

### 3. 人間と機械が混在する場での移動体検出手法と 画像センサ正常性確認手段の検討\*

濱島京子\*\*

### 3. Research on Object Detection Method of Man-Machine Coexistence System and Normality Confirmation Method for Image Sensor\*

by Kyoko HAMAJIMA\*\*

**Abstract;** The aim of this research is to develop a device to protect persons from possible collisions with machines in environments where machines move around working persons and where conventional protective measures for fixed machines such as guards are not applicable. Emphasis is placed on the development of an object detection method for image analysis with the aid of a computer and video cameras. This type of device is usually called a vision-based protective device (VBPD).

IEC/TR 61496-4 provides information related to the design, construction, and testing of electro-sensitive protective equipment (ESPE) that employs VBPDs for sensing purposes for safeguarding machinery. For writing this technical report, the results of a Japanese research project performed by JMF (The Japan Machinery Federation) were used. In the project report, the following were pointed out as problems encountered in the development of VBPDs. The integrity of the automatic image recognition technology currently available is insufficient for the application of the technology to protective devices.

First, object zone detection with a volume intersection method using omnidirectional vision sensors is proposed in this study. The detected object zone definitely contains the target object; however, the detection method has a tendency to estimate the zone to be larger than the target's real volume. In addition, false detection is unavoidable, and there is basically no solution for the ghost problem. These are features pertaining to the safety aspect. When more than three vision sensors are used, by comparing the inner areas enclosed by sensors, it is easy for the object zone of the object in the outer area to be overestimated. Therefore, the detection zone should be set in the inner area.

Second, a normality confirmation method using a reference pattern created by a light source instead of the floor or a wall filled with a reference pattern such as a checked pattern is proposed. The normality of the camera system is verified by taking a picture of the pattern projected onto the monitor by timesharing and checking the image. To take a picture of the reference light and the observation light alternately, a beam splitter is attached to the camera. If a checked pattern is used as the reference pattern created by a light source, a JMF normality confirmation algorithm can be used. Furthermore, the object detection method is examined by using an overlay image of the pattern light and observation light so as to improve the performance of the method. An experiment showed that the regularity of the pattern in the overlaid image varied depending on the complexity of the observed image. The experimental result indicates that object detection can be performed using an overlay image.

**Keywords;** Vision Based Protective Devices, Image sensor, Image analysis, Normality Confirmation

---

\* 本研究の一部を平成15年12月 日本機械学会 第12回交通・物流部門大会講演<sup>1)</sup> (優秀論文講演受賞)などで発表した。また、産業安全研究所特別研究報告<sup>2)</sup> (NIIS-SRR-No.33) および日本機械学会誌<sup>3)</sup> 平成20年2月号にて発表した。

\*\* 電気安全研究グループ Electrical Safety Research Group

## 1. はじめに

本稿は、平成14年～18年度に実施したプロジェクト研究「人間・機械協調型作業システムの基礎的安全技術に関する研究」<sup>2)</sup>におけるサブテーマ「環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発」で得られた研究成果を踏まえ、画像センサの正常性確認手法について新たに提案するものである。本研究では、人体検知用センサとしてビデオカメラ等の画像センサを使用した保護装置（以下、映像利用保護装置）の開発に向けて、物体の存在領域抽出方法と、装置の機能正常性確認手段について検討を重ねた。以下に、本研究の背景として、映像利用保護装置の概要および国際規格の現状について述べる。

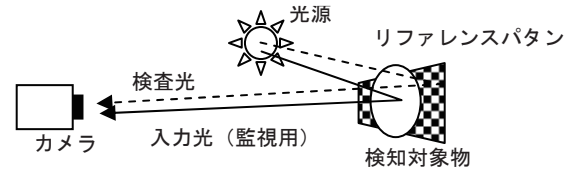
### 1.1 映像利用保護装置の概要

映像利用保護装置は、人間と機械の混在環境下における人間の安全確保のための保護装置として、有望視されているものである<sup>4)</sup>。この理由は、主として、画像センサが三次元空間を一度に走査できる点にある。

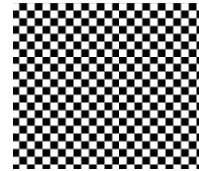
人間と機械の混在状態で人間の安全を確保するためには、人間と機械の接触の可能性を予知して機械を止める機能を自動化することが求められ、少なくとも地上2mまでの3次元空間内の人と機械の存在空間（注1参照）が検知できなければならない<sup>5)</sup>。現在、市販されている電気的検知保護設備用の人体検出センサは、走査が2次元に限られていることから、移動体（人または機械）を包含する存在空間を検出することができない。

また、第二の理由として、画像センサはパッシブ型のためセンサ間で干渉が生じないことが挙げられる。互いの視野が重複するようセンサを配置できることから、複数台の画像センサで広大領域を監視する分散視覚技術などの利用も考えられる。

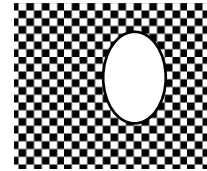
さらに、第三として、危険源を有する機械類より離れた位置に画像センサを設置可能な点があげられる。すなわち、レイアウト変更等で機械の危険区域場所が変更となっても、機械の危険区域をセンサの検知区域内に捉えている限り、画像センサの再設置が不要である。ライトカーテンやレーザスキャナ等の他の人体検知用センサでは原理上、作業員などの保護対象物が危険区域へ進入する経路上にセンサを設置しなければならず、機械設備のレイアウト変更や改修等により危険源の位置が変化した際には、検知センサの再設置が求められる。これに対し、画像センサは保護対象物体が危険区域へ接近する経路上に必ずしも設置する必要はなく、危険区域全体が視野に収まるよう危険区域より遠方にセンサを設置することが



(a) IEC/TR 61496-4 の撮影方式概要



(b) 物体不在時の撮影画像



(c) 物体存在時の撮影画像

Fig. 1 Object detection method in IEC/TR 61496-4.  
IEC/TR 61496-4の物体検出方式

できる。

このような理由から、人間と機械の混在環境下における保護方策のための人体検出センサとして、画像センサが注目されつつある。

### 1.2 映像利用保護装置の国際規格IEC/TR 61496-4

映像利用保護装置の関連規格にIEC/TR 61496-4<sup>6)</sup>がある。この規格は、日本機械工業連合会が提出した「情報産業支援即効型国際標準開発事業 人の安全を守る次世代機械監視技術の標準化、」平成12年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書<sup>5)</sup>に基づいて作成された。

この原案作成過程では、当研究所も密接に関与している。具体的には、IEC/TR 61496-4に規定されたリファレンスパターンを用いた人体検出方式は、当所の提案に基づくものであり、その原点は梅崎<sup>7)</sup>が開発した光学系のユネイト性評価法にある。

リファレンスパターンを用いた画像センサによる人体検出方式の概要をFig. 1に示す。リファレンスパターン方式では、検出区域に敷設した白黒チェッカー模様のリファレンスパターンを画像センサで撮影し、チェッカーパターン交点を検出することで、物体の不在と機能の正常性を同時に確認する。ここで、パターン交点が検出されない領域は、人又は機械によって遮蔽された領域、すなわち人又は機械の存在領域とみなされる。

