



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Progettazione di un supporto per attrezzature
ottiche e realizzazione in stampa additiva**

**Design of a support for optical equipment and
implementation in additive printing**

Candidato:
Salvi Federico

Relatore:
Prof. Sasso Marco

Correlatore:
Prof. Lattanzi Attilio

Anno Accademico 2020-2021



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Progettazione di un supporto per attrezzature
ottiche e realizzazione in stampa additiva**

**Design of a support for optical equipment and
implementation in additive printing**

Candidato:
Salvi Federico

Relatore:
Prof. Sasso Marco

Correlatore:
Prof. Lattanzi Attilio

Anno Accademico 2020-2021

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

A mia nonna Pia

Ringraziamenti

Il ringraziamento più sentito va ai miei genitori che in questi anni, con il loro affetto e il loro sostegno, mi hanno incoraggiato ad inseguire questo mio sogno. Senza di loro tutto questo non sarebbe stato possibile!

Grazie alle persone conosciute ad Ancona che non mi hanno mai fatto sentire solo.

Un ringraziamento speciale va al mio gruppo di studio, grazie a loro le giornate passate sui libri sono state più leggere, sostenendoci a vicenda durante tutto il percorso.

Ai Professori, che con i loro insegnamenti mi hanno aiutato a crescere e migliorare.

Grazie!

Ancona, Novembre 2021

Salvi Federico

Abstract

In questa tesi vengono spiegati i vari passi della progettazione di un supporto per attrezzature ottiche e la sua successiva realizzazione tramite stampa additiva.

Nel primo capitolo è presente una breve introduzione su tutto il lavoro svolto durante il tirocinio.

Nel secondo capitolo vengono illustrate le basi teoriche del metodo della correlazione digitale delle immagini (DIC).

Nel terzo capitolo vengono illustrati i vari componenti che costituiscono il progetto, i vari meccanismi utilizzati per la movimentazione e il bloccaggio.

Nel quarto capitolo tratta della stampa dei componenti, dal modello CAD alla realizzazione in resina affrontando le problematiche relative a questo processo.

Indice

1	Introduzione	1
2	Metodi ottici per la misura della deformazione mediante correlazione digitale d'immagine	3
2.1	Introduzione alla correlazione digitale di immagini	3
2.2	Digital Image Correlation (DIC)	4
2.3	Principi di base della DIC	6
2.4	Stereo-DIC Quantificazione dell'incertezza basata su immagini simulate	11
2.4.1	FE based Image Generator	11
2.4.2	Incertezza Teorica	13
2.5	Calibrazione DIC system	14
2.6	Influenza della luce, della messa fuoco e del rumore	15
2.6.1	Aggiunta di effetti luce	15
2.6.2	Aggiunta profondità di campo	18
2.6.3	Aggiunta rumore	19
3	Progetto supporto per attrezzature ottiche	21
3.1	Obiettivo Progetto	22
3.2	Videocamera	22
3.3	Realizzazione progetto	25
3.4	Componenti	25
3.4.1	Base	26
3.4.2	Supporto	28
3.4.3	Sostegno Videocamera	30
3.4.4	Albero	32
3.4.5	Chiavetta	33

Indice

3.4.6 Spina	34
3.4.7 Cuscinetti	35
3.4.8 Ingranaggio Vite Senza Fine	39
3.4.9 Viti	41
3.5 Meccanismo	44
4 Stampa Additiva	45
4.1 Stampante 3D	45
4.2 Software di Slicing	48
4.2.1 Chitubox	48
4.3 Realizzazione in Stampa Additiva	51
5 Conclusioni	57

Elenco delle figure

2.1	Correlazione delle immagini.	5
2.2	Esempio matrice dei punti.	7
2.3	Esempio punto nero deformato.	7
2.4	Modello dei grani in scala di grigio.	8
2.5	Schema di misurazione 2D.	10
2.6	Schema misurazione 3D.	10
2.7	Configurazione videocamera	12
2.8	Trasformazione tra sistemi di coordinate	12
2.9	Incertezza teoricamente prevista rispetto all'incertezza misurata mediante immagini simulate	14
2.10	Calibrazione sistemi DIC 2D e 3D	15
2.11	Illuminazione Phong	16
2.12	Esempi di immagini con differenti componenti di illuminazione aggiunte	17
2.13	DOP	19
3.1	Progetto	21
3.2	Blackfly S USB3	24
3.3	Tavola Videocamera	24
3.4	Esploso assieme	25
3.5	Base	26
3.6	Visualizzazione lavorazioni interne della base	27
3.7	Tavola Base	27
3.8	Supporto	28
3.9	Visualizzazione supporto	29
3.10	Tavola Supporto	29
3.11	Sostegno Videocamera	30

Elenco delle figure

3.12 Visualizzazione sostegno	31
3.13 Tavola Sostegno	31
3.14 Albero	32
3.15 Tavola Albero	33
3.16 Chiavetta	33
3.17 Tavola Chiavetta	34
3.18 Spina	34
3.19 Tavola Spina	35
3.20 Cuscinetti	35
3.21 Tavola Cuscinetto Albero	36
3.22 Tavola Cuscinetto Perno	37
3.23 Tavola Cuscinetto Supporto	38
3.24 Ingranaggio a vite senza fine	39
3.25 Tavola Ruota Dentata	39
3.26 Tavola Vite Senza Fine	40
3.27 Vite Bloccaggio	41
3.28 Tavola Vite Bloccaggio	41
3.29 Vite Sostegno	42
3.30 Tavola Vite Sostegno	42
3.31 Vite Fotocamera	43
3.32 Tavola Vite Fotocamera	43
3.33 Meccanismo interno	44
4.1 Phrozen Transform	45
4.2 Struttura asse Z	46
4.3 Meccanismo ParaLED	47
4.4 Esempio inclinazione modello	49
4.5 Supporti Chitubox	50
4.6 Esempio Slicing	50
4.7 Componente realizzato con resina rossa	51
4.8 Primo tentativo di stampa	52
4.9 Secondo tentativo	53
4.10 Parametri resina	53

Elenco delle figure

4.11 Terzo tentativo	54
4.12 Parametri stampa	55
4.13 Ultimo tentativo	56

Capitolo 1

Introduzione

Il presente studio concerne la progettazione di un supporto atto a sorreggere una videocamera con lo scopo di effettuare misurazione ottiche, conferendogli la movimentazione adatta per far sì che le misurazioni possano essere effettuate al meglio, facendo in modo che non ci siano errori dovuti agli spostamenti e al rumore.

Il principale utilizzo di questa videocamera è quello di effettuare delle misurazioni di deformazioni, spostamenti e vibrazioni di un componente soggetto a forze applicate.

Le misurazioni possono essere fatte in 2D o 3D, in funzione di quante videocamere vengono utilizzate.

Queste misurazioni avvengono senza contatto tra il provino e il sensore, pertanto non sono distruttive.

L'obiettivo del progetto è quello di realizzare un supporto che consente alla telecamera di compiere due rotazioni ortogonali fra loro:

- Una di beccheggio, per quanto riguarda la rotazione del sostegno rispetto al supporto;
- Una di imbardata, riferita alla rotazione del supporto rispetto alla base.

Queste rotazioni vengono controllate tramite un meccanismo di ingranaggio a vite senza fine, garantendo la regolazione manuale della videocamera, attraverso un albero, ottenendo misurazioni il più precise possibili.

Inoltre, il supporto viene dotato di un ampio angolo di imbardata in modo che si riesca ad avere una maggiore versatilità nel suo utilizzo, in quanto può essere usato singolarmente, sfruttando una sola videocamera.

Capitolo 1 Introduzione

Le misurazioni possono essere in 2D o in 3D a seconda se vengono impiegate una o più videocamere.

Il successivo passo dopo la progettazione dei componenti del supporto, mediante l'utilizzo di software CAD, è il processo di stampaggio; dal disegno dei modelli CAD alla lettura e realizzazione da parte della stampante 3D.

Successivamente viene eseguito il post-trattamento dei componenti stampati ed il controllo su ritiri e difetti dovuti al processo di stampa.

Capitolo 2

Metodi ottici per la misura della deformazione mediante correlazione digitale d'immagine

2.1 Introduzione alla correlazione digitale di immagini

Le tecniche sperimentali nella meccanica dei solidi si basano molto sulla misurazione del campo di spostamento, forma e deformazione superficiale di un provino sottoposto a forze applicate.

Diversi metodi ottici, come l'interferometria olografica, moirè o a macchie, sono stati utilizzati a lungo negli esperimenti della meccanica dei solidi per studiarne le deformazioni, fratture e spostamenti. [1]

Negli ultimi anni i sistemi di rilevazione e di misura hanno subito un significativo sviluppo tecnologico, diventando sempre più efficienti e meno invasivi.

La deformazione e lo spostamento sono parametri critici all'interno dei progetti di ingegneria e costruzione, tuttavia, misurare questi parametri al di fuori del laboratorio richiede una difficile scelta tra le tecniche convenzionali, poiché accuratezza, semplicità e costo devono essere bilanciati. [2]

Sono stati sviluppati alcuni metodi di misura ottica senza contatto che consentono di realizzare determinate misurazioni in ambito di campi di spostamento, deformazioni e vibrazioni in oggetti, superfici o materiali soggette a forze applicate, nei quali avviene una mappatura 3D a tutto campo (full-field) tramite una videocamera che riesce a identificare gli spostamenti o deformazioni che subisce il provino oggetto di studio.

Il tutto viene fatto senza andare a influire sulle proprietà e caratteristiche dei provini utilizzati.

Questi metodi di misura senza contatto utilizzano strumenti ad alta tecnologia per superare gli inconvenienti dei sensori di deformazione tradizionali.

I metodi più comuni per misure dello stato di sollecitazione e deformazione sono:

- Estensimetria :
 - Strain gauges
 - Estensimetri

- Metodi ottici :
 - Fotoelasticità
 - Interferometria olografica
 - Metodi speckle
 - Griglie di Moirè
 - Correlazione digitale delle immagini (DIC)

In seguito verrà approfondito il metodo della "correlazione digitale delle immagini" in quanto il progetto del supporto è finalizzato a sorreggere la videocamera che provvede alle misurazioni delle deformazioni tramite DIC.

2.2 Digital Image Correlation (DIC)

I materiali deformati solitamente non riportano una distribuzione uniforme della deformazione.

Nei policristalli questo fenomeno è attribuito alla natura anisotropa dello scorrimento cristallino, all'interazione non isotropa dei diversi difetti reticolari ed all'influenza delle condizioni macroscopiche al controno in termini di vincoli geometrici, cinematografici e di attrito.

La correlazione digitale delle immagini, abbreviata DIC, è un metodo sperimentale per l'indagine di tali fenomeni su scala di grani del materiale. Ha lo scopo di mappare i cambiamenti sia meccanici che microstrutturali durante la deformazione elastoplastica di materiali complessi e disomogenei. [3]

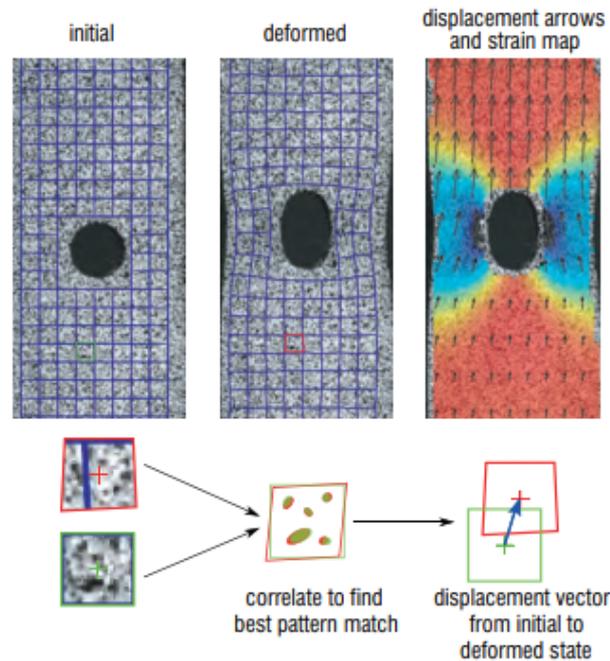


Figura 2.1: Correlazione delle immagini.

Il (DIC) è un metodo ampiamente utilizzato per la misurazione della forma, dello spostamento e della deformazione a tutto campo.

Essa è una tecnica che può rivelarsi ideale per lo studio della propagazione delle cricche e della deformazione del materiale nelle applicazioni del mondo reale, poiché ha il potenziale per diventare una soluzione economica, semplice ma accurata.

E' un'innovativa tecnica ottica senza contatto per misurare deformazione e spostamento, semplice da usare e conveniente rispetto ad altre tecniche come l'interferometria a speckle, è più accurato e soggettivo dei metodi di misurazione manuale, portando a una vasta gamma di potenziali applicazioni. [2]

A differenza dell'interferometria a macchie dove le macchie sono deformate naturalmente, nella correlazione digitale delle immagini invece i modelli delle macchie vengono introdotti artificialmente nel campione.

La dimensione delle macchie può essere modificata al fine di adattarsi a diverse scale di lunghezza dalla nanoscala a macroscale.

Viene utilizzata un'ampia elaborazione statistica dei dati di intensità delle macchie per valutare gli spostamenti del componente sotto studio.

Il metodo è quindi concettualmente unico e una delle considerazioni importanti

nell'implementazione della tecnica è come ridurre al minimo il numero di canali per punto per una determinata applicazione, ciò richiede a priori informazioni sulla natura del campo di deformazione in varie posizioni della struttura/componente.

In generale, si richiederebbe una rosetta a tre elementi per punto in modo da poter determinare in maniera esatta il tensore della deformazione; tuttavia possono essere utilizzati due o un'estensimetro: più precisamente due, se la direzione principale di deformazione è conosciuta in un punto e verranno disposte una lungo ogni direzione principale di deformazione; mentre se ne può utilizzare solamente uno nel caso in cui il campo di deformazione risulta uniassiale. [4]

Questo metodo consiste nel registrare due o più immagini, prima e dopo l'applicazione delle forze, del componente stesso, e grazie ad algoritmi di calcolo molto efficienti esso le correla e ne ricava gli equivalenti campi di spostamento e/o deformazione.

Tracciando blocchi di pixel, il sistema può misurare lo spostamento della superficie e creare campi vettoriali 2D e 3D e mappe di deformazione.

Per far lavorare in maniera efficace il DIC i blocchi di pixel devono essere casuali e unici con una gamma di livelli di contrasto e intensità.

