

第 7 章

応用開拓に向けた距離検出の高分解能化

7.1 はじめに

前章までは、主に映像制作分野への応用を目的とし、そのために必要な性能要件を満たすカメラとその周辺技術の開発に取り組んだ。従来技術で困難であった高速かつ高精細な距離画像検出を可能とする本技術は、映像制作分野に限らず、医療やロボットビジョン、セキュリティ、形状計測・検査など、幅広い産業分野への応用の可能性を秘めている。

第 5 章で試作したハイビジョン Axi-Vision カメラの距離検出分解は 17 mm (強度変調光の周波数 45 MHz、シャッター時間幅 2 ns、被写体までの距離 2 m の場合)であり [1]、この値は出演者と背景セットを距離情報で区別するなどの映像合成用途としては実用的な値であった。しかし、本技術を他の産業分野へ広く応用展開するには、より高分解能な距離検出性能が要求される。

そこで、本章では、このカメラ技術の新たな応用開拓を目指し、より高分解能な距離検出手法を開発する。まず高分解能な距離検出方式として、パルス照射光と撮像ゲインの高速変調による方法を提案し、次に実験によりその基本特性を測定評価し、高分解能な距離画像検出の可能性を検証する。

7.2 距離検出分解能について

Axi-Vision カメラの距離検出分解能は、距離検出 SN 比や測定レンジにより左右される。よって、高分解能な距離検出のためには、距離検出 SN 比の向上や測定レンジを短くする必要がある。距離検出 SN 比を決める主な要因は、I.L.および CCD のショットノイズであり、その改善手法には撮像素子のノイズ低減の他に、画像蓄積フィルター [2, 3]や空間フィルターによるノイズ低減手段があるものの、検出速度や空間解像度を

犠牲としない大幅なノイズ低減は困難である。一方、測定レンジを短くするには、強度変調光の周期とシャッター時間幅を短くしなければならない。しかし、これまで試作した Axi-Vision カメラでは、照射光の変調周期は 20~200 ns、シャッター時間幅は 1~10 ns であり、LED 光のさらなる高速変調と I.I.のシャッター時間幅の大幅な短縮は技術的に困難である。

7.3 高分解能方式の提案

そこで、高分解能な距離検出を実現するために、短パルスレーザー光を照射光とし、被写体からの反射光を撮像ゲイン変調カメラにより撮影する方式を提案する[4]。図 7.1(a)に前章までの強度変調光方式を示し、図 7.1(b)に新たに提案する撮像ゲイン変調方式を示す。

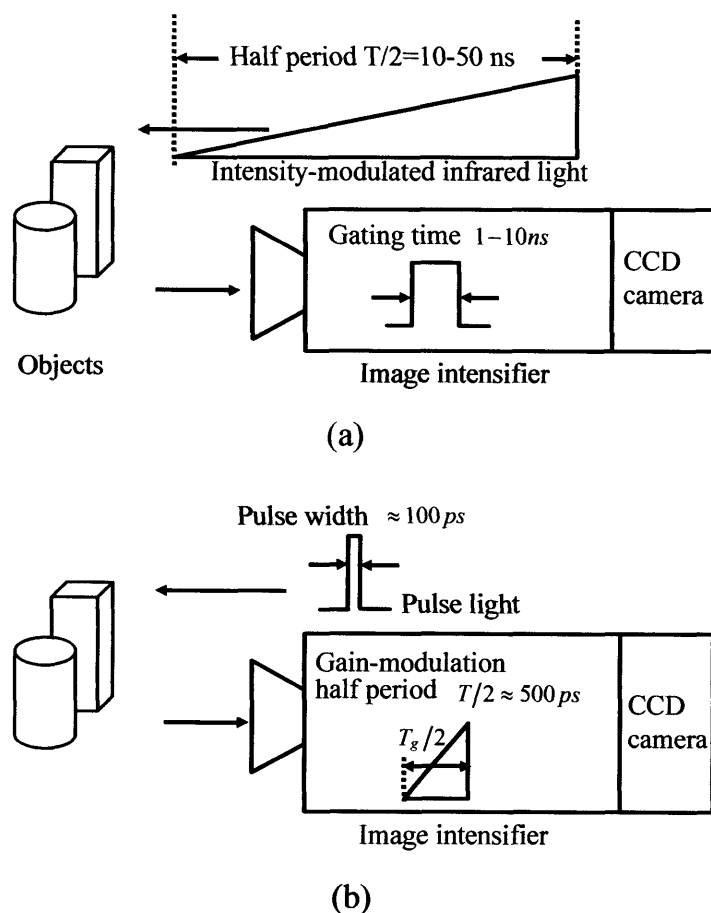


図 7.1 照射光と撮像ゲインの変調波形 (a) 強度変調光方式
(b) 撮像ゲイン変調方式

これまでの強度変調光方式(図 7.1(a))では、照射光は単調な増加/減少変調であり、撮像は高速シャッターによるパルス状であった。一方、ここで提案する撮像ゲイン変調方式(図 7.1(b))では、それぞれの変調波形を入れ替え、照射光をパルス状、撮像ゲインを単調な増加/減少変調とする。光源には従来の LED の代わりに短パルスレーザーを使用し、撮像ゲイン変調は I.I. の外部変調駆動により増加/減少を 1 ナノ秒以下の周期で行う。

従来の強度変調光方式において高分解能化を図るには、I.I. の撮影時間幅を数百ピコ秒～数十ピコ秒以下に短縮する必要がある。しかし、I.I. の電氣的駆動制御が困難となるとともに、数十 MHz の高速繰返しシャッター動作によるデバイスへのストレスも大きく、感度などの撮像特性の劣化が生じる。これらデバイスの性能限界による課題を解決するために、本提案方法では、照射光を数百ピコ秒以下の短パルスレーザー光とし、撮像ゲインをこのパルス光に対して比較的長い周期で増加/減少変調させる。この方式により、現実のデバイス性能においても測定レンジを従来の 1/10 以下にすることも可能となり、大幅な距離検出の高分解能化が図れる。

図 7.2 に提案方式のカメラシステムの概要を示す。短パルスレーザー光を被写体に照射し、時間とともに直線的に撮像ゲインが変化するカメラで撮影する。すると、被写体の距離 d_1 、および d_2 に応じて、カメラ側への反射光の到達時間が異なるため、それぞれの距離の違いが、画像の輝度差として撮影される。また、反射率の補正は、撮像ゲイン増加時と減少時の画像間の演算処理で行う。

