

4. 全方位視覚センサによる移動体存在領域検出手法*

濱島京子**, 呂健**, 石原浩二***

4. Object Zone Detection Method with Omni-directional Vision Sensors*

by Kyoko HAMAJIMA**, Jian LU** and Koji ISHIHARA ***

Abstract; The purpose of this research is to develop the camera monitoring device which is applicable to safety protection devices used in mechanical safety, especially in human-machine cooperation systems. This kind of device is usually called Vision Based Protective Devices (VBPD). By using VBPD, the machines are stopped while people intrude the dangerous area of the machine monitored by video cameras.

In this paper, the method for detecting presence area by using multiple omni-directional vision sensors is proposed for VBPD, and its applicability to collision estimation is examined by simulation. It is shown that the method robustly implements the presence-area detection even when occlusion occurs. In addition, an experiment system is constructed by using four omni-directional vision sensors, the demonstration for presence-area detection and collision estimation is performed on AGV. From the demonstration, it is shown that tracking moving-objects and collision estimation in real-time are possible. Furthermore, it is assured that presence-area is detected without missing any objects, even when occlusion occurs.

The results of this paper can be concluded as the follows:

- (1) The detected presence-area contains the moving-objects without error, but the true area of the moving-object is larger than the real area.
- (2) When more than 3 omni-directional vision sensors are used, comparing with the inner areas enclosed by sensors, the outer area is likely to be detected as extra larger area. If this is the problem, the monitoring area had better to be the inner areas.
- (3) In a simulation experiment in which four omni-directional vision sensors are set at the vertexes of a 5m x 4m rectangular, a cylinder object with diameter of 30cm can be detected as a presence-area with up to three times of the area, in the case that the method for presence-area detection is a simplex one for the purpose of real-time applications.
- (4) Although the presence-area detection is robust to occlusion, the missing is unavoidable if multiple objects are crowded together such that there seems to be one object by all cameras.
- (5) Ghosts in the detection results are unavoidable by the proposed method. There is basically no solution for the ghost problem, therefore it is necessary to supplement with the extra sensors corresponding to the monitored objects. In addition, there is also the solution in which a result presence-area smaller than a threshold is thought to be a ghost and is deleted. However it is necessary for this solution to set the threshold smaller than presence-areas of human-bodies.

Keywords; Camera monitoring system, Image processing, Safety, Omni-directional vision sensor.

* 第12回日本機械学会 交通・物流部門大会(2003年12月), 第34回安全工学研究発表会(2004年7月)において一部発表した^{6),7)}。

** 境界領域・人間科学安全研究グループ Interdisciplinary and Human Science Safety Research Group

*** 科学技術振興機構 重点研究支援協力員 Supporting Staff for Priority Research, Japan Science and Technology Agency

1. はじめに

本研究では、機械安全の分野、特に人間・機械協調型作業システムにおいて安全保護装置として使用可能な画像監視装置の開発を目指している。画像監視装置は、一般的には「画像を用いた安全保護装置 (Vision Based Protective Devices: VBPD)」と呼ばれる^{1),2)}。VBPDはトリップ装置であり、ビデオカメラを使って作業現場を監視し、機械類の危険区域内に要員が侵入したとき、機械類を停止させるものである。

人間・機械協調型作業システムでは、運転中の機械の近辺で人間が作業を行うために、機械と作業者の状態によって危険区域が動的に変化する。このため、従来の固定ガード類による「分離と停止」に基づく安全方策は適用しにくい。代わりに、機械と作業者の位置関係を安全保護装置が把握し、接触または衝突を予測して機械を止める、という安全方策が必要となる。

画像監視装置は近年の"フレキシブルな生産方式"への適応が高いと見られており、実現への期待が高まっている。画像処理による作業者と生産財の識別など、従来の安全装置にはない機能の実現が可能と見られることから、作業者とロボットが協調・共同して作業を実行するような"人間・機械協調型作業システム"において画像監視装置が有効であると考えられている²⁾。

VBPDの多数の要求事項の中で、特に重要なものは画像から物体を検出する機能である。画像処理やパタン認識に関する研究では、検出性能は確率で表現される。実時間処理 (30frames/secに近い値) において、1秒間内に数フレーム程度の検出漏れ (移動体を見失う状況) が生じて問題とされないことが多い。しかし安全上はこうした検出漏れは認められない。

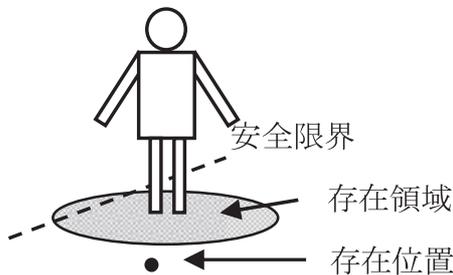


Fig. 1 Failure in detection of object.
位置検出における検出漏れ

本論文では、複数台の全方位視覚センサを用いた検出漏れに頑健な移動体検出手法について述べる。ここでは、全方位視覚センサの方位角検知特性を利用した移動体の存在領域検出手法を提案する。さらに、シミュレーションによりその特徴と有効性を示す。また、試作した監視装置を用いて走行AGVの存在領域検出、衝突予測に基づく一時停止のデモンストレーションを示す。

2. 画像処理を用いた移動体検出手法における安全上の諸問題

移動体検出手法に画像処理および画像認識技術を用いる際には、いくつかの考慮すべき点がある。ここでは特に、(1) 移動体の存在位置検出、(2) 移動体のロストとゴースト検出、(3) オクルージョン問題、の3点について考察する。

2.1 存在位置検出法における検出漏れ

危険状態において機械を停止させるためには、人体または人体の一部が安全限界を超えたことを確実に検出する必要がある。

検出漏れとは「人または人体の一部が安全限界を超えていること」を監視装置が検出せず、危険状態を安全状態と誤判別している状態を指す。

画像処理分野での移動体追跡手法に、三角測量の原理を用いて存在位置 (x,y) を検出するものがあるが、この手法にはFig.1に示すような検出漏れを招く危険性が存在する。これは存在位置が人体の1点のみを表現しており、人体全体を検出していないことに因る。また、誤差等の影響で存在位置そのものが人体外部に推定されることも起こりうる。

このため、人と機械の混在環境において、人と機械の接触の可能性を予知して機械を止めるためには、3次元空間内の人と機械の存在領域^{註1)}を検出する必要がある¹⁾。

2.2 移動体のロストとゴーストの検出

移動体の存在検出に誤りを生じている状況として、実際には存在している移動体を見失うという「移動体のロスト」と、存在していない移動体を検出してしまふ「ゴースト検出」の2種がある。

これらは安全以外の分野では「検出誤り」としてまとめて取り扱われる事もあるが、安全分野では明確に区別しなければならない。

註1) 移動体を包含する空間 (移動体が占める2次元領域または3次元空間) をいう。

Table 1 Missing object and ghost detection.
移動体のロストとゴースト検出

名称	誤検出の内容	環境の状態	システムの認識結果
移動体のロスト	実在している移動体を検出していない状況	危険	安全
ゴーストの検出	実在していない移動体を検出している状況	安全	危険

その理由は、「移動体のロスト」は検出漏れの要因となるため危険だが、「ゴースト検出」は安全状態を危険とみなすため、安全上問題とならないためである。

このため、移動体検出手法にはロストを起こさないアルゴリズムが求められる。

2.3 オクルージョン問題

カメラを用いて複数の移動体を撮影する場合、オクルージョン問題が必ず発生する。オクルージョンとは、カメラと物体の位置関係により物体の見え方が変化する現象であり、自己オクルージョンと相互オクルージョンの2種が存在する。

自己オクルージョンとは、カメラに対する物体の姿勢変化により、映像内の物体形状が変化する事をいう。一方、相互オクルージョンとは、一方の物体が他方の物体を遮蔽する事（例えば、手前の物体により後方の物体が隠されて映らない状況）をいう。

このような性質から、オクルージョンは複数カメラ間での物体の対応付け^(注2)を困難にするという特徴がある。これは、対応付けの処理が画像間で形状や色の類似度が高い箇所を探すことで行われるためである。対応付けは物体を特定していく作業のため、不正確な対応付けは、検出漏れの要因となる。

このように、オクルージョンに頑健な検出手法の考案が必要である。対応付けの際、オクルージョンの影響を受けやすい物体の幾何学特徴（形状や色、等）が不要であるような方法が望ましいと思われる。

