



三次元画像計測技術の最新の動向

佐藤 宏介

奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 〒630-01 生駒市高山町 8916-5

(1994年12月2日受理)

Recent Trends on 3D Range Imaging

Kosuke SATO

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology,
8916-5, Takayama, Ikoma 630-01

1. はじめに

対象物体の立体形状を地形図的な二次元データとして計測する手法は、データ構造が画像的であることと計測に画像センサーを用いることが多いため、三次元画像計測と呼ばれている¹⁾。空間的に離れた場所から測定するため、ここで用いる画像センサーのことをレンジファインダーと呼ぶことも多い。最近、このレンジファインダーの中で、マイクロでもなくマクロでもない数 cm から数 m のミドルレンジの三次元画像計測に対するニーズが、

- ・ロボットビジョン
 - ・組立ロボットの視覚センサー (部品把持など)
 - ・物流システムの視覚センサー (物品仕分, 位置決め)
 - ・無人搬送車の視覚センサー (位置同定など)
- ・形状入力
 - ・外観検査 (寸法検査など)
 - ・形状計測 (体矯正, 足形など)
 - ・CAD データ入力 (CG モデル作成など)

の分野で高まっている。これらの分野では、レンジファインダーをマニピュレータの手先に装着するといったハンドアイを実現するため、レンジファインダーの小型軽量化と、ロボット制御のビジュアルサーボ化のためのリアルタイム化が切望されている。

このためレンジファインダーは、小型化、高速化、高精度化の各方向から改善の努力がなされている。特に小型化と高速化については昨今の半導体デバイスの革新により、シリコンチップ上に三次元計測の機能をアナログ・デジタルのハイブリッド技術で集積するというよ

うな、新たなブレイクスルーが見えてきた。

ここでは、まず三次元画像計測の基本となる計測原理を概観した後、小型化、シリコンチップ化、高速化、高精度化の動向、ならびに最近提案された新しい計測原理について紹介する。

2. 三次元画像計測技術とは

三次元画像計測の基本的データ構造は、距離画像と呼ばれる二次元画像である。通常のテレビカメラで得られる画像は白黒の値やカラー値を記憶するのに対して、距離画像は一つ一つの画素が対象物の奥行きに関する情報をもつものである。

2.1 光波距離計をベースにしたもの

光の飛行時間を測定して2点間の距離を測定する方法は、測量の分野では光波距離計として普及している。このような点計測を用いて対象全体にわたってなぞるように二次元偏向走査すれば、距離画像が得られる。光波距離計が計測時間よりも計測精度を追及しているのに対して、距離画像を得ることを目的として開発された装置は、計測点が非常に多くなるため (例えば縦横 256 画素の場合、総計測点数は 65,000 点以上になる)、計測速度を優先して設計されている。そのため、光波距離計が投射するレーザー光の強度を正弦波状に変調し、対象からの反射光と発射光との位相差の測定から距離を算出する方法が主導的なものに対して、単発の光パルスの反射到着時間を直接にデジタル時間差測定するものもある。

2.2 光投影による三角測量をベースにしたもの

三角測量法は左右二つの地点から見たときの視線方向

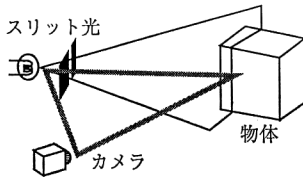


図1 スリット投影法

を測定し、視線の交差から三次元位置を算出するものである。光投影による三角測量は、二つの地点のうち一方を光を投影するプロジェクタに置き換えたものである。プロジェクタから形や方向を制御されて投影される光のことを、構造化光 (structured light) と呼び、そのさまざまな形状パターンによって、この方式は細分される。

- ・スポット光
- ・スリット光 (図1)
- ・パターン光

1回の画像入力で、物体表面のうち投影光のあたっている場所のみの三次元位置が計測できる。そこで投影光が計測対象全体に行き渡るように偏向走査すれば一つの距離画像が得られる。

