

## レーザーポインタの軌跡を追跡する 映像パフォーマンス向け遠隔入力システム

福地 健太郎<sup>†1,\*1</sup>

我々は、主にステージパフォーマンスで用いることを想定した、レーザーポインタを用いた遠隔での入力システムを開発した。このシステムは、映像が投影されているスクリーン上の箇所をレーザーポインタで指示すると、システムがその位置を認識する。提案手法は従来手法に比べ、表示画面の色や動きに対する制約が少なく、レイテンシが低く抑えられている。加えて提案手法は従来とらえることのできなかつたレーザーの軌跡を認識することができ、新しい入力手法を可能とする。評価実験の結果、位置入力の精度はマウスと同等であった。また従来手法に見られる補間処理による曲線入力は、提案手法により認識した実際のレーザーポインタの動きとの間に誤差を生じることが示された。

### A Remote Input System Tracking Laser Trails for Visual Performance

KENTARO FUKUCHI<sup>†1,\*1</sup>

We developed an interactive display system for stage performance using camera-tracked laser pointers that enables users to interact with the screen directly with multiple laser pointers. Our system has no limitation of color or motion on visuals on the screen, and its input latency is lower than previous systems. Moreover, the proposed system detects shapes of the laser trails that enables novel interaction with remote screen. An evaluation experiment was ran and showed our system provides the same performance to a mouse. A bicubic convolution interpolation is used in order to estimate motion of laser pointers, but the evaluation test indicated that it causes inaccuracy when the laser pointer is moved quickly.

### 1. はじめに

我々は、主にステージパフォーマンスで用いることを想定した、レーザーポインタを用いた遠隔での入力システムを開発した<sup>3)</sup>。このシステムは、映像が投影されているスクリーン上でレーザーポインタを動かすと、システムがスクリーン上に現れたレーザーの軌跡を認識し、その位置と形状をデータとしてアプリケーションに伝達する。

レーザーポインタを用いた遠隔入力は、スクリーンに対して直接的な操作ができ、演者・観客の双方にとっても直感的な入力であるため、パフォーマンスのための入力の一選択肢として魅力的であると我々は考えている。しかし、レーザーポインタを用いた同様の入力システムはこれまでも多く発表されているが、従来に入力システムでは投影できる映像の内容に制限があったり、レーザーポインタを動かした際の追跡が十分でないといった制約があったりしたため、映像技術を駆使したステージパフォーマンスを行うような場面では使うことが難しかった。

提案手法はこうした制約を解決したものである。提案システムはレーザーの軌跡の形状をとらえることができるため、レーザーポインタを動かしてもスクリーン上のレーザーの軌跡を追跡することができる。また、従来手法ではレーザーの輝点の位置座標しか利用することができなかったが、提案手法ではスクリーン上に描かれたレーザーの軌跡の形状をそのまま抽出することができる。加えて、提案システムは複数のレーザーポインタの軌跡を同時に追跡することができる。

我々はこれまでに数度のステージパフォーマンスで本システムを用いてきた。本論文では提案システムの実装について述べるとともに実際の使用から得られた知見について述べる。また、今回、提案システムの有効性について評価実験を行った。実験は、Fitts<sup>2)</sup>の“Reciprocal Tapping”に基づいた、ISO 9241-9に定められた実験手法を採用した。その結果、位置入力システムとしては一般的な光学マウスとほぼ同等の性能があることが分かった。また、軌跡の再現性についても評価実験を行い、従来手法によるレーザーポインタの動きの推定処理の誤差を計測した。その結果、被験者がレーザーポインタを高速に動かした場合に、認識された位置座標のみから再現した曲線と実際にスクリーン上に描かれたレーザーの軌

<sup>†1</sup> 電気通信大学

The University of Electro-Communications

\*1 現在、独立行政法人科学技術振興機構 ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

Presently with Igarashi Design Interface Project, Japan Science and Technology Agency ERATO

跡とのずれが大きくなることが確認できた。

## 2. 背景

### 2.1 ステージパフォーマンスで用いる入力機器

今日ではプロジェクタと大きなスクリーンを使った映像パフォーマンスが様々な分野で採り入れられている。たとえば音楽バンドのライブ演奏や DJ イベントにおいてステージパフォーマンスの随伴映像として用いられ、ステージ上のスクリーンの前でパフォーマンスが機器を制御して映像を写し出したりするといった種のパフォーマンスが広く行われている。

ステージ上で即興的な映像演出を行ううえで、インタラクティブなシステムの使用は不可欠である。今日ではこのためにコンピュータを用い、実時間で生成した CG をステージ上で流すことが一般的になりつつある。これらのコンピュータシステムでは通常の PC と同様、キーボードとマウスなどのポインティングデバイスが普通用いられる。しかしステージ上の大きなスクリーンの前でこの種の入力システムを使用した場合、最終結果であるスクリーン上の映像と操作デバイスとの間に距離感がある。演者にとってはスクリーン上の映像を直接操作している感覚は得られず、また観客にとっても、誰が何を動かしているのか把握しにくく、ライブ感を減ずることとなる。

