

信号保安装置に適用可能な画像処理システムの構成手法および安全確認手法

祇園 昭宏* 市川 武** 向嶋 宏記**
 長峯 望** 福田 光芳*** 板垣 朋範#

Configuration and Safety Confirmation Method of Image Processing System Applicable to Signalling Devices

Akihiro GION Takeshi ICHIKAWA Hiroki MUKOJIMA
 Nozomi NAGAMINE Mitsuyoshi FUKUDA Tomonori ITAGAKI

In recent years, image processing has been applied to the visual inspection of rolling stock and railroad tracks. It is also expected to be applied to abnormality detection applications at level crossings and platforms, however safety assurance is an issue for signal security applications. In this paper, we report on a method for composing an image processing system using general-purpose processing equipment that can be applied to signal security equipment and a safety confirmation method.

キーワード：カメラ，画像処理，安全性技術，異常検知

1. はじめに

近年、画像処理の分野においては、画像センサの高画質化と処理装置の高性能化、低価格化が進んだことにより、高度な画像処理アルゴリズムが比較的廉価で利用可能となり、様々な分野で活用が進んでいる。鉄道においても、車両や軌道の外観検査¹⁾への活用が進められている。異常検知用途についても、踏切障害事故とホーム事故が運転事故の半数以上を占めることから、その対応手段として期待されているが、保安用途への適用では安全性の確保が課題となる。そこで、信号保安装置に適用可能な画像式線路内異常検知装置の開発を進めてきた。本稿では、画像処理システムの構成手法と安全確認手法について報告する。

2. 画像処理システムの概要と課題

2.1 画像処理システムの概要

一般に、「画像処理システム」は、カメラなどの画像センサで撮像した画像データを、画像処理装置で処理し、画像データより対象物の変化や特徴量を抽出して、記録や判定などを行うシステムを指すが、本稿では、画像処理装置の判定に基づき制御出力を行う制御装置を含めて画像処理システムと定義する。図1に本稿で扱うシステム

の構成を示す。

2.2 信号保安装置への適用における課題

信号保安装置は、装置の故障や異常に対して安全側へ遷移するフェイルセーフの考え方を基本としており、電子連動装置などの信号保安装置では、演算にフェイルセーフ装置（FS装置）を用いることで装置故障に対する安全性を確保している。異常検知用途の適用例である光電式の踏切障害物検知装置²⁾は、図2のように、発光部と受光部、処理部より構成されており、発光部の発光パターン（照査パルス）通りに受光部が受光できていることを処理部が照査する、フィードバック診断を実施している。発光部および受光部の故障、濃霧等によるレベル低下などの事象に対し、支障物による遮蔽と同様に診断不一致として検知することで安全を確保している。

画像処理システムは、従来の信号保安装置と比較して

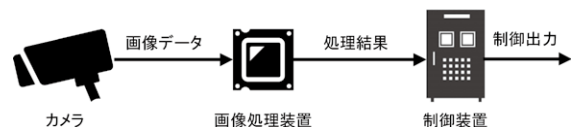


図1 画像処理システムの構成

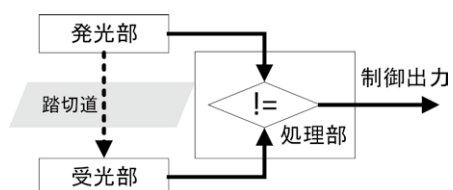


図2 光電式踏切障害物検知装置の構成

* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室
 ** 情報通信技術研究部 画像解析研究室
 *** 情報通信技術研究部
 # 株式会社京三製作所

センシング、画像処理の構成が異なる。センシングについては、受光部に相当するカメラのみとなり、クロズドループを構成できない事が課題となる。また、画像処理の構成についても、既存のFS装置の処理部（FS-CPU）では演算性能の不足により画像処理が困難となるため、汎用処理装置での画像処理に対する故障検知の考え方の確立が課題となる。

