

1-314 ステレオビジョンシステムを用いた一般道における障害物検出

Obstacle Detection Using Stereo Vision System

○菅沼 直樹 (日本学術振興会)

泉田 啓 (金沢大学) 藤原 直史 (金沢大学)

Naoki SUGANUMA, Japan Society for the Promotion and Science, Kanazawa Univ., Ishikawa 920-8667, Japan

Kei SENDA, Kanazawa Univ.

Naofumi FUJIWARA, Kanazawa Univ.

In this paper, we introduce our stereovision system for Active Safety Vehicle, and we propose obstacle detection algorithm using stereovision system. In our stereovision system, details of 3D information around the vehicle can be collected with 15Hz cycle. Also, all obstacles around the vehicle can be detected from the collected 3D information by extracting the road surface. The effectiveness of our system is confirmed from long time running test.

Key Words: Obstacle detection, Stereovision system, Activate Safety Vehicle, ITS

1. はじめに

近年の交通量の増加により交通渋滞といった問題が増えてきている。従来これを解決するため、交通容量の確保を目的として高速道路において付加車線を設ける等の対策がなされている。一方、最近行われた国土交通省の調査では、自動車交通量の増加が 2030 年度にピークを迎え、以降は減少傾向に向かうとされている。こうした状況下においてはインフラ投資によって交通渋滞を解決する方法は収束傾向に向かわざるを得ないと考えられる。その反面、インフラ側のみではなく車両側の性能向上により交通容量の増加を目指す試みは非常に重要性を帯びてくると考えられる。したがって今後 ITS に対する重要度は大きくなるものと考えられる。

我々はこの ITS における安全支援運転もしくは自動運転走行の実現を目的として、これまでセンサー、アクチュエータシステムの開発を行ってきた。本報では、金沢大学工学部において開発を行った自動運転車両^[1]に搭載したステレオビジョンに基づく障害物検出システムについて紹介を行う。

2. 3D 情報の再構築

2.1 2眼ステレオビジョンシステム 現在、車載用の障害物認識方法としては、レーザレーダやミリ波レーダ等が主流であるが、より複雑な環境を認識可能な Vision による手法が今後重要度を増すものと考えられる。このため我々はステレオビジョンに基づく障害物検出システムに重点を置き開発を行ってきた。図 1 に開発したステレオビジョンシステムを示す。本システムの主要パラメータを表 1 に示す。本システムは実験用自動車のルームミラー部に設置してある。

ステレオビジョンシステムとは複数の視点から撮影された像を解析し、視差を計測することで三次元情報を計測するシステムである^[2]。本システムでは左右 2 台のカメラを平行に設置した平行ステレオ視に基づく手法を採用した。平行ステレオ視では視差は横ライン上に生じるため、計測範囲の限定により安定かつ高速に処理できるという特徴をもつ。今、図 3 に示すように基線長 b 、焦点距離 f のステレオカメラで視差が d と計測された場合、対象物の三次元座標は

$$\begin{cases} x = bu/d \\ y = bv/d \\ z = bf/d \end{cases} \quad (1)$$

と表される。この関係から立体的な距離感をつかむことが可

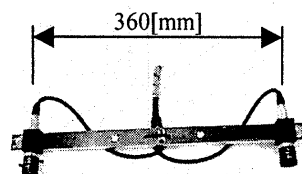


Fig.1 Stereovision system

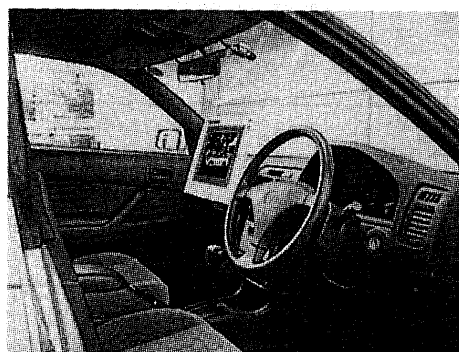


Fig.2 Inner view of experimental vehicle

能となる。

各ピクセルにおける視差を画素値として生成した画像は視差画像と呼ばれる。この生成方法としてはいくつかの手法があるが、本システムではブロックマッチングに基づく領域ベースの手法を採用した。この手法は画像を小領域に分割し、この領域の対応点をパターンマッチングにより求める手法である。パターンマッチングの評価関数には次式に示す SAD(Sum of Absolute Difference)を用いた。

$$SAD(u, v, d) = \sum_{i, j \in \Omega} |I_R(u+i, v+j) - I_L(u+i, v+j)| \quad (2)$$

