

高機能画像センシング

日浦 慎作 † 眞鍋 佳嗣 ‡

† 大阪大学大学院 基礎工学研究科

560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel +81-6-6850-6371 shinsaku@sys.es.osaka-u.ac.jp

‡ 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

630-0192 生駒市高山町 8916-5

Tel+81-743-72-5271 manabe@is.naist.jp

概要: 画像センサはもともと放送・通信等のメディア応用のために開発された機器であり, 光によりシーンを計測するための装置として見た場合, 我々人間の視覚システムの特性や伝送帯域幅の節約等のために様々な制約を受けていると考えられる. そこでこのような「流用」によるものではない画像センサ, つまり我々の視覚システムとは異なる特性を持つようなセンサについて理解・検討することはタスク達成のためのセンサ系の最適化や, 人間の視覚システムの特性の理解などの面で有意義であると考えられる. 本稿ではこのようなセンサを高機能画像センサと呼称し, この分野における代表的な研究や機器例をサーベイする.

キーワード 距離画像, 分光画像, レンジファインダ, マルチバンドセンサ

Highly Functional Imaging

Shinsaku HIURA† Yoshitsugu MANABE‡

† Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Machikaneyama-cho 1-3, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan

Tel +81-6-6850-6371 shinsaku@sys.es.osaka-u.ac.jp

‡ Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Takayama-cho 8916-5, Ikoma, Nara, 630-0192, Japan

Tel+81-743-72-5271 manabe@is.naist.jp

Abstract Originally image sensors have been developed for media appliance such as broadcasting or communication, and there are various limitations and artifacts to cope with the characteristics of the visual system of human beings and limited bandwidth. On the other hand, special sensor which feature is far from the vision of human beings is not only useful to optimize the performance of sensor system but also suggestive to understand the property of our vision system. In this writing we describe such sensor as Highly Functional Sensor and summarize representative works in this area.

Keywords: range image, spectral image, rangefinder, multi-band sensor

1 はじめに

我々人間は視覚により外界の情報の大半を得ている。視覚はその他の感覚とは異なり、対象物体や周囲環境など広範囲に渡る情報を、離れた場所から非接触に、詳細かつ一度に得ることができるという特徴がある。我々生物が進化の結果としてこのような視覚機能を有するようになった要因には、その他の感覚が利用する物質やエネルギーに比べ光エネルギーが持つ特性、すなわち 1) 波長の短さに起因する高解像力と優れた直進性、2) 太陽光の利用により自身からの放射が不要、3) 対象に対して非接触・非侵襲、4) 固体表面で反射し空中は透過することと機械的性質・タスクとの整合性、などによるものだと考えられる。

このような光エネルギーの特徴から考えると、計測装置や計算機への情報入力手段としても同様に光・映像技術を利用することには工学的妥当性があると言えるだろう。しかしそれは機械が人間と同じ方法・原理によりシーンを計測・理解することが妥当であるということに即帰結するものではない。もちろん科学的興味としての画像の認識・理解、つまり人間をよりよく知るための研究として人間と同等の視覚システムを構築しようとすることの重要性は否定されないし、文書・図面や標識・車線のように人間にとって見やすいことを基準に考案されたものなどはその限りではないが、現状では人間のように汎用の視覚システムを機械により実現することは難しいため、様々な光応用計測法から目的に合致したものを適切に選択することが重要である。また敢えて人間とは異なる計測方法を研究することで人間の視覚システムの特徴についての知見も得られよう。

他方、画像センサ技術の歴史から見てみると、これは専ら映像の放送・通信、記録を目的として発展してきたものであることが分かる。しかしそのためにこれらの機器は撮影された画像を再生し鑑賞することを基準として開発されており、また放送方式や帯域幅など伝送・記録段階の制約を強く受けている。画像計測ではこれらのために製造されたカメラを流用することがほとんどであり、コスト面でのメリットを享受するかわりに様々な問題点(アーチファクト)を受けている [1]。また最終的には鑑賞を目的としているために当然ながら人間の視覚特性に合わせて設計されており、例えばスペクトル分布を 3 原色に縮約したり、フレームレートが毎秒 30 フレームに

限定されたりするが、これが工学的に最適であるとは限らない。

以上のような認識の下、人間の視覚とは性質や機能が異なったセンサが多く開発され、また一部は市販されている。本稿ではこのようなセンサを特に「高機能画像センサ」と呼称し、画像鑑賞目的のカメラとは区別する。一般にこのようなセンサは特殊な機器であると捉えられがちであるが、物理量を計測するという文字通りのセンサとして見た場合はむしろ特殊とは言えず、逆に通常のカメラは流用にすぎないとも考えられる。ただし画像鑑賞目的のカメラについても、近年のデバイス・計算機技術の発展に伴い急速に高性能化しており、特に画素数の増加、ダイナミックレンジや色再現性の向上、低ノイズ化など多くの技術的トピックがあるが、これを含めることは一篇のサーベイの範囲を逸脱するため本稿では取り扱わないこととした。

以下、第 2 章では距離画像計測について、また第 3 章では分光画像計測について述べる。なお第 2 章は日浦が、第 3 章は眞鍋が担当した。

2 距離画像計測

古くは銀塩方式のカメラから現在のビデオカメラ・デジタルスチルカメラに至るまで、画像の鑑賞を目的としたすべてのカメラはシーンの輝度分布を画像に変換する。得られた画像上の各点の位置はカメラから見たシーンへの方位に 1 対 1 対応し、この意味ではカメラは幾何的 (geometric) な側面を持つ。しかし先に述べたように画像上の各点が表現する値はその方位から入射する光の強さを表しているために、カメラは第一義的には測光的 (photometric) な量を計測するセンサであると言える。またそのために画像はシーンの形状など幾何学的な情報を陽に含んでいるわけではないので、光学現象の解析やパターンマッチング、さらには対象に関する先験的知識を用いた高次処理により初めて幾何的情報が抽出される。それに対し距離画像センサは、画像の各画素に輝度ではなく対象までの距離が格納された、いわゆる距離画像を取得するためのセンサであり、画素の並び・画素値の双方が幾何的な情報を表している。ただしここでは距離画像センサはセンサ単体で距離値を出力するもの他に、計算機による所定の処理により距離画像が出力されるこ

とを目的として構成された計測装置（例えばステレオカメラ）も含むこととする。

一般に距離画像センサでは、対象に対する光の投影や画像の解析が必要であるため、濃淡画像センサに比べてフレームレートが遅いものが多い。また距離計測の精度や安定性などの面ではハードウェアに依存する部分が大きく、詳細な設計や作り込みに大きく左右される反面、計測原理などの部分では古くから大きく変わっていない。そこで本稿では距離画像センサの最新動向についてはフレームレートの高速化を中心に述べる。

2.1 距離画像センサの計測原理

距離画像センサに用いられる計測手法や装置の構造には様々なものがあるが [2]、基本となる距離計測原理は以下の2つのどちらか一方に属するものがほとんどである。

三角測量に基づく方法 対象物体表面の1点と、計測機器側の2点で構成される三角形の形と角の関係を利用して距離を計測する方式

光速を利用する方法 計測器と対象物体の間を光エネルギーが伝播するのに要した時間を利用して距離を計測する方式

例えばレンズのピント合わせやぼけ発生の仕組みを利用した距離計測法も、レンズ口径内の各点から対象物体上の1点への方位を利用しているので三角測量の原理に立脚した方式である [3]。また精密な距離の変動を観測するための干渉計も、光速と振動数によって決まる波長と光路長との関係を利用している。そこで本稿ではこの観点から距離画像センサを分類し、それぞれ2.2節、2.3節で最近の動向について述べる。

上記の2分類に当てはまらない距離・形状計測法としては、光源から対象までの距離に対する照度の関係を利用するものや、対象物体表面の反射特性を利用するもの（例えば shape from shading）などがあるが、濃淡画像からのシーンの幾何解析、つまりいわゆる shape from X と言われるような研究分野と重複する領域でもあり、本稿の目的を逸脱するため割愛する。

2.2 三角測量に基づく距離画像センサ

三角測量に基づく距離画像センサでは、対象物体上のそれぞれの点について計測装置側の2点からの方位を計測し、その方位と2点間の距離（基線長）の関係から距離を算出する。そのためこの方法では以下の2つの問題をどのように解決するのが計測手法を理解する要となる。