3. 画像処理システムの安全分析

線路内の異常検知を目的とする画像処理システムについて安全分析を行った。ここで対象とするシステムは、図1に示した構成の画像処理の内容を線路内の異常検知とし、制御出力を異常検知出力としたものである。具体的な前提条件を定めてシステムを定義し、リスクを抽出した後一般化するというアプローチにより分析を行った。

3.1 システムの前提条件と安全性解析

3.1.1 前提条件

システムの構成要素に関する各要素の前提条件について述べる。

(1) カメラ

遠赤外線カメラ（Vision Sensing社製：VIM-640）を対象とし、内部構造を図3と仮定する。

(2) 画像処理部

高性能な汎用処理装置（Intel社製：Core i7 6600U）を用いて毎秒10フレーム（100ms）の画像処理を行う。

(3) 制御部

FS装置を用いてカメラや画像処理部の故障監視と制御出力の安全を確保する。

(4) 伝送路

カメラと画像処理部の伝送路は、イーサネットとし、撮像した映像の伝送とカメラの制御を行うためのプロトコルであるGigE Visionを用いる。画像処理部と制御部は、FS装置のインターフェースとする。

(5) その他

アルゴリズムの検知性能は安全分析とは別に検討するものとし、アルゴリズム上の欠陥、環境条件等起因した危険側未検知は本検討では除外する。

3.1.2 FTA/FMEA

前節で述べた画像処理システムに対して、前記のアプローチによりFTAとFMEAによる分析を行った。FTAの抜粋を図4に、図1および図3の構成要素に対するFMEAの結果の一部を表1に示す。画像処理システム

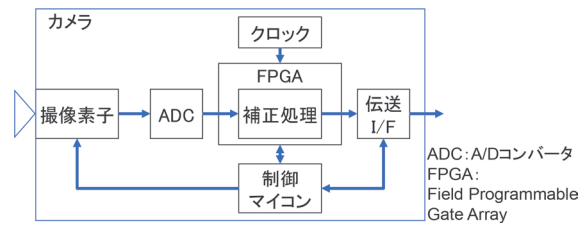


図3 遠赤外線カメラの内部構成

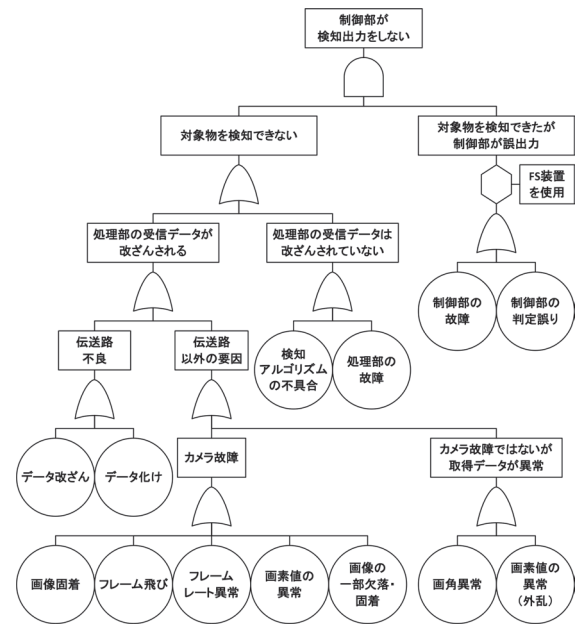


図4 画像処理システムのFTA（抜粋）

表1 カメラシステムのFMEA例（一部抜粋）

装置・要素	機能ブロック	故障モード	影響	概要	
カメラ	撮像素子	撮像素子焼け	①画素値の異常	ホワイトアウトやコントラスト低下など	
	ADC	出力固定故障	②画像固着	画像データが毎フレーム同一データとなる	
	FPGA	クロック生成	クロック停止	②画像固着	画像データが毎フレーム同一データとなる
			クロック変動	③フレーム飛び	撮像された画像データの時間間隔が空く
		補正処理	補正処理誤り	①画素値の異常 ⑤画像の一部欠落・固着	ホワイトアウトやコントラスト低下など 画像データの一部が欠落または毎フレーム同一
	伝送路		ノイズ誘導	⑥データ改ざん	画像データが破損する
ケーブル断			⑦データ欠落	画像データ単位で伝送において欠落する	
画像処理	画像処理	画像処理異常	⑧検知結果誤り	検知処理を誤る	

