

推薦論文

## 人間とデバイスの感度差を利用した 映像の盗撮防止方式

山田 隆行<sup>†1</sup> 合志 清一<sup>†2</sup> 越前 功<sup>†1,†3</sup>

スクリーンやモニタに表示した映像をデジタルビデオカメラで違法に撮影する盗撮行為を直接的に防止する方式を提案する。従来方式に電子透かしを用いた盗撮抑止方式がある。これは映像に透かしとして固有の情報を埋め込み、盗撮された映像から透かしを検出することにより、盗撮が行われた映画館や時間を特定する手法である。従来方式は、不正者による盗撮行為を心理的に抑止する効果はあるが、盗撮行為自体を直接的に防止できなかった。本論文は、人間とデバイスの分光感度特性の違いに着目し、人の視覚には影響を与えずに撮影映像にノイズを重畳する光源を映像表示装置に組み込むことで、既存のデジタルビデオカメラに新たな機能を追加することなく盗撮を直接的に防止する方式を提案する。提案方式を映画用 100 インチスクリーンに組み込んだ盗撮防止システムを開発し、評価実験により提案方式の有効性を確認した。

### Re-shooting Prevention Based on Difference between Sensory Perceptions of Humans and Devices

TAKAYUKI YAMADA,<sup>†1</sup> SEIICHI GOHSHI<sup>†2</sup>  
and ISAO ECHIZEN<sup>†1,†3</sup>

We propose a method to stop the re-shooting of pictures and videos displayed on screens using digital camcorders. Conventional digital watermarking technique involves embedding content ID into images and videos which helps to identify the place and time where the actual content was shot. However, digital watermarking technology does not control re-shooting of digital content using camcorders. The proposed method is to stop re-shooting of pictures and videos by corrupting the recorded content by adding invisible noise signal using CCD or CMOS devices during recording. In this way, recorded content will be unusable. To validate the result of this proposed method, we developed a functional prototype system for the re-shooting prevention and implemented it on a 100-inch cinema screen.

### 1. はじめに

ネットワークのブロードバンド化、AV (Audio Visual) 機器のデジタル化、DVD (Digital Versatile Disk) などの可搬媒体の大容量化にともない、個人が撮影した映像を高品質のまま DVD で配布することや、インターネット上で配信することが容易になった。一方で、不正に取得した映像を配布・配信することも容易であり、映画館で盗撮された映画が海賊版として露店で販売される事案や、映像配信サイトで公開される事案が発生しており、著作権者に甚大な損害を与えている<sup>1)~3)</sup>。デジタルビデオカメラなどの撮影機器やスクリーンやモニタなどの表示装置の機能が今後向上することで、盗撮映像の高品質化が進むことが懸念されており、著作権を保護するための抜本的な対策が求められている。映画の盗撮対策として、法制度面では、映画の盗撮の防止に関する法律<sup>4)</sup>が施行され、技術面では、電子透かしを用いた盗撮抑止方式<sup>5)~8)</sup>が提案されているが、いずれも盗撮行為を直接的に防止することができなかった。

そこで本論文では、スクリーンやモニタに表示された映像を、既存の撮影機器で録画する行為を直接的に防止する方式を提案する。本方式は、人間とデバイスの分光感度特性 (光の波長ごとの感度) の違いに着目し、人間の視覚に影響を与えずに撮影映像にノイズを重畳する光源を表示装置に組み込むことで、既存の撮影機器に新たな機能を追加することなく、スクリーンやモニタに表示した映像の盗撮を直接的に防止することができる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章において、映画の盗撮問題を概説し、映画盗撮の従来対策とその課題について述べる。次に3章で、提案する映像の盗撮防止方式の原理と提案方式で用いるノイズ光源の特性について述べる。4章では、提案方式を映画用 100 インチスクリーンに適用した盗撮防止システムの実装について述べ、5章では、4章で実装した盗撮防止システムの有効性を検証するため、評価実験を行い、その結果を示す。最後に6章でまとめを行う。

†1 総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻

Department of Informatics, School of Multidisciplinary Science, The Graduate University for Advanced Studies (Sokendai)

†2 シャープ株式会社

Sharp, Ltd.

†3 国立情報学研究所

National Institute of Informatics

本論文の内容は 2009 年 10 月のコンピュータセキュリティシンポジウム 2009 にて報告され、CSEC 研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

## 2. 映画の盗撮問題

### 2.1 背景

映画の盗撮とは、映画館で観客が撮影機器を使ってスクリーンに表示された映画を撮影する行為である。アメリカ映画協会 (MPAA: Motion Picture Association of America) は、映画の海賊版によってエンタテインメント業界が年間 30 億ドルの損害を被っていると推定している<sup>1)</sup>。また、日本国際映画著作権協会によると、映画の盗撮による国内損害額は約 180 億円 (2005 年) と推定している<sup>2),3),9)</sup>。同年の日本における映画興行収入が約 1,980 億円であったことから、同協会は、映画の盗撮が国内の興行収入を 1 割近く減少させていると指摘している<sup>3),9)</sup>。さらに海賊版の流通により、映画館の観客数やビデオソフトの販売・レンタルの売上げが減少し、映画業界は多大な損害を受けている<sup>10)</sup>。映画業界は、これまで盗撮防止キャンペーン映像の上映や、手荷物検査、巡回・監視などの対策をとってきたが<sup>2),9)</sup>、こうした対策は、観客に不快感を与えることや、巡回・監視に必要な従業員が十分に確保できないため、映画業界の対策だけでは限界がある<sup>2)</sup>。

### 2.2 従来対策

#### 2.2.1 法律による対策

映画の録画・録音に関しては、2007 年 8 月 30 日に私的使用目的でも違法とする“映画の盗撮の防止に関する法律”が施行された<sup>4)</sup>。この法律は、違反者に 10 年以下の懲役もしくは、1,000 万以下の罰金を科するもので、私的使用を目的とした録画・録音であっても罰則できるところに特徴がある。施行後、映画の盗撮防止に一定の効果をあげているものの<sup>2)</sup>、この法律には盗撮防止のための努力規定 (第三条) が設けられており、「映画館等において映画の上映を主催する者その他映画産業の関係事業者は、映画の盗撮を防止するための措置を講ずるよう努めなければならない」と定めている<sup>3),4)</sup>。これは、法律による対策の限界を示すもので、盗撮を防止するための具体的な対策を求めているものと解釈できる。

#### 2.2.2 技術的対策

コンテンツの不正流通を防止する技術の代表的なものに音楽や映像、文書などのデジタルコンテンツを暗号化し、対価を支払った人や特定の機器しか再生できないようにした DRM (デジタル著作権管理) などの不正コピー防止技術<sup>11),12)</sup>がある。しかし、これらの不正コピー防止技術はデジタルコンテンツを対象としており、アナログコンテンツであるスクリーンやモニタに表示された映像に対しては適用できない。

スクリーンやモニタに表示されたアナログコンテンツに対する映像の盗撮を抑制するた

めに、これまで、電子透かしを用いた方式が提案されている<sup>5)-8)</sup>。これは映像や音声に、電子透かしにより固有の情報を埋め込み、盗撮された映像や音声から透かしを検出することにより、盗撮が行われた映画館や時間を特定することを目的としている。映画館 ID などの情報を映像に埋め込むことで、スクリーンやモニタに表示された映像をビデオカメラで撮影しても撮影映像から埋め込んだ情報を検出可能な方式<sup>5)-7)</sup>や、映画館内に配置した複数のスピーカから出力する個々の音源に異なる情報を埋め込み、館内のビデオカメラにより録音された音声データの電子透かし強度を評価することで、盗撮された位置を推定する方式<sup>8)</sup>が提案されている。

