(42) 画像特徴領域内外分析支援システムの設計・開発と実用化

渡邊　大智[1]・古木宏和[2]・宗像　俊[3]・小島　尚人[4]

[1]学生会員　東京理科大学大学院　理工学研究科土木工学専攻（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）
E-mail: 7619529@ed.tus.ac.jp

[2]非会員 日本工営（株）・技術本部・先端研究センター

[3]非会員　東京理科大学大学院　理工学研究科土木工学専攻（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）

[4]フェロー会員　東京理科大学　理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）

本研究では，筆者らが提案した教師なし分類 k-means 法を中核とし，TFC アルゴリズムを組み込んだ画像特徴領域内外分析支援システム（TFC システム）を設計・開発した.コンクリート表面の画像特徴に適用した結果，1）クラス別重心ベクトルのノルムに基づいて，画像特徴分類処理と点検ランク付けの同時分析を実現，2）TFC アルゴリズムは，対象テクスチャを異常箇所とすれば，「異常箇所と正常箇所」の検査等，画像特徴領域内外の解釈と定量的点検ランク付けが可能，3）ざらつき領域内の微細ひび割れの同時分析のみならず，「表面部 or 深部」といった解釈と点検候補ランク付けが可能となることが確認された.さらに，対象画像を取り込みながら半リアルタイム処理を実現し，既存システム併用型＆アイデア創出支援型システムとして，今までにない TFC システムの特色と拡張性を示した.

Key Words: *classification in target and non-target image feature area，k-means clustering，super-high resolusion image，unsupervised classification，concrete surface texture inspection.*

1.　はじめに

筆者らは，各種点検・検査計測支援を目的として，コンクリート表面上における「ひび割れ」を分析対象とした場合の「対象画像特徴領域内分類画像（Target image-Feature area Classification image：TFC 画像）」に加えて，新たに「非対象画像特徴領域内分類画像（non-target image Feature area Classification image：n-TFC 画像）を出力する TFC 画像作成アルゴリズム（以下，TFC アルゴリズム）を組み込んだ TFC システムを設計し，開発した.

TFC 画像と n-TFC 画像は，両者を併用する事によって電磁波情報から「表面部 or 深部」といった解釈と点検候補ランク付けを可能とする．電磁波は，ひび割れの深度が大きいほど電深部に侵入し，反射率が低くなる特性がある．筆者らは，これを利用し，画像濃度値から成るクラスター重心グラフを定量的に分析することによって，ひび割れ辺縁における「表面浮き」の発生箇所（多重散乱）を検出でき，今までにないコンクリート表面の点検支援情報となることを示した[1)-2)].

建設分野において点検技術は，目視や打検による手法が中心となっており，膨大なインフラ構造物を点検する技術者の不足も相まって，これを支援する技術およびツールの開発は，喫緊の課題となっている．点検時の指標となっているコンクリートのひび割れ幅 0.2mm 幅以上（管理境界）のひび割れのみならず，時間経過によって肥大化する可能性のある 0.2mm 幅以下の微細ひび割れについては，効果的に抽出できる技術やツールのニーズは高い．しかしながら，既往研究，一般市場にはこれに対応できる抽出・分析システムは見当たらない.

TFC アルゴリズムを組み込んだシステムは，超高分解能画像のみならず，可視領域外の波長を撮影可能であるハイパースペクトルカメラのデータ等[3)]の活用が将来的に可能となり，ひび割れとざらつきの分類のみならず，「表面部 or 深部」といった解釈と点検候補ランク付けが可能となり，点検支援システムとなることが期待できる.

