映像に基づく床版更新用施工機械のサイクルタイム自動計測技術の開発

鹿島建設(株)　正会員　○北原　靖之　正会員　片村　立太
川崎　敦史　正会員　三上　大志
正会員　露木　健一郎

1．背　景

(1) 床版取替工事における課題

高度経済成長期に整備された道路橋の老朽化が進行しており，損傷や劣化に対応するための床版取替工事の需要が増加している．一方，通行規制期間の短縮などの観点から，施工の高速化および効率化が求められている．こうした要求に対応する施工方式として，専用の施工機械を用いて床版の撤去および架設を繰り返し行うスマート床版更新（SDR：Smart Deck Renewal）システム©が開発されている．

図-1 に SDR システムの概略図を示す．SDR システムは，床版の撤去から架設に至る一連の作業を連続的に実施する施工形態を特徴としており，従来工法と比較して高い生産性を有する．しかし，施工実績が限られており，効率的な運用に関する知見が十分に蓄積されていないため，運用時の施工効率化が課題となっている．

(2) サイクルタイム計測の課題

SDR システムにおける運用時の施工効率化には，床版 1 枚当たりの撤去や架設に要する時間（サイクルタイム）を定量的に把握・分析することが不可欠である．これを継続的に計測し，その内訳やばらつきの要因，工程のボトルネックを明らかにすることで，施工方法の改善や工程計画の高度化が可能となる．

しかしながら，従来のサイクルタイム計測は，現場担当者による目視観察や手動記録に依存しており，人手がかかるため，長時間にわたる連続的な計測が実施されていない．そのため，施工現場における実態を反映したデータに基づく分析が行えず，施工改善のための意思決定に活用しきれていないのが現状である．

このような課題を解決するため，近年では画像認識技術を活用した施工時間計測の自動化が進められている．トンネル工事などを対象としたサイクルタイム計測技術も開発されているが[1)]，対象工種や施工条件が異なるため，これらを SDR システムへ直接適用することは容易ではなく，SDR システムを対象としたサイクルタイム自動計測手法が必要とされている．

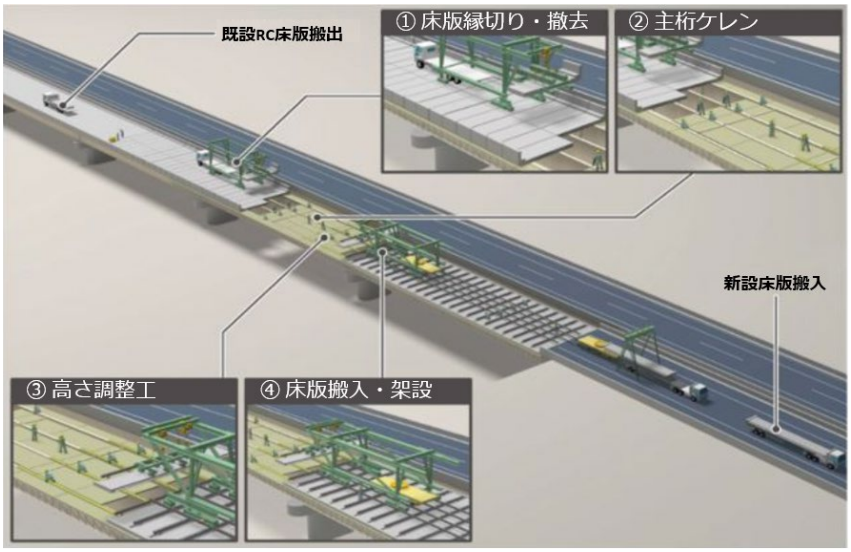


図-1　SDR システム概略図

キーワード　画像認識，画像解析，サイクルタイム計測，床版取替，リニューアル工事
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　ＴＥＬ042-485-1111

２．開発概要

上述の背景を踏まえ，本研究では，SDR システムにおける施工機械の施工映像を用いて，サイクルタイムを自動計測する技術を開発した．対象はフル SDR およびシングル SDR の 2 種類とし，物体検出に基づく方式と，光学フロー特徴および動的時間伸縮法（DTW）を用いたテンプレートマッチング方式について検討した．本章では，SDR システムおよび各手法の概要を示す．

