01 危険を察知する車載画像処理技術

中井宏章　前田賢一
(株)東芝 研究開発センター

ここでは，画像処理・認識技術の車載応用に関していくつかの具体例を紹介する．1つはハードウェアで，最も有力な画像処理プラットフォームとなるものと期待される．同時に画像認識のアルゴリズムも紹介する．それは，車周辺の立体物検出や運転者の顔を認識するものである．これらのハードウェア・ソフトウェアの組合せにより(場合によってはレーダーなどのセンサも含む)，自動車事故の危険性を緩和することが可能になると期待される．

自動車で画像処理に期待される機能

交通安全白書[☆1]によると，交通事故による死者数は近年減り続けており，昨年はほぼ50年来で最少となった．一方で，事故発生件数は6年連続90万件以上，負傷者数も7年連続で100万人を超えるなど過去最高レベルが継続している．死亡者数低減には，シートベルト着用の増加やエアバッグの普及，事故の衝撃を乗員に伝えない車体の開発等，乗員を保護する技術が貢献している．さらに，事故の発生を未然に防いで事故数を減らすには，予防安全という考え方が重要となる．これには，ドライバーの安全意識や運転技能の向上を目指した安全運転教育等の啓蒙活動と，交通事故の発生を防ぐのに役立つような自動車の安全装備を充実させる技術開発の取り組みが行われている．安全装備に関しては，緊急的な状況でも自動車が安全に止まったり危険を避けたりできるように自動車のブレーキや操舵性能を向上させる制御装置等の技術，ドライバーが気づかない危険も含めた自動車周囲の状況をセンシングする技術，これらの情報処理を行う車載用のコンピュータの技術等の開発が進められている．国家プロジェクトとしても，これら技術の研究開発が進められており，高度道路交通システム（ITS：Intelligent Transport System）研究開発での安全運転支援の分野における，先進安全自動車（ASV：Advanced Safety Vehicle）実現の取り組みがよく知られている[☆2]．

予防安全技術が目指す目標の1つに，自動車の高知能化がある．将来は，自動車が自律的に周囲環境を理解し，危険を未然に察知して運転者に適切に伝えたり自動車を制御して事故を回避できるようになると期待されている．センシングは危険を察知するための基礎情報を与えるので大変重要である．おおざっぱに言ってしまうと，交通事故に結びつく危険要因は，自動車の外の交通環境にあるか，自動車の内側（車室内）にあるかである．自動車の外で言えば，たとえば，急に車や人が飛び出してくるといった状況であり，車室内では居眠りや脇見といったドライバーの状態がある．もちろん，両方の場合もあり，たとえば無謀運転などは外部状況を勘案してドライバーの状態が判断されるべきかもしれない．

外の危険原因を察知するには，前方や周囲にある車や人の存在や動きを正確に検知できることが大切である．そのためのセンサとしては，現在，レーダーやソナーとカメラが用いられている．レーダーやソナーは，自動車から電波や光や音波を発射して物体からの反射波を計測する方式であり，自動車から測定のための“波”を発することからアクティブセンシング方式と呼ばれる．一方でカメラは，環境光の物体表面での反射のみを計測し，計測のために光の発射を制御しないためパッシブセンシング方式と呼ばれる．夜間も対応できるよう，可視光だけでなく赤外感度のあるものも用いられている．いずれの方式にも得意不得意がある．レーダーやソナー（後者は近距離に限られる）は対象物までの距離計測精度が高く，先行車両や周囲物との間隔を調節して衝突を防ぐといった車体制御に利用されている．広い範囲を計測する

☆1 平成18年版交通安全白書 http://www8.cao.go.jp/koutu/
☆2 ITSでは交通事故や渋滞といった交通問題の解決を目指した9つの開発分野がある．概要についてはたとえば国土交通省道路局Webサイト http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/index.html 等を参照いただきたい．

