

水門遠隔操作に資する画像認識技術の開発

上野仁士・杉谷康弘

1. はじめに

我が国の海岸は、地震や台風、冬期風浪等の厳しい自然条件にさらされており、高潮・高波、津波による災害や海岸侵食等に対して脆弱性を有している。

人口・資産が集積し、日本経済を支える三大湾等のゼロメートル地帯の広域・大規模水害対策は、想定し得る最大クラスの災害を視野に、国全体で取り組むべき課題である。

近年、極めて強大な台風により治水整備レベルを上回る洪水が広域で同時に発生している。ハザード予測システムの高度化による新たな予測情報の提供と治水施設の最大利用による「逃げ遅れゼロ」、「社会経済被害最小化」を実現する必要がある。そのため、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーションプログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」(研究推進法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所)の研究開発課題の一つとして「スーパー台風被害予測システムの開発」を実施した。その課題はさらにいくつかのテーマに細分化されており、その一つに「危機管理型水門管理システムの開発」がある。危機管理型水門管理システムの開発は、関係各省庁の研究機関等と連携して、下記3点を主体に実施している。

- ①無動力遠隔開閉操作手法の開発
- ②水門・陸閘等の開閉一元監視システムの開発
- ③水門開閉状況等の画像認識技術等の開発

土木研究所は研究の分担として②と、③のうち扉体面積10m²以上の治水用中・大規模水門を対象として実施しており、本稿は③の研究内容について記すものである。

2. 対象

2.1 基本方針

画像認識による監視対象については、遠隔操作

表-1 遠隔操作時のCCTVカメラによる監視対象¹⁾

監視対象	目的
量水標による水位確認	水位データの正誤確認
運転前周囲状況監視	設備周辺への侵入者の有無確認
運転阻害要因の監視	ゲート戸当り、開閉装置等への異物有無確認
ゲート運転状況監視	ゲート・開閉装置の作動状況の監視
流水、波浪状況監視	流水および放流状況の確認
ゲート制水状況監視	ゲート全閉時の止水状況確認
流介物等の監視	ゲート操作時に船舶の接近や流介物の監視
現地操作支援	異常箇所等を遠隔により確認

時のCCTVカメラによる監視対象を基本に検討を進めることとする。その内容を表-1に記す。

この表から、監視対象が多岐にわたることがわかる。これらのすべてを研究期間内に網羅するのは非効率的であるため、画像認識技術を必要とされる対象を優先的に開発を進めることとした。

2.2 ニーズ調査

どの監視対象を優先的に開発するかについては、設備管理者等を対象に、先述の表-1の監視対象についてニーズ調査を行った。その結果を図-1に示す。

また、調査の際には自由意見も求めており、以下の意見が寄せられた。

- ・ 操作時に安全確認が出来ればよく、画像認識までの高性能なカメラは不要。
- ・ 周囲安全確認は最も重要(2件)
- ・ 流向確認は苦慮している(特に強風や夜間)