3. 全方位センサを用いた移動体の存在領域検出手法

全方位センサを用いて、存在領域（移動体を包含

注2 個々のカメラ映像内で、同一物体上の同一箇所を探すこと。



Fig. 2 Omni-directional vision sensor and image taken with it.
全方位視覚センサとその映像

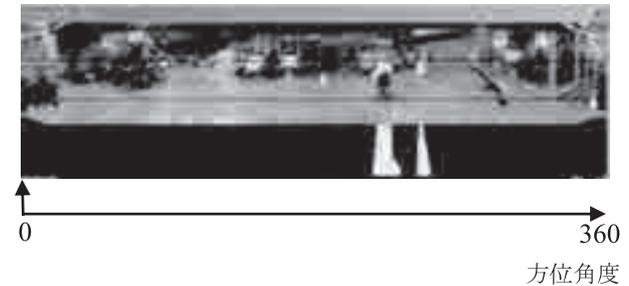


Fig. 3 Panoramic image.
パノラマ展開画像

する2次元領域)を検出するについて提案する。

全方位センサの特長を生かし、複数台の全方位センサで移動体の存在方位角を検出し、各全方位センサが検出した方位角を組み合わせることで存在領域を決めるものである。

3.1 全方位視覚センサの特徴

全方位視覚センサ³⁾の外観とその全方位映像をFig.2に示す。全方位視覚センサは周囲360度の検出範囲を持つ視覚センサであり、上部に取り付けられた円筒内の全方位ミラーに周囲の風景を反射させ、上向きに取り付けられたカメラよりその映像を撮影する。周囲360度の映像を一度に撮影可能であるため、従来の視覚センサに比べ非常に広い視野を確保することができる。

全方位映像を画像処理することにより、Fig.3に示すように移動体の存在方位角を検出することが可能である⁴⁾。

3.2 全方位センサを用いた移動体追跡システム例

全方位センサを用いた移動体追跡システムとして、実時間人間追跡システム⁴⁾がある。この追跡システムは、全方位映像から得られる移動体の方位角情報のみに基づいた、ステレオ視による位置推定が

可能であり、かつN眼ステレオ視によって、色や形状等の特徴を用いずに統計的に物体の対応問題を解決し、複数の物体の位置 (x,y) 推定と追跡を実現できるという特徴を有する⁴⁾。

追跡システム⁴⁾は追跡対象が人間のみであり、また位置 (x,y) を検出することから、本研究が対象としている「機械と人間の混在環境において存在空間を検出する監視装置」とは設計理念が異なる。特に、処理の実時間化のために移動体を円でモデル化し、計算量を抑制する工夫が行われているため、人間と機械のように大きさが異なる移動体が混在する状況においては、位置推定精度が低下する恐れがある。

このように、本研究が目的としている監視装置と、追跡システム⁴⁾とは目的等において大きな相違があるが、全方位センサの方位角検知特性を利用するという共通部分があることから、ハードウェアの構成方法や画像処理手法など、いくつかの手法を参考にしている。

3.3 他の存在空間検出法について

画像監視装置用に開発された存在領域検出手法として、チェッカーパターン方式がある⁵⁾。床面にリファレンスとしてチェッカーパターン敷設し、あらかじめ人や機械が居ない状態で、床面のみを画像撮影し、チェッカーパターンの交点位置を記録しておく。監視中はカメラにて同一の空間を撮影し、移動体がチェッカーパターン上を移動することで消失したパターンの交点位置を検知し、物体の領域を検出するものである⁵⁾。

この手法は、監視領域の正常性および機能の正常性の両方をチェッカーパターンによって保証できる優れた方式であるが、監視空間内にパターンが設置できない状況等においては適用が難しい。

これに対し、全方位センサを用いた存在空間検出法では監視空間内へのパターン敷設を必要としないため、実環境へ適用する際の柔軟性が高い。ただし、正常性確認のための処理を別途実装する必要がある。

また、全方位センサは視野が広いため、他方式のカメラセンサと比べて、より少ない台数で監視空間をカバーしやすい。

存在空間生成技術は、基本的には物体の3次元形状復元手法であり、様々な手法が研究されている。ただし、実時間性やコスト等の問題から画像監視装置として利用できるものは限られてくるのが現状である⁵⁾。

本研究では、全方位センサの視野特性を活かすことで、実時間性およびコストの問題の解決を試みて

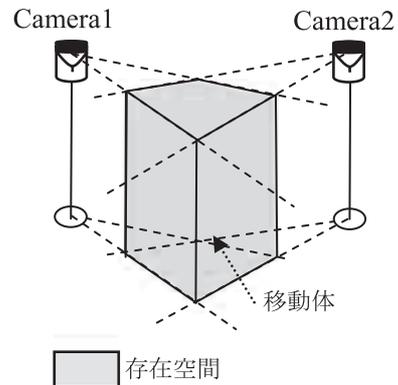


Fig. 4 Object zone of a cylindrical object (3D).
円筒物体の存在空間

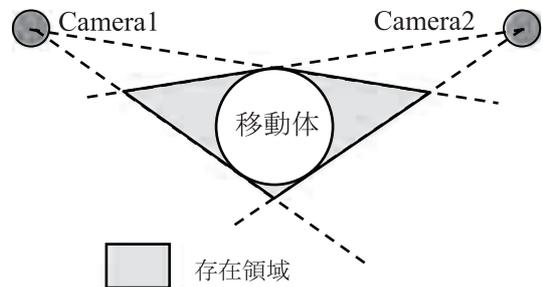


Fig. 5 Object zone of a cylindrical object (2D).
円筒物体の存在領域

いる。

3.4 全方位センサによる存在領域検出法

全方位センサのもつ方位角検出能力を利用して、2次元の存在領域を検出する手法について述べる。

まず、2台の全方位センサを用いて、基準円筒形物体を包含する3次元存在空間の例をFig.4に、2次元の存在領域の例をFig.5に示す。Fig.4は円筒形物体の側面上方から見た状況であり、Fig.5は円筒形物体の上方からみた図となる。

Fig.4に示すように、移動体を包含する存在空間は、Fig.5に示す存在領域を鉛直上向きに掃引した形状となるため、移動体の衝突を予測するには、Fig.5に示す存在領域の形状で十分である。

存在領域検出手法の概略を以下に述べる。まず、文献⁴⁾の手法を用いて、全方位センサの撮影映像 (Fig.2) をパノラマ展開した画像 (Fig.3) から、移動体の存在方位角を取得する。ここで、方位角を2次元平面に描写した領域を方位角領域とする (Fig.6)。

次に、複数台の全方位センサが検知した方位角領域の論理積(AND)を求め、移動体の存在領域とする。以下に存在領域の数学的定義を示す。

各全方位センサが検知した存在方位角領域の集合を R_{ck} とする。ここで、添字 c は全方位センサの番号を、添字 k は検知された存在方位角領域に一意にふられた番号とする。全方位センサNo. 1がFig.6に示すように n 個の存在方位角領域を検知した場合、カメラNo. 1の存在方位角領域集合は以下のように表現される。

$$R_{1i} = \{R_{1i_1}, R_{1i_2}, \dots, R_{1i_n}\} \quad (i \in I) \quad (1)$$

1台の全方位カメラが検知する存在方位角領域は移動体と1対1に対応するとは限らない。Fig.6に示すようにオクルージョン発生時には、2つの移動体に対して存在方位角領域が1つのみ検知されることもある。

ただし、1台の全方位カメラが検知した存在方位角領域は互いに重複することはない(式(2))。

$$R_{1i} \cap R_{1j} \cap \dots \cap R_{1n} = \emptyset \quad (2)$$

全方位カメラを M 台利用した場合における存在領域集合は以下のように定義される。

$$R_{cs} = R_{1i} \cap R_{2j} \cap \dots \cap R_{ck} \quad (3)$$

$(c \leq M \text{ および } i, j, k \in I)$

すなわち、移動体の存在領域とは、各センサが検知した存在方位角領域を監視空間の床面に描写した際に、センサ全数分の方位角領域が重複する部分となる。例として、4台のカメラを用いた場合の存

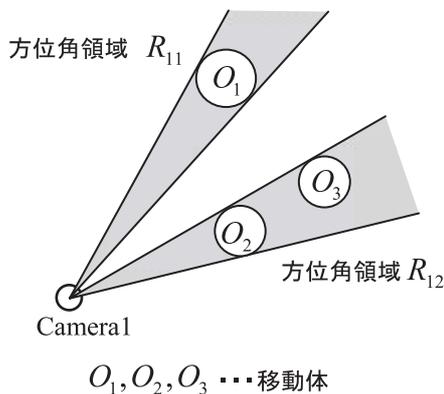


Fig. 6 Detected object 2-D zones by its azimuth Angles.
検出された方位角領域

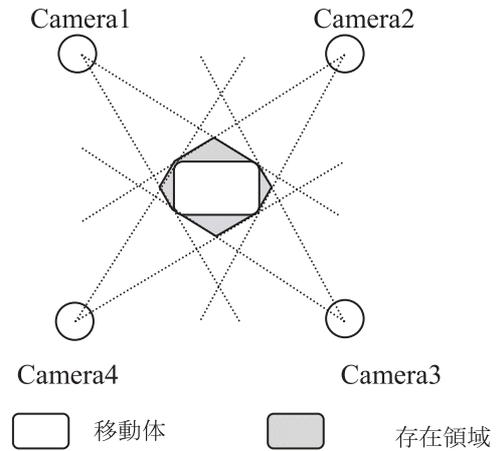


Fig. 7 Detected object zone with four sensors.
センサ4台を用いた場合の存在領域

在領域例をFig.7に示す。

3.5 存在領域の特徴

全方位視覚センサを用いて検出される存在領域は、物体形状を正確には反映していない。存在領域の形状はセンサ台数に応じた凸多角形となり、センサを2台以上使用する場合は以下の式を満たす。Fig.7のように4台のカメラを用いて存在領域を検出する場合、存在領域の頂点数は最大で8個となる。

$$\text{存在領域の頂点数} \leq \text{カメラ台数} \times 2$$

(ただし、カメラ台数 ≥ 2)