(1) SDR システム概要

SDR システムは 2019 年に開発された床版取替システムであり，施工条件などに応じた最適な施工を実現するため，「フル SDR」と「シングル SDR」の 2 種類が存在する．写真-1 にフル SDR における撤去機および架設機，ならびにシングル SDR における撤去・架設機を示す．

フル SDR は，床版撤去工程と床版架設工程にそれぞれ専用機械を用いることで，床版取替作業の効率化を図る施工システムである．床版取替に伴う既設床版の撤去，主桁ケレン処理，高さ調整，新設床版の架設を複数の作業班が並行して実施することにより，高い施工能力を発揮する．また，撤去作業と架設作業を同時に進行できるため，規制期間の短縮および施工全体の効率化が可能である．

シングル SDR は，1 台の施工機械が床版の撤去および架設の両機能を担うシステムである．床版取替にかかる各工程を同一作業エリアにおいて順次施工する方式であり，床版を 1 枚ずつ取り替えながら施工を進める．シングル SDR は，フル SDR と比較して施工能力は低下するものの，機械構成が比較的簡素であるため，施工延長が比較的短い工事においても導入しやすく，経済性との両立を図ることができる．



写真-1　フル SDR における撤去機(左)，架設機(中央)，シングル SDR における撤去・架設機(右)

(2) 物体検出を用いたサイクルタイム計測

本手法では，施工機械に設置したカメラの映像を対象として，物体検出および光学フローを組み合わせることで，各時刻における作業工程を自動判定し，サイクルタイムを算出する．具体的には，深層学習を用いて吊り具，床版，搬送用トラックなどの対象物の状態を認識するとともに，光学フローにより施工機械の移動状態を推定する．これらの情報を状態遷移モデルへ入力することで，撤去や架設などの各工程を時系列に分類し，サイクルの開始・終了時刻を自動的に抽出する．本手法はリアルタイム計測ができる特徴を有する．

(3) テンプレートマッチングを用いたサイクルタイム計測

物体検出方式は高精度な工程認識が可能である一方，現場条件の変化に応じた学習データの準備やモデルの再学習が必要となる．そこで本研究では，学習を必要としない手法として，光学フロー特徴と Dynamic Time Warping（DTW）を用いたテンプレートマッチング手法を開発した．本手法では，同一現場で取得した 1 サイクル分の映像をテンプレートとし，対象映像との時系列的な類似度を評価することでサイクルの開始・終了位置を推定する．映像中に繰り返し現れる施工パターンに着目してサイクルを抽出するため，学習データを必要とせず，多様な施工条件に柔軟に適用できる特徴を有する．

本論文では，第３章および第４章において，物体検出を用いたサイクルタイム計測手法を，フル SDR およびシングル SDR に適用した結果を示す．また，第５章では，光学フロー特徴と DTW を用いたテンプレートマッチング手法をシングル SDR へ適用し，その有効性を検証した結果を述べる．

３．物体検出を用いたフル SDR のサイクルタイム計測

(1) カメラ設置

本手法では，施工機械に設置したカメラ映像を用いてサイクルタイムの計測を行う．対象とするのはフル SDR システムにおける主要機械である撤去機および架設機であり，本章では撤去機を対象とした手法について述べる．カメラは，床版の引き剥がしを行う揚重エリアおよび，引き剥がした床版を搬出するトラックの動きが撮影可能となる撤去機上部に設置した(写真-2)．このように撮影範囲を設定することで，床版の有無や搬送車両の状態といった工程判定に必要な情報を単一の映像から取得可能とする．



写真-2　撤去機へのカメラ設置

(2) 計測手法

本手法では，映像解析により施工機械の作業状態を推定し，状態遷移モデルを用いて工程を判定することでサイクルタイムを算出する．工程判定に用いる情報として，物体検出による対象物の状態および光学フローによる施工機械の移動状態を抽出する．

a) 物体検出に基づく揚重装置およびトラックの判定

まず，深層学習に基づく物体検出を用いて，映像内の対象物の状態を判定する(写真-3 左)．具体的には，①吊り具の位置，②揚重中の床版の有無，③搬送用トラックの有無，を判定する．学習データは 13000 枚程度準備し，物体検出の性能を示す指標である F 値で各クラス 0.98 以上の検出精度が得られることを確認している．

b) 光学フローによる移動状態の判定

次に，施工機械の移動状態を捉えるため，光学フローを用いてフレーム間の移動ベクトル分布を算出し，その平均ベクトルから施工機械の移動状態を推定する(写真-3 右)．本手法では，撤去機の動作を①前進，②後退，③停止，に分類する．これにより，次の作業位置への移動や待機状態の判別が可能となる．