図-1ならびに自由意見(最も重要)から、周囲安全確認、つまり運転前周囲状況監視は最もニーズがある項目と考える。

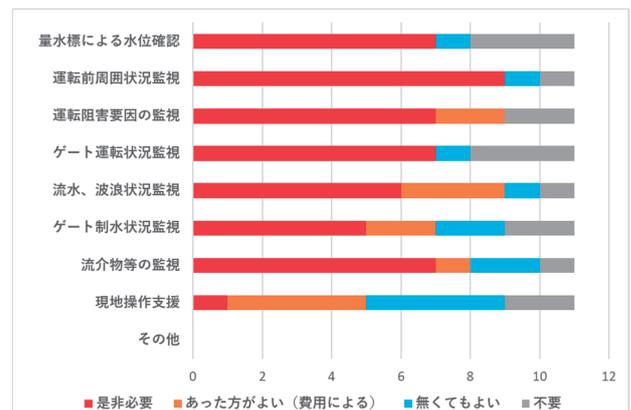


図-1 ニーズ調査結果

また、「是非必要」「あった方がよい」を含めた場合、運転前周囲状況監視と同数で最多となっている項目は「運転阻害要因の監視」「流水、波浪状況監視」の2点である。特に後者は自由意見で「流向確認は苦慮している」とあり（水門は基本的に、平時は開いており本川が増水した際に支川への逆流を防ぐために閉鎖をするが、逆流しているか否かの判断が難しい場合がある）、目視（カメラ越し含む）で困難な項目を技術的に解決するという点で研究開発価値は高いと考える。

以上から、本研究開発は、「運転前周囲状況監視（人検知）」と「流水、波浪状況監視（流向解析）」の2点を主体に進めることとした。

3. 運転前周囲状況監視（人検知）

運転前周囲状況監視には、人検知AIカメラの活用が考えられる。人検知AIカメラは民間でも需要が多く、多くの製品が発売されている。また、技術の進歩が著しい分野でもある。

そこで、水門でのニーズを提示することにより民間開発促進を図ることをも勘案し、人検知は独自開発ではなく、市販AIカメラの活用を主体とすることとした。しかし当然ながら、すべての製品が必ずしも「水門操作時の安全確認」というニーズに対応しているとは限らない。そこで、市販AIカメラの適用可否判断と選定技術のとりまとめを主眼に、以下の通り研究を進めることとした。

- ① 水門操作に用いる人検知AIカメラ選定の際に想定される評価項目（素案）の検討
- ② ①で設定した項目で評価可能かの確認を目的とした評価試験の実施（カメラ1機種で実施）
- ③ ②の試験結果に基づく評価項目のリバイスと、複数機種での評価試験の実施
- ④ 評価試験結果に基づく評価項目（案）のリバイスを含む評価選定手法のとりまとめおよび現在の人検知AI技術の限界ならびに将来に向けての課題の整理
- ⑤ 以上について「水門操作時の安全確認に資する人検知AIカメラの選定の手引き（仮称）」としてとりまとめ

なお、②③の評価試験はいずれも、土研構内で基本的な試験を行った後に、関東地方整備局荒川下流河川事務所管理のA水門で実地試験を行った。

ここでは、最終的にとりまとめた評価項目について紹介する。

人検知AIカメラは、建物内への侵入検知や安全確認などの目的に応じた仕様となっており、設置位置（距離、設置高さ）や撮影条件も使用用途に応じて設計されている。今回対象とする水門操作時は、天候は大雨であることがほとんどである他、昼間とは限らず、必ずしも画像解析にとってよい条件ではない。

また、検知対象となる人物の姿勢や動きも、周辺を歩行している場合の他、停止してどこかを見ている、座り込んでいる、寝転がっているなど、必ずしも一様でないことが想定される。

以上のことから検討した評価項目とそのポイントについて、表-2に示す。

表-2 評価項目とポイント

評価項目	評価のポイント
明暗の影響	明暗(昼夜別)にかかわらず明瞭な映像が得られるか、また検知精度の違いが生じるか。 * 使用条件から、昼夜別で検知精度に大幅な違いが生じるものはNG
天候の影響	雨天・晴天で検知精度の違いが生じるか。 * 使用条件から、悪天候であっても検知できる必要がある
位置の影響 カメラ位置の高低	カメラの設置位置により認識精度の違いが生じるか。 * 想定した設置高さで検知可能か
位置の影響 対象までの距離	全身が画像に収まらない(カメラが近い)場合に検知するか。 また、検知対象が画像内で小さい(カメラが遠い)場合に検知するか。 * 想定した範囲内で検知可能か
対象の姿勢の影響	直立姿勢以外も想定されるが、姿勢による検知精度の違いが生じるか * 静止して川を見ている、座っている、釣りをしている、寝転がっている、等が想定されるので、これらも検知可能か
対象の動作の影響	検知対象の動作の有無、動作内容、早さにより検知精度に違いが生じるか * 静止して川を見ている、座っている、釣りをしている、寝転がっている、等が想定されるので、これらも検知可能か
身長・服装・性別・老若等の影響	検知対象の身長、服装や老若男女の違いにより検知精度に違いが生じるか
その他所見	上記項目以外で特筆すべき次項があれば評価する
総合評価	以上を総合的に判断して、水門操作時の安全確認に資することができるかの評価を行う

