

## 3次元視覚システムVVV研究開発 —概要—

富田文明<sup>1</sup>、吉見 隆<sup>1</sup>、植芝俊夫<sup>1</sup>、河井良浩<sup>1</sup>、角 保志<sup>1</sup>、  
松下俊夫<sup>1</sup>、市村直幸<sup>1</sup>、杉本和英<sup>2</sup>、石山 豊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>電子技術総合研究所

<sup>2</sup>新情報処理開発機構

<sup>3</sup>スタンレー電気(株)技術研究所

ロボット、医療福祉、VRなど、多分野・多目的に利用できる汎用の3次元視覚システムVVV (Versatile Volumetric Vision) の開発を進めている。本システムは、3次元シーンの3次元の距離・形状計測、3次元物体の3次元の位置・姿勢の認識、さらに、物体が動く場合はその3次元の運動の追跡等の処理を一貫的に実行する。そして、対象物に関して制限がない。すなわち、対象物は、任意の3次元形状(図形、多面体から自由曲面体まで)であり、表面に模様、光沢があってもよく、任意の3次元位置・姿勢にあり、不特定の背景に他の不特定の物体と共存し、部分的に隠れて見えなくてもよい。システム開発の基本方針は、機能(処理と表現)と専門領域に依存する知識の分離である。それによって、汎用的でかつ実用的であり、そして、常に成長するシステムを実現できると考える。

## R&D of 3-D Vision System VVV —Overview—

Fumiaki Tomita<sup>1</sup>, Takashi Yoshimi<sup>1</sup>, Toshio Ueshiba<sup>1</sup>, Yoshihiro Kawai<sup>1</sup>, Yasushi Sumi<sup>1</sup>,  
Toshio Matsushita<sup>1</sup>, Naoyuki Ichimura<sup>1</sup>, Kazuhide Sugimoto<sup>2</sup>, and Yutaka Ishiyama<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Electrotechnical Laboratory

<sup>2</sup>Real World Computing Partnership

<sup>3</sup>Stanley Electric Co., Ltd., R&D

We are developing a versatile 3-D vision system VVV (Versatile Volumetric Vision) which can be used for many purposes in many fields (robotics, medical and welfare, VR, etc.). The system consistently executes the processes of sensing range data of a scene, describing 3-D shape of objects in the scene, and recognizing objects by matching with object models. Also, Moving objects can be tracked by repeating these processes. We make no assumption on objects; objects may be any size, any shape (figures, polyhedra to free forms), covered with textured or glossy surfaces, at any position, in any direction, together with other objects, and partially occluded by them. The basic policy of development is to separate visual functions (processing and representation) from domain dependent knowledges for the system to be versatile, practical, and growing.

## 1 まえがき

コンピュータに人間の眼と同じような視覚機能を持たせようとするコンピュータビジョン (CV) の研究は、1960年代の人工知能 (AI) 研究の開始とともに始まった。30年以上経過している。そして、研究の初期に開発された2次元の図形を認識する2次元視覚技術は、対象とする図形と背景が容易に分離でき、図形の位置決めや分類を目的とする場合には、文字やバーコードの読み取りなどで威力を発揮している。産業界でも、半導体に代表されるように、大量生産型の工程の自動化に多くの実績を挙げてきた。しかし、現在、顧客の製品ニーズの多様化に対応する多品種少量型の生産には適応できなくなっている。すなわち、生産ラインの全自動化ができないのが現状である。自動化のシンボルであったはずの産業用ロボットが、人間にとってかわられる例も出てきている。このことが、ひいては、工場の海外移転の大きな理由の一つとなっている。この問題を解決できるのが、任意の環境で任意の立体を認識できる3次元視覚技術である。しかし、そもそも3次元視覚が実用されている例は極めて少なく、実際、多くの現場からその早期実現が求められている[1]。来たる高齢化、少子化時代の労働者不足に対処するためにも、事は緊急であると考えられる。

