画像入力・計測技術の新展開*

—三次元画像計測技術を中心として—

Frontiers of Imaging and 3D Image Measurement

藤吉弘亘**

梅田和昇***

山本和彦****

Hironobu FUJIYOSHI, Kazunori UMEDA and Kazuhiko YAMAMOTO

Key words

3D image measurement, robot vision, passive method, active method

1. はじめに

1980年代から、ロボット視覚を適用した外観検査や生産システムの高度化が取り組まれ、実用されている。ロボット視覚の主要な課題は、三次元世界に存在する対象物体の位置姿勢の認識であり、高精度で高速かつ安価な三次元画像計測技術の実現に向けて、計測アルゴリズムや計測デバイスなどの研究が現在も取り組まれている。三次元画像計測は、パッシブ手法とアクティブ手法の二種類に大別することができる。パッシブ手法は、画像の特徴を利用して計測するものであり、代表的なものには多眼カメラを用いたマルチベースラインステレオがある。アクティブ手法は、三角測量に基づく手法やTOF (Time-of-flight) 距離画像センサなどのように、アクティブに光などのエネルギーを放射し、その反射量から三次元計測を行う。両手法ともに、メリット、デメリットが存在するが、目的に応じて利用することでロボット視覚の分野への応用が期待されている。

本論文では、三次元画像計測を主題とし、パッシブ手法

とアクティブ手法による三次元画像計測について解説する。

2. 画像入力の現状

カメラには、可視光カメラや赤外カメラ、紫外カメラなど様々な種類が存在する。三次元画像計測には、画像のテクスチャ情報を用いた手法が多く使用されるため、一般に可視光カメラが用いられる。ロボット視覚として使用するには、カメラの映像をPCに取り込んで画像処理が必要がある。従来、キャプチャカード (PCI 接続) を介したアナログ入力が多く用いられてきたが、近年では、カメラリンクによるデジタル入力が普及してきている。また、USB2.0 や IEEE1394, ギガビットイーサネット (GigE) で接続可能なカメラが普及し、キャプチャカードを介さずに映像をPCへ記録することが可能となった。さらに、高帯域なPCI Expressを利用して多眼カメラの画像をリアルタイムで取り込むカメラシステムが登場している。このように、データ転送速度が向上したことで、高解像度画像の高速処理による画像計測が可能となりつつある。

多眼カメラによるステレオ視の際には、各カメラに同期信号を入力してカメラ間の同期をとる必要がある。そのため、同期信号発生器などの特殊な装置を必要とする。IEEE1394 接続のカメラでは、HUB を介してカメラ間が同期でき、同期信号発生装置などの特別な装置を必要としないものが市販されており、容易に多眼同期カメラシステムを構築することができる。

3. パッシブ手法による三次元画像計測

パッシブ手法は、二台のカメラを用いたステレオ視¹⁾から始まり、多眼カメラを用いたマルチベースラインステレオ²⁾や三次元空間中の平面にエッジを投票することで対応点と距離計測を同時に行うSpace Sweeping法^{3)~5)}、非同期の問題をCV技術で解決する多眼非同期カメラによる距離計測法^{6)~10)}、カメラを工夫することにより単眼カメラで距離計測を行う手法^{11)~13)}が提案されている。本章では、多眼同期カメラ、多眼非同期カメラ、単眼カメラによる距

*原稿受付 平成20年11月27日

**正会員 中部大学工学部情報工学科 (愛知県春日井市松本町1200)

***正会員 中央大学理工学部精密機械工学科 (東京都文京区春日1-13-27)

****正会員 岐阜大学工学部 (岐阜市柳戸1-1)

藤吉弘亘

1997年中部大学大学院博士後期課程修了。

1997~2000年米カーネギーメロン大学ロボット

工学研究所 Postdoctoral Fellow. 2000年中部大学講師を経て2004年より同大准教授。2006年米カーネギーメロン大学ロボット工学研究所客員研究員。計算機視覚、動画画像処理、パターン認識・理解の研究に従事。

梅田和昇

1989年東京大学工学部精密機械工学科卒。1994年同博士課程修了。同年中央大学理工学部精密機械工学科専任講師。2006年より同教授。現在に至る。2003~2004年カナダNRC Visiting Worker。ロボットビジョン、画像処理の研究に従事。