③で記した評価試験は、技術資料等により試験に供するカメラを数機種選定して実施した。その一部抜粋であるが、「対象の姿勢の影響」についての評価について以下に紹介する。

この評価項目の主旨は表-2等で先述したとおりであり、図-2に示す様々な姿勢での検知の可否を確認するものである。

評価結果を表-3に、評価の分かれた臥位の各カメラでの撮影画像を写真-1に示す。



図-2 評価する姿勢

表-3 対象の姿勢の影響 評価結果

カメラ 姿勢	A社		B社		C社	
	①	②	③	④	⑤	⑥
	赤外線カメラ		可視光カラーCCDカメラ		可視光カラーCCDカメラ	
	高速道路への歩行者侵入検知用	車載式歩行者検知用	侵入禁止エリア内検知用	侵入禁止エリア内検知用 4K画像タイプ	一般的な人検知用 パレット型	一般的な人検知用 ドーム型
立位	○	×	○	○	○	○
四つ這い	○	×	○	○	×	×
座位	○	×	○	○	×	×
しゃがむ	○	×	○	○	×	×
ひざまずく	○	×	○	○	○	○
臥位	○	×	△	△	×	×
総評	○	×	○	○	×	×
	姿勢によらず検知可能	姿勢によらず検知不能	臥位のみ検知不可 (近距離なら検知)	臥位のみ検知不可 (近距離なら検知)	立位・ひざまずくのみ検知可能	立位・ひざまずくのみ検知可能



写真-1 対象の姿勢の影響 各カメラ映像

これらの試験を各項目で実施し、その結果、人検知AIカメラを水門操作時の安全確認に使用する場合には表-3で示した項目の評価を行ったうえ

で適用可否の判断を行うことが有効であることが確認された。

4. 画像による流向認識技術

画像による流向認識であるが、水門操作時は豪雨による見えづらさ、強風による水面への影響、さらには夜間に操作する可能性もあり、きわめて厳しい条件下で行わなければならない。

