdot \sin \theta + r_0]} \quad (14)$$

Nell'approssimazione $r, r_0 \gg x, y$, il fattore $f_{focal}(P)$ diventa semplicemente:

$$f_{focal}(P) = \frac{r_0^2}{f^2 \cdot \cos \theta} \quad (14')$$

Quando la camera CCD è allineata con l'asse ottico z , si ha che $f_{focal}(P, \theta) = f_{focal}(P, 0) = r_0^2/f^2 = \text{cost}$ e quindi non si ha nessun effetto sul calcolo della distribuzione dell'intensità relativa della luce sul diffusore. Nel seguito riporteremo delle accurate elaborazioni delle immagini CCD, utili non tanto e non sempre per uno scopo pratico, quanto per mostrare la correttezza della teoria da noi sviluppata per l'elaborazione delle immagini CCD. Esse si riferiranno a profili presi a $x = 0$ ($x' = 0$) o $y = 0$ ($y' = 0$) sull'immagine CCD. In questi casi il fattore $f_{focal}(P)$ prende la forma, rispettivamente:

$$f_{focal}(P)_{x=0} = \frac{r_0^3}{f^2 \cdot \cos \theta \cdot [y \cdot \sin \theta + r_0]} \quad ; \quad f_{focal}(P)_{y=0} = \frac{(r_0 - x \cdot \sin \theta)^3}{r_0 \cdot f^2 \cdot \cos \theta} \quad (14'')$$

Per la ricostruzione dell'intera immagine CCD, al contrario, è stato usato un programma scritto in C++, che applica le equazioni generali (11') and (11'') (vedi Appendice 1). L'algoritmo realizza una nuova matrice di punti. In primo luogo si determinano le dimensioni, in coordinate continue, in corrispondenza degli assi $y=0$ e $x=0$; per far ciò si impongono al target le lunghezze reali dell'oggetto visualizzato sulla matrice CCD; nota la dimensione verticale (corrispondente all'asse $x=0$), quella orizzontale della zona visualizzata si determina moltiplicando tale misura verticale per il rapporto tra il numero di colonne ed il numero di righe sull'immagine CCD. Si definisce poi arbitrariamente la dimensione di uno step sul target, che rappresenta il lato dell'elemento quadrato unitario, il pixel della nuova matrice. Minore è la dimensione scelta per tale elemento, maggiore è la risoluzione dell'immagine ottenuta.

La determinazione delle intensità di ognuno di questi punti è fatta definendo per ognuno di essi il corrispondente punto nella matrice CCD, individuabile applicando le formule che legano le coordinate dei 2 reticoli di punti. Per far ciò si sono definite le coordinate continue per entrambi le matrici. Poiché il numero di punti delle 2 matrici risulta diverso, per avere l'intensità di un punto sulla matrice ricostruita (x, y) si effettua una media pesata delle intensità dei pixel primi vicini (definiti da coordinate intere) al punto (x', y') coordinata corrispondente a (x, y) sullo schermo CCD. Il fattore peso è la distanza dalla coordinata ottenuta applicando le formule che legano le coordinate sul target e sulla CCD, quindi un numero reale.

Per l'intensità dei punti ricostruiti non si applica solo l'intensità dei pixel corrispondenti, ma si usano anche le formule che tengono conto della lambertianità del diffusore e del fattore geometrico di contrazione $f_{focal}(P)$.

Esempi di elaborazione di immagini CCD con il metodo descritto sono mostrate in fig.12a e b.

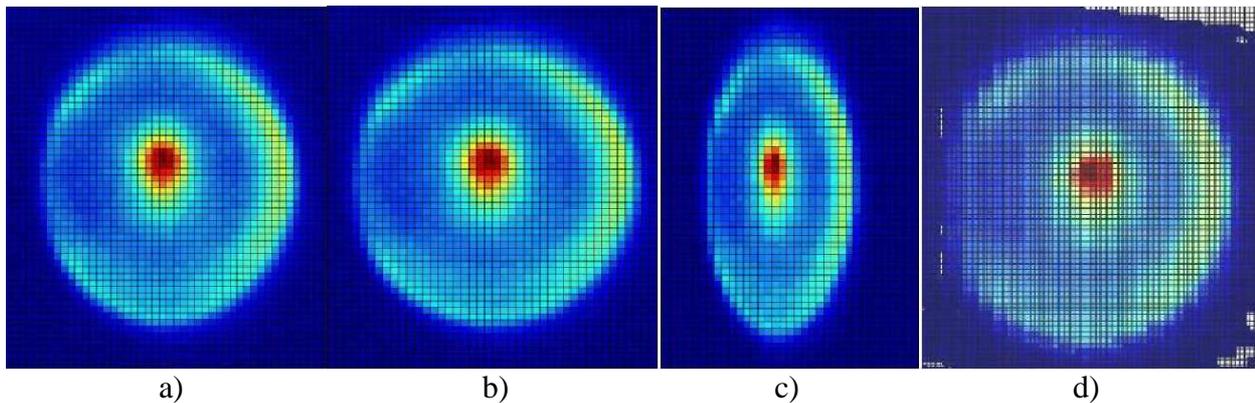


Figura 12a. Esempio di elaborazione di un'immagine CCD intera. Le immagini a) e c), prese a 30° e 70° rispettivamente, sono state ricostruite e il risultato sono le immagini b) e d).

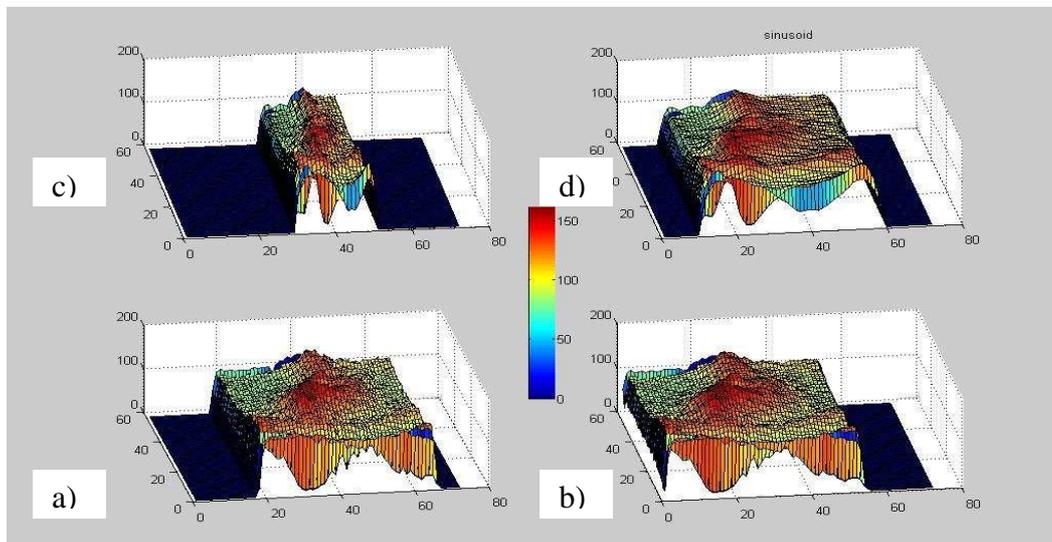


Figura 12b. Esempio di elaborazione di immagine CCD 3D con programma MatLab. Le immagini a) e c), prese a 70° e 30° rispettivamente, sono state ricostruite e il risultato sono le immagini d) e b) sulla destra. L'elaborazione si riferisce alle stesse misure di Fig. 12°.

3. Parte sperimentale

3.1 Caratterizzazione ottica dei diffusori

Per gli esperimenti di diffusione della luce e registrazione con la CCD sono stati impiegati target diffusivi quadrati da 5 pollici della Labsphere, realizzati con materiale Spectralon. Per le misure in riflessione, in particolare, è stato usato il target SRT-99-050, la cui riflettanza si mantiene intorno al 99% nell'intervallo spettrale di sensibilità della CCD, 300–1100 nm. Per le misure in trasmissione, invece, è stato usato il target SDM-500-SM, da 0.0125 pollici di spessore. La riflettanza e trasmittanza emisferica nell'intervallo spettrale 250–2500 nm, rispettivamente per i diffusori SRT-99-050 e SDM-500-SM, misurata con lo spettrofotometro Perkin-Elmer Lambda 900, è riportata in Fig. 13.

La caratterizzazione di fasci di luce concentrata col metodo LS-CCD, come descritta in questa relazione, è semplificata, anzi resa possibile dall'uso di diffusori di tipo Lambertiano. Questi diffusori obbediscono alla legge di Lambert [16], che stabilisce quanto segue per un diffusore ideale illuminato da un fascio collimato ed uniforme: "L'intensità della luce diffusa dalla superficie unitaria su un angolo solido unitario è: a) proporzionale al coseno dell'angolo incidente δ ; b) proporzionale al coseno dell'angolo di osservazione (scattering) ψ . Per un fascio spazialmente limitato, ovvero sempre contenuto all'interno della superficie analizzata, come si applica in questo lavoro, conseguenza della legge di Lambert è che la riflettanza totale emisferica del diffusore è costante con l'angolo δ , e che l'intensità radiante misurata all'angolo ψ è proporzionale a $\cos(\psi)$. Diversi metodo per la misura della riflettanza risolat nell'angolo d'incidenza sono riportati nei Rif. [22-27].

