

Material meets AI: リアルタイム画像生成と複合材料によるユーザインターフェースの提案

赤地 由妃^{1,a)} 山岡 潤一^{1,b)}

概要: 物理的なインターフェイス (Tangible UI) と生成 AI システム (Generative AI) を統合するためのユーザインターフェースの研究が注目されている。テキストベースの prompt を読み込ませて Tangible UI を操作する Text-to-Shape の UI 実装のみならず、ユーザから LLM に対して形状意識 (Shape-aware) で意図伝達する逆方向の入力手法も研究されてきた。従来これらの研究は、シンプルなピンディスプレイや Swarm ロボットを用いたものが多いが、本研究では、これらを木材や紙、糸、針金、粘土などの複合マテリアルに拡張するものである。本論文では、関連研究やリアルタイム画像生成モデルである Stream Diffusion を用いた実装、想定される社会での応用可能性、議論と今後の展望を述べる。

1. はじめに

2022 年以降、テキストベースの大規模言語モデルの実用化を背景に、ユーザと生成 AI (Generative AI) がどのように意思疎通すべきかを目的とする研究が注目されてきた。最近では、ブラウザ操作による生成 AI のコードアシスト機能が実装されるなど、音声や画像も含めたマルチモーダルな入出力により生成 AI と対話するインターフェイスに拡大しつつある。そのような社会での急速な実用化の影響もあり、物理的なインターフェイス (Tangible UI) の研究者らも、どのように Tangible UI と Generative AI を統合すべきか、さまざまな論文が発表されてきている。

SHAPE-IT[1] は、自然言語のコマンドを使用してピンベースの形状ディスプレイを生成する text-to-shape-display を実装した。出力結果として、形状変化ディスプレイを選択できることで、ユーザの体験価値向上のみならず、タスクの実行速度を高め、生成 AI へのアクセシビリティに繋がる可能性がある。Shape n`Swarm[2] は、SONY 社が販売する卓上ロボットの toio ハードウェア [3] と音声入力を用いて、形状意識 (Shape-aware) で生成 AI とインタラクティブに対話する手法を提案している。LLM の予測可能性と透明性がユーザの主体性に影響することを指摘し、入力システムのタッチポイントを増やすことによる対話の質を高める可能性を示唆している。一方、3DALL-E[4] や ProtoDreamer[5] などのファブリケーションの領域でも、

生成 AI との統合手法は検討されている。3DALL-E は、3DCAD ソフトウェアの Fusion360[6] にテキスト画像変換 AI の DALL-E を統合する実装である。ProtoDreamer は、物理的な材料と生成 AI システムを統合したプロトタイプ環境を提案している。生成 AI が提案する独創的な 3D パーツについては、古くから指摘されてきた。これらの関係を図示すると、図 1 となる。

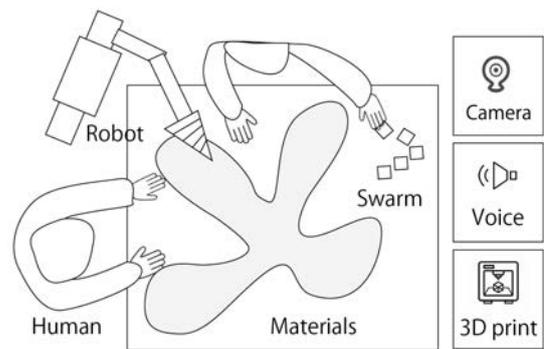


図 1 生成 AI と対話するインターフェイスの統合

本研究では、木材や紙、糸、針金、粘土などの複合マテリアルを用いて、形状意識 (Shape-aware) で生成 AI とインタラクティブに対話する手法を探索している。具体的には、リアルタイム画像生成モデルである Stream Diffusion[7] を用いて、キーボードや音声入力を使わず、物理的な複合マテリアルとの身体的なインタラクションのみで、生成 AI とリアルタイムで対話できるシステムの実装を行った。また、この手法の初期的なユーザ調査として、これまで月面基地