それを踏まえて、画像による流向認識技術の研究開発は以下の手順で検討を進めた。

① 技術動向調査と手法の選定

② 現場基礎試験

①で選定した手法による流向解析が、水門開閉操作時の情報として活用可能かの実証試験を実施

実証試験は、目的に応じて下記のように段階を設けて実施

○短期基礎試験

水門にカメラ類を仮設し、主に昼夜別（明暗）での解析の可否と精度の実証試験を実施

○長期基礎試験

短期基礎試験の結果を基にカメラ設置位置を選定し、水門にカメラを常設のうえ、主に荒天夜間等様々な条件下での解析の可否と精度の実証試験を実施

③ 流向解析システムの開発

現場基礎試験結果等を基に、ソフトウェアの水門操作に特化したカスタマイズ（システム化）の検討と実施

④ 流向解析システムの現場実証試験

システムの適用性の確認ならびにリバイスを実施

⑤ 流向解析システムの必要条件等の技術資料のとりまとめ

画像による流向認識の現時点で活用可能な条件と今後の課題の整理をとりまとめた技術資料のとりまとめ

以上についてここでは、①技術動向調査と方式の選定と、③で検討した流向解析システムの概要ならびに②④の試験で得られた知見について概説する。

表-4 画像による流量観測技術²⁾

	LSPIV (Large-Scale Particle Imaging Velocimetry)	PTV (Particle Tracking Velocimetry)	STIV (Space-Time Image Velocimetry)
概要	橋の上から川岸から斜め撮影したビデオ画像を幾何補正して無歪み画像を作成し、その画像にPIV(Particle Image Velocimetry) の適応を行う解析手法。	橋の上から川岸から斜め撮影したビデオ画像を幾何補正して無歪み画像を作成し、その画像上のトレーサを手動追跡し、流跡を捉える解析手法。 PTVのうち、トレーサとして浮子を対象にするものがFloat-PTV。	ビデオ画像から得られた連続した画像を用いて、検査線上の輝度値を時間軸方向に積み重ねた時空間画像に生じる縞パターンから解析を行い、平均速度場を求める手法。
特徴	○水表面上に生じる輝度変化などの画像パターンの変化、移動から流速を求める方法。 ○水表面に現れる輝度、浮遊物などによる輝度パターンを追跡するため、渦や剥離流などの平面的な流れの解析が可能。 ○流れに対して垂直方向で撮影された画像の解析に適している。	○トレーサとして浮子を用いることで、現在の浮子測法に準拠した流量算出が可能。 ○ビデオ画像を用いてトレーサの流跡を捉えることができるため、浮子の流下状況等の定量的な把握が可能。 ○トレーサを手動で追跡することから、幾何補正による輝度の希釈等の影響を受けづらい。	○波紋の移動速度から流速を算出するため、トレーサの投入などが不要で、録画された映像のみから流速の算出が可能。 ○撮影点からの距離による幾何補正の精度低下の影響、撮影画像のノイズや遮蔽物による影響が小さい。 ○計算アルゴリズムも比較的簡単であるため計算の高速化が可能。

①での方式の選定について既往技術として、洪水流を撮影した動画画像を解析することで流速を計測する、画像処理型流速測定法がある。

代表的な手法と各手法の比較について表-4 に記す。

これらの手法は、あらかじめ得られた画像を解析することにより、流速を求めるものである。水門操作時に資するには、リアルタイム画像の解析が必須であること、そのためには処理の高速化が求められること、また、水門操作時には必ずしもトレーサや浮子が用意できるとは限らず、また降雨等による画像ノイズの影響が小さいことから、STIVを主体に検討することとした。

STIV は河岸や橋梁から撮影したビデオ画像から連続した画像を取得し、画像上に設定した検査線（流向方向に設定した解析対象箇所）の輝度値を時間軸方向に積み重ねて時空間画像（STI：Space-time image）を作成し、この時空間画像に生じる縞パターンの角度から流速を算出する手法である。図-3に原理を示す。

図の左側は、映像から時空間画像を生成している状態を示す。

図中の黄色線は検査線、赤四角は表面波紋等の輝度値の特徴を表している。時空間画像（STI）は検査線上の輝度値を時間方向に並べることで生成され、流速に応じた輝度分布の縞模様が現れる。右図は、時空間画像から流速（V）を計算している状況を示す。

流速は時空間画像（STI）の縞模様の傾き（ ϕ ）、長さ、および時間から計算される。 ϕ が小さい場合には流れが遅く、 ϕ が大きい場合に

は流れが速いことを表す。なお、STIVの試用に当たっては、市販の流速観測ソフトをベースに実施した。

試験については、中部地方整備局木曾川下流河川事務所の協力を得て〇水門（通常時の流況：停滞または順流。感潮地帯のため満潮時に逆流あり）で実施した。可視光カラーCCDカメラを川表側、川裏側に取り付け、その画像を解析して流向認識が正しく実施できるかを確認した。

カメラ設置箇所について写真-2に示す。

基礎試験の後、画像収録装置に流向判定ソフトウェアとLTE通信機能を組み込んだ流向解析システムを令和2年10月～令和4年12月の間運用し、判定精度とリアルタイム判定の可否を確認している。また、風による流向判定への影響を調査するため、風向風速計も設置した。システム概要を図-4に、システム構成図を図-5に示す。