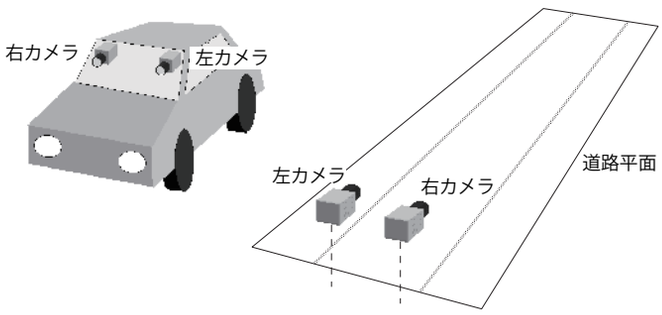
ためには電波や光の発射方向を変えて空間をスキャンする必要があるため，基本的には点あるいは線に沿った限られた計測範囲となる．これに対し，カメラは基本的には 2 次元センサなので計測範囲が広く，詳細な周囲情報の獲得に向いている．走行レーン検出とその応用によるレーン逸脱警報はすでに広く実用化されている．さらには，見つけた物体が車か人かといった種別の判定，物体の動きの計測，道路標識等の認識への適用が期待されている．ただし，距離計測に用いる場合には，遠くなるほど精度が低くなる性質を持つ．よって，高度な安全装備の実現には，これら複数方式のセンサの得失を考慮して組み合わせて用いることが重要と考えられている．

本稿では，カメラを用いた画像処理によるセンシング方式について概説していきたい．人間が自動車を運転するときには視覚に強く依存することからも，カメラを用いた方式への期待は大きいといえる．センシングのための画像処理手法には，まず，見つけたい物体や事象を精度良く検知できることが大切である．また，いかなる条件のもとでも検知性能が落ちないことが求められる．つまり，晴れた日には高精度だが雨が降ったら検知できなくなるとか，まっすぐな道路だと性能は良いがカーブや交差点ではうまく働かないといったことがあれば，使える状況が強く限定されてしまう．さらに，車載機器として実現可能な計算リソースで実時間処理を達成する必要がある．車載のプロセッサを使った場合，カメラで撮影してから検知処理が終わるまでに 10 秒もかかってしまうようでは，実際には役に立たない．これから紹介する画像処理手法は，いずれも上記を考慮して開発されたもので，多様な周囲環境やその変化への対応をいかにして可能にするかにポイントが置かれており，周囲環境や対象物についての仮定をできる限り減らしたり，環境変化に影響を受けることの少ない画像特徴や判定方式を用いるアプローチがとられている．これにより，屋内外，天候や昼夜，多様な対象物に対しても調整が少なく，安定した画像センシングが実現している．

車両前方監視技術 [1)]

自動車の進行方向に走行の妨げとなる立体物があって，これに衝突してしまう場合，死亡事故につながる可能性が高く，損害の程度も甚大となることが多い．具体的には，対向車のはみ出し走行による正面衝突，高速道路での追突事故，また路側から歩行者飛び出しといった状況である．よって，通常の走行時には，前方の立体物を検知してその距離を計測することが重要となる．

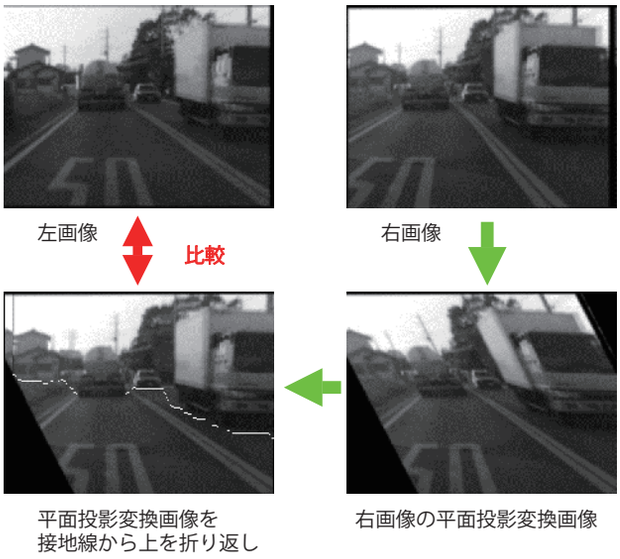
カメラを用いた立体物の検出と距離計測には，2 つ以上のカメラを用いるステレオ視（両眼立体視）が適している．