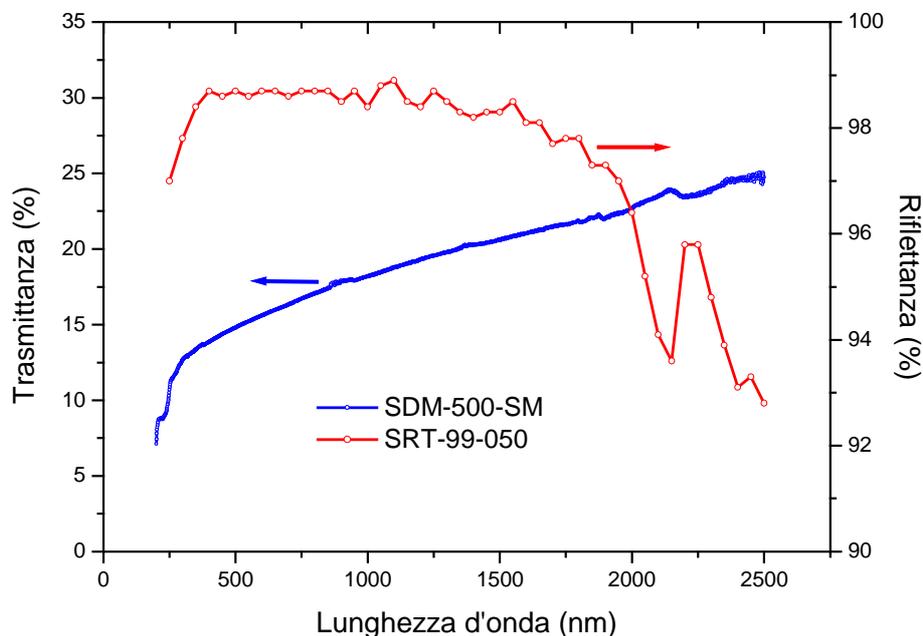


Figura 13. Spettri di riflettanza 8° /emisferica e di trasmittanza emisferica per i diffusori SRT-99-050 e SDM-500-SM, rispettivamente.

La legge di Lambert è stata verificata per due tipi di diffusori Labsphere di tipo Spectralon® usati in questo lavoro, misurando l'intensità radiante in funzione dell'angolo ψ , seguendo due metodi diversi. L'intensità radiante risolta nell'angolo ψ produce una curva detta "indicatrice" ("indicatrix") [16]. Nel primo metodo di misura, il diffusore

SRT-99-050 è stato caratterizzato ad alcune lunghezze d'onda laser usando l'apparato mostrato schematicamente in Fig. 14 [17].

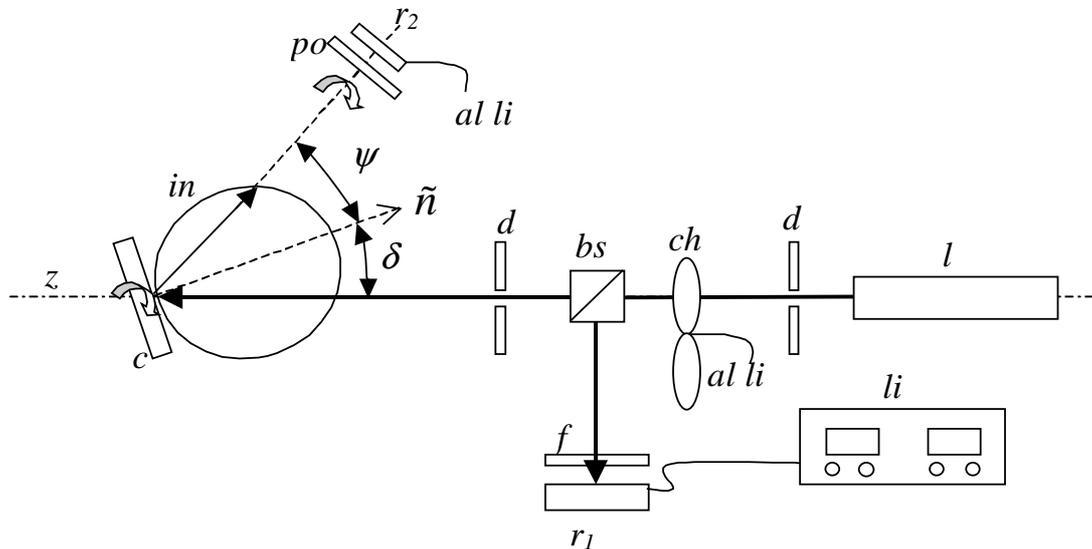


Figura 14. Schema dell'apparato per la misura dell'intensità radiante diffusa da un diffusore ottico di tipo lambertiano.

Il fascio di una sorgente laser (l) incide sul campione (c) ad un angolo d'incidenza δ . L'intensità della luce diffusa (di scattering) è misurata dal fotorivelatore (r2), che viene ruotato di fronte al campione (c) variando l'angolo ψ da -90° a $+90^\circ$. Le misure sono del tipo "in piano" ("on plane"), ovvero col fotorivelatore (r2) posto sul piano d'incidenza del fascio laser. Per un diffusore Lambertiano, la curva indicatrice è un cerchio e l'intensità della luce diffusa segue la funzione $\cos\psi$. Noi abbiamo analizzato, in particolare, la luce diffusa nel visibile (543 nm) e per $\delta = 0^\circ, 10^\circ$ e 20° , poiché la geometria del nostro concentratore di luce è tale che $\delta_{\max} \sim 20^\circ$. Le curve integratrici misurate sono mostrate in Fig. 15, e sono confrontate con la funzione $\cos\psi$. Esse mostrano che il diffusore è quasi-Lambertiano, perché caratterizzato da una piccola deviazione (diminuzione) delle indicatrici rispetto alla curva $\cos\psi$. Per alti angoli di scattering (70° - 80°), la percentuale della deviazione rispetto al segnale è rilevante, come sarà mostrato nella sezione dei Risultati.

Mediando i dati della Fig. 15 e simulandoli con una funzione Gaussiana, si ricava una funzione $\Lambda(\psi)$, da noi denominata funzione Lambertiana, che svolge un ruolo essenziale nella ricostruzione dell'intensità.

Nel secondo metodo di misura, il diffusore Labsphere SDM-500-SM, usato per le misure in trasmissione, è stato caratterizzato direttamente usando l'apparato sperimentale LS-CCD, secondo la procedura descritta di seguito. I dettagli sulla misura LS-CCD sono riportati nella Sezione 3.3.

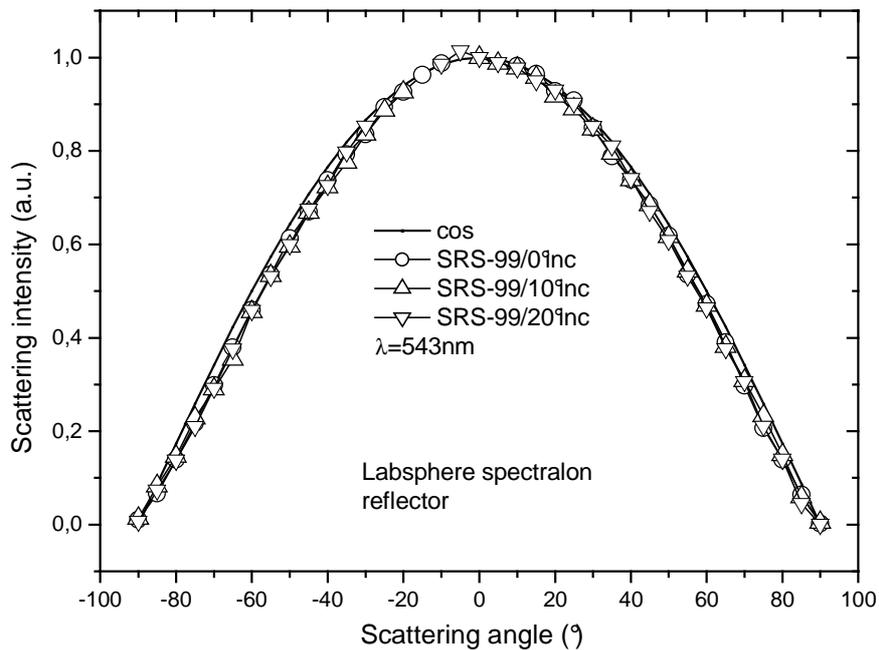


Figura 15. Curve indicatrici, del diffusore Labsphere SRT-99-050, misurate tra -90° e $+90^\circ$, ottenute con laser a 543 nm di lunghezza d'onda e per angoli d'incidenza $\delta = 0^\circ, 10^\circ$ e 20° . Per confronto è riportata anche la curva di $\cos \psi$.