また、IEC/TR 61496-4には記載されていないが、日機連の報告書<sup>5)</sup>に述べられている可動閉塞空間に基づく

注1) 存在空間とは、監視対象空間において人または機械が占める部分空間を指す。

物体の衝突判定手法についても当所の原案に基づくものである。可動閉塞空間とは、物体の移動速度や方向、物体の非常停止に要する時間等を考慮して存在領域の周囲に形成される動的な安全距離空間の一種である (Fig. 2)。すなわち、この可動閉塞空間とは、「移動体の安全を保障する空間」であり、この定義は作業者の安全ないしは機械の動作を保証するのに最低限守らなければならない空間を指す。従って、保護装置は「移動体の存在空間をさらに包含するような空間」を可動空間として形成でき、全ての方向から来る他の移動体やその他の物体からの安全を確保できることが望ましい、とされている<sup>5)</sup>。衝突判定は、Fig. 2に示すように移動体の可動閉塞空間同士の重複を検出することで行われる。減速領域が接触した場合には、減速が実行され、非常停止領域が接触した際には非常停止が実行される。

## 2. 本研究の実施概要

上述のように、IEC/TR 61496-4は物体の不在と機能の正常性を同時に確認することができるものの、検出区域面へリファレンスパタンを敷設しなければならない、かつ、パタンの汚染や破損などに対する保守が求められる。現実には、このような制約を持つ保護装置の使用は避けられる傾向にあり、また、現場状況と合致しない制約条件の存在は、保護装置の無効化などを招くことも懸念される。

このような理由から、本研究では移動体の存在領域検出および機能の正常性を確認する手段について改めて基礎的検討を行ない、IEC/TR 61496-4とは異なる方式の開発を目指した。以下に本研究の実施概要を示す。

### 2.1 移動体の存在領域検出法の検討

画像処理を用いた移動体検出における安全上の検討を行った。画像処理等の研究では「検出漏れ」および「ゴースト検出 (物体の存在しない箇所に物体の存在を推定すること)」を検出誤りとして一括りに扱うことがあるが、機械安全ではこれらを明確に危険側および安全側として扱わなければならないことを指摘した。

次に、複数台の全方位視覚センサ<sup>8)</sup>を使用した視体積交差法による存在領域検出法を開発した。この手法は、物体の幾何学的特徴 (色や形状など) を使用せずに、センサからみた物体の存在方位角範囲のみから、存在領域を求めるものである。ただし、計算が容易な反面、対象物体がセンサより遠方に存在するほど実体より大きな存在領域が形成される傾向にあるため衝突が予測されやすく、実用上の問題が懸念された。

そこで、センサ配置と対象物体の位置関係に応じた存在領域形状を調べ、その特徴を明らかにすると共に、本

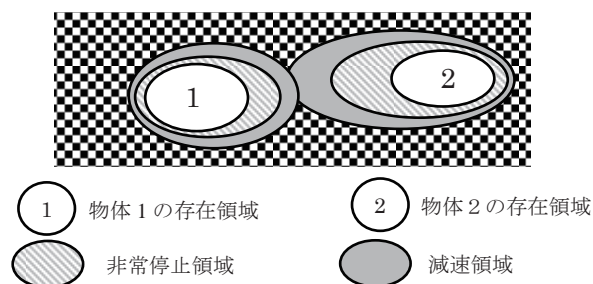


Fig. 2 Collision prediction method based on protected zone.

閉塞空間に基づく衝突予測

手法における適切なセンサ使用台数および配置方法を提案した。

さらに、提案手法の実時間性や衝突回避への適合性を実証するため、センサ四台を用いた試作システムによる実験によりその有効性を確認した。

### 2.2 画像センサの機能正常性確認手段の検討

映像利用保護装置は、故障時に誤って安全情報を生成することのないユニークな性質を持たなければならない、装置をユニークなシステムとするためには、装置を構成するコンポーネント毎にその機能が正常であることが確認できなければならない<sup>7) 9) 10)</sup>。しかしながら、レンズやCCD素子などの受動的なコンポーネントにおいては、正常性を自ら確認することができないため検査信号の外部入力が必要となる。

そこで、IEC/TR 61496-4と同様に、検査信号としてリファレンスパタンを使用し、リファレンスパタンを直接センサに投光する手法を検討し、実験によりその有効性を確認した。

また、ユニーク性を満たすためには、安全情報を抽出する画像処理において、危険側の検出誤りを起こさないことが求められる。そこで、リファレンスパタン光と監視光との重畳光を入力光画像とし、画像内にパタンの存在を確認することで物体の不在を検出する手法について検討し、実験にて重畳光の特徴を分析した。

## 3. 移動体の存在領域検出法の検討

### 3.1 移動体検出における危険側故障と安全側故障

人と機械が混在する人間・機械協調システムにおいて人の安全を確保するためには、三次元空間内の人と機械の存在領域を検知し、接触の可能性を予知して機械を止める機能が要求される。

さらに、存在領域は必ず対象物体を包含し実物体より

Fig. 3 Error consequences.  
物体検出における検出誤り

	正常解 (理想解)	検出誤り		
		安全側		危険側
位置 検出				
	$Obj \cap P \neq \phi$ and $P$ coincide with the centroid of the $Obj$	$Obj \cap P \neq \phi$	(ゴースト検出) $Obj = \phi$ and $P \neq \phi$	$Obj \cap P = \phi$ (検出漏れ) $Obj \neq \phi$ and $P = \phi$
存在 領域 検出				
	$Obj = Zone$	$Obj \cap Zone = Obj$	(ゴースト検出) $Obj = \phi$ and $Zone \neq \phi$	$Obj \cap Zone \neq Obj$ (検出漏れ) $Obj \neq \phi$ and $Zone = \phi$

も小さく見積らないこと、かつ、監視領域内に存在する対象物体を漏れないよう検出することが安全要求上求められる<sup>9)</sup>。その理由は、これらが危険側の誤りに相当するためである。Fig. 3に、移動体の存在領域および位置検出における危険側故障と安全側故障の分類を示す。

一般的に、画像処理を用いた学術的な移動体検出研究では、検出漏れおよびゴースト検出を「検出誤り」として一括りに扱うが、機械安全では危険側故障を起こさないよう画像処理アルゴリズム等を設計しなければならない。

### 3.2 複数台の全方位視覚センサを用いた視体積交差法による移動体の存在領域検出法

本研究では、各全方位画像センサ<sup>9)</sup>が検出した物体の方位角が表す領域を視体積交差法におけるシルエットとして利用し、全シルエットの重複領域を存在領域とする手法を開発した。

この手法の特徴は、物体の幾何学的特徴(色や形状など)を使用せずに、センサからみた物体の存在方位角範囲のみから、存在領域を求める点である。幾何学的特徴を使用しない理由は、物体の形状や色などの特徴量は、物体の移動や回転、照明光量の変化およびオクルージョンによる物体の重なりなどにより変化しやすく、物体固有の不変的な値を得ることが難しいことに因る。すなわち、幾何学的特徴の不安定性が検出漏れの要因となりやすいためである。