Non è richiesta un'illuminazione speciale e in molti casi la superficie naturale della struttura o componente, ha una texture dell'immagine sufficiente affinché esso funzioni senza bisogno di alcuna preparazione particolare della superficie.

2.3 Principi di base della DIC

La fotogrammetria o la correlazione dell'immagine digitale è un metodo per determinare la distribuzione spaziale delle microdeformazioni sulla superficie del campione, misurando i cambiamenti nel campo di spostamento plastico tridimensionale durante un esperimento di deformazione.

La tecnica consiste nell'impiegare un algoritmo di riconoscimento dei pattern, per il rilevamento dei cambiamenti nella distribuzione della scala di grigi dei pattern di superficie, che si verificano durante la deformazione elasto-plastica.

La microstruttura dei campioni è determinata, ad esempio, dall'analisi dei modelli di retrodiffusione di elettroni ottenuti in un microscopio elettronico a scansione. [3]

La correlazione dell'immagine digitale può essere riassunta come il tracciamento di un insieme di punti sulla superficie osservata: il movimento di una parte di superficie è noto quando sono stati determinati i singoli movimenti di tutti i marker su di essa.

Questo implica che la parte necessita di essere strutturata, con una matrice dei punti, prima che il suo movimento possa essere registrato; ad esempio, se la struttura superficiale è costituita da un solo punto nero al centro di un'area bianca, non è possibile valutare gli spostamenti all'interno dell'area che circonda il punto nero, ma solo di esso.

Anche i modelli con strutture periodiche devono essere evitati in quanto potrebbe diventare difficile per il software DIC determinare in modo inequivocabile la posizione dei singoli punti.

Per rimuovere questa ambiguità riguardante le singole posizioni dei punti, bisognerebbe utilizzare una trama casuale che consente di distinguere la vicinanza di un dato punto dalle aree circostanti.

La trama risultante sarà composta da puntini distribuiti disuniformemente con un diametro medio di 1 mm, in modo che ogni punto possa essere distinto dall'ambiente circostante.

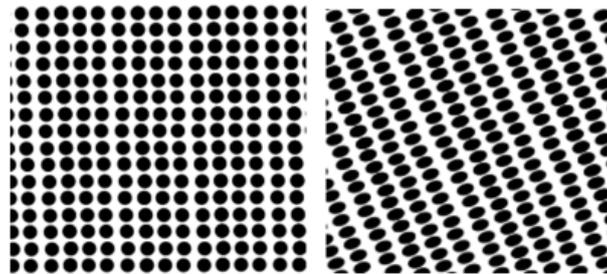


Figura 2.2: Esempio matrice dei punti.

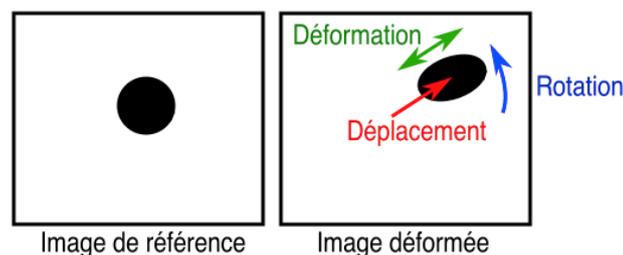


Figura 2.3: Esempio punto nero deformato.

L'accuratezza della misurazione può essere sorprendentemente elevata; essa è dovuta all'interpolazione del livello di grigio dei sub-pixel.

Se una macchia nera del diametro di 1 pixel viene traslata su uno sfondo bianco uniforme, i pixel vicini reagiranno a questo spostamento assumendo un valore di livello di grigio proporzionale alla superficie del punto sovrapponendo questo pixel.

L'interpolazione sub-pixel consente di misurare comunemente ampiezze di spostamento inferiori a 0,1 pixel o addirittura in condizioni sperimentali favorevoli arrivano a misurare spostamenti inferiori a 0,001 pixel.

Per ottenere questa precisione occorre prestare attenzione nel fornire un'illuminazione costante e uniforme al campione osservato, e l'acquisizione dell'immagine deve essere effettuata con obiettivi e telecamere di alta qualità.

Il riconoscimento del modello avviene tramite una procedura di elaborazione dell'immagine digitale che mappa una griglia rettangolare sull'immagine.

I punti della griglia sono caratterizzati da coordinate tridimensionali e dalla distribuzione in scala di grigi nelle loro vicinanze, dopo la deformazione, il modello viene riconosciuto sulla base che la distribuzione della scala di grigi attorno a una certa coordinata, rimanga costante durante la deformazione.

Dalla modifica delle coordinate del bordo, contenente la corretta distribuzione della scala di grigi attorno al punto della griglia, si determina il tensore del gradiente di spostamento tridimensionale in corrispondenza di ciascun punto sulla griglia.

Il modello in scala di grigi risultante viene quindi registrato e le coordinate di riferimento (microstruttura, metallografia, determinazione della microdeformazione) sono fissate sulla superficie del campione.

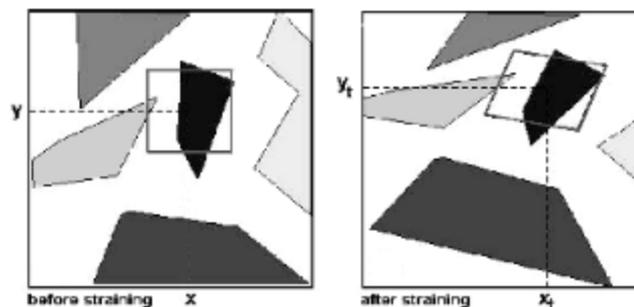


Figura 2.4: Modello dei grani in scala di grigio.

Il provino viene quindi deformato, ad esempio tramite una prova di trazione; dopo

ogni fase di deformazione viene acquisito il modello in scala di grigi della superficie e vengono calcolati il campo del gradiente di spostamento e la distribuzione della deformazione.

Il campo del gradiente di spostamento deriva esclusivamente dai cambiamenti nelle coordinate del bordo (di confine) per una distribuzione in scala di grigi a ciascuna coordinata.

La risoluzione spaziale del metodo è quindi indipendente da alcune dimensioni della griglia esterna ma è dell'ordine della rispettiva configurazione ottica.

Gli approcci classici della correlazione digitale delle immagini sono adattati per calcolare i dati di spostamento della nuvola di punti, ripetendo l'operazione precedente sui diversi sottoinsiemi di immagini in cui si cerca lo spostamento.

Questo però deve essere affiancato da simulazioni numerica (tipicamente software FE).

Quindi per avere un risultato attendibile bisogna confrontare i due metodi, cioè quello sperimentale e quello numerico, per far ciò bisogna utilizzare mesh di simulazione come base per la misurazione dello spostamento invece di sottoinsiemi di immagini indipendenti.

Infatti la proiezione dei dati della nuvola di punti nello spazio FE potrebbe comportare diverse operazioni problematiche (cambiamento del sistema di coordinate, interpolazione dei dati 3D) che potrebbero causare errori indesiderati, mentre prendere la mesh FE come base per la misurazione fin dall'inizio semplifica enormemente l'elaborazione dei dati sperimentali.

Ciò è possibile grazie all'utilizzo di un metodo globale basato sull'assunzione dei campi di spostamento nella formulazione del problema.

In funzione di quante telecamere vengono utilizzate per la misurazione possiamo avere:

- Mappatura 2D se viene utilizzata una sola videocamera : nella correlazione di immagini digitali bidimensionali basta solo una videocamera per la misurazione e gli spostamenti vengono rilevati direttamente da immagini digitali della superficie del campione.

La superficie piana di un oggetto viene generalmente osservata da una telecamera CCD con un obiettivo di imaging, poi le immagini sulla superficie dell'og-

getto, una prima e una dopo la deformazione, vengono registrate, digitalizzate e memorizzate in un computer.

- Mappatura 3D se vengono utilizzate due o più videocamere : per i componenti tridimensionali, non è possibile acquisire dati di spostamento completi utilizzando una singola telecamera, poiché una singola telecamera può determinare solo spostamenti nel piano parallelo al suo sensore.

Per geometrie semplici basta l'uso di due telecamere, dove una acquisisce l'immagine e l'altra misura lo spostamento. Per geometrie più complesse il concetto base può essere esteso utilizzando tutte le videocamere necessarie per misurare lo spostamento e le deformazioni su tutte le superfici desiderate.

I dati 3D-DIC acquisiti durante il test possono quindi essere abbinati alle informazioni raccolte da altri sensori per convalidare ed arricchire la modellazione numerica.

In alcuni casi, questo processo può essere automatizzato per stimare i parametri costitutivi della misurazione della correlazione digitale delle immagini.

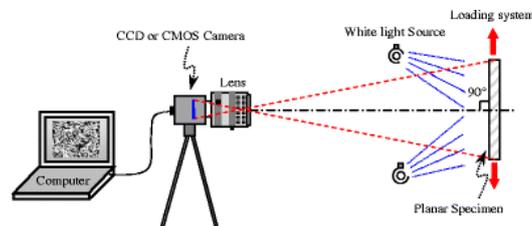
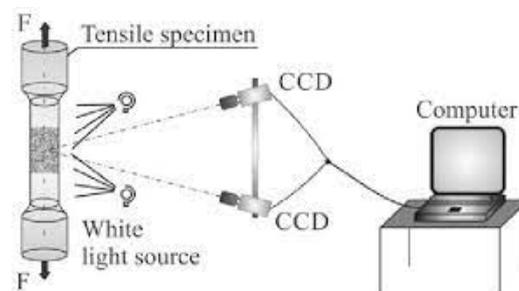


Figura 2.5: Schema di misurazione 2D.



(a) Sottofigura 1.

Figura 2.6: Schema misurazione 3D.

2.4 Stereo-DIC Quantificazione dell'incertezza basata su immagini simulate

La quantificazione dell'incertezza di una tecnica di misurazione gioca un ruolo molto importante; infatti si vuole conoscere il rapporto segnale-rumore per valutare la qualità di una misura.

Ottenere l'incertezza con DIC è molto complicato poichè coinvolge sia componenti ottiche che numeriche, questo è un peccato in quanto lo stereo-DIC ha importanti vantaggi, inclusi i campioni non planari e il calcolo del movimento fuori dal piano, giusto per citarne un paio.

2.4.1 FE based Image Generator

Per creare immagini deformate, è necessaria un'immagine di riferimento, una posizione della telecamera di riferimento da cui vengono prese le immagini e una mesh, che rappresenta l'oggetto che verrà deformato.

La mesh viene estratta da un pacchetto FE e verrà proiettata 3 volte utilizzando il modello pinhole camera.

Questa proiezione trasformerà il punto nello spazio 3D in punti 2D sul sensore di una fotocamera, inclusa la distorsione dell'obiettivo.

La prima proiezione trasforma la mesh FE sull'immagine di riferimento, come si vede dalla telecamera di riferimento.

Le altre due proiezioni trasformano la stessa mesh o una mesh deformata in un'immagine virtuale della telecamera.

Le proiezioni di queste mesh sono semplicemente un cambiamento della posizione nodale della maglia a causa del fatto che le telecamere sono in posizione diversa.

Finora non è stata imposta nessuna deformazione; questo è seguito dalla generazione dell'immagine basata sulla mesh, l'immagine di riferimento e ai principi della mappatura agli elementi finiti.

La mappatura, basata sul polinomio di Lagrange, può essere descritta dalla seguente formula:

$$d = \sum_{i=1}^N \phi_i \delta_a \hat{u}_a \quad (1)$$

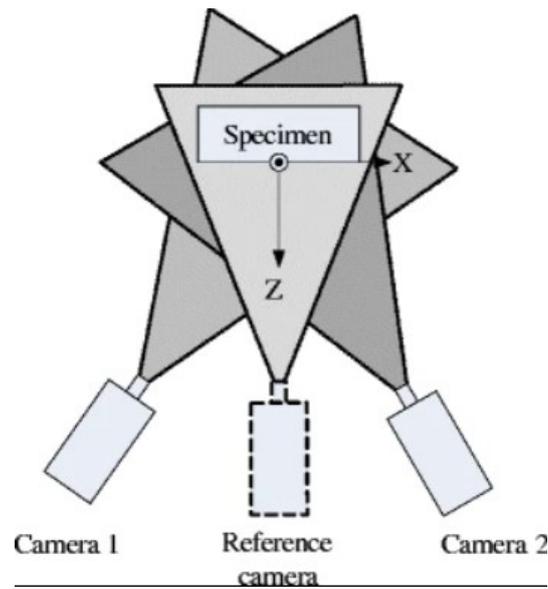


Figura 2.7: Configurazione videocamera

Dove d è lo spostamento, ϕ è la funzione di forma della base utilizzata, δ_a è lo spostamento nella direzione a , dove \hat{u}_a è il versore di a .

Un tipo di elemento comune è l'elemento lineare Q4, un elemento quadrilatero bilineare, basato su due polinomi di Lagrange.

Gli spostamenti di questo elemento possono essere descritti da 2 coordinate locali $[\beta, \eta]$ in un elemento quadrato, dove $[\beta, \eta] \in [-1, 1]$, come mostrato nella seguente figura

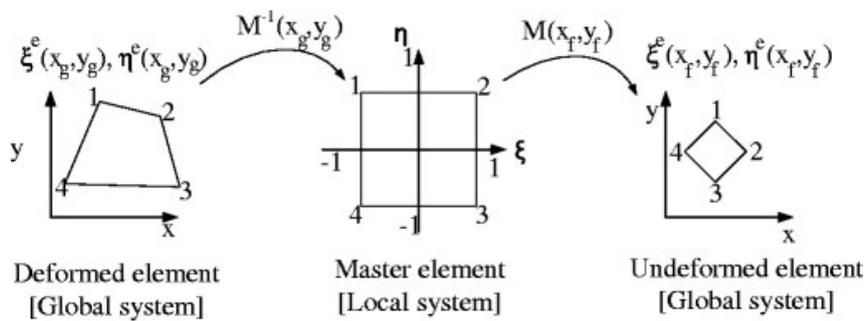


Figura 2.8: Trasformazione tra sistemi di coordinate

Se si hanno le coordinate globali dei quattro nodi e le coordinate locali di un punto, si può determinare la coordinata globale di quel punto mappandola usando l'Eq.(1).

Il processo di deformazione calcola il valore di grigio di ciascun pixel dell'immagine deformata calcolando il valore di grigio dall'immagine di riferimento, in base alla

2.4 Stereo-DIC Quantificazione dell'incertezza basata su immagini simulate

deformazione dell'elemento.

L'uso della mappatura avanti e indietro ha il vantaggio che eventuali errori di interpolazione in questa fase si annullano.

