

# 高輝度高速フレームレート LED ディ스플레이の開発と応用

山 本 裕 紹

## Development and Applications of High-Frame-Rate LED Display with High Brightness

Hirotsugu YAMAMOTO

We have developed a high-frame-rate light-emitting diode (LED) display. Full-color images with high brightness ( $5000 \text{ cd/m}^2$ ) are refreshed at 480 frames per second. In order to transmit such a high frame-rate signal via conventional 120-Hz digital video interface (DVI), a spatiotemporal mapping is introduced for its signal input. Four adjacent pixels in each frame in DVI signal are converted into successive four fields by a video processor for LED panel. The developed 480-fps LED display was utilized for stereoscopic 3D display without glasses and image interpolation has been demonstrated. Furthermore, the developed high-frame-rate LED display has been utilized for a new signage technique based on a spatiotemporal steganography. A text is hidden in successive frames so that it is unnoticeable because we cannot distinguish high frame rate images. The hidden text can be decoded by viewing through a waving hand.

**Key words:** light-emitting diode display, digital signage, steganography, stereoscopic display

情報通信技術により書き換え可能な看板（デジタルサイネージ）がこれまでの印刷看板に置き換わるように数を増やしている。駐車場には LED による文字で空き情報が表示され、レストランの前ではおすすめのメニューの案内が流れるように表示され、駅前の大型ショッピングビル壁面では映画の予告編が LED スクリーンに上映されるなど、LED によるデジタルサイネージの普及が進んでいる。また最近では、待ち時間に広告を見るよりもスマートフォンの画面を操作することのほうが多い傾向もみられる。このようにメディアがあふれる中で、デジタルサイネージの注目度を高める新しい技術が求められている。

注目を集めるには、何らかの楽しみを提供することが効果的である。人間には情報を知覚できないように時空間符号化を施した画像技術<sup>1,2)</sup>は、意識されなかった画像を復号するときに、発見的な楽しみを与える。このような画像技術をデジタルサイネージで提供できれば、楽しみながら広告を見られるため、広告に対する視聴率の向上と注目の維持に役立つと期待される。

本稿では、従来のビデオレートよりも1桁以上高速にフルカラー映像を表示する LED 表示システムの開発と、そのデジタルサイネージ応用について解説する。高輝度 LED により生じる残像を利用した映像表示<sup>3,4)</sup>が実現されている。本稿では、三次元（以下 3D とする）表示の解像度低下の課題を高速 LED により克服する事例<sup>5)</sup>、ならびに、高速性による広告向けの暗号表示法<sup>6)</sup>について紹介する。さらに、運動視差による 3D 表示など、今後の発展について述べる。

### 1. 高フレームレート LED 表示システム

高フレームレートのフルカラー映像を表示するために、デジタルサイネージ用の大画面 LED パネル（AVIX CV3021）をベースに映像信号処理と LED 駆動集積回路の再構築を行った。この大画面 LED パネルは、横 8 画素×縦 8 画素でユニット化された LED パネルのタイリングにより構成される。各 LED ユニットに搭載された LED 駆動集積回路により、各画素の LED ランプの発光時間を変調する

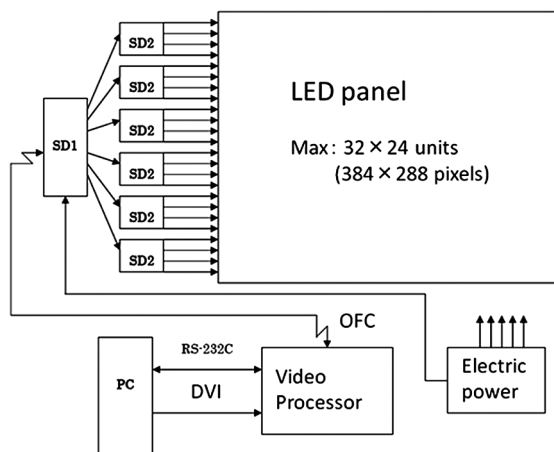


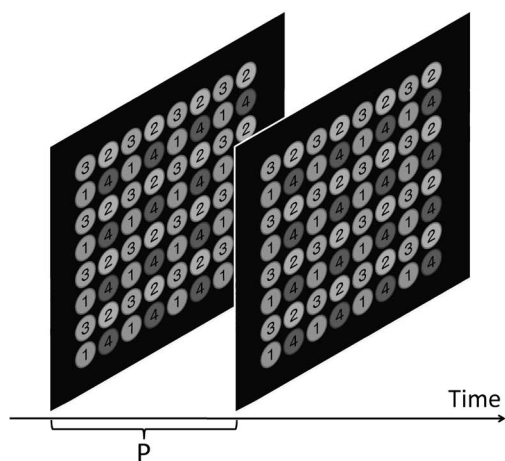
図1 高速 LED 表示システムの構成. SD は信号分配器, OFC は光ファイバーケーブル, DVI はデジタルビデオインターフェース, PC は映像表示用のコンピューター, RS-232C は表示モード設定などに用いるビデオプロセッサ制御用のシリアル通信インターフェースを表す.