山本和彦

1971年東京電機大学大学院修士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。手書き文字認識の研究に従事。1979~1980年、米国メリーランド大学で並列分散型処理による画像理解の研究。1986~1994年、電子技術総合研究所知能情報部画像研究室室長。現在、岐阜大学工学部応用情報学科教授。人工知能、パターン認識、特に図形の柔軟な対応付けの研究に従事。

離計測法に焦点を置き、その動向について述べる。

3.1 多眼同期カメラによる距離計測法

古くから対象物の三次元空間の位置を求める手法が研究されている。より正確な対応点を求める手法としてマルチベースラインステレオ²⁾がある。マルチベースラインステレオは、一つの基準となるカメラと、様々な長さや方向のベースラインをもつカメラのペアを構成し、複数のステレオ画像対から得られるマッチングコストを足し合わせる。そして、そのマッチングコストが最小となる位置を画像間の対応位置として決定することで、距離情報を測定することができる。

ロボット視覚では、ロボットが動作する三次元の環境把握やピッキング作業における対象物までの距離の把握が重要であり、高精度な距離計測法が必要とされるため、多眼同期カメラによる距離計測法が利用されている。川田工業らにより開発されているヒューマノイドロボット HRP シリーズ¹⁴⁾は、三台のカメラを用いて三次元位置を計測し、人間との協調搬送などを実現している。また、全方向の距離を算出することのできる SOS (Stereo Omni-directional Imaging System)¹⁵⁾は、全方向の危険を察知するインテリジェント車いす¹⁶⁾への適用が検討されている。市販自動車にもステレオカメラが搭載され、車両と歩行者の分類結果と距離情報を用いて、衝突を防止するシステムが実現されている¹⁷⁾¹⁸⁾。

Space Sweeping 法は、三次元空間中に z 平面を作成し、その z 平面を z 軸方向に移動させながら z 平面に画像上のエッジを投票する。この投票数から、複数の画像間の対応点と、三次元位置を同時に求める手法である。近年では、グラフカットなどを用いて、近傍情報を効果的に使用することで高精度な計測を実現している。また、GPU によるリアルタイム実装例も報告されている⁴⁾⁵⁾。本手法は、主に市街地などの三次元構造の生成⁵⁾、仮想焦点画像生成¹⁹⁾などの画像生成分野に利用されている。

3.2 多眼非同期カメラによる距離計測法

多眼同期カメラは、カメラ間の同期機構の設置にコストや手間がかかる。一方、近年安価な USB カメラが高解像度化し、低コストな多眼カメラシステムの構築に利用され始めている。USB カメラで構成された多眼非同期カメラは、ステレオ視で得られる同一時刻の対応点が算出できないという大きな問題があるため、カメラ間が同期していなくても、CV 技術を用いて三次元情報を求める手法が提案されている。

多眼非同期カメラを用いる際の問題を解決し三次元位置を推定する手法として、各フレームの画像から特徴点を算出し、フレーム間の対応を求めた後に、内挿法により存在しないフレームの対応点を算出する手法が提案されている。対応点の位置を高精度にするためにエピポーラ線の拘束を用いる手法⁶⁾や、フレーム間の対応をオプティカルフローで求める手法⁷⁾、その対応をスケール変化に不変な特徴量として知られている SIFT 特徴²⁰⁾で求める手法⁸⁾など

が提案されている。これらの手法はフレーム間の対応点を求めた後に他方のカメラに対応する時刻の対応点を内挿により求めることから内挿法による三次元位置推定法といえる。

一方、非同期ステレオ動画像を用いた動的シーンの位置とモーションの同時推定⁹⁾では、フレーム間で特徴点の対応付けを行う内挿法と違い、基準となる画像上の特徴点と最も類似している位置を対応づけたい画像すべてから同時に推定し、各点における距離と複数の三次元モーションに加え、時間ずれも推定する手法である。非同期画像間の関係を考慮したコスト関数を定義し、そのコスト関数を最小化することで、パラメータの同時推定を行う手法である。

最後に、電子シャッタースピードを遅くすることでボールの三次元軌跡の計測を行う手法¹⁰⁾について紹介する。一般的に、高速に動くボールなどの対象物を撮影するときには電子シャッタースピードを速くし、ブレの少ない映像を撮影するが、本手法では電子シャッタースピードを故意に遅くすることによりボールの残像を発生させる。電子シャッタースピードをフレームレートと同じにすることで、複数の非同期カメラから得られるボールの残像は共通部分を多くもち、視体積交差法を用いることで三次元軌跡を算出することが可能となる。

