

画像認識プロセッサ Visconti と、その安心・安全への適用事例

中井宏章[†] 田辺 淳^{††} 古川 賢司[†]
 小坂谷 達夫[†] 宮森 高^{††} 谷口 恭弘[†]
 宮本 幸昌^{††} 前田 賢一[†]

安心・安全についてのコンピュータビジョン技術への期待に応えるには、ユーザが求める機能を実現する様々な画像処理手法の確立が必要であるが、一方、この技術の恩恵を誰もが広く日常生活で享受できるようにするには、高度な画像処理の実装に適した高性能・小型で安価かつ信頼性の高い画像処理プラットフォームの実現が大変重要である。本論文では、様々な画像処理を効率的に実行できるアーキテクチャを持つ組み込み用画像認識プロセッサ Visconti と、これを用いた ITS、セキュリティ等の産業分野での開発事例について報告する。

Image Recognition LSI Visconti and Its Applications to Safety and Security

HIROAKI NAKAI,[†] JUN TANABE,^{††} KENJI FURUKAWA,[†]
 TATSUO KOZAKAYA,[†] TAKASHI MIYAMORI,^{††} YASUHIRO TANIGUTI,[†]
 YUKIMASA MIYAMOTO^{††} and KEN-ICHI MAEDA[†]

In this paper, we present several examples of practical developments in image recognition technologies for use in automotive and security applications. The first example is image processing hardware; where Visconti is perhaps the most efficient platform for visual sensing techniques. The second comprises various image processing algorithms for the sensing of surrounding obstacles to automobiles, human faces and conditions. Combination of such hardware and software form a smart sensor; which are widely expected to become pervasive in many aspects of daily life.

1. はじめに

CCD や CMOS カメラの小型化・高信頼性化・低価格化の目覚ましい進展により、多くの産業分野で新たに画像処理機器の利用が検討され始めている。たとえば自動車では、ドライバから見えにくい死角エリアやブラインドコーナでの視認性向上のために、すでに多くの車種にカメラが搭載されているが¹⁾、危険な状況を事前に察知してドライバに知らせることで不慮の事故を防ぐセンシング機能の実現が近年期待されるようになってきた。このような先進の安全機能の実現には、前方や周囲の走行車両や歩行者、電柱等の周囲の構造

物や駐車車両等、危険状況の原因となりうる物体を正しく検知し距離計測できる手段が必要であり、レーダを用いた能動的センシングの実用化が進められている。一方、物体の種別や存在する方向、あるいは走行レーンや標識等の周囲情報を詳細に得るにはカメラを用いた画像センシングが優れることから、今後、これら複数種類のセンサが組み合わされて自動車に搭載されるようになって見込まれ、高度な安全装置が実現すると期待されている。画像処理による物体検知・物体認識は、他にもインフラ系 ITS やバイオメトリクス、屋内外の監視カメラによる侵入や異常の自動検知等、安心・安全に関わる産業分野の基盤技術の 1 つとして日に日に期待が高まっている。コンピュータビジョンを自動車やセキュリティ等の産業分野で応用するには、現実には困難な課題が 2 つ存在する。1 つは、ダイナミックに変化する屋外環境でも多種多様な物体や状況を確実に検知できるアルゴリズム (ソフトウェア)、もう 1 つは、車載や屋外等の厳しい周囲環境条件でも動

[†] 株式会社東芝研究開発センター

Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

^{††} 株式会社東芝セミコンダクター社半導体研究開発センター

Center for Semiconductor Research & Development, Semiconductor Company, Toshiba Corporation

作可能で高性能・高信頼性・低価格のすべての条件を満たす画像処理ハードウェアである。本論文では、著者らがこれらの課題に取り組んだ研究開発事例を述べる。まず、安心・安全のための画像認識システムを実現するうえで基盤となる画像処理ハードウェアについて、続いて様々な目的に応じた画像認識アルゴリズムの開発事例について述べる。

2. 画像処理ハードウェア

2.1 車載用組み込み画像処理 LSI

コンピュータビジョン技術の適用が今後最も期待される安心・安全の分野として自動車がある。自動車用途で実現が望まれる画像認識機能は、前方や周辺の車両や歩行者の検出、走行レーンの検出や交通標識の認識、車内の乗員検知等様々であり、その画像処理アルゴリズムも異なる。一方で、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、数十個から 100 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^{2),3)}。よって機能ごとに個別 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 数を減らす方策が求められている。画像認識用 ECU についても同様で、処理の自由度 (フレキシビリティ) の高い画像処理 LSI の実現が望まれる。車載用画像処理 LSI に求められる性能としては、実時間処理でき (高性能) かつ故障しない (高信頼性) ことが必須であるが、上記のように異なる複数機能を実現できたり複数タスクを切り替えて処理できたりするような自由度と、普及のために低価格であることが重要となる。車載用途のハードウェアが満たすべき仕様は種々の応用の中でも最も厳しいものの 1 つといえ、上記を満たす画像処理 LSI が実現すれば、他の様々な目的に使用することも容易である。本節では、自動車画像認識機能を実現できる組み込み LSI 開発の動向について概説する。

一般に、特定用途の組み込み LSI を実現するには、大別して、1) 専用ハードウェア、2) リンコンフィギュラブルプロセッサ、3) プログラマブルプロセッサの 3 種類の方法がある⁴⁾。

1) は処理を回路として組み込むので、処理効率や消費電力の面だけでなく量産時のコストでも最適な LSI を作成でき、幅広い応用で用いられている (車載画像処理ではたとえば文献 5))。ただし、LSI は製造後に修正や調整ができず、処理が複雑になるほど開発や検証に長期間を要するため、開発初期に処理が確定できない場合や性能向上等のための試行錯誤が必要な場合

