

Projection-Domino: プロジェクションマッピングを用いた ドミノ制作支援

三島侑樹^{†*} 彭以琛[†] 五十嵐大和[†] 宮内涼将[†] 大川将広[†] 謝浩然[†] 宮田一乗[†]

概要: ドミノ倒しには遊戯目的の楽しさだけでなく、想像力や集中力、協調性などの教育的効果を得られるメリットがある。しかし、現状のドミノ制作では設計図や絵コンテを手動で作成し、設計図からどのようにドミノを配置するかは想像で行う。そのため、作成に時間がかかる、実際に完成したものと設計図の間で差が生じるなどの不都合となる場合がある。また、共同作成する場合、作成者間のイメージの共有が難しく、これは大規模なドミノ制作になるほど困難になる。本稿では、ユーザーが描いた絵からリアルタイムでドミノの配置図を自動生成し、プロジェクションマッピングを用いて実際のドミノ作成を支援するシステム“Projection-Domino”を提案する。本研究では、従来の作成方法と本システムを利用した場合での評価実験を行い、本手法がドミノ制作支援に有効であると確認した。

1. はじめに

ドミノ倒しは誰もが遊んだことのある遊戯の一つであるだろう。ドミノ倒しは単に遊戯目的だけではなく、制作過程において想像力や集中力、協調性などの教育的効果をお子から大人まで得ることができる。しかし、現状のドミノ倒し制作（以降、ドミノ制作）では、設計図や絵コンテなどを手動で作成し、設計図から実際のドミノの配置は想像で行う。そのため、作成に時間がかかり、完成したものと設計図の間で差が生じることがある。また、共同作成する場合、作成者間のイメージの共有が難しく、これはドミノ倒しが大規模になるほど困難になる。さらに、ドミノが交差する際などには細かい配置の調整も必要である。

これらの課題に対し、本研究では、ユーザーが描いたスケッチからリアルタイムでドミノの配置図を自動生成し、プロジェクションマッピングを用いてドミノの配置場所をユーザーに指示し、ドミノのデザインおよび制作を支援するシステムを提案する。従来のドミノ制作手法と本提案システムを利用した場合との評価実験を行い、本手法の有効性を確認した。

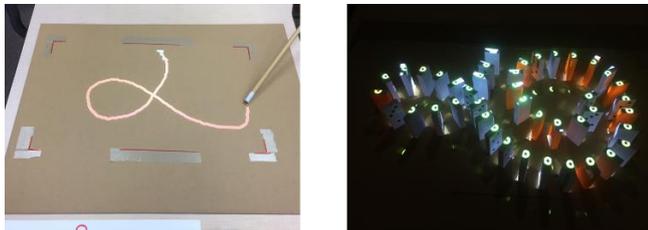


図 1 プロジェクションマッピングを用いたドミノ制作支援。(a) スケッチ入力と (b) 投影結果

2. 関連研究

2.1 ドミノを題材とした MR アトラクション

これまでにドミノを対象としたインタラクション分野の

研究事例は多くなく、ほとんどはシミュレーションなどの数学的なモデリングに関するものや教育領域の研究である。

インタラクション分野の研究には、平田らが開発した“DOMINO(DO Mixed-reality Non-stop) Toppling”がある [1]。平田らの研究では MR 技術に基づいて、物理接触デバイスを利用し、仮想のドミノが現実のドミノの位置まで倒れてきた際に現実のドミノが倒れるように設計している。

このようにして、現実のドミノと仮想ドミノを R-V (Real to Virtual) / V-R (Virtual to Real) 遷移する MR 空間を作成している。MR 空間を観測するデバイスとしてビデオスルー型 HMD を使用し、現実と仮想ドミノの見た目や位置、倒れる音などを再現することによって R-V/V-R のシームレスな遷移を実現した。平田らの研究目的は MR 表現の魅力を高めることであり、本研究のようなドミノの制作支援には触れていない。本研究では、ドミノの設計や作成過程を支援するシステムを提供する。