以上のように、多眼非同期カメラを用いた計測では、非同期の問題をアルゴリズム的に解決し、三次元位置の推定を実現している。本手法は、家庭用ビデオカメラでの利用が可能であり、三次元計測の個人利用への展開が期待される。

3.3 単眼カメラによる距離計測法

前述したように、一般的に距離を計測するためには、複数のカメラが必要とされる。これは、三次元空間中にカメラのレンズ中心と画像上の点を結ぶ光線が引かれるのみで、一意に三次元空間中の位置を決定することができないことから明白である。しかし、単眼カメラに工夫を施すと、三次元位置の推定が可能となる。その例として、フォーカスを変化させた画像を用いることによる距離の推定 (Depth from focus)¹¹⁾やレンズの球面収差を利用した手法 (蛍狩りカメラ)¹²⁾¹³⁾が挙げられる。

Depth from focus は、レンズのフォーカスを変化させることにより距離を計測する手法であり、一般的に広く知られている手法である。一方、蛍狩りカメラは、球面収差の大きな光学レンズを利用することで、距離計測対象となる光源 (LED) をリング像として撮像し、そのリングの直径と中心位置から、点光源の距離と方向を決定し距離推定を行う手法である。カメラのレンズ中心から点光源までの距離はリングの直径を用いた関係式により推定し、点光源の中心位置と各軸との角度を求めることで点光源の三次元位置を推定することができる。

このようにカメラのフォーカスやレンズを工夫することにより、対象物体の距離を推定する手法が提案されている。蛍狩りカメラは、リアルタイム処理が可能であり、ア

図1 アクティブ手法による距離計測の基本原則

スリートの運動解析やモーションキャプチャの分野へ展開されている。

4. アクティブ手法による三次元画像計測

本章では、アクティブ手法についてまとめる。手法の概要を述べた後、三角測量に基づく手法、および最近注目されている TOF 距離画像センサについて解説する。なお、詳細なサーベイに関しては、文献 21) 22) などを参照されたい。

4.1 アクティブ手法の概要

これまでに実現されているアクティブ手法の多くは、(a) 光路のずれ、(b) 光の飛行時間、のいずれかを利用して距離を計測する（図1参照）。

(a) は、対象に投光した光が反射して戻ってくるときの光路のずれを利用し、三角測量の原理に基づいて距離を得るというものである。モアレ法も広い意味でこの枠組みに含まれると考えられる。

(b) は、対象に投光した光が反射して戻ってくる時間を測定し、光の速度を掛けて2で割ることで距離を得るというものであり、飛行時間法（TOF 法、Time-of-flight method）と呼ばれている。超音波やマイクロ波を用いた距離計測と同じ原理である。

(a) と (b) には、計測対象までの距離に対する計測の不確かさの特性に大きな違いがある。(a) では距離の大小により不確かさが大きく変化する。すなわち、対象が遠くなるに従い、光路のずれが急速に小さくなって不確かさが大きくなる。これによる不確かさは一般に距離の二乗に比例する。一方 (b) では、不確かさが距離にそれほどよらない。時間の計測の誤差が距離の影響をそれほど受けないためである。以上の特性により、一般に、近距離の計測では (a) が、遠距離の計測においては (b) が有利である。

4.2 三角測量に基づく手法

ステレオ法のカメラの一台を投光器に置き換え、スポット光、スリット光などを投影し、三角測量の原理で距離を求める一連の手法である。ステレオ法と比較すると、左右の画像間で対応する点を求める対応点問題を回避することができ、ステレオ法で困難なテクスチャの少ない箇所での

距離の計測が問題なく実現できるという利点がある。実用性が高いため、多くの研究開発が行われており、製品化されているものも多い。

(1) スポット光のスキャン

レーザスポット光を投光し、投影された点までの距離を求める。距離画像を得るためには、二次元方向にスキャン（走査）する必要がある。カナダ NRC（国立研究所）の Synchronized Laser Scanner²³⁾²⁴⁾ が有名である。本センサはスキャンのメカニズムが巧みである。スキャンに用いる鏡の裏面が表面に平行な鏡になっており、物体に投影されたスポット像はこの裏面の鏡で反射されてライン CCD などの受光素子上に結像される。スキャンするのが鏡だけなので高速な計測が可能であり、かつスキャンによる計測方向の変化によらず受光素子の全域をレンジとした計測が可能で、10 μm オーダの高精度・高分解能の計測を実現している。さらに、光源として R, G, B の三色のレーザを合成した白色レーザを投光し、戻ってきた光をプリズムで分光してそれぞれの結像強度を得ることで対象の色情報も同時に得るセンサも開発されている。本センサは、文化遺産の三次元アーカイブ作成（最近ではモナリザが話題になった）、映画製作における三次元モデル取得、スペースシャトルでの耐熱タイルのはがれの検査などに用いられている。

