

図 3.9 カメラから被写体までの距離と出力距離信号の映像レベルの関係

## (2) 撮影実験

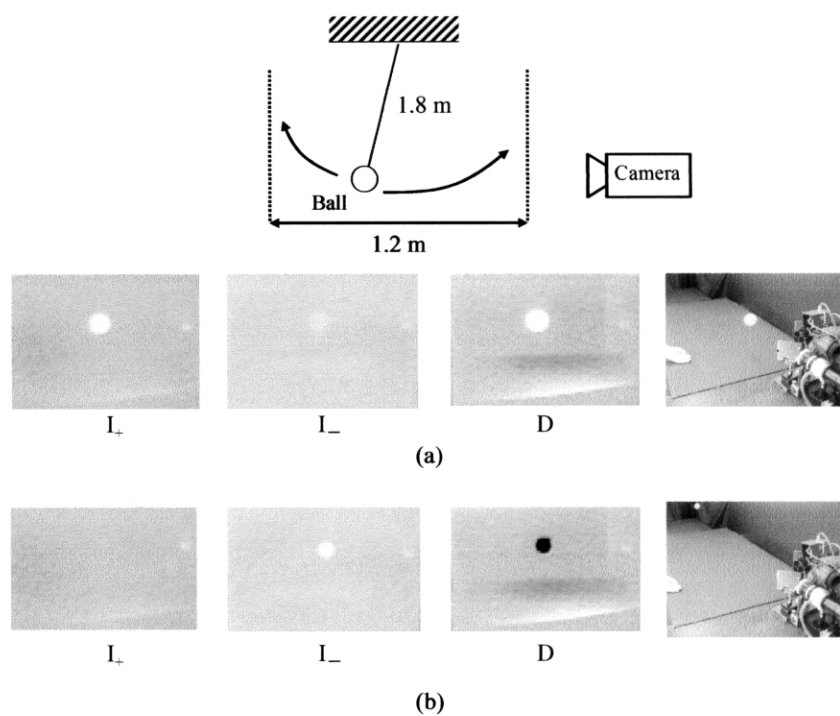


図 3.10 動く被写体(天井から糸で吊るされたテニスボール)の距離検出実験  
(a) ボールがカメラに近い場合と(b) 遠い場合の画像を示している。I<sub>+</sub>は増加変調光時の画像、I<sub>-</sub>は減少変調光時の画像、Dは距離画像、最も右はカメラによる被写体の撮影の様子

次に、動く被写体の距離検出実験を行った。図 3.10 に示すように、被写体には、天井より 1.8 m の糸で吊るされたテニスボールを使用し、前後に 1.2 m 幅で振子運動をさせ撮影した。図 3.10(a)および図 3.10(b)はそれぞれ、被写体がカメラに近い場合と、遠い場合に撮影された画像を示している。 $I_+$ は増加変調光時の画像、 $I_-$ は減少変調光時の画像、 $D$  は距離画像を示し、最も右側の画像は撮影の様子である。被写体がカメラに近い場合(図 3.10(a))、 $I_+$ の像が  $I_-$ より明るく、被写体が遠い場合(図 3.10(b))は、逆に  $I_-$ の像が  $I_+$ より暗くなっている。これらの画像より算出された距離画像  $D$  では、被写体の距離が画像の明暗として得られ、動く被写体の距離画像が検出できることが実証された。

図 3.11 は、被写体(犬のぬいぐるみ)をカメラから 2～3 m の距離範囲内を、2～3 秒で往復させたときの一連の被写体画像(図 3.11(b))と被写体の動きに追従して得られた距離画像(図 3.11(c))を示している。また、本実験では増加変調光と減少光時の画像をビデオフレーム時間(33ms)毎に交互に撮影し、距離画像を演算しているため、距離画像のフレームレートは 15Hz である。

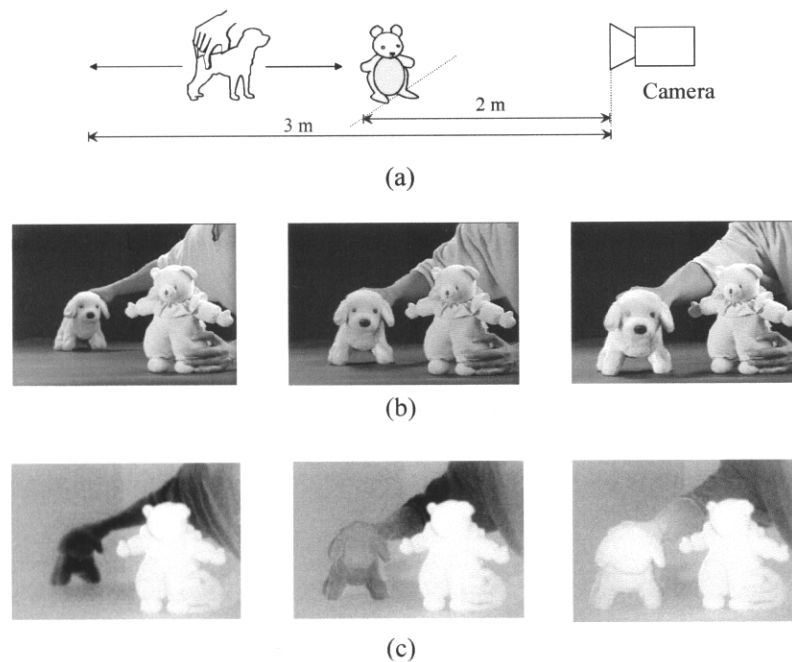


図 3.11 被写体の撮影実験 (a) 被写体とカメラ配置 (b) 被写体の画像 (c) 距離画像

この実験程度の速度で動く被写体では、距離検出の誤りは見られないが、被写体の動きがより速い場合、前後のビデオフレーム間で画像の差が大きくなり、被写体の輪郭部分に距離検出の誤りが生じる。これを解消するには、増加変調光と減少変調光時の各画像の取得間隔を短くし、動画像撮影特性を向上する必要がある。

この実験システムで撮影可能な被写体サイズは、カメラから 3 m の距離で、40 cm × 30 cm である。この制限要因は、カメラ前面の色分割光学系の大きさと照射光量である。撮影範囲拡大のためには、光学系の大型化や構成の工夫、照射光量の増加、I.I. 撮影感度の向上などが必要である。しかし、レーザー光の場合、照射光量の増加は、人物撮影の安全性の観点から望ましくなく、また、照射光にレンズ表面の影響による干渉パターンやスペックルノイズが生じる場合が多く、一様な光強度分布の光照射は困難であった。

### (3) 被写体表面の色や外乱光の影響

被写体表面の色による距離検出特性への影響を調べるため、カラーチャート(図 3.12(a))を被写体として距離画像を撮影した。測定では、カメラから 2 m の距離を測定レンジの中心に設定し、カラーチャートまでの距離を 2.5 m、2 m、1.5 m と移動して撮影した。ここでは、距離画像の輝度を、カラー表示に変換し、近い被写体は赤く、遠い被写体は青く表示する設定とした。

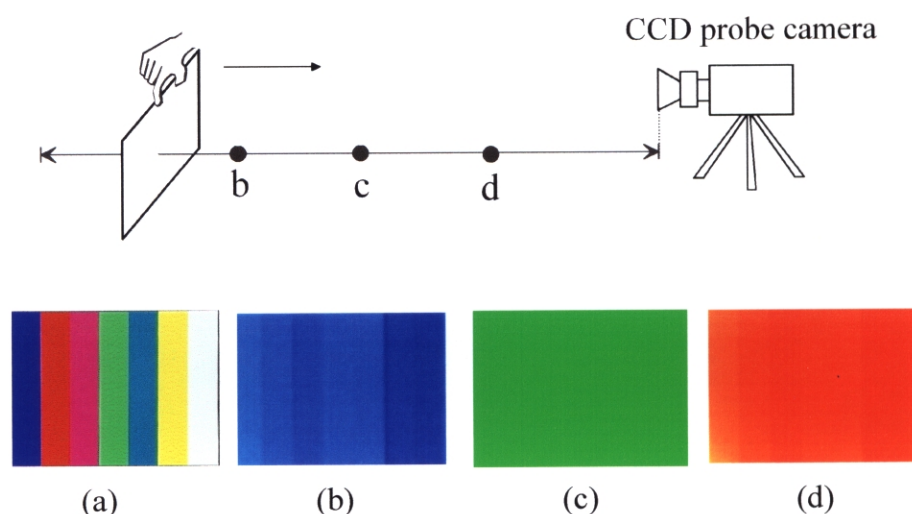


図 3.12 カラーチャートを被写体とした場合の撮像例。被写体の距離画像はカラーで表示している。(a) 被写体のカラーチャート (b) カメラから 2.5 m の場合の距離検出結果 (c) カメラから 2 m の場合 (d) 1.5 m の場合の距離画像

