

第 5 章

ハイビジョン Axi-Vision カメラの設計・試作

5.1 はじめに

これまで、3 次元カメラの実現に向け、距離検出方式を提案し[1]、原理検証と距離検出特性の解析、及び要素技術の開発に取り組んだ。その結果、画素数 768 (H) × 493 (V) の距離画像をフレームレート 15 Hz で検出できる標準テレビ信号対応の Axi-Vision カメラを開発した[2]。

しかしながら、現在、ハイビジョン放送の実用化により、一般家庭へ高精細かつ高画質な映像が急速に普及しつつあり、テレビ制作現場においてもデジタルハイビジョン機材が整備され、映像制作の主流はハイビジョン規格となりつつある。そのため、Axi-Vision カメラを映像コンテンツ制作分野へ実用化するには、ハイビジョンクラスへの高精細化が必要である。

ハイビジョン化の課題は、撮像素子 1 画素の微細化に伴い受光信号量が減少し、距離検出 S/N 比の低下により、検出分解能の低下を招くことである。同様に、ビデオフレームレートまで高速化する場合も、撮像蓄積時間の短縮とともに距離検出分解能が低下する課題がある。

そこで本章では、これら高精細化と高速化による性能低下の課題を解決し、カメラのハイビジョン化を実現することを目的とする。まず、前章の距離検出特性の解析結果より、ハイビジョン対応の高精細化とビデオフレームレート検出を可能とするカメラの設計指針を導く。それをもとに、撮像感度の改善などの距離検出分解能向上を目指した要素技術の開発を行い、ハイビジョン対応の Axi-Vision カメラを試作する。

5.2 設計指針

高精細化と高速化による距離検出分解能の低下を防ぐために、カメラパラメーター

の改善を検討する。第 4 章(4.13)式で得られた距離検出 SN 比を主なカメラパラメータのみで表すと、

$$SNR \propto \frac{\sqrt{\eta a \tau T_L P}}{d} \quad (5.1)$$

となる。ここで、 η は I.I.光電変換面の量子効率、 a は 1 画素当りの受光面積、 τ は撮像蓄積時間、 T_L は光学系の透過率、 P は照射光強度、 d はカメラと被写体間の距離である。

ハイビジョンカメラの場合、一般的に 1 画素当りの受光面積 a は標準テレビ信号のカメラの 1/5 以下となる。さらに、前章で試作した標準テレビ用 Axi-Vision カメラでは、距離画像の更新速度は 15Hz であったが、ビデオフレームレート(30Hz もしくは 60Hz)とするには撮像蓄積時間 τ がさらに 1/2 もしくは 1/4 となる。これらハイビジョン化により距離検出 SN 比は $\sqrt{1/10} \sim \sqrt{1/20}$ 倍に低下すると予想される。これらの低下を補うには、(5.1)式からわかるように、I.I.の量子効率 η 、LED 光源出力 P 、光学透過率 T_L 等の特性を向上しなければならない。

まず I.I.の量子効率の向上の可能性に関して検討する。前章までの検証実験に使用してきた I.I.は、耐久性の高いマルチアルカリ (Sb-Na-K-Cs)の光電変換面であったが、LED の出力光波長 850 nm における量子効率は 1.5%と低い。そこで、近赤外光に高感度な光電変換材料で I.I.を構成することで、1桁近い高感度化が期待できる。しかしながら、本カメラの I.I.には、数ナノ秒の高速シャッター動作を最大 50 MHz で高速に繰り返す特殊機能が必要であり、新たな光電変換材料を導入した場合、耐久性や安定動作を実現するために新たな要素技術の開発が必要となる。

一方、照射光量や受光量の増加については、LED アレーのユニット数の増加や光学系による光ロスの低減により高輝度化の可能性がある。ただし、多数の LED アレーユニットをカメラレンズ周辺に多数近接配置するためには、コンパクトなカメラ光学系の開発が必要である。また、光学系の光ロス、カメラレンズの近赤外光に対する透過率特性の改善や、光学系の構成を簡素化することで約半減できると予想される。

以下の節では、初めに、試作したハイビジョン Axi-Vision カメラの基本構成を説明し、その後、ハイビジョン化に伴う距離検出 SN 比の低下を補正するための各構成要素技術である I.I.の量子効率 η の向上、LED 光源出力 P の高出力化、光学透過率 T_L の向上などの詳細を述べる。

5.3 基本構成

ハイビジョン Axi-Vision カメラの基本構成図および外観写真を、図 5.1 および図 5.2 にそれぞれ示す[3]。本カメラシステムは、近赤外 LED アレー照射装置とその反射光を短時間撮像する機能を持つ距離検出部、およびカラーカメラが一体化した構成となっている。カメラレンズ周囲には 4 ユニットの LED アレー照射装置を配置し、近赤外の強度変調光を被写体へ照射する。被写体は、近赤外成分を含まない蛍光灯照明でも照明されている。カメラ光学系は、ズームレンズの後に、近赤外と可視光を分割結像する構成となっている。この光学系では、カメラへの反射光の可視光成分は、カメラレンズの後方に配置されたダイクロイックプリズムを透過し、レンズを介してカラーカメラへ結像される。一方、LED アレー照射装置からの近赤外光成分は、ダイクロイックプリズムで反射され、距離検出部へ入力される。距離検出部では、高速シャッター機能を持つ I.I.により短時間撮像を行い、出力の光画像をレンズで CCD カメラへ入力する。この I.I.は、外部のシャッタートリガ信号により LED アレー照射装置とともに同期駆動され、CCD カメラで増加変調光照射時と減少変調光照射時の画像が交互に撮像される。CCD 出力映像信号はハイビジョン信号処理装置に入力され、第 3 章(3.6)式で表される距離算出演算を行い、距離画像がハイビジョンデジタル信号 (HD-SDI) として出力される。

