



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
1.4	La Luna	5
2	Elaborazione delle immagini lunari	7
2.1	Calibrazione delle immagini	8
2.1.1	Bias Frames	8
2.1.2	Dark Frames	8
2.1.3	Flat Frames	8
2.2	Allineamento delle immagini	8
2.2.1	Feature Detection e Matching ORB, SIFT e SURF	8
2.2.2	Trasformazioni omografiche	8
2.3	Pre-processing delle immagini	8
2.3.1	Denoising tramite reti neurali: DnCNN	8
2.3.2	Unsharp Masking e personalizzazione	8
2.4	Stacking delle immagini	8
2.4.1	Principi e vantaggi dello stacking	8
2.4.2	Algoritmi di stacking	8
2.5	Post-Processing delle immagini	8
2.5.1	Miglioramento di nitidezza e contrasto	8
3	Implementazione	9

Indice	v
3.1 Architettura del software	9
3.1.1 Calibrazione	9
3.1.2 Allineamento	9
3.1.3 Pre-processing	9
3.1.4 Stacking	9
3.1.5 Post-processing	9
3.2 Sfide affrontate e soluzioni adottate	9
4 Valutazione dei risultati e metriche di qualità	10
4.1 Metriche di valutazione con riferimento	10
4.1.1 SSIM (Structural Similarity Index Measure)	10
4.1.2 SNR (Signal-to-Noise Ratio)	10
4.2 Metriche di valutazione senza riferimento	10
4.2.1 NIQE (Naturalness Image Quality Evaluator)	10
4.2.2 BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator)	10
4.2.3 LIQE (Language-Image Quality Evaluator)	10
4.2.4 Motivazione della scelta di LIQE come metrica di riferimento	10
4.3 Analisi e miglioramenti ottenuti	10
4.3.1 Effetti della calibrazione	10
4.3.2 Impatto del denoising	10
4.3.3 Benefici dello stacking	10
4.3.4 Miglioramenti con sharpening e contrasto	10
Conclusions	11
Acknowledgements	12

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Evoluzione dell'astrofotografia

L'**astrofotografia** si occupa di fotografare oggetti celesti come stelle, pianeti, galassie e nebulose. Questa pratica ha radici risalenti al XIX secolo: nel 1822 fu scattata la prima foto nella storia da Nicéphore Niépce, e già nel 1840 John William Draper catturò la prima immagine della Luna, 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 molto laborioso. Le prime immagini si concentravano infatti su oggetti luminosi, come la Luna e i pianeti, mentre stelle più deboli e galassie rimanevano al di là delle capacità tecnologiche dell'epoca [10]. Con la nascita della *fotografia a colori* gli astronomi poterono registrare le diverse tonalità di colore degli oggetti celesti, rendendo possibile ottenere informazioni circa la composizione chimica e la temperatura di stelle e nebulose. La vera rivoluzione arrivò con l'avvento della **fotografia digitale** e l'introduzione di *dispositivi a carica accoppiata* (*CCD*) alla fine degli anni '60. I *CCD* avevano sensibilità alla luce notevolmente superiore rispetto alle lastre fotografiche, permettendo tempi di esposizione più brevi e maggiore qualità dell'immagine. Ciò 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 [12][6].

Oggi l'astrofotografia è accessibile non solo ad astronomi professionisti, ma anche ad appassionati dilettanti. L'ampia disponibilità di telescopi, fotocamere 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 appassionati di astronomia e fotografia, che condividono le proprie immagini e scoperte sui social e 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.

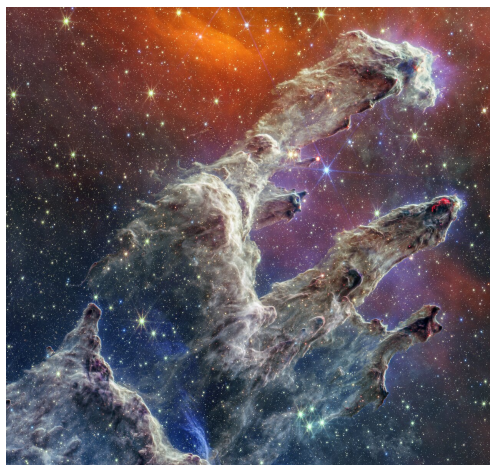


Figura 1.1. *Pillars of Creation*, Nebulosa dell'Aquila, ripresi dal *James Webb* combinando dati acquisiti da *NIRCam* e *MIRI*. Immagine originale su [webbtelescope.org](https://www.webbtelescope.org)

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 [7]. 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 [12] [6].

- **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) [8], **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] [6].
- **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) [13], 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* ("impilamento") combina multiple esposizioni per ottenere un'unica 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, per ottenere in seguito un'immagine data dalla media ponderata dei valori dei singoli 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:

- **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 diversi 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.

1.4 La Luna

Tra i corpi celesti più affascinanti e accessibili nell'astrofotografia spicca sicuramente la **Luna**. Grazie alla sua vicinanza alla Terra, alla sua luminosità e alle sue dimensioni apparenti relativamente grandi, è possibile catturare immagini lunari di alta qualità anche in assenza di strumentazione professionale. Fotografare la Luna rispetto ad altri corpi celesti presenta diversi vantaggi:

- **Rotazione sincrona:** La Luna mostra sempre la stessa faccia verso la Terra a causa della sua *rotazione sincrona*, ovvero il suo periodo di rotazione attorno al proprio asse è uguale al periodo di rivoluzione attorno alla Terra (circa 27,3 giorni) [Figura 1.2]. Questo fenomeno, dovuto alla *risonanza mareale*, comporta diverse semplificazioni nell'elaborazione delle immagini, eliminando la necessità di processi di derotazione [11].
- **Luminosità elevata:** La Luna è l'oggetto celeste più luminoso nel cielo notturno. Questa luminosità consente di utilizzare tempi di esposizione più brevi rispetto ad altri oggetti astronomici (da 1/250 a 1/100 di secondo, a seconda della percentuale di illuminazione, contro tempi fino a 20-30 secondi per oggetti dello spazio profondo), riducendo gli effetti del *rumore elettronico* e del movimento apparente.
- **Facilità di localizzazione:** Essendo facilmente visibile ad occhio nudo, la Luna non richiede sistemi di puntamento sofisticati o montature equatoriali per essere fotografata. Un semplice treppiede è sufficiente per stabilizzare la fotocamera durante la cattura delle immagini.