(2) スリット光のスキャン

光切断法とも呼ぶ。古くからあり²⁵⁾、産業応用などでも多く利用されている。スリット光を投影して画像を入力し、スリットの位置を計測することで、一列分の距離を計測する。これを一次元方向にスキャンすることで距離画像を得る。スリットをスキャンする本数分の画像を入力する時間が必要である。一般的な CCD カメラを使うと一枚の画像入力に 1/30 s（フレームレート）要するため距離画像の計測に時間を要するが、高速の CCD を用いるなどで高速化が図られている。また、光切断法の一種の拡張として、符号化された ON/OFF パターンの画面を時系列に投影することによって、スリット数を n としたときに必要なスキャン数を n から $\log_2 n$ のオーダに減らす時系列符号化法が知られている²⁶⁾。佐藤らが開発し製品化した Cubicscope²⁶⁾²⁷⁾ や Cartesia はこの時系列符号化法を利用したセンサであるが、時系列パターンを作成するために、スリット光を高速にスキャンしながら ON/OFF するという工夫をしている。0.3 s で 512 $\times$ 242 画素の距離画像を計測することができる²⁷⁾。また、スリットではなく正弦波を時系列に投影して位相から対応を求める空間位相シフト法も提案され、製品化されている。さらに、受光素子に二次元状に配置した多数のタイマつきフォトセンサアレイを用いることによって高速な計測を実現している研究がある²⁶⁾²⁸⁾。スリット光を一定速度でスキャンしたときにスリット像が各フォトセンサ上を通過する時間を求めることで各フォトセンサに対応するスリット光の方向を求め、三角測量を行う。

(3) マルチスポット光

表 1 各距離計測法のメリット、デメリットと応用例

	手法	メリット	デメリット	応用例
パッシブ	多眼同期カメラ	応用分野が広い 精度が高い	同期機構が必要 計算コストが高い	ロボット視覚 インテリジェント電動車いす、車載カメラ 市街地の三次元地図の生成 仮想焦点画像生成
	多眼非同期カメラ	カメラの設置が簡易	精度が同期カメラに劣る	家庭用カメラを用いた 3D 映像の生成 動的シーンの位置とモーション推定 運動解析
	単眼カメラ	対応点の探索が不要 リアルタイム処理が可能	カメラが特殊	運動解析 簡易モーションキャプチャ
アクティブ	三角測量に基づく手法	テクスチャから受ける影響が少ない 高精度な計測が可能	投影装置が必要	三次元アーカイブ 映画作成における三次元モデル取得 外観検査
	TOF 距離画像センサ (多点同時計測)	短時間で計測可能	低解像度 屋外での測定が困難	ロボット視覚 三次元情報入力デバイス

多数のスポット光を投影し、各スポット光までの距離をスキャンレスで計測する。スポット光が多数になることにより対応点問題が再度生じるが、計測レンジを限定することなどでこの問題を回避できる。計測レンジとのトレードオフで計測点数を多くできないという欠点はあるが、機械的な可動部がなく、実時間で計測が可能という利点がある。中澤、中島らは光ファイバグレーティングを回折格子として利用して多点スポット光の投影を実現した²⁹⁾。中島らはこの方式のセンサを無呼吸症候群の検出などの医療用途に用いている。同様の原理を用いて、移動ロボットなどでの利用を想定した小型距離画像センサも開発されている。市販のレーザプロジェクタと高速の CCD カメラを用いて 361 点からなる距離画像を 200 Hz で計測する³⁰⁾。さらに、バンドパスフィルタの装着で屋外での計測も可能である³¹⁾。

4.3 TOF 距離画像センサ

光を照射し、対象物から反射してくる時間から距離を計測する。パルス光を照射して時間を計測するものもあるが、時間そのものを計測するのではなく、光を数十 MHz 程度の正弦波で変調して投影し、投影光と反射光との間の位相差を測定して距離に換算するものが多い。単純に一つの位相差だけを見ると同位相を与える距離が複数生じてしまうため、複数の波長の変調波を用いることで測距の冗長性をなくすことなども行われている。