La principale fonte di errore è appunto l'interpolazione dell'immagine di riferimento. Se è necessaria un'elevata precisione, è possibile utilizzare un'immagine ad alta risoluzione per ridurre al minimo questo errore.

Per deformare le immagini basate su una mesh FE è necessario verificare che la posizione del pixel considerato sia all'interno di un elemento della mesh deformata. Il requisito per questo è che le coordinate locali $[\beta_g^e, \eta_g^e] \in [-1, 1]$, dove e rappresenta l'elemento e g denota il fatto che è nel suo stato deformato.

Per verificare questo le coordinate locali devono essere calcolate da una data coordinata globale (la posizione del pixel); una volta ottenute le coordinate locali e l'elemento corrispondente nel suo stato indeformato, si possono determinare le coordinate globali di questo elemento nel suo stato indeformato.

Il valore di grigio della coordinata globale dell'immagine di riferimento viene quindi assegnato al pixel corrente nell'immagine deformata.

Un'immagine deformata può quindi essere creata eseguendo questa procedura per tutti i pixel.

Dopo la generazione dell'immagine, è possibile imporre diversi effetti sull'immagine, inclusi effetti di luce, profondità di campo e sfocatura del movimento.

2.4.2 Incertezza Teorica

L'incertezza a tutto campo può essere determinata anche in modo matematico applicando la "legge di propagazione dell'errore", in cui lo stadio di triangolazione è considerato come un sistema black-box.

Se sono note la matrice di covarianza di input delle posizioni corrispondenti dei pixel nelle coppie di immagini e la matrice Jacobiana del sistema, la matrice di covarianza dell'output, ovvero le posizioni 3D ottenute, può essere calcolata come segue:

$$C_y = F_x C_x F_x^T, F_{xij} = \frac{\partial f_i}{\partial X_{cj}} \quad (2)$$

In cui C_y è la matrice di covarianza di output delle posizioni 3D, F_x è la matrice Jacobiana delle posizioni 3D ottenute rispetto alle posizioni dei sensori corrispondenti

(indicati come x_{c1} , y_{c1} , x_{c2} , y_{c2}) e infine C_x è la matrice di covarianza di input delle stesse posizioni dei sensori corrispondenti.

Questo approccio black-box può essere applicato a una procedura di triangolazione generica, o specifica per stereo-DIC.

Lo Jacobiano viene calcolato utilizzando un metodo alle differenze finite come mostrato nella figura sottostante :

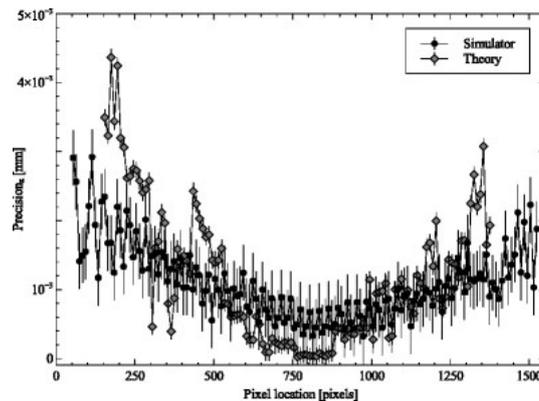


Figura 2.9: Incertezza teoricamente prevista rispetto all'incertezza misurata mediante immagini simulate

per l'incertezza nella direzione x . [1]

2.5 Calibrazione DIC system

La calibrazione del sistema di misurazione è un passo di fondamentale importanza per la corretta acquisizione dei dati e per la validazione dei modelli computazionali.

La calibrazione è l'insieme delle operazioni che stabiliscono, in condizioni specificate, la relazione tra valori indicati da uno strumento (o sistema) di misura e i corrispondenti valori di una quantità determinata da una norma di riferimento, e consente la stima degli errori di indicazione dello strumento di misura.

In generale per il processo di calibrazione viene utilizzato un materiale di riferimento che fornisce tracciabilità attraverso una catena ininterrotta di confronti con uno standard internazionale o nazionale.

Per la correlazione digitale delle immagini 2D, l'unica calibrazione è una conversione della scala di lunghezza dallo spazio pixel del DIC all'ingrandimento dell'immagine,

2.6 Influenza della luce, della messa fuoco e del rumore

quindi la calibrazione richiede una linea di lunghezza nota (come la larghezza del campo orizzontale o HFW).

Per DIC 3D le telecamere devono essere calibrate una rispetto l'altra, quindi una linea non è più sufficiente; le procedure di calibrazione comuni implicano una griglia di calibrazione o un piano di dimensioni note.

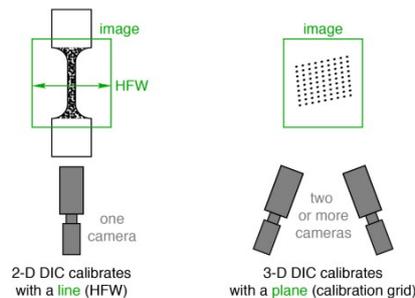


Figura 2.10: Calibrazione sistemi DIC 2D e 3D

Affinché la misurazione della lunghezza della linea possa calibrare il DIC 2D, piccoli errori nella lunghezza della linea possono creare grandi errori negli spostamenti risultanti, quindi è necessario utilizzare un riferimento accurato come un righello di precisione.

Per DIC 3D, la procedura di calibrazione varia tra i pacchetti software DIC. [\[5\]](#)

2.6 Influenza della luce, della messa fuoco e del rumore

Una volta calcolata l'immagine deformata è possibile aggiungere l'influenza della luce, della sfocatura e del rumore.

2.6.1 Aggiunta di effetti luce

Poiché avere una illuminazione adeguata è spesso difficile negli esperimenti DIC, si può avere bisogno di aggiunta di effetti luce per far sì che la misurazione avvenga nella maniera più precisa possibile.

Ad esempio, se l'oggetto si deforma possono verificarsi riflessi indesiderati che andranno a influenzare la qualità della misurazione, andandola a diminuire.

Ci sono molti algoritmi disponibili per simulare l'influenza della luce su una superficie, questi sono i cosiddetti algoritmi di sfumatura; ad esempio abbiamo il flat shading, Gouraund shading, Phong shading etc.

Ogni algoritmo di sfumatura è costituito da un modello di illuminazione e da una tecnica di interpolazione.

Il modello di illuminazione descrive come l'oggetto riflette la luce incidente, mentre la tecnica di interpolazione definisce quali punti vengono utilizzati per calcolare l'influenza della luce.

Viene scelto il modello di riflessione Phong in combinazione con una forma adattata della tecnica di interpolazione Gouraud.

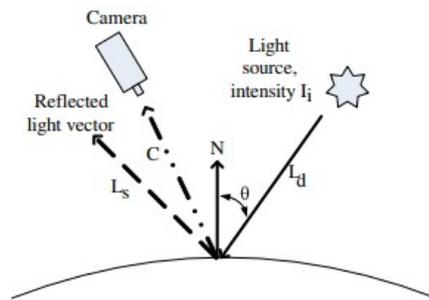


Figura 2.11: Illuminazione Phong

Questo modello è formato da tre componenti:

- Componente ambientale: modella la luce che è stata riflessa da più oggetti prima che colpisca l'oggetto di interesse e questa componente è di conseguenza una costante su tutto l'oggetto di interesse.

L'intensità di questa componente è indicata con I_a

- Componente diffusa: è il risultato della riflessione diretta in tutte le direzioni dall'oggetto stesso, questa componente dipende fortemente dall'angolo tra la sorgente luminosa e la superficie dell'oggetto.

Questo tipo di riflettanza è nota come "riflettanza Lambertiana" e l'influenza è proporzionale all'angolo tra la normale della superficie e il vettore che va dalla sorgente luminosa alla superficie.

L'intensità della luce diffusa (I_d) può essere modellata come:

$$I_d = I_i k_r \cos\theta \quad (3)$$

2.6 Influenza della luce, della messa fuoco e del rumore

Dove I_i è la luminosità della sorgente di luce puntiforme, k_r è il coefficiente di riflessione della superficie, mentre θ è l'angolo tra la normale alla superficie e il vettore che va dalla sorgente luminosa alla superficie.

- Componente speculare: esso è proporzionale all'angolo tra la direzione della videocamera e la direzione della luce riflessa e può essere definita come:

$$I_s = I_i k_s (L_s \cdot C)^r \quad (4)$$

Dove L_s definisce il vettore della luce riflessa e C è definito come il vettore tra la posizione della telecamera e il punto in cui la riflessione viene considerata come mostrato in Fig. 2.11, mentre r è la costante di brillantezza.

Se vengono aggiunti tutti e tre i componenti e se il coseno dell'angolo tra la normale e il vettore della luce incidente (L_s) può essere scritto come prodotto scalare, otteniamo:

$$I_{total} = I_a + I_i (k_r (L_d \cdot N) + k_s (L_s \cdot C)^r) \quad (5)$$

Questo modello però presuppone che ci sia un punto luce, risplende in ogni direzione con la stessa intensità e che la luce non ha dipendenza dalla distanza.

La formula viene rimodellata introducendo un fattore di attenuazione:

$$I = I_a + (k_r (L_d \cdot N) + k_s (L_s \cdot C)^r) \frac{I_i}{1 + kd^2} \quad (6)$$

Dove k è il fattore di attenuazione e d la distanza tra la sorgente luminosa e il punto considerato.

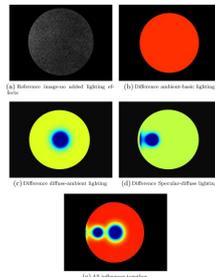


Figura 2.12: Esempi di immagini con differenti componenti di illuminazione aggiunte

2.6.2 Aggiunta profondità di campo

La profondità di campo rappresenta la zona in cui gli oggetti nell'immagine appaiono ancora nitidi e sufficientemente focalizzati, nonostante il piano a fuoco sia uno soltanto.

Un obiettivo mette a fuoco un solo piano nello spazio, tutti gli altri punti nello spazio produrranno un punto sfocato.

Tuttavia, se il punto di sfocatura è più piccolo della dimensione del pixel, l'immagine apparirà a fuoco entro un certo intervallo, il quale definisce il DOF (depth of field). Ogni punto del DOF avrà un punto di sfocatura più piccolo del cerchio di confusione accettabile (definito come dimensione del pixel).

Il DOF è quindi controllato dall'apertura, con aperture più piccole che forniscono una profondità di campo più ampia ed aperture più grandi che forniscono un DOF più piccolo.

Il limite di vicinanza del DOF è definito come:

$$D^- = \frac{D \cdot H}{H + D} \quad (7)$$

Dove D è la distanza alla quale è messa a fuoco la videocamera e H è la distanza iperfocale (la posizione più vicina alla fotocamera dove la profondità di campo è uguale a infinito).

Il limite di lontananza della profondità di campo è invece definita come:

$$D^+ = \frac{D \cdot H}{D - H} \quad (8)$$

Questa formula è valida solo se H è minore di D , altrimenti il limite è fissato all'infinito.

La distanza iperfocale è definita come:

$$H = \frac{f^2}{N \cdot c} + f \quad (9)$$

Dove f è la distanza focale, N è il numero relativo ad f (mette in relazione le dimensioni dell'apertura e la lunghezza focale) e c è il cerchio di confusione accettabile. Tutti i punti al di fuori della distanza focale creeranno una macchia di sfocatura più ampia rispetto al cerchio di confusione accettabile e apparirà sfocata.

La dimensione effettiva del punto di sfocatura può essere calcolata sulla base dei triangoli simili, come si può vedere in Fig. 2.13.

$$\frac{|LR|}{V_D} = \frac{|EB|}{V_D - V_P} \quad (10)$$

Dove:

$$V_D = \frac{f \cdot D}{D - f} \quad (10)$$

$$V_P = \frac{f \cdot P}{P - f} \quad (11)$$

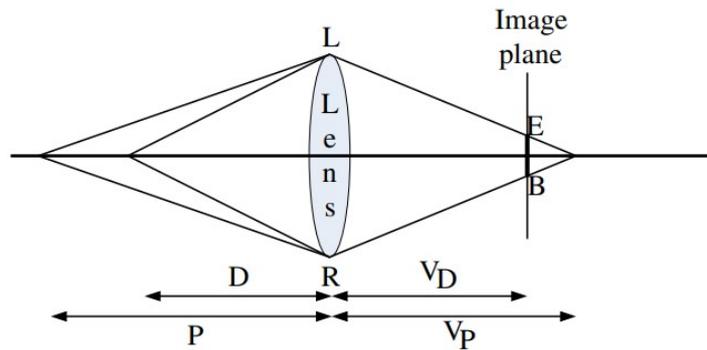


Figura 2.13: DOP

2.6.3 Aggiunta rumore

L'ultimo passaggio nella generazione dell'immagine è l'aggiunta del rumore su di essa. Esistono due modelli di rumore:

- Il primo modello è una semplificazione, in cui la deviazione standard del rumore ad ogni livello di grigio è lo stesso.
- Il secondo modello è più realistico nel senso che tiene conto dell'eteroschedasticità di livello di grigio, poichè la deviazione standard del rumore dipende dal valore del livello di grigio del pixel.

Entambi i modelli aggiungono un livello di grigio casuale a ciascun pixel con una distribuzione gaussiana, avendo una media dell'intensità desiderata e una varianza fissa data con una percentuale della gamma dinamica della videocamera nel modello semplificato o una varianza variabile nel caso di modello di eteroschedasticità. [6]

Capitolo 3

Progetto supporto per attrezzature ottiche

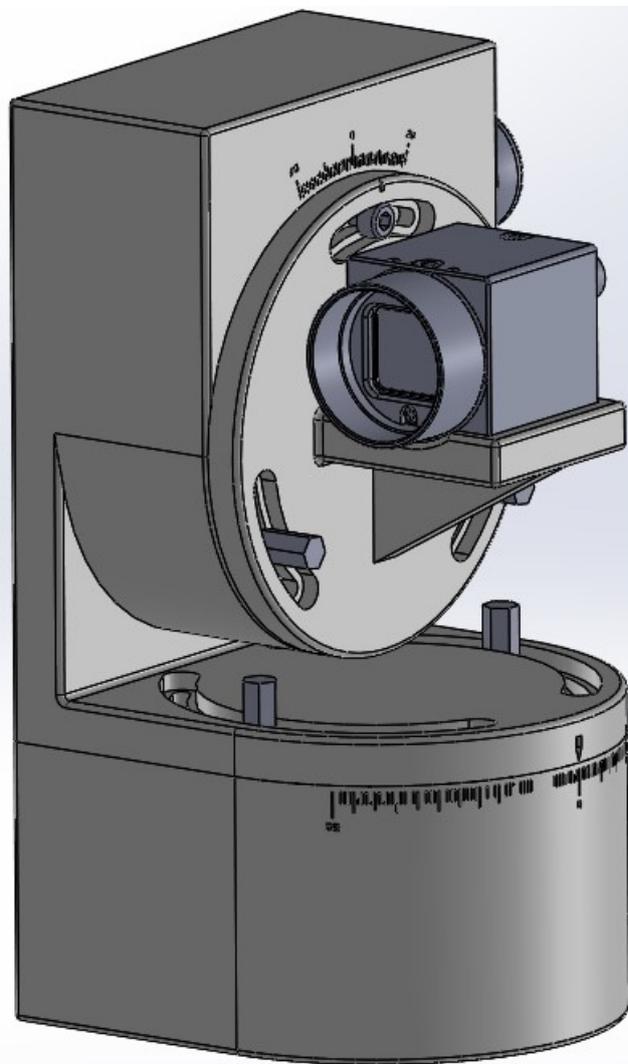


Figura 3.1: Progetto

3.1 Obiettivo Progetto

La finalità di questo progetto è quella di generare un supporto atto a misurazioni, tramite il metodo della correlazione digitale delle immagini.