には、LSI の作り替えという大きなリスクをとまなうこととなる。また、目的用途以外には転用できないため、複数機能を実現できるような自由度は持たない。

2) は、LSI 製造後に回路を定義したり変更できるもので、FPGA (Field Programmable Gate Array)^{6),7)} がよく知られる。実装可能な処理の自由度とハードウェア化が容易なことから、画像処理に限らず様々な用途での使用実例があり、また専用 LSI 開発時の機能検証にも多く用いられている。一般に、リコンフィギュラブルプロセッサは、処理を定義できる大規模な論理回路群のほかにマイクロプロセッサやメモリを持ち、並列化が容易で効率が求められる処理部分を論理回路群に実装し、全体制御や判断等の複雑な処理をプロセッサ部分に担当させることが多い。処理の大半が論理回路群で実現できる場合、後述のプログラマブルプロセッサのような命令フェッチやデコードのための回路が不要で消費電力が低く抑えられる利点があるが、論理回路の組合せに高い自由度を持たせるためには結線等の回路の規模が大きくならざるをえず、量産時のコスト面ではデメリットがある。また、処理実行中に回路構成を変更できなければ、機能の数だけ処理装置 (ECU) が必要となってしまう。処理実行中でも動的に回路構成を変更できるリコンフィギュラブルプロセッサがあり⁷⁾、自由度の高い組み込みシステムを実現できる手段として大きく期待されているが、複数処理の切替え時には回路再構成のための時間遅れの問題があり、実時間処理への適用にはまだ課題があるといえる。

3) はソフトウェアプログラムを実行するもので、市販コンピュータに用いられる汎用 CPU や組み込み用 DSP 等がある。これらは、ソフトウェアの切替えだけで容易に処理が変更できるため、自由度の面では最も優れる。並列演算命令により画像処理も高速実行できるが、汎用 CPU は動作周波数を高くすることで高性能を達成するため、温度耐性や耐振動性の面で車載のような厳しい条件で用いることができない。よって、動作周波数を低く抑えながら、画像処理については高度な並列処理を達成する方向で組み込み用プログラマブルプロセッサ開発が進められている。近年では、多数の並列演算器で構成される特定画像処理用の専用エンジンを内蔵するものや (たとえば SuperVchip⁹⁾ や EyeQ¹⁰⁾)、小さなプロセッサをアレイ状に複数並

Intel MMX/SSE や Motorola AltiVec 等が有名。

車載仕様を満たす DSP に関しては、Visconti 開発時の事前調査では著者らが想定する画像認識機能 (3 章参照) を実時間処理できる性能の DSP は存在しなかった。

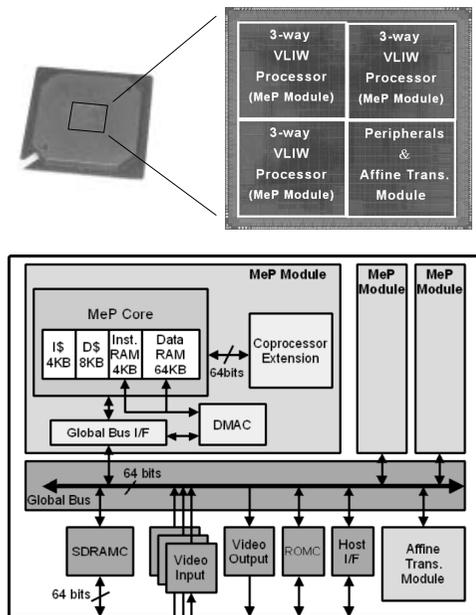


図 1 Visconti チップ写真とアーキテクチャ概略

Fig. 1 Micrograph and block diagram of Visconti.

べて高並列処理を実現するプロセッサが発表されている（たとえば Vision Instruction Processor¹¹⁾ や IMAP-CE¹²⁾）。前者は、設計仕様から外れる画像処理でも専用エンジンが有効利用できるとは限らず、処理内容によってはエンジンが利用できない等、自由度や効率の面で問題が残る。後者は、データ並列度が高い単純な画像処理では高い処理性能を発揮できる反面、条件分岐後に処理内容が変化する等、実応用でよく見られる複雑な処理での並列化が困難で、タスク分割処理等の粗粒度並列化に課題が残っている¹²⁾。

2.2 Visconti の設計方針と概要

我々は、車載用途に適したプログラマブルな組み込み用画像認識プロセッサ Visconti を開発した（図 1）^{13),14)}。前節で述べた組み込み画像処理での諸課題の解決を図るため、i) 複数の画像認識機能の処理量解析結果をプロセッサ設計に反映させることにより、車載条件（動作周囲温度、消費電力、耐振動、低価格）を満たしながらも性能面で過不足のない最適なプロセッサを実現する、ii) 様々な画像認識に適した自由度の高いプロセッサとするため、実時間処理でタイムクリティカルとなる種類の演算のみを最小限にハードウェア化し、他の演算はできる限りソフトウェア処理としながらプロセッサアーキテクチャの工夫で高性能化を図る、iii) 細粒度の並列処理効率の追求だけでなく、タスクレベルの粗粒度の並列処理も容易に実現できることを設計方針とした。Visconti 開発のベースには、目的に

応じて最適なプロセッサを設計できる MeP（Media embedded Processor）プラットフォームを使用している^{15),16)}。開発には MeP インテグレータというツールを用い、LSI ハードウェア設計データやソフトウェア開発環境等を自動生成する¹⁷⁾。これにより、開発期間短縮や設計資産流用により開発コストを低減させることができるだけでなく、設計途中での性能シミュレーションが容易に行え、複数のプロセッサアーキテクチャ候補の中から最善のものを選択することが可能となった。