### 2.2 レーザポインタによる入力

我々はステージ上での即興映像生成のための入力インタフェースとして、レーザーポインタを用いた多点入力システムを構築することで、前述の問題を解決することを目指している。レーザーポインタは遠隔からスクリーン上の 1 点を指し示すことができるため、演者には直接操作の感覚を提供できる。また、スモークマシンなどを使ってステージ上に適度に曇らせることでビームが客席からも見えるようにすることができ、演者とスクリーン上の映像との関係を観客にも把握しやすくすることができる。

レーザーポインタによる遠隔入力をシステムに取り入れるには、何らかの形でレーザーポインタの動きをコンピュータで認識しなければならない。これまでもレーザーポインタがスクリーン上のどこを指しているかを認識するような入力システムは多く提案されている。しかしその多くはプレゼンテーションソフトや一般的なデスクトップシステムを想定したものであり、使用条件やスクリーン上の映像に対する制約が大きい。そのため、ステージパフォーマンスでの使用には向いていないという問題があった。これについては次章以降で詳しく述べる。

## 3. 入力システムの要件

本論文で提案する入力システムが対象とするのは主に、演者による即興的な操作によりステージ上で映像や音を生成するパフォーマンスである。我々は本システムを、スクリーン上に音楽のリズムに同期したアニメーション映像を即興的に描いたり、スクリーン上に仮想シーケンサを表示してレーザーポインタでそれを操作して音楽を生成し、左記のアニメーションと同期させたりするといった内容のパフォーマンスに用いているが、こうしたパフォーマンスではデスクトップアプリケーションやプレゼンテーション向けの入力環境とは異なるいくつかの要件を満たす必要がある。以下に、我々が重視している要求をあげる。

### 3.1 低レイテンシ・高スキャンレート

スクリーン上の映像は、演者の身体動作と同期していなければならない。また、想定するパフォーマンスにおいては音楽と映像の同期が求められることが多い。そのために入力のレイテンシを極力低くする必要がある。それを達成するためにはある程度までスキャンレートは高くしなければならない。

### 3.2 高解像度

認識できる位置情報の解像度は、演者が入力した細かな動きを再現できる程度には高くなければならない。

### 3.3 動きや映像に制限を設けない

スクリーン上で使用できる映像の色や動き、レーザーポインタを動かす速さなどに制約があると、システムの汎用性が失われる。パフォーマンスの内容を入力システムが制限することは好ましくない。

## 4. 関連研究

カメラとレーザーポインタの組合せによる入力インタフェースの先行例をあげる。

Kirstein らはレーザーポインタのトラッキングのシンプルな実装を示した<sup>5)</sup>。このシステムでは、スクリーン上でのレーザーポインタの輝点を認識するために、最近数フレームの平均を参照画像として現在のフレームと比較して動きのある部分をまず発見し、その部分にパターン認識技術を適用して輝点を見つける。Myers らのシステムも同様に、直前のフレームとの比較により輝点を見つける<sup>7)</sup>。そのため、スクリーン上の画像に動きがある場合はこれらのシステムは有効に機能しない。

Sukthankar らはプレゼンテーションにレーザーポインタによる入力を応用した例を発表し

ている<sup>10)</sup>。この例ではレーザによるポイント位置を計測するため、プレゼンテーションのために部屋全体が暗くされていることを前提とし、各スライドのイメージを参照画像として背景差分を適用している。しかし、画面に動きがある場合はこの手法は有効に機能しないことが述べられている。

Olsen らは XWeb システムの拡張としてレーザポインタによる入力を取り入れ、ポインタによるジェスチャ入力を可能とした<sup>9)</sup>。やはりレーザポインタが動いているときに認識精度が低下することが問題とされており、この研究では取りこぼしによるジェスチャ入力の中断を防ぐため、認識アルゴリズムではつねに5フレーム分のウェイトを入れ、5フレームの間レーザが消えていた場合にのみレーザポインタによる入力終了と判断するようにしている。しかしこの方法は入力のレイテンシを増大させることとなり、リアルタイムでのパフォーマンス用途には向かない。

Myers らはレーザポインタを使った入力手法の評価実験の結果を報告している<sup>7)</sup>。それによると、レーザポインタによる位置入力は“point-and-click”式の入力においては効率が良くないとしている。Oh らも同様の報告をしている<sup>8)</sup>。

LumiPoint<sup>1)</sup>は複数人が大きなディスプレイを共有し、その上で同時にレーザポインタで入力できる協調作業型のシステムである。同システムでは4面あるディスプレイを4台のカメラを用いてカバーしている。それぞれのカメラ視野内では複数のレーザポインタの追跡にカルマンフィルタを用いた軌跡予測をしている。Oh ら<sup>8)</sup>は複数のレーザポインタの追跡手法として、個々のレーザポインタを固有の間隔で点滅させ、その間隔を識別することでレーザポインタを個別に認識するという手法を提案している。

## 5. 提案システムの実装

先行研究を検討した結果、いずれも3章であげた要求項目をすべて満たすものではなく、したがってステージパフォーマンスには適さないことが分かった。そこで我々は新しい入力システムを提案する。

### 5.1 システム概要

図1が今回実装したシステムの概要図である。基本的な構成は先行研究とほぼ同じで、スクリーン上のレーザ軌跡をカメラで認識し、その結果から映像を生成してスクリーンに投影するというものである。我々は今回 IEEE1394 digital camera<sup>\*1</sup>を採用した。これは撮像し

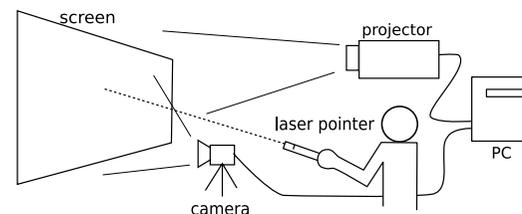


図1 レーザポインタ追跡システムの概要図  
Fig. 1 System overview of the laser pointer tracker.

