

Università degli Studi di Bari “Aldo Moro” – Dottorato in Fisica XXXI ciclo

Relazione attività dottorato primo anno

Dottorando: *Francesco Di Lena*

Tutor: *Milena D’Angelo*
Saverio Pascazio

1 Introduzione

L’immagine plenottica (PI) è una nuova tecnica ottica che permette di misurare simultaneamente posizione e direzione di propagazione della luce in un singolo scatto. Con le informazioni acquisite è possibile modificare il piano di messa a fuoco all’interno dell’immagine acquisita, così da aumentare la profondità di campo (DOF) del sistema ottico iniziale. Per ottenere lo stesso risultato con un sistema di imaging standard, è necessario fare più scatti, ciascuno con un diverso piano di messa a fuoco. In altre parole è necessaria una scansione lungo l’asse ottico. Invece con una fotocamera plenottica è possibile ricavare informazioni tridimensionali da un singolo scatto [1]. Per fare una misura plenottica si inserisce, una matrice di microlenti nel piano immagine della lente principale dello strumento. Il sensore viene spostato sul piano immagine delle microlenti, in questo modo ciascuna microlente fa le veci di un pixel, mentre la porzione del sensore relativa a ciascuna microlente ricava informazioni “angolari” sulla luce incidente su ciascuna microlente. Per migliorare la profondità di campo sono state studiate diverse configurazioni [2] [3], ma il legame di inversa proporzionalità tra DOF e risoluzione tipo dei sistemi di imaging standard, rimane presente anche in plenottica.

L’idea che da cui è partito il lavoro svolto nel primo anno di dottorato è utilizzare le correlazioni per aumentare le potenzialità della plenottica. La tecnica da cui si è partiti per realizzare tutto ciò è il “*ghost imaging*”. Questa consiste nel ricavare l’immagine di un oggetto remoto, mediante misura di coincidenze tra due fasci di luce correlati. Vicino all’oggetto vi è un rivelatore “spazzatura” che può essere pensato come un unico grande pixel che misura l’istante di tempo di arrivo di ciascun fotone, dimenticando invece il punto sul quale questo è giunto. L’altro rivelatore, caratterizzato da una buona risoluzione spaziale, come ad esempio il sensore a pixel di una fotocamera, non “vede” l’oggetto, ma solo la radiazione proveniente dalla sorgente [4] [5]. Inizialmente il ghost imaging è stato realizzato sfruttando la correlazione tra fotoni entangled. Circa 10 anni dopo è stato dimostrato, sia teoricamente che sperimentalmente, che è possibile ottenere il ghost imaging sfruttando la correlazione presente in una sorgente

di luce caotica [6]. Due caratteristiche sorprendenti del ghost imaging con luce caotica sono la non necessità di lenti [7] e la semplicità della strumentazione richiesta.

Il lavoro iniziato durante il primo anno di dottorato consiste nello studio un dispositivo che mette insieme le due tecniche citate allo scopo di realizzare un sistema ottico dotato di profondità di campo superiore a quella della plenottica attualmente esistente. Obiettivo del lavoro è sfruttare l'imaging in correlazione per realizzare un imaging plenottico al limite di diffrazione. La nuova tecnica è stata chiamata “*Correlation Plenoptic Imaging*” (CPI).

2 Correlation plenoptic imaging con fotoni entangled

↳ F. V. Pepe, F. Di Lena, A. Garuccio, G. Scarcelli, and M. D'Angelo, “Correlation plenoptic imaging with entangled photons,” *Technologies*, vol. 4, no. 2, p. 17, 2016.