このように、存在領域の形状は移動体形状を正確に反映するものではない。

また、使用するセンサ台数が少ないほど、存在領域を形成する凸多角形の頂点数が減少し、簡素な形状となるため、存在領域は移動体を冗長に包含する領域となる。

3.5.1 基準円筒物体に対する存在領域の理論値

Fig.8に、全方位センサを4台使用して直径30cmの円筒形物体に対する存在領域の計算結果を示す。ここで、4台の全方位センサは縦5[m]×横4[m]の矩形領域の各頂点に配置するものとする。

存在領域の形状はCADソフト(Jw_cad Ver. 4.05a)を用いて算出した。また、円筒直径の値はEN547-3:1996の胴体部の厚み(5)を基に決定した。

Fig.8に示すように、センサで囲まれた領域の内側

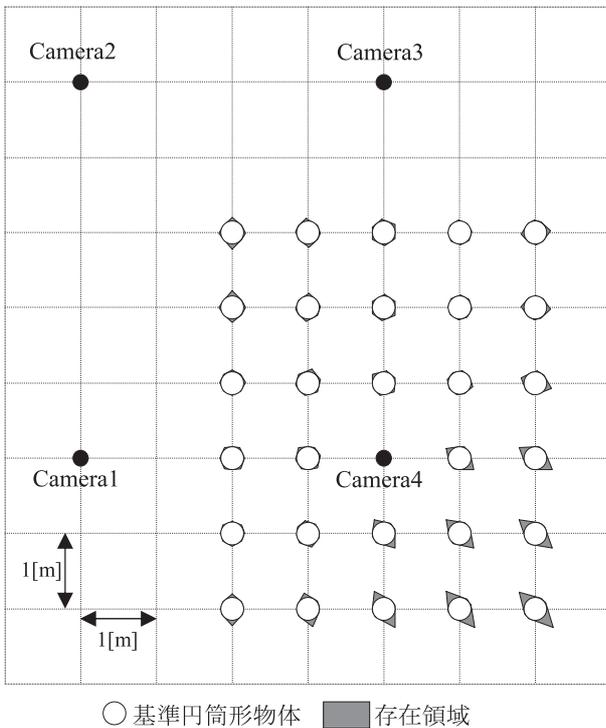


Fig. 8 Theoretical figure of object zone for cylindrical object.
円筒物体に対する存在領域の理論値

においては、円筒形状に近い形で存在領域が生成されているが、外側においてはセンサから遠方に位置する場合ほど冗長な存在領域が生成されている。

この結果から、移動体の最小包含領域に近い存在領域を得るためには、センサで囲まれた内側領域を監視対象領域としたほうがよいことがわかる。

3.5.2 オクルージョンに対する頑健性

三角測量による位置計測手法と比較した場合、存在領域検出法はオクルージョンに対する頑健性が強いという特徴を有する。Fig.9に、オクルージョン発生時の例を示す。

存在領域は移動体を包含するため、存在領域を基にした衝突予測ではFig.1に示したような検出漏れを起こさない。

これに対し、三角測量による位置計測手法の場合には、位置の推定精度が低下しやすく、検出漏れを起こしやすい。

3.5.3 ゴーストの発生

本手法には、複数の移動体が存在する状況におい

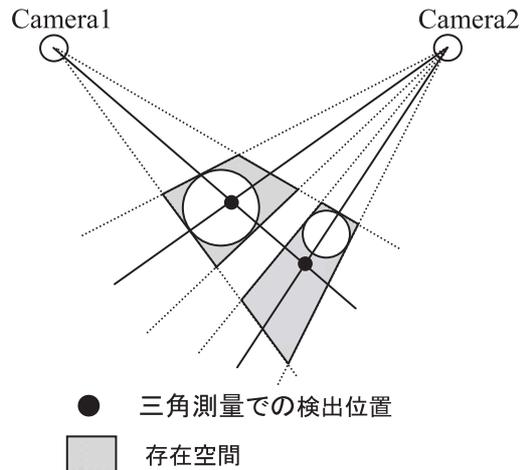


Fig. 9 Detected object zones and positions under occlusion state.
オクルージョン発生時における存在領域と存在位置の違い

てゴーストが検出されやすいという特徴がある。ゴースト検出例をFig.10に示す。ここで、Fig.10のセンサ配置および基準円筒物体半径は、Fig.8と同じである。

Fig.10では、円筒物体間の距離を1 [m] とした場合に基準円筒物体よりも小さな形状のゴースト領域が検出されている。

ゴースト検出に対する根本的な解決方法は存在しない。これはゴーストの出現が移動体群とカメラの位置関係に因るため、出現パターンを特定することが難しいためである。この問題に対し、例えば閾値以下の面積を持つ存在領域をゴーストとみなして削除する、等の対策は可能であるが、安全面での十分な考慮が必要である。

4. 画像監視装置の試作

全方位センサを用いた存在領域検出法による監視装置を試作し、AGV稼動域に適用した。以下にその詳細を述べる。

4.1 ハードウェア構成

監視装置のハードウェア構成をFig.11に示す。装置は全方位センサ (ODVSs) 4台、4画面ユニット1台、サーバPC1台 (Windows2000, PentiumIV 3GHz, Memory 1Gbyte)、クライアントPC1台 (Windows2000, PentiumIV 3.6GHz (EMT64T), Memory 2Gbyte)、AGV

(アシストシンコー製, セルキャリアエースM3-200), AGVコントローラ (AGVC) により構成されている。サーバPC・クライアントPC間はUDPプロトコルを用いたネットワークで接続されており, 全方位センサの増設に対応可能である。ただし現時点ではサーバPC, クライアントPC共に1台のみを使用している。

4.2 プログラム処理の流れ

監視のための一連のプログラムは, サーバPC, クライアントPCで分割処理される。サーバPCでは方位角検出を行い, クライアントPCでは存在領域検出および衝突予測を行う。

まず, サーバPCにおいて背景差分処理を用いて4台の全方位センサ映像から移動体方位角を検出する。4画面ユニットを用いたサーバPCへの映像入力法および画像処理による移動体方位角検出処理の詳細については文献4) に述べられている。

次に, UDPプロトコルによるネットワーク通信を用いて検出した移動体方位角をクライアントPCへ送信する。UDPプロトコルは速度重視の通信方式であり, データの受信ロスが生じることがある。このため, サーバが送出した移動体方位角の全てがクライアントPCで処理されるという保障はない。クライアントPCは受信したデータに対してのみ, 処理を行なうものとする。

クライアントPCでは受信した方位角から移動体の存在領域を検出し, 4.2.2に述べる閉塞空間 (1) を用いて衝突を予測する。さらに予測結果に基づいてAGVの走行制御命令を決定する。

クライアントPCで決定されたAGVの走行制御命令は, AGVCからの問合せに応じて送信される。問合せ間隔は500 [msec] であり, SECSプロトコルを用いて通信を行なう。

4.2.1 クライアントPCにおける存在領域検出

幾何学的手法による存在領域検出は, 方位角領域の交点計算や, 存在領域を形成する点列の探索が必要となり, 計算量が多く実時間性が低い。そこで, こうした幾何学計算を必要としない簡略化手法により存在領域を検出する。

まず, 計測領域を解像度 $dx [cm] \times dy [cm]$ に相当するサイズの2次元配列で表現する (Fig.12)。この2次元配列上に全方位センサ位置を固定し, サーバから受信した移動体方位角領域を描写する。全センサ分の描写を終了した後, 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