写真-3　物体検出結果例(左)および後退時の光学フロー検出結果イメージ(右)

c） 状態遷移モデルによる工程判定

上述の物体検出と移動状態の結果を入力として，状態遷移モデルに基づき現在の作業工程を判定する．図-2 に撤去機の状態遷移モデルを示す．本手法では，撤去機の作業を①床版撤去準備，②床版撤去，③床版積載，④待機，の 4 工程に分類する． これらの工程は，床版 1 枚の撤去作業を構成する一連のプロセスであり，本研究ではこの 4 工程を 1 サイクルとして定義する．状態遷移は，「撤去機の前進」「吊り具の下降」「床版の有無」「トラックの有無」などの条件の組合せにより判定される．これにより，映像から連続的に工程変化を検出し，サイクルの開始時刻および終了時刻を抽出することでサイクルタイムを算出する．

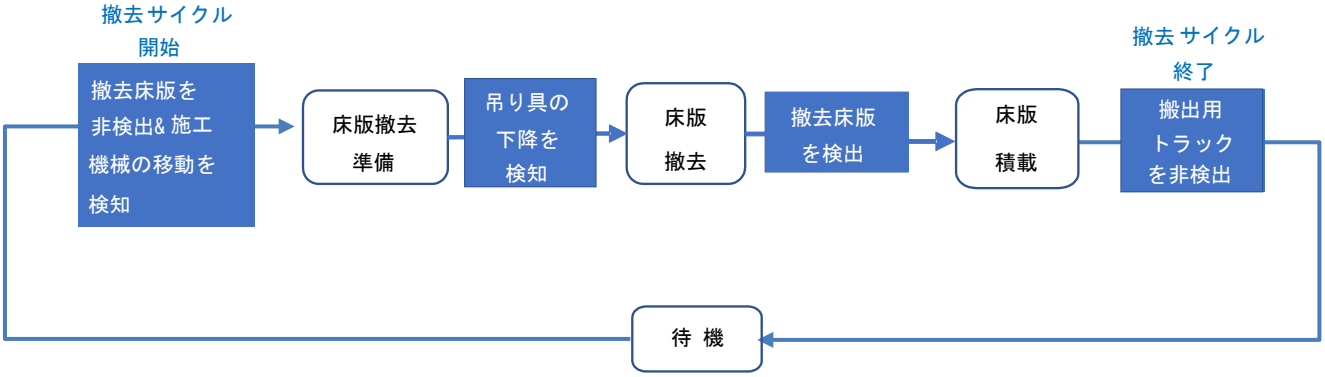


図-2　フル SDR における撤去機の状態遷移モデル

(3) 計測結果

本手法を実施工現場に適用し，撤去機のサイクルタイムを計測した．対象は関越自動車道阿能川橋床版取替工事における阿能川橋の上り線施工であり， Ⅰ期施工（2023 年 8 月～11 月）およびⅡ期施工（2024 年 5 月～7 月）について分析を行った． 図-3 に撤去機のサイクルタイム計測結果のヒストグラムを示す．60 分以上は一つのビンに集約している．その結果，サイクルタイムの最頻値はⅠ期施工では 40～45 分であったのに対し，Ⅱ期施工では 20～25 分となり，サイクルタイムが約半減していることが確認された．