学界においては、CV、AI、ロボットは、始めは広い意味のAIとして研究されたが、問題点が明らかになるにつれて研究が分化し、学会、会議も別々になり、今日に至っている。しかし、CVは、本来、AI、ロボットの情報源であり、CVは、AI、ロボットに使えるようなものでなければならない。また、逆に、人間の情報源の大半が視覚情報であることを考えると、AI、ロボットが、CVを使わないのでは無理がある。現在、CV、AI、ロボットがともに壁にぶつかっているとされているが、CVを使えないでいること、使えるCVがないことが大きな原因の一つである。

また、3次元の立体をコンピュータによって表現するという意味では、CVはCADやVRの分野と共通する部分があり、共通化、もしくは、相互変換可能とすべきである。今後、マルチメディアの発展に伴って、現実存在するものの3次元モデルを作成する需要が急増すると思われるが、これを人手によって合成するには限界がある。し

たがって、CVによる3次元モデルの自動生成は、CAD、VR等の3次元データベース作成のキーテクノロジーになると考えられる。

そこで、我々の研究グループでは、ロボット、医療福祉、VRなど、多分野・多目的に利用できる汎用の3次元視覚システムVVV (Versatile Volumetric Vision) の開発を進めている[2]。この3次元視覚の基本プロセスを図1に示す。

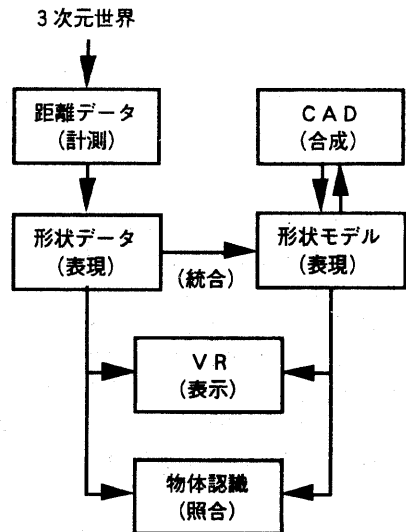


図1 3次元視覚の基本プロセス

まず、3次元視覚センサによって、観測している環境の3次元距離を計測する。次に、この距離データから環境に存在する物体の面、境界線、頂点などの特徴を抽出し、その3次元形状を計測する。そして、この形状データと予め登録している物体の形状モデルとの照合を行い、その3次元の位置と姿勢を決定する。いわゆる物体認識である。さらに、物体が動いている場合は、以上の処理を継続的に繰り返すことによって、その3次元運動を追跡する。3次元視覚センサとしては、複数台のTVカメラを用いるステレオビジョンと、スリット光を物体に投影するレンジファインダがある。物体のモデルの登録には、CADによって合成する方法と、自由曲面体などCADでは合成しにくい形状の場合には、実物の3次元形状を計測し、それを形状モデルとして利用する方法がある。

そして、汎用であるためには、少なくとも対象

物に関して制限がないことが必要条件となる。すなわち、対象物は、

- (1) 任意の3次元形状（図形、多面体から自由曲面体まで）である、
  - (2) 表面に模様、光沢があってもよい、
  - (3) 任意の3次元位置・姿勢（6自由度）にある、
  - (4) 不特定の背景に他の不特定の物体と共存する、
  - (5) 部分的に隠れて見えなくてもよい、
  - (6) 任意に（6自由度）動いてもよい、
- などである。

これを解決するアプローチは、データのセグメンテーションを基本とする構造的解析～部分パターン照合である。従来の統計的解析～パターン分類だけでは対処できない。

また、利用するモデルは、図2のように、その抽象度に応じて階層的に表現される。

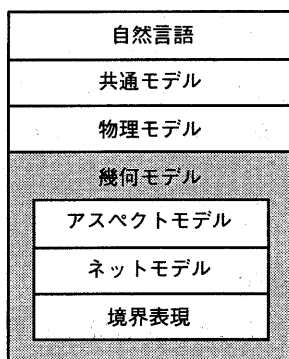


図2 モデルの階層構造

モデルの基礎は幾何モデルであり、個々の対象を定量的に正確に表現する。境界表現（b-rep）が基本データ構造である。曲面を対象とする場合には、さらに、曲面形状を表すネットモデルと、見掛けの輪郭線を表すアスペクトモデルが付加される。幾何モデルは観測から直接得られる表現であり、同一の対象を認識する場合や、CAD、VRのための3次元データを生成する場合に利用する。