測定中心(図 3.12(c))およびカメラに近い場合(図 3.12(d))では、色の違いによる距離検出への影響は見られず、均一な距離値が得られた。しかし、被写体の距離が遠い場合(図 3.12(b))、わずかに距離検出にばらつきが生じている。このばらつきを距離検出誤差に換算すると 3 cm 以内であった。この距離検出誤差の原因は、被写体が遠くなることで照射光量が減少し、特に近赤外光に対し反射率が小さい色の部分では十分な反

射光量が得られず、距離算出のもととなる減少変調光照射時の画像信号が撮影感度範囲外となったためである。I.I.と CCD からなるカメラシステムの感度特性のマッチングやダイナミックレンジの拡大、照射光量の増加によりこの検出誤差の発生は抑えられると考えられる。また、被写体が正反射光の強い金属やプラスチックなどの場合、反射光量が多く撮影したビデオ信号が飽和するため、被写体に応じて I.I.の撮像ゲインを調整する必要がある。さらに半透明の被写体のように特殊な場合は、被写体表面とその奥の被写体からの反射光が同時に検出されるため、本方式では 2 つの被写体の中間の距離値が算出される。

蛍光灯のように近赤外光成分が少ない環境光(照度 182 lx)の下では、カメラレンズ前面のバンドパスフィルターの効果により、距離検出への外乱光の影響はみられなかった。しかし、屋外の太陽光のもとなど、距離検出用の変調光と同じ波長領域の外乱光がある場合は、現カメラシステムでは距離検出は困難である。このように近赤外の外乱光がある環境下では、外乱光のみの場合の画像も同時に撮影し、これをもとに変調光照射時の画像を補正演算して距離を求める手法が有効と考えられる。また、照射する近赤外光の波長帯域を狭くするとともに、照射光量の増加やカメラのダイナミックレンジの拡大などにより、外乱光のある環境下における距離検出性能は向上できると予想される。環境光による距離検出への影響の低減は、今後、このカメラ技術の応用範囲を拡大する上で重要な課題の一つである。

図 3.13 に表面の反射率が異なる被写体の撮影例を示す。一番手前の被写体はカメラより 0.8 m、奥の被写体はカメラより 2 m の距離に設定した。図 3.13(b)に示す距離画像では、被写体の奥行き距離が検出されていることがわかるが、遠くの被写体の輪郭付近では、反射光量が少ないため検出誤差が見られる。また床には光の反射が少ない黒いラシャ紙を用いているため、距離は検出されていない。本方式では反射光が少なく距離検出できない被写体は、測定レンジ中心と同じ距離値が算出される。

また、図 3.13(c)および図 3.13(d)は距離画像をもとにカメラに近い被写体のみを抽出し、他の画像と合成した結果である。本実験系により、背景と分離可能な距離検出分解能と空間解像度が得られていることが示され、距離情報をもとにした画像合成技術の基本原理が実証された。なお、本実験では、単一のレーザー光源より光を斜め照射しているため、被写体の形状や配置によっては影が生じる課題があった。

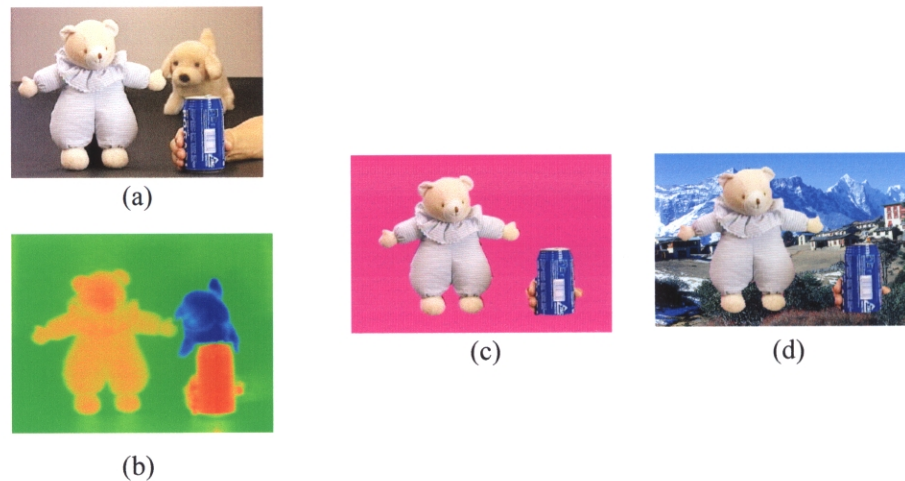


図 3.13 被写体の撮影と画像の抽出と合成結果 (a) 被写体画像 (b) 距離をカラー表示した画像。近い被写体を赤色、遠い被写体を青色で表示している。  
(c) 近い被写体だけの抽出画像 (d) 画像合成例

### 3.4 カメラ試作へ向けた課題

前節の原理検証の実験結果を踏まえ、カメラ実現に向けた課題を以下に整理する。

#### (1) 高速シャッターカメラの課題

高輝度から低輝度な被写体まで距離検出を可能とするには、高速シャッターカメラを構成する I.I. やリレーレンズ、CCD の撮像特性の最適化や、高感度化が必要である。また、本システムの距離検出分解能を左右するのは、距離検出の信号対ノイズ比であり、カメラパラメーターと距離検出ノイズの関係を明らかにする必要がある。

#### (2) 光源の課題

原理検証実験で使用したレーザー光源では、人物撮影時の安全性の問題により、大幅な高輝度化は困難であるため、広い撮影範囲を高輝度に照射できず、撮影サイズや距離検出分解能が制限される。また、コヒーレント光であるため照射光にスペックルノイズや干渉縞による輝度むらが生じやすい欠点がある。さらに、単一レーザー光源による斜め照射では、被写体によっては照射光が当たらずに距離検出できない部分が生じることがある。

#### (3) 距離検出性能の課題

実験では、距離画像は 15 Hz の更新速度で得られたが、更なる動画像検出機能向上

のためには、カラー映像と同様のビデオフレームレートで距離検出する必要がある。また、標準テレビクラスの解像度の距離画像検出と、画像合成に有効な距離分解能が得られていることを確認できたが、今後の実用化のためには画素をハイビジョンクラスまで高精細化する必要がある。また、撮影サイズの拡大やカラー画像と距離画像の容易かつ高精度な画角合わせ、ズームレンズ機能対応の光学系、システムの小型化なども課題である。

### 3.5 まとめ

本章では、従来技術では困難であった高速かつ高精細な距離画像検出の実現を目指して、新たな距離検出方式を考案した。強度変調光照射と高速シャッター撮影による方式を提案し、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) 距離検出方式として、強度変調光と高速シャッターによる方法を提案した。増加変調光と減少変調光照射時の撮影画像間で演算処理することで、被写体の反射率等の影響をキャンセルし、距離画像を求める方式を考案した。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有利な特長を持つ。
- (2) 提案方式の原理検証のために、I.I.とCCDからなる高速シャッターカメラとレーザー光源により実験系を作製した。実験の結果、画素数768(H)×493(V)の距離画像を、フレームレート15 Hzで検出可能であった。また、距離検出分解能は3 cmであり、距離情報を用いた画像の抽出や合成に有効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ことがあげられる。

高速シャッターカメラの課題として、I.I.やCCDなどの構成要素の特性の最適化や高機能化のために、カメラパラメーターと距離検出特性の関係を解明する必要がある。

光源の課題は、高輝度化と人物撮影の安全性確保、照射範囲の拡大、照射光の均一性向上、影の除去である。

距離検出性能の課題は高速化と高精細化であり、さらに実用化に向けて、カラー画像と距離画像の容易な画角合わせ、撮影画角の拡大、ズームレンズ機能の実現、小型化などの汎用性の向上が必要である。

## 参考文献

- [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, 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.
- [3] 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.
- [4] 木下勝之, 水島廣, “超高感度撮像技術,” テレビジョン学会誌, vol. 42, no. 8, pp. 794-799, 1988.
- [5] 山崎順一, 馬嶋圭三, 山口哲司, 城武光祐, “ハイビジョン超高感度カラーI.I.カメラ開発と天体撮影,” 映像情報メディア学会技術報告, vol. 22, no. 6, pp. 35-40, 1998.