具体的な Visconti 設計の流れは次のとおりである。汎用 CPU（パソコン等）で実装したソフトウェアアプリケーションでの処理量見積りと類似のプロセッサ設計時の性能評価結果とを考慮し^{18),19)}、アプリケーションのうちで専用ハードウェアとして実装すべき部分とソフトウェア処理として残すべき部分を切り分ける。処理量見積りでは複数の画像認識処理（3.1 節～3.3 節および文献 20）を用いた。画像認識で最も共通するのはフィルタリング、マッチング、ベクトル演算といった基本処理であり、これらを効率良く処理するには積和演算の高速化と高速なメモリアクセスの実現が必要となる⁸⁾。MeP では性能向上のための演算器拡張に複数の選択肢があるが¹⁷⁾、Visconti では複数データを同時処理する積和演算機能付き SIMD（Single Instruction Multiple Data）演算命令をサポートし、この SIMD 演算命令 2 つと通常の RISC（Reduced Instruction Set Computer）命令 1 つの 3 命令を同時実行できる VLIW（Very Long Instruction Word）型プロセッサモジュール（MeP モジュール¹⁵⁾）を搭載することとした。VLIW 命令セットについても複数候補について性能シミュレーションを行い、処理速度と回路規模の観点から最適なものを選択した¹³⁾。さらに、この MeP モジュールをチップ上に 3 個搭載し、複数レベルの並列性を実現している。つまり、モジュール構成によるタスクレベル、個々の VLIW プロセッサによる命令レベル、SIMD 型命令によるデータレベルの 3 レベルの並列性をアーキテクチャに持つことにより、データや命令レベルの細粒度の並列化はもとより、タスクレベルの粗粒度の並列化も含めて高速化が図れるプロセッサとなっている。また、各 MeP モジュールにローカルメモリ領域と DMA コントローラ

Visconti の各 MeP モジュールは最大 3 命令同時実行可能（3-way VLIW）であるが、同時命令実行数の実測値は 1.59～2.01¹⁴⁾と従来に比べて優っており（たとえば 4-way VLIW SIMD アレイプロセッサの例¹²⁾では実測値が最大 1.66）、画素並列部分以外のループ制御等も含めた全体処理に関して効率の良い命令セットである可能性が示されている。

表 1 Visconti 諸仕様
Table 1 Specifications of Visconti.

Feature	Specification
Technology	0.13 μm CMOS 6-layer metal
Peak performance	18 GOPS (6 GOPS \times 3 processors)
Clock frequency	150 MHz
No. of transistors	21 million (17 million for memory)
On-chip memory	260 Kbytes
Power consumption	1 W @ 1.5 V
Chip size	6.98 mm \times 6.98 mm (48.7 mm ²)
Package	456 pin PBGA

を実装することにより、double buffering によりデータ転送遅延が遮蔽できる等、メモリアクセスの効率化を実現している。一方、レンズ歪補正や平面投影ステレオ（3.2 節参照）で多用される画像幾何変換については上記 MeP モジュールアーキテクチャの工夫では高速化が困難であったため、アフィン変換モジュールとしてハードウェア実装することとした¹⁶⁾。ただし、幾何変換専用とするのではなくデータ変換用のテーブル引き処理にも転用できる回路構成とすることにより、幾何変換以外の処理でも有効利用できるモジュールとなっている。

Visconti の仕様概要を表 1 に示す。信頼性の高い車載用画像処理ハードウェアの実現には、まず故障原因となる冷却ファン等の機械構成要素をなくすことが重要で、このため表中の動作周囲温度や低消費電力の条件を満たす必要があった。加えて、量産採用に適した価格範囲の制約条件のもとで本節記載のプロセッサ設計開発を行った結果、動作周波数 150 MHz でのピーク性能は 18 GOPS で、3 章で述べる様々な画像認識機能を実時間処理できる性能を持つが、平均消費電力は約 1 W と小さく、動作周囲温度は $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ という、車載用途で必須の諸仕様を満たすプロセッサ Visconti が実現した。また、周辺回路としてメモリコントローラや 3 系統の画像入力、VGA 画像出力等、画像認識用の様々な機能も 1 チップに集積することにより、周辺部品数を減らして画像処理ハードウェア全体のコスト低下にも貢献できるプロセッサとなっている。参考として、評価用に試作した画像処理ハードウェアを図 2 に示す。これまで述べたように、Visconti は実際の複数アプリケーションの処理量解析からアーキテクチャが決定された処理自由度の高いプログラマブルプロセッサであり、車載用途のみにとどまらず広い産業応用で最適な対コスト性能が得られるプロセッサとなっている。

3. 画像認識システムの開発事例

前述のようなプログラマブルな画像処理ハードウェア

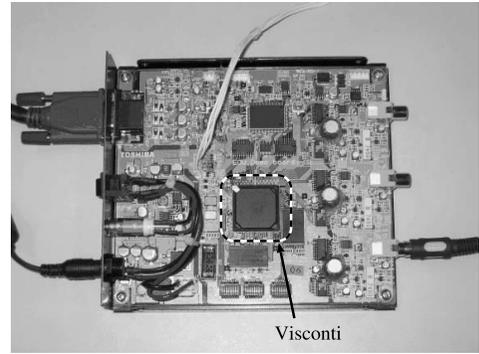


図 2 画像処理ハードウェア
Fig. 2 Prototype processing hardware.