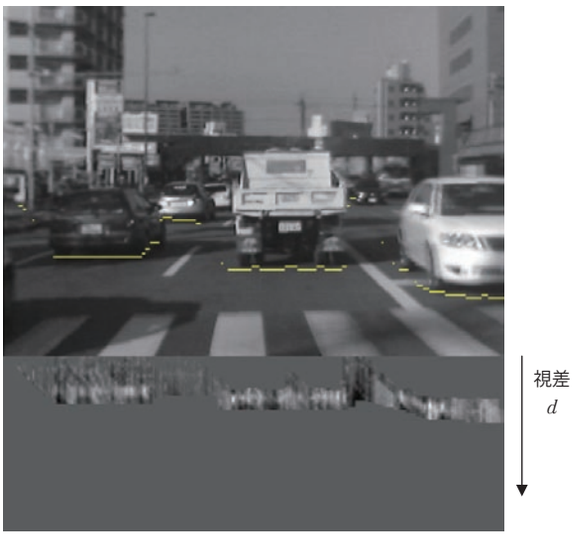
■図 -1　ステレオカメラと道路平面の関係

一般には，1 つのカメラで捉えた立体物が，他のカメラの画像ではどの位置に映っているかという“視差”の情報を利用し，物体の奥行き（距離）を計測する．画素単位の詳細な距離画像（depth map と呼ばれる）を作成する方法が広く用いられている．距離画像から立体物を検出するには，道路平面に投影して多くの距離情報が得られているところを見つけたり，自動車等のモデルを当てはめる等の方法がとられる．距離画像の作成には，画像を小領域に分割して対応点を探索する必要があるが，領域が小さすぎると対応点が決められず距離が求められなくなったり，逆に大きすぎると奥行きが不連続な部分での精度が低下する問題があり，この後の立体物検出の性能に影響してしまう．この不具合を避けるため，車両前方空間が道路平面とその上にほぼ垂直に立つ立体物の 2 種類の要素からなるとモデル化し，画像中での視差推定を全体最適化するロバストなステレオ法 [1)] が提案されている．

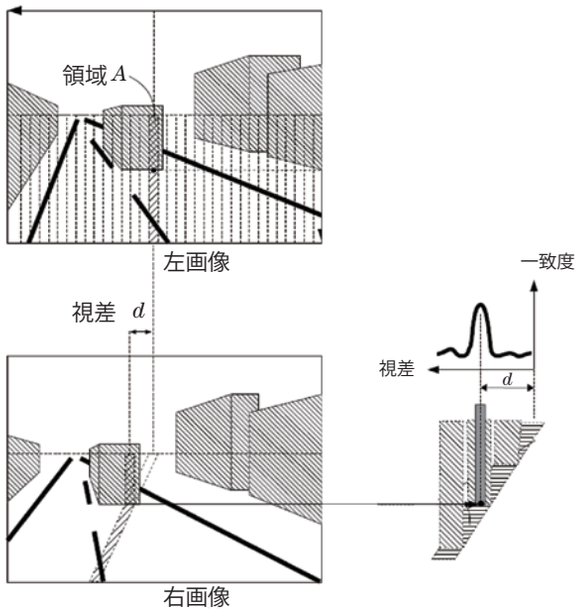
今，カメラ 2 台の光軸と道路面とがおおむね平行であるとすると（**図 -1**），左右画像中の道路面上の点は道路平面拘束 [2)] に基づくアフィン変換により対応付けられる．**図 -2** 右下の画像は右画像を上記拘束に基づき変換をしたものだが，道路面上に限れば画像パターンは左画像（左上）とよく一致している．立体物の像は変換により左側に傾くが，道路面と立体物の境界が分かれば，そこから上の傾きを元に戻すことにより（図左下，白曲線が境界），左上の左画像とよく一致した画像が作成できる．これは道路平面と立体物の 2 要素という単純なモデルで計測空間をよく近似できることを意味する．このモデル化によれば，画像の幅と高さを W, H としたとき，2W × H 個の画素データに基づき境界線の W 個のパラメータを求めるため，データ数 >> パラメータ数の推定問題となり，奥行き推定が非常にロバストに行えるメリットがある．境界線推定の手順は次のようになる．**図 -3** のように道路面上に立体物があり，左画像で立体物と道路面を共に含む縦長な領域 A を考えた場合，右画像で A に対応する領域は図 -3 左下での逆“く”の字に折れ曲