## 第 4 章

# 距離検出特性の解析と要素技術の開発

### 4.1 はじめに

前章では、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、実験で基本性能を実証するとともに、カメラ試作に向けた課題を明らかにした。本章では、前章の課題を踏まえ、カメラ設計に必要な距離検出特性の解析と、カメラ実現のための要素技術の確立を目的とする。はじめに、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、距離検出分解能を左右する距離検出の信号対ノイズ比（SN 比）特性を明らかにする。次に、前章の原理検証実験で用いたレーザー光源使用時の課題であった、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、照射光の均一性向上、および影の発生の抑制に取り組む。これらの課題を解決するために、高輝度かつ高速変調が可能な LED アレー照射装置を開発するとともに、標準テレビ信号対応のカメラシステムを構築し、距離検出性能の改善効果を調べる[1]。

### 4.2 距離検出特性の解析

本節では、距離検出特性の解析として、距離検出分解能を左右する距離検出 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導く。

#### 4.2.1 光電変換面におけるショットノイズ

はじめに、I.I.の出力信号の SN 比を求める。図 4.1 および図 4.2 に示すようにカメラから距離  $d$  に位置する被写体に増加／減少変調光を照射した場合、光電変換面に入力される単位面積当たりの光強度  $E_+(d)$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]、および  $E_-(d)$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]はそれぞれ以下の式で表される(付録 A)。



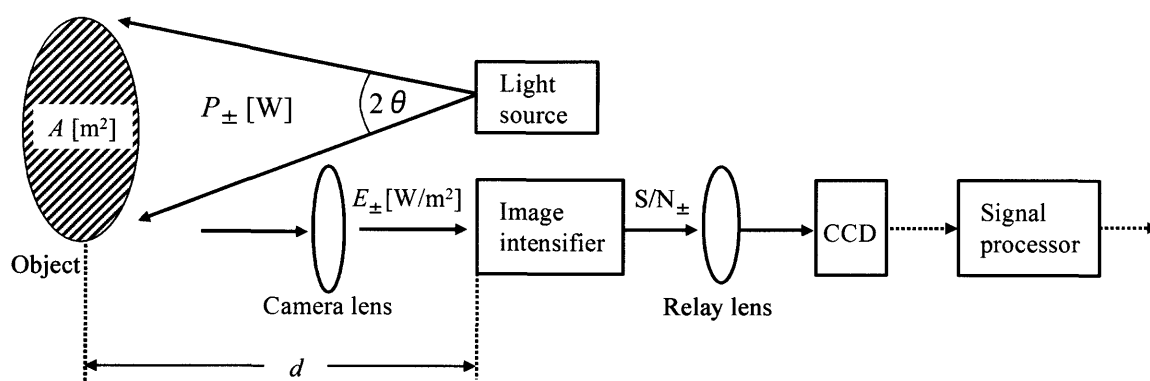


図 4.1 距離検出 SN 比の解析図

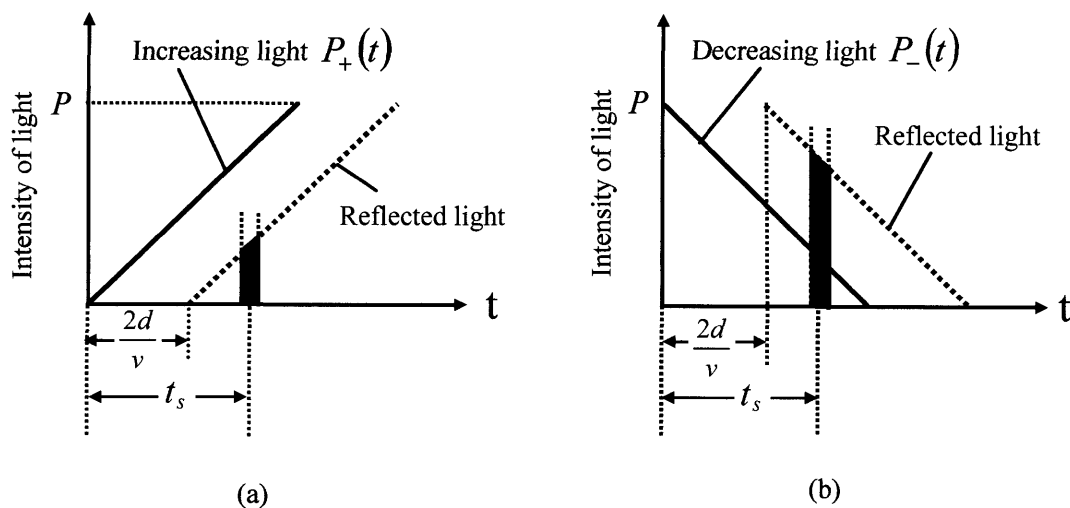


図 4.2 強度変調照射光と反射光 (a) 増加変調光照射の場合 (b) 減少変調光照射の場合

$$E_+(d) = \frac{RT_L P}{F^2 A} \left( \frac{1}{4} - \frac{d}{\lambda_L} \right), \quad \left( 0 \leq d \leq \frac{\lambda_L}{4} \right) \quad (4.1)$$

$$E_-(d) = \frac{RT_L P d}{F^2 A \lambda_L}. \quad (4.2)$$

ここで、 $R$  ( $0 \leq R \leq 1$ ) は被写体の反射率、 $T_L$  ( $0 \leq T_L \leq 1$ ) はレンズの透過率、 $P$  [W] は最大照射光パワー、 $F$  はカメラレンズの F ナンバー、 $A$  [m²] は光照射面積、 $\lambda_L$  [m] は変調光の変調波長である。

一方、光電変換面への平均照射光強度が  $E [\text{W}/\text{m}^2]$  の場合、光電変換面から放出される光電子の平均数  $\bar{n}$  は、

$$\bar{n} = \frac{\eta E a \tau}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

である。ここで、 $\eta (0 < \eta < 1)$  は光電変換面の量子効率、 $a [\text{m}^2]$  は光電変換面上の 1 画素あたりの撮像面積、 $\tau [\text{s}]$  は撮影時間、また  $\varepsilon = h\nu / \lambda [\text{J}]$  ( $h$ : プランク定数、 $\nu$ : 光速度、 $\lambda$ : 光の波長) である。光電変換面から放出される光電子数  $n$  の標準偏差  $\sigma$  は  $\sqrt{n}$  であり、光電変換面から放出される光電子の SN 比は、

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{pe} = \frac{\bar{n}}{\sigma} = \sqrt{\bar{n}} = \sqrt{\frac{\eta E a \tau}{\varepsilon}} \quad (4.4)$$

である。I.I. 内部の画像増幅における SN 比低下の要因に、MCP の開口率や二次電子放射率、また暗電流の発生などがある。暗電流は、チャンネル壁面からの熱電子放出や電界放出、残留ガスのイオン化などにより生じる。蛍光面のからの出力信号の SN 比  $(S/N)_{phosphor}$  はノイズファクタ  $N_f$  を用いて

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{phosphor} = \left( \frac{S}{N} \right)_{pe} \frac{1}{\sqrt{N_f}} = \sqrt{\frac{\eta E a \tau}{\varepsilon N_f}} \quad (4.5)$$