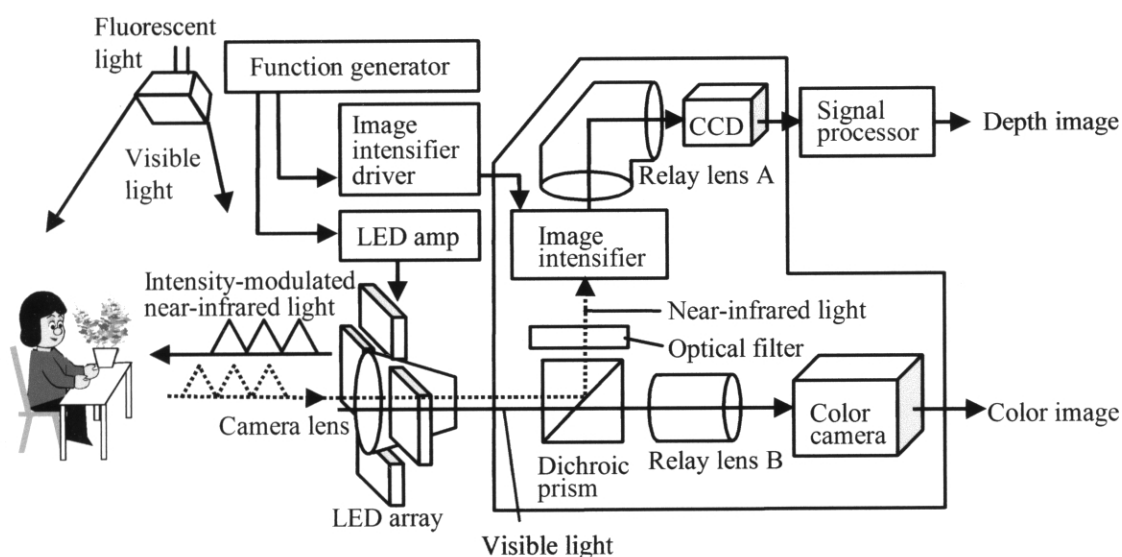


図 5.1 ハイビジョン Axi-Vision カメラの構成

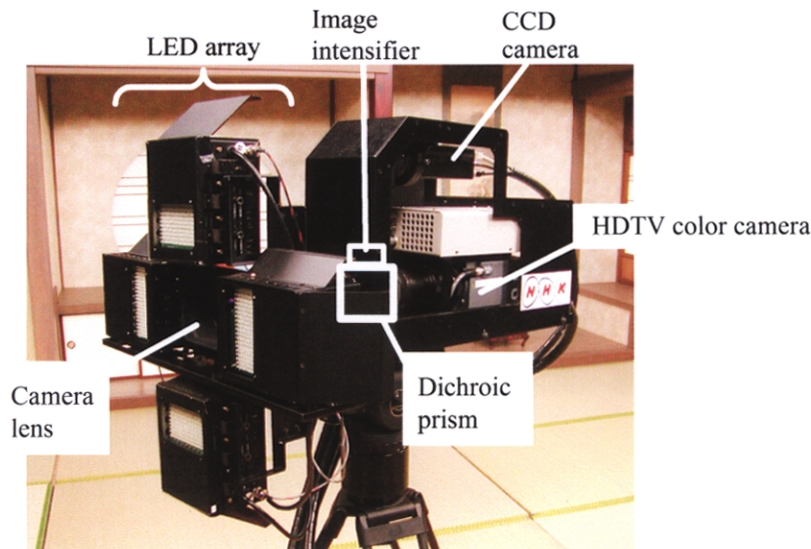


図 5.2 ハイビジョン Axi-Vision カメラの外観

5.4 要素技術の開発

5.4.1 イメージンテンシファイアの高性能化

第 3.3.1 節で詳述したように、I.I.は光電変換面と MCP、蛍光面から構成され、光電変換面と MCP 間に印加するパルス電圧の幅に応じてナノ秒オーダーの短時間シャッター動作が可能である。ここでは、高精細化に伴う SN 比の低下を抑えるために、I.I.の量子効率を改善する。

前章までの実験では、安定性と耐久性にすぐれたマルチアルカリ (Sb-Na-K-Cs) の光電変換面を使用してきたが、マルチアルカリ光電変換面は波長 850 nm に対しては 1.5 %と量子効率が低い課題があった。そこで、LED の中心発光波長 850 nm 近辺において高い量子効率を有する半導体結晶のガリウム砒素 (GaAs) 材料を光電変換面とした I.I.を開発した。GaAs 膜を光電変換面とした I.I.は第 3 世代 I.I.として、これまで近赤外領域に高感度な撮像管として開発実績がある[4]。しかし、光電変換膜が半導体結晶であることから、安定性や均一性、イオンフィードバックによる劣化が大きいなどの課題があった。I.I.の製造工程上、完全な真空を作り出すことが困難なため、内部の残留ガスに電子が衝突することで陽イオンが発生し、それが光電変換面にフィードバックしてダメージを与えることで、感度の低下や焼付きが生じる。そのため、従来技術では、光電変換面と MCP 間に保護膜を設けてこのイオンフィードバックを防いでいた。しかし、この保護膜により、光電変換面から MCP への光電子到達が阻害され

感度が犠牲になるとともに、約 800V の高電圧駆動が必要であり、Axi-Vision カメラに必要な数ナノ秒の短時間シャッター動作を数十 MHz で高速に繰返すのは困難であった。

そこで、光電変換面の長寿命化と低電圧化を目指し、製造工程の真空度の向上により残留ガス抜きを行い、イオン発生を最大限に抑えるとともに、MCP を 2 段構成とすることで光電変換面へのイオンフィードバックを低減した。これにより、保護膜をなくすことに成功し、感度低下の半減時間を 500 時間以上確保するとともに、駆動電圧を 1/10 以下とし、GaAs 光電変換面を用いた高感度な I.I.において、本カメラに必要な特殊機能を実現できた。図 5.3 は、光電変換面の分光感度特性であり、マルチアルカリ光電変換面材料と比べて GaAs 光電変換面は近赤外域で約 8 倍の量子効率を得られている。