3. 小型化に向けて

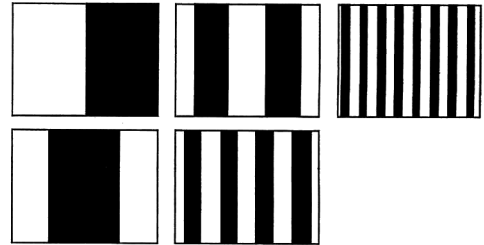
現在の実用的な三次元画像計測は、光投影による三角測量法が主流である。計測データの信頼性が高いこと、計測装置を比較的簡便に構築できるためである。このため、この方法をベースにして、より工業的な利便性が増すように、小型化、パッケージ化への努力が行われている。

3.1 スリット光投影法の実用計測ヘッド

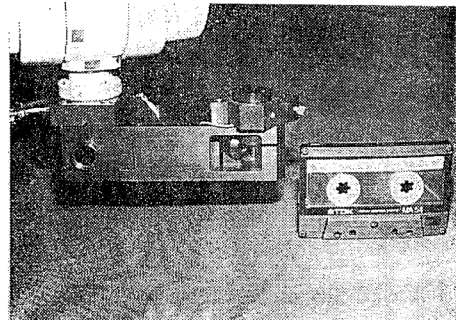
豊田中央研究所より商用化されたレンジファインダー RF-1M は、151mm×110mm×55mm のサイズの中にレーザーダイオードによるスリット光源と 404×241 画素の CCD カメラを搭載し、一次元 241 点の距離データを 16.7ms で出力できる²⁾。重量も 800g と軽量であり、マニピュレータの先に装着でき、主に自動車生産の検査工程においてハンドアイ型センサーとして利用されている。しかし、スリット光を走査する機構がないため、距離画像としてデータを得るためには、コンベアによる物体の平行移動あるいはセンサーそのものの移動が必要となる。

3.2 グレイコードパターンを投影する高速距離画像計測ヘッド

比較的少ない光の投影回数で十分に分解能の高い距離画像が信頼性高く得られ、しかも装置が単純なものとし



(a) グレイコードパターン



(b) 計測ヘッド

図2 小型距離画像計測装置の例

て、筆者らが開発したグレイコードパターン光投影法がある³⁾。

プロジェクタから、明暗のピッチが倍々に細かく変わっていくグレイコード 2進パターンが順番に投影される (図2(a))。n枚の光パターンの投影は、2ⁿのスリット光を投影していることと等価となり、画像入力の回数を大幅に削減することができる。

この原理を応用し、名古屋工業大学が開発したレンジファインダー Cubicscope は、RF-1M と異なりセンサー本体に移動させることなく距離画像を出力することができる (図2(b))⁴⁾。グレイコードパターンの投影は、スリットレーザー光を1フレーム時間内で高速に走査する間に、その明滅を制御することで行う。512×256点の距離画像を 0.57s で計測でき、サイズも 140mm×95mm×35mm と小さく、重量も 680g と軽い。

4. 実時間計測が可能なチップセンサー化に向けて

3節で紹介してきた三次元画像計測のためのレンジファインダーは、既存のデバイスのうち小型のものを組み合わせ計測ヘッドをコンパクトにまとめたものであった。しかし、このようなアプローチでは小型化に限界がある。今、三次元画像計測のみならず通常の濃淡画像処

