

Andrea Egidi

Misure di rumore su autocollimatore di progetto LUMINAR

R.T. 2/2018

Febbraio 2018

Sommario

Abstract	3
Misure di rumore a carrello fermo	4
Misure di rumore a carrello in moto	11
Misure di rumore a carrello fermo, a lunga distanza: camera Epix + corner cube	13
Sostituzione collimatore Thorlabs con collimatore Micro Laser Systems.....	17
Sostituzione corner cube con sfera retroriflettente.....	19
Taratura del sistema di imaging	19
Conclusioni	21
Figura 1: CAD rappresentativo di un asse di misura.....	3
Figura 2: schema concettuale che rappresenta le parti essenziali del set up	3
Figura 3: vista di insieme del setup usato per le misure di stabilità	4
Figura 4: particolare del setup lato laser	5
Figura 5: particolare del setup lato camera	5
Figura 6: coordinate X e Y dei CdM degli spot.....	6
Figura 7: coordinata X dei centri di massa degli spot.....	6
Figura 8: coordinata Y del CdM degli spot.....	6
Figura 9: confronto delle varianze di Allan delle coordinate X e Y dei CdM degli spot.....	7
Figura 10: confronto fra le deviazioni standard delle coordinate X e Y dei CdM degli spot nelle 6 diverse posizioni della slitta, e andamento delle dimensioni medie dell'ellissoide che interpola lo spot	8
Figura 11: aspetto tipico di uno spot ottenuto come "media" di tutti i frames di un'acquisizione.....	8
Figura 12: visualizzazione tridimensionale dello spot "medio"; l'asse z è la profondità in bit, gli assi X e Y le coordinate sul sensore	8
Figura 13: fit gaussiano (punti rossi) sovrapposto alla rappresentazione 3D dello spot	8
Figura 14: coordinate X e Y dei centri di massa degli spot	9
Figura 15: coordinate X e Y dei CdM degli spot.....	9
Figura 16: varianze di Allan relative alle coordinate X dei CdM degli spot alle frequenze, rispettivamente, di 50 e 3 Hz	9
Figura 17: differenze fra le coordinate Y dei CdM degli spot in presenza (a sinistra) e in assenza (a destra) della luce dei neon durante l'acquisizione	10
Figura 18: PSD delle coordinate X e Y dei CdM degli spot acquisiti a 150 Hz, in presenza del disturbo dei neon.....	11
Figura 19: Short-Time Fourier Transforms delle posizioni X (a sinistra) e Y (a destra) dei CdM degli spot acquisiti a 150 Hz, in presenza del disturbo dei neon	11
Figura 20: confronto coordinate X (a sinistra) e Y (a destra) acquisite con i due diversi metodi (autocollimatore e camera).....	12
Figura 21: sovrapposizione delle coordinate Y e X del CdM ottenute, a carrello in movimento, con l'autocollimatore e con la camera Edmund	13
Figura 22: setup con camera Epix per valutare l'effetto della turbolenza dell'aria con un corner cube posto ad una distanza di circa 10 metri dal pentaprisma	14
Figura 23: varianze di Allan delle coordinate X e Y del CdM relativo al setup in Figura 18, FPS=100.....	15
Figura 24: spot visualizzato sulla camera (a sinistra) e visualizzazione 3D (a destra)	16

Figura 25: ripetibilità con traslazioni in X e Y di 0.25 mm	17
Figura 26: varianze di Allan delle coordinate X e Y del CdM con il collimatore FC20, FPS=25.....	17
Figura 27: spot visualizzato sulla camera (a sinistra) e visualizzazione 3D (a destra).....	19
Figura 28: varianze di Allan di X e Y del CdM, usando la sfera come retroriflettore; la coordinata Y mostra una deriva rispetto alla X; FPS=25	19
Figura 29: segnale relativo alla ripetizione della traslazione della sfera di 250 μm lungo l'asse Y; a sinistra: scala in pixel, a destra: scala in microradianti. FPS=25	19
Figura 30: a sinistra: spot acquisito dalla camera Epix in corrispondenza della posizione centrale (N°5), con un framerate di 25 FPS e con un tempo di esposizione di 1.5 ms; a destra: immagine binaria dello stesso spot.....	20
Figura 31: regressione lineare spostamento CdM spot contro traslazione slitta	20
Figura 32: PSD delle coordinate X e Y del CdM dello spot, con FPS=5 e 150, calcolate su una base di 1000 frames.....	21
Figura 33: deviazioni di Allan delle coordinate X del CdM con FPS=150 (a sinistra) e 5 (a destra).....	21
Figura 34: deviazioni di Allan delle coordinate Y del CdM con FPS=150 (a sinistra) e 5 (a destra).....	21

Abstract

In the context of the Euramet-EMRP JRP [LUMINAR](#) project, one of the preliminary stages required the assessment of the **autocollimator** performances: this is one of the fundamental components of the final set up (Figura 1), and is essentially composed by a collimating lens and a digital sensor capable of acquiring images; positioned at the end of the linear stage, its purpose is to measure the actual misalignment of the undeflected beam and then the yaw and pitch of the equipment that is translated along the axis to follow a retro-reflecting target (Figura 2). The aim of this work is to quantify the **noise** affecting the digital images captured by the autocollimator camera, in different hardware configurations.

Nel contesto del progetto Euramet-EMRP JRP [LUMINAR](#), una delle fasi preliminari ha richiesto la verifica delle performances dell'autocollimatore, che è una delle parti essenziali di quello che è previsto come set up finale (Figura 1) dell'apparato dimostratore. Tale apparato, costituito fondamentalmente da una lente e da un sensore ottico, è deputato a misurare l'imbardata e il beccheggio del carrello che trasla sullo stadio lineare per inseguire il bersaglio retroriflettore (Figura 2). Scopo del presente lavoro è quello di quantificare il rumore da cui sono affette le acquisizioni della camera installata sull'autocollimatore, in presenza di diverse configurazioni hardware.

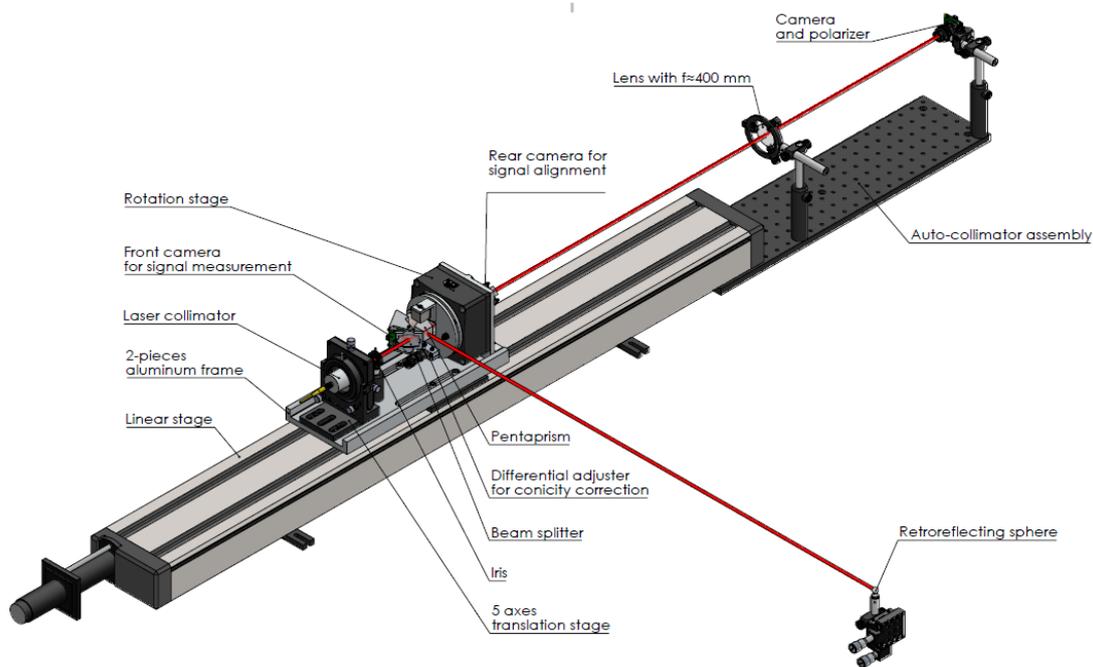


Figura 1: CAD rappresentativo di un asse di misura

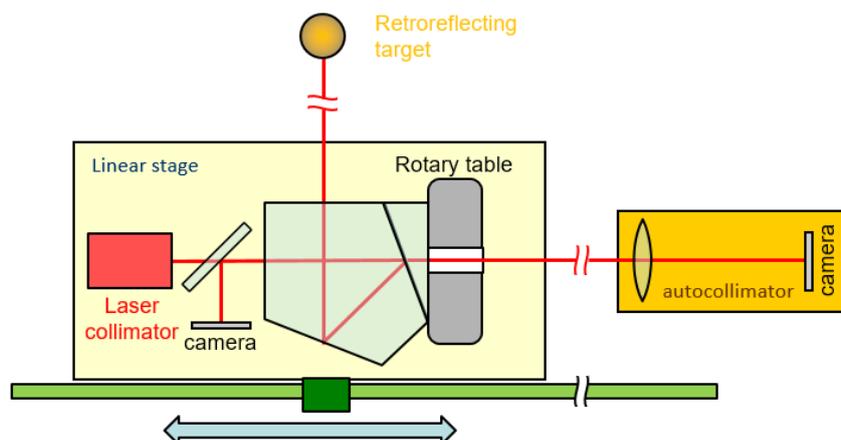


Figura 2: schema concettuale che rappresenta le parti essenziali del set up

Misure di rumore a carrello fermo

Le considerazioni iniziali sulla stabilità del setup per l'autocollimatore hanno richiesto delle acquisizioni in condizioni che fossero relativamente vicine a quelle di esercizio; si sono condotte dunque delle misurazioni focalizzando il fascio del laser a 633 nm con un doppietto di diametro pari a 63 mm, dalla lunghezza focale di 400 mm, su una camera Edmund Optics (modello *EO-10012C*, dalle caratteristiche visibili al seguente [link](#)). Le immagini sono state acquisite tramite il pacchetto software [IDS](#), mentre lo studio del jitter gaussiano del segnale luminoso è stato possibile con tecniche di image processing sfruttando il software open source **ImageJ**.