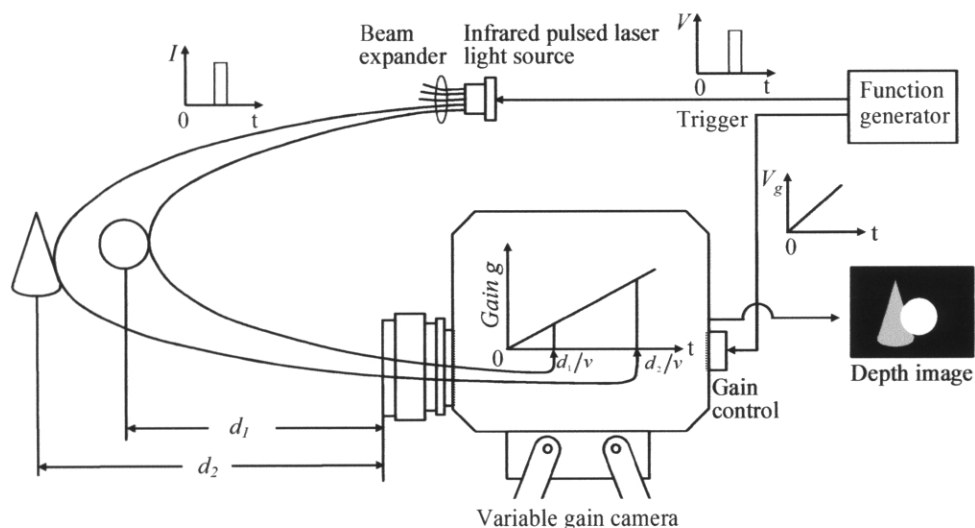


図 7.2 撮像ゲイン変調方式の Axi-Vision カメラの概要

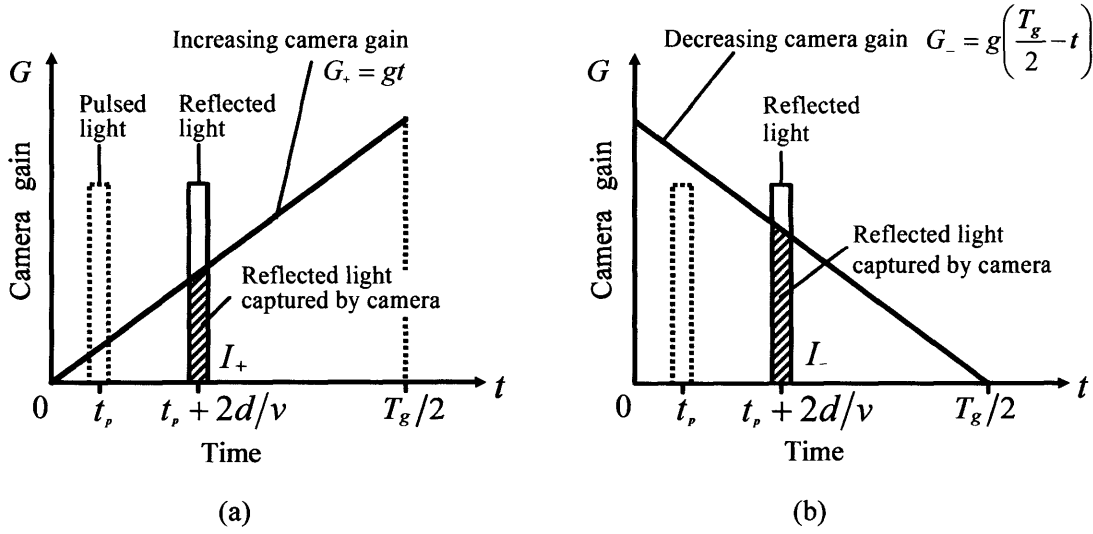


図 7.3 距離検出原理 (a) 増加ゲイン撮像時 (b) 減少ゲイン撮像

距離検出原理を、図 7.3 を用いて説明する。カメラから距離 d に位置する被写体に、パルス光を時刻 t_p に照射すると、反射光は時刻 $t_p + 2d/v$ (v は光速) にカメラ側に戻ってくる。図 7.3(a) に示すように直線的に増加する撮像ゲインは、

$$G_+ = gt \quad (7.1)$$

で表される。被写体からの反射光をこの撮像ゲインで撮影した場合の検出信号 I_+ は、

$$I_+ = \frac{\rho I_0 g}{(4\pi d^2)^2} \left(t_p + \frac{2d}{v} \right) \quad (7.2)$$

となる。ここで、被写体は点状の被写体とし、 ρ は被写体の後方散乱断面積、 I_0 は光の出力強度である。この(7.2)式のみでは、反射特性などの未知のパラメータを含む項 $\rho I_0 g / (4\pi d^2)^2$ により、距離 d を求めることはできない。この係数部分をキャンセルするために、次に係数 g で減少変調する撮像ゲイン

$$G_- = g \left(\frac{T_g}{2} - t \right) \quad (7.3)$$

で被写体を撮影する(図 7.3(b))。ここで、 T_g はゲイン変調周期である。この減少ゲイン撮像時の検出信号量 I_- は、

$$I_- = \frac{\rho I_0 g}{(4\pi d^2)^2} \left[\frac{T_g}{2} - \left(t_p + \frac{2d}{v} \right) \right] \quad (7.4)$$

となる。(7.2)式と(7.4)式の右辺の係数部分 $\rho I_0 g / (4\pi d^2)^2$ が等しいため、 I_+ と I_- の比

$$\frac{I_+}{I_-} = r \quad (7.5)$$

を計算すると、反射率を含む係数がキャンセルされる。最終的に、距離 d は、(7.2)式、(7.4)式、および(7.5)式より

$$d = \frac{v}{2} \left[\frac{T_g r}{2(r+1)} - t_p \right] \quad (7.6)$$

で求められ、撮像ゲイン増加時と減少時の検出信号比 r 、照射タイミング t_p 、および撮像ゲイン変調周期 T_g より距離を算出できる。

7.4 距離検出実験

7.4.1 実験系

距離検出実験系の構成図および仕様を、図 7.4 および表 7.1 にそれぞれ示す。光源には、波長 803 nm の半導体レーザーダイオード(LD: Laser diode)を使用し、パルス光の半値幅は 68 ps、繰返し周波数は 40 MHz で被写体に照射する。

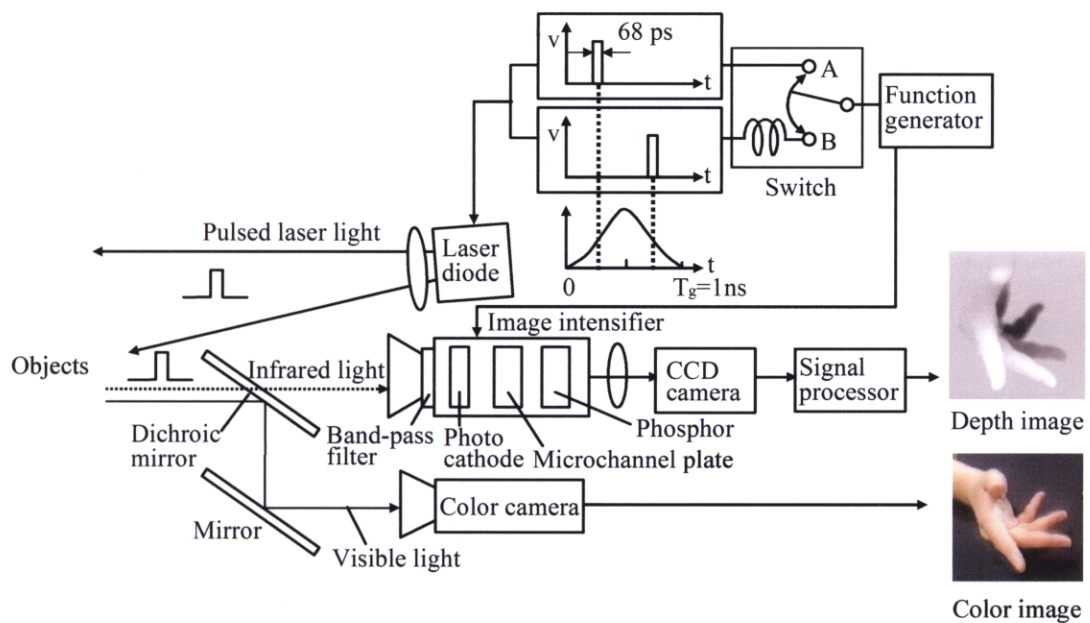


図 7.4 撮像ゲイン変調方式カメラシステムの構成

表 7.1 距離検出実験系の仕様

Light source	Laser diode	Wavelength	803 nm
		FWHM of pulsed light	68 ps
		Repetition rate	40 MHz
		Average intensity of illnmination	9.4 mW/cm ²
Gain-modulated camera	Image intensifier	Period of gain modulation	1 ns
		Repetition rate	40 MHz
	CCD camera	Size	2/3 inches
		Number of pixels	748 (H) × 493 (V)

撮像ゲイン変調カメラは、バンドパスフィルター、カメラレンズ、I.I.、リレーレンズ、および CCD カメラより構成されている。光電変換面と MCP 間への印加電圧の高速変調により、撮像ゲイン変調を行う。実験では、I.I.のゲインの変調周期を 1 ns、繰り返し周波数 40 MHz として撮像する。

信号発生器より LD のパルストリガ信号と I.I.のゲイン変調信号を同期出力する。スイッチ A の場合、パルス光と撮影ゲインの増加変調のタイミングが同期し、スイッチ B の場合、パルス光と撮像ゲインの減少変調のタイミングが同期撮影される。スイッチ A と B は、外部映像同期信号によりビデオフレーム毎に切替えられる。1 ビデオフレーム時間内(33ms)に約 1.32×10^6 回パルス光を出力し、それに同期して I.I.の撮像ゲインを変調し、蛍光面出力画像を CCD で撮像蓄積する。次のビデオフレームではスイッチ B に切替わり、同様に減少ゲインで撮影される。パルス光と撮像ゲインの変調タイミングはカラー映像の同期信号で制御され、撮像ゲインが増加時と減少時の画像を 1 ビデオフレーム毎に交互に撮影し、(7.6)式の演算処理で距離画像を算出し、テレビ信号に変換して出力する。

7.4.2 出力特性

カメラから被写体までの距離と、信号処理装置より出力される距離画像の信号レベルを測定した。被写体はカメラに正対した白紙を用いた。カメラから 500 mm の距離を中心に前後に被写体を動かし、出力信号レベルを測定した。

その結果、図 7.5 に示すように、近い被写体は距離検出信号レベルが高く、遠い被写体は検出信号レベルが低く、距離に応じた信号が得られていることがわかる。また、測定距離範囲の中心部 (カメラから被写体までの距離が 500 mm) 付近では直線に近

いが、測定レンジ周辺部において曲線を示している。これは、撮像ゲイン変調の特性が完全な三角波形状ではないためである。この曲線は、変調波形を事前に測定しておけば、直線に補正することも可能である[5]。