■図 -2　道路面と立体物の境界線をパラメータとする対応付け



■図 -4　境界線推定結果例



■図 -3　視差算出方式

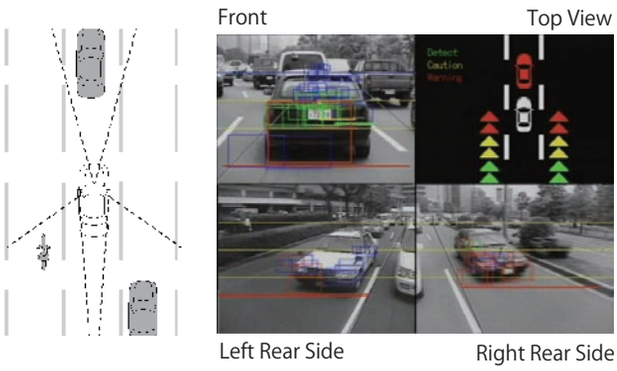


■図 -5　雨天，夜間での検出結果例

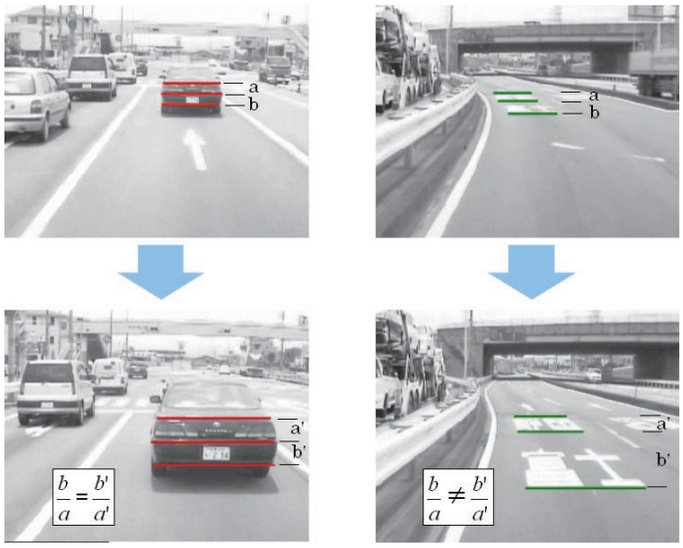
がった領域となる．折れ曲がりの位置は立体物の視差 d で決まる．よって，右下図のように折れ曲がり位置を変えながら左右画像の対応領域の画像の一致度を求めれば，最も一致する位置から視差 d が求められる．**図 -4** に視差推定した結果の例を示す．図中下が横位置ごとの左右対応領域の一致度と視差の関係を示している．境界線の決定は，一致度と視差の空間中での 1 次元の最適化問題なので，動的計画法により効率良く全体最適な解を求めることができる．奥行きの不連続を陽に含む形で全体最適化を行うので，複数の立体物が存在する場合の相互の遮蔽関係など，部分領域だけからでは判定が困難な状況も容易に扱える．図 -4 中黄曲線が推定した境界線である．この方法には，対象物についての仮定が必要ないため種別によらず正確に検出でき，遮蔽や路面反射といった悪条件でもロバストに立体物を検出できる（**図 -5**）．さらに，パソコンでの処理時間が約 15msec/frame（VGA）と計算量が少なく高速実行できる利点もある．

車両周辺監視技術 [3)]

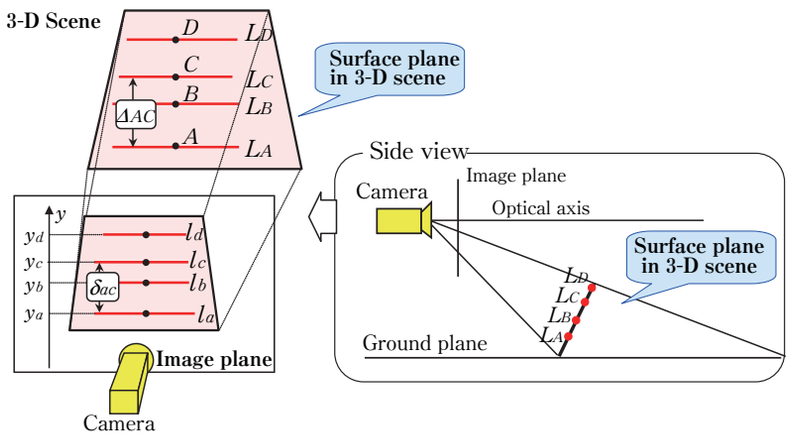
前章は自動車前方の立体物を検出する手法だったが，できれば自動車周囲の広い範囲の立体物を検出できることが望まれる．というのも，進行方向にある立体物との衝突だけではなく，横や後ろの立体物との衝突でも事故が起こるからである．たとえば，走行レーンを変更するときに後側方が確認できず追い越し車両と接触したり，