Seguono alcune foto del setup (Figura 3, Figura 4, Figura 5):

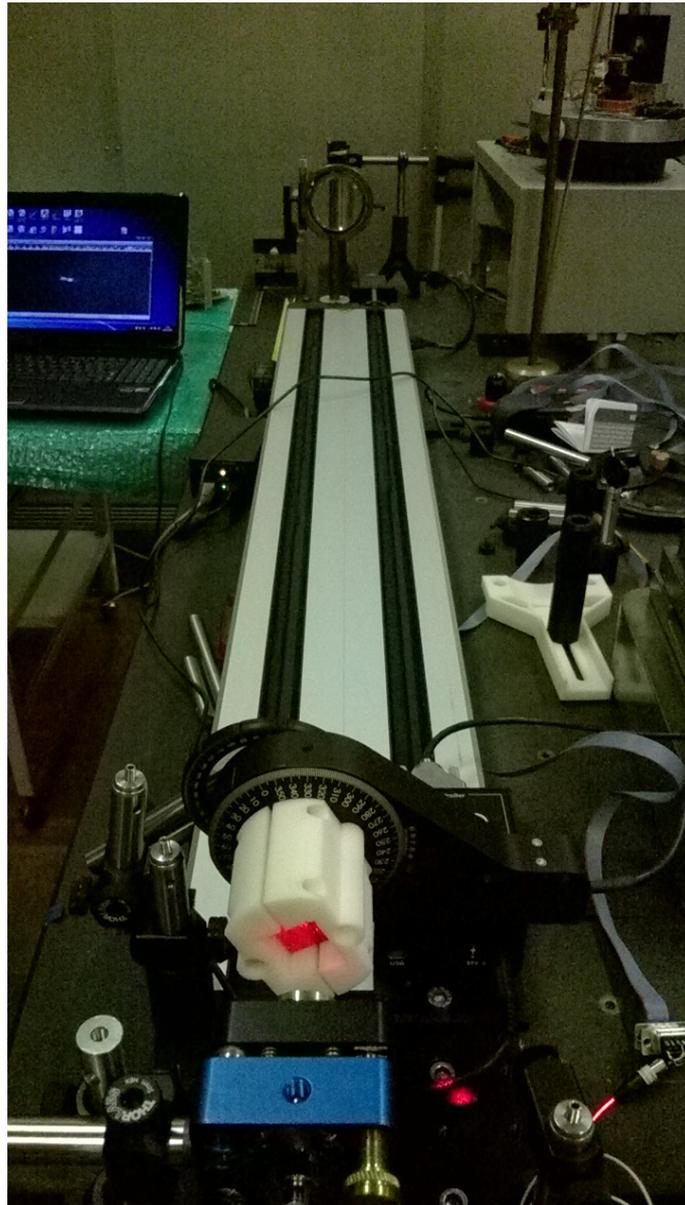


Figura 3: vista di insieme del setup usato per le misure di stabilità

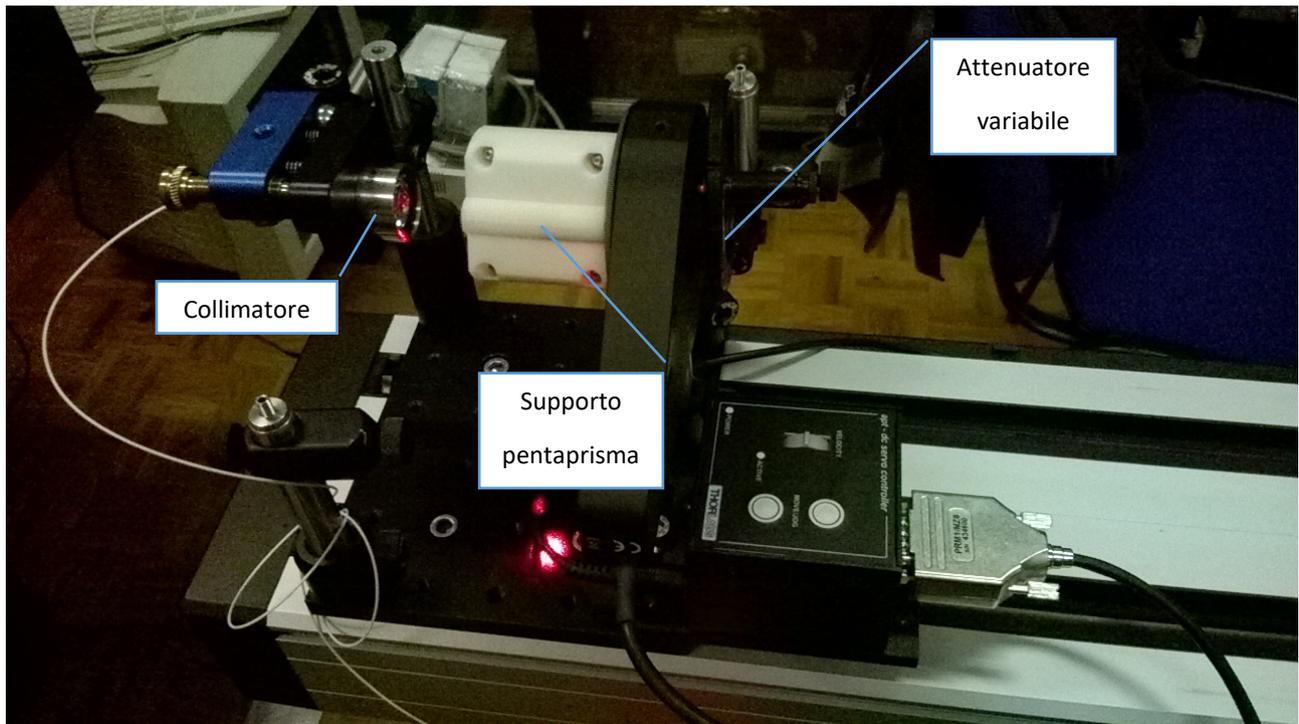


Figura 4: particolare del setup lato laser

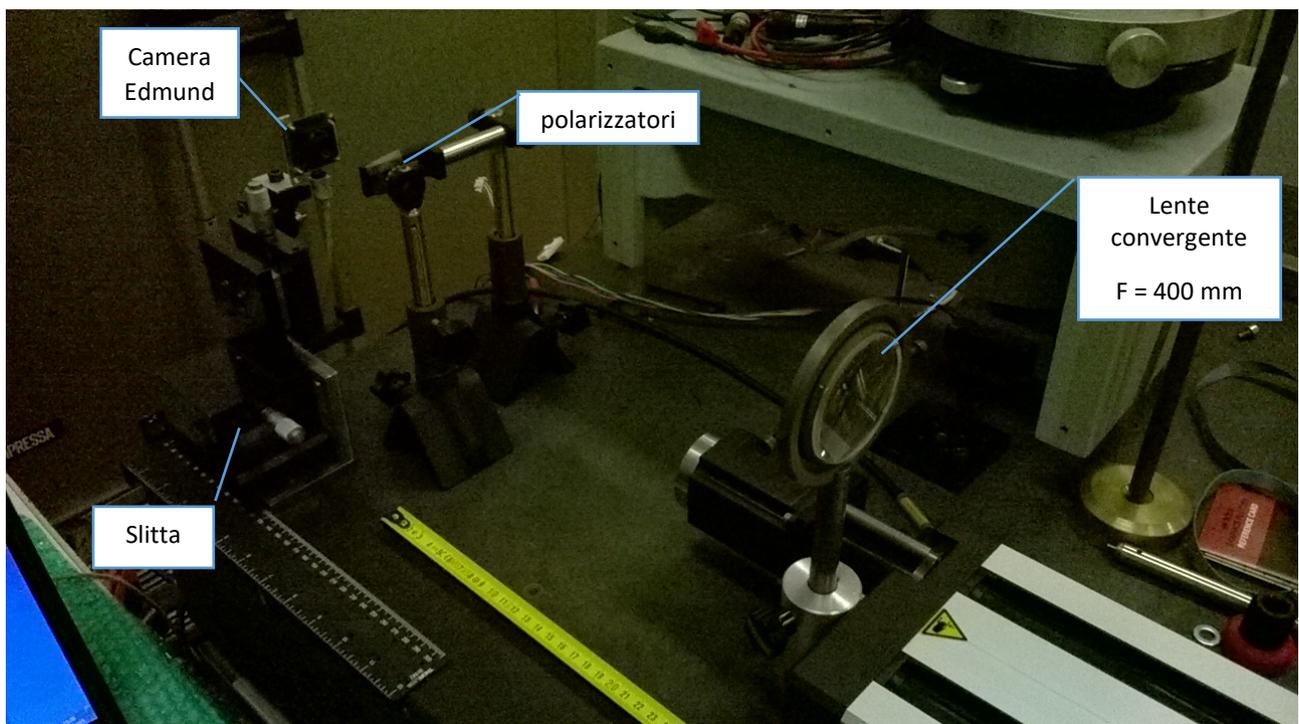


Figura 5: particolare del setup lato camera

Nelle condizioni relative al nostro setup, la sensibilità angolare della camera è pari a $4.175 \mu\text{rad}/\text{pixel}$.

Le prime acquisizioni si sono condotte fissando la distanza di ciascuna delle ottiche impiegate rispetto all'altra, per analizzare gli effetti indotti dalla combinazione di **turbolenza dell'aria** –che induce il fenomeno noto come *beam wandering*-, **derive termiche**, **discontinuità nella potenza del laser** ecc. Per far ciò, si è acquisito un numero arbitrario di frames (tipicamente 5000, focalizzando l'attenzione su una piccola ROI di

448 pixel \times 448 pixel centrata sullo spot -così da avere un framerate elevato pur senza applicare alcun binning-) e si è analizzata la variazione delle coordinate del centro di massa (*CdM*) dello spot, in due diverse configurazioni hardware:

1. Con un collimatore Thorlabs [CFC-11X-A](#) ;
2. Con un collimatore Thorlabs [F810FC-635 - 635 nm FC/PC](#).

Nella prima configurazione, i grafici relativi alle variazioni in X e Y del CdM, con un framerate di 46.6 Hz e un tempo di esposizione di 0.2 ms, sono quelli mostrati nella Figura 6, 7, e 8:

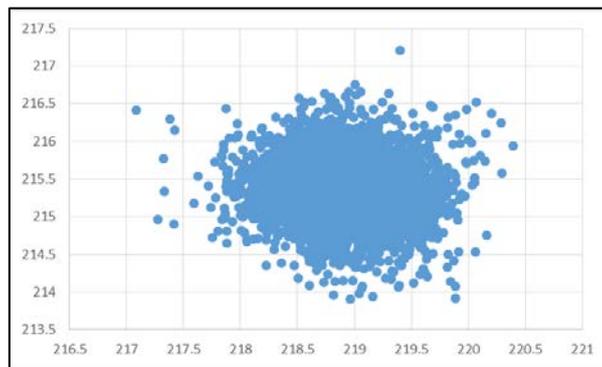


Figura 6: coordinate X e Y dei CdM degli spot

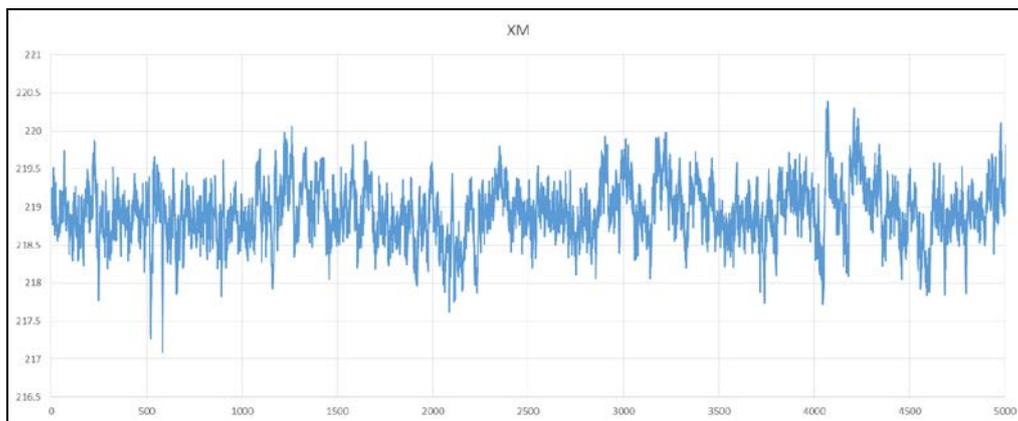


Figura 7: coordinata X dei centri di massa degli spot

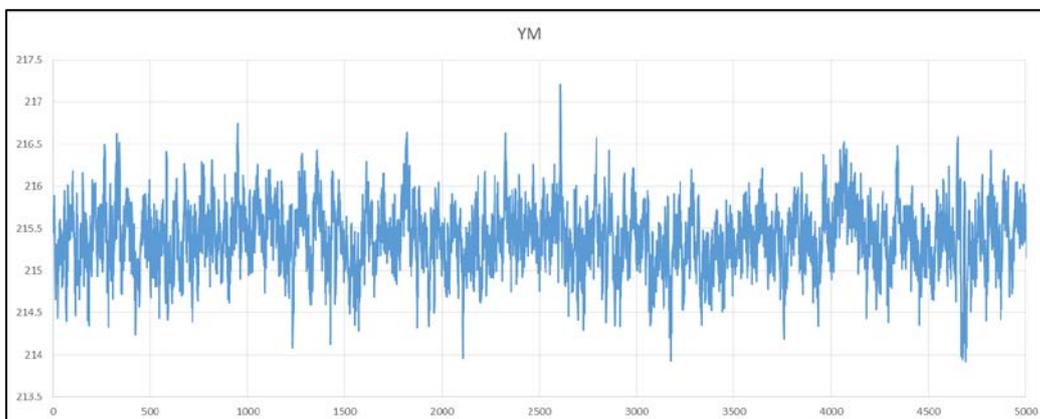


Figura 8: coordinata Y del CdM degli spot

XM medio	YM medio	σ_x	σ_y	inc standard X	inc standard Y
218.927	215.377	0.379	0.388	0.005	0.005

Tabella 1: valori in pixel delle coordinate medie dei CdM degli spot, delle deviazioni standard e delle incertezze standard

Si è dunque analizzata la varianza di Allan nell'arco temporale dei circa 110 secondi necessari per fare l'acquisizione, come mostrato in Figura 9:

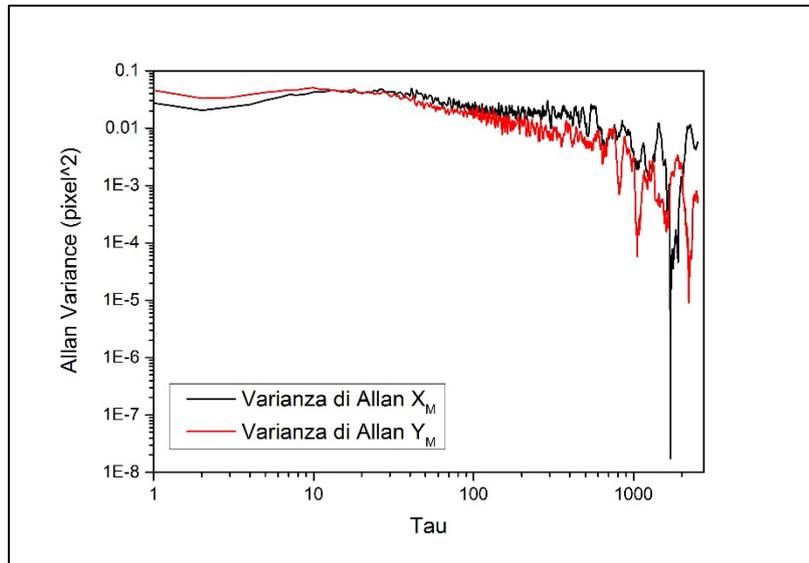


Figura 9: confronto delle varianze di Allan delle coordinate X e Y dei CdM degli spot

Nella stessa configurazione hardware, poi, si è cercato un legame fra la stabilità e la dimensione dello spot sulla camera, cercando cioè di lavorare fuori fuoco, traslando la camera sulla slitta di quantità discrete -due a destra e due a sinistra rispetto all'ipotetico punto di fuoco-; in realtà, vista l'entità della lunghezza di Rayleigh con un fascio dalle dimensioni così piccole (circa 2 mm, secondo le specifiche), non si sono potute apprezzare differenze importanti nelle dimensioni del waist allontanandosi di pochi mm dalla distanza focale di 400 mm... Analizzando però le immagini ottenute mediando le intensità dei pixel dei frames di ciascuna acquisizione, si è potuto ricavare che la posizione centrale non era esattamente quella del fuoco: fittando infatti le matrici di pixel delle suddette immagini con funzioni gaussiane del tipo

$$z = z_0 + A \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-x_c}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y-y_c}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right]$$

si sono ricavati i seguenti valori:

parametro	-5 mm		-2.5 mm		pos 0		+2.5 mm		+5 mm	
	valore	err. standard								
z0	1.27	0.01	1.32	0.00	1.44	0.01	1.42	0.01	1.41	0.01
A	151.44	0.04	159.10	0.04	180.28	0.05	175.79	0.05	181.31	0.04
xc	210.32	0.01	221.77	0.01	221.40	0.01	222.00	0.01	224.26	0.01
σ_x	41.61	0.01	40.43	0.01	39.15	0.01	38.23	0.01	37.34	0.01
yc	239.39	0.01	233.81	0.01	209.75	0.01	192.78	0.01	179.94	0.01
σ_y	42.44	0.01	41.37	0.01	39.36	0.01	39.24	0.01	38.88	0.01
area ellissoide (px ²) =	7691.15		7284.33		6711.16		6533.94		6322.29	
area ellissoide (μm ²) =	21449.85		20315.26		18716.74		18222.50		17632.23	

Tabella 2: parametri dei fit gaussiani degli spot ottenuti mediando tutti i frames di ciascuna acquisizione

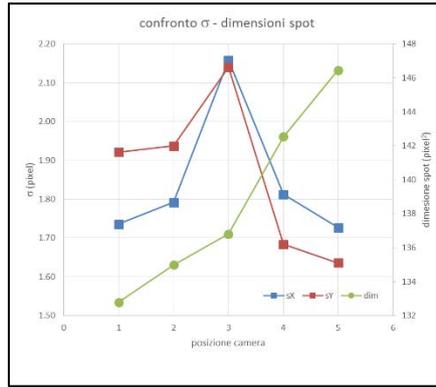


Figura 10: confronto fra le deviazioni standard delle coordinate X e Y dei CdM degli spot nelle 6 diverse posizioni della slitta, e andamento delle dimensioni medie dell'ellissoide che interpola lo spot

laddove l'area dell'ellissoide è stata ricavata con la formula seguente:

$$A = \frac{\pi}{4} FWHM_x \cdot FWHM_y = 2\pi \ln 2 \cdot \sigma_1 \sigma_2 \cong 4.355 \sigma_1 \cdot \sigma_2$$

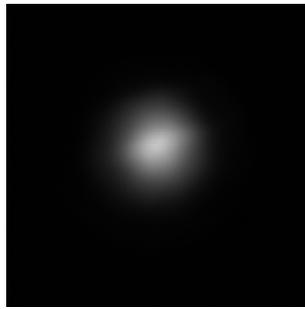


Figura 11: aspetto tipico di uno spot ottenuto come "media" di tutti i frames di un'acquisizione

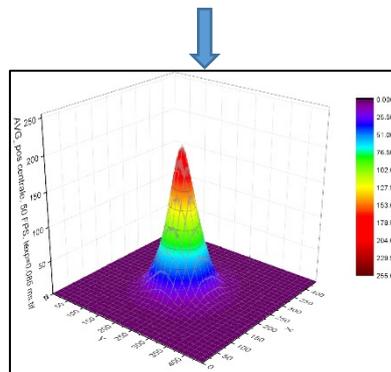


Figura 12: visualizzazione tridimensionale dello spot "medio"; l'asse z è la profondità in bit, gli assi X e Y le coordinate sul sensore

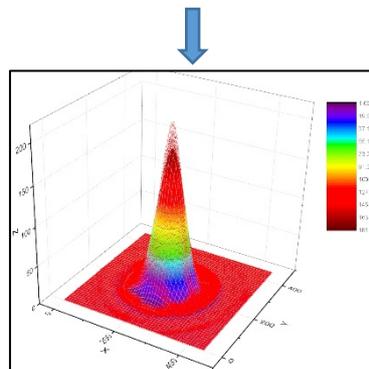


Figura 13: fit gaussiano (punti rossi) sovrapposto alla rappresentazione 3D dello spot

La fase successiva è consistita nella ripetizione di queste misure cambiando il setup nel modo anticipato sopra, ovvero utilizzando un collimatore Thorlabs che fa uscire un fascio più largo (6.7 mm, secondo le specifiche Thorlabs).