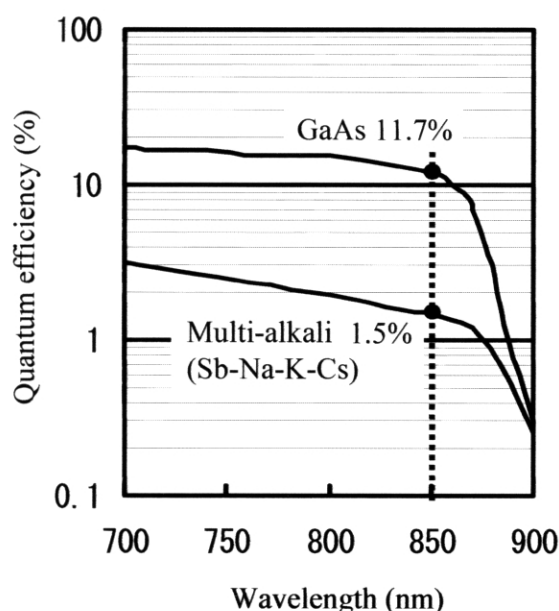


図 5.3 光電変換面の分光感度特性

またこの I.I.では、2 段構成の MCP により信号光の十分な増倍率を確保し、蛍光面の出力像を撮影する CCD カメラの感度不足を防いでいる。さらに、高精細画像撮影のため、MCP のチャンネル直径を 6 μm に微細化するとともに、光電変換面と MCP、および MCP と蛍光面間の距離を近接させ、解像度を 51 lp (ラインペア数)/mm に高精細化した。ハイビジョン用に開発した I.I.の仕様を表 5.1 に示す。

表 5.1 GaAs 光電変換面を持つイメージインテンシファイアの仕様

Gate time		1 to 10	ns
Repetition rate		10 to 50	MHz
Resolution		51	lp/mm
GaAs			
Photocathode	Quantum efficiency (at 850nm)	11.7	%
	Effective area	17.5	mm Φ
Double layer			
Micro channel plate	Thickness	0.3	μm
	Diameter of microchannel	6	μm
Phosphor	Material	P-43	
	Center wavelength of output light	545	nm

5.4.2 光学系の開発

(1) 分光特性

前章で試作した標準テレビ信号用 Axi-Vision カメラの光学系では、カラー画像と距離画像を同時撮影するためには、可視光／近赤外光の色分離光学系であるダイクロイックミラーをカメラレンズ前面に配置し、LED アレー照射装置をその後方部に設置しなければならなかった[2]。このため、装置が大型となり、LED 出力光の損失を生じるとともに、カラー画像と距離画像のズーム機能の連動もできなかった。そこで、図 5.4 に示すように、カメラレンズとカラーカメラの間に小型のダイクロイックプリズムを配置する光学系をハイビジョンカメラ用に開発することで、この課題を解決した。

光学系の設計においては、LED の近赤外波長領域の光を効率よく I.I.へ入力し、なおかつ可視光の混入が無いように考慮した。図 5.5 には、赤色の実線で LED の出力光を示し、青色の実線で蛍光灯照明カラー画像撮影用の照明としては、720 nm 以上の長波長成分が少ない蛍光灯照明光(OSRAM 社製 DULUX 42 W、5000k)の分光特性を示している。また青色および赤色の破線でカラーカメラ側および距離検出側への像入力光学系の波長透過率特性をそれぞれ示している。カメラレンズ後方のダイクロイックプリズムは、400 nm～680 nm の可視光領域において平均透過率を 97%以上とし、平坦な透過率特性とすることでカラー画像の輝度や色バランスに影響を与えない設計とした。また、ダイクロイックプリズムおよび光学フィルターによる近赤外光(波長 850 nm)の

距離検出側への反射率を 90% とし、高い光利用効率を確保した。これは標準テレビ信号用 Axi-Vision カメラ[2]の 1.5 倍に相当する。さらに、I.I.への近赤外光(850 nm)と可視光(5.32 nm)の透過率の比を $10^5:1$ 以上とし、可視光の距離検出側への漏れを防いだ。

