

C-Band : 色差信号を用いる環状ビジュアルタグシステム

宮 奥 健 人[†] アンソニー タン^{††} シドニー フェルス^{††}

本論文では、携帯端末カメラによる実世界メディアインタラクションへの利用を意図した新しいビジュアルタグシステム “C-Band” を提案する。また、提案システムの基本性能の評価結果と応用例について述べる。色差信号を用いる環状ビジュアルタグ C-Band は、デザインの柔軟性を有し、意味図形と統合された多様な外観を持つことができる。リゾルバサーバを介さず URL 情報を直接提供することも可能である。さらに、その構造はカメラを利用したインタラクティブな操作に有用である。このような特徴から、C-Band は、携帯端末カメラとタグシステムとを活用したメディア連携サービスのさらなる進展に寄与する手法として期待される。

C-Band: A Ring Tag System Using A Color Pattern Code

KENTO MIYAOKU,[†] ANTHONY TANG^{††} and SIDNEY FELLS^{††}

This paper proposed a new visual tag system for enhancing real-world media interaction using camera-based tagging techniques. This paper also described performance evaluations of the prototype, and its applications. C-Band is based on a ring with a color pattern code. A C-Band tag can provide a self-contained URL, and is flexible enough to allow various aesthetic designs for the tag's surface. Furthermore, the tag's structure is useful for building interactive techniques. Taken together, these features suggest that C-Band is an effective method to build various attractive camera-based media interactions.

1. はじめに

印刷物、商品パッケージ、パブリックスクリーンなどの実世界メディアと携帯端末とのインタラクションは、ユビキタスコンピューティングにおける重要な機能である^{1)~3)}。この機能の実現には、実世界メディアに機械可読なタグを付与する仕組みが必要となる(図1)。これまでに数多くのタグシステムが開発されているが、特に近年、カメラ付き携帯電話の普及にともなって、カメラ可読なタグシステムが実世界メディアインタラクションの手段として広く利用されるようになっていく^{4),5)}。

実世界メディアにカメラ可読なデータを連携する手法は、次の3つに大別される。1つは、バーコードやQRコードなどのビジュアルタグである^{4)~12)}。さらに、画像に非可視な状態でデータを埋め込む画像電子透かし^{13)~15)}と、対象画像そのものの特徴量を識別子として利用する画像特徴量マッチングがある^{16),17)}。

QRコードなどの2次元バーコードは、埋め込み可

能なデータサイズが大きく、URL、e-mail アドレスなどのアプリケーションデータを直接提供できる^{4),5)}。簡易かつ低コストに利用できるので、幅広い用途に活用されている。しかし、2次元バーコードは、物流管理などへの利用を目的として開発されたものである。そのため、その外観は、無機質でデザインの魅力に欠けている。データタグの用途が、TV、雑誌など各種情報メディアへのデータ連携にまで広がった結果、よりユーザフレンドリな外観デザインを実現するタグシステムが求められている^{10),11)}。

画像電子透かし^{13)~15)}や画像特徴量マッチング^{16),17)}は、上述のニーズに応えるものである。これらの手法は、メディア上のグラフィカルデザインに影響しない形でデータを連携する。しかし、携帯端末カメラを用いて検出可能なデータサイズに限界がある。このため、URLなどのアプリケーションデータを端末に提供するにはリゾルバサーバの仲介が必要であり、システム導入コストが高くなる。

このように既存タグシステムでは、デザイン性とデータサイズとの間にトレードオフがある(図2)。この制約の改善が、カメラとデータタグを活用した実世界メディアインタラクションの進展に向けた課題である。さらに、携帯端末カメラとタグとを活用した実世

[†] NTT サイバースリユーション研究所

NTT Cyber Solutions Labs.

^{††} ブリティッシュコロンビア大学

University of British Columbia

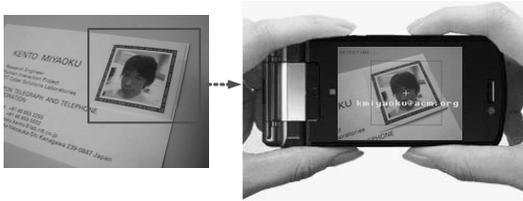


図 1 実世界メディアへのデータ連携
Fig.1 Linking real world object with data.

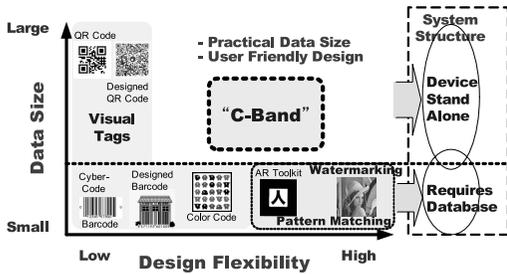


図 2 カメラベースタグシステムの分類
Fig.2 Design space of camera based tagging systems.

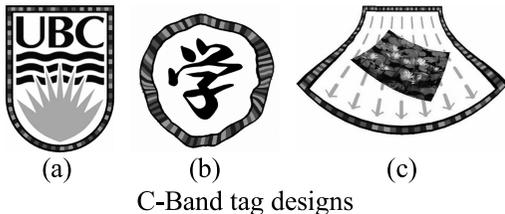
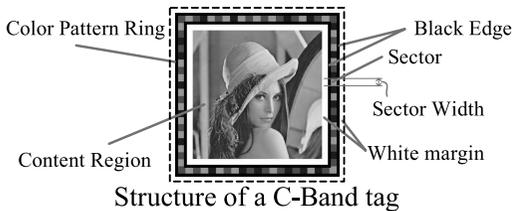


図 3 C-Band タグの構造とデザイン例

Fig.3 Structure of a C-Band tag and feasible C-Band tag designs.