■図 -6　車両周辺監視システム



■図 -7　立体物判別の簡略な説明



■図 -8　直線上の 4 点 A,B,C,D と画像面への射影

駐車するときに路側物とぶつかったりする．自動車の全周方向をカバーできるようステレオカメラを複数セット搭載できればよいが，カメラを含めた装置や製造のコストからみてユーザに受け入れられる装置の実現は難しい．これを解決できるよう，一方向につきカメラ 1 台で立体物を検出できる複比立体判別法[3]が提案されている．この方法を応用し，自動車の前方と左右後側方の 3 方向に向けて配置された 3 つのカメラ（**図 -6**）を用い，各方向カメラ 1 台で接近車両を検知できる車載周辺監視システムが開発されている．これは先行車や追い越し車両等，各方向で接近する車両を同時に検出し，運転者に知らせることができる（図右上▲印等が車両接近を示している）．

カメラ 1 台で立体物を検出した場合，立体物までの距離を厳密に決めることは原理的には困難となるが，接触するまでにどれぐらいの時間が残っているかは精密に予測できることが知られている．また，道路面の位置が正確に求められれば距離推定も可能となる．複比立体判別法でカメラ 1 台で立体物の有無を判定する方法を簡単に説明する．**図 -7** 中 3 つの水平線分の間隔 a, b は，その線分が立体物のものであれば，接近する場合でも間隔比がほぼ一定に保たれる．これに対し，水平線分が道路面のものであれば，線分の間隔は，遠くの a よりも近くの b の方が大きく広がる．したがって，線分間隔の時間変化から立体物か道路かの判定がカメラ 1 台で行えることになる．具体的には次のように定式化される．同一直線上の 4 点から求められる複比は射影変換に関する不変量である．今，**図 -8** のように道路面あるいは立体物面（道路面に垂直と仮定）に水平線分 4 本が検出されていると，それら線分間距離には以下の関係が成り立つ．

$$I_{ABCD} = \frac{\Delta_{AC}}{\Delta_{AD}} \cdot \frac{\Delta_{BD}}{\Delta_{DC}} = \frac{\delta_{ac}}{\delta_{ad}} \cdot \frac{\delta_{bd}}{\delta_{dc}}$$



車両は正しく検出される　　路面の影の動きは検出されない

■図 -9　検出結果例

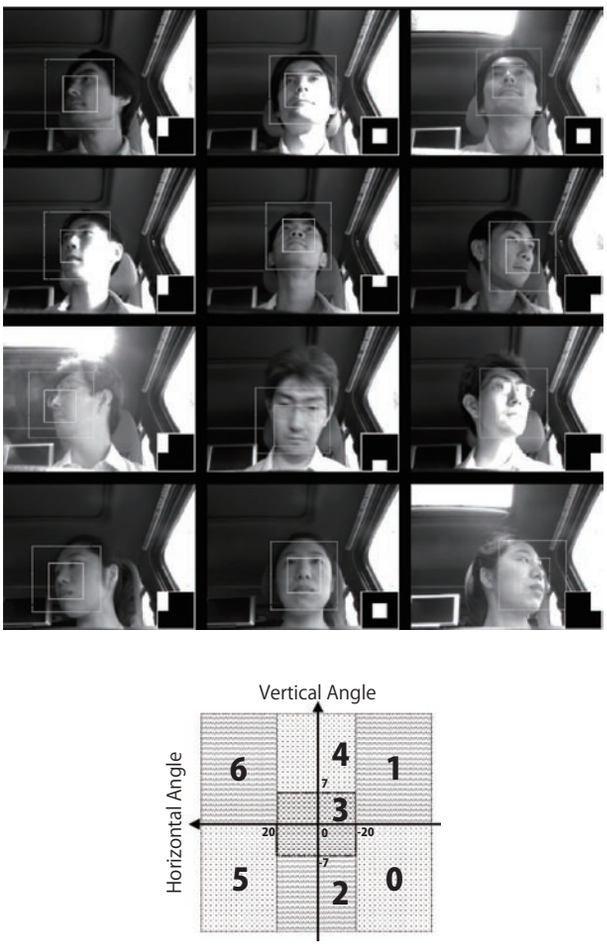
ここで，Δ_{IJ}, δ_{ij} は 3 次元空間あるいは画像面での線分 I, J あるいは i, j の距離である．最右辺は線分が同一平面上にあれば時間に関して不変であること，立体物面の消失線 y= ∞と道路面の消失線 y=0 を線分 l_d の位置として導入することにより，立体物面と道路面に関する 3 本の水平線分の運動拘束式が次のように得られる．

$$\frac{y_a(t_2)-yc(t_2)}{y_a(t_1)-yc(t_1)}=\frac{y_b(t_2)-yc(t_2)}{y_b(t_1)-yc(t_1)}=M_v$$

$$\frac{y_a(t_2)^{-1}-yc(t_2)^{-1}}{y_a(t_1)^{-1}-yc(t_1)^{-1}}=\frac{y_b(t_2)^{-1}-yc(t_2)^{-1}}{y_b(t_1)^{-1}-yc(t_1)^{-1}}=M_h$$