E' stato rimosso l'obiettivo dalla videocamera ed è stata eseguita una serie separata di misure con la CCD impiegata come fotorivelatore. Sono state fatte misure a diverse lunghezze d'onda e a tale scopo, avendo a disposizione una sorgente di luce bianca (vedi Sezione 3.3), è stato necessario impiegare filtri interferenziali per selezionare la banda prescelta. Per ogni banda di lunghezze d'onda sono state fatte misure orientando la CCD ad angolo θ variabile da 0° a 80° , con step di 10° . Il segnale CCD netto è stato ottenuto a partire da due misure, una al buio ed una alla luce, seguendo la stessa procedura descritta in Sezione 3.3. I segnali netti CCD ottenuti, in mancanza di obiettivo, corrispondono ad una serie di immagini omogenee di diversa intensità, le quali sono state elaborate per ricavarne il corrispondente valor medio. In Fig. 16 sono riportate le curve sperimentali ottenute a tre lunghezze d'onda (550, 750, 950 nm) e la curva teorica di $\cos \psi$ corrispondente ad un comportamento lambertiano. Le curve sperimentali di intensità diffusa denotano una netta insensibilità alla lunghezza d'onda nell'intervallo esaminato e inoltre un certo scarto rispetto alla curva ideale, sicuramente maggiore di quello riscontrato nelle misure in riflessione (vedi Fig. 15). Evidentemente, pur essendo i diffusori usati realizzati con lo stesso materiale, la diffusione in trasmissione è più critica di quella in riflessione per quanto riguarda il comportamento lambertiano. Questo aspetto, di una certa importanza teorica, sarà analizzato in un prossimo lavoro [18]. Dal punto di vista pratico, però, si deve tener conto che l'uso del diffusore in trasmissione comporta generalmente l'allineamento della CCD sull'asse ottico del concentratore e quindi un minore effetto distortore, dal punto di vista radiometrico, sull'immagine CCD.

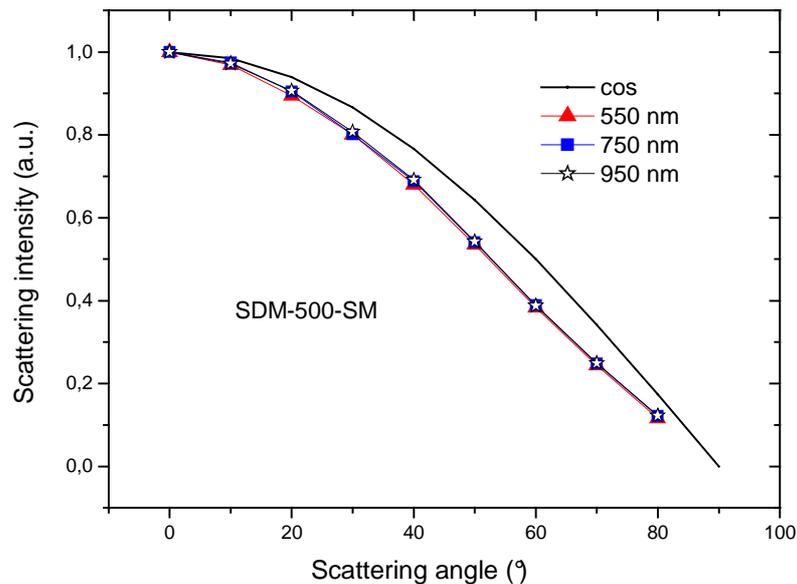


Figura 16. Curve indicatrici del diffusore Labsphere SDM-500-SM, misurate tra 0° e $+90^\circ$, ottenute a tre bande di lunghezza d'onda centrate su 550, 750 e 950 nm, per angoli d'incidenza caratteristici del concentratore impiegato ($\delta \leq 20^\circ$) (vedi Sezione 3.3). E' riportata per confronto la curva teorica di $\cos \psi$.

La curva indicatrice è stata poi simulata con una funzione Gaussiana per ottenere la funzione Lambertiana $\Lambda(\psi)$ necessaria per l'elaborazione delle immagini prese in trasmissione.

Questo secondo metodo, più diretto di quello illustrato in Fig. 14, è stato possibile grazie al fatto che in trasmissione è accessibile la misura a $\psi=0^\circ$, misura essenziale per stabilire il valore (massimo) dell'intensità rispetto al quale vengono normalizzate le altre misure.

3.2 Videocamera CCD

Per la ripresa delle immagini è stata usata la videocamera digitale, b/w, serie ORCA, mod. C4742-95-12NRG della Hamamatsu, da 2/3" (area effettiva $8.58 \times 6.86 \text{ mm}^2$), risoluzione 1280(H) \times 1024(V) pixel da $6.7 \times 6.7 \text{ }\mu\text{m}^2$, 12-bit digital output, provvista di interfaccia IEEE 1394 per il collegamento al computer. La videocamera è dotata di raffreddamento Peltier fino a 5°C . Il software di gestione della telecamera, HiPic, permette di regolare i principali parametri relativi all'esposizione, ovvero tempo di esposizione, regolabile tra 10 μsec e 10 sec, e guadagno, regolabile da 0 a 255, e inoltre gestisce le immagini acquisite fornendo in particolare la matrice dei dati relativi all'intensità misurata. La foto della videocamera CCD con il relativo controller è riportata in Fig. 17. Per la gestione della CCD occorre una scheda PCI con interfaccia IEEE 1394, provvista di tre ingressi per il collegamento a tre diverse CCD.

In Fig. 18 è mostrata la risposta spettrale caratteristica della videocamera. Essa lavora molto bene nel visibile, meno bene nel NIR. Recentemente, con l'avvento di un nuovo

chip, questa curva caratteristica è stata sensibilmente migliorata nella regione dell'infrarosso. Il modello di telecamera Hamamatsu che monta il nuovo chip, il mod. C8484-05G, è stato già acquisito e verrà impiegato per le misure sull'impianto PCS di Casaccia. Naturalmente i dati di risposta spettrale debbono essere usati in fase di analisi spettrale del fascio. La normalizzazione delle immagini in termini d'intensità sarà fatta considerando il fattore k_N :

$$k_N = 1/(g \cdot t_{\text{exp}} \cdot SR) \quad (15)$$

dove:

g = guadagno della CCD; t_{exp} = tempo di esposizione; SR = risposta spettrale.



Figura 17. Foto della videocamera CCD Hamamatsu con relativo controller.

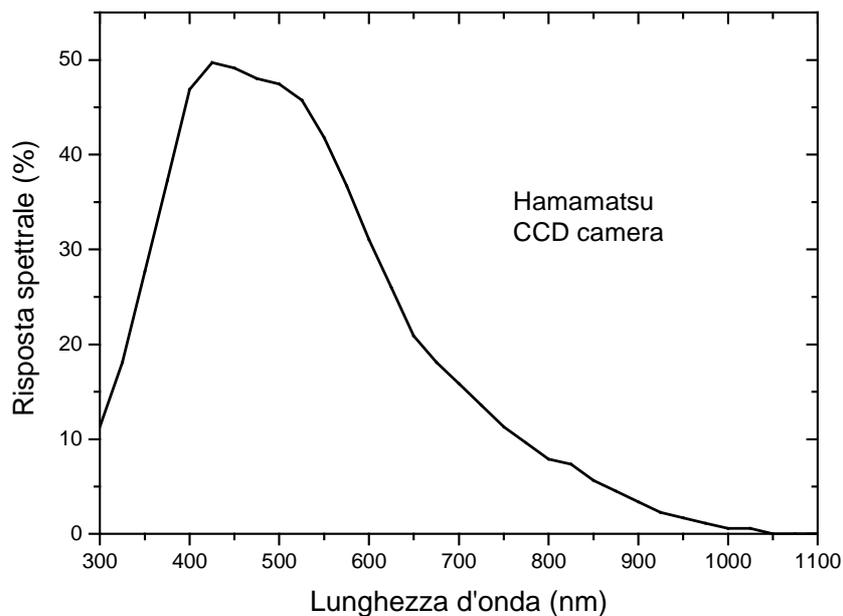


Figura 18. Curva di risposta spettrale della camera CCD Hamamatsu serie ORCA, mod. C4742-95-12NRG.

3.3 Configurazione sperimentale

L'apparato sperimentale impiegato per le misure LS-CCD in riflettanza e trasmittanza è quello schematizzato in Fig. 19. Il fascio di luce di una sorgente ad arco-Xenon Oriel da 400-1000 W è concentrato per mezzo di una lente di Fresnel (fl) e diretto verso il diffusore piano orientato ortogonalmente al fascio. La luce diffusa dal diffusore, nel modo in riflessione o trasmissione, è "catturata" dalla camera Hamamatsu, equipaggiata con un obiettivo micro-Nikkor 55 mm f 1/2.8 Nikon. La luce della lampada è spazialmente selezionata dai diaframmi d1 e d3, e spettralmente filtrata da un filtro passa basso AM1.5G (f1) che riduce l'intensità delle righe di emissione dello Xenon nell'arco. La luce diffusa verso la camera CCD è selezionata dal diaframma (d2), attenuata da una coppia di filtri neutri (fattore di attenuazione complessivo ~1000) e, per le misure spettrali, filtrata da filtri passa-banda Corion con ~70 nm larghezza di banda. Relativamente basse intensità d'irraggiamento sono state raggiunte con questa configurazione, essendo obiettivo principale della misura mettere a punto il metodo LS-CCD, indipendentemente dalle concentrazioni raggiunte. Ciononostante, è stato necessario raffreddare con ventole sia il filtro AM1.5G che il diffusore.

Nel modo in riflessione la CCD è stata orientata "off-axis" ad un angolo θ_r , ad una distanza di ~35 cm dal diffusore. Distanze minori non furono usate allo scopo di avere interamente sullo schermo l'area di misura di $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Nel modo in trasmissione, la camera CCD è stata posta dietro il diffusore e orientata "off-axis" ad un angolo θ_t , alla stessa distanza di ~35 cm. Le misure sui diffusori da 5-pollici sono state eseguite dopo aver delimitato l'area di misura di $2 \times 2 \text{ cm}^2$ sul diffusore con un filo di cotone nero, che ha costituito il riferimento (x, y) (vedi Fig. 20 b). Misure in riflessione e trasmissione sono state fatte sia in luce bianca che in bande spettrali selezionate nel Vis-NIR. L'intensità del segnale CCD è stato regolato agendo sul guadagno g, variabile da 0 (0 db) a 255 (20 db), e sul tempo d'esposizione t_{exp} , variabile da 10 ms a 10 s. Alcune foto del set-up sperimentale sono mostrate nella Fig. 20.

