

# 立体映像表示が可能なタンジブルデバイス Ficon へのペン入力の統合

高田 悠太<sup>1,†1</sup> 中林 隆介<sup>1,†2</sup> 福地 健太郎<sup>1,2,a)</sup>

受付日 2014年6月30日, 採録日 2015年1月7日

**概要:** 我々はテーブルトップシステム上で使用する, 光ファイバを用いた映像提示が可能な操作デバイス“Ficon”を提案した. Ficon は表面の形状加工を施すことで, 立体的な映像表現が可能になる. 我々は CG と立体形状を持つ Ficon を組み合わせ, 実体を持つ立体映像を表現するタッチディスプレイとして Ficon を実装した. Ficon は一般的な立体視差を使った 3D ディスプレイと異なり, 映像に実際に触れて操作することができる. これに加えて, 今回は赤外線を利用して, Ficon へのペン入力認識と, Ficon の ID 識別を両立させるシステムを実装した. 本稿では, Ficon の構造の問題点および左記実装について記述した後, Ficon の立体映像表現について触れ, いくつかのアプリケーションを示す.

**キーワード:** タンジブルインタフェース, 立体ディスプレイ, 3DCG

## Integration of Pen Input for 3D Displaying Tangible Device System “Ficon”

YUTA TAKADA<sup>1,†1</sup> RYUSUKE NAKABAYASHI<sup>1,†2</sup> KENTARO FUKUCHI<sup>1,2,a)</sup>

Received: June 30, 2014, Accepted: January 7, 2015

**Abstract:** We present Ficon, a novel tangible input device for tabletop systems that enables dynamic image projection using optical fibre bundle. It enables to provide 2.5 dimensional projection image with its relief-structured top surface, and allows tangible manipulation including touch and pen input, unlike stereoscopic displays. In this paper, we describe the details of the ID recognition and pen input techniques employing infrared reflection marker, LED, and cameras. We also introduce some experimental applications.

**Keywords:** tangible interface, 3D display, 3DCG

### 1. はじめに

テーブルトップシステムの分野で, テーブル上に置かれた操作デバイスを使ってオブジェクトを操作するインタラクション手法が注目されている. この手法は, 情報に物理

的実体を与え, 操作デバイスに対象となるオブジェクトの外観を持たせることで, 操作デバイスとオブジェクトの対応関係が把握しやすくなり, またインタラクション手法が多様化する. しかし, 従来の操作デバイスでは, 操作対象のオブジェクトの内部状態が変化しても操作デバイス自体の外観は変化しないため, オブジェクトの内部状態に関する情報はテーブル面に表示するなどの工夫が必要になる. この場合, デバイス自体と補助映像でテーブル面を占領してしまうため, テーブルの表示可能領域が大きく減少してしまう. テーブル上部のプロジェクタから直接デバイス表面にオブジェクトの映像を投影する方法はあるが, ユーザの手や腕によるオクルージョンの問題が残る.

<sup>1</sup> 明治大学  
Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan

<sup>2</sup> 科学技術振興機構  
Japan Science and Technology Agency, Chiyoda, Tokyo 102-8666, Japan

<sup>†1</sup> 現在, 株式会社コナミデジタルエンタテインメント  
Presently with KONAMI Digital Entertainment

<sup>†2</sup> 現在, DNP 情報システム  
Presently with DNP Information Systems

a) kentaro@fukuchi.org

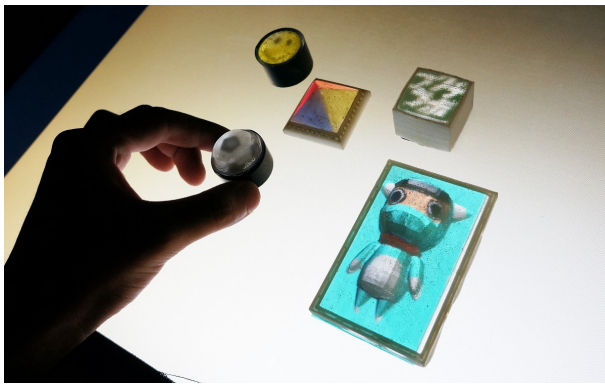


図 1 様々な Ficon の形状

Fig. 1 Examples of variously-shaped Ficon.

### 1.1 Ficon の概要

これらの問題を解決するための手法として Ficon というデバイスを提案し、これを用いたシステムを開発した [15]. 光ファイバの束で構成される Ficon は映像が表示されたディスプレイの上に乗せるとその下の映像が表面に浮き上がって見える. この現象を利用し, 関連付けられたオブジェクトの状態を反映した映像を Ficon の下から投影することで, デバイスの外観を可変にした. これによりデバイスの表面も映像の表示領域として利用することができる. また, 表面形状を加工することで立体的な映像表現ができる (図 1). 一般的な 3D ディスプレイと異なり映し出される映像には実体があるため, 映像に触れて操作することに違和感がない. さらに, 形状加工したいくつかの Ficon を積み木のようにテーブル上で組み合わせることで, 簡単な形状の入力が可能になる [10].

我々はこれまでに, Ficon を操作デバイスとして用いるテーブルトップシステムを実装するうえで「デバイスの ID 識別」「デバイスに対する操作」の各機能を追加した. まず, Ficon を構成する光ファイバのねじれを利用した固有 ID 識別の手法を提案した. 次に, Ficon に対するタッチによるポインティング操作を可能にするために, Diffused Illumination [3] を利用し, Ficon に触れる指先を赤外線カメラで検知するテーブルトップシステムを提案した. しかし, この 2 つのテーブルトップシステムは映像提示手法およびカメラ位置が異なるものであり, 「デバイスの ID 識別」「デバイスに対する操作」を統合することは困難であった.

