



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**PROGETTAZIONE E VERIFICA SPERIMENTALE  
DI UN SISTEMA DI ILLUMINAZIONE PER  
TELECAMERA IPERSPETTRALE**

*Design and experimental verification of a hyperspectral camera  
lighting system*

Relatrice: Prof.ssa Milena Martarelli

Correlatrice: Ing. Silvia Discepolo

Tesi di Laurea di:

Arianna Pedini

Anno Accademico 2023/2024

Alla mia famiglia,  
pilastro fondamentale della mia vita,

A me stessa, alla mia determinazione e ai miei sogni.

# INDICE

<i>LISTA DELLE TABELLE</i> .....	3
<i>INTRODUZIONE</i> .....	4
<i>1. Spettroscopia</i> .....	6
1.1. Storia della spettroscopia.....	6
1.2. Spettro elettromagnetico.....	7
1.2.1. Spettro del visibile .....	9
1.2.2. Spettro infrarosso.....	9
1.3. Interazione tra luce e materia .....	10
1.3.1. Riflessione .....	11
1.3.2. Rifrazione .....	12
1.3.3. Diffrazione.....	13
<i>2. Imaging Iperspettrale</i> .....	15
2.1. Fondamenti dell'Imaging Iperspettrale.....	15
2.1.1. Differenze tra Immagini RGB, Multispettrali ed Iperspettrali .....	16
2.2. Metodi di Scansione e Acquisizione delle Immagini Iperspettrali .....	18
2.2.1. Metodi di Scansione .....	18
2.2.2. Metodi di Acquisizione .....	19
2.3. Architettura dei Sistemi Iperspettrali.....	20
2.4. Campi di applicazione .....	22
<i>3. Materiali e Metodi</i> .....	24
3.1. Strumentazione .....	24
3.1.1. Telecamera Iperspettrale HinaLea® 4250 .....	25
3.1.2. Sistema di Raffreddamento .....	27
3.1.3. Sistema di Illuminazione – architettura delle due configurazioni .....	27
3.2. Acquisizione dei dati .....	32
3.2.1. Panoramica delle sei modalità di acquisizione .....	32
3.2.2. Preparazione del sistema .....	33
3.2.3. Procedura di acquisizione .....	34
3.3. Elaborazione dei dati .....	35

3.3.1. Metodo di caratterizzazione della non uniformità dell'intensità spaziale .....	35
3.3.2. Metodo di caratterizzazione della non uniformità dell'intensità spaziale-spettrale .....	36
<i>4. Valutazione e Risultati</i> .....	38
4.1. Valutazione della non uniformità dell'intensità spaziale.....	38
4.2. Valutazione della non uniformità dell'intensità spaziale-spettrale.....	40
4.3. Prove con telecamera inclinata .....	44
<i>CONCLUSIONI</i> .....	47
<i>Appendice – Codice MatLab</i> .....	48
<i>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</i> .....	52
<i>RINGRAZIAMENTI</i> .....	54

## LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 - Profilo di una radiazione elettromagnetica .....	8
Figura 2 - Spettro elettromagnetico, con dettaglio dello spettro del visibile .....	9
Figura 3 - Rappresentazione della legge della riflessione .....	11
Figura 4 - Rappresentazione delle due tipologie principali di riflessione .....	12
Figura 5 - Rappresentazione della legge di Snell nel passaggio aria-vetro .....	12
Figura 6 - Rappresentazione del concetto di angolo critico e riflessione totale nel passaggio aria-vetro .....	13
Figura 7 - Frange di diffrazione che si formano in prossimità del limite dell'ombra geometrica di un oggetto illuminato .....	14
Figura 8 - Rappresentazione dell'ipercubo .....	15
Figura 9 - Tipologie di immagini acquisite tramite tecniche di imaging .....	17
Figura 10 - Metodi di scansione delle immagini iperspettrali .....	18
Figura 11 - Modalità di acquisizione delle immagini iperspettrali .....	20
Figura 12 - Configurazione di un sistema di imaging iperspettrale .....	21
Figura 13 - Architettura del sistema iperspettrale .....	24
Figura 14 - Telecamera iperspettrale HinaLea® 4250 .....	26
Figura 15 - Sistema di raffreddamento .....	27
Figura 16 - Architettura delle due configurazioni dei sistemi di illuminazione ..	28
Figura 17 - Schema della disposizione delle lampade nel primo sistema visto dall'alto .....	28
Figura 18 - Struttura del ring vista dall'alto .....	29
Figura 19 - Confronto degli spettri di intensità di tre diverse fonti luminose .....	30

Figura 20 - Lampada alogena .....	32
Figura 21 - Immagine della differenza per ogni pixel tra $HS(x_i, y_j)$ e $HS_2$ .....	39
Figura 22 - Spettro medio d'intensità.....	41
Figura 23 - Spettro medio d'intensità sovrapposto per tutte e sei le modalità di acquisizione .....	42
Figura 24 - Differenza $d(x_i, y_j)$ .....	43
Figura 25 - Immagine di riflettanza con telecamera centrata (sinistra) e telecamera inclinata (destra) .....	45
Figura 26 - Verifica dell'uniformità del valore di riflettanza con telecamera centrata (sinistra) e telecamera inclinata (destra) .....	46

## LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classificazione delle radiazioni elettromagnetiche .....	8
Tabella 2 - Scheda tecnica HinaLea® 4250 .....	26
Tabella 3 - Media dell'immagine di intensità normalizzata media .....	38
Tabella 4 - Disuniformità dell'intensità spaziale (SIN) .....	40
Tabella 5 - Disuniformità dell'intensità spaziale-spettrale (SSN) .....	44

# INTRODUZIONE

L'imaging iperspettrale (*HyperSpectral Imaging* - HSI) è una tecnica che integra l'analisi di immagini digitali con la spettroscopia tradizionale per ottenere informazioni spaziali e spettrali dei dati acquisiti.

In ogni sistema di imaging, una buona illuminazione è fondamentale per garantire un'elevata qualità dell'immagine, necessaria per le migliori prestazioni degli algoritmi di analisi delle immagini. Pertanto, l'intero oggetto deve essere ugualmente ben illuminato, senza ombre o riflessi speculari, garantendo un'uniformità sia spaziale che spettrale.

Il presente lavoro di tesi si propone di progettare e verificare sperimentalmente la validità di un sistema che utilizza una telecamera iperspettrale per l'acquisizione di immagini di un foglio bianco, con conseguente estrazione ed elaborazione degli spettri ottenuti. Il foglio viene illuminato mediante due differenti sistemi di illuminazione, entrambi basati sull'utilizzo di lampade alogene. Il primo è costituito da quattro lampade collegate al sistema di acquisizione mediante due aste inclinate a  $45^\circ$  rispetto al foglio. Il secondo, invece, è composto da un ring di forma circolare su cui sono avvitate otto lampadine. La qualità dei due sistemi di illuminazione viene valutata attraverso misure di intensità spaziale e intensità spaziale-spettrale.

L'elaborato si compone di quattro capitoli, per i quali di seguito viene fornita una breve presentazione.

Nel primo capitolo vengono introdotte le generalità riguardo la spettroscopia nonché le informazioni in ambito ottico necessarie alla comprensione di questo elaborato.

Nel secondo capitolo viene descritto l'imaging iperspettrale, spiegandone i concetti fondamentali e le differenze rispetto ad altre tecniche di imaging come RGB e multispettrale. Inoltre, viene illustrata la tipica configurazione di un sistema di imaging iperspettrale ed esplorati i vari campi di applicazione.

Nel terzo capitolo si passa alla trattazione del lavoro svolto in pratica. In particolare, vengono dapprima descritte in maniera dettagliata la strumentazione utilizzata e le differenti configurazioni del sistema. In seguito, vengono approfondite le fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Nel quarto ed ultimo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dalla fase di elaborazione, rendendo note le differenze tra le varie modalità di acquisizione.

I risultati che derivano da questo studio possono risultare significativi e contribuire ad ottimizzare l'utilizzo dei sistemi di imaging iperspettrale, migliorando la qualità e l'accuratezza delle analisi spettrali ed aprendo nuove opportunità di ricerca e sviluppo.

# CAPITOLO 1

## Spettroscopia

### 1.1. Storia della spettroscopia

La spettroscopia è la disciplina che studia l'interazione tra la materia e la radiazione elettromagnetica.

Le sue origini risalgono al XVII secolo, quando l'inglese Isaac Newton condusse una serie di esperimenti utilizzando prismi di vetro per scomporre la luce bianca. Facendo passare quest'ultima attraverso un piccolo foro e poi attraverso un prisma, Newton osservò che la luce si separava in una serie regolare di colori, formando uno spettro proiettato su uno schermo. Egli concluse che la luce bianca è in realtà composta da vari colori, ciascuno dei quali viene deviato in modo differente durante il passaggio attraverso il prisma [1] [2].

Oltre un secolo più tardi, gli studi condotti dai fisici William Herschel e Johann Wilhelm Ritter rivelarono l'esistenza di radiazioni invisibili agli estremi dello spettro visibile, identificati come infrarossi e ultravioletti [1].

All'inizio del XIX secolo, il fisico e ottico tedesco Joseph von Fraunhofer, insieme a Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen, fece significativi progressi nella spettroscopia. Fraunhofer ideò il reticolo di diffrazione, uno strumento che permise di misurare con estrema precisione la lunghezza d'onda della luce solare. Utilizzando questo strumento, scoprì oltre 500 linee scure nello spettro solare, note oggi come linee di Fraunhofer. Queste linee sono il risultato dell'assorbimento di specifiche lunghezze d'onda da parte degli elementi chimici presenti nell'atmosfera del sole. L'invenzione del reticolo di diffrazione e la scoperta delle linee di assorbimento aprirono la strada alla costruzione degli spettroscopi moderni, strumenti fondamentali per l'analisi spettroscopica in vari campi della scienza [1].

Nel corso del XIX secolo, si consolidò il concetto che ogni punto dello spettro elettromagnetico corrisponde a radiazioni di una specifica lunghezza d'onda. Dopo i lavori di James Clerk Maxwell e ulteriori scoperte nel campo della spettroscopia, divenne

chiaro che lo spettro elettromagnetico si estende dalle onde radio, attraverso le regioni infrarossa, visibile, ultravioletta, fino ai raggi X e gamma. Questa comprensione ha portato alla spettroscopia moderna, che abbraccia l'intero spettro elettromagnetico. Nell'ultimo secolo, l'osservazione delle linee spettrali ha fornito una guida sperimentale essenziale per i teorici nello sviluppo della meccanica quantistica, con contributi chiave da parte di scienziati come Max Planck, Niels Bohr, Paul Dirac e Willis Lamb. Questi sviluppi hanno permesso di spiegare fenomeni complessi e di comprendere le proprietà fondamentali della materia e della radiazione [1].

Oggi, l'analisi spettroscopica ha applicazioni in molteplici campi, da quello puramente scientifico a quello medico, geologico, agroalimentare e infrastrutturale. La spettroscopia continua ad essere uno strumento indispensabile per la ricerca e l'industria, contribuendo a scoperte e innovazioni in diversi settori.

## **1.2. Spettro elettromagnetico**

Una radiazione elettromagnetica è una perturbazione caratterizzata da una natura simultaneamente elettrica e magnetica che si propaga nello spazio trasportando energia. Questa si manifesta come un'onda trasversale, in cui i campi elettrico e magnetico oscillano in direzioni perpendicolari tra loro e rispetto alla direzione di propagazione dell'onda [3].

La radiazione elettromagnetica è caratterizzata principalmente da tre parametri: la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), che rappresenta la distanza tra due punti massimi (creste) o minimi (avvallamenti) consecutivi; la frequenza ( $\nu$ ), che corrisponde al numero di oscillazioni al secondo, e che è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda; infine, l'ampiezza ( $A$ ), che misura l'intensità dell'onda e corrisponde alla distanza tra il valore massimo e l'asse di propagazione [5].

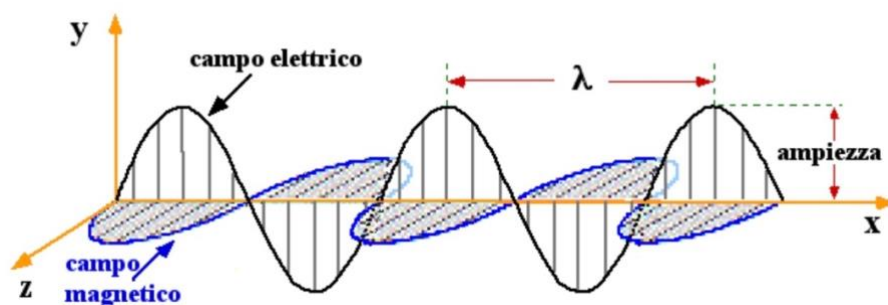


Figura 1 - Profilo di una radiazione elettromagnetica [6]

La relazione che lega lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) e frequenza ( $\nu$ ) è la seguente:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

in cui  $c$  rappresenta la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nel vuoto ( $3 \times 10^8$  m/s = 300000 km/s) [5].

Lo spettro elettromagnetico (o spettro EM) è definito come l'insieme di tutte le possibili radiazioni elettromagnetiche. Tale spettro può essere suddiviso in sette regioni (o bande) in base ai valori di lunghezza d'onda  $\lambda$ , in modo identico, in base alla frequenza [4].

<i>Tipologia di radiazione</i>	<i>Frequenza (<math>\nu</math>)</i>	<i>Lunghezza d'onda (<math>\lambda</math>)</i>
<i>Onde Radio</i>	$\leq 300$ MHz	$\geq 1$ m
<i>Microonde</i>	300 MHz – 300 GHz	1 m – 1 mm
<i>Infrarosso</i>	300 GHz – 428 THz	1 mm – 700 nm
<i>Luce Visibile</i>	428 THz – 749 THz	700 nm – 400 nm
<i>Ultravioletto (UV)</i>	749 THz – 30 PHz	400 nm – 10 nm
<i>Raggi X</i>	30 PHz – 300 EHz	10 nm – 1 pm
<i>Raggi <math>\gamma</math></i>	$\geq 300$ EHz	$\leq 1$ pm

Tabella 1 - Classificazione delle radiazioni elettromagnetiche [4]

### 1.2.1. Spettro del visibile

Lo spettro del visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico le cui radiazioni cadono tra il rosso e il violetto, includendo tutte le colorazioni percepibili dall'occhio umano, che, complessivamente, compongono la luce.

