

不可視バーコードにおける印刷支援システム

上 條 浩^{†1,†2} 張 綱^{†1} 上 條 昇^{†1}
南 正 輝^{†3} 森 川 博 之^{†3}

筆者らは紙媒体のようなアナログメディアと World Wide Web のようなデジタルメディアを結び付ける技術として不可視バーコード技術の開発を行ってきた。不可視バーコードでは、不可視インクで新聞等の記事に重畳して印刷された 2 次元バーコードをブラックライトで発光させ、それを携帯電話等のカメラで撮影した画像から情報を抽出する。しかしながら、不可視バーコードの印刷に使用する不可視インク、紙媒体、記事に使用されるインク等の組合せによっては、情報抽出時のビットエラー率が非常に高くなり、正しく情報が抽出できない場合がある。このため、不可視バーコードの印刷においては、抽出において適切なビットエラー率を実現できる印刷位置を、実際に不可視バーコードを印刷する前に決定できる印刷支援システムが必要となる。これに向けて、本論文では不可視バーコードの印刷・発光・撮影のプロセスをモデル化し、DTP システム等に組み込む形で最適な印刷位置を決定できる手法を開発した。実験評価を通じ、本手法により十分な性能を持つ不可視バーコード印刷支援システムを実現できることが示される。

A Printing Support System for Invisible Barcode Technology

KOICHI KAMIJO,^{†1,†2} GANG ZHANG,^{†1} NOBORU KAMIJO,^{†1}
MASATERU MINAMI^{†3} and HIROYUKI MORIKAWA^{†3}

As digitalization pervades, demands to connect paper media and digital worlds are increasing. To address these demands, an invisible barcode technology was proposed. In this technology, we overprint invisible barcodes on printed articles and extract the information by illuminating it with a blacklight LED. However, data extraction sometimes doesn't work depending on the combination of invisible ink, the ink used in the article, and other conditions. To address this problem, we propose a printing support system. In this technology, we first simulate an image with a blacklight-illuminated invisible barcode, then extract the barcode information from the simulated image. Parameters to simulate such an image is calculated by pairs of test images. By continuing

the simulation and extraction with various locations, we can lay out the invisible barcodes at appropriate location. Experimental results proved that our printing support system can simulate the extraction results from the actually illuminated images, lay out the invisible barcodes with appropriate position, and can be installed in DTP.

1. はじめに

World Wide Web の世界では、ニュースや記事のハイパーリンクをマウス等でクリックすることにより、容易にそれらの関連情報を取得することができる。一方、新聞や雑誌等の紙メディアに掲載されている項目の関連情報を調べる場合には、別途検索エンジン等を利用して調べる必要がある。そのような操作は Web の操作に慣れている昨今のユーザにとっては大変煩わしいものとなる。このため、紙メディアに対しても Web のハイパーリンクと同等のレベルで、容易に関連情報が取得できることが望ましい。それを実現する手段として、RFID¹⁾、2 次元バーコード²⁾⁻⁵⁾、あるいは電子透かし^{6),7)}等の技術を適用することが考えられる。しかし、RFID は、1 個あたりのコストが高く、大量に発行される新聞、雑誌等への適用は現時点では難しい。QR コード等の 2 次元バーコードも、印刷物のスペースをとってしまう、あるいは印刷物の美観を損ねてしまうため、スペースのない新聞や雑誌の記事への適用は難しい。また、電子透かしは新聞の記事に使用されるようなテキストに対しては、埋め込める情報量が 2 次元バーコード等と比べて少なく、たとえば URL 等を埋め込むことは難しい場合が多い。

それらを解決する技術として、筆者らは不可視バーコード技術の開発を行った⁸⁾。この技術では、新聞等の記事に不可視インク（紫外線領域の光を照射することにより発光する無色透明のインク）で 2 次元バーコードを重畳して印刷する。不可視インクで印刷された 2 次元バーコードから情報を抽出する際には、ブラックライト等でバーコードを発光させ、それを撮影した画像から情報を抽出する。しかしながら、不可視バーコード技術では、不可視イ

†1 IBM 東京基礎研究所
IBM Research-Tokyo

†2 東京大学大学院工学系研究科先端学際工学
Department of Advanced Interdisciplinary Studies, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

†3 東京大学先端科学技術研究センター
Research Center for Advanced Science and Technology, the University of Tokyo

ンク、紙媒体、記事に使われるインク等の組合せに依存して、情報がうまく抽出できない場合がある。たとえば、記事に使われるインクが不可視インクの成分を完全に吸ってしまうような場合には、ビットエラー率が非常に高くなり、情報を抽出することが困難となる。このため、アプリケーションによって決まる適切なビットエラー率（たとえば QR コードのエラー訂正符号で訂正可能なビットエラー率等）を達成できる印刷位置を探索・決定する必要が生じる。

これを解決する方法として、実際に不可視バーコードを重畳したい記事が印刷された紙を用い、不可視バーコードの位置を変化させて印刷し、抽出時のビットエラー率が適切となるような印刷位置を探す方法が考えられる。しかしながら、このようなアプローチでは、印刷対象となる同一の記事を大量に用意して、様々な条件で印刷・抽出を行う必要があり、毎日大量に印刷される新聞等に適用することは困難である。

そこで筆者らは、DTP⁹⁾システムに組み込む形で、実際に不可視バーコードを印刷することなく、抽出時において適切なビットエラー率となるバーコード印刷位置を見つけることができる不可視バーコード印刷支援システムを開発した。このシステムを実現するため、筆者らは不可視バーコードの印刷・発光・撮影のプロセスを Phong illumination model¹⁰⁾をベースにモデル化を行った。不可視バーコード印刷支援システムはこのモデルを用い、不可視バーコードを発光させて撮影した場合の画像（疑似画像）を生成する。その後、この疑似画像を実際に不可視バーコードを印刷したい記事に対して様々な位置で生成し、抽出時のビットエラー率を所望の値とするような印刷位置を求める。

このような印刷支援システムは、電子透かしに対して、いくつかの方法が提案されている^{11),12)}。文献 11)では、電子透かしを埋め込む際に、埋め込み後の画像の画質を劣化させないような条件を算出する手法を提案している。しかしながら、文献 11)は画質の劣化を対象としており、本研究が対象とするような抽出時のビットエラー率の問題に利用することはできない。一方、文献 12)は電子透かしの埋め込み時の信号強度を最大化するような条件を算出する手法を提案している。電子透かしの場合には、透かしと元画像との相関が高いところに透かしを埋め込むことで信号強度を大きくし、抽出時のビットエラー率も小さくすることができる。しかしながら、不可視バーコードでは、埋め込み先の画像と相関が強いところにバーコードを埋め込むと、逆にビットエラー率が大きくなってしまふ。このため、電子透かし用の印刷支援システムを不可視バーコードに適用することはできない。なお、QRコード等の通常の 2 次元バーコードに対しては、それらバーコードが記事や画像に重畳されて印刷されることがないため、適切な印刷位置を求めるような印刷支援システムは必要と