ことで, 各色 12 ビットでの階調再現が可能である. 高速 LED 表示システムの構成を図 1 に示す. 画像表示用コンピューター(PC) から 120 Hz のデジタルビデオインターフェース (DVI) を経由して, 映像信号が LED 用ビデオプロセッサに入力される. ビデオプロセッサには, PC からシリアル通信 (RS-232C) によりコマンド送信および状態受信を行うことができ, コマンドにより通常表示モード (毎秒 120 フレーム) と高速表示モード (毎秒 480 フレーム) の切り替えが可能である. ビデオプロセッサからは, LED 近傍に設置された信号分配器 (SD1) までクロックと映像信号が光ファイバーケーブル (OFC) を通じて伝送される. これらの信号は, SD1 からメタルケーブルにより LED ユニットの横 1 列ごとに設置された 2 段目の信号分配器 (SD2) に伝達される. SD2 から LED ユニットに対して信号が伝達される.

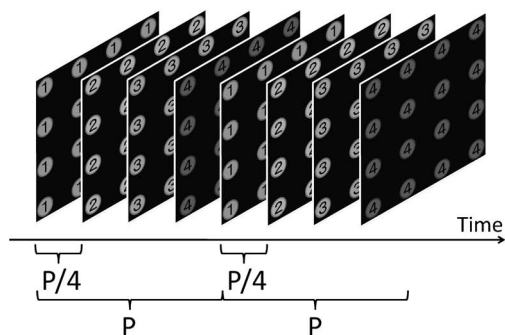
高速表示を実現するために, ビデオプロセッサにおける DVI 信号を LED 駆動信号に変換する処理回路, および, 各 LED ユニットにおける LED 駆動集積回路において, 空間符号化された信号の時間展開を行う機能を実装した.

### 1.1 4 倍速表示のための空間符号化

入力に用いられる DVI 信号 (毎秒 120 フレーム) の 4 倍のフレームレートで高速表示を行うために, 4 枚のサブフレームの情報を 1 フレームに含める空間符号化を行った. DVI 信号で伝達される映像情報とビデオプロセッサによる時空間変換の関係を図 2 に示す. ビデオグラフィックカードからは一定間隔  $P$  (120 Hz の信号利用時には 8.3 ミリ秒) で空間符号化された映像信号が LED パネル用ビデオプロセッサに入力される. 1 フレーム中の各画素は縦



(a)



(b)

図2 空間符号化された入力画像信号を 4 倍速で表示する時空間マッピングの概要. (a) 4 倍速表示のための空間符号の構成. 一定間隔  $P$  で空間符号化された映像信号が LED パネル用ビデオプロセッサに入力される. (b) 空間符号の時間展開. 1 番から 4 番に番号付けされた補助画素で構成された映像が  $P/4$  の時間間隔で LED パネルに表示される.

横各 2 画素の補助画素で構成される. 補助画素に記された番号は, LED に表示される際のサブフレームの順番である. この空間符号がビデオプロセッサにより復号される. 1 番から 4 番に番号付けされた補助画素で構成されたサブフレームが, 入力フレームの 4 分の 1 の時間間隔 (2.08 ミリ秒) で LED パネルに表示される.

### 1.2 高輝度 LED パネルによる高速表示

高速表示実験に用いた LED ユニットの構成を図 3 に示す. 中央下部に LED 駆動集積回路が位置する. 1 つのユニットは縦横各 12 画素を有する. 各画素は赤, 緑, 青の LED で構成され, 画素ピッチは 20 mm である. 16 個の LED ユニットの正方形に並べて以降の実験を行った.

空間符号の時空間展開を確認するために, 赤, 黒, 青, 緑で構成されるテスト画像を入力した結果を図 4 に示す. 通常表示モードでは, 入力画像と LED パネルが画素ごと

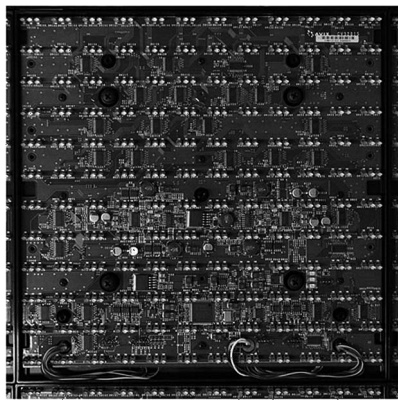


図3 高速表示に用いられたLEDユニット.

