

ÉLABORATION D'UNE MÉTHODOLOGIE ÉCONOMIQUE D'IMAGERIE SPECTRALE 3D ET ÉVALUATION DE SON APPORT POUR LES APPLICATIONS PATRIMONIALES

Résumé

La numérisation – qu'elle soit en 2D, 2D+ ou 3D – joue aujourd'hui un rôle central dans la gestion des collections, l'analyse scientifique et l'accès du public au patrimoine. La pandémie de COVID-19 a mis en évidence l'importance cruciale des substituts numériques, devenus parfois le seul moyen d'accéder aux collections et de les étudier. Si l'imagerie spectrale 2D et la numérisation 3D ont chacune démontré leur utilité dans le domaine patrimonial, leur combinaison ouvre de nouvelles perspectives pour révéler des informations jusque-là inaccessibles sur les matériaux, les structures ou les inscriptions.

Cette recherche explore le potentiel de l'imagerie spectrale 3D pour améliorer la documentation, l'interprétation et l'analyse des objets patrimoniaux. En tirant parti des complémentarités entre données spectrales et géométriques, l'étude propose une méthodologie accessible et peu coûteuse, adaptée aux besoins des professionnels du patrimoine. Elle poursuit un double objectif : développer un protocole méthodologique d'acquisition de données spectrales en 3D et en évaluer la valeur ajoutée à travers plusieurs études de cas.

Les questions de recherche principales sont les suivantes : comment acquérir efficacement des données spectrales 3D avec un équipement abordable ? Quelle est la valeur ajoutée de cette approche pour la numérisation de matériaux difficiles à numériser avec les techniques surfaciques habituelles ? Peut-elle améliorer la lisibilité ou révéler des informations invisibles à l'œil nu ? Peut-elle servir à identifier ou différencier les matériaux de manière non invasive ?

En testant de manière systématique différents dispositifs, flux de travail et méthodes de traitement, cette étude formule et évalue des hypothèses sur les apports visuels et analytiques de l'imagerie spectrale 3D. Elle vise, *in fine*, à proposer des recommandations concrètes pour l'intégration de cette méthodologie dans des campagnes de numérisation à plus grande échelle. Les résultats pourraient nourrir les pratiques futures en matière de conservation, de recherche et de valorisation du patrimoine culturel.

Cette thèse est structurée en trois grandes parties.

La **première partie** constitue les prolégomènes. Elle comprend l'introduction générale, qui expose les motivations scientifiques et pratiques ayant conduit au choix de combiner la photogrammétrie à l'imagerie spectrale. Elle présente également les fondements technologiques et méthodologiques de cette approche hybride. Enfin, elle propose un état de l'art documenté du domaine, en définissant les principes de base nécessaires à la compréhension du cadre de recherche.

La **deuxième partie** constitue le cœur de cette étude. Elle est consacrée à la mise en œuvre de la méthodologie proposée et à son évaluation au travers de plusieurs études de cas, réparties en cinq chapitres.

Le **premier chapitre** détaille les choix réalisés en matière d'équipement et de protocoles, en comparant différentes options allant des solutions les plus abordables aux configurations plus coûteuses.

Le **deuxième chapitre** s'interroge sur l'intérêt de l'imagerie spectrale pour améliorer les modèles 3D, en comparaison aux résultats obtenus en photogrammétrie classique, mais aussi par rapport à d'autres techniques d'imagerie 3D. Certains matériaux posent en effet des problèmes à la photogrammétrie classique en raison de leurs propriétés optiques – comme les matériaux très réfléchissants, fortement absorbants ou très transmissifs. L'imagerie spectrale est ici exploitée comme un moyen de surmonter ces limitations et d'améliorer la précision et l'intégrité des reconstructions 3D.