### 1.2 本研究の概要

本研究では Ficon の ID 識別とポインティングの両立を可能にする手法としてペン入力を導入した [14]. このために ID マーカの認識用とペン入力の認識用に用いる赤外線波長帯を分け, 2 台の赤外線カメラでそれぞれを認識する手法を実装した. これにより, どの形状の Ficon にどういった操作がなされたのかをシステムが把握できるようになる.

本稿では, Ficon の構成, ID 識別とポインティング認識を両立させる手法および実装方法を説明した後, Ficon の形状加工方法とそれにより拡張された映像表現の例をあげる. また, 形状加工による Ficon の視認性の低下を問題としてあげ, これを検証する実験と考察をまとめた. 最後に今回試作したテーブルトップシステムにより可能になったインタラクション手法をアプリケーション例で示す.

## 2. 関連研究

石井らはユーザが実体化された情報に直接手で触れて動かすことを可能にするタンジブル・ユーザインタフェースという概念を提唱している. metaDESK [11] ではアイコンの物理的表現であるファイコンとウィンドウの物理的表現であるレンズを模したディスプレイを用いて情報の格納・操作・閲覧を行っている. しかしこの手法では, 操作デバイスと表示デバイスとしての小型ディスプレイを別々に用意する必要がある.

Sensetable [4] や Audiopad [5] は情報を操作デバイス表面へプロジェクタを用いて投影することで直接的に情報を重畳表示している. しかしユーザの手によるオクルージョンの問題が残る. この問題を解決する手法として, 操作デバイスを透明化しデバイスの裏から映像を投影する方法がある. Data Tiles [8] は液晶ディスプレイによるテーブルトップシステム上に, 透明なアクリル製のタイル状操作デバイスを並べて使用するシステムであり, 情報の閲覧と操作を 1 つのデバイスで可能にした. しかし, デバイスによる映像表現は Ficon のような立体的なものではなく平面的なものに限定されている. SLAP widgets [12] や PhotelasticTouch [9] は, テーブルトップシステム上で使用できる樹脂製の透明な操作デバイスを提供するもので, いずれも立体的形状を持ち, その形状を活かした操作を可能としている. しかし投影映像はデバイス表面で拡散せず, そのまま素材を通過するため視点位置によっては映像が歪み, また樹脂に応力がかかるとさらに映像が歪むという性質を持つ.

光ファイバを用いて映像をデバイス表面に導く構造を提案したものに, Lumino [1] がある. 光ファイバとマーカとを組み合わせたブロックを用いることでディスプレイ下のカメラから光ファイバ越しにマーカを撮影することができ, 重なったブロックの識別, ブロックへのタッチや回転を検出できるシステムが Microsoft Surface 上に実装されている. 重ねたブロックの識別を可能にした点で新規性があるが, 光ファイバの透過性を上層ブロックの ID 識別のために利用しているため, デバイス表面への解像度の高い映像表示を行っていないという点や, ブロックの表面形状の加工による 3D 映像表現を行わない点で本研究とは異なる. Printed Optics [13] は 3D プリンタの素材に透明度の高い光硬化樹脂を用いて光ファイバと同様に光をデバイス

表面に導く。この技術を応用した PAPPILLON [2] は球面のディスプレイ面に対して三次元映像表示を行い、また指を使ったポインティング操作が可能である。ディスプレイ面の形状を立体的にデザインし、3D プリンタで印刷可能だが、凸面でなければならないという制約があり、またテーブルトップシステム上で扱うデバイスにこれらの機能を実装していない。

### 3. Ficon

#### 3.1 Ficon の構成

Ficon は光ファイバの束とそれをまとめる枠で構成される。光ファイバの束はデバイス底面に表示された映像を浮かび上がらせ、デバイス天面へ投影する。構成する光ファイバの径を小さくするほど、Ficon に映し出す映像の解像度が上がる (図 2)。枠とデバイス表面に形状加工を施すことで、様々な形に仕上げることができる。Ficon の形にあった映像を表示することで、立体的な映像表現が可能になる。形状加工の方法や本稿で提案するシステムに合わせた変更などの細かい仕様については 5 章で説明する。

#### 3.2 これまでの Ficon システム

##### ねじれを利用した固有 ID 識別システム

このシステムは液晶ディスプレイの偏光現象を利用し、デバイスの位置認識を行う [15]。液晶ディスプレイから出る光は偏光しているが、光ファイバにはその偏光を崩す光学的特性があるため、カメラに偏光フィルタを取り付けることで、液晶ディスプレイから直接届く光を遮断し、Ficon を通過した光のみを検出し、位置認識を可能にした。Ficon を構成する光ファイバの束をねじり、映像を回転させ、その回転角を計測することで固有 ID 識別を行っている。テーブルの上部に取り付けたカメラで位置認識を行っているため、手が Ficon を覆ってしまうと、位置認識はできなくなる。したがって、Ficon の位置情報を取得したまま Ficon に対するタッチを検出することが難しかった。静電容量タッチパネルと導電布を巻いた Ficon を組み合わせ

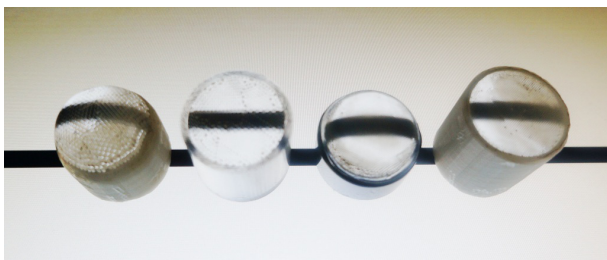


図 2 Ficon を構成する光ファイバの細さの違いにより生じる解像度の差。左側 2 つの Ficon は 1 mmφ、右側 2 つは 0.5 mmφ の光ファイバを用いている

Fig. 2 The difference of the resolution: two Ficons on the left use 1 mmφ, and two on the right use 0.5 mmφ fiber.