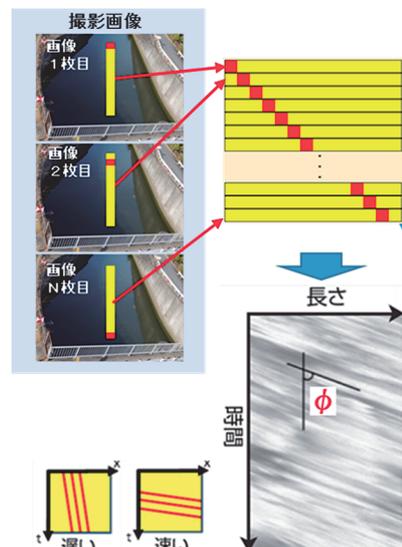


図-3 STIVの流速算出手法³⁾



写真-2 流向解析用カメラ設置状況

判定精度について、以下のことが確認された。

- ・ ある程度流れが速い流況であれば、明暗（昼夜）の別なく、おおむね流向認識可能である。
- ・ 流速が小さいとき（おおむね1m/s以下）に強風が生じた場合に流向判定精度が低下する。
- ・ 写真-3に夜間雨天強風時（降水量10.5mm/h、風速7.6m/s）の川裏側映像を示す。このような雨天強風下の場合にはSTIVによる標準的な画像認識技術では流向認識が困難であったが、画像にDFT（分散フーリエ変換）によるフィルタリング処理（風の影響による波紋の動きを排除する処理）をすることで流向認識が可能であった。しかしより多くの同種の画像を解析して正解率を求めたところ、正解率は50%強にとどまった。

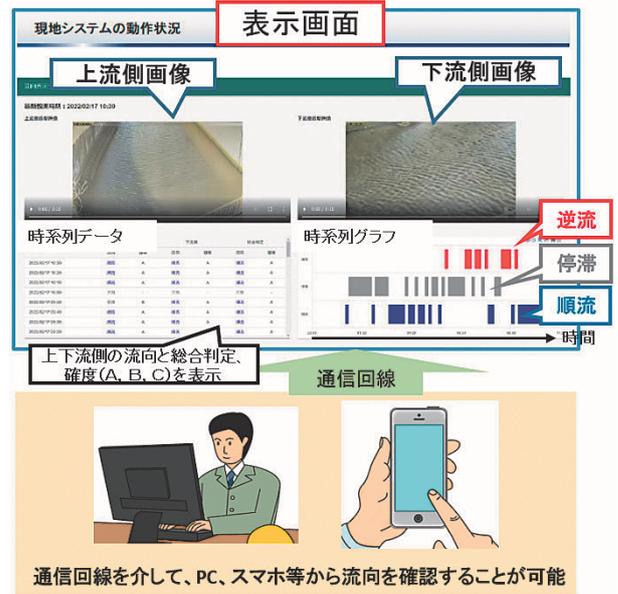


図-4 流向解析システム概要

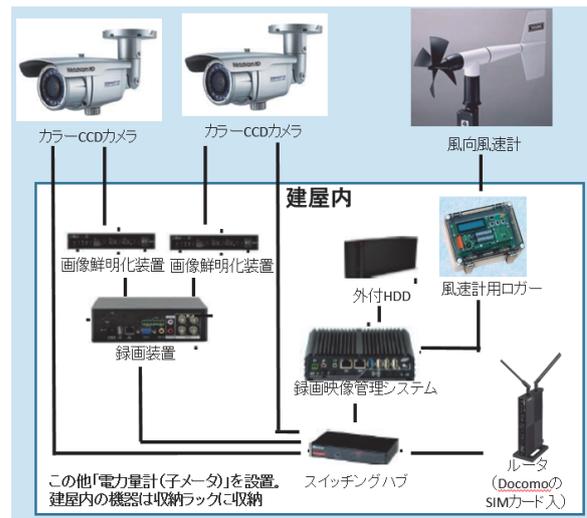


図-5 システム構成図

- ・ 正解率向上の取組として、藤田ら⁴⁾により検討された、パターン認識による画像解析で成果を上げているディープラーニング法を試行したところ正解率は90%程度に向上することが確認された。

