

高速距離検出 3 次元カメラ (Axi-Vision Camera) と
その応用に関する研究

河 北 真 宏

目次

第1章	序 論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的と論文の構成	3
	参考文献	7
第2章	3次元画像検出技術の現状と課題	9
2.1	はじめに	9
2.2	3次元画像の応用分野	9
2.3	各種距離検出方式	11
2.3.1	三角測量法	12
2.3.2	光飛行時間計測法と最近の進展	13
	参考文献	16
第3章	距離検出方式の提案	19
3.1	はじめに	19
3.2	Axi-Vision カメラ方式の提案	20
3.2.1	基本原理	20
3.2.2	反射率の補正	22
3.2.3	距離算出方法	24
3.3	原理検証実験	27
3.3.1	レーザー光源を用いた実験系	27
3.3.2	基本特性の評価	29
	(1) 距離検出分解能	29
	(2) 撮影実験	30
	(3) 被写体表面の色や外乱光の影響	32

3.4	カメラ試作へ向けた課題	34
3.5	まとめ	35
	参考文献	36
第4章	距離検出特性の解析と要素技術の開発	37
4.1	はじめに	37
4.2	距離検出特性の解析	37
4.2.1	光電変換面におけるショットノイズ	37
4.2.2	距離画像の SN 比	40
4.2.3	複数回撮影による距離検出方式の検討	41
4.3	LED アレー照射装置の開発	42
4.3.1	設計	42
	(1) 面光源の大きさと距離検出誤差	42
	(2) 照射光量	45
	(3) 安全性	46
4.3.2	試作	46
	(1) 強度変調特性	48
	(2) 照射光強度と均一性	48
	(3) 分光特性と光学系	49
4.4	距離検出特性の測定	50
4.5	まとめ	53
	参考文献	54
第5章	ハイビジョン Axi-Vision カメラの設計・試作	55
5.1	はじめに	55
5.2	設計指針	55
5.3	基本構成	57
5.4	要素技術の開発	58
5.4.1	イメージインテンシファイアの高性能化	58

5.4.2	光学系の開発	60
5.4.3	照射光の高輝度化	62
5.4.4	SN 比の改善効果	64
5.4.5	ハイビジョン距離演算処理システム	64
5.5	性能評価	66
5.5.1	出力特性	66
5.5.2	被写体の距離と距離検出分解能	67
5.5.3	被写体の反射率と距離検出分解能	68
5.5.4	最適撮影条件	69
5.6	まとめ	71
	参考文献	72
第6章	新規映像制作技術への応用	73
6.1	はじめに	73
6.2	距離情報を用いた映像合成手法	73
6.2.1	Depth-key	75
6.2.2	3次元映像合成技術	78
6.2.3	バーチャルスタジオへの導入と番組応用	80
6.3	距離検出ノイズの低減とモデリング応用	87
6.3.1	画像蓄積による分解能向上	87
6.3.2	ノイズ低減手法の提案	90
	(1) ノイズ低減方法	90
	(2) ノイズ低減効果	93
	(3) 検出データの校正	95
6.3.3	新規映像表現への応用の可能性	96
6.4	立体表示への応用技術	99
6.4.1	奥行き標準化立体ディスプレイ	99
	(1) 奥行き標準化映像の生成	100

(2) 奥行き標本化立体ディスプレイの試作 . . .	101
6.4.2 実時間立体撮像・表示実験	102
(1) 奥行き標本化数と立体表示効果 . . .	102
(2) 間隙の改善検討	103
(3) 奥行き標本化数の増加	105
6.5 まとめ	108
参考文献	110
第7章 応用開拓に向けた距離検出の高分解能化	113
7.1 はじめに	113
7.2 距離検出分解能について	113
7.3 高分解能方式の提案	114
7.4 距離検出実験	117
7.4.1 実験系	117
7.4.2 出力特性	118
7.4.3 距離画像撮影実験	119
7.5 従来方式との比較	122
7.6 まとめ	122
参考文献	123
第8章 結論	124
謝辞	129
本研究に関する発表論文	131
付録 A 光電変換面への入力光強度	137
付録 B 量子雑音の影響	141
付録 C カメラパラメータおよび被写体の撮影条件の数値例	143

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

ブロードバンドやデジタル家電の普及、地上デジタル放送の開始などにより、高精細なデジタル映像は我々の生活に身近なものとなった。デジタル技術により画質は飛躍的に向上し、アナログ技術ではできなかった多彩な映像表現も可能となった。特に、映画や放送、ゲーム産業における 3 次元コンピュータグラフィクス(CG: Computer graphics)映像の進展は目覚ましいものがある。

今後、さらに魅力的な映像コンテンツを創造するには、CG のみならず実写映像の 3 次元情報も活用した新たな映像制作技術を開拓していくことが重要である。その実現のためには、被写体のカラー画像と距離画像からなる 3 次元情報を高速検出できる 3 次元カメラ技術の開発が必要である。また、この 3 次元カメラ技術は、映像制作用途のみならず、将来の立体映像メディアの開拓や医療、ロボットビジョン、人体計測、セキュリティなど、幅広い産業分野への応用も期待できる。

ここで、この 3 次元カメラ開発の重要な要素技術である距離検出技術について、その代表例である三角測量法と光飛行時間計測法の研究の歴史を中心に概観する。

三角測量法は、1533 年オランダの地理学者 G. Frisus によって提唱され、1615 年、屈折則で有名な W. Snel が地球の経線の計測に使用し、近代の三角測量の基礎が確立された。1980 年以降、ビデオカメラやパソコンの普及と性能向上、画像処理技術の進展により、被写体全体の奥行き距離情報を画像化した“距離画像”の取得が盛んとなった。その一例をあげると、1996 年、金出ら[1]は複数台のビデオカメラで得られた多視点画像から、被写体の距離画像を高速に算出し、画素数 265 (H) × 240 (V)、フレームレート 30Hz で距離画像の検出を可能とした。また、アクティブな三角測量法であるパターン光投影法[2-5]やスリット光の走査投射による光切断法[6,7]においても、

演算処理の高速化や撮像デバイスの高性能化などにより、距離画像の検出技術が進展した。しかし、三角測量法の課題として、オクルージョンの発生や高精細化にともなう演算処理量の増加、カメラレンズのズーム機能への対応の難しさなどがあげられる。

一方、距離検出原理のもう一つの代表例である光飛行時間計測法の開発は、20 世紀後半に、レーザーの開発とともに急速に進展した。1947 年、スウェーデンの科学者 E. Bergstrand は、光を高周波で変調し、照射光と被写体からの反射光との位相差から距離を求める光測距儀ジオジメーターを開発した。本装置は、距離算出処理が簡単であり、装置構成がシンプルかつコンパクトな特長を持つ。その後、光源の出力光強度や受光素子の感度特性の変動による影響を抑えて高精度に位相差を求めることで、10 ～15 km の距離を標準偏差 2 mm で測定可能とするなど、高性能化や実用性の向上を重ねて現在の普及に至っている。

一方、1960 年に T. Mainman がルビーレーザー発振に成功後、正弦波状の変調光の代わりにパルス光を照射し、光の往復時間を計測することで距離を求めるレーザーレーダーが開発された。高出力パルス光を使用するため、変調光方式より測定可能な距離が長く、反射鏡なしに拡散反射光でも検出できる特長がある。このパルスレーザー光方式はマイクロ波より高い精度と空間分解能を持ち、レーダーに変わる新しい探知方法 LADAR (LAsER Detection And Ranging) として、軍事用途を中心に開発が進んだ。しかし、この方式で被写体の距離画像を取得するには、レーザービームの 2 次元走査が必要であり [8-10]、実時間での距離画像検出は困難であった。

1990 年代後半より、強度変調光と高速サンプリング機能を有する Kerr Cell や Pockels Cell、マイクロチャンネルプレートなどの高速変調デバイスにより、光走査機構なしで距離画像が検出できる可能性が示された [11-13]。しかし、数 kV の高電圧駆動が必要であり、デバイスは高価でサイズも小さいといった課題があった。数年後、変調デバイスにイメージインテンシファイアを用いる方式が提案され [14-16]、駆動電圧の低下や受光面積の拡大による高精細化、変調速度の高速化による高分解能化が進展した。この開発の流れには、本論文の Axi-Vision カメラの研究 [14,17] やイスラエルの 3DV System 社が同時期に開発した ZCam がある [16]。この ZCam は、軍事用途として発展してきた高出力なパルスレーザー光方式を民生品に転用し、標準テレビ用カメラとして製品化後、小型カメラの商品開発へ進んだ。一方、本論文で述べる Axi-Vision カメラは、光強度が増加及び減少する変調光を照射し、高速シャッターカメラによる撮影画像から距離画像を算出する手法であり、人物の撮影に安全な LED アレー光源が使用できる特長を有する。その後、このカメラは高品質な映像制作用途としての要素技術

の開発が行われ、距離画像検出の高精細化と高速化の研究へと進んだ。

一方、2000 年以降、高速サンプリング機能を有する CCD や CMOS などの固体撮像素子による光飛行時間計測法も開発された[18-20]。これらは、低消費電力と低コスト化に有利で製品化の動きもあるが、現時点では画素数が 1~2 万画素と少なく、基本性能が十分とはいえないためアプリケーションを模索している段階である。

以上のように距離画像検出技術はここ数年間で大きく進展し、方式によっては 3 次元カメラの製品化の機運も高まっている。今後、このカメラを映像制作へ実用化するには、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するという大きな技術的課題がある。また、3 次元カメラ技術を活かした魅力的な応用の開拓と、実用化に向けた周辺技術の開発も課題である。

1.2 本研究の目的と論文の構成

本研究では、実時間で距離画像を検出できる高精細 3 次元カメラを開発し、映像制作をはじめとする各産業分野への応用を目的とする。そのために、従来の距離検出技術の課題を踏まえ、以下の 3 つの研究テーマに取り組む。

