



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Allineamento, Denoising e Stacking di immagini lunari mediante tecniche tradizionali e Unsharp Masking basato su Deep Learning

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione, Informatica e Statistica
Laurea Triennale in Ingegneria Informatica

Andrea Spinelli

Matricola 1985877

Relatore

Prof. Thomas Alessandro Ciarfuglia

Anno Accademico 2023/2024

Allineamento, Denoising e Stacking di immagini lunari mediante tecniche tradizionali e Unsharp Masking basato su Deep Learning

Laurea Triennale. Sapienza Università di Roma

© 2024 Andrea Spinelli. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con \LaTeX e la classe Sapthesis.

Email dell'autore: andreaspinelli2002@gmail.com

*«tutta colpa della Luna, quando si avvicina troppo alla Terra fa impazzire tutti»
— William Shakespeare*

Sommario

TODO

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Evoluzione dell'astrofotografia	1
1.1.1	Breve storia e sviluppo tecnologico	1
1.2	Stato dell'arte: strumentazione e tecniche moderne	2
1.2.1	Hardware	3
1.2.2	Software e algoritmi nell'astrofotografia	3
1.3	Rumori e artefatti nelle immagini astronomiche	4
2	Tecniche di elaborazione delle immagini astronomiche	6
2.1	Calibrazione delle immagini	7
2.1.1	Bias Frames	7
2.1.2	Dark Frames	7
2.1.3	Flat Frames	7
2.2	Allineamento delle immagini	7
2.2.1	Feature Detection e Matching ORB, SIFT e SURF	7
2.2.2	Trasformazioni omografiche	7
2.3	Pre-processing delle immagini	7
2.3.1	Denoising tramite reti neurali: DnCNN	7
2.3.2	Unsharp Masking e personalizzazione	7
2.4	Tecniche di Stacking	7
2.4.1	Principi e vantaggi dello stacking	7
2.4.2	Algoritmi di stacking	7
2.5	Post-Processing delle immagini	7
2.5.1	Miglioramento di nitidezza e contrasto	7
3	Implementazione del Progetto	8
3.1	Architettura del software	8

Indice	v
3.1.1 Calibrazione	8
3.1.2 Allineamento	8
3.1.3 Pre-processing	8
3.1.4 Stacking	8
3.1.5 Post-processing	8
3.2 Sfide affrontate e soluzioni adottate	8
4 Valutazione dei Risultati e Metriche di Qualità	9
4.1 Metriche di valutazione con riferimento	9
4.1.1 SSIM (Structural Similarity Index Measure)	9
4.1.2 SNR (Signal-to-Noise Ratio)	9
4.2 Metriche di valutazione senza riferimento	9
4.2.1 NIQE (Naturalness Image Quality Evaluator)	9
4.2.2 BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator)	9
4.2.3 LIQE (Language-Image Quality Evaluator)	9
4.2.4 Motivazione della scelta di LIQE come metrica di riferimento	9
4.3 Analisi e miglioramenti ottenuti	9
4.3.1 Effetti della calibrazione	9
4.3.2 Impatto del denoising	9
4.3.3 Benefici dello stacking	9
4.3.4 Miglioramenti con sharpening e contrasto	9
Conclusions	10
Acknowledgements	11

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Evoluzione dell'astrofotografia

L'**astrofotografia** è una disciplina che si occupa di fotografare oggetti celesti come stelle, pianeti, galassie e nebulose. Questa pratica ha radici antiche, risalenti al XIX secolo: nel 1822 fu scattata la prima foto nella storia da Nicéphore Niépce, e già nel 1840 fu catturata la prima immagine della luna da John William Draper, segnando l'inizio di una nuova era nell'osservazione astronomica. Nel 1850, William Cranch Bond e John Adams Whipple scattarono la prima fotografia di una stella, *Vega*, con un'esposizione di 1000 secondi.