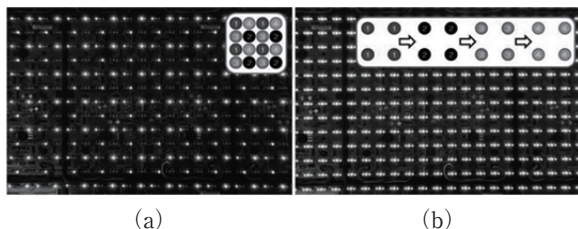


図4 同じ入力映像信号に対する (a) 通常表示モード (毎秒 120 フレーム) と (b) 高速表示モード (毎秒 480 フレーム) での表示の違い.

に1対1対応している. 高速表示モードでは, 肉眼では白色に見える. 高速LEDパネルでの映像切り替えを毎秒1200フレームの高速ビデオカメラを用いて観察した結果を図5に示す. 通常モードでは変化がみられないが, 高速表示モードでは補助画素の画素値に応じた発光の変化が確認された.

## 2. 高速LEDを用いたステレオ式3D表示

LEDを用いた3Dディスプレイには, これまでに, 偏光眼鏡式3Dディスプレイ<sup>7)</sup>, ステレオ画像を光学的に分離することによる眼鏡なし3Dディスプレイ<sup>8-13)</sup>のほか, LEDを動かした際に観察される残像による3Dディスプレイ<sup>14-17)</sup>が報告されている. ここでは, 筆者らが従来から開発してきた眼鏡なし3Dディスプレイを例に, 高輝度の高速映像による画質向上効果について述べる.

### 2.1 パララックスバリアーを用いた立体LEDディスプレイ

大画面のLEDスクリーンを用いて複数人に対して眼鏡なしに3D映像を表示する方法として, 筆者らはパララックスバリアー<sup>18,19)</sup>とよばれる遮光マスク列を用いた両眼視差式の3Dディスプレイを実現してきた. その基本構成を図6に示す. 画像表示面と観察者の間に, 上下にのびたスリット状の遮光マスク列 (パララックスバリアー) が設置されている. 右眼用と左眼用の画像が列ごとに交互に

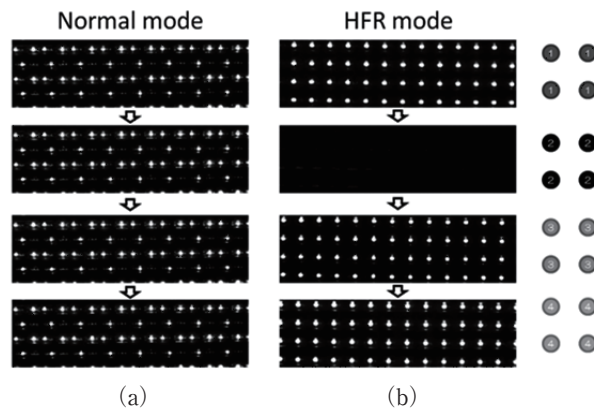


図5 空間符号化された映像信号の復号実験の結果. 通常モード (a) では映像信号の各画素と表示が1対1に対応して毎秒120フレームでLED画面が更新される. 高フレームレート (HFR) モード (b) では空間符号の展開がなされ, 各画素を構成する左上-右下-左下-右上の補助画素の順に毎秒480フレームでLED画面が更新される.

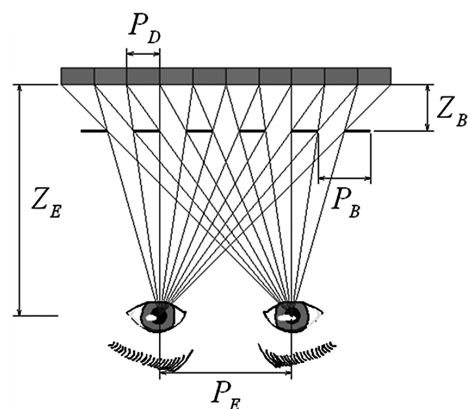


図6 パララックスバリアーの設計 (上面図).

LEDパネル上に表示される. パララックスバリアーの設計により, 観察位置において右眼用と左眼用の画像が分離されて観察される. パララックスバリアーのピッチ $P_B$ は, 設計両眼間隔 $P_E$ とLEDパネルの画素ピッチ $P_D$ により,  $P_B = 2P_E P_D / (P_E + P_D)$ で表される. また, LEDパネルから観察者までの距離を $Z_E$ とすると, LEDパネルからパララックスバリアーまでの距離 $Z_B$ は,  $Z_B = Z_E (2P_D - P_B) / (2P_D)$ で与えられる. すなわち, パララックスバリアーの設置距離により, 観察距離の調節が可能である.