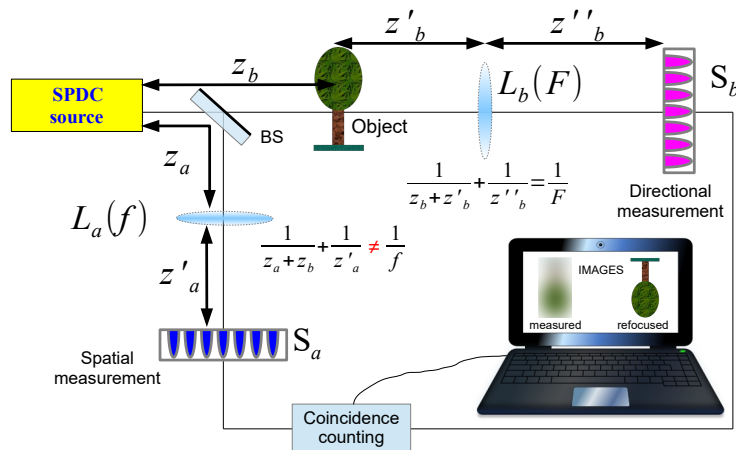


Figura 1: Setup schematico della CPI con fotoni entangled. La coppia di fotoni (signal e idler) è prodotta mediante Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC) e separata dal beam splitter. I fotoni riflessi si propagano attraverso la lente L_a verso il sensore S_a mentre i fotoni trasmessi attraversano l'oggetto e sono raccolti dalla lente L_b nel sensore S_b . I due sensori sono collegati mediante un sistema di conteggio delle coincidenze.

La tecnica CPI si basa sulla misura delle correlazioni spazio-temporali tra la luce misurata in due punti distinti a e b . Il setup proposto per la CPI con fotoni entangled prodotti da SPDC è riportato in figura 1. Come nella plenottica tradizionale è necessario acquisire simultaneamente diverse immagini della scena in esame, una per ogni direzione di propagazione della luce. Per mezzo di misure di correlazione tra ognuno degli N_b pixel dei sensori S_b ed S_a , vengono ricostruisce N_b ghost images coerenti dell'oggetto. Poiché S_b riproduce l'immagine della sorgente luminosa, ad ogni ghost image coerente è associata ad una differente illuminazione della scena, e quindi un differente punto di vista. In sintesi l'idea alla base della CPI è di sostituire con la singola lente L_b , e due sensori separati S_a ed S_b , il sistema composto dalla matrice di microlenti seguita da un singolo sensore. In questo modo misure spaziali e angolari risultano

disaccoppiate, e si eliminano i limiti dovuti all'inversa proporzionalità tra risoluzione spaziale e angolare caratteristici della plenottica tradizionale.

La figura 2 mostra i risultati di una simulazione numerica effettuata per convalidare il principio di funzionamento. Una maschera con una lettera "E" trasparente il cui spessore del tratto è pari a $d = 0.2 \text{ mm}$, è posizionata nel setup di figura 1 con $z_a = 10 \text{ mm}$, $z'_a = 30 \text{ mm}$ ed $f = 12 \text{ mm}$. Da questi ultimi due valori segue un ingrandimento di $m = 1.5$ volte. La maschera oggetto è illuminata da fotoni prodotti mediante Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC) con $\lambda = 1 \mu\text{m}$, generati da un laser di pompa con un profilo gaussiano di deviazione standard pari a $\sigma = 0.6 \text{ mm}$. L'oggetto è collocato ad una distanza dalla sorgente $z_b = 3 \text{ mm}$, che è meno di un terzo della distanza dalla sorgente del piano di messa a fuoco del ghost imaging standard $z_{bF} = 10 \text{ mm}$. Questo risulta focalizzato in $z'_{aF} = 5z'_a$. La larghezza dei due sensori è pari a $W_a = 6md = 1.8 \text{ mm}$ e $W_a = 4M\sigma = 1.9 \text{ mm}$, con $M = 0.8$ ingrandimento dell'immagine della lente riprodotta su S_b . I risultati mostrano un evidente aumento di profondità di campo della CPI rispetto ad un sistema ottico tradizionale con stessa apertura numerica.