Descriviamo ora la procedura per riprendere le immagini che saranno riportate nella sezione dei Risultati.

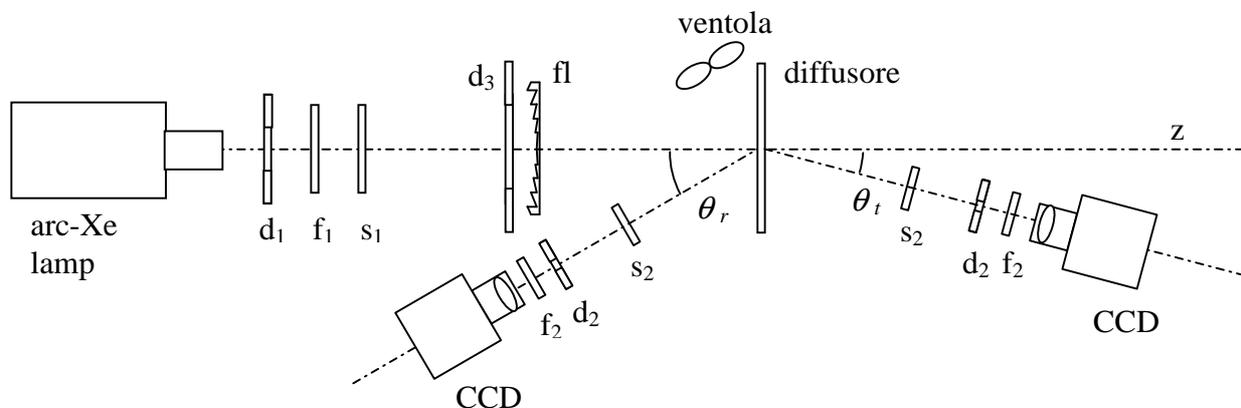


Figura 19. Schema dell'apparato sperimentale impiegato per le misure LS-CCD. Con la stessa camera CCD posizionata a sinistra sono svolte le misure in riflessione, a destra le misure in trasmissione.

Essa è stata ripetuta per qualsiasi immagine ripresa ai diversi angoli d'orientazione e alle diverse lunghezze d'onda. Dapprima viene registrato il reticolo di riferimento (quadrato di 2×2 cm²) alla luce della stanza, mascherando la sorgente con lo schermo (s1) e rimuovendo lo schermo (s2) di fronte alla CCD (vedi Fig. 19). Lo schermo (s2) è realizzato in modo tale da mascherare soltanto la zona illuminata del diffusore e lasciar passare verso la camera la luce restante. L'immagine del riferimento (Fig. 20 b) è necessaria per stabilire l'esatta orientazione della CCD rispetto al diffusore e quindi l'esatta posizione dello spot di luce registrato rispetto al riferimento. Quando si registra il diffusore illuminato, infatti, il riferimento è assolutamente invisibile in quanto sovrastato dalla luce concentrata (vedi Fig. 20 c). L'immagine del riferimento deve essere ripetuta ogni volta che si riposiziona la videocamera per una determinata orientazione. In Fig. 21 sono mostrate, a titolo di esempio, tre immagini del riferimento prese in riflessione rispettivamente a 30°, 50° e 70°.

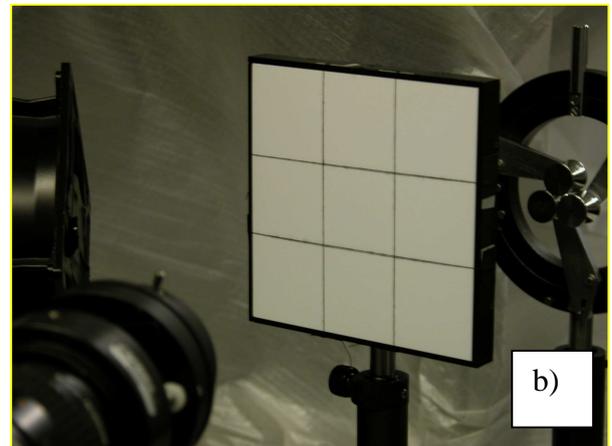


Figura 20. Configurazione sperimentale adottata per le misure LS-CCD in riflessione. Sul tavolo ottico (a), in prossimità del target, sono stati montati due diodi laser che servono ad individuare la sezione di test su cui è stato affacciato il diffusore. In b) è mostrato il riferimento (x, y) realizzato con filo nero sul diffusore.

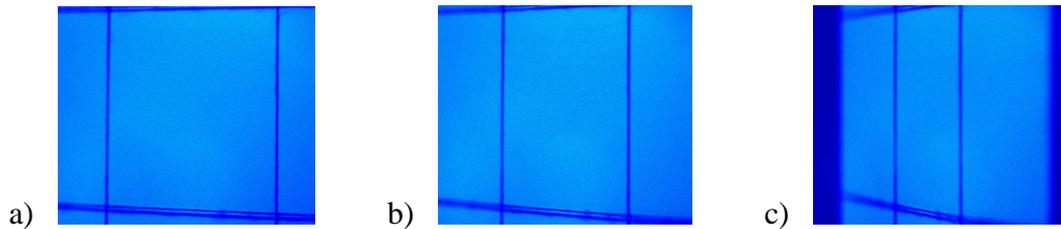


Figura 21. Esempio di immagini del riferimento (diffusore SRT-99-50) prese in riflessione con la CCD agli angoli 30° (a), 50° (b) e 70° (c). L'aumento dell'angolo θ ha come conseguenza inevitabile la sfocalizzazione di una parte dell'immagine (si veda in particolare l'immagine a 70°).

Preso l'immagine del riferimento, si procede a registrare l'immagine al buio (dark image) che ha lo scopo di misurare la luce che arriva alla CCD al di fuori del diffusore, quella dovuta a riflessioni spurie da parte dell'intorno della camera. Questa misura è fatta illuminando il diffusore dopo aver rimosso lo schermo (s1), e ponendo lo schermo (s2) davanti alla CCD. Segue subito dopo la misura alla luce (light image) eseguita rimuovendo lo schermo (s2) davanti alla camera. La coppia di misure al buio e alla luce deve essere eseguita nelle stesse condizioni di ripresa, con gli stessi parametri g e t_{exp} . Ogni immagine del diffusore deve essere sempre accompagnata dalla coppia di misure al buio e alla luce. Sottraendo il segnale CCD al buio da quello alla luce, si perviene al segnale CCD netto, o immagine CCD netta.

Le immagini riportate nella sezione Risultati, o anche i profili, sono sempre immagini del tipo netto. La sottrazione suddetta è effettuata esportando l'immagine digitale attraverso il programma nativo di gestione della CCD, HiPic, ed elaborandola per mezzo di un programma esterno del tipo Origin o Excel,

Il "frame" di riferimento è stato ripreso per $g = 200$ e $t_{exp} = 2$ s, mentre le immagini al buio e alla luce sono state riprese a $g = 18$ $t_{exp} = 40$ ms.

4. Risultati e discussione

Una serie di immagini in riflessione è stata ripresa orientando la CCD agli angoli θ da 30° a 70° con step di 10° . Per valori più bassi di θ infatti la CCD avrebbe oscurato la sorgente. Per ogni angolo di orientazione, misure CCD sono state fatte in luce bianca e luce filtrata entro ~ 70 nm di larghezza di banda. La Fig. 22 a mostra, riprodotte in falsi colori, le immagini del diffusore illuminato prese con filtro a $\lambda = 650$ nm ad angoli di orientazione della camera $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ e 70° . La Fig. 22 b mostra, invece, le immagini, prese nella stessa serie di misure, del riferimento illuminato dalla luce del laboratorio.

Osservando le immagini di Fig. 22 a) notiamo incidentalmente un aspetto molto interessante, cui era già stato accennato in precedenza e che verrà meglio chiarito nel seguito, e cioè che l'intensità delle immagini, rappresentata da un particolare colore, non si riduce all'aumentare di θ .

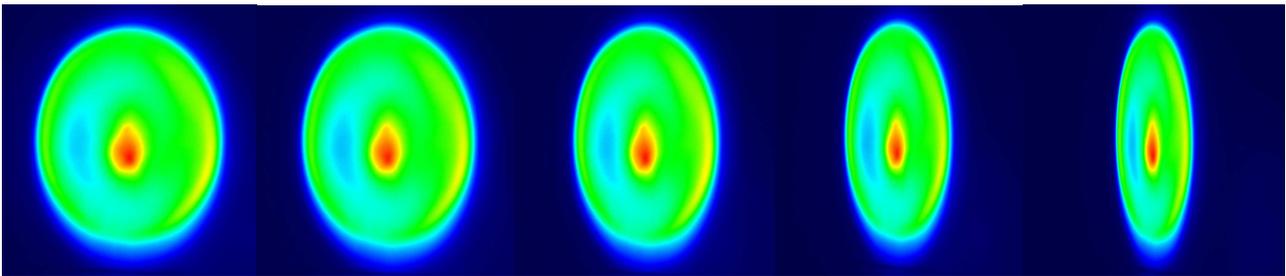


Figura 22 a). Immagini in falsi colori di luce diffusa in riflessione dal diffusore SRT-99-050 agli angoli (da sinistra verso destra) $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ e 70° .