Le **troisième chapitre** explore la contribution de l'imagerie spectrale 3D à l'amélioration de la lisibilité des objets patrimoniaux, en mettant en évidence des éléments difficilement visibles à l'œil nu. Les données spectrales et géométriques sont analysées à travers différentes techniques de traitement. Le chapitre compare les rehauts obtenus à partir de textures en lumière blanche (via des méthodes telles que l'étirement par décorrélation ou la réduction de dimension) avec ceux issus de bandes spectrales individuelles ou combinées (imagerie en fausses couleurs, réduction de dimension, traitements mathématiques). La valeur ajoutée des données géométriques est également étudiée à l'aide de textures spécifiques comme les textures d'occlusion ou via les techniques de mise à plat virtuelle pour faciliter l'interprétation visuelle.

Le **quatrième chapitre** porte sur l'identification des matériaux et de certains éléments géométriques à l'aide de méthodes de classification, avec une attention particulière portée à l'identification des pigments. Deux études de cas expérimentales ont été élaborées, chacune disposant de son propre jeu de données d'apprentissage. L'approche est ensuite appliquée à un cas d'étude patrimonial réel afin d'en évaluer l'efficacité sur le terrain.

Ces trois derniers chapitres s'appuient sur des études de cas patrimoniaux issus de cultures et de périodes variées, afin de démontrer que la méthode proposée est applicable à un large éventail de contextes. Elle ne se limite ni à une époque spécifique, ni à un type particulier d'objet.

Enfin, le **cinquième chapitre** synthétise les résultats des chapitres précédents pour évaluer l'efficacité des équipements et protocoles utilisés. Des expériences complémentaires ont été menées pour évaluer certains aspects des performances des différents éléments. Conçues pour être facilement reproductibles sans outils spécialisés, ces expériences aboutissent à des recommandations pratiques visant à trouver un équilibre optimal entre coût et performance pour des applications patrimoniales. Par ailleurs, elles constituent un cadre que d'autres chercheurs peuvent réutiliser pour tester le potentiel d'équipements alternatifs à bas coût.

La **troisième et dernière partie** est consacrée aux recommandations pratiques, aux bonnes pratiques et aux conclusions générales. En s'appuyant sur les résultats de la deuxième partie, elle propose un ensemble de recommandations concrètes pour accompagner la communauté dans la mise en œuvre de l'imagerie spectrale 3D. Cela comprend des conseils sur le choix de l'équipement en fonction des besoins spécifiques. Pour chaque question de recherche traitée dans la thèse, un protocole recommandé est proposé et illustré par des diagrammes adaptés. La thèse se termine par une synthèse générale et ouvre des perspectives pour de futures recherches.

ESTABLISHING A COST-EFFECTIVE METHODOLOGY FOR 3D SPECTRAL IMAGING AND ASSESSING ITS VALUE FOR HERITAGE APPLICATIONS

Abstract

Digitization – whether in 2D, 2D+, or 3D – now plays a central role in collection management, scientific analysis, and public access. The COVID-19 pandemic underscored the essential function of digital surrogates, often serving as the sole means of accessing and studying collections. While 2D spectral imaging and 3D digitization have individually proven their value in heritage contexts, integrating these approaches offers the potential to uncover previously inaccessible information about materials, structures, and inscriptions.

This research explores the potential of 3D spectral imaging (3D SI) to enhance the documentation, interpretation, and analysis of heritage objects. Drawing on the strengths of both spectral and geometric data, the study proposes an affordable and accessible workflow tailored to the needs of heritage professionals. The dual objective is to develop a technical methodology for acquiring 3D spectral data and to evaluate its added value through a series of case studies.

Key research questions include: How can 3D spectral data be effectively acquired using a cost-efficient setup? What is the added value of 3D SI for the digitization of challenging materials? Can it improve legibility or reveal otherwise invisible information? Can it support non-invasive material identification?

By systematically testing equipment, workflows, and processing strategies, this study formulates and assesses hypotheses concerning the analytical and visual benefits of 3D SI. Ultimately, it aims to establish best practices and evaluate the feasibility of integrating 3D SI into large-scale digitization efforts. The results have the potential to inform future conservation, research, and public dissemination strategies across the cultural heritage sector.