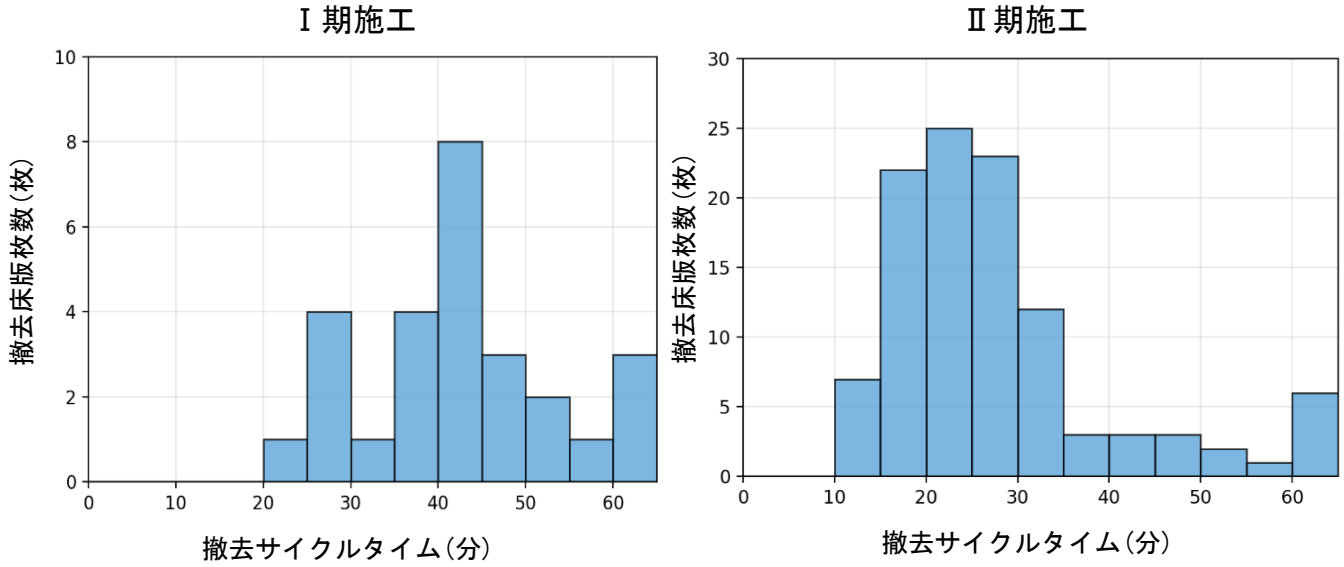


図-3　撤去機のサイクルタイムの比較（左：Ⅰ期施工，右：Ⅱ期施工）

図-4 にサイクルタイムの内訳比較を示す．各々サイクルタイム値の最頻値区間（1 期施工は 40～45 分， 2 期施工は 20～25 分）からサンプリングしている．内訳から引き剥がし工程の時間が大幅に短縮されていることが確認できる．また，写真-4 に揚重装置におけるチェーン構造の比較写真を示す． Ⅰ期施工完了後に床版をより安定的に揚重するために揚重装置のチェーン構造の改造を行っており，この改造が引きはがし工程短縮に寄与したと推察される．本手法により本体改造の効果を定量的に把握できることが示された．

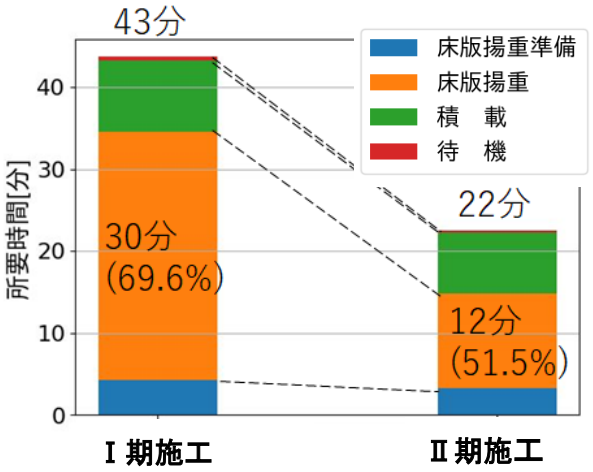


図-4　架設機サイクルタイムの内訳比較

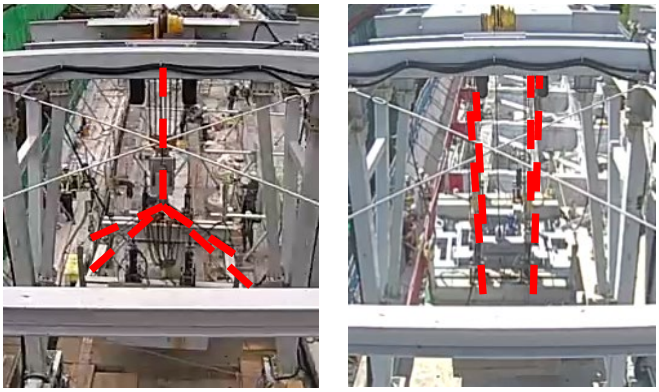


写真-4　Ⅰ期施工（左）とⅡ期施工（右）の揚重装置チェーン構造の比較

(4) まとめ

本章では，物体検出および光学フローを用いた映像解析により，フル SDR における撤去機のサイクルタイムを自動計測する手法を示した．その結果，実現場においてサイクルタイムおよびその内訳を自動取得できることを確認するとともに，施工方法の改善によるサイクルタイムの短縮効果を定量的に把握可能であることを示した．

