

ステレオカメラを用いた平面検出技術の 自律移動ロボットへの適用

Application of Efficient Plane Detection Using Stereo Camera to Unmanned Ground Vehicle

國 弘 孝 生 株式会社 IHI エアロスペース 防衛技術部
坂 野 肇 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 主査

当社は、発電所や工場および空港などの広大な施設の安全やセキュリティの監視用として、自律移動ロボットによる監視システムの開発を行っている。自律移動に必要な技術には、大きく分けて環境認識技術と行動制御技術があるが、本稿では、環境認識技術の一つである、ステレオカメラによる平面検出技術とその適用について報告する。平面検出技術には、高速な平面姿勢推定を利用した平面投影ステレオ法を採用した。これをさらに高速化し、改良などを実施して自律移動ロボットに搭載した。実走行で平面検出の動作検証を行った結果、実用性を確認することができた。

The IHI group has developed a surveillance system using an unmanned ground vehicle. The autonomous vehicle system depends on the following technologies, environment recognition technology and planning technology. This paper explains the environment recognition technology, which uses stereo camera for the efficient plane detection and is mounted on the unmanned ground vehicle. Plane-detecting algorithm that we developed is based on planar projection stereopsis using efficient plane-parameter estimation. Effectiveness of algorithm has been confirmed through test running.

1. 緒 言

近年、世界各地においてテロや大規模災害が多発しており、暮らしにおける安全・安心への意識が高まりつつある。我が国も例に洩れず、各分野においてセキュリティ対策が進められている。発電所や工場および空港など、暮らしに欠かせない重要施設の監視や警備もその一つである。これらの広大な敷地をもつ施設での監視や警備は、カメラやセンサなどの固定設備と、人の警備によるものが主流である。一方、少子高齢化などによって、国内での労働人口が減少しつつあるという問題もある。このような状況のなか、当社では、安全・安心のための広域監視および警備のソリューションの一つとして、自律移動ロボットシステムの開発に取り組んでいる。当社が取り組む自律移動ロボットは、自動車などの車輪をもつ移動機構に、センサとコンピュータを搭載し、ロボット自らが道を検出して目的地まで走行するというものである。この技術の活用によって、人は目的地の入力など、簡単な操作でロボットを扱うことができる。これにカメラなどのセンサを搭載し、遠隔から監視を行うことで、少ない人員で、かつ高い自由度をもった監視を安全に行うことができる。現在、自律移動に関する

技術開発を中心に取り組んでいる。自律移動の技術は、大きく二つの技術で構成される。一つは、道を検出するための環境認識技術で、もう一つは、環境認識結果に基づいて経路を生成し、移動機構の制御を行う行動制御技術である。本稿では、採用している環境認識技術の一つである、ステレオカメラによる平面検出と、その自律移動ロボットへの適用の取り組みを報告する。

当社が開発する自律移動ロボットは、重要施設の警備や監視を行うことから、その移動範囲は舗装された道が多い。しかし、施設の警備といっても、必ずしもアスファルトやコンクリート舗装がされているとは限らないため、未舗装路も含めた範囲を想定している。

採用した平面検出技術は、比較的計算時間が短く、安定した結果を得られるが、実装するためには、解の信頼性について幾つかの改善すべき点があった。自律移動ロボットの環境認識は、大きく間違った解を出すことなく、安定した妥当な解が得られることが必要である。この課題に対して、あらかじめ取得したデータを基に、アルゴリズムの改良やパラメータの調整によって改善を図った。そして、改善を施したソフトウェアを自律移動ロボットへ実装し、オンラインでの動作検証を行った。

この結果、走行に影響を与えるような大きな間違いがなく、安定して平面を検出することが可能なことを確認した。

2. ステレオカメラを用いた平面検出アルゴリズム

自動車と同様に、車輪による移動機構をもつロボットが走行する場所は、ほとんどが平坦な道である。うねりや段差などはあるものの、道は平面が連なったものとみなすことができる。この点に着目し、道を平面として画像から検出することが、本稿でいう平面検出であり、直接法と呼ばれている。

ステレオカメラとは、幾何学的に位置関係が固定された2台のカメラのことをいい、この位置関係を計測して画像解析に利用する。本稿では、カメラの一つを基準カメラ、もう一つのカメラを参照カメラと呼び、それぞれで撮影した画像を基準画像、参照画像と呼ぶことにする。