と表される[2]。以上、(4.1)式、(4.2)式、および(4.5)式より、CCD へ入力する増加変調光時と減少変調光照射時の撮影画像の SN 比はそれぞれ

$$\left( \frac{S}{N} \right)_+ = \sqrt{\frac{\eta a \tau R T_L P}{\varepsilon N_f F^2 A} \left( \frac{1}{4} - \frac{d}{\lambda_L} \right)} \quad (4.6)$$

$$\left( \frac{S}{N} \right)_- = \sqrt{\frac{\eta a \tau R T_L P d}{\varepsilon N_f F^2 A \lambda_L}} \quad (4.7)$$

と表される。特に、測定レンジの中心位置 ( $d = \lambda_L / 8$ ) での SN 比は、

$$\left( \frac{S}{N} \right)_+ = \left( \frac{S}{N} \right)_- = \sqrt{\frac{\eta a \tau R T_L P}{8 \varepsilon N_f F^2 A}} \quad (4.8)$$

となる。

## 4.2.2 距離画像の SN 比

I.I.からの出力像は、CCD カメラで撮影され、第 3 章の(3.6)式に従い距離画像が演算される。増加変調光時の映像信号を  $I_+ = V_+ \pm \delta_+$ 、減少変調光時の映像信号を  $I_- = V_- \pm \delta_-$ 、( $V_+$ 、 $V_-$  は信号成分、 $\delta_+$ 、 $\delta_-$  はノイズ成分)とし、シャッタータイミングを  $t_s = T/2$  とした場合、距離画像の信号  $D = V_d \pm \delta_d$ 、( $V_d$  は信号成分、 $\delta_d$  はノイズ成分)は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 D &= V_d \pm \delta_d \\
 &= \frac{\lambda_L}{2} \left( \frac{I_-}{I_+ + I_-} \right) \\
 &= \frac{\lambda_L}{2} \left( \frac{V_- \pm \delta_-}{V_+ \pm \delta_+ + V_- \pm \delta_-} \right) \\
 &= \frac{\lambda_L}{2} \left[ \frac{V_-}{V_+ + V_-} \pm \frac{V_+ V_-}{(V_+ + V_-)^2} \sqrt{\left( \frac{\delta_+}{V_+} \right)^2 + \left( \frac{\delta_-}{V_-} \right)^2} \right]
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

距離検出 SN 比は(4.9)式より

$$\frac{V_d}{\delta_d} = \frac{\frac{V_+ + V_-}{V_+}}{\sqrt{\left( \frac{\delta_+}{V_+} \right)^2 + \left( \frac{\delta_-}{V_-} \right)^2}} \tag{4.10}$$

となる。

ノイズ成分  $\delta_+$ 、 $\delta_-$  の要因は、I.I.や CCD カメラなどであるが、特に反射光量が少ない条件下では I.I.のショットノイズが支配的となる。その場合、測定レンジの中心位置 ( $V_+ = V_-$ 、 $\delta_+ = \delta_-$ )での距離検出 SN 比は

$$\frac{S}{N} = \sqrt{2} \frac{V_+}{\delta_+} \approx \sqrt{2} \left( \frac{S}{N} \right)_+ = \sqrt{\frac{\eta \alpha \tau R T_L P}{4 \epsilon N_f F^2 A}} \tag{4.11}$$

となる。ここで、照射面積  $A$  は、照射光の広がり角(半値)が  $\theta$  の場合

$$A = \pi (d \tan \theta)^2 \tag{4.12}$$

であるため、(4.11)式は、

$$\begin{aligned}
\frac{S}{N} &\approx \sqrt{\frac{\eta \alpha \tau R T_L P}{4 \epsilon N_f F^2 \pi (d \tan \theta)^2}} \\
&= \frac{1}{2 F d \tan \theta} \sqrt{\frac{\eta \alpha \tau R T_L P}{\pi \epsilon N_f}}
\end{aligned}
\tag{4.13}$$

となる。

この(4.13)式より、距離検出 SN 比は、被写体の距離  $d$  やカメラレンズの F ナンバー  $F$  に反比例し、光電変換面の量子効率  $\eta$  や 1 画素の受光面積  $\alpha$ 、撮像時間  $\tau$ 、光学系の透過率  $T_L$ 、照射光強度  $P$  の平方根に比例することがわかる。

### 4.2.3 複数回撮影による距離検出方式の検討

これまでの方式は、増加変調光と減少変調光照射時に撮影された 2 画像より、距離画像を算出するものであったが、より多くのシャッタータイミングで複数回撮影し、距離画像を求めることも可能である。ここでは、この複数回撮影した画像より距離を求めた場合、検出性能にどのような利点があるかを考察する。

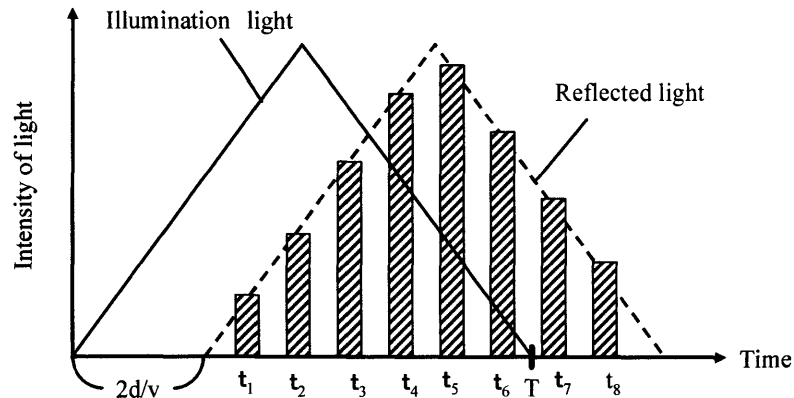


図 4.3 複数回撮影による距離検出時のシャッタータイミングの一例

具体例として、図 4.3 に示すように、シャッタータイミングを  $T/8$  ( $T$  は強度変調光の変調周期) ごとにシフトさせ、 $t_1 \sim t_8$  のシャッタータイミングで撮影した場合を考える。本方式では、シャッタータイミングが異なる 2 画像間より距離画像が求められ、この図 4.3 の場合は合計 4 枚の距離画像が算出できる。これら独立に求められた距離画像は無相関であるため、加算平均によりノイズ成分が低減され、距離検出 SN 比が向上できる。

また、従来の増加と減少変調光時の 2 画像間より距離検出する場合、後述の第 6 章の図 6.3 (b)で示すように、測定レンジ中心が最も距離検出分解能が高く、測定レンジの端では

距離検出 SN 比が低下する特徴を持つ。さらに、第 3.3.2 節の図 3.12 のように、測定レンジ周辺付近では、CCD のダイナミックレンジの制限により、被写体によっては黒つぶれや飽和が生じ、被写体の反射率補正が十分にできず距離検出誤差が生じることがある。

一方、撮影タイミングをシフトし複数回撮影する方式では、距離画像を加算平均することで、測定レンジ内において均一な距離検出 SN 比が得られる。また、複数の撮影画像の中で、CCD のダイナミックレンジ内で撮影された画像のみを用いて、距離画像を算出することで、測定レンジ周辺での反射率補正も良好となり、距離検出誤差を低減できる。

しかし、この複数回撮影方式を実用化するには、複数個の I.I.からなるカメラシステムか、もしくは 1 個の I.I.で時分割撮影するシステムが必要であり、装置の大型化や演算処理の複雑化、画像取得時間の延長、演算処理量の増加につながる。そのため、この複数回撮影方式は、ビデオフレームレートのような高速な距離検出性能は要求されないかわりに、高精度な距離検出が重要となる用途に有効と考えられる。

## 4.3 LED アレー照射装置の開発

本距離検出方式では、急峻なパルス光ではなく比較的緩やかに増加／減少する強度変調光を用いているため、レーザー光源と比較し強度変調の周波数特性は低いものの、自然光に近いインコヒーレントな LED 光が応用できる。レーザー光と LED 光の相違は、レーザー光はコヒーレンスが高く、集光時にエネルギー密度が相乗的に増加するのに対し、LED 光はコヒーレンスが低く[3]、光源サイズもレーザー光源に比べ非常に大きいことから、人物に照射できる光出力の許容値が高い[4]。また、複数個の LED 光源をアレー状に分散配置することで、安全基準をさらに緩和することができる[5]。そして、照射光にスペckルノイズの影響が無いことも LED 光源の利点である。

