

# Slope Disparity Gating を用いた プロジェクション映像とのタッチセンシングの実現

辻 茉佑香† 久保 尋之‡ 船富 卓哉† 向川 康博†

†奈良先端科学技術大学院大学 ‡東海大学

E-mail: tsuji.mayuka.td0@is.naist.jp

## 1 はじめに

近年、高解像度でフォーカスフリーでの映像を投影できるレーザー走査式プロジェクタが登場したことで、専用に設置されたスクリーンだけでなく、床や壁、机上などといったさまざまな平面への映像投影が可能になった。しかし、映像に対するタッチインタフェースとして、ディスプレイデバイスに対しては感圧式や静電容量式 [1] などのタッチパネル式ディスプレイが開発されている一方、プロジェクタで表示された映像に対するタッチインタフェースは実用化されている例が少ない。通常、プロジェクタの映像投影面は一切のセンシング機構を有していないため、投影面とのタッチ操作によるインタラクションを実現するには、指が面に接しているかどうかのタッチ検出と、指がどこにタッチしているのかの座標検出が重要な要素となる。最も簡便なのはカメラを用いて画像から指先検出を行うことだが、1台のRGBカメラでは3次元情報が得られず、座標検出と同時にタッチ検出を行えないことから、依然として実現が困難とされている。一方、ARなど3次元的な動作を前提としたインタラクションで使われている Time of Flight (ToF) カメラでの深度センシングを用いることで、タッチ検出も十分にを行うことができる [2]。しかし、ToF によるアプローチでは光源装置として追加の赤外線装置が必要となる。さらに、指先の位置を特定するために深層学習を用いる手法もあるが [3]、深層学習を用いた方法ではラベル付けされた大量の学習データの準備が必要となることが課題となる。

これに対し本研究では、プロジェクタに一般的な1台のカメラを加えた最も簡便な構成で、安定したタッチ検出および座標検出を行うことを目的とする。タッチ検出を安定に実現するため、我々は一般的なカメラとプロジェクタを組み合わせることで特定の奥行のみを撮影する技術である Slope Disparity Gating [4] を用いることを考えた。Slope Disparity Gating を用いることでタッチセンシングの検出に用いたい領域だけを選択的に撮影できるため、プロジェクタからの投影面に対する指の接触の有無やタッチ位置を簡便な手法で検出し、タッ

チセンシングを実装することができる。この研究が提案するセンシング手法を用いることで、プロジェクタ以外の追加の光源装置を用いずに、簡易な画像処理アルゴリズムでロバストにタッチセンシングを行うことができる。

## 2 Slope Disparity Gating [4]

プロジェクタの投影映像におけるタッチセンシングを実現するためには、タッチする指先の3次元的な位置情報を取得する必要がある。そこで、本研究では照明からの光を物体に当ててその反射光をカメラで計測するアクティブ計測手法に着目した。照明としてプロジェクタを採用したアクティブ計測の既存の技術として、プロジェクタから構造化光をシーンに照射し、その様子をカメラで撮影することによって、各画素における被写体の奥行きを取得する手法が知られている。しかし、本研究ではプロジェクタの投影映像とのタッチインタラクションを目的としているため、同一のプロジェクタからタッチ操作する映像以外の光を投影するのは都合が悪い、これを解決するためには、追加の非可視光のプロジェクタを用意しなければならない。

O'Toole ら [5] はレーザー走査プロジェクタとローリングシャッターカメラを組み合わせることで、特定の奥行きにある被写体のみを可視化する手法を実現し、さらに Ueda らはこの手法を発展させ、任意の傾きを有する平面にある物体だけを可視化可能な、Slope Disparity Gating と呼ばれる手法を提案した [4]。

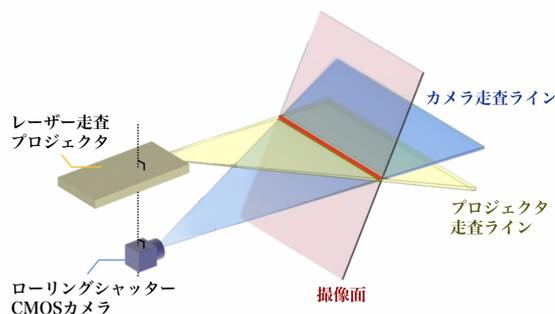


図 1: Slope Disparity Gating の概要図 [4]

