

画像情報を用いた流域監視技術に関する研究
—画像による降雨強度推定—
(要約版)

2023年1月

金澤 瑛

画像情報を用いた流域監視技術に関する研究
—画像による降雨強度推定—
(要約版)

筑波大学大学院
理工情報生命学術院
生命地球科学研究群
環境学学位プログラム
博士（環境学）学位論文

金澤 瑛

〈要約〉

本研究では、カメラベースの雨量計の実用化を見据え、近年急速に進歩してきている画像処理技術を用いて、土砂移動現象の発生場である山地流域の降雨の状況を、カメラで撮影した画像を用いて高い時空間分解能で解析できる技術の構築を目指した。

第 1 章では、本研究を実施するに至った背景、日本における降雨観測の現状、近年の新しい降雨観測技術の開発動向を整理し、本研究の目的、章立てを示した。

第 2 章では、画像に影響を及ぼす悪天候の気象条件について、カメラベースの雨量計の研究開発の背景や画像に影響を及ぼす悪天候の気象条件の定義、動的気象・静的気象というコンピュータビジョンで悪天候の気象条件を扱う際の分類について整理した。また、本研究の問題設定に関連して、雨滴の粒径分布と降雨強度、2次元平面の画像から3次元空間の復元についての考え方を示した。さらに、カメラベースの雨量計に関する先行研究をレビューすることで先行研究の考え方や課題点を整理し、本研究のアプローチを示した。

第 3 章では、雨による静的気象の効果が画像上にどのように表れるかを検証するため、遠方の背景を撮影する山地流域に設置された CCTV カメラを用いて、降雨強度の変化に伴う画像の輝度の変化について分析を行った。検討では、「画像上の細かい水滴」、「画像上の粗い水滴」という考え方を取り入れ、画像上の細かい水滴による視覚効果である画素値（輝度）の変化に着目し、画像上に設定した解析領域の全画素値の平均値である平均画素値を指標として、平均画素値と降雨強度の関係を分析した。その結果、降雨時に撮影した画像では、降雨強度の増加に伴って徐々に画素値が増加するとともに、画素値のヒストグラムの分布の幅が狭まること、また時系列において降雨強度に応じて平均画素値が反応して変動していることが示され、画素値が降雨強度の変化を表す有効な指標となることを示した。さらに、降雨強度を推定する際の画像上の解析領域の設定については、設定サイズを大きくしすぎないこと、また背景の輝度が小さい（観測強度 I が小さい）画角ないしカメラから背景までの距離が長い（シーン深度 d が大きい）画角の箇所を選定することが重要であることを示した。このように、第 3 章では、山地流域に設置した遠方の背景を撮影するカメラにおいて、降雨時に静的気象の効果が表れることを確認し、静的気象の効果を利用したカメラベースの雨量計の実用可能性を示した。

第 4 章では、多くのコンピュータビジョンの研究で報告されている静的気象の効果を取り除く技術と大気放射学や気象学で表現される降雨強度の理論を、消散係数を手掛かりにして結びつけることで、画像情報、降雨強度、シーン深度の関係性を表す式を提案した。そして、山梨県の観測サイトにおいて市販のインターバルカメラによって取得した屋外の撮影画像と降雨観測の結果を提案した関係式に適用することで、画像情報、降雨強度、シーン深度の関係性について分析を行い、画像から得られた消散係数の妥当性を検証した。その結果、以下のような知見が得られた。

①提案した関係式で想定したとおりに、透過率 t が降雨強度 R とシーン深度 d の増加に伴っ

て、指数関数的に減少した。

- ②透過率 t の値および降雨強度の増加に伴う透過率 t の変動は、主として観測強度 I の値に強く影響されている可能性がある。
- ③降雨時の画像から求めた消散係数 β は、シーン深度 d が約 100 m を超えたパッチでは、先行研究と比較しても妥当な値であった。
- ④無降雨時の画像から求めた消散係数 β には、シーン深度 d が約 100 m を超えたパッチでは、エアロゾルの影響が表れている可能性があった。そのため、消散係数 β は提案した式が想定するゼロとはならなかった。
- ⑤降雨の有無に関わらず、シーン深度 d が約 100 m までのパッチでは、画像から求めた消散係数は過大評価であった。また、その原因のひとつは、消散係数の算出方法に起因する影響が示唆された。

このような知見から、提案した雨による静的気象の効果を取り入れた画像情報と降雨強度、シーン深度の関係式は、一部のパッチでは消散係数の過大評価の課題はあるものの、全体としては概ね屋外の画像でも有効であることを示した。

第 5 章では、第 4 章で提案した関係式を用いて降雨強度の算出し、その算出した降雨強度 R_c と観測降雨強度 R_o を比較することで、本手法による降雨強度の推定結果を検証した。また、降雨強度の推定に適切なパッチ（降雨強度推定用パッチ群）の条件を検証した。その結果、降雨強度推定用パッチ群については、降雨強度 0 mm min^{-1} の観測強度 I が $40 \sim 80$ かつシーン深度 d が $100 \sim 400 \text{ m}$ という条件が、本手法によって降雨強度を推定するためのパッチの選定条件としてある程度一般性を持つ条件であることが示唆された。本手法による降雨強度の推定結果については、どのカメラにおいても算出降雨強度 R_c の時系列の変動の傾向は、観測降雨強度 R_o の時系列変動に概ね追従していることが確認された。また、降雨強度推定用パッチ群のうち 50% 値の算出降雨強度 R_c は、降雨強度が 0.4 mm min^{-1} を超える場合は MAPE（平均絶対パーセント誤差）の値で $21.1 \sim 32.7\%$ の正確度であったことから、静的気象の効果を用いて画像から降雨強度を推定する本研究の手法自体は降雨の観測に有効な手法であることが示された。一方で、日光の影響やカメラのレンズの曇りの影響、またカメラの撮影時の設定の影響によっては、算出降雨強度 R_c に影響が及ぶ可能性があることが確認されたことから、現場での実用にあたっては日光が直接写らないようにカメラの向きを設定することやレンズが曇らないような処理を施すこと、またカメラの撮影時の設定を固定するなどの方法によって、それぞれの現場で算出降雨強度 R_c に影響が及ばないように対処する必要があるとが考えられた。さらに、先行研究と比較した結果、本手法が先行研究の課題を解決した低コストで様々な環境にも適用できる汎用性のある手法であることが示された。第 5 章第 4 節では、これらの結果を踏まえて、画像による降雨強度推定手法を実施する際の具体的な手順を提案した。

第 6 章では、これまでの結果を総合して本研究成果の概要としてとりまとめ、本研究の目的であった土砂移動現象の発生場である山地流域の降雨の状況を、カメラで撮影した画

像を用いて高い時空間分解能で解析できる技術の構築，すなわちカメラベースの雨量計の技術開発は概ね達成できたことを示した．また，本研究成果の意義として，次の二つの点を示した．一点目は，本研究成果を利用することで，雨量観測網の時間分解能および空間分解能の飛躍的な高密度化が期待できる点であり，二点目は，一般的なカメラを利用して物理量（本研究であれば降雨強度）を計測するというアプローチが，一定程度の正確度をもって適用できることを示した点である．そして，広域的な視点および局地的な視点で本研究成果の利用可能性を示した．