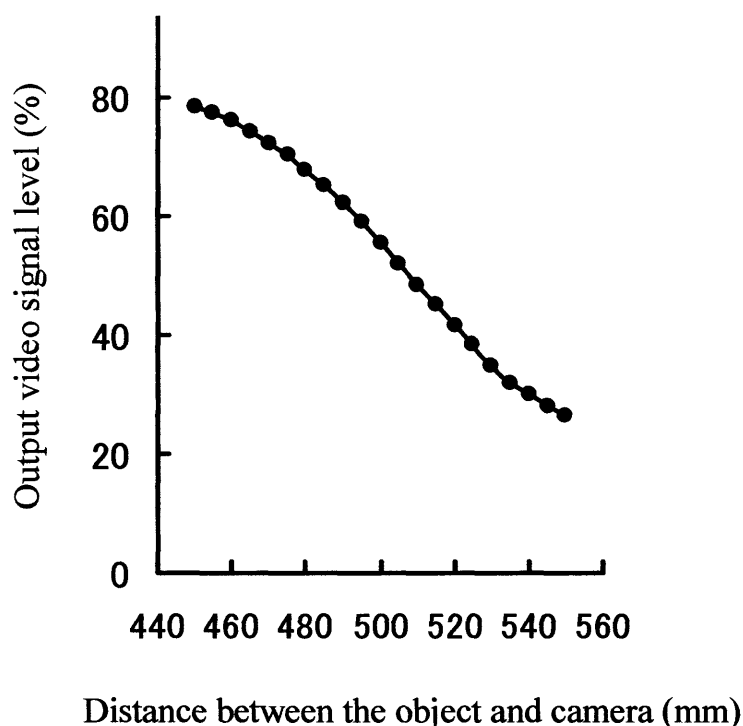


図 7.5 被写体の距離と距離検出信号の関係

この測定条件のもとで、出力映像信号のノイズ成分 δ をビデオシグナルアナライザ (シバシソク社製、TX20BX) で測定し、 3δ に相当する距離値を検出分解能として求めた。カメラから距離 500 mm の被写体に対し、ノイズ信号量は 4.3 mVrms であり、これに相当する距離検出分解能を算出した結果 2.4 mm の分解能が得られた。従来方式では光の変調周波数は約 20 ns であり、本手法では撮像ゲインの変調周期は 1 ns であるため、測定レンジは従来の 1/20 になっているが、照射光量不足等により SN 比が低下したため、実際に得られた分解能は従来の約 7 倍であった。

7.4.3 距離画像撮影実験

図 7.6(a)に示すように 10 mm の段差を 5 段階持つ階段状の被写体(高さ 60 mm)の距離画像を撮影した。被写体表面は白紙とし、カメラから被写体までの距離は 500 mm で、撮影時の平均照射光強度は $9.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ とした。

図 7.6(b)および(c)は、それぞれ増加ゲイン時および減少ゲイン時に撮影した画像の中心走査線の映像信号レベルを示している。この2つの信号の形状を比較すると、増加ゲイン撮影の場合、近い被写体が暗く、遠い被写体が明るい画像となっている。また、減少変調ゲイン撮影では、近い被写体が明るく、遠い被写体が暗い画像となっている。これら2つの画像より(7.6)式に従って求められた距離画像信号を図 7.6(d)に示す。近い被写体は明るく、遠い被写体は暗い映像として撮影され、被写体の10 mmの段差形状を表す信号が得られている。各段差の間隔が不均一なのは図 7.5 に示されているように、出力特性が測定レンジ周辺部で曲線であるためである。