てタッチポインティングを実装したが、Ficon 上のタッチ位置の検出ができなかった。また、デバイスの回転の検出に問題があった。

#### Diffused Illumination システム

Diffused Illumination (DI) を利用した手法ではテーブルの下に設置された赤外線カメラで Ficon 底面に張り付けた赤外線反射マーカを識別することで、Ficon の位置、回転角を計算している。したがって、Ficon 天面に指や手が接触しても、Ficon の位置認識が可能である。またテーブル下から赤外光を投光し、Ficon の上に置かれた指先が反射した光を赤外線カメラで観測することにより、タッチ認識を可能とした。位置認識に用いられる赤外線反射マーカは固有 ID 識別に用いることも可能だが、ある程度広い幅の枠が必要なので、Ficon の映像の表示可能領域が減少してしまう。また、複数の Ficon を並べたときに表示面の間に隙間ができてしまい、連続的な映像提示に支障をきたしていた。

#### 3.3 Ficon に対する操作

すでに述べたように、Ficon に対する操作としては Ficon をテーブル面上で並進および回転させる操作と、Ficon 表面に対するタッチ操作を可能としている。このうち後者については、先行する映像提示可能なタンジブルデバイスにならない、Ficon 上に提示された映像に対する直接的な操作手法として、ポインティング操作を実現することを目指した。しかし上に述べたように、これまでの実装ではタッチによるポインティング操作の実現に困難があった。

#### 3.4 ID 識別とポインティング操作の統合

「デバイスの ID 識別」「デバイスに対するポインティング操作」の 2 つの機能を両立させるために、本研究ではペン入力によるポインティング操作を導入した。またその実現のために、固有 ID の識別用とペン入力の認識用とで使用する赤外線の波長帯を変え、2 台の赤外線カメラを使ったシステムを実装した (図 3)。

まず、ID 識別のために Ficon 底面に取り付けるマーカとして、赤外光のみを反射し、可視光を透過する性質を持つフィルムを採用した。マーカの形状を Ficon の枠に制限しなくても、デバイスへの映像提示を阻害することはない。このとき、DI 方式を使用するとマーカを貼った部分のタッチ位置の認識精度が低下するため、これに代えて、先端に LED を取り付けたペンによるポインティング操作を採用した。LED は ID 識別用マーカが反射しない波長の赤外光を発するものを使用する。この赤外光を観察するためにペン先の赤外光のみを撮影するカメラをマーカ撮影用カメラとは別にもう 1 台用意する。

今回実装したペンはタッチに比べて、細かいポインティングが可能である。特に、表示域の小さい Ficon に対して

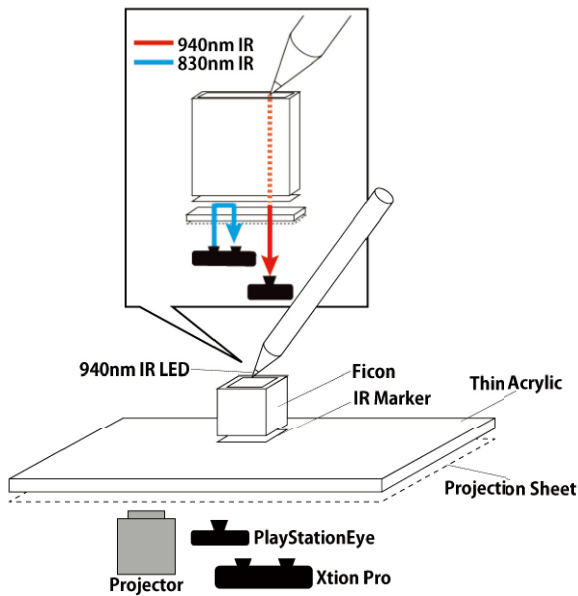


図 3 ハードウェア構成  
Fig. 3 System overview.

はタッチする指先が大きく、細かい操作が難しいという問題（ファットフィンガ問題）があったが、ペンポインティング操作を採用することで Ficon に対する細かい操作を実現した。

## 4. 実装

### 4.1 ハードウェア構成

ID 識別用とペンポインティング認識用に赤外線カメラを 2 台使ったシステムを図 3 に示す。テーブル面には不透明の投影シートを貼ったアクリル板を用い、テーブルの下にはプロジェクタ、波長 830 nm の赤外線 LED、赤外線カメラ 2 台を設置した。

ID 識別用赤外線カメラには ASUS 社の Xtion PRO を用いた。赤外光でパターンを照射し、パターンの歪みを計測することで深度情報を得る Xtion PRO は波長 830 nm の赤外線投光器を備えており、またこの波長の赤外線を撮影するカメラを搭載している。本研究では Xtion Pro による深度情報は使用しないため、投光器にはディフューザを追加し、赤外線の投光器として用いた。また、テーブル面に対して赤外線をなるべく均一に照射するために、Xtion PRO の赤外線投光器のほかに波長 830 nm の LED を数個テーブル面に向けて設置した。

Ficon 底面には、固有 ID 識別のためのマークとしてデバイスの底面に、700 nm から 1,040 nm の赤外光のみを反射し、可視光を透過する Tigold 社の赤外線カットフィルタを利用した（図 4 左）。可視光を透過するこのマークは Ficon の映像投影の妨げにはならない。