Le onde elettromagnetiche dello spettro del visibile hanno valori di lunghezza d'onda compresi tra 390 nm e 760 nm (1 nm = 1 nanometro =  $10^{-9}$  m), mentre le frequenze variano approssimativamente tra 430 THz e 750 THz (1 THz = 1 terahertz =  $10^{12}$  Hz) [4] [5].

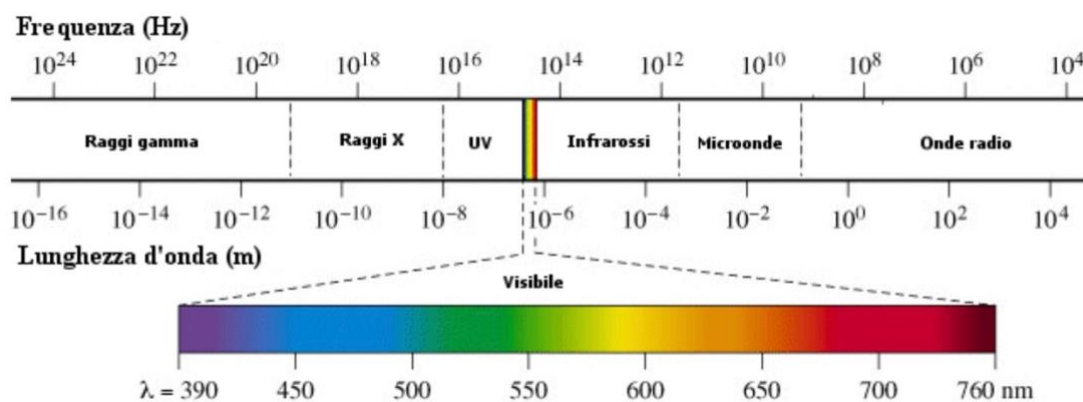


Figura 2 - Spettro elettromagnetico, con dettaglio dello spettro del visibile [7]

### 1.2.2. Spettro infrarosso

Lo spettro infrarosso (IR - *Infra Red*) è una porzione dello spettro elettromagnetico che si estende approssimativamente da 760 nm a 1 mm (1 mm = 1 millimetro =  $10^{-3}$  m) in lunghezza d'onda. Viene usualmente suddiviso in tre regioni principali: *vicino infrarosso* (NIR - *Near Infra Red*,  $760 \text{ nm} < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ), *medio infrarosso* (MIR - *Medium Infra Red*,  $3 \mu\text{m} < \lambda < 30 \mu\text{m}$ ) e *lontano infrarosso* (FIR - *Far Infra Red*,  $30 \mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$ ) [8].

Lo spettro IR è utilizzato principalmente in spettroscopia per identificare e studiare le vibrazioni molecolari e le transizioni rotazionali, offrendo informazioni dettagliate sulla struttura chimica e sulle interazioni molecolari [8].

### 1.3. Interazione tra luce e materia

La maggior parte degli oggetti è visibile solo quando illuminata: è quindi l'interazione tra questi e la radiazione elettromagnetica a permetterne la visione e la classificazione in base al colore [4].

I corpi sono suddivisi in tre categorie:

- trasparenti: possono essere attraversati dalla luce senza diffusione;
- traslucidi: se attraversati dalla luce, la diffondono;
- opachi: non lasciano passare la luce [4].

I fenomeni di interazione tra luce e materia possono essere classificati come segue:

- puro cambiamento di direzione del fascio luminoso: include i fenomeni della riflessione, rifrazione e diffrazione;
- assorbimento della radiazione elettromagnetica: si verifica quando la materia assorbe parte della radiazione incidente che la colpisce. Questo processo avviene in modo selettivo rispetto alla lunghezza d'onda, poiché diversi materiali assorbono specifiche frequenze della radiazione. L'energia assorbita viene generalmente convertita in calore o altre forme di energia non radioattiva, quindi non visibile;
- fotoluminescenza: si verifica quando il corpo assorbe radiazioni appartenenti ad un determinato intervallo, solitamente nell'ultravioletto e successivamente emette radiazioni nel visibile. Si parla di fotoluminescenza quando l'effetto inizia immediatamente dopo la fine dell'assorbimento ed è di breve durata, mentre si parla di fosforescenza se l'emissione persiste per un periodo prolungato [4].

Questi ultimi due fenomeni non saranno di seguito trattati in quanto il presente elaborato si concentra esclusivamente sui corpi opachi non fluorescenti.

### 1.3.1. Riflessione

Con il termine riflessione si intende il fenomeno per cui un raggio di luce (raggio incidente), colpendo una superficie totalmente o parzialmente riflettente, viene riflesso cambiando la propria direzione. Più precisamente la legge della riflessione equivale alle seguenti tre affermazioni:

1. il raggio incidente, quello riflesso e la normale alla superficie riflettente sono sempre contenuti nello stesso piano (piano di incidenza);
2. il raggio incidente e quello riflesso giacciono sempre da parti opposte rispetto alla normale;
3. l'angolo di incidenza e quello di riflessione sono uguali; tale relazione è descritta dalla legge della riflessione (eq. (2)) [4].

$$\theta_i = \theta_r \quad (2)$$

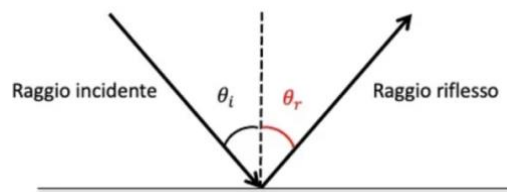


Figura 3 - Rappresentazione della legge della riflessione [9]

La riflessione può essere suddivisa in due tipologie principali:

- speculare: si verifica quando il raggio incidente colpisce una superficie liscia e regolare, come uno specchio. In questo caso, il raggio viene deviato in un'unica direzione, mantenendo l'angolazione rispetto alla normale (*Figura 4a*);
- diffusa: si verifica quando il raggio incidente colpisce una superficie ruvida o irregolare. In questo caso, il raggio viene deviato in molteplici direzioni diverse, producendo un effetto diffuso (*Figura 4b*) [4].

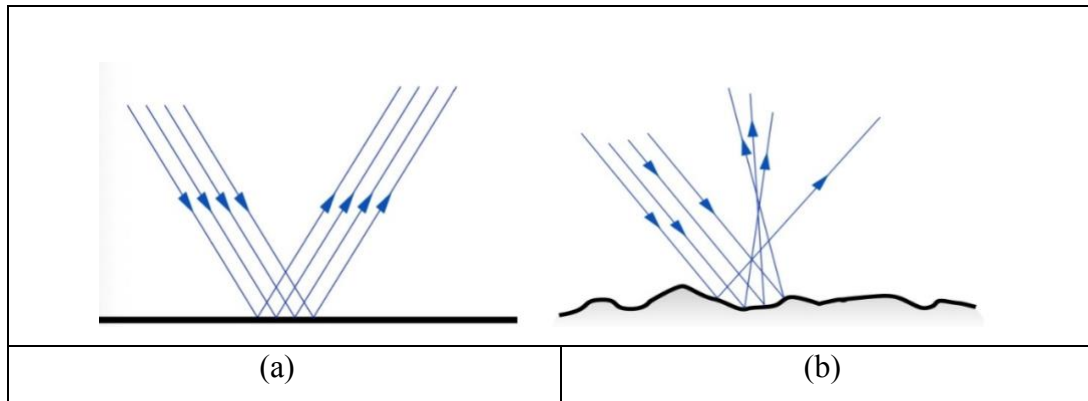


Figura 4 - Rappresentazione delle due tipologie principali di riflessione [10]: (a) Riflessione speculare; (b) Riflessione diffusa

### 1.3.2. Rifrazione

Con il termine rifrazione si intende il cambiamento di direzione che un raggio di luce subisce nel passaggio tra due mezzi diversi.

La legge della rifrazione nei mezzi isotropi equivale alle seguenti tre affermazioni:

1. il raggio rifratto è sempre contenuto nel piano di incidenza;
2. il raggio incidente e quello rifratto giacciono sempre da parti opposte rispetto alla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi che passa per il punto di rifrazione;
3. detti  $n$  e  $n'$  gli indici di rifrazione di due mezzi, l'angolo di incidenza ( $\theta$ ) e quello di rifrazione ( $\theta'$ ) sono collegati dalla legge della rifrazione, più comunemente nota come legge di Snell, riportata di seguito [4].

$$n \sin(\theta) = n' \sin(\theta') \quad (3)$$

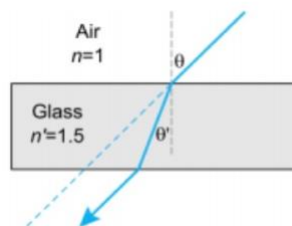


Figura 5 - Rappresentazione della legge di Snell nel passaggio aria-vetro [4]

L'angolo  $\theta$  ha un limite massimo detto  $\theta_c$  (angolo critico). Un raggio che incide sulla superficie di separazione con un angolo di incidenza maggiore di  $\theta_c$ , invece di penetrare nel mezzo con indice di rifrazione minore, subisce una riflessione totale, o interna, per la quale vale la normale legge della riflessione (eq. (2)). Per ogni valore dell'angolo di incidenza  $\theta$  in generale si ha sempre una certa riflessione del raggio incidente, ma la percentuale di luce riflessa rispetto a quella rifratta al variare di  $\theta$  da  $0^\circ$  a  $\theta_c$  aumenta sempre finché, quando l'angolo di incidenza supera l'angolo critico, tutta la luce viene riflessa e il raggio rifratto si annulla. Il valore di  $\theta_c$  è diverso per ogni coppia di mezzi. Alcune tra le più importanti applicazioni della riflessione totale si hanno nelle fibre ottiche e nei prismi [4].

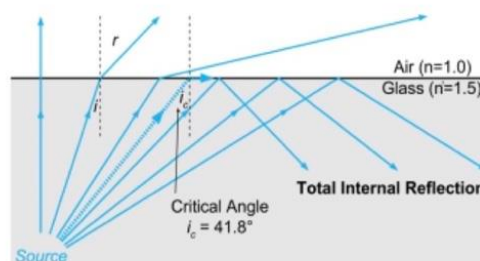


Figura 6 - Rappresentazione del concetto di angolo critico e riflessione totale nel passaggio aria-vetro [4]

### 1.3.3. Diffrazione

La diffrazione è un fenomeno fisico che si verifica quando un'onda luminosa incontra nel suo percorso un ostacolo o un'apertura, entrambi considerati come corpi opachi. In tali condizioni, solo alcune parti del fronte d'onda incidente possono propagarsi, cioè contribuire all'emissione delle onde secondarie. Un'importante conseguenza è che la luce sembra deviare dalla propagazione rettilinea, motivo per cui il fenomeno della diffrazione è spesso identificato con la tendenza delle onde ad aggirare gli ostacoli [4].

Si considera un fascio di raggi di luce paralleli che, dopo essere passato attraverso una fenditura, arriva su uno schermo. Se quest'ultimo è molto vicino alla fenditura su di esso si forma un'immagine nitida. Se però lo schermo viene progressivamente allontanato, pur rimanendo l'immagine chiaramente percettibile, ai suoi bordi iniziano ad apparire frange

di diversa intensità e l'effetto è noto come *diffrazione di Fresnel*. Quando la distanza tra lo schermo e la fenditura diventa sufficientemente grande, i raggi che incidono su di esso possono essere considerati paralleli e l'immagine geometrica scompare per il diffondersi delle frange. In tali condizioni si ha la *diffrazione di Fraunhofer* [4].

Gli effetti di diffrazione sono trattati come diffrazione di Fresnel in tutti i casi in cui i fronti d'onda devono essere considerati sferici e come diffrazione di Fraunhofer se i fronti d'onda possono essere considerati, almeno approssimativamente, piani [4].



*Figura 7 - Frange di diffrazione che si formano in prossimità del limite dell'ombra geometrica di un oggetto illuminato [4]*

## CAPITOLO 2

### Imaging Iperspettrale

#### 2.1. Fondamenti dell'Imaging Iperspettrale

L'imaging iperspettrale (*HyperSpectral Imaging* - HSI) è una tecnica che combina l'analisi di immagini digitali con la spettroscopia tradizionale, consentendo l'acquisizione simultanea di informazioni spettrali e spaziali. Tipicamente, i sistemi di imaging più diffusi lavorano nelle regioni che vanno dal visibile fino all'infrarosso ad onde corte (da  $\lambda = 400$  nm a  $\lambda = 2500$  nm).

I dati iperspettrali sono noti come ipercubo o cubo di dati a causa della loro natura tridimensionale, definita da due dimensioni spaziali (righe X \* colonne Y) e una terza dimensione spettrale (lunghezza d'onda  $\lambda$ ). Tali dati  $I(X, Y, \lambda)$  possono quindi essere rappresentati come un'immagine bidimensionale  $I(X, Y)$  ad ogni lunghezza d'onda  $\lambda$ . L'elemento dell'immagine nei dati iperspettrali è noto come voxel, mentre nel caso dell'immagine bidimensionale a singola lunghezza d'onda è noto come pixel [11] [12].

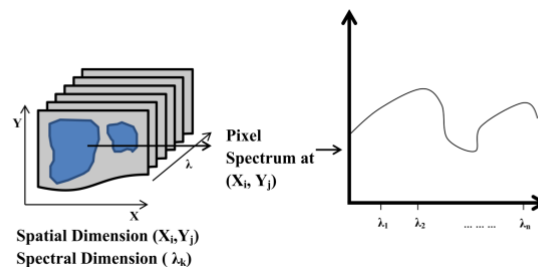


Figura 8 - Rappresentazione dell'ipercubo [11]

La tecnica HSI consente di generare profili spettrali continui per ciascun pixel del campione analizzato. Lo spettro di ciascun pixel può essere impiegato come una sorta di "impronta digitale" del materiale, permettendo di caratterizzare la composizione chimico-fisica del pixel e di valutarne la posizione spaziale [11].