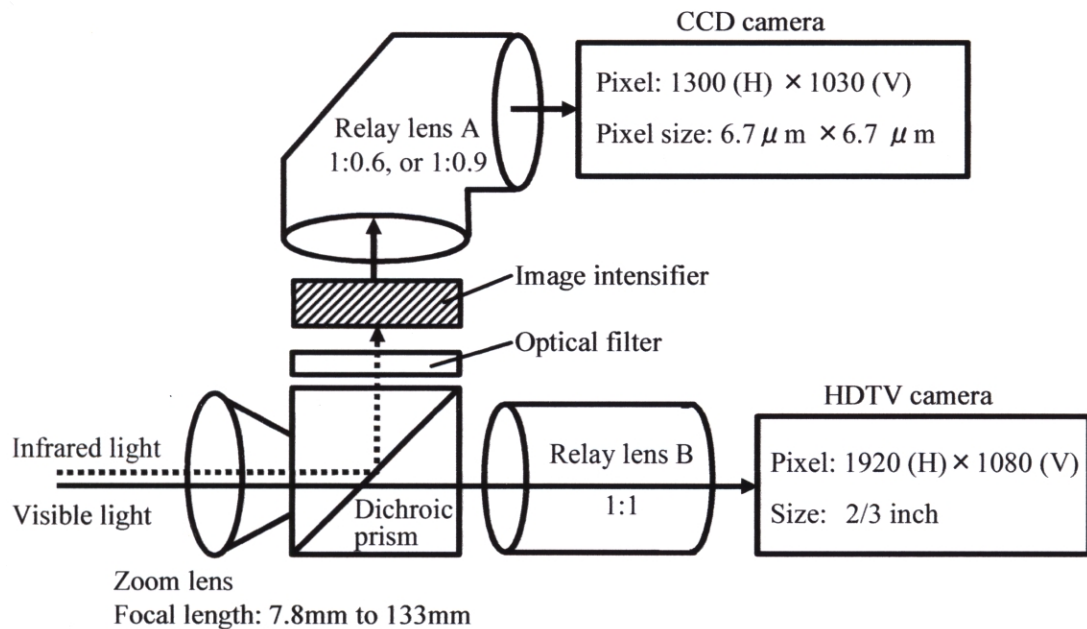


図 5.4 光学系の構成

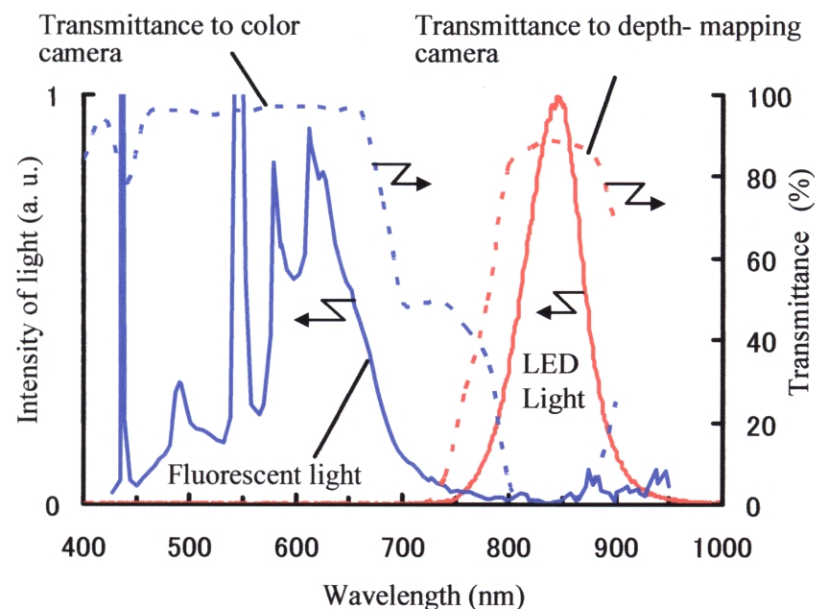


図 5.5 可視照明光(蛍光灯照明光)と LED アレー出力光の分光特性とカラーカメラおよび距離検出部への光透過率特性

(2) リレーレンズ

I.I.の出力画像は、図 5.4 のリレーレンズ A で CCD カメラへ結像した。I.I.と CCD のカップリングには、他にファイバプレートによる方法があり、システムの小型化や光利用効率に有利な反面、空間分解能の低下や固定パターンノイズの発生などの課題がある。そのため、ここでは、I.I.と CCD の光学結像に専用のリレーレンズを開発することで、固定パターンノイズの少ない画像を得た。また、I.I.の蛍光面の窓材を光学研磨ガラスとし、窓材の板厚および材質もレンズ設計に反映させることで画面全体にわたって高解像度を実現した。このリレーレンズは、コンパクト化のために 90 度反射型の構造とした。

リレーレンズ A には結像倍率 0.9 倍と 0.6 倍の 2 種類を作製し、CCD の有効画素 (1280 (H) × 720 (V)、もしくは 853 (H) × 480 (V)) の設定に応じて入れ換えて使用する。また、リレーレンズにより I.I.の蛍光面出力画像を CCD へ縮小結像することで、I.I.の有効面積を広くできるため、入力画像の SN 比や解像度に有利な結像系となっている。また、リレーレンズの蛍光発光波長 545 nm に対する透過率は 85%以上、CCD 側の実効 F 値は 1.8 とし、リレーレンズ内部には焦点距離および倍率の微調整機構も設置した。

カメラレンズの後に、ダイクロイックプリズムを配置する都合上、ハイビジョンカメラへの像入力用にも、図 5.4 に示すようにリレーレンズ B を作製した。レンズは 5 群 12 枚構成とし、使用するカメラズームレンズ (ズーム倍率 17 倍、焦点距離 7.8~133 mm、最大開口効率 1:1.8、850 nm の透過率 92%) に対して解像度特性や色収差などのハイビジョン映像の品質を保証する設計とした。またリレーレンズ B には、フォーカスとアイリス調整機構を設け、カメラレンズ部のアイリスは開放とし、多くの近赤外光量を距離検出側へ入力すると同時に、カラー映像の明るさ調整はリレーレンズ B のアイリスで単独に調整できるように工夫した。

5.4.3 照射光の高輝度化

図 5.5 で示したように LED の出力光波長は、カラー画像撮影用の可視光領域(400 ~ 700 nm)と光学的に分離できるように、中心波長 850 nm、半値幅 50 nm の近赤外光としている。LED アレー照射装置には、最大 50 MHz の高速変調周波数特性を持つ近赤外 LED 素子を 20 個×10 個のアレー状に配置し、照射光の影の発生を抑えるためカメラレンズの上下左右に各ユニットを 1 台ずつ設置した(図 5.6(a))。光学系のコンパクト

化により、LED アレーを 4 ユニットに増設でき、出力光パワーを前章の標準テレビ用試作カメラの 2 倍の 1W にできた。図 5.6(b) に LED アレー光源の照射光強度の空間分布を示す。カメラから 3 m の距離において、横 2 m × 縦 2 m の範囲内を、縦横それぞれ 0.25 m おきに光パワーメーター(アドバンテスト社製 TQ8210、センサー部 TQ821017)で照射光強度を測定した。照射範囲の中心と周辺の照射光強度比は 2:1 以下の均一性を確保し、中心の放射照度は $38.9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ を実現している。LED アレー照射装置の仕様を表 5.2 に示す。