ポインティングに使用するペンの先端には波長 940 nm の赤外線 LED が取り付けられている（図 5）。LED の光

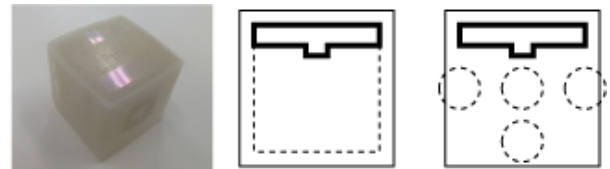


図 4 左：底面に透明な ID マークを貼りつけた Ficon. 中：マーク位置を特定するためのファインダパターン. 右：ID シンボルが配置できる領域

Fig. 4 Left: Transparent IR reflection markers on the bottom surface of the Ficon. Middle: Finder pattern. Right: ID symbol areas.

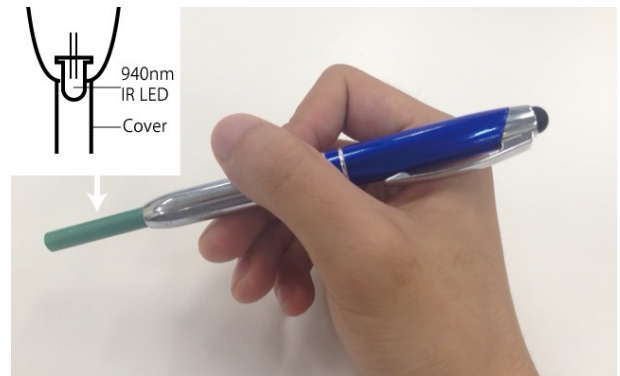


図 5 先端に赤外線 LED を搭載したペン  
Fig. 5 IR Stylus.

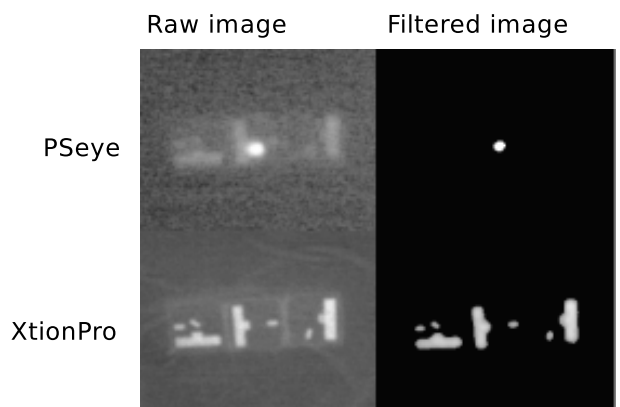


図 6 2 台の赤外線カメラからの画像と、それに対して画像処理を施した結果

Fig. 6 Raw images from two IR cameras and filtered images.

が拡散しないよう、LED にはカバーを被せた。マークが反射する赤外光は 700 nm から 1,040 nm の波長なので、ペン先の LED の光が赤外線反射マークの干渉をうけ減衰してしまうが、LED の光が十分に明るければカメラで認識することができる。

ペンポインティング認識用赤外線カメラは Sony Computer Entertainment の PlayStationEye に、860 nm 以下の波長の光を遮る IR フィルタ (FUJI FILM IR-86) を取り付けられたものを使用した。これにより、マークや手が反射する波長 830 nm の赤外線と可視光が写り込まず、ペン先の軌跡のみ撮影することが可能になる（図 6 上）。一方、

Xtion Pro には波長 830 nm の赤外線以外はほとんど写らないため、ペン先が発する LED の光による影響はなく、ペンを使って Ficon 上にポインティング操作を行っていてもマーカの反射光だけを抽出することができる (図 6)。

## 4.2 ソフトウェア構成

### ID 識別部

まず、ID 識別部では Xtion PRO が撮影する映像に対して背景差分処理、閾値処理を行い、高輝度領域を抽出する。得られた複数の領域から、図 4 中央のようなファインダパターンを探査し、マーカのテーブル上での位置を決定する。ファインダパターンが凸状になっているのは、マーカの向きを判定するためである。探査が済み、マーカの位置と角度が確定したら、ファインダパターンにより決定された領域にあるシンボルを検出し、その有無により ID を決定する (図 4 右)。現在の実装では、シンボルを配置する領域は 4 つとし、 $2^4 = 16$  通りの ID が識別できる。シンボルを配置可能な領域を増やせば、さらに多くの ID を識別することが可能になる。

### ペンポインティング認識部

ペン先に取り付けられた LED が発する光は、IR フィルタをつけた PlayStation Eye により認識される。この映像に対して固有 ID 識別機構と同様の画像処理を行いペン先の光のみを抽出し、テーブル上でポインティングされている座標を取得する。なお、2つのカメラ映像におけるテーブル座標は一致させておく必要があるため、XtionPRO と PlayStationEye からの映像に対して射影変換を用いたカメラキャリブレーションを行う。

## 5. Ficon の形状加工

Ficon の立体形状加工は Roland 社の Modela MDX-40 を用いて切削加工した。Modela で切削するには素材に一定以上の強度があるため、切削を施す Ficon の光ファイバの束の間にエポキシ樹脂を流し込み、束を固定し強度を上げた。樹脂を光ファイバの隙間に流し込んでも光ファイバの光学的特性に影響はなく、Ficon は映像提示デバイスとして十分に機能する。以下に Ficon で可能な映像提示手法について述べる。