たイメージを非圧縮で640×480ピクセルのイメージとして、毎秒30フレームの間隔でコンピュータに転送する。プロジェクタは一般的なXGAサイズのもので、2000-2500 ANSIルーメンの明るさのものを使用した。

### 5.2 レーザ軌跡の抽出

すでに見てきたように、レーザ輝点をカメラで認識する場合、カメラでとらえた画像からレーザ輝点を見付けることが課題となる。フレーム間差分による動き認識を用いる手法では、スクリーン上の映像に動きがあると使用できない。輝点の位置を色参照法を用いて計測する手法では、映像にレーザと同じ色を使用することができない。また、出力映像を参照画像として用いる背景差分法では、高速に描き換えられるような映像を使用した場合にカメラでとらえた映像にブレが生じ、確実に動作しないという問題がある。シャッタースピードを高速にしてブレを抑えようとするのであれば、プロジェクタとカメラとの間でシャッタの同期を確実にを行う必要があり、システム構成が複雑になる。輝点の形から判断するパターンマッチング法を用いた場合、レーザポインタを高速に動かすと追跡ができない。また、映像に同じような色形をした部位があると認識に支障をきたす。以上のように、先行研究が採用してきた手法は我々の使用目的を考えると、適しているとはいえない。そこで我々は、高輝度レーザポインタおよび減光フィルタによる解決手法を提案する。

提案する手法は、レーザの輝度がスクリーン上の映像に比べて高いことを利用し、光学的な前処理を施すことで軌跡の分離を簡単にするものである。まずレーザポインタには、波長532nmで出力が5mW程度のクラス3a緑色レーザポインタ<sup>\*2</sup>を使用した。また、カメラには減光フィルタとしてNDフィルタを加えた。これはプロジェクタの明るさに応じて、ND-4やND-8、あるいはそれらを重ねて使用する。また必要に応じ、カメラの設定のうち

\*1 Sony DFW-VL500 または Unibrain Fire-i を使用。

\*2 GPL-105, Leadlight Technology, Inc.



図2 カメラ画像の例。左：フィルタを装着していないとき。右：フィルタ装着後  
Fig. 2 Captured images. Left: without an ND filter. Right: with an ND filter.

輝度・コントラストを手動で調整することで、スクリーン外の背景やスクリーン上のプロジェクタに投影された映像をカメラ画像から取り除くことができる。一方で、スクリーン上のレーザ軌跡は輝度が高いため、減光フィルタを経ても撮像される。

図2はカメラ画像の例を示している。左図はフィルタを装着していないときの画像で、右図が同条件でND-8フィルタを装着したときの画像である。左図ではレーザ軌跡は丸で囲った場所にあるが、背景と同化しておりこれを分離するのは簡単ではない。また、緑色レーザポインタを使っているが、輝度が高いためCCD上で緑色に対応した画素以外の部分も反応してしまっており、画像では緑色になっていない。一方、右図ではレーザ軌跡以外の部分はほとんど感光しておらず、レーザ軌跡がはっきりと識別できる状態になっている。これにより、表示する映像に制限を加えることのない入力システムが構築できた。

これまでに我々は様々な条件下で実際にパフォーマンス目的で本システムを使用しているが、いずれの場合においても減光フィルタとカメラ設定の調節をすることでレーザ軌跡の認識に成功している。調節には慣れを要するが、フィルタを用いたビデオ撮影の経験があれば容易であると感じた。

なお、カメラの設定は、輝度・白バランス・シャッタースピードの自動調節をすべてオフにする。これは使用中に不意にパラメータが変化することを防ぐためである。シャッタースピードは1/30秒に設定した。カメラのスキャンレートが30Hzであるため、1回のスキャンの間ずっと開放している状態にほぼ等しい。開放時間を長く設定しているため、レーザポインタを素早く動かすと軌跡の形状がブレを生じて変形し、また全体が少し暗くなる(図3)。この現象は先行研究ではレーザの追跡に支障をきたすものと考えられてきたが<sup>(8)</sup>、我々は今回この軌跡形状を積極的に利用する手法を提案する(5.6節)。

### 5.3 キャリブレーション

我々のレーザ追跡システムは、様々な設置条件下で使えるものであることが求められてい

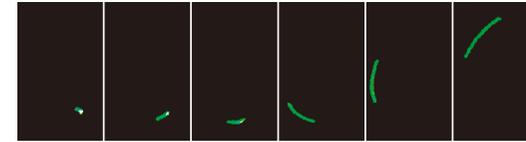


図3 レーザポインタを素早く動かしたときの連続画像  
Fig. 3 Sequential shots of a fast moving laser trail.

