

|      |   |    |     |
|------|---|----|-----|
| 京都大学 | 博士（工学）  | 氏名 | 王 鵬 |
| 論文題目 | Comprehensive Digital Archiving Techniques through High-resolution Imaging System with Line Sensor（ラインセンサーを用いた高精細イメージングシステムによる総合的デジタルアーカイブ技術） |    |     |

（論文内容の要旨）

近年、分光、色彩および表面形状などの情報をもつデジタルアーカイブを取得するための画像技術は、画像取得技術、画像処理技術および画像分析方法などの発展に伴い、医療、農業、文化財の記録など様々な分野で不可欠なものになっている。画像取得技術はイメージセンサーの高画質化や高速度化によって発展しており、画像処理技術はコンピュータの高性能化とともに扱える情報量が増え大きく進歩している。多くの分光情報を取得するためには、複数のフィルタを使用した複数回の撮像を行う手法がある。しかし、複数回の撮像にはその分の時間が必要であり、またそれぞれの画像間の位置合わせも必要である。一方、様々な対象物に対して色再現の技術が開発されてきているが、色再現できないものがまだ存在している。例えば、過去に文化財の記録を目的としてガラス乾板に撮影されたものが考えられる。このような過去の技術で記録された対象物は、歴史研究などを行う上で非常に貴重な資料として取り扱われている。さらに近年、様々な表面形状計測の手法が開発されてきた。テクスチャや凹凸のある 2.5D 対象物の場合に対して、より質の高いデジタル化を実現するために、従来の色情報に加え表面の微小形状を 3 次元データとして取得することが求められている。

本論文では、ラインセンサーを用いた高精細画像入力機械による分光、色彩および表面形状情報を取得するために、分析的イメージングシステムの設計を提案する。また、各情報に対する画像取得機械、画像処理技術および画像分析技術について述べる。さらに、各プロセスの正確性をシミュレーションあるいは実験により検証する。本論文は、全 6 章から構成される。

第 1 章では、画像技術の背景と既存手法の問題点、および本研究の目的について述べる。また、本研究に提案した画像取得システムの開発について紹介し、各章の要旨を述べる。

第 2 章では、分光、色彩および表面形状の情報を取得するために、本研究で開発した高精細画像取得システムについて述べる。まず、高精細画像取得システムの構築に必要な部分について検討する。画像取得システムの様々な段階において画像の色や光源むらによる誤差が生じるが、それらを補正するためのアルゴリズムについても提案する。ここで紹介するイメージングシステムの動作メカニズムとプロトタイプは、後の章で説明するすべてのシステムの基盤である。

第 3 章では、本研究で開発した高速回転マルチカラーフィルタを用いたマルチスペクトル画像取得システムについて述べる。高速回転マルチカラーフィルタを用いて 1 回の撮像から分光情報をもつ複数の画像を取得する効率的な撮像システムを開発し、実際の画像分析的手法に適用することを目的とする。実際の適用例として、マルチカラーフィルタを用いた分光反射率推定技術を題材として提案システムを適用し、有効性を検証する。マルチカラーフィルタの設計手法を構築し、その最適化シミュレーションを行う。最適化されたマルチカラーフィルタを使用して、日本画の顔料を対象として実験を行う。複数回撮影の従来手法と同程度の精度で分光反射率が取得でき、画像取得時間を考慮すると従来手法よりも効率的であることを示す。

第 4 章では、フィルタ係数を用いたラインセンサーで取得した重要文化財のガラス乾板画像の色再現について述べる。まず、ガラス乾板撮像装置の開発と高解像度画像取得のメカニズムについて論じる。また、提案したフィルタ係数の取得方法について述べる。マルチバンドモノクロ画像から