Le due tipologie di spettro associate ad un pixel in un'immagine iperspettrale utilizzate nello sviluppo successivo dell'elaborato sono lo spettro di intensità e lo spettro di riflettanza. Lo spettro di intensità fornisce informazioni riguardanti la distribuzione

dell'energia luminosa attraverso le diverse lunghezze d'onda. L'analisi di tale spettro consente la determinazione del potere emissivo di una sorgente luminosa o la quantità di luce che una superficie riceve da una sorgente esterna. Lo spettro di riflettanza fornisce invece informazioni riguardanti la distribuzione della riflettanza attraverso le diverse lunghezze d'onda. La riflettanza è una grandezza adimensionale compresa tra 0 e 1, che indica l'efficienza con cui una superficie riflette la luce a una determinata lunghezza d'onda. Un valore di riflettanza pari a 0 significa che tutta la luce è assorbita, mentre un valore di riflettanza pari a 1 indica che tutta la luce è riflessa.

### **2.1.1. Differenze tra Immagini RGB, Multispettrali ed Iperspettrali**

Quando si parla di tecniche di imaging, è fondamentale comprendere le differenze tra le varie tipologie di immagini che esse possono fornire. Tra queste vi sono le immagini RGB, multispettrali ed iperspettrali, ciascuna delle quali offre vantaggi specifici a seconda dell'applicazione.

Le immagini RGB (Red-Green-Blue) sono composte da tre canali che rappresentano le intensità di tre colori: rosso (R), verde (G) e blu (B). Questi tre canali sono sufficienti per rappresentare la maggior parte dei colori visibili all'occhio umano. La combinazione dei tre colori fornisce infatti quasi tutto lo spettro dei colori del visibile. Le immagini RGB sono ampiamente utilizzate in fotografia, video e applicazioni di visualizzazione generica dove è importante riprodurre i colori in modo fedele e comprensibile per l'occhio umano [13].

Le immagini multispettrali catturano informazioni su più bande dello spettro elettromagnetico (in genere variabile tra tre e dieci), non limitandosi quindi ai soli tre canali RGB. Queste bande possono includere intervalli sia nel visibile che nell'infrarosso. Le immagini multispettrali permettono di ottenere informazioni più dettagliate sulle caratteristiche del materiale osservato, che non sarebbero distinguibili con una semplice immagine RGB. Sono utilizzate in agricoltura di precisione, telerilevamento, monitoraggio ambientale e analisi della qualità alimentare [12] [13].

Le immagini iperspettrali rappresentano un ulteriore passo in avanti rispetto alle immagini multispettrali. Esse, come precedentemente approfondito, catturano centinaia di bande strette per ciascun pixel. Ogni banda copre un intervallo di lunghezze d'onda molto specifico, permettendo un'analisi estremamente dettagliata della composizione spettrale di un campione [12] [13].

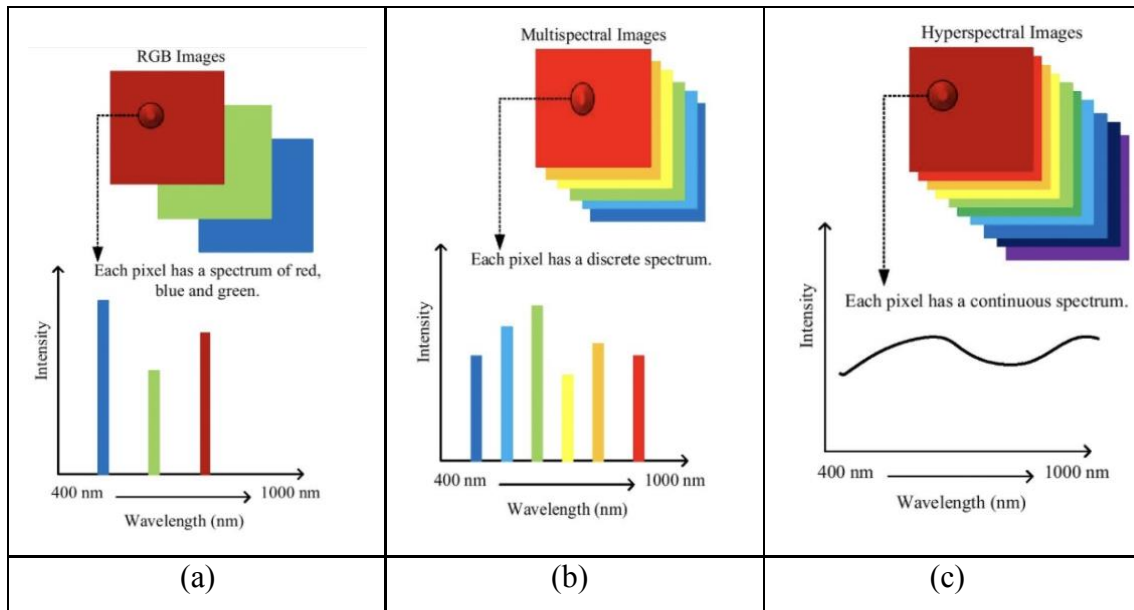


Figura 9 - Tipologie di immagini acquisite tramite tecniche di imaging [14]: (a) Rappresentazione di un'immagine RGB; (b) Rappresentazione di un'immagine multispettrale; (c) Rappresentazione di un'immagine iperspettrale

Osservando la *Figura 9* è ancora più evidente la differenza tra immagini RGB o multispettrali e immagini iperspettrali: l'informazione contenuta in un'immagine iperspettrale assume un comportamento assimilabile al continuo, permettendo perciò la generazione di una vera e propria firma spettrale, diversamente da quella contenuta in un'immagine RGB o multispettrale, discreta e meno adeguata alla generazione di una curva.

I costi di un sistema HSI sono di gran lunga superiori rispetto ai sistemi di imaging RGB o multispettrali, così come il dispendio di tempo di acquisizione e memoria (un'immagine iperspettrale può arrivare a "pesare" *gigabytes*). Tuttavia, questi sono in genere compensati dalle grandi potenzialità che i sistemi HSI sono in grado di offrire [13].

## 2.2. Metodi di Scansione e Acquisizione delle Immagini Iperspettrali

### 2.2.1. Metodi di Scansione

In base alla modalità di acquisizione delle immagini iperspettrali, i sistemi HSI possono essere suddivisi in tre categorie differenti: *whiskerbroom*, *pushbroom* e *staredown*.

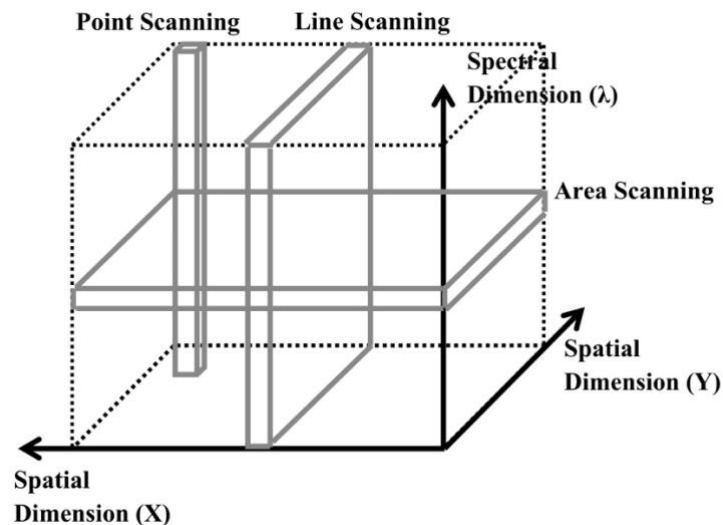


Figura 10 - Metodi di scansione delle immagini iperspettrali [11]

Nella configurazione *whiskerbroom*, anche chiamata *point scanning* (scansione puntuale), la scansione si esegue posizionando il campione su un supporto mobile che si sposta in posizioni predefinite lungo la dimensione spaziale ( $x, y$ ) come se fosse una scopa. In corrispondenza di ciascuna posizione ( $x_i, y_j$ ) viene acquisito uno spettro singolo (da  $\lambda_1$  a  $\lambda_n$ ). I dati raccolti da tale meccanismo di scansione puntuale vengono ottenuti nel formato *Band-Interleaved-by-Pixel* (BIP). Lo svantaggio di questa tecnica è che la raccolta dei dati richiede tempo e preciso posizionamento del sistema pixel per pixel. Generalmente, la scansione puntuale viene utilizzata per l'imaging microscopico in cui il tempo non è un fattore rilevante [11].

La configurazione *pushbroom*, nota anche come *line scanning* (scansione lineare), consente di acquisire tutti i dati spettrali (da  $\lambda_1$  a  $\lambda_n$ ) di tutti i pixel lungo  $y$ , ad una determinata posizione  $x_i$ . I dati bidimensionali (dimensione spaziale  $y$  e dimensione

spettrale  $\lambda$ ) acquisiti per ciascuna linea vengono concatenati insieme mentre il campione si sposta lungo l'asse x, formando così l'ipercubo di dati. Tale configurazione consente quindi un'acquisizione dell'ipercubo in modo più rapido rispetto alla configurazione *whiskerbroom*. I dati ottenuti sono nel formato *Band-Interleaved-by-Line* (BIL). Normalmente, la tecnica di scansione lineare viene utilizzata per applicazioni industriali. In entrambe le configurazioni trattate la raccolta dei dati spaziali avviene in sequenza, a differenza dei dati spettrali che vengono raccolti nel loro insieme [11] [12].

Nella configurazione *stareddown*, anche conosciuta come *area scanning* (scansione dell'area), l'ipercubo viene generato concatenando le immagini bidimensionali (con dimensioni spaziali x e y) acquisite per ciascuna lunghezza d'onda  $\lambda_i$  lungo la direzione spettrale  $\lambda$ . Diversamente dalle due precedenti, nella configurazione *stareddown* il campo visivo (*Field Of View* - FOV) viene mantenuto fisso e non vi sono parti in movimento. In questa tecnica, i dati vengono archiviati nel formato *Band SeQuential* (BSQ). I vantaggi consistono nel fatto che non sono richiesti meccanismi di scansione e viene utilizzato un sistema molto semplificato [11].

### **2.2.2. Metodi di Acquisizione**

Le modalità di acquisizione o rilevamento dell'immagine nell'imaging iperspettrale sono state suddivise in modalità di riflettanza, trasmittanza e interazione a seconda della disposizione relativa delle unità di illuminazione e della telecamera iperspettrale. Le tre modalità sono illustrate in *Figura 11*.

Nella modalità di riflettanza, una telecamera iperspettrale cattura la luce dal campione illuminato in modo specifico per evitare la riflessione speculare. Tale modalità viene utilizzata per rilevare forma, dimensione, colore, struttura della superficie e difetti esterni degli oggetti visualizzati [11].

Nella modalità di trasmittanza, la telecamera iperspettrale è posizionata sul lato opposto della sorgente luminosa e fornisce informazioni sulla concentrazione interna e sui difetti del campione in esame [11].

Nel caso della modalità di interazione, la sorgente di luce e la telecamera iperspettrale sono adiacenti e parallele tra loro. L'informazione ricavata rappresenta congiuntamente la struttura fisica, la composizione chimica e la correlazione tra i campioni attraverso la firma spettrale dell'oggetto visualizzato [11].

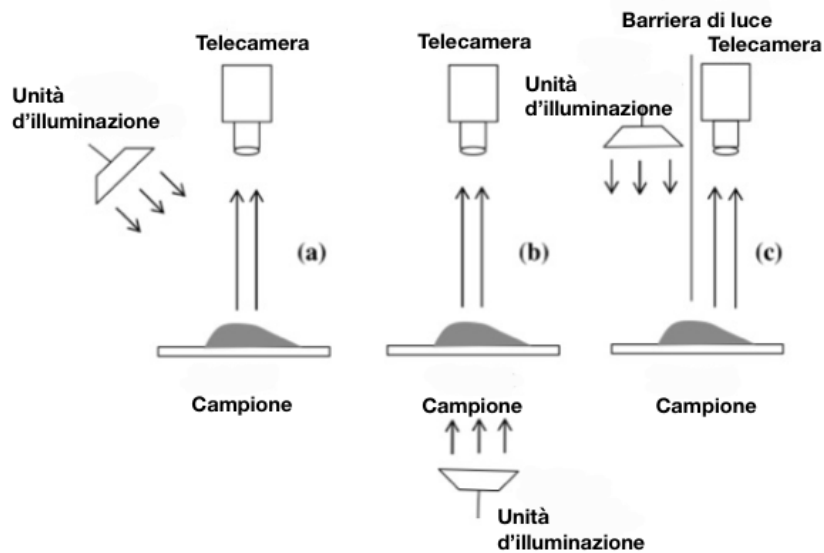


Figura 11 - Modalità di acquisizione delle immagini iperspettrali [11]: (a) Modalità di riflettanza; (b) Modalità di trasmittanza; (c) Modalità di interazione

## 2.3. Architettura dei Sistemi Iperspettrali

Una tipica configurazione di un sistema di imaging iperspettrale è mostrata in *Figura 12*.