しかし、電子透かしを用いた従来方式は、不正者による盗撮行為を心理的に抑止する効果はあるが、デジタルビデオカメラなどの撮影機器による盗撮行為を直接的に防止できない。そのうえ、映画コンテンツに対する透かしの埋め込みと検出の処理が必要となることや、盗撮場所や時間が特定できたとしても、それらの情報だけでは盗撮者の特定は困難である。また、従来方式で盗撮行為を防止するためには、撮影機器に電子透かしの検出器と記録制御器からなる盗撮防止機能を組み込むことが必要になるが、市場に流通しているすべての撮影機器に当該機能を組み込むことが前提となるため、従来方式による盗撮の直接的な防止は現実的に不可能である。

上述した問題の対策として、本論文では人間とデバイスの感度の違いを用いてスクリーンやモニタに表示された映像の盗撮を直接的に防止する方式を提案する。次章では、その詳細について述べる。

## 3. 人間とデバイスの感度差を利用した映像の盗撮防止方式

### 3.1 原理

本論文で提案する映像の盗撮防止方式は人間とデバイスの感度特性の違いを利用している。図 1 は、人間とデバイスによる感知可能な領域を表した概念図である。

領域の例として、人間の目とイメージセンサの受光波長域があげられる。一般的な CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) などのイメージセンサや、マイクロフォンなどのデバイスは、人間の視覚や聴覚特性に合わせて設計されるが、デバイスの特性上、完全に一致させることは不可能なため、図 1 に示す 2 つの領域に差異が生じる。本方式は、図中の影を付けた部分の領域に反応するノイズ信号を生成することで、通常の映像の視聴には影響を与えずに、映像撮影時にのみ映像の品質を劣化させることで、映像の盗撮を防止する。

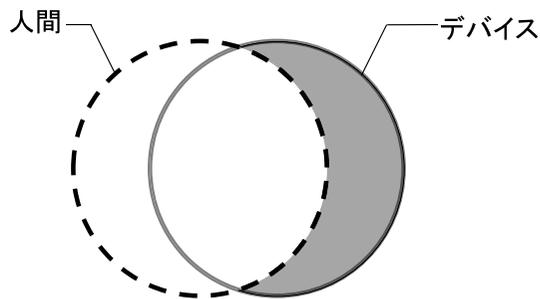


図 1 人間とデバイスによる感知領域の概念図

Fig. 1 Perceptible areas of sensory perceptions of humans and sensor devices.

具体的には、人間の目とデジタルビデオカメラのイメージセンサの分光感度特性の違いに着目し、人間の視覚には影響を与えずに撮影映像にのみノイズを重畳する光源（ノイズ光源）を映像表示装置に組み込むことで、撮影機器による盗撮を防止する。以降では、本方式に適用したノイズ光源の性質について述べる。

### 3.2 ノイズ光源

#### 3.2.1 概要

この節では、人間とデバイスの分光感度特性に基づいて提案方式を分析し、ノイズ光源に必要な特性について述べる。光に関する標準仕様を勧告する国際照明委員会（CIE: international Commission on Illumination）の視覚の分光感度特性（等色関数）によれば、人間の目の可視域は波長 380 ~ 780 nm である<sup>13),14)</sup>。一方、デジタルビデオカメラに用いられるイメージセンサは暗所での感度維持のために可視域よりも広い波長域（約 200 nm ~ 1,100 nm）に感度を有している<sup>15),16)</sup>。図 2 に人間とデジタルビデオカメラの感度の違いを示す。

光源に対する目の 3 刺激値を  $B_H, G_H, R_H$ 、デジタルビデオカメラの 3 応答を  $B_D, G_D, R_D$  とする。波長  $\lambda$ 、時刻  $t$  における光源の放射分光分布を  $s(\lambda, t)$ 、可視光線の波長範囲（380 nm ~ 780 nm）の各波長  $\lambda$  に対して、実験により求めた赤、緑、青と感ずる度合いを示す値である等色関数を  $\bar{b}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{r}(\lambda)$ 、イメージセンサの分光感度と各種フィルタの分光透過率を合わせた分光積を  $b(\lambda), g(\lambda), r(\lambda)$  とすると、目の 3 刺激値  $B_H(s, t), G_H(s, t), R_H(s, t)$  とデジタルビデオカメラの 3 応答  $B_D(s, t), G_D(s, t), R_D(s, t)$  は、それぞれ次のように表せる<sup>14),15),17)</sup>。

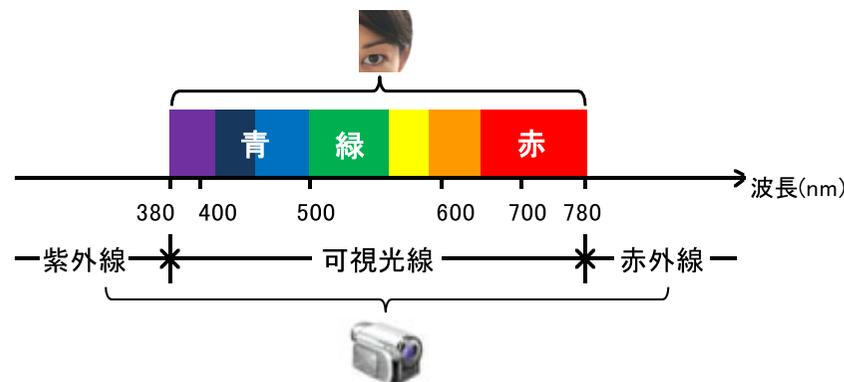


図 2 人間とデジタルビデオカメラの感度

Fig. 2 Perception of human and digital video camera.

#### [ 目の 3 刺激値 ]

$$\begin{aligned}
 B_H(s, t) &= \int_{380}^{780} s(\lambda, t) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda \\
 G_H(s, t) &= \int_{380}^{780} s(\lambda, t) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \\
 R_H(s, t) &= \int_{380}^{780} s(\lambda, t) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{1}$$

#### [ デジタルビデオカメラの 3 応答 ]

$$\begin{aligned}
 B_D(s, t) &= \int_{200}^{1100} s(\lambda, t) \cdot b(\lambda) d\lambda \\
 G_D(s, t) &= \int_{200}^{1100} s(\lambda, t) \cdot g(\lambda) d\lambda \\
 R_D(s, t) &= \int_{200}^{1100} s(\lambda, t) \cdot r(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{2}$$

このとき、スクリーンやモニタに表示したい映像の光源を  $v(\lambda, t)$ 、ノイズ光源を  $n(\lambda, t)$  とすると提案方式による光源  $s(\lambda, t)$  は、

$$s(\lambda, t) = v(\lambda, t) + n(\lambda, t) \tag{3}$$

と表せる。すると、3.1 節で述べた提案方式の光源  $s(\lambda, t)$  が満たす性質は、次式で表せる。

$$X_H(s) = X_H(v) \quad (4)$$

$$X_D(s) \neq X_D(v) \quad (5)$$

ただし、 $X$  は  $B, G, R$  のいずれかを表す。すなわち、視覚上では、光源  $s(\lambda, t)$  と映像光源  $v(\lambda, t)$  は一致するが、イメージセンサ上では不一致となる。不一致の度合いを  $\Delta = |X_D(s) - X_D(v)|$  で表すと、式 (2) の線形性と式 (3) より  $\Delta = |X_D(n)|$  となる。

次節からはこの差分  $\Delta$  を大きくするために、人間の視覚特性、認知特性の観点から、ノイズ光源  $n(\lambda, t)$  の波長特性と時間特性を定性的に分析する。

### 3.2.2 波長特性

提案方式を実現するために可視域外の波長を用いる。可視域外には短波長側にある紫外線 (Ultraviolet) と長波長側にある赤外線 (Infrared) があるが、紫外線に長時間さらされると、皮膚、目、免疫系への疾患を引き起こす可能性があるため、人間への安全性を考慮すると紫外線をノイズ光源として使用するの望ましくない<sup>18)</sup>。一方、長波長側にある赤外線は、現在の日常生活に深く浸透し、テレビのリモコン、暖房器具など様々な用途に利用されており、その安全性も確立されている。

