

分光反射率未知の物体表面における水の検出

奥山 享彦 王 超 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

路面や床などの物体表面上に存在する水を検出することは、自動車の運転支援やロボットの行動計画への応用において重要である。また、非接触により行うことで、水による危害を遠くから事前に察知することができる。

水は光を吸収する性質を持っており、その吸収率は波長によって異なる。可視光域の波長においては吸収率は小さいが、波長が900nm以上の近赤外光においては高い吸収率をもつ。そのため、物体表面上に水がある場合、近赤外域の波長における分光輝度が小さくなる。したがって、分光輝度を分光照度で割った見かけの分光反射率が小さくなる。

この見かけの分光反射率の変化から物体表面上の水を検出する場合、物体がもつ本来の分光反射率と比較する必要がある。ところが、本来の分光反射率が未知のとき、比較をすることができず見かけの分光反射率が低下しているのか判断することができないので水の検出が困難である。

そこで本稿では、分光反射率が少数の基底の線形結合で近似的に表現できることを活用して、水による光の吸収の影響を受けづらい可視光域のみかけの分光反射率から近赤外域の本来の分光反射率を推定することで、分光反射率が未知である問題を解決する。また、近赤外域でのみかけの分光反射率と本来の分光反射率の差から物体表面上に存在する水の検出を行う。

2 関連研究

Shimano ら [2] は、物体表面が水で濡れている (物体に水が染み込んでいる) 場合の光の散乱方向の変化と物体による光の吸収を元に、水に濡れている物体の色が濃くなることを示した。Asano ら [3] は、水による光の吸収に基づいて、波長の異なる2つの近赤外光による計測から、水中物体の奥行きを推定している。

これらの研究に対して、我々は物体表面上の水を近赤外光の吸収を手がかりにして、検出することを目指す。

3 提案手法

3.1 吸収に基づく水濡れの検出

水は波長が900nm以上の近赤外光を吸収しやすいという性質がある。図1は表面に水滴がある点とない

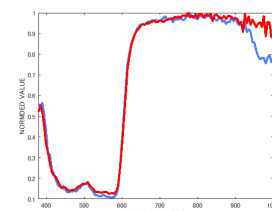


図 1: 水の有無による見かけの分光反射率の違い

点のそれぞれの分光反射率を示したものであり、青線が水滴がある点、赤線が水滴がない点の反射率を表している。図1からもわかるように、近赤外域において水が存在している点では、水が存在しない点に比べて反射率が低下していることがわかる。提案手法ではこの性質を利用し、照明の分光強度が既知である場合に、ハイパースペクトル (Hyper Spectral:HS) カメラを用いることで近赤外光の波長での分光反射率を観察し、画素ごとに水の検出を行う。

物体表面の分光輝度 $I(\lambda)$ は物体の分光反射率 $\rho(\lambda)$ と分光照度 $l(\lambda)$ の積で求めることができる。ここで λ は波長を表す。HS カメラを用いて物体表面の分光輝度 $I(\lambda)$ を得ることで既知である照明の分光強度 $l(\lambda)$ と併せて各画素ごとに物体の見かけの分光反射率 $\rho(\lambda)$ を求めることができる。これにより求めた見かけの分光反射率 $\rho(\lambda)$ を利用して水の検出を行う。

3.2 主成分分析を用いた反射率の推定

見かけの分光反射率を観察するだけでは、その反射率が物体の持つ本来の反射率なのか水により変化した反射率なのかを判断することは困難である。分光反射率未知の物体上の水の検出のためには本来の物体の分光反射率を推定し、観測した見かけの分光反射率と比較する必要がある。

Parkkinen ら [1] は主成分分析を用いたカラーチェッカーのデータ分析により

$$r(\lambda) = \sum_{n=1}^N c_n b_n(\lambda) \quad (1)$$

のように、分光反射率が少数の基底の線形結合で近似的に表現できることを示している。ここで c_n は結合係数、 $b_n(\lambda)$ はカラーチェッカーの分光反射率から求めた相関行列の固有ベクトルを表す。