ステレオ画像の観察例を図7に示す. 左眼用と右眼用の画像が列ごとに分離されて観察され, 立体視により奥行きが知覚される.

### 2.2 高輝度映像の残像を利用した画質向上

パララックスバリアーを用いることで, ステレオ画像が眼鏡なしに分離されるが, 遮光マスク列による黒ストライプが観察されるという課題がある. 光源に高輝度LEDを用いる場合には, 観察者の眼の動きにより生じる残像を利

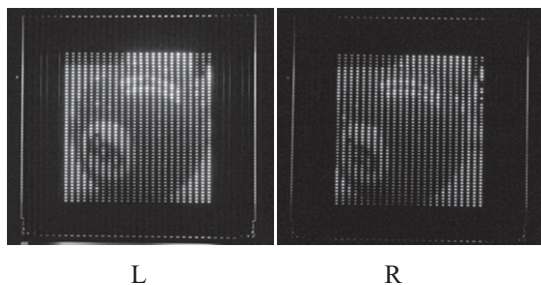


図7 パララックスバリアーにより分離されたステレオ画像の例。

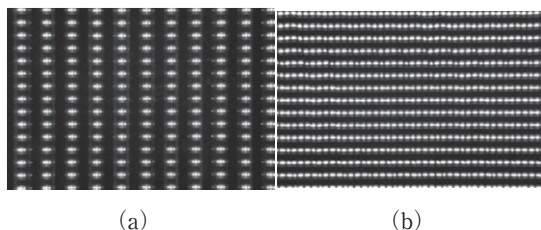


図8 パララックスバリアーを通して観察された画像の詳細。(a) 半数の画素列はパララックスバリアーにより遮光されているため黒色の縞模様が顕著である。(b) カメラを水平方向に動かしながら写真撮影した結果、黒色縞模様が目立たない。

用することで、この黒ストライブを目立たなくできる可能性がある。パララックスバリアーを通して観察される画像の一部を拡大して図8 (a) に示す。黒ストライブが顕著であるが、観察者の眼の動きを模して、カメラを水平方向に動かしながら撮影した結果を同図 (b) に示す。黒ストライブ領域の上にLEDの輝点が観察されることがわかる。

この残像による黒ストライブ領域の補間の効果を毎秒120フレームの通常表示モードと毎秒480フレームの高速表示モードで比較した結果を、図9および図10に示す。高速表示においては、 $96 \times 96$ 画素の映像を入力して図2の時空間マッピングがなされた結果が表示されている。図9 (a) および図10 (a) は、カメラを静止させた状態で撮影した結果である。通常表示、高速表示ともに、遮光部の黒ストライブが顕著である。高速表示モードであっても通常モードとほとんど同じ映像が観察される。これに対して、カメラの向きを右から左に動かしながら撮影した結果を、図9 (b) および図10 (b) に示す。露光時間は $1/60$ 秒である。残像により黒ストライブが消える。さらに、高速表示モードにおいては、図10 (b) でわかるとおり、水平方向にはより細かいテクスチャーが再現されることがわかる。このようなカメラの動きは眼球運動を模しており、大画面LEDパネルを前にして観察者が画面全体を観察しようと眼を動かすことで黒ストライブが残像により消され、高速表示においては映像が空間展開されて観察される可能性を

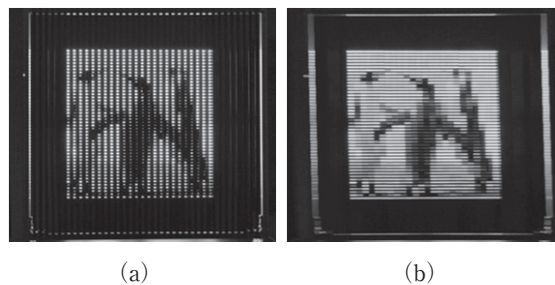


図9 通常表示モード(毎秒120フレーム)において、パララックスバリアーを通じて観察される画像の比較。(a) 静止カメラで撮影。(b) 水平方向にカメラを動かしながら撮影。

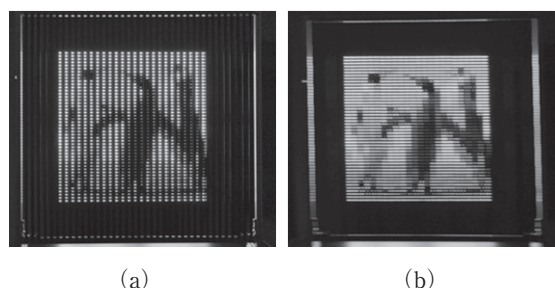


図10 高速表示モード(毎秒480フレーム)において、パララックスバリアーを通じて観察される画像の比較。(a) 静止カメラで撮影。(b) 水平方向にカメラを動かしながら撮影。