赤外光源として、赤外 LED (Light Emitting Diode)、半導体レーザ、キセノンランプ、ハロゲンランプなどがあるが、光源の安全性確立 (付録 A.1 を参照のこと)、放射角度の大きさ (表示装置のどの角度からでも妨害可能)、発光による発熱量の少なさ、および実装の容易さなどを考慮して、本論文では赤外 LED を採用することにした。赤外 LED はレーザのような単波長光源ではなく、図 3 の破線のようにスペクトルに幅を持つ正規分布状の光源である。このため、ピーク波長が可視域に近すぎると、人間の目に知覚される恐れがある。逆に、ピーク波長が可視域から離れすぎると、デジタルビデオカメラの感度自体が低下することにより、ノイズ効果が減少する。そこで、780 nm 以上の異なるピーク波長を持つ 5 種類の赤外 LED (定格 6 W、ピーク波長 780, 810, 850, 870, 940 nm) を用いて、裸眼による放射強度の評価と 2 種類のビデオカメラ (CMOS/CCD デジタルビデオカメラ) によるノイズ効果の予備評価を行った。予備評価の結果、ピーク波長 870 nm の LED が裸眼による視覚的劣化が少なく、ビデオカメラによるノイズ効果が高いことを確認した。ピーク波長 870 nm の赤外 LED おける、波長と相対分光感度の関係 (分光放射強度分布) を図 3 の破線で示す。図が示すように、上述の分布放射強度分布は可視域の上限 780 nm 付近にわずかに放射を持つため視覚に影響を及ぼす。そこで、この部分の影響を抑えるため、カットオン波長 (透過率 50% の波長) 870 nm を持つ短波長カットフィルタを赤外 LED の前面に装着した。

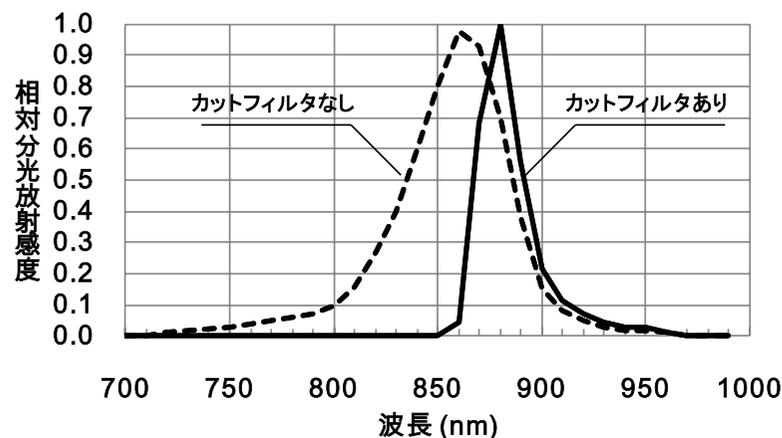


図 3 赤外 LED (ピーク波長 870 nm、カットフィルタがなし/あり) の相対放射強度分布  
Fig. 3 Distributions of infrared LED (870 nm) relative response (Low-cut filter 870 nm).

図 3 の実線に短波長カットフィルタを適用した分布放射強度分布を示す。図が示すように、フィルタ適用後の分布では、ピーク波長の変化を抑えながら、可視域における放射を低減できていることが分かる。すなわち、短波長カットフィルタの適用により、目に知覚される赤外 LED の可視域をカットし、デジタルビデオカメラに反応する赤外成分だけを残すことができる。

次に、短波長カットフィルタを装着した赤外 LED のノイズ効果を確認するために、先に評価した 5 種類の赤外 LED に短波長カットフィルタを装着し、2 種類のビデオカメラ (CMOS/CCD デジタルビデオカメラ) によるノイズ効果を評価した。図 4 に CCD デジタルビデオカメラによる評価結果を示す。図 4(a) は 5 種類の LED (ピーク波長 780, 810, 850, 870, 940 nm) の配置構成を示しており、図 4(b)–(d) は、3 種類の異なる強度 (1 W, 3 W, 6 W) で点灯した赤外 LED に短波長カットフィルタを装着して、デジタルビデオカメラで撮影したものである。図に示した評価結果より下記が判明した。図は、CCD デジタルビデオカメラによる結果であるが、CMOS デジタルビデオカメラでも同様の結果となった。

- 赤外光の強度が強くなるほど、ビデオカメラのノイズ効果は高くなる
- 評価した 3 種類すべての赤外強度において、ピーク波長 870 nm の赤外 LED が最もノイズ効果が高い

以上の検討により、本方式では、ピーク波長 870 nm の赤外 LED に短波長カットフィル

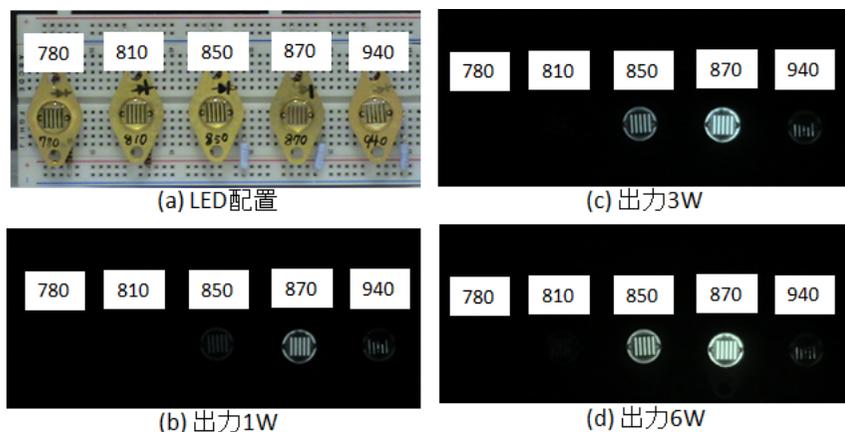


図 4 赤外線 LED の波長とノイズ効果の関係  
Fig. 4 Relations between wavelength of infrared LED and noise effect.

タ (カットオン波長 870 nm) を組み合わせたノイズ光源を適用した。

### 3.2.3 時間特性

ノイズ光源の時間変化によるノイズ効果を検討する。Bartley 効果によると、点滅した光源を人間が見たとき、点滅周波数が 10 Hz 前後の場合に最も強い感覚が生じる<sup>14),19)</sup>。一方、点滅周波数が十分高い場合には、点滅光のみかけの明るさが点滅光の平均輝度になるという Talbot の法則が成立する。人間の目の時間分解能は約 50 ms ~ 100 ms 程度であることから、この時間よりも短い光の点滅は連続点灯しているように知覚される<sup>14)</sup>。上記検討より、本方式では、盗撮映像のノイズ光源による妨害効果を高めるために、赤外 LED を 10 Hz で点滅させることとした。ノイズ光源の点滅による撮影映像への妨害度合いの評価については、5 章の評価実験で詳述する。

## 4. 盗撮防止システムの実装

3 章で述べた提案方式を、映画用 100 インチスクリーンに組み込んだ盗撮防止システムを開発した。図 5 に盗撮防止システムの構成、図 6 に外観を示す。このシステムは、図 6 (c) に示す発光ユニットを収納した赤外発光部と図 6 (d) に示す点滅調整回路から構成される。各機能の詳細は、下記のとおりである。

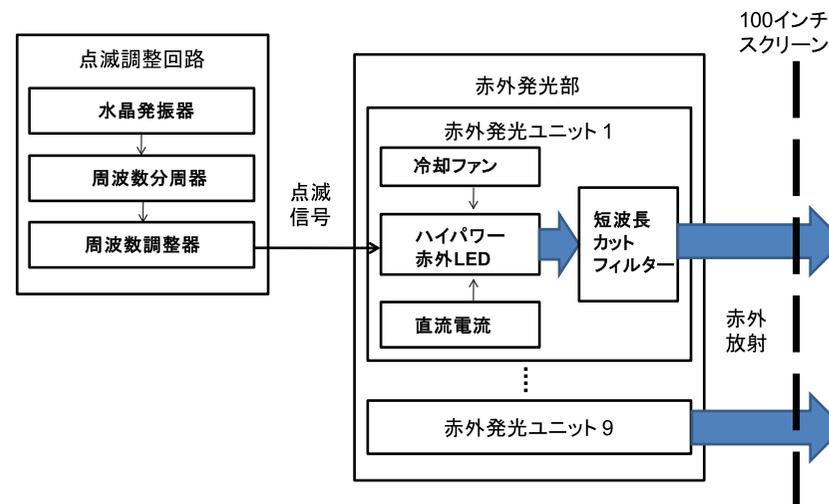


図 5 盗撮防止システムの構成  
Fig. 5 System structure.