そこで、本研究ではこの手法を応用して、可視光の領域だけでなく近赤外光の領域を含めた本来の分光反射率の推定を行う。具体的には、主成分分析を用いて得られる分光反射率の低次元線形モデルを用いて見かけの分光反射率から本来の分光反射率を推定する。まず、カラーチェッカーの分光反射率を測定し、主成分分析を行う。そして、式(1)から未知である本来の分光反射率 $r(\lambda)$ を推定する。カラーチェッカーの固有ベクトル $b_n(\lambda)$ は既知であるので、分光反射率 $r(\lambda)$ を推定するためには結合係数 c_n を求める必要がある。可視光の範囲において水による光の吸収は少ないことから、水の存在している点と存在していない点の可視光域の分光反射率はほぼ同じであると仮定する。この仮定の下で、可視光域の見かけの分光反射率から、本来の分光反射率を表現するための結合係数 c_n を求める。式(1)を行列式に拡張してそれぞれ $\mathbf{r} = [r(\lambda_1), r(\lambda_2), \dots, r(\lambda_M)]^T$, $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_N]^T$, および、 m 行 n 列成分が $b_n(\lambda_m)$ である行列を $\mathbf{B}$ とする。このとき式(1)は、 $\mathbf{r} = \mathbf{B}\mathbf{c}$ と書き換えることができ、 $\mathbf{B}$ の擬似逆行列を求めることで結合係数 $\mathbf{c}$ を求める。ここで λ_m は m 番目のバンドの波長を表している。そして、求めた結合係数 $\mathbf{c}$ と既知である $\mathbf{B}$ を用いて式(1)より近赤外域の波長を含めた本来の分光反射率を推定する。

3.3 水の検出

表面に水が存在する場合、吸収により近赤外域の波長における強度が低下する。すなわち、水の有無によって近赤外域における分光反射率に違いが生じる。そこで、各画素ごとに近赤外域における見かけの分光反射率と本来の分光反射率のグラフの間の面積を求め、その面積の大きさから水の検出を行う。具体的には、理想的な状況下において水の存在しない点の見かけの分光反射率は本来の分光反射率と差がないためグラフ間の面積は小さくなる。それに対し、水の存在する点の近赤外域における見かけの分光反射率は本来の分光反射率と比較して、低下するのでグラフ間の面積は大きくなる。このことから、各画素ごとにのグラフ間の面積を求め、その値によって水を検出する。

4 実験

実際に表面に水滴が存在する画像を撮影し、物体表面の見かけの分光反射率を求めた。また、求めた反射率から本来の分光反射率を推定し、水の検出を行った。

図3は見かけの分光反射率と提案手法を用いて推定した本来の分光反射率を同時に示している。分光反射率推定のために380nmから830nmまでの波長を使用し、10個の基底を用いて推定を行った。実線は見かけ

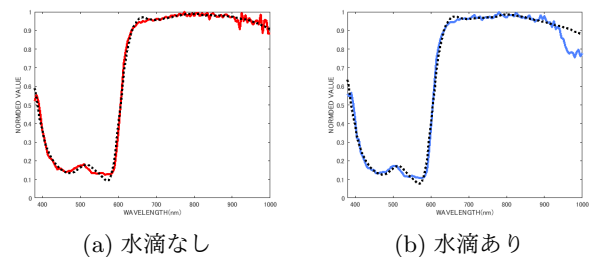


図2: 反射率推定結果



図3: 水の検出

の分光反射率、黒色の点線は本来の分光反射率を示し、(a)は水滴が存在していない点、(b)は水滴が存在している点を示している。実線と点線を比較すると、水滴が存在していない点での反射率は差が小さいが、水滴が存在している点では近赤外域において差が大きいことがわかる。

図4は、実際に水の検出を行った結果である。(a)は $\lambda=950\text{nm}$ における反射率を表しており、(b)に提案手法による水の検出結果を示した。(a)からわかる水の存在している領域が、(b)では他の領域と色が異なっており確かに水の存在している領域と存在していない領域を分離できていることが確認できる。このことから画像内に存在する水を検出できたといえる。

5 むすび

本稿では、水滴の存在する面での分光反射率から水滴の存在しない面の分光反射率を推定する手法を提案し、HSカメラを用いることで画像中の水滴の検出を行った。今後は推定に用いるバンド数の削減、つまり、より簡易的なカメラでの水の検出に取り組みたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18H05011 の助成を受けた。

参考文献

- [1] J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen "Characteristic spectra of Munsell colors", In Proc. Journal of the Optical Society of America A. pp.318-322, 1989.
- [2] M. Shimano, H. Okawa, Y. Asano, R. Bise, K. Nishino, and I. Sato, "Wetness and color from a single multispectral image", In Proc. CVPR 2017, pp.321-329, 2017.
- [3] Y. Asano, Y. Zheng, K. Nishino, and I. Sato "Shape from Water: Bispectral Light Absorption for Depth Recovery" In Proc. ECCV 2016, pp.635-649, 2016.