(第 1 の研究テーマ： 距離検出方式の提案) 高速かつ高精細な距離画像検出を実現するための新規距離検出方式を考案し、その原理を検証する。**(第 2 の研究テーマ： カメラの設計・試作)** 提案方式の距離検出特性の解析、およびカメラ設計と要素技術の開発によりハイビジョン対応の 3 次元カメラを実現する。**(第 3 の研究テーマ： カメラの応用開拓)** 3 次元カメラの映像制作技術への応用の可能性を検証し、実用化を目指すとともに、広範囲な産業分野への応用を視野に入れた性能向上を行う。

本論文では、距離画像を実時間で撮影可能な 3 次元カメラとその応用に関する研究成果を図 1.1 のように 8 章の構成にまとめた。以下に各章の内容の詳細を述べる。

第 2 章では、従来の 3 次元画像検出技術を概説する。3 次元画像の応用分野と従来の距離検出方式を解説し、代表例である三角測量法と光飛行時間計測法を基本原理とする各方式について、その特徴と課題を述べる。特に、本研究の距離検出方法と関連のある光飛行時間計測法については、距離画像の高速検出技術の最新動向について詳細を解説する。

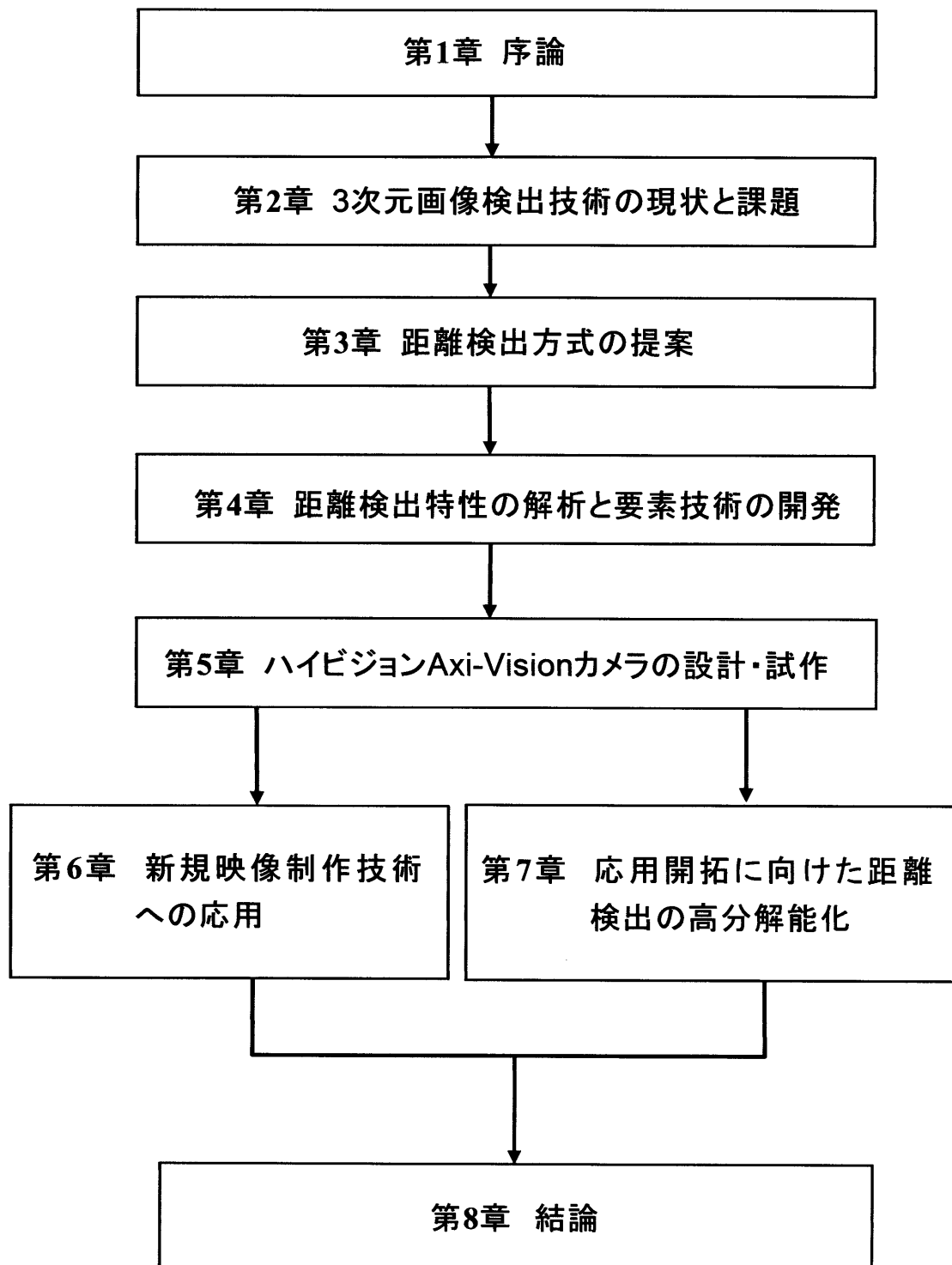


図 1.1 本論文の構成

第3章では、実時間の距離画像検出を実現するための距離検出手法を提案し、実験によりその基本性能を検証する。はじめに、新規距離検出方式として、強度変調照射光と超高速シャッターカメラからなる方式を提案する。本方式は、光ビームの走査機構や煩雑な演算処理が不要であるため、高速かつ高精細な距離画像取得の可能性を持つ。提案方式を実現する具体策として、近赤外半導体レーザーと超高速シャッター機能を持つ特殊なイメージインテンシファイア、CCDカメラから構成される実験システムを考案し試作する。実験により距離検出分解能や出力特性を測定し、高速な距離画像検出が可能であることを実証する。また、被写体撮影実験により動画像検出性能や被写体表面の反射特性の影響を調べ、カメラ開発に向けた課題を明らかにする。

第4章では、距離検出特性の解析と要素技術の開発について述べる。解析では、距離検出の信号対ノイズ比 (SN 比) とカメラパラメーターや被写体の撮影条件との関係を解明する。また、前章の原理検証実験で明らかとなったレーザー光源の課題である照射光の高輝度化と人物撮影時の安全性の確保、照射範囲の拡大、照射光強度の均一性向上、影発生抑制に取り組む。これらの課題の解決に向け、高輝度かつ高速強度変調が可能な近赤外発光ダイオード(LED: Light emitting diode)アレー光源を用いることを提案し、アレー状光源が距離検出特性に及ぼす影響や距離検出に必要な光量を求め、人物撮影の安全性についても調べる。これらの結果をもとに LED アレー照射装置を試作し、標準テレビ信号対応の実験システムを作製し、距離検出性能を検証する。

第5章では、ハイビジョン映像制作用として実用性の高い Axi-Vision カメラの設計・試作について述べる。カメラの実用化に向けて残された課題である距離画像検出速度のビデオフレームレート化とハイビジョンクラスの高精細化を目指す。前章の解析結果をもとにハイビジョン用カメラの設計指針を導出し、その実現に必要な要素技術の開発として、イメージインテンシファイアの高感度化と高精細化、新規光学系の作製、強度変調光の高輝度化、距離演算信号処理装置の開発等を行い、ハイビジョン用 Axi-Vision カメラを試作する。

第6章では、Axi-Vision カメラの新規映像制作技術への応用の可能性を検証する。第1の応用として、Axi-Vision カメラによる距離情報を用いた映像合成技術に関し、基本性能を調べるとともに、CG と実写映像とのリアルタイム 3 次元合成技術を確立する。また、この合成技術を用いたバーチャルスタジオを構成するとともに、実際の番組制作へ応用し、効果的な映像表現と効率的な番組制作を実現する。次に、第2の応用として、高速 3 次元モデリングへの活用を検証する。モデリングに必要な距離検出分解能を得るために、画像蓄積効果によるノイズ低減手法を提案し、距離検出分解

能の向上を図る。また、具体的な応用例として CG 映像合成における CG 物体の 3 次元配置やライティング、シャドウイングなどの自然な合成効果を実験で調べる。最後に、第 3 の応用として、立体映像システムへの活用の可能性を検討する。距離画像をもとにした奥行き標本化立体ディスプレイを提案し、奥行き標本化画像の生成装置と立体表示装置を作製する。これら試作装置を用いた実時間の立体撮像・表示実験により、カメラの立体映像システムへの応用の可能性を検証する。

第 7 章では、映像コンテンツ制作以外の産業分野への広い応用展開を目指し、より高分解能な距離検出手法の可能性を調べる。まず、新規距離検出方式として、数十ピコ秒の短パルス光と高速可変ゲイン撮影による方法を考案し、検証実験によりその高分解能な距離検出性能を実証するとともに、従来方式との距離検出特性の違いを明らかにする。

以上、本論文に記述する研究の概要を述べた。次の第 2 章以降に本研究の詳細を記述する。

参考文献

- [1] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano, and M. Tanaka, "A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications," in Proceedings of 15th Computer Vision and Pattern Recognition Conference, pp. 196-202, San Francisco, California, 1996.
- [2] M. H. Demers, J. D. Hurley, R. C. Wulpern, and J. R. Grindon, "Three dimensional surface capture for body measurement using projected sinusoidal patterns," in Three-Dimensional Image Capture and Applications, R. N. Ellson and J. H. Nurre, eds., Proc. SPIE 3023, pp. 13-25, 1997.
- [3] G. Frankowski, M. Chen, and T. Huth, "Real-time 3D shape measurement with digital stripe projection by Texas Instruments micro mirror devices DMD," in Three-Dimensional Image Capture and Applications III, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., Proc. SPIE 3958, pp. 90-105, 2000.
- [4] 吾妻健夫, 登一生, 魚森謙也, 森村淳, "マルチスリット方式レンジファインダの開発," 電情学誌, D-II, vol. J84-D-II, no. 6, pp. 1020-1032, 2001.
- [5] 西川修, 山口義紀, 安部勉, 東海研, 伊與田哲男, "再符号化を特徴とした新規レンジファインダの開発," 3次元画像コンファレンス 2002, 2-4, pp. 37-40, 2002.
- [6] 杉山寿伸, 吉村真一, 鈴木亮司, 角博文, "カラー動画像と実時間 3 次元計測が可能な CMOS センサー," 映像情報メディア学会技術報告, vol. 26, pp. 1-6, 2002.
- [7] Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "Design and implementation of real-time 3-D image sensor with 640×480 pixel resolution," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 4, pp. 622-628, 2004.
- [8] D. Nitzan, A. E. Brain, and R. O. Duda, "The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis," Proc. IEEE, vol. 65, no. 2, pp. 206-220, 1977.
- [9] R. A. Lewis and A. R. Jhonston, "A scanning laser rangefinder for a robotic vehicle," in 5th International Joint Conferences on Artificial intelligence (IJCAI), Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 762-768, 1977.
- [10] R. A. Jarvis, "A laser time-of-flight range scanner for robotic vision," IEEE Trans., vol. PAMI-5, no. 5, pp. 505-512, 1983.
- [11] K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. Zhang, and T. Yagi, "Simultaneous 3-D imaging using

