

令和7年度
修士学位論文

デジタルカメラによる全天空放射量の計測と
地物の反射率推定

Estimation of Reflectance Using All-Sky
Radiance Measured by a Digital Camera

指導教員 高木 方隆
副指導教員 赤塚 慎
副審査員 佐藤 慎司

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
社会システム工学コース

伊藤 祐太郎

2026年1月21日

論文要旨

デジタルカメラによる全天空放射量の計測と地物の反射率推定

伊藤 祐太朗

植物の季節変化や経年変化を定量的に捉えるためには、正確な色情報の取得が不可欠である。UAVを用いた観測では、光源条件の違いによって地物からの反射光の強さや波長分布が変化することが大きな課題となる。取得した反射量を反射率や反射係数へ変換することで、異なる観測日や異なる地域間においても植物の色の変化を比較・評価することが可能となる。

しかし、天候の違いによる画像の写り方の差は大きい。曇天時の観測では、主に雲による散乱光のみが光源となるのに対し、晴天時の観測では、観測位置と太陽位置によって決まる位相角の違いにより、地物の反射量が大きく変化し、画像全体の明るさも大きく変動する。また、晴天時であっても観測日時が異なれば、大気条件の違いによって画像の写り方は変化する。

一般的に、光源条件に依存しない評価手法として反射係数の計測が用いられる。反射係数は、直達光および散乱光を白板に反射させ、その反射光をカメラで計測することで、分母となる白板の輝度を取得し算出される。しかし、分光反射特性が安定した白板は高価であることや、経年劣化による反射特性の変化などの問題があり、白板を用いた計測では精度の確保が難しいという課題が存在する。

そこで、全天空放射量を直接計測し、これを分母として算出する反射率の利用が考えられる。一方で、反射率の算出においては、分子である地物の反射量および分母である全天空放射量の双方をデジタルカメラで計測することの難しさが指摘されている。特に、全天空放射量計測においては、太陽およびその周辺の高輝度領域を単一露光の画像で適切に記録することが困難である。

本研究では、露光条件を変えて多段階撮影した画像からHDR (High Dynamic Range) 画像を生成し、これを用いて全天空放射量を計測した。HDR画像を用いることで、太陽近傍の高輝度領域から天空全体の低輝度領域までを同時に記録することが可能となる。

反射率は地物からの反射量を分子、全天空放射量を分母とする比として算出される。そのため、両者を高精度に計測することが、正確な反射率推定を行う上で不可欠である。地物の反射量については、対象物の反射特性、入射光の強度、入射角、観測角、さらには周囲環境からの多重散乱の影響を考慮しなければならない。

以上より、本研究の目的は、短時間で多段階撮影が可能なラズパイカメラを用いてHDR画像から全天空放射量を算出し、これを用いた地物の反射率を推定することである。

反射率は地物からの反射量を分子、全天空放射量を分母とする比として算出される。そのため、両者を高精度に計測することが、正確な反射率推定を行う上で不可欠である。地物

の反射量については、対象物の反射特性、入射光の強度、入射角、観測角、さらには周囲環境からの多重散乱の影響を考慮しなければならない。

推定した全天空放射量を分母、同じ全天空画像から取得した地物の反射量を分子として反射率を算出したところ、予想とは異なり、ばらつきが大きくなった。ばらつきの要因を検討したところ、雲量と散乱光成分が一つの要因であることがわかった。また、鏡面反射と反射率との関係について解析を行った結果、鏡面反射ベクトルとカメラ方向ベクトルが近づくにつれ、反射率が小さくなる傾向が確認された。

一方、分母である全天空放射量の計測においては、ND フィルターの補正処理の際にセンサーノイズが増幅されている可能性が考えられる。

また、反射率算出においては、分子および分母が同一の条件で取得されることが望ましい。すなわち、分子となる対象物に入射する直達光および散乱光を含むあらゆる方向からの光を適切に捉え、それに対応する全天空放射量を分母として用いることが、反射率の計測結果の精度向上のために重要であることが研究により明らかになった。

キーワード：全天空放射量，地物の反射量，反射率

Abstract

To quantitatively capture seasonal and interannual variations in vegetation, the accurate acquisition of color information is essential. In observations using unmanned aerial vehicles (UAVs), a major challenge is that differences in illumination conditions change both the intensity and spectral distribution of the reflected light from ground objects. By converting the measured reflectance into reflectance or reflectance coefficients, it becomes possible to compare and evaluate changes in vegetation color across different observation dates and locations.

However, differences in weather conditions can significantly affect the appearance of images. Under cloudy conditions, the primary light source is diffuse radiation scattered by clouds, whereas under clear-sky conditions, the reflectance from ground objects varies greatly depending on the phase angle determined by the observation position and the solar position. As a result, the overall brightness of the image can also change considerably. Furthermore, even under clear-sky conditions, differences in atmospheric conditions at different observation times can alter the appearance of images.

In general, the measurement of reflectance coefficients is used as an evaluation method that is independent of illumination conditions. Reflectance coefficients are calculated by reflecting both direct and diffuse radiation from a white reference panel and measuring the reflected light with a camera. The brightness of the white panel is used as the denominator in the calculation. However, white reference panels with stable spectral reflectance characteristics are expensive, and their reflectance properties may change due to long-term degradation. Therefore, it is difficult to maintain measurement accuracy when using white panels.

As an alternative approach, the use of reflectance calculated with directly measured global solar radiation as the denominator can be considered. However, it has been pointed out that it is difficult to measure both the reflected radiance from ground objects (numerator) and the global solar radiation (denominator) using a digital camera. In particular, when measuring global solar radiation, it is difficult to appropriately record the extremely bright region around the sun and the surrounding sky in a single-exposure image.

In this study, high dynamic range (HDR) images were generated from multi-exposure photographs taken under different exposure conditions, and these HDR images were used to measure global solar radiation. By using HDR images, it becomes possible to simultaneously capture both the high-luminance regions near

the sun and the low-luminance regions across the entire sky.

Reflectance is calculated as the ratio of the reflected radiance from a ground object (numerator) to the global solar radiation (denominator). Therefore, accurate measurement of both quantities is essential for precise reflectance estimation. The reflected radiance from ground objects is influenced by various factors, including the reflectance properties of the target, the intensity of incident light, the incident angle, the observation angle, and multiple scattering from the surrounding environment.

Based on the above considerations, the objective of this study is to estimate global solar radiation from HDR images captured using a Raspberry Pi camera capable of rapid multi-exposure imaging, and to estimate the reflectance of ground objects using the measured radiation.

When reflectance was calculated using the estimated global solar radiation as the denominator and the reflected radiance from ground objects obtained from the same sky images as the numerator, the variability in the results was larger than expected. An analysis of the causes of this variability revealed that cloud cover and the diffuse radiation component were contributing factors. In addition, analysis of the relationship between specular reflection and reflectance showed that reflectance tends to decrease as the specular reflection vector approaches the camera direction vector.

On the other hand, in the measurement of global solar radiation (the denominator), sensor noise may have been amplified during the correction process for the neutral density (ND) filter.

Furthermore, for reflectance calculation, it is desirable that the numerator and denominator be obtained under the same conditions. In other words, it is important to properly capture all incoming light, including both direct and diffuse radiation from all directions incident on the target object, and to use the corresponding global solar radiation as the denominator. This study demonstrated that such consistency is important for improving the accuracy of reflectance measurements.

Keywords: hemispherical sky radiance, ground-object radiance, reflectance