4．物体検出を用いたシングル SDR のサイクルタイム計測

(1) 計測手法

シングル SDR への適用にあたっては，第 3 章で示したフル SDR に対する計測手法を基本としつつ，施工形態および使用機械の相違に対応するための改良を行う．シングル SDR では 1 台の施工機械が撤去・架設の両機能を担うため，1 系統の映像から撤去作業および架設作業の双方を判定する必要がある．そのため，サイクル内で撤去工程と架設工程が交互に遷移する施工フローを考慮した状態遷移モデルを構築する（図-5）．

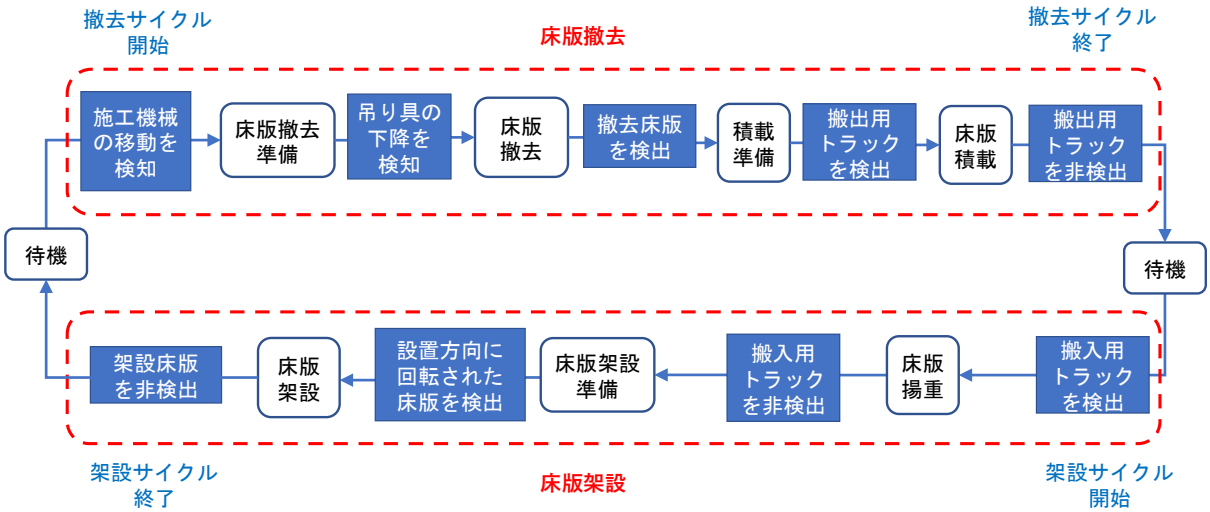


図-5　シングル SDR における工程判定アルゴリズム

また，施工条件の違いにより，床版・吊り具・トラックなどの形状・見え方が変化するため，シングル SDR への適用検証用に新たなデータセットを用いて物体検出モデルの再学習を行う．さらに，技能者が一定時間以上映像内で検出されない場合，当該時間帯を休憩時間とみなし，実働時間としてカウントしない処理を付加する．

(2) 計測結果

本手法を，シングル SDR による実施工現場に適用し，サイクルタイムの計測を行った．対象は関越自動車道阿能川橋床版取替工事における土樽橋の下り線施工であり，Ⅱ期施工（2025 年 8 月～9 月）について分析を行った．図-6 に結果を示す．撤去サイクルおよび架設サイクルそれぞれについて，サイクルタイムの分布を取得することができ，各作業の特性やばらつきを可視化することが可能となった．撤去と架設を比較すると，撤去のサイクルタイムの方が短時間かつバラつきが小さい傾向が確認された．また，目視による計測結果との比較を行ったところ，サイクルタイムの計測誤差の平均は，撤去・架設ともに各サイクルタイムに対して約 7～8%であることが確認された． 以上より，本手法はシングル SDR に対しても適用可能であり，実施工環境において一定の精度でサイクルタイムを把握できることが示された．