示している。

### 3. 手振り復号型ステガノグラフィー

近年、人間には情報を知覚できないように符号化を施した画像を用いた覗き込み防止表示<sup>20-22)</sup>、デジタルカメラの撮影を用いるステガノグラフィー<sup>23)</sup>、構造化された照明光による違法撮影防止技術<sup>24)</sup>などの技術が報告されている。これらの画像技術においては、通常では人間にはわからないように情報が潜在化された画像に対して、何らかの復号操作を行うことで情報が顕在化される。情報の潜在化が重要であるため、これらの画像技術は「アンコンシャス画像技術」と総称される<sup>1,2)</sup>。アンコンシャス画像技術において、意識されなかった画像情報を復号する際に発見的な楽しみが得られる。本稿では、画像を高速に切り替えることにより、潜在情報を見る楽しみを提示する手法を提案する。

高輝度高フレームレートのLED表示を用いて、人には弁別できないほど高速に映像を切り替えれば、時間軸上で符号化されたアンコンシャス画像技術が可能になる。視覚の時間周波数特定について、1点を凝視する観察下においては、点滅周期に対するコントラスト感度は8 Hz付近にピークがあり、30 Hzを超えるとコントラストがほとんど知覚されないことが報告されている<sup>25)</sup>。映像のフレーム

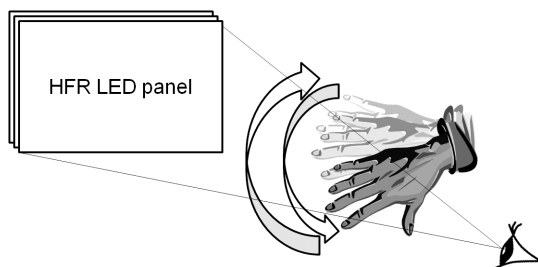


図11 高フレームレート (HFR) LED パネルを用いた手振り復号型ステガノグラフィーの概念図. 目の前で手を振りながら観察すると透かし情報が復号される.



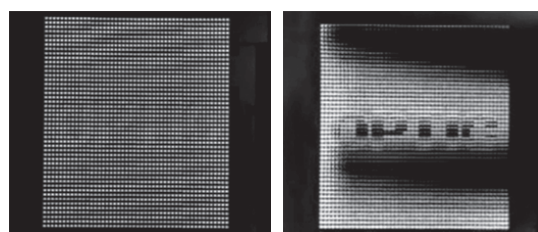
図12 手振り復号型ステガノグラフィーの表示画像と知覚される画像の例. 左辺に示された画像対がLEDパネル上で高フレームレートで交互に表示されると、肉眼では、右辺に示されたように全面が灰色に見える。

レートと得られる質感に関しては、毎秒 240 フレーム以上では評価値がほぼ一定となることが報告されている<sup>26)</sup>。本研究で開発された毎秒 480 フレームの高輝度フルカラー表示において、通常の観察条件下では、連続するフレームが分離されることなく知覚される。

視覚的に弁別不可能な高速フレームレートで表示映像を利用した情報の潜在化を行えば、何らかの方法で復号を行ったときにだけ情報が知覚される。アンコンシャス画像からの情報復号過程における楽しみをデジタルサイネージで提供するためには、特殊な道具なしに復号処理を行えること、かつ、すぐには復号が完了しないことが有効である。そこで、図 11 に示すように、手振りを復号手段に用いた一種の透かし (ステガノグラフィー) 技術を提案する。復号動作を行わない限り、埋め込まれた情報は提示されない。観察者が目の前で手を振りながら LED 画面を見ると、情報が復号される。基本原理を述べた後、各種画像への適用例を紹介する。

### 3.1 情報の潜在化と復号

潜在化は高速性を利用してなされる。通常は、480 Hz で更新される動画をフレームごとに分離して知覚することはできない。たとえば、図 12 の左辺に示された 2 種類の映像が交互に表示された場合には、これらの加法混色がなされた結果が観察者に知覚される。図の左辺は、灰色 (50% 白色) を背景として、一方は白色の文字、他方は黒色の文字が記された画像対である。観察者には、これらが平均化されて図の右辺のように全体が灰色として観察され、潜在化された文字を認識することができない。



(a) (b)

図13 透かし情報が埋め込まれた LED ディスプレイの観察例. とともに毎秒 60 フレームのビデオカメラを用いて、(a) 直接撮影、(b) ビデオカメラの前で手を振りながら撮影した結果。

復号は遮蔽によりなされる。図 12 の左辺のうち一方を遮蔽すると、他方の画像が観察されることになり、潜在化された文字が顕在化する。480 Hz に同期して画面全体を遮蔽するように手を振り続けることは現実的ではないが、LED が高輝度であるため、ほとんどを遮光しながら部分的に復号された映像を見続けていると、文字を読めるようになる。