されない。

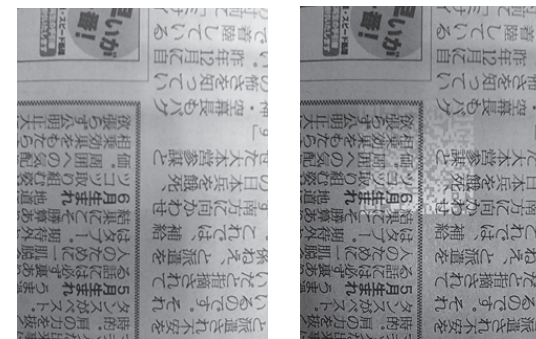
本論文では、不可視バーコード印刷支援システムについて、以下のような構成で述べる。2 章ではまず、不可視バーコード技術における基本的な処理の流れについて説明する。次いで、印刷支援システムの具体的な構成、印刷支援システムで重要となるモデル化、疑似画像生成方法、および印刷位置の決定方法について詳細に説明する。3 章では、疑似画像に基づいたビットエラー率と実際に印刷した際のビットエラー率とを比較することで印刷支援システムの有効性を示し、最後に 4 章で本論文をまとめる。

2. 不可視バーコード印刷支援システム

本章では不可視バーコードの印刷・発光・抽出の一連のプロセスを説明し、印刷支援システムの中核となるモデル化、疑似画像生成、および印刷位置の決定方法について述べる。

2.1 不可視バーコード技術

不可視バーコードは紫外線等により励起されて可視の蛍光を発するような不可視インクを用い、2 次元バーコードを新聞や雑誌の記事等に重畳して印刷したものである。不可視バーコードの印刷に用いられるインクは無色透明であり、印刷物の見栄えに何ら影響を与えることなく、紙面のどこにでも 2 次元バーコードを印刷することができる。図 1 に不可視バーコードの印刷例を示す。図 1 (a) は不可視バーコードをある新聞記事に印刷した画像であり、



(a) ブラックライト非発光時

(b) ブラックライト発光時

図 1 不可視バーコードのサンプル

Fig. 1 An invisible barcode ((a) The image without the blacklight illuminated. (b) The image with the blacklight illuminated).

図 1 (b) はその記事上にブラックライトを照射し、不可視バーコードを発光させた画像である。このとき、不可視バーコードの存在をユーザに知らせるために、バーコードがある部分の記事のフォントや文字の太さを変えたり、記事に下線等を引いたりしても良い。

図 1 (b) においては、不可視バーコードと文字が重畳しているため、携帯電話に搭載されている通常の 2 次元バーコードリーダを用いて QR コードの情報を抽出することはできない。そのため、不可視バーコードの抽出においては、元画像の影響を極力減らし、バーコードの印字部分を強調させる信号処理ソフトウェアを利用する。このように、記事等に重畳された 2 次元バーコードを抽出するプロセスが、従来の 2 次元バーコード技術と大きく異なる点であり、抽出時のビットエラー率が適切になるような印刷を決定するための印刷支援システムが必要となる理由である。

なお、不可視バーコードと関連技術との詳細な比較は文献 8) および 13) に譲るが、不可視バーコード技術は紙メディアと電子メディアの融合を目指す関連技術とは相補的な関係にある。たとえば、不可視バーコード技術との関連がきわめて深い FPcode¹⁴⁾ は、カラー画像を対象として、人間の目が知覚しにくい黄色を用いて情報を埋め込む技術である。この技術はブラックライトのような追加デバイスを必要とせず、携帯電話に専用のソフトを組み込むだけで利用できる。具体的にはダイレクトメール等に印刷されたカラー画像から地図情報へのポインタを抽出するといったアプリケーションを簡単に実現できる。このように、カラー画像が印刷された紙媒体に手軽にポインタ的な情報を付加する場合には、FPcode のような技術が適している。

一方、不可視バーコードは、(1) カラー画像に限らず、記事を選ばない自由度の高さ、(2) 埋め込み可能な情報量の多さ（同一面積であれば FPcode の 30 倍以上の容量を持つ）、および (3) 輪転機への適用性にある。特に、新聞や雑誌等、低コストで大量印刷されるモノクロメディアに対して、ハイパーリンクのような機能を実現したい場合や、ある程度の記憶容量を実現したいようなアプリケーションの場合は、モノクロ用輪転機に一般的に具備されている予備タンクを利用して大量印刷できる不可視バーコードが優位となる。たとえば、株価情報の文字の上に最新の株価情報にリンクする URL を重畳させるアプリケーションや、囲碁・将棋の記事の上にその棋譜の動きを重畳して記録させるようなアプリケーション、あるいは、英語の新聞や雑誌等における難解な単語や文章の訳を表示するといったアプリケーションの場合には不可視バーコードの特徴が発揮される。不可視バーコードにおける 1 つの問題点は、ブラックライトを追加的なデバイスとして必要とする点である。しかしながら、携帯電話等にブラックライトを組み込むことは技術的には十分に可能であり、また、携帯電

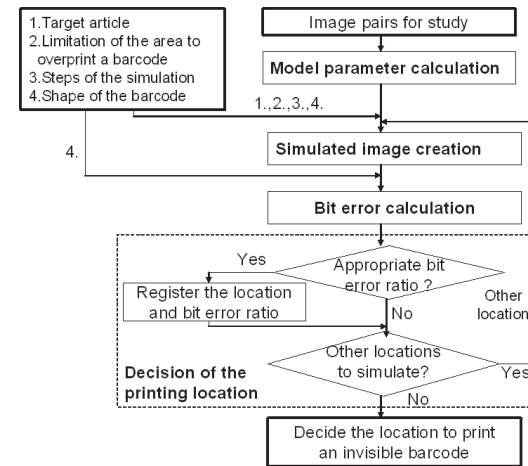


図 2 印刷支援システムの構成とプロセス

Fig. 2 The structure and the process of the printing support system.