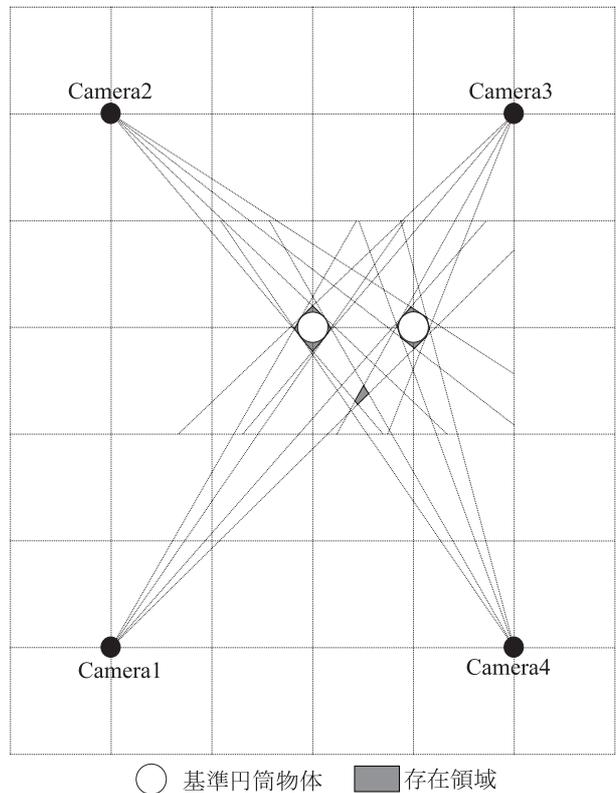


Fig. 10 Detected ghost as an object zone. ゴースト検出例

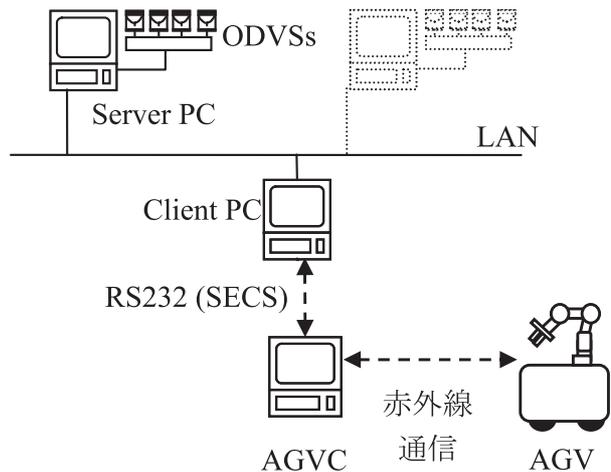


Fig. 11 System configuration. 試作システム構成

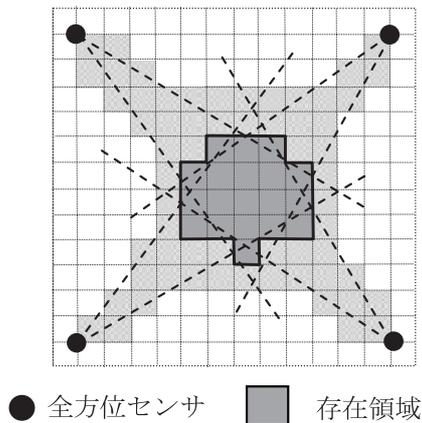


Fig. 12 Detection method of object zone with 2D map.
2次元マップを用いた存在領域検出

存在領域とする。

4.2.2 閉塞空間による衝突予測

衝突予測には可動閉塞空間を用いた衝突判定アルゴリズムを用いる。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のことである。閉塞空間の構成をFig.13(左)に示す。

閉塞空間は、移動体存在領域、一時停止領域、徐行領域の3層で構成される。一時停止領域と徐行領域は移動体の移動速度と方向に応じて生成され、速度が増すほど進行方向に大きく伸びた領域となる。

閉塞空間の大きさの上限は、移動体の停止に要する時間や通信遅れ等を考慮して設定する。

衝突予測は、個々の移動体の閉塞空間の重複を調べることにより行う。Fig.13(右)にその様子を示す。例えば移動体Aの閉塞空間が移動体Bの閉塞空間と重複するかどうかを調べ、移動体Aの一時停止領域が移動体Bの徐行空間と重複していた場合には、移動体Aを停止させる、という制御を行う。

4.3 シミュレーションによるクライアントの検証

存在領域、閉塞空間および衝突予測の各機能に対するシミュレーション結果を示す。シミュレーション時の条件は以下の通りである。

- ・ 全方位センサを4台使用し、縦5[M]×横4[M]の矩形領域の各頂点に設置する。
- ・ 対象計測領域は、カメラ間を結ぶ基線で囲まれた内部領域とする (Fig.14)。

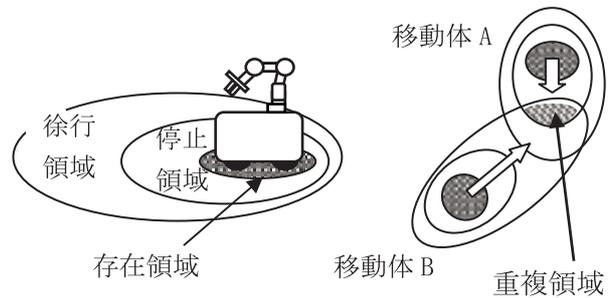


Fig. 13 Protected zone of object (left) and collision prediction (right).
物体の閉塞空間と衝突予測

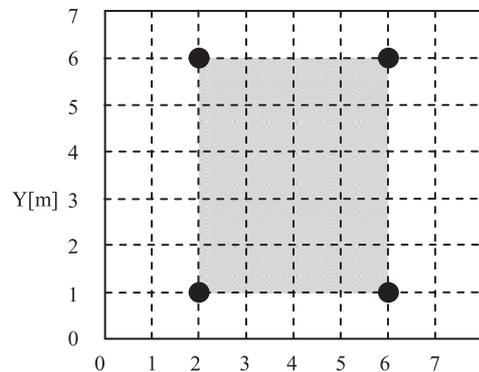


Fig. 14 Sensor map for simulation.
シミュレーション環境

- ・ 移動物体は直径30[cm]の円筒物体とする。

上記条件の下で、各全方位センサからみた円筒物体の方位角を計算し、クライアントPCの入力とする。

4.3.1 存在領域の検出シミュレーション

直径30[cm]の円筒物体に対する存在領域の生成結果をFig.15に示す。なお、解像度は10[cm]×10[cm]とした。

Fig.15の計測点A~Kにおいて、各点中心の円は基準円筒物体を表す。この基準円の外側に位置する外接多角形は、CADソフト (Jw_cad Ver. 4.05a) により求めた存在領域の理論値である。これらを囲むように太線で示された矩形領域が、4.2.1節に述べた2次元マップを用いた手法で検出された存在領域である。このように、本検出手法は、移動体および存在領域理論形状を包含するため、安全上問題のないことが判る。

基準円筒物体とこの手法における存在領域の面積

Table 2 Area comparisons of object zones.
存在領域の面積比較

計測点	存在領域面積	面積比率
A,D	2,000[cm ²]	2. 83
B,C,E~K	1,600[cm ²]	2. 26

比率をTable2に示す。ここで、10[cm]×10[cm]の領域を1ブロックと表現した場合、点A,Dでの存在領域を構成するブロック数は20個であり、それ以外の点での構成数は16個である。Table2に示すように、Fig.15に示す状況下では、計測領域中央付近では移動体面積に対して約3倍、カメラ近辺では約2倍の大きさの存在領域が生成される。