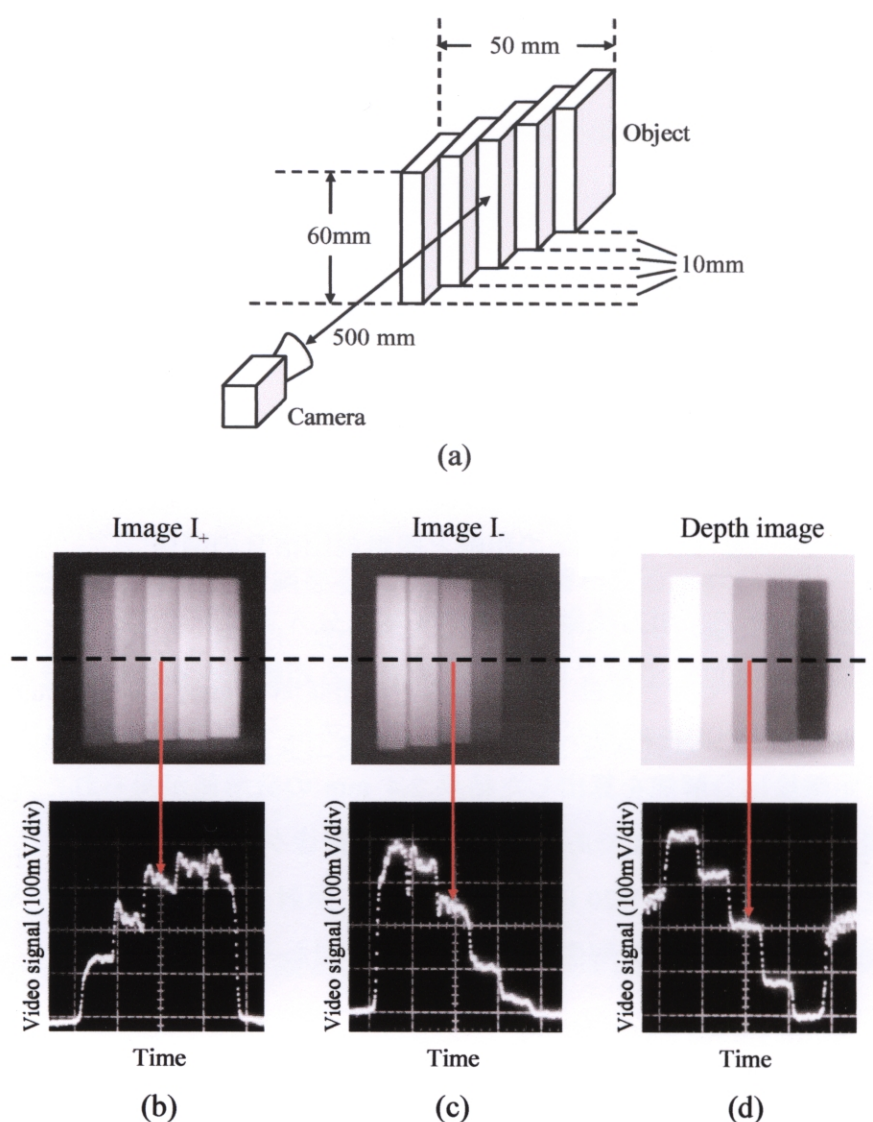


図 7.6 段差形状被写体の測定 (a) カメラと被写体の配置 (b) 増加ゲイン時の撮影画像 (c) 減少ゲイン時の撮影画像 (d) 距離画像

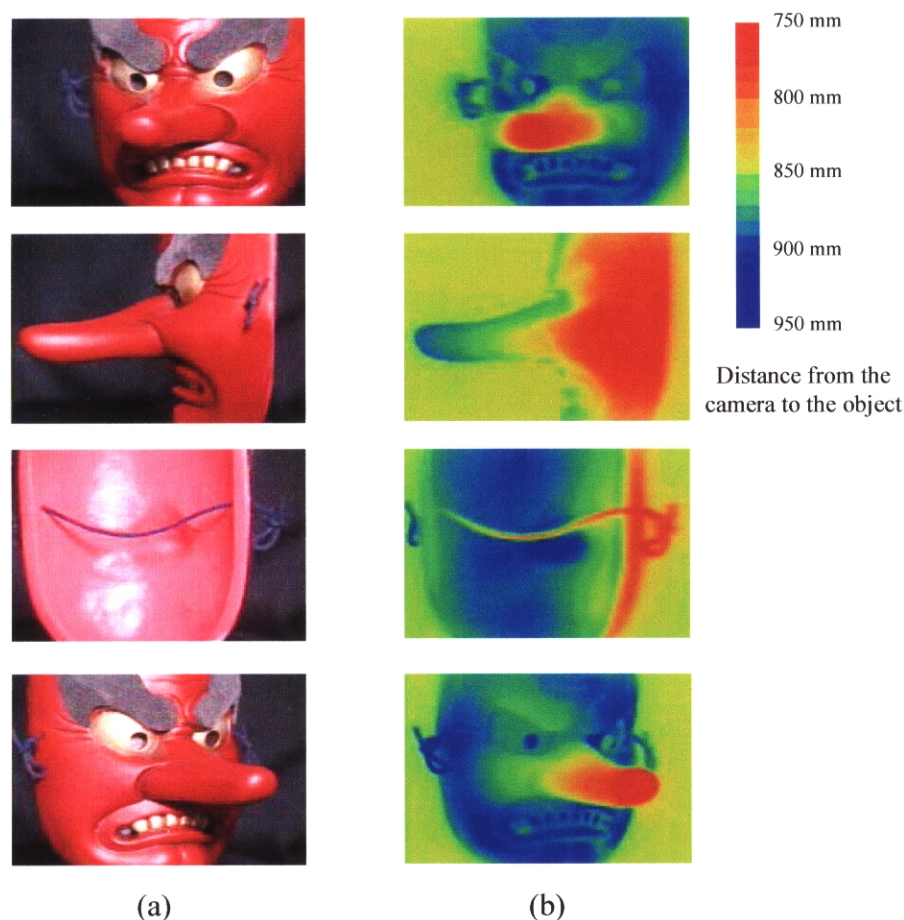


図 7.7 撮像ゲイン変調方式の Axi-Vision カメラによる撮影画像
(a) 被写体のカラー画像 (b) 距離を画像の色で表現した距離画像

表面の色や反射特性が異なる動く被写体(回転台の上の天狗の面)を撮影した(図 7.7)。被写体の大きさは幅 160 mm、高さ 200 mm、奥行き 160 mm、鼻の高さ 100 mm である。被写体は赤い漆塗りの顔や黒紙でできた眉、金色の目など、色や表面反射率の異なる部分がある。カメラから 850 mm の距離で、被写体を回転台に載せ、約 12 秒/回転で回転させ撮影した。光ビーム照射の広がり角度は 15°、照射範囲は約 200 mm ϕ 、照射光強度は 1.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ で撮影した。また撮影は、照度 550 lx の蛍光灯照明下で行った。図 7.7(a)は被写体のカラー画像、図 7.7(b)は色の違いで距離を表現した距離画像である。得られた距離画像では、表面の色や反射特性の違いに係らず距離が検出され、顔の凹凸形状が検出されている。また、蛍光灯照明による距離検出への影響は見られず、カラー画像と距離画像が同時に撮影できた。距離画像の画素数は 748 (H) \times 493 (V)、フレームレートは 15 Hz であり、動く被写体の高速距離検出が可能であった。

7.5 従来方式との比較

最後に、従来の強度変調光方式と本提案の撮像ゲイン変調方式の距離検出特性の違いを検討する。従来の強度変調光方式では、高速シャッター開放時の短時間のみ撮影するのに対し、撮像ゲイン変調方式では、常に撮影ゲインを変化させて反射光を撮影しているため、外乱光の影響を受けやすい。よって、LD 出力光以外の外乱光を、光学フィルターにより十分に遮断し、距離検出誤差を防ぐことが重要となる。

また、従来の強度変調光方式では、シャッター開放時間以外でも、常に強度変調光を被写体に照射しているのに対し、本撮像ゲイン変調方式では、撮像ゲイン 1 周期の間に 1 回パルス光を出力するのみであるため、撮像ゲイン変調方式の方が光利用効率は高い特長を持つ。

7.6 まとめ

映像制作以外の分野へ応用展開を図るため、高分解能な距離検出方式を提案し、従来方式より 7 倍の高分解能な距離検出が可能であることを実証した。

本章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 高出分解能な距離検出方式として、新たに数十ピコ秒のパルス幅を持つ短パルスレーザーを照射光とし、I.I.により撮像ゲインを高速変調する方式を提案した。
- (2) 実験系を作製し距離検出性能を調べた結果、距離検出分解能 2.4 mm、距離画像の画素数 748 (H) × 493 (V)、フレームレート 15 Hz が実現できた。
- (3) 本方式の特徴としては、従来方式よりも外乱光の影響を受けやすいものの、光の利用効率に関しては有利である特長をもち、映像制作分野以外に形状計測などへの応用の可能性があるといえる。

参考文献

- [1] M. Kawakita, K. Iizuka, H. Nakamura, I. Mizuno, T. Kurita, T. Aida, Y. Yamanouchi, H. Mitsumine, T. Fukaya, H. Kikuchi, and F. Sato, “High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera,” *Optics Express*, vol. 12, no. 12, pp. 2781-2794, 2004.
- [2] R. H. Mcmann, S. Kreinik, J. K. Moore, A. Kaiser, and J. Rossi, “A digital noise reducer for encoded NTSC signal,” *J. SMPTE*, vol. 87, pp. 129-133, 1978.
- [3] 浅見典充, 河北真宏, 白井暁彦, 小林希一, 滝沢國治, “3次元カメラの画像蓄積による距離検出分解能の向上と形状計測,” 2004 画像電子学会, 第32回年次大会, 学生セッション 18, pp. 71-72, 2004.
- [4] M. Kawakita, K. Iizuka, R. Iwama, K. Takizawa, H. Kikuchi, and F. Sato, “Gain-modulated Axi-Vision Camera (high speed high-accuracy real-time depth-mapping camera),” *Optics Express*, vol. 12, no. 22, pp. 5336-5344, 2004.
- [5] 河北真宏, 飯塚啓吾, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 會田田人, “実時間距離検出3次元テレビカメラ(Axi-Vision カメラ),” *電子情報通信学会論文誌, D-II*, vol. J87-D-II, no. 6, pp. 1267-1278, 2004.

第 8 章

結 論

被写体のカラー映像とともに距離画像を検出できる 3 次元カメラは、放送や映画の映像制作をはじめとして、ゲームや医療、ロボット産業、セキュリティなど多くの産業分野において活躍が期待される。本論文では、従来技術で困難であったハイビジョンクラスの高精細な距離画像をビデオフレームレートで検出できる 3 次元カメラ (Axi-Vision カメラ) の開発とその応用に関する研究成果を述べた。

以下に、本研究で得られた主な成果を述べる。

第 1 章「序論」では、距離検出技術の歴史を概観して本研究の背景を述べ、研究の目的と内容、ならびに、本論文の構成を概説した。

第 2 章「3 次元画像検出技術の現状と課題」では、3 次元画像の応用分野や従来の各種距離検出技術について解説し、特に本研究の提案に関連の深い光飛行時間計測法について最近の進展の詳細を説明した。

第 3 章「距離検出方式の提案」では、距離画像を高速に取得できる新規距離検出方式を提案し、原理検証実験によりその基本性能を実証するとともに、カメラ試作へ向けた課題を明らかにした。

この章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 新規距離検出方式として、強度変調光と高速シャッターカメラによる方法を提案した。本方式は光ビームの 2 次元走査機構が不要で、距離算出演算も容易であるため、距離画像の高速取得に適した特長を持つ。また、本方式では、増加変調光と減少変調光照射時の 2 種類の撮影画像より、被写体の反射率等の影響を除去することで、距離画像が求められることを証明した。
- (2) 提案方式の原理検証のために、イメージンテンシファイアと CCD カメラから

なる高速シャッター撮像部とレーザー光源から実験系を製作した。実験の結果、画素数 768 (H) × 493 (V)、フレームレート 15 Hz の距離画像の取得に成功し、動く被写体の距離画像の検出を可能とした。また、本方式では、距離検出分解能 3 cm が得られ、距離情報を用いた画像抽出や合成に有用であることを実証した。

- (3) カメラ実現に向けた課題として以下の点が明らかとなった。撮影条件によっては、被写体表面の反射率や色の影響による距離検出誤差が生じるため、カメラパラメーターや被写体の撮影条件と距離検出特性の関係を解析し、最適設計する必要がある。また、光源に関する課題として、照射面積の拡大と照射光の影の除去、人物撮影時の安全性確保、外乱光の影響の除去があげられる。さらに、動画撮像機能の向上のための距離検出の高速化や、ハイビジョン映像制作への応用に向けた距離画像の高精細化、カラー画像と距離画像の容易で高精度な画角合わせなどが実用化のための課題としてあげられた。

第 4 章「距離検出特性の解析と要素技術の開発」では、前章の検証実験で明らかとなった課題の解決を目指し、提案方式の距離検出特性を解析し、カメラパラメーターや被写体条件と距離検出特性の関係を明らかにした。さらに、光源部に関する課題を解決するために、LED アレー照射装置を開発し、標準テレビ信号対応のカメラを試作して性能を評価した。