以下に、複数台の全方位視覚センサによる存在領域検出法の概要を示す。Fig. 4は全方位視覚センサの撮影画像、Fig. 5は図の画像をパノラマ展開したものである。

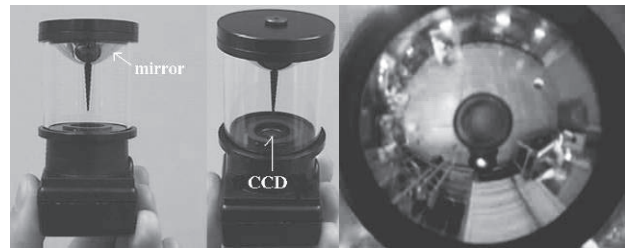


Fig. 4 Omni-directional vision sensor and image taken with it.  
全方位視覚センサとその映像

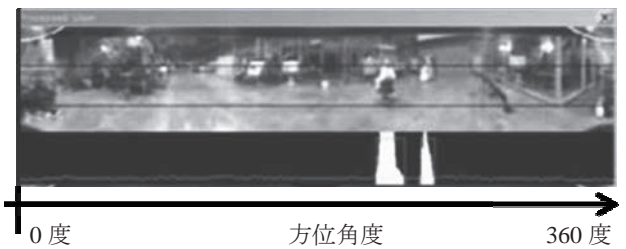


Fig. 5 Panoramic image.  
パノラマ展開画像

パノラマ展開画像 (Fig. 5) から、移動体が存在する領域を背景差分等の処理を用いて取得し、物体の存在方位角範囲を取得する<sup>11)</sup>。

次に、計測領域を解像度 $dx[cm] \times dy[cm]$ に相当するサイズの二次元配列で表現したマップ (Fig. 6) の上に、全方位画像センサの位置を固定し、検出した移動体方位

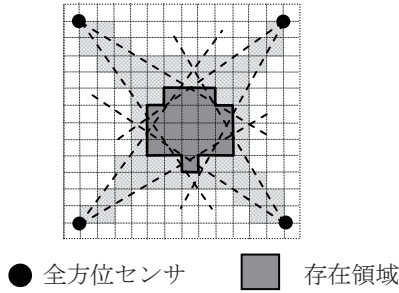


Fig. 6 Detection method of object zone with 2D map.  
2次元マップを用いた存在領域検出

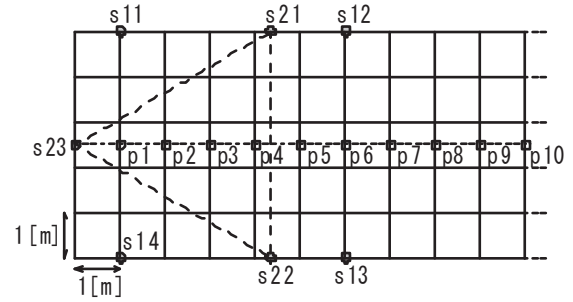


Fig. 7 Positional map of sensors ( $s_{ij}$ ) and test piece ( $p_k$ ) to compare shapes of object zones.  
センサ設置位置( $s_{ij}$ )と試験片設置箇所( $p_k$ )

角領域を描写する。全センサ分の描写を終了した後に描写の重なりが最大(すなわち全センサ台数分)となった領域を移動体の存在領域とする。

この手法は計算が容易な反面、対象物体がセンサより遠方に存在するほど実体より大きな存在領域が形成される傾向があるため、物体間の衝突が予測されやすい等の実用上の問題が懸念される。そこで、センサ配置と対象物体の位置関係に応じた存在領域形状を調べ、その特徴を明らかにすると共に、本手法における適切なセンサ使用台数および配置方法を提案する。

センサの配置形状と存在領域形状の関係をCAD(jw\_cad Ver.5.01)による作図にて検証する。なお、存在領域形状は基本アルゴリズムに基づき算出する<sup>3)</sup>。Fig. 7にセンサの設置位置と試験片位置を、Table 1に使用センサ数と配置位置の組み合わせを示す。なお、Fig. 7ではp11以降の試験片位置は省略しているが、p11以降の試験片位置についても同様にX軸方向へ1m毎に設置した。ここで試験片は直径20cmの円柱を使用した。

Fig. 8はFig. 7の各試験片位置における存在領域の形状を示し、Fig. 8は試験片の面積を1.0とした場合の各試験片位置における存在領域面積である。Case1, Case2およびCase3のセンサ配置のいずれにおいても、センサ間を結ぶ基線で囲まれる領域の外側では、存在領域を形成する外接多角形のある一方向における対角線がセンサ群からの距離に比例して長さを増す。このため、存在領域は正多角形を潰した菱形のような形状となるが、センサ間の内側では存在領域が正多角形の形状に近く、均一的な厚みで基準検知物を包含している。

また、p9またはp10以降の試験片位置における存在領域の面積が線形に上昇していくことがFig. 9よりわかる。特に、存在領域面積が基準検知物面積の三倍を超えるあたりから、隣接する試験片位置における存在領域との干渉が見られる。Fig. 8ではCase1 : p19, Case2 : p18, Case3 : p19の試験片位置における存在領域が、

Table 1 Combination of the placement of sensors.  
センサの配置方法

Case No.	Sensor positions
case 1	s11, s12, s14
case 2	s21, s22, s23
case 3	s11, s12, s13, s14

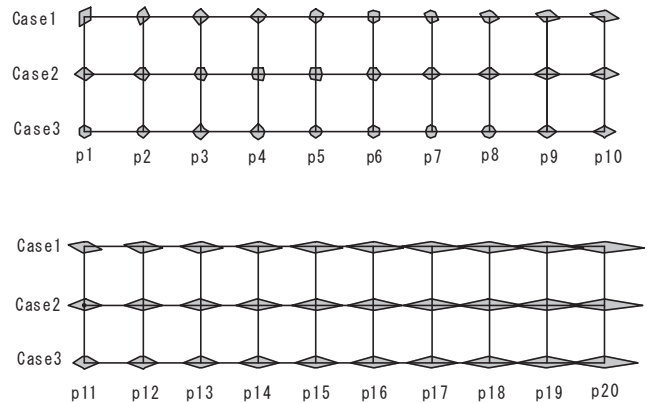


Fig. 8 Detected object zones of test piece which is placed on measurement positions in Fig.7.  
センサおよび試験片配置 (Fig.7) における存在領域算出結果

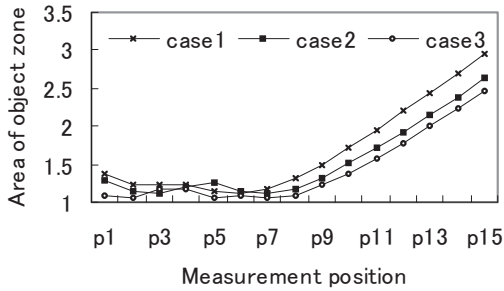


Fig. 9 Area of object zone shown in Fig. 8.  
Fig. 8における存在領域の面積

Case1 : p18, Case2 : p17, Case3 : p18における存在領域と干渉している。この干渉はセンサの光学系とは無関係であり、対象物の大きさおよび形状と、センサとの相対的位置関係により生ずるものである。

検出区域<sup>6)</sup>および許容差域<sup>6)</sup>(注2参照)に対し、存在領域の干渉が生ずる区域を定めることは適切ではない。Fig. 8より、存在領域の干渉はセンサで囲まれた内部領域では生じないため、検出区域はセンサ間基線内部領域とし、許容差域は基線で囲まれた領域の外側かつ干渉の生じない領域、と定めることが適切であることがわかる。また、これより、使用センサ台数は3台が最低数となる。

### 3.3 AGVを使用した存在領域検出および衝突予測実験

四台の全方位画像センサを用いてAGV (Automatic Guided Vehicle : 無人搬送車) とダミー人形の存在領域検出および存在領域に基づく衝突保護を試みた結果を以下に示す。

#### 1) 実験システム構成

Fig. 10は実験時のシステム構成であり、装置は全方位画像センサ四台、四画面ユニット一台、サーバPC一台 (Windows 2000, Pentium IV 3GHz, Memory 1Gbyte), クライアントPC一台 (Windows 2000, Pentium IV 3.6GHz (EMT64T), Memory 2Gbyte), AGV (アシストシンコー製 セルキャリアーエース M3-200), AGVコントローラ (AGVC) により構成される。サーバPCとクライアントPC間はEthernetケーブルにて接続しUDP (User Datagram Protocol) によるデータ通信を行う。