る。特に、スクリーンの大きさやカメラの位置・姿勢は様々なステージセッティングに対応できなければならない。このため、実際に使用する前のキャリブレーションが必須となる。

提案手法でキャリブレーションが必要なのは、スクリーンとカメラ視野の関係である。つまり、カメラ視野系での座標がスクリーン座標系のどこに対応するかを、あらかじめ補正しておく必要がある。今回はパースペクティブ変換による補正を採用した。

ユーザの指示でキャリブレーションが始まると、システムはユーザに、スクリーンの四隅を左上から順番に、レーザポインタで指し示すよう促す。ユーザはそれぞれの隅を1秒間(30フレーム)レーザを照射し続ける。システムは各フレームでレーザ軌跡の重心を計測し、30フレーム分の計測値の最頻値(モード)をカメラ視野系での隅の座標として採用する。最頻値を採用する理由は、ユーザはシステムに指示された後、まず隅の点から若干離れた位置にレーザを照射し、それを目で確認してから徐々に位置を補正していく傾向があるため、平均値や中間ではこの初期のずれたデータが結果に強く影響するためである。四隅の座標が得られたら、三次元のパースペクティブ変換行列を求め、求めた変換行列の逆行列は、カメラ画像をスクリーン座標系に変換するために用いる。

### 5.4 レーザポインタの追跡

レーザ軌跡の動き追跡の手順を説明する。まず、レーザ軌跡の画素のみ残すよう、輝度値が閾値以下の画素を除去する。次に、画像全体をスキャンし、連続した画素を1つの領域として、それぞれの領域に分割する。このとき、大きさが10ピクセル以下の領域は除外する。これはレーザ軌跡周辺の、輝度が不安定な部分でノイズとなる領域を除去するためである<sup>\*1</sup>。次に各分割領域の重心をその位置とし、前節で求めた変換行列を用いてスクリーン座標系に変換する。

\*1 10ピクセルという値はカメラとスクリーンの距離などで変える必要があるが、おおむね10ピクセル前後が適当である。

最後に、各軌跡の動きを求めるが、ここで、計測されたレーザ軌跡が複数ある場合、それぞれがどのレーザポインタで照射されたものかを示す情報が得られないという問題がある。そのため、軌跡の動きはフレーム間での位置関係から推定して求める必要がある。本システムでは、現在のフレームと直前のフレームとの間で、軌跡位置のありうる対応関係を全通り調べ、移動距離の二乗和が最小となるものを採用する。この手法で実際に3本までのレーザポインタの追跡を試験したところ、十分に実時間で動き追跡ができることを確認した。4本以上での試験は行っていないが、同じアルゴリズムを採用した過去の研究において評価した結果より、20本程度までは実時間で追跡ができるものと考えられる<sup>11)</sup>。ただし、本手法では、レーザの軌跡が交差したり触れたりした場合に、領域分割の時点で軌跡を区別することができず、認識に失敗する。

軌跡位置の計測は毎秒30回行われるため、フレーム間でのレーザ軌跡の動き情報が必要な場合は適宜補間する必要がある。本論文で特に補間手法の適不適については論じないが、後述する評価実験では3次置み込み内挿法を採用した。

#### 5.5 ボタン操作の実現

提案システムはレーザポインタには特に改良を加えてはいない。しかし、GUIで見られるようなクリック操作を実現するには、何らかの形でボタン操作を実現することが必要である。

解決法の1つは、Ohらが提案している<sup>8)</sup>、レーザポインタにレーザのON/OFFボタンに加えてもう1つボタンを追加し、ボタンの押下状況をPCに通信して知らせる方法である。この場合、レーザはつねに照射状態にするか、利用者が意図的にON/OFFを制御することとなるが、前者の場合、特に提案システムではレーザの輝度が高いため安全上の問題があり、後者の場合操作が複雑になる。

今回はこの問題を解決するために、狙いを定めるためのレーザポインタをさらに用いるという手法をとった。追加したのは出力が1mW程度のクラス2a赤色レーザポインタである。試作したものを図4に示す。赤色レーザは常時照射して使うが、レーザのスクリーン上での軌跡はそれほど明るくないため、減光フィルタによって除去され、認識されることはない。レーザ軌跡の追跡システムには特に変更を加えず、レーザの照射開始をもってボタン押下操作と見なすようにした。

この手法は、論理的にはOhらの手法と同様であり、また前述した問題点を解決するものではない。しかし、緑色レーザを常時照射して別のボタンによる操作を導入した場合、ボタン操作は観客からは見え難く、これは演者による操作内容が観客に伝わりやすくするとい



図4 2つのレーザポインタを束ねた様子  
Fig. 4 The two laser pointers combined.