物理モデルは、外界に作用するロボット（マニピュレータ、自律走行車）との協調に用いられる。例えば、幾何モデルには、把持可能な部位、走行可能な面など、対象の物理的特徴に関する情報がないので、これらを表現する。

共通モデル（generic model）は、対象を定性的

に表現する。例えば、幾何モデルを用いて自動車を認識する場合には、世界中の車種のモデルを用意しておかなければならない。これに対して、共通モデルは、自動車の形状を包括的に表現するもので、一度も見たことのない自動車であっても自動車と認識することができる。

さらに、共通モデルは、ボタン情報の記号化、言語化へと一般化される。ボタンと自然言語（名詞、動詞、形容詞、副詞）との結び付きは、自然言語に実体を与え、人との対話をより自然なものとすることができる。

これまでに、全体システムの基盤である幾何モデルに基づくシステムの開発を優先的に行ってきた。その結果、屋内や屋外の任意のシーンの3次元距離・形状を計測することができ、また、同じものであれば、基本的にどのような形のものでも認識できるソフトウェアシステムが実現している。現在の処理時間は、シーンや物体の複雑さに依存するが、通常のワークステーション（Sun Ultra 2 Model 2200）上で、ステレオビジョンによる画像入力から形状計測までが3～5秒、物体認識が1～10秒、運動追跡が200ミリ秒位のオーダーである。

## 2 VVVのコンセプト

システム開発の基本方針は、機能と知識を分離することである。機能には、処理だけでなく、知識を表現する方法（知識を入れるデータ構造）も含まれる。汎用性が実現できるためには、機能は有限であること、専門領域に依存しない共通のものであることが前提となる。機能が無限に必要であれば、汎用システムはあり得ない。

一方、知識は、専門領域によって異なり、無限にある。したがって、これまでの多くのシステムのように、機能と知識が混在するシステム、と言うよりは、必要な機能がないために、機能を知識で補うシステムは、アドホックになり、際限なく開発せざるを得ない。そのようなシステム作りには限界があるのは明らかである。

機能と知識を分離しておけば、知識を入れ換えるだけで、多くのタスクが実行できるようになる。知識の最も典型的な例が、物体のモデルである。モデルを入れ換えるだけで、多くの物体を認識することができる。

そこで、必要な機能を体系化して揃えることが

課題となるが、VVVはまた、何ができて、何ができないかを実証するためのシステムでもある。そして、できない場合には、本質的に不足している機能を明らかにして、開発のターゲットを絞ることができる。常に成長するシステムである。

その他のVVVの特徴として、画像、立体共に境界表現を基礎とし、セグメント化された単調な線や面を、表現と解析の単位としていることが挙げられる。そして、曲線や曲面は関数表現せずに、標本点で表現している。これは、関数曲線と自由曲線、あるいは、関数曲面と自由曲面を区別することなく表現、処理できる利点と、関数表現が必要なら、標本点から関数を求めることができるからである。

VVVは、人間の眼が必要とされる作業すべてに利用できることを目標とする。そこで、VVVが有効であることを示すためには、それをツール、サブシステムとするシステムで実際に利用できなければならない。また、逆に、VVVによってそのようなシステムの高度化がはかれなければならない。そこで、具体的には、ロボット（ハンドアイシステム、自律走行車）の自律化と、視覚障害者のための視覚エイドを含む知的インタフェースの開発も進めている。これらのシステムも、VVVと同様に、機能と知識の分離の基本方針で開発する。例えば、ロボットの基本動作にpick-and-placeがあるが、対象物が変わっても、新たなプログラミングをせずに、モデルを入れ換えるだけでそれを実行できるシステムを開発する。

このように、VVVの開発は、CVだけに留まらず、最終的には、CV、AI（自然言語、記号推論）、ロボット、VR、データベースを統合する情報処理システムを目指している（図3）。