方位決定要素 撮像素子やレンズ、ミラー角度など対象物体上の点までの方位を決定する光学的・機械的要素

対応点の決定 センサ側の一方の観測点から観測した対象物体上の1点が、他方の観測点からはどの点に対応付けられるのかを決定する方法

ここで計測装置側の2点は必ずしもカメラである必要はなく、上記の2つの問題の解決を容易にするために対象物体への入射光を制御することがある。このような手段の有無により、三角測量による距離画像センサは大きく分けて以下の2種類に分類することが出来る。

能動型 センサから対象に対し幾何学的に整形された光を投影し、その反射光を解析するもの

受動型 太陽光や屋内の照明など、特に計測のために構造化されたわけではない光源からの光が対象に反射した結果を撮影し解析するもの

一般に、能動型センサは受動型センサに比べ利用可能なシーンは制約され、また計測速度の向上が難しいが、距離画像の稠密性や解像度に関して有利である。以下ではそれぞれの手法に関する計測原理とその性質について述べる。

2.2.1 受動型ステレオ法

いわゆるステレオビジョンと呼ばれるもので、対象への方位を求めるための装置としてすべての箇所にカメラを用いる。つまり対象物体上の1点について、その像の位置を2台以上のカメラからの画像上で決定し、その方位（視線）の交点の位置を計算することにより対象物体までの距離を得る方法である。この分野の研究については文献 [4] を参照されたい。

人間を含め多くの動物は複数の眼球を有しており、それらからの視差により奥行きを知覚していることが分かっている。ステレオ法はこのような動物の両眼立体視の原理をそのまま模した距離計測法であり、そのために計測の特性も我々の視覚に似通ったものとなる。例えば暗いところでは計測が不可能であることや、遠くのものについては奥行きが知覚しにくい（精度が下がる）という特性がある。しかし距離画像センサとして他の方式と比較した場合、生活環境中に埋め込まれたモニタリングシステムやヒューマノイドロボットの視覚システムなどとしては目障りな投光がないことや複数のセンサ間での干渉がないこと、通常の濃淡画像カメラと同様の条件で利用可能であることなどから適しているといえる。

前述のように、受動型ステレオ法では対象物体上の1点に対応する像の位置を複数の画像上で対応付ける必要があり、これが計測速度上でも、また計測の安定性の上からも最大の問題である。最も多く用いられている方法はテンプレートマッチング法であるが、この方法は計算量が多く、従来ソフトウェア処理ではビデオレート（毎秒30枚）の距離画像の算出は困難であった。しかし Kanade らはこの処理をハードウェアにより行うことで、6台までのカメラを用い 256x240 画素の距離画像を毎秒30フレームで出力する装置を開発した [5]。同様にコマツは9台のカメラを 3x3 に配置したセンサにより 280x200 画素の距離画像を毎秒30フレームの速度で計算するハードウェアを市販している [6]。またソニーはヒューマノイドロボット SDR-4X の頭部に搭載するために、176x144 画素の距離画像を毎秒25フレーム出力することが出来る FPGA を中心としたシステムを開発した [7]。

これらのうち前二者はカメラを3台以上用い、それらの間で求められた視差を合成することで距離画像の推定を安定化している。これをマルチベースラインステレオと呼び [8]、対応点の探索において偽の対応を排除したり、オクルージョンによる計測不可能領域を小さくすることが可能である [4]。特にカメラを一列に並べるのではなく、縦・横双方に（平面的に）カメラを配置する方法では、エッジの方向による安定度の変化を抑制することが出来るという特徴もある。そこでこの原理を用いたものは他の市販のステレオカメラにもあり、Point Grey Research は縦・横双方向に基線を持つステレオカメラ、Digiclops を市販している [9]。この装置では対応付けの

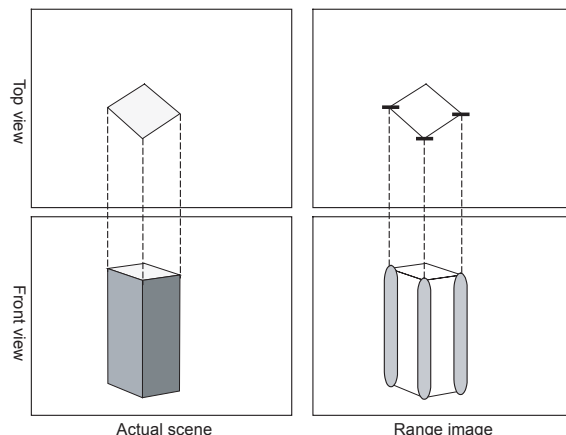


図 1: Estimated range image by passive stereo method.

計算をホスト PC の CPU により行うが、近年の PC の高速化によりリアルタイム性のある用途にも利用可能である。また同様のセンサを 20 組、正 20 面体の各面に配置することで全方位の距離画像が計測可能なセンサ SOS [10] も開発されている。

受動型ステレオ法では、それぞれの画像間の対応点を決定するために画像上の輝度分布の比較を行う。そのためにテクスチャの豊富な領域やエッジやコーナーなどの形状的特徴では安定な対応付けが可能であるが、白塗りの壁面のようにテクスチャや明度の変化に乏しい部分では対応付けを行うことが出来ない。そのため金型製作のための形状計測のように密な形状を得る必要がある分野には不向きであるが、形状情報から再び CG を生成し表示するようなイメージメディア分野ではテクスチャに乏しい部分の距離精度は知覚的な差異を生じにくいと利用可能である。また高速な計測が容易であることから対象の動きを求めるなどのロボットビジョン分野にも向いている。

テンプレートマッチングに基づく距離計測では一般に、テンプレートの大きさが小さすぎると誤った対応付けがなされたり、奥行き精度が低下したりする。しかしテンプレートの大きさと実質的な距離画像の分解能の間にはトレードオフの関係があり、テンプレートの端にエッジ等の特徴が含まれた場合でも距離値が算出される。そのため図 1 に示すように距離画像はエッジ部の周囲に広がりを持ち、また奥行きは光軸に垂直な平面状となる。これを避けるために coarse-to-fine 探索など多くの手法

が提案されているが [4]、一般に隣接画素間の奥行き値に従属性が強く、実質的な分解能は能動型ステレオ法に比べて大きく劣るといわざるを得ない。また前述のように均一な明度分布を持つ部分では対応付けが不可能であるため、実用上の観点ではセンサからは距離画像各画素の信頼度を出力することが望ましく、ここまでに挙げた全ての研究例では同時に信頼度画像を出力することが可能である。また信頼度画像を元に欠損部を穴埋めすべきかどうかは用途による。

2.2.2 能動型ステレオ法

能動型ステレオ法では、受動型ステレオ法の一部のカメラの代わりにシーンに対して光を投影する装置を用い、その光が対象に反射した像を観測することで形状の計測を行う。最も単純な手法はスポット光投影法で、レーザービーム等による輝点の位置をセンサにより計測する手法である。輝点の位置を高速に求めるためには走査型画像センサの代わりに PSD (Position Sensitive Detector) と呼ばれる特殊な構造のフォトダイオードを用いる方法があり、他に画素型でありながら縦・横双方向の射影結果を直接出力できるデバイスが提案されている [11]。またこの方法により二次元画像としての距離画像を得るためにはスポット光を二次元的に走査する必要があり、時間を要する。そのためラスタスキャンではなく、スポット光の軌跡を自由に制御し、形状が必要な軌跡上のみの奥行きを得るような用途に主として用いられるが [12]、このように対象に応じて適応的に計測範囲を変更することはアクティブビジョンの考え方に沿ったものであり、計算量の削減に有効である [13]。

スリット光・ステップ光投影法 受光センサとして二次元撮像素子を用いる場合は、スリット状の光を投影した場合でもエピポーラ拘束からスリット上の奥行きを同時に求めることが出来る [2]。この方法は、スリット光のなす平面で対象物体を切断したときの断面形状を受光センサで撮影するようにも理解できるため、光切断法とも呼ばれる。しかし受光センサとして通常のビデオカメラを用いた場合、フィールド毎に処理を行ったとしても 1 秒間に 60 枚の断面形状しか得ることが出来ず、画素数に見合った奥行き分解能を得るためには数秒を要する。そこで様々な方法により光切断法を高速化する手法が提