### 4.1 赤外発光部

#### 4.1.1 概要

赤外発光部は、赤外 LED によるノイズ光を放射する部分であり、複数の赤外発光ユニットから構成される。図 6 (b) に示すように、赤外発光部はスクリーン背面のスチームフレームに吊るされており、当該発光部の熱や振動が直接スクリーンに伝わらない構造になっている。図 6 (c) に示す赤外発光ユニットは、18 個の赤外 LED からなり、前面に黒色の短波長カットフィルタ、後面に冷却ファンを付けている。各赤外発光ユニットは点灯中に約 36 W の電力を消費する。上述の冷却ファンは、PC 内部の冷却に用いられる防音・防振性の高いものであり、このファンの振動やノイズが映画鑑賞に与える影響はきわめて小さいと考えられる (付録 A.2 を参照のこと)。

#### 4.1.2 スクリーンによる影響

盗撮防止システムは、上述の赤外発光部を 100 インチのスクリーン中央部背面に取り付けたものである。映画用スクリーンには、音響と映像を一体化させるために、スクリーンに直径 1 mm 程度の無数の孔 (サウンドホール) が開いている。赤外線は可視光に比べ透過性

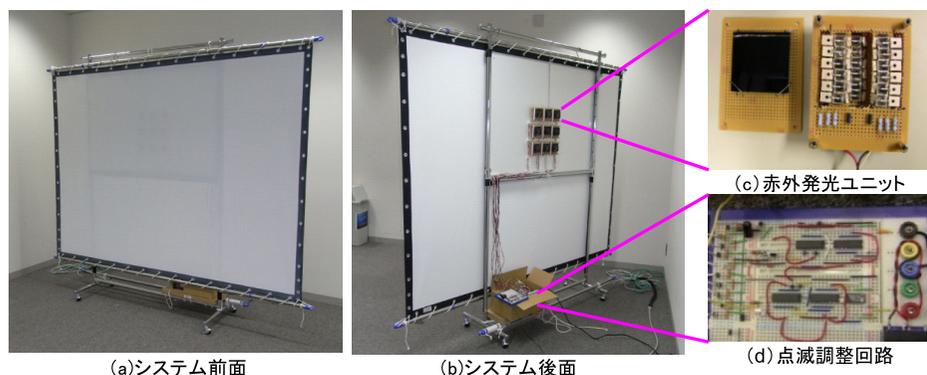


図 6 盗撮防止システムの外観  
Fig. 6 System overview.

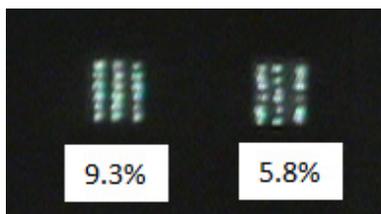


図 7 スクリーンの開口率とノイズ効果の関係  
Fig. 7 Relations between aperture ratio of screen and noise effect.

が高いため、赤外発光部によりスクリーン背面からスクリーン表面（観客席側）に照射された赤外線は、サウンドホールを通過するだけでなく、スクリーンも透過する。このため、スクリーンを加工することなく赤外発光部をスクリーンの後面に設置するだけで直接的に盗撮を防止することができる。

図 7 は、映画館で実際に使用されている代表的な 2 種類の映画用スクリーンの背面に赤外発光ユニットを設置し、CCD ビデオカメラで撮影したものである。2 種類の映画用スクリーンは、単位面積あたりのサウンドホールの数が異なっており、各スクリーンの開口率（スクリーン領域に対する開口領域の割合）は 9.3%と 5.8%である。図が示すように、開口率 5.8%のスクリーンのノイズ効果は、開口率 9.3%のスクリーンと比べると弱い

線によるスクリーンの透過により、双方のスクリーンとも、十分なノイズ効果が認められることが判明した。

#### 4.1.3 赤外発光ユニットの配置

赤外発光ユニットの配置については、スクリーンやモニタなどの画面に映像を表示すると、人間の眼球軌跡は画面中央部に集まる傾向があるため<sup>20)</sup>、本システムでは赤外発光ユニットをスクリーン中央部に配置した。また、赤外発光ユニットの設置個数については、一般的にユニットを多く設置するほど、ノイズ効果が高くなるが、ユニット数の増大により、システムの使用電力が増大することや、システム実装の工数が増大するため、より少ないユニット数で盗撮防止システムを構築することが望ましい。そこで、映画用 100 インチスクリーン（アスペクト比 4 : 3）の中央部に赤外ユニットを (a) 1 個設置した場合、(b) 縦横 2 個ずつ計 4 個設置した場合、(c) 縦横 3 個ずつ計 9 個設置した場合について、ノイズ効果の予備評価を実施し、その結果、(c) のケースであれば、100 インチスクリーンに表示した映像を撮影しても、撮影映像に十分に妨害を与えることが判明したため、本システムでは、赤外ユニットを縦横 3 個ずつ計 9 個の構成とした。

#### 4.2 点滅調整回路

ノイズ光源の妨害効果を高めるため、赤外 LED を点滅させる信号を発生する回路である（図 6 (d)）。内部構成は、水晶発振器のパルスを分周器に通し 1 ~ 64 Hz の点滅周波数を生成する。この点滅信号を使用して赤外発光ユニット内の赤外 LED の点滅を行う。赤外 LED を点滅させることにより、発熱による損傷を防ぎながら点灯時に高い出力を得ることができる。

### 5. 評価実験

本章では、通常の盗撮防止機能を持たないスクリーン（従来システム）と 4 章で実装した盗撮防止システム（提案システム）を用いて、表示映像の妨害度合いを主観評価実験により評価した。

#### 5.1 評価方法

評価映像を従来システムのスクリーンと提案システムのスクリーンに投影し、下記の 2 つのケースについて、従来システムに対する提案システムの妨害度合いを主観評価実験により評価した。

ケース (a) 投影映像を評価者が直接見た場合

（観客がスクリーンに投影された映像を鑑賞する場合を想定）

表 1 評価環境  
Table 1 Conditions of evaluation.

スクリーン	100インチ映画用ホワイトサウンドスクリーン(開口率9.3%)
プロジェクタ	デジタルプロジェクタ(1000ANSIルーメン)
評価映像	(財)NHKエンジニアリングサービス システム評価用標準画像から選択した6映像(図8)
撮影機材	CMOSデジタルビデオカメラ(1/3.2型CMOS, 有効画素: 207万画素) CCDデジタルビデオカメラ(1/6型CCD, 有効画素: 69万画素) カメラ付き携帯電話(CMOS, 有効画素: 8万画素)
点滅周波数	・全点灯 ・4種類の点滅周波数(5, 10, 15, 20Hz)
評価者	非専門家15名(矯正視力0.7以上)

ケース (b) デジタルビデオカメラで録画した投影映像を評価者が見た場合  
(盗撮映像を盗撮者または海賊版購入者が観賞する場合を想定)

ケース (a) では, 提案システムは, 従来システムと同等の画質であることが望まれるため, ノイズ光源による妨害が認められないことが望ましい. 一方, ケース (b) では, 盗撮映像の観賞を妨げるために, 提案システムの妨害度合いはできるだけ大きいことが望ましい. 表 1 に主観評価実験の評価環境を示す.