話の外付け用アタッチメントとしてブラックライト機能を実現するといった方法も考えられるため、ブラックライトの利用に関して技術的な問題はない。

2.2 印刷支援システムの構成と動作

図 2 に、印刷支援システムの構成と、その動作を示す。印刷支援システムはモデルパラメータ決定、疑似画像生成、ビットエラー率の計算、および印刷位置の決定の各処理から構成される。

まず、モデルパラメータ決定においては、次節で述べる疑似画像作成のベースとなる数学モデルのパラメータを、学習用の画像を用いて計算する。学習用の画像は、実際の印刷対象と同一の紙質、可視インク、および不可視インクを用いて作成されたサンプル記事を複数枚用意し、不可視バーコードを発光させる前の画像と、発光させた後の画像を取り込むことで作成する。このプロセスで決定されたパラメータは、紙質、可視インク、および不可視インクが同じであれば、他の記事や異なるバーコード形状に対しても適用できる。

次に、実際に印刷したい記事と、その記事に対するバーコードの形状を用意し、決定されたパラメータを用いて疑似画像を生成する。このとき、記事やバーコードは電子化されていてもかまわない。さらに、生成した疑似画像に対して、実際の不可視バーコードの抽出過程に用いられるアルゴリズムをそのまま適用し、抽出時のビットエラー率を計算する。最終的

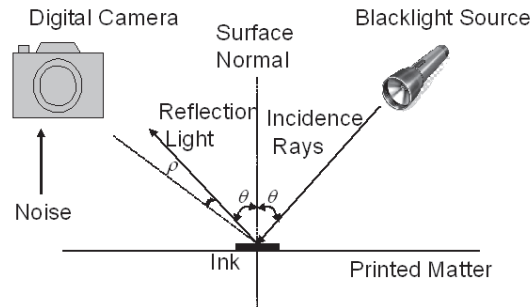


図3 不可視バーコードの撮影モデル

Fig. 3 An object reflects lights and taken by a camera.

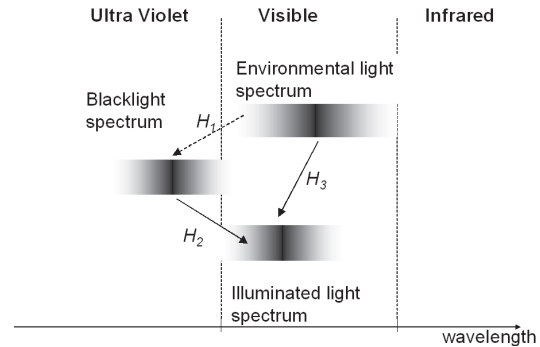


図4 スペクトラムの変換モデル

Fig. 4 A spectrum transformation model.

な印刷位置の決定は、上記の疑似画像作成とビットエラー率の計算を指定された範囲内でバーコードの位置を変化させながら繰り返し行い、適切なビットエラー率となる位置を決定する。以下では、これらの各処理について詳細に説明する。

2.3 モデル化

本節では、ブラックライトが不可視バーコードに照射された場合の発光画像をモデル化する方法について述べる。図3に、ブラックライトからの光が紙面上の可視および不可視インクに照射され、その反射光がデジタルカメラのイメージセンサによってとらえられる様子を示す。デジタルカメラへの入射光は、環境光、拡散反射光、および鏡面反射光の3種類に分類してモデル化される。いま、カメラのフォーカスが正しく設定されている場合、デジタルカメラへの入射光 I は式(1)によって表される (Phong illumination model¹⁰⁾。

$$I = I_{\alpha} k_{\alpha} + f_{att} I_p (k_d \cos \theta + k_s \cos^n \rho) \quad (1)$$

ここで、 I_{α} は環境光の強さ、 k_{α} は環境光の紙面における反射率である。また、 f_{att} は入射光の減衰係数、 I_p は入射光の強度を表す。 k_d および k_s はそれぞれ拡散反射 (乱反射) および鏡面反射の反射率を表し、 θ は入射光と反射面法線間の角度、 ρ は反射光とカメラのなす角度である。 n は鏡面反射を近似表現するための係数で、 n の値が大きいくほど反射面が光沢のあるもの (鏡面に近いもの) となる。

式(1)で示されるモデルは、反射において光源からの光の周波数が変化しない場合に成立するモデルである。しかしながら、不可視バーコードではブラックライトからの光が不可視インクに照射されると、ブラックライトの周波数帯域がシフトして可視光を発するモデルとなる。印刷支援システムではブラックライトが照射された場合の不可視バーコードの発光画

像を求める必要があるが、厳密なブラックライトの発光モデルを作るためには紙や不可視インクの物理モデルを作る必要があり、現実的ではない。そこで、本研究ではブラックライトによる不可視インクの発光を単純な周波数変換としてモデル化し、不可視インクが発光する前の画像 (環境光のみの画像) と不可視インクが発光した後の画像 (ブラックライト照射時の画像) のサンプルを用いて、そのモデルのパラメータを学習により決定する。

今、図3において、ブラックライトの代わりに環境光と同一のスペクトルを持つ仮想的なライトを考える。このライトのスペクトルをブラックライトのスペクトルに変換するような周波数変換を H_1 とする (図4)。また、ブラックライトのスペクトルが不可視インクにより可視光スペクトルに変換される部分の周波数変換 H_2 を考える。このとき、 H_1 および H_2 を組み合わせた周波数変換 H_3 を考えれば、 H_3 の変換は不可視バーコードを印刷したい記事の画像のみから、不可視バーコードが発光した場合の画像 (すなわち疑似画像) を求める変換となる。本研究ではこの周波数変換 H_3 を Cheung らによる Polynomial model¹⁵⁾ (以下、Polynomial model) を用いて表現する。Polynomial model は画像の周波数変換をモデル化したものであり、ある画素 i の変換前の RGB 画素値が (r_i, g_i, b_i) で表現される場合、周波数変換後の画像はこれら (r_i, g_i, b_i) を組み合わせた m 個の基本成分の線形和を用いて表現される。たとえば、 $m = 14$ の場合には $(r_i, g_i, b_i, r_i g_i, r_i b_i, g_i b_i, r_i^2, g_i^2, b_i^2, r_i g_i b_i, r_i^3, g_i^3, b_i^3, 1)$ の14個の基本成分の線形和で表現される (表1)。いま、環境光のみが照射されている状況で、RGBの強さがそれぞれ r_i, g_i, b_i であるような画素 i の画素値 $x_i^{[3]} = [r_i, g_i, b_i]^T$ を考える (右上の $[]$ はベクトルの次元を表す)。また、その画素に環境光に加えてブラック

表 1 Cheung らによる Polynomial model
Table 1 Polynomial model by Cheung, et al.