一連のプログラムはサーバPCおよびクライアントPCにて分割処理され、サーバPCでは移動体の存在方位角検出<sup>11)</sup>を、クライアントPCでは簡易的手法による存在領域検出および衝突予測が行われ、AGVCからの問い

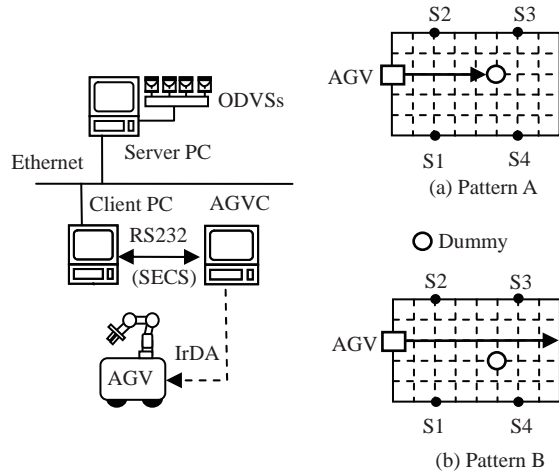


Fig. 10 System configuration.  
実験システム構成

Fig. 11 AGV route and dummy placement.  
AGV走行経路とダミー人形設置箇所

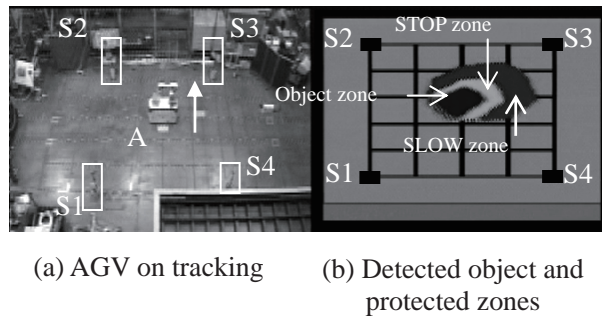


Fig. 12 Example of detected object zone of moving AGV.  
走行中のAGVに対する存在領域および閉塞空間の検出例

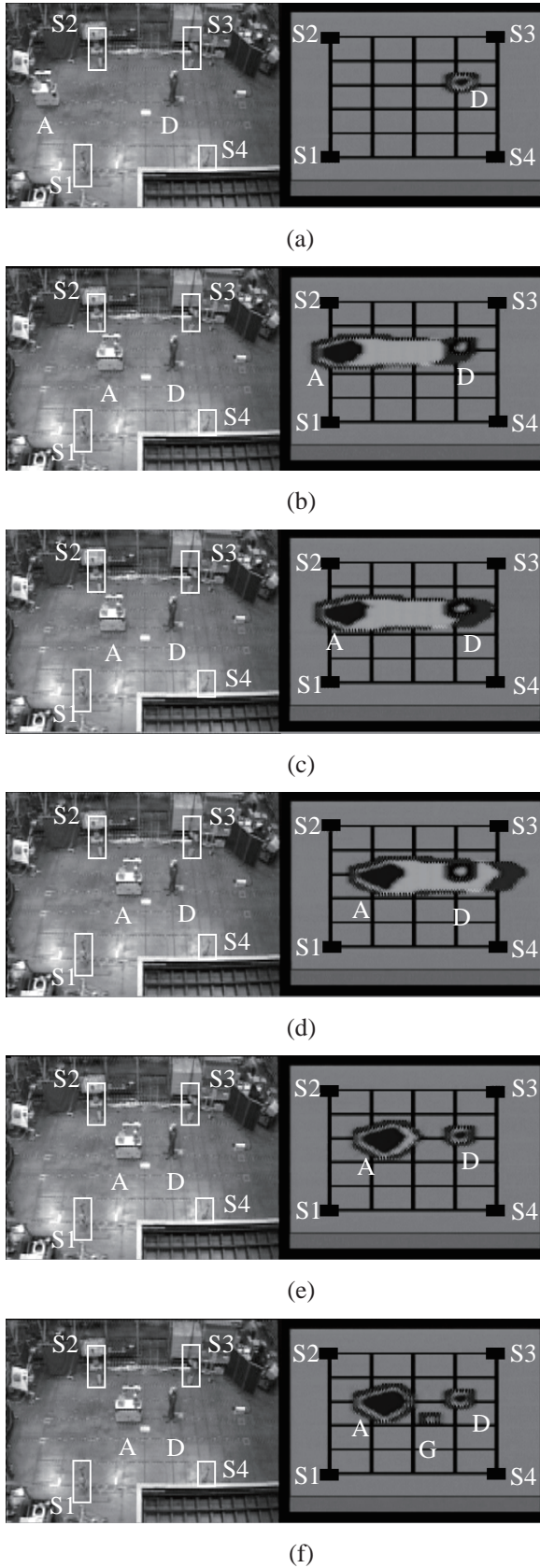
合せに応じてAGVへの制御命令を送信する。

#### 2) 実験方法

AGVの走行経路とダミー人形の設置位置をFig. 11 (a)およびFig. 11 (b)に示す。

Fig. 12に存在領域および閉塞空間の検出例を示す。閉塞空間とは移動体の存在空間領域を包み込むように形成された停止距離層である。閉塞空間は非常停止領域および減速領域から構成され、これらは移動体の移動速度と方向に応じて生成される。移動体間の衝突は、互い

注2) 規定の試験片を検出区域内で十分な確率で検出するために必要な、検出区域の外側の空間区域、検出区域の境界を定めるために付与される。



(s1~s4: センサ, A: AGV, D: ダミー人形. 写真は時系列に沿って表示)

Fig. 13 Collision protection experiment in Pattern A.  
パターンAでの衝突回避実験

の閉塞空間の重複により予測される. Fig. 12 (a)において図内矢印方向へ走行中のAGVの存在領域および閉塞空間の検出結果を示したものがFig. 12 (b)である. Fig. 12 (b)に表示されている3重領域は, 中心より存在領域 (Object zone), 非常停止領域 (STOP zone) および減速領域 (SLOW zone) を表す.

### 3) 衝突予測による保護実験

Fig. 11 (a) 配置に対して衝突回避を試みた結果をFig. 13に, Fig. 11 (b) 配置での結果をFig. 14に示す. 各図は実験開始時からの時系列に沿って並べられている. なお, 本実験では, AGV制御に係る保守の関係で非常停止命令を一時停止命令で代替し実行した.

Fig. 13 (a) ではセンサ間基線内部の検出区域においてダミー人形が検出されており, Fig. 13 (b) では走行中のAGVとダミー人形が検出され, AGVの非常停止領域がダミー人形の減速領域と重複している. Fig. 13 (d) ではAGVに対し非常停止命令 (実際には一時停止) が既に送信されているものの, 通信遅れの関係でまだ停止には至っていない. Fig. 13 (e) は停止直前であり, 閉塞空間の大きさから速度が減少していることがわかる. Fig. 13 (f) ではAGVが停止しており, Fig. 13 (e)と比較して閉塞空間が小さくなっていることがわかる. またFig. 13 (f) ではゴーストが発生している.