界デジタルメディアへのインタラクティブ操作^{20),21)}を実現するためには、高速にタグ検出を行える必要がある。

本論文では、これら既存システムの課題を考慮し、実世界メディアインタラクションへの適用を意図した次世代ビジュアルタグシステム “C-Band” を提案する。C-Band は、幾何学的パターンではなく、色変化パターンによる符号化を用いることで、タグデザインの柔軟性を実現する(図 3)。初歩的なアルゴリズムを用いた性能評価により、640 × 480 の画像を介して、28 byte のアプリケーションデータを提供できる

ことを確認した。また、C-Band タグの検出手順はシンプルであり、インタラクティブな操作を実現するために十分な処理速度を実現する。このような特徴から、C-Band は、携帯端末カメラを活用した実世界メディアインタラクションの普及を促進するタグシステムの 1 つとして期待される。

以下、2 章で、既存タグシステムの課題と次世代タグシステムへのデザイン要求を示す。3 章では、提案手法 “C-Band” の仕組みと、初歩的な検出アルゴリズムの実装について述べ、4 章で基本性能の評価結果を示す。評価結果をふまえて、5 章で、C-Band の有用性を考察し、6 章で実世界メディアインタラクションへの応用例を示す。最後に 7 章でまとめを述べる。

2. 実世界メディアインタラクションに向けたタグシステム

2.1 関連技術

これまで、実世界メディアに機械可読なデータを付与するタグシステムが数多く開発されている^{2),4)-19),22)}。しかし、多くは高解像度のイメージスキャナや専用リーダーによってデータを読み取ることを前提としている。携帯端末に内蔵された汎用カメラの画像からデータを取得できる手法は次の 3 つに大別される。

(1) ビジュアルタグ

バーコードや 2 次元バーコード^{4),5)}はカメラ画像から検出できる。QR コード⁴⁾は、仕様上最大 2953 bytes の情報を埋め込み、高速に検出できるという特徴を有する。また、AR (拡張現実感) の分野でも多様なビジュアルタグが開発されている⁶⁾⁻⁹⁾。AR 用のタグは、高速検出、位置姿勢検出が可能で、携帯端末カメラとタグの位置関係を用いたインタラクティブな操作を実現する。たとえば、スクリーン上に提示されたビジュアルタグを撮影しながら、カメラ端末を回転することによりオプション選択を行うといったインタラクションが実現されている^{20),21)}。

ビジュアルタグは矩形または円形領域の内部を白黒の幾何学的パターンで埋めた無機質な外観を有する。それゆえ、情報メディアへの提示に際して、タグの外観デザインの魅力を高めたいというニーズがある。このニーズに向け、QR コード内部のパターンに色を付与して、図柄を表現するデザイン QR¹⁰⁾が提案されている。また、色マトリクスコードを基本とし内部デザインに一定程度の柔軟性を有した ColorCode¹¹⁾や、色と幾何学的不変量に基づく ID タグ¹²⁾が開発されている。これらの方法は、タグの幾何学的パターンを維持する範囲内で可能なデザインを付与するものである。

したがって、任意の画像を挿入できるわけではない。

デザイン面の問題を解決する方法として、紫外線インクを用いて非可視なタグを添付することが考えられる。しかし、端末側に特殊光源が必要であり、TV スクリーンに表示できないといった問題がある。紫外線反射インクで印刷したパターンや、目に見えないほど小さいパターンをメディアに付与し、接写形のペン型センサにより読み取るシステムも開発されている^{18),19)}。これらも端末側に特殊デバイスを追加する必要がある。

(2) 画像電子透かし

画像電子透かし¹³⁾⁻¹⁵⁾は、任意の画像に非可視な状態で ID を埋め込む技術でありデザイン上の制約はない。しかし、視覚的な影響を抑えつつ、検出時のロバスト性を確保するという条件の下では、埋め込めるデータサイズが制限される。様々な方式が開発されているが、現状、30 万画素 (640×480) の画像を利用する場合、検出可能なデータサイズは 128 bit (16 byte) が最大となっている¹⁵⁾。

電子透かしに類似する技術として、DataGlyph²²⁾がある。これは、特殊なパターンを画像上に重畳してデータを埋め込むもので、原理的には 640×480 の画像から 50 byte 程度のデータを検出できる。しかし、カメラ画像からパターンを検出する際の処理コストが高く、携帯端末での検出処理に時間を要する²³⁾。

(3) 画像特徴量マッチング

対象画像に処理を加えるのではなく、その特徴量を識別子として利用する手法も開発されている^{16),17)}。この手法では、事前に、対象画像またはその特徴量をリゾルバに登録しておき、撮像された画像の特徴と比較する。この手法では、リゾルバの利用が前提となる。また、類似画像に異なるデータを割り当てられないという制約がある。

2.2 次世代タグシステムへのデザイン要求

以上のように、既存タグシステムは、デザイン性、データサイズ、処理速度のいずれかの面で制約がある。実世界メディアインタラクションへの適用を意図した次世代タグシステムは、以下のデザイン要求をともに満たすことが望ましいといえる。

1. 意味情報を統合し、外観の魅力を向上するためのデザインの柔軟性を実現する。これにより、タグが、データが連携された Hotspot を示すだけでなく、デザイン的な存在価値を持つようになる。

2. URL や e-mail アドレスなどのアプリケーションデータを直接提供できるデータサイズを実現する。これにより、2 次元バーコードと同様に、低コストに多様な用途へ活用できる。

3. 高速な検出処理を実現する。これにより、携帯端末カメラを用いた実世界メディアへのインタラクティブな操作^{20),21)}をサポートできる。

本研究では、これらの要求を満たす次世代タグシステムの実現に向け、ビジュアルタグにデザインの柔軟性を付加した方式を検討する。ビジュアルタグは電子透かし、DataGlyph に比べ、検出処理が低コストであり、インタラクティブ操作の実現に適する。一方、携帯端末のカメラ機能が高度化し、オートホワイトバランスやフラッシュ (白色 LED) を搭載したものが普及してきている。色再現性を向上させるこれらの機能のサポートによって、ColorCode¹¹⁾などの色情報を活用したビジュアルタグの実用化が促進されている。このような状況をふまえ、本研究でも、色情報を活用した次世代ビジュアルタグシステムを提案する。

3. C-Band : カラー環状ビジュアルタグシステム

ビジュアルタグはデータを表現するパターン領域により構成される。したがって、多様なデザインと調和するための柔軟性を有するパターン領域構成手法が研究課題となる。本論文では、グラフィックデザインにおいて、領域の明示、強調、区切りなどの目的でしばしば用いられる“枠”をパターン領域として用いる手法を提案する。提案手法は、枠上の色変化でデータを表現することにより枠形状の柔軟性を実現する。

3.1 C-Band タグの構成

C-Band タグは、任意の図形を含むコンテンツ領域と、それを囲むリング (枠) により構成される (図 3)。リングは埋め込まれたデータのサイズに応じた数の色セクタに分割される。検出 (2 値化) 処理において、リング成分をうまく抽出できるように、リングはその内側と外側に黒い縁を有する。また、リングとコンテンツ領域との間、および、リング外側に白色のマージンを設ける。