案されている。

受光センサのフレームレートを向上させる方法は最も直接的な方法である。幸い、画像上でスリット光が現れる位置はごく一部である上、寸前のスリット位置から次のスリット位置を推測することが出来る。そこでコニカミノルタが販売する VIVID シリーズ [14] では、部分読み出しによりセンサからの画像読み出しを高速化し [15]、0.3 秒程度での形状計測を可能としている。しかしこの方法によりビデオレート程度まで高速化することは難しい。そこでスリット通過時刻を求める回路を画素ごとに設ける方法が提案されている [16]。荒木ら [17] や木田ら [18] は単体のフォトランジスタやフォトダイオードを用い実時間距離画像計測が可能であることを示したが、実際には画素数が多くなると各画素から全結線により信号を取り出すことは困難となるため、一部の処理を各画素内で行うことが望ましい。しかしそのためには専用の受光 LSI を製作する必要がある、これは容易ではないにもかかわらず、多くの研究例がある。

Kanade ら [19] はそれぞれの受光素子に入射した光量が閾値を超えたときに、LSI に印加されたランプ信号 (時間に比例して電圧が上昇する信号) をコンデンサに蓄えることが出来るような回路を各画素ごとに備えることで、スリットの通過時刻を電圧値として読み出せるような受光 LSI を試作し、28x32 画素の距離画像を每秒 100 から 1000 フレーム出力できることを示した。また同様に Kang ら [20] も 32x32 画素の素子を製作したが、この場合はスリット光の性質を利用し、各行内で光量が閾値を超えた画素のうちもっとも左の画素の番号を出力するような回路とした。つまり各画素は光量が閾値以上であったかどうかを判別・記憶することが出来る回路であり、各画素の出力は二値である。これに対し行順次にアクセスし、1 行内の値を同時に読み出した上で left priority encoder により画素位置を求める構造となっている。Kanade らの手法ではスリット通過時刻をアナログ値で記憶するのに対し、Kang らの方法では通過時刻はフレーム番号に対応するため、精度低下が発生しにくいことが特徴である。これにより每秒 200 フレームの距離画像を得ることが出来たと報告している。

以上の 2 つの手法では、スリット光の有無の判別を、入射光量に対する固定された閾値により行っている。そのためシーンの明るさに制約があると考えられ、スリット光の明るさは十分大きくなければならない。またレン

ズ収差によるスリット光の広がりや光量変化の関係から、対象物体の面の向きや反射率により奥行き値が変化する可能性がある。そこで横山ら [21][22] は 2 個一組のフォトダイオードを各画素に組み込み、その明度差を利用することでシーンの明度変化等に対して無調整で距離画像の計測が可能となるセンサを開発した。このセンサ（シリコンレンジファインダ）は 24x24 画素で毎秒 30 フレームの距離画像を出力出来ると報告されているが、奥行き分解度が奥行き $1/1000$ 以下と非常に高く、スリット検出レートは 50kHz から 100kHz であるため、スリットの走査周期を短くすることでフレームレートをより高速化することも出来る。

これらの研究ではフォトセンサの感度や集積度の関係から画素数が限られていたが、昨今のデバイス技術の発展により多画素化された素子も発表されている。吉村らはまず 192x124 画素の素子を 2001 年に [23][24]、次いで QVGA (320x240 画素) の素子を 2002 年に [25][26] それぞれ発表している。後者は距離画像と同時にカラー画像を出力することも出来るが、各画素に処理回路を含めるのではなく列並列処理に改められている。また大池ら [27][28] は CMOS プロセスによる VGA (640x480 画素) の素子を試作し、毎秒 65.1 フレームの距離画像を得た。この素子は各画素で多階調処理を行い、重心演算による距離計測精度の向上も可能である。他には、オランダのデルフトハイテックが受光素子の各列ごとにプロセッサを混載したスマートセンサ MAPP2500 を市販している。これによると 512x512 画素の受光素子を用いてスリット光の検出を毎秒 2000 回実行できるため、奥行き分解能を 100 とすると、毎秒 20 フレームの距離画像を出力可能である。

以上のように様々なセンサデバイスが提案されているが、スリット光の通過時刻を高速に求める方法としては大きく次の二通りに分けられる。ひとつは各画素の読み出しレートを高速化し、さらにセンサから出力されるデータの帯域幅を小さくするための回路を組み合わせたもの、他方はスリット光の通過時刻を電圧等のアナログ値に変換して読み出すものである。後者については [19] のようにデバイス内にてその処理を行うもの他に、光学的な工夫によりスリット通過時刻をセンサへの入射光量に変換する方式がある。石原は高速に回転する偏光板を用いた手法を提案している [29]。回転する偏光板によりセンサへ入射した光を時刻に応じて異なった角度に偏

光し、さらにその後方に偏光板が固定された画像センサを配置することにより、光が入射した時刻に応じてセンサ上で観察される光量が変化することを利用している。偏光板が固定された画像センサはビームスプリッタを介して 2 台配置し、偏光板の向きは互いに直交しているため、それらのセンサ間の光量比を用いることでスリット光源から対象物体までの距離や反射率によって対象物体表面の輝度が変化することに対処している。また同様に 3 台のカメラを利用することで、外乱光（スリット光以外の定常光等）の影響を除去し、また奥行き推定精度を向上させる方法も同時に提案している。また陳ら [30] はビデオプロジェクトに利用される光スイッチング素子 DMD を光投影側・受光側の双方に用いた方法を提案している。この方法では DMD によりステップパターン光 [2] を走査し、同時に CCD の各画素に対して列方向に露光開始タイミングを変化させることで、対象物体の距離に応じて光が入射する時間を変化させることにより距離を計測する。対象物体の反射率や距離による明るさの変化には、時分割的に動作を切り替えることで対処している。石原の方式 [29] に対し機械的駆動部分が DMD 素子上のみであり、可動部を事実上無視できる利点があるが、反面受光側では DMD 上に一旦結ばれた像を再びレンズ系で撮像素子上に結像させる必要があるため、装置が大型化する欠点がある。

パターン光投影法 スリット光投影法など多くの能動型ステレオ法では、幾何学的に整形された光を走査することで、幾何学的情報（方位情報）を時系列的情報に置き換え、対応付け問題を簡単化しているということが出来る。そこでこれに含まれない方法としては、幾何学的情報に対して何らかの光の特性を対応付ける方法が考えられる。Rainbow Range Finder [31][32] はそのような方法の 1 つであり、方位に対して光の波長を対応付けている。つまり白色光を回折格子により分光し、それを被写体に投影する。しかし画素ごとに入射光の波長を求めることが出来るような受光素子は存在しないため、分光程度の異なる 2 枚以上の画像を撮影し、それらの画像間の光量比から波長を特定する。つまり各点には単波長光が投影されているためカラーカメラ等により得た画像の色相から波長を求めることが可能である。偏光板を利用した、石原の方法 [29] は最終的に光量比により光源から対象への方位が決定されるという点で Rainbow Range

Finder に似た方式であると言える．どちらにしても対象物体までの奥行きを正確に求めるためにはカメラの暗電流や 特性の補正，熱雑音等のノイズの低減などが必要で，一般に時系列型のレンジファインダに対し精度では劣るものと考えられる．

スリット光やステップ光よりも複雑な幾何学的形状の光を投影することで高速化を図ったレンジファインダも提案されている．例えばステップ光は3次元空間を光の照射部と非照射部に二分するが，さらに空間を分割する時は照射部内と非照射部内の二箇所を同時に分割することが出来，三次元空間は4つの領域に分割される．以降8,16,.. と n 回の光の投影により3次元空間を 2^n とおりに分割することが出来るため，空間を m 個の空間に分割するためにはスリット光の順次走査では $O(m)$ のオーダを要するところ， $O(\log(m))$ のオーダでよいことになる．これを空間コード化法と呼び，特に符号としてグレイコードを用いたものをグレイコード光投影法と呼ぶ [2][33]．この方法を用いれば通常のカメラを用いても数秒で三次元計測を完了することが可能であるが [34]，特にこの手法を高速化したものとして CubicScope が商品化されている [35]．これは液晶シャッタの代わりに明滅するスリット光を回転ミラー等により走査するもので，約 0.3 秒で形状計測を行うことが出来る [36]．