次に, Fig. 11 (b) の走行経路における衝突保護実験の結果をFig. 14に示す. ここでは各センサの存在方位角領域検出結果 (screen2) と実時間追跡システム<sup>11)</sup>での検出結果 (screen3) を併せて示す. Fig. 14の各screen3では, 推定された物体位置を黒円で表し, 黒円の外側に物体の移動速度に応じた非常停止領域を表示している. この実験では, Fig. 14 (b)においてセンサS2, S4で, Fig. 14 (c)においてセンサS1, S3, S4でオクルージョンが発生している. Fig. 14 (c)では実時間追跡システム<sup>11)</sup>はAGVとダミー人形を合わせて一つの移動体として検出しているが, 存在領域検出手法では双方の検出に成功している.

## 4. 機能正常性確認手段の検討

映像利用保護装置は, 故障時に誤って安全情報を生成することのないユニタリな性質を持たなければならない. 装置をユニタリなシステムとするためには, 装置を構成するコンポーネント毎にその機能が正常であることが確認できなければならない<sup>7) 9) 10)</sup>.

そこで, 画像センサ1台から成る基本的な映像利用保護装置を対象に, 光学系のユニタリ性評価法<sup>7)</sup>を用いてコンポーネントの機能正常性確認手段を検討する.

4.1 ユネイトなシステムとなるための条件

映像利用保護装置の基本構成をFig. 15のブロック図で表し、各構成要素を $K_J$  ( $J=0\dots5$ )とする。ただし、 $K_0$ は画像センサの設置状態を表し、 $K_1$ は撮像レンズ、 $K_2$ は光学系フィルタ部、 $K_3$ は撮像デバイス部 (CCD)、 $K_4$ は信号処理回路、 $K_5$ は画像処理判定部である。ここで、作業者はFig. 15に示す検出区域に侵入するものとし、作業者が検出区域内に存在していないときを $\bar{H}=1$ 、存在しているときを $\bar{H}=0$ で表す。また、各構成要素が正常であるときを $K_J=1$ 、正常でないときを $K_J=0$ で表し、各構成要素が正常でなくなったときの出力を $K'_J$ で表し、出力ありを1、なしを0とする。さらに、光環境が正常であるときを $L=1$ 、正常でないときを $L=0$ で表し、正常でなくなったときの検知対象物体からの反射光を $L'$ で表し、反射光ありを1、なしを0とすると、装置が出力する運転許可信号は次式で表すことができる<sup>7)</sup>。

$$W = (((((\bar{H} \cdot K_0 \cdot L \vee \bar{K}'_0 \cdot K'_0 \vee \bar{L} \cdot L') \cdot K_1 \vee \bar{K}'_1 \cdot K'_1) \cdot K_2 \vee \bar{K}'_2 \cdot K'_2) \cdot K_3 \vee \bar{K}'_3 \cdot K'_3) \cdot K_4 \vee \bar{K}'_4 \cdot K'_4) \cdot K_5 \vee \bar{K}'_5 \cdot K'_5) \quad (1)$$

ただし、 $W=1$ は機械の運転許可、 $W=0$ は運転停止を意味する。Fig. 15の装置をユネイトなシステムとするには、 $\bar{H} \geq W$ なる関係を実現しなければならない。ユネイトなシステムは次式で表現することができる。

$$W = \bar{H} \cdot L \cdot \prod_{J=0}^5 K_J \quad (2)$$

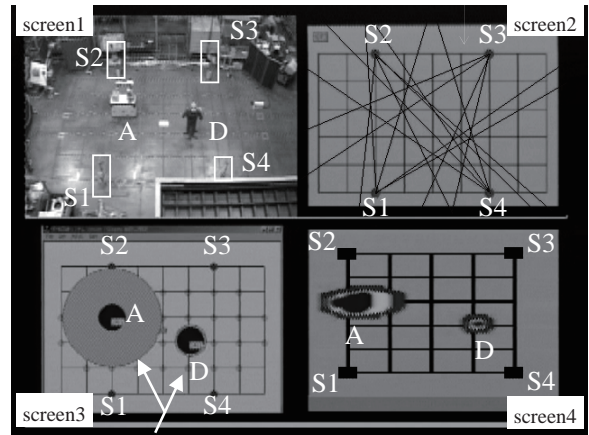
(2) 式は、検出区域内に作業者が存在せず、かつ、光環境が正常で、かつ装置の全てが故障していないときに限って、安全装置が運転許可信号を出力することを示している。すなわち、システムは自らの機能の正常性を確認し、故障が発生していないことを証明しなければならない。

4.2 コンポーネントの機能正常性確認方法

機能の正常性を確認すべき各コンポーネント (Fig. 15 における $L, K_0 \sim K_5$ )のうち、信号処理部 ( $K_4$ ) および画像処理・判定部 ( $K_5$ ) に関しては、多重化や自己診断などの対策技術や機能安全 (IEC61508) 技術などが存在する<sup>7)</sup>。

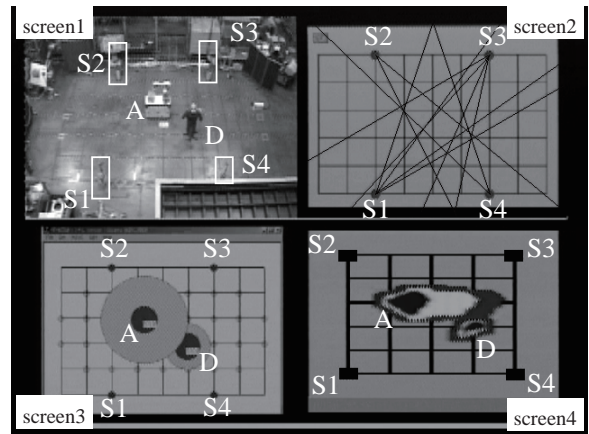
これに対し、光環境 ( $L$ )、カメラ設置状態 ( $K_0$ )、レンズ ( $K_1$ )、光学フィルタ ( $K_2$ )、CCD素子 ( $K_3$ ) においては、自らの正常性を証明できない受動的な要素であるため、センサ外部に設置されたリファレンスパターンを撮影し、その撮影画像を調べることで正常性を判断しなければならない。そこで、以下に正常性確認に求められるリファレンスパターンの構造および設置要件を検討する。

各センサが検出した物体の存在方位角領域

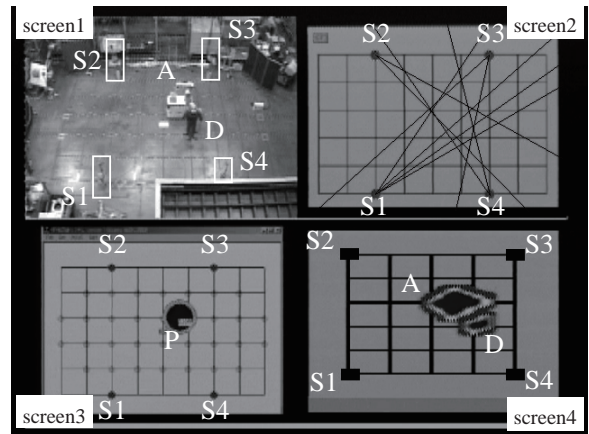


位置推定手法<sup>11)</sup>により求められた物体位置

(a)



(b)



(c)

$s1 \sim s4$ はセンサ、AはAGVおよびDはダミー人形を表す。図(c)でのPはAGVまたはダミー人形の推定位置である。位置推定手法<sup>11)</sup>にて求めた物体位置を黒円中心で表し、物体の移動速度に基づいて推定された減速領域を黒円外側の灰色円で表示している。なお、(a)～(c)の写真は時系列に沿って配置されている。