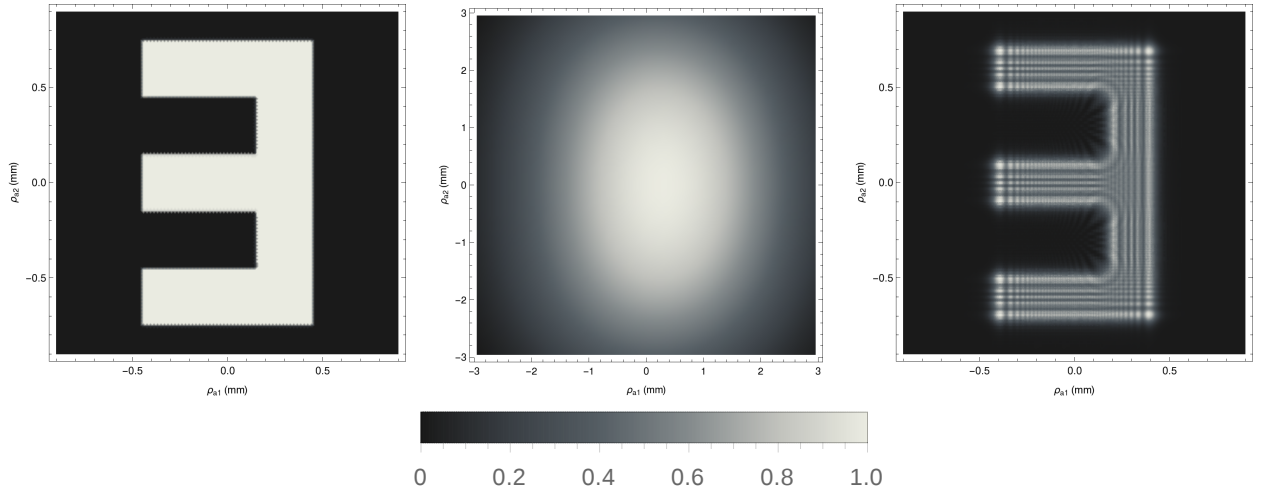


Figura 2: Confronto tra ghost imaging con oggetto posizionato a fuoco $z_b = z_{bF}$, ghost imaging con oggetto posizionato in $z_b = 0.3z_{bF}$ (centro) e rifocalizzazione mediante CPI applicata alla seconda situazione in $z_b = 0.3z_{bF}$ (destra). Le intensità sono normalizzate al loro valore massimo in riquadro.

3 Dimostrazione sperimentale del correlation plenoptic imaging con luce caotica al limite di diffrazione

↳ M. D'Angelo, F. Di Lena, A. Garuccio, A. Mazzilli, F. V. Pepe, G. Scarcelli, “Experimental demonstration of correlation plenoptic imaging at the diffraction limit” *In preparazione (Nature Physics)*.

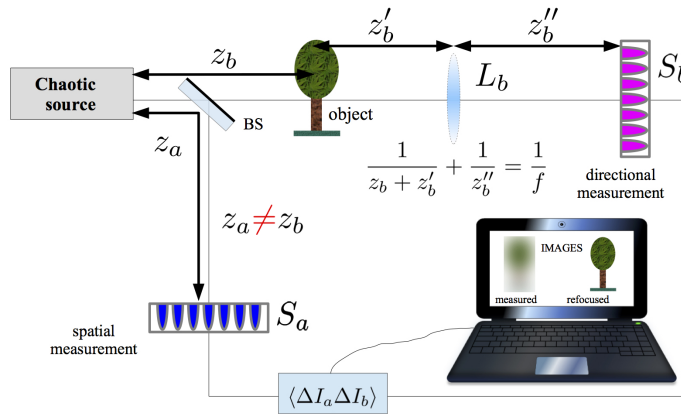


Figura 3: Rappresentazione schematica del setup sperimentale utilizzato per la CPI con luce caotica. Grazie alla misura di correlazione, la sorgente di luce caotica agisce da elemento focalizzante e permette di ricavare l'immagine dell'oggetto sul sensore S_a . Sul sensore S_b si forma l'immagine della sorgente mediante la lente L necessaria per l'imaging plenottico.

La tecnica CPI è stata inizialmente studiata con una sorgente di luce caotica [8] per via della maggiore semplicità di una futura realizzazione sperimentale.

3.1 Misure e confronto con la teoria

Il setup sperimentale è mostrato in figura 3. La sorgente caotica è realizzata con un diodo laser di lunghezza d'onda $\lambda = 980 \text{ nm}$ con profilo gaussiano incidente su un disco smerigliato rotante. Il fascio riflesso si propaga nello spazio libero fino al sensore S_a posto a distanza di $z_a = 160 \text{ mm}$. Nel caso della luce caotica, la lente sul braccio spaziale non è necessaria e la distanza oggetto è pari a z_a [7]. Il fascio trasmesso passa attraverso l'oggetto da esaminare e si propaga attraverso la lente L_b di focale $f = 250 \text{ mm}$ fino al sensore S_b posizionato nel piano coniugato della sorgente in modo che l'ingrandimento scelto sia $M = 1.3$. Anche in questo caso la lente L_b fa le veci della matrice di microlenti e le misure spaziali e angolari risultano tra loro disaccoppiate. Nel caso di luce caotica, la ghost image è realizzata senza lente, e risulta a fuoco quando $z_b = z_a$. Il laser è stato focalizzato sul disco in modo da avere una risoluzione a fuoco pari a $\Delta x^f \simeq 100 \mu\text{m}$. In questa condizione, la deviazione standard del profilo della sorgente è stata misurata pari a $\sigma = 0.89 \text{ mm}$. Le misure di risoluzione a fuoco sono state effettuate a