投影光として明暗二値をとるものの他に，濃淡値を利用して高速化・高精度化を図る方法も提案されている．特に NEC は多眼正弦波格子位相シフト法と呼ぶ，正弦波状の濃淡パターンを持つ投影光を，位相をずらしながら複数回投影し，それを複数のカメラにより撮影することで少ない投影回数によりながら形状計測が可能な方法を提案し，様々な形状計測装置を市販している [37]．

2.2.3 レンズ焦点法

レンズ焦点法は，現実のレンズが有する有限の開口径により生じる像のぼけを利用して対象までの距離を求める方法である．ピンホールカメラモデルを理想とするコンピュータビジョン分野では専ら有害なものみなされてきたこの現象を解析することで，ぼけを含んだ画像から対象の形状に関する情報と，対象表面のテクスチャに関する情報を分離出来ることが示されている [38]，これはとりもなおさずセンサの様々なアーティファクトをモデル化し解析することで理想センサでは得られない有

用な情報が獲得できる可能性があることを示している．

Depth from Focus (DFF) 法は，フォーカス調整に伴い得られる画像列について合焦判定を行い，最も良く合焦した時のフォーカス位置から距離を求める方法である [39]．簡単かつ実現容易な方法であり，それぞれの画像から合焦領域を切出すなどして完全合焦画像を得ることも可能であるが [40]，レンズの物理的な駆動が必要であり運動物体の計測には向かない．

実時間計測を目指した方法として，画像のぼけ量と距離の相関モデルを用いた Depth from Defocus(DFD) 法が提案されている [41][42]．ただし単一の画像からぼけ量を正しく求めることは困難である．なぜならカメラの前の合焦距離にぼけを含んだ写真を設置した場合と，本当に奥行きのあるシーンを撮影した場合とが区別できないからである．この問題を避けるためには，合焦距離の異なる複数枚の画像から相対的にぼけ量を求める方法が用いられる．竹村ら [43] は 3-CCD カラーカメラを改造して合焦距離の異なる3枚の画像を同時に撮影できるカメラを製作し，高速・高精度な距離計測が可能であることを示した．また渡辺ら [44] は，テレセントリック光学系に二重フォーカスカメラを用い，テクスチャ状の対象についても距離計測を可能とした．しかしこれらの方法では，ぼけの性質を決定する瞳（開口）形状を単なる円形としているためノイズに弱く，多数の画像を撮影し平均をとることでノイズを除去したり [44]，コントラストのはっきりしたエッジのみを対象とする [43] などの制約があった．なぜなら円形のぼけは空間周波数領域においてローパスフィルタの働きを持つため，高周波成分を解析するためには SN 比が悪化するためである．また高周波成分が失われることで原画像の復元が困難であるといった問題もある．

そこでぼけを発生させる瞳（開口）形状を解析に向けた形状に変更し，計測を安定化させることが考えられる．同様の考え方は，レンズの製作が困難な X 線撮像技術において符号化開口法 [45][46] として用いられており，これを拡張することで山田ら [47] は可視光領域において3次元形状を求める方法を提案しているが，これはレンズ光学系を用いない従来の符号化開口法をそのまま使用しているため，撮像面積に起因する基線長の不足や対雑音性の低さのため十分な性能を得ることは難しかった．そこで日浦ら [38] はレンズの前焦点面に開口マスクを設置したテレセントリック符号化開口法を提案し，合焦距

離の異なる3枚の画像から対象物体の形状と、ぼけを除去した完全合焦画像を分離し取り出せることを示した。

以上の方法は全て特殊な光源を利用しない受動型の計測法であるが、Nayarら[48]は撮影用のレンズを通してパターン光を対象へ同軸落射照明することで実時間的に距離画像を得ることが出来ることを示している。この方法ではチェッカーパターン状の投影マスクが撮像素子と共役の位置に設置されており、かつパターンは撮像素子の各画素に対して精密に位置合わせされているため、DFDの一種というよりは共焦点顕微鏡に近い構成の装置であるとも言える。

2.3 光飛行時間に基づく距離画像センサ

光速は真空中および空気中ではほぼ一定であり、およそ 3×10^8 [m/s] である。そこで、センサから発した光が対象物体で反射し、再びセンサへ返ってくるまでの距離（光路長）と光の往復時間の関係を利用して距離を求める方法が多く用いられている。ただし光の往復時間を直接計測する手法は非常に高速に動作する光デバイスが必要とするため、干渉や強度変調光の位相差を利用することでより容易に距離を得ることが出来る手法も用いられている。

測定値と距離が比例関係にあるため、気温の変化による空気の屈折率（伝播速度比の逆数）の変化や屈折による光路の曲がりの影響を除けば計測距離の大小にかかわらず精度が一定である。これに対して三角測量法では奥行き精度が距離の増加に伴い急激に悪化することから、光飛行時間測定法は長距離の計測に向いているといえる。また三角測量法ではオクルージョンによる計測不可能領域が発生しやすいが、光飛行時間に基づく方法では本質的にはこの問題がない。

2.3.1 光飛行時間測定法

光飛行時間測定法は、センサから発した光が対象物体に反射しセンサへ再び帰ってくるまでの時間を直接的に計測し、対象物体までの距離を得る方法である。光が往復する時間を t 、光速を C とすると、センサから物体までの距離 d は $d = C \cdot t/2$ で表される。しかし光速 C は非常に高速であるため、用いられる電子的デバイスには高応答性が要求され、特に近距離で高精度な計測を行う

ためには大変高い時間分解能が必要とされる。それゆえ光飛行時間測定法は比較的遠距離での計測に多用されてきたが、最近では特に光通信技術の発展に伴い、非常に応答速度の速い光デバイスが安価に提供されるようになり機器の低価格化と相まって用途が広がりを見せている。市販の距離画像センサでは高速に1点計測を行うセンサを鏡などにより偏向しシーンを走査することで距離画像を得る方法をとっており、例としてCyrax[49]、Riegl[50]などがある。また鏡などの機械的要素無しに距離画像を得るためには多数の回路を並列に配置する必要があるが、従来これは回路規模や動作速度などから困難であった。しかしCanesta[51]は非常に高速に動作するカウンタ回路を開発するなどし、CMOS型固体撮像素子の各画素で光飛行時間測定法による測距を可能とする方法を発表している[52][53]。

2.3.2 強度変調光位相差測定法

光飛行時間測定法では非常に高速に応答する光源や光センサが必要であること、パルス光の到達時刻を求めることが容易でないという問題がある。そこで出射する光をパルス状ではなく周期信号的に変調し、その光が対象物体表面で反射した後、センサまで返ってくるまでに生じる位相差を用いて距離を求める方法が強度変調光位相差測定法である。原理としては1849年にフィゾーが初めて地球上で光速を測定したときと同様で、このときは高速に回転する歯車の隙間から光を出射し、遠方に設置した鏡を用いて反射した光を同一の歯車を通して観測した。歯車の回転数により光の強度が変化して見えることと遠方の鏡までの距離が既知であることから光速が求められたが、これは光速が既知であれば逆に距離測定が可能であることを示している。またこの実験からは、必ずしも光の強弱を電気信号に変換できなくとも、高速に光を遮断・通過することが出来る素子があれば計測が可能であることを示している。

強度変調光位相差測定法では計測可能な奥行き範囲が変調周波数に依存する。変調周波数が高すぎるとセンサから対象までの間の波数が1を超え、距離の推定値に波数の整数倍ごとのあいまいさが生じる。例えば1MHzで変調した場合の変調光の波長は300mとなるため、距離が150mを超えると位相差が1周期を超えることになる。しかし周波数をむやみに下げると精度が落ちるた

め、1点あたりの計測速度が遅くても許される光波測距儀（測量器の一種）の場合では、数種類の周波数を切り替え、それらの組み合わせから実際の距離を求める方法が用いられている [54]。しかし二次元的な距離画像を得るためにミラー等により計測方位を偏向しシーンを走査する装置では、変調周波数を組み合わせる手法は計測時間を要するため使いがたい。