Fig. 14 Collision protection experiment in Pattern B. パターンBでの衝突回避実験



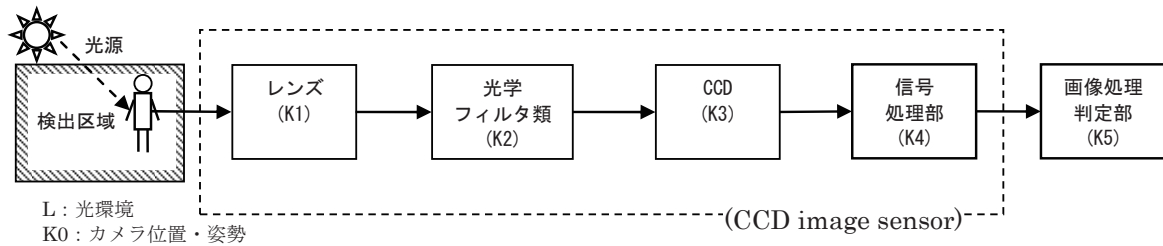


Fig. 15 The block diagram of a vision system.  
画像監視装置のブロック図

まずリファレンスパタンの種類として、検出区域の全面にパターンが存在する全面パターン方式と、部分的にパターンが存在する部分パターン方式の二種を想定する (Fig. 16 参照)。

次に、光環境 (L)、カメラ設置状態 (K0)、レンズ (K1)、光学フィルタ (K2)、CCD素子 (K3) の各々に対し、使用可能なパタンの種類を検討した結果を Table 2 に示す。表に示すように、全面パターンは全ての正常性確認項目 (L、K0~K3) にて適用が可能であるが、部分パターンはその適用が限られる。

一般的にカメラ設置状態 (K0) とレンズ焦点 (K1-1) の較正 (キャリブレーション) では、空間内での三次元座標が既知の箇所に設置した部分パターンを用いるため、正常性確認においても部分パターンの使用が可能である。これに対し、光環境 (L)、レンズ汚れ (K1-2)、光学系フィルタ (K2) および撮像素子 (K3) は、検出区域全体を確認しなければならないため、部分パターンの使用は適さない。

また、パターンの設置要件に関しては、カメラ設置状態 (K0) とレンズ焦点 (K1-1) の正常性確認用パターンは、既に述べたように空間内の定められた位置に設置しなければならない。同様に、光環境 (L) においても、検出区域面上に敷設されている必要がある。これに対し、レンズ汚れ (K1-2)、光学系フィルタ (K2) および撮像素子 (K3) の正常性を確認するパターンは検出区域面上に固定されている必要は必ずしもない。例えば、正常性を確認する時のみパターンをレンズ前面に設置するなどの方法が考えられる。

なお、光環境 (L) の正常性確認において使用するパターン種別 (Fig. 16) は、空間の環境状態 (注3参照) が一定ならば、部分パターンの利用も可能である。

#### 4.3 パターン光時分割照射方式による正常性確認

機能の正常性確認は周期的に実行されなければならない

Fig. 16 Two type of reference patterns for normality confirmation.  
正常性確認に使用するリファレンスパターン二種

	パターン配置例	撮影画像例
全面パターン方式		
	検出区域の全面にパターンが存在	
部分パターン方式		
	検出区域内の一部にパターンが存在	

Table 2 Reference pattern used by self-checking of component.  
コンポーネントが正常性確認に使用するパターン方式

ブロック	要素名	使用可能なパターン方式	
		全面	部分
L	光環境	○	△
K0	カメラ設置状態	○	○
K1	(K1-1) レンズ焦点	○	○
	(K1-2) レンズ汚れ	○	×
K2	光学系フィルタ	○	×
K3	撮像素子	○	×

注3) 日光等の外乱要因のない遮蔽された空間など。

い<sup>12)</sup>。そこで、Fig. 17に示すように、正常性確認区間ではパタン光を直接センサに投光して機能正常性確認を行い、安全確認区間では監視光のみを受光して人の不在(または存在)を確認する方法を提案する。本方式の原理概要をFig. 18に、装置の光学部(カメラおよびレンズ部)をFig. 19に示す(注4参照)。

画像センサにビームスプリッターを取り付け、スプリッターの入力部にそれぞれにシャッターおよびレンズを設置し、二つの入力光路を確保する。この二つの入力経路のうち、一つを監視光の入力経路とし、他方をリファレンス光の入力経路とする。

また、リファレンス光の照射部には、数種のパタン画像の切替え表示が可能な機構を有する投光器としてモニターを使用する。この理由は、映像利用保護装置ではリファレンス光照射装置の故障も検知しなければならないことから、数種のパタン光を順次切替えて照射することで、照射装置の正常性が保たれていることを確認するためである。ここで、照射するリファレンスパタンは2値の白黒チェッカーパタンおよびその反転パターンとした。これにより、正常性確認のためのパタン検知アルゴリズムに、チェッカーパタン交点検出による正常性確認アルゴリズム<sup>5)</sup>が使用できる。

#### 4.4 時分割撮影方式によるパタン交点検出実験

監視光とパタン光を交互に撮影する時分割撮影方式におけるパタン交点検出結果をFig. 20に示す。Fig. 20では、撮影されたパタン画像(Fig. 20左)と検出された交点(Fig. 20中央)の位置関係を比較するため、パタン画像上に検出された交点(白点)を重ねて表示している(Fig. 20右)。この結果より、パタン交点が漏れなく検出されていることがわかる。

また、Fig. 21はパタンの一部を類似パターンにて故意に遮蔽した状態におけるパタン交点検出結果である。遮蔽したパタン部の交点はほぼ検出されていないことがわかる。

提案手法では二種のリファレンスパタンを用いるため、いずれか一つのパタンで検出不可能な不具合を、他方のパタンにて検出できると推測され、類似パターンに対し頑健な特徴を有する。

#### 4.5 安全情報抽出手段の検討

人の不在または存在を表す安全情報を画像から抽出するためには、前処理として撮影画像内から人体などの対

注4) Fig. 18およびFig. 19に示すこれらの装置は、原理確認のため市販の機材にて構成したものである。これら装置の小型化は可能であるとの意見を光学メーカーより頂いている。

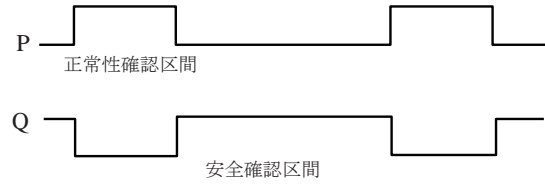


Fig. 17 Safety confirmation area and normality confirmation area.  
安全確認区間と正常性確認区間

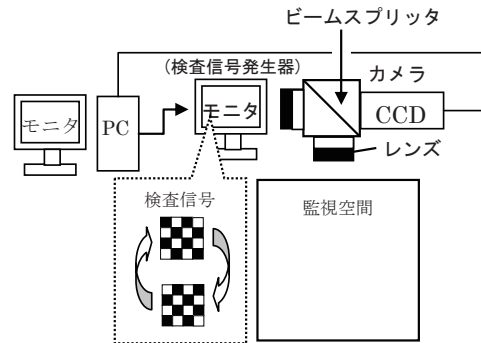
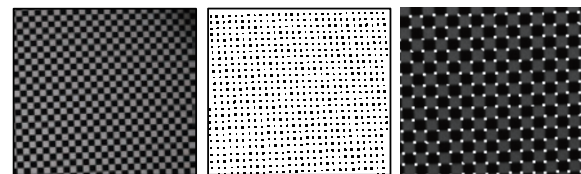


Fig. 18 The mechanism of timesharing irradiation of reference patterns light.  
リファレンスパタン光の時分割照射の仕組み



Fig. 19 Optical component of image sensor with beam splitter.  
ビームスプリッターを使用したカメラ光学部



(左)リファレンスパタン撮影画像(中央)パタン交点検出結果(右)パタン撮影画像と交点検出結果を重ねた画像

Fig. 20 Image of reference pattern taken in by the image sensor and locations of the detected pattern elements (brighter dots).  
リファレンスパタン撮影画像とパタン交点検出結果

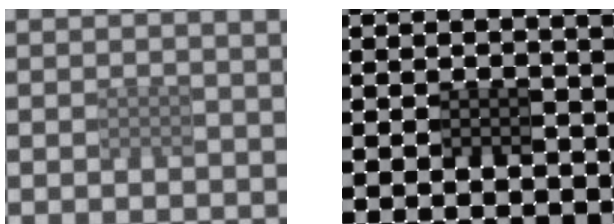


Fig. 21 Photographs of deception test pattern using a similar checked pattern (left) and the camera image with the locations indicated by dots where pattern elements are detected (right).