この章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) カメラパラメーターや被写体の撮影条件と距離検出 SN 比との関係を解析した。その結果、距離検出 SN 比は、光電変換面の量子効率や受光面積、撮像蓄積時間、光学系の透過率、照射光強度などの平方根に比例し、カメラと被写体間の距離やレンズの F ナンバーに反比例することが明らかとなった。
- (2) 高速変調可能な高輝度 LED アレー照射装置を開発した。前章の原理検証実験の 50 倍の光照射強度を可能とし、照射面積も従来の 25 倍に拡大できた。また、カメラレンズ近傍に複数配置することで、単一光源時の課題であった照射光の影を除去するとともに、干渉縞やスペックルノイズの無い均一な光照射を実現するとともに、人物撮影時の安全性も確保できた。
- (3) LED アレー照射装置と大型色分離光学素子と同軸光学系により構成された標準テレビ信号対応のカメラを作製した。LED アレー照射光により、単位面積あたりの照射光強度が従来の 5 倍となり、距離検出分解を 1.8 cm までに向上できた。

光源の高出力化と光学系の大型化により、カメラより 3 m 先の直径 2 m の範囲の広画角撮影が可能となり、人物大の被写体も撮影できるようになった。また、光学系の近赤外光と可視光の分離特性を最適化することで、可視光の距離検出側への漏れ光を十分に抑えることができた。

第 5 章「ハイビジョン Axi-Vision カメラの設計・試作」では、カメラ実現のために残された課題であるビデオフレームレート検出までの高速化とハイビジョン対応の高精細化に取り組んだ。高速化と高精細化に伴う距離検出 SN 比の低下を防ぐための設計指針を導出し、要素技術の開発により、ハイビジョン対応の Axi-Vision カメラを実現した。

この章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 距離画像の高精細化と高速化による距離検出 SN 比の低下を防ぐためのカメラの設計指針を求めた。カメラパラメーターとしては、従来の約 10 倍の撮像感度や光利用効率の改善が必要であることが明らかとなった。これらの対策として、I.I.の量子効率の改善、光学系の透過率向上、光源の高出力化により、カメラ開発に必要な性能が実現できる見通しを得た。
- (2) 要素技術の開発として、I.I.の高性能化に取り組み、近赤外に高感度な GaAs を光電変換面とし、本カメラの要求仕様を満たす高解像度なデバイスを新たに開発した。これにより従来の約 8 倍の感度と、ハイビジョン撮影に必要な高精細性を実現した。また、新規光学系を作製し、近赤外光透過率を 90%まで向上させるとともに、ズームレンズも使用可能とするためにカラー画像と距離画像の同光軸撮影光学系を開発した。さらに、光学系をコンパクトにすることにより、LED アレー照射装置をレンズ周囲へ多重配置でき、1W の高出力な照射光を実現するとともに、ズームレンズも使用可能とした。また高速かつ高精度に距離画像を算出するハイビジョン映像信号処理装置を開発した。
- (3) 以上の要素技術の開発により、画素数 1280 (H) × 720 (V) の距離画像をフレームレート 29.97 Hz、または画素数 853 (H) × 480 (V)の距離画像をフレームレート 59.94 Hz で検出できるハイビジョン Axi-Vision カメラの開発に成功した。

第 6 章「新規映像制作技術への応用」では、距離情報を用いた新たな映像製作技術の確立を目指し、映像合成技術や 3 次元モデリング、立体映像システムなどへの応用

の可能性を検討した。

この章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 距離情報を用いた映像合成手法を確立し、ブルーバックなしの映像合成技術や CG と実写映像と前後関係の位置を考慮した 3 次元的な映像合成をリアルタイムで可能とした。さらに、本合成技術をバーチャルスタジオへ導入するとともに、番組制作や生放送番組に実用化し、新しい映像演出効果と効率的な番組制作を実現した。
- (2) 被写体の 3 次元モデリングへの応用の可能性を検証するために、本距離検出手法に適した画像蓄積効果によるノイズ低減手法を考案し、所望の時間内に効率よく距離検出ノイズを除去できることを示した。また、Axi-Vision カメラによるモデリングにより、実写映像と CG 物体の自然な合成が容易に実現できることを実証した。
- (3) 立体映像システムへの応用の可能性を検証するために、距離画像より実時間で奥行き標準化画像を生成するとともに、ハーフミラーと複数の CRT モニターより構成された立体表示装置を開発し、実時間の立体映像の撮像・表示が可能であることを示した。

第 7 章「応用開拓に向けた距離検出の高分解能化」では、映像制作以外の新たな分野への応用展開を目指し、大幅な距離検出分解能の向上が可能な方法を提案し、その基本性能を検証した。

この章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 距離検出分解能の向上方法を検討し、短パルス光と撮像ゲイン変調による距離検出方法を考案し、その原理を証明した。
- (2) 時間幅 68 ps の短パルスレーザー光と、I.I.を用いた周期 1 ns の高速な撮像ゲイン変調による撮像実験系を作製して基本特性を測定した。その結果、距離検出分解能 2.4 mm が得られ、従来の 7 倍の分解能で距離画像が検出できることを実証した。

本研究は、被写体の距離画像を高速検出できる Axi-Vision カメラの開発と、映像制作を始めとする応用に関するものである。本論文で開発した Axi-Vision カメラは、ハイビジョンクラスの高精細性と高速性を兼ね備えた世界で初めてのカメラとなった。

このカメラは、実際の番組制作へ応用できるとともに、今後、モデリングや立体映像表示など3次元情報を使った映像分野での活用が大いに期待される。さらに、距離検出手法や光源を変えることで、mm オーダー高分解能な距離検出も可能であることを実証でき、さらに幅広い産業分野への応用展開の可能性も高まった。

近年、同様の3次元情報検出機能を持つカメラの開発機運が高まり、市場開拓の動きが見られる。その中で、本論文に述べた結果は、国内外の研究開発に大きな刺激を与えるとともに、3次元映像分野をはじめとする各方面への新たな応用のアイディアも芽生えさせる役割を果たしている。今後、より高度な3次元撮像機能を持つカメラの研究開発と、その実用化による社会貢献に本研究の結果が寄与することを期待する。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、東京大学 工学部 電子情報工学科 相澤清晴教授より熱心な御指導と御鞭撻を頂き感謝の意を表します。また、東京大学 大学院情報学環・学際情報学府 原島博教授、東京大学 新領域創成科学研究科 柴田直教授、東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター 浅田邦博教授、東京大学 大学院情報学環・学際情報学府 苗村健助教授、東京大学 生産技術研究所 佐藤洋一助教授 からは多くの有益な御示唆ならびに御助言をいただき心から感謝いたします。

本論文は、著者が1997年から2005年の間に日本放送協会放送技術研究所で行った研究成果をまとめたものです。本研究は招聘研究制度として開始され、トロント大学 飯塚啓吾教授には、研究指導者として研究開始当初の情熱のまま、長年にわたり熱心な御指導と御鞭撻を賜るとともに、数々の有益な討議と御助言を頂き心から深く感謝の意を表します。

本研究の機会とそれを遂行するための環境を与えていただいた、日本放送協会 放送技術研究所 吉野武彦元所長、三宅誠前所長に感謝するとともに、榎並和雅所長、久保田啓一前次長、渡辺敏英次長には、本論文をまとめる機会と多大なる御配慮を頂き心より感謝いたします。特に、本研究の実施に際し同研究所の材料基盤技術 佐藤史郎部長には多大なる御支援と御配慮を頂くとともに、直属の上司として常に有意義な御指導と激励を頂き感謝申し上げます。

直接の上司として御指導と御配慮をいただいた、藤本勲元研究主幹(現在、広島工業大学教授)、滝沢國治元研究主幹(現在、成蹊大学教授)、村上宏元研究主幹(現在、大日本印刷株式会社)、清水直樹材料基盤技術副部長に御礼を申し上げます。また、本研究の遂行に当たり、熱心な討論と御指導をいただいた會田田人元主任研究員(現在、大阪市立大学教授)、土屋讓主任研究員、栗田泰市郎主任研究員、菊池宏主任研究員、藤掛英夫主任研究員に深く感謝いたします。さらに、広島放送局 飯野芳己チーフエンジニア、佐藤弘人研究員、藤崎英好研究員、ポストドクタ 村重毅氏 はじめ材料基盤技術の方々や、放送デバイス 米内淳 研究員に多大なる御助力を頂き感謝いたします。

番組制作応用に関して、多大な御尽力をいただいた、日本放送協会 放送技術研究所 井上誠喜主任研究員、山内結子主任研究員、三ッ峰秀樹専任研究員、深谷崇史研究員、津田貴生研究員をはじめ、NHK 放送センターの番組制作局、制作技術センター、番組送出センター、技術局、放送技術局、NHK 名古屋放送局、NHK 愛知万博事務局の皆様には深く感謝いたします。また、研究遂行上、多くの御助力をいただいた、元東

京理科大学大学院生 中村博重氏 (現在 富士写真フィルム勤務)、元成蹊大学大学院生 岩間玲氏 (現在 キヤノン勤務)、成蹊大学大学院生 浅見典充氏に感謝致します。