このように、Fig.12の手法による存在領域生成法では、実際の移動体よりも大きな存在領域が生成されることがわかる。

4.3.2 閉塞空間による衝突予測シミュレーション

移動体として2つの円筒物体を用いた閉塞空間に

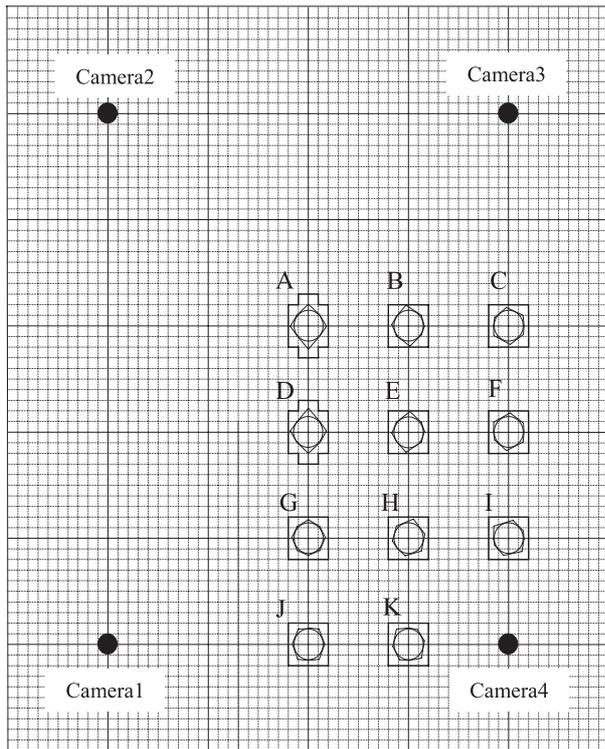


Fig. 15 Object zones detected from 2D map.
2Dマップを用いた簡略化手法で検出した存在領域

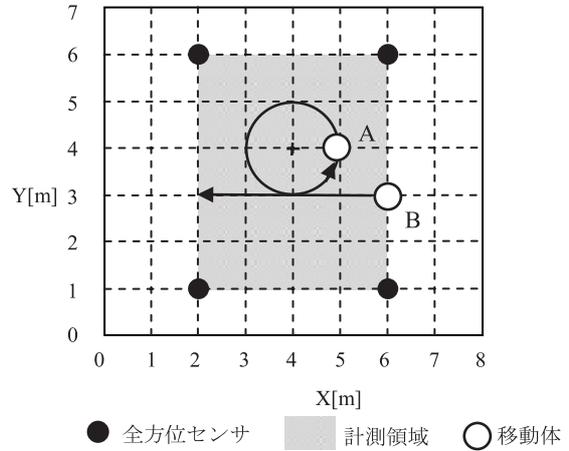


Fig. 16 Detection method of object zone with 2D map.
2次元マップを用いた存在領域検出

よる衝突予測シミュレーションの結果を以下に示す。なお、シミュレーションには以下の条件を用いた。

- ・ 2つの移動体（移動体AおよびB）は共に直径30[cm]の円筒物体とする。
- ・ 移動体AおよびBの移動軌跡をFig.16に示す。

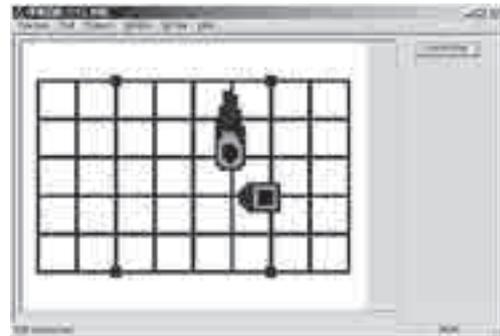


Fig. 17 (a)

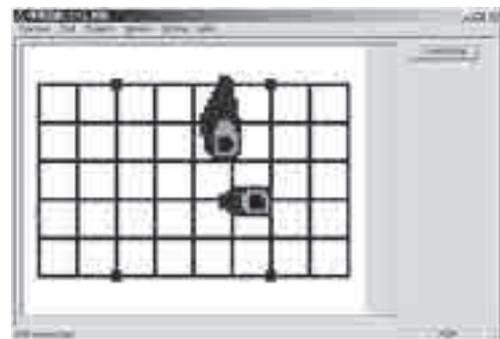


Fig. 17 (b)

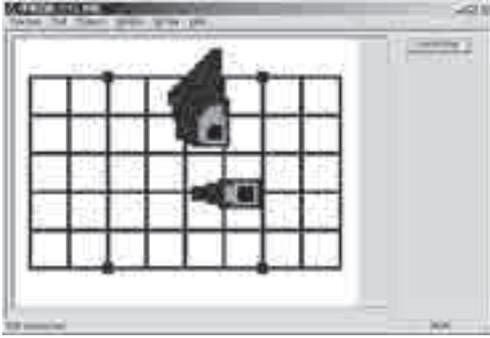


Fig. 17 (c)

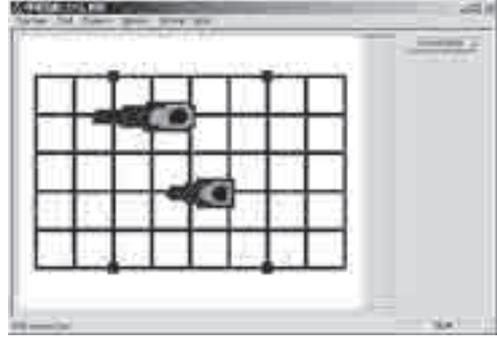


Fig. 17 (g)

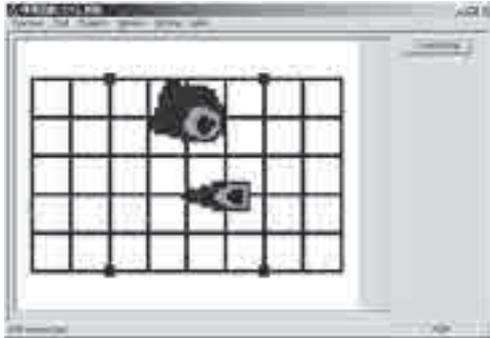


Fig. 17 (d)

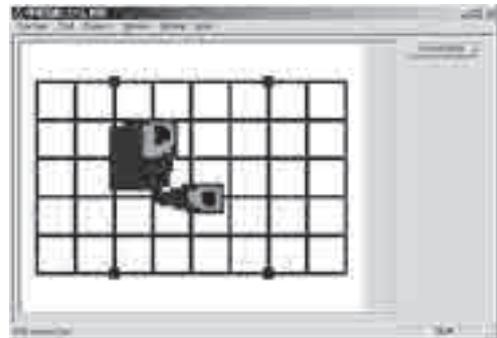


Fig. 17 (h)

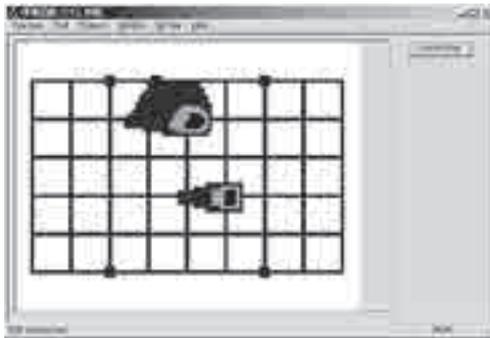


Fig. 17 (e)

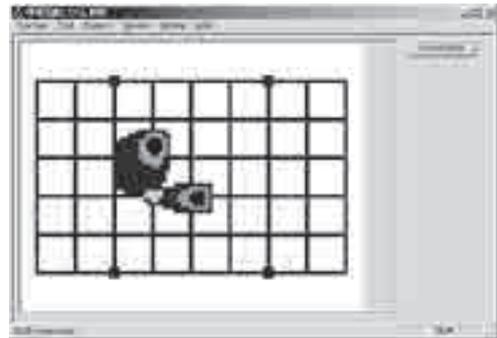


Fig. 17 (i)

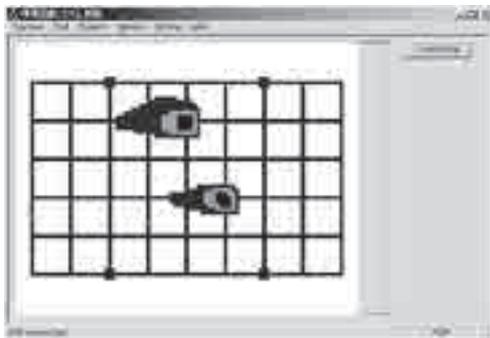


Fig. 17 (f)

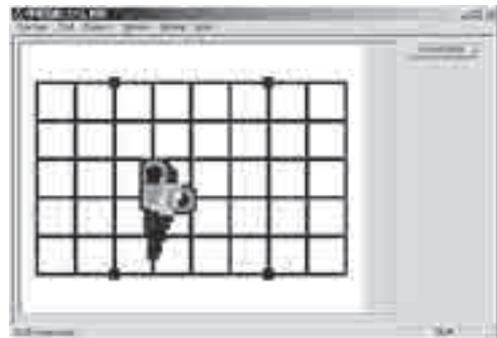


Fig. 17 (j)

Fig. 17 Simulation results of collision prediction.
衝突予測シミュレーション結果

ここで移動体Aは点 (3,4) を中心とする等速円運動を行い、移動体Bは点 (5,3) を始点として $y=3$ 上を等速直進する。移動速度は、移動体Aが 2.18 [rad/sec]、移動体Bが 1.39 [m/sec] である。

衝突予測結果は、クライアントPCの実行画面において閉塞空間重複領域部の表示色を変更することで示す。これは閉塞空間の重複状態から衝突を予測するためである (Fig.13)。Fig.17にシミュレーション結果として、実行画面をキャプチャした図を示す。

Fig.17に示すように、閉塞空間の生成においては速度と移動方向に応じた停止領域と徐行領域が生成されていることがわかる。

予測結果では、Fig.17 (i) において移動体AおよびBの徐行領域が重複し、Fig.17 (j) で移動体Aの停止領域と移動体Bの徐行・停止領域部が重複している。この結果、Fig.17 (i) ではAGVの走行制御命令として徐行命令が送信され、Fig.17 (j) では停止命令が送信される。

5. 試作装置のデモンストレーション

試作した監視装置 (Fig.11) の機能紹介として、AGVを用いた移動体追跡と走行一時停止による衝突回避の様子を以下に示す。

4台の全方位センサをFig.14と同等に配置し、監視装置は計測領域内の移動体に対して追跡を行う。移動体追跡および衝突回避時のAGVとダミー人形の位置関係をそれぞれFig.18, Fig.19, Fig.20に示す。

このデモンストレーション実施時において、計測空間における各全方位センサの感度解析や方位角領域 (サーバPCにて検出) の精度については未検証である。これはサーバPCの評価が終了していないことに因る。従って、方位角領域により構成される存在領域の妥当性については、存在領域の形状を目視により大まかに確認するに留めている。ただし、AGVの走行停止を確認することにより、クライアントPCとAGVC間における走行制御命令の通信状況、および、衝突予測結果に基づくAGVの走行制御機能の確認は可能である。