ここで $y_i(t)$ は時刻 t での線分 i の y 座標値である．したがって，画像で観測された水平線分 3 本を追跡し，各 y 位置がいずれの拘束をより満たすかを判断すれば，それら線分が立体物面にあるか道路面にあるかが判定できる．

この方法でも対象物についての仮定が必要ないため，対象の種別や環境条件の変化によらず立体物だけを正確に検出でき，実装や調整が容易というメリットがある．また，接近物との接触の可能性を知らせる警報装置では，ドライバーがスイッチオフしたり，かえって事故を誘発してしまうことのないよう，誤報をできる限り減らすことが重要である．動き情報を用いた単純な近接判定だけでは排除困難である路面上の影の動きも誤検出することなく（**図 -9**），正しい近接車両検出が実現されている．

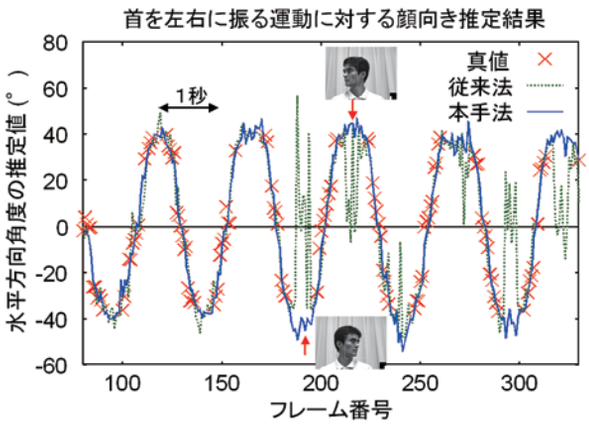


■図 -10　さまざまな条件での顔向き推定結果

運転者顔向き推定技術 [4)]

カメラで人の顔を撮影してその向きを計測できれば，ドライバーが脇見をしていないかどうかが判定でき，事故回避に役立てられる．ここでは，車室内のカメラ 1 台を用いた顔向き推定技術を紹介する．

顔向きの推定には，あらかじめ顔の向きごとに顔辞書を作成し，部分空間法による画像マッチングを用いて，どの向きに一番近いかを判定する．多くのドライバーやさまざまな照明条件で撮影した顔画像から作成した顔辞書を用いることにより，ドライバーの相違や環境に影響を受けずにロバストに顔向き推定できる方法が実現できる．顔の向きは 7 つにクラス分けし（**図 -10** 下），各クラスで顔領域全体と 5 つの顔の部分特徴領域の辞書を作成する．まず，顔全体を検出する顔辞書を用いて画像中の顔領域を検出する．その後，顔の部分特徴の辞書を用い，両目，鼻，口両端の 5 つの部位を検出する．個別の顔特徴部位を検出して動きを追跡でき，サイズが異なったり変形しても頑健に位置合わせが行える画像マッチング手法を用いている．そして複数の顔特徴の追跡結果から，