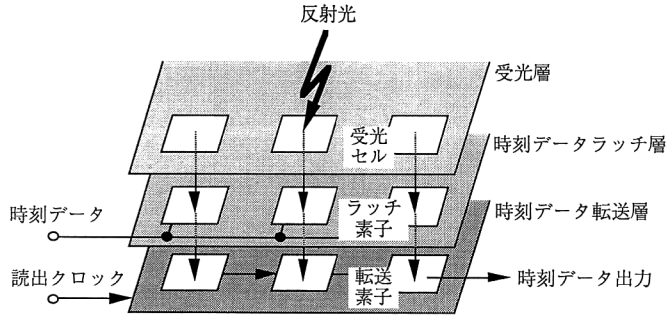


図 3 3層 IC による距離画像チップセンサーの機能構成

理をも含めたロボットビジョン全般にブレークスルーを与える可能性を持つものとして、画像センサー自身で画像処理機能を埋め込むインテリジェント画像センサーが提案されている。一般に画像センサーは、1画素ごとにホットダイオードとそれに蓄積された光電荷を転送する CCD 素子や MOS スイッチからなっている。機能的には、撮像とラスタ走査の二つが組み込まれているにすぎず、出力ピンの転送バンド幅の制約から、ビデオレートの数倍程度が画像計測の速度限界となっている。

この転送バンド幅の制約を取り除くことに加えて、画像センサー内でフィルタリング機能や記憶機能が加われば、画像処理の著しい速度向上が期待できる。レンジファインダーではないが、例えば、三菱電機で試作された3層積層構造の画像処理センサーチップがある。第1層は5×5画素のホットセンサー、第2層は5×5組の2ビット AD コンバータ、第3層は40個の ALU とシフトレジスタからなる。画像入力、AD 変換、平滑化・輪郭抽出に要する処理時間は、わずか1ms～数十μsで行うことができる。また、豊橋技科大では、電流ベースのアナログ演算素子を基本として Roberts オペレータ処理を行う3×3画素の複合機能画像センサーチップを試作した。

これらのインテリジェント画像センサーは、カメラによる濃淡画像の入力と画像プロセッサによる画像処理とを、シリコンチップ上に一つにしたものであった。三次元画像計測システムもシリコンチップ上に一つに集積することができれば、装置を大幅に小型化できるうえ装置コストも著しく低減できる。

4.1 距離画像計測機能の集積化

ロボットビジョン用途の三次元画像センサーは高速性が強く求められるが、スリット光を用いた光投影法による計測では、空間分解能×フレーム時間で原理上計測時間が制限される。Cubicscope のようにグレイコードパターン投影法を用いて、 $\log_2 n$ のオーダーに高速化する

手法もあるが、数百程度の分解能では速くても数百ミリ秒を必要とした。しかし最近、単純にテレビカメラでスリット光の画像を入力するのではなく、画像センサーの画素ごとにスリット光の三次元計測を行うようなインテリジェント画像センサーが提案され、ミリ秒オーダーの高速計測を目指す研究が進められるようになってきた。

スリット光投影法では、三次元位置をスリット光による一つの平面と、レンズとホットセンサーがなす視線によって決まる直線の交点として検出する。このセンサーは、画像センサーの1画素ごとに視線方向を固定し、その視線と対象物体が交差する一点に対して、スリット光があたる時刻からスリット光の投影方向を測定するものである。

図3に、3層構造で考えた距離画像チップセンサーの概念を示す。このセンサーは、画素一つ一つがスリット光の検知とスリット光の投影角データの保持転送の機能を有したインテリジェントセンサーであり、受光素子と時刻データのラッチ素子、時刻データの転送素子の3層