う本研究の目的に反する。一方、提案手法では緑色レーザの照射のON/OFFにより演者のボタン操作の様子が観客にも伝わり、パフォーマンス性を減じないという利点がある。加えて、コンピュータとの間で特別な通信手段を必要としないため機構が簡単である。

#### 5.6 抽出したレーザ軌跡の応用

前節までに述べたのは位置入力のための仕組であり、システムから出力されるデータは軌跡位置の座標値であった。これは毎秒30回の計測であるため、レーザポインタが動いた場合には、フレーム間でのポインタの動きは何らかの手法で推定する必要が生じる。しかし推定手法によっては誤差が生じたり(6.2節で後述)、数フレーム分の遅延を生じたりすることとなり、特に後者はすでに述べたようにパフォーマンス用途においては大きな欠点となる。

一方、提案手法ではスクリーンに映ったレーザの軌跡をそのままビットマップ情報として得ることができる。そのため、抽出された軌跡形状を位置認識や動きの推定をせずにそのまま利用することで、誤差がなく、遅延も生じない軌跡の利用が可能となる。この方法ではレーザポインタの動きを推定することはできないが、たとえばスクリーン上に絵を描くようなアプリケーションであれば、ビットマップ情報をそのまま利用できる。

軌跡の形状は、各撮影フレームにおいて1/30秒分の軌跡がとらえられることになる。連続した動きによって描かれた軌跡をビットマップ情報として復元するには、フレーム間で合成する必要がある。今回の実装では単純な加算合成を採用したが、パフォーマンス用途や6.2節での評価実験に用いる分には十分な復元ができていると我々は考えている。たとえば図5の左図は、得られたレーザの軌跡形状のビットマップをそのまま用いて、映像効果を加えて表示したものであるが、ドローイング目的には十分に適うものである。

### 5.7 レーザ軌跡入力における GUI 部品の実装

前節で述べたような軌跡形状をそのまま用いる入力手法の場合、レーザポインタが指している場所の座標値をそのままでは取得できないため、一般的な GUI をそのまま適用することはできない。これを解決するための 1 つの手法は先に述べた軌跡の位置認識を並行して行い、両方のデータをあわせて用いることであるが、遅延の問題は解消できない。

そこで、提案システムではビットマップベースで動作する GUI を実装した。これは、たとえばボタンであれば、そのボタンが画面中に占める領域内に観測されたレーザ軌跡のピクセル数を数え、ある閾値を超えた場合はボタンが押された、と判断することで、ボタンに対する操作を実現するものである。つまり、ボタンを押すには、レーザポインタをボタン領域内を狙って照射するか、ボタン領域を横切らせる操作をすればよい。図 5 右図に、提案手法によるボタンとそれが押されている様子を示す。線で囲まれた領域がボタンで、内部が薄く塗られているのは押されているボタンを表している。

同様に、スライダ部品であればスライダの枠内で観測された軌跡の重心を求め、その座標を出力とするなど、既存の GUI 部品のうちのいくつかは、ビットマップベースで実装可能である。

我々は提案手法による GUI を採用した音楽演奏アプリケーションをステージパフォーマンスで使用した。その際、使用したレーザポインタは図 4 のような赤色レーザを併用したものではなかったため、レーザを照射しない状態でボタンを狙うことは難しく、主にレーザポインタをボタン領域の外から内へ移動させることでボタン操作をした。我々が感じた限りにおいては、狙ったタイミングでボタン操作をすることができ、実用に耐えるものであった。ただし、ボタン領域を高速に何度も横切る操作でボタンの連打を再現しようとした場合に思いどおりの操作にならない場面があった。これはカメラの撮影速度から生じる制約があ

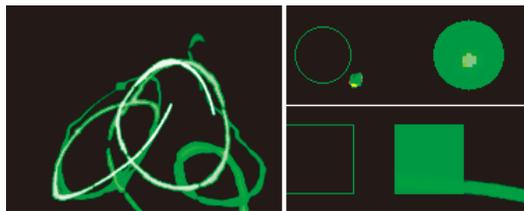


図 5 レーザ軌跡を利用した入力：左はドローイングの例、右はボタンの実装例

Fig. 5 Applications using laser trail input. Left: an example of drawing application. Right: Button widgets for bitmap image-based interaction.

るためである。カメラの撮影速度は他にも時間分解能に直結しており、現状の毎秒 30 回という分解能は必ずしもすべてのパフォーマンス用途の要求に応えるものではない。この問題を回避するには、カメラの撮影速度を上げるか、別途機械式のボタンをレーザポインタに付加することが考えられる。

## 6. 評価実験

提案システムの有効性を評価するために、2 種類の実験を実施した。まず第 1 の実験では位置入力デバイスとしての性能を評価した。この実験で提案システムが位置入力デバイスとしては既存のポインティングデバイスと同等の成績を持つことが分かったため、それをふまえて第 2 の実験として、レーザ軌跡の推定における、従来手法と提案手法との比較実験を実施した。

実験の様子を図 6 に示す。被験者はスクリーンから 4.5 m 離れた場所から、実験システムを操作した。両実験ともに被験者は大学院生 8 名で、全員がマウスによるコンピュータの操作を日常的に行っているが、レーザポインタを使った入力はほとんど経験したことがなかった。



図 6 実験の様子。被験者はレーザポインタを使っている

Fig. 6 Configuration for experiments with a participant using the laser pointer.