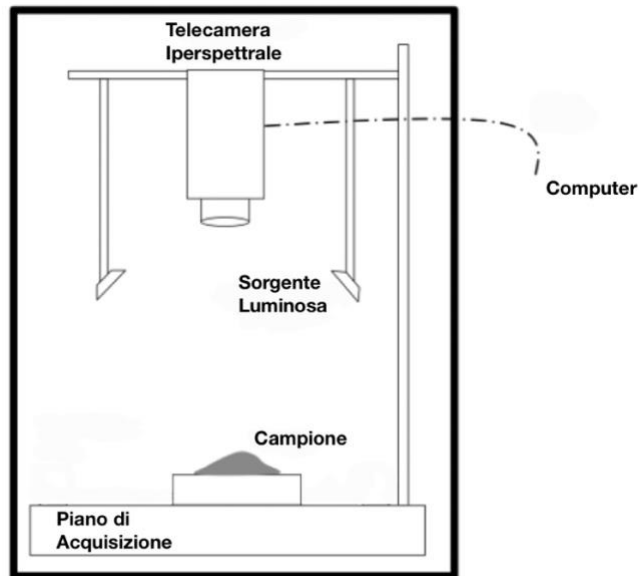


Figura 12 - Configurazione di un sistema di imaging iperspettrale [11]

I principali componenti del sistema sono i seguenti:

- telecamera iperspettrale: rappresenta il cuore del sistema. È progettata per acquisire immagini in un gran numero di bande spettrali, che possono variare da varie decine a centinaia. I dati raccolti, come ampiamente trattato nel sottocapitolo 2.1., formano un cubo iperspettrale, in cui ogni pixel contiene uno spettro continuo di riflettanza o intensità. Le telecamere iperspettrali possono funzionare in diverse regioni spettrali, come il visibile, l'infrarosso vicino (NIR) e l'infrarosso medio (MIR);
- sorgente luminosa: fornisce la luce necessaria per illuminare il campione al fine di poterlo analizzare. Generalmente, nel sistema HSI vengono utilizzate sorgenti luminose come lampade alogene, laser, diodi a emissione di luce (LED) oppure lampade a incandescenza. Una buona sorgente di illuminazione deve garantire una distribuzione uniforme della luce, sia dal punto di vista spaziale che spaziale-spettrale;
- piano di acquisizione: piano su cui viene posizionato il campione;

- campione: è l'oggetto o il materiale che viene analizzato. Deve essere preparato e posizionato correttamente sul piano di acquisizione per garantire una illuminazione uniforme e una raccolta di dati precisa.

Il segnale proveniente dal sistema HSI viene trasmesso ad un computer che permette l'elaborazione dei dati acquisiti e la memorizzazione dei risultati [11].

## **2.4. Campi di applicazione**

Negli ultimi tre decenni, l'imaging iperspettrale è passato dall'essere una tecnica costosa e riservata alla ricerca ad una applicabile ad un'ampia gamma di settori scientifici ed industriali. La capacità di questa metodologia di identificare e quantificare i materiali in modo non invasivo e non distruttivo, unita alla sua rapidità rispetto a molte altre tecniche, ha portato alla sua adozione in numerosi nuovi campi [15].

Nel monitoraggio ambientale, l'HSI risulta essenziale per monitorare la qualità dell'acqua, rilevando parametri come clorofilla, torbidità e presenza di inquinanti. È anche impiegato per identificare e mappare aree contaminate in terreni e corpi idrici e per la sorveglianza delle foreste.

In agricoltura di precisione, questa tecnologia permette di monitorare le colture, rilevando stress, malattie e carenze nutrizionali prima che diventino visibili ad occhio nudo.

Nell'industria alimentare, l'HSI è utile per il controllo della qualità dei prodotti, identificando contaminanti ed eventuali difetti, come la presenza di corpi estranei, e valutando parametri come colore, forma e dimensione.

In ambito artistico, l'imaging iperspettrale consente di identificare in modo accurato, efficiente e sicuro la composizione chimica delle opere d'arte, nonché il loro degrado o cambiamento nel tempo.

Uno dei campi di applicazione di maggiore rilevanza è quello sanitario. In questo contesto, l'HSI viene impiegato per distinguere diverse tipologie di tessuto in base alle loro firme spettrali, migliorare l'accuratezza della diagnosi di malattie e risparmiare tempo prezioso. In dermatologia, è utilizzato per il rilevamento e l'analisi dell'ischemia

intestinale, la caratterizzazione delle strutture vascolari e delle contusioni cutanee, e la documentazione di diverse infiammazioni della pelle. In oncologia, viene impiegato per il rilevamento del cancro e l'identificazione di tumori residui. In odontoiatria, è utilizzato per la diagnosi precoce e la valutazione della gravità della carie. È inoltre sempre più diffuso nel settore farmaceutico [15] [16].

# CAPITOLO 3

## Materiali e Metodi

Le fasi operative della presente tesi riguardano l'acquisizione dei dati attraverso l'utilizzo di una telecamera iperspettrale, con conseguente estrazione ed elaborazione delle immagini ottenute.

In particolare, il centro di questo elaborato è il confronto degli spettri ricavati utilizzando due differenti configurazioni del sistema, entrambe basate sull'impiego di lampade alogene. L'obiettivo è quello di garantire un'elevata qualità dell'immagine, facendo in modo che il campione risulti uniformemente illuminato, senza ombre o riflessi.

È quindi necessario fornire una descrizione dettagliata riguardo la strumentazione utilizzata in questa trattazione, nonché i metodi relativi alla preparazione del sistema per le acquisizioni e all'elaborazione dei dati per la valutazione dell'uniformità dell'illuminazione.

### 3.1. Strumentazione

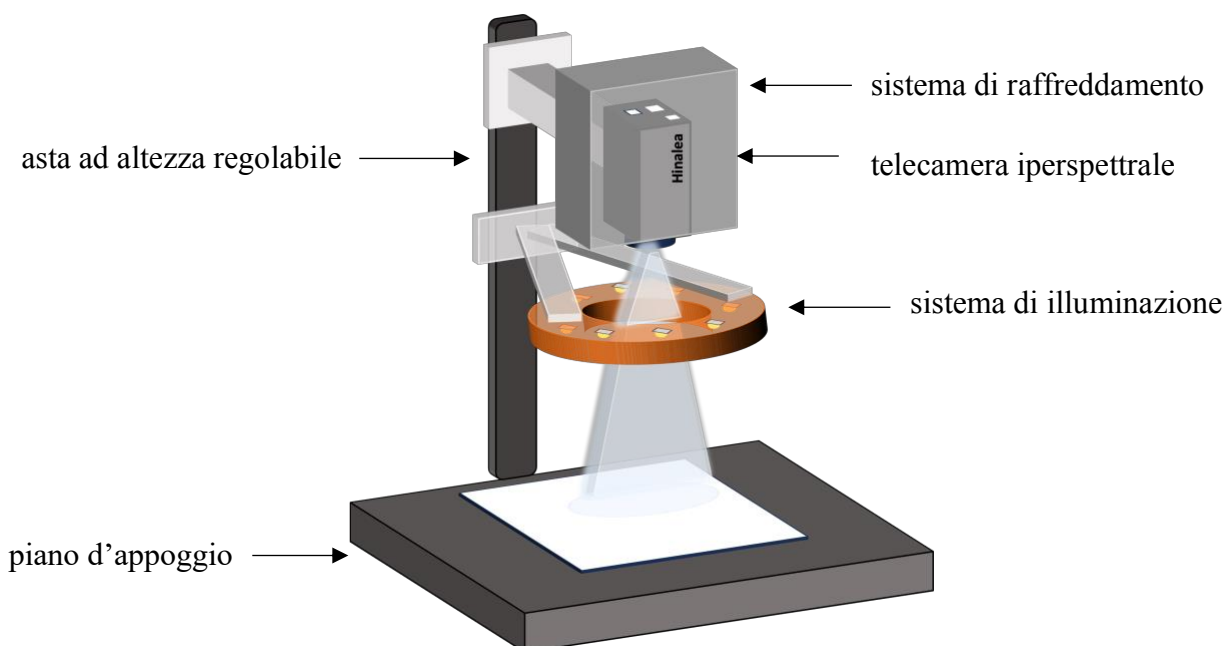


Figura 13 - Architettura del sistema iperspettrale

In *Figura 13* viene mostrata la strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati. In particolare, nella raffigurazione viene riportata soltanto una delle due configurazioni utilizzate, quella costituita da un anello di forma circolare.

Al centro del sistema si trova la telecamera iperspettrale HinaLea®, inserita all'interno di un sistema di raffreddamento. La telecamera è montata su un supporto verticale che permette di regolare l'altezza e l'angolazione rispetto al campione da analizzare, ovvero un foglio bianco posto sul piano d'appoggio. La luce emessa dalle lampade alogene illumina il foglio, e la telecamera iperspettrale cattura le immagini, raccogliendo dati spettrali nel range compreso tra 400 e 1000 nm.

Di seguito viene riportata una trattazione dettagliata per ciascun componente.

### **3.1.1. Telecamera Iperspettrale HinaLea® 4250**

Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata una telecamera iperspettrale HinaLea® 4250, mostrata in *Figura 14*. Questa lavora nel range di lunghezze d'onda compreso tra 400 e 1000 nm, con la capacità di acquisire 299 bande spettrali, offrendo una risoluzione di 2 nm.

La telecamera è dotata di un filtro sintonizzabile posizionato davanti al sensore che è in grado di selezionare sequenzialmente le bande spettrali ed acquisire per ciascuna di esse il corrispondente cubo iperspettrale. Inoltre, la tecnologia sviluppata da HinaLea® rende questa telecamera compatta, leggera e facilmente utilizzabile in un ambiente di laboratorio. Le specifiche tecniche dettagliate della telecamera sono riportate in *Tabella 2* [17].

Il sistema di acquisizione è gestito tramite un computer che utilizza il software HinaLEa, il quale permette un'acquisizione rapida e semplice dell'ipercubo sia del target di riferimento che del campione in esame [17].



Figura 14 - Telecamera iperspettrale HinaLea® 4250 [17]

<b>Mechanical</b>	
<b>Dimensions (LxWxH)</b>	197.7mm (7.78'') x 81mm (3.19'') x 78mm (3.07'') 15° FOV lens adds 45.5mm (1.79'') when focused at infinity (see below) 30° FOV lens adds 130.7mm (5.15'') when focused at infinity (see below)
<b>Mass (Weight)</b>	1.25 kg (2.75 lbs.)
<b>Electrical</b>	
<b>Input Voltage</b>	110 VAC at 60Hz / 220 VAC at 50Hz
<b>Data Interfaces</b>	USB 2.0, 3.0
<b>Environmental</b>	
<b>Operating Temperature</b>	≈ 20°C
<b>Humidity</b>	65% non-condensing
<b>Scan Performance</b>	
<b>Standard Lens</b>	15° Field Of View (FOV) – 150 mm to ∞ 30° Field Of View (FOV) – 150 mm to ∞
<b>Sensor Spatial Resolution</b>	2.3 MP
<b>Spectral Range</b>	400 – 1000 nm
<b>Spectral Bands</b>	300 nominal
<b>Spectral Resolution</b>	2 nm (FWHM)
<b>Dynamic Range</b>	User selectable; 8 or 16 bit
<b>Illumination</b>	Optional

Tabella 2 - Scheda tecnica HinaLea® 4250 [17]

### 3.1.2. Sistema di Raffreddamento

Il sistema di raffreddamento avvolge la telecamera iperspettrale, con l'obiettivo di mantenere la temperatura della telecamera costante intorno ai 20°C, che è la ottimale per garantirne il corretto funzionamento.

Il sistema è costituito da tre elementi Peltier, utilizzati per assicurare un efficace trasferimento termico. Questi sono integrati con tre ventole, ciascuna a sua volta composta da una ventola grande ed una piccola, che lavorano insieme per dissipare il calore in modo efficiente.

Questa configurazione garantisce che la telecamera operi entro il range di temperatura ideale, prevenendo il surriscaldamento dovuto ad un utilizzo prolungato della telecamera e assicurando prestazioni stabili e affidabili durante le acquisizioni.



*Figura 15 - Sistema di raffreddamento*

### 3.1.3. Sistema di Illuminazione – architettura delle due configurazioni

Le acquisizioni vengono eseguite utilizzando due differenti sistemi di illuminazione, entrambi basati su lampade alogene come sorgente luminosa.

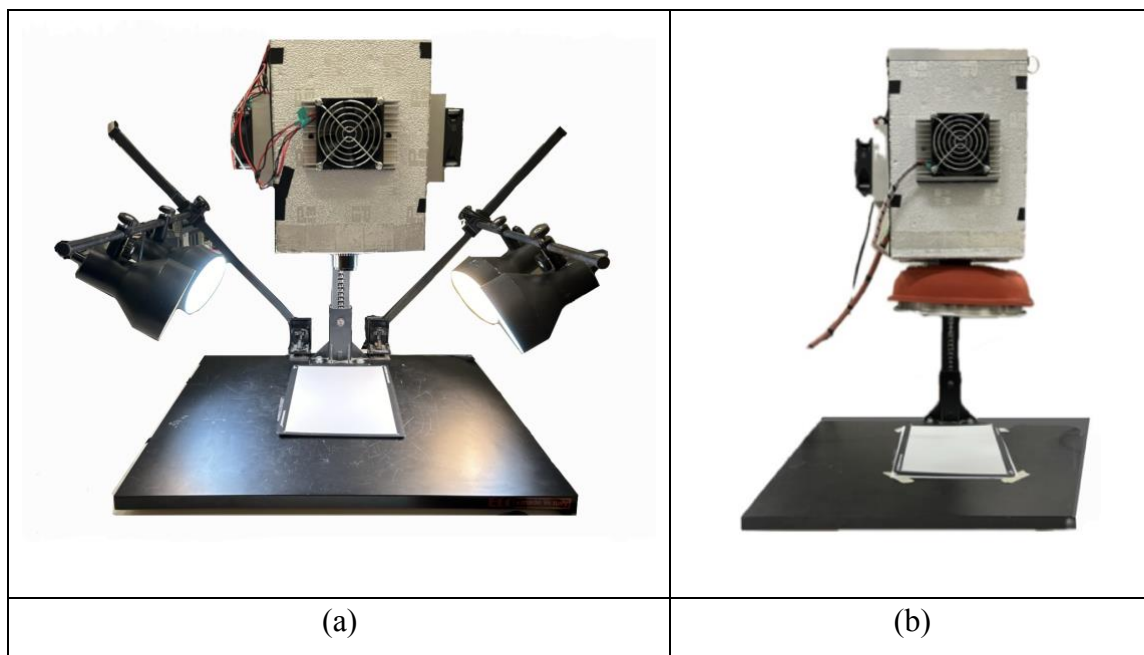


Figura 16 - Architettura delle due configurazioni dei sistemi di illuminazione: (a) Lampade collegate al sistema mediante due aste inclinate; (b) Ring di forma circolare

Il primo sistema (Figura 16a) è composto da quattro lampade collegate al sistema di acquisizione tramite due aste inclinate a  $45^\circ$  rispetto al piano di vista costituito da un foglio bianco. L'angolo di inclinazione è stato appositamente scelto al fine di ridurre al minimo le riflessioni speculari sulla superficie analizzata. Le quattro lampade, due con potenza di 60W e due di 100W, sono disposte in maniera alternata: nell'asta sinistra la lampada da 100W è avvitata nella parte posteriore e quella da 60W nella parte anteriore, viceversa nell'asta destra (lo schema è riportato nella Figura 17). Questa disposizione permette di ottenere un'illuminazione quanto più uniforme possibile, minimizzando le ombre.