- chirped ultrashort optical pulses,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33, pp. L1348-L1351, 1994.
- [12] R. Schwarte, H. Heinol, Z. Xu, and K. Hartmann, “An new 3D-Vision system based on rf-modulation interferometry of incoherent light,” in Intelligent Robots and Computer Vision XIV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling, D. P. Casacent ed., Proc. SPIE 2588, pp. 126-134, 1995.
 - [13] V. Jetter and R. Muller, “Optical Demodulation phase measurement technique for 3D-Camera-Application,” CLEO/Europe 1996, Hamburg, Technical Digest, p.187, 1996.
 - [14] 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.
 - [15] H. Höfler, V. Jetter, and E. Wagner, “3D-profiling by optical demodulation with an image intensifier,” in Three-Dimensional Image Capture and Applications II, J. H. Nurre and B. D. Corner, eds., Proc. SPIE 3640, pp. 21-27, 1999.
 - [16] G. J. Iddan and G. Yahav, “3D imaging in the studio (and elsewhere...),” in Three-Dimensional Image Capture and Applications IV, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., Proc. SPIE 4298, pp. 48-55, 2001.
 - [17] 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.
 - [18] Lange, P. Seitz, A. Biber, and S. Lauxtermann, “Demodulation pixels in CDD and CMOS technologies for time-of-flight ranging,” in Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications, M. M. Blouke, N. Sampat, G. M. Williams and T. Yeh, eds. Proc. SPIE vol. 3965, pp. 177-188, 2000.
 - [19] 森本作也, “1 チップ 3 次元画像センサー,” 画像ラボ, 日本工業出版, vol. 15, no. 7, pp. 55-60, 2004.
 - [20] 川人祥二, “反転増幅器を用いた TOF 距離画像センサ,” 映像情報メディア学会技術報告, vol. 27, no. 59, pp. 13-16, 2003.

第 2 章

3 次元画像検出技術の現状と課題

2.1 はじめに

本章では、3 次元画像検出技術の応用分野と、従来の距離検出技術を概説する。また、距離検出方式の代表例である三角測量法について、各方式の原理と特徴、課題、最近の進展を述べる。さらに、本論文で提案する距離検出方式と関連のある光飛行時間計測法については、最新の研究開発動向を詳細に解説する。

2.2 3 次元画像の応用分野

現在、距離検出技術は、多くの産業分野に広く普及し、被写体のカラー画像と距離画像からなる 3 次元画像の検出技術も幅広い活用が期待される[1]。予想される 3 次元画像の応用分野を図 2.1 に示す。この図では、想定される被写体サイズを横軸とし、必要となる距離検出分解能を縦軸として用途別に応用例を分類している。

応用の 1 つとして、3 次元画像を用いた映像制作があげられる。放送や映画、デジタルシネマにおける距離情報を活用した映像表現や 3 次元 CG、ゲーム制作など、新たな映像コンテンツ制作への応用が期待される。本研究においても、まずこの分野への応用を目標とした 3 次元カメラの開発に取り組む。

また、センシング応用としては、通常のカメラでは得られない被写体までの距離や形状、障害物の有無を画像として検知できるため、セキュリティや交通監視、ナビゲーション、ロボットビジョン、災害時の救助探索などへの利用が考えられる。

さらに、高分解能化が可能となれば、図 2.1 のグラフの左下に示すように、形状計測用途として活用でき、医療の診断や治療、CAD、部品検査、3 次元モデリング、人体計測など、応用分野は広がり、社会に大きく貢献できると期待される。

しかし、3 次元画像検出技術は、用途に応じて要求性能が大きく異なり、本研究で

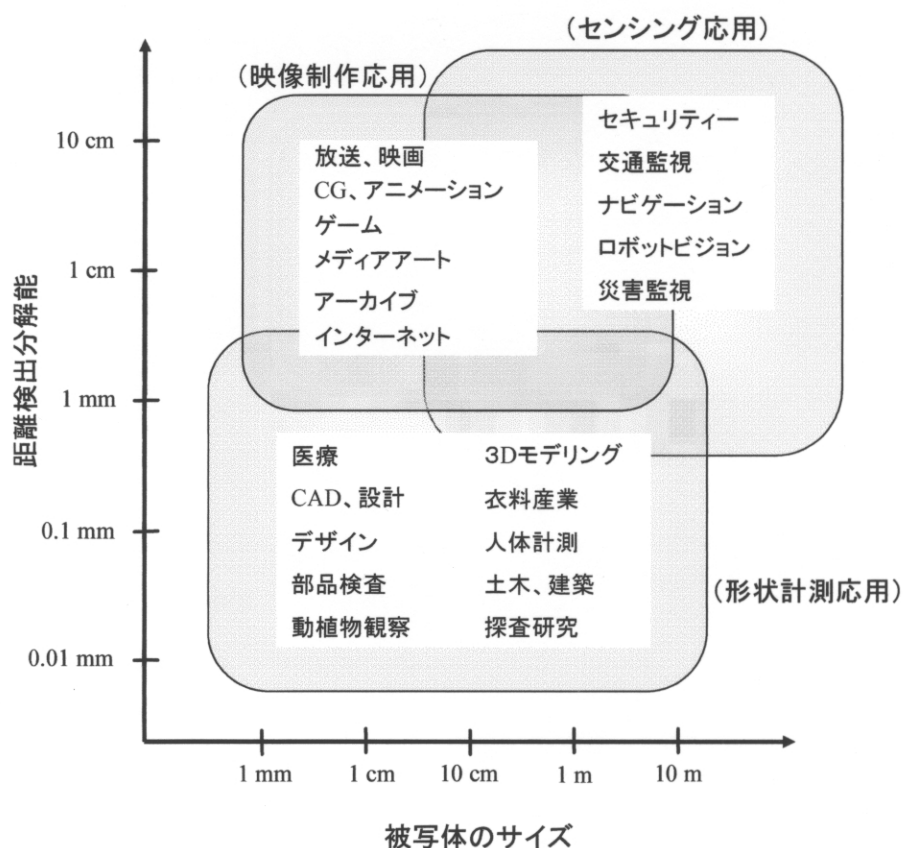


図 2.1 3次元画像の応用分野

開発する3次元カメラもこれらすべての分野に応用できるものではない。

表 2.1 に主要な3次元画像検出の性能項目を示す。被写体のサイズや動く速度により、距離検出の空間解像度や更新速度、分解能などの要件が決まる。また、使用環境が屋内かもしくは屋外か、光照射が可能か、外乱光の影響の有無などにより、最適な距離検出方式が異なってくる。これら各項目をすべて満足する距離検出方式はなく、3次元カメラ開発においては、目的に応じた性能要件を設定し、最適な距離検出方法や要素技術を開発することが重要となる。

表 2.1 距離検出性能の主な項目

性能：	空間解像度，更新時間，距離検出分解能，測定可能範囲
機能：	カラー画像との同時検出，ズーム機能
測定条件：	光照射の可否，不検出領域の有無，屋内か屋外か 外乱光の影響，被写体の表面形状や反射特性の影響
システム：	サイズ，コスト，信頼性，安定性，操作性，汎用性

2.3 各種距離検出方式

従来の距離検出方法を大別すると、光照射なしに撮影条件が異なる複数の画像より距離を求める受動型方式と、空間的もしくは時間的に変調された光を被写体に照射し、距離を検出する能動型方式がある(表 2.2)。

受動型方式では、光照射が不要で、屋外でも使用できるメリットがある。具体例として、マルチカメラステレオ法[2-4]やレンズ焦点法[5,6]がある。一方、能動型方式では、光照射が必要であるため外乱光や被写体表面の反射特性の影響を受けやすいものの、光の特長を活かした超高精度な検出や高速な検出方式などバリエーションが豊かである。基本原理も三角測量法[7-17]や光飛行時間計測法[18-23]、干渉法[24,25]、モアレ法[26-29]など多岐にわたっている。

次に距離検出原理の代表例である三角測量法について、各種方式の基本原理と特徴を説明し、その後、光飛行時間計測法の最近の進展を解説する。

表 2.2 距離検出技術の分類

方式			参考文献
受動型 (光投射なし)	三角測量法	マルチカメラステレオ法	[2-4]
	レンズ焦点法		[5,6]
能動型 (光投射あり)	三角測量法 (アクティブ ステレオ法)	光切断法 (スリット光投影)	[7-10]
		空間コード化 パターン光投影	[11-17]
		カラーパターン 濃度傾斜 多重パターン	
	光飛行時間 計測法	パルス光時間計測 強度変調位相計測	[18-23]
	光干渉法	ヘテロダイン干渉	[24,25]
		ホログラフィ干渉	
		スペックル干渉	
	モアレ法		[26-29]

2.3.1 三角測量法

(1) マルチカメラステレオ法

受動型のマルチカメラステレオ方法は、複数台のカメラで得られた多視点画像より、三角測量法にもとづき 3 次元情報を取得する[2]。本方式は、光照射が不要で、屋外でも使用可能な特徴を持つ。

一方、課題は、被写体表面のテクスチャの有無が距離検出に影響するとともに、複数台のカメラ制御やキャリブレーションが煩雑で、画像間のマッチング処理に時間を要することである。また、カメラ台数が少ない場合、被写体の形状によってはオクルージョンが生じる。