の不安全事象を「線路内の異常に対して異常検知出力をしないこと」と定め、「制御部が検知出力をしない」をトップ事象とした。

3.2 抽出した事象の整理

FTA/FMEA で抽出した事象の整理を行った。

3.2.1 カメラ

カメラ内部の故障および環境要因により、①画素値の異常、②画像固着、③フレーム飛び、④フレームレート異常、⑤画像の一部欠落・固着の事象が想定される。既存の障害物検知装置のようなフィードバック診断はカメラには適用困難であり、複数のカメラの比較も画角差により直接照合ができない。このため、カメラは単一構成とした場合に、他装置でカメラの故障を検知する手法が必要となる。

3.2.2 画像処理部

画像処理の汎用処理装置の故障またはアルゴリズム上の問題による⑧検知結果誤りの事象が想定される。既存の信号保安装置のFS装置においても、汎用の処理装置を二重化して同期処理の結果を比較照合する構成があるが、画像処理部は非同期で動作し、確率統計を用いることによる画素値更新の揺らぎが存在し、検知判定が同一とならない。このため、画像処理への適用に当たってはA系とB系の非同期動作に対応した照手法が必要となる。

3.2.3 制御部

FS装置を用いるため、制御部自体で発生する危険事象はないと整理できるが、カメラと画像処理部の異常を検知する方法が網羅的かつ妥当であるとともに、FS装置で実行可能であることが求められる。

3.2.4 伝送路

伝送路においては⑥データ改ざん、⑦データ欠落の事象が想定される。イーサネットではCRC32による検定がなされるが、検定の健全性を制御部が把握できないことが課題となる。

4. 構成手法の提案

本章では、安全性解析で抽出した事象と課題に対応する画像処理システムの構成手法を提案する。

4.1 システム構成

提案する画像処理システムは、単一のカメラと、二重化された汎用処理装置による画像処理部、FS装置による制御部で構成し、制御出力およびカメラおよび画像制御部の健全性診断に基づく安全制御を制御部が行う。

4.2 安全確認手法

画像処理システムの安全確認手法として、画像データへの診断データの格納と照査、テストパターンによる診断、ダイジェストデータの比較機能を定める。

4.2.1 画像データへの診断データの格納

診断データとして、図5に示すようにフレームカウント、クロックカウント、画像CRCを画像データに埋め込む。イーサネットのビット誤り率 10^{-10} 、画像データ長 $640 \times 480 \times 16 = 4915200\text{bit}$ より、誤りが複数個以上含まれる確率は 1.21×10^{-7} となる。また、 n 回連続してCRCが一致する1時間あたりの確率はCRCのビット長 m に対して、 $2^{-m \times n} \times 3600[\text{s}] \times 10[\text{fps}] = 2250 \times 2^{-m \times n}[\text{h}]$ となる。これより、伝送上の見逃し誤りと固着の誤認の確率を考慮し、画像CRCのビット長 $m=16$ 、画像の固着を判定するまでの回数 $n=3$ とした。

(1) 画像CRC

$N(0,0)$ から $N(636,479)$ までを対象としたCRC16の値をカメラのFPGAで計算し、付与する。図6に示すように、画像処理部で再計算し、格納値と再計算値の一致を制御部で照査する。

(2) フレームカウント・クロックカウント

カメラの内部で計数する、フレーム通番をフレームカウント、フレーム前後の間隔をクロックカウントとして格納する。図7に示すように、画像処理部でフレームカウントを追加付与し、制御部のFS-CPUでデータ欠落を考慮した照査をおこなう。

4.2.2 テストパターン

カメラおよび画像処理部のCRC計算の健全性を診断するため、テスト用画像データをテストパターンとしてカメラ内に用意し、定周期あるいは制御部からの要求の都度、画像データとして挿入する。画像処理部は画像データと同様にCRCを再計算し、制御部はテストパターンのCRCの正解データとそれらを照査する。