Figura 22 b). Immagini di luce diffusa in riflessione dal diffusore SRT-99-050 alla luce del laboratorio agli angoli (da sinistra verso destra) $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ e 70° .

Le varie zone dell'immagine mantengono lo stesso colore al variare di θ . Questo è l'effetto combinato della riduzione dell'intensità della luce diffusa dal diffusore lambertiano, secondo la legge $\cos\theta$, e dell'aumento dell'intensità del segnale CCD registrato, prodotto dal fattore di focalizzazione $f_{focal}(P, \theta)$ che segue la legge $\sim 1/\cos\theta$. La Fig. 22 b) mostra come appare il riferimento alle varie orientazioni della CCD alla luce della stanza. L'effetto di prospettiva produce un restringimento lungo l'asse x' di un fattore $\sim \cos\theta$, mentre le coordinate y' , nelle condizioni sperimentali di $f \sim 5.5$ cm, $r_0 = 35$ cm e $x, y \leq 2$ cm, rimangono relativamente invariate.

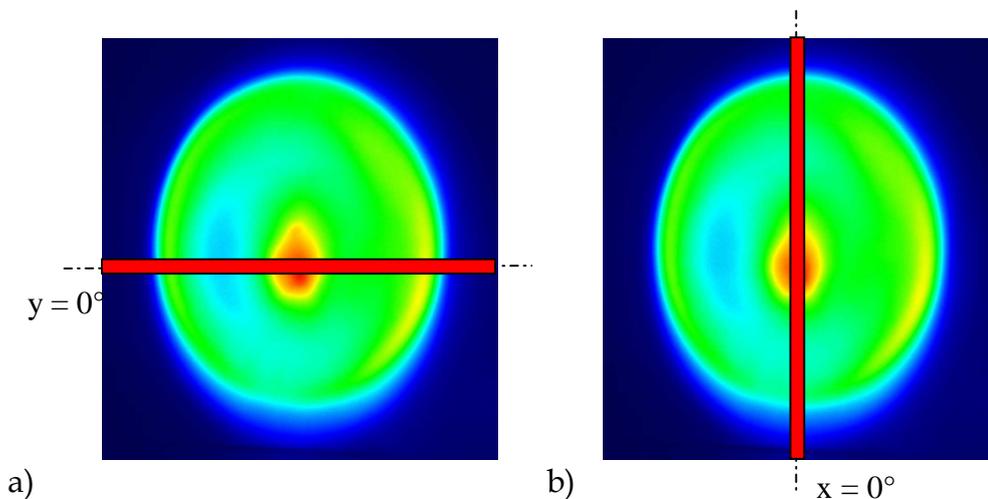


Figura 23. a) Esempio di immagine CCD da cui è estratta una banda orizzontale a cavallo di $y = 0^\circ$ per l'analisi del profilo orizzontale. b) Immagine CCD da cui è estratta una banda verticale a cavallo di $x = 0^\circ$ per l'analisi del profilo verticale.

Per ogni immagine della Fig. 22 a) è stata estratta una banda orizzontale a cavallo di $y' = 0$ (vedi l'esempio di Fig. 23 a) contenente un numero costante di righe della matrice di dati. Le righe della banda selezionata sono state mediate ed il profilo medio ottenuto, $I'(x', \theta)$, è mostrato in Fig. 24 a) per i cinque valori di θ : 30° , 40° , 50° , 60° e 70° . Si può notare l'effetto di restringimento dell'asse x' e una certa riduzione dell'intensità del profilo all'aumentare di θ . L'accurata elaborazione di queste curve che svolgiamo dappresso, non sempre necessaria nella pratica, ha lo scopo di verificare la correttezza ed accuratezza del metodo da noi sviluppato per l'elaborazione delle immagini CCD e la ricostruzione del profilo originale dell'intensità della luce incidente sul diffusore.

L'elaborazione dei diversi profili di $I'(x', \theta)$ dovrebbe portare ad uno stesso profilo che rappresenta l'andamento dell'intensità $I(x, \theta)$ della luce incidente sul diffusore per $y = 0$. A tal fine, procediamo a rimuovere l'effetto della prospettiva espandendo le curve di un fattore derivato dall'Eq. (11'')

$$f_{\text{exp}}^{(x)} = \frac{\Delta x'(0)}{\Delta x'(\theta)} = \frac{f \cdot \Delta x}{r_0} \cdot \frac{(r_0 - x_{\text{max}} \cdot \sin \theta) \cdot (r_0 - x_{\text{min}} \cdot \sin \theta)}{f \cdot r_0 \cdot \cos \theta \cdot \Delta x} = \dots$$

$$\dots = \frac{(r_0 - 2 \cdot \sin \theta) \cdot (r_0 + 2 \cdot \sin \theta)}{r_0^2 \cdot \cos \theta} \quad (16)$$

dove $\Delta x'(\theta) = x'_{\text{max}}(\theta) - x'_{\text{min}}(\theta)$ è l'intervallo in x' dell'area di riferimento da $2 \times 2 \text{ cm}^2$ misurata per $y'=0$ sull'immagine CCD. Dopo la correzione della prospettiva, otteniamo i profili di $I'(x, \theta)$ mostrati in Fig. 24 b). La correzione dell'intensità del segnale CCD, basata sulla proprietà ottiche del diffusore, è stata fatta dapprima applicando l' Eq. (8) nell'ipotesi di diffusore Lambertiano ponendo $y' = y = 0$, ma non sono state trovate apprezzabili variazioni d'intensità nei diversi profili. Dalle Eq.ni (8) e (14'') otteniamo infatti per un diffusore Lambertiano:

$$f_{\text{corr}}(x) \propto \frac{r^2(x)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \psi \cdot \cos \phi \cdot f_{\text{focal}}(x)} = \frac{r^2(x)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \psi \cdot \cos \phi} \cdot \frac{r_0 \cdot f^2 \cdot \cos \theta}{(r_0 - x \cdot \sin \theta)^3} \quad (17')$$

Con un diffusore altamente riflettente, $R_d(\lambda) \approx 1$, abbiamo che $f_{\text{corr}}(x) \approx f^2$ e quindi è solo lievemente dipendente da x e θ . Il termine $\cos \psi \approx \cos \theta$, che stabilisce la riduzione media dell'intensità della luce diffusa al crescere dell'angolo di diffusione, è bilanciato dal termine $1/\cos \theta$ che stabilisce la concentrazione media della luce sulla matrice CCD, come descritto dal fattore di focalizzazione. Questo è il punto rilevante del metodo per il processamento delle immagini CCD applicato alla correzione dell'intensità del segnale. In altre parole, operando con un diffusore Lambertiano, l'immagine dello spot di luce registrata ad angolo di orientazione θ subisce una riduzione dell'intensità di $\approx \cos \theta$ per effetto del comportamento Lambertiano e simultaneamente un incremento di $\approx 1/\cos \theta$ dovuto alla focalizzazione (concentrazione) dell'immagine dello spot. Il risultato è che il profilo della distribuzione dell'intensità luminosa non cambia, a parte l'effetto di deformazione dell'immagine prodotto dalla prospettiva. Una maggiore precisione nell'elaborazione dell'intensità dell'immagine è raggiunta

tenendo conto della non idealità del diffusore, che può risultare in una riduzione o un incremento del segnale CCD, in relazione allo specifico comportamento del diffusore a quella lunghezza d'onda e a quell'angolo di diffusione [17]. A tal proposito abbiamo considerato la definizione di diffusore quasi-Lambertiano e usato la "funzione Lambertiana" di forma Gaussiana, derivata dalle misure di luce diffusa senza obiettivo (vedi la sezione Sperimentale). Il corrispondente fattore di correzione diventa:

$$f_{corr}(x, \lambda) \propto \frac{r^2(x)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \phi \cdot \Lambda(\psi)} \cdot \frac{1}{f_{focal}(x)} = \frac{r^2(x)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \phi \cdot \Lambda(\psi)} \cdot \frac{r_0 \cdot f^2 \cdot \cos \theta}{(r_0 - x \cdot \sin \theta)^3} \quad (17'')$$

Otteniamo finalmente per l'intensità luminosa sul diffusore:

$$I(x, \theta) = \frac{f^2 \cdot r_0 \cdot r^2(x, \theta) \cdot \cos \theta}{R_d(\lambda) \cdot \Lambda(\psi) \cdot (r_0 - x \cdot \sin \theta)^3} \cdot I'(x, \theta) \quad (18)$$

dove:

$$r^3(x, \theta) = (r_0^2 + x^2 - 2r_0 \cdot x \cdot \sin \theta)^{3/2}$$

$$\psi = \cos^{-1} \left[\frac{r_0 \cdot \cos \theta}{r(x, \theta)} \right] \quad ; \quad \phi = \cos^{-1} \left[\frac{r_0 - x \cdot \sin \theta}{r(x, \theta)} \right]$$

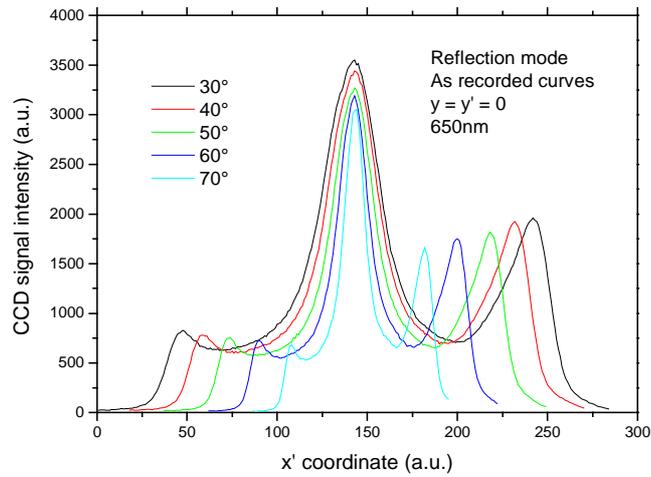
Il risultato finale è mostrato in Fig. 24c, dove si può osservare l'ottimo accordo tra i diversi profili di $I(x, \theta)$.