また、本論文をまとめるにあたり御鞭撻と御配慮をいただいた NHK エンジニアリングサービス 小幡伊和男前理事長、大島英男理事長、市川和哉理事、金田英郎理事、角井良治部長、大関健二部長、真鍋宣久部長ほか、マルチメディア開発部の方々に感謝の意を表します。

なお、研究開発当初より、イメージインテンシファイアの開発に関し有益な議論と御協力をいただいた浜松ホトニクス株式会社 中村治仁氏、岡田晃行氏、水野到氏には、心より感謝の意を表します。

本研究は、これら多くの方々の御指導と御協力により達成されたものであり、ここに心より厚く御礼申し上げます。

本研究に関する発表論文

論文

- (1) M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa, “Axi-Vision Camera (real-time distance-mapping camera),” *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 22, pp. 3931-3939, 2000.
- (2) 山内結子, 三ッ峰秀樹, 深谷崇史, 河北真宏, 井上誠喜, 林正樹, “実空間ベース 仮想スタジオ ～実セットと仮想セットのシームレスな合成,” *映像情メディア学会*, vol. 57, no. 6, pp. 739-744, 2003.
- (3) 河北真宏, 飯塚啓吾, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 會田田人, “実時間距離検出 3 次元テレビカメラ(Axi-Vision カメラ), ” *電子情報通信学会論文誌, D-II*, vol. J87-D-II, no. 6, pp. 1267-1278, 2004.
- (4) M. Kawakita, K. Iizuka, H. Nakamura, I. Mizuno, T. Kurita, T. Aida, Y. Yamanouchi, H. Mitsumine, T. Fukaya, H. Kikuchi, and F. Sato, “High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera,” *Optics Express*, vol. 12, no. 12, pp. 2781-2794, 2004.
- (5) M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, T. Kurita, and H. Kikuchi, “Real-time three-dimensional video image composition by depth information,” *IEICE Electronics Express*, vol. 1, no. 9, pp. 237-242, 2004.
- (6) M. Kawakita, K. Iizuka, R. Iwama, K. Takizawa, H. Kikuchi, and F. Sato, “Gain-modulated Axi-Vision Camera (high speed high-accuracy real-time depth-mapping camera),” *Optics Express*, vol. 12, no. 22, pp. 5336-5344, 2004.

国際学会

- (1) M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa, "Axi-Vision Camera: a three-dimension camera," in Part of the IS&T/SPIE Conference on Three-Dimensional Image Capture and Applications III, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., San Jose, Proc. SPIE 3958, pp. 61-70, Jan. 2000.
- (2) M. Kawakita, T. Kurita, H. Kikuchi, and S. Inoue, "HDTV Axi-Vision Camera," Proc. IBC (International Broadcasting Convention) 2002, pp. 397-404, Amsterdam, Netherlands, Sept. 2002.
- (3) Y. Yamanouchi, H. Mitsumine, T. Fukaya, M. Kawakita, N. Yagi, and S. Inoue, "Real space-based Virtual Studio -Seamless Synthesis of a Real Set Image with a Virtual Set Image-," Proc. of the ACM symposium on Virtual reality software and technology. Association for Computing Machinery (ACM) Virtual Reality Software and Technology (VRST) 2002, Hong Kong, China, pp. 194-200, 2002.
- (4) A. Shirai, K. Kobayashi, M. Kawakita, S. Saito, and M. Nakajima, "A new archiving system for TV studio sets using depth camera and global illumination," NICOGRAPH International 2004 in Taiwan, pp. 85-90, May 2004.
- (5) G. Fujimoto, M. Kawakita, and M. Inagage, " "ZECTO" Cinematograph for depth-based live-action imaging," ACM SIGGRAPH 2005, Technical Sketches, Los Angeles, Aug. 2005. (accepted)

国内学会

- (1) 河北真宏, 飯塚啓吾, 會田田人, 藤掛英夫, 菊池宏, 藤井孝憲, 滝沢國治, "振幅変調光による被写体の奥行き情報検出," 第 45 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29p-ZD-12, p.153, 1998.
- (2) 河北真宏, 飯塚啓吾, 會田田人, 菊池宏, 藤掛英夫, 米内淳, 滝沢國治, "Axi-Vision Camera による奥行き画像の検出," 電子情報通信学会総合大会 D-11-161, 1999.

- (3) 河北真宏, 飯塚啓吾, 會田田人, 菊池宏, 藤掛英夫, 米内淳, 滝沢國治, “三次元撮像装置 Axi-vision カメラの開発,” 3次元画像コンファレンス '99, 6-1, pp. 151-156, 1999.
- (4) 飯野芳己, 河北真宏, 飯塚啓吾, 菊池宏, 土屋譲, “3次元カメラ Axi-vision のノイズとその低減処理,” 電子情報通信学会総合大会, D-11-142, p. 142, 2000.
- (5) 中村博重, 河北真宏, 飯塚啓吾, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 米内淳, 佐藤弘人, 土屋譲, “光書き込み型空間光変調素子による奥行き標準化立体表示,” 映像情報メディア年次大会, pp. 357-358, 2000.
- (6) 河北真宏, 飯塚啓吾, 土屋譲, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 佐藤弘人, “奥行き距離撮像装置 Axi-vision camera の開発と画像合成への応用,” 映像情報メディア冬季大会, 4-3, 2000.
- (7) 河北真宏, 中村博重, 飯塚啓吾, 土屋譲, 菊池宏, 飯野芳己, 藤掛英夫, 佐藤弘人, “光書き込み型空間光変調素子による奥行き多重ホログラム表示,” 第26回光学シンポジウム, 13, 2001.
- (8) 河北真宏, 飯塚啓吾, 土屋譲, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 佐藤弘人, “距離検出カメラと奥行き標準化ディスプレイによる3次元撮像・表示実験,” 3次元画像コンファレンス 2001, P-7, pp. 141-144, 2001.
- (9) 岩間玲, 河北真宏, 飯塚啓吾, 菊池宏, 飯野芳己, 藤掛英夫, 佐藤弘人, 滝沢國治, “短パルスレーザーによる3次元カメラ(Axi-vision Camera)の距離検出分解能の向上,” 日本光学会講演会, Optics Japan 2001, 7PA6, pp. 381-382, 2001.
- (10) 河北真宏, 栗田泰市郎, 菊池宏, 飯野芳己, 井上誠喜, 山内結子, 飯塚啓吾, “ハイビジョン3次元カメラ(Axi-vision カメラ)の開発,” 3次元画像コンファレンス 2002, 2-5, pp. 41-44, 2002.
- (11) 河北真宏, 栗田泰市郎, 菊池宏, 飯野芳己, 井上誠喜, 山内結子, 飯塚啓吾, “高精細3次元カメラ(HDTV Axi-vision カメラ),” 2002年映像情報メディア学会年次大会, 13-7, 2002.
- (12) 岩間玲, 河北真宏, 栗田泰市郎, 菊池宏, 飯塚啓吾, “ビデオレート距離検出3次

元カメラ(Axi-Vision Camera)の距離検出分解能の向上にむけた解析と実験,” 日本光学会講演会, Optics Japan 2002, pp. 406-407, 2002.

- (13) 河北真宏, “(招待講演) 3次元カメラ(Axi-vision カメラ)とその応用,” 3次元画像コンファレンス 2003, pp. 121-124, 2003.
- (14) 浅見典充, 河北真宏, 飯塚啓吾, 栗田泰市郎, 菊池宏, “ハイビジョン3次元カメラの距離検出特性,” 日本光学会講演会, Optics Japan 2003, pp. 360-361, 2003.
- (15) 浅見典充, 河北真宏, 白井暁彦, 小林希一, 滝沢國治, “3次元カメラの画像蓄積による距離検出分解能の向上と形状計測,” 2004画像電子学会 第32回年次大会, 学生セッション 18, pp. 71-72, 2004.
- (16) 山田英樹, 白井暁彦, 河北真宏, 三ッ峰秀樹, 中島正之, “Axi-Vision を用いた三次元モデリング,” 第 67 回 (平成 17 年) 情報処理学会全国大会, no. 4, 3Y-3, pp. 195-196, 2005.
- (17) 米田昭, 羽生洋, 牧田匡史, 會田田人, 河北真宏, “奥行き標本化方式による Axi-Vision 画像データの三次元表示,” 電子情報通信学会, 2005 年 総合大会, D-11-82, p.82, 2005.
- (18) 浅見典充, 河北真宏, 菊池宏, 滝沢國治, “Axi-Vision カメラの距離画像検出ノイズの低減と番組制作への応用,” FIT2005 第 4 回情報科学技術フォーラム, J-056, pp. 309-310, 2005.