### 5.1 3D 映像表現

Ficon は形状加工を行うことで、デバイス表面を触れる 3D ディスプレイとして利用できる。図 1 はキャラクタ型の三次元モデルから作成した Ficon に元になった三次元モデルをレンダリングした映像を投影している。Ficon 自身の形状を変えることができないが、ユーザの入力に合わせてキャラクタが瞬きする、口を動かすなどダイナミックにその姿を変えることが可能である。

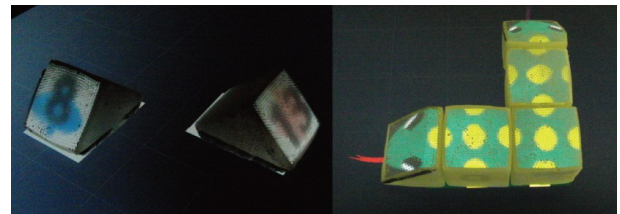


図 7 左：光ファイバを斜めに配置することで、傾いた面に映像を投影したもの。右：立方体や三角柱型の Ficon を組み合わせたところ

Fig. 7 Left: Diagonally stacked fibers enabled slanted surface. Right: primitive-shape Ficons.

### 5.2 組合せによる形状入力

Ficon 自体の形は変化させることができないが、シンプルな形状の Ficon を複数組み合わせれば、テーブル上に好きな三次元形状を作ることが可能である。図 7 右に示すようにテーブル上で組まれたブロックの種類と位置・向きを認識し、組まれた形状にあわせてグラフィクスを提示することで、形と外観のそれぞれを動的に変更可能にすることができる。たとえば、テーブル面に地図を投影し、その上に建物を模した Ficon を配置し、街並みをデザインするアプリケーション例などが考えられる。また、それぞれの Ficon はタッチおよびペン入力によりインタラクティブに表示内容を変更することを可能とする。

### 5.3 映像提示方向の変更

斜めにカットした Ficon をテーブル上に置くことで光の向きを調整し、映像を提示する方向を変えることができる。図 7 左のように、特定のユーザにのみ閲覧が可能な映像提示が可能となる。パスワードの表示や、自分以外のプレイヤーに対して情報を隠蔽する必要があるような麻雀やトランプなどの対戦型ゲームへの応用が考えられる。

### 5.4 Ficon の積層

積層した Ficon の識別ができれば、より立体感のある造形が可能となり、また高いところから低いところへ転がり落ちるボールなど高さを利用した新しいインタラクション手法を提供できる。Ficon は複数重ねた状態でも下の Ficon から上の Ficon へ光が到達するため、こうしたインタラクションが可能になる (図 8)。ただし、Ficon の底面および表面で光が拡散するため、層が増えるに従って映像は不鮮明になる。現在の実装では 3 層以上重ねると映像の判別が難しくなる。また、本報告で述べたマーカによる ID 識別は、上層に積まれた Ficon のマーカがぼやけてしまうこと、および上層のマーカと下層のマーカの像が重なってしまうことから、最下層も含めたすべての Ficon に対して適用できない。Lumino [1] のように光ファイバの透過性を ID 識別に用いれば、積層したブロックの識別はできるが、デバイスの形状は制限され、表面に解像度の高い映像を映し出

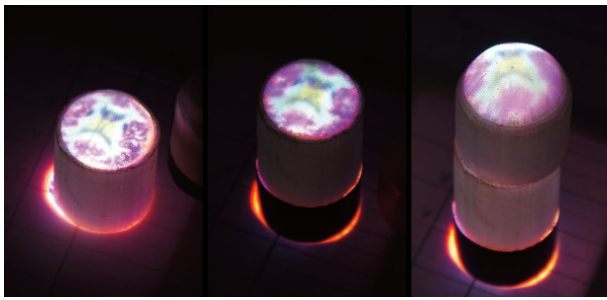


図 8 積み重ねた Ficon  
Fig. 8 Stacked Ficons.

すことが難しくなる。

## 6. 映像の視認性評価

光ファイバ表面の光の屈折はペンやタッチポインティングの認識と Ficon に映し出す映像の視認性の両方に悪影響を与える。特に、斜めに切断された光ファイバにおいて顕著で、カットした面に対するペンやタッチポインティング操作の認識精度が落ちてしまう。これは斜めに切断した面から入射した光が屈折してしまい、光ファイバを通してカメラまで届く光が少なくなるためである。

このうち、ポインティングの認識精度の低下については、ペン先に使う LED をより強く光らせることでこの問題を解決した。

一方、視認性については、図 9 にその影響を示すが、傾斜した面を持つ Ficon はユーザ側に向けた面の映像の視認性が低下してしまう。解決策として映像投影に使用するプロジェクタの輝度を上げることも考えられるが、傾斜した面を持つ Ficon とそうではない Ficon で表示映像に輝度の差が生じてしまうため、単純な解決は難しい。しかし、視認性が低下しているものの、投影された映像が何を示す映像であるかを確認することはできる。そこで、ディスプレイ上に置かれた Ficon 表面に投影された映像の意味をユーザが確認することができる角度を検証するために実験を行った。

### 6.1 実験内容

本実験では、図 2 に示した表面形状と構成する光ファイバの径が異なる 4 種類の Ficon を試験した。これは光ファイバの太さと Ficon の表面形状がどの程度視野角に影響を与えるかを検証するためである。

被験者は自分の視点の代わりとなるカメラからの映像を別モニターから見る。カメラは Logitech 社の HD Pro Webcam C910 を用いた。最初、カメラはディスプレイの脇に Ficon の天面と水平になるように設置されており、このカメラはつねに Ficon を中心にとらえるようにしながら徐々に上に動かす。被験者が Ficon 上に表示された映像を確認できた時点でカメラの動きを止め、カメラの止まった位

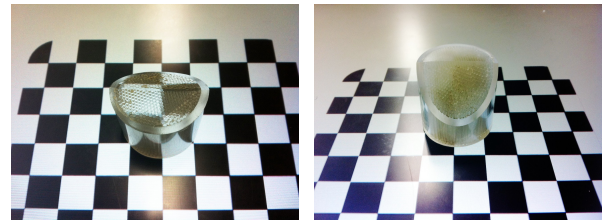


図 9 面の傾斜角による視認性の低下例。円筒状 Ficon の一部を斜めに切断したものを使用。左図でははっきりと見える傾斜面の模様、右図ではほとんど視認できない

Fig. 9 Example of the reduction of visibility on slant surfaces.