4.2.3 ダイジェストデータ

非同期動作する画像処理部の健全性診断の方法として、処理結果のダイジェストデータ同士のハミング距離を評価する。まず図8(a)に示すように画像処理により画素単位の検知あり/なしの二値化した検知結果に対し

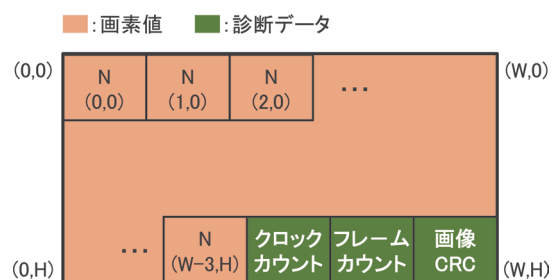


図5 画像データへの診断データの格納

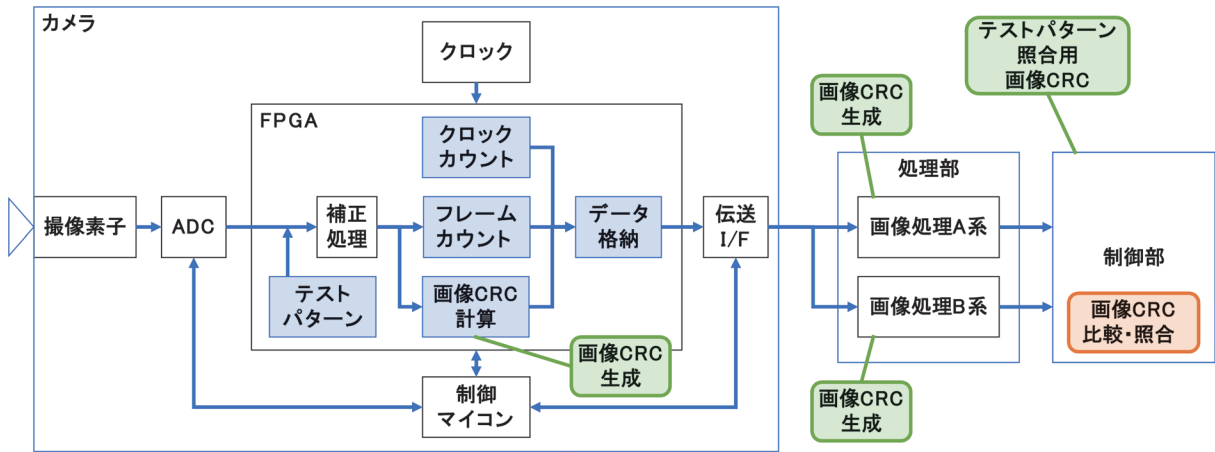


図6 画像処理システムの構成と画像CRCによる検定処理の関係

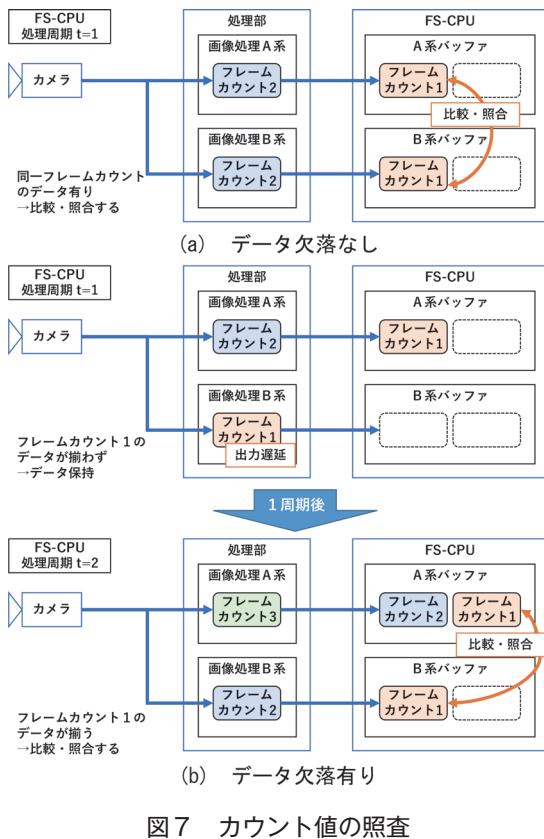


図7 カウント値の照査

てブロックサイズKで検知結果を分割し、各ブロック内での検知の有無を計算することでダイジェスト化し、次に図8(b)に示すようにラスタスキャン順でシリアルライズする。そして、図8(c)に示すようにA/B系のデータでハミング距離を計算し、予め定めたしきい値以下であることをもって両系が健全と判定する。

4.3 安全確保の考え方

抽出したカメラシステムの故障モードと診断手法の対応を表2に示す。各項目の概要を以下に述べる。

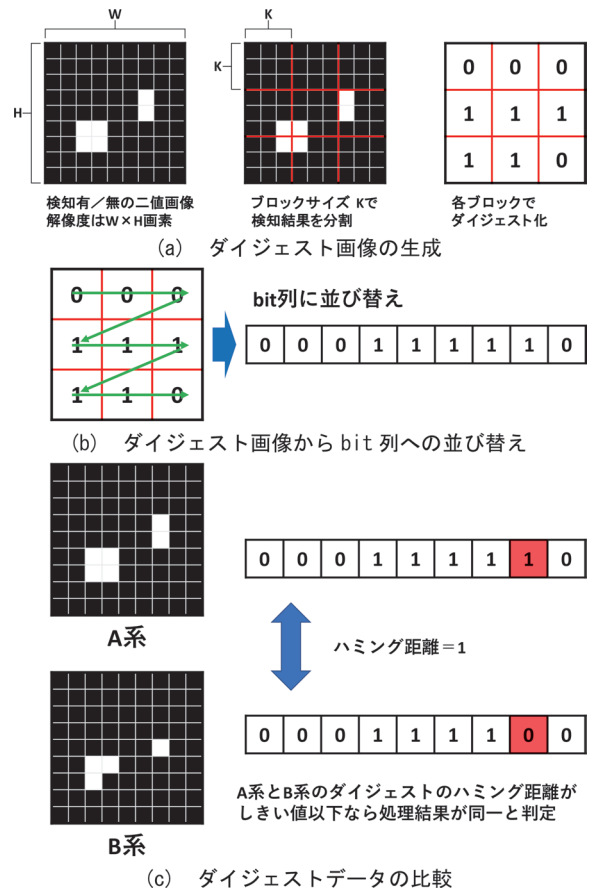


図8 ダイジェストデータの生成と照合

4.3.1 画素値の異常