V（視覚）により対象を認識し、R（ロボット）により移動したり、対象を操作する。認識、移動、操作に必要なモデルはDB（データベース）から引き出す。事例がない場合はPS（推論機構）によって問題を解決する。U（ユーザ）とシステムはI（インタフェース）を介して、自然言語、GUIを用いて対話でき、VやRへの命令や、DBからの必要な情報の検索、そのVRによる表示（知覚）ができる。I以外はネットワークでつながっていれば、ユーザの近くになくてもよい。また、VやRの装置（ハードウェア）が異なってい

てもよい。勿論、ユーザは、誰でもよい。そのユーザが必要とするI、DB、V、Rを選べばよい。本システムは、多くの知的作業に共通的に利用できるソフトウェア、アーキテクチャを提供する。

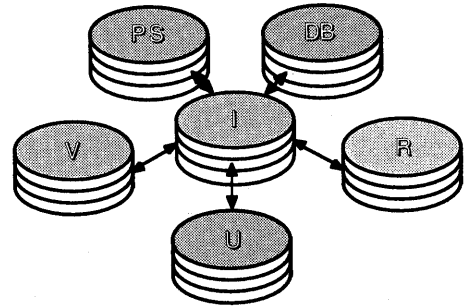


図3 統合情報処理システム

尚、VVVのプログラムはCを基本としてSunワークステーション上で開発しているが、コーディングとデータ構造の機種依存性をなくすことによって、Solaris、IRIX、Linuxなど、主要なUNIXをOSとするマシンに移植可能である。また、需要が非常に多いパソコン用（Windows版）も予定している。

### 3 実験装置

VVVの開発にあたって試作、利用している実験装置を列挙する。

#### 3.1 3眼ステレオカメラシステム

3台のカメラを用いる3次元視覚センサである。注視点を変えることができるように、ヘッドのパンとチルト、左右カメラの輻輳角、中央カメラの俯角、そして、各カメラのズーム、フォーカス、アイリスを制御することができる[3]。

#### 3.2 レンジファインダシステム

ステレオカメラシステムにレーザ光源を取り付けて、スリット光投影レンジファインダとして利用することができる[4]。

#### 3.3 移動回転ステージ

対象物を同ステージ上に置くことによって、対象物のX軸、Y軸方向の平行移動とZ軸回りの回転を制御することができる。したがって、観測系（ステレオカメラシステム、レンジファインダシステム）がこれを用いることによって、対象物を多数の方向から観測することができるようになり、

観測系の移動を模擬したり、対象物の全方位モデルを構築することができる[4]。

### 3.4 ステレオ顕微鏡システム

実体顕微鏡に2台のカメラを取り付け、台座にX-Y-Zステージを設置して、対象物の3次元位置を制御することができる。微生物やマイクロマシンの観測に利用することができる[5]。

### 3.5 マルチカメラシステム

24台のカメラを円環状に並べて、回転ステージを用いずに、対象物の全方位モデルの構築に利用することができる。

### 3.6 ハンドアイシステム

ステレオカメラシステムとマニピュレータが協調して物体を操作するシステムである。

### 3.7 自律走行車

電動のゴルフカートに、ステレオカメラシステム、ワークステーション、無線LANを搭載し、屋外を自律走行するシステムである。

### 3.8 視覚代行装置

視覚障害者をユーザとして、携帯型ステレオカメラによって観測される各種の視覚情報を、触覚ディスプレイや聴覚ディスプレイによって伝達するシステムである[49]。

## 4 基本視覚機能

VVVで開発している基本的な視覚機能を列挙する。

### 4.1 カメラキャリブレーション

- (1) カメラパラメータ[3][6][7]
- (2) 移動パラメータ
  - ・4点アルゴリズム(2画像、平面)[8]
  - ・5点アルゴリズム1(2画像)[9]
  - ・5点アルゴリズム2(3画像以上)[10]
- (3) パラメータの微調整[11]
- (4) 幾何学的歪み[3][6]
- (5) 光学的特性