光源に必要な強度変調周波数は、第 3 章(3.8)式に示したように、被写体の奥行きに応じた距離検出範囲により決まる。例えば、通常のテレビスタジオで人物やセットなどを撮影する場合、距離検出範囲はおおよそ 10 m 以内であり、変調周波数  $f$  は 10～50 MHz 程度が必要となり、この変調周波数帯域は特性的に LED 光源でも有効な範囲である。

### 4.3.1 設計

#### (1) 面光源の大きさと距離検出誤差

第 3 章では、光源を単一の点光源と仮定して距離検出の基本原理を説明したが、本節では、複数の LED が密にアレー状に配置された面光源の場合の距離検出を説明し、

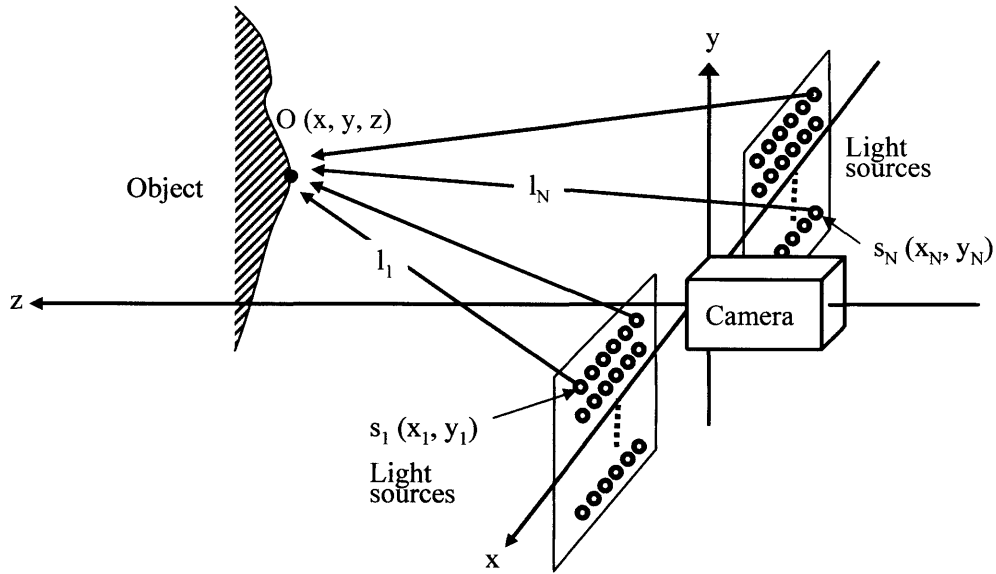


図 4.4 面光源の配置

光源の大きさが距離検出結果に及ぼす影響について調べる。

図 4.4 に示すように、 $N$ 個の点光源  $S_1 \sim S_N$  がカメラの両脇に、光軸を中心として、左右対称に配置されているとする。この場合、各光源から被写体までの距離が異なることを考慮して距離算出を行う。各光源より被写体に、強度変調光  $I(t)$  [W/sr] を照射すると、被写体  $O(x, y, z)$  の放射照度  $E_O(x, y, z, t)$  [W/m<sup>2</sup>] は、

$$E_O(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{l_n^2} I \left( t - \frac{l_n}{v} \right) \right\} \quad (4.14)$$

$$l_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + z^2} \quad (4.15)$$

となる。被写体の表面は完全拡散面と仮定し、被写体上の点  $O(x, y, z)$  の像をカメラレンズで撮像素子上に結像した場合、その像の放射照度  $E(x, y, z, t)$  [W/m<sup>2</sup>] は、

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= \frac{R(x, y) T_L}{4F^2} E_O \left( x, y, z, t - \frac{d}{v} \right) \\ &= \frac{R(x, y) T_L}{4F^2} \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{l_n^2} I \left( t - \frac{l_n}{v} - \frac{d}{v} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4.17)$$

となる。ここで、 $R(x, y)$  ( $0 \leq R \leq 1$ ) は被写体の反射率である。増加および減少変調光照射時の高速シャッター撮像時刻をそれぞれ、 $t_s$  および、 $t_s + T/2$  とし、これらの撮像時刻での検出信号の比  $r_a$  を求めると、

$$r_a = \frac{E\left(x, y, z, t_s - \frac{l_n}{v} - \frac{d}{v}\right)}{E\left(x, y, z, t_s + \frac{T}{2} - \frac{l_n}{v} - \frac{d}{v}\right)} = \frac{\sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{l_n^2} I\left(t_s - \frac{l_n}{v} - \frac{d}{v}\right) \right\}}{\sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{l_n^2} I\left(t_s + \frac{T}{2} - \frac{l_n}{v} - \frac{d}{v}\right) \right\}} \quad (4.18)$$

となる。ここで、照射光が三角波状の強度変調光の場合、(4.18)式は

$$r_a = \frac{\sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{l_n^2} \left( t_s - \frac{2d}{v} - \frac{l_n - d}{v} \right) \right\}}{\sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{l_n^2} \left( \frac{T}{2} - t_s + \frac{2d}{v} + \frac{l_n - d}{v} \right) \right\}} \quad (4.19)$$

となる。ここで、 $x_n, y_n \ll d$  の場合、

$$\frac{1}{l_n^2} \doteq \frac{1}{d^2} \quad (4.20)$$

が成り立つとともに、(4.15)式の近似により、

$$\sum_{n=1}^N (l_n - d) \doteq \frac{1}{2d} \sum_{n=1}^N (x_n^2 + y_n^2) \quad (4.21)$$

となる。(4.19)式に、(4.20)式および(4.21)式を代入すると、

$$r_a \doteq \frac{N\left(t_s - \frac{2d}{v}\right) - \frac{1}{2dv} \sum_{n=1}^N (x_n^2 + y_n^2)}{N\left(\frac{T}{2} - t_s + \frac{2d}{v}\right) + \frac{1}{2dv} \sum_{n=1}^N (x_n^2 + y_n^2)} \quad (4.22)$$

となる。画像演算装置では(4.22)式を第3章(3.6)式に代入した値を算出するため、これにより得られる結果  $d_a$  は

$$\begin{aligned} d_a &= \frac{vt_s}{2} - \frac{vT}{4} \left( \frac{r_a}{r_a + 1} \right) \\ &= d + \frac{1}{4Nd} \sum_{n=1}^N (x_n^2 + y_n^2) \end{aligned} \quad (4.23)$$



となる。以上より面光源を使用すると、実際の距離より  $\frac{1}{4Nd} \sum_{n=1}^N (x_n^2 + y_n^2)$  だけ大きい値が得られることがわかる。また、この項は光源が光軸から離れて配置されるほど2次関数的に大きくなり、遠方の被写体ほど距離に反比例して小さくなることがわかる。ちなみに、400個のLED素子が光軸を中心に半径75 mm～175 mmの範囲内に配置された場合、

$$\frac{1}{4N} \sum_{n=1}^N (x_n^2 + y_n^2) = 0.0042 \quad (4.24)$$

であり、光軸上2 mの距離の被写体を撮像した場合、(4.23)式の右辺第2項は2.1 mmとなる。現在のこの程度の誤差は、画像合成などへ実用化する上では問題はないが、必要があれば画像演算装置で得られた  $d_a$  から(4.23)式をもとに  $d$  を求めることができる。また、目的の被写体までの距離に応じて、電氣的に面光源の変調トリガー時刻を調整するか、機械的に光源の位置を前後に微調整することでこの誤差の影響を小さくする対策が考えられる。

## (2) 照射光量

本方式では、ナノ秒オーダーの短時間撮像を行うため、カメラで受光できる反射光量が微弱である場合、量子揺らぎによる影響を受ける可能性がある。量子揺らぎの影響を受けない光電変換面への最低照射強度は、標準テレビカメラを想定した場合、約  $1.1 \text{ nW/cm}^2$  と見積もられる(付録B)。