主観評価実験として広く認知・活用されているものに国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R: International Telecommunication Union Radio communications Sector)<sup>21)</sup> と国際電気通信連合電気通信標準化部門 (ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)<sup>22)</sup> が規定する主観評価方法がある. ITU-R の評価方法が, 放送を意図した高品質な映像を対象としているのに対して, ITU-T の評価方法は, ビデオフォンやビデオ会議などのマルチメディア通信向けの映像を対象としている. 提案システムは, 映画コンテンツを対象としているため, ITU-R が規定する主観評価法を採用した. ITU-R の主観評価には, 通信路における映像品質劣化を評価する二重刺激連続品質尺度法 (DSCQS: Double Double-stimulus continuous quality-scale) と映像への妨害度合いを評価する二重刺激妨害尺度法 (DSIS: Double-stimulus impairment scale) があるが, 提案システムのノイズ光源は映像に対する妨害と見なせるため, ITU-R の BT.500<sup>23)</sup> が規定する二重刺激妨害尺度法により妨害度合いの主観評価実験を行い, 提案システムの妨害効果の有効性を検証した. 評価映像の選定については, 主観評価用の標準動画像<sup>24)</sup> が

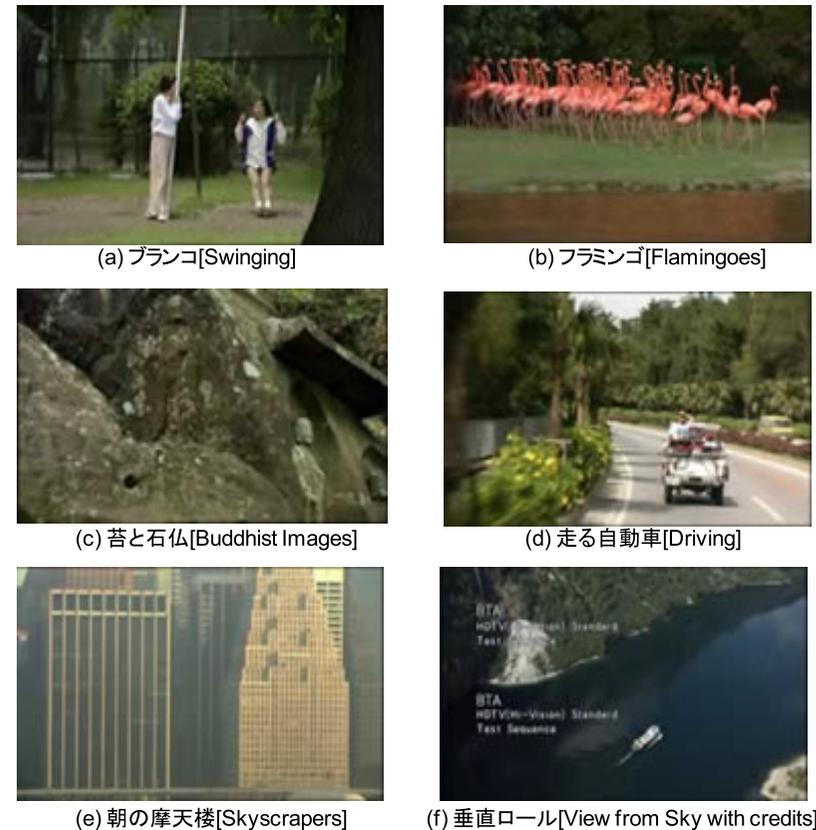


図 8 評価映像  
Fig. 8 Evaluated pictures.

ら, カメラのズームイン, カメラのパン, 被写体のゆっくりした動きと速い動き, 映画特有のスパ(字幕)への影響, さらに, 映像の波長や空間周波数を考慮して図 8 に示す 6 種類の異なる映像を選び, 評価映像とした. 評価映像の特性を次に示す.

評価映像の特性

- ブランコ [Swinging]

緑の木々の茂る公園で, 金網のフェンスを背景にしてブランコに座る白い服を着た女性を

表 2 評価尺度  
Table 2 Level of disturbance and rating scale.

妨害度合	評点
妨害が全く認められない	5
妨害がわかるが気にならない	4
妨害が気になるが邪魔にならない	3
妨害が邪魔になる	2
妨害が非常に邪魔になる	1

撮影した画像である。被写体はほとんど静止しているが、カメラがゆっくりズームインする。

- フラミンゴ [ Flamingoes ]

芝生を歩くフラミンゴの群れの風景である。赤いフラミンゴの動きに合わせてカメラがパンする。

- 苔と石仏 [ Buddhist Images ]

崖に安置されている石仏群を、カメラがゆっくりとパンした画像である。

- 走る自動車 [ Driving ]

緩くカーブした道路を走る自動車を撮影した画像である。カメラは追走している車に乗っており、周囲の景色が早く移動する。

- 朝の摩天楼 [ Skyscrapers ]

朝靄に包まれた建物風景。映像に建物の小窓など細かい部分が多く高周波成分が多い。カメラはゆっくりと水平にパンする。

- 垂直ロール [ View from Sky with credits ]

北欧の山河を撮影した画像に字幕を付加したものである。河川の部分は、映像に変化が少なく低周波成分が多い。空撮のため画面全体が細かく振動しながらゆっくりと動くとともに、字幕が垂直方向へスクロールされる。

## 5.2 評価手順

ITU-R の BT.500 が規定する二重刺激妨害尺度法の手順は下記のとおりである。

Step1. 評価者に従来システムの投影映像を提示後、提案システムの投影映像を提示。

Step2. 評価者は、従来システムの投影映像に対する提案システムの投影映像の妨害の度合いを表 2 の評価尺度より選択し、評点を与える。

Step3. 上の Step1 と Step2 を (a), (b) の場合について 15 人の評価者に対して行い、15 人の評価者の評点の平均値を評価値とする。

上記の評価実験を 6 種類の評価映像と提案システムの 5 種類の点滅周波数（全点灯，5，

10，15，20 Hz）に対して実施した。

## 5.3 評価結果

### 5.3.1 ケース (a) 評価者が投影映像を直接見た場合

本ケースは、観客がスクリーンに投影された映像を観賞する場合を想定しており、ノイズ光源が知覚されないことが望ましい。主観評価の結果、評価した 6 種類の評価映像において、評価者 15 人全員の評点は 5（“妨害がまったく認められない”）であり、提案システムのノイズ光源は知覚されなかった。提案システムは実用に値する可能性を満たしていると考えられる。

### 5.3.2 ケース (b) ビデオカメラにて録画した投影映像を評価者が見た場合

評価には 2 種類のデジタルビデオカメラ（CMOS，CCD 搭載）に加え、CMOS カメラ付き携帯電話を使用した。提案システムに表示した映像を各カメラで撮影した図を図 9 に示し、カメラごとの主観評価結果を図 10，図 11，図 12 に示す。グラフの縦軸は評価値、横軸は点滅周波数を示し、点滅周波数が全点灯の場合は 0 Hz と表記した。グラフのマーカの縦線は、各評価映像の評価値（評点の平均値）を  $\mu$ ，標準偏差を  $\sigma$  としたときの評点のばらつきの範囲  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$  を示したものである。

評価の結果、2 種類のデジタルビデオカメラ（CMOS，CCD 搭載）により録画した映像では、提案システムによる妨害効果が最も高いのはノイズ光源の点滅周波数が 10 Hz の場合であり、すべての評価映像において評価値が 2（“妨害が邪魔になる”）以下となった。カメラ付き携帯電話により録画した映像では、評価したすべての評価映像および点滅周波数においてデジタルビデオカメラより高い妨害効果が得られた。