### 4.2 2D画像の表現

- (1) 画像の分割
  - ・エッジ検出[12]
  - ・テクスチャー領域の抽出[21]
  - ・シェイディング領域の抽出[13]
- (2) 境界線の分割[14]
  - ・屈曲点、変曲点、遷移点の検出による、直線、凸曲線、凹曲線セグメントへの分割
- (3) 2D境界表現[15]

### 4.3 ステレオビジョン

- (1) 標準画像座標系(直列、並列)[3][6]
- (2) 境界線(セグメント)の距離計測[16]~[19]
- (3) 見かけの輪郭線の補正[20]
- (4) 面の距離計測(相関法)[21]~[23]
- (5) 面の補完[24][25]

### 4.4 レンジファインダ[4]

### 4.5 距離画像の表現

- (1) 距離画像の分割[26]
  - ・曲率に基づく6種類の面の型(flat, peak, pit, ridge, valley, saddle)への分割(ISL法)
- (2) 3D境界線の分割[27]
- (3) 曲率線の抽出[28]

### 4.6 立体の幾何表現

- (1) 2.5D境界表現[29]
- (2) ネット表現[30][31]
- (3) アスペクト表現[31]
- (4) 関係表現[32][33]
- (5) ポリゴン表現(表示用)

### 4.7 物体認識

- (1) 境界線の照合[29]~[33]
- (2) 面の照合
- (3) 複合体(接続体)の照合[32][33]
- (4) 干渉チェック
- (5) モデルの更新[25]
- (6) インデクシング[40]

### 4.8 運動認識

- (1) 運動の追跡[34]
- (2) 運動の分割[35]~[37]
- (3) 運動の表現

### 4.9 変形認識

- (1) 変形体の表現[38]
- (2) 変形体の照合
- (3) 変形の追跡

### 4.10 ボリューム認識

- (1) ボリューム画像(CT, MRI)の分割
- (2) 3D境界表現
- (3) ボクセル表現(表示用)[39]

### 4.11 定性認識

- (1) プリミティブの表現[40]~[42]
- (2) プリミティブの認識[40]~[42]
- (3) プリミティブの形成
- (4) 自然言語化

## 5 イントラシステム化

VVVのロバスト化と高速化をはかる。

### 5.1 フィードバック

特徴抽出が不十分で認識に失敗した場合に、次の2通りのフィードバックが可能である。

- (1) パラメータ値の変更
- (2) 視点の移動

### 5.2 並列分散化

複数のCPUを使って並列分散処理を行っている処理を列挙する。

- (1) 3眼ステレオ画像の境界表現の作成(3並列)
- (2) 3眼2対の画像のステレオ処理(2並列)
- (3) 物体認識の初期照合～微調整処理(多並列)

### 5.3 ハードウェア化

ハードウェア化を行っている処理を列挙する。

- (1) エッジ検出[43]
- (2) 領域のラベル付け[44]
- (3) 運動追跡(DSP)

## 6 インターシステム化

VVVと組み合わせることによって、他のシステムの高度化をはかる。

### 6.1 ハンドアイシステム

視覚と協調して行う各種の物体操作のための基本動作を体系化してライブラリ化し、プログラムレスなハンドアイシステムを開発する。以下に、これまでに開発したシステムを列挙する。

- (1) 積み木を積み上げるシステム[45]
- (2) 多くの物の中から空き缶を認識してゴミ箱に捨てるシステム[46]
- (3) 自由曲面体であるバナナを認識してお皿に置くシステム
- (4) 部品を穴に挿入するときに、穴が動いても穴を追いかけて挿入できるシステム[47][48]
- (5) 運動追跡に基づく作業の教示

### 6.2 自律走行車

視覚と協調して行う各種の移動作業のための基本動作を体系化してライブラリ化し、完全自律走行システムを開発する。以下は、当面の課題である。

- (1) 走行路認識[35]
- (2) 走行制御
- (3) 3次元地図作成
- (4) 屋外環境認識

## 6.3 視覚エイド

視覚障害者が必要とする各種(特に、3次元)の視覚情報を、視覚障害者が、オンライン、実時間で、有効かつ適切に知覚できる触覚情報または聴覚情報に変換する方法を開発する[49]。