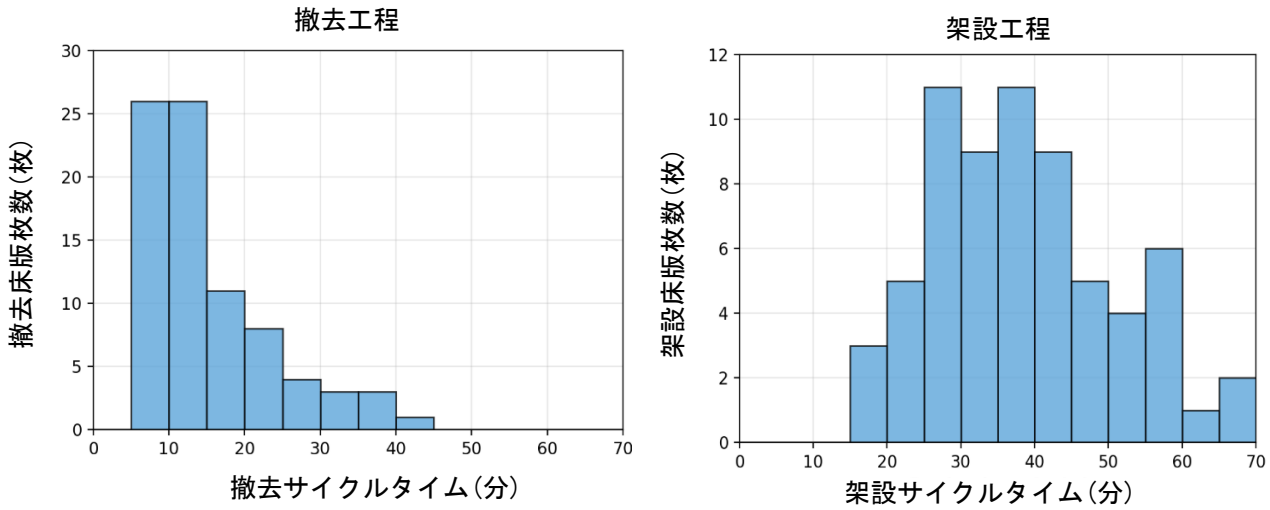


図-6　サイクルタイム計測結果　（左：撤去工程　右：架設工程）

(3) まとめ

本章では，フル SDR 向けに開発したサイクルタイム計測手法を，シングル SDR へ適用するための改良について示した．その結果，検出モデルの再学習および工程判定アルゴリズムの拡張により，施工形態の異なる SDR に対してもサイクルタイムの自動計測が可能であることを確認した．

５．テンプレートマッチングを用いたサイクルタイム計測

(1) 物体検出方式の課題

第３章および第４章では，物体検出および状態遷移モデルに基づき工程を判定し，サイクルタイムを算出する手法を示した．これらの手法はリアルタイム処理が可能である一方で，施工条件の変化に応じた検出モデルの再学習が必要となる点が課題である．

SDR システムでは，現場ごとに床版形状，トラックの種類などが異なるため，同一の検出モデルをそのまま適用することが難しい．そのため，新たな現場に適用する際には，学習データの収集やラベル付けといった準備作業が必要となり，運用上の負担が大きい．そこで学習データを必要とせず，同一現場の映像のみでサイクルタイムを計測可能な手法として，計算量は増加するもののテンプレートマッチングに基づく手法を検討した．

(2) 提案手法

図-7 に提案手法の処理全体図を示す．本手法では，同一現場において取得した 1 サイクル分の施工映像をテンプレートとし，対象映像に対して時系列マッチングを行うことで，サイクルの開始･終了時刻を推定する．逐次的な工程判定は行わず，映像パターンの類似性に基づいて変化点を抽出し，サイクルを算出する点に特徴がある．