ここで、CCDカメラの感度に十分な輝度の蛍光面出力画像を得るために光源に必要な光パワーを見積もる。光パワー  $P [\text{W}]$  の光を被写体に照射し撮影した場合、I.I.の光電変換面の放射照度  $E [\text{W/m}^2]$  は、付録Aの(A6)式より

$$E = \frac{RT_L P}{4F^2 A} \quad (4.25)$$

である。ただし、 $R$  ( $0 \leq R \leq 1$ ) は被写体の反射率、 $T_L$  ( $0 \leq T_L \leq 1$ ) はレンズの透過率、 $F$  はレンズのFナンバー、 $A$  は照射面積 [ $\text{m}^2$ ] である。このときI.I.の蛍光面の放射発散度  $M [\text{W/m}^2]$  は、

$$M = GE\tau f_s = \frac{GRT_L P\tau f_s}{4F^2 A} \quad (4.26)$$

となる。ここで、 $G$  は I.I.の増倍率、 $\tau$  はシャッター時間幅[s]、 $f_s$  はシャッターの繰り返し周波数[Hz]である。(4.26)式より光源の光パワー  $P$  は、

$$P = \frac{4F^2 AM}{GRT_L \tau f_s} \quad (4.27)$$

となる。ここで一例として、 $F=1.2$ 、 $A=3 \text{ m}^2$ 、 $R=0.7$ 、 $T_L=0.3$ 、 $G=500$ 、 $\tau=1 \text{ ns}$ 、 $f_s=50 \text{ MHz}$  とした場合、I.I.の蛍光面に必要な発散放射度  $M=50 \text{ mW/m}^2$  を得るために光源に必要な光パワー  $P$  は  $165 \text{ mW}$  と見積もられる。

### (3) 安全性

光の眼に対する安全性でもっとも注意すべき点は、光が水晶体を通過後、網膜上の一点に結像し、損傷を与えることにある。単一の高出力レーザー光源を使用した場合、コヒーレント光であるため網膜の一点に高いエネルギー密度で集光するため危険である。それに対し、インコヒーレント光は指向性が低く、また、LED アレー光源は面状光源に近い配置であるため、眼に結像した場合でも網膜の一点にエネルギーが集中することはない。

LED 出力光源に対する安全基準を、レーザー光の JIS 基準に準じて最大許容露光量 (MPE : maximum permissible exposure)をもとに計算する[5]。MPE の定義は、“通常的环境下、人体に照射しても有害な影響を与えることが無い放射レベルの最大値”である。

LED アレー光源の出力光波長を  $850 \text{ nm}$ 、アレー面積を  $100 \text{ cm}^2$  とし、 $3 \text{ m}$  離れた被写体に  $8$  時間照射する場合について MPE を算出すると  $1.9 \text{ mW/cm}^2$  となる。前節で得られた必要となる光出力  $165 \text{ mW}$  で直径  $2 \text{ m}$  の範囲を照射した場合、被写体上の平均放射照度は MPE の  $1/359$  の  $5.3 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$  であり、安全性は十分に確保されている。

### 4.3.2 試作

試作 LED アレー照射装置を用いて標準テレビ信号対応のカメラシステムを構成した。その構成図と外観写真、LED アレー照射装置の仕様を、図 4.5、図 4.6 及び表 4.1 にそれぞれ示す。

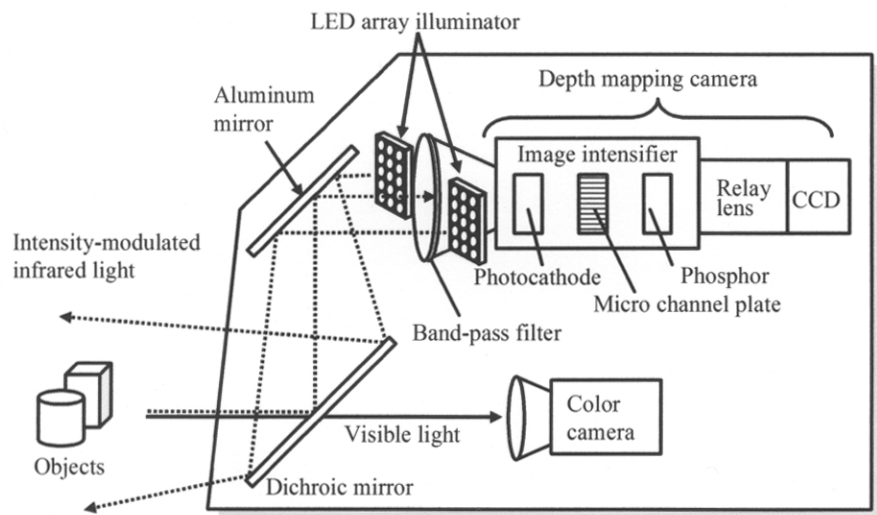


図 4.5 LED アレー照射装置を用いた標準テレビ信号対応のカメラシステム

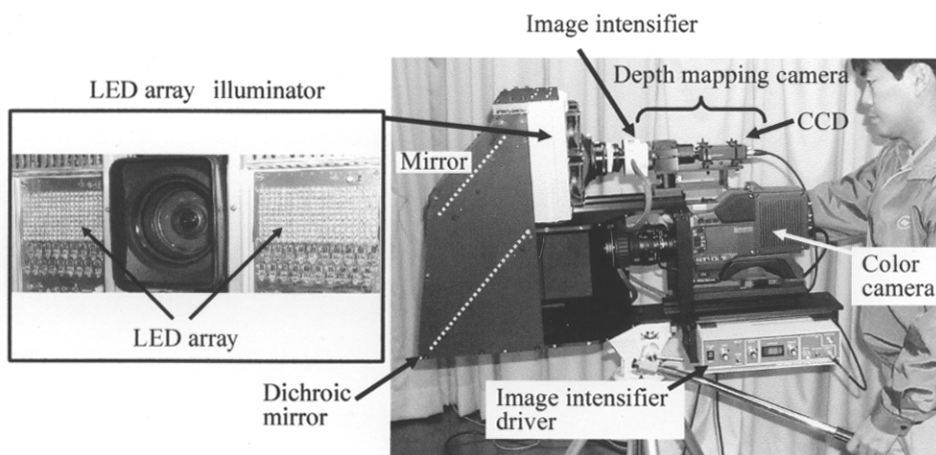


図 4.6 カメラの外観写真

表 4.1 LED アレー照射装置の仕様

LED illuminator	Wavelength	850 nm
	Width of wavelength	50 nm (FWHM)
	Average light power	500 mW
	Modulation frequency	10 to 50 MHz
	Total number of LED	20(H) × 10(V) × 2 Units

試作機では、距離検出カメラを上段に、カラーカメラを下段に配置している(図 4.5)。近赤外光と可視光を分離するカメラ前部の大型ダイクロイックミラーとその上部のミラー(表面反射型アルミミラー)により各カメラの撮影光軸を同一とし、また、被写体と各カメラの撮像面間の光路長も等しくすることで、カラー画像と距離画像の撮影画角合わせを可能としている。距離検出カメラのレンズ両脇に LED アレー照射装置を配置し、強度変調した近赤外光をミラーとダイクロイックミラーで反射させ、被写体に照射する。被写体からの近赤外反射光は、ダイクロイックミラーとミラーで反射し、バンドパスフィルターで近赤外光以外を除去した後、レンズにより I.I.へ結像される。増加変調光照射時と減少変調光照射時の画像が、ビデオフレーム(1/30 秒)ごとに交互に撮像され、信号処理装置で距離算出演算を画素単位で行い、得られた距離画像を標準テレビ信号として出力する。一方、被写体は、可視光成分のみを出力する光源でも照明されており、被写体からの可視の反射光は、ダイクロイックミラーを透過後、カラーカメラへ入力し、カラー画像が撮影される。