La prima misura è servita ad analizzare le differenze relative alla stabilità nelle misure ad alta frequenza rispetto a quelle a bassa frequenza: si sono confrontati i CdM di 5000 frames acquisiti rispettivamente a 50 e a 3 Hz, considerando validi i soli valori della coordinata X del sensore; i valori di Y risultano infatti affetti da un disturbo di carattere periodico che sarà oggetto di indagine nel prosieguo del report:

XM medio	YM medio	σ_x	σ_y	inc standard X	inc standard Y
224.65	215.87	0.24	2.16	4.82E-05	4.32E-04

Tabella 3: riepilogo delle misure di stabilità eseguite in una sola posizione della camera, usando il collimatore F810FC

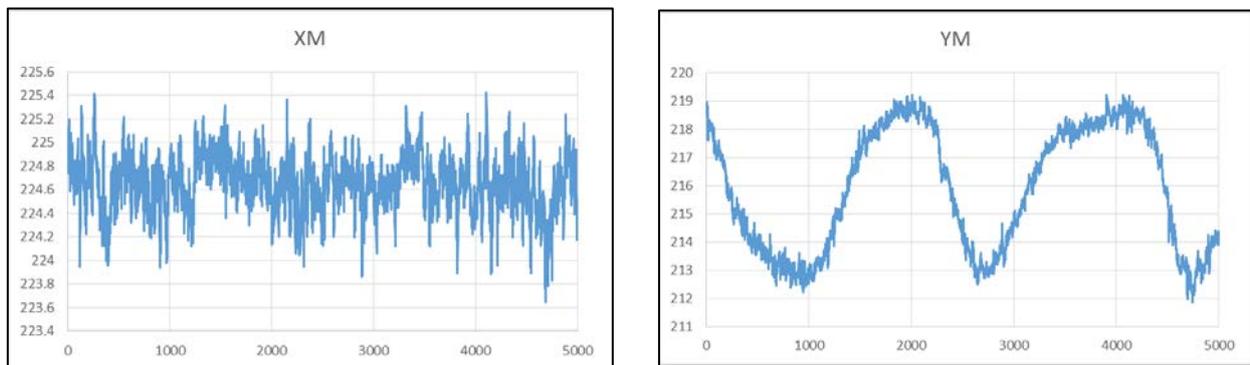


Figura 14: coordinate X e Y dei centri di massa degli spot

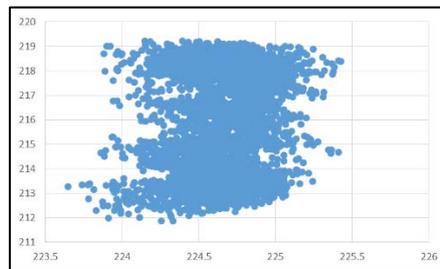


Figura 15: coordinate X e Y dei CdM degli spot

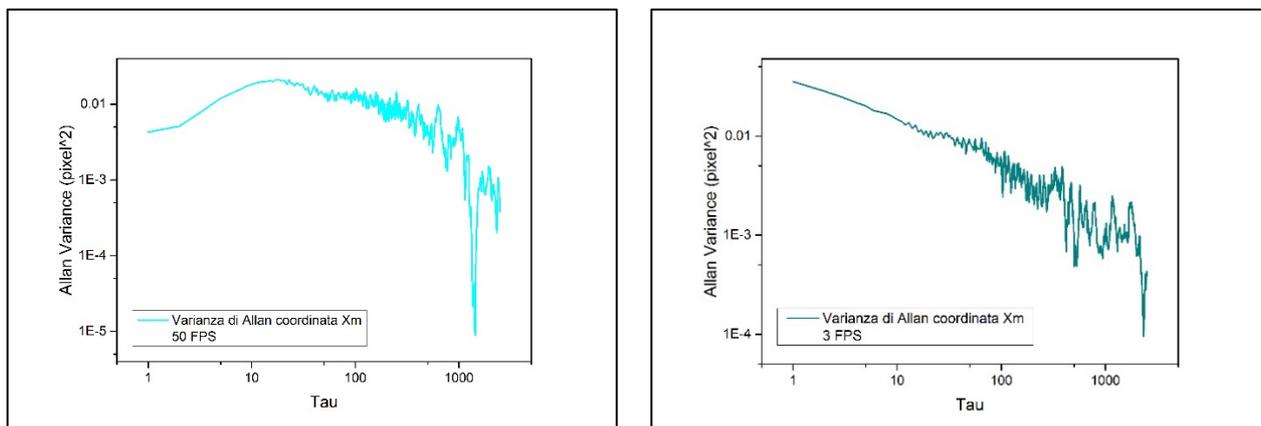


Figura 16: varianze di Allan relative alle coordinate X dei CdM degli spot alle frequenze, rispettivamente, di 50 e 3 Hz

L'utilizzo di un collimatore più grande e l'aver perfezionato la collocazione del sensore nella posizione del fuoco della lente hanno diminuito la dispersione dei dati: nelle misure successive, fatte traslando la camera su una slitta dotata di vite micrometrica e scegliendo 13 posizioni arbitrarie rispetto alle quali fare le acquisizioni (tutte comunque vicine al fuoco della lente), si sono trovati valori della deviazione standard decisamente più piccoli che nel caso dell'altro collimatore (Tabella 4).

posizione	σ_x (pixel)	inc. standard X (pixel)
-8mm	0.22	8.69E-05
-4mm	0.23	9.24E-05
-3mm	0.20	7.96E-05
-2mm	0.20	8.03E-05
-1mm	0.20	7.81E-05
pos centrale	0.22	8.71E-05
+1mm	0.23	9.15E-05
+2mm	0.19	7.45E-05
+3mm	0.22	8.64E-05
+4mm	0.22	8.69E-05
+8mm	0.18	7.01E-05

Tabella 4: valori delle σ_x e delle incertezze standard delle coordinate X dei CdM dello spot nelle 13 posizioni indagate

(i tempi di esposizione sono stati variati ogni volta per avere sempre una buona dinamica dei pixel in corrispondenza dello spot, mantenendo però inalterato il framerate della camera a 50 Hz).

L'origine del disturbo si è individuata nei neon accesi: le acquisizioni con il collimatore piccolo non ne risultano affette, in quanto fatte al buio, mentre le acquisizioni con il collimatore grande hanno la coordinata Y del CdM sempre palesemente caratterizzata da una modulazione; la prova di ciò è contenuta in una coppia di acquisizioni fatte ad hoc, in condizioni che sono identiche tranne che per il fatto di avere i neon alternativamente accesi e spenti; a seguire (Figura 17) due grafici che mostrano la coordinata Y del CdM nelle condizioni illustrate, con il framerate della camera impostato a 25 Hz:

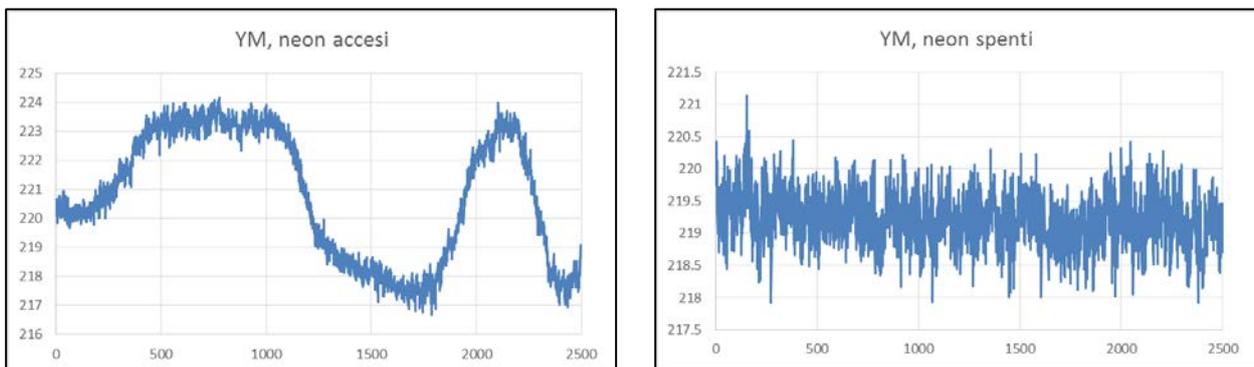


Figura 17: differenze fra le coordinate Y dei CdM degli spot in presenza (a sinistra) e in assenza (a destra) della luce dei neon durante l'acquisizione

Considerando validi i valori presenti nella Tabella 3, prendendo in considerazione il peggior valore della σ (0.23 pixel) e traducendolo in una quantità angolare corrispondente ad un braccio di 400 mm, si può affermare che il nostro sistema è in grado di apprezzare variazioni angolari che stiano al di sopra del parametro di larghezza che caratterizza la distribuzione del jitter del segnale, ovvero superiori al

microradiante: $\alpha = \arctan\left(\frac{0.23 \text{ pixel}}{400 \text{ mm}}\right) = \arctan\left(\frac{0.23 \cdot 1.67 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{400 \text{ mm}}\right) \approx 9.6 \cdot 10^{-7} \text{ rad}$

Allo scopo di isolare il disturbo e caratterizzarlo, si è fatta un'ultima acquisizione a neon accesi campionando 5000 frames ad una frequenza di 150 Hz (riducendo la dimensione della ROI a 448×130 pixel così da

aumentare sensibilmente il framerate massimo della camera); il calcolo della Power Spectral Density ha permesso di individuare un picco alla frequenza di 50 Hz (Figura 18 e Figura 19):

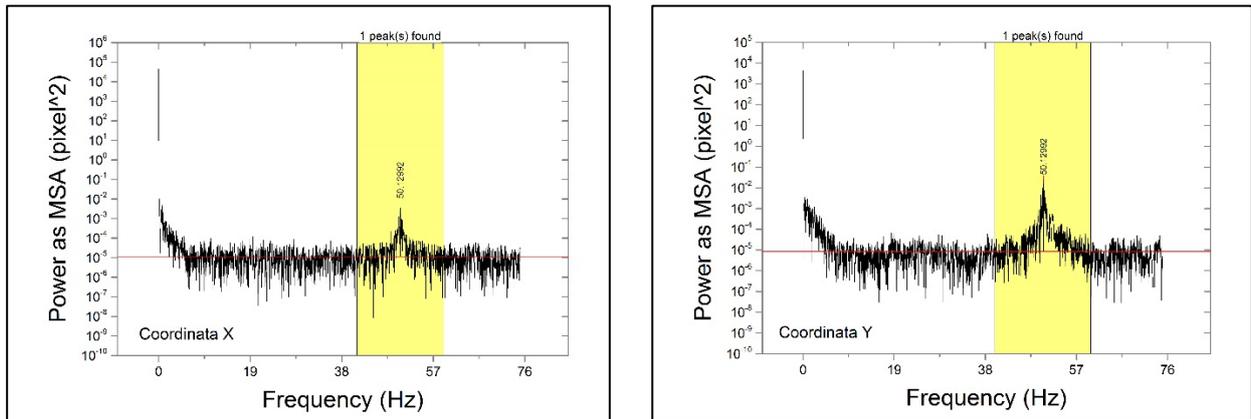


Figura 18: PSD delle coordinate X e Y dei CdM degli spot acquisiti a 150 Hz, in presenza del disturbo dei neon

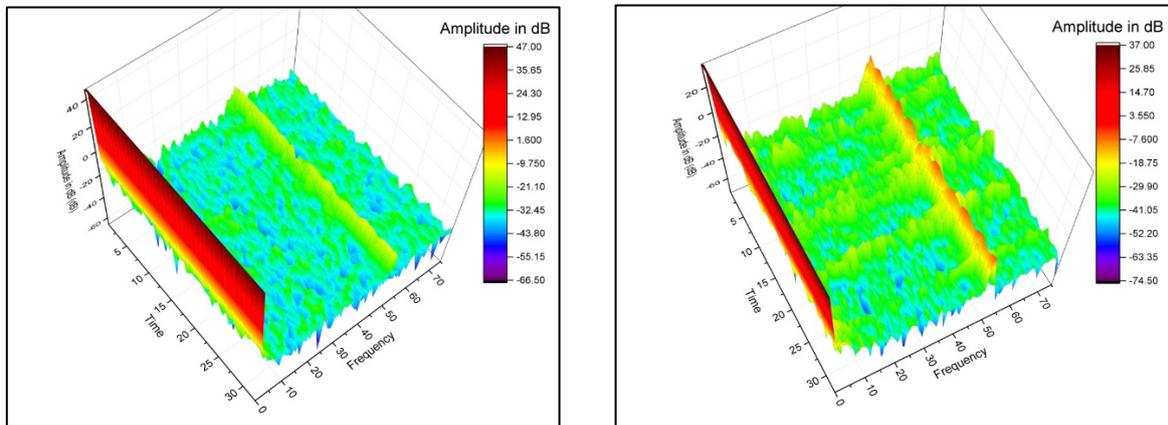


Figura 19: Short-Time Fourier Transforms delle posizioni X (a sinistra) e Y (a destra) dei CdM degli spot acquisiti a 150 Hz, in presenza del disturbo dei neon