Slope Disparity Gating では、図 1 に示すように、レーザー走査式のプロジェクトが照射するシート状の走査平面（黄色で表す面）と、ローリングシャッター方式のカメラによるシート状の走査平面（青色で表す面）との交線（図の赤線）にある物体だけが撮影される。さらに、これらの走査ラインは繰り返し上下にスイープしており、交線の軌跡は平面（赤色で表す面、撮像面と呼ぶ）を形成する。プロジェクトとカメラの動作の同期タイミングと走査速度を制御する事によって、この平面は任意の奥行きと傾きに設定することができる。実際には、露光時間を制御することによってこの撮像面は任意の厚みを有するボリュームとなり、これを本研究では撮像領域と呼ぶ。

Slope Disparity Gating の特徴として、プロジェクトが投影する映像に制約が無く、またリアルタイムで映像が取得可能な点が挙げられる。そこで我々は、プロジェクトに対するタッチセンシングにおいて、Slope Disparity Gating によって得られた画像を入力として用いることで、今まで単一のカメラでは実現困難とされていた 3 次元的なタッチ情報の取得、すなわちタッチ検出情報と座標検出情報の同時取得が可能ではないかと考えた。

### 3 提案手法

プロジェクトの映像投影面は一切のセンシング機構を有していないため、映像投影面とのタッチ操作によるインタラクションを実現するには、指が面に接しているかどうかのタッチ検出と、指がどこにタッチしているのかの座標検出を行う必要がある。

#### 3.1 Slope Disparity Gating によるタッチ検出

Slope Disparity Gating は、特定の奥行き・傾き・特定の厚みで指定される領域を撮影することができるため、図 2 のようにプロジェクトから映像を投影した平面に対して斜めに映像を投影した場合、投影平面よりわずかに上側の、投影面と平行になるような傾きで、数 cm の厚みのみを撮影することが可能となる。

一般的なカメラ画像によるタッチ検出では指が面に接しているかを判定するのが容易ではないが、Slope Disparity Gating を用いて投影平面よりわずかに上の領域のみを撮影すれば、その領域に指が存在していれば指の部分が写り、領域外に指が存在していれば指の部分は撮影されない(図 3)。そのため、Slope Disparity Gating の撮影結果をタッチ検出に利用することができる。

#### 3.2 座標検出

Slope Disparity Gating で撮影した画像は、指定した撮像領域に物体が存在しなければプロジェクトから照射された光の反射光が無いためカメラに光は届かず、その画素値は極めて小さくなると考えられる。したがっ

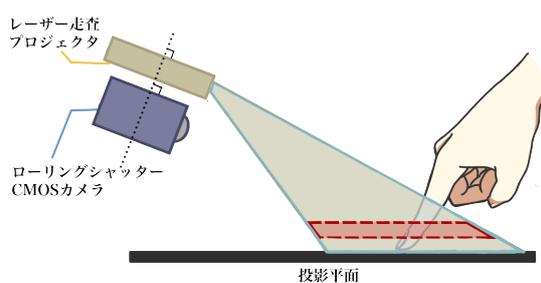


図 2: Slope Disparity Gating による特定領域の選択的撮影。プロジェクトは透視投影方式で青い線で囲まれているように映像を投影しているが、Slope Disparity Gating を用いることで赤い線で囲まれた部分のみを撮影することができる。

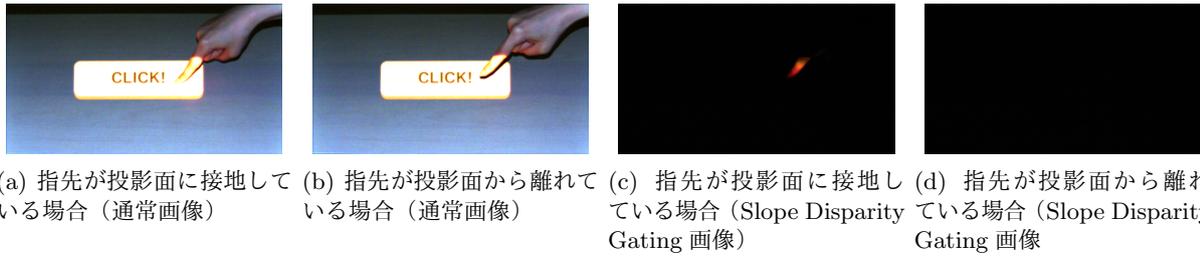
て、得られた撮影画像から指の位置を検出するにあたって、投影面付近に存在する物体がタッチするための 1 本の指だけである仮定したとき、式 (1) で示すように、撮影画像の座標  $(i, j)$  における輝度値  $m_{i,j}$  を重みとした画像全体の重心座標  $(w_g, h_g)$  を用いて指の位置を検出することができる。