なお、位置検出方式での追跡例として、実時間追跡システム (4) での位置追跡実験も並行して行なう。全方位センサ4台分の映像を本試作装置のサーバPCと実時間追跡システムに分配器を用いてそれぞれ入力することで、同一映像に対する追跡処理を行う。ただしこの実験は、あくまで参考例として行うものであり、これによる詳細な比較検討は行わない。

Fig.21はデモンストレーション結果を示すもので

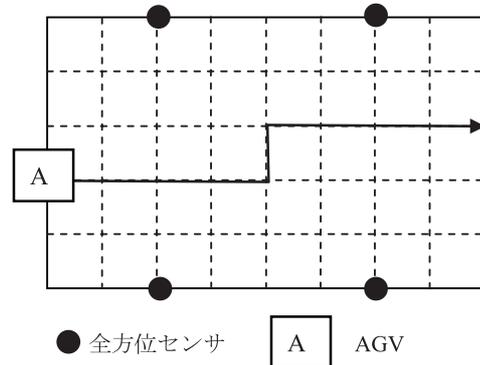


Fig. 18 The AGV route for tracking.
追跡用のAGV移動経路

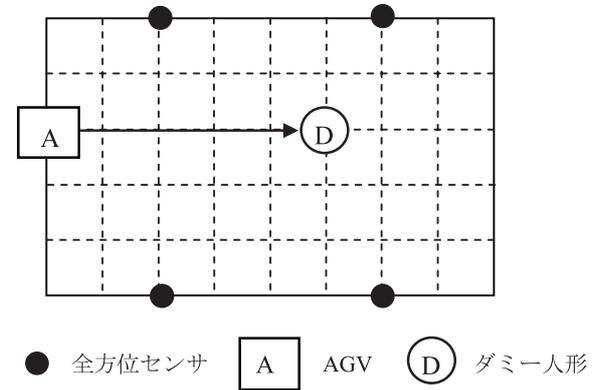


Fig. 19 The AGV route and dummy position for collision avoidance demo.1.
衝突回避 (1) 用のAGV移動経路とダミー人形位置

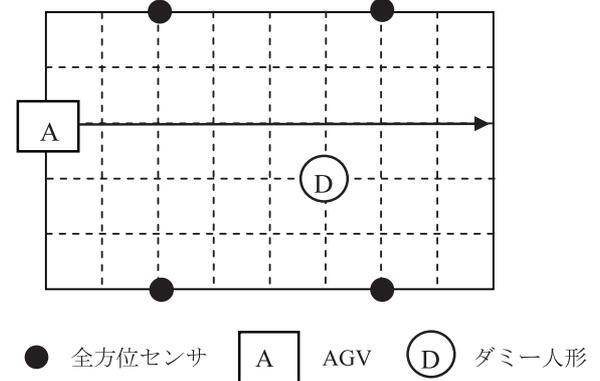


Fig. 20 The AGV route and dummy position for collision avoidance demo.2.
衝突回避 (2) 用のAGV移動経路とダミー人形位置

ある。画面は4枚のキャプチャ映像から構成され、それぞれFig.21 (a) 計測領域の様子、Fig.21 (b) 方位

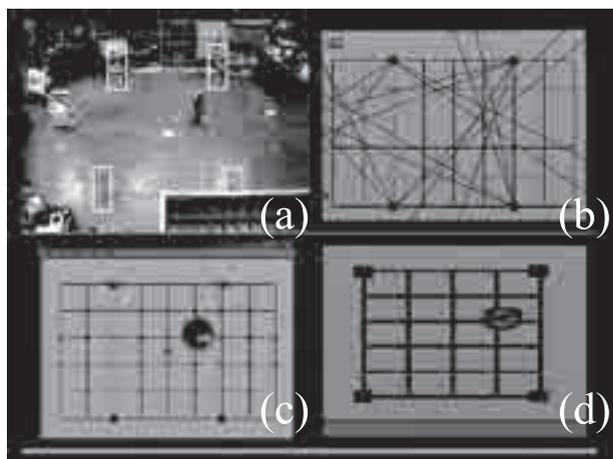


Fig. 21 Screen to show demonstration.
デモンストレーション実行画面

角領域（サーバPC実行画面）、Fig.21 (c) 実時間追跡システムによる追跡結果、Fig.21 (d) 存在領域および閉塞空間による追跡結果（クライアントPC実行画面）、である。

Fig.21の各図における全方位センサの設置箇所はFig.21 (a)：白枠、Fig.21 (b) およびFig.21 (c)：黒丸、Fig.21 (d)：黒矩形、で示している。ここでFig.21 (d) のみが他図と描写領域が異なりFig.14における計測領域（センサで囲まれた内部領域）のみを表示する。

また、Fig.21 (c) およびFig.21 (d) では、移動体の存在領域は計測領域部（センサで囲まれた内側領域）のみに表示される。さらにFig.21 (a) およびFig.21 (b) には、計測領域の外側に位置する移動体が描写されるがFig.21 (c)、Fig.21 (d) では表示されない（プログラムの仕様による）。

なお、Fig.21 (d) における3重に囲まれた領域は、中心から移動体の存在領域、一時停止領域、徐行領域を表している。

5.1 AGVの追跡

Fig.18に示す経路をAGVが走行した場合の存在領域および閉塞空間検出結果をFig.22に示す。

この結果より、存在領域は概ね良好に検出されている。また、徐行空間、停止空間も移動方向とスピードに応じて変化していることが判る。計測領域中央部でAGVが横行走行する際、閉塞空間の形状が変化しているが、これは横行に伴いAGVが減速したためである。

5.2 衝突回避のための停止制御 (1)

AGVの走行経路上にダミー人形を設置し、停止による衝突回避を試みた。衝突予測結果が正しく、かつ、その結果に基づいた走行制御命令がAGVCへ送信されていれば、AGVは衝突前に一時停止する。Fig.19にAGV走行経路とダミー人形の位置を示し、結果をFig.23に示す。なお、ここではクライアントPCから停止命令が送信された後、実際にAGVが停止するまでの所要時間を2.5秒とし、閉塞空間の大きさを設定した^(注3)。

Fig.23 (a) では計測領域においてダミー人形が検出されている。Fig.23 (b) では走行中のAGVが検出され、AGVの停止空間が重複している。Fig.23 (c) では停止命令がすでに出されているが、通信遅れの関係でまだ停止には至っていない状態である。Fig.23 (d) では停止直前であり、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.23 (e) は停止状態である。AGVが停止したため、Fig.23 (d)と比較して閉塞空間が小さくなっている。さらに、ゴーストが発生している。これはFig.10で説明したように、AGVとダミー人形との位置関係により生じた偽存在領域である。

注3 この数値は実際に一時停止に要する時間を計ることより得た。

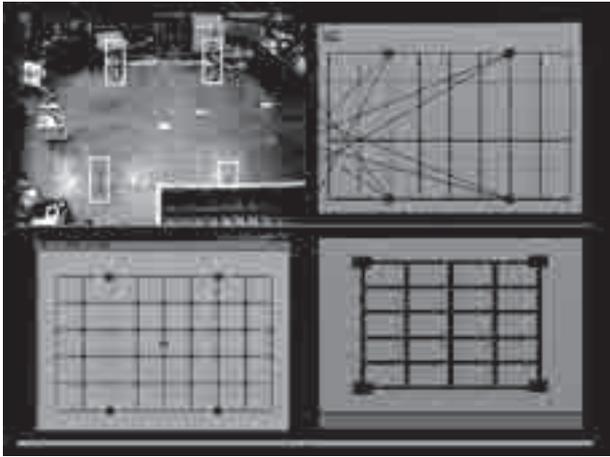


Fig. 22 (a)

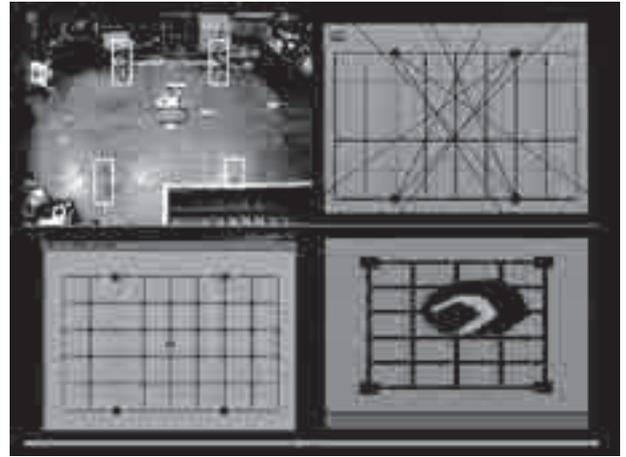


Fig. 22 (d)