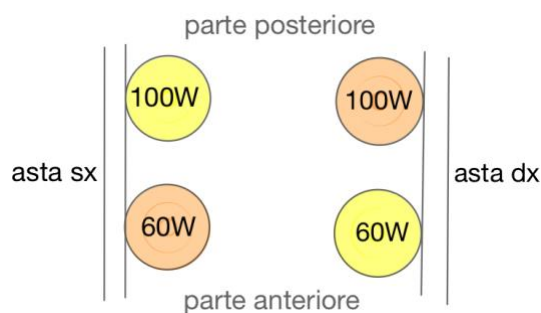
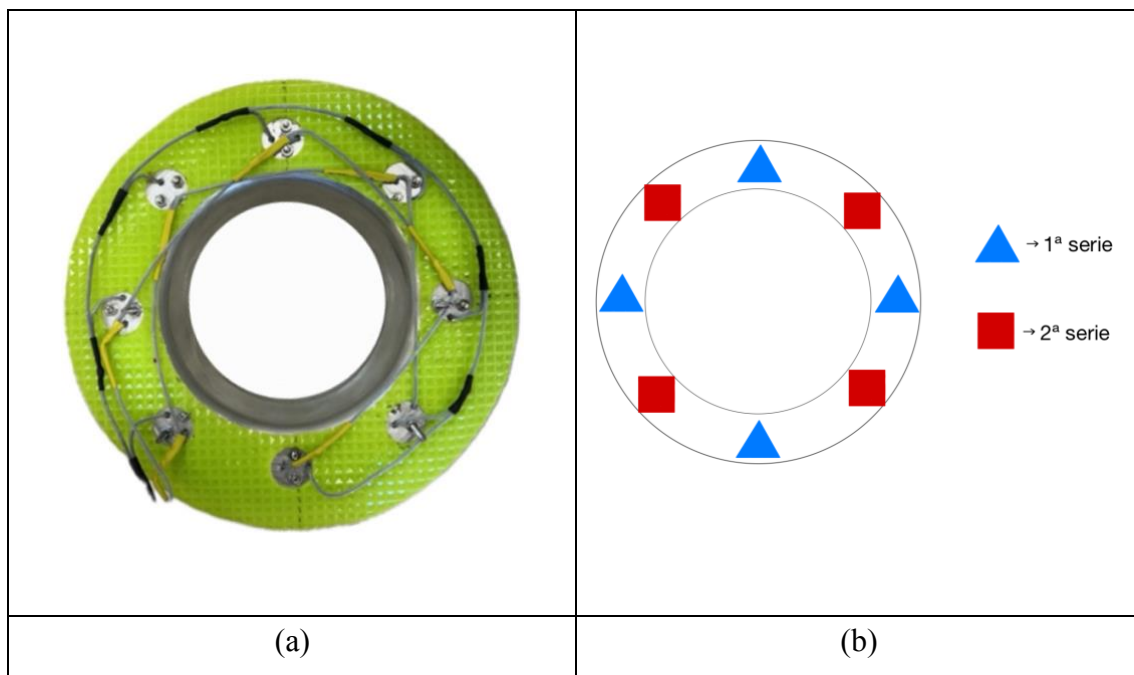


Figura 17 - Schema della disposizione delle lampade nel primo sistema visto dall'alto

Il secondo sistema (*Figura 16b*) utilizza un anello di forma circolare (ring) posizionato in modo tale da circondare l'obiettivo della telecamera. Sul ring sono uniformemente distribuite otto lampadine alogene, ognuna con una potenza di 20W.

La *Figura 18a* rappresenta nello specifico la costruzione del sistema di illuminazione composto dal ring circolare. Ognuna delle otto lampadine distribuite sull'anello presenta un polo positivo ed uno negativo. I poli positivi sono organizzati in due serie, ciascuna comprendente quattro lampadine disposte in modo alternato (lo schema è riportato in *Figura 18b*). Ogni serie di poli positivi è connessa dapprima a due interruttori, i quali permettono di accendere in maniera separata ed indipendente le due serie, e poi ad un alimentatore (12V, 7A). Il polo negativo (*Ground*) è invece comune a tutte le otto lampadine e direttamente collegato all'alimentatore.

L'intera struttura è montata su un materiale isolante (in verde nella *Figura 18a*) per garantire sicurezza elettrica.

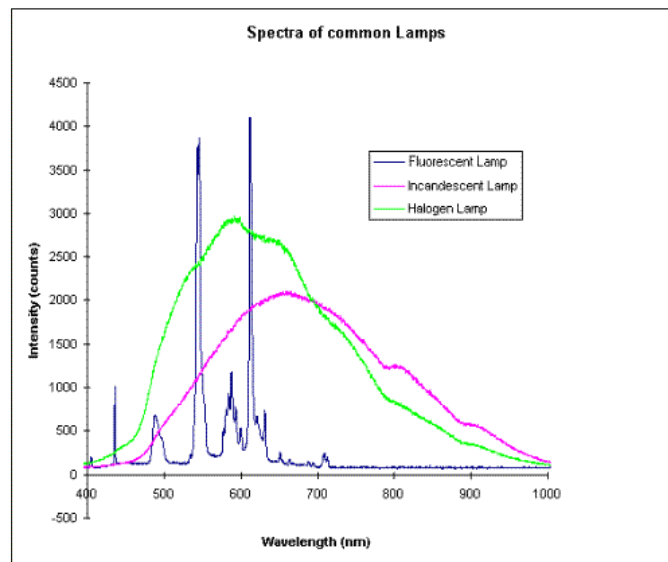


*Figura 18 - Struttura del ring vista dall'alto: (a) Immagine del ring; (b) Schema della disposizione delle due serie di poli positivi*

### 3.1.3.1. Lampade Alogene

L'illuminazione è una componente importante nell'imaging iperspettrale per ottenere immagini di alta qualità. Tra le diverse sorgenti luminose disponibili, le lampade alogene sono particolarmente adatte per l'imaging iperspettrale nel vicino infrarosso, poiché emettono luce su un ampio spettro che copre sia il visibile che l'infrarosso a onde corte, senza generare picchi spettrali netti. Questa caratteristica consente di garantire una maggiore uniformità, fondamentale per un'acquisizione accurata e corretta dei dati iperspettrali [18] [19].

La *Figura 19* mostra lo spettro d'intensità tipico di una lampada alogena, confrontato con quelli di altre due fonti luminose: la lampada fluorescente e quella a incandescenza. Si osserva che le lampade alogene offrono uno spettro di emissione continuo, a differenza delle lampade fluorescenti, che presentano picchi discreti a specifiche lunghezze d'onda. Inoltre, rispetto alle lampade a incandescenza, le alogene producono un'illuminazione più stabile ed intensa su un'ampia gamma di lunghezze d'onda [20].



*Figura 19 - Confronto degli spettri di intensità di tre diverse fonti luminose [20]*

Le lampade alogene funzionano grazie a un filamento di tungsteno che, riscaldato a temperature elevate, emette luce nel visibile. Per proteggere il filamento dall'ossidazione e da altre reazioni chimiche, è racchiuso in un bulbo di vetro riempito con una miscela gassosa, costituita da un gas inerte (come argon, kripton o xeno, che riduce la reattività chimica del tungsteno) e una traccia di composto alogeno (bromo o iodio). Poiché il filamento di tungsteno in una lampada alogena raggiunge temperature elevate, il bulbo è generalmente costituito da vetro di silice fuso [21].

Il ciclo rigenerativo dell'alogeno del tungsteno è un elemento chiave del funzionamento delle lampade alogene. Quando la lampada è accesa, la corrente inizia a fluire attraverso il filamento di tungsteno, riscaldandolo rapidamente. Quando la temperatura del filamento supera i 2500°C, gli atomi di tungsteno iniziano a vaporizzare. In lampade non alogene, questi atomi vaporizzati si depositano sulla superficie interna del bulbo, annerendolo e assottigliando il filamento, riducendo così la durata della lampada [21].

Nelle lampade alogene, invece, gli atomi di alogeno reagiscono con il tungsteno vaporizzato per formare alogenuri di tungsteno. Questi composti vengono catturati dalle correnti convettive all'interno del bulbo e diretti verso il filamento. Quando gli alogenuri di tungsteno entrano in contatto con il filamento incandescente, si dissociano e il tungsteno si rideposita sul filamento, ripristinando il ciclo. Questo processo permette di mantenere il filamento in buone condizioni più a lungo, aumentando l'efficienza e la durata della lampada, che risulta circa il doppio rispetto a una lampada a incandescenza tradizionale [21].

In sintesi, le lampade alogene rappresentano una scelta eccellente per l'illuminazione nell'imaging iperspettrale grazie alla loro emissione spettrale continua, alta intensità luminosa, stabilità della temperatura di colore e affidabilità nel tempo. Tuttavia, è importante notare che le lampade alogene richiedono circa un secondo per raggiungere la piena luminosità o raffreddarsi, il che può essere un limite in alcune applicazioni dove è necessaria una risposta immediata [21].



Figura 20 - Lampada alogena [22]

## 3.2. Acquisizione dei dati

Il lavoro pratico di acquisizione dei dati si è svolto, interamente, nel laboratorio di misure ottiche e visione del Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

Le immagini sono state acquisite a 299 lunghezze d'onda nell'intervallo da 400 a 1000 nm, range in cui lavora la telecamera iperspettrale HinaLea®.

La fase di acquisizione ha permesso di ricavare, per ciascuna configurazione, lo spettro di intensità. Questo consentirà, in seguito, di poter eseguire una valutazione sull'uniformità dell'illuminazione utilizzando le misure di intensità spaziale e spaziale-spettrale.

### 3.2.1. Panoramica delle sei modalità di acquisizione

Le modalità di acquisizione sono in totale sei, suddivise equamente tra le due configurazioni precedentemente descritte e illustrate in *Figura 16*.

In dettaglio, per la prima configurazione, costituita da quattro lampade collegate al sistema tramite due aste inclinate a  $45^\circ$  rispetto al campione, le tre modalità sono le seguenti:

1. accese solo le due lampade da 60W (in arancione in *Figura 17*);
2. accese solo le due lampade da 100W (in giallo in *Figura 17*);
3. accese tutte e quattro le lampade.

Per la seconda configurazione, che utilizza il ring composto dalle otto lampadine, le modalità di acquisizione sono:

4. accese solo quattro lampadine alternate (in blu in *Figura 18b*);
5. accese le altre quattro lampadine (in rosso in *Figura 18b*);
6. accese tutte e otto le lampadine.

In ognuna delle sei configurazioni, la telecamera iperspettrale è posizionata a un'altezza di 40 cm rispetto al piano d'appoggio. Di conseguenza, il campo di acquisizione copre un'area rettangolare di 6,5 cm x 9,7 cm.

### **3.2.2. Preparazione del sistema**

Prima di acquisire le immagini iperspettrali, è stato necessario eseguire alcune procedure per garantire il corretto funzionamento della telecamera.

Per prima cosa, la telecamera è stata collegata al computer mediante un cavo, in modo da poter monitorare le acquisizioni tramite il software HinaLEa. Al termine del processo di ciascuna delle sei modalità di acquisizione, il software genera tre files fondamentali per la lettura ed elaborazione dei dati rilevati.

La telecamera è stata poi posizionata all'altezza opportuna per le acquisizioni e ne è stata valutata la messa a fuoco. Per fare ciò, è stato posto un foglio contenente caratteri alfanumerici sotto l'obiettivo ed è stato ruotato l'anello di messa a fuoco fino a rendere il testo perfettamente visibile.

Successivamente, sono state spente tutte le luci del laboratorio, facendo in modo che l'unica fonte di illuminazione risultasse quella delle lampade alogene prese in esame. Le lampade sono state collegate a un gruppo di continuità, il quale, erogando corrente continua, assicura una sorgente di luce stabile e priva di fluttuazioni.

Infine, è stato necessario eseguire la calibrazione del colore bianco e del colore nero. Per calibrare il bianco, è stato posizionato un target bianco sotto l'obiettivo della telecamera ed è stato avviato il processo di calibrazione tramite il software dedicato del dispositivo. Per calibrare il nero, si è lasciato il tappo coprilente agganciato all'obiettivo e si è fatto partire il processo di calibrazione del colore nero. La procedura di calibrazione è stata eseguita per ognuna delle sei modalità di acquisizione.

### **3.2.3. Procedura di acquisizione**

Il primo passo per l'acquisizione dei dati consiste nel posizionare il campione da analizzare sul piano d'appoggio. Il campione è un foglio di carta bianco A4 (dimensioni 21,0 cm x 29,7 cm), collocato al centro dell'inquadratura. Il foglio è stato fissato sui quattro angoli con del nastro adesivo per evitare spostamenti accidentali dovuti a movimenti o correnti d'aria generate dalle ventole di raffreddamento del sistema.

Dopo aver eseguito l'auto esposizione della telecamera tramite il software HinaLEa, viene avviato il programma di acquisizione dell'immagine. Questo processo viene ripetuto per ognuna delle sei modalità di acquisizione.

Al termine del processo, il software genera automaticamente una cartella contenente i risultati necessari per la lettura e l'elaborazione dei dati rilevati. All'interno di ciascuna cartella sono presenti tre files:

- un file *.png* contenente l'immagine acquisita;
- un file *.hdr* contenente tutte le impostazioni e i parametri necessari per leggere correttamente i dati dell'ipercubo;
- un file *.dat* contenente il cubo di dati.