m	Augmented matrix																			
3	r	g	b																	
5	r	g	b	rgb	1															
7	r	g	b	rg	rb	gb	1													
8	r	g	b	rg	rb	gb	rgb	1												
10	r	g	b	rg	rb	gb	r^2	g^2	b^2	1										
11	r	g	b	rg	rb	gb	r^2	g^2	b^2	rgb	1									
14	r	g	b	rg	rb	gb	r^2	g^2	b^2	rgb	r^3	g^3	b^3	1						
17	r	g	b	rg	rb	gb	r^2	g^2	b^2	rgb	r^2g	g^2b	b^2r	r^3	g^3	b^3	1			
20	r	g	b	rg	rb	gb	r^2	g^2	b^2	rgb	r^2g	g^2b	b^2r	r^2b	g^2r	b^2g	r^3	g^3	b^3	1

ライトが照射された後の画素値を $x_i^{[3]'} = [r'_i, g'_i, b'_i]^T$ とすると、前述の H_3 に相当する変換は、 $x_i^{[3]}$ から $x_i^{[3]'}$ への変換である。反射のモデルは式 (1) がそのまま成立するので、拡散反射光と鏡面反射光の部分に Polynomial model を適用すれば、

$$x_i^{[3]'} = x_i^{[3]} + (P_j \cos \theta_i + Q_j \cos^n \rho_i) x_i^{[m]} + w_i, \quad i \in \mathcal{G}_j, j = 0, 1 \quad (2)$$

を得る。ここで、 $x_i^{[m]}$ は、Polynomial model における基本成分であり、 P_j および Q_j は基本成分に対する係数を表す $3 \times m$ の行列である。これらの係数行列を求めることが、前述の H_3 の変換を求めることに相当する。なお、不可視インクが存在しない場所であっても、ブラックライトは紙面での反射等により可視成分が発生するため、不可視インクが存在する場所としない場所で係数行列を別々に求めておく必要がある。そこで、式 (2) では不可視インクが印刷されている画素の集合と、されていない画素の集合をそれぞれ、 \mathcal{G}_1 および \mathcal{G}_0 としている。 θ_i および ρ_i は画素ごとの入射光と反射面法線間の角度、および反射光とカメラのなす角度である。また、 w_i は付加ノイズベクトルであり、以下の確率密度関数で表されるガウシアンノイズである。

$$p_n(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{s}{2}} \sqrt{|S|}} \exp\left(-\frac{1}{2}[x - \mu]^T S^{-1}[x - \mu]\right) \quad (3)$$

ここで、 s は色チャンネル数（本システムの場合、RGB なので $s = 3$ ）、 $\mu = [\mu_r, \mu_g, \mu_b]^T$ は RGB の各チャンネルにおけるノイズの平均ベクトルである。また、 $x = [\Delta r, \Delta g, \Delta b]^T$ は RGB の各チャンネルに対する付加ノイズベクトルである。 S はノイズの分散共分散行列であり、

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{rg} & \sigma_{rb} \\ \sigma_{rg} & \sigma_{gg} & \sigma_{gb} \\ \sigma_{rb} & \sigma_{gb} & \sigma_{bb} \end{bmatrix} \quad (4)$$

である。

2.4 係数行列の決定と疑似画像の生成

式 (2) においては、 θ_i および ρ_i はブラックライト LED とカメラレンズの相対位置が求めれば計算可能である。したがって、係数行列 P_j および Q_j をどのように求めるかが問題となる。本研究ではこの係数行列を 1 組以上の学習用画像ペアから求める。具体的には、環境光のみが照射され不可視インクが発光していない画像を x 、実際にブラックライトを照射して不可視インクを発光させた画像を x'' とし、実際の発光画像 x'' と式 (2) で求まる発光画像 x' との差の二乗和を最小とするような係数行列を求める。すなわち、

$$Y_j = \sum_{i \in \mathcal{G}_j} |x_i^{[3]''} - x_i^{[3]'}|^2, j = 0, 1 \quad (5)$$

を最小とするような係数行列を最小二乗法により求めればよい（不可視インクが存在する部分と存在しない部分で異なる係数行列が求まる）。具体的には、まず、式 (2) の $x_i^{[3]'}$ を式 (5) に代入し、 Y_j を P_j および Q_j の係数を変数とする式とする。次に、 Y_j を P_j, Q_j のすべての係数で偏微分し、それらの値がすべて 0 になるように連立方程式を解いた。すなわち、

$$\begin{aligned} \partial Y_j / \partial p_{j,u,v} &= \partial Y_j / \partial q_{j,u,v} = 0, \\ j &= 0, 1, u = 1, 2, 3, v = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $p_{j,u,v}$ 、 $q_{j,u,v}$ は各々 P_j 、 Q_j の u 行 v 列成分、から得られる $j = 0, 1$ の各々に対する $6m$ 個の連立方程式を、各 j に対して解き、 P_j と Q_j を推定した。

このとき、鏡面反射を近似する係数 n も決定する必要がある。 n の値は使用する紙やインクによってある程度予測できるので¹⁰⁾、その近傍で n を変化させながら式 (5) を計算し、式 (5) が最小となるような n を求める。なお、係数行列を求める場合には、ノイズ成分 $w_i = 0$ として計算を行う。

このようにして求めた係数行列を用いることで、記事の画像のみから不可視バーコードが発光した際の画像（疑似画像）を式 (2) により生成することが可能となる。

2.5 印刷位置の決定

印刷支援システムでは前節までに求めた疑似画像を用い、ビットエラー率が適切となる印刷位置を求める。具体的には、不可視バーコードの印刷位置を、指定された範囲内で、指定された移動ステップで移動させながら情報の抽出を繰り返し行う。このとき、印刷したい不可視バーコードのビット配列は既知であるため、疑似画像を用いた抽出においてどの程度のエラーが発生するかを知ることができ、したがってビットエラー率を求めることができる。なお、現在の実装では印刷位置の決定に際し、ビットエラー率の計算の度に疑似画像の生成を行っているため、印刷位置を探索するための演算量が多くなるという問題があるが、本論文では疑似画像の生成手法に主眼をおいているため、これについては今後の課題とする。

3. 評価

3.1 実験環境

印刷支援システムの有用性を確認するための初期的な評価実験を行った。実験においては、2次元バーコードとしてQRコードを用いることを想定する。学習用画像としては、実験で用いるものと同じ紙質、可視インク、および不可視インクで、記事の内容が異なる3枚のサンプルを使用した。ブラックライトおよびカメラは学習用と評価実験用とで同一のデバイスを用いた。なお、図1は、学習に用いた画像の1つである。