partire dalla visibilità della ghost image di una doppia fenditura. Sono state effettuate misure di CPI utilizzando come campione alcune doppie fenditure di distanza d pari al doppio della loro larghezza a , e sono stati studiati sia il caso $z_b < z_a$ (avvicinamento alla sorgente) che $z_b > z_a$ (allontanamento dell'oggetto alla sorgente). I risultati sperimentali sono mostrati in figura 4.

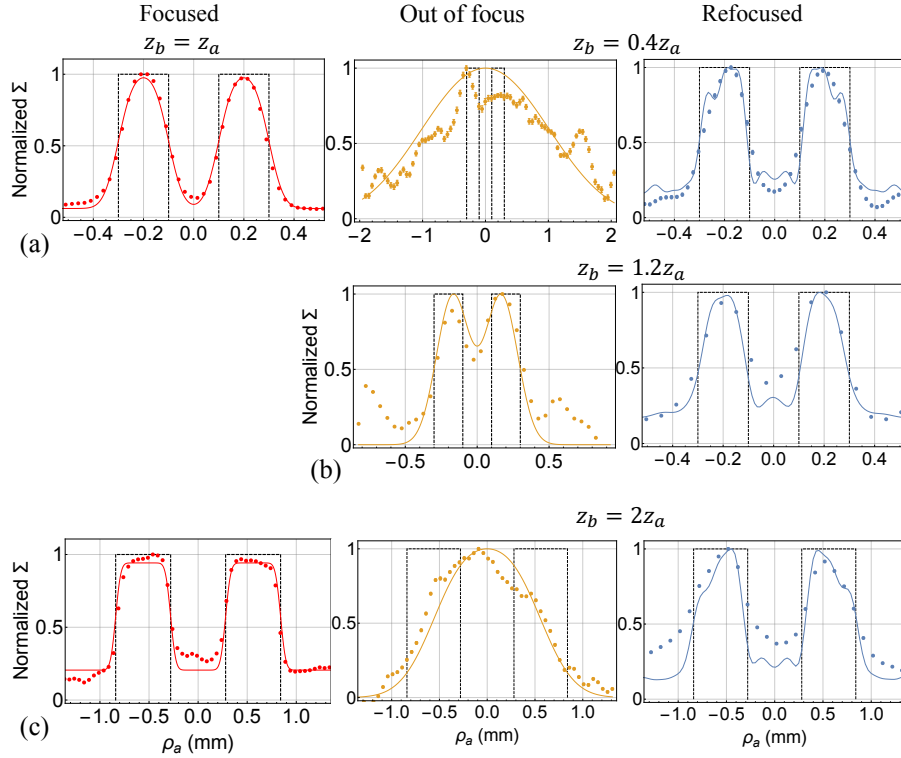


Figura 4: Confronto tra ghost imaging a fuoco (colonna di sinistra), ghost imaging fuori fuoco al valore z_b indicato in figura (colonna centrale), e il refocusing di quest'ultima mediante correlation plenoptic imaging (colonna di destra). Nei casi *A* e *B* è stata usata una doppia fenditura con $d = 0.4 \text{ mm}$, mentre nel caso *C* $d = 1.12 \text{ mm}$. I punti indicano i dati sperimentali, le linee continue la previsione teorica e le linee tratteggiate la funzione apertura.

3.2 Studio dei limiti di diffrazione della CPI e confronto con la plenottica tradizionale

Come già detto la tecnica CPI ha lo scopo di aumentare le prestazioni della fotocamera plenottica tradizionale grazie al disaccoppiamento delle misure di informazioni spaziali e angolari, che vengono raccolte da due rivelatori separati. È stato condotto uno studio di confronto tra le due fotocamere simulando per via numerica l'immagine rifocalizzata di una doppia fenditura di tipo $d = a/2$.