まず、直接法の基礎となる、撮影された平面の射影変換について説明する。ステレオカメラで平面、例えば平坦な道を撮影したとする。このとき、道上の点 X が映し出されている基準画像上の座標を m_B 、参照画像上の座標を m_R と定義すると、この2点間で、以下の関係が成立する。

$$m_B = kH \cdot m_R \quad \dots\dots\dots (1)$$

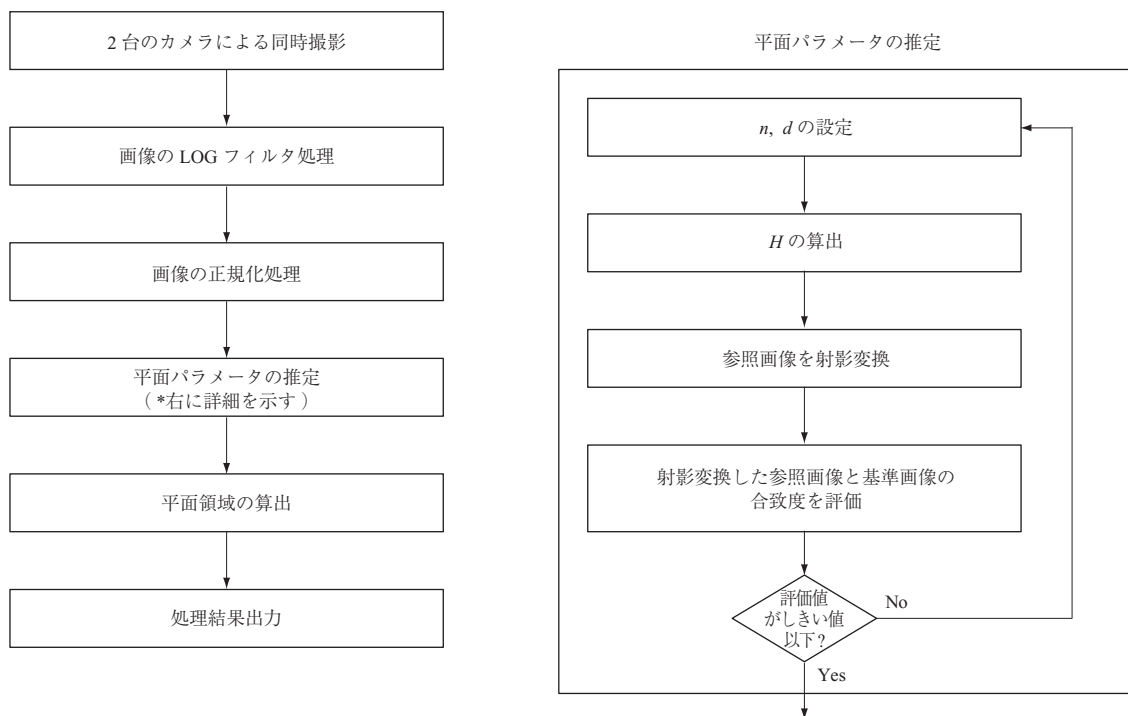
$$H = H(n, d) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで k は定数、 H は 3×3 の行列であり、射影変換行列という。 n はカメラに対する道の向き、すなわち道の

法線ベクトルであり、 d はカメラから道までの直距離である。この関係によって、参照画像上に映し出されている平面領域を、基準画像の視点から撮影した場合の画像として再現することができる。直接法はこの関係を利用して、画像上の平面を検出する。以下、直接法による平面検出の概要を述べる。第1図に平面検出処理フローの概要を示す。まず、ステレオカメラで基準画像および参照画像を取得する(第2図)。この画像に前処理として、LOGフィルタ処理を行い、エッジ画像(以下、基準エッジ画像、参照エッジ画像と呼ぶ)を生成する。LOGフィルタ処理は、特定の周波数帯域のエッジ、すなわち輝度変化のある領域を抽出するフィルタ処理である。この処理によって、画像上にある特定の大きさ(周波数)の模様(エッジ)を抽出することができる。この処理によって、アスファルト上などにある細かい模様を抽出している。

次に、エッジ画像を使って n および d を繰り返し計算によって求める。繰り返し計算では、まず解きたい式と関連する評価指標を定義する。これに仮の解を代入して、評価指標が設定した範囲内であった場合、与えた仮の解を正しい解として扱う。この作業を、解が求まるまで仮の解を変化させながら繰り返し行う。