Misure di rumore a carrello in moto

La fase seguente è consistita nel confronto tra le letture delle deviazioni angolari ottenute con l'autocollimatore *Elcomat* –il nostro strumento di riferimento– e quelle derivanti dall’analisi dei centri di massa degli spot visualizzati sulla camera Edmund durante la traslazione del carrello sul linear stage (una sola misura “secca”); per questa analisi si sono considerati unicamente i tratti a velocità costante (quindi escludendo la zona iniziale e quella finale, dove il carrello ha, rispettivamente, un’accelerazione e una decelerazione di 500 steps/s²). Segue un breve riepilogo per il confronto fra i due sistemi di misura:

camera Edmund				
N° frames traslazione carrello	N° frames con $v_{\text{carrello}}=\text{cost}$	t_{TOT} traslazione (s)	t con $v_{\text{carrello}}=\text{cost}$ (s)	v media di acquisizione (FPS)
4213	4111	83.4	81.4	50.5

autocollimatore				
N° letture traslazione carrello	N° letture con $v_{\text{carrello}}=\text{cost}$	t_{TOT} traslazione (s)	t con $v_{\text{carrello}}=\text{cost}$ (s)	v media di acquisizione (letture/s)
320	312	83.4	81.4	3.8

motore linear stage	
N° tot steps per traslazione	N° steps con $v=\text{cost}$
41700	40700

campionamento	
camera (steps/frame)	autocollimatore (steps/lettura)
9.9	130.4

Per il confronto dei dati è necessario avere una base comune, e una scelta sensata fa riferimento agli steps del motore man mano che il carrello avanza sulla guida; ri-arrangiando quindi i dati su questa base, sottocampionando le 4111 acquisizioni utili della camera in modo da ottenere un numero di dati il più possibile vicino a quello dell'autocollimatore (che ha con una risoluzione temporale decisamente inferiore) e usando un algoritmo di smoothing basato sulla FFT per rimuovere il rumore legato al jitter gaussiano, ottengo i grafici delle coordinate X e Y del segnale mostrati in Figura 20:

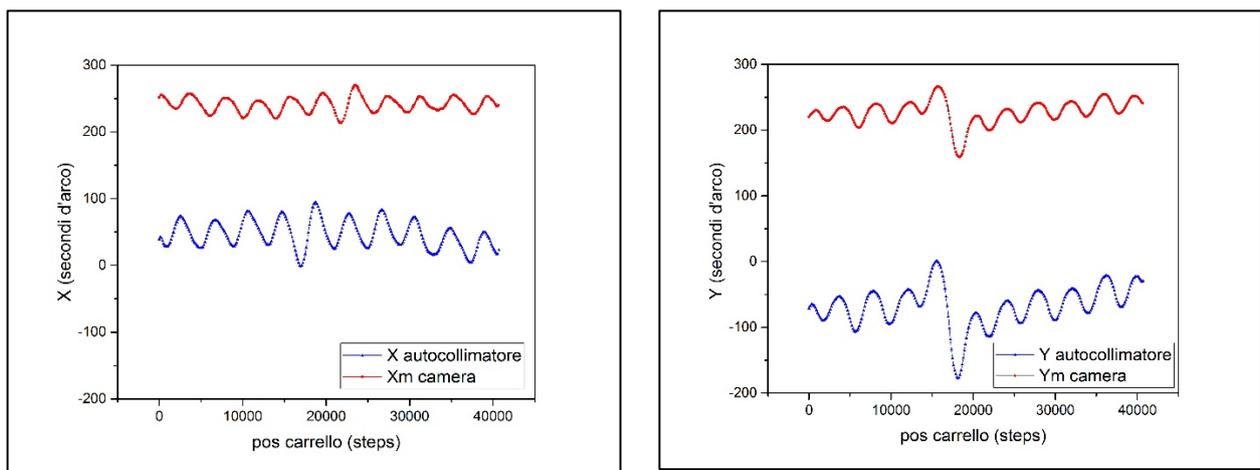


Figura 20: confronto coordinate X (a sinistra) e Y (a destra) acquisite con i due diversi metodi (autocollimatore e camera)

Al di là dello sfasamento orizzontale delle curve (legato alla non precisa corrispondenza fra le basi temporali relative alla camera e all'autocollimatore), tenendo come riferimento le curve X e Y dell'autocollimatore è possibile stimare i parametri di calibrazione che portano alla migliore sovrapposizione dei dati acquisiti con i due metodi.

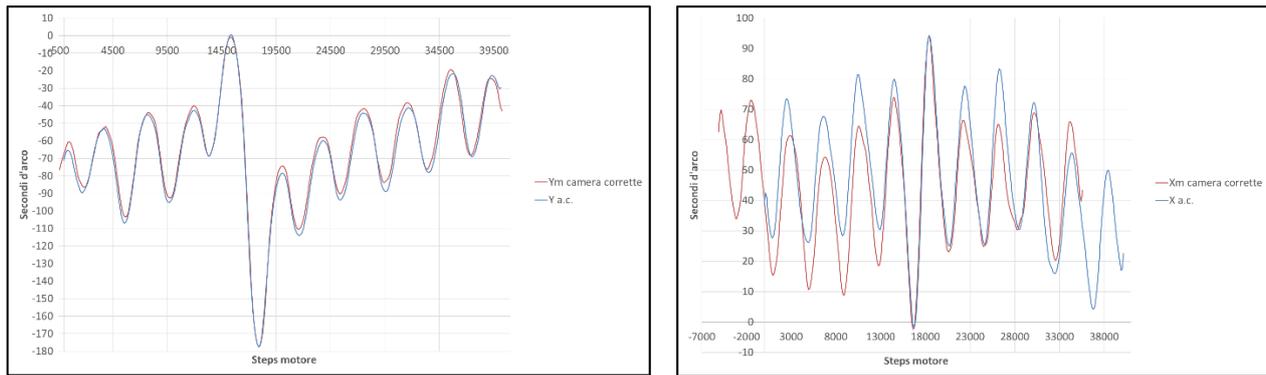


Figura 21: sovrapposizione delle coordinate Y e X del CdM ottenute, a carrello in movimento, con l'autocollimatore e con la camera Edmund

Imponendo il miglior match nelle zone centrali della traslazione, dove si collocano il picco e la valle più grandi, si osserva che è possibile ottenere una buona sovrapposizione complessiva nel caso della coordinata Y (con uno scarto mai peggiore di circa 5 secondi d'arco), mentre nel caso dell'altra coordinata la sovrapposizione appare più forzata (scarti peggiori fra i picchi che si collocano intorno ai 20 secondi d'arco) -Figura 21-; questi valori sono comunque buoni perché gli scarti dal valor medio misurati con l'autocollimatore facevano registrare un picco quantificabile in circa 25 secondi d'arco, quindi siamo dentro la ripetibilità del linear stage. La formula empirica usata per convertire in secondi d'arco le letture (in pixel) delle posizioni dei centri di massa degli spot è la seguente:

$$Y(\text{secondi d'arco}) = k \cdot [Y_m(\text{pixel})] + \Delta Y(\text{secondi d'arco})$$

Dove K è un fattore di conversione che ha le unità di $\left[\frac{\text{secondi d'arco}}{\text{pixel}} \right]$, il cui valore è stato sperimentalmente trovato pari a circa 1.65 e 1.7 per le coordinate Y e X, rispettivamente.

Misure di rumore a carrello fermo, a lunga distanza: camera Epix + corner cube

Utilizzando lo stesso collimatore Thorlabs F810C, si è allestito il setup mostrato nella Figura 22 allo scopo di valutare l'effetto della turbolenza dell'aria allungando il braccio di misura a 10 metri, con il segnale che torna indietro dopo una riflessione su un corner cube. La camera utilizzata per studiare il segnale di ritorno dal corner cube è una [Epix SV643M](#), accoppiata ad un frame grabber [PIXCI S14](#); il software usato per l'acquisizione è [XCAP](#).

In questa configurazione (notare la presenza di una lente davanti alla camera, al fine di focalizzare lo spot), i valori delle deviazioni standard che danno una stima del rumore sono, per le coordinate X e Y del CdM, rispettivamente di 0.89 e 0.9 pixel; questi valori si sono ricavati lavorando su circa 3500 frames (quantità tenuta costante anche nelle successive misure, legata alla dimensione del buffer imposto al programma per il salvataggio delle immagini, pari ad 1 GB) dalla risoluzione di 640 x 480 pixel, acquisiti con un framerate di 100 FPS.