右画像中のある 1 つのブロック (u, v) を基準として、左画像中の横方向に探索し、上式が最小となる位置を探索することで、視差を検出することが可能となる。これは、2 つのブロック間で各画素の輝度差が最小となるブロックを探索することを意味するので、2 枚の画像間で厳密に輝度が等しくなるような調整が必要となる。これは、LoG フィルター^[3]を用いることで解決できることがよく知られている。

上述のように、真横方向にのみ視差を探索する手法は、真横方向に厳密にエッジ方向拘束を満たすことが前提となる。

Table 1 Specification of stereovision system

Contents	Specification
Base line	360[mm]
Camera	1/3 inch Progressive scan CCD
Lenz	6mm
Matching block size	8 × 8
Disparity image size	320 × 160
Maximum disparity	64[pixel]
Cycle	More than 15Hz
Processor	PentiumIII-1GHz×2

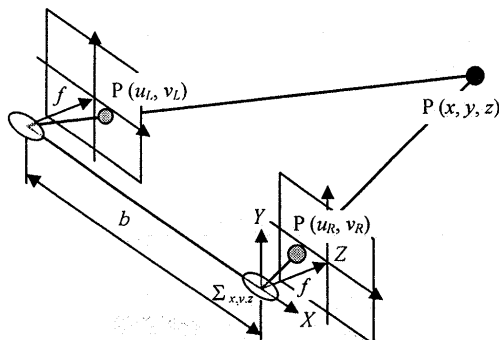


Fig.3 Geometry of parallel stereovision

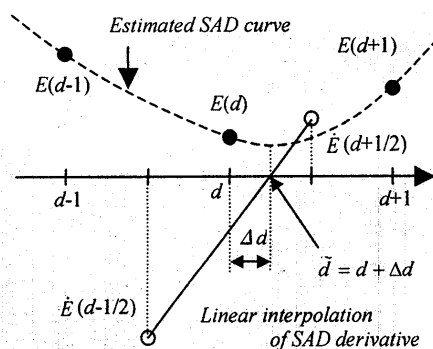


Fig.4 Sub-pixel interpolation of disparity

しかし、たとえ慎重にカメラを平行に設置したとしても、レンズの歪みや設置誤差などにより厳密に平行ステレオ視を実現するのは非常に困難であるため、本システムではあらかじめレンズの歪み、カメラ間の幾何学的関係をオフラインで計算しておき各画素の補正量を LUT に記録しておき、システム作動時はソフトウェアにより仮想的に平行ステレオを実現することで視差の計算を行っている。これらの処理については様々な場で議論されているためここで取り扱わない。

2.2 信頼度評価手法 領域ベースのステレオマッチングを行った場合、領域内の特徴があまり存在しない場合でも何らかの視差を検出してしまうため本報では下記の4つの信頼度評価を行い、正しく視差が計算できているかどうかの確認を行う。

2.2.1 誤差評価 本システムは式(2)で計算される SAD 値が探索範囲内において最小である場所を視差として検出している。したがって、この SAD 値が小さければ小さいほど正しくマッチングできたことを示す。このことから、探索範囲内において最小である SAD 値があるしきい値以上の場合、正しくマッチングができなかったものと見なす。

2.2.1 一貫性評価^[4] 視差探索時は、右画像中のある局所領域が左画像中のどこにあるかを探索することで視差の検出を行った。もし、信頼度の高い探索が行えていと仮定

するならばこの探索で得られた左画像中の局所領域を基準として、右画像内で再度探索を行えば元の局所領域位置と一致するはずである。このように一貫性評価法では、2回の視差探索を行い同一の視差が検出できたかどうかを確認することで信頼度の評価を行う手法である。本システムでは、2回の視差探索で同一の視差とならない場合は正しく視差が検出できなかったものと判断しその視差を採用しないこととした。