評価に用いる不可視バーコードの印刷では、インクジェットプリンタのインクカートリッジを、シアン用の不可視インクのカートリッジ¹⁶⁾と入れ替え、新聞紙上に印刷する。印刷に用いたインクジェットプリンタにはLexmark Z1420を利用した。

撮影においては、カメラ内蔵型携帯電話のauW21CAIIに、図5のスペクトラム特性¹⁷⁾を持つブラックライトLEDアタッチメントを搭載したものを利用した。撮影は、カメラと被写体の距離を48mmに保った状態で、クローズインモードで行った。

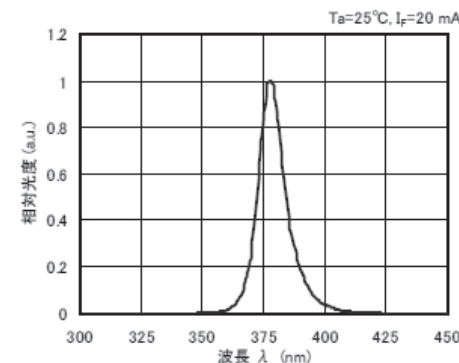


図5 実験で用いたブラックライトLEDのスペクトル特性
Fig. 5 Light spectrum of the blacklight LED used in the prototype cell phone.

実験時の環境光の照度は照度計 (Minolta T-1H) を用いて測定した結果、560 lxであった。文献 18) では、オフィス環境 (室内) における推奨照度を 300 lx から 1,000 lx としており、560 lx はこの環境に含まれる照度である。今回の実験においては、1種類の環境光のみで実験を行ったが、様々な環境光の下でシミュレーションを行うことにより、環境光の強さに応じた印刷位置の算出が可能である。これに関しては、文献 8) において、様々な環境光で様々な不可視バーコードの抽出実験を行っているが、環境光がある強度 (1,970 lx) まではすべての不可視バーコードが抽出できるにもかかわらず、ある強度 (2,550 lx) を超えた時点で、すべての不可視バーコードに関し、エラーが生じることが分かっている。そこで、環境光が抽出可能なレベルにあれば、1種類の環境光におけるシミュレーションで、抽出性能の傾向が分かると判断し、今回の実験においては、不可視バーコードが一般的に利用されることが想定される室内のオフィス環境 (560 lx) の環境光でのみの実験にとどめた。

不可視バーコードを印刷する記事は、図 6 (a) に示す新聞記事 (サイズは 105.2 mm × 139.2 mm) を用いた。これは、実験に用いた新聞記事において、この領域に典型的な新聞記事の要素 (各種サイズの文字、白抜き文字、および画像) が含まれているためである。

印刷支援システムでは、印刷対象の記事は電子化されたものでよいが、今回の実験では実際の新聞記事を用いたため、これを 150 dpi のスキャナで取り込み、621 × 822 ピクセルの RGB 画像にした。このようにすることで、携帯電話で撮影された画像と解像度的に同レベルの画像を得ることができる。

不可視バーコードとして印刷する QR コードは、41 × 41 モジュール (バージョン 6)

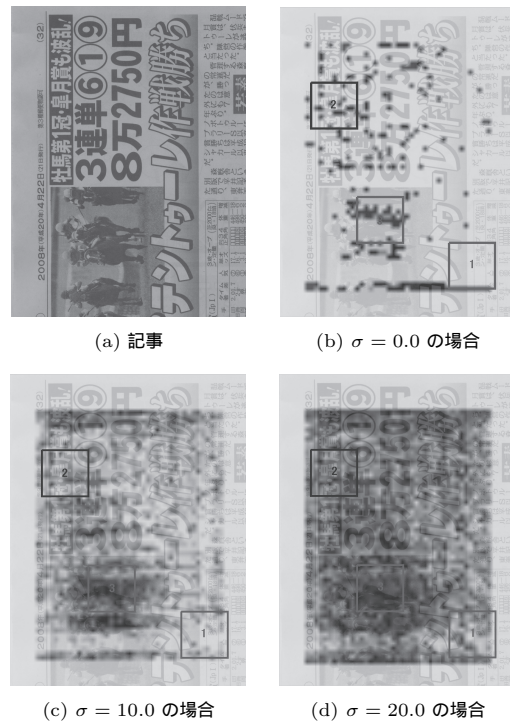


図 6 付加ノイズレベルとビットエラー率

Fig. 6 The article used for the experiment and bit error ratio ((a) article, (b) simulation results with $\sigma = 0.0$, (c) simulation results with $\sigma = 10.0$, (d) simulation results with $\sigma = 20.0$).

でエラー訂正レベル H (最大 30% のパーストエラー訂正可能) のものを使用した。

バージョン 6 でエラー訂正レベル H の QR コードは英数字で 84 文字の情報を格納できる⁵⁾。不可視バーコードは URL 等の情報を格納することを目的としているが、URL の長さは平均的には 35 文字程度とされており¹⁹⁾ 当該 QR コードは十分な容量を持つ。なお、エラー訂正レベルを下げ、モジュールサイズが小さい QR コードを利用することも考えられる。しかしながら、不可視バーコードの抽出時には、ランダムエラーが多くなる^{20),21)} ため、エラー訂正能力の高いレベル H の訂正能力を選んだ。

また、撮影に用いた携帯電話では、不可視バーコードを含む記事を RGB565 フォーマット

で 240×320 ピクセルとして取り込んだ。これら、RGB565, 240×320 ピクセル (QVGA) は、実験で利用した携帯電話 (auW21CAII) の仕様である。これらの値は、携帯電話の仕様としては、低スペックのものであるが、このように低スペックの携帯電話にも対応可能であることを示すため、この携帯電話を使用した。

携帯電話で撮影したサイズは、記事において $40.6 \text{ mm} \times 61.0 \text{ mm}$ の大きさに相当し、このとき不可視バーコードの大きさは 123×123 ピクセル ($20.8 \text{ mm} \times 20.8 \text{ mm}$) となる。

これらのパラメータの中で、技術的に重要な点は、不可視バーコードの大きさが 123×123 ピクセルとなるように撮影している点である。これは不可視バーコードの 1 モジュールがカメラの 3×3 画素に対応するようにし、不可視バーコードを確実に読み取れるようにしたためである (このとき、前述の QR コードの 41×41 モジュールが 123×123 ピクセルに対応)。実際の利用においても、ユーザが不可視バーコードから確実に情報を抽出するためには、撮影した不可視バーコードがこの程度の画素数に対応している必要がある。一方、不可視バーコードの物理的サイズに関しては、記事内での不可視バーコードの見やすさといった主観的な要素により決定される。たとえば、今回の実験では不可視バーコードの物理的サイズを主観的に $20.8 \text{ mm} \times 20.8 \text{ mm}$ と決定すると、カメラの解像度 (QVGA) と 123×123 ピクセルの条件を満たすように撮影画像の大きさ ($40.6 \text{ mm} \times 61.0 \text{ mm}$) が決定される。なお、このような条件となるように携帯電話 (クローズインモード) と不可視バーコードの距離を決定すると 48 mm となる。