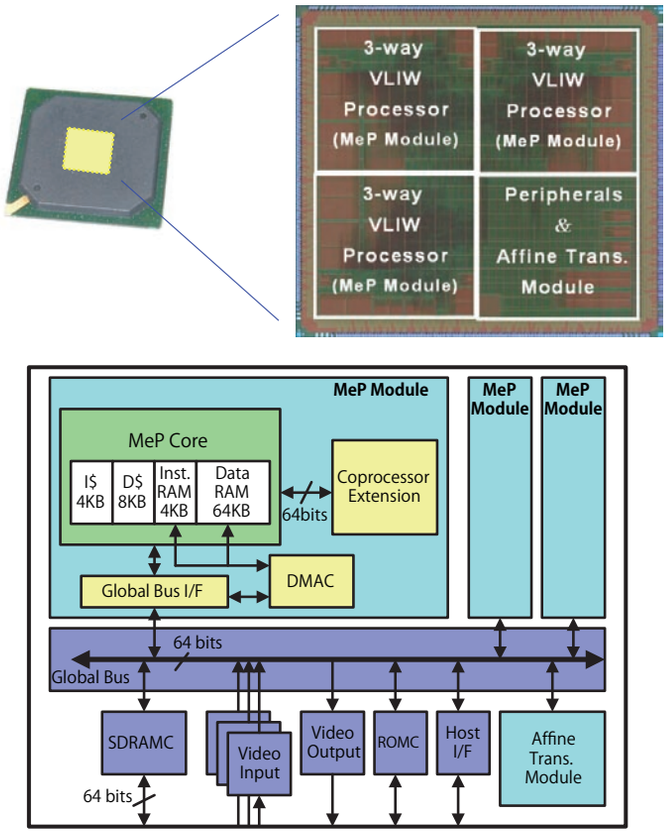
■図 -11　頭を左右に振る運動時の推定結果

因子分解法を用いて顔の形状と姿勢（顔向き）とを分離し，顔向きの推定を行う．図 -10 に示すように，さまざまな照明条件やドライバーに対しても非常に安定して正しく顔向きを推定できる（図中の各シーン右下に示されている白色矩形が顔向き推定の結果）．また，顔向き推定の精度や安定性も高く（**図 -11**），従来法（ピラミッド画像による顔探索と顔特徴点探索）では失敗するような場合でも正確に顔向き推定できる．この方法もパソコンで 50msec/frame と高速実行できる．

画像認識 LSI Visconti [5)]☆3

自動車に搭載される電子制御ユニット（ECU: Electronic Control Unit）の数は近年急激に増加しており，数十個以上もの ECU が 1 台の自動車に搭載されるようになった．自動車に搭載される機能ごとに個別に ECU を開発するのは膨大なコストが必要となり，複数機能を 1 つに集約する等，ECU 数を減らす方策が必要となっている．画像認識用 ECU についても同様で，実時間処理でき（高性能）かつ故障しない（高信頼性）という車載の条件のほかに，処理の自由度（フレキシビリティ）が高いこと，普及のために低価格であることが重要である．フレキシビリティが高いことは開発期間短縮にもつながりコスト低下の効果も大きい．したがって，ソフトウェアを入れ替えるだけで簡単に処理を変更できる汎用プロセッサタイプの画像処理 LSI の実現が望まれる．高度な画像認識には高性能のプロセッサ，たとえば最新鋭パソコンの CPU と同程度の性能が必要となるが，動作周波数が高いパソコン用 CPU は温度耐性や耐振動性の面で車載の厳しい動作条件を満たすことができない．よって，動作周波数は低いが高度な並列処理により高性能を達成

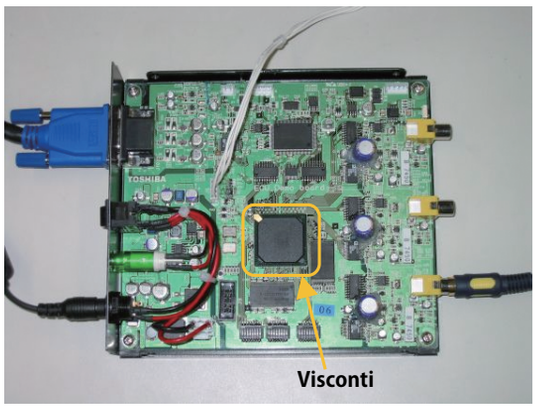
☆3　Visconti は（株）東芝の登録商標



■図 -12　Visconti チップ写真とアーキテクチャ概略

する方向で組み込み用高性能プロセッサの開発が続けられている．その 1 つとして，車載条件で動作し（動作周囲温度，消費電力，耐振動），低価格（ダイサイズが小さい）という特徴を持つ組み込み用画像認識プロセッサ Visconti を紹介する．

Visconti は，画像認識に多く共通する演算を最適効率で実行できるよう，プロセッサ設計にさまざまな工夫が盛り込まれている．概要について**図 -12** を用いて説明する．1 チップに 3 つのメディア処理モジュールが含まれており，各処理モジュールには SIMD（Single Instruction Multiple Data）と呼ばれる並列演算命令をサポートするコプロセッサ拡張とローカルメモリが含まれ，画像認識で頻繁に用いられるフィルタリング，マッチング，ベクトル演算といった処理が最適な効率で実行できる設計となっている．動作周波数 150MHz での処理性能は 18 GOPS 以上でパソコン用 CPU に匹敵するメディア処理性能を発揮するが，平均消費電力は約 1W と小さく，動作周囲温度 -40℃ ～ +85℃ の車載動作条件を満たす．さまざまな周辺回路も内蔵しており，画像認識用のさまざまな機能が 1 チップに集積されている．また，ROM に保存されたソフトウェアを実行するため，ソフトの変更だけでさまざまな画像処理を実行できる．特定