3.2 色差信号によるデータ符号化

枠形状を可変にするため、C-Band では、色変化パターン (色差信号) によりデータを表現する。色差信号には多様な方法が考えられるが、具体例として、ここでは色相変化を考慮した色相差信号²⁴⁾について述べる。この方式では、色相値が $2/3\pi$ 増加する色変換によりデータ値 0 を表現し、 $4/3\pi$ 増加する色変化によりデータ値 1 を表現する。したがって、赤 (R) (色相値 = 0 (2π)), 緑 (G) (色相値 = $2/3\pi$), 青 (B) (色相値 = $4/3\pi$) を用いる場合、 $R \rightarrow G$, $G \rightarrow B$, $B \rightarrow G$ の色変化は 0 を示し、 $R \rightarrow B$, $B \rightarrow G$, $G \rightarrow R$ の

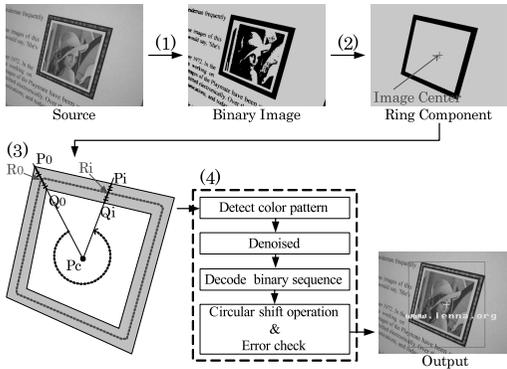


図 4 C-Band タグ検出処理

Fig. 4 C-Band tag detection process.

色変化は 1 を示す。

データコード n bit と誤り検出のためのチェックビット c bit を含むバイナリコードを上記した方式により色差信号へ変換し、リング上に反時計回りの方向に出現する色変化パターンとして表現する。色変化パターンの始点終点間で 1 セクタを調整用に用いるため、 n bit のデータコードをエンコードする場合、リングは $n + c + 2$ 個の色セクタに分割される。

3.3 検出アルゴリズム

R, G, B の 3 色を用いたタグを検出するための初歩的なアルゴリズムの実装について述べる。このアルゴリズムは、以下の 4 つのステップからなり、ユーザがカメラ画像の中心でポインティングしたタグ（カメラ画像中心に位置するタグ）を検出する（図 4）。C-Band システムでは、原理的には、タグがどのような形状であってもよい。しかし、携帯端末での利用が前提であるため、検出アルゴリズムは軽量である必要がある。輪郭形状に制約を設けない場合、特に、画像中から C-Band タグのリングを検出する部分の処理が複雑になる。そこで、この初歩的なアルゴリズムでは、軽量化を重視して、検出可能な C-Band タグの形状を凸包形状に限定している。さらに、色の分類において、色相値を用いない簡易な方法を採用している。これにより、既存携帯電話上のプログラム実行環境では一般にサポートされていない浮動小数点演算を不要としている。なお、凸包形状に限定されたとしても、楕円や長方形、各種凸多角形を含む多様な形状をサポートできる。

Step 1. 2 値化

カメラより入力されたカラー画像を、輝度に対する固定閾値を用いて 2 値化する。入力は、各画素の R, G, B それぞれを 8 bit (0 ~ 255) で示す RGB24 色空間を用いる。画像処理で一般に用いられる YUV

(CCIR601) 色空間の輝度 Y は、式 $Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B$ で与えられる²⁵⁾。ここでは、小数点演算を不要とするために、 Y を 1,000 倍した値を輝度として扱う。

Step 2. リング成分の抽出

まず、2 値化画像中の連結成分の外側輪郭を検出しラベリングを行う（具体的には、文献 25) p.76 に記載のラベリングアルゴリズムを用いている）。次に、画像中心点を内包する輪郭のみを抽出する。さらに、抽出された輪郭線の中で、最大のものを、すなわち、他の輪郭をすべて内包する輪郭を抽出する。そして、その輪郭に対応する連結成分をリング成分として決定する。なお、この手順では、画像中心点を内部に含むリング成分が複数あり、多重リング構造になっている場合、最も外側にあるリング成分が信号検出の対象となる。

Step 3. リング上の点列の抽出

縁との境界部分に位置するピクセルでは色混ざりが発生し、正確な色の抽出が難しくなる。そこで、色混ざりの影響を低減させるため、リング縁から離れたリング帯中央の点列を抽出する。一般的な細線化アルゴリズムでは計算量を要するため、次の手順でリング帯中央の点列を抽出する。まず、リング成分の内部にある任意の点 P_c を選択する。次に、リング成分の外側境界上の各点 P_i と点 P_c を結ぶ線分 $P_i P_c$ とリング成分の内側境界との交点 Q_i を検出し、 $P_i Q_i$ の中点 R_i をリング上の点として抽出する。なお、線分 $P_i P_c$ 上の点を Bresenham のアルゴリズム²⁶⁾ により抽出することで、整数演算のみによって交点 Q_i を検出できる。この手順により、リングが凸包形状である限りカラーパターンの色順を正確に保持した点列が取得される。

Step 4. 点列の色パターンの復号

各点 R_i の色を 3 色に分類した色点列を生成する。なお、 R, G, B から色相値を求める計算にはコストがかかるため、 R, G, B 成分のいずれが最大かに基づく単純な方法で色を分類している。抽出された色点列から、ノイズ（孤立成分）を除き、リングの色変化パターンを抽出する。その色変化パターンの示す色相差信号をビット列に変換し、このビット列をシフトして得られるすべてのビットパターンに対してエラーチェックを試みる。エラーがない場合に、得られたデータコードを検出結果として出力する。

4. C-Band の基本性能の評価

4.1 試行システムの構成

C-Band の基本的性能を評価するため、Windows を搭載した小型ラップトップ上に検出アルゴリズムを実

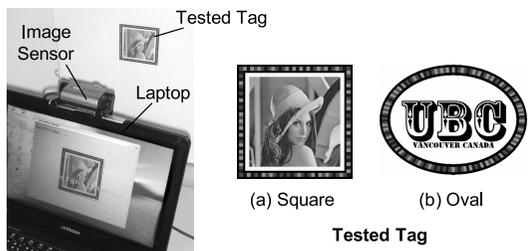


図 5 実験システム構成 (左) とテストしたタグ (右)
Fig. 5 Experimental setting (left) and tested tags (right).