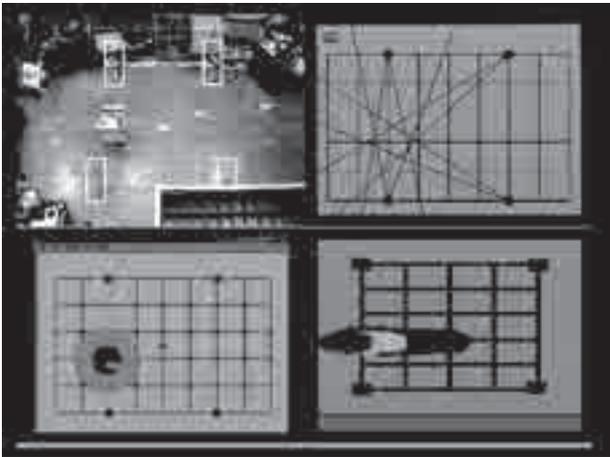


Fig. 22 (b)

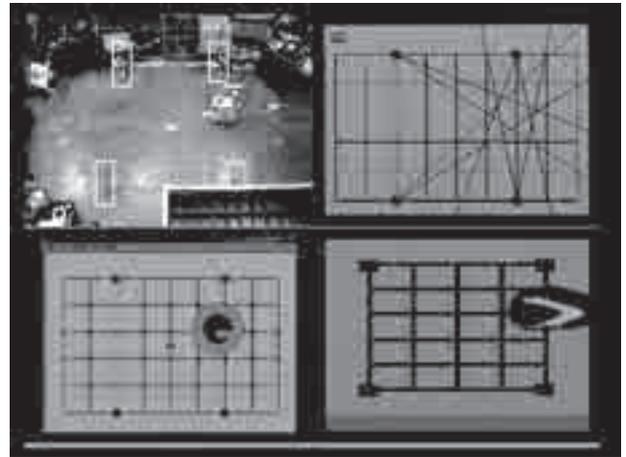


Fig. 22 (e)

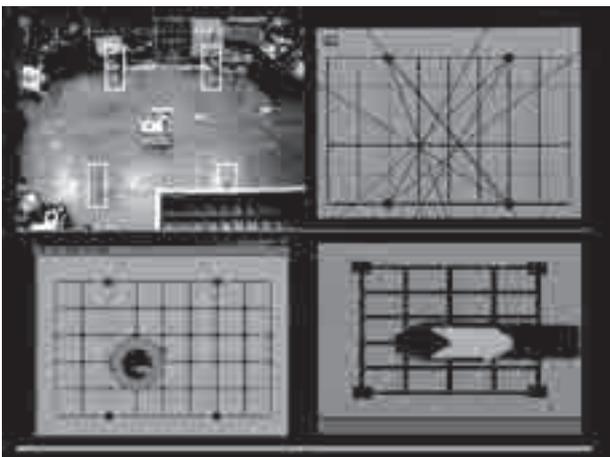


Fig. 22 (c)

Fig. 22 Detected protected zone from tracking AGV.
走行AGVの閉塞空間検出結果

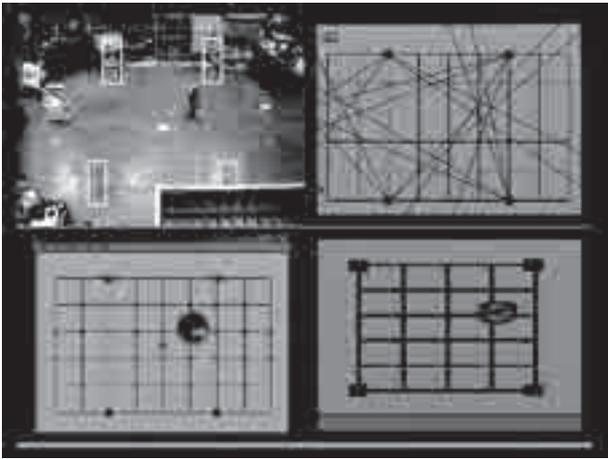


Fig. 23 (a)

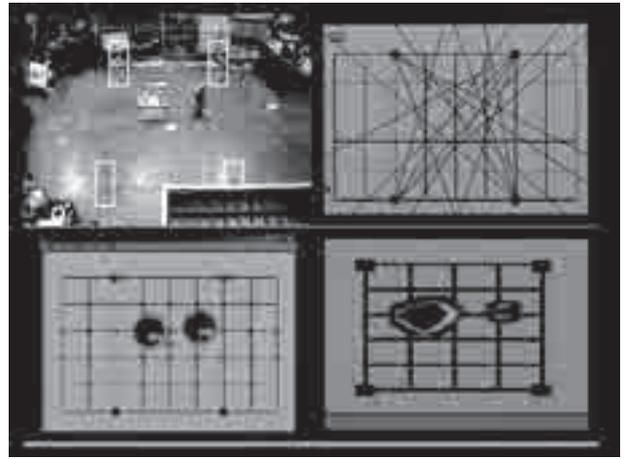


Fig. 23 (d)

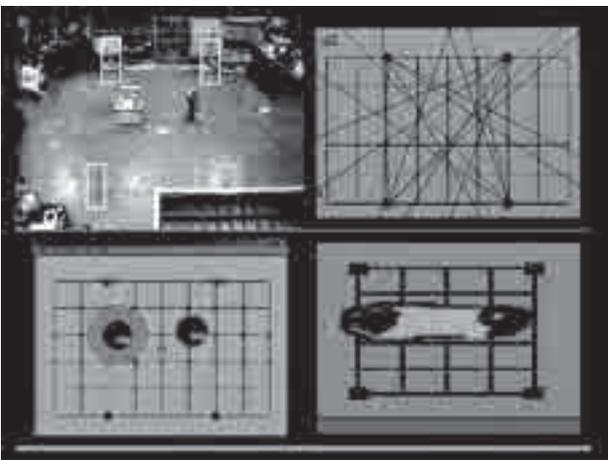


Fig. 23 (b)

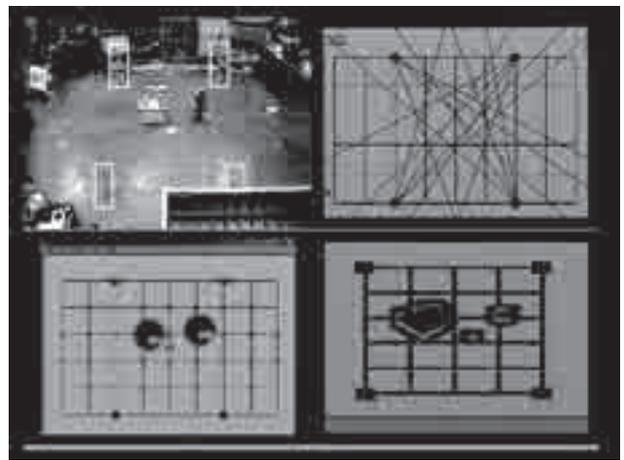


Fig. 23 (e)

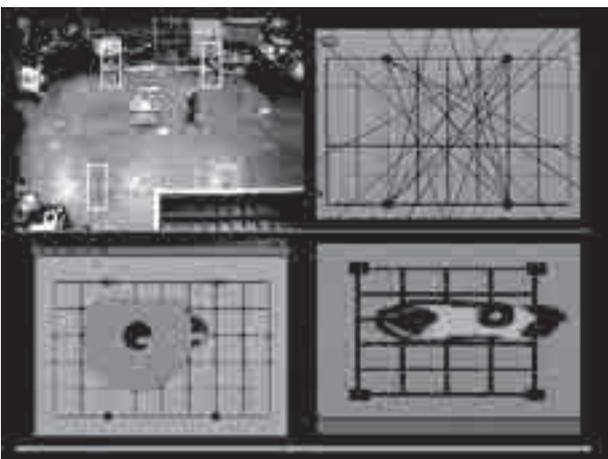


Fig. 23 (c)

Fig. 23 Result of collision avoidance demo. (1).
衝突回避 (1) の結果

5.3. 衝突回避のための停止制御 (2)

AGVの走行経路付近にダミー人形を設置した場合における衝突回避を試みた。Fig.20 にAGV走行経路とダミー人形の位置を示し、結果をFig.24に示す。

AGVの走行経路とダミー人形の位置関係が停止制御 (1) (Fig.19) と似ているため、デモンストレーションの結果もほぼFig.23と同様に見えるが、この停止制御 (2) における特筆すべき結果は、Fig.24 (e) である。このFig.24 (e) ではオクルージョンが発生しており、位置追跡結果では移動体を見失っているが、存在領域は移動体を見失うことなく検出に成功している。