### 3.3. Elaborazione dei dati

Per la procedura di elaborazione dei dati è stato utilizzato il software di programmazione MatLab, nel quale è stato caricato il file con estensione *.hdr* (*High Dynamic Range*).

Come prima cosa, è stato necessario filtrare il cubo di dati con un filtro gaussiano. Il parametro del filtro è stato scelto in modo tale da ridurre significativamente il rumore nell'immagine, pur preservando le non uniformità del sistema di illuminazione. Successivamente, è stata selezionata una regione ristretta dell'immagine rispetto a quella totale, escludendo le componenti spaziali non appartenenti all'area di interesse:

*data\_cube\_1(608x968x299) → cubo\_nobg(499x949x299).*

*data\_cube\_1* rappresenta il cubo di dati acquisito dalla telecamera iperspettrale, mentre *cubo\_nobg* è il cubo filtrato e ritagliato, che rappresenta il punto di partenza per le successive analisi.

Il fulcro della fase di elaborazione è stato valutare l'uniformità spaziale e spaziale-spettrale di tutte le sei modalità di acquisizione, con l'obiettivo di determinare quale delle due configurazioni del sistema riesca a garantire una migliore illuminazione. Questo è un requisito fondamentale per ottenere un'elevata qualità dell'immagine, necessaria per ottimizzare le prestazioni degli algoritmi di analisi delle immagini.

Nei due sottoparagrafi seguenti sono descritti i metodi per valutare la non uniformità spaziale e spaziale-spettrale. Le elaborazioni sono state eseguite seguendo le trattazioni sviluppate nell'articolo [19].

#### 3.3.1. Metodo di caratterizzazione della non uniformità dell'intensità spaziale

La misura della non uniformità dell'intensità spaziale di ciascuna modalità di acquisizione si sviluppa in tre fasi.

Inizialmente, è stata calcolata l'immagine dell'intensità media tra tutte le lunghezze d'onda. Questo significa che, per ogni pixel con coordinate spaziali specifiche, viene calcolata la media dei valori di intensità su tutte le 299 lunghezze d'onda acquisite dalla telecamera, utilizzando la equazione (4):

$$HS(xi, yi) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K cubo\_nobg(xi, yj, \lambda k), \quad (4)$$

in cui  $cubo\_nobg(xi, yj, \lambda k)$  è l'immagine iperspettrale filtrata e ritagliata,  $xi$  e  $yj$  sono le coordinate spaziali dell'immagine,  $\lambda k$  è la coordinata spettrale e  $K$  rappresenta il numero delle lunghezze d'onda (299 nel caso trattato).

Nella seconda fase, viene calcolata la media dell'immagine di intensità media mediante l'equazione (5):

$$HS2 = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M HS(xi, yj), \quad (5)$$

in cui  $N$  e  $M$  sono il numero di pixel in ciascuna dimensione spaziale dell'immagine.

La non uniformità dell'intensità spaziale (SIN) è definita come la deviazione media del valore dei pixel dalla media dell'immagine dell'intensità media (HS2), e viene calcolata tramite l'equazione (6):

$$SIN = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (HS(xi, yj) - HS2)^2}. \quad (6)$$

### 3.3.2. Metodo di caratterizzazione della non uniformità dell'intensità spaziale-spettrale

Il calcolo della disuniformità dell'intensità spaziale-spettrale inizia con la normalizzazione degli spettri in ciascun pixel dell'immagine iperspettrale:

$$HS\_norm(xi, yi, \lambda k) = \frac{cubo\_nobg(xi, yi, \lambda k) - HS(xi, yi)}{std[cubo\_nobg(xi, yi, \lambda k)]}, \quad (7)$$

dove  $std[cubo\_nobg(xi, yi, \lambda k)]$  rappresenta la deviazione standard dell'immagine iperspettrale. La normalizzazione,  $HS\_norm(xi, yi, \lambda k)$ , è utile per poter eseguire un confronto diretto delle forme dei diversi spettri indipendentemente dal valore della loro intensità assoluta.

L'immagine iperspettrale media normalizzata viene quindi utilizzata per calcolare lo spettro medio  $s(\lambda k)$ :

$$s(\lambda k) = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M HS\_norm(xi, yj, \lambda k). \quad (8)$$

Successivamente, viene calcolata la differenza tra gli spettri di tutti i pixel dell'immagine iperspettrale media normalizzata e lo spettro medio mediante l'equazione (9):

$$d(xi, yj) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (HS\_norm(xi, yj, \lambda k) - s(\lambda k))^2}. \quad (9)$$

Infine, la non uniformità dell'intensità spaziale-spettrale (SSN) viene calcolata facendo la media, su entrambe le dimensioni dell'immagine ottenuta, delle distanze rispetto allo spettro medio, seguendo l'equazione (10):

$$SSN = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M d(xi, yj). \quad (10)$$

# CAPITOLO 4

## Valutazione e Risultati

### 4.1. Valutazione della non uniformità dell'intensità spaziale

La valutazione della non uniformità spaziale dei sistemi di illuminazione viene eseguita seguendo gli sviluppi riportati nel *Paragrafo 3.3.1*.

La *Tabella 3* presenta i risultati ottenuti dall'equazione (5), che indicano la media dell'immagine di intensità normalizzata media per ciascuna delle sei modalità di acquisizione.

<i>Configurazione</i>	<i>HS2 [normalized]</i>
<i>2 alogene 60W</i>	7,1339
<i>2 alogene 100W</i>	6,9823
<i>4 alogene</i>	7,1486
<i>Ring 4 alogene</i>	7,3208
<i>Ring 4 alogene (2)</i>	7,2895
<i>Ring 8 alogene</i>	7,2009

*Tabella 3 - Media dell'immagine di intensità normalizzata media*

La *Figura 21* mostra, per ogni modalità di acquisizione, la differenza per ogni pixel tra  $HS(x_i, y_i)$  (l'immagine dell'intensità media su tutte le 299 lunghezze d'onda, calcolata tramite l'equazione (4)), e HS2 (la media dell'immagine di intensità media, calcolata tramite l'equazione (5) e riportata nella *Tabella 3*). Dalla *Figura* si osserva che il valore della differenza risulta massimo al centro dell'inquadratura e tende a diminuire radialmente verso i bordi. La *ColorBar* a lato di ciascuna delle sei immagini mostra che entrambe le configurazioni forniscono un'illuminazione spaziale abbastanza uniforme del piano di imaging, con disuniformità ridotte rispetto alle intensità medie dell'immagine

(Tabella 3). In particolare, si nota che la seconda configurazione, ovvero quella che utilizza il ring composto dalle otto lampadine, risulta più uniforme dal punto di vista spaziale, soprattutto nella modalità con tutte e otto le lampadine accese.

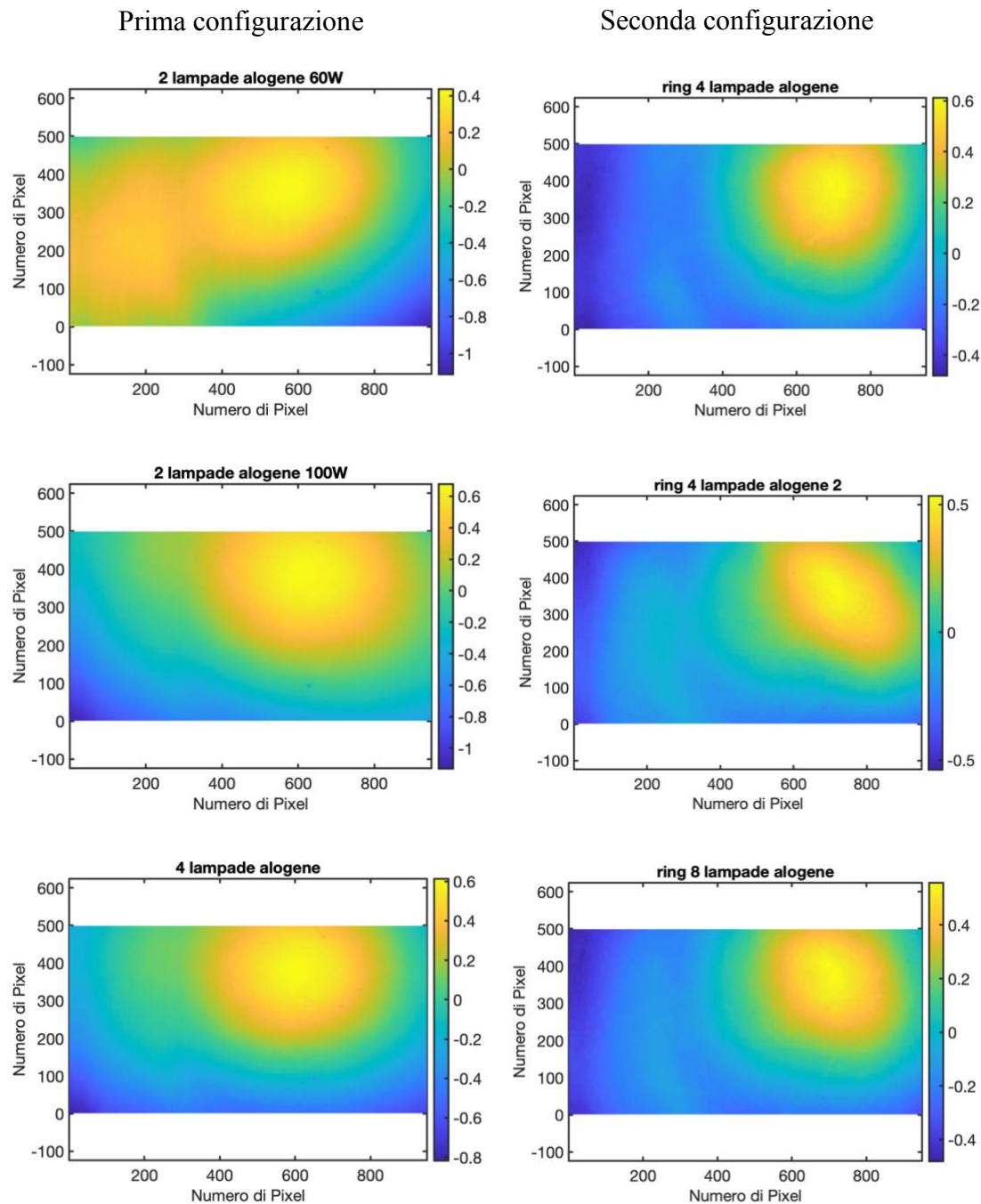


Figura 21 - Immagine della differenza per ogni pixel tra  $HS(x_i, y_j)$  e  $HS2$

I risultati osservati nella *Figura 21* sono confermati dai valori di non uniformità dell'intensità spaziale (SIN) riportati in *Tabella 4*. I valori delle prime tre modalità di acquisizione (prima configurazione) risultano infatti circa un decimo superiori rispetto a quelli delle ultime tre modalità (seconda configurazione).

<i>Configurazione</i>	<i>SIN</i>
<i>2 alogene 60W</i>	0,2910
<i>2 alogene 100W</i>	0,3750
<i>4 alogene</i>	0,3124
<i>Ring 4 alogene</i>	0,2809
<i>Ring 4 alogene (2)</i>	0,2369
<i>Ring 8 alogene</i>	0,2501

*Tabella 4 - Disuniformità dell'intensità spaziale (SIN)*

## **4.2. Valutazione della non uniformità dell'intensità spaziale-spettrale**

La valutazione della non uniformità spaziale-spettrale dei sistemi di illuminazione viene eseguita seguendo le metodologie descritte nel *Paragrafo 3.3.2*.

Di seguito sono riportate le immagini relative allo spettro d'intensità medio per ciascuna delle sei modalità di acquisizione, ricavate tramite l'equazione (8).