以下にカメラごとの評価結果の詳細を述べる。

#### (1) CMOS デジタルビデオカメラ

提案システムによる妨害効果が最も低いのは、すべての評価映像でノイズ光源が全点灯した場合であり、6 種類の評価映像で評価値は 3.1 から 3.9 の値をとった。ノイズ光源が点滅した場合は、6 種類の評価映像で評価値は 1.7 から 3.2 の値をとった。提案システムによる妨害効果が最も高いのは、すべての評価映像でノイズ光源の点滅周波数が 10 Hz の場合であり、6 種類の評価映像で評価値は 1.7 から 2.0 の値をとり、評価値は 2（“妨害が邪魔になる”）以下となった。これは、提案システムにおいて Bartley 効果が有効であることを示すものである。評価映像ごとの傾向として、輝度値の低い映像（“ブランコ”）では、ノイズ光源による妨害効果が高くなり、輝度値の高い映像（“朝の摩天楼”）では、ノイズ光源による妨害効果は低くなった。各評価者による評点のばらつきは、後述するカメラ付き携帯電話

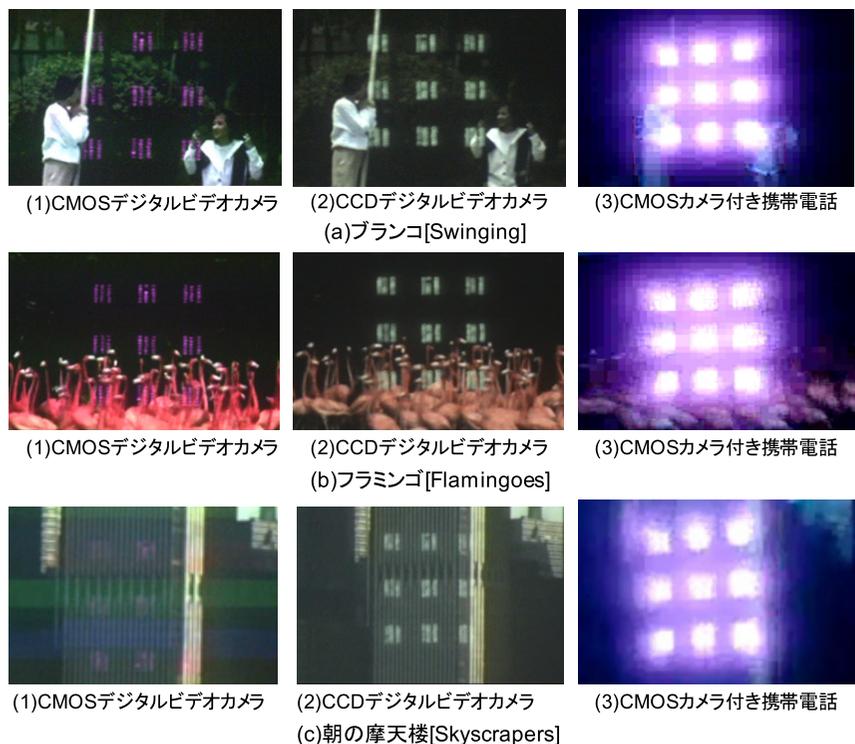


図 9 評価結果 (撮影映像)  
Fig. 9 Evaluation results (Shot videos).

の評価結果と比べると大きく、妨害効果に個人差があると考えられる。また、一部の評価映像では、映像の色調や周波数特性がノイズ効果に影響を与える箇所があった。具体的には、図 9 (b)(1) に示すように、“フラミンゴ”で映像の一部分(フラミンゴの赤色部分)とノイズ光の色調が重なることや、図 9 (c)(1) に示すように、“朝の摩天楼”でビルの窓枠配置パターンとノイズ光のパターンが重なることで、ノイズ光が認識しにくい箇所があった。しかし、“フラミンゴ”では、フラミンゴの赤色部分以外のノイズ効果は十分であり、“朝の摩天楼”では、ビル群が横にパンニングしていることから、上述のビルとノイズ光のパターンが重なる状況は全映像の一部であり、ノイズ効果の減少は限定的であった。さらに、赤外 LED を点滅させていることによるノイズ効果があるため、主観評価結果では、双方の映像

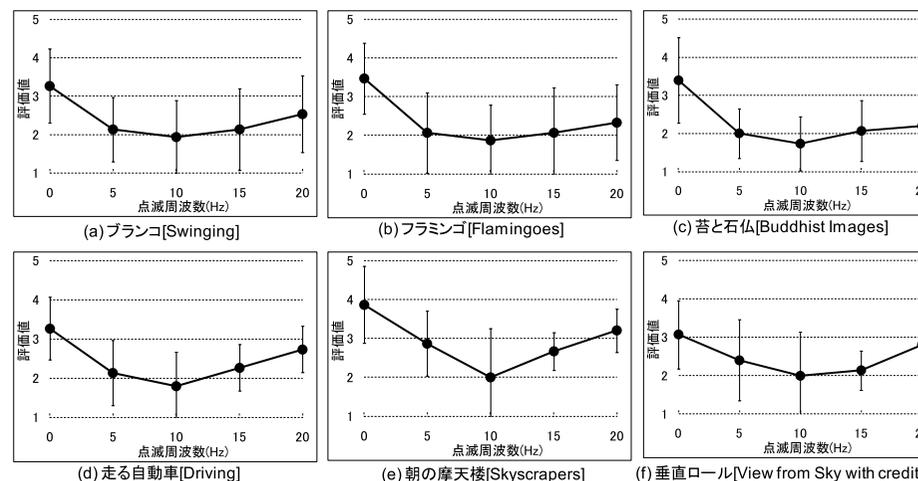


図 10 評価結果 (CMOS デジタルビデオカメラ)  
Fig. 10 Evaluation results (CMOS-based digital camcorder).

とも、点滅周波数 10 Hz で評価値は 2 (“妨害が邪魔になる”) 以下となった。

(2) CCD デジタルビデオカメラ

提案システムによる妨害効果が最も低いのは、すべての評価映像でノイズ光源が全点灯した場合であり、6 種類の評価映像で評価値は 2.6 から 3.5 の値をとった。提案システムによる妨害効果が最も高いのは、すべての評価映像でノイズ光源の点滅周波数が 10 Hz の場合であり、6 種類の評価映像で評価値は 1.5 から 2.0 の値をとり、評価値は 2 (“妨害が邪魔になる”) 以下となった。これは、CMOS デジタルビデオカメラの評価結果と同様に、Bartley 効果が有効であることを示すものである。評価映像ごとの傾向および各評価者による評点のばらつきについても、CMOS デジタルビデオカメラの評価結果と同様の傾向を示した。

(3) CMOS カメラ付き携帯電話

30 カ所の評価ポイント (6 種類の評価映像 × 5 種類の点滅周波数) すべてにおいて、評価値は 2 (“妨害が邪魔になる”) 以下となり、他のデジタルビデオカメラと比較して高い妨害効果を示した。これは、携帯電話には一般的にコストや軽量化のため赤外カットフィルタが付けられていないため、高い妨害効果が得られたと考えられる。点滅周波数 15 Hz の評価値が、全点灯の評価値と同様に高くなっているのは、CMOS カメラ付き携帯電話の映像撮影時のフレームレートが他のデジタルビデオカメラのフレームレートと比較して小さい

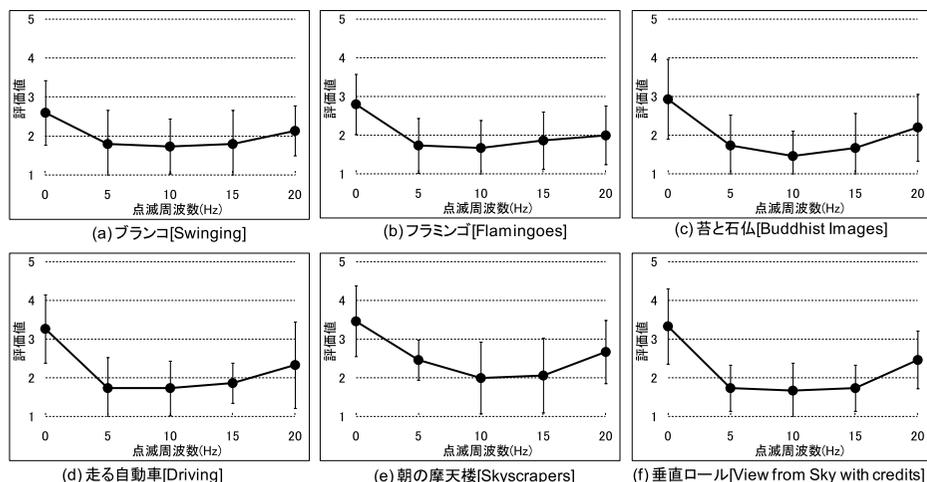


図 11 評価結果 ( CCD デジタルビデオカメラ )

Fig. 11 Evaluation results ( CCD-based digital camcorder ).