直接法では、求める解は n と d であり、評価指標は基準エッジ画像と参照エッジ画像の合致度としている。合致度は、参照画像を射影変換した画像と、基準エッジ画像の



第1図 平面検出処理フローの概要
Fig. 1 Algorithm of plane detection

(a) 基準画像



(b) 参照画像

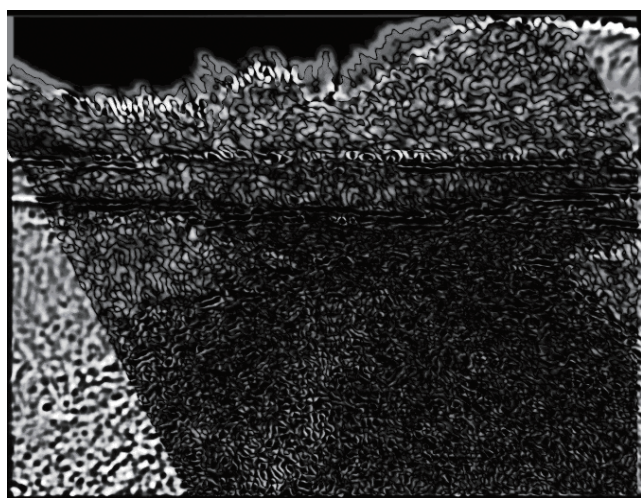


第2図 ステレオカメラによる撮影画像例
Fig. 2 Pictures taken by stereo camera

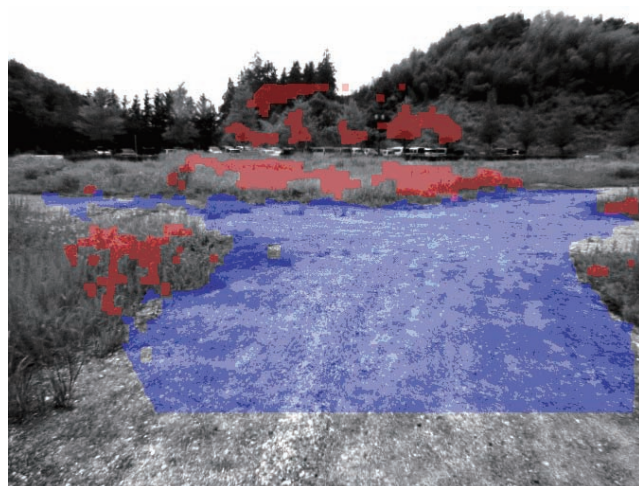
差分値としている。第3図に基準エッジ画像と射影変換後の参照エッジ画像の差分を表した画像を示す。両画像上で平面として合致している領域は、暗く表れている。

平面検出結果を第4図および第5図に示す。第4図は基準画像上に検出した平面領域を青色で表示したものである。赤色の領域は、画像のなかでも暗い領域としてさらに評価して、平面領域ではないと判断した箇所である。第5図は、ロボットおよびその前方領域、すなわち平面検出領域を真上から見た図である。第5図は、第4図の青い領域を射影変換して得られる画像である。1辺が50mに相当する。