### Prima configurazione

### Seconda configurazione

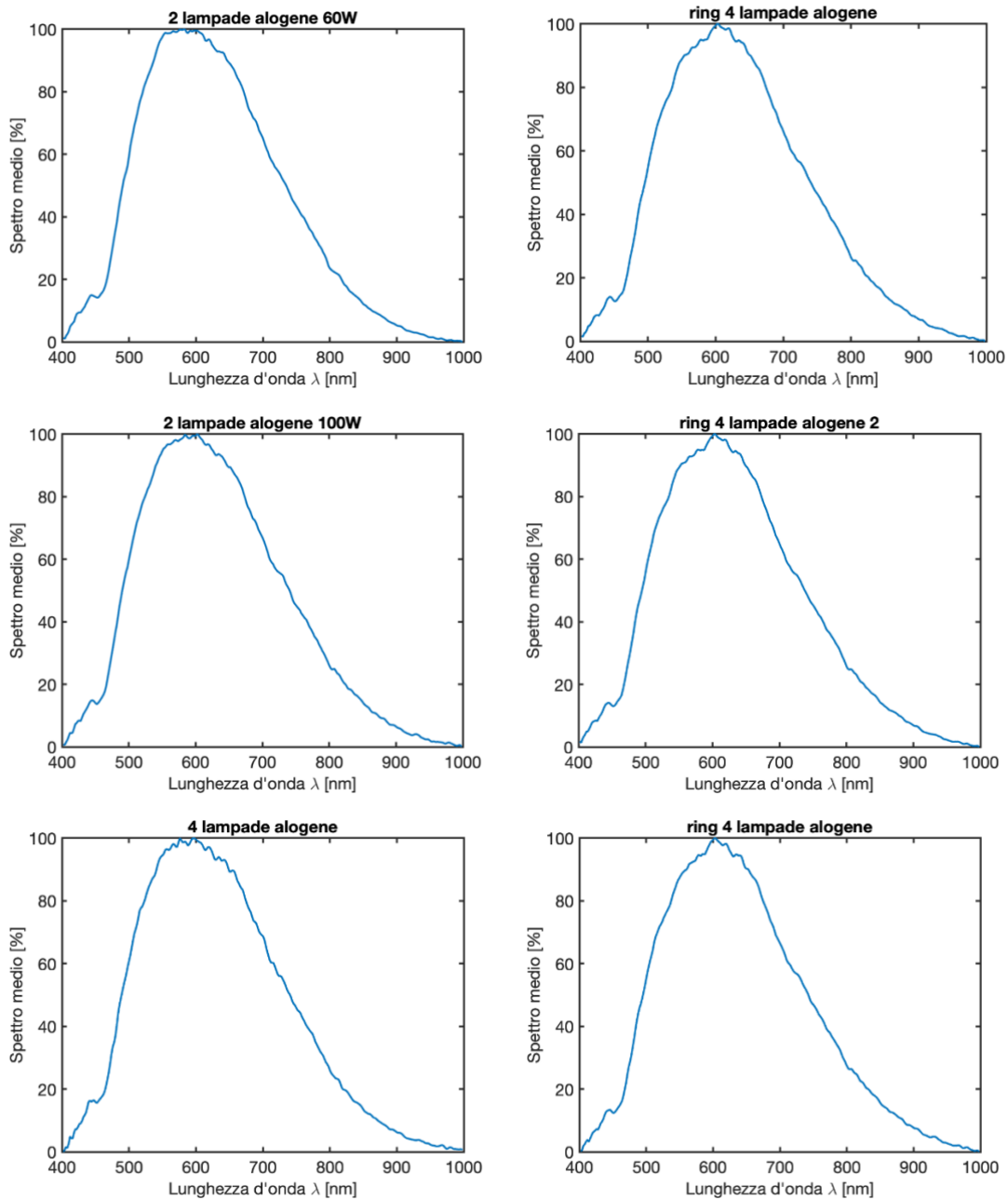


Figura 22 - Spettro medio d'intensità

Sull'asse delle ascisse è indicato il range di lunghezze d'onda a cui lavora la telecamera iperspettrale (400 nm - 1000 nm), mentre sull'asse delle ordinate è riportato lo spettro medio espresso in percentuale. Tutti e sei gli spettri seguono un andamento molto simile, con un picco di intensità compreso tra circa 500 nm e 700 nm. Dopo il picco, l'intensità diminuisce progressivamente fino a raggiungere valori molto bassi oltre i 900 nm.

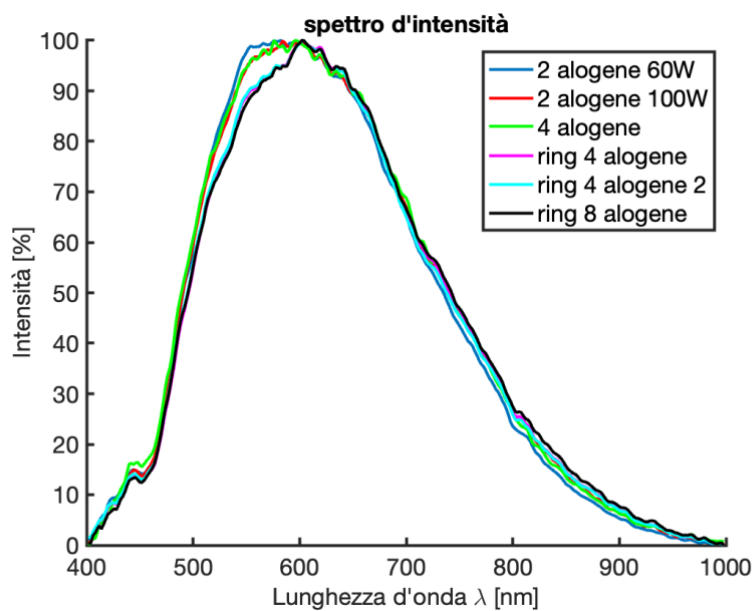


Figura 23 - Spettro medio d'intensità sovrapposto per tutte e sei le modalità di acquisizione

Dalla *Figura 23*, che fornisce una sovrapposizione delle sei curve, si evidenzia con maggiore chiarezza che non ci sono particolari differenze tra le due configurazioni.

La *Figura 24* mostra, per ciascuna delle sei modalità di acquisizione, la differenza  $d(x_i, y_j)$  tra gli spettri di tutti i pixel dell'immagine iperspettrale media normalizzata e lo spettro medio, calcolata precedentemente tramite l'equazione (9).

### Prima configurazione

### Seconda configurazione

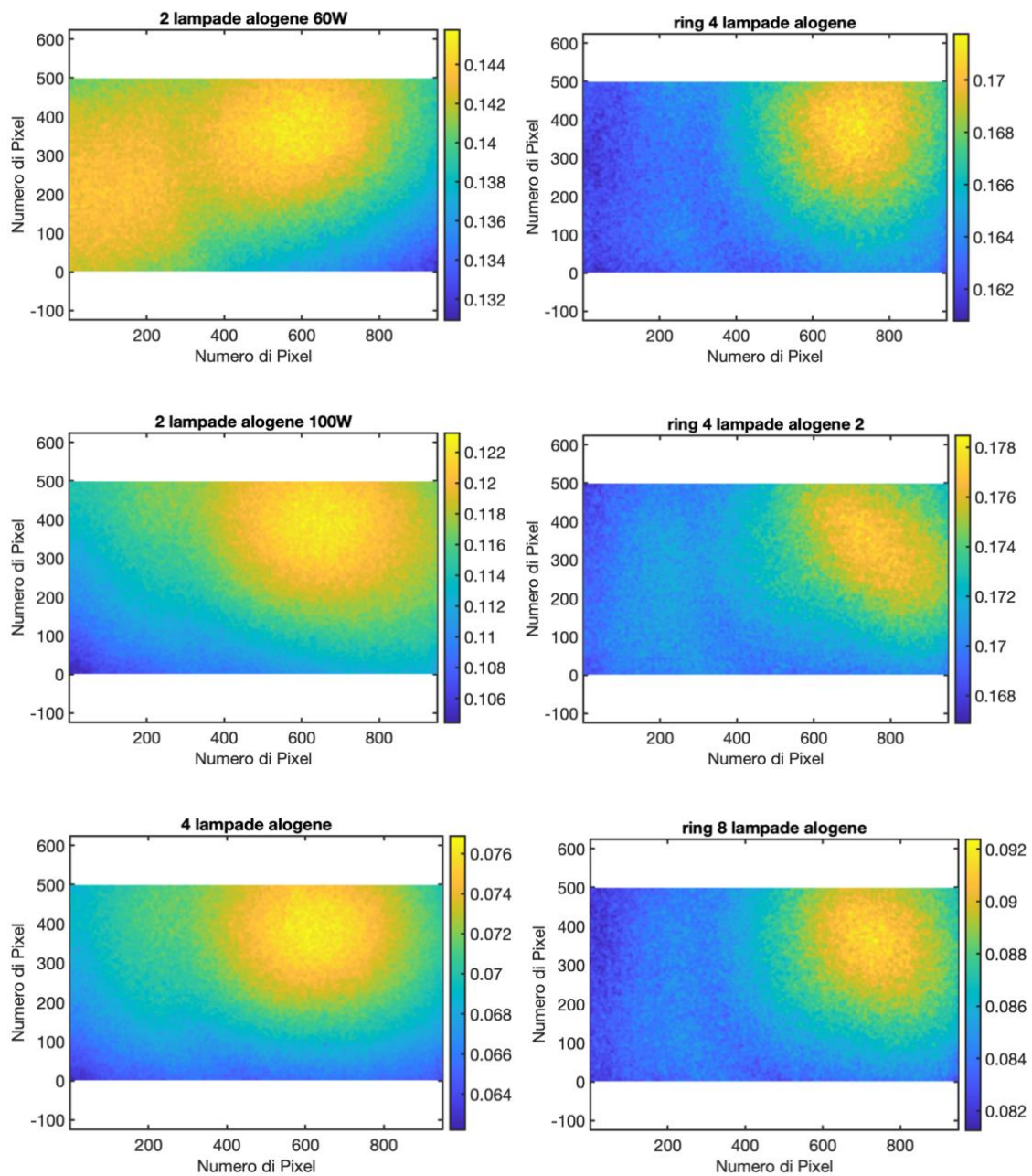


Figura 24 - Differenza  $d(x_i, y_j)$

La ColorBar a lato di ciascuna delle sei immagini indica, anche se in maniera sottile, che la seconda configurazione, ovvero quella che utilizza il ring, risulta più uniforme dal punto di vista spaziale-spettrale rispetto alla prima.

I risultati relativi ai valori di non uniformità spaziale-spettrale (SSN) sono riportati in *Tabella 5*.

<i>Configurazione</i>	<i>SSN</i>
<i>2 alogene 60W</i>	0,1414
<i>2 alogene 100W</i>	0,1158
<i>4 alogene</i>	0,0705
<i>Ring 4 alogene</i>	0,1655
<i>Ring 4 alogene (2)</i>	0,1722
<i>Ring 8 alogene</i>	0,0860

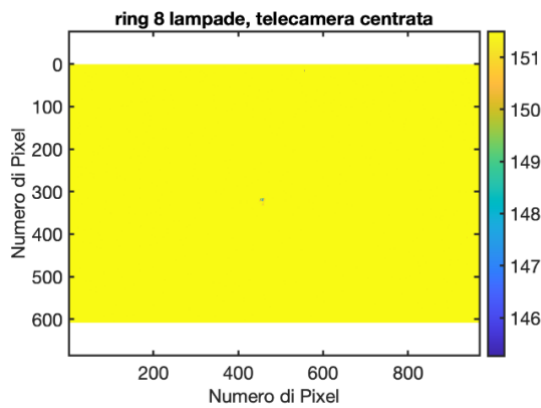
*Tabella 5 - Disuniformità dell'intensità spaziale-spettrale (SSN)*

### **4.3. Prove con telecamera inclinata**

Anche con la modalità di acquisizione migliore, che impiega il ring composto da tutte e otto le lampadine accese, l'illuminazione risulta non completamente uniforme in termini di intensità, sia spaziale che spaziale-spettrale. Questo può essere dovuto, oltre ad una non uniformità del sensore, anche al fatto che l'illuminazione è leggermente decentrata rispetto al centro dell'inquadratura.

Per verificare questa ipotesi, è stata modificata l'angolazione della telecamera rispetto al campione da analizzare. Dopo le calibrazioni del bianco e del nero, è stato segnato il centro esatto dell'inquadratura su un foglio bianco utilizzando una penna nera, per poi acquisire le immagini di riflettanza sia prima che dopo lo spostamento della telecamera, utilizzando sempre la configurazione del ring con tutte e otto le lampadine accese. Di seguito sono riportate le immagini della riflettanza ottenute considerando la media tra le lunghezze d'onda da 700 nm a 900 nm.

Configurazione telecamera centrata



Configurazione telecamera inclinata

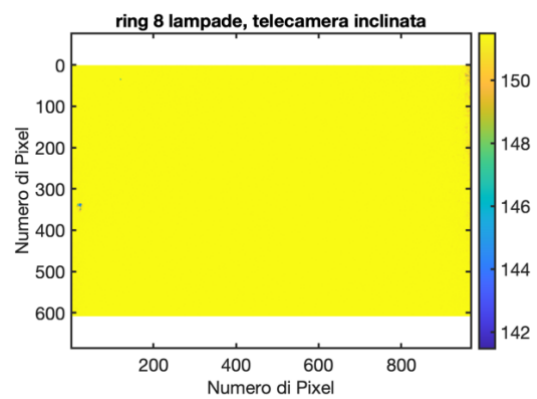


Figura 25 - Immagine di riflettanza con telecamera centrata (sinistra) e telecamera inclinata (destra)

In entrambe le immagini riportate nella *Figura 25*, è visibile una piccola macchia scura che corrisponde al segno con la penna su ciascun foglio. Nell'immagine a sinistra, il segno si trova al centro poiché la telecamera è allineata verticalmente con il campione. Nell'immagine a destra, invece, relativa alla configurazione con la telecamera inclinata rispetto all'asse verticale, il segno appare spostato verso il lato sinistro dell'inquadratura.

Come mostrato in *Figura 26*, selezionando con il cursore diversi punti delle due immagini, la riflettanza risulta uniforme su tutta la superficie, ad eccezione del punto corrispondente al segno nero della penna, che presenta un valore di riflettanza inferiore rispetto al resto (*Figura 26c*, *Figura 26f*).

Questo spiega in parte il motivo per cui non è stata ottenuta un'illuminazione completamente uniforme in termini di intensità.