2.2 プロジェクションマッピングによる活動支援

制作支援の研究事例として、大規模なパルーンアートの制作を簡易化する手法として、モデルを各層ごとに分割し、実空間とのキャリブレーションを各層に実施する手法を提案した。 [2, 3] 演奏支援の研究事例として、土井らは、プロジェクションマッピングにより、箏演奏情報を箏の弦や龍甲に直接提示することで、初心者を対象とした演奏の学習支援システムを構築した。 [4]

このように、プロジェクションマッピングによる活動支援は盛んに行われている。本研究では、プロジェクションマッピングを用いてドミノ制作のガイダンスを行い、ユーザーが思い描いた図の実現やドミノ制作時間の削減、多人数での共同作成を可能にすることを目的としたシステムを提案する。

3. Projection-Domino

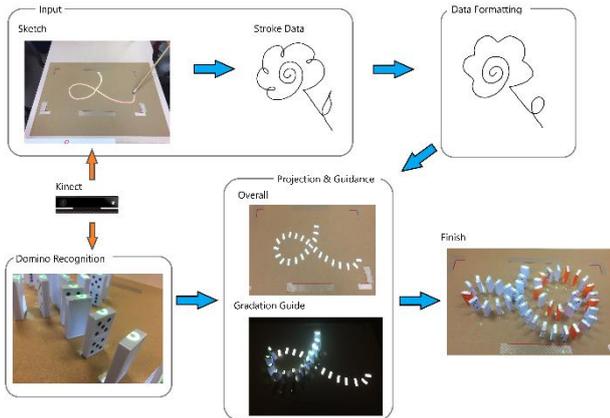


図 2 提案システムのフレームワーク

本提案システム Projection-Domino のフレームワークを図 2 に示す。システムのプロセスは以下の 4 つのステップで構成する。

- 1). 赤外線トラッキングによる軌跡の検出
- 2). ドミノ倒しを可能にするデータ整形
- 3). プロジェクションマッピングによるガイダンス
- 4). 赤外線トラッキングによるドミノ検出

まず、取得した赤外線画像からユーザーが描いた線を抽出し、システムの入力となるストロークデータ（ドミノの配置の標列）を作成する。そのデータに対して、ドミノ倒しを実現できないような角度や過度に密集したストロークデータの頂点などを調整するデータ整形を行う。そして、整形されたデータをもとにプロジェクションマッピングを行い、ユーザーにドミノの配置を指示する。この際に、ユーザーがドミノを正しい位置に配置したかを判定するドミノ検出を行う。

3.1 キャリブレーション

軌跡とドミノ検出では、赤外線トラッキングを行うため、深度センサ Kinect とプロジェクターのキャリブレーションが必要になる。本研究では、深度センサの照射範囲とプロジェクターの投影範囲を合わせるようにキャリブレーションを行う。まず、計算機内にて実際の投影面と深度センサの照射面を仮想的に構築する。次に、深度センサの照射面積を Kinect の解像度 (512 × 424) で投影し、映像の面積で割った結果をサイズと位置の比率 (Ratio) として算出する。映像を Ratio 倍で拡大し、サイズのキャリブレーションを行う。また、サイズのキャリブレーション後の映像投影範囲の上辺および左辺を Kinect 照射範囲の上辺と左辺に合わせ、位置のキャリブレーションを行う。

3.2 軌跡の検出

ユーザーは、自作した再帰性反射材付きのペンを用いて

投影面に線を描く。そして、以下に示すように、線の描画軌跡をリアルタイムで記録する。まず、反射材のエッジ検出をし、反射材の中心となる座標を算出する。次に、検出速度を 60FPS に設定した上、フレームごとに中心点の座標を取得してストロークを作成し、フィードバックとして描いた軌跡を投影する。最後に、作成したストロークデータを後述のデータ整形部へ出力する。