In figura 5 è mostrato il comportamento della visibilità dell'immagine

$$\mathcal{V}(z_b - z_a; d/\Delta x^f) \quad (1)$$

in funzione di $z_b - z_a$, posizione assiale dell'oggetto, e della distanza d tra le due fenditure diviso il valore della risoluzione a fuoco Δx^f . In figura sono anche indicate le tre misure mostrate nel paragrafo precedente, ciascuna con le sue dimensioni oggetto d e la sua posizione assiale z_b . Si vede come le misure A e C siano visibili solo in CPI, mentre B è appena visibile anche in standard imaging. Una plenottica standard equivalente non sarebbe in grado di rifocalizzare nessuna delle tre immagini. Nel caso della plenottica è necessario fissare un valore di N_u numero di pixel corrispondenti a ciascuna microlente lungo una dimensione. Questo valore non è altro che il rapporto tra la dimensione delle microlenti e l'ampiezza della point spread function. Da esso dipendono risoluzione e profondità di campo della fotocamera plenottica:

$$r \propto N_u^{-1} \quad , \quad DOF \propto N_u^2 \quad . \quad (2)$$

In sintesi così come avviene nell'immagine standard, anche in PI risoluzione e profondità di campo sono tra loro intrinsecamente collegate: al crescere dell'una diminuisce l'altra e viceversa. La figura 5 mostra come l'utilizzo delle correlazioni spinge l'imaging plenottico fino ai suoi limiti fondamentali, da cui risulta una profondità di campo maggiore rispetto alla plenottica tradizionale limitata solo dalla diffrazione.

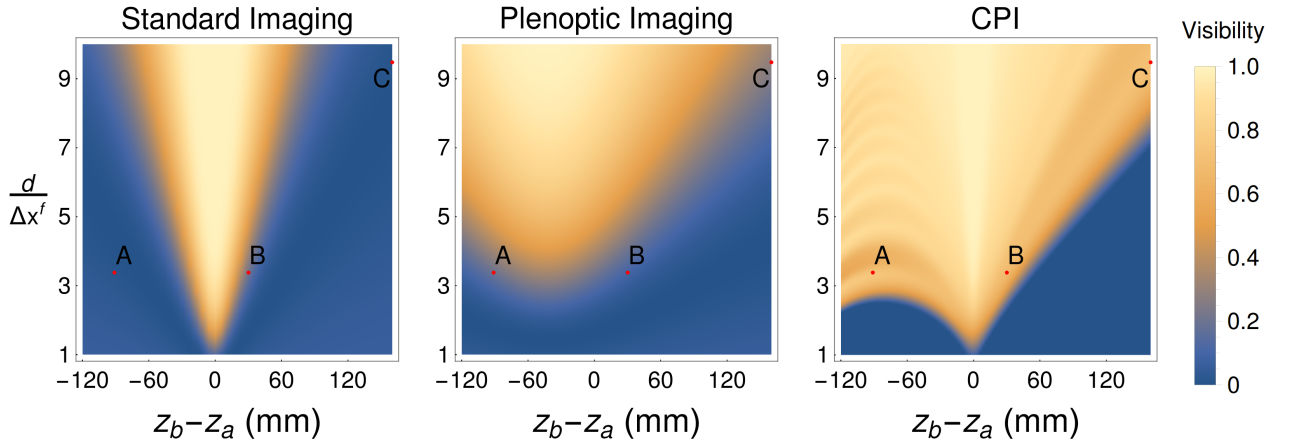


Figura 5: Studio dell'intervallo di perfect refocusing con una doppia fenditura di tipo $d = 2a$. La distanza tra le fenditure è normalizzata alla risoluzione a fuoco Δx^f . La visibilità della CPI (a destra) è calcolata considerando i parametri del setup sperimentale in utilizzato per le misure. A sinistra e al centro sono mostrati i risultati ottenuti con un sistema di immagine standard ed una fotocamera plenottica con $N_u = 3$ pixel per microlente. In entrambi i casi l'apertura numerica della lente considerata è uguale all'apertura numerica della sorgente caotica sperimentale. I punti A , B e C , corrispondono alle tre misure mostrate in figura 4.

4 Prospettive future

Il problema del legame tra profondità di campo e risoluzione risulta essere particolarmente importante in microscopia dove la risoluzione è elevata, e si desidera ottenere elevate profondità di campo con buona risoluzione assiale. Per queste ragioni il microscopio plenottico sembra

essere molto promettente [9] [10]. Procedendo in questa direzione sarà necessario iniziare a studiare la CPI nel caso di oggetti bidimensionali.