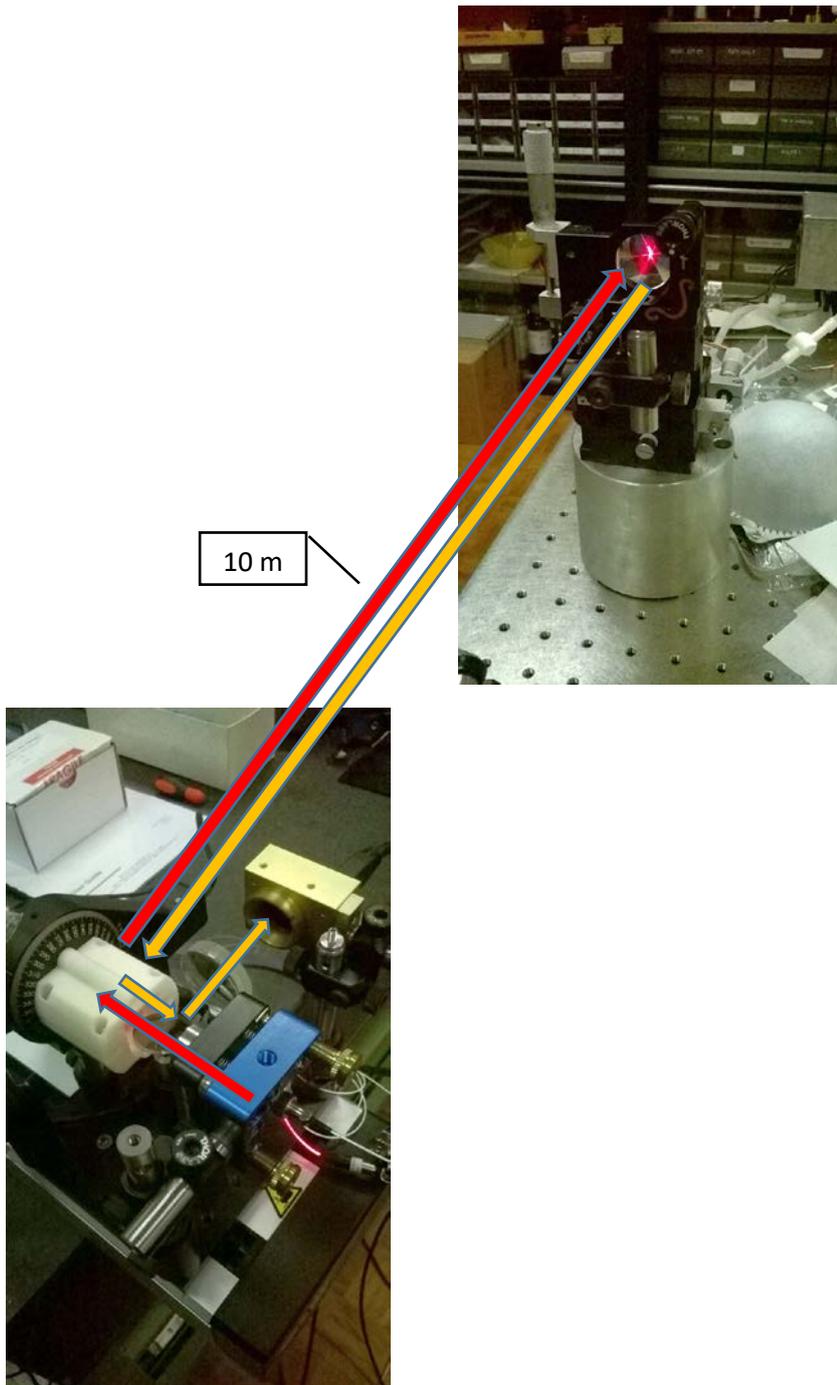


Figura 22: setup con camera Epix per valutare l'effetto della turbolenza dell'aria con un corner cube posto ad una distanza di circa 10 metri dal pentaprisma

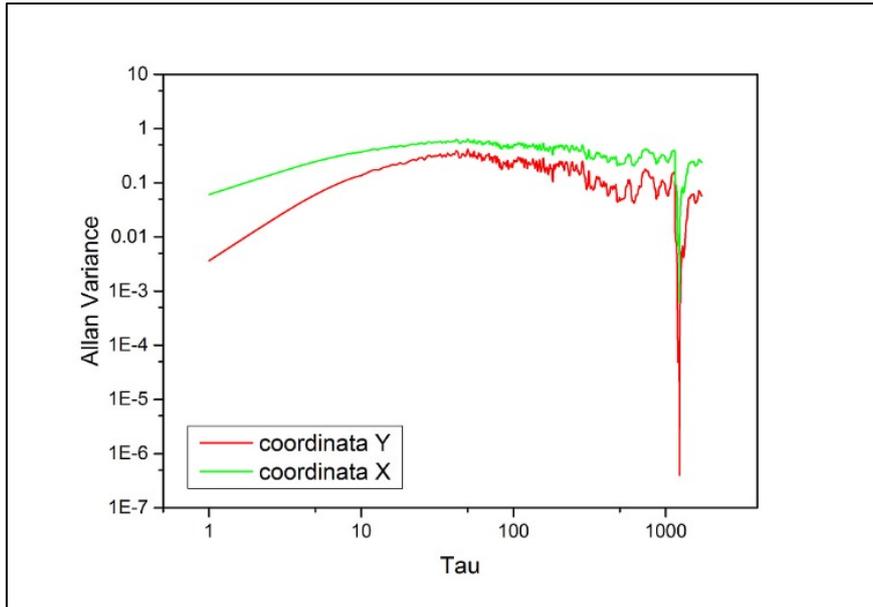
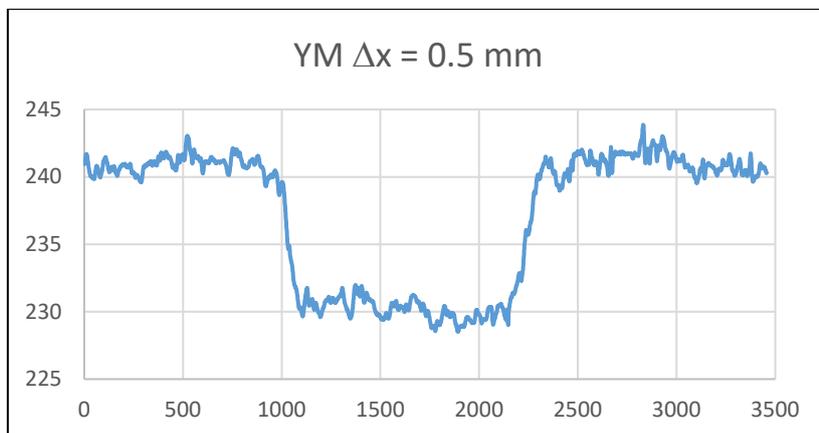
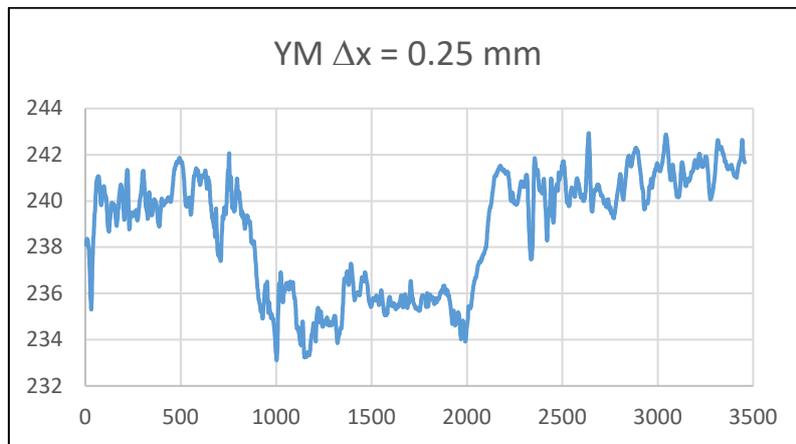
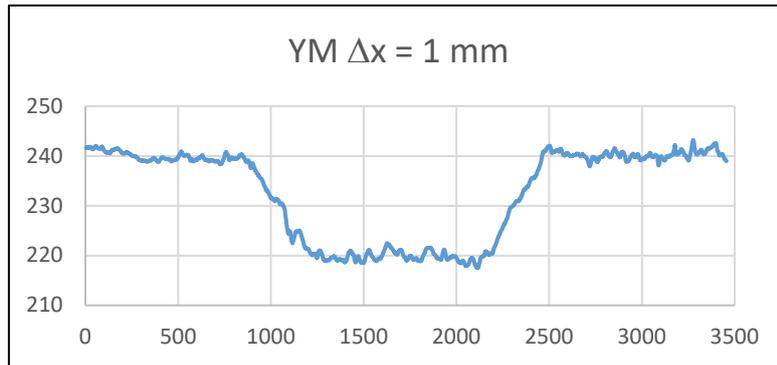


Figura 23: varianze di Allan delle coordinate X e Y del CdM relativo al setup in Figura 18, FPS=100

Si sono poi operate delle traslazioni (di 0.25, 0.50 e 1 mm) su un asse della slitta (sulla quale era montato il riflettore), allo scopo di valutare la sensibilità del sistema, abbassando il framerate a 25 FPS così da aumentare il tempo di acquisizione; i risultati nei grafici a seguire:





Le distanze picco-picco che quantificano la mappatura sulla camera, in pixel, delle traslazioni operate di 0.25, 0.5 e 1 mm sono, rispettivamente, pari a (circa) 5, 10 e 20 pixel; tenendo conto del fatto che il pixel size della camera è pari a $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ si evince che il nostro sistema ha una risoluzione massima di circa 50 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (ovvero di 0.02 pixel/ μm): traslazioni di entità inferiore a 0.25 mm sarebbero infatti mascherate dal rumore. Si può dunque imporre una relazione lineare fra spostamento D (in pixel) sulla camera del CdM dello spot e traslazione d (in μm) del retroriflettore lungo un asse della slitta del tipo $D = k \cdot d$, dove $[k] = [\text{pixel} \cdot (\mu\text{m})^{-1}]$ e, tenendo conto che dalla geometria del sistema, si può scrivere la relazione $L \tan \alpha = d$, con L =distanza del retroriflettore dalla camera (=10 metri) ed α = angolo sotto cui è vista dalla camera la traslazione di quello; traducendo dunque in quantità angolari la risoluzione calcolata prima, si può affermare che il nostro sistema è in grado di apprezzare, sopra il rumore, variazioni nella posizione del retroriflettore rispetto alla camera non inferiori al seguente angolo, a 10 metri di distanza:

$$\alpha_{\min} = \arctan\left(\frac{D_{\min}}{kL}\right) = \arctan\left(\frac{5 \text{ pixel}}{0.02 \frac{\text{pixel}}{\mu\text{m}} \cdot 10^7 \mu\text{m}}\right) \cong 25 \mu\text{rad}$$

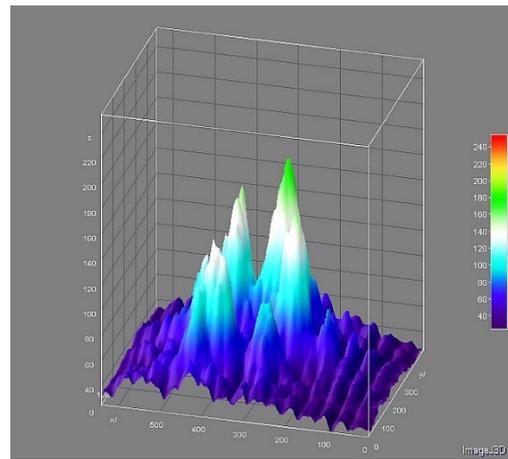
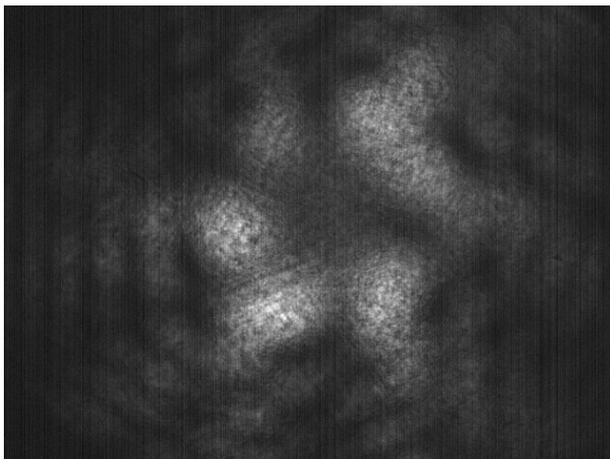