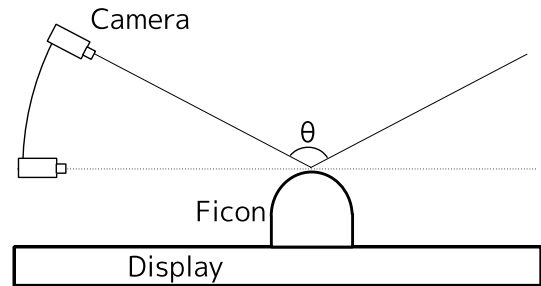


図 10 実験手法概略図：カメラを Ficon を中心に動かし、映像が視認された時点での視野角  $\theta$  を求める

Fig. 10 Overview of the experiment: rotate the camera around the Ficon, and record the view angle  $\theta$  when the image is recognized by the subject.

表 1 Ficon に投影した映像が認識可能な視野角 (括弧内に標準偏差)  
Table 1 Average and stdev of field of view (degree).

Shape	flat		hemisphere	
	1 mm	0.5 mm	1 mm	0.5 mm
numeric	150°(2.23°)	156°(0.35°)	124°(3.83°)	152°(1.53°)
character	146°(0.23°)	154°(0.47°)	118°(3.42°)	134°(4.6°)
photo	142°(3.1°)	152°(0.71°)	118°(7.54°)	142°(2.6°)

置、Ficon の天面、カメラの初期位置から視野角を求めた (図 10 参照)。被験者は二十代男性 2 人、Ficon に投影させる映像は画像・平仮名・数字の 3 種類で行った。これは画像情報と文字情報とで視野角に差異ができるかを確認するためである。また画像情報では色から画像を特定できないように、画像はすべてグレースケール画像に変換して表示した。各種類ともに著者が用意した映像をランダムに表示させ、その最小の視野角を計測した。画像・平仮名・数字の映像をそれぞれ 5 回ずつ計 15 回、用意した 4 種類の Ficon に表示して実験し、その平均をとった。

### 6.2 結果と考察

Ficon の種類と表示映像を変えて計測した視野角を表 1 にまとめた。この表には 2 人の被験者から得られた視野角の平均を記している。1 mm 径の光ファイバでは、立体形状を持たない Ficon に対し、立体形状を持つ Ficon の視野角は狭く、視認性が悪くなる。しかし、0.5 mm 径の光ファ

イバでは、提示映像に文字を用いた場合を除けば、立体形状を持つ Ficon は立体形状を持たないものに比べてそれほど視認性が悪くなることはない。これは細い光ファイバを使用した場合、表示される画像の解像度が良くなるため映像が鮮明になり、曲面においても映像が見えやすくなるためである。また、立体形状を持つ Ficon に文字を映した場合、視野角が狭くなる傾向が見られる。これは一部が見えてもその文字が何を表しているかを判別するのは難しいためであると考えられる。たとえば、「は」と「ほ」のような文字を見せた場合、一番上の線が見えなければ、どちらか判別することはできない。被験者からも「画像・数字は特徴的な部分が見え始めれば判別ができるが、平仮名は全景が見えないと分かりにくい」という意見があった。これは光の屈折が引き起こす視認性の低下ではなく、ユーザの視点に対して映像の一部が死角になってしまうことが主要因と考える。

### 6.3 視認性の改善

実験の結果から Ficon に使う光ファイバの径を小さくすることが視認性の低下を防ぐ解決策の1つといえる。しかし、この問題の根本的な要因は Ficon 天面における光の屈折の影響である。PAPILLON [2] は同様の問題をデバイスの映像表示面にディフューザを貼ることで解決をしている。PAPILLON ではデバイスに対して直接プロジェクタを照射しているため、ディフューザによる光の減衰が解像度に与える悪影響は少ない。ディフューザを映像表示面に貼る手法は Ficon にも応用できるが、表示映像の解像度の低下を考慮する必要がある。Ficon に適切なディフューザの検証を今後行っていく。

また、Ficon 天面で光が屈折する向きをコントロールできるような形状加工の可能性がある。図 7 左のように映像提示面の法線方向に光ファイバが並ぶように Ficon を配置すると、視認性の問題がある程度解消されることが分かっている。したがって、光ファイバを曲げたり、斜めにしたりすることで視認性の低下を避けつつ、映像提示方向を変えるアプローチも考えられる。

## 7. アプリケーション

今回新しく提案したペンポインティングと Ficon の形状加工を組み合わせたインタラクション手法をアプリケーションで示す。

### 7.1 ゲームへの応用

このアプリケーションは、複数の Ficon を使った形状入力をゲームに応用した例である。平面的なディスプレイ上に Ficon を使って地形を作り、自律移動する CG キャラクターが組み上げた地形に沿って立体的な動きをする。たとえば、キャラクターと敵との接触を避けるために、Ficon で橋