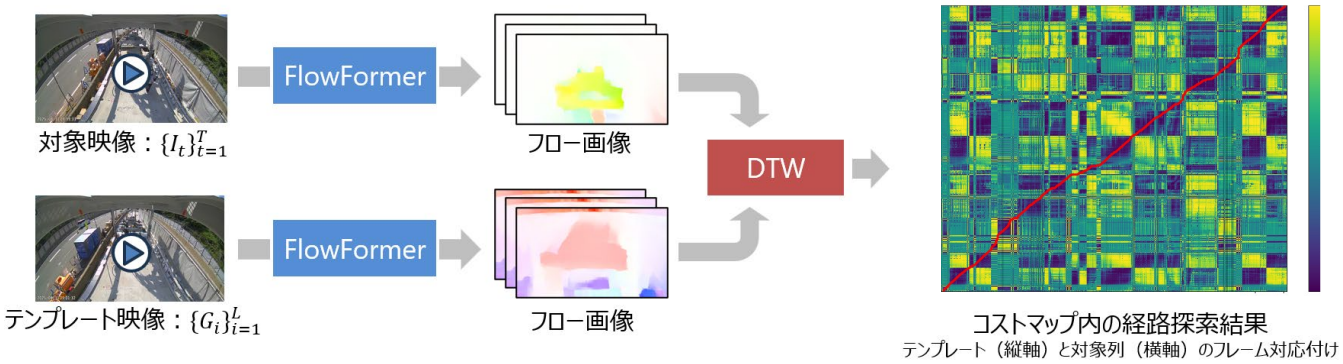


図-7　テンプレートマッチング方式の処理全体図

a)光学フローを用いた時系列特徴表現

映像間の類似性を評価するための特徴量として，本研究では光学フローを用いる．SDR システムによる施工は，施工機械の移動や床版の揚重・回転といった特徴的な動作の繰り返しで構成される．光学フローは，画素の移動量としてこれらの動きを直接的に表現できるため(図-8 左)，照明変化や外観の違いに対して比較的頑健な特徴量となる．本研究では FlowFormer と呼ばれる深層学習モデルを用いて映像の各フレーム間で特徴量を算出し，その分布を 1 フレームごとの特徴ベクトルとして扱う．これにより，施工機械や床版の運動パターンを時系列データとして表現する．

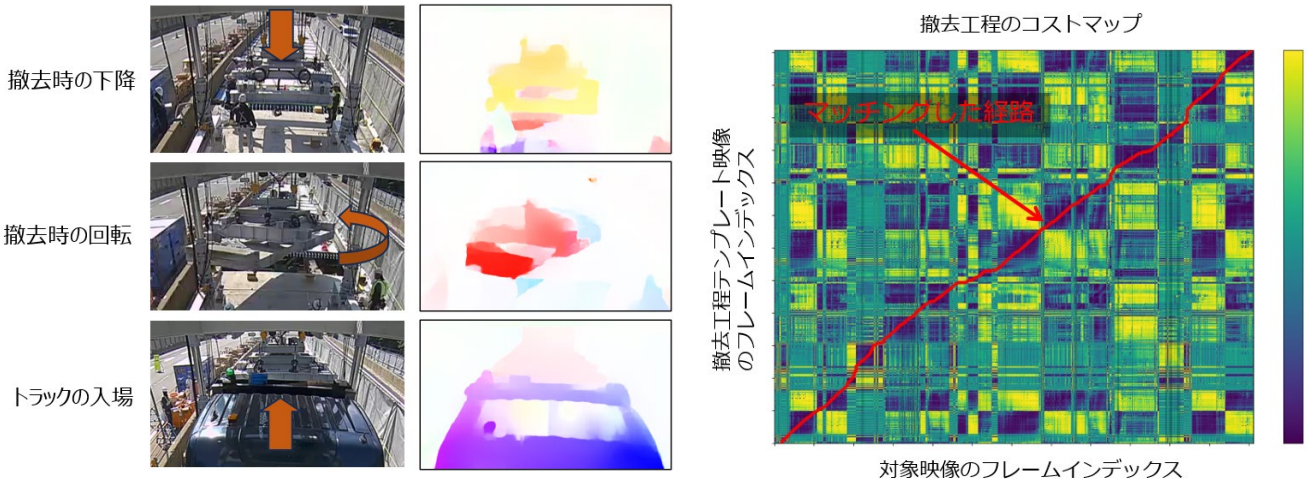


図-8　光学フロー抽出例（左）とフレーム間マッチング時のコストマップ(右)