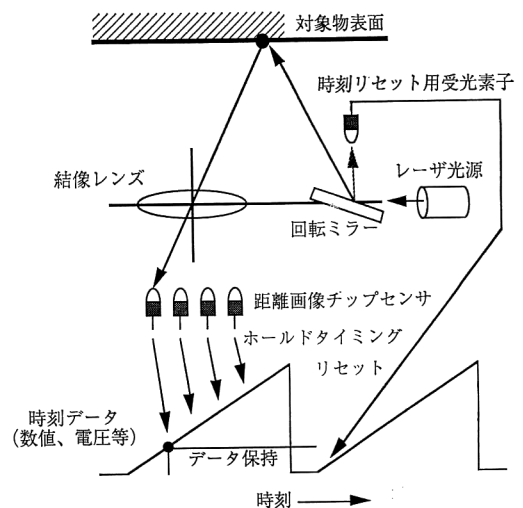


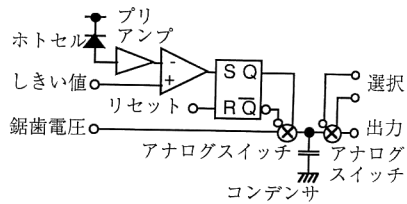
図 4 距離画像チップセンサーの駆動

からなる。図4に本センサーの計測動作を示す。定速回転するミラーにより走査されるスリット光の投影角は、基準位置センサーによってリセットされる時刻データとして置き換えられる。スリット光は結像レンズで受光層に結像され、必要ならばアンプにより増幅される。この光信号は、タイミング検出され、下層のラッチ層に伝達される。この受光タイミングパルスによって、外部から注入されている時刻データをラッチする。したがって、スリット光を1回走査させるとラッチ層の全面素子に投影角に応じた時刻データが保持される。データの読出しには、時刻データをデータ転送層に転送した後、外部にラスタ走査で出力させる。出力データはコンピュータに投影角データとして入力され、この値より距離画像を算出する。

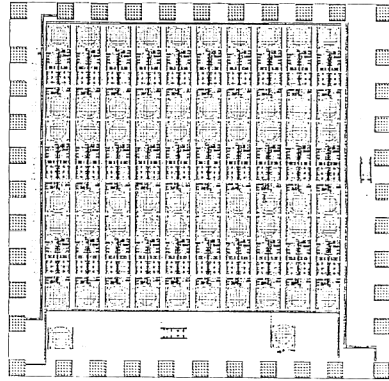
4.2 アナログサンプルホールド型

投影光の投影角に関する情報を担う時刻データに鋸波アナログ電圧信号を用いて、時刻データの保持にはアナログサンプルホールドを用いるものが最初に研究された⁵⁾。ホールドされた電圧が直接時刻を表すことになる。アナログ素子がホトダイオードなどの受光回路と整合性がよいためである。このアナログ方式の原理を最初にチップ上に集積したものに、カーネギメロン大学で試作された6×10画素のものがある。このチップ上には、ホトダイオード、光信号を増幅するアンプ、外部から注入されている鋸歯電圧をサンプルホールドするMOSスイッチ、さらに画素を選択して保持電荷を外部に出力する出力アンプを平面分割により混載させている。最新のものでは、チップ面積を拡大し32×28画素のものが製作されている⁶⁾。図5(a)はその内部回路の構成であるが、円形ホトセルからの光電流をプリアンプで増幅しコンパレータでしきい値処理した後、RSフリップフロップでラッチする。このタイミングで電荷蓄積用コンデンサに注入されている鋸歯電圧をMOSスイッチを切断することで電荷をホールドさせる。読出し時には、読出しMOSスイッチを順次スイッチングし外部にラスタ出力する。図5(b)にチップの写真を表す。

アナログサンプルホールド型のもはサンプルホールド素子がMOSスイッチと電荷蓄積用コンデンサで実現できるなど、コンパクトに設計でき、デバイスの製作上利点が多い。しかし、電荷蓄積用コンデンサの漏れ電流や温度ドリフトに依存した各種デバイスパラメータの変動など、アナログ電圧の保持が正確に保てず、総合的な三次元計測の精度はよくない。



(a)内部回路



(b)チップレイアウト

図5 アナログサンプルホールド型のセンサーの例

4.3 デジタルラッチ型

アナログサンプルホールド型の欠点を解消するため、投影角を直接デジタルデータとして扱ったものがデジタルラッチ型である。チップには外部から、時刻カウンタから発生させたデジタルカウンタ値を注入する。時刻データのラッチはフリップフロップからなるデジタルラッチ回路で行う。