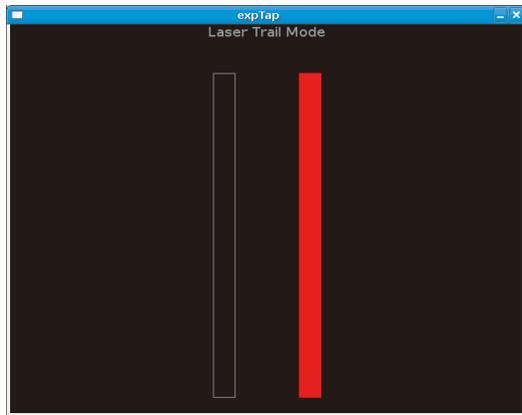


図 7 評価実験用アプリケーションの画面例  
Fig. 7 Screenshot of the application for the first experiment.

## 6.1 位置入力の効率評価

### 6.1.1 実験内容

提案システムを用いた位置入力が、既存のデバイスに比べてどの程度の性能を持つのかを評価した。評価に用いたテストは、Fitts<sup>2)</sup>の“Reciprocal Tapping”に基づいた、ISO 9241-9 に定められたものを用いた<sup>4)</sup>。画面には2つの縦長の帯が表示され、被験者はこれを交互に指し示すことが求められる。次に指すべき帯は赤色で示される。正しい帯を選択した場合はもう一方の帯が次に指すべき帯となるが、帯から外れた場所を選択したり間違った帯を選択したりした場合は誤入力として記録され、指すべき帯は変化しない。

2つの帯は等しい幅  $W$  を持ち、中心間の距離が  $D$  となるように配置される。帯が定められた回数選択されると、 $W$  または  $D$  を変化させる。今回の実験では Myers らの実験手順<sup>7)</sup>を踏襲した。 $W$  および  $D$  は3種類の値をとり、各条件では20回帯を選択させた。Myers らの実験では  $W$  はスクリーン上で1.5, 2.75, 5.5インチ、 $D$  は5.5, 11, 22インチと設定されているが、スクリーンと被験者との距離は5フィートとなっている。今回の実験ではこの距離は約15フィートに相当するため、それぞれ3倍した値を採用した。これらのソフトウェア内部での長さは、 $W$  が34, 64, 128ピクセル、 $D$  が128, 256, 512ピクセルである。図7に画面例を示す。

実験結果は以下のように解析する。まず、 $D$  の値と入力された座標から、有効難易度 (Ef-

fective Index of Difficulty,  $ID_e$ ) を算出する。これはその条件の難しさを表す指標である。まず、それぞれの帯について、入力された位置の X 座標の分散  $SD$  から、有効幅  $W_e$  を算出する。 $SD$  と  $W_e$  の関係は次式で表される。

$$W_e = 4.133 \times SD$$

この係数は、被験者の入力のエラー率が4%程度であることを前提としている。 $ID_e$  は  $W_e$  を用いて次のように表される。

$$ID_e = \log_2 \left( 1 + \frac{D}{W_e} \right)$$

さて、Fitts が示したモデルでは、 $ID_e$  が大きい程、つまり条件が難しい程、それに比例して入力に要する時間が長くなり、またその係数はその入力機器の性能 (スループット) による、というものであった。このモデルに従い、帯の選択に要した時間の平均  $MT(\text{sec})$  と  $ID_e$  からスループットを次式によって求める。

$$\text{Throughput} = \frac{ID_e}{MT} \text{ (bits per second)}$$

スループットは各条件ごとに計算し、その相加平均をその被験者に対する実験から得られたスループットとする。さらに全被験者から得られたスループットの相加平均を、最終的なスループット値とする。

評価実験は、5.5 節で述べた、赤色レーザを併用したレーザポインタを用いた。また、比較対象として、USB 接続の光学式有線マウス (DELL 社製) も用いた。

実験の手順は、実験内容を説明した後、まずマウスを用いて実験し、次にレーザポインタによる入力と同じ課題で実験を行った。それぞれの実験において、まず短時間の練習を行わせ、その後に課題を与えた。課題が終了した時点で、エラー率が5%を超えた場合、やり直しをさせた。これは有効幅の算出において入力のエラー率が4%程度であることが想定されているためである。この手順は Mackenzie らの実験<sup>6)</sup>を参考にした。

なお、予備実験では赤色レーザを用いない、緑色レーザポインタのみでの入力も試したが、被験者3名による実験では3名ともエラー率が10%を超えていたため、実験対象からは除外した。

### 6.1.2 実験結果

帯の選択にかかった時間と、エラー率のそれぞれの平均を表1に示す。両者ともエラー率は2%台にとどまっている。次に、計測された  $ID_e$  と  $MT$  とが比例関係にあるかどうかを調べる。図8が両者の関係を図示したものであるが、マウス・提案システムともに、おおまかに比例関係が成立していることが分かる。そこで、これらの値をもとにスループットを

表 1 位置入力効率の評価結果  
Table 1 Results from the tapping test.