類似したパタン (左) に対する交点検出結果 (右)

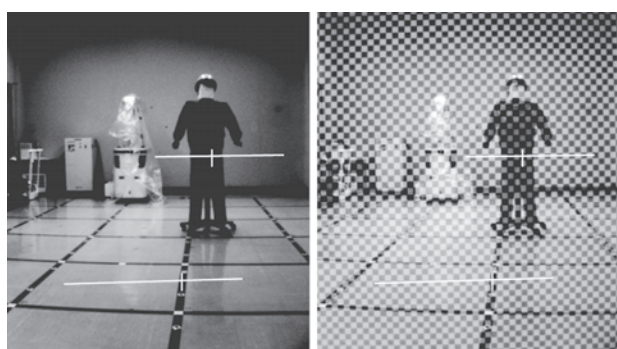


Fig. 22 The camera image of detection zone (left) and the overlay image of detection zone image (observation image) and reference pattern image.

監視光の撮影画像 (左) と、監視光およびリファレンスパタン光の重畳撮影画像 (右)

象物体領域を切り出す必要があり、これには背景差分やフレーム間差分などの差分処理法が存在する。

しかしながら、これらの処理は確実に対象物体領域のみを取り出すことが困難であり、照明環境の変動の影響によって検出失敗の可能性が大きくなることが問題視されている<sup>5)</sup>。

危険側の検出誤りを起こさない画像処理を使用した物体検出手法は、IEC/TR 61496-4におけるリファレンスパタン方式のように、安全状態を高エネルギーで検知する方式である。すなわち、人工的なパタンを画像センサで撮影し、そのパタンの存在が確認されたときに安全であると判断し、物体がパタンを遮蔽するなどしてパタンの存在が確認できない場合には、危険と判断するものである。ただし、前述のように作業現場への大規模なリファレンスパタンの敷設は避けられる傾向にあり、パタンを敷設せずに物体を検出する手法が望まれている。

そこで、監視光にリファレンス光を重ね合わせて撮影し、物体が存在する箇所のパタンが喪失することで、物

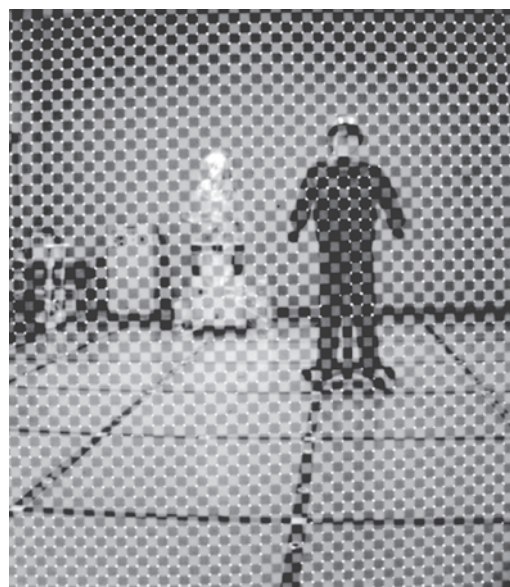


Fig. 23 Locations of the detected pattern elements (brighter dots).

重畳撮影画像に対するパタン交点検出結果

体の存在を検出する方法を試みる。

Fig. 22 (左) は監視光のみを撮影した画像、Fig. 22 (右) は監視光とパタン光をビームスプリッタで重畳させて撮影した画像である。なお、Fig. 22 内の白線は、画素の濃淡値を調べるための計測ラインを示している。

実験は以下の手順で実施した。まず、監視光を遮光し、パタン交点のみを撮影してその交点検出を行い、交点位置を記憶する。次に、監視光とパタン光の重畳撮影画像 (Fig. 22右) に対しパタン交点検出処理を施し、先に記憶した交点位置と同一箇所にはパタン交点を検出された場合に交点ありと判定する。Fig. 22 (右) の画像に対するパタン交点検出結果をFig. 23に示す。

Fig. 23では、監視光画像 (Fig. 22左) 内で壁面や床面など、映像の濃淡変化が緩やかと見られる領域ではパタン交点を検出され、ダミー人形の境界部や床面のガイドテープ上など、濃淡変化が急峻なエッジ成分が含まれるとみられる領域では、パタン交点を検出されていない。この差を明らかにするため、画素の濃淡値変化を計測した結果をFig. 24に示す。

Fig. 24は、監視光画像および重畳撮影画像の同一箇所に対する濃淡変化の違いを示したものである。Fig. 24でのグラフは、白線で示された計測ライン上の各画素における濃淡値を示しており、横軸は計測ライン上の画素位置、縦軸が濃淡値を表す。

グラフにて重畳撮影画像の濃淡値と監視光画像の濃淡値を比較すると、重畳撮影画像における濃淡値は、監視光画像の濃淡値にリファレンスパタン分が加算されたも

のであることがわかる。また、監視光画像において濃淡変化が緩やかな領域では、白黒チェッカーパターンに応じた濃淡値変化が規則的に現れており、パターン交点が検出されている。これに対し、濃淡変化が急峻な領域では、パターン濃淡値の規則性が失われており、パターン交点が検出されていない。

この結果より重畳撮影画像からリファレンスパタンの規則性を抽出し評価することができれば、重畳撮影画像を利用した物体検出が可能であると推察される。

### 5. おわりに

本論文では、人間・機械協調型作業システムの基礎的安全技術に関する研究におけるサブテーマ「環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発」で得られた研究成果をまとめた。得られた結果は次のとおりである。

1) 人間・機械協調システムのための存在領域の検出法として、全方位画像センサの特性を利用した視体積交差法による存在領域検出法について提案し、試験片に対する存在領域検出傾向の分析結果を示すと共に、存在領域検出の実時間性および衝突保護への有効性を実験により示した。また、これらの結果に基づく検討として、電気的検知保護設備に求められる各区域の設定方法、背景差分等の画像処理に係る誤差の考慮、および画像センサを用いた移動体検出に特有の問題であるゴーストターゲットとオクルージョンについて安全上の問題点や対策案についても検討した<sup>3)</sup>。

2) 映像利用保護装置にはユニテ性を満たすことが求められることから、画像センサ1台を使用した基本的な装置に対し、装置を直列接続されたコンポーネントに分解し、各コンポーネントにおいて機能の正常性を確認する手段を考察した。

この結果、受動的なコンポーネントの正常性確認にはリファレンスパタンが必要となることを示し、コンポーネント毎に正常性確認に使用するパタン種類（視野全域を覆うパタンまたは、視野内の数カ所に離散的なパタン）を分類した。