近年の高速演算プロセッサやソフトウェアの進展、安価で高性能なカメラの普及により、距離検出速度や精度が向上し、画素数 256 (H) × 240 (V)、フレームレート 30Hz、7 ビット精度の距離画像検出が報告されている[3]。また、最近、類似の形状検出技術として、複数台カメラでハイビジョン映像を撮影し、オフライン処理で任意視点映像生成する試みも行われている[4]。

しかし、複数の高精細画像データより高精度な形状検出を実時間処理するには、現在では演算処理能力が不足し、今後の映像処理性能の進展を考慮しても実現にはかなりの年月を要すると推定される。

(2) 光切断法

能動型の三角測量法である光切断法は、被写体上にスリット光を走査させ、光の通過タイミングより距離を求める [7,8]。この能動型方式は、一般的に外乱光や被写体の反射特性の影響を受けやすいものの、空間解像度や距離検出分解能、計測時間、装置サイズなどで多くの優れた特長を有している。

最近の進展として、CMOS センサーや信号処理技術の進展により、高速化や多画素検出化が実現されつつある [9,10]。課題としては、スリット光を走査する機械的駆動部が必要なことや、光源とカメラの位置が異なるため、被写体形状によっては投射光の影が生じ、距離検出ができない領域が生じることなどである。

(3) 空間コード化パターン光投影法

本方式は、カラーパターンや濃度パターン、多重パターンなど各種光パターンを投影し、撮像画像間で三角測量法より距離を求める[11-16]。これらの方式は、機械的な

駆動部が不要である特徴を持つ。

最近、1 種類の輝度コード化パターン光のみを照射し、しかも被写体の反射特性の影響を低減した手法[17]も開発され、静止物体の形状計測に使用されている。

一方、課題として、液晶プロジェクターなどパターン光投射装置によりシステム構成が複雑かつ大型になることや、比較的煩雑な画像演算処理が必要であるため実時間検出が困難な点が挙げられる。

2.3.2 光飛行時間計測法と最近の進展

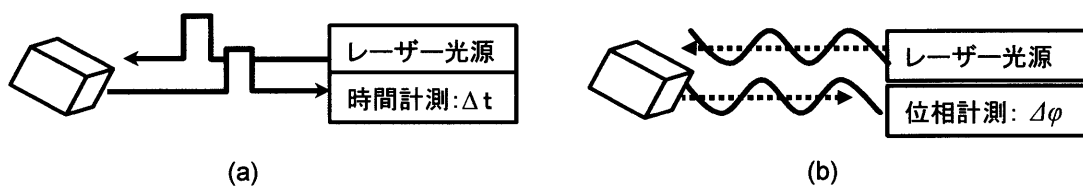


図 2.2 光飛行時間計測法 (a) パルス光時間計測 (b) 強度変調位相計測

本研究と関連の深い光飛行時間計測法[18]の原理と最近の進展を述べる。光飛行時間計測法は、カメラと被写体間を光が往復する時間 (図 2.2(a))、もしくは反射光の変調位相(図 2.2(b)) により距離を求めるものである。計測時間や位相が直接距離値に換算できるため、演算処理が容易でシンプルな機器構成が可能である。また、光投射と受光を同光軸で構成できるため、照射光の影の発生を除去できる。さらに、時間や位相の検出精度を高めることで、遠くの被写体に対しても高分解能な距離検出が可能である。

本方式による距離画像の検出は、一般的にレーザービームをスキャナで機械的に 2 次元走査する必要がある、建築物など大型の静止した被写体の形状計測に使用されている。

ところが、1993 年に走査機構が不要な方式として、正弦波状強度変調レーザー光と、正弦波状のゲイン変化を持つカメラで撮影する方法が報告された[19]。屋外の車両など大型物体を対象にした距離検出を可能としたが、20 W もの強力レーザーを使用し、軍用途に特化した技術として位置付けられていた。

数年後、光飛行時間計測法に基づいた民生機器用 3 次元カメラの提案が相次ぎ [20-23]、1998 年の本研究の距離検出方法の提案[21]もその一つであった。我々はテレビ用途の 3 次元カメラとして距離検出方式を考案し、直線的に増加及び減少変調する

光を照射し、短時間撮影することで距離画像を得る Axi-Vision カメラを開発した[30、31]。

本研究と同時期に、イスラエルの 3DV System 社では ZCam と呼ばれる標準テレビ用 3 次元カメラを開発し商品化した[23]。本方式は、パルスレーザーを照射し、パルス状のゲート撮影により距離画像を求めるもので、前述の軍事用 LADAR からの派生技術であり、図 2.2(a) に示すパルス光方法による 2 次元検出を可能としたものである。

本研究の Axi-Vision カメラとこの ZCam の相違について述べる。ZCam は数ナノ秒程度のパルス光と同等の時間幅のパルス状のゲート撮影を行う。一方、Axi-Vision カメラは、数十ナノ秒周期で増減する比較的緩やかな強度変調光を照射し、1～数ナノ秒の時間幅の特殊な超高速シャッターで撮影する。どちらも基本原理は光飛行時間による 2 次元距離画像検出法であるが、ZCam は、光源にパルス光を使用し、そのパルス波形の急峻性が距離検出の直線性に影響するため、光源が周波数応答の高いレーザー光源に限定される。一方、Axi-Vision カメラは、第 4 章で詳細に説明するようにレーザーのみならず LED アレー光源が使用でき [32]、高輝度で均一性のよい光照射が可能である。また、インコヒーレント光であるためスペックルノイズの影響が無く、ハイビジョンクラスの高精細な距離画像検出に有利であり [33]、人物撮影時の安全性も高い特長を持つ。また、ZCam では、ゲート時間幅が比較的広く受光時間が長いため、撮影感度が高い反面、反射光が無い時間帯もゲート開放しているため、外乱光の影響を受けやすい。それに対し Axi-Vision カメラでは、シャッター開放時間を最短 1 ナノ秒と必要最小限に抑えているため外乱光の影響を受けにくく、また、欠点である感度不足も短時間シャッターの高速繰返し動作を可能とする技術開発により解消している。3DV System 社では標準テレビ用カメラ開発の後、小型 3 次元カメラの商品開発へと進み、一方、Axi-Vision カメラは、高精細な距離検出の特長を活かして、ハイビジョンクラスの高精細 3 次元カメラ開発に向けて進展した。

上記のカメラは、撮像管を用いた方式であるが、2000 年頃より、固体撮像素子による光飛行時間計測法が開発され始めた。スウェーデン CSEM 社は CMOS プロセスにより高速サンプリング機能を備えた CCD により 3 次元カメラを開発し[22]、画素数 160 (H) × 124 (V) の距離画像をフレームレート 30Hz で検出できるカメラを商品化している。また、同様の原理で松下電工より 128 (H) × 123 (V)、15Hz の産業用カメラが販売されるとともに、カネスタ社からは CMOS センサーによる 64 (H) × 64 (V)、30Hz のカメラが商品化されている。これらは、多画素化が困難であるものの、小型化や低コスト化の可能性がある、セキュリティやパソコン・携帯端末用カメラとしての用途が期

待される。

最近の高速距離画像検出技術について、フレームレートを横軸に、距離検出画素数を縦軸として図 2.6 に示す。光飛行時間計測法や光切断法による高速化かつ多画素化の進展が多く、VGA から XGA クラスの距離画像のビデオフレームレート検出が実現されつつある状況である。