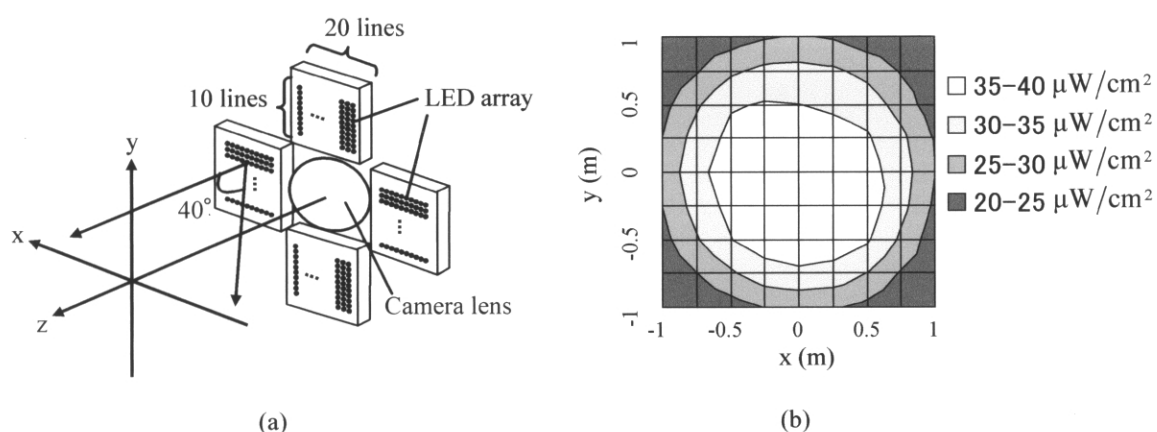


図 5.6 LED アレーユニット (a) アレー配置 (b) カメラより 3m 離れた位置の照射光強度分布

表 5.2 LED アレー照射装置の仕様

Wavelength	850	nm
Width of wavelength spectrum	50	nm
Average light power	1	W
Illumination intensity (at 3m distance)	38.9	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Diameter of effective illumination (at 3m distance)	2	m Φ
Beam width	$\pm 20^\circ$	
Modulation frequency	10~50	MHz
Number of LED elements	20(H) \times 10(V) \times 4 units	
Uniformity of illumination (Ratio of maximum intensity to minimum intensity)	2:1	

5.4.4 SN 比の改善効果

従来の標準テレビ信号 Axi-Vision カメラ[2]とハイビジョン Axi-Vision カメラの距離検出 SN 比に関する各パラメータの比較を表 5.3 に示す。(5.1)式で表される距離画像の総合的な SN 比は 5 倍以上に改善された。これにより、従来の距離分解能の性能で、画像の高精細化とフレームレートを従来の 2 倍(29.97 Hz)もしくは 4 倍(59.94 Hz)に向上できるとともに、検出距離可能な範囲の拡張も可能となった。

表 5.3 標準テレビ信号 Axi-Vision カメラとハイビジョン Axi-Vision カメラのパラメータ比較

Camera parameter	NTSC camera	HDTV camera
Quantum efficiency : η [%]	1.5	11.7
Output intensity of LED array illuminator : P [W]	0.5	1
Transmittance of optics : T_L [%]	16	35
Signal to noise ratio : $SNR \propto \frac{\sqrt{\eta\alpha\tau T_L P}}{d}$	$0.035 \frac{\sqrt{\alpha\tau}}{d}$	$0.202 \frac{\sqrt{\alpha\tau}}{d}$

5.4.5 ハイビジョン距離演算処理システム

図 5.7 に Axi-Vision カメラシステムの制御信号と映像信号の流れを示す。信号発生器より、LED アレー光源の変調信号と I.I.のシャッタートリガ信号を出力する。光源への変調信号路は 2 系統あり、変調の半周期に相当する遅延を加えた経路を用意している。スイッチ 1 の A と B をビデオフレーム毎に交互に切替え、増加変調光と減少変調光を被写体に交互に照射する。また、I.I.は、信号発生器からの信号に同期してシャッター動作し、CCD で撮影された映像信号は、スイッチ 2 の切替えによりビデオフレーム毎に各メモリ I_+ 、 I_- に記録される。

図 5.8 に、距離演算処理のタイミングチャートを示す。図の上部には、強度変調光とシャッター開放のタイミングを示し、下部には、各メモリへの画像の入出力と距離画像算出のタイミングを示している。強度変調光は 20～100 ns の周期を持ち、それに同期して 1～10 ns の短時間シャッター動作を行う。シャッター開放時間が短いにも拘

わらず、高精細かつ高 SN 比の出力画像が必要であるため、その解決策として、1 ビデオフレーム間(1/60 秒間)に I.I.のシャッター動作を高速に繰り返し、CCD の蓄積効果により SN 比を向上している。例えば繰り返し周波数が 45MHz の場合、1 フィールド間の撮影回数は 75 万回となり、大幅な SN 比の向上が可能となる。