■図 -13　評価用画像処理ハードウェア



■図 -14　レーン変更時の脇見運転警報

用途専用の LSI のように処理に応じてゲートレベルの設計をする必要がなく，用途に応じて動作を切り替えることも可能である．図 -12 にチップ写真とアーキテクチャ概略を，**図 -13** に評価用に試作した画像処理ハードウェアを示す．

本稿で紹介した画像認識アルゴリズムはすべて Visconti 上で動作するソフトウェアが開発されており，これらを単純に組み合わせるだけでも高機能な安全装置が容易に実現できる．たとえば，追い越し車両との衝突回避を目的とする後側方監視システムでは，追い越し車両が通り過ぎるごとに常にアラームを鳴らしてしまうと，ドライバーが煩わしく感じてしまう警報装置となり，スイッチオフされてしまう可能性がある．顔向き推定を組み合わせて，ドライバーが後方確認をしていない場合にだけ発報するようにすれば，ドライバーにとって好ましい警報装置にすることができる（**図 -14**）．

まとめ

本稿では自動車内外の立体物や顔を検知する画像処理技術を述べてきた．実際に役立つ予防安全装備を実現するには，このような検出技術に加えて，検出した物体や事象が何であるかを認識する技術と，危険な状況になり得るかを判断する技術が必要になる．たとえば，ドライバーが気づきにくい夜間の歩行者を検知できる運転支援システム[6]では，遠赤外線カメラを用いて歩行者らしき画像領域を検出し，位置関係の変化を計測すると同時に，人物であるか否かを大きさと形状から認識し，真に歩行者と衝突する可能性があると判断した場合に警報が発せられる．このように，センシング技術による検知に加えて高度な認識や判断が組み合わされることにより，今後多くの予防安全装備が実現されていくと考えられる．また，ハードウェア面においても，車載用プロセッサやカメラ・レーダー等のセンサが低コストで実現することにより，高度な安全装備が多くのユーザに広く使われるようになり，交通事故数の減少に大きく貢献するようになると期待されている．

謝辞　本記事作成に協力いただいた（株）東芝 研究開発センター窪田進氏，岡田隆三氏，山田貢己氏，同社自動車システム事業統括部 今井康介氏の各位，ならびに Visconti 開発およびその応用に協力されたすべての方に感謝の意を表する．

参考文献

1) 窪田 他：車載ステレオ障害物検出システムのための実時間処理可能な全体最適化アルゴリズム，画像の認識・理解シンポジウム，MIRU2006, S3B-1 (2006).
2) Hattori, H. et al. : Stereo without Depth Search and Metric Calibration, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, Vol.1, pp.177-184 (2000).
3) 岡田 他：複比と消失線に基づく車載単眼障害物検出，信学論 D-II, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2165-2175 (2004).
4) Yamada, M. et al.: Head Pose Estimation Using Adaptively Scaled TemplateMatching, IAPR Conference on Machine Vision Applications, MVA2005, pp.285-289 (2005).
5) Miyamori, T. et al.: Development of Image Recognition Processor Based onConfigurable Processor, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.17, No.4, pp.437-446 (2005).
6) 辻：画像処理による夜間の運転支援システム，信学誌，Vol.89, No.3, pp.272-277 (2005).

（平成 18 年 12 月 4 日受付）

中井宏章（正会員）　hiroaki.nakai@toshiba.co.jp

平成 2 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程前期修了．同年（株）東芝入社．現在，同社研究開発センターマルチメディアラボラトリー勤務．コンピュータビジョンおよびその産業応用の研究開発に従事．電子情報通信学会会員．

前田賢一（正会員）　ken.maeda@toshiba.co.jp

昭和 51 年東京工業大学理工学研究科電気工学専攻修士課程修了．同年東京芝浦電気（株）入社．現在，（株）東芝 研究開発センターマルチメディアラボラトリー勤務．パターン認識，コンピュータビジョンの研究開発に従事．電子情報通信学会会員．IEEE Senior Member.