Figura 24: spot visualizzato sulla camera (a sinistra) e visualizzazione 3D (a destra)

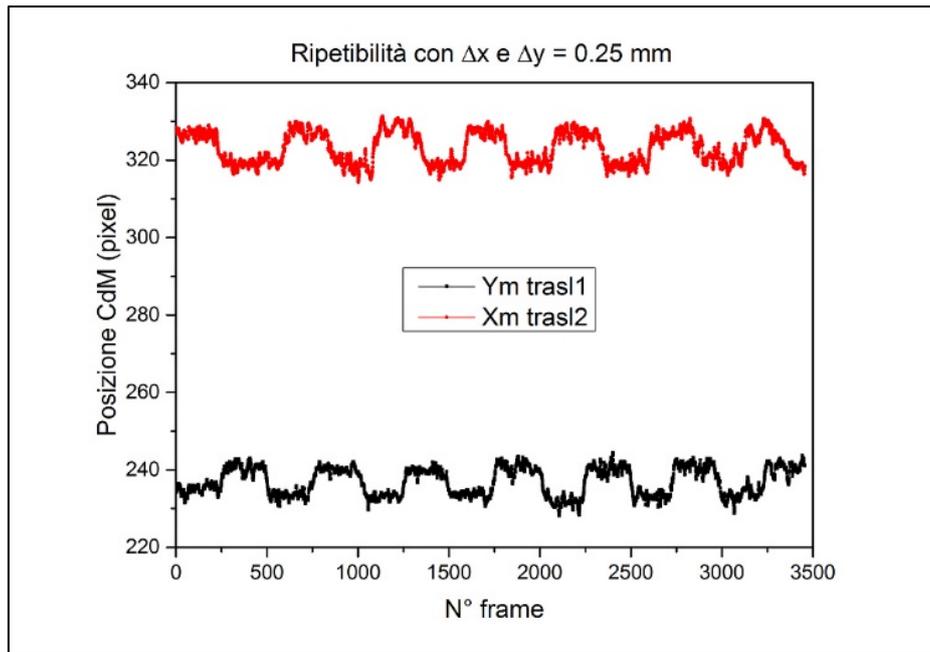


Figura 25: ripetibilità con traslazioni in X e Y di 0.25 mm

Sostituzione collimatore Thorlabs con collimatore Micro Laser Systems

La successiva variazione del setup ci ha visti sostituire il collimatore Thorlabs F810C con quello che sarà il collimatore definitivo, cioè il modello FC20-NIR1-T della [Micro Laser Systems](#). Per trovare una corrispondenza diretta fra traslazione del corner cube e spostamento del CdM dello spot sulla camera si è rimossa la lente convergente, quindi si sono ripetute le stesse misure fatte nella configurazione precedente. Nella misura "statica" i valori delle deviazioni standard per X e Y sono, rispettivamente, pari a 4 e 3.4 pixel, e in Figura 26 sono mostrate le varianze di Allan.

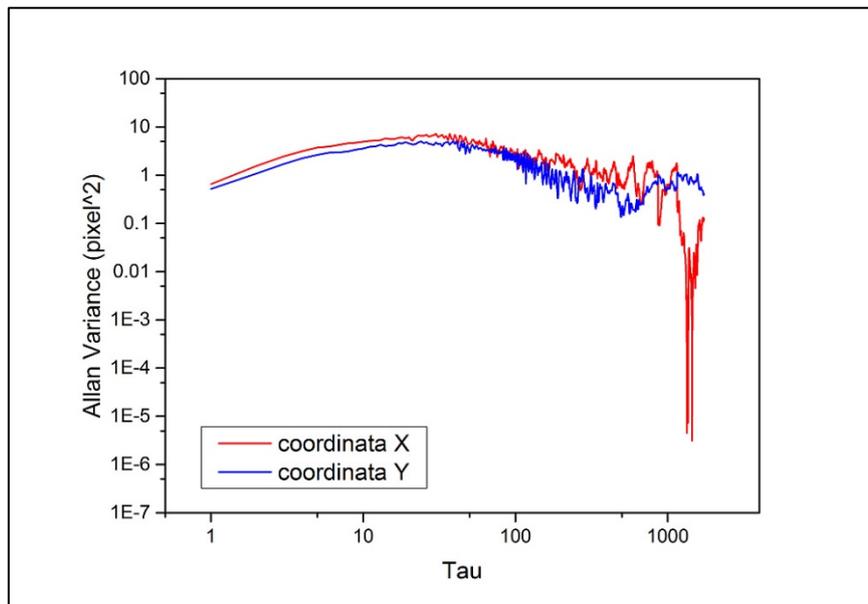
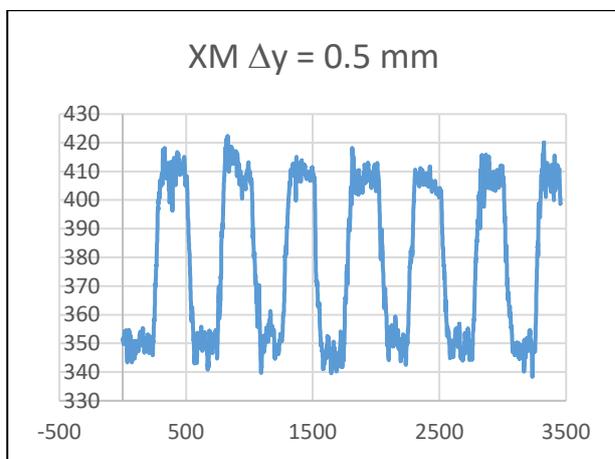
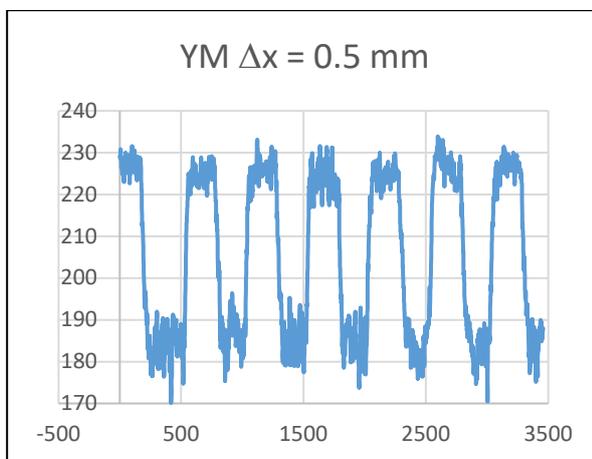
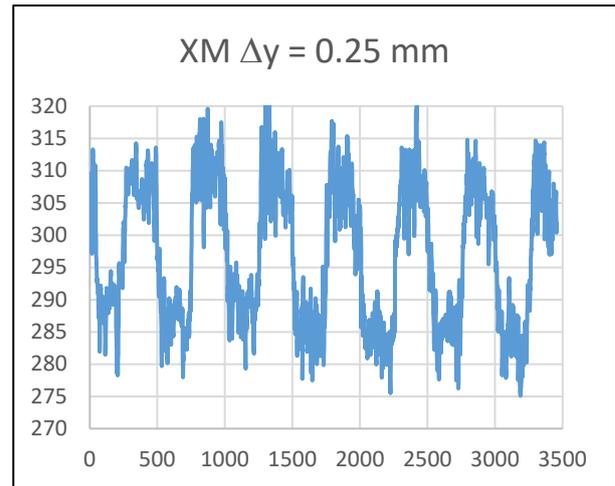
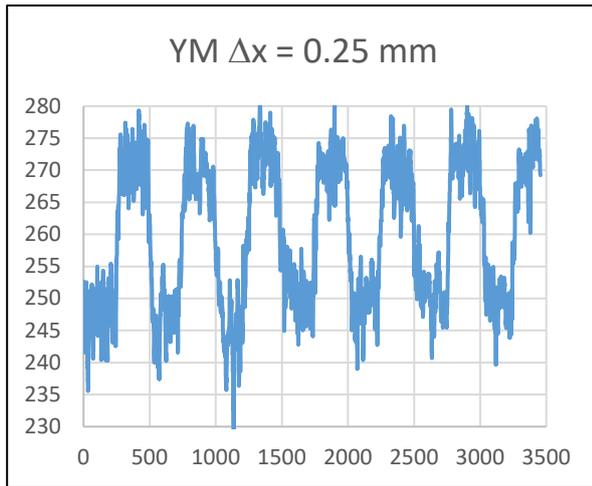


Figura 26: varianze di Allan delle coordinate X e Y del CdM con il collimatore FC20, FPS=25



Analizzando in modo qualitativo i grafici (distanza picco-picco mediando il rumore) e tenendo conto del pixel size della camera, la relazione **traslazione corner cube** → **spostamento CdM spot**, in quest'ultima configurazione, è in pratica una mappatura nella quale ad ogni μm di traslazione (in X e Y) della slitta corrisponde uno spostamento relativo di 0.1 pixel del CdM dello spot: imponendo cioè una relazione lineare tra ΔY_{camera} e ΔY_{slitta} , si può scrivere

$$\Delta y_{\text{camera}} (\text{pixel}) = k \cdot \Delta y_{\text{slitta}} (\mu\text{m})$$

dove $k = 0.1 \frac{\text{pixel}}{\mu\text{m}}$.

La risoluzione angolare risulta migliorata, in pratica, di un fattore 2 rispetto al setup con il collimatore precedente; infatti, a 10 metri, assumendo un'incertezza nella misura statica pari a 3 volte il peggior valore della deviazione standard relativa ad una delle coordinate dei CdM dello spot acquisiti in 3500 frames in condizioni statiche, si può fare il seguente calcolo:

$$\alpha_{\text{min}} = \arctan\left(\frac{3\sigma_{\text{worst}}}{kL}\right) \cong \arctan\left(\frac{12 \text{ pixel}}{0.1 \frac{\text{pixel}}{\mu\text{m}} \cdot 10^7 \mu\text{m}}\right) \cong 12 \mu\text{rad}$$

Sostituzione corner cube con sfera retroriflettente

L'ultima configurazione è quella in cui il corner cube è stato sostituito con la sfera in vetro (indice di rifrazione $n = 2$), e la distanza di quest'ultima dal pentaprisma si è ridotta a 7 metri:



Figura 27: spot visualizzato sulla camera (a sinistra) e visualizzazione 3D (a destra)

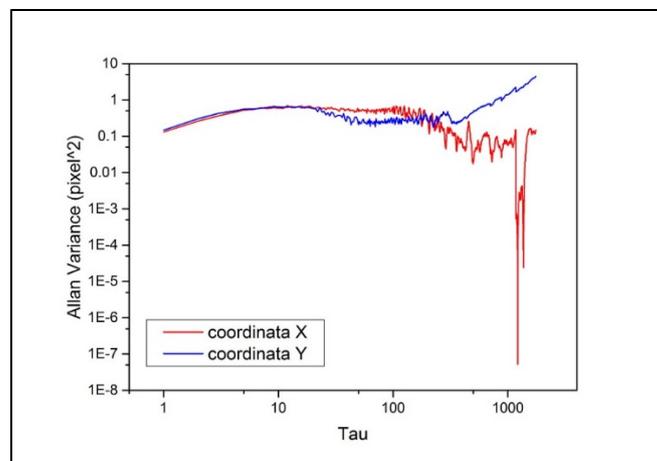


Figura 28: varianze di Allan di X e Y del CdM, usando la sfera come retroriflettore; la coordinata Y mostra una deriva rispetto alla X; FPS=25