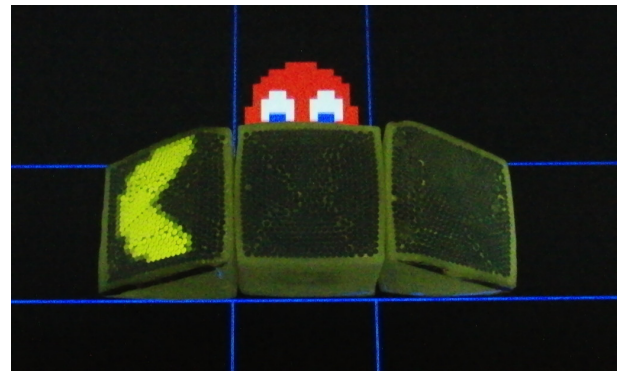


図 11 Ficon を使って組み立てた立体交差の上をキャラクターが移動している様子

Fig. 11 CG characters moving upon an overpass built by Ficons.

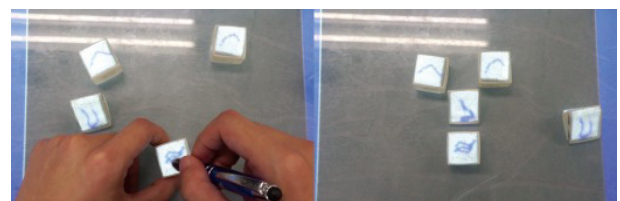


図 12 ペンによる Ficon への描画操作。パーツごとに描画を行い、その後に再配置しなおすことが可能

Fig. 12 The user can draw on the surface and assemble them.

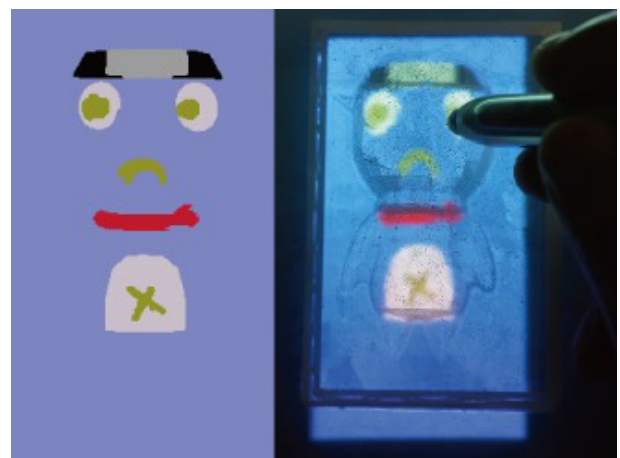


図 13 立体形状を持つ Ficon への描画

Fig. 13 Drawing on a curved Ficon with the IR stylus.

を作ることで、接触を回避することができる (図 11)。

Ficon は立体的な映像提示と地形を直接手で触れて組み立てるタンジブルな操作を両立させており、入出力空間が一致した直感的なインタラクションが可能である。

### 7.2 ペイントアプリ

図 12 は Ficon の形状入力とペンポインティングを組み合わせることで、Ficon に直接描画を行うアプリケーションである。指先でのタッチによるペン描画と比べて、ここで利用できるペン先は細いので、細かいストロークでの

描画が可能になる。また、Ficon の固有 ID 識別が可能になったことで、描画された Ficon がテーブル上から取り除かれても、再びテーブル上に配置されたときに取り除かれる前の描画結果をそのまま Ficon に表示することが可能になる。これを利用すれば、図 12 のように、部位ごとにペイントを行った後に、Ficon を配置しデザインすることができる。また、立体形状を持つ Ficon に対してペンを使った描画を行った例を図 13 に示した。マウスを使った GUI では煩雑な三次元オブジェクトに対する描画を簡単に行うことができる。

## 8. 現実装における制約

### 8.1 ポインティング手法の制約

本稿で提案するシステムはタッチポインティング機能は実装しておらず、ポインティング操作を行う場合、ユーザは片手にペンを持つ必要がある。そのため、両手を Ficon の移動操作に使っている状態からペンポインティング操作に移る際に、デバイスを持ち変える手間が生じる。たとえば、複数の Ficon 上を移動していく CG キャラクタに対するポインティング操作など Ficon の移動操作とペンポインティング操作の切替えが多発するインタラクションには不向きである。

今回開発したシステム上でタッチ認識機能を追加するためには、Diffused Illumination を利用したシステムと同様の手法が利用できることが確認できている。すなわち、指先による反射光を観測することでタッチの有無や位置を認識することが可能である。しかし、Ficon 底面の ID 識別用マーカの影響を受けるため、指先位置の認識精度は著しく低下する。これを回避する手法として、比較的大きな表示領域を持つ Ficon であれば、マーカの位置を Ficon の枠もしくはその付近に限定することで、ID 識別とタッチポインティングを両立させることができる。しかし、表示領域の小さい Ficon の場合はこのような解決は難しい。小さい Ficon に対しては、指先により正確なポインティング指示をすることは考えにくく、指が触れているかいないかの識別ができれば十分有用かもしれないが、複数個並べて表示領域を拡大した場合はやはり精度が求められることも考えられる。

### 8.2 デバイスを持ち上げる操作

Ficon はテーブル面に接触していなければ、映像の提示ができず、また位置・ID の認識もできなくなるため、デバイスを持ち上げて行うインタラクションには不向きである。Display Blocks [6] のように操作デバイスに液晶ディスプレイなどの映像出力装置を搭載することによってそれらは解決可能だが、これらはその駆動に電力を必要とする。これらの特性を比較して考えると、Ficon は安価に構築できることを利用し、大量に配布して使用させるような応用