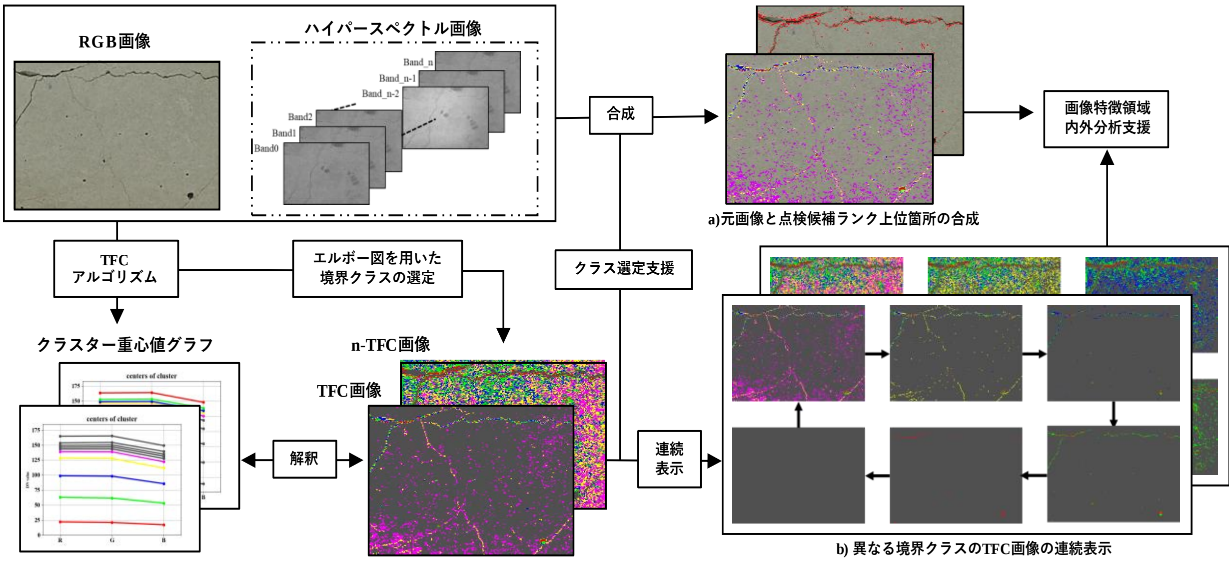
以上の背景のもと，TFC アルゴリズム中核としたシステム化のニーズが高まったことから，本研究では，超高分解能画像を対象とした TFC 画像や n-TFC 画像を活用したリアルタイム画像特徴領域内外分析支援を目的として，TFC システムを設計・開発した.

2.　実験前提条件

（１）本研究で使用した超高分解能カメラ

本検討では，初期検討として，PhaseOne 社の iXU-RS 1000 を使用し，RC 梁曲げ・せん断試験後の供試体表面から 2m 離れて撮影した．分解能は約 0.08（mm/pixel）であり，幅 0.2mm 以下のひび割れはもとより，幅 0.1mm 以下のびび割れ内の分類にも期待できる.

紙面の都合上により割愛するが，本システムのスマートフォンやディジタルカメラ等で取得したデータに対する有用性も確認できている.



図−1　TFC アルゴリズムと TFC システムのフロー図

（2）観測対象

本検討では，RC 梁曲げ・せん断試験後のコンクリート供試体表面を観測対象として撮影した．全領域は 11608×8708 画素であるが，分析処理効率，及び背景等の余分な情報を考慮し，任意の領域を選択し，分析対象領域とした．**図−1** に対象領域に対する TFC アルゴリズムのフロー図を示す．

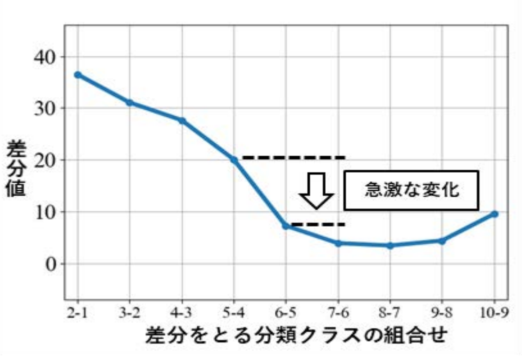
本アルゴリズムは，超高分解能画像等の RGB 画像のみならず，様々な波長領域を複数のバンドで観測できるハイパースペクトルカメラで撮影した画像に対する適用性も確認できており，異なる分野における画像に対する検討も進んでおり，更なる拡張性が期待できると考えている．

3. TFC アルゴリズムの構築

（1）TFC アルゴリズムの概念とシステムの標準機能

TFC アルゴリズムは，教師無し非階層型クラスター分析に代表される k-means 法を中核としている．画像濃度値を変数として分析を行い，クラスター重心値グラフにおける収束時の 3 バンド別の各クラスターの分類を試みる．つまり，各クラスターのグラフ線が交差しないクラス数を採用する必要性がある．**図−1** の対象領域に対して，クラス数の検討のために相対評価するクラス数として 10~50 の 5 クラスを採用し，各 TFC 画像の 0.2mm 幅のひび割れに対する精度評価を数回行った結果，同程度の精度が確認できた．そこで，処理効率と画像化する際の視認性の評価より，**図−1** の対象領域に対しては 10 クラスが最適であるとした．