This dissertation is structured into three main parts.

The **first part** serves as a set of preliminary considerations. It includes the general introduction, which outlines the scientific and practical motivations behind the decision to combine 3D with spectral imaging. This section then lays out the technological and methodological foundations of this hybrid approach, explaining the rationale behind selecting photogrammetry as the 3D acquisition technique. Finally, it provides a documented state of the art, defining the key principles necessary for understanding the research framework.

The **second part** constitutes the core of this study. It focuses on the implementation of the proposed methodology and its evaluation through several case studies, and is divided into five chapters.

The **first chapter** details the choices made regarding equipment and acquisition protocols, comparing various options ranging from cost-effective solutions to more advanced, high-end configurations.

The **second chapter** investigates whether spectral imaging can enhance 3D models compared to traditional photogrammetry and other 3D imaging techniques. Certain

materials pose challenges for conventional photogrammetry due to their optical properties – such as highly reflective, strongly absorbent, or highly transmissive materials. Spectral imaging is explored as a potential solution to overcome these limitations and improve the accuracy and completeness of 3D reconstructions.

The **third chapter** explores how 3D spectral imaging contributes to improving the legibility of heritage objects by revealing features that are difficult to perceive with the naked eye. Both spectral and geometric aspects are addressed through a variety of processing techniques. The chapter compares enhancements derived from white light textures – using methods such as decorrelation stretch and dimensionality reduction – with those obtained from individual spectral bands or combinations of bands through false color imaging, dimensionality reduction, or mathematical processing. The added value of geometric data is also assessed, using specific textures like ambient occlusion and flattening techniques to improve visual interpretation.

The **fourth chapter** addresses the identification of materials and certain geometric elements using classification methods, with a particular focus on pigment detection. To evaluate these methods, two experimental case studies were created, each with its own training dataset. The approach is ultimately applied to a real-world heritage case study to assess its practical effectiveness.

These three chapters are grounded in case studies involving heritage objects from diverse cultures and time periods, demonstrating the wide applicability of the proposed method. It is not restricted to any specific era or type of object.

Finally, the **fifth chapter** synthesizes the findings from the previous chapters to assess the overall effectiveness of the selected equipment and protocols. Additional experiments were conducted to assess specific aspects of the equipment's performance. These experiments were designed to be easily reproducible without the need for advanced or specialized tools. The chapter offers practical recommendations for achieving an optimal balance between cost and performance in heritage applications. Moreover, the proposed experiments provide a framework that other researchers can replicate to evaluate the potential of alternative low-cost equipment.

The **third and final part** is devoted to practical recommendations, best practices, and concluding reflections. Building on the findings from Part Two, it proposes a set of best practices and recommendations to support the community in implementing 3D spectral imaging. This includes equipment recommendations and guidance for making informed choices based on specific needs. For each research question addressed in this dissertation, a recommended workflow is proposed and illustrated with tailored flowcharts. The dissertation concludes with a general synthesis and outlines future research perspectives opened by this work.

Table of Contents

Résumé	7
Abstract	9
Acknowledgments	11
Disclaimer	13
List of Common Acronyms Used in this Thesis	25
PART A — Preliminary Considerations	27
Chapter 1 — Introduction	29
1.1. Context	29
1.2. Research objectives and hypothesis.....	30
1.3. Research methodology	31
1.4. Structural summary.....	32
Chapter 2 — Selecting a Method: Cost-Conscious Choice for 3D Spectral Digitization.....	35
Chapter 3 — Basic concepts and state of the Art.....	37
3.1. Glossary and basic concepts	37
3.1.1. Structure-from-Motion MultiView Stereo photogrammetry	37
3.1.1.1. The origins of photogrammetry.....	37
3.1.1.2. Method	38
3.1.1.3. Benefits of 3D imaging.....	41
3.1.2. Multiband, multispectral, hyperspectral or spectral imaging.....	41
3.1.2.1. The origins of spectral imaging.....	41
3.1.2.2. Useful vocabulary.....	43
3.1.2.3. Method	44
3.1.2.4. Benefits of 2D multiband and multispectral imaging	50
3.2. Attempts at 3D spectral imaging	51
3.3. The Uncharted Territory: Addressing the Challenges of 3D Spectral Imaging	54