高速 LED ディスプレイを用いて提案手法を実証した。実験結果を図 13 に示す。図は通常 (毎秒 60 フレーム) のビデオカメラで LED 画面を撮影した様子である。直接観察時には図 13 (a) に示されるとおり、灰色の画面が見えるだけで、潜む文字は判読されない。しかし、目の前で素早く手を振りながら画面を観察すると、図 13 (b) に示されるように文字が復号されていることがわかる。

### 3.2 画像への透かし埋め込み

手振り復号型ステガノグラフィーは加法混色に基づいて秘密画像を潜在化させる。加法混色の結果をイラストや自然画像にすれば、通常観察時には何らかの映像として観察しながら、手振りを行うことで復号が可能になる。たとえば、街頭の大画面スクリーンを用いてクイズ画面を表示させ、答えは手振りを行いながら得るようにすれば、答えを見たいときに答えを知ることができる。また、広告とともにクーポンコードを伝達するような活用も可能である。

イラストに対して透かし情報を埋め込んだ表示画像を図 14 (a) に示す。これは図 2 に示された空間符号化により連続する 4 枚の画像情報が含まれている。高速 LED ディスプレイに表示された様子を高速カメラ (毎秒 1200 フレーム) で撮影した結果を図 14 (b) に示す。上部の「日本」は赤色 / 青緑色 (シアン) の切り替えにより白色として観察され、中央の「こっき」の文字は、黒色 / 白色もしくは赤色の切り替えにより、日の丸模様が観察される。ここでは復号結果を観察しやすくするために同じ映像を 2 枚続けて表示しているため、補色関係で構成された 2 枚の映像を毎秒

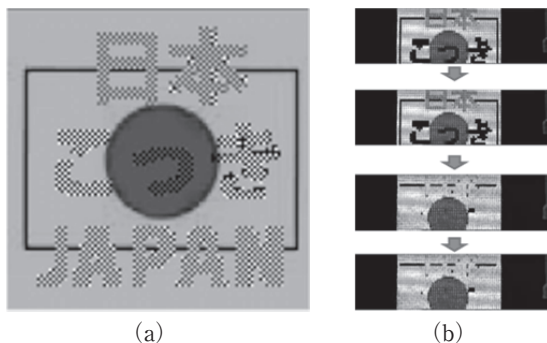


図 14 イラストに対する透かし情報の埋め込み. (a) 空間符号化がなされた表示画像. (b) LED パネルを高速 (毎秒 1200 フレーム) ビデオカメラで撮影した動画の一部.

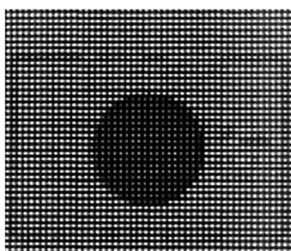


図 15 透かしが埋め込まれた LED 表示画面を通常 (毎秒 60 フレーム) のビデオカメラで撮影した動画の 1 コマ.

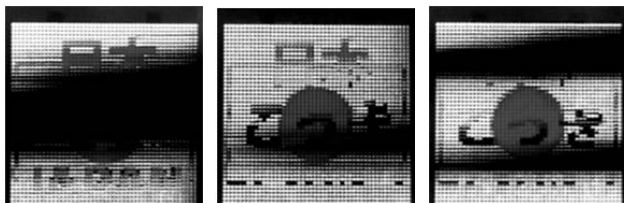


図 16 通常のビデオカメラの前で手を振りながら撮影された動画の一部. 指で遮光された後に透かし情報が部分的に復号されている様子がわかる.

(<http://www.youtube.com/watch?v=BM2N1UUOUNc&feature=youtu.be>)

240 フレームで切り替えて表示している. 図 15 は直接観察した結果であり, 黒色であるべき線の一部が欠けるが, 潜在化された文字は判別できない. 図 16 はビデオカメラの前で手を上下に振りながら LED パネルを撮影した様子である. 隠されたメッセージ上を指が通過した直後には, メッセージが復号されている. ここで示されたように, 部分的に復号された映像が見えるため, 一瞬の復号では全体を読み取れない. 手振り続けながら文字の輪郭を追うことでメッセージ全体を読み取れるようになるため, 注目の維持に効果的である.

#### 4. 高輝度超高速映像による画像技術の新展開

ディスプレイの高速性においては, フレームレートだけ

でなく, 映像信号が入力されてから表示が更新されるまでの時間遅れ (レイテンシー) の短縮も重要である. 現在の高速 LED 表示システムでは, この遅延はおよそ 13 ミリ秒以下である. その内訳は, ビデオプロセッサへのフレーム情報の取り込み (1/120 秒) と LED ユニット内駆動回路メモリーへの転送 (1/480 秒) とパルス幅変調による LED 表示 (1/480 秒) に加えて 2 段の信号分配器における遅延 (0.2 ミリ秒以下) であり, 映像信号の読み込みが遅延要因となっている. 案内標識や警告表示のような固定パターンの場合には, 画像情報を事前にビデオプロセッサ内に蓄積しておくことで, 表示遅延は 5 ミリ秒以下に短縮可能である.