また、現場に全面パタン（視野全域を覆うパタン）を敷設せずに正常性確認を実施するため、ビームスプリッタを使用したパタン光時分割照射による正常性確認手法を提案した。パタン光に白黒チェッカーおよびその反転パタンを使用し、パターン交点検出アルゴリズム<sup>5)</sup>にて正常性確認実験を実施し、その有効性を明らかにした。

3) 画像処理を用いたシステムでは、撮影画像から人体領域を抽出する背景差分処理などの前処理時に危険側故障を生じやすい問題がある。そこで、危険側故障を起こさない物体抽出方法開発のための予備的検討として、リファレンスパタン光と監視光の重畳撮影による物体の領

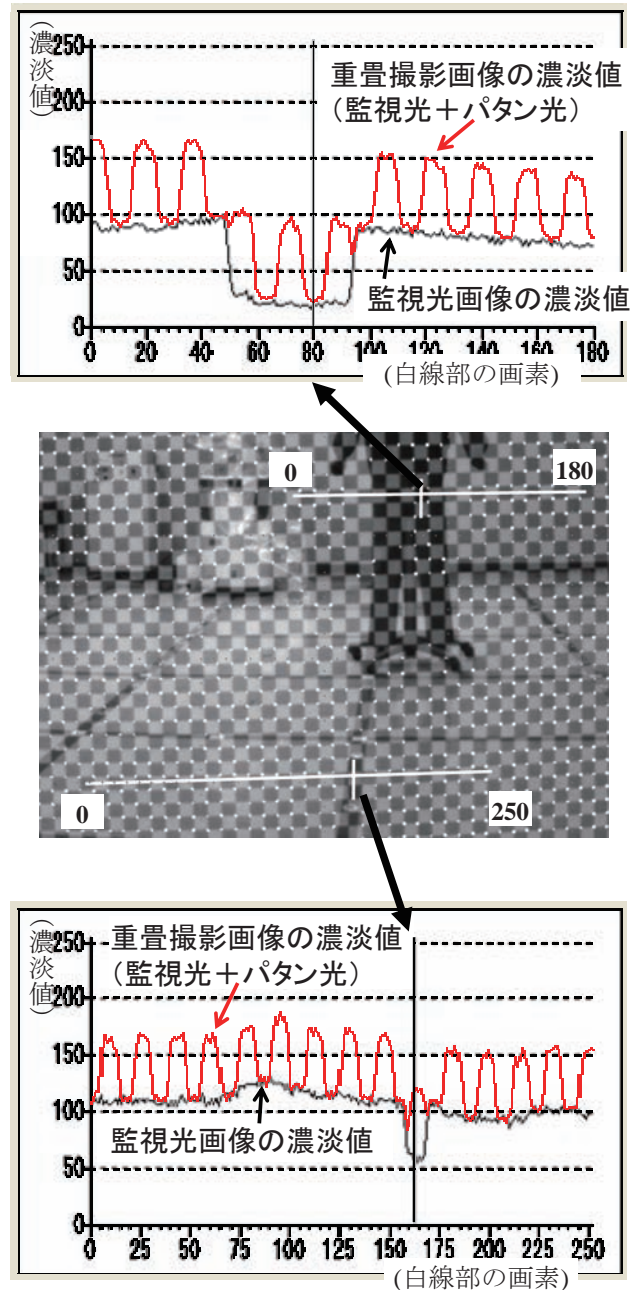


Fig. 24 Pixel value comparison on white line of observation image and overlay image.  
監視光画像と重畳撮影画像の白線部の画素値比較

域抽出を試みた。実験では、監視光の撮影画像において、濃淡変化が緩やかな領域ではパターン交点が検出され、エッジ成分を含む領域（濃淡変化が急峻）ではパターン交点が検出されなかった。この結果より重畳撮影画像からリファレンスパタンの規則性を抽出し評価することができれば、重畳撮影画像を利用した物体領域抽出が可能であると推察される。

なお、映像利用保護装置の国際規格であるIEC/TR 61496-4には、光学系ユネイト性評価法<sup>7)</sup>など当所での成果が反映されている。

今後の課題としては、監視光とリファレンスパタン光の重畳撮影画像を利用した領域抽出法の確立とインテグリティレベルの検証が挙げられる。これらを実現することができれば、リファレンスパタン光の時分割照射による正常性確認と併せて用いることで、映像利用保護装置の新たな方式を国際提案していくことが可能である。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、IEC/TR 61496-4リファレンスパタンによる人体検知方式を提案された当研究所池田博康上席研究員およびリファレンスパタンによる光学系ユネイト性評価法を開発された当研究所梅崎重夫機械システム安全研究グループ長より多大な助言をいただきました。深く感謝いたします。

また、「全方位視覚センサを用いた実時間人間追跡システム<sup>11)</sup>」のプログラムをご提供くださいました大阪大学石黒浩教授、プログラム開発の助言をくださいました産業技術総合研究所西村拓一情報技術研究部門実世界指向インタラクショングループ長、実験に多大なご協力を頂いた当研究所呂健主任研究員および元科学技術振興機構重点支援研究員石原浩二氏に心から感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 濱島京子, 石原浩二, 呂健, “全方位視覚センサを用いた移動体追跡と衝突予測,” 日本機械学会 第12回交通・物流部門大会講演論文集, pp.259-262, 2003.
- 2) 濱島京子, 呂健, 石原浩二, “全方位視覚センサによる移動体存在領域検出手法”, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.33 (2005), pp.25-41.
- 3) 濱島京子, 呂健, 石原浩二, “人間・機械協調システムを対象とした全方位画像センサを用いた視体積交差法による移動体存在領域検出のための基礎的解析”, 日本機械学会論文集, C編, Vol.74, No.738, pp.409-182, 2008.
- 4) T. Bommer, “Vision Based Protective Devices (VBPD) – A vision becomes reality,” Proc. And CD-ROM, 3rd Int. Conf. Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Session7.1, pp.11-16, 2003.
- 5) (社)日本機械工業連合会, “情報産業支援即効型国際標準開発事業 人の安全を守る次世代機械監視技

術の標準化,”平成12年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書,平成13年3月

- 6) IEC/TR 61496-4 Ed. 1.0:2007 (b), “Safety of machinery - Electro-sensitive protective equipment - Part 4 : Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD)”, 2007-07-10.
- 7) 梅崎重夫, “広大領域内の安全確認を目的としたレーザ式安全装置の開発と評価”, 産業安全研究所特別研究報告 NIIS - SRR - No.24 (2002), pp.43-50.
- 8) H. Ishiguro, “Development of low - cost compact omni - directional vision sensors and their applications,” Proc. Int. Conf. Information Systems, Analysis and Synthesis, pp.433-439, 1998.
- 9) 杉本, 蓬原, ほか6名, “安全確認形安全の基本構造”, 日本機械学会論文誌, C編, Vol.54, No.505, pp.2284 - 2292, 1988.
- 10) 杉本旭, 蓬原弘一, “安全の原理”, 日本機械学会論文集, C編, Vol.56, No.530, pp.2061-2069, 1990.
- 11) 十河卓司, 石黒浩, Mohan M. Trivedi, “複数の全方位視覚センサによる実時間人間追跡システム,” 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J83-DII, No.12, pp.2567-2577, 2000.
- 12) JIS B9704-1 : 2006, “機械類の安全性-電気的検知保護設備 - 第1部・一般的要求事項および試験”, 日本規格協会.

(平成20年11月13日受理)