前述のように強度変調光位相差測定法では必ずしも光センサから光強度に応じた電気信号を取り出して処理する必要はなく、何らかの手段により変調周波数で検波した結果から位相を求めることが出来ればよいと考えられる。そこで現在、固体撮像素子の各画素において検波が可能な回路を搭載し、多数の画素において同時に測距することができる装置の開発が進められている。松下電工は CCD 素子により、128x123 画素の距離画像を每秒 15 フレーム計測可能なセンサを発表している [55]。このセンサでは光源にレーザではなく近赤外 LED を 10MHz ~ 100MHz で変調して用いている。受光素子の構造については発表されていないようであり、画素数からは光電子を複数のウェルへ時分割的に蓄積するような専用の LSI を開発しているとも考えられるが、同社の特許 [56] には CCD の電子シャッタの仕組みを用いて光源と同期的に複数回露光する方法が示されており、特殊な構造の CCD は必ずしも必要でないとのことである。また前述の Canesta は強度変調光位相差測定法による距離画像測定用 LSI を開発し、現在開発ツールとして出荷している [57]。センサは 1/3 インチの CMOS 型で 64x64 画素であり、每秒 30 フレームの距離画像を計測可能である。前述の特許 [53] では光飛行時間測定法と強度変調光位相差測定法の双方について記述があるが、このセンサでは強度変調光位相差測定法が採用されている。

3 分光画像計測

見たままに映像を記録することの人間の願望は、光の強度を表す濃淡画像から、人間の視覚特性に合わせた RGB カラー画像に変わってきたことからあきらかである。さらに現在はいかに鮮明に綺麗なカラー映像を取得し、表現するかで技術開発が進んでいる。しかし、色情報はもともと物体固有の分光反射特性と光源の分光反射強度によって決まるものであり、RGB カラーよりさら

に分光画像計測技術および表示技術の研究開発が進められている。本章では、分光画像計測技術について解説を試みる。

3.1 分光画像について

これまでの視覚センサを利用した物体認識は、二値画像、濃淡画像、色情報を加えるために RGB カラーカメラを用いたカラー画像によって行われることが多かった。しかし、実際のシーンはスペクトル分布を持つ物理光学現象である。そこで、連続的なスペクトル分布を画素値として持つ、分光画像が考えられる。このような分光画像は、これまでは主にリモートセンシングの分野において資源調査などに使われてきている [58]。LANDSAT の画像では、450 ~ 690nm までの可視波長帯と 760nm ~ の赤外線波長帯を 7 バンドに分けて測定を行っている。また、顕微鏡画像の処理に分光情報を利用する方法 [59, 60] などが提案されている。

3.2 分光画像計測手法

分光画像の計測手法としては、点計測、線計測、面計測の手法があり、基本的にはこの順番で計測される分光情報の精度が良い半面、計測される分光画像の空間分解能が低くなる。つまり、計測分解能を高くするためには点、線、面の順番で計測時間がかかることを意味する。

3.2.1 点計測

分光画像は各画素毎に分光分布情報を持つ画像である。そこで、分光分布を計測する分光輝度計を用いてその計測点を走査することで画像化する方法が考えられる [61]。この計測方法は分光輝度計を用いるため、各画素に当たる一点一点の計測精度が高く、分光画像計測手法の中では今のところもっとも正確な計測が可能である。このような非接触で点計測が可能な分光輝度計がいくつか製品として販売されている [62, 63, 64]。しかしながら一方で、計測個所を二次元に走査する必要があり計測に時間がかかる。また近年、光ファイバとグレーティングによる手のひらサイズの小型の分光器もあり [65]、計測対象に合わせた新しい計測手法も今後提案されると思われる。

3.2.2 線計測

プリズムの前にスリットを置くと、スリットを通った光がプリズムで分光されることはよく知られている。このとき、分光はスリットに対して垂直方向になりスリット方向は空間軸となる。つまりライン状の分光が可能であり、この場合、プリズムの後ろに撮像素子を置くことで線状の計測ができ、一次元の走査をすることで分光画像を計測することが可能である。これがイメージ分光器の原理である。単純にプリズムを使用して線状の分光計測を行うことは可能であるが、その場合、波長軸において画素位置と波長の関係は比例しない。そのため、波長域において分解能が異なってしまう。この問題を解決したものが Prism-Grating-Prism (PGP) 素子であり [66, 68]、この素子を用いたものがフィンランド SpecIm 社の ImSpector である [67]。ImSpector はプリズムの代わりに PGP 素子を用いることで撮像素子上での波長変化を線形にしている [69]。このイメージ分光器を用いた研究として肌色の変化や印刷物の検査 [70]、またイメージ分光器を用いた三次元計測 [71] などがある。

一方で、プリズムによる分光ではなく、フィルタの分光透過特性を変化させることで線状の計測ができる。一般に光学フィルタではフィルタ全体の分光特性は一様であるが、透過波長を少しずつ変化させたりニア可変バンドパスフィルタと言われるものがある [72]。このフィルタをモノクロカメラの前に取り付けると、画素位置によって計測される波長の異なる画像が得られる。そこで、フィルタを取り付けたカメラを一次元の走査することで分光画像の計測が可能となる。この方法では、走査による各画像間の距離が波長分解能に影響する。また、正確に走査しないと画素の対応付けがずれてしまい、正しい分光画像を計測することができない。そのため、イメージモザイク手法を応用し画像の位置あわせを行うことで画素の対応付けを正確に行い、計測対象の正確な分光反射率を求める手法が提案されている [73, 74]。

3.2.3 面計測

点計測や線計測のように計測器を走査させずに分光画像を計測する方法として面計測がある。この方法は、撮像素子の各画素に入ってくる光の波長特性を変化させることで実現している。

CCD (Charge Coupled Device) や CMOS などの撮像素子は、各フォトセンサの分光感度特性はあるが一般にフォトセンサで感知されたフォトン の量を光電効果によって電子に置き換えることで光の強度を計測している。感度のある波長域の光を全て計測するため、そのままでは色情報が計測できない。そこで、フォトセンサの前に波長特性の異なるフィルタを置くことでフォトセンサ毎に計測できる波長域を変化させ色情報の計測を可能にしている。

n 枚の光学特性の異なるフィルタを用いて計測を行う場合、計測対象の分光反射率を $R(\lambda)$ 、照明の分光放射強度を $E(\lambda)$ 、 i 番目 ($i = 1, 2, \dots, n$) のフィルタの分光透過率を $F_i(\lambda)$ 、またレンズの分光透過率や撮像素子の分光感度などを合わせた計測システムの総合的な分光特性を $S(\lambda)$ とすると、センサの出力 $I_i(\lambda)$ は

$$I_i(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)E(\lambda)F_i(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

となる。モノクロカメラの場合は $i = 1$ であり、一般に $F_1(\lambda) = const$ となりセンサに入射する光に対して撮像素子の分光感度のある波長域の積分値となる。また、 $i = 3$ として、撮像素子の感度特性を含めてフィルタの波長特性を人間の目の特性に合わせたものが RGB カラーである。この式から分かるように、RGB 毎の値は、各フィルタ特性で計測波長域の光を積分したものである。

さらに、このフィルタの分光特性を変えて計測を行うことで、異なる波長の計測を行い RGB よりさらに波長分解能の高い画像の計測が可能となる。このフィルタの波長特性の設計が分光画像を計測する際に重要であり、大きくわけて数 nm の幅の狭帯域フィルタを複数枚使用するものと、数十 nm から数百 nm の幅の広帯域フィルタを複数使用するものにわけられる。

狭帯域フィルタ 透過波長が数 nm の幅で中心波長を少しずつ変化させたフィルタを複数枚使うことによって分光画像の計測が可能である [75, 76]。この方法では正確な分光分布を計測するには数十枚の中心波長の異なるフィルタが必要となり、例えば、5nm 間隔で可視波長域 400nm ~ 700nm を計測するには 61 枚のフィルタが必要となる。しかし山口らは先見知識がなくとも 16 枚のフィルタによるマルチバンド計測で異なる照明下での色を高精細に入力できることを実証している [77]。また、物体

認識では必ずしも正確な分光分布の計測は必要ではなく、森脇は透過波長域の半地幅が $3 \sim 4nm$ の 5 枚のフィルタを用いて照明光に依存しない物体認識手法を提案している [78] .