	選択時間 (msec)	エラー率	スループット
マウス	510	2.57	3.90
提案システム	511	2.31	3.97

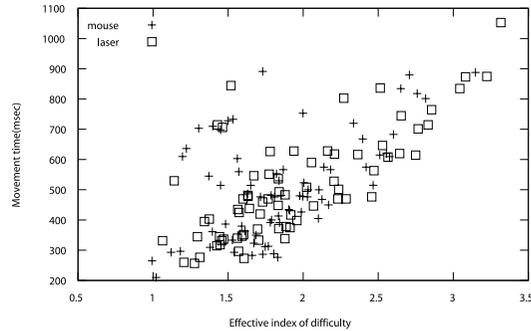


図 8 有効難易度と移動速度の散布図

Fig. 8 Scatter chart of effective index of difficulty and movement time.

算出したところ、マウス入力の場合は 3.90 bps、提案システムによる入力の場合は 3.97 bps となった。

以上の結果より、提案システムによる位置入力は、マウスとほぼ同等の性能を持つことが示せた。

## 6.2 軌跡推定の精度評価

### 6.2.1 実験内容

次の評価実験では、レーザポインタを照射しながら動かした際に、推定した動きと実際の動きとにどれほどずれが生じるかを試験した。動きの推定の際に、フレーム間での動きは前後の軌跡重心位置から補間で求める。この実験では、推定の精度が比較的高い、3 次畳み込み内挿法 (bicubic convolution interpolation) を用いた。この手法は、ある区間の値を補間する際に、区間端の 2 点に加えてそれぞれに隣接する 2 点の値を用い、計 4 点から補間を行う。

実験では、図 9 に示すような課題画像をスクリーンに提示する。被験者には、ガイドを丁寧になぞるのではなく、ガイドと同じような図形を描くよう求めた。ガイド図形自体は後の実験結果の解析では使用しない。また、各課題画像において、1 回目は普通で、2



図 9 課題図形

Fig.9 Task figures.

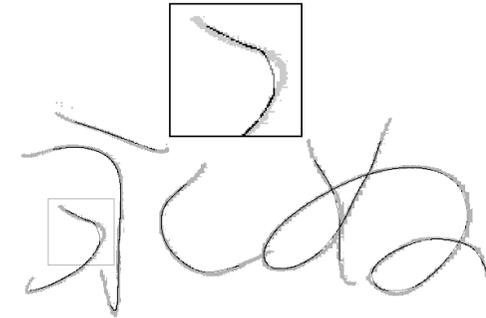


図 10 推定軌跡と実際のレーザ軌跡。画面上部に、一部の拡大図形を示している

Fig. 10 Estimated motion of the laser pointer and its trails. A scaled image is located at the top of the image.

回目はその倍の速度で描くよう求めた。

スクリーン上には、推定された動きの軌跡が表示される。これを課題画像ごとに記録する。また、5.4 節で説明した、輝点の位置を計算するのに用いた領域を、5.3 節で求めた逆行列を用いてパースペクティブ変換した後にビットマップとして記録した。図 10 に、記録した軌跡と領域を重ねた図を示す。

被験者は前節の実験と同じ 8 名で、合計で 48 のストロークデータを得た。

### 6.2.2 実験結果

実験結果を以下のように解析した。まず、各ストロークデータにおいて、平均速度 (pixel/sec) を算出する。次に、推定した軌跡をレーザ軌跡のビットマップに重ねて描画し、その各ピクセルにおいて、レーザ軌跡からはみ出したピクセルの数を数える。推定軌跡の総延長に占めるはみ出したピクセルの割合を計算する。この割合を、推定誤差として扱う。

図 11 に、平均速度と推定誤差の関係をプロットしたものを示す。図から、全体として、レーザの動きが速くなるに従って誤差が増える傾向があることが分かった。また、課題図形

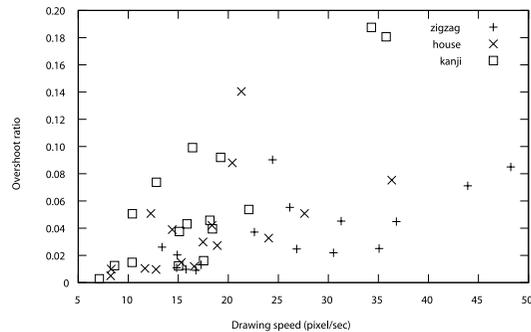


図 11 推定された軌跡と実際の軌跡のずれの散布図  
Fig.11 Scatter chart of the amount of undershoot.

が複雑なもの程誤差が増える傾向がある。この結果から、一般的な補間処理による動き推定は実際のレーザーポインタの動きと比較すると、素早く複雑な動きがあった場合に誤差を増大させていたことが分かる。

誤差が生じる箇所を、図 10 に示すような図を目視して確認した。多く見られたのが、図 10 で拡大して示した箇所のように、軌跡が鋭く方向転換するような場合にその角が鈍る場合であった。また、速い動きで弧を描く場合に、その半径が実際よりも小さく推定され、誤差を生じている箇所も多く見られる。これは、領域の代表位置として重心を用いており、重心が弧の内側に偏るためである。これらの問題を本質的に解決するには、軌跡位置のサンプリングレートを増すこと、この場合カメラのフレームレートを向上させる必要がある。