採用したクラス数での分析結果を画像化する際，ひび割れとざらつきの境界クラスを決定しなければならない．そこで，**図−2** にクラスター重心の差分値をプロットしたエルボー図を



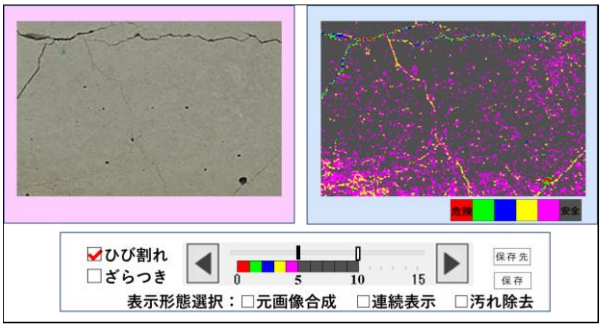
図−2　クラスター重心の差分値

示す．この図より，ひび割れとざらつきの境界クラスの前後で急激な値の変化が確認でき，両者の分類が可能であると同時に，TFC アルゴリズムが定量的に評価できることも示している．対象領域によっては上記のクラス数，及び境界クラス選定法が適用できないことも考えられるが，この点については後述する．点検支援情報となりうる TFC 画像と n-TFC 画像は，境界クラスを決定した後，ニーズに応じて対象画像特徴としてひび割れかざらつきに該当するクラスを選択し，出力する．

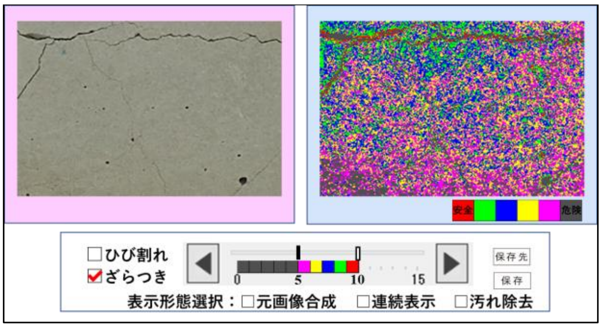
以上の出力に至るまでの処理は，標準機能として TFC システムには組み込んでおり，従来の処理時間と比較すると，大幅な効率化が実現したことも確認できている（後述）．

（2）表面浮きの検出機能

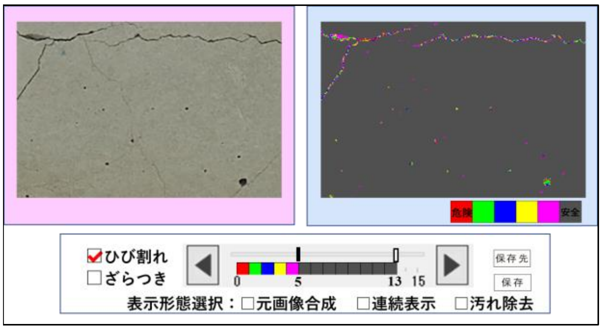
ひび割れを対象画像特徴とした場合，ひび割れ辺縁における画像濃度値の急激な変化が n-TFC 画像上で確認できた．これは，ひび割れ辺縁に「表面浮き」が発生したことによる多重散乱に起因していると考えられ，実際にひび割れ辺縁を触ると凹凸が確認された．この多重散乱はコンクリート表面上のひび割れ辺縁のみで現れており，汚れ辺縁などには確認



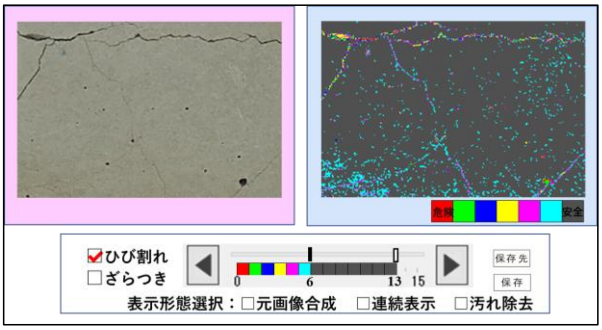
(a)ひび割れ強調(クラス数:10,境界クラス:5)



(b)ざらつき強調(クラス数:10,境界クラス:5)



(c)ひび割れ強調(クラス数:13,境界クラス:5)



(d)ざらつき強調(クラス数:13,境界クラス:6)

図-3 TFC画像の対象領域とクラス選択に関する画面内設計

できなかった. この特性を顕在化できる機能を TFC システムに導入することによって, ひび割れ以外の汚れなどの除去精度の向上も期待できる.