に向くだろう。また、将来的には 3D プリンタや切削加工機を用いて、その場で新しいデバイスを出力して使用する、といった応用が期待できる。

### 8.3 識別可能な ID の数

現在の ID 識別用のマーカは開発中のものであり、将来的にタッチ認識を併用することを考慮した設計になっているため空白を多く設けている。このため識別可能な ID の数は少ない。これはマーカの密度を上げることにより容易に改善できる。具体的には、CyberCode [7] のようなビジュアルマーカの手法を採用することで解決できる。しかし密度を上げると空白領域が減るため、先に述べたようにタッチ認識を併用することは困難になる。

## 9. まとめと展望

本稿では映像表示が可能なテーブルトップデバイス “Ficon” の ID 識別とペンポインティングを可能にした。特に立体形状加工を施した Ficon の製作方法とその有用性を示し、立体形状を持つ複数の Ficon とペンポインティングを組み合わせたインタラクションをアプリケーションの章で例示した。表面形状と光ファイバ径を変えた 4 種類の Ficon を用いて Ficon の視野角について検証し、天面に立体形状を持つ Ficon は立体形状を持たない Ficon と比較して視野角が小さくなる傾向がある、という結果を得た。

今後の課題として Ficon の視認性の問題を解決するような形状加工の研究も行っていく。また、ペン入力に使う赤外波長帯をタッチ認識にも応用し、よりロバストなタッチポインティングを実現する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (23700090) の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] Baudisch, P., Becker, T. and Rudeck, F.: Lumino: tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles, *Proc. CHI '10*, pp.1165–1174, ACM, DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1753326.1753500> (2010).
- [2] Brockmeyer, E., Poupyrev, I. and Hudson, S.: PAPIL-LON: Designing Curved Display Surfaces with Printed Optics, *Proc. UIST '13*, pp.457–462, ACM, DOI: 10.1145/2501988.2502027 (2013).
- [3] Matsushita, N. and Rekimoto, J.: HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall, *Proc. UIST '97*, pp.209–210 (1997).
- [4] Patten, J., Ishii, H., Hines, J. and Gian, P.: Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces, *Proc. CHI2001*, pp.253–260 (2001).
- [5] Patten, J., Recht, B. and Ishii, H.: Audiopad: A Tag-based Interface for Musical Performance, *Proc. 2002 International Conference on New Interface for Musical Expression (NIME '02)*, pp.11–16 (2002).
- [6] Pla, P. and Maes, P.: Display Blocks: A Set of Cubic Displays for Tangible, Multi-perspective Data Exploration, *Proc. TEI '13*, pp.307–314, ACM, DOI: 10.1145/



- 2460625.2460677 (2013).
- [7] Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags, *Proc. DARE 2000*, pp.1–10, ACM, DOI: 10.1145/354666.354667 (2000).
  - [8] Rekimoto, J., Ullmer, B. and Oba, H.: DataTiles: A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions, *Proc. CHI'01*, pp.269–276, ACM, DOI: 10.1145/365024.365115 (2001).
  - [9] Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K.: PhotoelasticTouch: Transparent Rubbery Tangible Interface using an LCD and Photoelasticity, *Proc. UIST '09*, ACM, pp.43–50 (2009).
  - [10] Takada, Y., Nakabayashi, R. and Fukuchi, K.: Ficon: A Touch-capable Tangible 3D Display using Optical Fiber, *Proc. ITS'12 Workshop: Beyond Flat Displays* (2012).
  - [11] Ullmer, B. and Ishii, H.: The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces, *Proc. UIST '97*, pp.223–232 (1997).
  - [12] Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J.D. and Borchers, J.: SLAP widgets: Bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops, *Proc. CHI '09*, pp.481–490, ACM, DOI: 10.1145/1518701.1518779 (2009).
  - [13] Willis, K., Brockmeyer, E., Hudson, S. and Poupyrev, I.: Printed Optics: 3D Printing of Embedded Optical Elements for Interactive Devices, *Proc. UIST '12*, pp.589–598, ACM, DOI: 10.1145/2380116.2380190 (2012).
  - [14] 高田悠太, 中林隆介, 福地健太郎: Ficon: 立体映像表示が可能なタンジブルデバイスの提案, *インタラクシオン 2014 論文集*, pp.100–107 (2014).
  - [15] 中林隆介, 佐藤俊樹, 福地健太郎, 高田悠太: Ficon: テーブルトップシステム向けの光ファイバを用いた映像提示可能な操作デバイス, *情報処理学会研究報告*, Vol.2011-HCI-144, pp.1–7 (2011).



福地 健太郎 (正会員)

明治大学総合数理学部准教授。2004年東京工業大学大学院情報理工学研究科博士後期課程単位取得退学。博士(理学)。電気通信大学大学院情報システム学研究科助教, 独立行政法人科学技術振興機構 ERATO 五十嵐プロジェクト研究員, 明治大学工学部特任准教授を経て, 2013年より現職。ユーザインタフェースやエンタテインメント応用, 音楽・映像分野との協調に興味を持つ。ACM・VR・情報処理学会各会員。2002年FIT 船井ベストペーパー賞, 2010年日本VR学会論文賞受賞。



高田 悠太

1989年生。2014年明治大学大学院理工学研究科修士課程修了。2014年よりアミューズメント機器開発に従事し, 現在に至る。コンピュータのエンタテインメント応用に興味を持つ。



中林 隆介

2012年明治大学大学院理工学研究科修士課程修了。2012年より株式会社DNP情報システムにて, ソフトウェア開発に従事し, 現在に至る。ユーザインタフェースの分野に興味を持つ。