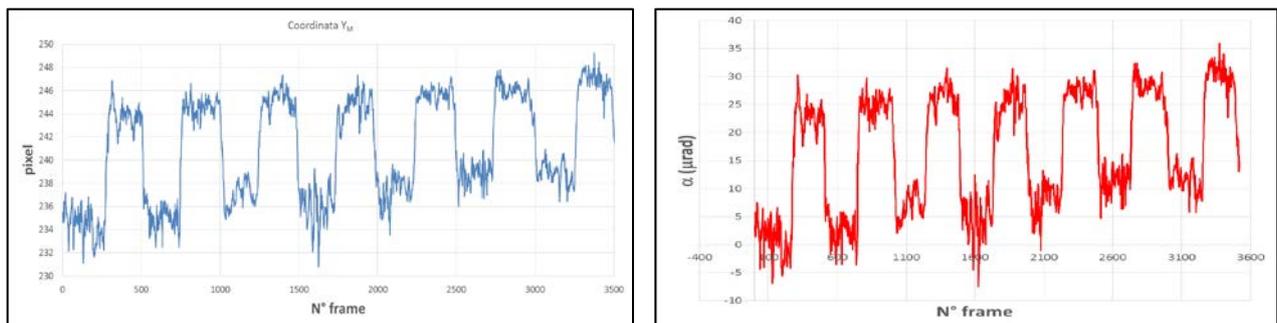


Figura 29: segnale relativo alla ripetizione della traslazione della sfera di 250 μm lungo l'asse Y; a sinistra: scala in pixel, a destra: scala in microradiani. FPS=25

Taratura del sistema di imaging

Al fine di tarare il sistema utilizzato, senza fare alcuna variazione al setup descritto nel paragrafo precedente si è seguita una procedura nella quale si sono acquisiti 50 frames ad ogni variazione di posizione nelle due coordinate ortogonali della slitta, avendo cura di tenere sempre in campo l'intero spot in modo da non inficiare il calcolo della posizione del CdM.

posizione	N° divisioni	ΔL slitta (μm)	Y camera (px)	inc camera (σ_Y)	ΔY camera (px)
0	0	0	144.9	3.8	0.0
1	10	100	168.2	6.1	23.3
2	20	200	186.3	3.4	41.3
3	30	300	201.2	2.1	56.3
4	40	400	222.5	2.8	77.5
5	50	500	239.7	3.9	94.8
6	60	600	258.7	?	113.8
7	70	700	268.6	4.5	123.7
8	80	800	287.7	2.1	142.8
9	90	900	305.4	1.6	160.5

Tabella 5: tabella di calibrazione per la coordinata Y; per la posizione N°6 il calcolo del CdM è stato fatto sull'unico frame disponibile, anziché mediando su 50 frames come nelle altre posizioni, a causa di un problema di acquisizione



Figura 30: a sinistra: spot acquisito dalla camera Epix in corrispondenza della posizione centrale (N°5), con un framerate di 25 FPS e con un tempo di esposizione di 1.5 ms; a destra: immagine binaria dello stesso spot

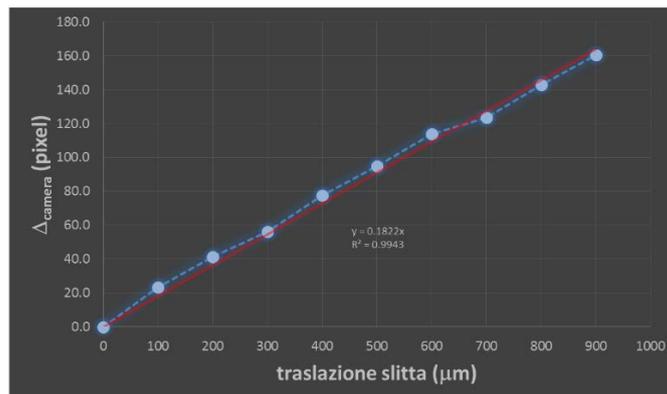


Figura 31: regressione lineare spostamento CdM spot contro traslazione slitta

Dal grafico in Figura 31 si evince che il fattore di conversione tra lo spostamento del CdM dello spot e la traslazione lungo la coordinata X della slitta è $k \approx 0.182 \frac{\text{pixel}}{\mu m}$. La coordinata Y mostra un comportamento analogo; la risoluzione angolare del sistema, a 7 metri, assumendo un'incertezza pari a 3σ sulla posizione dello spot (in condizioni statiche) è pari a

$$\alpha_{\min} = \arctan\left(\frac{3\sigma_{\text{worst}}}{kL}\right) \cong \arctan\left(\frac{6 \text{ pixel}}{0.182 \frac{\text{pixel}}{\mu m} \cdot 7 \cdot 10^6 \mu m}\right) \cong 5.1 \mu rad$$

Utilizzando il fattore di conversione ricavato, con un tool scritto in LabView si sono calcolate le PSD (Figura 32) e le deviazioni di Allan per entrambe le coordinate (Figura 33 e Figura 34), acquisendo 1000 frames a due diversi framerate (a 5 e a 150 Hz).

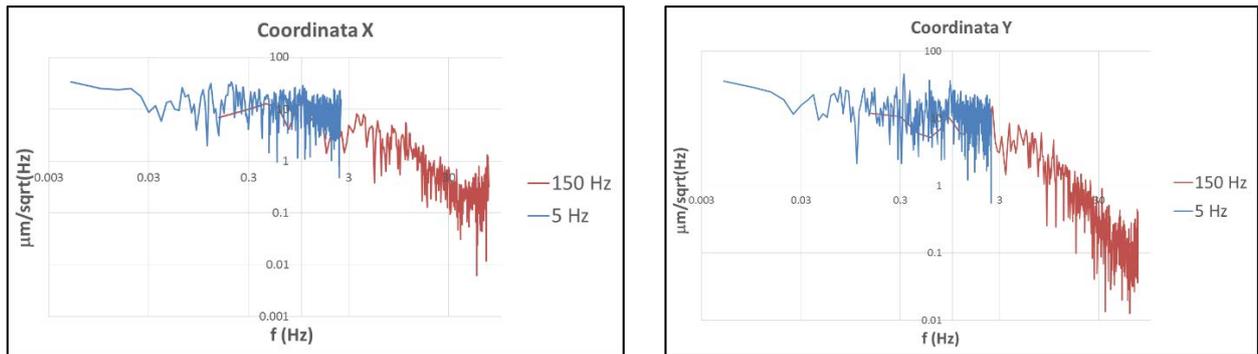


Figura 32: PSD delle coordinate X e Y del CdM dello spot, con FPS=5 e 150, calcolate su una base di 1000 frames

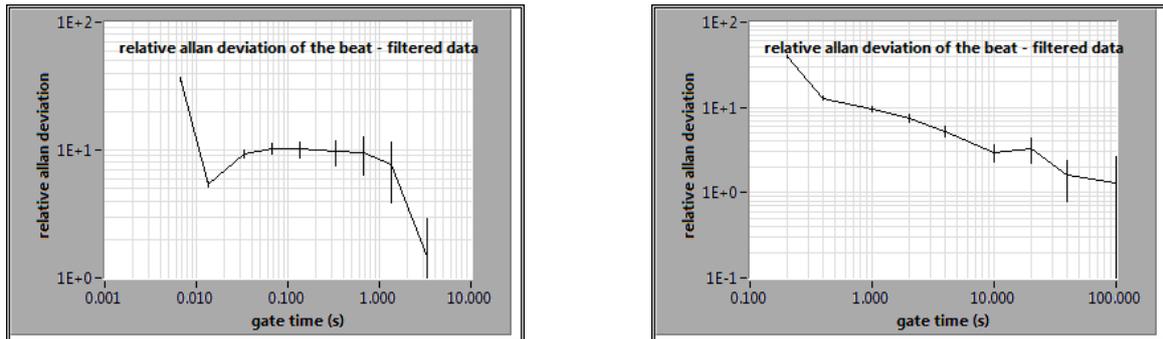


Figura 33: deviazioni di Allan delle coordinate X del CdM con FPS=150 (a sinistra) e 5 (a destra)

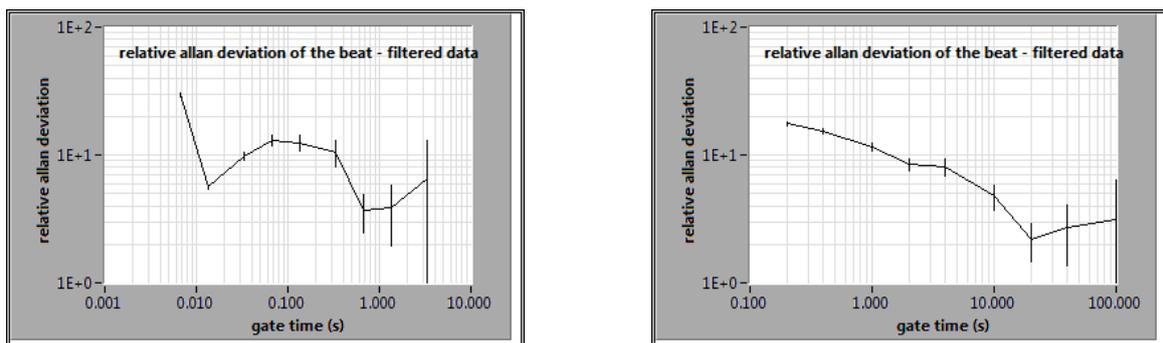


Figura 34: deviazioni di Allan delle coordinate Y del CdM con FPS=150 (a sinistra) e 5 (a destra)

Conclusioni

Nel corso di questo lavoro, al fine di valutare l'impatto del **rumore** (sia esso legato a vari fattori come la turbolenza dell'aria, le derive termiche, la discontinuità nella potenza del laser o la combinazione di questi tre) sulle prestazioni dell'autocollimatore da impiegare nel set up dell'esperimento LUMINAR, varie configurazioni di prova sono state indagate; in particolare, si è ricavato che la presenza inevitabile di tale fenomeno fisico limita la risoluzione angolare del nostro sistema di acquisizione a circa $5 \mu\text{rad}$ su una distanza del bersaglio pari a circa 7 m, assumendo un'incertezza pari a 3σ sulla posizione dello spot sulla camera; questo è il miglior valore che è stato possibile ottenere con l'hardware a nostra disposizione, lo stesso previsto nella configurazione di set up definitiva (sfera con $n = 2$ e collimatore FC20-NIR1-T).