1.1.1 Breve storia e sviluppo tecnologico

Nei primi anni le immagini erano ottenute con *lastre fotografiche di vetro*, che richiedevano tempi di esposizione estremamente lunghi. Catturare immagini di oggetti deboli come nebulose e galassie era un'impresa ardua e poteva richiedere ore o notti intere di esposizione, rendendo il processo piuttosto laborioso. Le prime immagini si concentravano principalmente su oggetti luminosi, come la Luna e i pianeti, mentre le stelle più deboli e le galassie rimanevano al di là delle capacità tecnologiche dell'epoca [8].

Con la nascita della *fotografia a colori* gli astronomi poterono registrare le diverse tonalità di colore degli oggetti celesti. In questo modo fu possibile ottenere informazioni preziose circa la composizione chimica e la temperatura di stelle e nebulose, approfondendo la comprensione dei processi fisici dell'universo. La vera rivoluzione arrivò con l'avvento della **fotografia digitale** e l'introduzione dei *dispositivi a carica accoppiata* (*CCD*) alla fine degli anni '60. I *CCD* avevano una sensibilità alla luce notevolmente superiore rispetto a quella delle lastre fotografiche, permettendo tempi di esposizione più brevi e una maggiore qualità dell'immagine. Questa tecnologia consentì di rilevare oggetti celesti più deboli e ridurre significativamente il rumore nelle immagini [1].

Con la diffusione dei computer, l'elaborazione delle immagini digitali divenne parte integrante dell'astrofotografia. Tecniche come la *calibrazione*, l'*allineamento*, la

riduzione del rumore e lo *stacking* delle immagini hanno permesso di ottenere risultati di qualità superiore rispetto alle immagini singole. L'utilizzo di algoritmi avanzati consentì di rivelare dettagli nascosti, migliorare il contrasto e ridurre al minimo il rumore aumentando l'accuratezza delle osservazioni astronomiche [9][5].

Oggi l'astrofotografia è accessibile non solo agli astronomi professionisti, ma anche agli appassionati dilettanti. L'ampia disponibilità di telescopi, fotocamere digitali e software avanzati ha reso possibile catturare immagini di alta qualità anche con strumenti di costo contenuto. L'astrofotografia è diventata un hobby popolare tra gli appassionati di astronomia e fotografia, che condividono le proprie immagini e scoperte sui social media e sui forum online come *Cloudy Nights* o *AstroBin*.

1.2 Stato dell'arte: strumentazione e tecniche moderne

L'astrofotografia moderna si avvale di strumenti sofisticati e tecniche avanzate per catturare immagini di alta qualità. I telescopi sono dotati di montature motorizzate che compensano il movimento apparente del cielo, consentendo esposizioni più lunghe senza sfocature. Le fotocamere digitali, spesso equipaggiate con sensori *CCD* o *CMOS*, sono in grado di catturare immagini ad alta risoluzione anche di oggetti celesti deboli quali galassie o nebulose, preservandone i dettagli. I software di elaborazione delle immagini offrono strumenti avanzati per la calibrazione, l'allineamento e la post-produzione delle immagini, consentendo di ottenere risultati di qualità professionale.

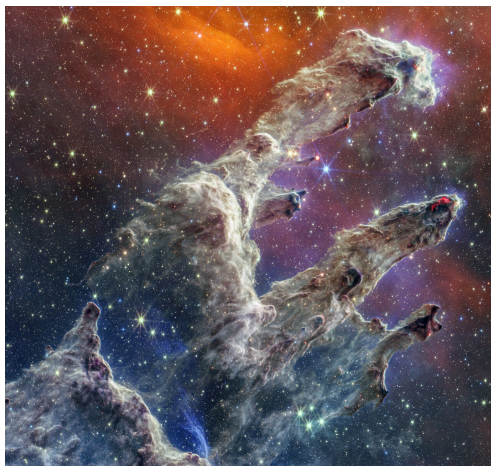


Figura 1.1. *Pillars of Creation*, nella *Nebulosa dell'Aquila*, ripresi dal *James Webb Space Telescope* combinando dati acquisiti da *NIRCam* e *MIRI*.