狭帯域の干渉フィルタを複数枚用いる方法では、フィルタの枚数が多くなり交換が面倒であり、交換時に計測装置が動き正確に計測ができなくなる可能性も高くなる。干渉フィルタを用いるのではなく液晶の波長透過帯域を変化させる液晶チューナブルフィルタ [79] を用いる方法もある [80] .

広帯域フィルタ 狭帯域フィルタの場合、正確な分光分布を計測するには多数のフィルタが必要になるが、それではあまり現実的ではない。そこでフィルタの枚数を減らし、かつできるだけ正確な分光分布の計測も可能である広帯域フィルタを用いたマルチバンド計測手法が、分光画像計測において現在注目されている [81] .

式 1 では、光学的な現象を説明するため分光特性を連続量として扱ったが、数学的な取り扱いを簡単にするために分光分布を離散化する。ここで、波長を m 個に離散化すると仮定する。I を n 個のフィルタに対するセンサ応答を表した n 個の要素を持つ行ベクトル、R を対象物体の分光反射率を表す m 個の要素で構成される行ベクトルとし、また、カメラおよびレンズの分光感度特性を S、光源の分光放射強度を E の $m \times m$ の対角行列とし、フィルタの分光透過率を表す行列を F とする。この行列 F は i 番目のフィルタの分光透過率を表す行ベクトル F_i をまとめたものである。これらより、式 1 は、

$$I = GR \quad (2)$$

と離散化できる。ここで、 $G = FES$ である。マルチバンド画像からの分光反射率推定とは、式 2 を分光反射率ベクトル R に関して解くことであるが、一般に行列 G は正則ではないため逆行列を持たず不良設定問題となる。正則でない行列に対する擬似的な逆行列として一般化逆行列が知られているが、分光分布の離散化数 m がフィルタのバンド数 n よりかなり多いため精度の高い推定は困難である。しかし、計測対象が限定される場合は比較的精度の高い推定が可能となる。

Maloney は自然界に存在する物体表面の分光反射率の記述には $6 \sim 8$ 次元が必要であると報告している [82] . また主成分分析によって、Parkkinen らは 8 つの主成分

によって Musell 表色の分光反射率を推定できることを [83]、三宅らは胃粘膜色および肌色が 3 つの主成分で推定できることを明らかにしている [84, 85] . さらに Judd らは昼光スペクトルを線形モデルで記述するにはおおよそ 4 次元以上必要であることを報告している [86] . これらから、マルチバンド画像によって分光反射率を推定する場合、計測対象が限定されるなら $6 \sim 8$ 枚の分光透過特性の異なるフィルタを用いれば精度良く推定ができることが分かる。さらに肌のような対象の場合は 3 枚のフィルタでも推定が可能である。

富永らは 6 枚のフィルタによるマルチバンド視覚系を提案している [87] . この視覚系では 6 原色の波長帯が波長軸で互いにあまり重ならないようにフィルタを選択し、有限次元線形モデルによって物体の分光反射率および光源の分光分布の推定を行っている。また、マルチバンド画像からの分光反射率の推定方法として他にも、主成分分析による方法 [88]、Wiener 推定法（最小平均二乗誤差推定法）[89] などの線形演算による方法や、カメラのガンマ特性等の非線形性や分光反射率サンプルの分布自体の非線形性等を考慮したニューラルネットワークによる方法 [90] や、重回帰分析による方法 [91] なども提案されている。また、肌の色の場合は 3 主成分で分光反射率が推定可能であるため、RGB カラーカメラを用いて Wiener 推定を使った分光反射率の推定も報告されている [84, 85] .

上記のマルチバンド計測では、フィルタの透過特性は市販の色素フィルタからの選択や分光透過率を Gauss 分布で近似することで設計することで実現している。しかし、最適なフィルタ関数を実現するためには市販の色素フィルタや Gauss 分布近似では困難である。そこで、Hauta-Kasari らはニューラルネットワークでフィルタ関数の最適化を行っている [92] . この最適化されたフィルタ関数を実現するために、宮澤らは透過率を自在に書き換えられるフィルタとして液晶パネルとリニア可変バンドパスフィルタを貼り合わせたものをリニアステージ上に固定し、カメラの前で走査させることで実現している [93] .

基本的にはマルチバンド計測では、複数枚のフィルタを変更することで対象の分光反射率の計測を行っているため、動画の計測は困難である。動画を入力するには、光軸の合ったフィルタの分光特性の異なる画像を同期を取って入力する必要がある。通信・放送機構（現：情報

通信研究機構) 赤坂ナチュラルビジョン・リサーチセンターでは、従来の RGB3 バンドの撮影が可能な HDTV カメラヘッドを 2 つ用いて、2 分岐光学系および楕型分光特性を持つバンドパスフィルタにより各カメラヘッドで異なる 3 バンドの光を計測することで 6 バンドの画像入力を実現している [94]。また、イメージ分光器と同じようにレンズと撮像素子の間に装着し一枚の画像で一度に 4 バンドの画像を計測する MultiSpec Agro-Imager もある [95]。この装置は入射光を 4 分岐し、それぞれの光を分光透過特性の異なるフィルタを通し撮像素子の 4 分の 1 ずつに投影する機構になっており、一度に 4 枚の画像を計測するためリアルタイム計測が可能になっている。また、フィルタはユーザが自由に交換することが可能であり、計測対象に合わせたフィルタ選択ができる。

3.2.4 光源変更法とその他の分光画像入力方法

分光画像の面計測においては、撮像面の前にフィルタを設置することで撮像素子の各画素に入ってくる光の波長特性を変化させているが、光源の分光分布特性を変えることでも観測される光の波長特性を変化させることが可能である。

胃粘膜色の分光反射率推定に関しては、3 つのフィルタでの推定が可能であることが報告されているが、内視鏡での観測のために小型のカメラを使う必要がある。そこで、光源の前で RGB のフィルタを回転させ計測された画像から主成分分析を使って分光反射率の推定を行っている [84]。また、Hauta-Kasari らはニューラルネットワークでフィルタ関数の最適化を行い、フィルタ関数に相当する分光分布を持つ光を合成し分光反射率を測定するシステムを提案している [92]。このシステムでは、スリットを通った光源の光が凹面回折格子で分光され、焦点面に置かれた液晶パネルを選択的に通過し、第 2 凹面回折格子で混合されることで実現している。

これまでにまとめた分光画像計測手法は、カメラ側または光源側での分光特性を変化させることで、対象の分光反射率を推定していた。これらと異なる原理に基づいた分光画像入力方法としてフーリエ分光影像法がある [96]。この方法は、入射光を 2 分岐し、光路差を変化させながら計測した干渉強度分布を逆フーリエ変換することでもとの入射光の強度分布を得るものである。

3.3 可視画像と近赤外線画像の同時計測

これまで分光画像計測手法についてまとめてきたが、最後に可視画像と近赤外線画像の同時入力可能な装置について述べておく。

近年、可視領域の画像計測だけでなく、紫外領域、赤外領域の画像計測も盛んになってきている。特に、近赤外線は CCD 素子が一般に 1000nm 付近まで感度を持っているため比較的容易に計測ができる。しかし、計測対象の可視光領域の情報と合わせて近赤外線の情報を得ることは、光軸の合った可視光用と近赤外線用のカメラを 2 台準備する必要がある簡単ではない。このような可視光と近赤外線のそれぞれの画像を同時計測する装置としては、前述の MultiSpec Agro-Imager がある [95]。4 枚のフィルタのうち 3 枚を RGB フィルタにし、残り 1 枚を IR パスフィルタにすることで可視光のカラー画像と近赤外線画像を同時に計測することが可能である。また、3CCD カメラのダイクロイックプリズムの分光特性を調整することで可視光画像と近赤外線画像の同時計測を可能にしたものもある [97]。