この方式では、時刻データの保持が時間やノイズで劣化することはなく、外部への出力も誤りなく行える。しかし、デジタルラッチには1ビット当たり4トランジスタは最低必要で、総合の素子数が多くなる。現在のシリコンデバイス技術では、このデジタル方式が必要とする素子数は集積することは難しく、時刻データのラッチ機能はフレームバッファなど周辺回路で行わなくてはならない。また、ホトダイオードなどのアナログ部とラッチなどのデジタル部とをハイブリッドに混載するので、相互のノイズ干渉を防がなくてはならない制約も多い。

アナログサンプルホールド型、デジタルラッチ型いずれも、1画素に一つの受光素子を用いた場合、対象物体の模様による反射強度の変動やレンズのぼけ、外乱光の影響などにより受光タイミングの検出精度が低下する欠点がある。そこで1画素に相補的な二つのホトセルを

用いるアイデアが提案されている。二つのホットセルで受光量の差を比較することで、各種のノイズ成分が二つのホットセル間で相殺され、スリット光がホットセル間の中心を横切る瞬間を正確に検出することができる (図 6 (a))。

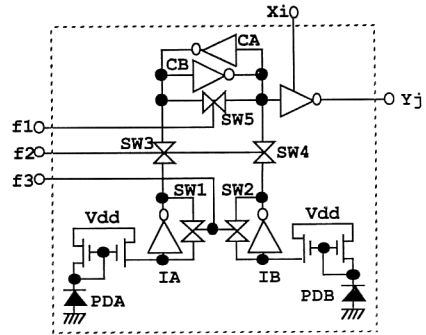
筆者は、このような構成に基づいたチップをシリコンレンジファインダーと呼び、試作を行った⁷⁾。1.5 μm ルールのダブルポリシリコン、シングルメタルの標準 CMOS プロセスでフロアレイアウトを行った (図 6 (b))。セルは 250×250 μm の正方である。クロック型インバータで微小な光電流を増幅し、インバータを正帰還結合したクロック型コンパレータで検出させる。1セル当たり 38 トランジスタを要し、このセルを 24×24 個正方形に並べ、総計 22 万トランジスタ、7.8×7.8mm の 84 pin PGA チップを製作した。波長 780 nm、30 mW の半導体赤外線レーザースリット光を用い、30 Hz で距離画像計測が行えることが確認されている。

4.4 集積型 PSD 素子

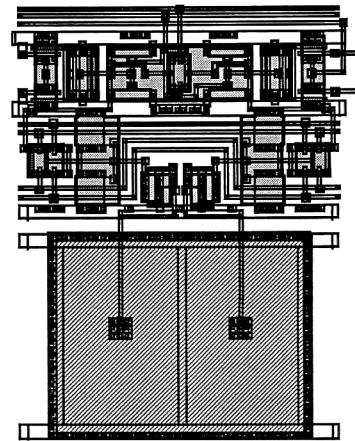
前節までに紹介したように、1 画素ごとにスリット光を受光し検出する機能を組み込むアプローチとは異なり、従来から距離光電スイッチなどで用いられてきた PSD (position sensitive device) 素子を 1 デバイス上に多数並列化するアプローチが試みられている (図 7 (a))⁸⁾。PSD 素子は、輝点位置をアナログ電流として出力するものである。これを、中京大学では、一次元の PSD を 30 素子分チップ上にアレイ化したデバイスを用い、10 ms/画像で計測できるレンジファインダーを製作した (図 7 (b))。