2.2.1 テクスチャ評価 ブロックマッチングに基づく探索を行う場合、テクスチャ情報に乏しいブロックから得られる結果は必ずしも正解とは限らないため、本システムでは各ブロックごとにテクスチャが存在するかどうかの評価を行うこととした。

テクスチャ量の評価方法としては、ブロック内の平均輝度に影響されないパラメータとして次式に示すコントラスト評価値を用いた。

$$C(u, v) = \sigma(u, v) / \mu(u, v) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma(u, v)$ および $\mu(u, v)$ はそれぞれ座標 (u, v) のブロック内における輝度の標準偏差および平均輝度を示す。この値がしきい値以下の場合、テクスチャ情報が乏しいものと判断し、検出した視差を採用しないこととした。

2.2.1 距離評価 平行ステレオによる距離推定では、計測距離と視差が反比例する。したがって非常に小さい視差から計算される距離はばらつきが大きく計測距離の信頼性が低いものと考えられる。従って視差があるしきい値以下の場合、その視差は採用しないこととした。

2.3 サブピクセル視差推定 上記までの処理で得られる視差は、離散空間中の演算であるため最良の場合でも pixel 単位での精度しか得られない。一方で式(1)に示したように、距離は視差に反比例するためより遠方での計測を行うためにはサブピクセル精度での視差を推定する必要がある。そこで本システムでは、得られた SAD 分布からサブピクセル精度での視差を推定することとした。

今、図 4 に示すようにピクセル単位の視差推定によって SAD 値が最小となったときの視差を d 、またその位置での SAD 値を $E(d)$ とする。このとき視差が最小となるとは SAD 値が極小となることを意味するので、SAD 値の 2 次微分が零交差する位置を求めることでサブピクセルの視差を求めれば良いとわかる。よって視差 d に対するサブピクセル補正量

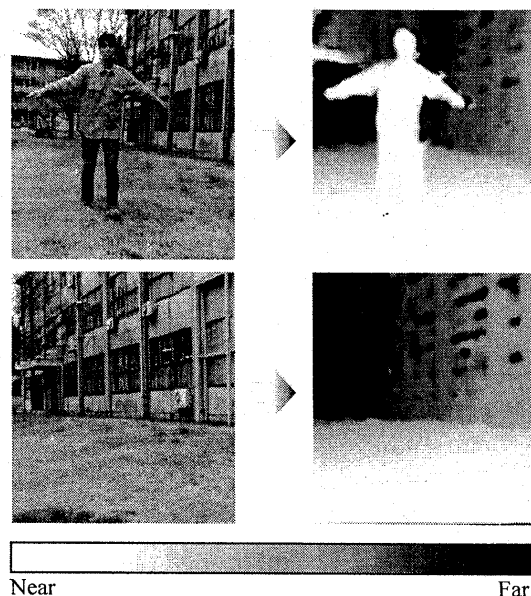
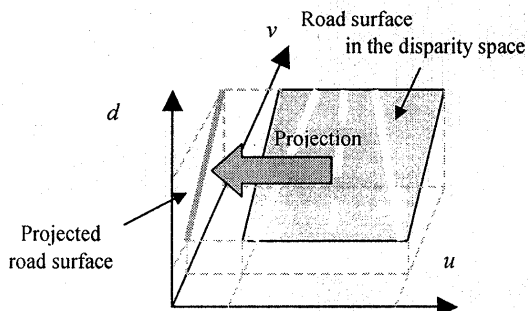
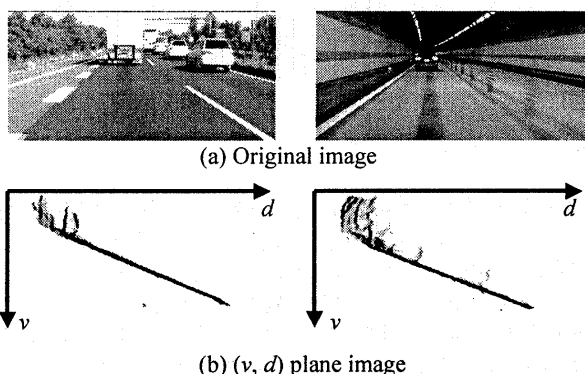