3.3 データ整形

軌跡の検出で得たストロークデータをドミノ倒しのストロークに変形する処理を以下に順に示す。

- (1). 処理の簡単化のため Ramer-Douglas-Peucker アルゴリズムを適用する。[5, 6] これにより、データ内の座標数を、ストロークの形を損なうことなく減らすことができ、処理の軽量化が期待できる。
- (2). ドミノの実現上不可能な部分(鋭角, 小さいループなど)を削除する。
- (3). 処理したストロークをスプライン補間で滑らかにする。[7]
- (4). 交差する部分にテクニックが適用できるように処理をかける。
- (5). ドミノが連鎖して倒れるように間隔を空けた座標列を生成する。検証を基に、ドミノを倒れる間隔は 2cm と設定した。

3.4 ドミノの検出

ユーザーが実際に置いたドミノの位置と、投影したガイド位置とが合致しているかを確かめるために、ドミノの座標を取得する。Kinect を用いて取得するドミノの上面に貼った再帰性反射材による反射光の画像からエッジを検出し、その中心点を記録する。これらの中心点の座標を投影されたドミノの座標と比較し、ガイダンス情報を投影する。

4. 制作インタフェース

4.1 プロジェクションマッピングによるガイダンス

まず、再帰性反射材付きのペンを使用し、リアルタイムで軌跡を表示できる投影面に線 (スケッチ) を直接描く。次に、描いたスケッチから算出したドミノの配置場所の全体図を白色で提示する。その投影された全体図をもとにユーザーはドミノを実際に置いていく。その際、全体像の把握と多人数での共同作成を目的として全体像を投影しているため、ユーザーがドミノを置く順番は制限せず、多人数での作成も可能である。また、実際のドミノが置かれた位置と投影したドミノの位置が合致しているかを確かめるため、置かれたドミノの中心に色付きの「円」を投影する。ここで、目標位置との距離によって「円」の色をカラーグラデーションで表示する。

配置したドミノと投影されたドミノの距離によって、カ

ラーグラデーションの「円」を図3のように表示する。目標位置は白く投影されている長方形の部分であり、正しく配置された場合は緑色で表示され、距離が離れるほど赤色になるよう設定した。図3aのように約2cm以上離れていると赤色、図3bのように約1cm離れていると黄色で表示される。

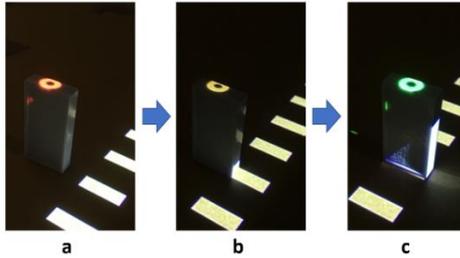


図3 カラーグラデーションの例

4.2 実装環境

実装環境は図4のように設定した。作業スペースとなるテーブルの高さは70cmとし、使用機器は、レーザープロジェクター (LG HF80JG, 2000 lumen) および深度センサー (Microsoft Kinect V2, 解像度 512×424) を使用する。レーザープロジェクターはテーブル上70cmに角度49度、Kinectはテーブル上から97cmの位置に垂直に設置した。投影面のサイズは46.5cm×27cmとする。

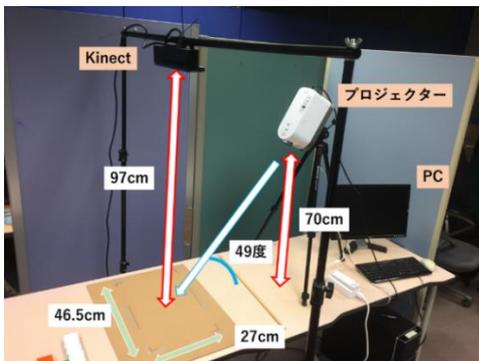


図4 実験環境の設置

5. ユーザースタディ

5.1 従来手法との比較実験

本システムを、従来の手動で作成した設計図をもとにドミノ制作を行う場合と比較することを目的に評価実験を実施した。本実験では、12名の被験者 (20代男性10名・30代男性1名・20代女性1名) が、(1) 設計図をもとに作成する従来の方式、(2) 本システムを利用した方式、を使用して評価した。具体的な評価内容を以下に述べる。