装し, Web カメラ (Sony PCGA-UVC11A, レンズ: F3.4, 焦点距離 $f = 2.8 \text{ mm}$ ($f = 40 \text{ mm}$, 35 mm カメラ換算)) を用いる試行システムを構成した (図 5 左). このカメラはオートホワイトバランス機能を有しており, 試行システムはホワイトバランス処理を施された入力画像を処理する. 評価した C-Band タグは, チェックビットに 16 bit-CRC を用いる構成とした. したがって, データサイズが $n \text{ bit}$ の場合, リングは, $n + 18$ 個のセクタに分割される. C-Band タグの紙面への印刷には, 小型インクジェットプリンタ (HP Deskjet 5740) を用いた.

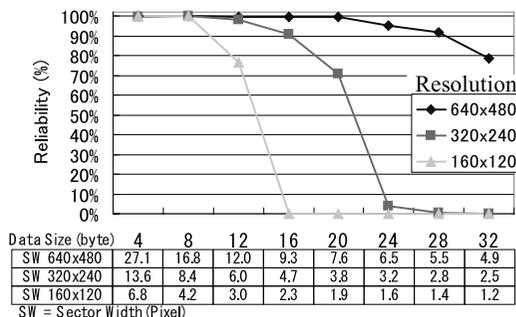
4.2 理想条件下での性能評価

まず, 提案手法の基本的な性能を明らかにするため, 屋内白色蛍光灯照明下での性能を評価した. また, 検出率 (Reliability) として, タグを撮像するカメラから連続して入力される画像フレーム 1,000 個に対して検出を行い, データコードがうまく受信できた割合を用いた. なお, 本実験では, CRC によるエラーチェックが機能せず誤ったデータコードが受信されたケース (False-Positive) はなかった.

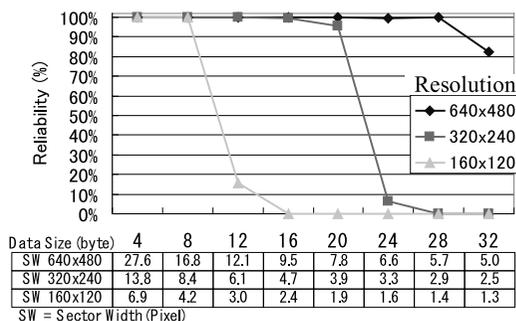
4.2.1 検出可能なデータサイズ

検出可能なデータサイズは, 正確に色検出が可能なセクタ数に依存する. 1 セクタを撮像する画素数が色検出の精度に影響するため, カメラ解像度によって検出できるデータサイズは異なる. そこで, 異なる解像度において, 安定して検出可能なデータサイズを評価した.

まず, 2 種類の形状のタグ (図 5 右) に対して, 異なる Byte 数 (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32) のデータを埋め込み, 縦の長さが 5 cm となるように紙面に印刷した. これらのタグをその正面 8 cm の距離に固定したカメラから撮像し, 検出率を測定した. この条件下では, 各タグは画像中央に, 縦の長さが画像全体の縦の長さのおおむね 80% となるように撮像される. 図 6 に, 640×480 , 320×240 , 160×120 の各解像度により評価した結果を示す. なお, これらのタグ



(a) Square



(b) Oval

図 6 各データサイズ (セクタ幅) と検出率の関係

Fig. 6 Relationship between data size (sector width) and detection reliability.

ではリング幅がタグの縦の長さ (5 cm) の $1/14$ (約 3.6 mm) になっている.

リング上のセクタの境界を撮像する画素では色交じりが発生する. したがって, セクタの境界と境界との間にある画素の数が少なくなると, セクタの色を正確に検出することが難しくなる. 以下, このセクタ境界間を撮像する画素の数をセクタ幅 (Sector Width) と呼ぶものとする. セクタ幅は, 提案手法の色検出性能に強く関係する. 図 6 では, セクタ幅と検出性能の関係を表すため, 各グラフ横軸の下に, 各データサイズ, 解像度でのセクタ幅 (画素数) を示した. なお, 図中のセクタ幅は, Square, Oval それぞれについて次の方法で算出したものである. Square については, 4 辺のうち, セクタ数が最大である辺の頂点間の距離 (画素数) を観測し, これを頂点間に存在するセクタの数で割った値 (小数第 1 位まで) を用いた. Oval については, 撮像されたタグの直径 (画素数) から色パターンリングの周囲長を計算し, これをリング上のセクタ数で割った値 (小数第 1 位まで) を用いた.

まず, データサイズと検出率との関係についてみると, 解像度 640×480 では, いずれの形状に対しても,

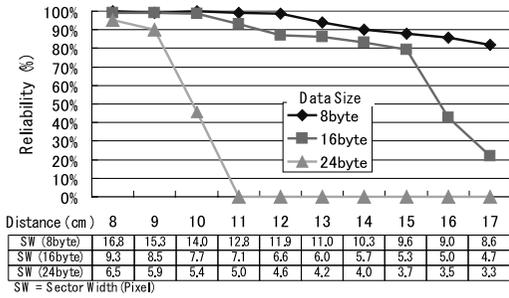


図 7 解像度 640 × 480 時の撮像距離 (セクタ幅) と検出率の関係
 Fig. 7 Relationship between camera distance (sector width) and detection reliability.

28 byte まで 90%以上の検出率を達成した。カメラ入力画像に対して連続的に検出処理を行う場合、1 フレームあたりの検出成功率が 90%以上なら十分に実用的だと考えられる。解像度 320 × 240 の場合、Square では、16 byte、Oval では 20 byte まで 90%以上の検出率を達成した。8 byte であれば解像度 160 × 120 であってもほぼ 100%の検出率を得た。

一方、セクタ幅の影響についてみると、解像度 640 × 480 および 320 × 240 では、セクタ幅が 6 程度以下となると、検出率の低下が見られた。この解像度では、境界からセクタ幅方向に 3 画素程度まで色混じりが生じていた。この結果、セクタ幅が 6 程度になるとセクタ色の検出ミスが発生した。一方、解像度が低い場合 (160 × 120) では、境界からセクタ幅方向に 2 画素程度まで色混じりが生じたため、セクタ幅が 4 以下になると検出率が低下した。