アとカメラとの組合せにより、様々なビジョンシステムが容易に構築できる。本章では、4 つのシステム開発事例について概要を述べる。いずれも Visconti 画像処理ハードウェア上に実装されている。ソフトウェア（アルゴリズム）面では、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開発の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、安定動作する画像認識システムが実現できる。

3.1 車両周辺監視システム

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 3）を用いた車載周辺監視システムが開発されており²¹⁾、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）。このような警報装置では、ユーザがスイッチオフしたり、かえって事故を誘発してしまったりすることのないよう、誤報をできる限り減らすことが重要である。このシステムでは複比立体判別法²²⁾を用い、各方向での接近車両すなわち立体物をカメラ 1 台で検知するようになっている。単眼で立体物有無を判定する方法を端的に説明する。図 4 中 3 つの水平線の間隔 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一定に保たれる。これに対し、水平線分が道路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が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できる。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 5 のよう

表 2 最適化による計算時間の比較 (1 frame)

Table 2 Effect of optimized implementation on execution time.

処理段階	最適化前 [μ s]	最適化後 [μ s]
エッジ方向計算	10,162	3,884
水平線分検出	74,849	2,697
水平線分追跡	101,369	2,793
面方向判定	7,694	1,232
全処理 (上記以外も含む)	232,058	14,956

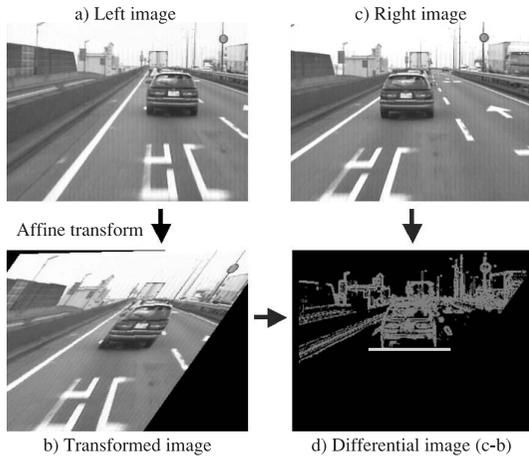


図 6 平面投影ステレオ法の流れ

Fig. 6 Schematic view of planar-projective stereo method.

3.2 前方障害物検出システム

道路走行時の追従車両制御や衝突回避を実現するには、遠方の先行車両や障害物を検出し、距離を正確に計測する必要がある。画像からの距離計測にはステレオ視が適しており、これを基本とした前方障害物検出システムの開発事例を次に紹介する²⁵⁾。このシステムでは、障害物検出に平面投影ステレオ法²⁶⁾を用い、天候や照明条件の変化への頑健性を実現している。通常のステレオ視では、カメラの共通視野にある物体の位置を求めるため、特徴点抽出とその近傍でのステレオ対応付けが必要となる。ところが、カメラ視点位置により抽出される特徴点が変わったり対象物の見え方が変わったりする、横断歩道等の繰返し模様がある等により正確な対応付けが困難となり距離計測を誤るといった問題がある。平面投影ステレオ法では、この対応付け問題を回避できる。図 6 を用いて処理の概要を説明する。画像中のすべての物が道路平面上にあると仮定し、一方のカメラ画像 (a) を他方のカメラ位置から見た画像に平面射影変換する (b)。変換画像と他方のカメラの画像 (c) とを比較すると、道路面にあるという仮定が成り立たない立体物の部分だけに画像の違いが生じ、差分等の単純な処理だけで障害物位置が求め

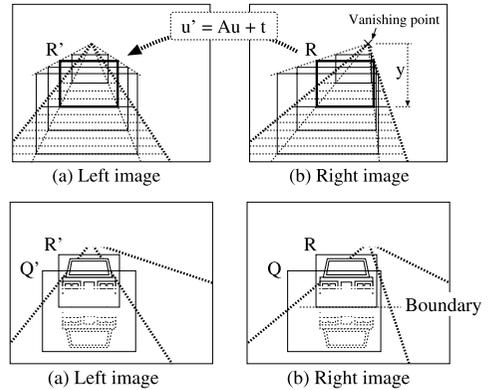


図 7 対応探索領域と接地位置決定

Fig. 7 Image regions for boundary determination.



図 8 悪条件下での先行車両検出例 (雨天, 夜間)

Fig. 8 Examples of detection results under severe imaging conditions (rain, night).

られる d)。これを発展させ、2つのカメラが前方遠方の同方向を向いている場合には上記平面射影変換が単純なアフィン変換に近似できる²⁷⁾、画像中の道路位置から視差を予測できるため水平方向の対応探索が不要で遠近方向の探索だけで済む、対象物位置決定のための対応領域のサイズを大きくとることができる (図 7 上) といった利点により、雨天や夜間等の悪条件のもとでも先行車両の検出が正確に行える (図 7 下, R-R' は対応し Q-Q' は対応しない)。さらに、左右カメラ画像と平面投影画像との 3 画像間でのブロックマッチングにより検出立体物の検証処理ができる、道路勾配の変化による路面の誤検出を抑制できる等、様々な天候や道路条件でも検出性能が劣化しない障害物検出方式が実現できる (図 8)。この方式は、画像の幾何変換のほかは差分処理やブロックマッチング等の並列処理に適した演算から構成されるため、Visconti 画像処理ハードウェアを用いた実装では、前節と同様の SIMD 命令の多用とデータ転送の効率化を行うとともに、アフィン変換モジュールの活用による画像幾何変換の高速化によって、毎秒 30 フレームの実時間処理が実現している。

本節で述べた前方障害物検出のほかにも、夜間の歩行者検出システム²⁸⁾や、integral image 手法を利用し

た高速ステレオ法²⁹⁾、複数部分追跡による割込み車両検出³⁰⁾等の数々の車載用物体検出機能が Visconti 画像処理ハードウェアを用いて実現されており、異なった数々の画像処理アルゴリズムに対して Visconti が適したアーキテクチャを持つことが示されている。