本手法は、平面である道路を探索する手段として、効率の良い技術であるが、計算量が多く、高い計算処理能力が



第3図 合致度評価画像
Fig. 3 Picture for estimating equality

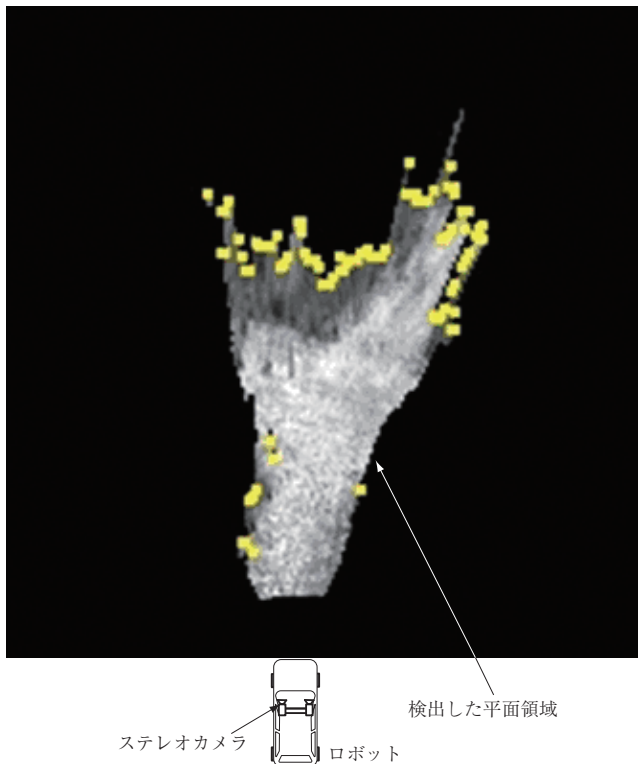


第4図 平面領域検出結果
Fig. 4 Detected plane on base picture

必要となる。この問題に対して、さらなる高速化を実現する手法が提案されている⁽¹⁾。この手法では、最も計算コストの高い繰り返し計算について効率化を行い、計算量を大幅に低減するものである。当社ではこの手法を採用した。また、計算量低減のため、繰り返し計算においては、 n と d は無尽蔵に変化させるのではなく、道を検出するという観点から、範囲を限定するなどの工夫も行っている。同時に、これによって、道以外の平面を解とすることを防ぐこともできる。

3. 実装のためのアルゴリズム改善と改良

当社では、前述した技術を自律移動ロボットの環境認識手法として採用し、ロボットが走行するための道を検出するモジュールとして実装した。実装に当たって、いくつか



第 5 図 平面検出結果（上面）
Fig. 5 Plane detected by looking down from sky

の課題をクリアするために、アルゴリズムの改良やパラメータの調整を行った。課題のなかでも、検出される平面の信頼性に関するものについて、対処例を紹介する。

3.1 模様と多段階処理

第 6 図に示すように、壁などになだらかな模様があることがある。既存のアルゴリズムにおいては、この模様が存在する壁面領域を、平面として検出してしまうことがあった。壁面も確かに平面であるが、2 章で述べたように平面の探索の範囲は、道路が存在する範囲で行っている



第 6 図 壁の模様
Fig. 6 Wall texture

ため、全く方向の異なる壁が平面として検出されることはない。この原因の一つとして、評価対象としていた模様の大きさ、すなわち周波数の違いがあげられる。

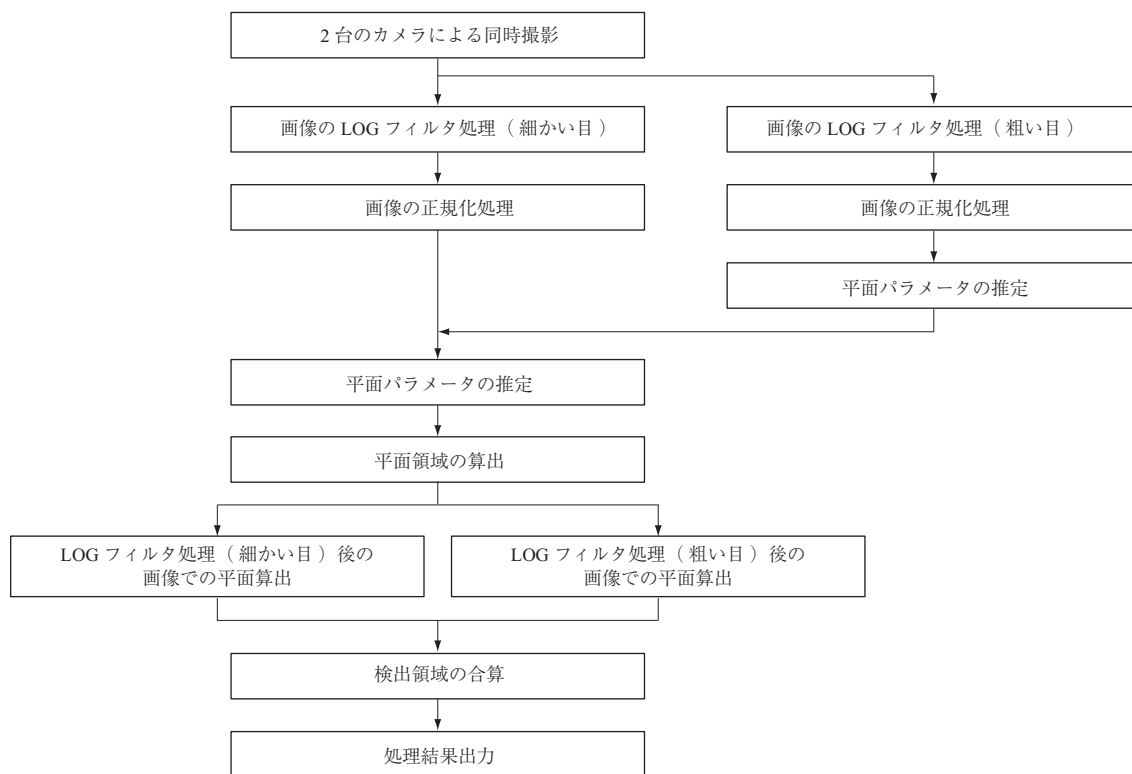
従来、主に対象としていたのは、アスファルト上などにある細かい模様であり、画像の周波数特性上では高い周波数帯域に存在する。これを検出するために LOG フィルタ処理（第 1 図）において、高周波数帯を検出するフィルタ仕様としていた。