PART B — Case Studies and Method Validation	57
Chapter 1 — Toolbox and Protocols: Method Development	59
1.1. Context, resource and constraints.....	59
1.2. Gearing Up: Tools of the Trade.....	59
1.2.1. Capture equipment	60
1.2.1.1. Imaging sensor: using Modified DSLRs	60
1.2.1.2. Lenses.....	63
1.2.1.2.1. Dedicated lenses.....	64
1.2.1.2.2. Normal lenses	68
1.2.2. Optical/spectral filters.....	70
1.2.2.1. Types of optical/spectral filters	70
1.2.2.1.1. Classification in term of construction	71
1.2.2.1.2. Filter classification in term of light filtering	72
1.2.2.2. Filters used.....	73
1.2.3. Radiation source	75
1.2.3.1. Potential radiation for spectral imaging	75
1.2.3.2. State of the art illumination panels (high end commercial setup)	79
1.2.3.3. Low-cost spectral imaging setup developed in-house.....	80
1.2.3.3.3. The flashguns setup (SI-FLASH)	80
1.2.3.3.4. Stand-alone LEDs panels (SI-SA-LED)	82
1.2.3.3.5. Other sources.....	84
1.2.3.4. Collection safety.....	84
1.2.4. Accessories	85
1.2.4.1. Turntable	85
1.2.4.2. Scales	85
1.3. Calibration and control quality of spectral data.....	86
1.3.1. Introduction	86
1.3.2. Calibration images: literature review	87
1.3.3. Reflectance standards and radiometric calibration	88
1.3.4. 3D spectral calibration procedure	92
1.3.4.1. Premium Calibration: Investing in Professional Software	92
1.3.4.2. Calibration on a Shoestring	93
1.3.4.3. Calibration: A Necessity or a Choice?.....	95
1.3.5. Beyond the Rainbow: Quality Control for Spectral Data.....	95
1.4. 3D control quality.....	95
1.4.1. Quality parameters for SfM.....	96
1.4.2. Summary	98

1.5. Paradata Chronicles: Revealing the Data's Behind-the-Scenes Journey	99
1.6. Charting New Territories: 3D-SI protocols	100
1.6.1. Spectral acquisition methods.....	100
1.6.1.1. Ultraviolet induced visible photoluminescence	100
1.6.1.2. Ultraviolet reflected photography	100
1.6.1.3. Visible reflectography / Visible reflected photography	101
1.6.1.4. Infrared reflected photography	101
1.6.1.5. Infrared visible-induced luminescence improved legibility	102
1.6.1.6. Summary	102
1.6.2. Image acquisition.....	102
1.6.3. Processing protocols	103
1.6.3.1. Protocol P1: 1 model calculated for each wavelength	104
1.6.3.2. Protocol P2: 1 model for all wavelength but 1 texture per wavelength	104
1.6.3.2.1. P2A: With image registration	105
1.6.3.2.2. P2B: With 3D registration	106
1.7. Visualization of 3D spectral data.....	106
1.8. Analysis	108
1.9. Summary.....	110
Chapter 2 — Improving 3D Models of Challenging Materials	111
2.1. Introduction.....	111
2.2. Material types.....	112
2.2.1. Perceived color and homogenous materials	113
2.2.2. Highly reflective materials.....	113
2.2.3. Translucent or transparent materials	114
2.3. Evaluation method.....	117
2.3.1. Presentation of other techniques used to generate reference data	121
2.3.1.1. Micro-Computed Tomography	122
2.3.1.2. Structured light	122
2.3.2. Case studies	122
2.4. Light and reflective material	123
2.4.1. Light and reflective material: Enamel (Spy 2A, RBINS)	123
2.4.1.1. Presentation.....	123
2.4.1.2. Results	125
2.4.1.3. Discussion	127