Dalle immagini di Fig. 22 a) una striscia verticale di colonne a cavallo di $x' = 0$ è stata analizzata seguendo il metodo illustrato in Fig. 23 b). A causa della linearità tra le coordinate y' e y (vedi Eq. (11'')), non c'è nessun effetto di prospettiva da correggere. Il profilo medio del segnale CCD, $I'(y, \theta)$, è riportato in funzione della coordinata y in Fig. 25 a).

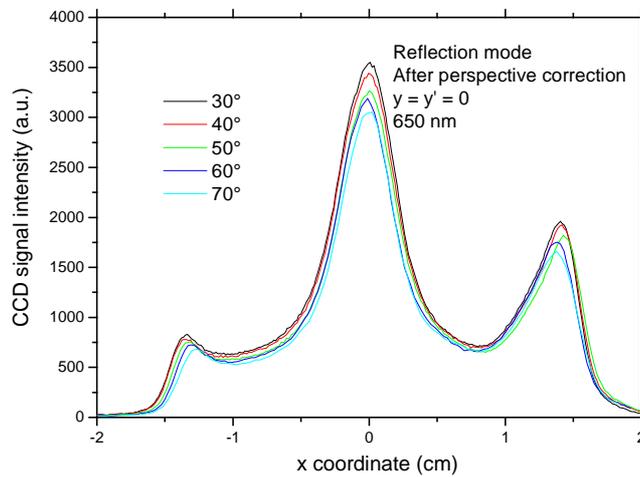
La correzione dell'intensità è stata fatta dapprima applicando le Eq.ni (8) e (14''), nell'ipotesi di un diffusore Lambertiano, ottenendo per il fattore di correzione dell'intensità:

$$f_{corr}(y) \propto \frac{r^2(y)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \psi \cdot \cos \phi \cdot f_{focal}(y)} = \frac{r^2(y)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \psi \cdot \cos \phi} \cdot \frac{f^2 \cdot \cos \theta \cdot (r_0 + y \cdot \sin \theta)}{r_0^3} = \dots$$

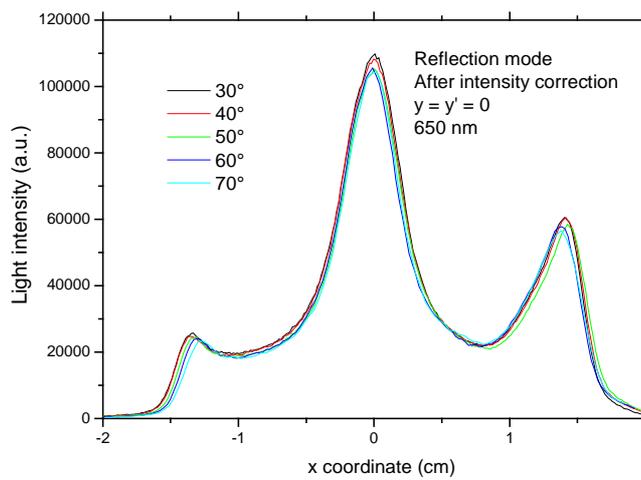
$$\dots = \frac{(r_0^2 + y^2)^2 \cdot f^2}{R_d(\lambda) \cdot r_0^5} \cdot (r_0 + y \cdot \sin \theta) \quad (19)$$



a)



b)



c)

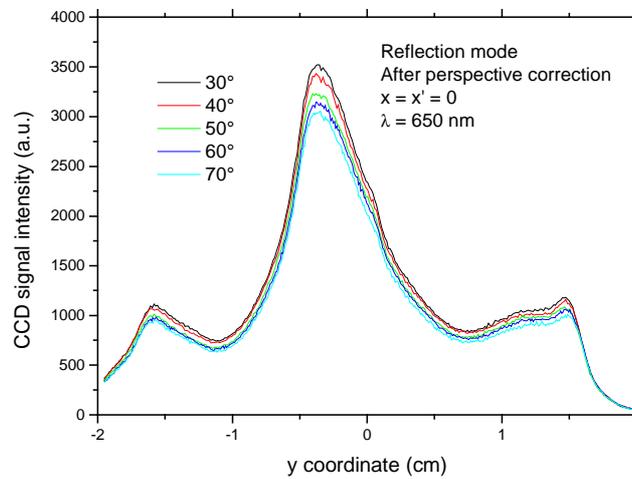
Figura 24. Elaborazione delle immagini CCD registrate in riflessione a $\lambda = 650$ nm per $y=0$:
 a) profili del segnale CCD come registrato; b) profili d'intensità dopo la correzione della prospettiva; c) profili d'intensità dopo la correzione per un diffusore quasi-Lambertiano.

dove:

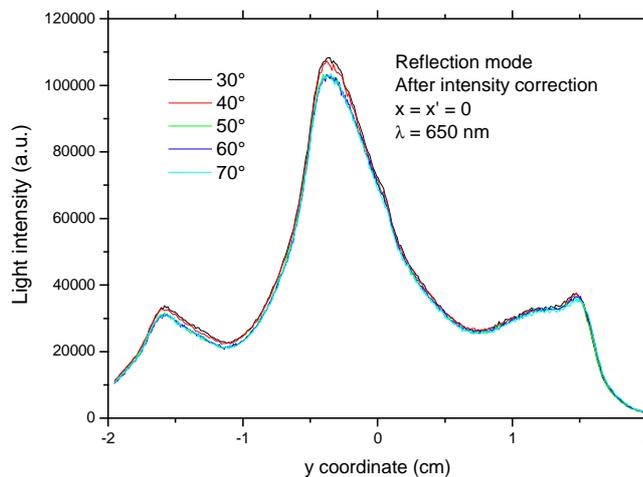
$$r^2(y) = (r_0^2 + y^2)$$

$$\psi(y, \theta) = \cos^{-1} \left[\frac{r_0 \cdot \cos \theta}{(r_0^2 + y^2)^{1/2}} \right]$$

$$\phi(y) = \cos^{-1} \left[\frac{r_0}{(r_0^2 + y^2)^{1/2}} \right]$$

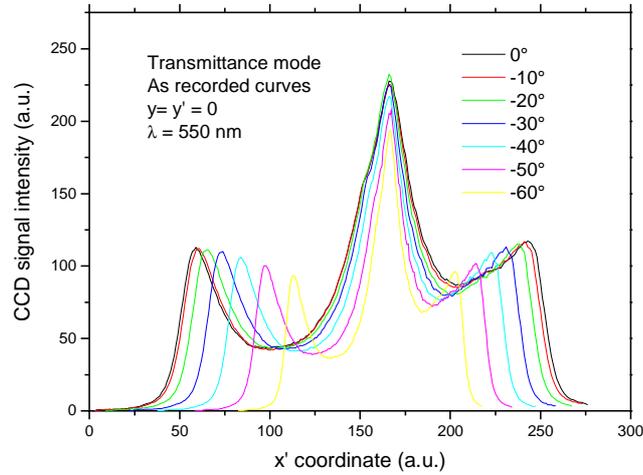


a)

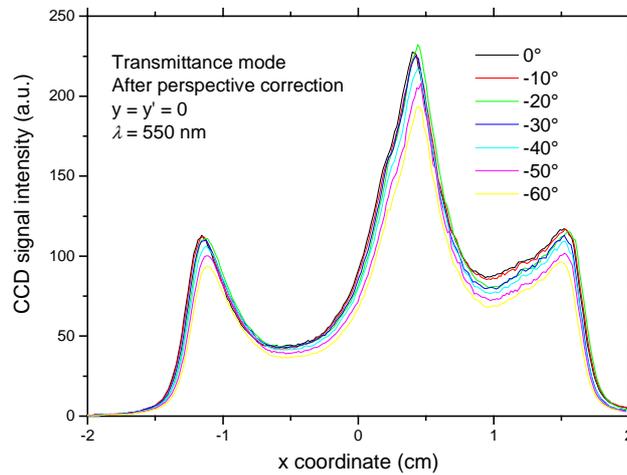


b)

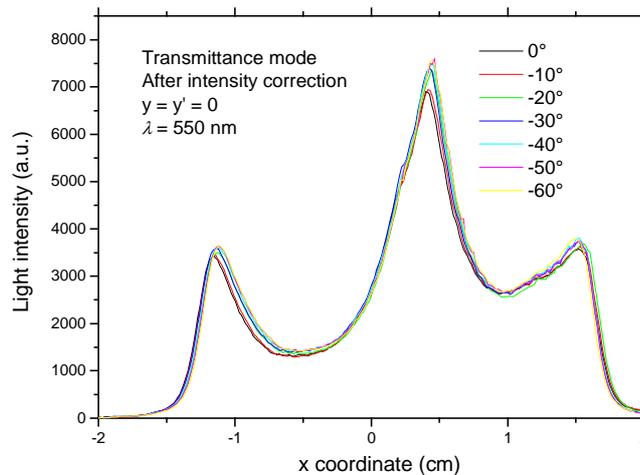
Figura 25. Elaborazione delle immagini CCD registrate in riflessione a $\lambda = 650 \text{ nm}$ per $x=0$: a) profili del segnale CCD come registrato, riportato in funzione della coordinata x ; b) profili d'intensità dopo la correzione per un diffusore quasi-Lambertiano.



a)



b)



c)

Figura 26. Elaborazione delle immagini CCD registrate in trasmissione a $\lambda = 550 \text{ nm}$ per $y=0$: a) profili del segnale CCD come registrato; b) profili del segnale CCD dopo la correzione della prospettiva; c) profili d'intensità luminosa dopo la correzione per un diffusore quasi-Lambertiano.