実験では、まず学習用の画像を携帯電話を用いて取り込み、モデルのパラメータである P_j および Q_j を推定する。

P_j, Q_j の推定は、式 (6) より導出される連立方程式を解くことにより行った。それらの連立方程式における $x_i^{[3]''}$ および $x_i^{[3]}$ は、2.2 節に記したように、実験に使用するものと同じ紙質、可視インク、および不可視インクを用いてサンプル記事を 3 種類用意し、それらから得られる値を用いた。具体的には、これらのサンプル記事に対し、実験で用いたものと同じ QR コードを、同じ大きさで印刷し、実験で使用するのと同じ携帯電話を用いて、ブラックライト照射あり、なしの各々 2 種類、計 6 つの画像を作成した (図 1 の 2 つの画像は、そのうちの 1 ペアに該当)。次いで、3 つのブラックライト照射あり、なしの画像の画素値を各々 $x_i^{[3]''}$, $x_i^{[3]}$ とした。ここで、 k ($k = 0, 1, 2$) 番目のサンプルのピクセル (X, Y), $X = 0, \dots, W - 1, Y = 0, \dots, H - 1$ (W, H は各々サンプル画像の幅と高さ) に対して、 $i = HWk + WY + X$ とした。連立方程式における $\cos \theta_i$ および $\cos \rho_i$ の値は、サンプル画像における各画素の位置、カメラの位置、およびブラックライトの位置より求めた。

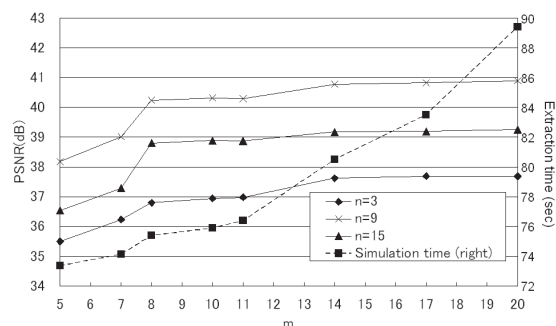


図 7 擬似画像における m と PSNR の関係 (左目盛) および m と実験用新聞の計算時間の関係 (右目盛)
 Fig. 7 Relationship between m and PSNR using simulated images (left scale), and m and calculation time (right scale) using a newspaper for the experiment.

Polynomial model (表 1) における m の値はシミュレーションに基づいて $m = 14$ とした。具体的には、擬似画像とブラックライト照射時のサンプル画像と擬似画像の PSNR の平均値を、 $m = 5, 7, 8, 10, 11, 14, 17, 20$ の 8 種類の各々に関し、 $n = 3, 9, 15$ において測定した。次に、各 m に関し、 $n = 9$ で、下記 (実験 1) で使用した紙面を用い、(実験 1) でノイズを加える場合と同じ条件でシミュレーションを行った際のシミュレーション時間を測定した。この結果を図 7 に示す。図 7 より、すべての n に対し、 m の増加にともない PSNR の値 (左目盛) は増加し、 $m = 14$ においてその値がほぼ飽和することが分かる。一方、シミュレーション時間 (右目盛) は $m = 17$ 以上においても増加し続けるため、推定値の正確性と計算負荷のバランスを考え、 $m = 14$ とした。

これら推定されたパラメータを用い、以下の 2 つの実験を行った。

(実験 1) この実験では、記事上にガウシアンノイズを付加し、ノイズレベルを可変したときのビットエラー率を印刷支援システムを用いて求めた。

(実験 2) この実験では、実験 1 の結果に基づき、ビットエラー率が最も低い印刷位置、最も高い印刷位置、およびそれらの中間的な印刷位置の 3 カ所において、実際にその場所に不可視バーコードを印刷した場合のビットエラー率を、印刷支援システムで計算したビットエラー率と比較した。

3.2 実験結果

(実験 1) 図 6(a) の新聞記事において、 $\sigma^2 = \sigma_{rr} = \sigma_{gg} = \sigma_{bb}$ 、 $\mu = [0, 0, 0]^T$ として、 $\sigma = 0.0, 10.0, 20.0$ の 3 種類のガウシアンノイズを付加し、印刷支援システムによりピッ

トエラー率を計算した。なお、付加したノイズのスケールは $\sigma = 1$ が 1 画素値に相当する。また、 S のパラメータのうち、 σ_{rr} 、 σ_{gg} 、 σ_{bb} 以外は 0 とした。

付加ノイズは、擬似画像作成において、実際のブラックライト発光画像におけるノイズ成分による抽出時のビットエラー率と同等のエラー率を再現することが目的となる。しかし、 σ_{xy} (x, y は各々 r, g, b のいずれか) を各々変化させて実験を行うと膨大な実験数となる。そこで、実験数を抑えつつ、実験の目的を達成できるようにする必要がある。これに向けて、 $\sigma_{rr} = \sigma_{gg} = \sigma_{bb} = \sigma^2$ とし、それ以外の共分散は 0 として σ の値の探索を行った。その結果、 $\sigma = 10.0$ において、擬似画像と実画像の結果でほぼ一致をみた。そこで、ノイズがない場合、および $\sigma = 10.0$ の倍の強さのノイズが載った場合のエラー率を比較するため、 $\sigma = 0.0, 10.0, 20.0$ の 3 つの値で実験を行った。

ビットエラー率を計算するに際しては、 621×822 ピクセルの記事画像に対し、 240×320 ピクセルの疑似画像を縦、横、各々 12 ピクセル単位で移動させて計算を行った。12 ピクセルは、実験に使用した不可視バーコードの大きさ (123 ピクセル \times 123 ピクセル) の $1/10$ に相当するサイズであるが、この程度の単位で移動を行ってもビットエラー率の傾向に十分な差が認められたため 12 ピクセル単位での移動としている。

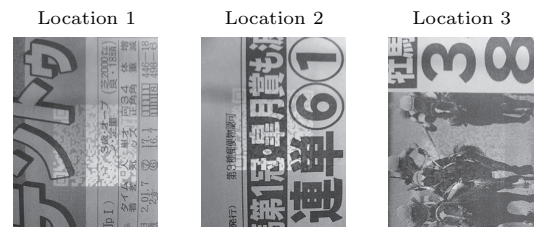
また、各移動ごとに $\sigma = 0.0$ の場合はビットエラー率の計算を 1 回、 $\sigma = 10.0, 20.0$ の場合はガウシアンノイズ生成用の乱数発生器のシードを変えて 5 回行った平均のビットエラー率を計算している。