## 7 あとがき

VVVは、技術的には、二枚以上の画像を与えれば、ミクロなものからマクロなものまで、その3次元データを得ることができるし、モデルを与えれば、その認識ができるようになっている。したがって、産業的には、実用化できるレベルにあり、従来のロボット技術にブレイクスルーをもたらすことができるものと自負しているが、今後は、それを実証していかなければならないし、学問的には、本来目指しているCVの基礎がやっとできた段階である。

以下には、VVVの開発に対して、よく受ける誤解や質問への回答を述べる。

### (1) そのようなシステムは既にある?

これは、技術的な知識のない一般の人に非常に多い誤解である。多分、類似した研究も多いので、話としてはどこかで聞かれたことがあり、技術的にももうできていると思われるか、非常に条件を限定することによってうまくできる少数の例を見て、他の場合も同じようにできると思われているのだろう。しかし、広く現場を見聞きすれば、人手に頼っている現状はすぐにわかることである。学界でも、簡単と思われる積み木の認識さえ(実際はそんなに甘くはない)、無条件にできると言えるところはほとんどないのではなかろうか。CVに限らず、ロボットもAIも、技術的にできているできていないにかかわらず、表向きのシナリオはほぼ出尽していると考えた方がよい。したがって、特に今後は、技術レベルによってできることのレベルが違うことに事の本質がある。

(2) 汎用的なシステムなどは、当分できるはずがない?

これは、逆に、CVの専門家を含めて、多少でもこれまでの技術について知っている人はほとんどそう考えておられるのではないだろうか。いつどうしたらできるかという議論も少ないが、議論だけで理解されるものでもない。これに対しては、実証するしかない。そして、正に10年以上に亘る研究の成果として、それを実現できる時期が来た、

実証するシステムができてきたと考えている。

(3) 汎用的なシステムは、実用的でない？

作業は多種多様であって、それぞれ特殊にならざるを得ないということだろうか。しかし、特殊なのは知識であって、機能ではない。人が通常行う作業において、対象は千差万別でも、必要とする視覚機能はそんなに多くはなく、大差もないと考える。ある作業が与えられた場合に、仮に専門の技術者が特殊な「専用システム」を開発することができるとしても、VVVを用いれば、一般のユーザが、その専用システムと同等以上の能力を持つ「タスク指向システム」を、新たにプログラムすることなく、容易に作成することができる。と考える。

(4) 汎用的なシステムは、効率的でない？

汎用的なシステムができたとしても、オーバーヘッドが大きく、高速化が難しいのではないかとこの疑問である。(3)の回答と同じである。VVVから、各作業にチューニングされた効率的な「タスク指向システム」が得られると考える。

(5) 単眼視による2次元視覚でもできる？

仮定が合えばという条件付きだろう。しかし、たとえできる場合があったとしても、問題を断片的にしか解決していない。産学共に、従来のこのアプローチに限界がきていることは、まえがきで述べたとおりである。3次元を2次元で解釈するには、個別的に特殊な前提が必要であるが、少なくとも、その前提を人手を介さずに生成できる前処理が存在しないと、特殊なものをいくら集めても、一般的に使えるものではない。

(6) 画質の悪い画像でもできるのか？

判断の目安としては、人が見て認識できる画像はできなければならないと考える。そして、画質が悪ければ、良くなるようにすればよいのであって、何をすればよいかは、物理的にほとんど明らかかな場合が多いと思われる。具体的には、カメラのアイリスやフォーカスを変えるか、視点を変えるか、できるなら照明の強さや方向を制御するくらいだろう。それでもだめなら、用途にあったセンサに取り換えるしかない。

(7) セグメンテーションは信頼できない？

セグメンテーションが完全にできないことも、曖昧な部分のあることも事実だが、大部分はむしろ安定に有益な特徴を提供するので、これを使わ

ないのでは勿体ないとしか言いようがない。また、データ圧縮の意味でも有効である。完全でないといけないというのでは、問題解決を放棄している。これまでの多くの研究が、セグメンテーションを避けてきた代償が、現在の閉塞状態を招いていると考えている。