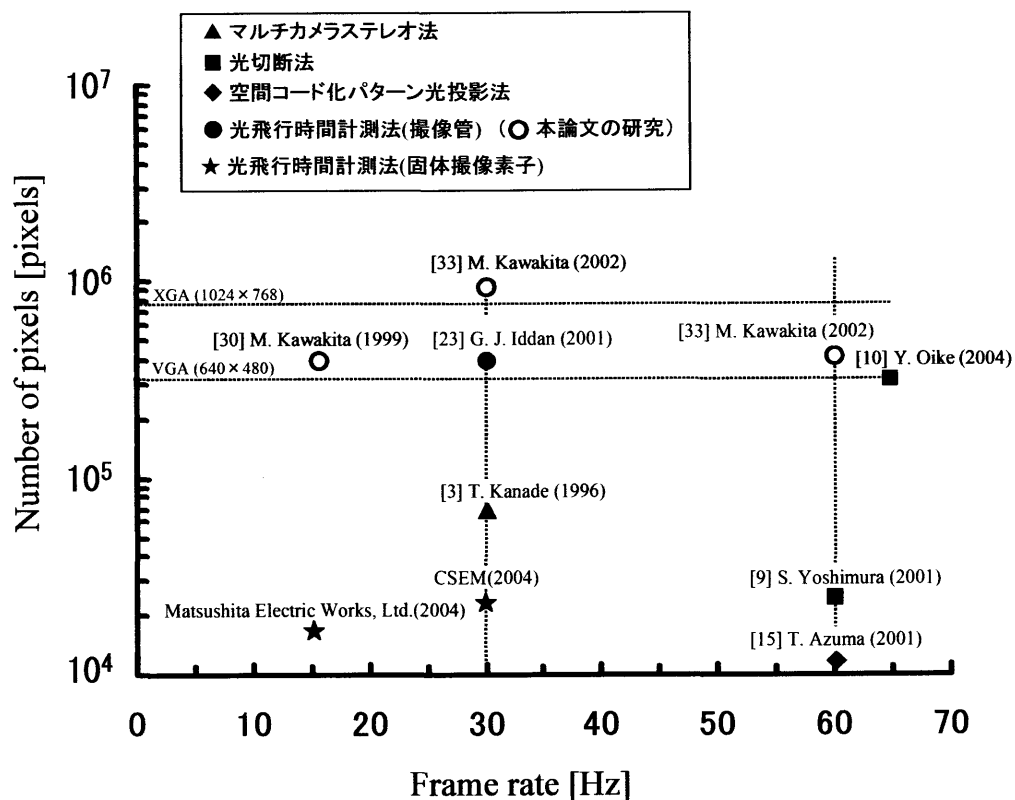


図 2.6 最近の高速距離画像検出技術

参考文献

- [1] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 東京, 1990.
- [2] Y. Yakimovsky and R. Cunningham, "A system for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras," *Computer Graphics and Image Processing* 7, pp. 195-210, 1978.
- [3] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano, and M. Tanaka, "A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications," in *Proceedings of 15th Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pp. 196-202, San Francisco, California, Jun. 1996.
- [4] 片山美和, 岩館祐一, 富山仁博, 今泉浩幸, "視点ハイビジョンカメラによる任意視点映像生成システム," *NHK 技研 R&D*, no. 76, pp. 24-29, 11 月, 2002.
- [5] S. K. Nayar, M. Watanabe, and M. Noguchi, "Real-time focus range sensor," *International Conference on Computer Vision*, p. 995, 1995.
- [6] 椿泰範, 久保田彰, 児玉和也, 相澤清晴, "多数の昆虫顕微鏡画像からの全焦点画像と 3 次元画像の生成," *映像情報メディア学会誌*, vol. 56, no. 2, pp. 263-270, 2002.
- [7] M. Rioux, "Laser range finder based on synchronized scanners," *Appl. Opt.*, vol. 23, pp. 3837-3844, 1984.
- [8] G. Häusler and W. Heckel, "Light sectioning with large depth and high resolution," *Appl. Opt.*, vol. 27, pp. 5165-5169, 1988.
- [9] S. Yoshimura T. Sugiyama, K. Yonemoto, and K. Ueda, "A 48kframe/s CMOS image sensor for real-time 3-D sensing and motion detection," in *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference*, vol. 44, pp. 94-95, 436, 2001.
- [10] Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "Design and implementation of real-time 3-D image sensor with 640×480 pixel resolution," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 4, pp. 622-628, 2004.
- [11] S. Inokuchi, Y. Morita, and Y. Sakurai, "Optical pattern processing utilizing nematic liquid crystals," *Appl. Opt.*, vol. 11, pp. 2223-2227, 1972.
- [12] B. Carrihill and R. Hummel, "Experiments with the intensity ratio depth sensor," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing (CVGIP)*, vol. 32, pp. 337-358, 1985.

- [13] J. Tajima, "Rainbow range finder principle for range data acquisition," in Proceedings of International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence Seiken Symposium (IEEE-Industrial Electronics Society, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 1987), pp. 381-386, 1987.
- [14] M. H. Demers, J. D. Hurley, R. C. Wulpern, and J. R. Grindon, "Three dimensional surface capture for body measurement using projected sinusoidal patterns," in Three-Dimensional Image Capture and Applications, R. N. Ellson and J. H. Nurre, eds., Proc. SPIE 3023, pp. 13-25, 1997.
- [15] 吾妻健夫, 登一生, 魚森謙也, 森村淳, "マルチスリット方式レンジファインダの開発," 電情学誌, D-II, vol. J84-D-II, no. 6, pp. 1020-1032, Jun. 2001.
- [16] G. Frankowski, M. Chen, and T. Huth, "Real-time 3D shape measurement with digital stripe projection by Texas Instruments micro mirror devices DMD," in Three-Dimensional Image Capture and Applications III, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., Proc. SPIE 3958, pp. 90-105, 2000.
- [17] 西川修, 山口義紀, 安部勉, 東海研, 伊與田哲男, "再符号化を特徴とした新規レンジファインダの開発", 3次元画像コンファレンス 2002, 2-4, pp. 37-40, 2002.
- [18] R. A. Jarvis, "A laser time-of-flight range scanner for robotic vision," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-5, pp. 505-512, 1983.
- [19] J. Anthes, P. Garcia, J. Pierce, and P. Dressendorfer, "Non-scanned LADAR imaging and applications," Applied Laser Radar Technology, Proc. SPIE 1936, pp. 11-22, 1993.
- [20] K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. Zhang, and T. Yagi, "Simultaneous 3-D imaging using chirped ultrashort optical pulses," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33, pp. L1348-L1351, 1994.
- [21] 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.
- [22] R. Lange, P. Seitz, A. Biber, and S. Lauxtermann, "Demodulation pixels in CDD and CMOS technologies for time-of-flight ranging," in Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications, M. M. Blouke, N. Sampat, G. M. Williams and T. Yeh, eds., Proc. SPIE 3965, pp. 177-188, 2000.
- [23] G. J. Iddan and G. Yahav, "3D imaging in the studio (and elsewhere...)," in Three-Dimensional Image Capture and Applications IV, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., Proc. SPIE 4298, pp. 48-55, 2001.
- [24] K. Okada, H. Sakuta, T. Ose, and J. Tsujiuchi, "Separate measurements of surface

shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable source phase shifting interferometry,” *Appl. Opt.*, vol. 29, pp. 3280-3285, 1990.

- [25] 吉澤徹, 瀬田勝男, 光ヘテロダイン技術, 新技術コミュニケーション, 東京, 1994.
- [26] H. Takasaki, “Moire topography,” *Appl. Opt.*, vol. 9, pp. 1467-1472, 1970.
- [27] L. G. Gregoris and K. Iizuka, “Moiré microwave holography,” *Appl. Opt.*, vol. 16, pp. 418-426, 1977.
- [28] Y.-B. Choi and S.-W. Kim, “Phase-shifting grating projection moiré topography,” *Opt. Eng.*, vol. 37, pp. 1005-1010, 1998.
- [29] J.-T. Oh, S.-Y. Lee, and S.-W. Kim, “Scanning projection grating moiré topography,” in *Three-Dimensional Image Capture and Applications III*, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., *Proc. SPIE* 3958, pp. 46-51, 2000.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa, “Axi-Vision Camera: a three-dimension camera,” in *Three-Dimensional Image Capture and Applications III*, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., *Proc. SPIE* 3958, pp. 61-70, 2000.
- [33] M. Kawakita, T. Kurita, H. Kikuchi, and S. Inoue, “HDTV Axi-Vision Camera,” *Proc. IBC (International Broadcasting Convention) 2002*, pp. 397-404, Amsterdam, Netherlands, 2002.

第 3 章

距離検出方式の提案

3.1 はじめに

近年、実写映像とコンピュータグラフィクスを融合したバーチャル映像や、臨場感溢れる立体映像など、3次元情報を活用した映像表現への関心が高まっている。今後、さらに魅力的な映像コンテンツを創造していくには、新たな映像制作技術の開発が必要であり、特に、被写体の映像と同時に距離画像を検出できる3次元カメラの開発が、3次元情報を如何に活用できるかの鍵を握っている。

3次元カメラを放送や映画など映像制作分野へ応用するには、高精細な距離画像をビデオフレームレートで検出することが要求される。また、人物やスタジオセットなどを撮影対象とするため、少なくとも数 cm の距離検出分解能が必要となる。さらに、カメラレンズのズーム機能や人物の安全な撮影、操作性など、通常のビデオカメラと同等の汎用性も必要である。しかし、従来の距離検出手法では、距離算出の演算処理や機械的な光走査機構などにより検出速度や測定点数が制限され、これら3次元カメラの性能要件を満たすことは困難であった。

そこで、本章では、新規距離検出方式を提案し、上記要件を満たす距離検出性能を実現する。提案方式では、強度変調光を被写体に照射し、高速シャッターカメラで撮影された画像より距離を算出する。本方式の原理検証を行うために、半導体レーザーと超高速シャッター機能を持つ特殊なイメージインテンシファイア(I.I.: Image intensifier)と CCD カメラからなる実験系を作製し、距離検出特性を調べるとともに、カメラ試作へ向けた課題を明らかにする。

3.2 Axi-Vision カメラ方式の提案

3.2.1 基本原理

高速距離検出を実現する方式の考案においては、演算処理が容易で機械的走査機構が不要であることを前提条件とした。また、汎用性と実用性を確保するとともに、既存のビデオカメラとの併用を図るには、従来のビデオカメラの結像光学系と類似のシステムで距離検出できることが重要と考えた。

そこで、結像光学系においては、被写体上の1点からの発散光は同一の光路長を伝播後、結像面上の1点に集光する特性に注目した。カメラ側からの照射光の往復時間を結像面の各点で並列に検出できれば、高速かつ緻密な距離画像が得られると考えた[1]。結像面の各点で往復時間を検出するには、画素毎に時間計測機能を持つ検出器を配置する方法があるが、テレビ画像に匹敵する多画素化は技術的に困難である。そこで、強度変調光の照射とともに、画素構造を持たない高速シャッター機能素子を既存の高精細な撮像デバイスに取り付け、光の往復時間差を画像の輝度差として検出し、距離値を求めることを提案する[2]。

提案方式の概要を図 3.1 に示す。カメラに取り付けた光源より、時間とともに出力光強度が増加する変調光(増加変調光)を被写体に照射する。被写体からの反射光は、カメラと被写体間の距離に応じた遅れをもってカメラ側へ戻ってくる。その反射光を高速シャッターカメラで短時間撮影すると、得られる画像には被写体までの距離に応じた輝度差が生じ、これより被写体各点の距離が求められる[3]。