La principale problematica è quella di poter consentire al supporto due rotazioni con assi ortogonali tra loro, in modo da garantire una regolazione precisa della telecamera.

Per ogni rotazione viene impiegato un ingranaggio a vite senza fine, che garantisce una precisa regolazione del supporto.

Inoltre è dotato di un sistema di bloccaggio, dato che sulla videocamera viene montato un'obiettivo più pesante della telecamera stessa, che non permette al supporto di muoversi una volta che esso viene utilizzato per la misurazione.

Questo garantisce un buon posizionamento della telecamera e previene ad eventuali spostamenti causati dalla forza peso dell'obiettivo e telecamera.

3.2 Videocamera

La videocamera è composta da un sensore ottico e da un protocollo trasmissione dati.

Riguardo al sensore, essendo obbligatorio impiegare immagini digitali monocromatiche nella correlazione, è importante che esso abbia una buona gamma dinamica, cioè un alto rapporto di contrasto tra la massima e la minima intensità luminosa misurabili nell'immagine.

L'esposizione della videocamera deve essere regolata in maniera tale da consentire al sensore di ricevere la giusta quantità di luce e da permettere una riproduzione fedele del provino nell'inquadratura.

Sensori più grandi riescono a catturare una maggiore quantità di luce, per cui possono andar bene anche in ambienti poco illuminati.

Tanto è più grande la risoluzione e tanto più accurata e dettagliata sarà la misura ottenuta delle deformazioni locali.

Le videocamere normalmente impiegate hanno una risoluzione compresa tra 1.3 e 2 Megapixel; un'immagine più con una risoluzione più elevata, comporta un aumento

della memoria occupata nello storage e quindi tempi di trasferimento dei dati più elevati.

Un video può essere definito dalla sequenza di immagini digitali distanziate in un intervallo temporale, il quale rimane costante durante la registrazione.

Per ottenere una maggiore accuratezza dei risultati non è sufficiente acquisire un fotogramma per ogni secondo (fps), ma nei punti più critici del diagramma sforzo-deformazione la frequenza minima dei fotogrammi acquisiti dalla telecamera dovrebbe assestarsi attorno ai 5 fps.

Una maggiore quantità di fotogrammi catturati dal sensore fornisce dei vantaggi non trascurabili per l'esito della misurazione con il video-estensimetro.

I principali sensori della videocamera sono divisi in due tipologie:

- Sensori CCD (Charge Coupled Device): sono dispositivi ad accoppiamento di carica composti da un circuito integrato realizzato su del silicio che utilizza elementi sensibili alla luce, chiamati pixel.

L'architettura comprende uno o più circuiti che trasferiscono all'esterno le cariche generate nei singoli pixel.

L'informazione si muove lungo due direzioni denominate parallela e seriale.

- Sensori C-MOS (Active Pixel Sensor): sono dispositivi più recenti. In questi ciascun pixel contiene un sensore di luce e un amplificatore di segnale, in aggiunta sono allocati un convertitore A/D e un controllore digitale.

Questi sensori permettono di assolvere a diverse funzioni di post processing del segnale acquisito già all'interno dell'elettronica presente in ogni singolo pixel, permettendo frame rate maggiori a parità di categoria, e quindi sono i più diffusi nelle misurazioni tramite DIC.

Per quanto riguarda i protocolli di trasmissione dati i principali sono l'USB 3 (4.8 Gbps), il Camera link (5.44 Gbps) e l'USB 3.1 (10 Gbps) [8].

La videocamera che verrà poi montata sul supporto realizzato è la *Blackfly S USB3* della *Flir*.

Questa videocamera presenta un sensore di tipo *C-MOS*, una risoluzione di *720x540 pixel*, ha una fotocamera di *0.4 Megapixel* ed un *Frame Rate* di *522 fps*.



Figura 3.2: Blackfly S USB3

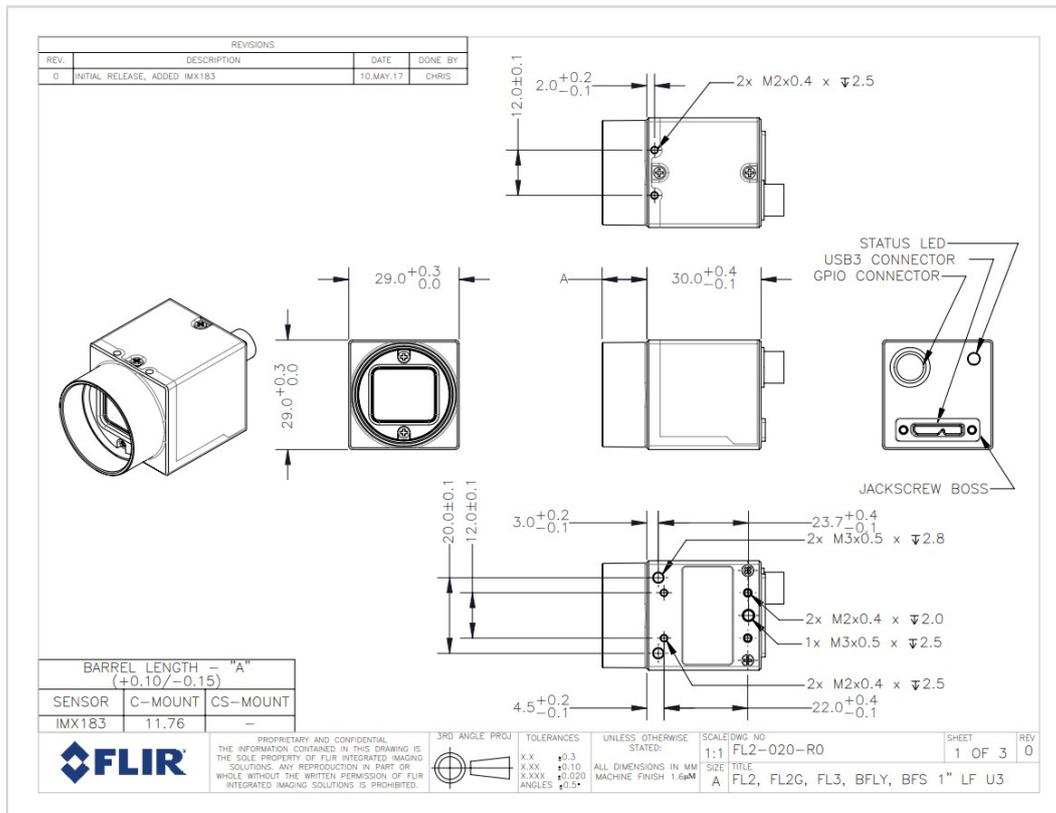


Figura 3.3: Tavola Videocamera

3.3 Realizzazione progetto

Partendo dalla videocamera descritta sopra, e quindi dalla valutazione delle dimensioni di essa, sono arrivato alla prima realizzazione del supporto dopo un primo tentativo risultato inadeguato. Le dimensioni delle ruote dentate atte alla movimentazione del supporto erano troppo piccole e difficili da reperire in commercio e, le dimensioni della vite di bloccaggio non permetteva una regolazione manuale in quanto aveva un diametro della testa della vite troppo piccola.

Per la realizzazione dei componenti del progetto ho utilizzato il software SolidWorks.

Considerando le dimensioni della videocamera, la scelta dei cuscinetti e gli ingranaggi a vite senza fine, da catalogo, in modo da avere dimensioni normalizzate tali da trovarle in commercio, sono arrivato alla realizzazione del progetto vero e proprio.

3.4 Componenti

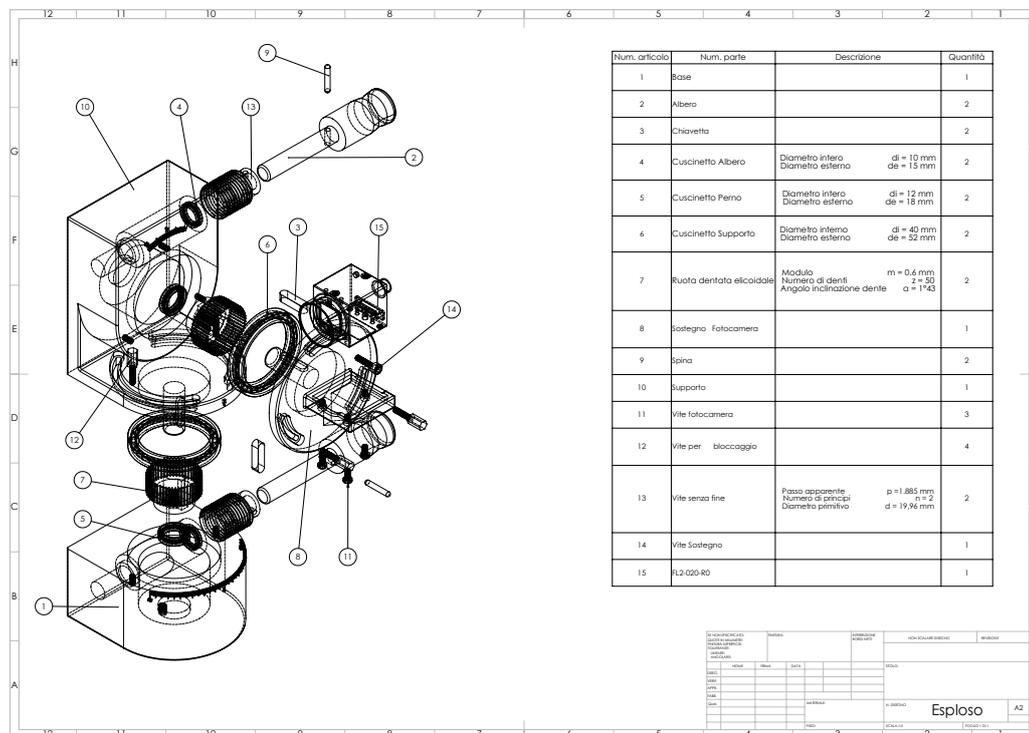


Figura 3.4: Esploso assieme

Di seguito verranno illustrati tutti i componenti che compongono l'assieme.

3.4.1 Base

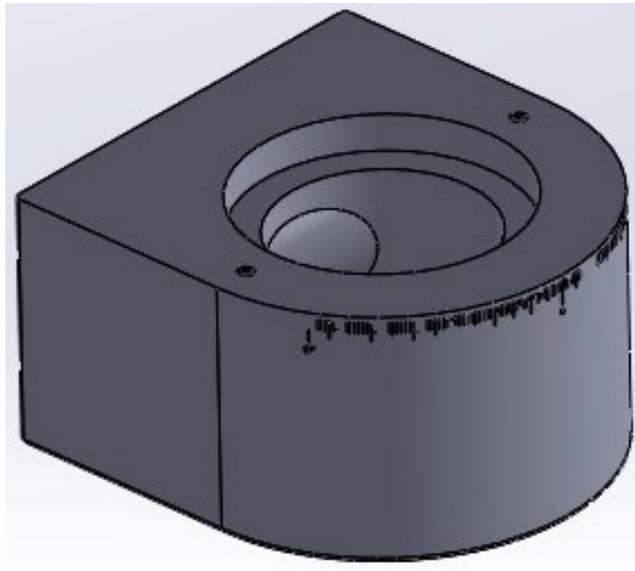


Figura 3.5: Base

La base serve a sorreggere tutto il supporto e a consentire, tramite un foro posto nella parte inferiore, la traslazione lungo la guida sulla quale verrà poi montato tutto il supporto.

Presenta una scala goniometrica che va da -65° a 65° , quindi complessivamente presenta un angolo di imbardata di 130° , per regolare nel modo più preciso possibile la posizione della videocamera durante la misurazione.

All'interno troviamo una serie di scavi che vengono impiegati per inserire i cuscinetti e il meccanismo di ingranaggio a vite senza fine.

Per consentire l'ingranamento della ruota dentata con la vite, due scavi si intersecano tra loro in modo da generare un'area per l'accoppiamento ruota-vite.

Inoltre, nella parte superiore, sono situati due fori filettati per consentire il bloccaggio del supporto sulla base.

Di seguito viene riportata la tavola del componente.

3.4.2 Supporto

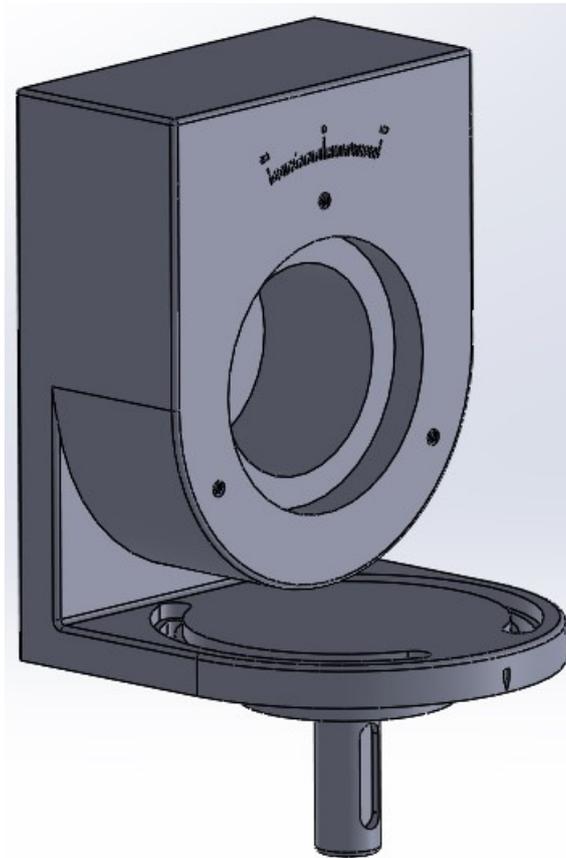


Figura 3.8: Supporto

Il supporto serve a sorreggere il sostegno per la fotocamera.