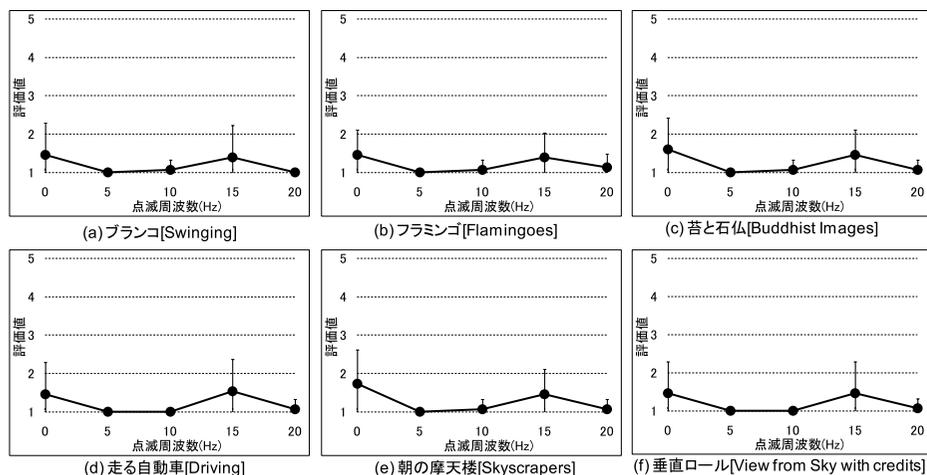


図 12 評価結果 ( カメラ付き携帯電話 )

Fig. 12 Evaluation results ( Cell phone with CMOS-based camera ).

( 15 fps [frames/sec] ) ため、15 Hz でノイズ光源を点滅させた場合、携帯電話のカメラ側では連続光として記録されるためである。各評価者による評点のばらつきは、CMOS および CCD デジタルビデオカメラの場合に比べて小さく、評価者や評価映像によらずつねに妨害することができる。

## 6. おわりに

映像の盗撮防止は、著作権保護のための本質的な対策である。法制度面では、映画の盗撮の防止に関する法律が施行され、技術面では、電子透かしを用いた映像盗撮抑止方式が提案されているが、いずれも盗撮行為を直接的に防止することができなかった。本論文では、人間とデバイスの分光感度特性の違いを利用して、人間の視覚に影響を与えずに撮影映像にノイズを重畳する光源を表示装置に組み込むことで、既存の撮影機器に新たな機能を追加することなく、スクリーンやモニタに表示した映像の盗撮を直接的に防止する方式を提案した。提案方式で用いるノイズ光源は、裸眼による視覚的劣化を防止しながら撮影時のノイズ効果を向上させることが求められるが、赤外 LED への短波長カットフィルタの適用と Barley 効果による光源点滅により、通常の視聴による視覚的劣化がなく、撮影映像にのみ妨害が認められる方式を実現した。提案方式を映画用 100 インチスクリーンに組み込んだ盗撮防止システムを開発し、主観評価実験を通じて提案方式の有効性を示した。

提案方式の問題点として、盗撮者が、可視域のみを通過させる帯域通過フィルタや、赤外領域のみをカットする帯域カットフィルタを撮影機器に装着して盗撮を行うことで、提案方式のノイズ効果が機能しなくなることがあげられる。すなわち、提案方式は上述の攻撃に対して脆弱であるという問題がある。この攻撃への対策として、フィルタの鏡面反射特性に着目し、表示装置側に赤外カメラを設置することで、フィルタの赤外鏡面反射を検知して、当該攻撃を検知する手法が考えられる。この手法は、表示装置側に向けて一定時間固定された平面状の鏡面反射物を検知することを目的としており、室内や館内に元々存在する鏡面反射物を検知処理時に排除することで、人為的に持ち込まれた上述の特徴を持つ鏡面反射物を効率良く検知することが可能になる。今後は、この手法の確立とプロトタイプ実装について検討する必要がある。

また、盗撮防止システムにおける赤外発光ユニットの配置方法についても今後検討が必要である。4.1.3 項で述べた赤外発光ユニットの配置は、アスペクト比 4 : 3 の 100 インチスクリーンを対象としており、スクリーンのサイズやアスペクト比が上記スクリーンと異なる場合に、ユニットの配置がノイズ効果に与える影響を今後検討する必要がある。

さらに、今後、3D の映画の急速な普及が予想され、3D 映画への提案方式の適用も重要な課題である。3D 映画における左右の映像の分離は、偏光板や液晶シャッタをビデオカメラに装着することで容易に実現可能であり、分離した映像が違法に流通する可能性があるため、3D 映画の盗撮防止も著作権保護の本質的な課題である。提案方式は 3D 映画にも適用可能な方式であり、盗撮防止対策となりうる。3D 映画の方式には、偏光方式とアクティブシャッタ方式があるが、アクティブシャッタ方式は、赤外線を利用して同期をとり液晶シャッタの開閉を制御しているため、提案方式の赤外線と干渉を起こす可能性がある。今後はアクティブシャッタ方式と提案方式の干渉の分析を行い、干渉がある場合には、提案方式の点滅周波数を変更するといった改良を検討する必要がある。

謝辞 本論文は、総合研究大学院大学学融合推進センターの助成を受けたものである。

### 参 考 文 献

- 1) MPAA (米国映画製作者連盟): 映画作品に対する著作権侵害サイト.  
<http://www.mpa.org/piracy.asp>
- 2) 産経ニュース. <http://sankei.jp.msn.com/entertainments/entertainers/090607/tnr0906070842001-n2.htm>
- 3) 映画館に行こう! 実行委員会: 映画盗撮防止法 Q&A.  
<http://www.eiren.org/tousatuboushi.html>
- 4) 総務省電子政府の総合窓口イーガブ: 映画の盗撮の防止に関する法律(平成十九年五月三十日法律第六十五号). <http://law.e-gov.go.jp/announce/H19HO065.html>
- 5) Haitisma, J. and Kaler, T.: A Watermarking Scheme for Digital Cinema, *Proc. International Conference on Image Processing*, Vol.2, pp.487-489 (2001).
- 6) 合志清一, 真島恵吾, 中村晴幸, 山田浩之, 藤井亮介, 伊藤 浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷愉佳里: 再撮耐性を有する電子透かし, *放送技術*, Vol.61, No.5, pp.107-112 (2008).
- 7) 中村晴幸, 合志清一, 藤井亮介, 伊藤 浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷愉佳里: CRT 盗撮画像に耐性を有する電子透かし, *映像情報メディア学会誌*, Vol.60, No.11, pp.1778-1788 (2006).
- 8) Nakashima, Y., Tachibana, R. and Babaguchi, N.: Watermarked Movie Soundtrack Finds the Position of the Camcorder in Theater, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.11, No.3, pp.443-454 (2009).
- 9) 日本国際映画著作権協会 (JIMCA). <http://www.jimca.co.jp/jimca/index.html>
- 10) NHK 解説委員室. <http://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/200/3824.html>
- 11) 金野和弘: デジタル著作権管理 (DRM) に関する研究, *社会技術研究会*, Vol.3, pp.205-213 (2005).
- 12) 甲斐真典: ストリーミング配信での著作権保護 (DRM) と配信ネットワーク (CDN),

ユニシス技報, Vol.76 (2003).