Fig.5 Example of disparity (or range) image

Fig.6 Projection from disparity space to (v, d) planeFig.7 Example of projection from disparity space to (v, d) plane

は

$$\Delta d = \frac{1}{2} \frac{E(d-1) - E(d+1)}{E(d-1) + E(d+1) - 2 \cdot E(d)} \quad (4)$$

となり、これからサブピクセル視差は

$$\tilde{d} = d + \Delta d \quad (5)$$

として計算することができる。

2.4 並列処理による高速化 自動車での障害物検出ではリアルタイム性が要求されるためより高速での画像計測が必要となる。これを行うために解像度の低い画像で視差探索を行うことも考えられるが、画像計測の大きな利点はその解像度の高さであるため、より高解像度での計測が望ましい。これを行うために本システムでは視差探索および信頼度評価に SIMD(Single Instruction Multiple Data)演算および複数 CPU への負荷分散によって高速化を行った。これらの並列処理を用いることで本システムでは Pentium-III 1[GHz] Dual processor 構成のシステムを用いて 320×160 の視差画像を 15Hz 以上の周期で生成することに成功している。図 5 に上述の手法を用いた作成した視差画像(距離画像)の例を示す。

3. 3D 情報からの障害物検出

3.1 地面の検出 次に得られた 3 次元分布から障害物を検出することを考える。ここで本論文では障害物を「道路路面に接し、なおかつ道路路面より上に存在するすべての物体」と定義する。したがって本報において障害物とは、先行車両のみでなく、ガードレール、側壁なども含む物体となる。これらの認識を行う前提として道路路面の高さの推定を行うことが非常に重要な要素となる。これを行う方法として、白線を検出し路面高さを推定する手法[5]も存在するが、一般道においては必ずしも白線が存在するとは限らないため、本報では視差画像から直接道路路面の画像内における高さを推定するアルゴリズムを提案する。

まず視差画像空間 $\Sigma_{u,v,d}$ と現実の三次元空間 $\Sigma_{x,y,z}$ との幾何

学的関係について整理する。ここで視差画像空間とは図 7 に示すように画像座標 (u, v) と視差 d を三次元直交座標系の各軸に持つ空間を示す。今、三次元空間内において次式で示される平面を考える。

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (6)$$

$$(A^2 + B^2 + C^2 = 1)$$

このとき、式(6)に式(1)を代入すると

$$Aau + Bbv + Dd + Cbf = 0 \quad (7)$$

となるので、三次元空間内の任意の平面は視差画像空間に平面として投影されることが分かる。このことから地面は三次元空間内で平面であると仮定すれば、視差画像空間において地面は平面となることが分かる。したがってカメラが路面に対して小さなロール角で設置されていると仮定すれば、視差画像中における道路路面は図 7 のようになり、これを (v, d) 平面に投影したとき、地面は直線として現れることが分かる。本研究では、この性質を利用して路面高さの推定を行う。具体的には 2 章で述べた手法により作成した視差画像を各 v 座標ごとに視差 d のヒストグラムを作成する。このヒストグラムにおける頻度を画素値とし各 (v, d) 座標に割り当てることで (v, d) 平面への投影を行う。図 8 にこの投影の例を示す。

次に、この投影画像から地面領域を示す直線の検出を行う。直線の検出手法としては古くから Hough 変換などの手法があるがここではリアルタイム性を持たせるため、より単純なアルゴリズムを採用することとした。具体的には投影された画像内の v 座標軸上の一点から d 座標軸上の一点へ直線を引き、この直線上の画素値の総和を求める。この総和がもっとも大きくなる直線を求めることで路面高さの検出を行う。またこのとき、車両のピッチング運動が限定された範囲内で起こると仮定し、探索する v 座標軸と d 座標軸上の範囲を限定することで高速化を計ると同時に、確実に地面を示す直線を求めることができる。