Esistono diversi telescopi spaziali, come l'*Hubble Space Telescope* [3] della *NASA* e il *James Webb Space Telescope* [2], gestito congiuntamente da *ESA*, *NASA* e *CSA*. Questi strumenti, orbitando al di fuori dell'atmosfera terrestre, sono in grado di catturare immagini ad altissima risoluzione e sensibilità, libere dalle distorsioni e dall'inquinamento luminoso terrestre. Sfruttano a proprio vantaggio fenomeni fisici come le *lenti gravitazionali* e la *diffrazione* per osservare oggetti nello spazio profondo, ben oltre le capacità degli strumenti terrestri. Questi telescopi, inoltre,

sono dotati di telecamere come la *NIRCam* (Near Infrared Camera) e la *MIRI* (Mid Infrared Instrument), che permettono di osservare l'universo in bande di luce altrimenti invisibili, rivelando dettagli nascosti e processi fisici altrimenti inaccessibili (Figura 1.1), e si dimostrano fondamentali per la ricerca astronomica.

1.2.1 Hardware

Nell'astrofotografia tradizionale si utilizzano principalmente tre tipi di strumenti:

- **Telescopi:** I telescopi sono fondamentali nell'astrofotografia; ne esistono di diversi tipi, tra cui rifrattori, riflettori e catadiottrici, ciascuno con caratteristiche specifiche. I telescopi moderni variano da piccoli modelli portatili a grandi strutture professionali, come l'*ELT* (Extremely Large Telescope), con uno specchio principale di ben 39m di diametro, che è ancora in costruzione ma si prevede diventerà operativo entro il 2027 [6]. La scelta del telescopio dipende dall'oggetto celeste da osservare e dal livello di dettaglio desiderato, oltre che dal budget disponibile.
- **Fotocamere:** Le fotocamere *CCD* (Charge-Coupled Device) sono ampiamente utilizzate in ambito astronomico per la loro alta sensibilità e basso **rumore elettronico**. Negli ultimi anni, le fotocamere *CMOS* (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) hanno guadagnato popolarità in quanto più performanti e più accessibili economicamente. Tali fotocamere offrono elevate risoluzioni, velocità di lettura più rapide e buona *efficienza quantica*, rendendole adatte sia per l'uso professionale che amatoriale [4].
- **Montature:** Una montatura stabile e precisa è essenziale per compensare la rotazione terrestre durante le lunghe esposizioni.
 - Le *montature equatoriali* sono progettate per seguire il movimento apparente delle stelle nel cielo, consentendo di mantenere gli oggetti celesti centrati nell'inquadratura.
 - Le *montature altazimutali*, più semplici da utilizzare, richiedono sistemi di derotazione o software di correzione più sofisticati per lunghe esposizioni, a causa della rotazione di campo.
 - Le *montature computerizzate*, dotate di sistemi *GoTo*, permettono di puntare automaticamente verso specifici oggetti celesti e di tracciarli con precisione.

1.2.2 Software e algoritmi nell'astrofotografia

Con il tempo i software utilizzati in ambito astrofotografico sono arrivati al punto tale per cui non è necessario essere dotati di un **hardware** professionale per catturare immagini di corpi celesti anche dal proprio cortile (o "*from my backyard*").

I software principalmente utilizzati, quali *PixInsight* o *AutoStakkert* implementano diversi algoritmi in grado di migliorare sensibilmente i risultati finali:

- **Calibrazione delle immagini:** La calibrazione è un passaggio cruciale per rimuovere artefatti e rumori dovuti alla strumentazione dalle immagini astronomiche. Questo processo utilizza diversi insiemi di frame di calibrazione: *bias frames*, *dark frames* e *flat frames* (più nel dettaglio nella [Sezione 2.1](#)) dai quali è possibile estrarre informazioni sul rumore dell'immagine, così da poterlo sottrarre alla stessa [9] [5].
- **Allineamento delle immagini:** L'allineamento è necessario per combinare correttamente più immagini dello stesso oggetto. Algoritmi di feature detection come **ORB** (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [7], **SIFT** (Scale-Invariant Feature Transform) e **SURF** (Speeded Up Robust Features) identificano punti caratteristici nelle immagini per calcolare *trasformazioni omografiche*, utilizzate per correggere differenze di scala, rotazione e prospettiva tra le immagini (più nel dettaglio nella [Sezione 2.2](#)) [1] [5].
- **Riduzione del rumore:** La riduzione del rumore migliora la qualità finale delle immagini. Tecniche tradizionali come l'unsharp masking [1] accentuano i dettagli sottraendo una versione sfocata dell'immagine originale. Approcci più avanzati utilizzano reti neurali convoluzionali profonde, come **DnCNN** (Denoising Convolutional Neural Network) [10], che apprendono a rimuovere il rumore preservando i dettagli attraverso l'addestramento su grandi dataset (più nel dettaglio nelle sezioni 2.3 e 2.5).
- **Stacking delle immagini:** Lo *stacking* (let. "impilamento") combina multiple esposizioni per ottenere un'immagine finale ottimizzandone il rapporto segnale-rumore. Questa tecnica riduce il rumore casuale e mette in evidenza dettagli deboli non visibili in singole esposizioni. Metodi come il **Weighted Average Stacking** assegnano un peso a ciascuna immagine in base ad un criterio prefissato (spesso la nitidezza), per poi in seguito ottenere un'immagine di output data dalla media ponderata dei valori dei vari frames in input (più nel dettaglio nella [Sezione 2.4](#)).

1.3 Rumori e artefatti nelle immagini astronomiche

La qualità delle immagini astronomiche è influenzata da diversi tipi di rumore e artefatti, che devono essere mitigati per ottenere risultati ottimali. I tipi di rumori principali sono:

- **Rumore termico:** Il rumore termico (*Dark Current*) è generato dall'agitazione termica degli elettroni all'interno del sensore della fotocamera, producendo un segnale anche in assenza di luce. Questo tipo di rumore aumenta con la temperatura del sensore ed è particolarmente significativo nelle lunghe esposizioni. Per ridurlo, molti sensori astronomici sono raffreddati tramite *sistemi termoelettrici* o *criogenici*. La sottrazione dei *dark frames* durante la calibrazione permette di correggere questo rumore.
- **Rumore del sensore:** Include vari tipi di rumore intrinseco al sensore della fotocamera:

- **Rumore di lettura:** deriva dall'elettronica durante il processo di lettura e digitalizzazione del segnale dal sensore. È generalmente costante e può essere minimizzato utilizzando componenti elettronici di alta qualità. Sebbene il rumore di lettura non possa essere eliminato, l'uso di *bias frames* nella calibrazione aiuta a compensare l'offset introdotto dall'elettronica.
- **Rumore di schema fisso:** Il rumore di schema fisso (*Fixed Pattern Noise*) è causato dalle variazioni di sensibilità tra i pixel, si manifesta come pattern ripetuti nell'immagine. L'utilizzo dei *flat frames* nella calibrazione aiuta a correggere queste imperfezioni.
- **Amp glow:** È una luminescenza causata dal calore generato dai circuiti di amplificazione del sensore, visibile come un bagliore ai bordi dell'immagine. La sottrazione dei *dark frames* e il raffreddamento del sensore contribuiscono a ridurre questo fenomeno.
- **Altri artefatti:** altri artefatti includono la vignettatura, un oscuramento ai bordi dell'immagine dovuto alle caratteristiche ottiche del sistema e mitigabile con i *flat frames*, e i *pixel caldi e morti*, ossia pixel che rimangono sempre accesi o spenti, che possono essere mappati e corretti durante l'elaborazione.