4.2.2 検出可能距離

タグとカメラの距離が離れれば、タグを撮像する画素数は小さくなる。当然、セクタ幅も小さくなることから結果として検出率が低下する。そこで、撮像距離が検出性能に与える影響を評価するため、タグ (Square) が印刷された紙面とタグを正面から撮像するカメラとの距離を 8 cm から 17 cm まで 1 cm ずつ変化させ検出率を測定した。撮像解像度を 640 × 480 とし、タグのデータサイズが 8 byte, 16 byte, 24 byte の場合について評価を行った。その結果を図 7 に示す。グラフ縦軸が検出率であり、横軸は撮像距離を示している。横軸の下には、データサイズごとに各撮像距離で観測されたセクタ幅を示した。セクタ幅の算出方法は、4.2.1 項に述べた手順と同様である。また、利用したカメラは手動で焦点距離を調節可能であるが、8 cm の距離で鮮明に撮像されるよう調整した後、焦点距離を変化させずに評価を行った。

結果、8 byte では、13 cm まで 90%以上の検出率を

実験条件

条件名	照明種類	タグ紙面上の照度
屋内A	白色蛍光灯	440~460 lx
屋内B	暖色系 (橙) 白熱灯	120~140 lx
屋外A	晴天下 (午後3時頃)	1200~2200 lx
屋外B	曇天下 (午後3時頃)	30~50 lx

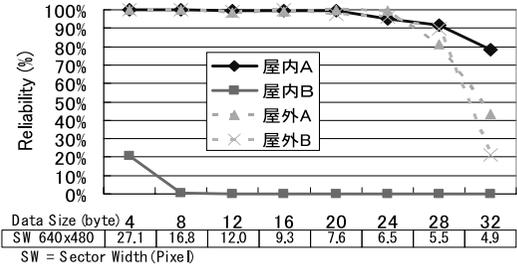


図 8 各種照明条件下での各データサイズ (セクタ幅) と検出率の関係
 Fig. 8 Relationship between data size (sector width) and detection reliability under various lighting conditions.

達成した。8 byte では、距離 17 cm でも、セクタ幅が 8.6 と大きいため 80%以上の検出率を維持した。なお、距離 17 cm では、焦点距離のズレの影響で色混じりを生ずる画素範囲が若干増える。この点が若干の検出率の低下につながっている。16 byte では、11 cm まで 90%以上の検出率を達成し、セクタ幅が 6.6 となる距離 12 cm で検出率が 90%以下に低下した。24 byte では、セクタ幅が 5.4 となる 10 cm の時点で、45%まで検出率が低下した。

すべてのセクタのセクタ幅が同じであれば、基本的に、個々のセクタ境界での検出ミス発生確率は同じである。データサイズが大きく、セクタ数の多いタグほど全体としての検出ミスの発生確率が高くなるため、観測されるセクタ幅に対する検出率の低下が顕著となっている (たとえば、16 byte (セクタ数: 146) では、距離 15 cm で観測されるセクタ幅が 5.3 であるが、依然として 80%程度の検出率を維持できる。しかし、24 byte (セクタ数: 210) では、セクタ幅 5.4 の時点 (距離 10 cm) で 45%まで低下する)。

4.3 各種照明条件下での性能評価

照明条件の違いが検出性能に与える影響について予備的な評価実験を行った。図 8 は、異なる照明条件の下、Square タグ、カメラ解像度 640 × 480 を用いて、4.2.1 項と同じ実験を行った結果を示している。実験は、一般的な白色蛍光灯が設置された居室内 (屋内 A)、比較的強い橙色の白熱灯が設置されたレストラン内 (屋内 B)、および、人工照明が周囲にない屋外で、晴天時午後 3 時頃 (屋外 A) および曇天時午

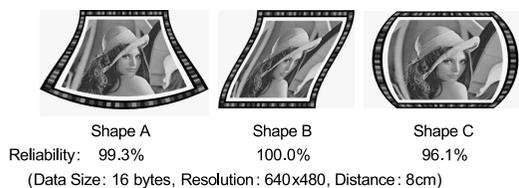


図 9 多様な形状のタグの検出率

Fig. 9 Detection reliability for Tags with various shape.

後 3 時頃 (屋外 B) に行った (なお, 屋内 A の結果は, 図 6 (a) に示すものと同じである). 図 8 上部には, 各実験条件の照明種類と実験時にタグ紙面上で観測された照度 (lx) を示している. また, 図 8 中のグラフの縦軸, 横軸に示す情報は, 図 6 のグラフと同じである.

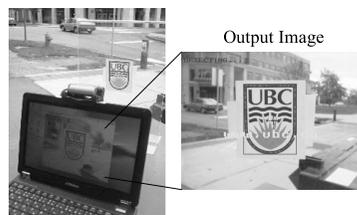
今回の実験では, 屋外晴天 (屋外 A), 曇天下 (屋外 B) での検出性能は, 白色蛍光灯下 (屋内 A) の結果とおおむね同程度であった. これら 3 つの条件の間では, セクタ幅が 6 程度以下となった際 (データサイズ 24, 28, 32 のとき) の検出率低下度合いに異なりが見られた. これは, カメラのオートホワイトバランスを適用しても, 照明色や照度の違いから撮像される色がそれぞれ微妙に異なり, 色混ざりの影響の仕方が変わったためと推測される. 一方, 暖色系 (橙) 白熱灯下 (屋内 B) では, 強い照明色の影響により, 撮像したリング上の青と緑の色相が接近し, 結果として, 今回, 実装した簡易な検出アルゴリズムではうまく色パターンを検出できなかった.

4.4 多様な形状のタグの検出

各種形状のタグをデザインできることが C-Band の利点である. 上述の評価結果から, 照明条件に問題がない場合, 検出性能は撮像されるセクタ幅に依存している. したがって, セクタ幅が 6 以上になるように撮像されるならば, どのような凸形状のタグであっても安定して検出可能なはずである. このことを確認するために, 図 5 に示す Square, Oval よりも複雑な形状のタグ 3 種類を作成し検出率を測定した (図 9). 実験条件は, 4.2.1 項の実験の条件と同じである. データサイズを 16 byte とし, 解像度 640×480 を用いて撮像距離 8 cm で評価した. 結果, いずれも 90% 以上の高い検出率を達成した. Shape C については, 4 頂点付近のセクタ幅が小さくなっているため, その部分の色検出ミスから, 若干の検出率低下が見られた.