3.3 顔認証システム

近年、セキュリティ分野では生体情報を用いた個人認証技術が注目を集めているが、なかでも顔画像による個人認証は、非接触に認証でき、同時に顔画像が記録できる等、利便性の面で優れた方式である。個人認証を正確に行うには、顔の向きや表情の変化、周囲環境の照明変化に影響を受けにくい高精度で頑健なパターン認識処理が不可欠である。これまででは、計算量の多さから高性能のパソコン用 CPU を用いた装置が開発されてきたが³¹⁾、この高精度なパターン認識を Visconti を用いて実現した例を述べる³²⁾ (図 9)。

顔認証処理の流れは顔検出と顔認識の 2 段階からなる。顔位置の検出精度は認証性能に大きな影響を与えるため、顔部品形状情報(エッジ)と顔部品の濃淡パターン情報を組み合わせて判定する高精度な顔検出方法を用いる³³⁾。まず、円形状を持つ画像特徴のみを安定に検出できる分離度フィルタにより特徴点候補(瞳と鼻孔の 4 点)を検出する。図 10 に円形分離度フィルタの模式図と顔特徴点候補の検出結果を示す。図中丸印が検出された特徴点候補である。次に正しい候補点を選択するため、目鼻の各部品パターンから辞書を作成するとともに、目じりや眉毛等候補点と誤りやすいパターンからも辞書を作成し、正しい辞書と誤り辞書との両者を用いた部分空間法により濃淡パターンの検証を行うことで、誤検出を減らしロバストに特徴点を検出する。図 10 中 (+) で示された目鼻の 4 点が選択された特徴点を示す。この特徴点を基準とし

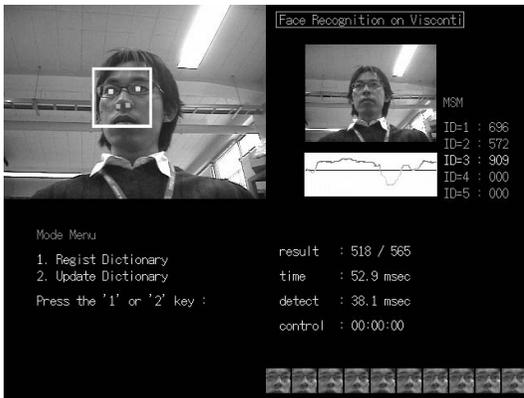


図 9 顔認証システム
Fig. 9 Face identification system.

て、アフィン変形により向きと大きさを正規化して顔パターンを切り出す。

高精度な顔認識の実現には、顔パターンの変動による影響が少ない方式を用いることが重要である。このシステムでは、制約相互部分空間法 (CMSM: Constrained Mutual Subspace Method) による動画像系列を用いた顔認識を行う^{34),35)}。まず CMSM の元となる相互部分空間法 (MSM: Mutual Subspace Method) の概要を図 11 を用いて説明する。従来では、1 枚の静止画像と登録人物の顔パターン分布(部分空間)との類似度を計算するため、顔向きや表情変化により入力と登録データの距離が大きく変化する場合があつて安定な認識が難しい(上図 Conventional と下図破線)。これに対して動画像系列を用いた手法では、入力にも分布を用いるため、顔向きや表情変化によるパターン変動に対しても類似度計算が安定になる(上図 MSM と下図実線)。

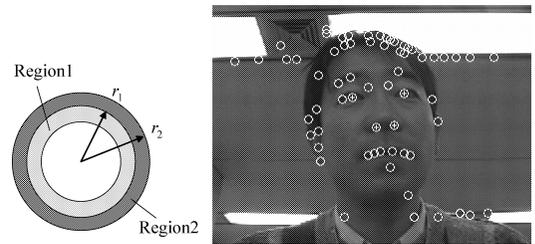


図 10 円形分離度フィルタと顔特徴点候補
Fig. 10 Circular separability filter and detected candidates for feature points.

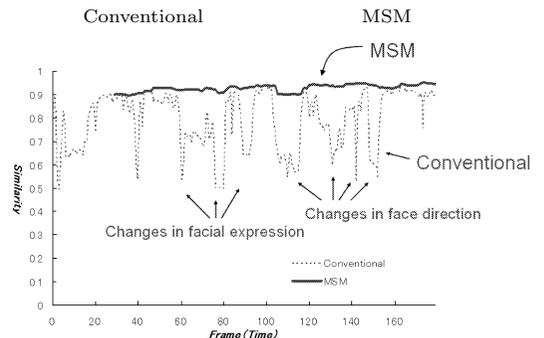
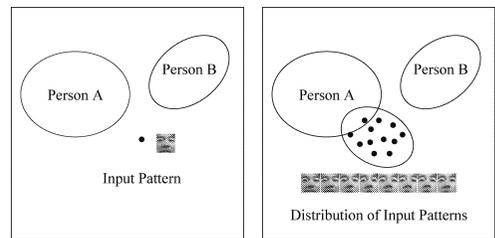


図 11 相互部分空間法の概念図と類似度計算例
Fig. 11 Schematic view of Mutual Subspace Method.

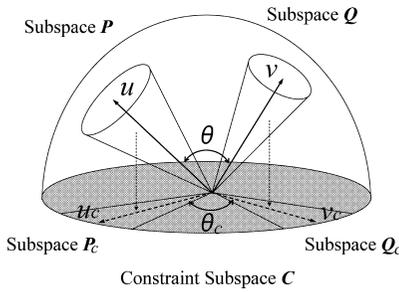


図 12 制約相互部分空間法

Fig. 12 Conceptual diagram of Constrained Mutual Subspace Method.