2.4.2. Light and reflective material: Nunavut figurine in ivory (E.O.90.26.54, RMCA)	128
2.4.2.1. Presentation.....	128
2.4.2.2. Method	129
2.4.2.3. Result	129
2.4.2.4. Discussion	139
2.5. Dark and reflective material	139
2.5.1. Dark and reflective material: Pende headrest (EO.1955.96.4, RMCA)	139
2.5.1.1. Presentation.....	139
2.5.1.2. Method	140
2.5.1.3. Results	140
2.5.2. Dark and reflective material: Obsidian blade core (A.P.8146, RBINS)	149
2.5.2.1. Presentation.....	149
2.5.2.2. Method	149
2.5.2.3. Results	150
2.5.3. Discussion.....	158
2.6. Translucent material.....	159
2.6.1. Translucent material: Calcite (D138, IG32105, RBINS).....	159
2.6.1.1. Presentation.....	159
2.6.1.2. Method	159
2.6.1.3. Discussion	171
2.7. General discussion.....	172
Chapter 3 — Improved Legibility.....	177
3.1. Introduction.....	177
3.2. Methodology	178
3.2.1. Spectral groups for improved legibility	179
3.2.1.1. Ultraviolet induced visible photoluminescence	179
3.2.1.2. Infrared reflected photography	179
3.2.1.3. Ultraviolet reflected photography	180
3.2.1.4. Visible-induced infrared photoluminescence	180
3.2.1.5. Other wavelengths/bands	180
3.2.2. Enhancing Contrast Objectivity	180
3.2.3. Sharpen Your Vision: Improving Legibility with Image Processing Algorithms	181
3.2.3.1. Introduction.....	181
3.2.3.2. False color	181
3.2.3.3. Mathematical processing.....	183

3.2.3.4. Dimension reduction using Principal Component Analysis.....	184
3.2.4. Comparison with color enhancing software apply to white light ...	185
3.2.4.1. Decorrelation stretch.....	185
3.2.4.2. ERA.....	187
3.2.5. Mesh processing for improved legibility	188
3.2.5.1. Ambient occlusion and digital elevation model.....	189
3.2.5.2. Unrolling.....	190
3.3. Case studies.....	191
3.3.1. Improved legibility of engravings.....	192
3.3.1.1. Rod of Trou des Nutons (Mathys <i>et al.</i> , 2019)	192
3.3.1.1.1. Presentation	192
3.3.1.1.2. Results.....	193
3.3.1.2. Mpungi horn (Mathys <i>et al.</i> , 2019)	202
3.3.1.2.1. Presentation	202
3.3.1.2.2. Results.....	203
3.3.1.2.3. Rollout of a detailed view.....	207
3.3.2. Enhancing past restorations	208
3.3.2.1. Ngongo ceramic (EO.1954.40.34, RMCA)	208
3.3.2.1.1. Presentation	208
3.3.2.1.2. Results.....	208
3.3.2.1.3. 3D unwrapping/flattening.....	213
3.3.2.2. Yaka mask (EO.1954.1.17, RMCA).....	214
3.3.2.2.1. Presentation	214
3.3.2.2.2. Results.....	214
3.3.3. Revealing lost details	216
3.3.3.1. Long dugout canoe (EO.1958.1.1, RMCA)	216
3.3.3.1.1. Presentation	216
3.3.3.1.2. Results.....	217
3.3.3.2. Red tomb of Deir el Medina.....	219
3.3.3.2.1. Presentation	219
3.3.3.2.2. Results.....	221
3.3.4. Sennefer tomb	233
3.3.4.1. Presentation.....	233
3.3.4.2. Results	235
3.3.4.2.1. Scene 1	235
3.3.4.2.2. Scene 4.....	247
3.3.4.2.3. Scene 5	260
3.3.4.2.4. Scene 6	266