図 6(b), (c), および (d) に、 $\sigma = 0.0, 10.0, 20.0$ それぞれの場合のビットエラー率を示す (色が黒いほどビットエラー率が高い場所を示す)。 $\sigma = 10.0, 20.0$ の場合は、5 回の平均のビットエラー率を示している。

図 6 より、記事上で黒成分を多く含んでいる部分 (たとえば写真の部分) は抽出成功率が低く、白成分が比較的多く含まれている部分 (たとえば文字の部分) は抽出成功率が高いことが分かる。

なお、この実験において 1 つの記事の、1 つのノイズレベル ($\sigma = 10.0$, または $\sigma = 20.0$) に対するビットエラー率の分布を求めるときに要する疑似画像の生成回数は、 $((621 - 240)/12 + 1) \times ((822 - 320)/12 + 1) \times 5 = 6,270$ 回となる。この処理を 2.40 GHz の Core2 Duo を搭載したメモリ容量 2 GB のノート PC を用いて行った場合、 $\sigma = 10.0$ において 80.5 秒を要した。

(実験 2) 印刷支援システムにより計算されるビットエラー率と実際の印刷・抽出結果に基づくビットエラー率を比較する実験を行った。この実験では、実験 1 において最もピッ



(a) 実際の発光画像

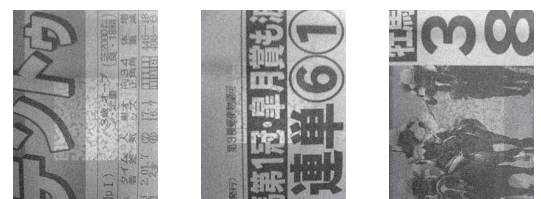


PSNR = 38.3 dB PSNR = 39.2 dB PSNR = 21.4 dB

(b) 疑似画像 ($\sigma = 0.0$)



(c) 疑似画像 ($\sigma = 10.0$)



(d) 疑似画像 ($\sigma = 20.0$)

図 8 生成された疑似画像

Fig. 8 Images for the experiment at Location 1, 2, and 3. (a) Actual illuminated photo images, simulated images with (b) $\sigma = 0.0$, (c) $\sigma = 10.0$, and (d) $\sigma = 20.0$. For $\sigma = 0.0$, PSNRs between the actual images are calculated.

表 2 実験結果
Table 2 Experimental results.

	Location 1 (Good)				Location 2 (Medium)				Location 3 (Bad)			
	Simulated			Actual	Simulated			Actual	Simulated			Actual
noise (σ)	0.0	10.0	20.0	-	0.0	10.0	20.0	-	0.0	10.0	20.0	-
[A]	1	5	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
[B]	0	0	5	0	0	4	1	1	0	0	0	0
[C]	0	0	0	0	0	0	4	0	1	5	5	1
Bit Error (%)	0.21	2.65	9.81	3.45	1.32	6.45	43.10	8.11	-	-	-	-

トエラー率が低い場所 (Location 1), ビットエラー率が中程度の場所 (Location 2), および最もビットエラー率の高い場所 (Location 3) の 3 点を選んで比較を行った (それぞれ, 図 6 中の四角形 1, 2, 3 に対応). 各 location における印刷支援システムによるビットエラー率の計算は, $\sigma = 0.0$ の場合は 1 回行い, $\sigma = 10.0, 20.0$ の場合は付加するガウシアンノイズを変え, 各々 5 回行った.

図 8 に, Location 1, 2, 3 に対応する場所に実際に同じ場所に不可視バーコードを印刷して撮影した画像, および同一の場所で $\sigma = 0.0, 10.0, 20.0$ の条件で生成された疑似画像を示す. ガウシアンノイズが付加されていない $\sigma = 0.0$ のシミュレーション結果に関しては, 実画像との PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) 値も求めた. これらの図と PSNR の値より, 印刷支援システムが実際に近い疑似画像を生成できていることが分かる. 表 2 に各 location におけるビットエラー率の比較結果を示す. 表中の [A] は QR コードの情報を正しく抽出できた回数, [B] は QR コードの認識はできたが実際に情報を抽出できなかった回数 (QR コードの誤り訂正に失敗した回数), [C] は認識すらできなかった回数を示す. ビットエラー率は [A] と [B] を用いて平均値を計算している. 表 2 より, 印刷支援システムで算出したビットエラー率の傾向は実測値と一致することが分かる. また, 今回用いた紙, 可視インク, および不可視インクの組合せにおいては, 印刷支援システムで予測したビットエラー率と, 実際の撮影から測定したビットエラー値が $\sigma = 10$ でほぼ一致する. すなわち, σ の値を紙とインクの組合せに応じて実験的に求めることで印刷支援システムによりビットエラー率を予測することができる. これより, ビットエラー率が適切な値となる印刷位置を決定するという目的において, 印刷支援システムの効果が確認できる.

実験 1 および実験 2 の両方において, $\sigma = 10.0, 20.0$ の場合に対して各々 5 回のガウシアンノイズを発生させている. その結果, 実験 2 において, $\sigma = 10.0$ の場合, Location 1 および 3 に関しては 5 回とも各々 [A] と [C], Location 2 に関しても, [B] が 4 回および

[A] が 1 回となり，各々 5 回の発生だけで， σ の強度に対するエラーの傾向が分かる．また， $\sigma = 20.0$ に関しても，同様にエラーの傾向が分かる．

なお，エラー訂正レベル H の QR コードでは，30% のビットエラー率まで訂正できる．しかしながら，表 2 において，このエラー率よりはるかに小さい場合においても QR コードの情報を正しく抽出できない場合が存在する．これは，QR コードのエラー訂正が，バーストエラーに対して効果のあるリード・ソロモンを用いているためであり，ランダムエラーとしての性質が強い不可視バーコードの抽出においては，エラー訂正能力が大幅に劣化する．なお，この問題の解決方法については文献 22) を参照されたい．

4. おわりに

本論文では，不可視バーコード技術において，ビットエラー率が適切な値となる印刷位置を探索・決定するための不可視バーコード印刷支援システムについて述べた．不可視バーコードを紙に印刷することなく，その発光画像をシミュレートするために，Phong illumination model をベースにした画像生成モデルを構築した．また，このモデルに基づく不可視バーコード印刷支援システムの実験を行い，システムの有効性を示した．