5. 高精度化に向けて

レンジファインダーの小型化と高速化については、インテリジェント画像センサー化によるブレイクスルーが見えてきた。後に残される問題点は、計測の高精度化で



(a)内部回路

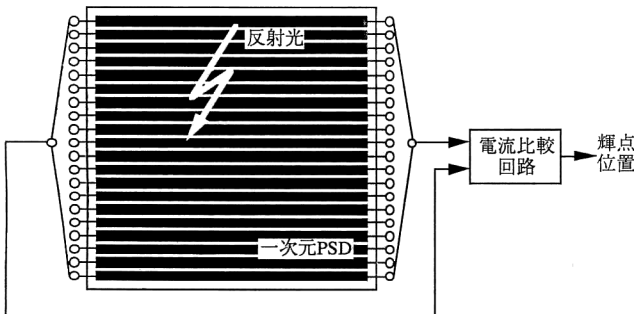


(b)セルレイアウト

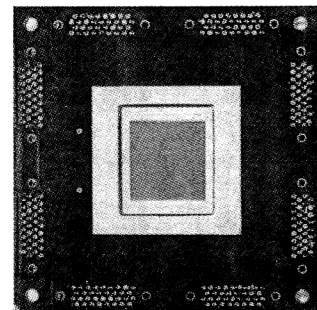
図 6 デジタルラッチ型センサーの例

ある。三次元画像計測の高精度化は次の三つの観点から行われている。

- 受光素子の分解能向上
- 光学系の工夫
- 信号処理の工夫



(a)集積構成



(b)チップ外観

図 7 集積型 PSD チップ

最初にあげた受光素子の分解能向上とは、分解能の高い受光素子を用いるという直接的なアプローチである。例えば、分解能が数百レベルの二次元 CCD 素子を用いるのではなく、数千レベルの一次元 CCD 素子を組み合わせる手法である。二つめの光学系の工夫として、カナダの NRC で開発された同期走査系が有名である⁹⁾。レーザー光の投光系と受光系を同期させながら走査することで、センサー上の受光位置が走査方向に依存なくなり、純粹に奥行き変分のみを受光位置に対応させることができる。すなわち、受光素子の分解能を光学系の工夫で有効利用しているわけである。

それに対して三つめの信号処理の工夫は、内挿技術を用いて受光素子の画素分解能以上の分解能を実現することである。例えば、スリット光の受光分布の重心を求めたり、ガウス分布に近似するなどして、サブピクセル精度でスリット光を同定する方法である。

最近、この信号処理の工夫による高精度化に、時空間画像処理に基づく新しい手法¹⁰⁾を筆者が提案したので、ここに紹介する。これは、従来のスリット光投影法では、投影光の位置検出を1枚の画像中から行うのに対して、投影光の位置検出を時空間画像中の時間軸上の処理より行う計測原理である。

5.1 パターン変調法

計測は、二次元パターンを左右に移動させつつ投影するプロジェクタと、そのパターンが照射された対象を観測するカメラ、および入力画像の時空間画像処理装置より構成される。三角測量に基づき、カメラの視線方向は画素に固定しているため、投影角をいかに高精度に検出するかが三次元計測の高精度化のポイントとなる。二次元パターンは正確な時刻に基づいて移動するので、対象物体上にパターンが通過する時刻を計測することで投影角が得られる。ここでカメラのある画素に受光される光量を時系列に並べると、投影した二次元パターンに応じ

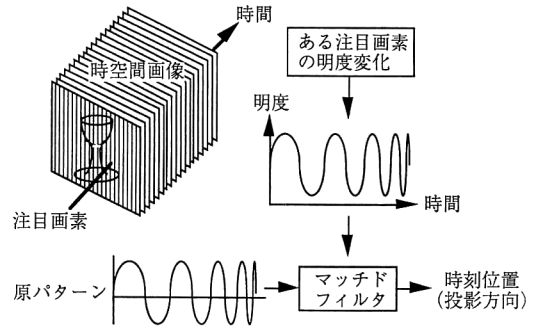


図8 パターン変調法の計測原理

た明暗パターンをなす。この時系列明暗パターンから原パターンとの移動マッチングにより通過時刻（フレーム）を決定する（図8）。

ある1画素ではなく対象物体全体の三次元計測に対しては、入力画像全体の時系列明暗パターンを得る必要があるため、時空間画像を得ることとなる。順次この時空間画像より、時間軸上に1画素分の時系列明暗パターンを切り出して処理を行う。