(1). 設計図 (A4 サイズ) に描かれている図をテーブル上の投影面のサイズ内で再現する。この時、ドミノの間隔などは制限せず、1回のドミノ倒しですべて倒れるような並べ方を指示する。実験の様子を図5aに示す。

(2). 本システムによって投影された全体像とガイダンスをもとに作成する。この時、並べる順番などは制限しない。並べるドミノの図は (1) と同じものを使用する。実験の様子を図5bに示す。

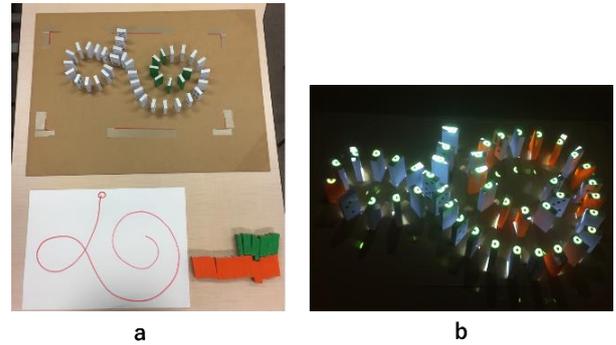


図5 評価実験の事例

本実験では、従来の方式 (1) の実施後に本システムを利用した方式 (2) を実施する。それぞれの方式で、作成時間と完成後にドミノ倒しを行い、すべて倒れたかどうかを記録する。ドミノを並べる過程で倒れてしまった場合は倒れた回数を記録し、最初から作成し直してもらい、再度時間をリセットして計測する。

5.2 比較実験の結果

本実験では、システム全体を通して実行し、完成したドミノがすべて倒れたかどうかを記録し、アンケートを実施する。

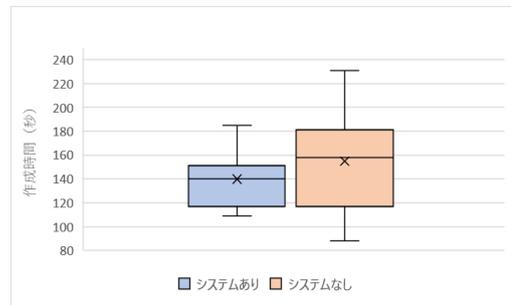


図6 従来手法との比較 (箱ひげ図)

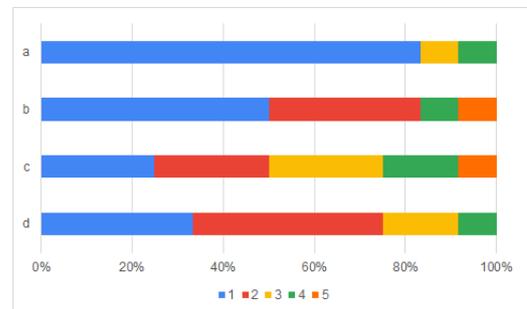


図7 比較実験のアンケート結果

図6に作成時間を計測し、従来手法と比較した結果を箱ひげ図で示す。システムありでは最大値185秒、最小値109秒、平均値140秒となった。システムなしでは最大値231秒、最小値88秒、平均値155秒となった。この結果からシ

システムなしに比べてシステムありの方は、作成時間のばらつきが抑えられ、平均作成時間も短縮できていることがわかる。さらに、作成途中にドミノを誤って倒してしまった人数は、システムありで4人、システムなしで8人となった。完成したドミノをすべて倒すことができた人数はシステムありで8人、システムなしで3人となった。よって、本システムはドミノ作成時間を短縮することができ、ドミノの安定した配置を提供できることが確認できた。このような結果の理由として、全体像の把握ができるため、位置をずらす回数が減ることや配置しやすい位置から置き始めることができることなどが考えられる。