3.3.4.2.5. Scene 7	270
3.3.4.3. Discussion	272
3.4. General discussion.....	275
Chapter 4 — Unlocking Hidden Layers: Digging Deeper into Heritage Analysis with Spectral 3D Classification	277
4.1. Introduction.....	277
4.2. Method and evaluation protocol	278
4.2.1. The classification	279
4.2.1.1. Geometric classification	279
4.2.1.2. Spectral classification	281
4.2.1.2.1. General consideration.....	281
4.2.1.2.2. Preparation of the data for 3D spectral classification.....	282
4.2.1.3. An overview of classification algorithms considered in this research.....	283
4.2.2. Other pigment identification methods: flowchart method and false color imaging	288
4.3. Experimental case study	289
4.3.1. Introduction	289
4.3.2. Creation of case studies: creation of objects and training datasets	290
4.3.2.1. Case study genesis: the creation.....	290
4.3.2.2. Imaging the case study and the training set.....	294
4.3.2.3. Methodology	296
4.3.3. Training the classifier	296
4.3.3.1. Visual overview of wooden pigment charts.....	297
4.3.3.2. Model Training for Pigment Classification on Wooden Substrate	301
4.3.3.2.1. Algorithm Performance Comparison.....	301
4.3.3.2.2. Impact of Wavelengths on Classification.....	302
4.3.3.3. Model Training for Pigment Classification on Paper Substrate.....	305
4.3.3.3.1. Algorithm performance from a point cloud from single viewpoint/ light orientation	305
4.3.3.3.2. Impact of Wavelengths on classification	306
4.3.3.3.3. 3D Model Classification Results	306
4.3.3.4. Efficiency of the classifiers	312
4.3.4. Case Study Classifier Testbed.....	312
4.3.4.1. Application of the classifier to the Giraffe case study	312
4.3.4.1.1. Overall performance	312
4.3.4.1.2. Pigments performance	319

4.3.4.2. Application of the classifier to the Bird case study	324
4.3.4.2.1. Overall performance	324
4.3.4.2.2. Pigments performance	327
4.3.4.3. Discussion	334
4.3.5. Confrontation of the classification results with the flowchart pigment identification method	334
4.4. Sennefer tomb: identification of pigment <i>in-situ</i>	337
4.4.1. Introduction	337
4.4.2. Geometric classification.....	337
4.4.2.1. Method	337
4.4.2.2. Results	340
4.4.3. Spectral classification results	343
4.4.3.1. Method	343
4.4.3.2. Results	349
4.4.3.2.1. Training the classifier	349
4.4.3.2.2. Classification from the point cloud using all spectral bands	351
4.4.3.2.3. Classification from the point cloud using a small set of spectral bands and RGB data	362
4.4.3.2.4. From point cloud using the reference from the painting itself	363
4.4.3.3. Classification performed on image texture	366
4.4.3.4. Using the flowchart method.....	371
4.4.4. Discussion and critical assessment of the results from Sennefer Scene 1 analysis.....	376
4.5. General discussion.....	378
Chapter 5 — Evaluation of the Different Equipment and Workflows.....	379
5.1. Introduction.....	379
5.2. Lens evaluation: is a dedicated lens worthed?.....	379
5.2.1. 60 mm lenses	379
5.2.1.1. Transmission.....	379
5.2.1.2. Chromatic focus shift.....	382
5.2.1.2.1. Chromatic focus shift evaluation	382
5.2.1.2.2. Focus shift impact in SfM	384
5.2.1.3. Hotspot performance	388
5.2.1.4. Discussion: Evaluating the Worth of a Dedicated Multispectral Lens.....	393
5.2.2. Evaluation of standard lenses at other focal lengths	394