4 まとめ

本稿では距離画像と分光画像の計測方法について、代表的な研究例とその原理、最新動向についてサーベイした。計測原理そのものには古くから知られたものが多いものの、昨今のデバイス技術の発展や問題に関するより深い理解により従来は不可能と思われていたような機器や方法が実現されつつあることが興味深い。特に距離画像センサについてはフォト LSI により高速化を図った機器が三角測量法と強度変調光位相差測定法の双方で精力的に開発されており、近いうちに一般化する可能性がある点を指摘しておきたい。また分光画像についてはリモートセンシングや医用画像だけでなく、リサイクルにおける材質判別やデザイン分野におけるより高精度な質感再現など様々な分野に用途が広がっている。また従来はビデオ用に限られていた画像センサが近年スチルカメラ分野に大きく広がりを見せたことに伴い、より個性に富むセンサが今後も登場するであろうと思われ、今後の発展にも注目したい。

参考文献

- [1] 佐藤宏介, 八木康史, "コンピュータビジョンのための画像センサ", コンピュータビジョン 技術評論と将来展望, pp.8-24, 1998.
- [2] 井口征士, 佐藤宏介, "三次元画像計測", 昭晃堂, 1990.
- [3] Y. Schechner and N. Kiryati, "Depth from Defocus vs. Stereo: How Different really are they?," Int. J. Computer Vision, Vol. 39, No. 2, pp. 141-162, 2000.
- [4] 奥富正敏, "ステレオ視", コンピュータビジョン 技術評論と将来展望, pp.123-137, 1998.
- [5] T. Kanade, H. Kano and S. Kimura, "Development of a Video-Rate Stereo Machine," Proc. of Int. Robotics and Systems Conf. (IROS'95), pp. 95-100, 1995.
- [6] "コマツ 多眼ステレオ VF^2Z ",
<http://www7.airnet.ne.jp/komatsu/Stereo/stereoj/index.htm>
- [7] 芦ヶ原隆之, 佐部浩太郎, "二足歩行ロボット用小型ステレオビジョンとそのアプリケーションの開発", 情報研報 2003-CVIM-136, pp.43-50, 2003.
- [8] M. Okutomi and T. Kanade, "A multiple-baseline stereo," IEEE Trans. PAMI 15(4), pp. 353-363, 1993.
- [9] "Pointgrey Research,"
<http://www.ptgrey.com/>
- [10] 棚橋英樹, 山本和彦, 桑島茂純, 丹羽義典, "ステレオ全方向画像システム (SOS) の開発", 第6回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.145-150, Jun. 2000.
- [11] 松井克宜, 杉山行信, 井堀篤, 豊田晴義, 向坂直久, 水野誠一郎, "プロファイルセンサを用いた高速3次元計測モジュール", 第10回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.241-246, 2004.
- [12] "三次元位置計測装置", 特開平 10-002722
- [13] 三田雄志, 日浦慎作, 加藤博一, 井口征士, "投影パターンの戦略的変更による多面体追跡", 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.6, pp.1953-1964, 1998.
- [14] "コニカミノルタ VIVID",
<http://www.minolta-rio.com/vivid/>
- [15] "3次元計測装置", 特開平 11-271030
- [16] 佐藤幸男, 荒木和男, "高速3次元物体計測法の提案", 信学論 D, Vol.J70-D, no.5, pp.1053-1055, 1987.
- [17] 荒木和男, 田中伸宣, 藤野智浩, 佐藤幸男, "高速3次元形状計測装置の試作", 信学論 D, Vol.J71-D, no.10, pp.2059-2068, 1988.
- [18] 木田隆夫, 佐藤宏介, 井口征士, "リアルタイム距離画像センサ", 第5回センシングフォーラム, pp.91-96, 1988.
- [19] T. Kanade, A. Gruss and L.R. Carley, "A Very Fast VLSI Rangefinder," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 2, pp. 1322-1329, 1991.
- [20] S. H. Kang, Y. D. Seo, K. S. Hong and O. H. Kim, "A High Speed Digital Range Imaging Sensor," Proc. of Asian Conf. on Computer Vision (ACCV), pp. III-490-493, 1995.
- [21] A. Yokoyama, K. Sato, T. Yoshigahara and S. Inokuchi, "Realtime range imaging using adjustment-free photo-VLSI," Proc. of Intelligent Robotics and Systems, pp.1751-1758, 1994.
- [22] 横山敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之, 井口征士, "無調整型フォトVLSIセンサを用いた実時間距離画像計測-シリコンレンジファインダー", 信学論 D-II, No.9, pp.1942-1500, 1996.
- [23] S.Yoshimura, T.Sugiyama, K.Yonemoto and K.Ueda, "A 48kframe/s CMOS Image Sensor for Real-time 3-D Sensing and Motion Detection," IEEE ISSCC Dig. of Tech. Paper, pp.94-95, 2001.
- [24] S.Yoshimura, et al., "100frames/s CMOS Range Image Sensor for Realtime 3-D Sensing and Motion Detection," ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp.94-95, Feb. 2001.
- [25] T. Sugiyama, S. Yoshimura, R. Suzuki and H. Sumi, "A 1/4-inch QVGA Color Imaging and 3-D Sensing CMOS Sensor with Analog Frame Memory," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. of Tech. Papers, pp. 434-435, 2002.

- [26] "Sony Entertainment Vision Sensor,"
<http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200202/02-0207/>
- [27] 大池祐輔, 新宅宏彰, 池田誠, 浅田邦博, "光切断法による高精細・実時間3次元撮像システム", 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.9, pp.1149-1151, 2003.
- [28] Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "640x480 Real-Time Range Finder Using High-Speed Readout Scheme and Column-Parallel Position Detector," IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSI Symp.) Dig. of Tech. Papers, pp.153 - 156, Jun. 2003.
- [29] 石原満宏, "2次元光タイムスタンプを用いた距離動画像計測", 第10回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.501-506, 2004.
- [30] 陳謙, 竹下昌宏, 和田俊和, "DMDを用いた実時間レンジファインダの開発", 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, pp.I-733-738, 2004.
- [31] 田島譲二, "Rainbow Range Finderによる距離画像取得", 情処研報 CV, No.44, pp.1-7, 1986.
- [32] 岩川正人, 田島譲二, 本山純四郎, "Rainbow Range Finderによる距離計測実験", 情処研報 CV, No.59, pp.1-8, 1989.
- [33] 佐藤宏介, 井口征士, "空間コード化による距離画像入力", 信学論, Vol. J68-D, No. 3, pp. 369-375, 1985.
- [34] 佐藤宏介, 井口征士, "液晶レンジファインダ - 液晶シャッタによる高速距離画像計測システム - ", 信学論, Vol. J71-D, No. 7, pp. 1249-1257, 1988.
- [35] "CubicScope,"
<http://hilbert.elcom.nitech.ac.jp/Y-lab/lab/system/cubicscope/>
- [36] 服部 数幸, 佐藤 幸男, "スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダ", 信学論 Vol. J-76-D-II, No. 8, pp. 1528-1535, 1993.
- [37] "NEC Danae,"
<http://www.nec-eng.com/pro/danae100/>
- [38] 日浦慎作, 松山隆司, "構造化瞳を持つ多重フォーカス距離画像センサ", 信学論 Vol. J82-D-II, No.11, pp.1912-1920, 1999.
- [39] 浅田尚紀, 藤原久永, 松山隆司, "多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測", 信学論 J77-D-II, No. 6, pp.1048-1058, 1994.
- [40] 工藤朋之, 平野彰宏, 三池秀敏, "連続フォーカス画像を用いた奥行き分布, テクスチャー情報の検出: 偏光フィルタの利用", 画像の認識・理解シンポジウム MIRU '96, pp.I 187-192, 1996.
- [41] A.P.Pentland, "A New Sense for Depth of Field," IEEE Trans. PAMI, Vol.9, No.4, pp.523-531, 1987.
- [42] M.Subbarao and G.Surya, "Depth from Defocus: A spatial domain approach," International Journal of Computer Vision, Vol.13, No.3, pp.271-294, 1994.
- [43] 竹村岳, 松山隆司, "多重フォーカス画像を用いた実時間3次元距離計測 - 分散協調視覚システムのための多機能高精度センサの開発 -", 情処研報 97-CVIM-103, pp.3542, 1997.
- [44] M.Watanabe, S.K.Nayar, "Minimal Operator Set for Passive Depth from Defocus," Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.431-438, 1996.
- [45] M.Harwit, N.J.A.Sloane, "Hadamard Transform Optics," Academic Press, 1979.
- [46] E.E.Fenimore, T.M.Cannon, "Coded Aperture Imaging with Uniformly Redundant Arrays," Applied Optics, Vol.17, No.3, pp.337-347, 1978.
- [47] 山田憲嗣, 高橋秀也, 志水英二, "符号化開口法を用いた3次元形状検出手法", 信学論 J80-D-II, No. 11, pp.2986-2994, 1997.
- [48] S.K.Nayar, M.Watanabe, M.Noguchi, "Real-time focus range finder," Proc. of 5th Int. Conf. on Computer Vision, pp.995-1001, 1995.
- [49] "Leica Cyrax,"
<http://www.leica-geosystems.com/jp/products/cyrax/>
- [50] "Riegl,"
<http://www.riegl.co.at/>
- [51] "Canesta Sensor,"
<http://www.canesta.com/sensors.htm>