図7にシステムありとなしでの比較アンケートの結果を示す。5段階評価1～5は、1に近いほどシステムありで、5に近いほどシステムなしの評価が高い。a～dは以下のアンケート項目を指す。

- (a). どちらがドミノを並べやすかったか
- (b). どちらの完成度に自信があるか
- (c). どちらの方が達成感があったか
- (d). どちらの方が楽しかったか

アンケート結果より、どちらの方がより達成感を得られたかの設問以外はシステムありの方が評価が高いことが明確である。達成感に関して、差が生じづらかった原因としては、全体像を投影してガイダンスを行うことで配置変更などが許されず、作業が比較的単調になってしまうことが考えられる。

5.3 システム全体の評価

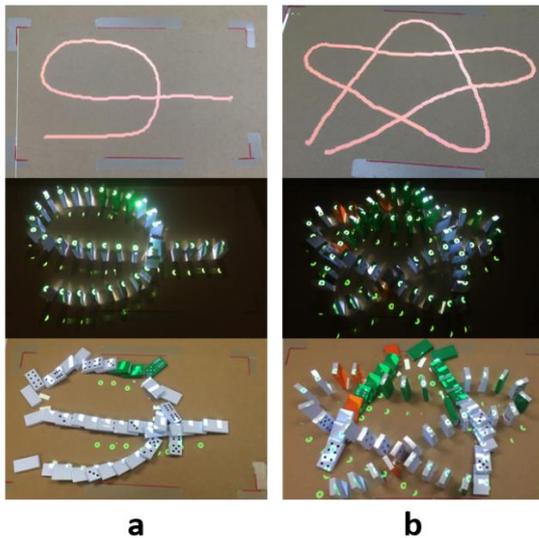


図 8 評価実験結果

図8に被験者がシステム全体を通して実験を行った様子を示す。図8aは、完成したドミノを全て倒すことができた例、図8bは一部倒れなかったドミノの例である。

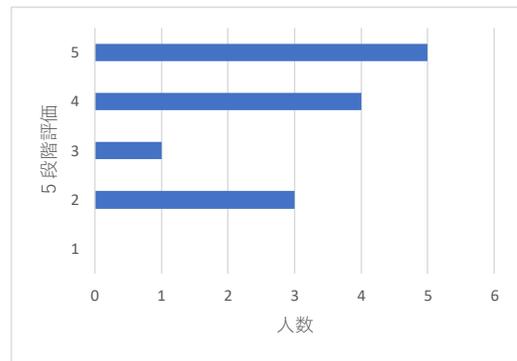


図 9 アンケート結果

図9にシステム全体を通して実行した際に、描いたストロークに対して、考えた通りのストローク（ドミノ配置）が出力されたかを5段階で評価した結果を示す。ここでは、1は”出力された”、5は”出力されなかった”ことを表す。半数以上が考えた通りのストロークが出力されなかったと答えている。その原因として、ペンを用いて描くストロークを自由なものにしていたため、現在のデータ整形部のアルゴリズムでは対応できない複雑な交差などが含まれていたことが考えられる。完成したドミノを倒した結果、完全に倒すことができた人数は3人であり、倒れなかった内のほとんどが交差や鋭角に関わる部分でドミノ倒しが途切れていた。

5.4 共同作成

図10に本システムを用いた共同作成の様子を示す。全体像の把握ができ、配置順の制限がないため、従来手法では難しい共同作成が可能になった。これにより、作成時間の削減や協調性を高める効果などを期待できる。