b)DTW に基づくテンプレート映像とのフレーム間マッチング

テンプレート映像と対象映像との光学フローの対応付けには，Dynamic Time Warping（DTW）を用いる．DTW は，異なる長さの時系列データ同士の類似度を評価し，非線形な時間伸縮を考慮しながら対応関係を求める手法である．本研究では，テンプレート映像と対象映像の光学フロー特徴系列間の類似度を算出し，類似度が高いほどコストが低くなるようコストマップとして表現する(図-8 右)．このコストマップ上でコストが最小となるフレーム対応を連続的に探索することで，テンプレート映像と対象映像との対応関係を求める．さらに，テンプレート映像中の個別要素作業およびサイクル開始・終了時刻を対象映像へ対応付けることで，対象映像におけるサイクルの開始・終了時刻を推定する．

さらに，本手法では，長時間の映像や待機時間を含む現場特有の条件に対応するため，①動きの少ない区間を除外する前処理，②テンプレートに存在しない動作を除去する仕組み，などを実施している．これにより，数時間に及ぶ長時間映像に対しても安定してサイクル抽出が可能となる．

(3) 計測結果

表-1 に計測結果を示す．検証にはシングル SDR にて撮影した作業２日分（１０サイクル分）の動画を用い，目視による各工程の変化点と本手法による検出結果を比較することで誤差を評価した．その結果，対象映像中に含まれる１０サイクルをすべて正しく検出できることを確認した． また，サイクルタイムの計測精度について評価したところ，撤去工程および架設工程を含む全体サイクルの個別の要素作業において，中央値は数秒程度，最大誤差も２分程度に収まる結果が得られた．実際の施工現場においてサイクルタイムは分単位で評価されることが多く，本手法の精度は実用可能な水準であるといえる．

表-1 検出結果の誤差 （単位：秒）

		Mean	Median	Min	Max
撤去	床版把持なし下降開始	0	1	0	2
	床版把持なし下降終了	30	7	0	122
	床版把持あり上昇開始	7	2	0	31
	床版把持あり上昇終了	29	19	1	117
	床版把持あり回転開始	3	0	0	27
	床版把持あり回転終了	2	1	0	14
	トラック入場開始	20	2	0	74
	トラック退場終了	1	1	0	4
架設	トラック入場開始	4	3	0	14
	トラック退場終了	33	8	1	123
	床版把持あり回転開始	2	1	0	11
	床版把持あり回転終了	1	1	0	3
	床版把持あり下降開始	14	15	0	36
	床版把持あり下降終了	17	7	0	86
	床版把持なし上昇開始	0	0	0	1
	床版把持なし上昇終了	2	1	0	6
	全体	10	2	0	123

(4) まとめ

本章では，学習を必要としないサイクルタイム計測手法として，光学フロー特徴と DTW に基づくテンプレートマッチング手法を提案した．本手法により，同一現場のテンプレート映像のみを用いて，対象映像中のサイクルを高精度に抽出できることを示した．

６．まとめ

本研究では，SDR システムにおける施工機械の作業映像を対象とした，サイクルタイムを自動計測する手法を開発した．物体検出および光学フローに基づく手法により，フル SDR およびシングル SDR においてサイクルタイムを実用的な精度で取得できることを確認した．また，学習を必要としない手法として，光学フローと DTW に基づくテンプレートマッチング手法を提案し，その有効性を示した．両手法は，リアルタイム性と学習データ準備の要否においてそれぞれ異なる特徴を有しており，適用条件に応じた使い分けが重要である．今後は，実施工現場における運用要件を整理し，各手法の適用範囲の明確化と現場導入を進めることで，施工改善および工程管理への活用を図る予定である．

参考文献

1)吉田： 山岳トンネル掘削の作業状況を自動分析する AI システム，建設機械施工 Vol.75，2023

2)片村ら： 映像によるスマート床版更新（SDR）システムの施工機械サイクルタイム分析，土木学会第 80 回年次学術講演集，VI-1113，2025.

3)片村ら： 映像によるスマート床版更新（SDR）システムの施工機械サイクルタイム分析(その２)，土木学会第 81 回年次学術講演集，VI-1062，2026.

4)川崎ら： 道路橋リニューアル工事におけるフロー画像と DTW を用いたサイクルタイム計測,画像センシングシンポジウム 2026,IS2-05