Capitolo 2

Tecniche di elaborazione delle immagini astronomiche

2.1 Calibrazione delle immagini

2.1.1 Bias Frames

2.1.2 Dark Frames

2.1.3 Flat Frames

2.2 Allineamento delle immagini

2.2.1 Feature Detection e Matching ORB, SIFT e SURF

2.2.2 Trasformazioni omografiche

2.3 Pre-processing delle immagini

2.3.1 Denoising tramite reti neurali: DnCNN

2.3.2 Unsharp Masking e personalizzazione

2.4 Tecniche di Stacking

2.4.1 Principi e vantaggi dello stacking

2.4.2 Algoritmi di stacking

2.5 Post-Processing delle immagini

2.5.1 Miglioramento di nitidezza e contrasto

Capitolo 3

Implementazione del Progetto

3.1 Architettura del software

3.1.1 Calibrazione

3.1.2 Allineamento

3.1.3 Pre-processing

3.1.4 Stacking

3.1.5 Post-processing

3.2 Sfide affrontate e soluzioni adottate

Capitolo 4

Valutazione dei Risultati e Metriche di Qualità

4.1 Metriche di valutazione con riferimento

4.1.1 SSIM (Structural Similarity Index Measure)

4.1.2 SNR (Signal-to-Noise Ratio)

4.2 Metriche di valutazione senza riferimento

4.2.1 NIQE (Naturalness Image Quality Evaluator)

4.2.2 BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator)

4.2.3 LIQE (Language-Image Quality Evaluator)

4.2.4 Motivazione della scelta di LIQE come metrica di riferimento

4.3 Analisi e miglioramenti ottenuti

4.3.1 Effetti della calibrazione

4.3.2 Impatto del denoising

4.3.3 Benefici dello stacking

4.3.4 Miglioramenti con sharpening e contrasto

Conclusions

TODO

Acknowledgements

TODO

Bibliografia

- [1] Tanmoy Bhowmik et al. *Image Processing and Analysis of Multiple Wavelength Astronomical Data Using Python Tools*. 2024. DOI: 10.48550/ARXIV.2410.06573. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.06573>.
- [2] Jonathan P. Gardner et al. «The James Webb Space Telescope». In: *Space Science Reviews* 123.4 (apr. 2006), 485–606. ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1007/s11214-006-8315-7. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-006-8315-7>.
- [3] Matthew D. Lallo. «Experience with the Hubble Space Telescope: 20 years of an archetype». In: *Optical Engineering* 51.1 (feb. 2012), p. 011011. ISSN: 0091-3286. DOI: 10.1117/1.oe.51.1.011011. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/1.oe.51.1.011011>.
- [4] Diganta Misra et al. *Advanced Image Processing for Astronomical Images*. 2018. DOI: 10.48550/ARXIV.1812.09702. URL: <https://arxiv.org/abs/1812.09702>.
- [5] Nikhil Padmanabhan et al. «An Improved Photometric Calibration of the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data». In: *The Astrophysical Journal* 674.2 (feb. 2008), 1217–1233. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.1086/524677. URL: <http://dx.doi.org/10.1086/524677>.
- [6] Paolo Padovani et al. «The Extremely Large Telescope». In: (2023). DOI: 10.1080/00107514.2023.2266921. eprint: [arXiv:2312.04299](https://arxiv.org/abs/2312.04299).
- [7] Ethan Rublee et al. «ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF». In: *2011 International Conference on Computer Vision*. IEEE, nov. 2011, 2564–2571. DOI: 10.1109/iccv.2011.6126544. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>.
- [8] *The History of Astrophotography* / High Point Scientific — [highpointscientific.com](https://www.highpointscientific.com/astrophotography-guides/history-of-astrophotography). <https://www.highpointscientific.com/astrophotography-guides/history-of-astrophotography>.
- [9] Donald G York et al. «The sloan digital sky survey: Technical summary». In: *The Astronomical Journal* 120.3 (2000), p. 1579.
- [10] Kai Zhang et al. «Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising». In: *IEEE Transactions on Image Processing* 26.7 (lug. 2017), 3142–3155. ISSN: 1941-0042. DOI: 10.1109/tip.2017.2662206. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TIP.2017.2662206>.