画素値の異常については、画像処理部の画像処理アルゴリズムにおいて、ホワイトレベル、コントラストなどの画像品質を計算し異常を検出する、画像処理部の故障については制御部のFS-CPUにおいて画像処理部A系とB系の出力を比較照合することにより検知する。画像処理部による画素値の異常検出、および異常検出の系間不一致を制御部で検知することで、安全を確保できる。

表2 カメラシステムの故障モードと診断手法の対応

影響	診断手法
①画素値の異常	画像処理の比較
②画像固着	画像 CRC
③フレーム飛び	フレームカウント
④フレームレート異常	クロックカウント
⑤画像の欠落・固着	画像 CRC, テストパターン
⑥データ改ざん	画像 CRC
⑦データ欠落	フレームカウント
⑧検知結果誤り	ダイジェストデータ

4.3.2 画像固着

画像固着については、診断データのうちの画像 CRC の変動を制御部の FS-CPU が監視し、値が不変となることを検知することで判定できる。通常、静止物を撮像した場合でもイメージセンサに発生するランダムノイズ³⁾⁴⁾により画素単位で画素値に微小な揺らぎが発生する。このため、画像 CRC は毎フレーム変化することが期待される。異なる画像の CRC が同一となる事象についても、3回連続する確率は 1.27×10^{-10} [h] と十分に低く、また毎秒 10 フレーム取得することから判定条件を 3 フレームとすることの検知遅延への影響も小さい。