I corrispondenti profili d'intensità sono rimasti relativamente imm modificati. Nell'ipotesi di un diffusore quasi-Lambertiano, abbiamo usato come precedentemente una "funzione Lambertiana" di tipo Gaussiano, derivata dalle misure d'intensità di luce diffusa (vedi la sezione Sperimentale). Il corrispondente fattore di correzione dell'intensità diventa:

$$f_{corr}(y, \lambda) \propto \frac{r^2(y)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \phi \cdot \Lambda(\psi)} \cdot \frac{1}{f_{focal}(y)} = \frac{r^2(y)}{R_d(\lambda) \cdot \cos \phi \cdot \Lambda(\psi)} \cdot \frac{f^2 \cdot \cos \theta \cdot (r_0 + y \cdot \sin \theta)}{r_0^3} = \dots$$

$$\dots = \frac{(r_0^2 + y^2)^{3/2} \cdot f^2 \cdot \cos \theta \cdot (r_0 + y \cdot \sin \theta)}{R_d(\lambda) \cdot r_0^4 \cdot \Lambda(\psi)} \quad (20)$$

La Fig. 25b mostra i profili d'intensità $I(y, \theta)$ per il diffusore quasi-Lambertiano, calcolati usando il fattore di correzione di Eq. (20). Tutte le curve si sovrappongono molto bene, come è stato trovato analizzando i profili orizzontali $I(x, \theta)$.

Una serie di immagini CCD è stata ripresa anche in trasmissione, in luce bianca e per diverse regioni spettrali. L'angolo di orientazione della videocamera è stato variato questa tra 0° e 70° con step di 10° (vedi la Fig. 19 per la configurazione sperimentale). L'elaborazione delle immagini CCD è stata effettuata seguendo la stessa procedura usata per il modo in riflessione e applicando le Eq.ni (10)-(10''). Di seguito riportiamo i risultati ottenuti con le misure a $\lambda = 550$ nm. La Fig. 26 a) mostra i profili d'intensità $I'(x', \theta)$ del segnale CCD come registrato per una striscia d'immagine a cavallo di $y' = 0$.

La Fig. 26 b) mostra i profili d'intensità $I'(x, \theta)$ del segnale CCD dopo la correzione della prospettiva e la Fig. 26 c) mostra i profili d'intensità $I(x, \theta)$, ovvero la distribuzione (relativa) dell'intensità luminosa lungo l'asse x , come risultato dell'elaborazione delle immagini ai diversi angoli di orientazione della CCD.

Dalla Fig. 26 c) si può osservare nuovamente il buon accordo tra le diverse curve d'intensità e quindi la validità del metodo da noi sviluppato per la ricostruzione del profilo d'intensità luminosa incidente sul diffusore.

5. Conclusioni

Il metodo qui presentato della caratterizzazione di fasci concentrati di radiazione luminosa, da noi denominato metodo LS-CCD (Light Scattering and CCD recording), che consiste nell'intercettare il fascio luminoso concentrato con un diffusore Lambertiano e nel registrare, attraverso una videocamera digitale (CCD), l'immagine prodotta sul diffusore dal fascio incidente, è stato da noi applicato alla caratterizzazione di un fascio di prova realizzato in laboratorio con una sorgente ad arco-Xenon e una lente di Fresnel. Sono state seguite due modalità di misura, una in riflessione ed una in trasmissione e riprese immagini in luce bianca e in luce filtrata per diversi angoli di orientazione della videocamera. Le immagini registrate sono state elaborate seguendo un procedimento derivato da uno studio teorico originale del metodo LS-CCD, ampiamente descritto in questa relazione.

Le immagini sono state corrette dapprima per gli effetti di prospettiva derivanti dal non allineamento della CCD lungo l'asse ottico del concentratore, e successivamente per tener conto delle proprietà di diffusione della luce da parte del diffusore.

Questo studio dimostra l'utilità del metodo LS-CCD per il monitoraggio della radiazione solare concentrata negli impianti fotovoltaici o termodinamici, in particolare per la misura in tempo reale della distribuzione spaziale dell'intensità su una sezione specifica del fascio.

La geometria dell'apparato di misura può essere disegnata per lo specifico concentratore, al fine di risultare meno invasiva possibile. Il metodo fornisce la distribuzione relative dell'intensità luminosa incidente su un diffusore posto in una posizione strategica del concentratore, con un buon grado di accuratezza e con un minimo impegno a livello di elaborazione dati.

L'affidabilità della procedura di ricostruzione del profilo originale dell'intensità del fascio è dimostrata attraverso il buon accordo trovato tra i profili ricostruiti indipendentemente e relativi ai diversi angoli di orientazione della CCD.

Il metodo LS-CCD permette di individuare difetti nell'inseguimento solare o difetti strutturali nei sistemi solari a concentrazione. Un'accurata scelta dei diffusori Lambertiani è necessaria per garantire il corretto approccio teorico all'elaborazione dei dati sperimentali. Sono stati presentati due approcci sperimentali, uno in riflessione, l'altro in trasmissione. Sebbene il metodo della trasmissione fornisca il profilo d'intensità cercato senza bisogno di elaborare le immagini, ciononostante esso risulta più invasivo di quello della riflessione. La soluzione ottimale va cercata caso per caso

Appendice A

CODICE C++:

```
#include <fstream.h>
#include <math.h>
```

```
double theta =0.5233 ;
double F=0.0652 ;
double r0=0.35 ;
double dimx=0.0128 ; // semidimensione orizzontale immagine in metri
double dimy=0.01 ; // semidimensione verticale immagine in metri
double NEWdimx=0 ; // semidimensione orizzontale immagine nuova in metri
double NEWdimy=0 ; // semidimensione verticale immagine nuova in metri
double newstep=0.0012; // step di campionamento in metri sulla nuova matrice (al crescere la matrice rimpicciolisce)
```

```
ofstream outfile ;
ifstream infile ;
```

```
double formula1_X(double,double) ;
double formula1_Y(double,double) ;
double formula2(double,double) ;
double formula1INV_X(double,double) ;
double formula1INV_Y(double,double) ;
double L_intens(double,double,int **,int,int) ;
void S_intens(double,double,int **,int,int,int) ;
double distanza(double,double,double,double) ;
double posx,posy ;
```

```
int transpose(int,int,int **) ;
```

```
int main()
```

```
{ int colonneold= 73;
  int righeold=57 ;
  int colonneNEW=0 ;
  int righeNEW=0 ;
  int i,j ;
  int ** datiold=NULL ;
  int ** datioldt=NULL ;
  int ** datinew=NULL ;
  int temp=0 ;
  long somma=0 ;
  double intensity ;
  char nomefile [30] ;
```

```
cout << "Inserire valore di R0 " ;
//cin >> r0 ;
cout << "Inserire valore di Theta (in radianti) " ;
cin >> theta ;
//cout << "Inserire valore di F " ;
//cin >> F ;
```

```
cout << "Inserire valore di dimensione X (numero colonne file da ricostruire) " ;
cin >> colonneold ;
cout << "Inserire valore di dimensione Y (numero righe file da ricostruire) " ;
cin >> righeold ;
cout << "Inserire il nome del file " ;
cin >> nomefile ;
// calcola i valori di dimensione della nuova matrice
NEWdimx=1.56*formula1_X(dimx,dimy) ; // coord X massima nella nuova immagine
NEWdimy=2*formula1_Y(dimx,dimy) ; // coord Y massima nella nuova immagine
righeNEW=int(2*NEWdimy/newstep+1) ;
colonneNEW=int(2*NEWdimx/newstep+1) ;

// iniziamo a dimensionare la matrice originale
datiold=new int * [righeold] ;
for(i=0 ;i<righeold ;i++)
```

```
{ datiold[i]=new int [colonneold] ;
}
cout << "Inizializzata Matrice iniziale di " << colonneold << " x " << righeold << "\n" ;
cout.flush() ;

// iniziamo a dimensionare la matrice nuova
datinew=new int * [righeNEW] ;
for(i=0 ;i<righeNEW ;i++)
{ datinew[i]=new int [colonneNEW] ;
}
cout << "Inizializzata Matrice nuova di " << colonneNEW << " x " << righeNEW << "\n" ;
cout.flush() ;

// carichiamo i dati da file
infile.open(nomefile,ios::in) ;
if(!infile.good())
{ cout << "Problemi con il file\n" ;
  cout << "Premere un tasto ed enter per proseguire\n" ;
  cin >> i ;
  return(-1) ;
}
for(i=0 ;i<righeold ;i++)
  { for(j=0 ; j<colonneold;j++)
    { infile >> datiold[i][j] ;
      somma=somma+datiold[i][j] ;
    }
  }
infile.close() ;
cout << "Caricati dati dal file, somma dati " << somma << "\n" ;
cout.flush() ;

// abbiamo i dati e applico la correzione di intensità
for(posx=-NEWdimx ;posx<NEWdimx ;posx=posx+newstep)
  { for(posy=-NEWdimy ; posy<NEWdimy;posy=posy+newstep)
    {

intensity=L_intens(formula1INV_X(posx,posy),formula1INV_Y(posx,posy),datiold,righeold,colon
neold)*formula2(posx,posy) ;
      S_intens(posx,posy,datinew,righeNEW,colonneNEW,int(intensity+0.5)) ;
    }
  }

// li si salva su file
oufile.open("datinew.txt",ios::out,ios::trunc) ;
for(i=0 ;i<righeNEW ;i++)
  { for(j=0 ; j<colonneNEW;j++)
    { oufile << datinew[i][j] << " " ;
    }
  }
```

```
oufile << "\n" ;
    }
oufile.close() ;

return(0) ;
}

double formula1_Y(double x,double y) //ok
{return(1/F*(r0-formula1_X(x,y)*sin(theta))*y) ;}
//{return(y) ;}

double formula1_X(double x,double y) // ok
{return(r0/(F*cos(theta)+x*sin(theta))*x) ;}
//{return(x/cos(theta)) ;}

double formula1INV_X(double X,double Y)
{ return(F*cos(theta)/(r0-X*sin(theta))*X) ;}
//{return(X*cos(theta)) ;}

double formula1INV_Y(double X,double Y)
{return(F/(r0-X*sin(theta))*Y) ;}
//{return(Y) ;}

double formula2(double x,double y)
{return(pow(r0*r0+y*y-2*r0*y*sin(theta),2)*((x-y)*sin(theta)+r0)/pow(r0-y*sin(theta),5)) ;}
//{return(1) ;}

double L_intens(double x,double y, int ** matrice, int righe, int colonne)
{int i,j;
double x1,y1 ;
x1=(x+dimx)/(2*dimx)*(colonne);
y1=(y+dimy)/(2*dimy)*(righe);
i=int(y1) ;
j=int(x1) ;
if ((i>=0)&&((i+1)<righe)&&(j>=0)&&((j+1)<colonne))
return (
    (matrice[i][j]*distanza(x1,y1,i,j)+matrice[i+1][j]*distanza(x1,y1,i+1,j)
    +matrice[i][j+1]*distanza(x1,y1,i,j+1)+matrice[i+1][j+1]*distanza(x1,y1,i+1,j+1)
    )
    /(distanza(x1,y1,i,j)+distanza(x1,y1,i+1,j)+distanza(x1,y1,i,j+1)+distanza(x1,y1,i+1,j+1))
    );
//if ((i<colonne) && (j<righe)) return (matrice[j][i]);
else return (0);
}

void S_intens(double posx,double posy, int ** M, int R, int C,int val)
{int i,j;
i= int((posy+NEWdimy)/(2*NEWdimy)*(R));
```

```
j= int((posx+NEWdimx)/(2*NEWdimx)*(C));  
M[i][j] = val ;  
}
```

```
double distanza(double x,double y,double a,double b)  
{ return(sqrt(pow(x-a,2)+pow(y-b,2))) ;  
}
```