今ここで求めた直線を

$$d_v = \alpha v + \beta \quad (8)$$

とすれば、各 v 座標における視差 d が d_v より大きい場合、検出した視差が正確であると仮定すればその画素は路面より 3 次元的に上方にあると考えることができる。しかし各画素単位で考えた場合、ノイズ等の影響により正しく視差を計測

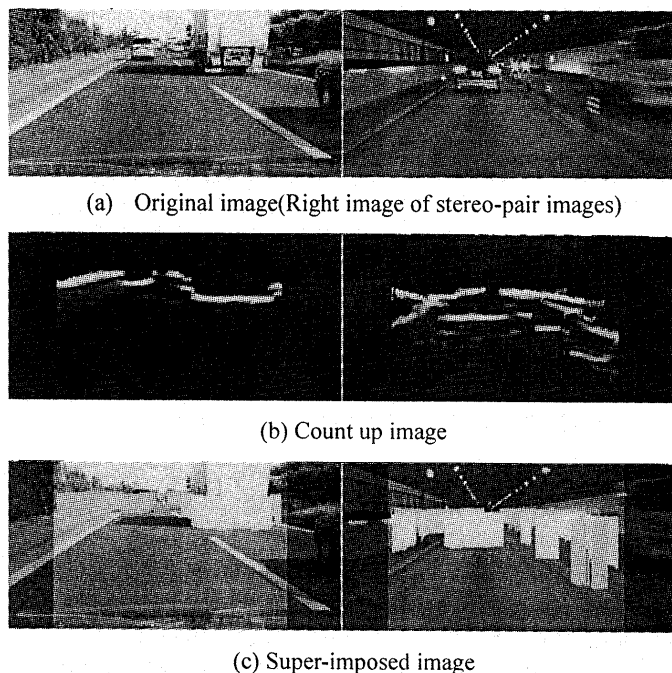
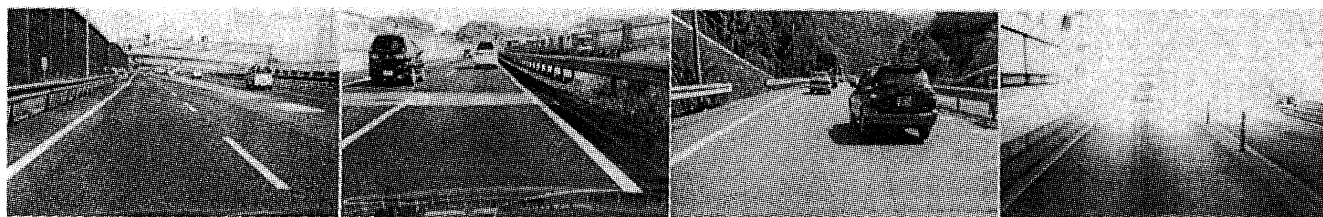
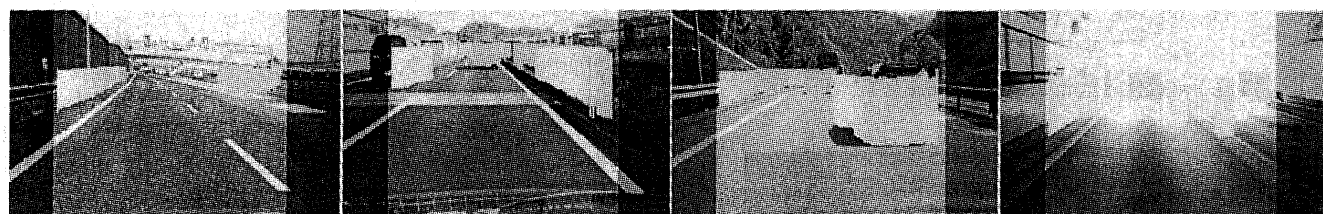


Fig.9 Extraction of obstacles



(a) Original images (Right image of stereo-pair images)



(b) Results

Fig.10 Experimental results of obstacle detection

できなかった場合に障害物を誤検出する可能性が生じると同時に、これのみでは地面に接しているかどうかの判断を客観的に行いにくい。ため次節で述べる手法により障害物の検出を行う。