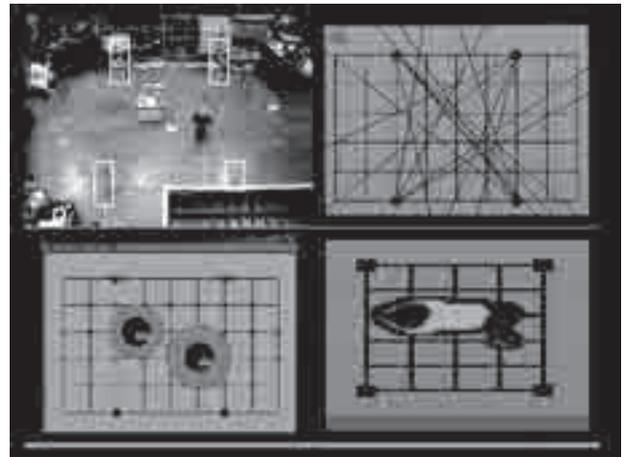


Fig. 24 (c)

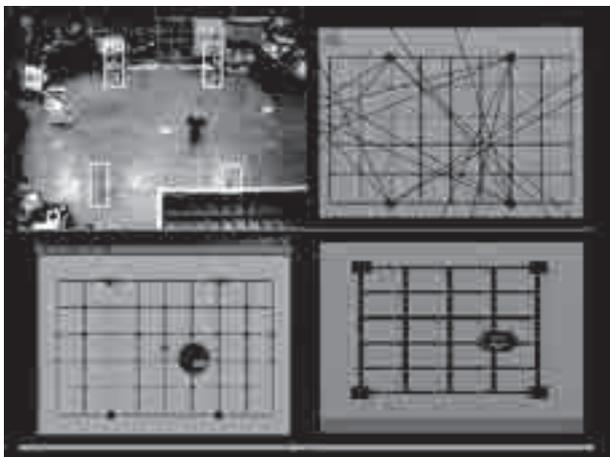


Fig. 24 (a)

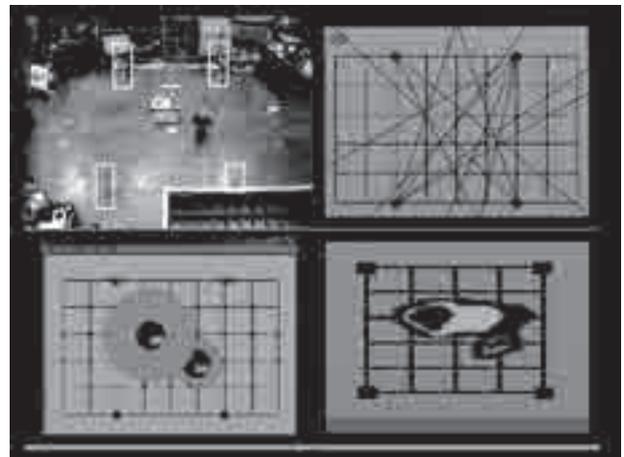


Fig. 24 (d)

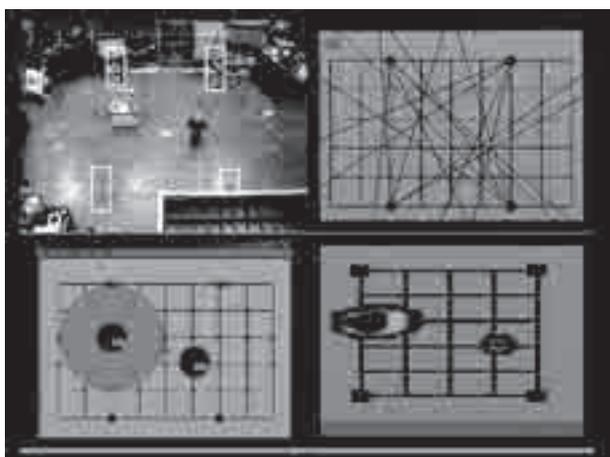


Fig. 24 (b)

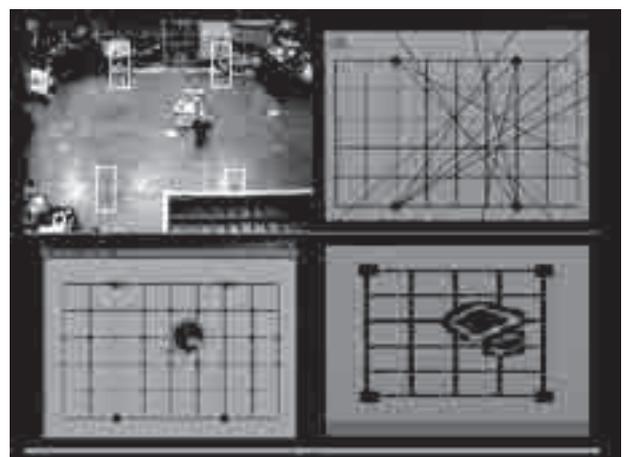


Fig. 24 (e)

Fig. 24 Result of collision avoidance demo. (2) .
衝突回避 (2) の結果

6. おわりに

本論文では、画像監視装置のための複数の全方位視覚センサを用いた存在領域の検出法を提案し、シミュレーションにより衝突予測への適用性を検証した。この手法は、オクルージョン発生時の検出漏れに頑健な存在領域検出を実現している。さらに、4台の全方位視覚センサを用いた試作システムを構築し、AGVを用いた存在領域検出および衝突予測デモンストレーションを行った（試作装置については多くの検証事項が残されており、本稿ではデモンストレーションにとどめている）。このデモンストレーションにより、存在領域検出法による実時間での移動体追跡および衝突予測が可能であることを示した。また、オクルージョン発生時において、移動体を見失うことなく存在領域を検出していることを確かめた。

以下に本論文での結果をまとめる。

(1) 検出される存在領域は、移動体を確実に包含するものの、存在領域面積は実際の移動体面積よりも大きくなりやすい。

(2) 3台以上の全方位視覚センサを用いた場合、センサで囲まれた内部領域に比べ、外部領域ではより冗長な存在領域が検出されやすい。この冗長性が問題となる場合には、監視領域をセンサで囲まれた内部領域に設定したほうが良い。

(3) 処理の実時間化のために簡略化した存在領域検出手法では、全方位視覚センサ4台を縦5[m]×横4[m]の矩形領域の各頂点に配置したシミュレーション実験において、直径30[cm]の円筒物体の存在領域面積は最大で約3倍となった。

(4) 本論文での存在領域検出法は、オクルージョン発生時の移動体の消失に頑健である。ただし、複数の移動体が密着し、全てのカメラから1つの物体のように観測される状態においては、消失は避けられない。

(5) 本論文での存在領域検出法では、ゴーストの発生は避けられない。これを回避する根本的解決策はなく、監視内容に合わせたセンサ配置等で補う必要がある。なお、検出した存在領域の面積に閾値を設け、微小領域をゴーストとみなして削除する、という手法も想定されるが、この手法を適用する際には、閾値が必ず人体の存在領域面積以下となる必要がある。

今後の課題としては以下の点が挙げられる。

(1) 移動体に対して存在領域が大きく検出されることは、安全上は問題とならない。しかし頻繁な機

械類の停止を引き起こす要因となるため生産効率の点からは問題となる可能性がある。適切な大きさの存在領域を検出するためには、計測対象となる移動体の大きさやカメラ性能を考慮した解像度決定および全方位センサ配置場所についての検討が必要である。

(2) Fig.23とFig.24におけるシミュレーション時のダミーデータ計測点の選定は、カメラ配置の対象性を考慮して選定した。実際には、(a) カメラ性能の個体差、(b) 背景映像の違い、のために、あらかじめ計測領域全体における感度解析が必要である。

(3) クライアント部ではUDPによるデータ受信漏れが起こる可能性があるため、システムの応答時間を計測するためには、クライアント部での処理サイクルを計測監視する必要がある。

(4) サーバ部においては、センサの感度解析や方位角領域の妥当性のチェックが必要である。

(5) 機能の正常性確認処理が未実装である。特に、全方位視覚センサの映像正常性を確認する手段が必要である。

今後はこれらの課題について検討を行い画像監視装置の完成を目指す。

7. 謝辞

本研究の実施にあたり、「全方位視覚センサを用いた実時間人間追跡システム」のプログラムをご提供くださいました大阪大学 石黒浩 教授に深く感謝致します。また、プログラム開発において多大な助言をくださいました産業技術総合研究所 西村拓一研究官に心から感謝致します。

参考文献

- 1) (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 (2001)
- 2) T. Bomer, “Vision Based Protective Devices (VBPD) — A vision becomes reality,” Proc. And CD-ROM, 3rd Int. Conf. Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Session7.1 (2003) pp.11-16.
- 3) H. Ishiguro, “Development of low-cost compact omni-directional vision sensors and their applications,” Proc. Int. Conf. Information Systems, Analysis and Synthesis (1998) pp.433-439.
- 4) 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 (2000) pp.2567-2577.

- 5) 安全技術応用研究会 編著, “国際安全規格対応安全システム構築総覧－機械/電気安全, 機能安全－” (2001)
- 6) 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 (2003) pp.259-262.

- 7) 濱島京子, 石原浩二, 呂健, “複数の全方位視覚センサを利用した画像監視装置のための基礎的検討”, 第34回安全工学シンポジウム (2004) pp.181-184.