研究会

- (1) 河北真宏, 飯塚啓吾, 菊池宏, 藤掛英夫, 米内淳, 會田田人, “高速シャッターと変調照明の組合せによる 3次元撮像の一方式,” 信学技報, EID98-51, vol. 22, no. 57, pp. 19-24, 1998 年 10 月 (東京).
- (2) 河北真宏, 飯塚啓吾, 土屋譲, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 佐藤弘人, “距離検出による三次元カメラ,” 精密工学会, 三次元工学研究会, 2000 年 12 月 (東京).
- (3) 河北真宏, 飯塚啓吾, “奥行き距離検出三次元カメラ(Axi-vision camera),” 第 225 回研究会 日本学術振興会 光エレクトロニクス研究会, 2001 年 9 月 (東京).
- (4) 河北真宏, 飯塚啓吾, “奥行き距離検出 3次元カメラ,” 光産業振興協会 次世代

画像メディア研究会, 2001 年 11 月 (東京).

- (5) 河北真宏, “ハイビジョン 3 次元カメラ: Axi-vision カメラ,” 平成 14 年 NHK 放送技術研究所公開, 研究発表会, pp. 58-63, 2002 年 5 月 (東京).
- (6) 河北真宏, 栗田泰市郎, 菊池宏, 井上誠喜, 山内結子, 飯塚啓吾, “ハイビジョン 3 次元カメラ –HDTV Axi-vision camera–,” 第 86 回微小光学研究会, pp. 25-30, 2002 年 11 月 (東京).
- (7) 河北真宏, “高精細 3 次元カメラの開発,” (財)日本工業技術振興協会, 次世代画像入力・ビジョンシステム部会, 2002 年 11 月 (東京).
- (8) 河北真宏, “3 次元画像を撮る～原理と応用～,” 浜松テクノポリス推進機構イメージングセミナー, 2002 年 12 月 (浜松).
- (9) 河北真宏, “高精細 3 次元カメラの開発とその応用,” センサ・アクチュエータ・マイクロマシン/ウィーク 2003, 総合シンポジウム, pp. 1-7, 2003 年 4 月 (東京).
- (10) 白井暁彦, 小林希一, 河北真宏, 斉藤豪, 中島正之, “Axi-Vision カメラによるモデリングとシャドウイング,” 映像メディア学会メディア工学研究会, 映像情報メディア学会技術報告, vol. 28, no. 32, pp. 9-12, 2004(愛知).
- (11) 河北真宏, “(招待講演) 実時間距離検出カメラと画像合成手法の開拓,” 映像メディア学会メディア工学研究会 技術報告, vol. 28, no. 32, pp. 21-27, 2004 年 6 月 (愛知).
- (12) 河北真宏, “距離画像計測カメラとその応用,” 応用物理学会, 第 39 回日本光学会サマーセミナー「光による 3 次元情報の獲得」, 2005 年 8 月(静岡).
- (13) 河北真宏, 菊池宏, 飯田正博, 堀口弘幸, 岩井豊, 安藤孝, “距離画像検出カメラ (Axi-Vision Camera)と“愛・地球博” 特設グローバルスタジオにおける TV 番組制作への応用,” 平成 17 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 企画セッション「高臨場感システム・デバイス」, TC1-7, p. 2, 2005 年 9 月(北九州).

解説等

- (1) 河北真宏, “新 3 次元カメラ ～カラー映像と被写体までの距離をリアルタイムに撮影～,” 新技研だより, 第 11 号, 2000 年 6 月号.

- (2) 河北真宏, 飯塚啓吾, “新 3 次元カメラ「Axi-vision camera」の開発とその応用,” 映像情報インダストリアル, pp. 37-42, 2000 年 7 月.
- (3) 河北真宏, 飯塚啓吾, “リアルタイム立体カメラ –Axi-Vision カメラ–,” 光学, 31 巻 3 号, pp. 166-168, 2002.
- (4) 河北真宏, “ハイビジョン 3 次元カメラ : Axi-vision カメラ,” 平成 14 年度 技研公開講演・研究発表会予稿集, pp. 58-63, 2002 年 5 月.
- (5) M. Kawakita, T. Kurita, H. Kikuchi, Y. Yamanouchi, S. Inoue, and K. Iizuka, “High-definition three-dimension camera: HDTV version of an Axi-vision camera,” NHK Laboratories note, no. 479, Aug. 2002.
- (6) 河北真宏, “HDTV Axi-vision カメラ ～距離情報をリアルタイムに検出できるハイビジョンカメラ～,” 新技研だより, 第 41 号, p.3, 2002 年 12 月号.
- (7) K. Iizuka, M. Kawakita, “Axi-Vision camera,” Optics & Photonics News, Optics in 2002, Optical Society of America, vol. 13, no. 12, Dec. 2002.
- (8) 河北真宏, 栗田泰市郎, 菊池宏, 山内結子, 井上誠喜, “ハイビジョン 3 次元カメラ「Axi-vision カメラ」の開発,” 映画テレビ技術, no. 610, pp. 43-46, 2003 年 6 月号.
- (9) 河北真宏, “Axi-Vision カメラ ～距離センサを融合した 3 次元カメラ～,” 映像情報メディア学会誌, vol. 57, no. 10, pp. 1243-1245, 2003 年 10 月.
- (10) 河北真宏, 栗田泰市郎, 菊池宏, 山内結子, 三ッ峰秀樹, 深谷崇史, “アクシビジョンカメラの開発と映像合成への応用,” NHK 技研, R&D, pp. 32-41, 2004 年 11 月.
- (11) 河北真宏, “Axi-Vision カメラ –距離画像をリアルタイム検出可能な 3 次元カメラ–,” 光アライアンス, pp. 45-48, 2005 年 1 月号.
- (12) 河北真宏, 菊池宏, “実時間距離画像検出三次元カメラ: Axi-Vision Camera,” 日本ロボット学会, vol. 23, no. 3, pp. 14-17, 2005.
- (13) 安藤孝, 鳥居宏行, 青山智一, 宮崎太郎, 堀口弘幸, 金澤勝, 濱浜公男, 津田貴生, 河北真宏, “愛・地球博(愛知万博)における NHK 関係施設の概要,” 放送技術, vol. 58, no. 4, pp. -123-130, 2005 年 4 月号.

付録 A

光電変換面への入力光強度

放射強度 P [W] の光を被写体に照射した場合の光電変換面への入力像の光強度 E [W/m²] を求める(図 A.1)。

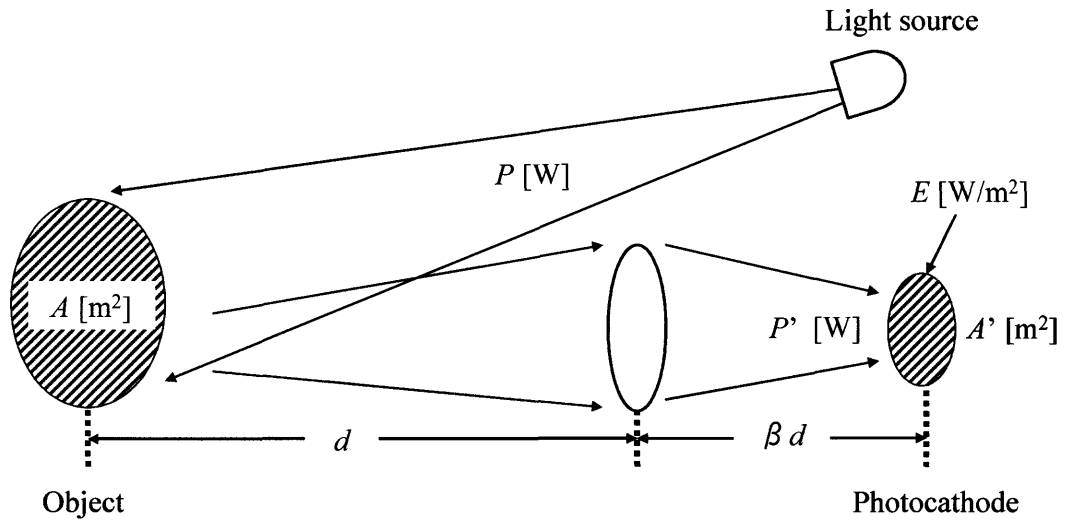


図 A.1 結像光学系

被写体の表面を完全拡散と仮定し、放射強度 P [W] の光を被写体に照射した場合、反射光の単位立体角あたりの放射強度 I [W/sr] は

$$I = \frac{RP}{\pi} \quad (\text{A.1})$$

となる。ただし、 $R(0 \leq R \leq 1)$ は被写体表面の反射率である。透過率 $T_L(0 \leq T_L \leq 1)$ のレンズにより、光電変換面へ結像入力される光の放射強度 P' [W] は、

$$P' = T_L I \Omega = \frac{T_L R P \Omega}{\pi} \quad (\text{A.2})$$

である。ここで、 Ω [sr] はレンズの取込み立体角である。レンズから被写体までの距離を d とすると、

$$\Omega = \frac{\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2}{d^2} = \frac{\pi D^2}{4d^2} \quad (\text{A.3})$$