これまでに提案され製品化されてきたものは、スポット光（一般にはレーザ）を照射して一点の距離を計測し、距離画像を得るには、二次元方向にスキャンするものである。ロボティクス応用などに、北陽電機の URG や SICK のセンサが良く用いられている。

最近、イメージセンサのすべての素子で同時に位相差を計測する手法が提案されている。この手法を用いたものはスキャンが不要でかつ実時間で距離画像を得ることが可能であるため、注目されている。本手法は、特別な固体撮像素子を用い、撮像素子の各素子で TOF での距離計測を実現することで、スキャンレスでの距離画像計測を実現するというものである。赤外 LED アレイを用いて変調光を照

図 2 Swiss Ranger SR-3000

射し、特別な固体撮像素子を用いたカメラで撮像する。この固体撮像素子の各素子では、電荷蓄積時にゲートを高速に制御する機能があり、これを利用することで各素子での TOF を実現する。市販品の一つである Swiss Ranger (図 2 参照) で用いられている技術³²⁾³³⁾を例に示す。なお、他にも松下電工やカネスタなどから同様のセンサが市販されている。

- ・ 赤外 LED の波長は 850 nm、55 個の LED を利用し、計 1 W の赤外光を照射。
- ・ 変調周波数は 20 MHz、よって変調波の波長は 15 m。往復なので計測レンジは半分の 7.5 m まで。
- ・ 90 度ずつ位相が異なる 4 点で反射光をサンプリング。この 4 つの値からオフセット（環境光と反射光の和）、振幅（反射光）、反射光の位相が計算され、反射光の位相から距離が、オフセットからは輝度値が得られる。

5. 各距離計測法の応用例

表 1 にパッシブ手法とアクティブ手法による距離計測法のメリット、デメリットおよび応用例を示す。

パッシブ手法は、カメラのみを使用するため、比較的安価に三次元計測システムを実現できる。ステレオマッチング等の計算処理コストが高いが、ハードウェア化によりリアルタイム処理も可能となり、ロボットや車などに実用化されている。

一方、アクティブ手法は、投光投影装置などの特殊な装

置が必要となり高価である。その反面、高精度に三次元形状の計測が可能である。特に TOF 距離画像センサは、小型でかつリアルタイム処理が可能である。しかし、低解像度という問題があるため、今後高解像度化することで産業用ロボットへの実利用が大いに期待される。

6. お わ り に

三次元画像計測技術の分野において、パッシブ手法とアクティブ手法について解説した。三次元画像計測は高精度化と高速化の研究が進んでおり、産業用ロボット視覚のみでなく、様々な用途への実用化が期待される。