表示遅延が特に問題となるのは, 観察者とのインタラクティブ表示を行う場合である. 観察者の視点位置の動きに応じた視点位置の映像を表示する運動視差による 3D 表示実験では, 視点位置の高速検出に基づく表示により単眼でも安定して奥行きが知覚される結果が得られている<sup>27)</sup>. しかし, 遅延時間を 100 ミリ秒加えると, 奥行き表示の主観評価値が平均以下に低下した. これは, VR (バーチャルリアリティ) の分野で, 100 ミリ秒以下は許容, 200 ミリ秒を超えると VR 酔いを生じる, と経験的に得られている知見<sup>28)</sup> と一致する. このように, 表示の即応性はインタラクティブシステムに重要であるが, そのメカニズムは明らかになっていない. 高輝度高速 LED ディスプレイを視覚刺激ツールとして用いて, 表示遅延が知覚に与える影響を解明することが, 今後の研究課題のひとつである.

また, 高臨場感システムにおいては, 異種の感覚情報を人間に対して調和して提示する方法が求められている. すなわち, 視覚的な三次元映像の提示だけでなく, 聴覚, 触覚 (力や温度), 嗅覚など異なる感覚情報の提示が求められている. 高フレームレートかつ低遅延表示装置を用いることで, 異種の感覚情報と調和して映像情報を提示するシステム構築における同期の問題を解決するとともに, 感覚間の同時性の知覚や知覚情報の融合に関する研究展開が望まれる.

本稿においては高フレームレートで高輝度フルカラー映像を提示する LED 表示システムの構築について空間符号化を中心に解説し, 高速性を利用した応用事例としてステレオ 3D 表示における時間-空間展開による映像の補間効果, 手振りにより復号されるデジタルサイネージ用の新しい透かし表示の実現を紹介した. 高輝度高フレームレート LED ディスプレイは視覚刺激提示ツールとしても有望であり, 人間調和型の情報環境の構築への利用が期待される. これまでのディスプレイ開発においては, 高解像度化,

高コントラスト化, 3D 化, 低消費電力化が進められてきた。ユーザーとのインタラクティブインターフェースとしてのディスプレイの役割が重視されるにつれて, 今後は高速化と即応化が重要な評価指標になり得る。特に即応化は, 全体システムとして最適化が求められる事項であり, 表示パネルや信号処理エンジンをモジュール化した開発ではなく, 表示素子, 信号処理, 光学設計, 視覚特性を含めた総合力が重要であり, 光学分野の果たす役割は大きい。

本研究の一部は, 科学技術進行機構 (JST) による戦略的創造研究推進事業 (CREST) の一環として, 徳島大学大学院の陶山史朗教授, 堤正景氏, シャヒミファルハン氏との共同研究の成果である。