Nell'astrofotografia planetaria in generale, quando il soggetto non è la Luna, i pianeti sono notevolmente distanti dalla Terra, e piccole perturbazioni dell'atmosfera possono causare rumore e artefatti fastidiosi. È possibile ovviare a questo problema registrando dei video (piuttosto che singole immagini) e rimuovere tali artefatti

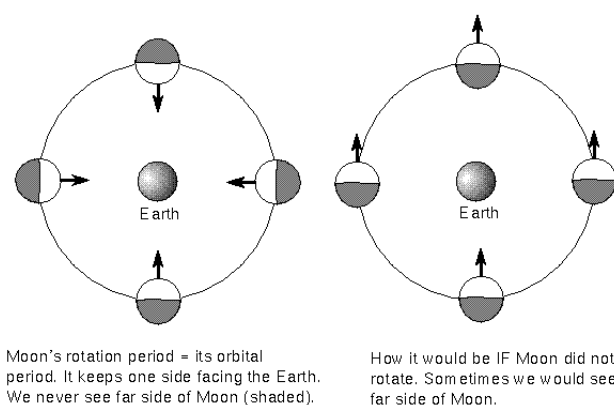


Figura 1.2. Dimostrazione grafica del moto di rotazione e rivoluzione della Luna. Questa immagine è per gentile concessione di *Nick Strobel* su www.astronomy_notes.com

tramite una tecnica chiamata *Lucky Imaging*, combinata con tecniche di *derotazione* per mitigare l'effetto della rotazione del pianeta attorno al proprio asse.

L'astrofotografia lunare professionale consiste spesso nello scattare immagini che catturano sezioni diverse della Luna; queste vengono prima processate singolarmente e poi unite mediante tecniche di *stitching*. Un'altra tecnica molto diffusa è quella utilizzata per ottenere le cosiddette *Mineral Moon*: si eseguono diversi scatti applicando filtri a banda stretta sui telescopi, per poi elaborare i canali RGB singolarmente, facendo risaltare la presenza di minerali diversi sulla superficie lunare [5].

Fotografare la Luna presenta comunque diverse sfide. Essa è caratterizzata da un elevato contrasto tra le aree illuminate e quelle in ombra, specialmente durante le fasi parziali, rendendo difficile ottenere un'esposizione bilanciata che catturi dettagli in entrambe le zone [9]. Nonostante la sua vicinanza, l'atmosfera terrestre influenza la qualità delle immagini lunari, introducendo turbolenze (*seeing*), dispersione e attenuazione della luce, portando ad una riduzione di nitidezza e contrasto nei risultati [9]. Infine, sebbene la luminosità della Luna consenta di fotografarla anche da aree urbane, l'inquinamento luminoso può ancora influenzare la qualità, specialmente quando si vuole catturare dettagli più fini o nelle fasi meno illuminate.

Nel contesto di questo progetto, sono state scattate personalmente immagini della Luna utilizzando una **Fujifilm FinePix S1**, una fotocamera bridge dotata di uno zoom ottico fino a 50×. Senza l'ausilio di telescopi o montature specializzate, ma semplicemente con l'utilizzo di un treppiede standard, è stato possibile catturare immagini dettagliate della superficie lunare.

Questa scelta strumentale evidenzia come, grazie alle moderne tecnologie e alle tecniche di elaborazione delle immagini, sia possibile ottenere risultati di qualità anche con attrezzature relativamente modeste. Le immagini acquisite sono state utilizzate per testare e validare gli algoritmi sviluppati nel corso del progetto, dimostrando l'efficacia delle metodologie proposte nell'ottimizzazione di fotografie lunari.

Capitolo 2

Elaborazione delle immagini lunari

Questo capitolo si propone di approfondire le tecniche di elaborazione delle immagini lunari, illustrando le nozioni teoriche alla base degli algoritmi implementati nel progetto. Ogni tecnica verrà descritta in dettaglio, partendo dalla calibrazione e dall'allineamento, passando per il pre-processing e lo stacking, per concludere con il post-processing. Quando necessario, verranno forniti pseudocodice e descrizioni dei processi matematici applicati alle immagini; l'implementazione sarà invece discussa nel capitolo [3](#).

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 Stacking delle immagini

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

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] *Moon - Thierry Legault — astrophoto.fr*. <http://www.astrophoto.fr/moon.html>.
- [6] 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>.
- [7] 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).
- [8] 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>.
- [9] William P. Sheehan et al. *Epic Moon*. Willmann-Bell, Inc., 2001. ISBN: 9780943396725.
- [10] *The History of Astrophotography | High Point Scientific — highpointscientific.com*. <https://www.highpointscientific.com/astronomy-hub/post/astro-photography-guides/history-of-astrophotography>.
- [11] *The Moon's Orbit and Rotation – Moon: NASA Science — moon.nasa.gov*. <https://moon.nasa.gov/resources/429/the-moons-orbit-and-rotation/>.

-
- [12] Donald G York et al. «The sloan digital sky survey: Technical summary». In: *The Astronomical Journal* 120.3 (2000), p. 1579.
 - [13] 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>.