（３）初期値依存性に対する検討とシステム化

図-1 の対象領域に対する TFC アルゴリズムの k-means 法の初期値依存性は無いことが確認できた. しかし, 今後 TFC アルゴリズムを様々な画像に対して拡張させるには, 初期値依存性に対する各現場に適した解決手法が必須となる. なぜなら, 分析時のクラス数決定, 及び領域内 or 領域外の境界クラス選定等の解釈に対する初期値依存性は, TFC 画像の視認性評価, つまり, 使用者の主観に依存するためである. このように, 初期依存性は, 現場および使用者ごとに存在するため, 統一的基準値を設定することが困難である.

このような中, k-means 法におけるクラスター数の初期値依存性に対する研究は古くより数多く存在し, 代表的な例として x-means 法や k-means++法などが挙げられる. しかし, 上記のクラスター数決定法を適用した場合, TFC アルゴリズムの処理時間が大幅に増加してしまうため, 点検現場における効率化の実現を目的とした本システムとの併用は, 現実的ではないことから標準機能として組み込んでいない.

そこで, 本システムは現場での実用性を考慮し, 画面上でスライドバーとチェックボックスを指定するだけで, クラス数, 及び境界クラスのみならず, 領域内外を簡易に選定できる機能を搭載することで, 動画, 静止画の各種処理をリアルタイム表示させる事を可能とした. 図-3 に TFC 画像の対象領域とクラス選択に関する画面内設計を示す.

4. 本システムの画面内設計と有用性

（１）点検現場に適用した出力フロー

図-3 は, 土木現場におけるコンクリート点検時を想定して, 本システムを用いて様々な表示形態とクラス数等を指定してTFC画像を出力する場合の各図の画面内設計と操作法を説明するものである.

a) ひび割れ強調(クラス数:10, 境界クラス:5)

点検対象は, ひび割れであるため, 画面上の領域を選択して対象画像特徴をひび割れとし, 初期検討としてクラス数を10 として TFC 画像を出力した(図-3(a)). ひび割れは, 凡例に基づき各色に分類されており, クラス別重心のノルムに基づいて(電磁波反射率), 点検ランク付けが可能となっている.

b) ざらつき強調(クラス数:10, 境界クラス:5)

一方で, 点検内容によってはコンクリートのざらつき(非対象画像特徴)を対象とすることがある. この場合は, 対象領域をひび割れからざらつきに変更することでリアルタイムでの変換が可能である(図-3(b)).

c) ひび割れ強調(クラス数:13, 境界クラス:5)

異なる幅のひび割れを点検したい場合は, さらに多くのクラスで分類することによって解決することが期待できる. この行程は, 右側のスライドバーの操作のみで指定可能な設計となっている(図-3(c)).

d)ざらつき強調(クラス数:13, 境界クラス:6)

ここで, クラス数を多くしたことによって, ひび割れの視認性低下を招く可能性があるため, クラス数の増減量に対応させた境界クラスの指定が必要である. この操作も前述と同様に左側のスライドバーのみで完結することが可能である(図-3(d)). このように本システムは, 専門性のあるソフトウェアの知識や操作技術の習得が不要であることを強みとしており, 現場への導入性も優れた有用な点検支援システムである. .

(2) 表示機能の設計開発と汎用性の検討

筆者らは, より多くのニーズに対応するために上記システムでクラス数と境界クラスを選定した後, 複数の表示形態を適用することによって, より使いやすく, 効率性を向上させた点検支援システムを開発中である. 現時点において, 以下の 3 機能を TFC システムに装備した.

a)TFC 画像と元画像の合成機能

TFC 画像は, 単体で用いると, コンクリート表面上の画像特徴量が全体的に類似しているため, 点検ランク付けされた領域と視認している領域を同時に確認する事が困難である. そこで, 出力した TFC 画像を元の写真画像と合成することによって, 上記の問題の解決を試みた(図-1(a)). この際, 点検ランクにおいて上位に分類された領域に加え, 前述したひび割れ周りの浮きとして分類されたクラス群を有色表示することによって, 高い精度で検出できることが確認できた.