- 13) CIE (International Commission on Illumination). <http://www.cie.co.at/>
- 14) 高木幹夫, 下田陽久 (編): 新編 画像ハンドブック, 東京大学出版会 (2004).
- 15) 米本和也: CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用, CQ 出版社 (2003).
- 16) BITRAN: CCD 分光感度特性. <https://www.bitran.co.jp/ccd/character/>
- 17) カメラ映像機器工業会 (CIPA): デジタルカメラの感度規定.  
<http://www.cipa.jp/hyoujunka/kikaku/pdf/>
- 18) 市橋正光: 紫外線による皮膚障害とアレルギー疾患, *日本アレルギー学会*, Vol.56, No.7, pp.670-678 (2007).
- 19) Halstead, W.C.: A note on the Bartley effect in the estimation of equivalent brightness, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.28, No.6, pp.524-528 (1941).
- 20) 神崎宏一, 辰巳 浩, 外井哲志, 山下三平: 視点移動に着目した屋外歩行実験と室内実験の比較分析, *土木学会年次学術講演会講演概要集*, Vol.60, pp.405-406 (2005).
- 21) ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunications Sector).  
<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=rhome&lang=en>
- 22) ITU-T (Telecommunication Standardization Sector). <http://www.itu.int/ITU-T/>
- 23) Rec. ITU-R BT.500-11: Method for the subjective assessment of the quality of television pictures (2002).
- 24) NHK エンジニアリングサービスシステム評価用標準動画像.  
<http://www.nes.or.jp/standardimage/imagelist.html>
- 25) 光産業技術振興協会: LED のレーザ安全規格 (IEC 60825-1) 適用除外の決定.  
<http://www.oitda.or.jp/main/st/st77-j.html>
- 26) 光産業技術振興協会: 平成 18 年度光産業技術標準化シンポジウム: LED 照明の安全性—その人体への安全性と国際規格の適用 (2006).
- 27) 日本建築学会 (編): 建築資料集成 I, p.13, 丸善 (1978).

### 付 録

#### A.1 赤外 LED の安全性

赤外 LED に使用される LED がレーザ安全規格の適用対象になったのは、光ファイバ通信のレーザ安全規格である IEC 60825-2 が制定されたことに關連してレーザ安全規格の基本規格である IEC 825 (当時) が改定され IEC 60825-1 として 1993 年 11 月に改正されたときである。光ファイバ通信ではレーザだけでなく LED も光源として使われていること (LED 光源は光ファイバの中を通ることでコヒーレンス性が出てくる) から IEC 60825-2 (光ファイバ通信のレーザ安全規格) の中で LED も適用対象として組み込まれたことに始まっている。このとき、IEC 60825-1 の適用範囲に LED が適用対象として明確に規定され

ることになった<sup>25)</sup>。ところが、2006年7月にCIE(国際照明委員会)の国際規格「CIE S 009:光源及び照明機器の光生物学的安全性」がIEC 62471としてIEC規格化されたことにより、LEDはレーザ安全規格から分離され、一般の光源と同等の安全基準が適用されている<sup>26)</sup>。

#### A.2 冷却ファンのノイズと振動が映画観賞に与える影響

冷却ファン1個の音圧レベルは、製品性能から1m離れた距離では測定値23dBである。4.1.3項で述べたように、100インチスクリーンの裏面中央部に縦横3個の冷却ファンを赤外発光ユニットに付けている。

映画館およびホームシアタの視聴環境の認定業務を行うTHX社は、ホームシアタにおけるスクリーンサイズと視聴距離の関係を定めており、ハイビジョン映像(1,920×1,080)の場合、画面の横幅が、視聴者の視野角(水平)の36°以内、標準画質映像(720×480)では、30°以内を推奨している。この基準によれば、視聴距離 $L$ は、100インチスクリーンの横幅を $W$ (=2,032mm)、視野角を $\theta$ とすると、

$$L = W/2 \tan(\theta/2)$$

と表せるため、100インチスクリーンを視聴するのに望ましい視聴距離 $L$ は、ハイビジョン映像では3,127mm、標準画質映像では3,792mmとなる。

仮に視聴距離を2m(望ましい視聴距離より近い距離)としたとき、この冷却ファン9個の2m離れた距離での音圧レベルは、最大30.1dBとなる。これはラジオスタジオや中規模劇場のノイズレベルと同等であり、5m離れてもささやき声を聞くことができるノイズレベルである<sup>27)</sup>。また、冷却ファンを取り付けた赤外発光ユニットは、スクリーン背面のスチームフレームに吊るされており、冷却ファンの振動がスクリーンに直接伝わらない構造を持つ。

以上により、冷却ファンのノイズと振動が映画鑑賞に与える影響はきわめて小さいものと考えられる。

(平成22年4月27日受付)

(平成22年11月5日採録)

#### 推薦文

本論文は、スクリーンやモニタに表示した映像をデジタルビデオカメラで違法に撮影する盗撮行為を防止する方式を提案するものである。提案方式では、撮影映像にノイズを重畳する光源を映像表示装置に組み込むことで、人の視覚には影響を与えずに、かつ、既存のデジ

タルビデオカメラに新たな機能を追加することなく盗撮防止方式が実現されている。したがって、シンプルで実用性が非常に高いシステムであるといえる。さらに、本研究では提案方式が実装されており、それによって評価実験も行われていることから、提案方式の有効性も信頼できるものとなっている。よって、推薦論文に十分値するものと判断し、推薦する。

(コンピュータセキュリティ研究会主査 菊池浩明)



山田 隆行(学生会員)

2000年防衛大学校理工学研究科情報数理専攻修了。2008年より総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻博士後期課程に在学中。2010年辻井重男セキュリティ学生論文賞(情報セキュリティ学生賞)、映像情報メディア学会藤尾フロンティア賞、画像電子学会画像電子技術賞各受賞、画像電子学会会員。



合志 清一

1981年早稲田大学理工学研究科博士前期課程修了。同年NHK入局。1984年よりNHK放送技術研究所において、映像信号のデジタル信号処理、伝送、番組応用、電子透かしの研究に従事。2008年より、(株)シャープにおいて、次世代テレビの研究開発に従事。現在、ディスプレイシステム研究所副所長。早稲田大学大学院非常勤講師、博士(工学)。1985年、1999年放送文化基金技術賞、1997年映像情報メディア学会進歩賞、2010年画像電子学会画像電子技術賞、2008年映像情報メディア学会船井賞、2010年映像情報メディア学会藤尾フロンティア賞各受賞。電子情報通信学会、映像情報メディア学会、画像電子学会各会員。



越前 功 (正会員)

1997年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了(応用物理学). 同年日立製作所入社, システム開発研究所を経て, 2007年より国立情報学研究所コンテンツ科学研究系准教授. 同年総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻准教授を兼務. 2010年4月よりドイツ・フライブルグ大学計算機科学・社会情報学研究所客員教授. メディアセキュリティの教育研究に従事. 博士(工学). 2000年日立製作所社長技術賞, 2005年本学会論文賞, 2006年IEEE IHH-MSP06, Best Paper Award, 2008年電子情報通信学会ISS活動功労賞, 2010年映像情報メディア学会藤尾フロンティア賞, 画像電子学会画像電子技術賞各受賞. IEEE, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会会員, 画像電子学会各会員.

---