$$(w_g, h_g) = \left( \frac{\sum_j^h \sum_i^w m_{i,j} i}{\sum_j^h \sum_i^w m_{i,j}}, \frac{\sum_j^h \sum_i^w m_{i,j} j}{\sum_j^h \sum_i^w m_{i,j}} \right) \quad (1)$$

ただし、実際に Slope Disparity Gating で撮影すると、環境光などの影響で物体が存在しない空間の画素も小さな画素値を持つ場合があることから、その影響を取り除くために画素値が 50 以下の場合はその数値を 0 に補正した。なお、画像のサイズを  $w \times h$  (ピクセル) とした。

#### 3.3 座標変換

前節で求めた指先位置を表す重心座標  $(w_g, h_g)$  はカメラ座標であるため、これをスクリーン投影面におけるスクリーン座標に変換する必要がある。そこで、カメラ座標系からスクリーン座標系に変換するホモグラフィ行列を計測によって取得し、得られたホモグラフィ行列を用いてスクリーン座標系における重心座標を計算する。ただし、実際にこの操作を行ったところ、求められた重心位置は指先よりやや上（指の根元側）になることが多かった。これは、Slope Disparity Gating による撮像領域が一定の厚みを持つため、その厚みの分だけ指先より重心位置が上方にシフトしてしまったことが原因であると考えられる。そこで、これを指先の座標に対応させるために、 $(w_g, h_g)$  それぞれのピクセルオフセットの定数  $(w_o, h_o)$  を用いて較正を行った。カメラ座標で得られた指の重心座標をオフセットで較正したの同次座標系を  $C = (w_g + w_o, h_g + h_o, 1)^T$ , ホモ



(a) 指先が投影面に接地している場合 (通常画像) (b) 指先が投影面から離れている場合 (通常画像) (c) 指先が投影面に接地している場合 (Slope Disparity Gating 画像) (d) 指先が投影面から離れている場合 (Slope Disparity Gating 画像)

図 3: 映像投影面に指を近づけた場面を通常のカメラと Slope Disparity Gating システムとを用いて撮影したときの比較. 前者は指が接地しているかを判別するのは難しいが, 後者は指が写っているかどうかで接地を判別することができる.

グラフィ変換行列を  $H$  としたとき, スクリーン座標系における指先の同次座標系  $C' = (x' \ y' \ 1)^T$  は, 式 (2) として表すことができる.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} w_g + w_o \\ h_g + h_o \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

なお, オフセット  $(w_o, h_o)$  は事前の測定結果をもとに決定した.

## 4 実験と結果

本研究では, Slope Disparity Gating を用いてプロジェクタの投影平面よりわずかに上の領域のみを撮影した画像を入力とすることで 3 次元的なタッチ情報を取得できることを示すために, 簡素なインタラクティブシステムを構成した. このインタラクティブシステムでは, 投影面である机に指が触れたときに, スクリーン座標系における指先の推定位置が赤色の丸で表示されるようなプログラムを実装し, 赤色の丸が実際のタッチ位置と一致することを確かめた.

### 4.1 Slope Disparity Gating の構成

本研究では, レーザー走査プロジェクタとしてソニー社製の MP-CL1A, ローリングシャッターカメラとして IDS 社製のカラーカメラ UI-3250CP-C-HQ を用いた. 図 4a のように, プロジェクタとカメラは上下に並べて固定し, 机上に映像を投影するよう角度を調整した.

### 4.2 タッチセンシングの実証

Slope Disparity Gating を用いての投影平面よりわずかに上の領域のみを撮影した画像を元に, 指が映像投影面に触れたとき, 式 (1),(2) を用いてタッチ位置を検出した. 図 4b から分かるように, 指が机に触れているときは Slope Disparity Gating の撮影画像に指が写っていることからタッチ検出がなされており, 撮影画像の輝度重心を元に座標が求められている. また, 図 4c のようにタッチ位置を示す赤い丸も指先に投影されていることから, Slope Disparity Gating を用いて得た指のカメラ座標は正しくスクリーン座標へと変換されてい

ることが分かる. 対して, 指がボタンにタッチされていないとき, すなわち指が機の表面から離れた位置にある場合は Slope Disparity Gating の撮影画像には何も写らず, 指がボタンにタッチしていないと正しく判断された結果となった.