Ha un geometria tale da consentire la rotazione del supporto rispetto alla base e la rotazione del sostegno rispetto ad esso.

Per garantire la rotazione e l'eventuale bloccaggio, esso possiede una guida circolare, con angolo di imbardata pari a 130° complessivi, realizzata per consentire al supporto di ruotare e nello stesso tempo alla vite di serrare il supporto alla base senza influire sulla rotazione.

Il supporto presenta una scala goniometrica, in corrispondenza del punto in cui viene montato il sostegno, per regolare il beccheggio della videocamera.

Come nella base, pure nel supporto troviamo una serie di scavi che rappresentano le sedi per i cuscinetti e per il meccanismo di ingranaggio a vite senza fine.

Inoltre presenta un perno, con sede per chiavetta, in modo da potersi far trasmettere il moto dalla ruota dentata montata sulla base.

3.4.3 Sostegno Videocamera

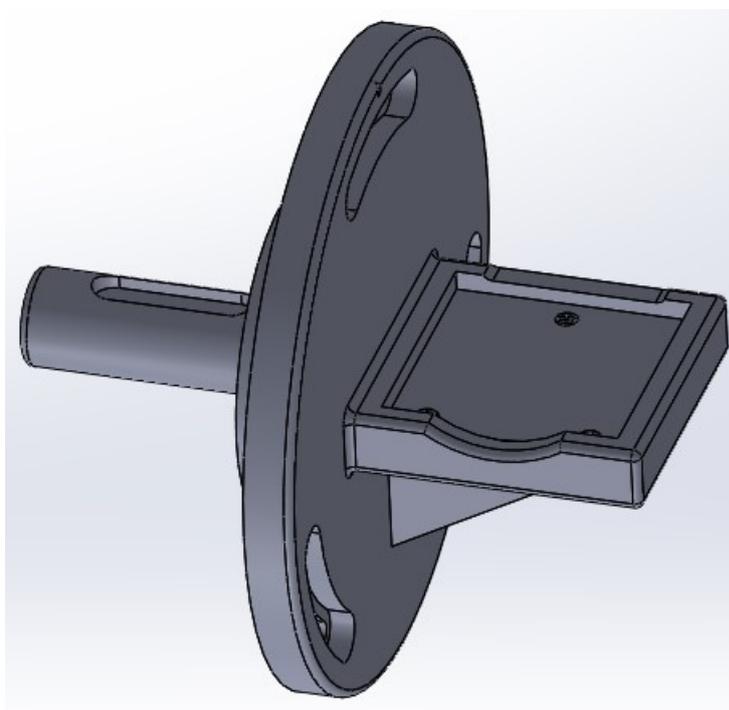


Figura 3.11: Sostegno Videocamera

Il sostegno viene impiegato per sorreggere la videocamera e consentirgli la regolazione manuale tramite il sistema di movimentazione.

In questo componente le guide circolari sono disposte a 120° l'una dall'altra e servono per consentire la movimentazione del sostegno rispetto al supporto e l'eventuale bloccaggio, in quanto sulla videocamera viene montato solitamente un obiettivo che presenta dimensioni maggiori della videocamera stessa.

Anche nel sostegno, troviamo un perno con sede per chiavetta che consente al meccanismo di ingranaggio a vite senza fine del supporto di farsi trasferire il moto.

La geometria è tale per cui, sul sostegno, è possibile montare la videocamera attraverso dei fori filettati.

Inoltre, l'estrusione sulla quale viene appoggiato il dispositivo di misurazione, è modellata in modo tale da consentire alle sporgenze della videocamera di rientrare nello scavo realizzato.

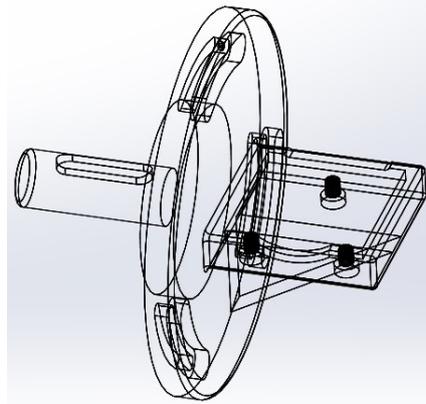


Figura 3.12: Visualizzazione sostegno

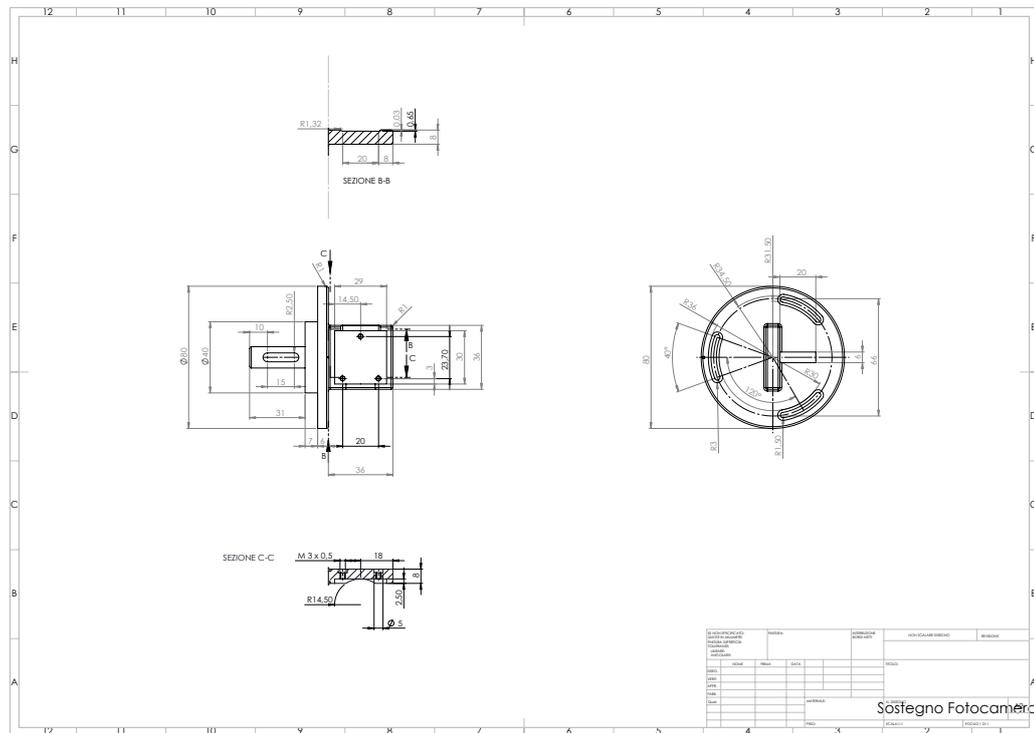


Figura 3.13: Tavola Sostegno

3.4.4 Albero



Figura 3.14: Albero

L'albero ha il compito di riuscire a movimentare il meccanismo di ingranaggio vite senza fine.

Presenta un foro atto a contenere la spina che dovrà poi trasmettere il moto alla vite senza fine.

Di seguito viene riportata la tavola del componente.

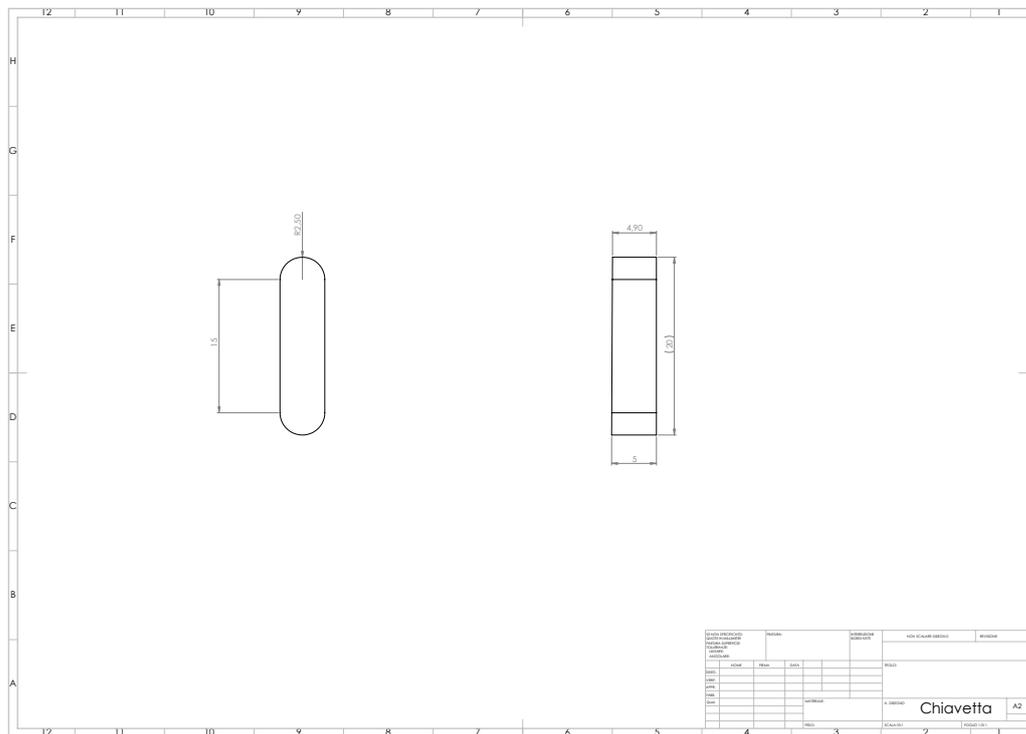


Figura 3.17: Tavola Chiavetta

3.4.6 Spina



Figura 3.18: Spina

La spina è un elemento atto alla trasmissione del moto dall'albero alla vite senza fine con la quale viene accoppiata.

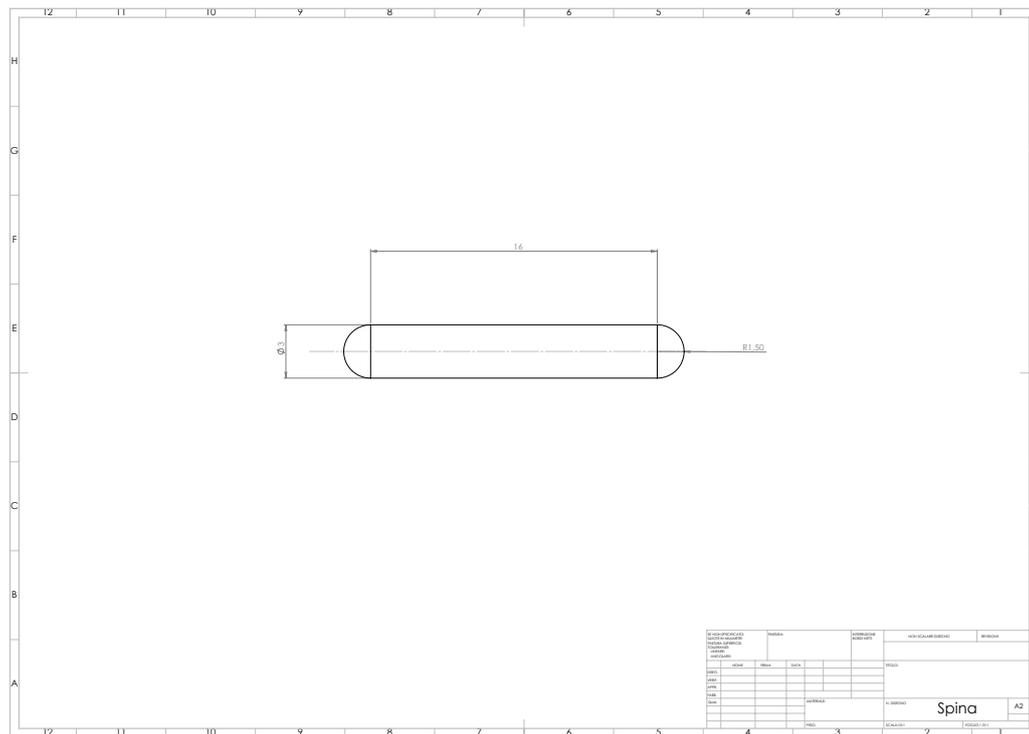


Figura 3.19: Tavola Spina

3.4.7 Cuscinetti

Nel supporto vengono impiegati tre cuscinetti con differenti dimensioni.

Essi servono ad evitare il contatto diretto tra i vari componenti e quindi lo strisciamento nei vari alloggiamenti del supporto e della base.

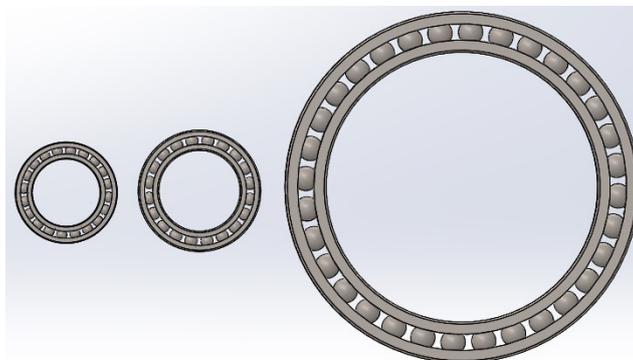


Figura 3.20: Cuscinetti

Di seguito vengono illustrati i vari tipi di cuscinetti utilizzati:

- **Cuscinetto Albero**

E' il cuscinetto con dimensioni del diametro esterno e interno minori rispetto agli altri due.

Vengono utilizzati due di questo tipo di cuscinetto e, sono impiegati nella rotazione dell'albero all'interno del suo apposito alloggiamento.