さらに CMSM では、登録時と認証時で照明条件が異なるといった照明条件変動にも対応できるよう、登録パターンと入力パターンの部分空間の類似度を計算する前に、照明条件を抑制できる制約部分空間へ射影する処理を行う。具体的には、2つの部分空間 P, Q を考え、あらかじめ様々な環境で撮影したデータをもとに差分部分空間と呼ばれる部分空間を計算し、射影後の部分空間 P_C, Q_C との類似度を計算することで認識を行う。図 12 に制約相互部分空間の概念図を示す。類似度には、2つの部分空間のなす角度として定義される正準角 θ

$$\cos^2 \theta = \sup_{\|u_C\| \neq 0, \|v_C\| \neq 0} \frac{|(u_C, v_C)|}{\|u_C\|^2 \|v_C\|^2}$$

を用いる。ここで u_C, v_C は $u_C \in P_C, v_C \in Q_C$ を満たすベクトルである。

以上の顔認証処理においては、顔検出時の全画面探索と顔認識のための高精度なベクトル行列演算が演算量の面で大部分を占める。Visconti を用いて実時間処理を実現するため、画像処理や内積演算の並列化に加え、演算の固定小数点化、3つの処理モジュールへのタスクの動的割当て等の最適化を行った³²⁾。固定小数点化は認証性能への悪影響が予想されたが、浮動小数点演算を用いた場合に比べて遜色ない認証性能が得られることが実験により確かめられている。また、Visconti ではタスクレベルの粗粒度の並列化処理が容易なことから、顔が未検出のときは3つの処理モジュールすべてを用いて全画面探索し、いったん顔が見つければモジュール1つで近傍追跡しながら残りのモジュールで認識処理を行うといったタスクの動的割当てを行い(図 13)、秒 20 フレームの準実時間で顔検出から認識までを行えるシステムが実現している。

この顔認証システムには冷却ファンといった機械構成要素が小さいため、盗難防止や乗員検知等の車載応用に使えるだけでなく、小型で低価格、設置場

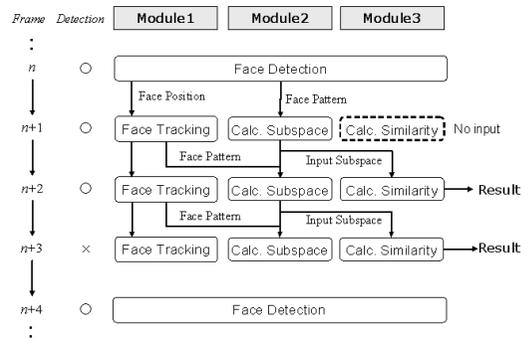


図 13 顔認証処理でのタスクの動的切替

Fig. 13 Dynamic task assignment to three MeP modules.

所を選ばない顔認識システムとして、家庭用の高機能インターホン、情報家電やロボット等、従来では適用が難しいと考えられていた幅広い応用分野での顔認識技術の展開が期待できる。

3.4 就寝モニタリングシステム

高齢者の増加や睡眠時無呼吸症候群、乳幼児突然死症候群といった睡眠障害や病状への関心の高まりから、睡眠時の生理状態を自動監視できる装置の実現が望まれており、病院や老人ホーム等でのフェイルセーフ用途も含め、一般に広く在宅で使用できるような操作が容易かつ安価な装置の実現が期待されている。このような睡眠時の呼吸計測では、非接触計測により被験者が真に自然な状態で睡眠できること、オペレータの操作なしに長時間の連続計測が可能であることが重要であり、これを実現する画像計測による就寝モニタリングシステムが報告されている³⁶⁾。このシステムでは、暗環境でも S/N の高い呼吸信号が獲得できるような画像計測手法を用いるとともに、睡眠中の呼吸停止や非呼吸体動等の自動判定を実装することで長時間の自動計測を可能としている。

処理の流れは、1) 呼吸計測のための ROI を被験者胸部に自動設定する(図 14 上図)、2) ROI 内の差分変化量から被験者の呼吸波形を獲得し、同時に呼吸周期や画像変化量を算出する、3) 被験者の就寝状態を判定する、の3段階からなる。呼吸波形はフレーム間絶対値差分の ROI 内和から求めるが(図 14 $D(t)$)、被験者の吸気呼気の動作切替わり時に極小となるため、この極小のタイミングで $D(t)$ 波形を正負反転させることにより呼吸波形 $R(t)$ を求める(図 14 $R(t)$)。この呼吸波形 R のゼロ交差間隔から呼吸周期 T は容易に計測できる。また、呼吸計測においては睡眠中の寝返り体動やトイレのための離床・着床といった所在変化は避けられないことと、暗環境にて S/N の高い呼吸波形を獲得するために、最適な位置に ROI を自動設

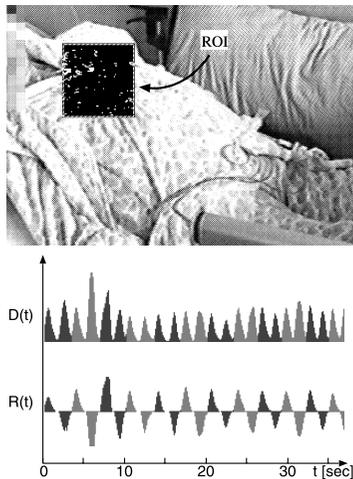


図 14 呼吸計測のための ROI 設定例と呼吸計測例

Fig. 14 Examples of ROI-setting result and respiration signal.