## 文 献

- 1) 山本裕紹: “イントロダクトリートーク: アンコンシャス画像技術とその応用”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18p-J-1 (2010).
- 2) K. Uehira and H. Yamamoto: “New display technology for unconscious information,” *Proc. of 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (IEEE, 2011) 2011-ILDC-335.
- 3) 時本豊太郎, 大石昌利: 実用新案平 05-043021.
- 4) J. Watanabe, H. Ando, T. Maeda and S. Tachi: “Gaze-contingent visual presentation based on remote saccade detection,” *Presence-Teleop. Virt. Envir.*, **16** (2007) 224-234.
- 5) H. Yamamoto, M. Tsutsumi, R. Yamamoto, K. Kajimoto and S. Suyama: “Development of high-frame-rate LED panel and its applications for stereoscopic 3D display,” *Proc. SPIE*, **7956** (2011) 79560R.
- 6) S. Farhan, S. Suyama and H. Yamamoto: “Hand-waving decodable display by use of a high frame rate LED panel,” *Proc. of International Display Workshops (IDW) '11* (Institute of Image Information and Television Engineers (ITE) and Society for Information Display (SID), 2011) pp. 1983-1986.
- 7) H. Yamamoto, S. Muguruma, T. Sato, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Stereoscopic large display using full color LED panel,” *Proc. of International Display Workshops (IDW) '98* (Institute of Image Information and Television Engineers (ITE) and Society for Information Display (SID), 1998) pp. 725-728.
- 8) H. Yamamoto, S. Muguruma, T. Sato, K. Ono, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Optimum parameters and viewing areas of stereoscopic full-color LED display using parallax barrier,” *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C** (2000) 1632-1639.
- 9) H. Yamamoto, M. Kouno, Y. Hayasaki, S. Muguruma, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Enlargement of viewing area of stereoscopic full-color LED display by use of a parallax barrier,” *Appl. Opt.*, **41** (2002) 6907-6919.
- 10) H. Yamamoto, T. Sato, S. Muguruma, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Stereoscopic full-color light emitting diode display using parallax barrier for different interpupillary distances,” *Opt. Rev.*, **9** (2002) 244-250.
- 11) S. Matsumoto, H. Yamamoto, Y. Hayasaki and N. Nishida: “Real-time measurement of a viewer's position to evaluate a stereoscopic LED display with a parallax barrier,” *IEICE Trans. Electron.*, **E87-C** (2004) 1982-1988.
- 12) H. Yamamoto, T. Kimura, S. Matsumoto and S. Suyama: “Viewing-zone control of light-emitting diode panel for stereoscopic display and multiple viewing distances,” *J. Disp. Technol.*, **6** (2010) 359-366.
- 13) H. Yamamoto, H. Nishimura, K. Uchida, K. Ono, Y. Hayasaki and S. Suyama: “Depth perception for moving pictures shown on a large LED display with an aperture grille,” *J. Soc. Inf. Disp.*, **17** (2009) 1031-1036.
- 14) K. Kameyama, K. Ohtomo and S. Sekimoto: “An interactive volumetric display system,” *Proc. TAO 1st Int. Symp. Three-Dimensional Image Communication Technologies* (Telecommunications Advancement Organization of Japan (TAO), 1993), E51-54.
- 15) Y. Kunita, M. Inami, T. Maeda and S. Tachi: “Real-time rendering system of moving objects,” *Proceedings of 1999 IEEE Workshop on Multi-View Modeling and Analysis of Visual Scenes* (IEEE, 1999) pp. 81-88.
- 16) Y. Kunita, N. Ogawa, A. Sakuma, M. Inami, T. Maeda and S. Tachi: “Immersive autostereoscopic display for mutual teleexistence: TWISTER I (Teleexistence Wide-angle Immersive STEReoscope model I),” *Proc. of IEEE Virtual Reality 2001* (IEEE, 2001) pp. 31-36.
- 17) Y. Sakamoto, S. Maruyama and I. Fukuda: “Turn type three-dimensional display system using arrayed light emitting diodes,” *Proc. of International Display Workshops (IDW) '02* (Institute of Image Information and Television Engineers (ITE) and Society for Information Display (SID), 2002) pp. 1257-1260.
- 18) H. E. Ives: “Parallax panoramagrams for viewing by reflected light,” *J. Opt. Soc. Am.*, **20** (1930) 585-592.
- 19) S. H. Kaplan: “Theory of parallax barriers,” *J. SMPTE*, **59** (1952) 11-21.
- 20) H. Yamamoto, Y. Hayasaki and N. Nishida: “Securing information display by use of visual cryptography,” *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1564-1566.
- 21) H. Yamamoto, Y. Hayasaki and N. Nishida: “Secure information display with limited viewing zone by use of multi-color visual cryptography,” *Opt. Express*, **12** (2004) 1258-1270.
- 22) H. Yamamoto, Y. Hayasaki and N. Nishida: “Secure information display with two limited viewing zones using two decoding masks based on visual secret sharing scheme,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 1803-1807.
- 23) R. Shogenji and J. Ohtsubo: “Hiding information using a checkered pattern,” *Opt. Rev.*, **16** (2009) 517-520.
- 24) Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka: “Practical evaluation of illumination watermarking technique using orthogonal transforms,” *J. Disp. Technol.*, **6** (2010) 351-358.
- 25) B. R. Wooten, L. M. Renzi, R. Moore and B. R. Hammond, Jr.: “A practical method of measuring the human temporal contrast sensitivity function,” *Biomed. Opt. Express*, **1** (2010) 47-58.
- 26) Y. Kuroki, T. Nishi, S. Kobayashi, H. Oyaizu and S. Yoshimura: “A psychophysical study of improvements in motion-image quality by using high frame rates,” *J. Soc. Inf. Disp.*, **15** (2007) 61-68.
- 27) 建島一輝, 陶山史朗, 石井 抱, 山本裕紹: “単眼運動視差による 3D ディスプレイ—高速ビジョンプラットフォームによる位置検出を用いた単眼運動視差による 3D 表示—”, 映像情報メディア学会技術報告, **37** (2013) 121-124.
- 28) 前田太郎: “What's virtual?—バーチャルリアリティにおける視覚提示技術の虚実—”, *光学*, **30** (2001) 323-329.

(2013 年 4 月 5 日受理)