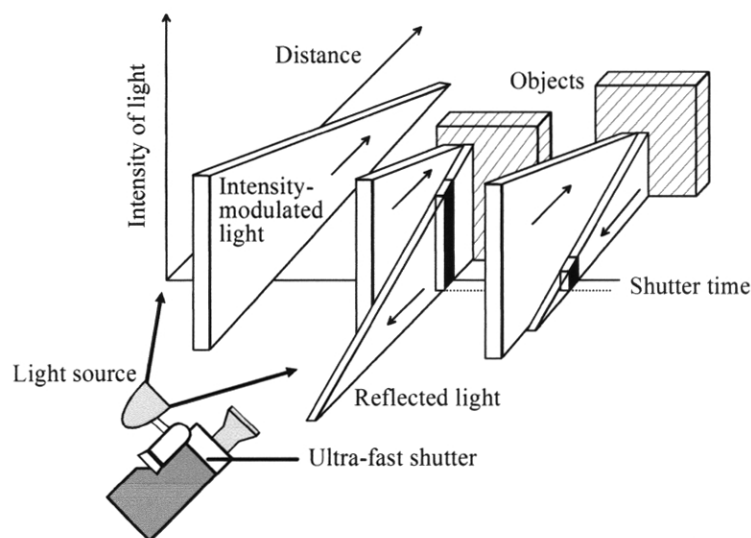


図 3.1 提案方式の概要

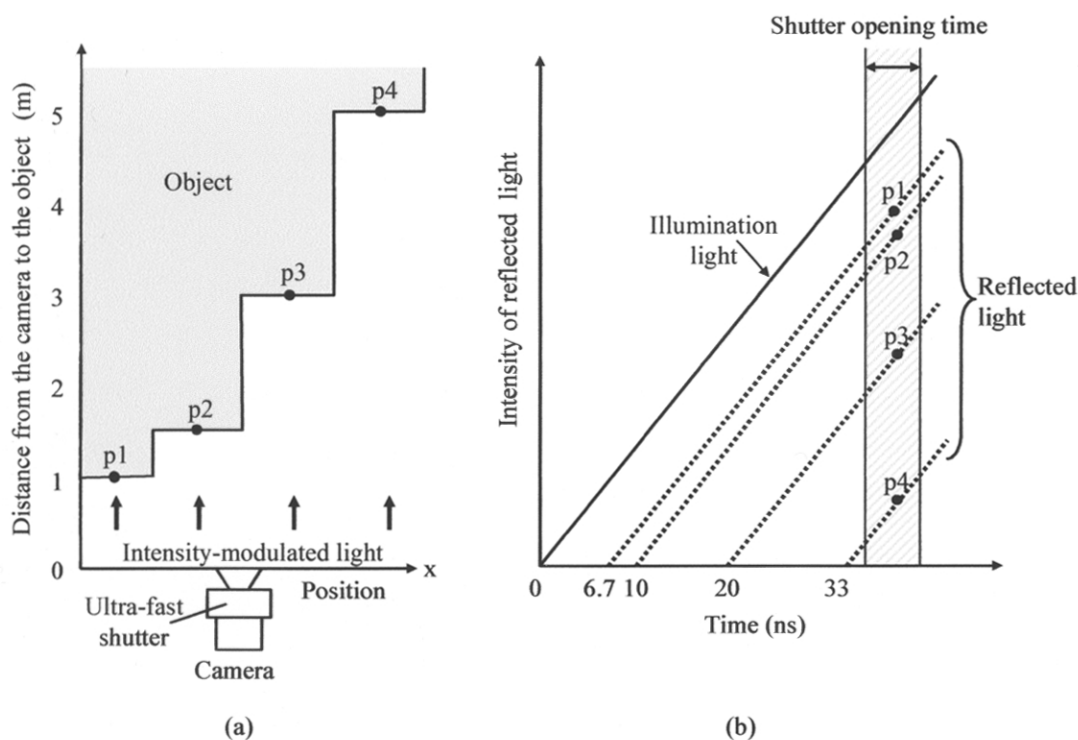


図 3.2 光の伝播時間を考慮した距離検出原理の説明図
(a)カメラと被写体の配置、(b)照射光と反射光の時間変化

図 3.2 に、光の伝播時間を考慮した原理説明図を示す。図 3.2(a)の階段状被写体の各段差上の点 p1～p4 とカメラとの距離は、それぞれ 1 m、1.5 m、3 m、5 m とする。ここでは、被写体各点の反射率は等しく、光の拡散や減衰効果は無いと仮定する。図 3.2(b)の実線は増加変調照射光の時間変化を示し、破線は各段差からの反射光を示している。点 p1 からの反射光は、往復距離 2m を光が伝播する時間(6.7ns)だけ、光照射開始時点(時間軸の原点)より遅れてカメラに到達し、その後、照射光と同じ割合で反射光量は増加していく。その他各点からの反射光も同様に、カメラからの距離に応じて遅れてカメラへ到達し、同様の時間変化を示す。これらの反射光を高速シャッターカメラで短時間撮影すると、斜線部分の光量がカメラで受光され、被写体の距離に応じた反射光量が得られる。図 3.2(b)からわかるように、この方式で数 m の奥行き距離差の被写体を検出するには、数十 ns 周期の変調光、つまり数十 MHz の変調周波数の強度変調光と、数 ns の時間幅の高速シャッター撮影が必要となる。

3.2.2 反射率の補正

前節では、被写体表面の反射率や照射光量の空間的なむらなどの影響は考慮しなかったが、実際の距離算出には、これらの諸要因を補正しなければならない。その補正方法を、図 3.3 を用いて説明する。

光源より増加変調光を被写体に照射し、高速シャッターカメラで短時間撮像する場合(図 3.3(a))、カメラに近い被写体 O_1 と遠い被写体 O_2 からの反射光は、その往復時間に距離の差に相当する違いが生じる。そのため、短時間撮像した画像 A では、 O_1 の像は明るく、 O_2 の像は暗くというように、距離の情報が画像の明暗としてあらわれる。

しかし、画像 A の明暗には、被写体の反射率や照射光量の空間的なむら、また拡散光の距離による減衰効果などの要因も影響している。そのため、これらの補正として、時間とともに光強度が減少する光(減少変調光)を照射し、同様に撮像する(図 3.3(b))。

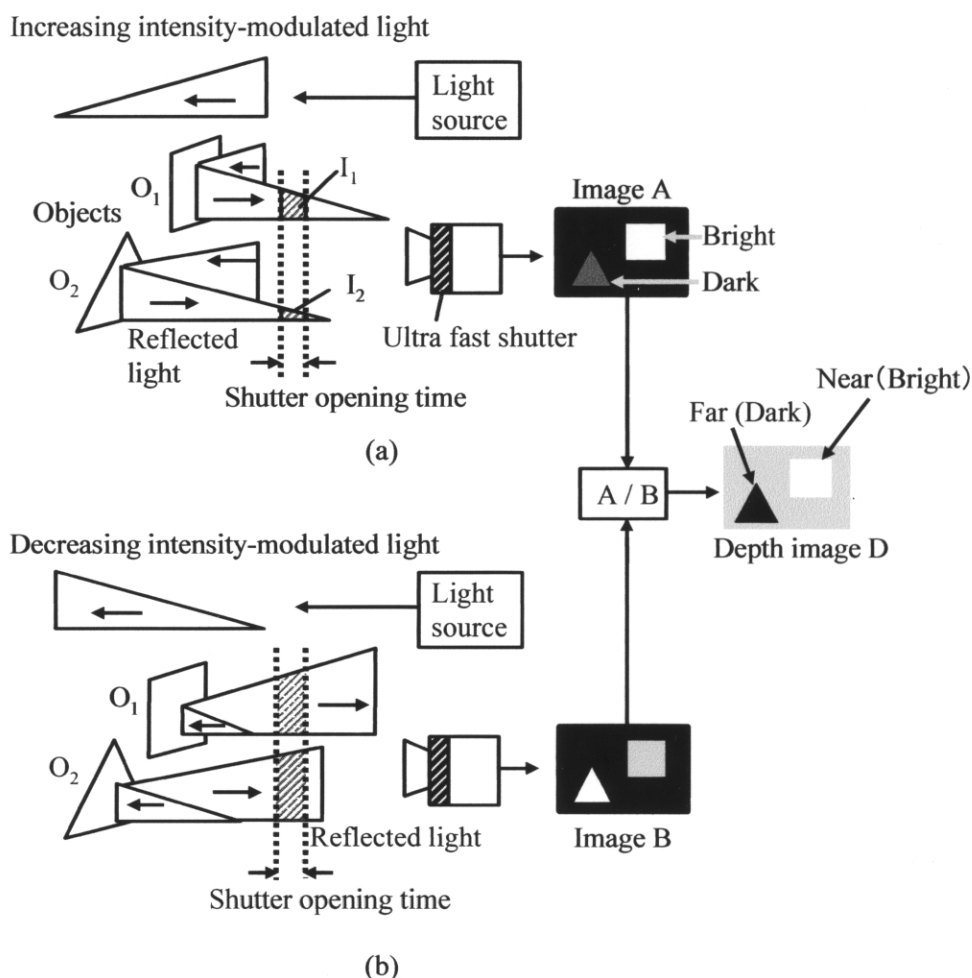


図 3.3 反射率の補正と距離画像算出方法

すると、増加変調光時の画像Aとは異なり、遠い被写体は比較的明るく、近い被写体は暗い画像Bが得られる。これら画像Aと画像Bには、各被写体の反射率等による光量の減衰率を示す係数がどちらにも同じく含まれているため、画像間の輝度比をとれば、この係数がキャンセルされ、カメラから被写体までの距離を画像の明暗で表した距離画像Dが求められる。

この増加変調光時と減少変調光時の短時間撮影例を図 3.4 に示す。30 cm 間隔で置かれたプラスチック製のロッドを被写体とし(図 3.4(a))、光源には波長 532 nm、照射光強度 4mW のレーザーを使用し、出力光を音響光学素子で 10 MHz に強度変調し、被写体に照射した。イメージインテンシファイアと CCD カメラにより、シャッター時間幅 3ns で撮影した[2]。増加変調光時の映像信号(図 3.4(b))と減少変調光時の映像信号(図 3.4(c))とでは、被写体までの距離に応じて画像の輝度分布が異なっていることがわかる。本方式では、この 2 種類の画像より被写体反射率を補正し距離画像を算出する。