図 10 共同作成の様子

6. 今後の予定

実験結果の考察から、今後の課題を以下に示す。

- ・ 投影方法の改善
- ・ 大規模なドミノ制作への対応
- ・ 交差や鋭角を正確に実現する並べ方の提示

- ・ 制作過程でのドミノの追加や配置変更
- ・ ドミノ制作時や倒した際のエフェクト

本研究では、テーブル上の投影範囲が $46.5 \times 27\text{cm}$ と小規模で行っているため、より大規模なドミノ制作に対応するために実装環境の変更を行う必要がある。複数台のプロジェクトを使用することによって実験環境の拡張と同時に、配置済みのドミノによる影の軽減ができると考える。現状ドミノが交差する際の配置は、1通りの方法で実装しており、鋭角な部分は緩やかになるようなアルゴリズムを使用している。元のスケッチの形をできる限り保つためにデータ整形部のアルゴリズムを改善し、複雑な交差や鋭角の処理を行いたい。また、特殊な並べ方は数種類あり、交差や鋭角になる位置を検出して、特殊な並べ方をユーザーが選択し、動画などで提示することによってインタラクティブな要素を与え、制作の幅が広がると考えている。さらに、ドミノ配置に対する支援に加え、デザイン提案の支援を目的として、よりインタラクティブな部分に焦点を当てて研究を進めていきたい。本システムでは描いた線をもとにドミノの配置を行うため、ドミノの追加や配置変更には対応していない。今後はドミノの配置動作と並行したデザインの動的な編集を可能にしていきたい。現時点では、Quick, Draw! Dataset [8]のようなイラストを時系列データとして扱っているデータセットなどを活用し、ドミノが現在置かれている位置から描きたいものを完成させる確率が高い次の配置場所をいくつか提案することによって、デザインの変更とユーザーが描きたいものを実現する補助を行う手法を考えている。デザイン提案の支援を行うことで想像力や創造力などを養うことができ、教育目的での活用や遊戯の幅が広まることを期待する。さらに、プロジェクションマッピングの追加要素として、ドミノ制作時や倒した際のエフェクトを加えることでドミノ制作に対する意欲の向上や楽しさを高めることができると考える。

7. まとめ

本研究では、ユーザーが描いたスケッチからドミノ配置を自動生成し、プロジェクションマッピングを用いてドミノの配置を指示することで、従来の方式の課題解決を試みた。本稿では実装詳細の説明とシステムの評価について述べた。評価手法として従来の方式とシステムありでの作成時間や完成度などの比較、アンケートを行った。実験の結果、本システムの使用による作成時間の削減や作成途中に倒してしまうリスクの回避に貢献できると確認した。7章では実験結果から今後の課題を取り上げた。よりインタラクティブな部分にも焦点を当てることによってユーザーの達成感や想像力の向上を図り、教育分野での利用や遊戯の幅が広まることを期待する。

参考文献

- [1] 平田 遼太郎, 石橋 朋果, チェ カネイ, 森 尚平, 池田 聖, 柴田 史久, 木村 朝子, 田村 秀行. DOMINO Toppling: 実物体と仮想物体のシームレスな遷移を可能にした MR アトラクション. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 2016 年 21 巻 3 号 p. 463-472
- [2] Haoran Xie, Yichen Peng, Naiyun Chen, Dazhao Xie, Chia-Ming Chang, and Kazunori Miyata, BalloonFAB: Digital Fabrication of Large-Scale Balloon Art, ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2019), Late Breaking Work, 2019.
- [3] 吉田 匠吾, Yichen Peng, Dazhao Xie, Naiyun Chen, 謝 浩然, 張家銘, 宮田 一乘. 階層的プロジェクションマッピングによる大規模バルーンアートの制作支援. Visual Computing, 2019
- [4] 土井麻由佳, 宮下芳明. プロジェクションマッピングによる箏演奏学習支援システム. 情報処理学会論文誌, Vol2017-HCI-172, No15, 2017
- [5] Douglas, David H, and Thomas K Peucker. 1973. "Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature." Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization 10 (2): 112-122.
- [6] Ramer, Urs. 1972. "An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves." Computer Graphics and Image Processing 1 (3): 244-256.
- [7] P. Dierckx, "Curve and surface fitting with splines", Monographs on Numerical Analysis, Oxford University Press, 1993.
- [8] The Quick, Draw! Dataset
<https://github.com/googlecreativelab/quickdraw-dataset>