である。ただし、 D はレンズ径である。(A.2)式に(A.3)式を代入すると、

$$P' = \frac{T_L R P D^2}{4d^2} \quad (\text{A.4})$$

となる。

一方、レンズから被写体までの距離 d は、レンズから結像面までの距離 βd より十分大きい($\beta \ll 1$)とすると、像の面積 A' は

$$A' = \beta^2 A \approx \left(\frac{f}{d} \right)^2 A \quad (\text{A.5})$$

となる。ただし、 A は被写体の面積、 β はレンズの結像縮小率(=結像サイズ/被写体サイズ)、 f はレンズの焦点距離である。

よって、(A.4)式と(A.5)式より、光電変換面に入力される像の単位面積あたりの光強度 $E [\text{W/m}^2]$ は、

$$\begin{aligned} E &= \frac{P'}{A'} = \frac{R T_L P D^2}{4d^2} \cdot \frac{d^2}{f^2 A} \\ &= \frac{R T_L P}{4 \left(\frac{f}{D} \right)^2 A} \\ &= \frac{R T_L P}{4 F^2 A} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となる。ただし、ここで F はレンズのFナンバーである。

一方、第4章の図4.2(a)および(b)に示す増加変調光 $P_+(t) [\text{W}]$ 、および減少変調 $P_-(t) [\text{W}]$ は、それぞれ以下の式で表される。

$$P_+(t) = \frac{2P}{T} t \quad (\text{A.7})$$

$$P_-(t) = \left(1 - \frac{2t}{T} \right) P \quad (\text{A.8})$$

ただし、 T は光の変調周期である。

これらの変調光を被写体に照射し、時刻 t_s に撮影すると、光電変換面に入力される単位面積当たりの強度 E_+ [W/m²]、および E_- [W/m²] は、(A.6)式に(A.7)式、および(A.8)式を代入し、

$$\begin{aligned} E_+(d, t_s) &= \frac{RT_L}{4F^2} \frac{P_+ \left(t_s - \frac{2d}{v} \right)}{A} \\ &= \frac{RT_L P}{2F^2 AT} \left(t_s - \frac{2d}{v} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned} E_-(d, t_s) &= \frac{RT_L}{4F^2} \frac{P_- \left(t_s - \frac{2d}{v} \right)}{A} \\ &= \frac{RT_L P}{2F^2 AT} \left[\frac{T}{2} - \left(t_s - \frac{2d}{v} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

となる。ここで、シャッタータイミングを

$$t_s = \frac{2d_0}{v} + \frac{T}{2} \quad (\text{A.11})$$

に設定すると、(A.9)式、(A.10)式はそれぞれ、

$$\begin{aligned} E_+ \left(d, \frac{2d_0}{v} + \frac{T}{2} \right) &= \frac{RT_L P}{2F^2 AT} \left(\frac{2d_0}{v} - \frac{T}{2} - \frac{2d}{v} \right) \\ &= \frac{RT_L P}{F^2 A} \left[\frac{1}{4} - \frac{(d - d_0)}{\lambda_L} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

$$\begin{aligned} E_- \left(d, \frac{2d_0}{v} + \frac{T}{2} \right) &= \frac{RT_L P}{2F^2 AT} \left[\frac{T}{2} - \left(\frac{2d_0}{v} + \frac{T}{2} - \frac{2d}{v} \right) \right] \\ &= \frac{RT_L P}{F^2 A} \cdot \frac{(d - d_0)}{\lambda_L} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

となる。

ここで、 d_0 は第3章の図3.6(a)に示すように測定レンジの最近距離を意味している。 $d_0 = 0$ と設定した場合、(A.12)式、(A.13)式は、

$$E_+\left(d, \frac{T}{2}\right) = \frac{RT_L P}{F^2 A} \left(\frac{1}{4} - \frac{d}{\lambda_L} \right) \quad (\text{A.14})$$

$$E_-\left(d, \frac{T}{2}\right) = \frac{RT_L P d}{F^2 A \lambda_L} \quad (\text{A.15})$$

となる。

付録 B

量子雑音の影響

イメージインテンシファイアを用いて数ナノ秒の短時間撮影を行なう場合、受光量が少なく、量子効果による雑音が距離の検出限界に影響を与える可能性がある。量子数が一番少ない光電変換面の段階での SN 比が距離検出分解能を決定し、その後の増幅において SN 比は向上しない。

ここでは、量子雑音の影響を受けずに距離検出するために必要な光量(光電変換面に入射する光量)を求める。光電変換面に時間 t 内に、入射する光子の数を平均で N 個とする。その標準偏差 ΔN は $\Delta N = \sqrt{N}$ である。コントラストを K とすると、

$$K = \frac{N}{\Delta N} = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N} \quad (\text{B.1})$$

となる。光子が単位時間に \bar{n} 個やってくるとすると、 $N = \bar{n} \cdot t$ なので

$$K = \sqrt{\bar{n}t}, \quad (\text{B.2})$$

$$\bar{n} = \frac{K^2}{t} [\text{個/s}] \quad (\text{B.3})$$

となる。撮像素素数を P 個とすると、全画素に毎秒やってくる光子数 n_t は、

$$n_t = \frac{K^2 P}{t} [\text{個/s}] \quad (\text{B.4})$$

となる。

波長 λ の光子 1 個のエネルギーは $E_p = h\nu / \lambda$ [J](プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ 、光速 $\nu = 3 \times 10^8$ [m/s])、撮像面積 A に入力する単位面積あたりの光の強度 E は、

$$E = \frac{E_p n_t}{A} = \frac{hc}{\lambda} \frac{K^2 P}{At} [\text{W/m}^2] \quad (\text{B.5})$$

である。

ここで、例えば $K = 5$ 、画素 $P = 1.89 \times 10^5$ [個] (5.25I カメラの場合フィールド蓄積なので総画素数 $768(H) \times 493(V)$ の半分)、撮像時間 $t = 0.83 \times 10^{-3}$ [秒]、波長 $\lambda = 850$ [nm]、撮像面積 $A = 1.23 \times 10^{-4}$ [m²] とする場合で必要最小な光強度を算出すると、

$$E = 1.1 \text{ [nW/cm}^2\text{]} \quad (\text{B.6})$$

となる。

撮像面への照射強度は少なくとも、 1.1 nW/cm^2 以上が必要であり、この値より十分に大きな強度の光を光電変換面に入力できれば、量子雑音による影響は無いと見積もられる。

付録 C

カメラパラメーターおよび被写体の撮影条件の数値例

第 5.5.4 節の数値解析に使用したカメラパラメーターおよび被写体の撮影条件の一例を以下に示す。

・ 被写体の距離	$d = 2.25 \text{ [m]}$
・ 測定レンジまでの距離	$d_0 = 1.50 \text{ [m]}$
・ 被写体の反射率	$R = 0.7$
・ 変調光の波長	$\lambda = 850 \times 10^{-9} \text{ [m]}$
・ 変調光の変調周波数	$f_L = 50 \times 10^6 \text{ [Hz]}$
・ 変調光の変調周期	$T = \frac{1}{f_L} = 20 \times 10^{-9} \text{ [s]}$
・ 変調光の変調波長	$\lambda_L = 6 \text{ [m]}$
・ 変調光の照射角	$2\theta = 33 \text{ [deg]}$
・ ゲート時間	$\Delta t = 1.0 \times 10^{-9} \text{ [s]}$
・ ゲート繰り返し周波数	$f_g = 50 \times 10^6 \text{ [Hz]}$
・ 撮像時間(蓄積時間)	$\tau = \Delta t \times f_g \times \frac{1}{\text{フィールド周波数}} \text{ [s]}$
・ 照射光源最大強度	$P = 1 \text{ [W]}$
・ レンズ透過率	$T_L = 0.9$
・ F ナンバー	$F = 1.8$
・ I.I.のノイズファクタ	$N_f = 2.5$
・ 光電変換面の量子効率	$\eta = 0.117$
・ リレーレンズの縮小率	$m = 0.6$
・ CCD の 1 画素面積	$a = 6.7 \times 10^{-6} \times 6.7 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$
・ プランク定数	$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$
・ 光速	$v = 3.0 \times 10^8 \text{ [m/s]}$
・ 光子エネルギー	$\varepsilon = \frac{hv}{\lambda} = 2.3 \times 10^{-19} \text{ [J]}$