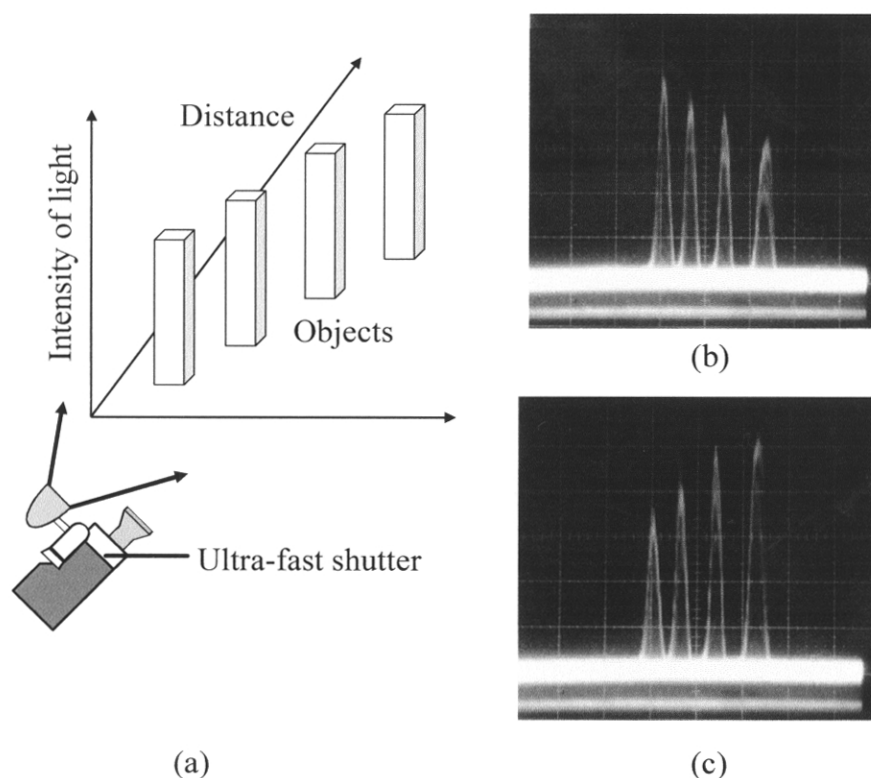


図 3.4 強度変調光照射時の短時間撮像映像 (a) カメラと被写体の配置 (b) 増加変調光照射時の撮影映像信号 (c) 減少変調光照射時の撮影映像信号

3.2.3 距離算出方法

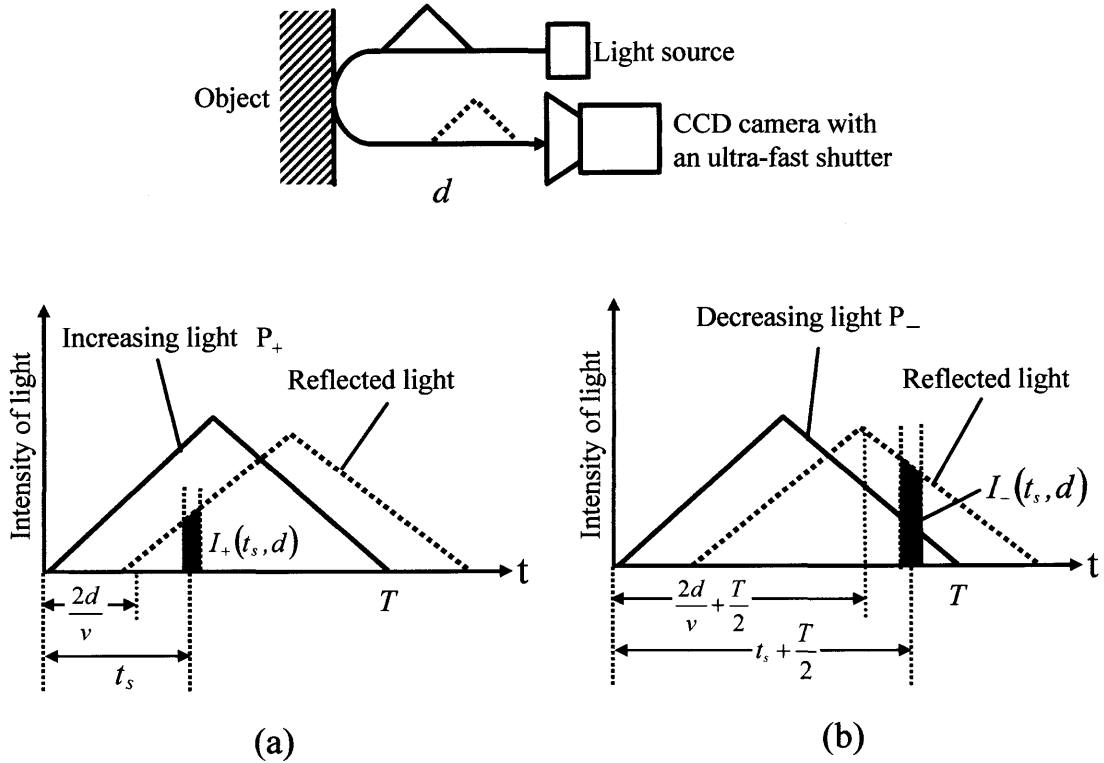


図 3.5 距離算出方法 (a) 増加変調反射光の撮影 (b) 減少変調反射光の撮影

距離算出方法を周期的に増加／減少する三角波状の強度変調光を用いた場合について説明する(図 3.5)。ここでは、等方性放射の単一点光源がカメラと同じ位置にあると仮定する。カメラから距離 d に位置する被写体に増加変調光 $P_+(t)$ を照射する(図 3.5(a))。

$$P_+(t) = st. \quad (3.1)$$

ただし、 s は照射光の増加率を示す係数である。被写体からの反射光は、照射光より $2d/v$ (v は光速) だけ遅れてカメラ側に戻ってくるため、時間 t_s にシャッターを開放した場合の受光量 $I_+(t_s, d)$ は、

$$\begin{aligned} I_+(t_s, d) &= \frac{\rho}{(4\pi d^2)^2} P_+\left(t_s - \frac{2d}{v}\right) \\ &= \frac{\rho s}{(4\pi d^2)^2} \left(t_s - \frac{2d}{v}\right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

となる。ここで、 ρ は被写体の後方散乱断面積である。

(3.2)式に含まれる未知数は ρ と d である。この(3.2)式の係数 $\rho s/(4\pi d^2)^2$ を消去するために、次に減少変調光 $P_-(t)$ 、

$$P_-(t) = s \left(\frac{T}{2} - t \right) \quad (3.3)$$

を照射する(図 3.5(b))。シャッター開放時間を $t_s + \frac{T}{2}$ とした場合の、入力光量 $I_-(t_s, d)$ は、

$$\begin{aligned} I_-(t_s, d) &= \frac{\rho}{(4\pi d^2)^2} P_- \left(t_s - \frac{2d}{v} \right) \\ &= \frac{\rho s}{(4\pi d^2)^2} \left[\frac{T}{2} - \left(t_s - \frac{2d}{v} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

となる。

ここで注目すべきは、(3.2)式と(3.4)式との比 I_+/I_- を計算することで、被写体の反射率特性が含まれている後方散乱断面積 ρ や光の発散を表す項 $1/(4\pi d^2)^2$ をキャンセルできることである。また、照射光強度の空間的なむらや、カメラレンズの口径食などによる結像画像周辺部の輝度低下も、画像間の比を計算することでキャンセルできる。以上の距離検出原理は、非等方性放射の光源を使用した場合でも同様に成り立つ。

このとき、(3.2)式、(3.4)式より、 $I_+(t_s, d)$ と $I_-(t_s, d)$ の比 r は、

$$r = \frac{\left(t_s - \frac{2d}{v} \right)}{\frac{T}{2} - \left(t_s - \frac{2d}{v} \right)} \quad (3.5)$$

となる。(3.5)式より距離 d は、

$$d = \frac{1}{2} v \left\{ t_s - \frac{T}{2} \left(\frac{r}{1+r} \right) \right\} \quad (3.6)$$

で与えられる。

つまり、増加変調光時と減少変調光時の画像輝度比 r をとることで、反射率や照射光量のむら等の影響が補正され、被写体までの距離が求められる。本方式では、直線的に変化する変調光だけでなく、非直線的な変調光でも、得られた距離検出結果に、その特性の逆補正をすることで距離を算出できる。

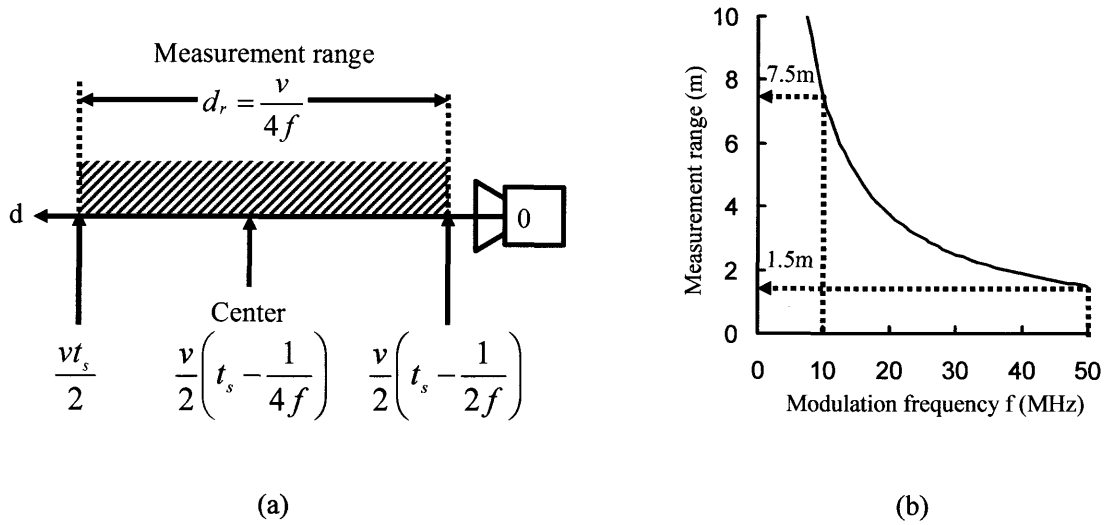


図 3.6 本方式の測定レンジ (a) カメラ位置と測定レンジの関係 (b) 光の変調周波数と測定レンジの関係

本方式による距離の検出範囲は、撮像タイミング t_s と変調周波数 f で決まり、

$$\frac{v}{2}\left(t_s - \frac{1}{2f}\right) \leq d \leq \frac{vt_s}{2} \quad (3.7)$$