## 5 結論

本研究では, Slope Disparity Gating を用いたカメラ画像によるタッチセンシング手法を構築することで, プロジェクタ投影面にインタラクティブな機能を実装することに成功した.

本手法においては, Slope Disparity Gating を用いることで投影面よりわずかに上の厚み数センチの領域のみを撮影できるため, 従来のカメラ画像によるタッチセンシングと比較して, 投影映像にロバストかつ, 簡単な画像処理技術でのタッチ検出を可能にした. さらに, プロジェクタからの投影光は, 映像投影としての役割に加えてセンシング機能にも用いることができ, 従来の ToF センサを用いた指検出とは異なり, 追加の光源装置が必要ないという利点がある.

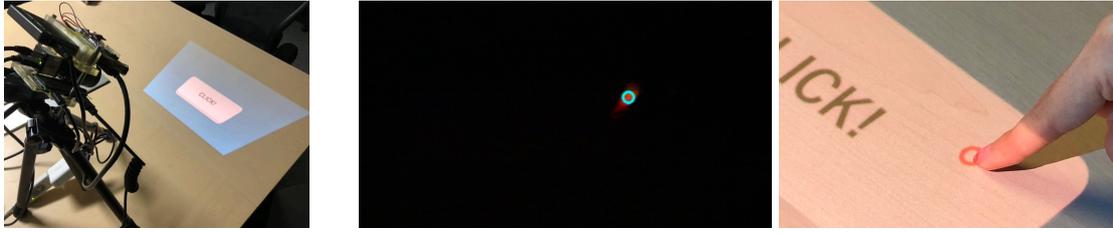
現段階では, 指が 1 本だけプロジェクタ投影面に触れた場合を想定して実装を行ったが, 今後は撮像領域内に指が 2 本以上存在した場合を想定してマルチタッチに対応させることが今後の課題である. また, Slope Disparity Gating では, 撮像領域の奥行きがコントロール可能であることから, ホバー操作により柔軟性を持たせることも今後の課題として挙げられる.

## 謝辞

本研究は, 日本学術振興会 科研費 19H04138, および科学技術振興機構 CREST JPMJCR1764 の助成を受けたものです.

## 参考文献

- [1] SK Lee, William Buxton, and K. C. Smith. A multi-touch three dimensional touch-sensitive



- (a) Slope Disparity Gating を用いて プロジェクタからの映像を机上に投影した様子
- (b) 指を机にタッチした状態を Slope Disparity Gating で撮影した画像. カメラ座標系における指の位置  $(x, y)$  は青い丸で示されている.
- (c) スクリーン座標におけるタッチ位置  $(x', y')$  が赤い丸で示されている様子. 赤い丸が指先に投影されていることから, タッチ位置が正しく表示されていることが分かる.

図 4: 実験結果

tablet. *SIGCHI Bull.*, Vol. 16, No. 4, p. 21–25, April 1985.

- [2] Olivier Janssens, Steven Verstockt, Pieterjan De Potter, Piet Verhoeve, and Rik Van de Walle. Ki-touch: a kinect- based virtual touchscreen. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) Workshop on Color-Depth Camera Fusion in Robotics, Proceedings*, p. 5, 2012.
- [3] Eisuke Fujinawa, Kenji Goto, Atsushi Irie, Songtao Wu, and Kuanhong Xu. Occlusion-aware hand posture based interaction on tabletop projector. In *The Adjunct Publication of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19*, p. 113–115, 2019.
- [4] Tomoki Ueda, Hiroyuki Kubo, Suren Jayasuriya, Takuya Funatomi, and Yasuhiro Mukaigawa. Slope disparity gating using a synchronized projector-camera system. In *2019 IEEE International Conference on Computational Photography, ICCP 2019*, 5 2019.
- [5] Matthew O' Toole, Supreeth Achar, Srinivasa G. Narasimhan, Kiriakos N. Kutulakos. Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, July 2015.