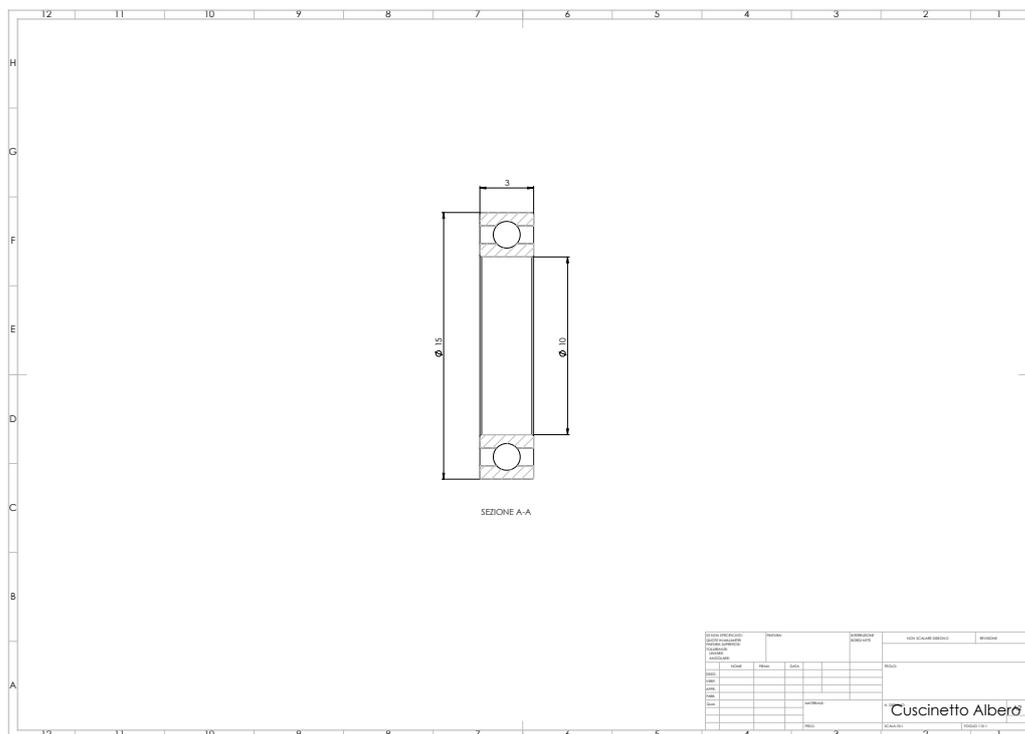


Figura 3.21: Tavola Cuscinetto Albero

3.4.8 Ingranaggio Vite Senza Fine

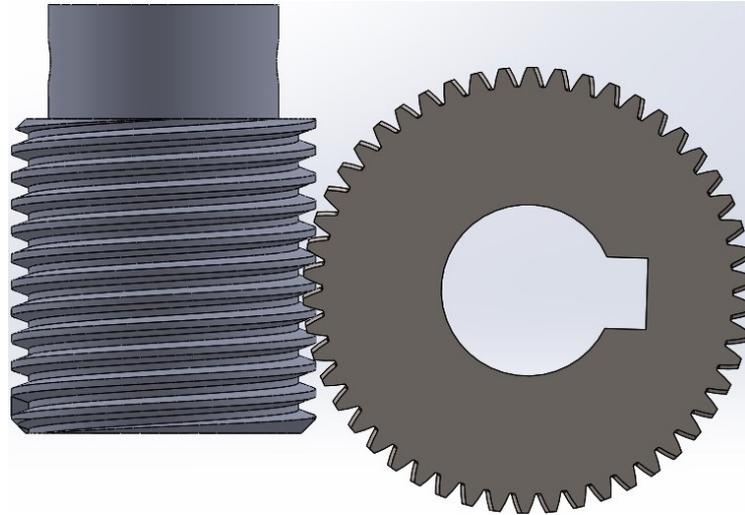


Figura 3.24: Ingranaggio a vite senza fine

Nel progetto sono presenti due ingranaggi a vite senza fine che gestiscono le rotazioni del supporto e del sostegno della videocamera.

Questo meccanismo presenta un rapporto di trasmissione pari a 50 : 1.

Entrambe i componenti sono stati scelti dal catalogo della *Norelem*.

Di seguito riporto le specifiche tecniche di entrambi i componenti.

Ruota Dentata Elicoidale

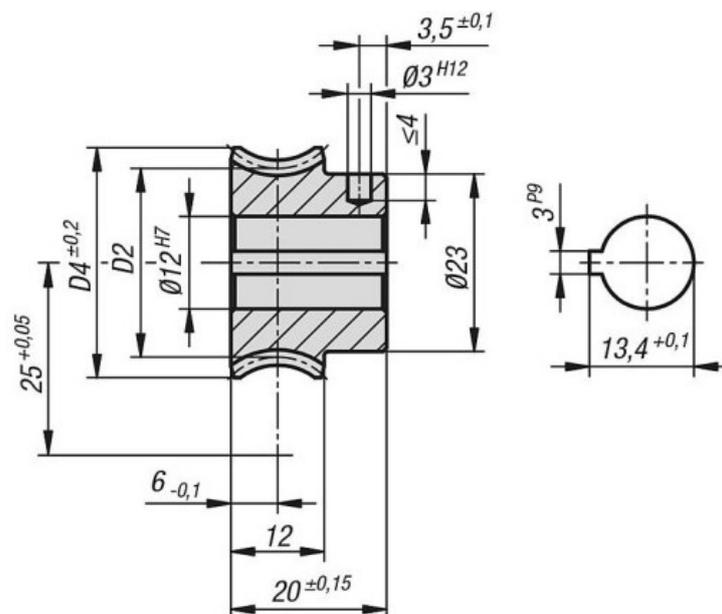


Figura 3.25: Tavola Ruota Dentata

Le specifiche tecniche della ruota sono:

- **Modulo:** $m = 0.6mm$
- **Angolo di inclinazione:** $\alpha = 1.43^\circ$
- **Numero di denti:** $z = 50$
- **Diametro primitivo:** $D2 = 30.04mm$
- **Diametro esterno:** $D4 = 33.5mm$

Vite Senza Fine

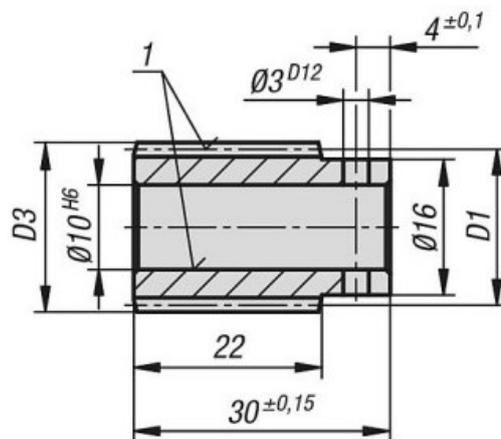


Figura 3.26: Tavola Vite Senza Fine

Di seguito sono riportate le specifiche:

- **Modulo:** $m = 0.6mm$
- **Angolo di inclinazione:** $\alpha = 1.43^\circ$
- **Numero di principi:** $n = 1$
- **Diametro primitivo:** $D1 = 19.96mm$
- **Diametro esterno:** $D3 = 21.16mm$

3.4.9 Viti

Per la realizzazione del supporto sono impiegate 3 viti con utilità differenti.

1. Vite bloccaggio:

Nel progetto sono presenti 4 di queste viti. Esse servono a bloccare il supporto sulla base ed il sostegno sul supporto.

Una volta trovato il giusto posizionamento dell'angolazione della videocamera, queste viti sono utilizzate per serrare i componenti in modo che durante la misurazione non vi siano spostamenti che vadano ad influire sulla corretta misurazione.



Figura 3.27: Vite Bloccaggio

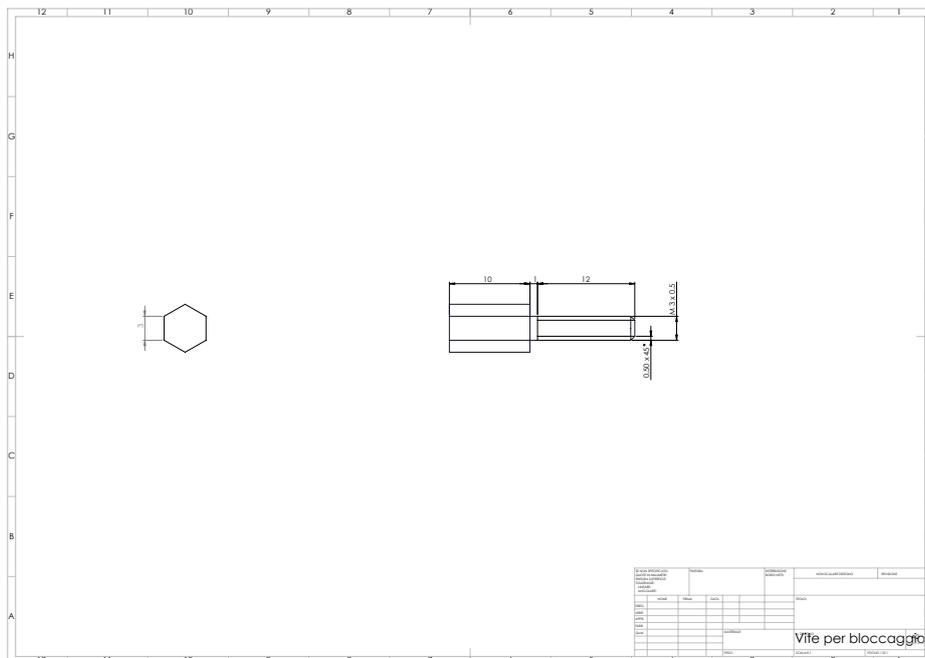


Figura 3.28: Tavola Vite Bloccaggio

2. Vite sostegno:

Troviamo solo una vite di questo tipo; essa è utilizzata per sorreggere il sostegno al supporto.



Figura 3.29: Vite Sostegno

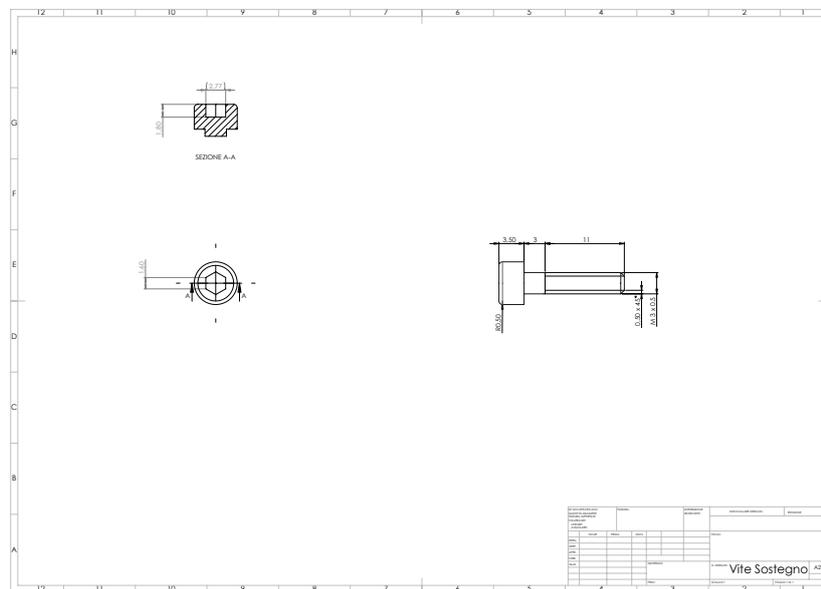


Figura 3.30: Tavola Vite Sostegno

3. Vite fotocamera:

Sono presenti tre di queste viti che servono a bloccare la videocamera sul sostegno tramite gli appositi fori filettati presenti sulla base di essa; consentono, quindi, la tenuta della videocamera anche quando vengono effettuate misurazioni posizionando il supporto orizzontalmente.



Figura 3.31: Vite Fotocamera

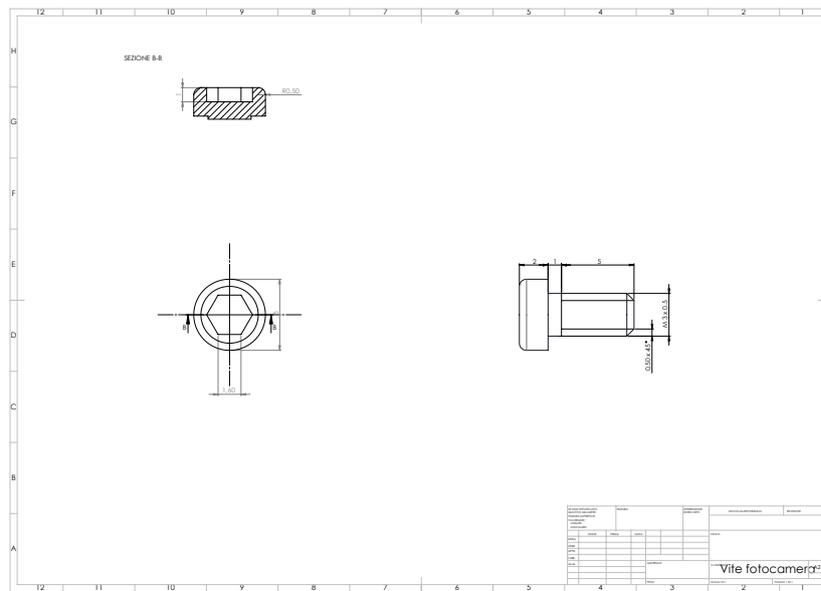


Figura 3.32: Tavola Vite Fotocamera

Tutte le viti presentano una filettatura $M3x0.5$, più nello specifico abbiamo:

- **Vite Bloccaggio** $M3x0.5x11.5$
- **Vite Sostegno** $M3x0.5x10.5$
- **Vite Fotocamera** $M3x0.5x4.5$

3.5 Meccanismo

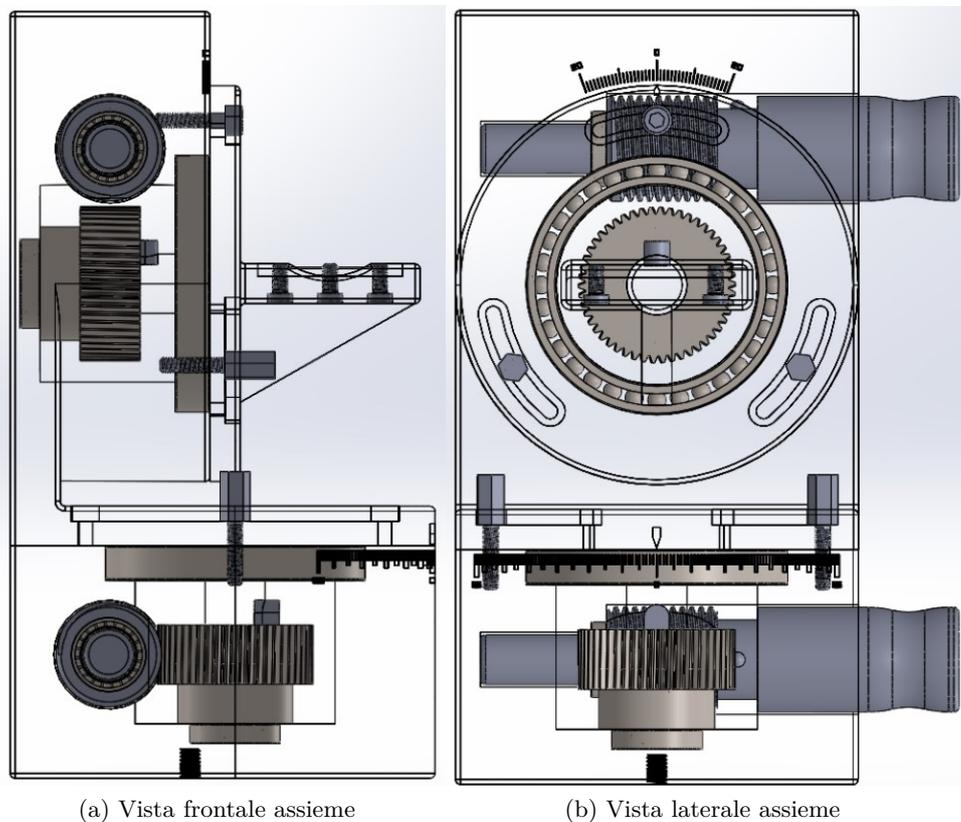


Figura 3.33: Meccanismo interno

Nelle due figure viene rappresentato il meccanismo interno che movimentava il progetto.