定できる機能が不可欠となる。ROI 設定は、フレーム間差分値を一定時間積算して最大の積算値となった領域に設定する方式としている。さらに、呼吸間隔、呼吸波形パワースペクトラム、明度分布ヒストグラムの時間変化等を利用し、正常呼吸、無呼吸、非呼吸体動、所在変化等の被験者の就寝状態を自動判別する機能を実装し、危険な無呼吸状態が発生したときには警報を発することができるシステムとなっている。実際に就寝時の呼吸計測を行った例を図 15 に示す。この計測手法を用いて特別養護老人ホームで長期のフィールドテストを実施しており、睡眠時無呼吸症候群の疑いがある入居者を新たに検出する等、その有用性が実験により確かめられている。フレーム間差分を用いる手法は、オプティカルフローやブロックマッチング等の動き情報を用いる従来手法（たとえば文献 37）) に比べて、胸部腹部の動きを個別に求める等の呼吸計測の緻密さの面では劣るものの、自然な睡眠を妨げない暗環境での計測能力が高く、カメラで物理的にモザイク処理を施す等のプライバシー保護策を行った場合でも計測できる可能性がある³⁸⁾等の利便性で優れる。さらに、この呼吸計測手法は Visconti の MeP モジュール 1 つを用いて毎秒 30 フレームの実時間処理が可能であり、Visconti の MeP モジュール 3 つと市販の安価なカメラ 3 台を同時使用することで、病院や特別養護老人ホーム等 1 室に複数の入院者がある場合でも 1 つの画像処理ハードウェアで同時に最大 3 人までモニタリングできるといったコスト面での利点もあり、被介護者モニタリングや診断前スクリーニングといった多数の利用者が見込まれる用途に適しているといえる。

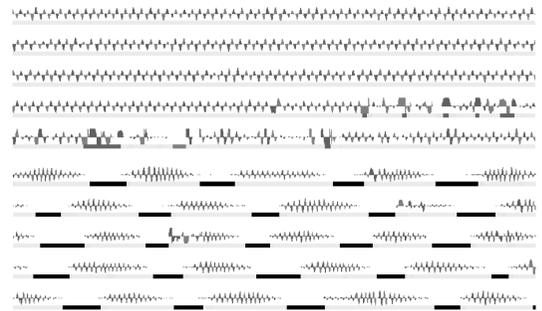


図 15 呼吸計測例（上段：健康者安静睡眠時，下段：睡眠時無呼吸症候群患者）

Fig. 15 Examples of respiration measurement results (upper: a healthy person, lower: a patient of Sleep Apnea Syndrome).

4. おわりに

本論文では、画像処理ハードウェアと画像認識アルゴリズムの具体的な開発事例を通じ、コンピュータビジョン分野での著者らの安心・安全への取組みの一端を報告した。安心・安全に関する分野ではコンピュータビジョンへの期待がますます高まる一方で、より高度なアルゴリズムとそれを実行できる高性能ハードウェア、これらで実現するシステムの普及のため頑健性と低コスト化が強く求められるようになってきている。この期待に応えるには、様々な応用で共通するアルゴリズムや演算を吟味してハードウェア設計に取り入れ、利用可能なリソースを無駄なく最大限に利用できるシステムを開発する等、ハード・ソフトの両面での同時進行的な研究開発が今後重要になっていくと考えられる。

謝辞（株）東芝セミコンダクター社ブロードバンドシステム LSI 開発センター武田信之氏、同社研究開発センターマルチメディアラボラトリー岡田隆三氏、同社自動車システム技術開発部山岸智氏、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) 水澤ほか：車載カメラの技術と自動車への応用，自動車技術，Vol.59, No.5, pp.65-70 (2005).
- 2) 天野ほか：電機・電子技術の自動車への応用，自動車技術，Vol.59, No.5, pp.4-9 (2005).
- 3) Scharnhorst, T.: Management of the E/E Complexity by Introducing a Software Development Process and the Open System Architecture, 6th Braunschweig Conference on Automation, Assistance and Embedded Real Time Platforms for Transportation, AAET, Vol.1,