(8) ステレオの距離測定精度は？

ステレオの距離測定精度は、アルゴリズムに関係なく、使用するカメラの分解能、レンズの焦点距離、カメラ間距離によってその上限が定まる。したがって、要求精度が決まっているなら、それを満足する組み合わせを事前に選ぶことができる。高精度のデータが必要な場合は、分解能の高いカメラを用い、焦点距離の長いレンズを用い、カメラ間距離を長くすればよい。例えば、ハンドアイシステムでは、特別の設定をしなくても、1m離れた物体に対して、1mm以下の精度は得られている。

(9) ステレオでは曲面の輪郭線を正しく捉えられない？

ステレオカメラの基線長に対して対象物の距離が十分ある場合は、その誤差は無視できる程度である。また、3眼以上にすれば、その誤差を補正することもできる。

## 参 考 文 献

- [1] 富田: 3次元ビジョンの実用化に向けて; 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8, pp.1124-1127, 1994
- [2] 富田ほか: 3次元視覚システムVVV研究開発一概要-, 電総研研究速報, TR-97-27, 1997
- [3] 河井ほか: ステレオカメラシステム—パタパター; 画像の認識・理解シンポジウム, II, pp.127-134, 1994
- [4] 河井, 吉見, 富田: ステレオレンジファインダ; 情処学会53全大, Vol.2, pp.287-288, 1996
- [5] 河井, 植芝, 富田: ステレオ顕微鏡; 情処学会55全大, Vol.2, pp.315-316, 1997
- [6] 高橋, 富田: ロボットビジョンのためのカメラキャリブレーション; 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, pp.177-184, 1992
- [7] 高城, 角, 河井, 石山, 富田: プリミティブ認識によるカメラキャリブレーション; 信学総大, D-578, p.366, 1996
- [8] 高橋, 富田: ラージスケールステレオ; 情処学会研報, CV73-14, 1991
- [9] 植芝, 富田: 初期モデルとしてアフィン投影を用いた多視点透視投影画像からの運動と形状の復元;