b) TFC 画像の連続表示機能

任意のクラス数で分析し, 出力した TFC 画像に対して複数の境界クラスで分類した各画像を連続表示することによって, 危険度ランク毎のひび割れがどのように分布しているかを動画で確認することが出来る(図-1(b)).

c)汚れ除去機能

コンクリート表面上のひび割れとざらつき以外の画像特徴は, TFC 画像でノイズとして表示される可能性がある. それらの多くは, 施工時における外的要因やコンクリート中の成分に起因しており, ここでは「汚れ」と表記している. 先述したが, これらの汚れの RGB バンドに対する反射特性と, ひび割れとざらつきの反射特性が定量的に異なることが確認できた. そこで, この特性を活用し, 多少の汚れの除去が可能となった.

これらの機能によって, 各現場の適用ニーズに対応した出力画像を簡易に取得でき, 点検台帳への添付も可能である. さらに, TFC システムは, 現場事務所の画像処理ソフトのから表示される画像をそのまま取り込みながら, 半リアルタイムで TFC画像を取得できる. すなわち, 既存システム併用型であり, 既往のシステムにはない特色となっている.

(3) 作業効率性と異なる分野への拡張性

TFC システム導入により, 大幅な処理時間の低減を実現した. 本システムを開発する以前は, 図-1 で示した TFC アルゴリズムのフロー図に沿って, 複数の数値解析・画像処理ソフトウェアを経由して, TFC 画像を出力していたため, 処理効率の問題に直面していた. TFC システム導入後, 1 画像の処理時間は, 従来約 30 分～約 2～3 分に短縮できた.

TFC システムは, コンクリートだけでなく, 様々な分野に適用できる可能性がある. 本研究では, TFC システムの設計・開発を第 1 の目標としたことから, 超高分解能画像を用いて, 微細ひび割れとざらつき等の各種テクスチャが混在分布するコンクリート表面の点検支援への適用性について検討を進めた.

例えば, 多バンド構成のハイパースペクトル画像[3], ドローン動画, 医用画像, 顕微鏡画像等への適用が挙げられる. さらに動画, 静止画であれば分析可能であるため, デバイス機能向上と比例して TFC システムの適用範囲も拡大すると考えられる. 既存システム併用支援型に加えて, アイデア創出支援型システムとして, TFC システムのもう 1 つの特色となる.

5. まとめ

本研究は, コンクリート表面点検支援を目的として, 超高分解能画像特徴分析支援策を提案したものであり, 研究内容は以下の 4 点にまとめられる.

a)筆者らが提案した TFC アルゴリズムを組み込んだ TFC システムを設計・開発した. TFC アルゴリズムの精度評価のみならず, 初期値依存性についての指摘をした上で, 現場におけるニーズ対応できる各種機能を設計・開発した.

b)点検領域によって出力するべき TFC 画像が変化する問題を示した上で, 専門性のあるソフトウェアの知識や操作技術の取得が不要であり, スライドバーとチェックボックスへの指定だけで操作できる画面内外設計を実施し, システム化した.

c)単体の TFC 画像の出力のみでなく, 異なる境界クラスの TFC 画像を連続表示させた動画や元画像との合成画像などの様々な表示形態を有する機能を装備したことによって, 新たな点検支援につながることを確認した.

d)さらに, 土木現場におけるコンクリート表面の画像データのみならず, 様々な分野の画像に対する TFC システムの適用性を確認した. 今後の各種研究の展開にも寄与できる.

今後の課題として, 現場適用性の向上と TFC アルゴリズムの拡張性の検討に加えて, 適用現場で派生する問題点を整理し, TFC システムの機能拡充を進める予定にある.

参考文献

1) 渡邊大智, 小島尚人, 酒見卓也, 清本貴哉: 超高分解能画像を用いたコンクリート表面ひび割れ領域内分類画像の提案, 日本リモートセンシング 学会第 66 回学術講演会論文集, pp.19-20, 2019.
2) 渡邉大智, 小島尚人, 古木宏和 : 超高分解能画像を用いた画像特徴分析支援策の一提案, 日本リモートセンシング学会第 67 回学術講演会論文集, pp.57-58, 2019.
3) 宗像俊, 渡邊 大智, 小島 尚人:コンクリート表面ひび割れ領域分類を目的とした ハイパースペクトルデータの適用性, 日本リモートセンシング 学会第67 回学術講演会論文集, pp.61-62, 2019.