- pp.11–21 (2005).
- 4) Dasu, A., et al.: A Survey of Media Processing Approaches, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.12, No.8, pp.633–645 (2002).
 - 5) Hanawa, K., et al.: Development of Stereo Image Recognition System for ADA, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.177–182 (2001).
 - 6) Tessier, R., et al.: Reconfigurable Computing for Digital Signal Processing: A Survey, *Journal of VLSI Signal Processing*, Vol.28, No.1, pp.7–27 (2000).
 - 7) Todman, T.J., et al.: Reconfigurable computing: Architectures and design methods, *IEE Proc. Computers & Digital Techniques*, Vol.152, No.2, pp.193–207 (2005).
 - 8) Kisacanin, B.: Examples of Low-Level Computer Vision on Media Processors, *The 1st IEEE Workshop on Embedded Computer Vision* (2005).
 - 9) 村松ほか：小型システムのための高性能画像処理 LSI “SuperVchip” の開発，第 7 回画像センシングシンポジウム，pp.5–10 (2001).
 - 10) Stein, G.P., et al.: A Computer Vision System on a Chip: A case study from the automotive domain, *The 1st IEEE Workshop on Embedded Computer Vision* (2005).
 - 11) Raab, W., et al.: A 100-GOPS Programmable Processor for Vehicle Vision Systems, *IEEE Design & Test of Computers*, pp.8–15 (2003).
 - 12) Kyo, S., et al.: An Integrated Memory Array Processor Architecture for Embedded Image Recognition Systems, *32nd Intr. Symposium on Computer Architecture, ISCA '05*, pp.134–145 (2005).
 - 13) Tanabe, J., et al.: Visconti: Multi-VLIW Image Recognition Processor based on Configurable Processor, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference, CICC*, pp.185–188 (2003).
 - 14) Miyamori, T., et al.: Development of Image Recognition Processor Based on Configurable Processor, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.17, No.4, pp.437–446 (2005).
 - 15) Media embedded Processor.
<http://www.MePcore.com>
 - 16) Miyamori, T.: A Configurable and Extensible Media Processor, *Embedded Processor Forum* (2002).
 - 17) 長田ほか：MeP における SoC 開発手法，*東芝レビュー*，Vol.58, No.5, pp.9–13 (2003).
 - 18) Kondo, Y., et al.: A 4GOPS 3Way-VLIW Image Recognition Processor Based on a Configurable Media-processor, *International Solid-State Circuits Conference, ISSCC*, digest of technical papers, pp.148–149 (2001).
 - 19) Takano, H., et al.: A 4GOPS 3 Way-VLIW Image Recognition Processor Based on a Configurable Media Processor, *IEICE Trans. ELECTRON*, Vol.E85-C, No.2, pp.347–351 (2002).
 - 20) Taniguchi, Y., et al.: Automatic Rear and Side Surveillance System Using Image Processing, *6th World Congress on ITS*, Paper No.3026 (1999).
 - 21) 古川ほか：車載用画像処理 LSI を用いた車両周辺監視システム，第 9 回画像センシングシンポジウム，pp.227–232 (2003).
 - 22) 岡田ほか：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).
 - 23) Fukui, K.: Edge Extraction Method based on Separability of Image Features, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E-78-D, No.12, pp.1533–1538 (1995).
 - 24) Ullah, F., et al.: Orientation Code Matching For Robust Object Search, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E84-D, No.8, pp.999–1006 (2001).
 - 25) Nakai, H., et al.: A Practical Stereo Scheme for Obstacle Detection in Automotive Use, *International Conference on Pattern Recognition, ICPR*, Vol.3, pp.346–350 (2004).
 - 26) 小野口ほか：平面投影ステレオ法を用いた道路領域抽出，*情報処理学会研究報告 CVIM-93-7*，pp.61–68 (1995).
 - 27) 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).
 - 28) 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).
 - 29) Hattori, H., et al.: Dense stereo matching in restricted disparity space, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.118–123 (2005).
 - 30) 仲野ほか：多数の領域追跡による割り込み車両検出，第 8 回画像センシングシンポジウム，pp.275–280 (2002).
 - 31) 顔照合せセキュリティシステム FacePass .
<http://www3.toshiba.co.jp/snis/scd/fps/>
 - 32) 小坂谷ほか：Visconti を用いた顔認識システムの開発，第 10 回画像センシングシンポジウム，pp.483–488 (2004).
 - 33) 福井ほか：形状情報とパターン照合の組み合わせによる顔特徴点抽出，*信学論 D-II*，Vol.J80-D-II, No.8, pp.2170–2177 (1997).
 - 34) 福井ほか：制約相互部分空間法を用いた環境変化にロバストな顔画像認識—照明変動を抑える制約部分空間の学習，*信学論 D-II*，Vol.J82-D-II, No.4, pp.613–620 (1999).
 - 35) 小坂谷ほか：制約相互部分空間法を用いた顔認

識システムの開発と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.3, pp.951-959 (2004).

- 36) 中井ほか: 動画像処理による呼吸モニタリングシステム, 信学論 D-II, Vol.J83-D-II, No.1, pp.1-9 (1999).
- 37) 西田ほか: 視覚情報による睡眠時無呼吸症候群診断手法, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.2, pp.274-281 (1998).
- 38) 中井: 呼吸計測装置, 特願 2004-214965.

(平成 18 年 5 月 10 日受付)

(平成 18 年 11 月 10 日採録)

(担当編集委員 鷲見 和彦)



中井 宏章 (正会員)

1990 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理学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主任研究員。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。



田辺 淳

2000 年慶應義塾大学大学院計算機科学専攻修士課程修了。同年 (株) 東芝入社。現在, セミコンダクター社半導体研究開発センター主務。組み込みプロセッサの研究開発に従事。



古川 賢司

2001 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 (株) 東芝入社。現在, 同社研究開発センターに勤務。コンピュータビジョン, ITS 画像処理の研究に従事。日本ロボット学会会員。



小坂谷達夫 (正会員)

2001 年東京工業大学大学院精密工学科知能システム科学専攻修士課程修了。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, 顔画像認識の研究開発に従事。2002 年度山下記念研究賞受賞。



宮森 高

1987 年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 (株) 東芝入社。同社半導体技術研究所, マイクロエレクトロニクス研究所にて, マイクロプロセッサの研究開発に従事。1996~1998 年米国スタンフォード大学に客員研究員として滞在中, プロセッサに密結合するリコンフィギュラブルアレイプロセッサを研究する。現在, 同社セミコンダクター社半導体研究開発センター主幹。コンフィギュラブルプロセッサ, およびマルチメディア SoC の研究開発に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



谷口 恭弘

1995 年大阪大学大学院電子制御機械工学専攻博士課程修了。工学博士。同年 (株) 東芝入社。同社研究開発センターマルチメディアラボラトリーにて画像処理, 認識の研究開発に従事。現在, 同社研究開発センター研究企画室参事。電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。



宮本 幸昌 (正会員)

1986 年工業高校卒業。同年 (株) 東芝入社。現在, 同社セミコンダクター社半導体研究開発センター主務。計算機アーキテクチャ, および画像系や通信系 SoC のハードウェアの研究開発に従事。



前田 賢一 (正会員)

1976 年東京工業大学大学院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技監。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。