一方、第 6 図の模様は比較的大きなものであり、画像の周波数特性上では低い周波数帯域に存在する。このような模様は上記フィルタでは、カットされて明暗の低い模様となる。この結果、合致度評価画像上暗く表れ、平面と判定されてしまう。従来、これらの部分は模様がな部分として特別な処理で回避をしていたが、確実な判定までは至らなかった。

これに対処するため、異なる模様を適切に対処できるように処理を多段階にした。まず、探索する画像に粗い目のフィルタ処理を行い、この画像を用いて合致度を評価し、平面領域を算出する。このとき、目の粗いフィルタの特性によって、第 6 図の壁上の模様を平面外と判定することができる。さらに、細かい目のフィルタ処理を行った画像で合致度を評価し、平面領域を算出する。最後に、両方で平面と判定された部分を、最終的な平面部分として出力する。第 7 図に改善した平面検出処理フローの概要を示す。これによって、大きく間違えることなく平面を検出することができる。

3.2 揺動と初期値補正

平面検出では、次の平面パラメータを探索するために、前回求めた平面パラメータを初期値として使用している。この平面パラメータは、カメラ座標系で定義されるものであり、車両に揺動が発生するとカメラと道路の関係が変化するため、前回の平面パラメータが妥当な初期値ではなくなる。第 8 図 - (a) は橋に差し掛かったシーンで、誤検出をした例である。このシーンでは橋と道の境界には段差があったため、車体は大きく揺動した。この結果、探索時間の増大や、検出される平面の精度が悪化した。第 8 図 - (b) は、ガードレールを含んだ領域を平面として出力している。さらにこの後のフレームで、平面の方向は大きくずれてしまった。これに対して、ロボットに搭載しているジャイロセンサの姿勢角を利用することで対処した。姿勢角を使って、ロボットの姿勢変化を座標変換によって打ち消すことで、平面パラメータを妥当な初期値として与

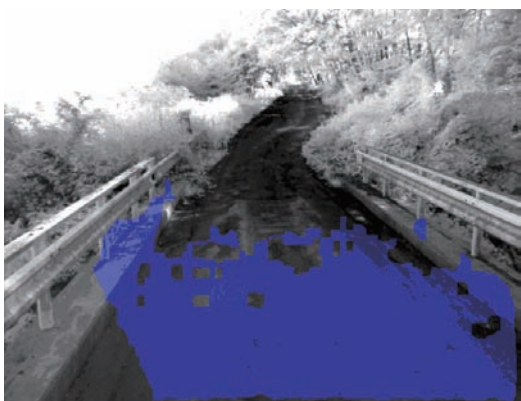


第7図 改善した平面検出処理フローの概要
Fig. 7 Improved algorithm

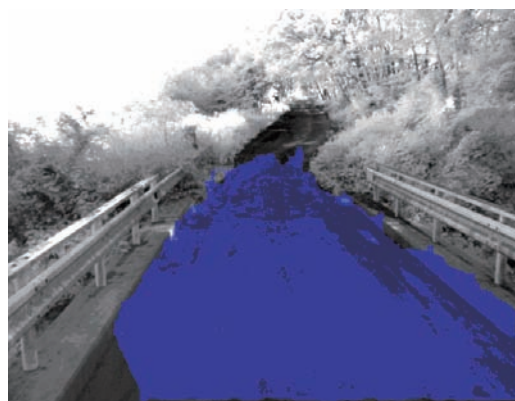
(a) 基準画像



(b) 解を間違った例



(c) 改良後



第8図 橋通過シーン
Fig. 8 Scene passing on a bridge

えることができる（第8図-(c)）。

加えて、仮に上記のような大きな間違いが発生した場合の対処として、平面検出結果の妥当性を判断する処理を追加した。前時刻に検出された平面と新たに検出された平面のパラメータを比較し、その変化量を算出する。探索条件などから、その変化量が想定内であることを確認するものである。