Una soluzione alternativa per realizzare CPI, che verrà studiata il prossimo anno è l'applicazione del “computational ghost imaging”. Questa tecnica consiste nella sostituzione del sensore ad alta risoluzione con una sorgente caotica creata mediante uno spatial light modulator e correlata con il bucket detector [11]. L'idea che si vuole percorrere è quella di sostituire un sensore del setup attuale di CPI con uno SLM per realizzare un setup più semplice.

Per risolvere i problemi di rumorosità presentatisi nelle misure fatte fino ad oggi, si intende iniziare la verifica sperimentale della CPI con fotoni entangled. Nel caso del ghost imaging questa tecnica si è in grado di dar luogo ad immagini con rumore ridotto al minimo possibile [12].

5 Sintesi del primo anno di dottorato

Articoli:

- ✓ F. V. Pepe, [F. Di Lena](#), A. Garuccio, G. Scarcelli, and M. D'Angelo, “Correlation plenoptic imaging with entangled photons,” *Technologies*, vol. 4, no. 2, p. 17, 2016.
- M. D'Angelo, [F. Di Lena](#), A. Garuccio, A. Mazzilli, F. V. Pepe, G. Scarcelli, “Experimental demonstration of correlation plenoptic imaging at the diffraction limit” *In preparazione (Nature Physics)*.

Conferenze internazionali:

- ✓ “Correlation Plenoptic Imaging” (poster), “Quantum Roundabout 2016”, University of Nottingham, 6-8 luglio 2016.

Conferenze nazionali:

- ✓ “Imaging plenottico con misure di correlazione” (presentazione), 102 congresso nazionale della SIF, Padova 26-30 settembre 2016.

Corsi frequentati:

- ✓ Management and knowledge of European research model and promotion of research results
- ✓ How to prepare a technical speech in English
- ✓ LabView introductory Course
- ✓ Programming FPGA with LabView
- ✓ Optical sensors

- Complex Systems (entro novembre 2016)
- Gaseous detector (15 dicembre 2016)
- Analysis of experimental data (entro dicembre 2016)

Riferimenti bibliografici

- [1] E. H. Adelson and J. Y. Wang, “Single lens stereo with a plenoptic camera,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 99–106, 1992.
- [2] T. Georgiev and C. Intwala, “Light field camera design for integral view photography,” *Adobe System, Inc., Technical Report*, 2006.
- [3] C. Perwass and L. Wietzke, “Single lens 3d-camera with extended depth-of-field,” in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, pp. 829108–829108, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [4] T. Pittman, Y. Shih, D. Strekalov, and A. Sergienko, “Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement,” *Physical Review A*, vol. 52, no. 5, p. R3429, 1995.
- [5] T. Pittman, D. Strekalov, D. Klyshko, M. Rubin, A. Sergienko, and Y. Shih, “Two-photon geometric optics,” *Physical Review A*, vol. 53, no. 4, p. 2804, 1996.
- [6] A. Valencia, G. Scarcelli, M. D’Angelo, and Y. Shih, “Two-photon imaging with thermal light,” *Physical review letters*, vol. 94, no. 6, p. 063601, 2005.
- [7] G. Scarcelli, V. Berardi, and Y. Shih, “Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations?,” *Physical review letters*, vol. 96, no. 6, p. 063602, 2006.
- [8] M. D’Angelo, F. V. Pepe, A. Garuccio, and G. Scarcelli, “Correlation plenoptic imaging,” *Physical Review Letters*, vol. 116, no. 22, p. 223602, 2016.
- [9] R. Prevedel, Y.-G. Yoon, M. Hoffmann, N. Pak, G. Wetzstein, S. Kato, T. Schrödel, R. Raskar, M. Zimmer, E. S. Boyden, *et al.*, “Simultaneous whole-animal 3d imaging of neuronal activity using light-field microscopy,” *Nature methods*, vol. 11, no. 7, pp. 727–730, 2014.
- [10] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” *Computer Science Technical Report CSTR*, vol. 2, no. 11, pp. 1–11, 2005.

-
- [11] Y. Bromberg, O. Katz, and Y. Silberberg, “Ghost imaging with a single detector,” *Physical Review A*, vol. 79, no. 5, p. 053840, 2009.
- [12] G. Brida, M. Genovese, and I. R. Berchera, “Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging,” *Nature Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 227–230, 2010.