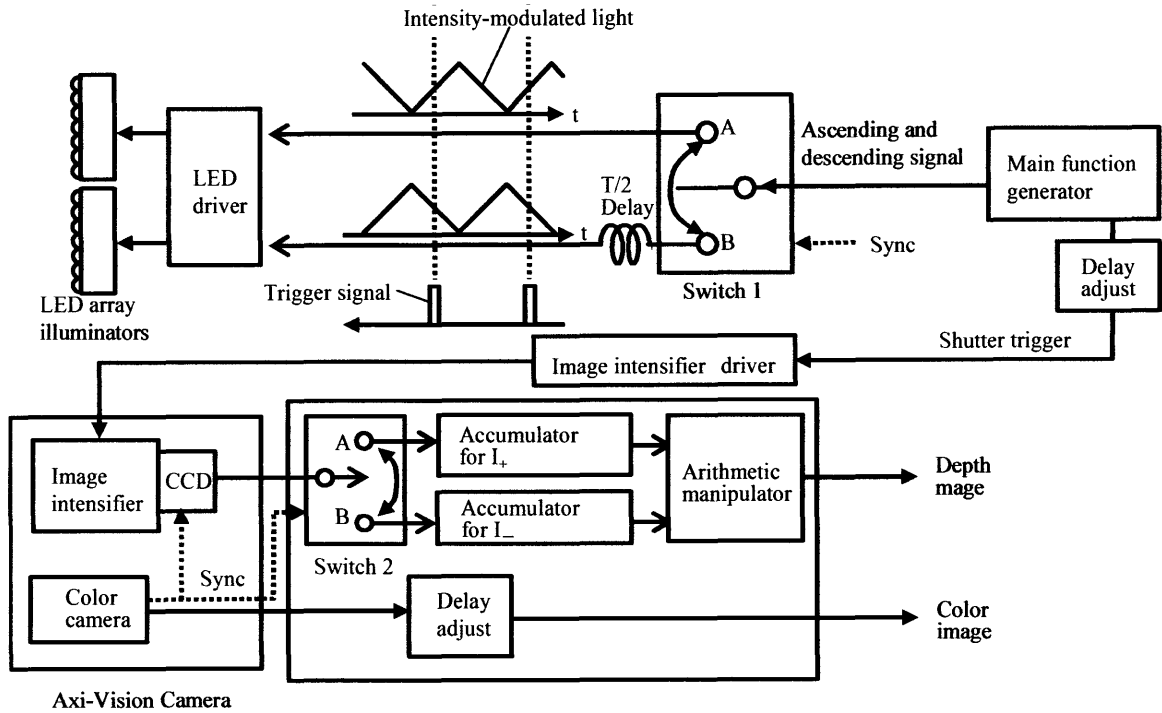


図 5.7 Axi-Vision カメラの信号の流れ

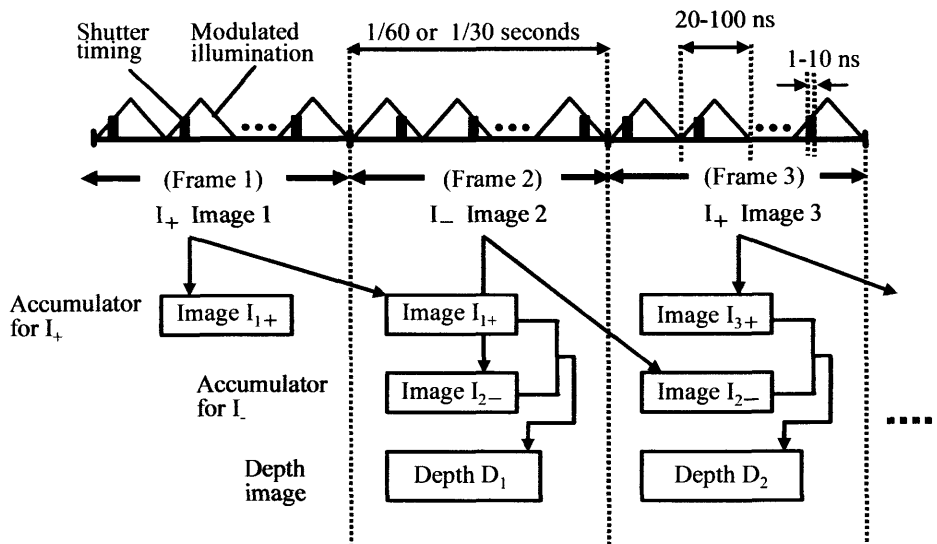


図 5.8 距離演算処理のタイミングチャート

演算処理装置では、増加変調光時の撮影画像 $I_+(x,y)$ と減少変調光時の撮影画像 $I_-(x,y)$ より距離画像 $d(x,y)$ が以下の式で演算される。

$$d(x,y) = \frac{1}{2} \left[1 - k \frac{I_-(x,y) - I_+(x,y)}{I_-(x,y) + I_+(x,y)} \right] \quad (5.2)$$

ここで、 k は定数である。この演算は、図 5.8 に示すように、第 1 ビデオフレームで増加変調光時の画像 I_{1+} が撮影され、次の第 2 ビデオフレームでは減少変調光時の画像 I_{2-} が撮影され、これら 2 つの画像より距離画像 D_1 が演算出力される。次の第 3 ビデオフレームでは、メモリ I_{1+} を新たに画像 I_{3+} に書き換え、画像 I_{3+} と画像 I_{2-} の間で演算を行い、距離画像 D_2 を演算出力する。このように、ビデオフレーム毎に増加変調光時と減少変調光時の画像を交互に撮影し、前後の画像間で順次、距離画像を算出することで、ビデオフレームレートでの高速演算出力を可能としている。出力距離信号は 10 ビットのハイビジョンデジタル信号で、出力距離画像信号の SN 比は 44.2 dB (カメラと被写体間の距離 2 m の場合) である。距離算出の信号処理には FPGA (Field Programmable Gate Arrays) を使い、(5.2) 式の係数 k を外部制御することで、距離画像のコントラストを調整できる。また、CCD (インターライン型 CCD、池上通信機社製、SKC-133、画素数 1300(H) × 1030(V)) の有効画素領域を電氣的に調整することで、カラーカメラと距離検出カメラとの撮影画像の高精度な画角調整を可能としている。

5.5 性能評価

5.5.1 出力特性

白紙を被写体とし、カメラからの距離を変化させ、距離画像信号の出力レベルを測定した。このときの照射光の変調周波数は 15 MHz とし、測定レンジ中心をカメラから 6 m の距離に設定した。シャッター時間幅の設定は、変調周期に対し短時間であると検出信号量が少なくなり撮像画像の SN 比が低下し、また逆に長時間であると有効な測定レンジが狭くなる傾向にある。そのためここでは、シャッターの時間幅は、強度変調周期の約 10 分の 1 に相当する 5 ns (半値幅) とした (シャッター時間幅の最適化については、第 5.5.4 節を参照)。測定の結果、図 5.9 に示すように、カメラから被写体までの距離とともに、出力映像信号レベルが変化し、被写体の距離検出が可能であった。

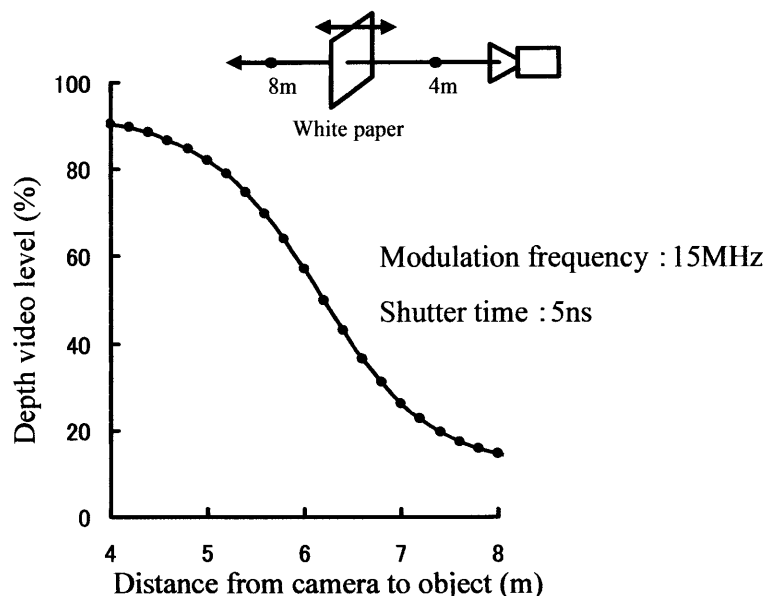


図 5.9 被写体の距離と出力距離信号の映像レベル

カメラから 6 m の距離付近の測定レンジ中心では、比較的直線的な特性を有しているが、測定範囲の周辺部では曲線となっている。これは LED 光源の光変調特性が直線からずれている影響であり、出力映像信号のガンマ補正によりリニアな特性に補正できる(第 4.4 節参照)。また、測定レンジは 15 MHz で約 4 m であり、変調周波数を 45MHz とすることで、測定レンジは約 1.6 m となり、相対的に検出分解能を高めることができる。