3.3 誤検出の抑制とパラメータ調整

平面パラメータ n と d はおおむね正しい解を得られているが、平面領域に障害物などが含まれるケースを誤検出という。これについては、パラメータの設定を適切に行うことで対処した。例えば、平面領域の判定しきい値がその一つである。このしきい値は第3図に示す画像上において、各ピクセルが平面上にあるかどうかを判定するためのしきい値である。ピクセル上の差分値がしきい値を下回っている場合、その領域は平面上の領域として認識される。したがって、これを低く設定するほど誤検出は低減される。しかし、下げすぎると平面も検出されにくくなってしまいうため、適切な設定が必要である。パラメータの調整に

当たっては、第9図に示すように自律移動ロボットに近い形でセンサおよびコンピュータを搭載し、さまざまな環境のデータを取得して、これらをオフラインで評価・分析している。第10図に取得したデータの例を示す。



第9図 環境認識センサ例
Fig.9 Example of perception device

(a) 建屋の隣接するアスファルト路



(b) 林道（アスファルト路）



(c) 林道（橋）



(d) 林道（未舗装路）



第10図 取得データ例
Fig.10 Example of acquired pictures

4. 走行試験による動作検証

自律移動ロボットにステレオカメラおよび平面検出処理を行うソフトウェアが動作するコンピュータを搭載し、人の運転によって未舗装路からアスファルト路にかけて走行させた。評価は、ロボットが移動中に出力する平面検出結果に対して行った。ステレオカメラおよびコンピュータの主な仕様を第1表に示す。走行距離の内訳は、未舗装路が約100m、アスファルト路は約300mである。

フレームごとに検出結果を評価し、まとめた結果を第2表に示す。また、平面検出結果例を第11図に示す。未舗

装路およびアスファルト路ともに大きく間違った解を出すことなく、安定して平面を検出することができた。ただ

第1表 装置概要

Table 1 Machinery configuration

名称	項目	仕様
カメラ	最大画素数	130万画素
	インタフェース	IEEE1394
	ダイナミックレンジ	1500:1
	最大読み出しフレーム	8.9フレーム/s
	A/Dコンバータ(出力階調)	12ビット
コンピュータ	CPU	Core2Duo E8500 3.16 GHz
	メモリ	3.5 GB

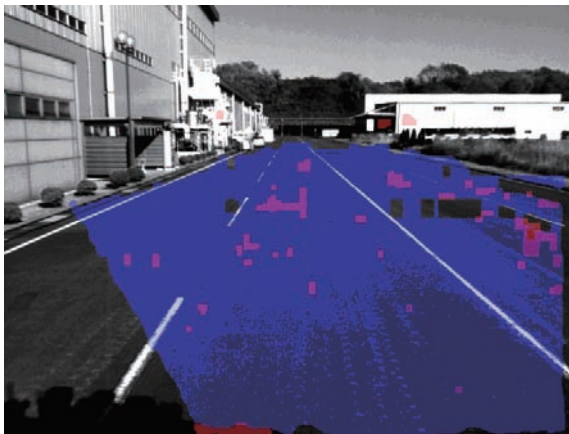
第2表 評価結果

Table 2 Summary of results

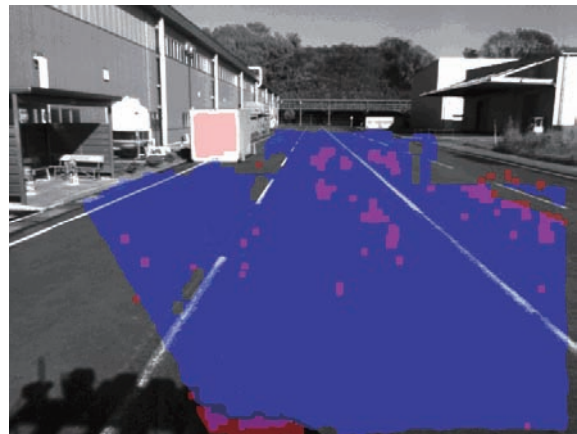
走行場所	計算フレーム数	平面を正しく検出したフレーム数	平面を検出しなかったフレーム数	誤検出を含んだフレーム数
未舗装路	562	471 (84%)	5 (1%)	86 (15%)
アスファルト路	955	905 (95%)	20 (2%)	30 (3%)