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Marco Stefancich e Andrea Antonini del Dip.to di Fisica dell'Università di Ferrara per il valido aiuto fornito nella fase di elaborazione delle immagini CCD.

Riferimenti

- [1] A. Steinfeld, "Solar hydrogen production via a two-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions", *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (2002) 611-619.
- [2] Y. Tamaura, A. Steinfeld, P. Kuhn, K. Ehrensberger, "Production of solar hydrogen by a novel, two-step, water-splitting thermochemical cycle", *Energy - The International Journal* 20 (1995) 325-330.
- [3] H. Ohya, M. Yatabe, M. Aihara, Y. Negishi, T. Takeuchi, "Feasibility of hydrogen production above 2500 K by direct thermal decomposition reaction in membrane reactor using solar energy". *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (2002) 369-376.
- [4] A. Kogan, "Direct solar thermal splitting of water and on-site separation of the products - IV. Development of porous ceramic membranes for a solar thermal water-splitting reactor". *International Journal of Hydrogen Energy* 25 (2000) 1043-1050.
- [5] Ohta, Tokio; Editor, "Solar-Hydrogen Energy Systems. An Authoritative Review of Water-Splitting Systems by Solar Beam and Solar Heat: Hydrogen Production, Storage, and Utilization". (1979), 264 pp. Publisher: (Pergamon Press, Oxford, Engl.)
- [6] Steinfeld A., "Recent Research Developments in Solar Thermochemical Processing", *Recent Research Developments in Chemical Engineering, Transworld Research Network, ISBN: 81-86846-63-8, Vol. 4, pp. 95-101, 2000.*
- [7] R.M. Swanson, "The Promise of Concentrators", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 8 (2000) 93-111.
- [8] A. Luque, G. Sala, J.C. Arboiro, T. Bruton, D. Cunningham, N. Mason, "Some Results of the EUCLIDES Photovoltaic Concentrator Prototype", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 5 (1997) 195-212.
- [9] A.W. Blakers, J. Smeltink, "The ANU PV/trough concentrator system", in *Proc. 2nd World Conf. on Photovolt. Solar Energy Conversion, Wien, Austria, 6-10 July, 1998, pp. 2193-2195.*
- [10] G. Sala, J.C. Arboiro, A. Luque, I. Antón, M.P. Gasson, N.B. Mason, K.C. Heasman, T.M. Bruton, E. Mera, E. Cambor, P. Datta, M. Cendagorta, M.P. Friend, P. Valera, S.

- González, F. Dobón, F. Pérez, "480 kW peak EUCLIDES concentrator power plant using parabolic troughs", in Proc. 2nd World Conf. on Photovolt. Solar Energy Conversion, Wien, Austria, 6-10 July, 1998, pp. 1963-1968.
- [11] "Next Generation Photovoltaics. High efficiency through full spectrum utilization", Ed. by A. Martí and A. Luque, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2004, p. 296.
- [12] I. Antón, G. Sala, J.C. Arboiro, "Effect of the Optical Performance on the Output Power of the EUCLIDES Array", Proc. 16th EPSEC 2000, Vol. 3, pp. 2225-2228.
- [13] G. Sala, I. Antón, J.C. Arboiro, A. Luque, E. Cambor, E. Mera, M.P. Gasson, M. Cendagorta, P. Valera, M.P. Friend, J. Monedero, S. González, F. Dobón, "The 480 kWp EUCLIDES™-THERMIE Power Plant: Installation, Set-up and First Results", Proc. 16th EPSEC 2000, Vol. 3, pp. 2072-2077.
- [14] G. Sala, I. Antón et al., "The Euclides-Thermie Concentrator Power Plant in Continuous Operation", Proc. 17th EPSEC 2001, Vol. 1, pp. 488-491.
- [15] I. Antón, D. Pachón and G. Sala, "Characterization of Optical Collectors for Concentration Photovoltaic Applications", Prog. Photovolt. Res. Appl. 11 (2003) 387-405.
- [16] G. Kortum, "Reflectance Spectroscopy. Principles, methods, applications", Springer, Berlin, 1969.
- [17] M.L. Addonizio e A. Parretta, "Analisi del fascio concentrato per riflessione da superficie lambertiana: caratterizzazione di diffusori ottici", Report interno ENEA n. EGE04009 del 9 Febbraio 2004.
- [18] A. Parretta, "Proprietà di lambertianità di diffusori reali", in preparazione.
- [19] R.Y.Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", IEEE J. Rob. Autom. 3 (1987) 323-344.
- [20] T. Weng, P. Cohen, M. Hernion, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (1992) 965-980.
- [21] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", Technical Report MSR-TR-98-71 (Microsoft Corporation, Redmond, Wash., December 1998).
- [22] A. Parretta, A. Sarno and H. Yakubu, "Non-destructive optical characterization of photovoltaic modules by an integrating sphere. Part I: mono-Si modules", Optics Communications, 161 (1999) 297-309.
- [23] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, H. Yakubu, P. Maddalena, J. Zhao, A. Wang, "Angle-dependent reflectance and transmittance measurements on photovoltaic materials and solar cells", Optics Communications, 172 (1999) 139-151.
- [24] A. Parretta, P. Grillo, P. Tortora and P. Maddalena, "Method for measurement of the directional/hemispherical reflectance of photovoltaic devices", Optics Communications, 186 (2000) 1-14.
- [25] A. Parretta, "Dispositivo per la esecuzione non distruttiva di misure di riflettanza spettrale, globale, speculare e diffusa, ad angolo di incidenza variabile, nonché di trasmittanza, per celle solari e moduli fotovoltaici", Patent It. Application N. RM 97 A 000676, 5 November 1997.
- [26] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, "Apparecchio e metodo per la misura differenziale della riflettanza di una superficie", Patent It. Application N. RM 99 A 000656, 25 October 1999.

 Unità Tecnico Scientifica Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi	Documento EGE 04009	Pag. 40 di 40 Rev. 0
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	-------------------------

- [27] P. Tortora, P. Maddalena, A. Parretta, “Apparecchio e metodo per la misura simultanea della corrente e della riflettanza di una cella solare”, Patent It. Application N. RM 2001 A 000321, 8 June 2001.