5.5.2 被写体の距離と距離検出分解能

距離画像のノイズ成分より、距離検出分解能を評価した。カメラの最大距離検出分解能を測定するために強度変調光の周波数を 45 MHz と高く設定し、シャッター時間幅も変調周期の約 10 分の 1 の 2 ns とした。測定レンジ中心に位置する被写体を撮像し、距離画像のノイズ成分の実効値 δ を測定し、その 3δ に相当する距離値を検出分解能とした。また、被写体の距離と検出分解能の関係を調べるため、測定レンジ中心位置をカメラから 1~10 m の距離まで変化させ、検出分解能を測定した(図 5.10)。測定レンジの中心位置は、第 3 章の図 3.6 に示されるようにシャッタータイミング t_s に比例するため、 t_s を調整して変化させた。

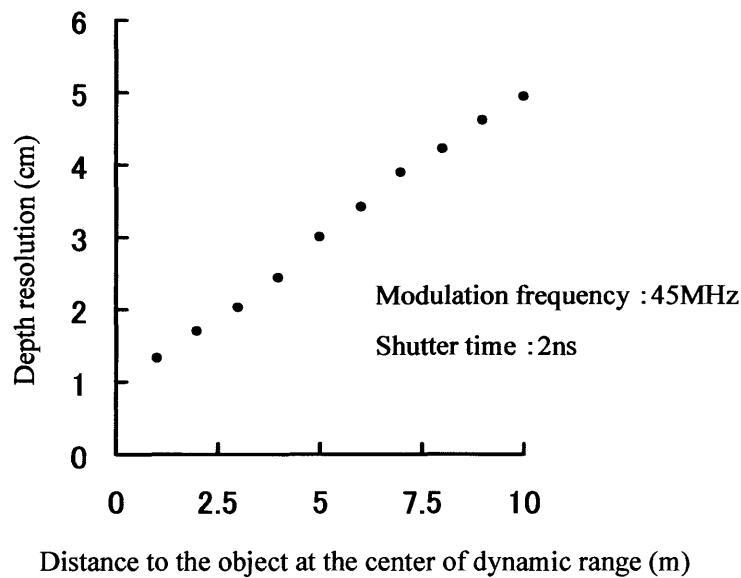


図 5.10 カメラから測定レンジ中心位置までの距離と距離検出分解能の関係

被写体がカメラより 2 m の距離のとき、距離検出分解能は 1.7 cm であった。高精細化、高速検出化およびズーム対応の光学系としたにもかかわらず、標準テレビ信号 Axi-Vision カメラとほぼ同程度の距離検出分解能が得られた。距離検出分解能はカメラから被写体までの距離とともに低下し、10 m で検出分解能は 4.9 cm であった。これは、第 4 章(4.13)式の SN 比がカメラと被写体間の距離に反比例するためである。

距離情報をもとに人物と背景を分離する場合については、被写体間の距離差は数十 cm 以上ある場合が多いと考えられる。得られたカメラの距離検出分解能はこれより小さく、被写体までの距離がおおよそ 10 m 以内であれば、距離情報による画像の抽出や合成に有効な分解能が得られているといえる。

5.5.3 被写体の反射率と距離検出分解能

反射光量の異なる被写体を撮像し、距離検出分解能を測定した。被写体のカメラからの距離は 2 m、反射率は BaSO₄ 標準白色板の値を 1 で規格化した。測定結果を図 5.11 に示す。被写体の反射光量が低下するとともに、距離検出ノイズ成分が増加し距離検出分解能が低下している。その原因は CCD ノイズや I.I. のショットノイズの増加によるものである。このグラフで、人物の皮膚の反射率はおおよそ 0.4 近辺であり、また、黒髪は約 0.1 以下の反射率に対応する。0.1 の反射率の被写体撮影の場合、全ノイズ成分の 2/3 以上が I.I. ショットノイズであり、本カメラの距離検出分解能を左右する大きな要因となっている。

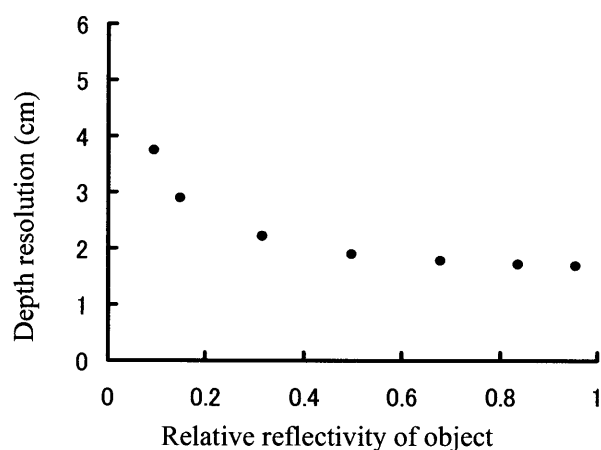


図 5.11 被写体の反射率と距離検出分解能の関係

5.5.4 最適撮影条件

シャッター時間幅と距離検出分解能の関係を調べた。はじめに、シャッター時間幅 Δt と光の変調周期 T の比率 $\Delta t/T$ に対する距離検出分解能 Δd を計算より求めた。計算には第 4.2 節の SN 比の(4.13)式を用いた。各カメラパラメーターに数値例(付録 C)を代入し、光の変調周期 T が 10 ns、20 ns、30 ns の場合について、測定レンジ中心位置の距離検出分解能を求めた。その結果を図 5.12 の破線で示す。比率 $\Delta t/T$ が 0.3~0.4 の近傍で距離検出分解能の最大値が得られた。