### (1) 強度変調特性

開発した LED アレー照射装置では、最大 50 MHz の高速変調周波数特性を持つ近赤外 LED を 200 個使用し、縦 10 個 × 横 20 個のアレー構成としている。2 台の LED アレーユニットは、照射光の影の発生を抑えるためカメラレンズの左右に 1 台ずつ設置した(図 4.6)。また、LED 発光部と駆動回路部を 1 枚の基板にコンパクトに一体化し、配線の引き回しによる変調信号へのノイズの混入を防ぐとともに、信号源から個々の LED までの配線距離をそろえて強度変調の位相差が生じるのを抑えている。さらに、カメラレンズの左右の装置間についても、外部変調信号の位相を個々の装置で独立に微調整できるように可変ディレイ部を設け、変調位相をそろえている。また、個々の発光素子と被写体間の光路長差が大きいと、位相差を持つ複数の強度変調光が被写体上で重畳され、変調度の低下が生じ、距離検出分解能の低下や検出誤差などの原因となる。本装置では、各 LED を 5 mm ピッチ間隔で密に配置する回路基板設計とするとともに、カメラレンズの光軸から左右の各 LED アレーの中心までの距離を 125 mm となるように近接配置し、変調度の低下や空間的な変調むらを抑えた。

### (2) 照射光強度と均一性

試作した LED アレー光源では、出力光パワーを 500 mW とし、カメラより 3 m 離れた位置の直径 2 m の範囲を照射しても十分に撮像可能であり、これは前章の原理検証実験系[6]の場合の約 25 倍の広さである。

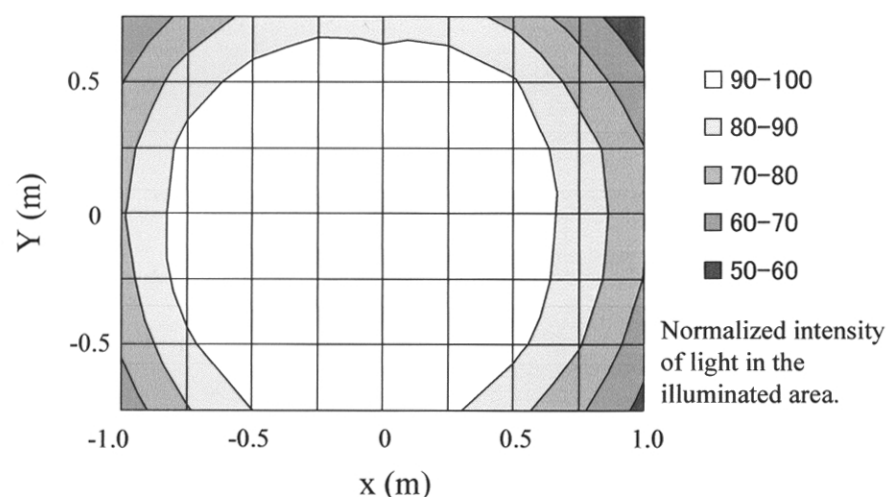


図 4.7 LED アレー照射装置の照射光強度の空間分布。カメラから 3 m の距離の照射範囲(横 2 m×縦 1.5 m)の光強度を測定し、測定中心の値  $200 \text{ mW/m}^2$  を 100 に規格化したときの光強度の空間分布。

図 4.7 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 1.5 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 TQ8210、センサー部 TQ821017)で照射光強度を測定した。図 4.6 のグラフは、照射範囲の中心の照射光強度を 100 で規格化したときの空間分布を示している。中心と周辺照射光強度比が 10 : 6 以上の均一性を確保するとともに、中心の放射照度は  $200 \text{ mW/m}^2$  を実現している。また、照射光量の安定化のために、光源部の基板背面にはヒートシンクとファンからなる冷却部を設け、発熱による発光効率の低下や、光源や基板回路の劣化を防いでいる。

### (3) 分光特性と光学系

LED の出力光波長は、カラー画像撮影用の可視光領域(400 nm～700 nm)と光学的に分離できるように、中心波長 850 nm の近赤外光を選択した。また、近赤外光の波長選択においては、市販のカメラレンズでも比較的良好な結像特性や透過率特性が得られる波長域であることや、I.I.のマルチアルカリ光電変換面の感度特性が有効な波長域であることを考慮した。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が利用できる。それ以外にも、通常のスタジオ照明に近赤外光カットフィルターを付けたものも利用できる。

カメラ前部のダイクロイックミラーは、400～680 nm の可視光領域において平均透

過率を 97%以上とし、平坦な透過率設計とすることで、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、ダイクロイックミラーの近赤外光(波長 850 nm)の距離検出側への反射率を 99.4%とし、高い光利用効率を確保するとともに、近赤外バンドパスフィルターをカメラレンズ前面に取り付けることで(図 4.5)、I.I.への近赤外光(850 nm)と可視光(532 nm)との入射率の比を  $10^6 : 1$  以上とし、可視光の距離検出側への漏れを防いだ。

## 4.4 距離検出特性の測定

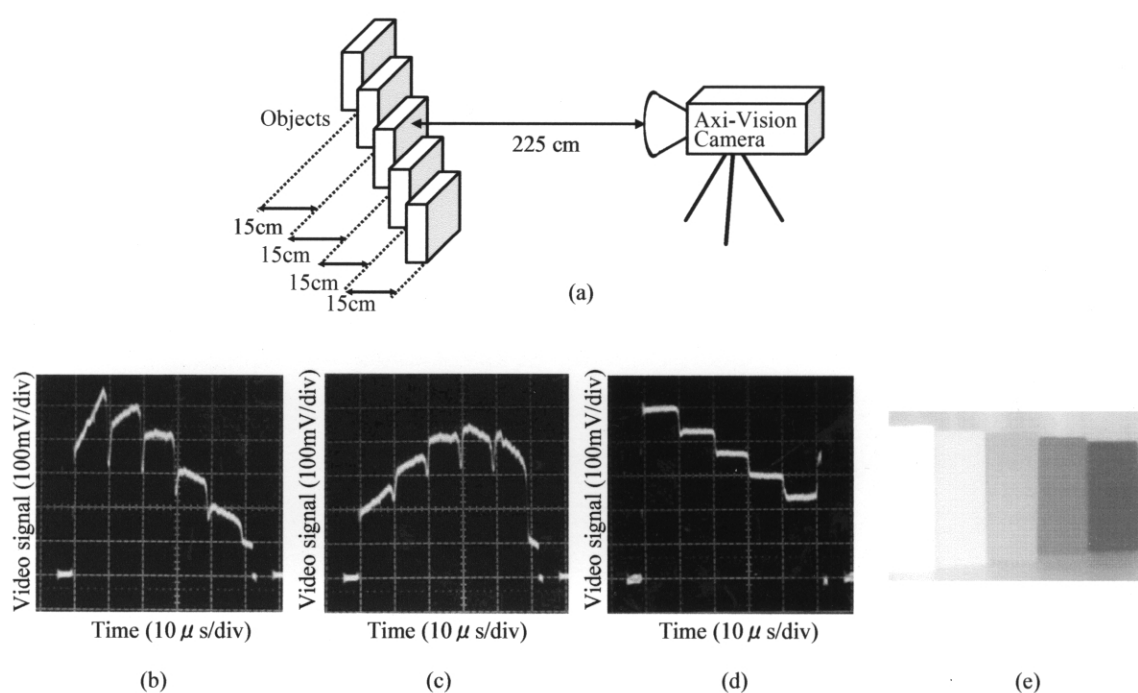


図 4.8 階段状被写体の距離検出 (a) 被写体の配置 (b) 増加変調光照射時 (c) 減少変調光照射時に短時間撮像した映像信号 (d) 距離を表す映像信号 (e) 距離画像

図 4.8(a)に示すような階段状の被写体を用いて距離画像の撮像実験を行った。被写体の表面は白紙であり、BaSO<sub>4</sub> 標準白色板の 850 nm の光に対する反射率を 1 とした場合に、この被写体の反射率は 0.85 である。光の強度変調周波数は 45 MHz、シャッター時間幅は 1 ns、シャッターの繰り返し周波数は 45 MHz で撮像した。増加変調光照射時の映像信号(図 4.8(b))の輝度レベルでは、左側の近い被写体が高く、一方、減少変調光照射時(図 4.8(c))は、逆に右側の遠い被写体が比較的高くなっている。これらの映像信号には、被写体の距離の違いによる輝度差とともに、照射光強度の空間的なむら