4.5 その他の動作確認結果と考察

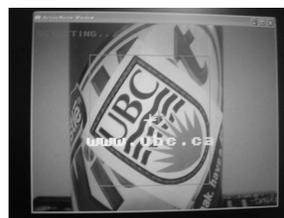
4.3 節に述べたように, 屋外自然光下でも, 条件が良ければ十分な検出性能を得ることを確認した (図 10 (a) には屋外での検出動作を示す). しかし, 屋外自然光



(a) Detecting tag under outdoor lighting



(b) Detecting tag on LCD



(c) Detecting tag on curved surface

図 10 各種条件下でのタグの検出

Fig. 10 Detecting tag under various conditions.

は, 時間によって色が変わる. このため, 条件によっては検出率が低下もしくは検出不可能となる場合も見られた. したがって, 有色の屋内照明を含め, 多様な光環境へ対応するために, 実環境で想定される照明色を考慮した軽量な色補正の仕組みを検討し, 検出アルゴリズムに組み込むことが重要な課題となる.

一方, 照度が不十分 (10 lx 程度以下) である場合や, 他の物体の影がタグ上にかかり照度差が生じている場合では, 2 値化処理時にリング成分がうまく抽出できず, 検出に失敗した. これらの照度に関わる問題は携帯電話のフラッシュ (白色 LED) を用いたライティングにより改善できることが期待される. 確認のため, 3.6 V, 30 mA の白色 LED をカメラに取り付けてテストを行った. その結果, タグ表面の光条件が安定し検出性能が改善された. また, スクリーン (LCD) に表示したタグの検出動作も確認した (図 10 (b)). 特に LCD は, そのものが色を発光するため周囲光の影響が少なく, 安定して検出できた.

また, 4.4 節で確認したとおり, C-Band タグは多様な形状で構成し検出できる. 理論的には, どのような凸形状であるかに関係なく, 結果的に, 撮像されたタグの各セクタのセクタ幅が少なくとも 6 画素以上,

また、セクタの縦の長さについても 6 画素以上となっていれば検出できるものと考えられる。この特性から、タグを添付した面が曲面であるなどの要因で、撮像されるタグ形状が変形した場合でも検出可能である。実際に、曲面（直径 6.5 cm の円筒缶側面）にタグ（縦 5.0 cm、横 3.7 cm）を添付しテストした結果、うまく検出できることを確認した（図 10 (c)）。これについても、検出の可否は、曲面の形状ではなく、タグ中の各セクタが少なくとも幅 6 画素、縦 6 画素で撮像され、かつ、環境光の影響により曲面上で生じる照度差が 2 値化処理に影響を与えない範囲である場合にうまく検出できるものと考えられる。

4.6 検出アルゴリズムの処理時間

Pentium M 1GHz を搭載した小型ラップトップ (Victor MP-XP7310) による検出処理時間を計測した。4.2.1 項の実験と同じ条件で 1,000 回検出を繰り返し、1 フレームあたりの処理時間の平均値を求めた。その結果、解像度 640×480 では 68.0 msec、 320×240 では 14.8 msec、 160×120 では 3.5 msec であった。特に、リング成分抽出時のラベリング処理、次いで、リング上の点列の抽出処理に時間を要している。この結果からの単純な予測では、104 MHz ~ 425 MHz の CPU を搭載した携帯電話での処理時間は、上記 PC の 2 ~ 10 倍になると推定できる。近年、携帯電話への GPU (Graphics Processing Unit) の搭載が進んでいる。GPU を活用することで、2 値化処理や色の分類処理が全画素について並列に行えるため、処理時間が低下できる²⁷⁾。

5. C-Band の特徴についての考察

既存ビジュアルタグシステムと比較した C-Band の利点と課題について以下に考察する。

5.1 デザインの柔軟性

色変化パターンでデータを表現する C-Band では、内包する図形に合わせて、多様な凸形状のタグを実現できるとともに、デザインのトーンに合わせて不規則なセクタ幅の色パターンなども表現できる（図 3）。このようなデザインの柔軟性を有することが、既存ビジュアルタグシステムに対する大きな利点である。

さらに、C-Band タグは、アイコンやロゴマークなど提示スペースの小さな画像へのタグ付けに有効である。カメラの分解能を 0.3 mm 程度とすると、QR コード⁴⁾ は、少なくとも 1 平方 cm 程度の正方形スペースを占有する。ある図形に 9 平方 cm の印刷スペースがあらかじめ割り当てられているとする。このスペースに 1 cm 角の QR コードを追加することは効率的では

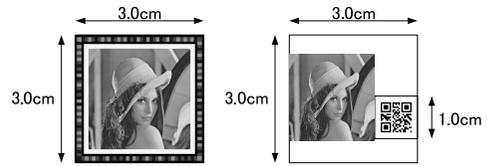


図 11 小さい固定面積領域への URL タグ付け
Fig. 11 Adding a URL tag to small, fixed space.

ない（図 11）。C-Band では、印刷スペースの形状に依じた枠を用いることで有効にスペースを活用できる。

デザイン面の課題として、リングの色調を調整できるようにすることがあげられる。リングは HotSpot の存在を示すキューとして機能するが、リングの色調が周囲のデザインにそぐわない場合もある。試行システムでは、RGB の色相差信号を用いているが、基本的に、色差信号は、識別可能な組合せであれば、どのような 3 色からでも生成できる。(赤, 黒, 白), (緑, 黒, 白) などの色差信号を実現すれば、より周囲の色調に合うタグをデザインできるようになる。

5.2 提供可能なデータサイズ

4.2.1 項に示したとおり、C-Band タグが提供可能なデータサイズは、 640×480 の画像に対して、最大 28 byte であった。QR コードと同様に 11 bit で英数字 2 文字を符号化する場合、40 文字が提供できる⁴⁾。この文字数制約の範囲で URL や e-mail アドレスを直接提供することは可能である。

しかし、C-Band タグが提供できるデータサイズは、正方形領域全体にパターンを埋め込む 2 次元バーコードに比べて小さい。C-Band タグは、その構造上、撮像画像中に占めるパターン領域の割合が小さくなる。このことが提供可能なデータサイズを低下させる主な要因である。それゆえ、パターン領域を拡大することにより、データサイズは改善できる。具体的には、より太いリングを用い、内部のリング状のコードパターンを多重化することが考えられる。16 byte のデータを含むリング状コードを 3 多重すれば 48 byte のデータが表現できる。このような多重リング構造を用いても、形状の柔軟性は維持できる。また、利用する色数を増やすことができれば、情報密度を増加させることが可能になる。

5.3 インタラクティブ操作への適用性

4.6 節に示した処理時間の評価結果から、携帯端末でも、解像度 320×240 の画像を用いる場合、7 fps 程度、 160×120 の画像では、28 fps 程度のレートで C-Band タグ検出処理を実行できると考えられる。また、4.2.1 項に示したように、 320×240 の画像からでも 16 byte、 160×120 でも 8 byte のデータが検出