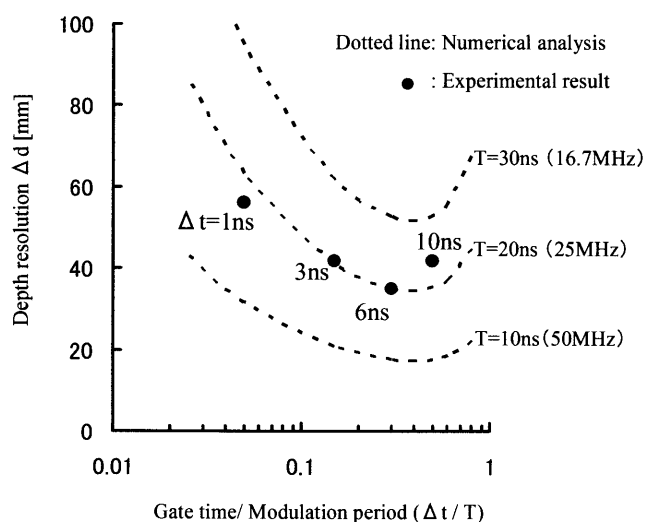


図 5.12 被写体の反射率と距離検出分解能の関係

次に、実験により、カメラから距離 3 m の被写体に対し、シャッター時間の半値幅 Δt を 1~10 ns、強度変調周期 T を 20 ns として距離検出分解能を測定した。その結果を図 5.12 の点で示す。 $\Delta t=6$ ns、 $\Delta t/T=0.3$ の場合もっとも高い分解能が得られ、計算値より最適なシャッター時間は多少短いものの、ほぼ同様の傾向が得られた。

この最適値が現れる理由は、シャッター撮像時間が短くなると、受光信号量が減少し、ノイズ成分比率の増加により距離検出分解能が低下するのに対し、シャッター撮影時間が長くなると、受光信号量は多くなる反面、次の周期の光が混入しやすくなり、有効な測定レンジが狭くなることで相対的に距離検出分解能が低下するためである。つまり、距離検出 SN 比のみに注目すると、シャッター撮像時間幅を狭くすることで SN 比は減少し、逆に広く設定すれば受光量が多くなり SN 比は増加する。ただし、シャッター撮影時間が光の変調周期と同程度に広くなると、注目している変調光以外の光も多く取込むことになり、有効な距離検出範囲が制限されることになる。

実験結果では、変調光の立上り立下り部分の非線形な変調特性の影響により、最適値がよりシャッター時間幅が短い方にシフトしている。これまでは、測定レンジ中心位置の被写体に対する分解能を評価したが、測定レンジ全体で高分解能な特性を保つには、 $\Delta t/T=0.1\sim0.2$ 近辺の値が適していると考えられる。このシャッター時間幅の最適条件は、シャッター波形や強度変調光の変調特性により変動すると予想されるが、高分解能な撮影条件設定ための有効な目安となる。



Color image



Depth image

図 5.13 カメラ出力画像 (a) 被写体のカラー画像 (b) 距離画像

本カメラによる撮影例を図 5.13 に示す。カメラから被写体までの距離は約 2 m、背後のセットまでは約 3 m である。約 1000 lx の蛍光灯照明下で撮影したが、距離検出に影響はなく、人肌や濃い茶色の服装など反射率が異なるにも拘わらず距離が検出できている。また一番手前の机や奥の背景セット部分など、カメラの測定レンジの端に

あたるため、測定レンジ中心ほどの明確な階調差は得られていない。距離画像の距離検出点数は、フレームレート 29.97 Hz 時に 1280 (H) × 720 (V)、もしくはフレームレート 59.94 Hz 時に 853 (H) × 480 (V)で、ハイビジョン 1080, 60i 信号に変換し出力している。フレームレートにより画素数が異なるのは、市販 CCD カメラの部分読み出しによる倍速駆動機能を流用しているためである。59.94 Hz のプログレッシブの高精細な単板カメラを使用すれば、距離検出の画素数の向上は可能である。

5.6 まとめ

Axi-Vision カメラの映像制作への実用化に向けて、残された課題であったハイビジョンクラスの高精細なカメラ開発に取り組んだ。距離検出 SN 比とカメラパラメータの関係をもとに、高速化と高精細化においても十分な SN 比が得られるカメラ設計を行い、各要素技術の開発に取り組み、ハイビジョン Axi-Vision カメラを開発した。この章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 検出分解能を左右する距離画像の SN 比は、画素の高精細化・高速化とともに低下する。分解能の低下を防ぎ良好な距離検出性能を得るためのカメラパラメータの検討を行った結果、I.I.の高効率化、光学系の透過率向上、照射光量の増加が有効な開発要素としてあげられた。
- (2) I.I.の高効率化に取り組み、GaAs を光電変換面とした素子を開発し、従来の約 8 倍の効率向上とハイビジョン映像に必要な空間解像度を実現した。また、光学系を開発し、近赤外光の透過率を従来の 1.5 倍とし、可視光と近赤外光の波長分離も高い消光比で行い、距離検出への外乱光の影響を防いだ。この光学系では、カラー画像と距離画像を同じ画角での撮影や、ズームレンズの使用が可能となった。また、光学系の大幅な小型化により LED アレー照射装置の多重配置を可能とし、従来の約 2 倍の明るさで被写体に光を照射できた。
- (3) ハイビジョン Axi-Vision カメラでは、カメラから 2 m の位置にある被写体に対し、距離検出分解能 1.7 cm を実現した。このカメラは、フレームレート 29.97 Hz 駆動時、1280 (H) × 720 (V) 画素の距離画像を、もしくはフレームレート 59.94 Hz 時、853 (H) × 480 (V) 画素の距離画像が検出可能で、標準テレビ信号カメラの約 3 倍以上の画素数と、2 倍以上の高速化を実現できた。

参考文献

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] E. Roaux, J. Richerd, and C. Piaget, “Third-Generation Image Intensifier,” *Advances in Electronics and Electron Physics*, vol. 64A, pp. 71-75, 1985.