- 情処学会研報, CVIM107-1, 1997
- [10] 植芝, 富田: 複数画像からの三次元形状復元—アフィン投影から透視投影へ—; 情処学会55全大, Vol.2, pp.319-320, 1997
- [11] 高橋, 富田: ステレオカメラのセルフキャリブレーション; 情処学会誌, Vol.31, No.5, pp.650-659, 1990
- [12] 富田, 高橋: 画像のB-REPのためのアルゴリズム; 信学技報, PRU86-87, 1987
- [13] 高城, 河井, 石山, 富田: 微分ベクトルに基づくシェイディング領域の抽出; 情処学会53全大, Vol.2, pp.327-328, 1996
- [14] 杉本, 富田: 輪郭線の屈曲点, 変曲点, 遷移点の検出; 画像の認識・理解シンポジウム, Vol.1, pp.83-90, 1994
- [15] 角, 石山, 植芝, 河井, 杉本, 富田: 画像の境界表現のデータ構造とインタフェース; 情処学会49全大, Vol.2, pp.123-124, 1994
- [16] 富田, 高橋: ステレオ画像の境界表現に基づく対応; 信学論, Vol.J71-D, No.6, pp.1074-1082, 1988
- [17] 石山ほか: セグメントベースステレオにおける対応候補探索; 信学技報, PRMU96-136, 1997
- [18] 河井ほか: セグメントベースステレオにおける連結性と対応評価; 信学技報, PRMU96-135, 1997
- [19] 植芝ほか: セグメントベースステレオにおける対応パスの探索; 信学技報, PRMU96-137, 1997
- [20] 植芝, 富田: 水平三眼ステレオによる遮蔽輪郭線からの曲面形状復元; 信学技報, PRU90-98, 1991
- [21] 佐藤, 富田: テクスチャー領域の両眼立体視; 情処学会研報, CV55-5, 1988
- [22] 石山, 富田: 等輝度線のステレオ視による曲面の復元; 信学論, Vol.J77-D-II, No.9, pp.1673-1679, 1994
- [23] 石山, 富田: 3眼視による物体の正反射部分の検出; 情処学会43全大, Vol.2, pp.333-334, 1991
- [24] 杉本, 富田: ステレオ画像の境界表現に基づくシーンの解釈; 信学論, Vol.J76-D-II, No.3, pp.524-533, 1993
- [25] 杉本, 富田: ステレオによる幾何モデリング; 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.431-438, 1997
- [26] 吉見, 河井, 富田: 主ベクトルと曲面の型によるレンジデータのセグメンテーション; 情処学会53全大, Vol.2, pp.297-298, 1996
- [27] 杉本, 富田, 荒川: 3次元点列上の特徴点抽出; 情処学会55全大, Vol.2, pp.327-328, 1997
- [28] 吉見, 富田: 最大最小曲率線ネットによる曲面の表現; 信学論, Vol.J77-D-II, No.1, pp.61-68, 1994
- [29] 角, 富田: ステレオビジョンによる3次元物体の認識; 信学論, Vol.J80-D-II, No.5, pp.1105-1112, 1997
- [30] 角, 富田: ステレオビジョンによる円錐複合体の認識; 情処学会研報, CV98-7, 1996
- [31] 角, 河井, 富田: セグメントベースステレオによる自由曲面体の認識; 信学技報, PRMU96-149, 1997
- [32] 富田: 3次元物体の境界線に基づく記述の生成と認識; 信学論, Vol.J71-D, No.2, pp.343-349, 1988
- [33] 角, 富田: セグメントベースステレオによる複合物体の認識; 情処学会55全大, Vol.2, pp.291-292, 1997
- [34] 石山, 角, 富田: ステレオ視による位置姿勢の変化する3次元物体の追跡; 情処学会研報, CV95-3, 1995
- [35] 佐藤, 富田: 自律走行車のためのステレオビジョンによる道路面と移動物体の認識; 情処学会研報, CV73-13, 1991
- [36] 市村, 石山, 角, 富田: 形状行列からの特徴選択に基づく動きの分割; 情処学会研報, CVIM106-12, 1997
- [37] 市村, 石山, 角, 富田: QR分解を用いた特徴選択に基づく複数運動の分割; 情処学会55全大, Vol.2, pp.121-122, 1997
- [38] 橋本: 計測データに基づく変形アニメーション; 東大工学部精密機械工学科卒論, 1997
- [39] 市村: 領域分割に基づくボリュームデータの圧縮の検討—オクトツリーと3次元任意形状DCTの適用—; 信学総大, D-11-23, 1997
- [40] 小泉, 富田: ソリッドモデルと画像の定性的および定量的照合; 情処学会研報, CV54-5, 1988
- [41] 小泉, 富田: 階層的な形状プリミティブの並列的発見; 情処学会研報, CV69-1, 1990
- [42] 杉本, 富田: 斜め対称プリミティブの統合と解釈; 情処学会49全大, Vol.2, pp.121-122, 1994
- [43] 野村, 井上, 古川, 白井, 富田: 高速視覚認識・検査システム; 第9回ロボット及び応用システム・シンポジウム, pp.76-80, 1984
- [44] 石山, 久保, 高橋, 富田: 境界追跡型ラベリングボード; 信学論, Vol.J78-D-II, No.1, pp.69-75, 1995
- [45] 高橋, 寺崎, 杉本, 富田: ハンドアイロボットのためのステレオビジョン; 信学技報, PRU90-102, 1991
- [46] 高橋, 廣野, 寺崎, 富田: Can-Pickingロボットのためのプリミティブベースステレオ; 第10回日本ロボット学会学術講演会, pp.1149-1152, 1992
- [47] 松下ほか: トラッキング機能を持つステレオビジョンを用いた作業の誘導とモニタ; 第14回日本ロボット学会学術講演会, pp.275-276, 1996
- [48] 松下, 角, 富田, 石山: ビジュアルトラッキングを用いたハンドリング作業状況の認識; 第15回日本ロボット学会学術講演会, pp.985-986, 1997
- [49] 河井, 富田: 視覚障害者用3次元物体認識支援システム—対話型3次元触覚ディスプレイシステム—; 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.6, pp.870-877, 1997