3.2 障害物の検出 最後に障害物の検出をについて考える。前述のように本報における障害物とは、道路面に接し路面より上にある物体を示す。本システムではこの条件を満たす障害物の検出手法として、地面からある一定の高さを持つ探索ウィンドウを設け、この中に地面と同じ距離(視差)を持つ画素がどのくらいの割合を示すかを計算することで障害物を検出することとした。以下に具体的手法について述べる。

3.1 で述べた手法により、画像内の路面の各 v 座標に対する視差は式(6)により求めることができる。これを用いれば、各 v 座標に対する高さ L の物体の画像内における高さ H_v が

$$H_v = \left(\frac{d_v}{b} \right) L = \left(\frac{av + \beta}{b} \right) L \quad (9)$$

として計算することができる。これを用いて画像内の各 v 座標における各 u 座標で $(v-H) \sim v$ の範囲において d_v と同じ視差を持つ画素数をカウントアップし、対応する (u, v) 座標に H_v に対するカウントアップ値の比率を記録した画像(以後カウントアップ画像と呼ぶ)を作成する。図 9(b)にカウントアップ画像の例を示す。このようにして作成したカウントアップ画像は H_v に対する比率として現しているため、対象物までの距離に依存しないパラメータであるといえ、これは原画像中の路面に障害物が存在する可能性を示すこととなる。したがって、これがあるしきい値以上であるかどうかを判断するだけで、非常に簡単に障害物が存在するかどうかを判断することが可能となる。

図 9(c)はカウントアップ画像を原画像中表示した結果である。ただし、表示方法としてカウントアップ画像から障害物が存在すると判断できた部分を地面位置から高さ L の位置までその距離に対応する色で塗りつぶした物である。

4. 実験

本システムの有効性を確認するために、東名高速道路豊田 IC～名神高速道路～一宮 JCT～東海北陸自動車道荏川 IC 間を往復し、障害物の検出実験を行った。この間は片道約 147[Km]程度であり、往復で約 3.5 時間程度の走行を行った。また実験は日中天気のよい日に行い、途中東名高速道路では

片側 3 車線の道路、東海北陸自動車道では片側 1 車線の道路や数多くのトンネル等さまざまな環境が存在した。さらに、石川県金沢市内の国道 8 号線、および周辺の市道において同様の実験を行った。図 10 に障害物検出の例を示す。

実験の結果、今回の実験環境において障害物を検出できなかった場合は存在せず、本システムの安定性を確認することができた。

5. おわりに

本報では金沢大学工学部において開発を行ったステレオビジョンシステムについて紹介を行い、これを用いた地面高さの推定手法および障害物検出手法の提案を行った。本手法を用いた場合、白線がない一般道においても適応可能である。

高速道路走行および一般道走行による実実験から、日中晴天時の有効性を確認した。今後は夜間における対応や、経年変化によるカメラの内部パラメータ変化もしくはカメラ間のエピソード拘束変化等に対するロバスト性確保について検討を行う予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員研究奨励費および科学研究費補助金(特別研究員奨励費)によって遂行された研究である。

参考文献

- (1) 菅沼, 丁, 尾西, 渡辺, 権, 藤原, ITS 実験車両の開発, ADVANTY2001 シンポジウム, pp.83-86, 2001
- (2) 奥富, ステレオがなぜ難しいか, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.6, pp.773-777, 1998
- (3) 野口, 木村, ステレオ画像画像処理の前処理で使用する LoG フィルタ出力データ圧縮について, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J83-D-II, No.9, pp.1952-1956, 2000
- (4) 岡田, 加賀美, 稲場, 井上, PC による拘束対応店探索に基づくロボット搭載可能な実時間視差画像・フロー生成報と実現, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, pp.896-901, 2000
- (5) M.Bertozzi, A.Broggi, A.Fascioli, An extension to the Inverse Perspective Mapping to handle non-fat roads, IEE International Conf. on Intelligent Vehicles (IV98), pp.305-310, 1998