- [52] "Canesta センサ解説,"
<http://ne.nikkeibp.co.jp/members/01db/200203/1008228/>
- [53] "CMOS-compatible three-dimensional image sensor IC," US patent 6,323,942, 2001.
- [54] ペンタックス測量機図書編集委員会編, "よくわかるトータルステーション 理論からシステム応用", 山海堂, 1990.
- [55] "松下電工 距離画像カメラ",
<http://www.mew.co.jp/press/0402/0402-18.htm>
- [56] "撮像素子を用いた測距装置および測距方法", 特開 2004-045304.
- [57] 森本作也, "1チップ3次元画像センサー", 画像ラボ 7月号, pp.55-60, 2004.
- [58] 日本リモートセンシング研究会編, "リモートセンシング実用講座 画像の処理と解析", 共立出版, 1981.
- [59] Kawata S., Sasaki K., and Minami S., "Component Analysis of Special and Spectral Patterns in Multispectral Images. I. Basis." Journal of the Optical Society of America A, Vol.4, No.11, pp.2101-2106, 1987.
- [60] 河田聡, "分光画像を応用した顕微鏡画像処理", Optics Express, No.85, pp.87-94, 1988.
- [61] 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士, "物体認識のためのスペクトル画像による材質判別", 信学論 Vol.J79-DII, No.1, pp.36-44, 1996.
- [62] 株式会社トプコン 分光放射計 SR-3,
<http://www.topcon-techno.co.jp/products/110260.html>
- [63] コニカミノルタセンシング株式会社 CS-1000,
<http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/display/cs1000a/index.html>
- [64] Photo Research Inc.,
<http://www.photoresearch.com/>
- [65] オーシャンフォトンクス株式会社,
http://www.oceanphotonics.com/products_ooi_p001.html
- [66] Herrala E, Okkonen J, Hyvärinen T, Aikio M, Lammasniemi J, "Imaging Spectrometer for Process Industry Applications," SPIE Vol.2248, 1994.
- [67] Spectral Imaging Ltd.
<http://www.specim.fi/>
- [68] Eric Åstrand, Mats Österberg, Olle Hagman, and Anders Åstrom, "Near-Sensor Real Time Spectral Classification for Industrial Applications," Scandinavian Conference on Image Analysis, pp.33-40, 1995.
- [69] 久保田洋孝, 長田典子, 眞鍋佳嗣, 井口征士, "イメージ分光器を用いたスペクトル画像の取得とその応用," 電子情報通信学会 PRMU 研究会報告書, PRMU98-126, 25-30, 1998.
- [70] 長田典子, 眞鍋佳嗣, 井口征士, "スペクトル画像計測とその応用", 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.6, pp.1325-1331, 2004.
- [71] 眞鍋佳嗣, 黒坂信一, 千原國宏, "三次元形状と表面スペクトル分布の同時計測システム," 信学論 Vol.J84-DII, No. 6, pp.1012-1019, 2001.
- [72] エドモンドオプティクス・ジャパン株式会社
<http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=1615>
- [73] Yoav Y. Schechner, and Shree Nayar, "Generalized Mosaicing: Wide Field of View Multispectral Imaging," IEEE Trans. PAMI, Vol.24, No.10, pp.1334-1348, 2002.
- [74] 猪狩壮文, Robby T. Tan, 池内克史, "Interference filter を用いた多波長データ取得のためのスペクトル変換関数の推定", 画像の認識・理解シンポジウム 2004 論文集, Vol.II, pp.471-476, 2004.
- [75] 佐藤嘉伸, 河合秀夫, 田村進一, "CCD 撮像素子を用いたマルチスペクトル画像入力装置", 画像電子学会誌, Vol.14, No.2, pp.112-120, 1985.
- [76] 中野恵一, 小宮康宏, "マルチスペクトルカメラを用いた物体認識", 応用物理, Vol.65, No.5, pp.496-499, 1996.
- [77] 平成 12 年度ナチュラルビジョンの研究開発プロジェクト研究開発報告書, 通信・放送機構(現:情報通信研究機構), 2001.

- [78] 森脇耕介, 中谷幸太郎, “離散分光画像を用いた照明不変な色物体検出”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J81-D-II, No.11, pp.2574-2581, 1998.
- [79] Cambridge Research & Instrumentation, Inc.
<http://www.cri-inc.com/instruments/products/index.shtml>
- [80] 富永昌治, 岡島良介, “液晶フィルタによる分光画像システムの改良”, 映像情報メディア学会誌, Vol.54, No.2, pp. 268-276, 2000.
- [81] 津村徳道, “スペクトル画像計測法の進展”, 光技術動向調査報告書 XV, pp.407-414, 光産業技術振興協会, 1999.
- [82] L. T. Maloney, “Evaluation of Linear Models of Surface Spectral Reflectance with Small numbers of Parameters,” J. Optical Society of America A, 10, pp.1673-1683, 1986.
- [83] J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen, “Characteristics Spectra of Munsell Colors,” J. Optical Society of America A, Vol.6, No.2, pp.318-322, 1989.
- [84] T. Shiobara, S. Zhou, H. Haneishi, and Y. Miyake, “Improved Color Reproduction of Electronic Endscopes,” J. Imaging Science and Technology, Vol.40, No.6, pp.494-501, 1996.
- [85] 小島伸俊, 羽石秀昭, 三宅洋一, “化粧肌の質感解析 (III)”, 日本写真学会誌, Vol.57, No.2, pp.78-83, 1994.
- [86] D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. W. Wyszecki, “Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature,” J. Optical Society of America A, 54, pp.1031-1040, 1964.
- [87] S. Tominaga, “Multichannel vision system for estimating surface and illuminant functions,” J. Optical Society of America A, Vol.13, No.11, pp.2163-2173, 1996.
- [88] M. J. Vrhel and H. J. Trussell, “Color Correction Using Principal Components,” Color Research and Application, Vol.17, pp.328-338, 1992.
- [89] H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura, and Y. Miyake, “System Design for Accurately Estimating Spectral Reflectance of Art Paintings,” Applied Optics, 39, pp.6621-6632, 2000.
- [90] 荒井佳文, 中内茂樹, 臼井支朗, “分光反射率推定に基づく光源変動による色ずれの修正法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.2, pp.558-568, 1997.
- [91] 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, “重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定”, 光学, Vol.27, No.7, pp.384-391, 1998.
- [92] M. Hauta-Kasari, K. Miyazawa, S. Toyooka, and J. Parkkinen, “Spectral Vision System for Measuring Color Images,” J. Optical Society of America A, Vol.16, No.10, pp. 2352-2362, 1999.
- [93] K. Miyazawa, M. Hauta-Kasari, and S. Toyooka, “Rewritable Broad-band Color Filters for Spectral Image Analysis,” Optical Review, Vol.8, No.2, pp.112-119, 2001.
- [94] 平成 14 年度ナチュラルビジョンの研究開発プロジェクト研究開発報告書 [動画], 通信・放送機構 (現: 情報通信研究機構), 2003.
- [95] Optical Insights, LLC.,
<http://www.optical-insights.com/agro-imager.html>
- [96] A. Hirai, T. Inoue, K. Itoh, and Y. Ichikawa, “Application of Multiple-Image Fourier Transform Spectral Imaging to Measurement of Fast Phenomena,” Optical Review, Vol.1, No.2, pp.205-207, 1994.
- [97] Redlake MASD, LLC.,
<http://www.redlake.com/spectral/index.html>