### Configurazione telecamera centrata

### Configurazione telecamera inclinata

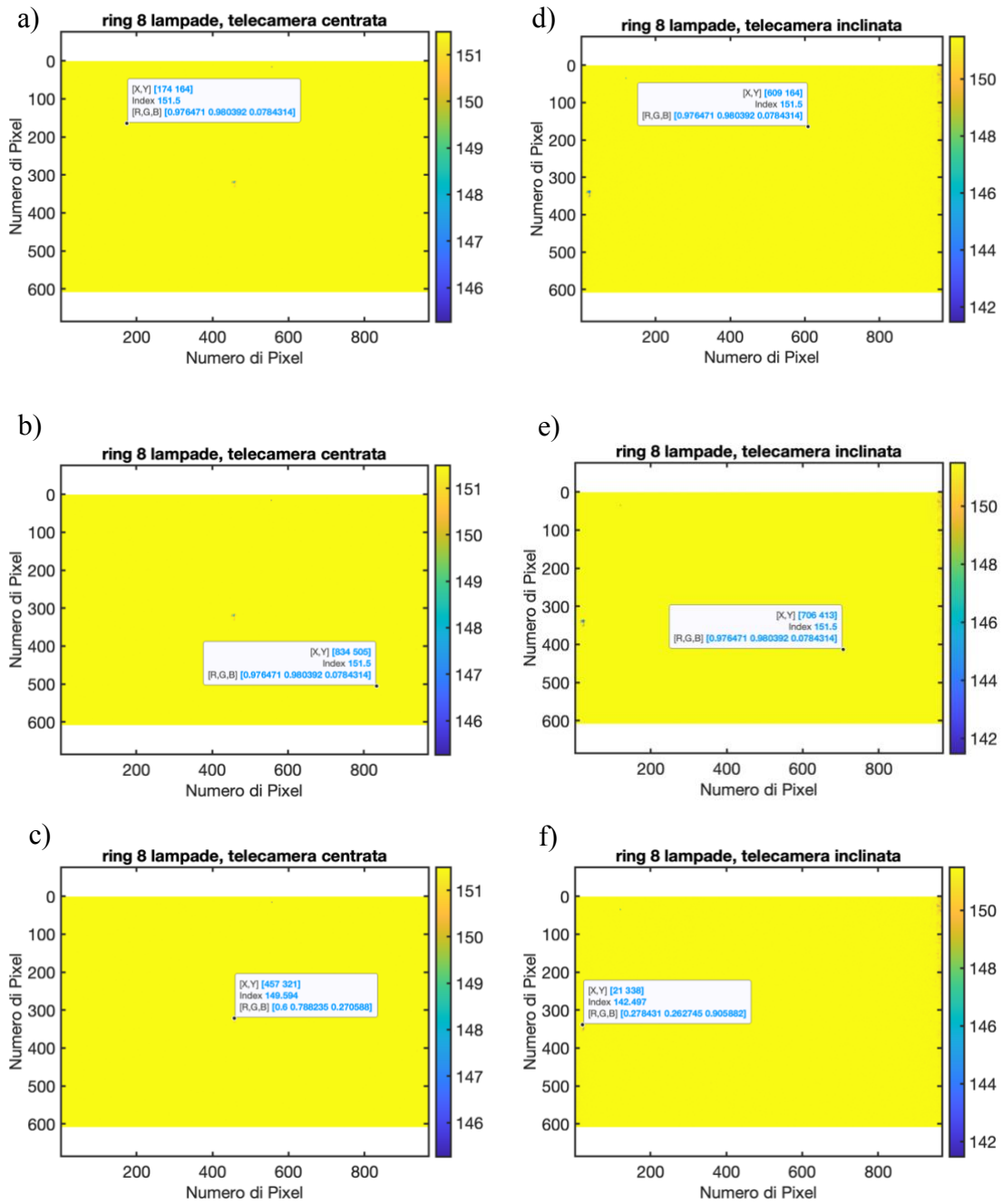


Figura 26 - Verifica dell'uniformità del valore di riflettanza con telecamera centrata (sinistra) e telecamera inclinata (destra)

## CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato progettare e sperimentare un sistema di imaging iperspettrale, che opera tra 400 nm e 1000 nm, in grado di garantire un'illuminazione il più uniforme possibile in termini di intensità spaziale e spaziale-spettrale. Sono stati analizzati due differenti sistemi di illuminazione, entrambi basati sull'utilizzo di lampade alogene. I risultati indicano che la modalità che impiega il ring composto da otto lampadine accese offre una maggiore uniformità rispetto alle altre. Questo esito, in parte previsto, è giustificato dalla maggiore complessità del sistema a ring, che risulta ragionevolmente più efficiente rispetto al sistema composto da quattro lampade montate su aste inclinate.

Tuttavia, nemmeno la configurazione che utilizza il ring offre un'illuminazione completamente uniforme. Per comprenderne meglio le cause, sono state eseguite ulteriori prove con la telecamera inclinata rispetto al campione da analizzare. Queste prove hanno confermato che, oltre alla non uniformità del sensore, la disuniformità è anche dovuta a un lieve decentramento dell'illuminazione rispetto al centro dell'inquadratura.

In conclusione, sebbene il sistema costituito dal ring con otto lampadine rappresenti un miglioramento, c'è ancora margine per ulteriori perfezionamenti. Gli sviluppi futuri potrebbero includere l'ottimizzazione dell'angolazione e della disposizione delle lampade per minimizzare ulteriormente le disuniformità. Inoltre, l'integrazione di algoritmi di correzione delle immagini post-acquisizione potrebbe contribuire a migliorare ulteriormente la qualità e l'uniformità delle immagini. Questi perfezionamenti non solo migliorerebbero la qualità delle immagini acquisite, ma potrebbero anche ampliare l'applicabilità dei sistemi di imaging in vari campi, come la ricerca scientifica o la diagnostica medica.

## Appendice – Codice MatLab

Di seguito viene riportato il programma MatLab utilizzato per caricare l'immagine iperspettrale, applicare il filtro, ritagliarla e valutare la non uniformità dell'intensità spaziale e spaziale-spettrale. Lo stesso procedimento è stato eseguito per ciascuna delle sei modalità di acquisizione.

```
clear all
close all
clc
%% caricamento dati
cd('File di acquisizione')

%% lettura immagine
info_data1=read_envihdr('nomefile.hdr');
data_cube_1=multibandread('nomefile.dat', info_data1.size, info_data1.format,
0, info_data1.interleave, info_data1.machine);
ww=info_data1.wavelength;
wave=cell2mat(ww);

%% applicazione filtro gaussiano
h = fspecial('gaussian', size(data_cube_1(:, :, 100)), 3);
for jj = 1:length(wave)
    img = data_cube_1(:, :, jj);
    filtered_img = imfilter(img, h);
    cubo_nobg(:, :, jj) = filtered_img;
end

cubo_nobg=cubo_nobg(10:508,10:958,:);

%% immagine dell'intensità media su tutte le lunghezze d'onda
HS=mean(cubo_nobg,3);
```

```

%% media dell'immagine dell'intensità media
HS2=mean(mean(HS,1),2);
figure, pcolor(HS(:,:)-HS2), shading interp, xlabel('Numero di Pixel'),
ylabel('Numero di Pixel'), title('Nome configurazione')
axis equal, colorbar

%% non uniformità dell'intensità spaziale
SIN=std2(HS-HS2);

%% normalizzazione degli spettri in ciascun pixel dell'immagine iperspettrale
HS_norm=(cubo_nobg-HS)./std(cubo_nobg(:));

%% spettro medio
s=squeeze(mean(mean(HS_norm)));
s=(s-min(s))./(max(s)-min(s));
s=s*100;
figure, plot(wave, s), xlabel('Lunghezza d'onda \lambda [nm]'), ylabel('Spettro
medio [%]'), title('Nome configurazione')

%% distanze tra gli spettri di tutti i pixel nell'immagine iperspettrale normalizzata
e lo spettro medio
d=zeros(size(HS_norm,1),size(HS_norm,2));
for i=1:size(HS_norm,1)
    for j=1:size(HS_norm,2)
        diff_sum=0;
        for k=1:size(s)
            diff=HS_norm(i,j,k)-s(k);
            diff_sum=diff_sum+diff^2;
        end
        d(i,j)=sqrt(diff_sum/length(s));
    end
end
end

```

```
figure, pcolor(d), shading interp, xlabel('Numero di Pixel'), ylabel('Numero di  
Pixel'), title('Nome configurazione')  
axis equal, colorbar
```

```
%% non uniformità spaziale  
SSN=mean(mean(d,1),2);
```

Il programma MatLab riportato in seguito viene utilizzato per plottare le immagini necessarie alla verifica eseguita con la telecamera inclinata.

```
clear all
close all
clc
%% caricamento dati
cd('File di acquisizione')

%% lettura immagine
info_data1=read_envihdr('nomefile.hdr');
data_cube_1=multibandread('nomefile.dat', info_data1.size, info_data1.format,
0, info_data1.interleave, info_data1.machine);
ww=info_data1.wavelength;
wave=cell2mat(ww);

%% verifica con spettro di riflettanza
figure, imagesc(sum(data_cube_1(:, :, 150:250), 3)), xlabel('Numero di Pixel'),
ylabel('Numero di Pixel'), title('Nome configurazione')
axis equal, colorbar
```

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Nicholas C. Thomas, Journal of Chemical Education, The Early History of Spectroscopy, ACS Publications 631-634 (1991)
- [2] Vittorio Degiorgio, Storia della luce: dal sole al laser, Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 151, 3-18 (2017)
- [3] U. Amaldi, L'Amaldi 2.0. Zanichelli (2010)
- [4] Ronald Blum, Duane E. Roller, Fisica, Volume Secondo: Elettrocità, Magnetismo, Ottica. Zanichelli (1985)
- [5] F. Ulaby, U. Ravaioli, Fondamenti di campi elettromagnetici, Ottava edizione. Pearson (2021)
- [6] Chimica1956, Onda elettromagnetica, [www.chimica1956.it/generale/luc\\_06.htm](http://www.chimica1956.it/generale/luc_06.htm)
- [7] chimica-online.it, Spettro elettromagnetico, <https://www.chimica-online.it/download/spettro-elettromagnetico.htm>
- [8] C. Mencuccini, V. Silvestrini, Fisica, Elettromagnetismo e Ottica. Casa Editrice Ambrosiana (2017)
- [9] Wauniversity, Riflessione e rifrazione, <https://wauniversity.it/riflessione-rifrazione/>
- [10] conilfilodiarianna, Riflessione diffusa e speculare, [http://www.conilfilodiarianna.it/home/?page\\_id=667](http://www.conilfilodiarianna.it/home/?page_id=667)
- [11] Lodhi V, Chakravarty D, Mitra P. Hyperspectral Imaging System: Development Aspects and Recent Trends. Sensing and Imaging (2019) 20:35. doi:10.1007/s11220-019-0257-8

- [12] Shaikh M.S, Jaferzadeh K, Thörnberg B, Casselgren J. Calibration of a Hyper-Spectral Imaging System Using a Low-Cost Reference. *Sensors* 2021, 21, 3738. doi:10.3390/s21113738
- [13] R. Calvini, Chemometric Tools for Food Characterization Through RGB and Hyperspectral Imaging
- [14] ResearchGate, [https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-a-rgb-image-b-multispectral-imaging-and-c-hyperspectral-imaging\\_fig2\\_357659917](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-a-rgb-image-b-multispectral-imaging-and-c-hyperspectral-imaging_fig2_357659917)
- [15] Applicazioni dell'imaging iperspettrale, [www.clydehsi.com/it/hyperspectral-imaging-applications](http://www.clydehsi.com/it/hyperspectral-imaging-applications)
- [16] Raita-Hakola A.M, Annala L, Lindholm V, et al. FPI Based Hyperspectral Imager for the Complex Surfaces-Calibration, Illumination and Applications. *Sensors* 2022, 22, 3420. doi:10.3390/s22093420
- [17] HinaLea® Model 4250, [www.hinaleaimaging.com](http://www.hinaleaimaging.com)
- [18] Lawrence K, Park B, Heitschmidt G, Windham W, LED Lighting for Use in Multispectral and Hyperspectral Imaging. Paper number 053073, 2005 ASAE Annual Meeting. doi: 10.13031/2013.19891
- [19] Katrasnik J, Pernus F, Likar B, A method for characterizing illumination systems for hyperspectral imaging (2013)
- [20] Union College, Producing Light, [https://minerva.union.edu/newmanj/Physics100/Light%20Production/producing\\_light.htm](https://minerva.union.edu/newmanj/Physics100/Light%20Production/producing_light.htm)
- [21] ScienceStruck, <https://sciencestruck.com/halogen-cycle-explained>
- [22] [Lumenstore Lighting Solutions, https://www.lumenstore.it/vendita/lampadina-alogeno-halopin-pro-g9-20w-luce-calda](https://www.lumenstore.it/vendita/lampadina-alogeno-halopin-pro-g9-20w-luce-calda)

## RINGRAZIAMENTI

Arrivata alla conclusione di questo percorso, desidero ringraziare di cuore tutti coloro che mi hanno accompagnata durante questi tre anni, rendendo possibile ciò che oggi rappresenta per me un importante traguardo. A ognuno di voi va la mia più sincera e profonda gratitudine.

*Alla mia relatrice Prof.ssa Milena Martarelli,*

che con grande dedizione ha seguito la stesura di questa tesi. Grazie per aver condiviso con me le sue conoscenze e la sua esperienza con estrema professionalità.

La sua guida attenta e i suoi preziosi consigli sono stati fondamentali per la realizzazione di questo lavoro e per la mia crescita personale.

*Alla mia correlatrice Dott.ssa Silvia Discepolo e al Dott. Alessandro Bini,*

grazie per avermi aiutato e seguito con costante gentilezza e massima disponibilità.

La vostra passione ed il vostro impegno sono stati per me una continua fonte di ispirazione e di motivazione a migliorarmi.

*Ai miei genitori e a mio fratello Manuel,*

all'amore incondizionato che mi dimostrate ogni giorno.

Grazie per essere i miei primi sostenitori, per avermi insegnato che non esiste sfida che non si possa superare.

Il desiderio di rendervi orgogliosi di me è stato ciò che mi ha dato la forza per arrivare fino a qui, spero di riuscire a mantenere sempre accesa quella luce nei vostri occhi fieri.

Questo traguardo è tanto mio quanto vostro.

*Ai miei nonni,*

grazie per avermi sempre protetta e accompagnata in questi anni con tanto amore e dolcezza.

Grazie per farmi sentire ogni giorno così tanto fortunata ad avervi.

*A Cristian, Jacopo, Sofia e Giada,*

i miei cuginetti. A voi auguro di realizzare ogni vostro sogno più bello, di coltivare con entusiasmo la vostra curiosità e di inseguire le vostre passioni. Io sarò sempre in prima fila a fare il tifo per voi.

*A Benedetta, Francesca e Sara,*

le mie amiche del cuore. A voi che credete in me più di quanto possa farlo io, a voi che avete sognato questo mio traguardo così intensamente.

Alla vostra presenza costante, alla vostra capacità di sognare con me e di rendere ogni traguardo ancora più bello.

Per questo e molto altro non mi basterebbe una vita per ringraziarvi abbastanza, siete il mio tesoro più prezioso.

*A Roberta, Ilaria, Lucia e Aurora,*

compagne inseparabili di questi anni. Grazie per aver reso ogni momento di questo percorso indimenticabile. Grazie per le tante risate durante le lezioni, per le pause rigorosamente mangiando taralli e per le innumerevoli chiacchiere che hanno reso più leggere anche le giornate di studio più intense.

Senza di voi questo percorso non sarebbe stato lo stesso.