今後の課題としては，新聞記事に限らず，様々な紙面での実験評価を行い，本システムの性能を明らかにしていく必要があると考えている．また，2.5 節で触れた印刷位置探索の高速化についても，具体的な解決策を示す必要があると考えられる．

なお，本文中，“QR コード” はデンソーウエーブの登録商標，他の会社名，製品名およびサービス名等は，それぞれ各社の商標または登録商標である．

参 考 文 献

- 1) Want, R., Fishkin, K.P., Gujar, A. and Harrison, B.L.: Bridging physical and virtual worlds with electronic tags, *Proc. CHI'99*, pp.370–377 (1999).
- 2) 平本純也：知っておきたいバーコード・二次元バーコードの知識，日本工業出版 (1991).
- 3) 柴田 彰：これでわかった 2 次元シンボル，オーム社 (2004).
- 4) QR コードドットコム．<http://www.qrcode.com/>
- 5) ISO/IEC 18004: 2000: Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Bar code symbology – QR Code (2000).
- 6) 松井甲子雄：電子すかしの基礎，森北出版 (1998).
- 7) Cox, I.J., Miller, M.L. and Bloom, J.A.: *Digital Watermarking*, Prentice Hall (2001).
- 8) 上條浩一，上條 昇，阪本正治：電子スクラップシステム，*情報処理学会論文誌*，Vol.47, No.7, pp.2168–2181 (2006).
- 9) 国島文生：ワークフローモデル Workflow Base に基づく分散 DTP 支援環境の構想，*情報処理学会研究報告*，Vol.1998, No.57, pp.257–264 (1998).
- 10) Dam, A.V., Feiner, K.S., Hughes, F.J. and Foley, D.J.: *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison-Wesley (1995).
- 11) 越前 功，吉浦 裕，安細康介，田口順一，黒須 豊，佐々木良一，手塚 悟：輪郭保存に基づく電子透かしの画質維持方式，*情報処理学会論文誌*，Vol.41, No.6, pp.1828–1839 (2000).
- 12) Miller, M.L., Cox, I.J. and Bloom, J.A.: Informed embedding: Exploring image and detector information during watermarking insertion, *Proc. IEEE Int'l. Conference on Image Processing*, Vol.3, pp.1–4 (2000).
- 13) Kamijo, K., Kamijo, N. and Sakamoto, M.: Electronic Clipping System with Invisible barcodes, *Proc. 14th Annual ACM Int'l Conference on MultiMedia*, pp.753–762 (2006).
- 14) 野田嗣男，師尾 潤，千葉広隆：印刷型ステガノグラフィ技術，*富士通ジャーナル*，2006-5, Vol.57, No.3, pp.320–324 (2006).
- 15) Cheung, T.L.V., Westland, S., Connah, D.R. and Ripamonti, C.: A comparative study of the characterization of colour cameras by means of neural networks and polynomial transforms, *Coloration Technology*, Vol.120, No.1, pp.19–25 (2004).
- 16) VersaInk™: 34IUUV Invisible Ink. <http://www.g7ps.com/scripts/versainkuv.asp>
- 17) ナイトライド・セミコンダクター：紫外線 LED ランプ標準仕様書品番 NS375L-5RLO．<http://www.tecparts.co.jp/pdf/led/nitride/NS375L-5RLO.pdf>
- 18) ISO 8995: Principles of visual ergonomics – The lighting of indoor work systems (1989).
- 19) 藤原 洋：インターネット数理科学第 12 回，ネットワークのあちら側を支える数理科学その 3，東京大学大学院数理科学研究科・情報理論 901-35 講義資料，pp.26–27 (2007).
- 20) 上條浩一，上條 昇：不可視バーコード技術におけるエラー訂正方式の考察，*電子情報通信学会総合大会*，講演番号 DS-4-10 (2008).
- 21) Kamijo, K., Kamijo, N. and Zhang, G.: Invisible Barcode with Optimized Error Correction, *Proc. 2008 IEEE Int'l Conference on Image Processing*, pp.2036–2039 (2008).
- 22) 上條浩一，上條 昇，張 綱，南 正輝，森川博之：ハイパーリンク不可視マーカのためのスキップビット符号化方式，*電子情報通信学会総合大会*，講演番号 DS-3-6 (2009).

(平成 21 年 2 月 2 日受付)

(平成 21 年 9 月 11 日採録)



上條 浩一（正会員）

昭和 60 年東京大学工学部電子工学科卒業。同年日本アイ・ピー・エム株式会社入社。平成 8 年コーネル大学大学院コンピュータサイエンス専攻修士課程修了。平成 9 年より同社東京基礎研究所にて、主に、電子透かし、著作権保護管理、画像処理、ユビキタスコンピューティングの研究に従事。平成 19 年より、東京大学工学系研究科先端学際工学博士課程に在籍。電子情報通信学会会員。



張 綱（正会員）

平成 11 年東京工業大学電気電子工学科卒業。平成 13 年東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム株式会社東京基礎研究所入所。主に SoC や組み込みシステムの検証、システムシミュレーションの研究に従事。ACM 会員。



上條 昇（正会員）

昭和 57 年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業。日本アイ・ピー・エム株式会社東京基礎研究所主管研究員。主に省電力化技術、次世代モバイルシステムの研究に従事。IEEE 会員。



南 正輝（正会員）

平成 8 年芝浦工業大学工学部電子工学科卒業。平成 10 年同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。平成 13 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。工学博士。平成 18 年スイス・ローザンヌ連邦工科大学客員研究員。平成 15~19 年芝浦工業大学工学部講師。現在、東京大学先端科学技術研究センター准教授。電子情報通信学会論文賞、電子情報通信学会奨励賞各受賞。IEEE、電子情報通信学会各会員。



森川 博之（正会員）

昭和 62 年東京大学工学部電子工学科卒業。平成 4 年同大学院博士課程修了。現在、同大学先端科学技術研究センター教授。工学博士。平成 9~10 年コロンビア大学客員研究員。平成 14~18 年情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。ユビキタスネットワーク、無線ネットワーク、モバイルコンピューティング、フォトニックインターネット等の研究に従事。電子情報通信学会論文賞（2 回）、情報処理学会論文賞、情報通信功績賞等受賞。電子情報通信学会フェロー。平成 18~19 年電子情報通信学会編集理事。平成 20 年から電子情報通信学会情報ネットワーク研究専門委員会委員長、電子情報通信学会通信ソサイエティ英文論文誌編集長。IEEE、ACM、ISOC、電子情報通信学会、映像情報メディア学会各会員。