である(図 3.6(a))。実際の運用時には、撮像タイミング t_s を調整し、被写体の位置に検出範囲を合わせる。また、測定レンジ d_r は、変調周波数 f で決まり、

$$d_r = \frac{v}{4f} \quad (3.8)$$

となる。

図 3.6(b)に強度変調周波数と測定レンジの関係を示す。強度変調周期が 10 MHz の場合測定レンジは 7.5 m、また 50 MHz の場合、測定レンジは 1.5 m である。撮影する被写体の奥行き距離に応じて、強度変調周期を最適に設定する。

本提案方式の特徴は、レーザービームの 2 次元走査機構や煩雑な演算処理が不要であるため、テレビ画像の画素毎に被写体の距離を高速に検出できることである。また通常のカラー画像撮影と同様に被写体の結像画像より距離画像が求められるため、カラー画像と同時に同じサイズの距離画像の撮影も可能である。

3.3 原理検証実験

3.3.1 レーザー光源を用いた実験系

本節では、レーザー光源と高速シャッター撮像部より実験系を作製し、提案方式の原理検証を行う。本方式では、数 ns の短時間シャッター機能が必要であるが、機械的シャッターや通常の電子シャッターでは、この高速動作は実現できない。そこで、高速シャッター撮像部をイメージインテンシファイア(I.I.: Image intensifier)と CCD カメラを組み合わせた撮像システムで実現することを提案する。

I.I.は、高感度撮像管として、長年、開発が進められ[4]、近年では、ハイビジョン用高感度撮像カメラや天体撮影、緊急報道用カメラ[5]、医療用カメラなどとして実用化されている。I.I.の構造と高速シャッター動作原理を図 3.7 に示す。I.I.は、光電変換面とマイクロチャンネルプレート(MCP : Micro channel plate)、蛍光面の 3 層から構成される。

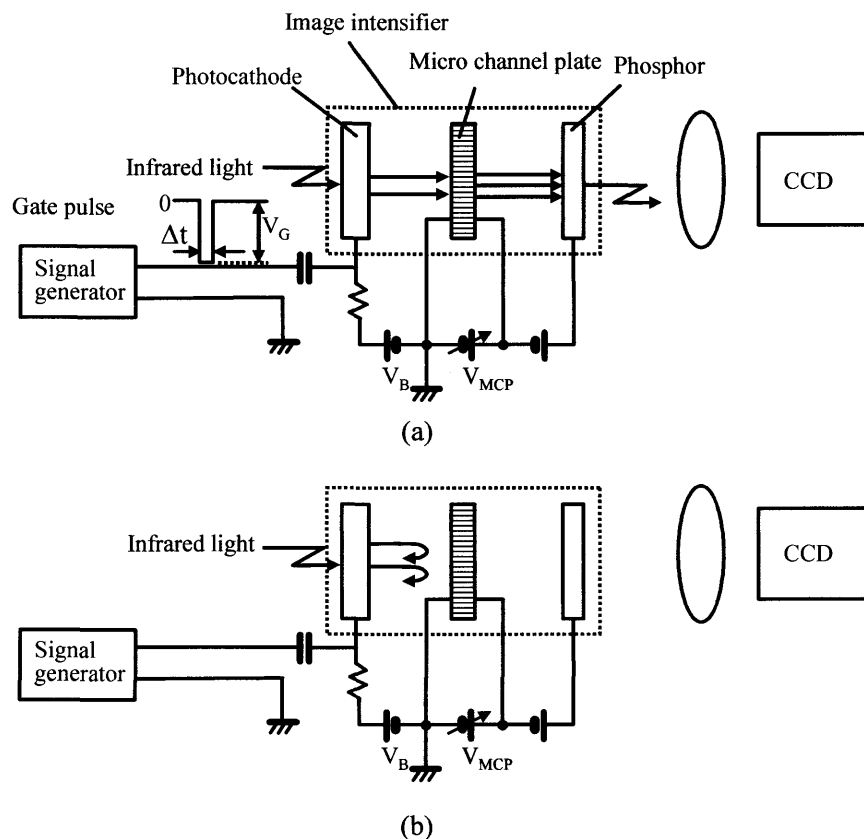


図 3.7 イメージインテンシファイアの構成と高速シャッターの動作原理
(a) ON 状態 (b) OFF 状態

MCP は微細なガラス管を多数束ねた構造を持ち、各チャンネルが独立した 2 次電子増倍器を構成している。光電変換面より MCP に入射した電子は、チャンネル壁に衝突し 2 次電子が放出され、MCP の両端の印加電圧により加速され、再び壁に衝突する。これを繰り返すことで出力側より多数の電子が放出される。このように電子は MCP で増倍後、蛍光面で再び光に変換され、リレーレンズで CCD カメラへ入力される。

光電変換面に負のバイアス電圧を印加した場合(図 3.7(a))、光電変換面からの光電子は、MCP へ到達し、増倍後、蛍光面から光出力され、シャッター ON 状態となる。また、バイアス印加電圧が無い場合(図 3.7(b))、光電変換面からの光電子は、MCP へ到達せず、シャッター OFF 状態となる。このバイアス電圧のパルス幅を制御することで、数 ns の高速シャッター動作が可能となる。このバイアス電圧は 20~80 V であり、駆動回路には高周波領域のアンプ特性が必要であり、撮像素子の耐久性も確保しなければならない。

この I.I.と CCD による高速シャッター撮像部とレーザーダイオードを光源部とした実験系を試作した。その構成図と仕様を図 3.8 および表 3.1 にそれぞれ示す。レーザーダイオード出力光を外部信号で変調し、出力光束の広がりレンズで調整して被写体全体に照射した。被写体からの反射光は、バンドパスフィルターを通過し、レンズで I.I.の光電変換面上に結像する。

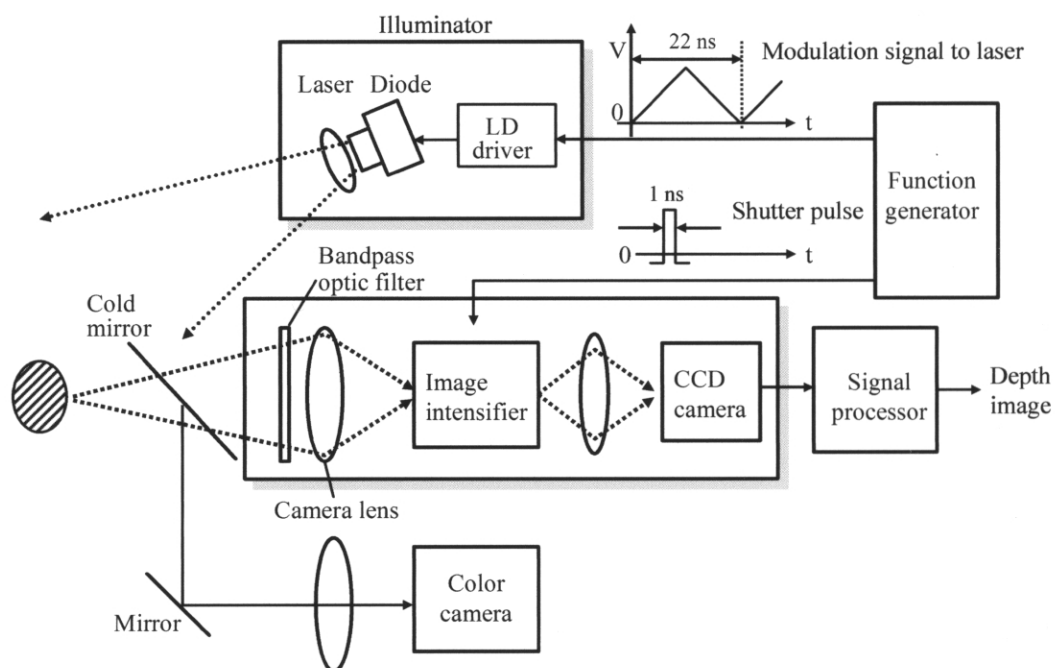


図 3.8 高速シャッター撮像部とレーザー光源による原理検証実験系

表 3.1 実験系の仕様

Light source (Laser diode)	Wavelength	830	nm
	Average power	10	mW
	Illumination intensity	4	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
	Modulation frequency	45	MHz
Image intensifier	Gate time	1	ns
	Repetition rate	45	MHz
CCD camera	Number of pixels	768(H)×493(V)	
	Center wavelength of output light	2/3	inch
Camera lens	<i>F</i> number	1.2	
	Focal length	55	mm

第 5.4.5 節で詳述するように、I.I.のシャッタータイミングと光源の変調タイミングを同期させ、1 ビデオフレーム間で約 149 万回繰り返し撮像を行い、I.I.の蛍光面上の出力像を CCD で蓄積することで、撮影映像の SN 比を向上している。なお、このシステムでは、ビデオフレーム毎に光源の変調信号の位相を 180° シフトし、増加変調光と減少変調光を交互に被写体に照射し、CCD カメラの出力信号を 1 ビデオフレーム毎に分割してメモリし、信号処理回路により(3.6)式の距離演算を行っている。

3.3.2 基本特性の評価

(1) 距離検出分解能

測定レンジ中心をカメラより 2.5 m の距離に設定し、10 cm おきに平坦な白紙の被写体を移動させ、距離画像信号レベルを測定した。その結果、図 3.9 に示すように、被写体の位置に応じた出力信号が得られ、距離が検出できている。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 Δd を検出分解能として求めた。その結果、被写体が測定レンジ中心の距離 2.5 m の位置で、検出分解能は 3 cm であった。この分解能を左右するノイズの要因は、I.I.のショットノイズであり、MCP の増倍率を増すにつれ SN 比は低下する。本実験では、測定レンジ中心の照射光強度は $4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であるが、この照射光量の増加により I.I.の増倍率を低下できれば、ノイズ成分は低減できる。本測定では、距離測定レンジ中心をカメラより 2.5 m の位置に設定したが、変調光の位相調整により測定範囲を可変でき、測定レンジの幅も変調周波数を低下することで拡大できる。