Possiamo osservare: due ingranaggi a vite senza fine che regolano le movimentazioni, i vari cuscinetti che consentono di ottenere rotazioni senza strisciamento diretto fra i componenti rotazionali negli appositi alloggiamenti e, le posizioni delle varie viti in funzione del loro utilizzo.

Gli alberi trasmettono, mediante una spina, il moto alla vite senza fine; quest'ultima movimentava la ruota dentata tramite un rapporto di trasmissione.

Attraverso delle sedi presenti sul perno e sulla ruota dentata, viene montata una chiavetta in modo da poter trasmettere il moto dalla ruota dentata al supporto e/o sostegno in base all'albero che verrà movimentato.

Il tutto per regolare, appunto, il beccheggio e l'imbardata, così da ottenere posizioni precise per la videocamera.

Capitolo 4

Stampa Additiva

4.1 Stampante 3D

Per la realizzazione dei vari componenti viene utilizzata la stampante 3D, più precisamente la *Phrozen Transform*.



Figura 4.1: Phrozen Transform

Questa è una stampante di grande formato e presenta:

- Area di costruzione pari a $29 \times 16 \times 40 \text{ cm}$
- Asse Z da 40 cm

Capitolo 4 Stampa Additiva

- Risoluzione XY di $76\mu m$
- Velocità di stampa pari a $50mm/h$

Phrozen Transform è una stampante 3D che utilizza resine fotopolimeriche.

Uno dei principali vantaggi di questa stampante sono i pannelli LCD sostituibili:

- Pannello Singolo da 13.3 pollici, utilizzato quando è necessario stampare un oggetto di grandi dimensioni.
- Doppio Pannello composto da 2 pannelli da 5.5 pollici l'uno, ideale per la stampa di modelli 3D con dettagli molto piccoli.

Il Doppio Pannello consente anche di stampare due modelli contemporaneamente garantendo una maggiore precisione e dimezzando i tempi di stampa.

Il volume totale della camera di lavoro della stampante è di $29.2 \times 16.5 \times 40cm$.

L'asse Z presenta una solida struttura in lega di alluminio con due guide lineari con vite a sfera; queste guide eliminano virtualmente le vibrazioni e facilitano la regolazione della velocità di stampa.

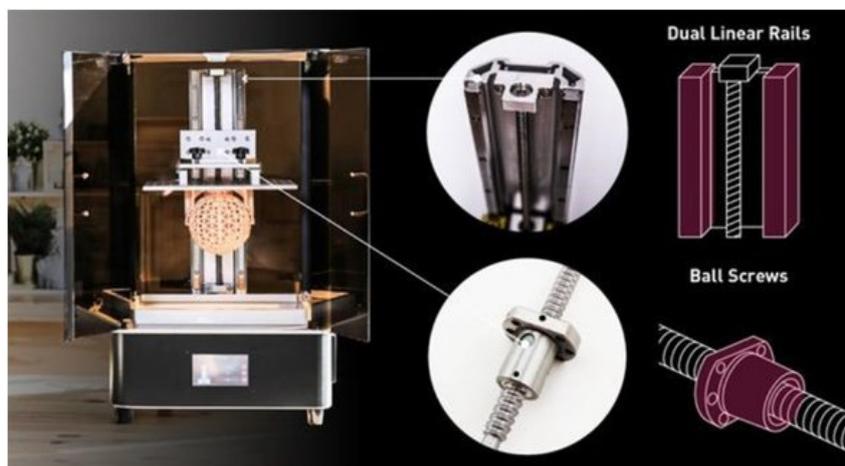


Figura 4.2: Struttura asse Z

Un'altra caratteristica peculiare inerente alla stampante Phrozen Transform è il meccanismo ottico "ParaLED", che viene utilizzato per ridurre l'angolo di radiazione della fonte di luce.

Di seguito viene spiegato il funzionamento di questo meccanismo ottico (ParaLED)

La dimensione della matrice LED è la stessa del pannello LCD.

Il percorso di trasmissione della luce è regolato in modo tale da ridurre l'angolo di divergenza della radiazione LED, creando un flusso luminoso quasi parallelo che riesce a penetrare meglio attraverso il pannello LCD.

Allo stesso tempo, il 95% della superficie dell'area è esposta in modo uniforme dalla luce LED.

Questo meccanismo garantisce un'esposizione uniforme della superficie di stampa e accelera il tempo di polimerizzazione dello strato garantendo stampe ad alta risoluzione.

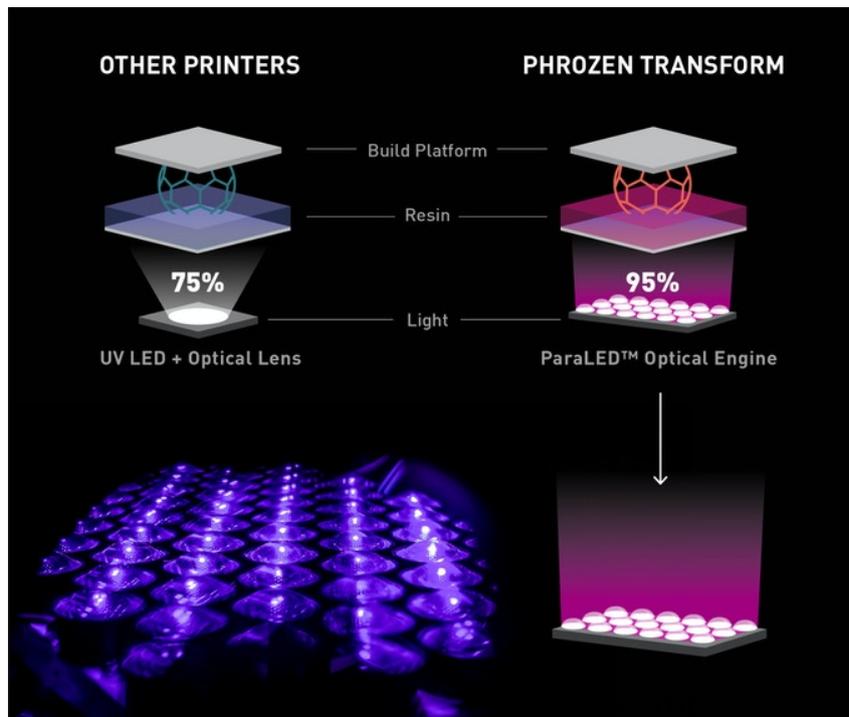


Figura 4.3: Meccanismo ParaLED

4.2 Software di Slicing

Dopo il disegno del componente tramite software CAD, il passo successivo è quello di "affettare" il pezzo per consentire alla stampante di realizzarlo strato per strato.

Per fare ciò vengono impiegati software di slicing.

Lo **slicing** è una delle fasi principali del processo che consente di passare da un modello tridimensionale di un oggetto alla sua versione "affettata" che permette di creare il G-code.

Il G-code è una funzione nel linguaggio di programmazione del controllo numerico e viene impiegato nella definizione del percorso macchina.

Nella fase di slicing, il modello viene tradotto in una serie di "fette" (layer) piane orizzontali, che saranno poi realizzate una sopra l'altra, per depositazione di materiale fuso, dall'estrusore della stampante.

Tramite questi software si possono quindi modificare molti parametri che andranno poi a definire la qualità della stampa. Troviamo anche delle funzioni, che permettono di posizionare il pezzo nella maniera più adeguata sull'area di costruzione della stampante e, funzioni, che consentono di svuotare il modello per ridurre i consumi della resina.

4.2.1 Chitubox

Il software di slicing utilizzato è *CHITUBOX*, programma molto semplice e intuitivo.

Una volta realizzato il modello 3D, ho convertito il file in formato ".stl" in modo che il programma riesca a leggerlo.

Il primo passo è stato quello del posizionamento del modello sull'area di costruzione.

L'orientamento del modello sull'area di costruzione può influire notevolmente sia su quali geometrie sia possibile realizzare, sia sulla qualità di particolari superfici.

Inoltre l'orientamento influisce anche su:

- Tempi: scegliendo l'orientamento giusto in funzione della geometria del pezzo e, trovando il giusto compromesso tra numero e grandezza dei layer si può andare a ridurre i tempi di stampa.

- **Tensioni residue:** scegliendo l'orientamento migliore si può evitare l'insorgere di tensioni residue.

Principalmente si tende ad inclinare il supporto in quanto, stampare il modello in posizione obliqua, riduce la superficie di ciascuno strato e il contatto tra stampa e serbatoio ed aumenta la percentuale di successo della stampa.

Ridurre l'area della superficie significa che la stampa è soggetta a meno forza quando la piattaforma di stampa si solleva dopo ogni strato.

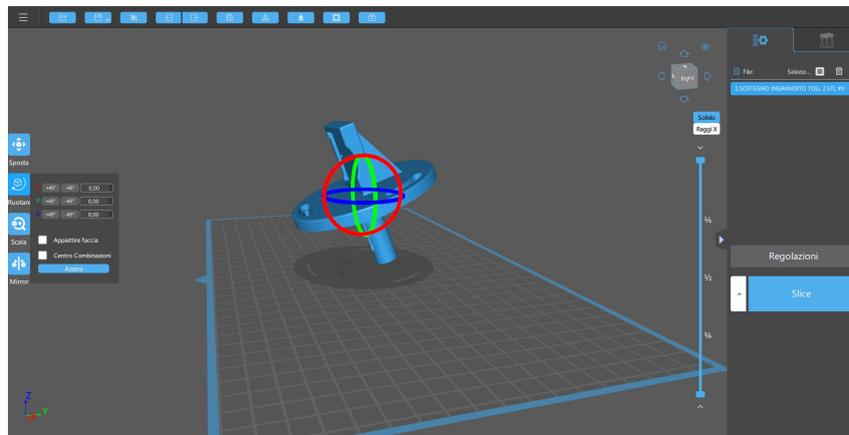


Figura 4.4: Esempio inclinazione modello

Una volta inclinato, il pezzo necessita dei supporti; essi sono fondamentali in quanto, mantengono il modello in posizione durante l'intero processo in modo da ottenere una stampa di successo.

I supporti si suddividono in tre elementi:

- **Base:** forma un appoggio che aderisce alla piattaforma di stampa.
- **Impalcatura:** si dirama dalla base per assicurare stabilità della parte durante la stampa.
- **Punti di contatto:** sono le aree in cui l'impalcatura e il modello si uniscono.

Forme semplici possono essere stampate direttamente sulla piattaforma di stampa senza supporti, mentre modelli altamente dettagliati che presentano sporgenze, spaziature o punti di minimo privi di supporti, necessitano di essere supportati in quanto potrebbe andare a influire sulla riuscita del processo.

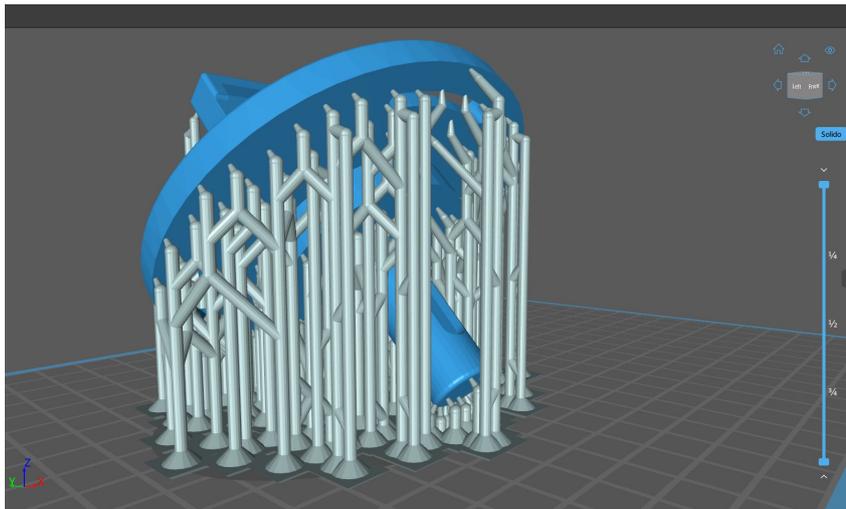


Figura 4.5: Supporti Chitubox

Per la fase di supporto possiamo operare sia con il riempimento automatico, cioè il programma genera automaticamente tutti i supporti in base a dei parametri che possono essere modificati, o essere inseriti manualmente là dove il modello ne ha bisogno.

Un'altra funzione di Chitubox è quello del vero e proprio *slice*, cioè quella di tagliare a "fette" il modello andando a generare i layer che verranno poi proiettati dalla stampante per la realizzazione del componente.

Durante lo slicing il programma è in grado di rilevare le "isole" cioè punti (layer) che verrebbero stampati senza l'appoggio di altro materiale intorno e quindi destinati al fallimento.