|   |         |    |     |
|---|---------|----|-----|
| 京都大学  | 博士 (工学) | 氏名 | 王 鵬 |
| <p>被写体の色再現を行う手法について論じ、色情報が既知の色票をマルチバンド撮像した後、各設定により色再現を行い、その定量的を評価する。最後に、法隆寺金堂壁画のガラス乾板に対して提案手法を適用し、色再現を評価する。</p> <p>第5章では、高解像度画像を用いた2.5D表面形状取得手法について示す。まず、画像取得装置の構築と照度差ステレオ法のメカニズムについて述べる。画像取得装置をエリアセンサーカメラからラインセンサスキャナに変更することにより、撮像精度を向上する。光源方向の推定方法、ラインセンサスキャナに適用した法線ベクトルの推定方法を実装し、被写体に対して色彩情報と表面立体形状を同時に取得できるようにする。任意形状の被写体に対して、表面形状復元の画像分析実験を行う。レーザー測定器により計測した立体形状と、提案した手法を使用して撮影した画像と比較し、精度検証を行う。</p> <p>第6章では、本研究の結論と今後の研究の展望について述べる。本研究で行った高解像度画像取得システムの実装、分光反射率の推定と特定対象物の色再現、2.5D表面形状取得のための画像処理・画像分析技術の開発に関する結果についてまとめる。分光学的属性、忠実な色再現、2.5D表面形状データは、デジタルアーカイブにおいて多くの情報レイヤーを提供し、文化財などの貴重な対象物の記録をより詳細かつ立体的にすることができる。またこの結果は、博物館や美術館などにおける文化的な展示のみならず、産業、医療、教育などにおける様々な場面において幅広く適用できる可能性を示す。</p> |         |    |     |

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は分光、色彩および表面形状の情報をデジタルアーカイビングするための画像取得技術、画像処理技術および画像分析方法に関する研究であり、それぞれにおいてマルチスペクトル画像取得、色彩再構築、および2.5D画像分析(表面の微細構造をも表現する2次元と3次元の中間の画像解析)の技術を提案し、開発している。応用例として想定される文化財、絵画等芸術作品を対象に、実験的検証を行っている。本論文の独自性は画像取得技術としてラインセンサーを用いていることであり、超高精細画像入力機械による分光、色彩および表面形状情報を取得するために、分析的イメージングシステムの設計を提案し、実験的かつ理論的な解明を目指している。主な内容は以下の通りである。

(1) 分光、色彩および表面形状の情報を得るために、開発した高精細画像取得システムについて述べた。画像取得システムの様々な段階において画像の色や光源むらによる誤差が生じるため、その補正アルゴリズムについて提案した。

(2) 1回の撮像から分光情報をもつ複数の画像を取得する効率的な撮像システムの開発について述べた。実例として、高速回転マルチカラーフィルタを用いた分光反射率推定技術を提案システムに適用し、有効性を検証した。その中でフィルタの設計手法を構築し、最適化シミュレーションを行った。

(3) 透過光スキャナー開発について、フィルタ係数を用いたラインセンサーで取得した重要文化財のガラス乾板画像の色再現について述べた。まず、ガラス乾板撮像装置の開発とそのメカニズムについて論じた後、提案したフィルタ係数の取得方法について述べた。マルチバンドモノクロ画像から被写体の色再現を行う手法について論じ、色情報が既知の標準カラーチャートをマルチバンド撮像した後、色再現を行い定量的に評価した。実例として、日本の国宝である法隆寺金堂壁画のガラス乾板に対し提案手法を適用し、壁画は火事で焼失する前の色再現を行った。

(4) 高解像度画像を用いた2.5D表面形状取得手法について提案した。画像取得装置の構築と照度差ステレオ法のメカニズムについて述べた。取得装置をエリアセンサーカメラからラインセンサスキャナに変更することにより、撮像結果の精度が向上した。また、光源方向の推定方法、ラインセンサスキャナに適用した法線ベクトルの推定方法を実装した。被写体に対しても、色彩情報と表面の立体形状を同時に取得できるようになった。形状情報はレーザー測定器により計測した立体形状と、提案した手法を使用し撮影した画像と比較し精度検証を行った。

以上、本論文は近年急速な発展を遂げているデジタル技術を用いた画像取得・分析技術の中核である色彩と表面構造の情報を取得するために基礎となる装置と技法の確立を行った。今後文化、産業、医療、教育など幅広い分野で重要となることが期待され、理論上、実用上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。