4.3.3 フレーム飛び

フレーム飛びについては、診断データのうちフレームカウントの増加量を制御部の FS-CPU で監視することで判定できる。

4.3.4 フレームレート異常

フレームレート異常は、診断データのうちクロックカウントの値と画像処理部が付与する周期カウンタ値を制御部の FS-CPU で監視することで判定できる。フレームレート異常は、前後のフレーム間隔が 100ms を逸脱する事象となることから、図 7 に示したようにカメラと画像処理部それぞれの計時を照査することで、フレームレートと計時機能の両方の健全性を監視できる。

4.3.5 画像の一部欠落・固着

画像の一部欠落・固着は、カメラの補正処理を行う領域の故障を想定しており、カメラによる自己診断の健全性を保証できないことから、制御部の FS-CPU が外部診断を行う方法として、テストパターンと画像 CRC を用いる。テストパターンはカメラの補正処理に挿入され、カメラ、画像処理部がそれぞれ画像 CRC を計算する。画像の一部欠落・固着が生じた場合は、テストパターンが破壊されるため、正解データと異なる画像 CRC が付与され、制御部は正解データと比較できることから、これを検知できる。

4.3.6 データ改ざん

データ改ざんは、診断情報のうちの画像 CRC について、カメラの付与した画像 CRC と画像処理部の A/B 系

がそれぞれ付与する画像 CRC が一致することを制御部の FS-CPU が監視することで検知する。定期的にテストパターンを挿入することで、カメラ、画像処理部それぞれの画像 CRC 生成機能の健全性を併せて監視する。

4.3.7 データ欠落

データ欠落は、フレーム飛びと同様の事象であるが、ここでは A/B 系で受信状態が不一致となる事象を言う。データ欠落により系間の処理状態の乖離が生じてアベイラビリティを損なうことが考えられるが、FS-CPU は、画像処理部各系の出力を 2 周期保持する構成としており、その中から同じフレームカウントのデータを探して、比較・照合することでデータ欠落に対するアベイラビリティを確保する。

4.3.8 検知結果誤り

検知結果誤りは、画像処理部の故障により異常を検知しない事象であり、画像処理部 A/B 系の生成するダイジェストデータのハミング距離を制御部の FS-CPU が検定することで誤りを判定できる。検知結果としての異常の有無を比較するだけでは潜在的な故障を検出できないが、処理データをダイジェスト化することにより各系への入力と学習がおよそ同等であることを監視することが可能となり、潜在故障を検出できる。

4.4 提案手法の主な利点

提案する画像処理システムの構成および安全確認手法の利点は 2 つある。一つは既存の FS 装置を安全確保の手段として適用できることである。画像処理は演算量が多く、膨大な情報を取り扱うことから、FS 装置への組み込みは困難であったが、処理と照合を切り離して FS 装置の役割を汎用のセンサおよび処理装置の故障監視と保安制御に特化することで適用が可能となった。監視の方法についても、汎用装置の出力の一致や正解データとの比較、またはハミング距離の計算などであり、データサイズを CRC やダイジェストデータに圧縮することで、FS-CPU での比較・照合に対応可能としている。

もう一つの利点は、非同期かつ内部状態の異なる処理の比較照合ができる点である。画像処理アルゴリズムにおいて確率統計を用いることによる揺らぎや、伝送状態の差により画像処理部が厳密に同一とならない処理でも照合可能となる。この手法は、より高度な画像処理アルゴリズムに適用可能であるほか、三重系以上の冗長化により異常系の検出と切り離しが可能となることから、アベイラビリティの向上が見込まれる。