できる。すなわち、16 byte 以下の C-Band タグであれば十分高速に検出可能である。

文献 8) には、パブリックスクリーンなどのローカルサイトに提示したタグを活用し、カメラ端末によるサイトへの情報操作を簡易化するシステムが提案されている。このシステムは、カメラ端末でタグをスキャンすることにより、自動的に、サイトとの Bluetooth リンクを確立し、特定の情報操作（氏名入力、席予約など）を実施するものである。このシステムの実現に必要なタグのデータサイズは、たかだか 63 bit（48 bit の Bluetooth デバイスアドレス (BD_ADDR) と 15 bit のアプリケーションデータ）である。当然、C-Band タグもこのようなシステムに適用可能である。しかも、タグにその機能を示すデザインを付与することで、ユーザインタフェースを改善することができる。

カメラとタグの位置関係を用いたインタラクティブ操作を行うためには、タグの姿勢検出が必要である^{7),20)}。C-Band タグでは形状が可変であることが姿勢検出に際して問題となる。しかし、データ領域に形状、タグサイズを通知する flag を挿入しておくことで姿勢検出にも対応できる。具体的には、色パターン始点を 1 頂点（角）に配置した正方形タグを用い、flag を介して端末側に形状、タグサイズを知らせる。端末側では、画像中の正方形形の形状と色パターン始点の位置に基づいて、距離、回転、傾きなどのパラメータを算出することで、インタラクティブ操作²⁰⁾を実現できる。

6. 実世界メディアインタラクションへの適用

以下に、C-Band の利点を活かす応用例のいくつかを示す。

6.1 スクリーンインタラクション

パブリックスクリーンインタラクション^{21),24)} は C-Band の有望な応用の 1 つである。C-Band タグは、ロゴマークと統合したデザイン（図 3 (a)）や、アニメーションを内包できるというユニークな特徴がある。これにより、たとえば、TV-CM への情報連携において、企業ロゴやアニメーションを含んだ魅力的なタグを提供できる。アニメーションそのものに機能的意味を持たせることで、インタラクティブなアプリケーションも実現できる。図 12 に、この特徴を活かしたインタラクティブスクリーンアプリケーション（モグラ叩きゲーム）を示す。

ゲームスクリーンには、9 個の C-Band タグがあり、モグラの出るホールとその ID を示している。各ホールからは 2 種類のキャラクタがランダムに出現す

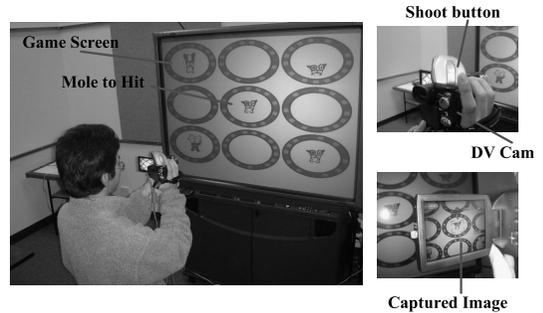


図 12 C-Band を用いたモグラ叩きゲームスクリーン
Fig. 12 C-Band based Whack-a-Mole game screen.

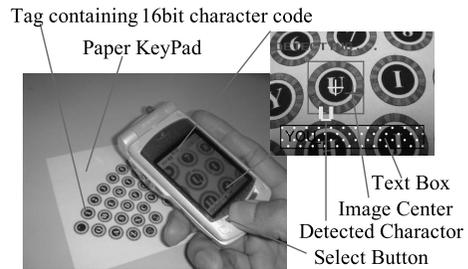


図 13 タグを用いる仮想キーボード
Fig. 13 Tag based virtual keypad.

る。1 つは敵であり、一方は味方（ヒットすると減点される）である。ユーザはカメラにより敵をポイントし、シュートボタンを押すことで敵をヒットする。

C-Band タグはホールとしてゲームスクリーン上に大きく表示される。したがって、各ホールの横に小さなビジュアルタグを配置する場合より広範囲（遠く）から検出可能である。また、C-Band タグでは、キャラクタをポイントする操作が、タグをポイントする操作と一致する。このため、横に配置されたビジュアルタグをポイントするシステムより、操作が自然だといえる。

6.2 タグを用いる仮想キーボード

モバイル環境での利用に適した入力インタフェースの実現は依然として重要な課題である。文字や記号コード、コマンドコードなど含む複数の C-Band タグを用途に応じて配置した紙片は、可搬性に優れた仮想入力デバイスとなる。このような仮想キーボードのイメージを図 13 に示す。Bluetooth を活用すれば、携帯端末から分離可能な小型カメラモジュールが構成できる。将来的には、小型カメラを指先に付けて操作する入力インタフェースも実現できると考えられる。

文字の横に既存タグを配置する場合、キーボードのように選択対象が過密に配置されると、文字とタグとの対応が把握し難くなる。一方、C-Band タグの操作では、入力したい文字（を含む枠）を直接ポインティ

ングすればよく、自然で分かりやすい。

6.3 実世界アイコン

文献 28) では実世界メディアに機能が連携された小さなタグを提示し、GUI におけるアイコンのように活用するインタフェースが提案されている。URL を含む QR コードも、携帯端末で Web ページを開くためのアイコンだと考えることができる。アイコンのデザインは、対応する機能を分かりやすく表現していることが重要である。C-Band タグは、内部画像だけでなく形状をも用いて、その機能を表現するようにデザインできる (図 3(c))。また、5.1 節に述べたように、C-Band タグの構造は、印刷スペースの小さな画像へタグ付けを行うことに適している。このことから、実世界メディアに添付されるアイコンの実現に適したシステムだといえる。

7. ま と め

本論文では、携帯端末カメラによる実世界メディアインタラクションへの適用を意図した新しいビジュアルタグ構成手法“C-Band”を提案した。色差信号を用いる C-Band は、デザイン面で高い柔軟性を有する。それゆえ、連携機能の意味や見た目の楽しさを考慮したタグ外観を実現できることが期待される。データサイズについても、文字数に制約はあるが、URL などを直接内包することが可能である。さらに、アニメーションが内包できるなど、インタラクティブシステムへの適用に向けて有用な特性を持つ。このような特徴から、C-Band は、視覚的に魅力があり、機能的にも優れた実世界メディアインタラクションを実現するタグシステムだといえる。それゆえ、携帯端末カメラとタグシステムとを活用したメディア連携サービスのさらなる進展に寄与する手法として期待される。