などの影響が含まれている。これら映像信号から、第3章(3.6)式より算出した距離画像信号が図4.8(d)であり、被写体の階段形状を表す映像信号が得られ、図4.8(e)に示すように被写体の距離画像が撮像されている。距離画像の画素数は768(H)×493(V)であり、2ビデオフレーム毎に距離画像を更新演算しているため、更新時間は1/15秒である。

この実験の場合、撮影サイズは約100 cm×75 cmであり、撮像素子1画素に対応する被写体上の面積は約1.3 mm×1.5 mmである。本方式では、この1画素に対応する領域内に距離の異なる被写体が存在する場合は、反射光が1画素内で積分されるため、それらの距離の中間値が得られる。同じ撮影サイズの下で、より微小領域ごとの距離検出を行う場合は、撮像素子の高精細化が必要となる。ただし、後述する画像合成への応用においては、カラー画像と同数の画素を持つ距離画像が得られればよいと考えられる。

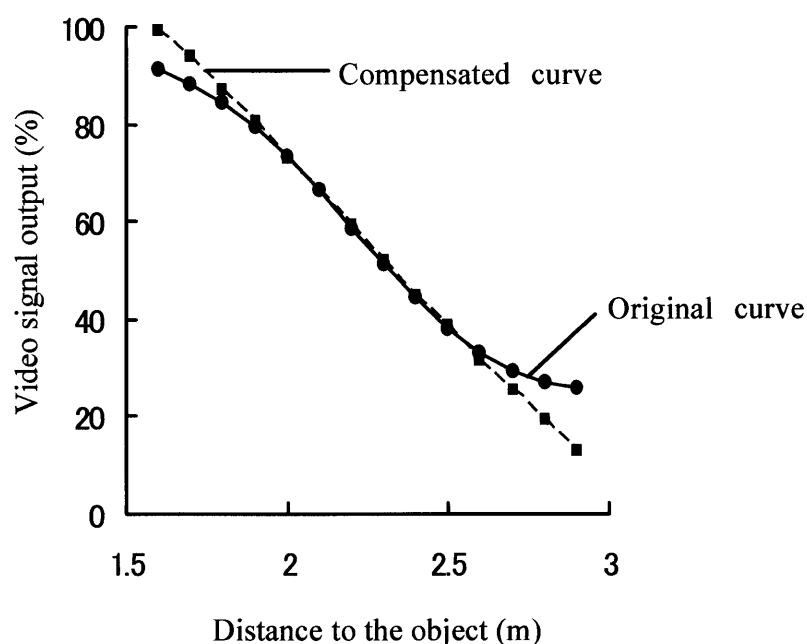


図 4.9 被写体までの距離と出力映像信号レベルの関係。実線はカメラの距離信号の映像レベルを測定した結果であり、破線は直線性補正後の特性である。

次に、同じ撮影条件のもと、被写体とカメラ間の距離と、距離画像の出力信号レベルの関係を測定した。その結果(図4.9 実線)、被写体とカメラ間の距離に応じた信号レベルが得られている。測定結果が曲線である理由は、実験で使用した照射光が理想的



な三角波ではなく正弦波状に近い変調特性を持つ一方、画像信号処理装置では第3章(3.6)式中の $r/(r+1)$ 、 $(0 \leq r/(r+1) \leq 1)$ を求め、これを画像の輝度に変換して距離画像として出力するためである。

関係式 $r/(r+1)=g(d)$ は $d$ の増加に対して単調減少する一価関数であるので、関係式 $g(d)$ が得られればその逆関数で補正できる。実際には、照射光の変調特性、または基準となる被写体で関数 $g(d)$ を測定して補正する。補正実験では、映像信号の階調レベルを任意に調整できるノンリニアアンプ(シバソク社製 VB13DX)を用いた。先に測定した特性曲線(図 4.9 実線)をもとに補正関数を作成して、ノンリニアアンプに設定し、画像信号処理装置からの出力映像信号を補正した。このノンリニアアンプを挿入した状態で、再度特性を測定した結果が図 4.9 の破線であり、直線性が補正されていることがわかる。

距離検出分解能を評価するために、ビデオシグナルアナライザ(シバソク社製、TX20BX)で距離画像信号のノイズ成分 $\delta$  [mVrms] を測定し、 $3\delta$  に相当する距離の値を分解能として求めた。その結果、カメラから距離 2 m の位置の被写体に対して、距離検出分解能は 1.8 cm であり、レーザー光を使用した前章の実験系[6]の約 1.7 倍の値が得られた。このカメラの距離検出分解能を左右する主な要因は I.I. のショットノイズであり、LED アレー光とすることでレーザー光使用時の約 5 倍の照射光量が得られ SN 比が増加し、距離検出分解能が向上している。

試作した LED アレー照射装置では、光軸上の 2 m 先の被写体に変調周波数 45MHz(変調波長 6.67 m)の光を照射した場合、各光源と被写体間の光路長は 2.0015 m~2.0076 m と計算される。この光路長のばらつきを光の変調位相差に換算すると $\pm 0.16^\circ$ 以下となる。これら各光源からの照射光は被写体上で積分されて平均的な位相を持つ変調光となる。各照射光の変調位相のばらつきが十分小さいため、積分された光の変調度の低下は無視できる程度であり、距離検出分解能への影響はみられなかった。

カメラから被写体までの距離が 3 m と、遠くなると距離検出分解能は 2.4 cm になり、4 m で 3.0 cm と直線的に低下した。この理由は、(4.13)式に示されたように、被写体の距離 $d$ の増加とともに、受光量が減少することで距離検出 SN 比が距離に反比例して低下し、距離検出分解能も同様に距離に比例して低下するためである。

## 4.5 まとめ

本章では、前章の原理検証実験で明らかとなった課題を解決するために、まず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解決に向け、LED アレー照射装置を新たに開発し、標準テレビ信号ベースのカメラシステムを試作した。実験の結果、距離検出分解能の向上、撮影可能な画角の拡大、人物撮影時の安全性の確保、照射光の影の除去に成功した。

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の 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 1 画素当たりの受光面積、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、被写体の距離やカメラレンズの F ナンバーに反比例することを明らかにした。
- (2) LED アレー照射装置の開発により、照射光量の増加と撮影画角の拡大が実現でき、前章の原理検証実験時の 50 倍の照射光量が得られ、照射面積も 25 倍に拡大できた。また、LED アレーユニットをレンズの近傍に複数近接配置することで、面状光源でも距離検出特性への影響を十分低減できることを示すとともに、単一光源使用時の課題であった照射光の影を除去できた。さらにレーザー光使用時に生じるスペックルノイズを無くし、均一性の良い光照射を実現するとともに、人物の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の色分離光学系による同軸光学系からなる標準テレビ信号対応のカメラシステムを試作した。LED アレー照射光により、単位面積あたりの照射光強度を従来の 5 倍とすることで、距離検出分解能を 1.8 cm ままで向上させるとともに、この光学系により距離検出カメラとカラーカメラの撮影画角合わせを容易とした。この光源の高出力化と光学系により、カメラより 3 m 先の直径 2 m の範囲が撮影できるようになり、人物大の被写体も撮影可能とした。また、近赤外光と可視光の分離特性を最適化し、可視光の距離検出側への漏れを十分に抑えることができた。
- (4) 実際の放送番組応用に向けて残された課題は、距離検出の更新速度をビデオフレームレートまでさらに向上することや、ハイビジョン番組に対応できる高精細化、ズームレンズ対応や小型化などの操作性や汎用性の向上などである。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] R. Hertel, “Signal and noise properties of proximity focused image tubes,” Ultrahigh Speed and High Speed Photography, Photonics, and Videography '89, Proc. SPIE 1155, pp. 332-343, 1989.
- [3] 山本裕紹, 野上豊史, 早崎芳夫, 西田信夫, “ダブルスリットを用いた干渉計による発光ダイオードの空間的コヒーレンスの評価,” 光学, vol. 39, no. 10, pp. 679-683, 2001.
- [4] 村野元宏, “LED の安全対策,” O plus E, (株)新技術コミュニケーションズ, vol. 23, no. 7, pp. 838-842, 2001.
- [5] 財団法人光産業技術振興協会, “レーザー安全ガイドブック第 3 版,” (株)新技術コミュニケーションズ, 東京, 2000.
- [6] 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.