5. 装置試作と検証試験

提案した対策手法を適用した踏切異常検知装置を試作し、安全技術の評価試験を行った。踏切異常検知装置の

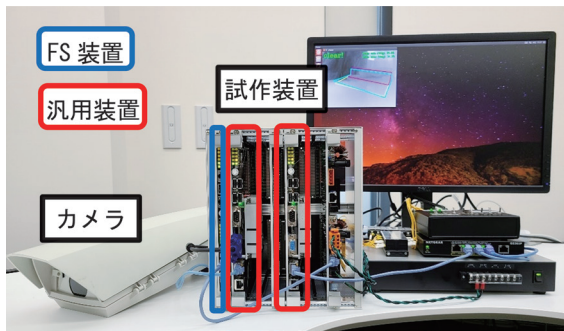


図9 試作したシステムの装置構成

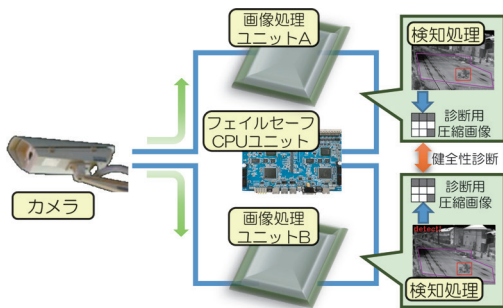


図10 試作したシステムのデータフロー

表3 試験項目および試験方法と試験結果

試験項目	試験方法	結果
(1) 画像CRC	画像処理部でCRC値を改変	良
(2) クロックカウンタ値	片系異常となるカウンタ値設定	良
	両系異常となるカウンタ値設定	良
(3) テストパターン	テストパターンのCRCを改変	良
	通常画像に遷移しない	良
	テストパターンを出力しない	良
(4) ダイジェスト	ハンク距離の乖離を検知	良
	カメラ故障の交番停止	良
(5) 交番信号	画像処理結果の交番停止	良
	イーサケーブルを抜く	良
(6) その他	片系を動作停止する	良

構成を図9に、データフローを図10に示す。

汎用装置による画像処理と、FS装置による診断と制御を組み合わせることにより、100msec周期での画像処理を診断できることを確認した。また、故障診断機能について、抽出した故障モードを試作した装置に発生させ

た場合にフェイルセーフな制御部で異常や故障を検知し、安全側に制御できることを確認する工場内試験を実施した。試験項目と試験方法、試験結果を表3に示す。試験項目(1)～(6)のそれぞれについて、意図した通りに異常検知・安全側固定できたことから、各ユニットの故障や異常に対して安全上問題ないことを確認できた。

6. まとめ

カメラを用いた画像認識システムを高い安全性が要求される分野に導入するために、システムを一般化した機能ブロックとして定義し、安全性解析によりシステムの危険側事象を抽出するとともに、課題の整理をおこなった。抽出した危険側事象と課題への対策手法として、画像データへの診断データの付与と照査、テストパターンによる画像CRCの健全性確認、ダイジェストデータによる画像処理の健全性確認を提案するとともに、カメラを用いた踏切異常検知装置について検証用のシステムを試作して人工故障試験を実施し、安全上問題ないことを確認した。

カメラを用いた画像認識システムを信号保安用途に適用するための構成手法を確立できたことから、今後は、鉄道の信号保安分野におけるカメラを用いた画像処理システムの活用のため、試作したシステムの構成手法、診断手法を基に、線路内の異常監視を行うシステムの実用化に向けた検討をおこなう。

文献

- 1) 穴見徹広：スマートメンテナンスの取り組み状況について、JR EAST Technical Review, No.62, pp.5-10, 2019
- 2) 鈴木勇：踏切障害物検知装置の各種、鉄道と電気技術, Vol.2, No.9, pp.23-28, 1991
- 3) 北村純一、勝間裕章、西村敏博：CMOSイメージセンサにおける局所輝度分散に基づいたフォトンショットノイズの低減、電気学会論文誌C 電子情報システム部門誌, Vol.129, No.6, pp.1147-1155, 2009
- 4) 西田泰章、小池純朗、大竹浩、吉川重夫：CCD型撮像素子のノイズと低雑音信号読出し法、テレビジョン学会誌, Vol.39, No.12, pp.1176-1181, 1985