参 考 文 献

- 1) Y. Ohta and T. Kanade: Stereo by Intra-and Inter-Scanline Search Using Dynamic Programming, IEEE Trans. PAMI, **7**, 2 (1985) 139.
- 2) M. Okutomi and T. Kanade: A Multiple Baseline Stereo, IEEE Trans. PAMI, **15**, 4 (1993) 353.
- 3) R.T. Collins: A Space-Sweep Approach to True Multi-Image Matching, CVPR '96, (1996) 358.
- 4) X. Zabulis, G. Kordelas, K. Mueller and A. Smolic: Increasing the Accuracy of the Space-Sweeping Approach to Stereo Reconstruction, Using Spherical Backprojection Surfaces, ICIP 2006, (2006) 8.
- 5) D. Gallup, J. -M. Frahm, P. Mordohai, Y. Qingxiong and M. Pollefeys: Real-Time Plane-Sweeping Stereo with Multiple Sweeping Directions, CVPR, (2007) 1.
- 6) 清水彰一, 藤吉弘亘: カメラ間のシャッタータイミングのずれを利用した高速 3 次元位置推定, MIRU2004, **1** (2004) 428.
- 7) C. Zhou and H. Tao: Dynamic Depth Recovery from Unsynchronized Video Streams, CVPR, (2003) 351.
- 8) M. Svedman, L. Goncalves, N. Karlsson, M. Munich and P. Pirjanian: Structure from Stereo Vision Using Unsynchronized Cameras for Simultaneous Localization and Mapping, IROS, (2005) 2.
- 9) 関晃仁, 奥富正敏: 非同期ステレオ動画像を用いた同時最適化による位置とモーションの推定, CVIM, **49**, SIG 6 (2008) 22.
- 10) 高野橋健太, 眞鍋佳嗣, 安室喜弘, 井村誠孝, 千原國宏: 残像を利用したボールの 3 次元軌跡の計測, CVIM, **48**, SIG 1 (2007) 35.
- 11) P. Grossmann: Depth from Focus, Pattern Recognition Letters, **5** (1987) 63.
- 12) 藤原孝幸, 室伏広治, 湯浅景元, 奥水大和: 蛍狩りカメラを用いたアスリートの運動解析システムの提案, 情報科学技術レターズ, **6** (2007) 305.
- 13) 瀬古保次, 佐口泰之, 堀田宏之, 伊與田哲男, 奥水大和: 『蛍狩り計測法』: レンズの球面収差によるリング像の形成とそのハフ変換を利用した単眼多点 3D 位置計測, 電子情報通信学会論文誌 D, **J91-D**, 8 (2008) 2121.
- 14) 川田工業株式会社: <http://www.kawada.co.jp/mechs/index.html>
- 15) 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典: 実環境センシングのための全方向ステレオシステム (SOS), 電気学会論文誌 C, **121-C** (2000) 876.
- 16) 佐藤雄隆, 坂上勝彦: 全方向ステレオシステム (SOS) を搭載したインテリジェント電動車いすの開発, VIEW2006, (2006) 231.
- 17) 齊藤徹, 森光登, 関口幸弘, 丸山匡, 加藤寛基, 松浦宗徳, 柴田英司: ステレオ画像認識運転支援システムのソフトウェア開発について, 第 14 回画像センシングシンポジウム (SSII2008), IN2-14 (2008).
- 18) 片平聡, 高橋靖, 並木信夫, 柴田英司: ステレオ画像認識運転支援システムのハードウェア開発について, 第 14 回画像センシングシンポジウム (SSII2008), IN2-15 (2008).
- 19) 杉本茂樹, 奥富正敏: カメラアレイを利用した任意画像領域に対する仮想焦点画像生成, 第 14 回画像センシングシンポジウム (SSII2008), IN3-02 (2008).
- 20) 藤吉弘亘: Gradient ベースの特徴抽出: SIFT と HOG, 情報処理学会 CVIM 研究会資料, **2007**, 87 (2007) 211.
- 21) P. Besl: Active, Optical Range Imaging Sensors, Machine Vision and Applications, **1**, 2 (1998) 127.
- 22) F. Blais: A Review of 20 Years of Ranges Sensor Development, Videometrics VII, Proc. of SPIE-IS & T Electronic Imaging, SPIE, **5013** (2003) 62.
- 23) M. Rioux: Laser Range Finder Based on Synchronized Scanners, Applied Optics, **23**, 21 (1984).
- 24) J.-A. Beraldin et al.: Real World Modelling through High Resolution Digital 3D Imaging of Objects and Structures, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, **55** (2000) 230.
- 25) Y. Shirai: Recognition of Polyhedrons with a Range Finder, Pattern Recognition, **4**, 3 (1972) 243.
- 26) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: コンピュータビジョン技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, (1998).
- 27) 佐藤幸男, 長谷川一英: レンジファインダ Cubicscope の実用的諸応用, Robomec'99 講演論文集, 2P2-72-061 (1999).
- 28) T. Kanade, et al.: A VLSI Sensor Based Rangefinding System, Robotics Research Fifth International Symposium, (1990) 49.
- 29) 中澤和夫他: ファイバースケイティングを用いた 3 次元形状計測システムの開発, 信学論, **J69-D**, 12 (1986) 1929.
- 30) 立石雅輝, 石山英俊, 梅田和昇: マルチスポットレーザプロジェクトを用いた 200Hz 小型距離画像センサの構築, 日本機械学会論文集 C 編, **74**, 739 (2008) 499.
- 31) 石山英俊, 梅田和昇: 屋外照明環境での 200 Hz 距離画像計測, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I1-01 (2008).
- 32) B. Büttgen, T. Oggier and M. Lehmann: CCD/CMOS Lock-in Pixel for Range Imaging: Challenges, Limitations and State-of-the-art. In Proceedings: 1st Range Imaging Research Day, (2005) 21.
- 33) T. Oggier, et al.: An All-solid-state Optical Range Camera for 3D Real-time Imaging with Sub-centimeter Depth Resolution (SwissRanger), Proc. SPIE, **5249** (2004) 534.