5.2.2.1. Transmission.....	397
5.2.2.2. Chromatic focus shift.....	399
5.2.2.3. Discussion	403
5.3. Comparing Spectral Imaging Performance of Modified and Unmodified DSLRs	404
5.3.1. Comparison of the sensitivity of a modified and non-modified DSLR	405
5.3.2. Comparison of the sensitivity of several modified DSLR.....	406
5.3.3. Discussion: which is the most cost-effective camera body?	409
5.4. Filter comparison	409
5.4.1. UV-Pass	410
5.4.2. UV-IR block	410
5.4.3. IR-Pass.....	411
5.4.4. Discussion.....	412
5.5. Evaluation of the different illumination setups.....	413
5.5.1. Evaluation of the LEDs setups.....	413
5.5.1.1. Evaluation of the high-end illumination panels	413
5.5.1.2. The in-house LED setups.....	414
5.5.1.2.1. Wavelengths accuracy.....	414
5.5.1.2.2. Usability	416
5.5.1.3. Discussion	416
5.5.2. The flash setup.....	417
5.5.2.1. Comparison between different models	418
5.5.2.2. Usability in UVL and VIL.....	420
5.5.2.2.1. UVL results.....	421
5.5.2.2.2. VIL results	424
5.5.2.3. Ambient light impact	425
5.5.2.4. Field application reality: using the flash units in Sennefer tomb	427
5.5.2.5. Discussion	427
5.5.3. Comparison of the in-house LED panels and the modified flashguns in the framework of the field acquisition session of Sennefer tomb	428
5.5.3.1. Practical aspect of field work.....	428
5.5.3.2. Comparison of similar bands with different radiation sources	429
5.5.3.3. Time of acquisition.....	432
5.5.3.4. Discussion	433
5.5.4. Discussion on illumination setups.....	433
5.6. Evaluation of the targets' materials.....	433
5.7. Evaluation of the acquisition process.....	436

5.7.1. Evaluation of the use of the automated turntable.....	436
5.7.2. Evaluation of the acquisition workflow.....	436
5.8. Image processing: Evaluation of the calibration process.....	439
5.8.1. Reflectance standards comparison.....	439
5.8.2. Comparison of calibration procedures.....	442
5.8.2.1. Calibration of reflectance images.....	443
5.8.2.1.1. Dark-fielding.....	443
5.8.2.1.2. Flat-fielding.....	444
5.8.2.1.3. Color calibration.....	450
5.8.2.1.4. Radiometric correction.....	454
5.8.2.1.5. Overall process.....	456
5.8.2.2. Calibration procedure for luminescence images.....	456
5.8.2.2.1. UVL image calibration.....	457
5.8.2.2.2. VIL image calibration.....	464
5.8.3. Importance of calibration steps.....	465
5.8.3.1. Calibration necessity for improved 3D.....	465
5.8.3.2. Calibration necessity for improved legibility.....	465
5.8.3.3. Calibration necessity for material differentiation.....	466
5.8.4. Discussion.....	466
5.9. Evaluation of photogrammetry Processing Protocols.....	467
5.9.1. Comparison of P2 Protocols: Single Model with Textures for Each Wavelength.....	467
5.9.2. Evaluation of P1 protocol.....	470
5.9.3. Discussion.....	471
5.10. Cost impact.....	471
5.11. Discussion.....	472
PART C — Best Practices, Conclusions, and Future Developments	475
Chapter 1 — Best practices and quality assessment	477
1.1. Introduction.....	477
1.2. Equipment recommendations	477
1.3. Basic recommendation for qualitative SfM data	480
1.4. Best practices for improved 3D.....	482
1.5. Processing workflow for spectral 3D.....	484
1.6. Best Practices for Enhancing Legibility with 3D Spectral Imaging	484
1.7. Best Practices for Material Differentiation Using 3D Multispectral Imaging.....	487

Chapter 2 — Discussion	491
2.1. Summary.....	491
2.2. Future developments	493
PART D — References	497
PART E — Appendices.....	553
Specific vocabulary	555
Mathys <i>et al.</i>, 2019a.....	557
Mathys <i>et al.</i>, 2019b	565
Mathys <i>et al.</i>, 2022.....	597