マッチドフィルタによってその時刻位置を検出するため、プロジェクタより投影する光は、自己相関が原点でインパルスとなるような信号でなければならない。そのような信号としては、空間周波数が連続的に変化するチャープ信号やM系列信号、疑似ランダム信号などが考えられる（図9）。そのような一次元信号を明暗に変調したものを横軸に配置し、それを縦軸に引き伸ばすことで二次元パターンを得る。そのパターンを横軸方向に平行移動させつつ投影する。

従来のスリット光投影法では、スリット像が画像中では数画素あるいは時空間画像中では数フレームしか出現しないのに対して、本方法では時空間画像中の全フレームに信号が存在するので、データ点が大幅に増し、耐雑音性に優れるとともに、高精度に計測が行える。

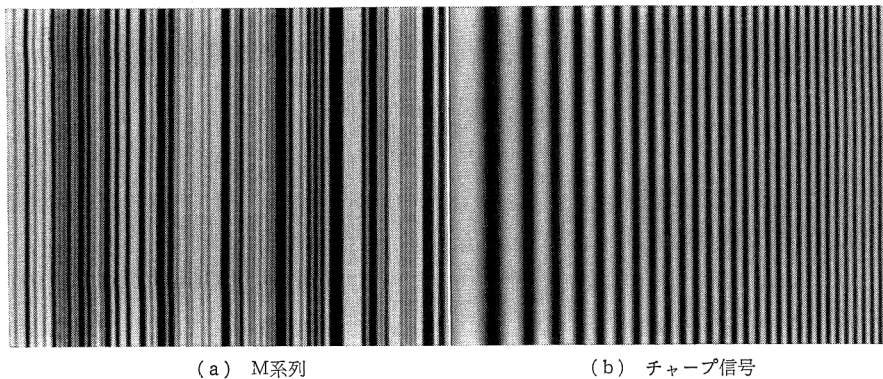


図9 パターン変調の例

6. おわりに

以上、三次元画像計測の最新動向を、小型化、高速化、高精度化のそれぞれの観点から紹介してきた。小型化、高速化には、チップセンサー化が期待されている。

紹介した距離画像チップセンサーは、安価でコンパクトな三次元画像センサーとして、CCD カメラに代るものとして高く期待されている。このようなシリコンチップで実現したインテリジェント画像センサーは、デスクサイドの大きさの三次元画像計測システムをパーソナルコンピュータに変容させる可能性があり、ロボットビジョンにブレイクスルーを与えるものである。今後注目されたい。

文 献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測 (昭晃堂, 1990).
- 2) 小関 修, 中野倫明, 山本 新, ほか: “光切断法を用いた実時間距離検出装置”, 電子情報通信学会 論文誌, **J68-D** (1985) 1141-1148.
- 3) 佐藤宏介, 井口征士: “液晶レンジファインダー液晶シャッターによる高速距離画像計測システム”, 電子情報通信学会論文誌, **J71-D** (1988) 1249-1257.
- 4) 橋本礼児, 佐藤幸男: “スキャン式空間コード化法によるレンジファインダ”, 第 22 回画像工学コンファレンス, 5-4 (1991) pp. 127-130.
- 5) 佐藤宏介, 木田隆夫, 井口征士: “距離画像チップセンサー”, 1988 年電子情報通信学会春季全国大会予稿集 (1988) p. 251.
- 6) T. Kanade, A. Gruss and L. R. Carley: “A very fast rangefinder,” *1991 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (1991) pp. 1322-1329.
- 7) K. Sato, A. Yokoyama and S. Inokuchi: “Silicon range finder—A realtime range finding VLSI,” *Custom Integrated Circuit Conf.*, **94** (1994) pp. 339-342.
- 8) 荒木和男: “高速三次元形状計測”, 画像ラボ, **2** (1991) 20-25.
- 9) M. Rioux: “Laser range finder based on synchronized scanners,” *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3837-3844.
- 10) 余田 茂, 佐藤宏介, 千原國宏: “変調投影光の時空間処理による三次元計測”, 第 91 回情報処理学会コンピュータビジョン研究会研究報告 (1994) pp. 1-6.