なお、線分の描き出しや描き終わりの箇所では、推定された軌跡がレーザー軌跡の端点付近まで描かれず、長さが足りていないものが多くあったが、これは、軌跡の補間に 4 点を必要とする補間手法を使っており、現在の実装では線分の端点付近の区間が補間されていないためである。端点付近を補間するには端点での 2 次成分を何らかの形で与える必要が生じる。この場合、端点付近のレーザー軌跡形状から 2 次成分を推測することができる可能性があり、その値を用いることで精度の良い推定ができるのではないかと我々は予想している。

### 6.2.3 考 察

実験結果より、計測されたレーザー軌跡の重心位置から推定したレーザーポインタの動きと、提案手法により計測された実際の動きとの間の誤差が示された。特に、レーザーポインタの動きが速くなるにつれて誤差が増えること、また図形が複雑になるほど誤差が増えることが明らかになった。これらにより、軌跡形状の抽出においては、提案手法が優位であることが示

された。ただし、今回計測された誤差量が、実際のステージパフォーマンスにおいてどれほどの影響を持つかは明らかではないため、今後の検討が必要である。

また、今回採用した 3 次畳み込み内挿法では、線分の描き始め・描き終わりの部分で動き推定が望みどおりに働かないことが明らかとなった。筆者の経験によれば、ドローイングにおいては書き始め・書き終わりの位置認識は精度が高い方が望ましい。また 3 次畳み込み内挿法では 1 フレーム分の遅れを生じることもあり、あわせて従来手法による動き推定のパフォーマンス用途における問題点を示している。

## 7. ま と め

レーザーポインタを用いた遠隔での入力システムを開発した。提案手法は減光フィルタを用いた光学的手法によりスクリーン上のレーザー軌跡を分離するもので、レーザーポインタを用いた従来手法が持つ問題を解消し、さらに従来手法ではとらえることのできなかったレーザーの軌跡を認識する。提案システムのアプリケーションは、軌跡の重心位置に加え、軌跡の形状情報をそのまま利用できる。また、軌跡の形状情報の利用方法として、形状情報による GUI 部品の実装手法を提案した。

評価実験により、提案システムは位置入力デバイスとしてはマウスを用いた場合と同等の性能を持つことが示された。また重心位置の動きから推定した動きと提案手法により観測された実際の動きとの誤差が計測され、レーザーポインタの動きが速くなるにつれ誤差量が増えていることが示された。これは、動きの速い即興的な入力において誤差が大きくなる傾向があることが明らかになったのと同時に、提案手法がそれを解決する一手法であることを示すものである。

今後の課題としては、軌跡形状情報を有効に利用する手法を示すことをあげる。また、現在の実装ではクラス 3a のレーザーポインタを使用しているが、このクラスはレーザー光を直視した際に眼に傷害を与えうる。より安全にかつ広範に使用できるよう、クラス 2 程度のレーザーポインタを使えるよう改善することを課題とする。

## 参 考 文 献

- 1) Davis, J. and Chen, X.: LumiPoint: Multi-User Laser-Based Interaction on Large Tiled Displays, Technical report, Stanford University (2001).
- 2) Fitts, P.M.: The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, pp.381-391 (1954).

- 3) Fukuchi, K.: A Laser Pointer/Laser Trails Tracking System for Visual Performance, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2005*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.3585, Springer, pp.1050–1053 (2005).
- 4) International Organization for Standardization: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) – Part 9: Requirements for non-keyboard input devices.
- 5) Kirstein, C. and Müller, H.: Interaction with a Projection Screen Using a Camera-tracked Laser Pointer, *Proc. International Conference on Multimedia Modeling*, pp.191–192 (1998).
- 6) MacKenzie, S. and Jusoh, S.: An Evaluation of Two Input Devices for Remote Pointing, *Proc. 8th IFIP International Conference on Engineering for Human-Computer Interaction – EHCI 2001*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2254/2001, pp.235–249, Springer Verlag (2001).
- 7) Myers, B.A., Bhatnagar, R., Nichols, J., Peck, C.H., Kong, D., Miller, R. and Long, A.C.: Interacting at a Distance: Measuring the Performance of Laser Pointers and Other Devices, *Proc. CHI2002*, pp.33–40 (2002).
- 8) Oh, J.Y. and Stuerzlinger, W.: Laser Pointers as Collaborative Pointing Devices, *Proc. Graphics Interface 2002*, pp.141–149 (2002).
- 9) Olsen Jr., D.R. and Nielsen, T.: Laser Pointer Interaction, *Proc. CHI2001*, pp.17–22 (2001).
- 10) Sukthankar, R., Stockton, R.G. and Mullin, M.D.: Self-Calibrating Camera-Assisted Presentation Interface, *Proc. International Conference on Automation, Control, Robotics and Computer Vision, 2000*, pp.33–40 (2000).
- 11) 福地健太郎, 暦本純一: SmartSkin を用いた多点入力システムの実装, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.7, pp.1682–1692 (2005).

(平成 19 年 9 月 1 日受付)

(平成 20 年 4 月 8 日採録)



福地健太郎 (正会員)

1975 年生まれ。2000 年東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程修了。2004 年同博士課程を退学後、電気通信大学に勤務。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。2002 年 FIT 船井ベストペーパー賞受賞。