また、写真-4に示すような、カメラに蜘蛛の巣が付着して部分的にしか流れが映っていないような場合は判定困難であり、定期的に蜘蛛の巣撤去を実施する等の対策が必要であることが確認された。

リアルタイム判定であるが、現状では、いったん撮影映像を動画ファイルとして保存し、それを解析しているため処理にはおよそ10分程度を要している。したがって解析結果は10分前の動画



写真-3 夜間雨天時の撮影画像

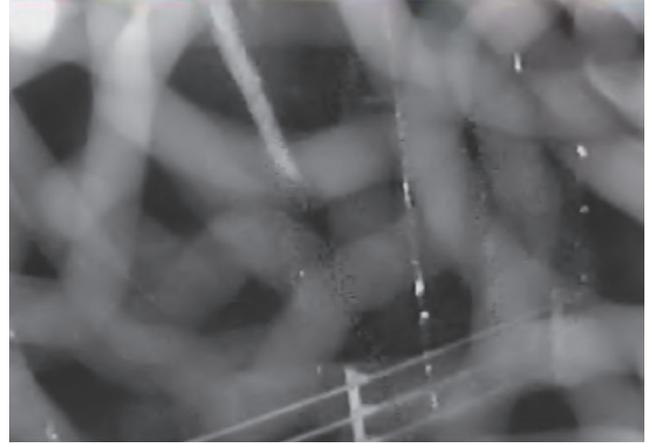


写真-4 蜘蛛の巣付着画像

を用いていることになりリアルタイムとは言いがたい。こちらについては、より高スペックの解析用PCを用いることで1分程度まで解析時間を短縮できることを確認している。

5. さいごに

本研究では、水門操作に資する画像認識技術のうち、安全確認のための人検知AIカメラと開閉判断を行うための流行認識技術について検討を進めてきた。

人検知AIカメラについては、3章⑤で示した手引き案としてとりまとめ、土木研究所先端技術チームHP内の「研究成果 (<https://www.pwri.go.jp/team/advanced/papers.html>)」で公開している。

流向認識技術についても技術的なガイドライン策定に向けて検討を進めている。しかし、STIVに限らず画像認識が水面表面で判断する手法であることと、表面上に発生する強風等の外乱を完全に排除することは現時点では難しいことから、水門操作に資するためには補助として流向計等他の技術との併用も視野に入れ検討を進める必要があると考える。

国土交通省の社会資本整備審議会河川分科会・河川機械設備小委員会においても水門操作の自動化、遠隔化が提言されており、このような技術が今後必要とされるため、この取組が現場への導入の一助になれば幸いである。

謝 辞

本研究の推進に当たり、SIPの研究推進法人の国立研究開発法人防災科学技術研究所、試験現場フィールドを提供いただいた関東地方整備局荒川下流河川事務所、中部地方整備局木曾川下流河川事務所に多大なご協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水門・樋門・樋管 遠隔監視操作システム技術資料 一般社団法人ダム・堰施設技術協会 2001年
- 2) 流量観測の高度化マニュアル 土木研究所 2016年
- 3) ハイドロ総合技術研究所HP
<https://hydrosoken.co.jp/service/hydrostiv.php>
- 4) 深層学習を用いたSTIV解析の高性能化 土木学会論文集B1(水工学) Vol76 2020

上野仁士



土木研究所 技術推進本部
先端技術チーム 主任研究員
UENO Hitoshi

杉谷康弘



研究当時 土木研究所 技術
推進本部 上席研究員
(特命事項担当)、現 国土
交通省国土技術政策総合研
究所 社会資本マネジメン
ト研究センター 社会資本
高度化研究室長
SUGITANI Yasuhiro