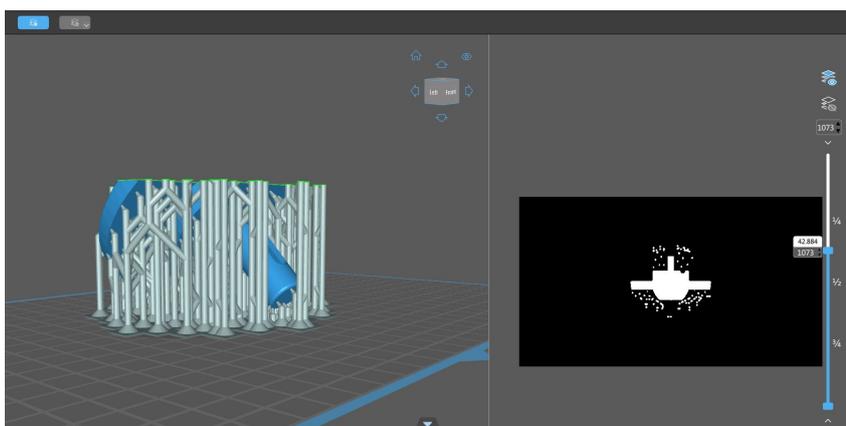


Figura 4.6: Esempio Slicing

4.3 Realizzazione in Stampa Additiva

Come detto in precedenza, per poter passare dal CAD alla realizzazione del modello, abbiamo bisogno dei software di slicing.

Un primo tentativo di stampa è stato realizzato con della resina rossa ed è riuscita con successo, anche se presentava qualche difetto sia di stampa che sui ritiri del materiale una volta riscaldato nel fornello.

Qui il pezzo, nella fase di slicing, è stato inclinato di 45° e i supporti sono stati generati automaticamente dal programma utilizzando i supporti *forti*.

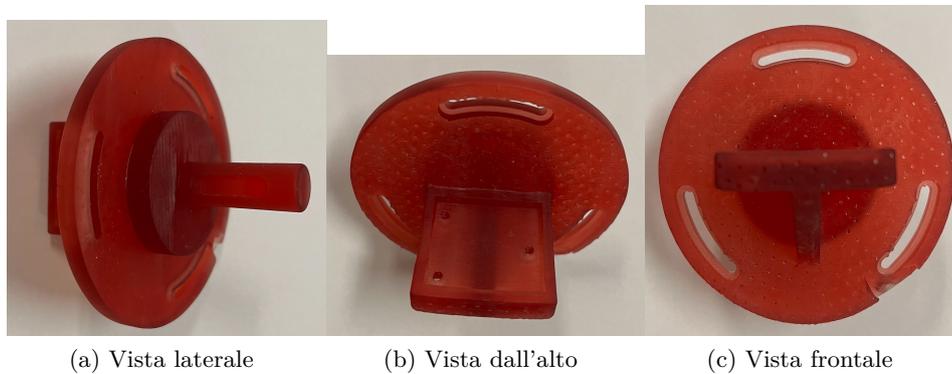


Figura 4.7: Componente realizzato con resina rossa

Come si può notare nella prossimità della guida circolare è presente un difetto dovuto alla stampa che non è riuscita perfettamente.

Per quanto riguarda il ritiro, andando a misurare il componente con il calibro, una volta fatto essiccare bene nel forno, si è notato come quasi tutte le dimensioni sono diminuite di 2 decimi di millesimi.

Un secondo tentativo è stato realizzato utilizzando della resina di colore nero.

Inizialmente ci siamo affidati alla sola generazione automatica dei supporti *medi* andando a modificare solo la densità in percentuale dei supporti.

Abbiamo così verificato che il componente non veniva realizzato, ma ottenevamo solo la realizzazione dei supporti ed un primo layer del componente vero e proprio il quale è rimasto attaccato sul fondo porta resina. Questo ci ha portato a pensare di utilizzare supporti più robusti in quanto pensavamo che il problema fosse che i supporti non reggevano bene il pezzo da realizzare.



Figura 4.8: Primo tentativo di stampa

Dopo il primo tentativo di stampa, che non ha dato risultati, come prima cosa siamo andati a sostituire i supporti utilizzando supporti *forti* ed andando ad ingrandire il diametro dei supporti, portando il diametro del corpo del supporto da $1mm$ a $1.5mm$ ed il diametro della testa da $1.5mm$ a $2mm$.

E' stata sostituita la punta di contatto tra il supporto e il componente vero e proprio: inizialmente presentava una punta a cono, rimpiazzata poi da una punta a sfera.

Queste due modifiche sono state fatte al fine di garantire più contatto tra componente e supporto e per ottenere supporti più grandi in modo da sostenere meglio il componente durante la realizzazione.

Mantenendo però gli stessi parametri di stampa utilizzati in precedenza.

Anche in questo caso la stampante non è riuscita a costruire il componente, ma ci sono stati miglioramenti per quanto riguarda la generazione del modello, in quanto la stampante è riuscita a stampare più layer rispetto al tentativo precedente.

Questo ci ha fatto comprendere che il problema non era più quello dei supporti ma dei parametri di stampa che potevano non essere adatti per quel tipo di resina, in quanto diversa da quella utilizzata nella prima realizzazione riuscita del pezzo, utilizzando resina di colore rosso.

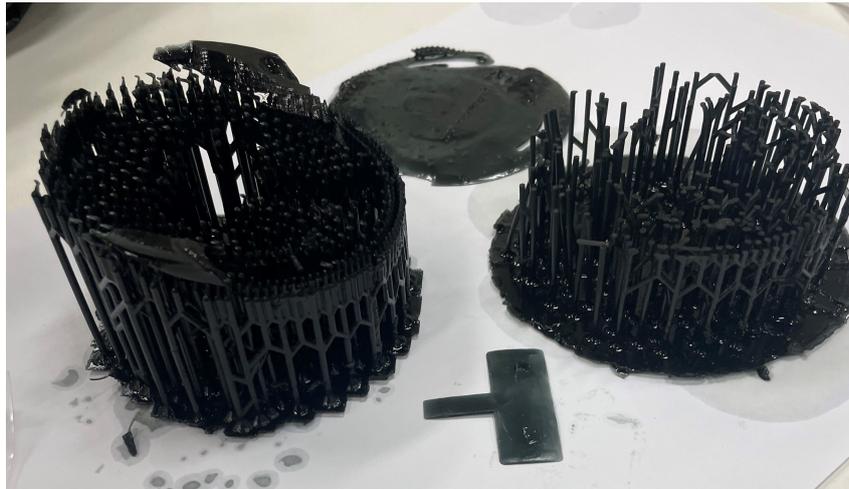


Figura 4.9: Secondo tentativo

Per il terzo tentativo abbiamo proseguito nel seguente modo. Per prima cosa abbiamo generato i supporti *forti* automaticamente, andando poi ad aggiungerne altri manualmente nei punti in cui ci sembrava opportuno che fosse supportato.

Abbiamo modificato i parametri di stampa utilizzando gli intervalli scritti sul contenitore della resina.



Figura 4.10: Parametri resina

Anche in questo caso ci sono stati miglioramenti sulla riuscita della stampa, ma non a tal punto da consentire la riuscita completa del componente, in quanto i layer non riuscivano a solidificarsi in tempo a cause della loro grandezza.



Figura 4.11: Terzo tentativo

In questo tentativo oltre al componente del progetto da realizzare sono stati aggiunti due componenti per osservare come si comportava la stampa con oggetti più piccoli, in modo da capire quale fosse il problema della non riuscita.

Dopo questi fallimenti ci siamo concentrati solo sui parametri di stampa. La non riuscita dei componenti è dovuta al fatto che la stampante non riusciva a solidificare in tempo il layer precedente nel momento in cui stava per essere realizzato quello successivo, e questo portava al distacco dei layer del componente dai supporti andando a influire sulla stampa.

I parametri di stampa sono fondamentali per la corretta realizzazione del componente, in quanto vanno a definire i tempi giusti che devono essere adottati per far sì che i layer riescano a generarsi l'uno sopra l'altro senza che rimangano attaccati sul fondo porta resina e, quindi portando al fallimento della stampa.

Di seguito riporto tutti i parametri di stampa modificabili dal software Chitubox.

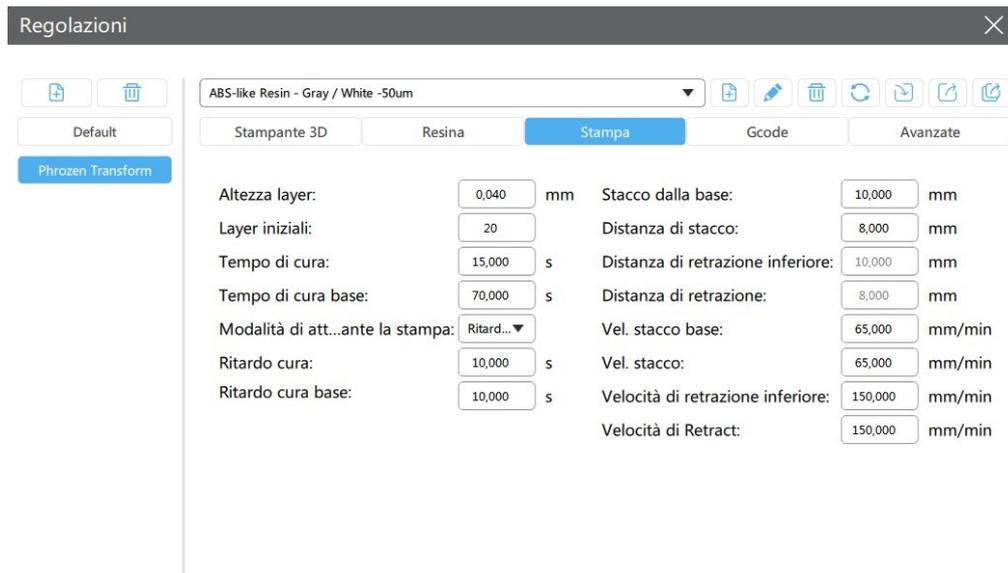


Figura 4.12: Parametri stampa

Tra questi quelli che siamo andati a modificare sono:

- **Tempo di cura:** Nel primo tentativo abbiamo impostato il tempo di cura pari a *5secondi*, per il secondo lo abbiamo portato a *8secondi*, nell'ultimo tentativo è stato impostato pari al massimo consentito dalla resina, quindi *15secondi*.
- **Altezza layer:** Inizialmente impostato a *0.05mm*, nell'ultimo tentativo l'altezza è stata modificata, in quanto vedevamo che non il layer costruito non si solidificava bene e questo impediva l'attaccamento del layer successivo ad esso, ed è stata portata a *0.04mm* aumentando così la durata della stampa.

Nell'ultimo tentativo, andando ad utilizzare questi settaggi, si è notato come la stampa ha avuto grossi miglioramenti in quanto il pezzo più piccolo è stato realizzato quasi completamente, mentre il sostegno della videocamera è riuscito meglio rispetto tutti ai tentativi precedenti.

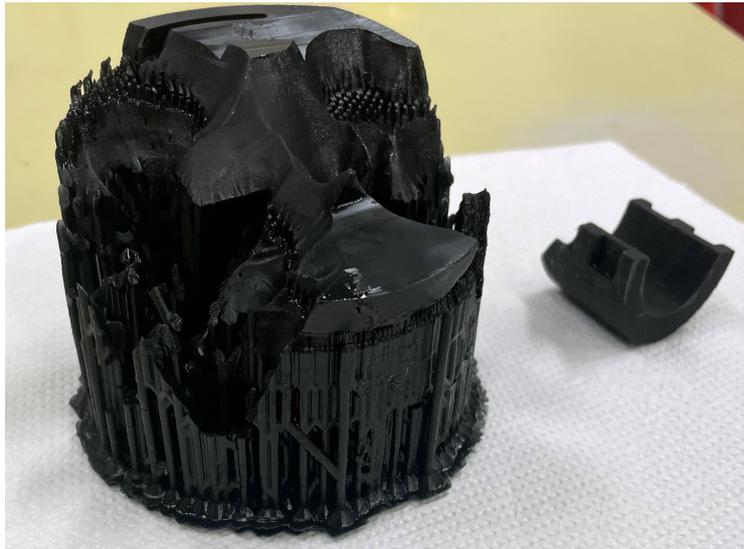


Figura 4.13: Ultimo tentativo

Gli ultimi passi dopo la realizzazione del componente tramite la stampante sono il processo di solidificazione post-stampa attraverso un fornetto a raggi UV portato a 30° per circa un'ora, ed il controllo delle dimensioni per verificare eventuali ritiri del materiale.

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo prefissato in questa attività di progettazione e realizzazione tramite stampa additiva, è stato quello di constatare ed implementare le mie abilità nell'idealizzazione e la successiva sintesi mediante l'uso del software *SolidWorks*, al fine di coordinare tra loro i singoli componenti appartenenti al progetto.

Il risultato è un collettivo di elementi che mettono in moto la videocamera sia nella traslazione lungo una guida che nella regolazione del beccheggio e dell'imbardata del dispositivo utilizzato per la misurazione.

L'esecuzione dei modelli tramite la stampa additiva è stata fortemente caratterizzata dal diverso tipo di resina utilizzata nella realizzazione del componente; si è notato come due diverse colorazioni della resina, utilizzando gli stessi parametri di stampa, portavano a due risultati differenti: utilizzando la resina di colore rosso la stampa del componente è avvenuta con successo (se non per qualche difetto nella vicinanza delle guide circolari e nel ritiro del materiale); mentre applicando la resina nera non siamo riusciti ad ottenere risultati soddisfacenti.

Variando i settaggi dei parametri di stampa, durante l'utilizzo della resina nera, abbiamo riscontrato dei miglioramenti sulla generazione del componente tramite la stampa, senza riuscire ad ottenere un risultato completo poichè i tempi di solidificazione dei vari layer non erano sufficienti alla realizzazione dell'intero componente.

La parte di progettazione mi ha aiutato ad apprendere le dinamiche e l'uso del software, nonchè una maggiore attitudine nell'idealizzare e concretizzare un progetto partendo dai soli movimenti che esso potesse effettuare, senza dovermi basare da un progetto già esistente, sfruttando solo le mie idee.

Capitolo 5 Conclusioni

La parte di stampa, ha contribuito a sviluppare in me una buona predisposizione nel lavorare in team, oltre che una maggiore comprensione della fase di sperimentazione volta ad ottenere risultati accettabili.

Bibliografia

- [1] Balcaen-Reu-Lava-Debruyne. Stereo-dic uncertainty quantification based on simulated images. *Experimental Mechanics*, 57:939–951, 2017.
- [2] McCormick-Lord. Digital image correlation. *materialstoday*, 13:52–54, 2010.
- [3] D.Raabe. Digital image correlation (dic) for local strain measurement in polycrystalline and inhomogeneous materials.
- [4] Rastogi-Hack. *Optical Methods for Solid Mechanics*. Rastogi-Hack, 2012.
- [5] Sebastian-Patterson. Calibration of a digital image correlation system. *SEM*, 2012.
- [6] Balcaen-Wittevrongel-Reu-Lava-Debruyne. Stereo-dic calibration and speckle image generator based on fe formulations. *Experimental Mechanics*, 57:703–718, 2017.