(注) ()内は計算フレーム数基準

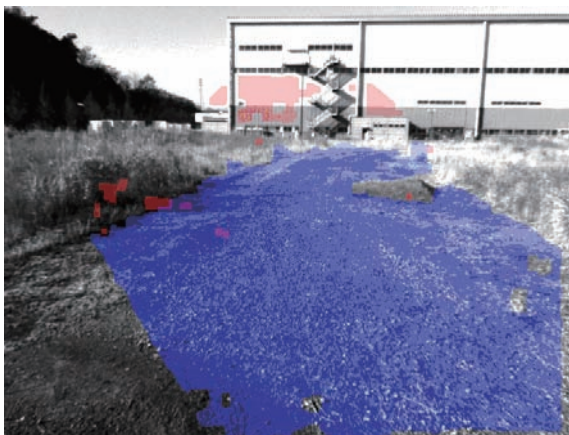
(a) アスファルト路結果例(1)



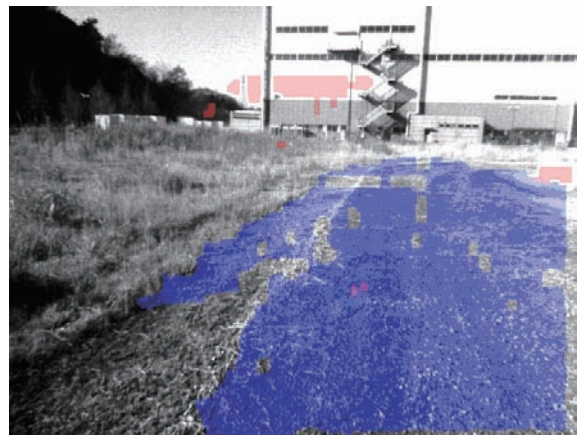
(b) アスファルト路結果例(2)



(c) 未舗装路結果例(1)

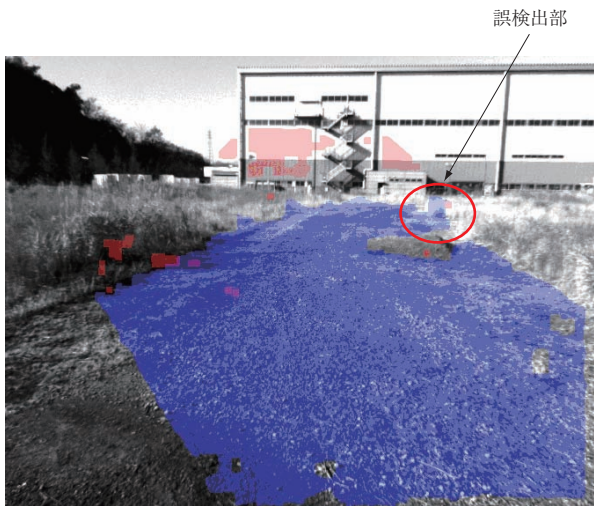


(d) 未舗装路結果例(2)



第11図 走行試験における平面検出結果

Fig. 11 Results of test running



第 12 図 草の誤検出
Fig. 12 Miss detection example

し、未舗装路については、大きく解を間違えることはなかったが、誤検出が約 15% 存在した。これは第 12 図に示す草を平面として誤検出したものが多くを占める。遠くの草などは模様が細かくなりすぎるため、この処理にとって誤検出しやすいシーンの一つである。

5. 結 言

ステレオカメラによる平面検出技術を自律移動ロボットに適用し、走行試験によって実用性および高速走行の実現性を確認できた。今後は、未舗装路での誤検出の低減に取り組んでいく。

— 謝 辞 —

本システムの開発に当たり、東京工業大学 奥富正敏教授をはじめ、関係各位に多くのご協力とご指導をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 杉本茂樹, 奥富正敏: ステレオ画像を用いた高速な平面パラメータ推定法 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア Vol. 48 No. SIG1 (CVIM17) 2007 年 2 月 pp. 24 - 34