今後、本技術の実用化に向けた課題に取り組む。特に、多様な光条件下での性能評価と、ロバスト性向上に向けた検出アルゴリズムの改良が重要である。将来、携帯電話機器において浮動小数点数演算がサポートされるようになれば、色相値を算出処理する方法の適用などにより検出性能を改善することが可能である。この点を考慮し、アルゴリズムの高度化を進める。また、実用化に向け、高性能携帯電話や PDA への実装を進めるとともに、タグオーサリングシステムの開発を行う。さらに、各応用について、C-Band の提供するデザイン柔軟性を活かした、使いやすく魅力的なタグデザインの方法について、グラフィクスデザイナーとともに検討を進める。

謝辞 本研究をご支援いただいたブリティッシュコ

ロンビア大学 HCT-Lab, MAGIC の皆様, NTT サイバースペーション研究所の皆様にご挨拶いたします。また、電子透かし技術に関してご教示いただいた NTT サイバースペーション研究所中村高雄氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Rekimoto, J. and Nagao, K.: The World through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments, *Proc. UIST'95*, pp.29-36 (1995).
- 2) Want, R., Fishkin, K., Gujar, A. and Harrison, B.: Bridging Physical and Virtual Worlds with Electronic Tags, *Proc. CHI'99*, pp.370-377 (1999).
- 3) 宮奥健人, 重吉宏樹, 阿久津明人, 外村佳伸: VisionMark: 情報伝達メディアとインターネットの協調に向けたメディア連携方式, 信学論, Vol.J86-D-I, No.6, pp.421-430 (2004).
- 4) QR-Code.com. <http://www.qrcode.com/>
- 5) Semacode. <http://semacode.org/>
- 6) Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags, *Proc. DARE2000*, pp.1-10 (2000).
- 7) 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行: 複合現実感における位置合わせ手法, 日本 VR 学会論文誌, Vol.8, No.2, pp.171-180 (2003).
- 8) Toye, E., Sharp, R., Madhavapeddy, A. and Scott, D.: Using Smart Phones to Access Site-Specific Services, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.4, No.2, pp.60-66 (2005).
- 9) Rohs, M.: Real-World Interaction with Camera Phones, *Proc. UCS2004*, LNCS 3598, pp.74-89 (2005).
- 10) 有限会社新世界: デザイン QR. <http://d-qr.net/index.htm>
- 11) ColorZip: カラーコードの市場展開. <http://www.colorzip.co.jp/ja/>
- 12) 磯 俊樹, 倉掛正治, 杉村利明: 携帯電話機搭載カメラを用いた読取り条件にロバストな ID 読取り方式, 信学論, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2188-2198 (2004).
- 13) Alattar, A.M.: Smart images using digimarc's watermarking technology, in Security and Watermarking of Multimedia Contents II, *Proc. SPIE*, Vol.3971, pp.264-273 (2000).
- 14) 中村高雄, 片山 淳, 山室雅司, 曽根原登: カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式, 信学論, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2145-2155 (2004).
- 15) 三洋電気: ニュースリリース (2004 年 7 月 20 日). <http://www.sanyo.co.jp/koho/hypertext4/0407news-j/0720-3.html>

- 16) Kato, H. and Billinghamurst, M.: Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system, *Proc. IWAR1999*, pp.85-94 (1999).
- 17) C4Technology : 技術情報—特徴量抽出技 . <http://capg.c4t.jp/technology/extraction/>
- 18) Anoto AB.: Anote. <http://www.anoto.com/>
- 19) TAKARA: D-touch. <http://www.d-touch.jp/>
- 20) Rohs, M. and Zweifel, P.: A Conceptual Framework for Camera Phone-based Interaction Techniques, *Proc. PERSASIVE2005*, LNCS 3468, pp.171-189 (2005).
- 21) Toye, E., Sharp, R., Madhavapeddy, A., Scott, D., Upton, E. and Blackwell, A.: Interacting with mobile services: An evaluation of camera-phones and visual tags, *Journal of Personal and Ubiquitous Computing* (online) (2006).
- 22) XeroxParc: DataGlyphs. <http://www.parc.com/research/projects/dataglyphs/>
- 23) Moravec, K.L.C.: A grayscale reader for camera images of Xerox DataGlyphs, *Proc. BMVC*, pp.698-707 (2002).
- 24) Miyaoku, K., Higashino, S. and Tonomura, Y.: C-Blink: A Hue-Difference-Based Light Signal Marker for Large Screen Interaction via Any Mobile Terminal, *Proc. UIST 2004*, pp.147-156 (2004).
- 25) 酒井幸一 : デジタル画像処理入門, CQ 出版社 (2002).
- 26) Bresenham, J.E.: Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter, *IBM Systems Journal*, Vol.4, No.1, pp.25-30 (1965).
- 27) 宮田一乗, 高橋誠史, 黒田 篤 : GPU コンピューティングの動向と将来像, 芸術科学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.13-19 (2005).
- 28) Sioo, I. and Mima, Y.: IconStickers: Converting Computer Icons into Real Paper Icons, *Proc. HCII: Ergonomics and User Interfaces-*

Volume I, pp.271-275 (1999).

(平成 18 年 6 月 15 日受付)

(平成 18 年 12 月 7 日採録)



宮奥 健人 (正会員)

1994 年広島大学総合科学部卒業 .
1996 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了 . 同年日本電信電話株式会社 (NTT) 入社 . 2005 ~ 2006 年カナダ, プリティッシュコロンビア大学客員研究員 . ユビキタスサービスのインタフェースに関する研究開発に従事 . 現在, NTT サイバースリユーション研究所研究主任 . 電子情報通信学会, ACM 各会員 .



アンソニー タン

カナダ, プリティッシュコロンビア大学大学院博士課程在学 . 主に大型ディスプレイを用いた協調作業支援, マルチディスプレイ環境におけるインタラクションテクニック, 情報ビジュアライゼーションの研究に従事 .



シドニー フェルス

カナダ, プリティッシュコロンビア大学電機計算機工学部準教授 . ヒューマンコミュニケーションテクノロジー, 調音音声合成, ヒューマンコンピュータインタラクション, インタラクティブアート, 音楽表現のためのインタフェース, および, 人工知能の研究に従事 . Ph.D. (計算機科学) .