¹ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

^{a)} akachi0803@kmd.keio.ac.jp

^{b)} yamaoka@kmd.keio.ac.jp

を設計するワークショップを複数回行ってきた。材料としては、積み木や糸、3Dプリンタ造形物を使用しているほか、照明やカメラの位置や動きなどをユーザが操作できるようにして、どのような月面基地を設計するかを調査した。



図 2 月面基地を設計するワークショップ

本論文では、これまで探求してきた初期的な調査に関して、関連研究や想定される社会での応用可能性、議論と今後の展望を述べる。

2. 関連研究

2.1 複合材料と HCI

コンピュータのビジュアライゼーションに、木材や紙、糸、針金、粘土などの物理的な複合材料を使用しようという動きは、もともと AR 研究において探求されてきた。Sketched Reality[8] は、物理オブジェクトを身体的に操作することで、AR 上の仮想スケッチを操作できるシステムを提案している。Toio ハードウェアと iPad を使用したシンプルな実装であるが、応用例の中で、さまざまな物理的なインタラクションを使用している。AniCraft[9] は、金属線や折り紙、木製ブロック、ロープ、3D 印刷ペンなどの物理的なプロキシと AR マーカーを用いて、AR のアニメーションを制作できるツールを開発している。これらの日常的に手に入る物質は直感的に操作可能で、ユーザの創造性を高める効果があることを指摘している。

複数の材料を混合して使用するという事は、ファブリケーションでも追求されてきた。Therms-Up![10] は、通常ゴミとして捨てられる熱可塑性プラスチックを活用して、インフレータブル製品やインタラクティブな材料のプロトタイプをつくる手法を提案している。プラスチックフィルムのヒートシールの特性評価を行いつつ、エンボス加工や折り紙、複雑なテクスチャ、形状変化などを提示している。Xstrings[11] は、3D プリントにケーブル駆動のメカニズムを入れることで、バンドやコイル、ネジ、圧縮といったインタラクションを追加する手法を提案している。このようにファブリケーションやインフレータブルの形状変化ディスプレイの研究領域では、想定していない材料同士の組み合わせが、多様性に富むインタラク

ションを生じさせることは、よく探求されてきた。

これらの多様な複合材料の可能性を、生成 AI の研究領域でも、もっとも検討した研究は、ProtoDreamer[5] である。ProtoDreamer では、ペーストボードや粘土などの触覚の強い材料も使用しており、一方でレゴ R ブロックのような固い材料も混合して使用している。参加者したデザイナーらは、60 分間のドローン設計のタスクに取り組んでおり、写真とテキストのプロンプトによる stable diffusion WEB UI[12] の支援を受ける。専門的なプロンプトエンジニアリングやパラメータ設定、ControlNet などの操作を行うシチュエーションもあり、現在ほど直感的な UI を設計するのは当時難しかったとみられる。TangibleNegotiation[13] は、動画生成ツールの ComfyUI[14] と Toio ハードウェア、音声入力を用いて、児童の美術教育向けのリアルタイム生成 AI 支援ツールを開発している。これらの研究と、本研究との違いは 2 点あり、(1) リアルタイム画像生成を使用していないこと、(2) 音声入力を活用していることである。1 つ目に関しては、ダンスパフォーマンスなどでの活用事例も存在するため、今後はより簡単に使用できるようになると考えられるが、2 つ目に関しては、本研究の独自の条件として、音声入力を使用していない。

2.2 マルチモーダル生成 AI

HCI の研究者らは、音声やジェスチャー、タッチなどの入力モダリティの統合を追求してきており、生成 AI の研究領域でも、画像やロボットアームなどを生成 AI との対話に取り込むなど積極的に行われている。Xcreation[15] は、グラフベースのサポートツールで、ユーザーは、テキスト入力、グラフ編集、スケッチの 3 つの手法を組み合わせることで、物語の一貫性と操作性を保ちながら直感的に絵本などを制作できる。DesignPrompt[16] は、画像や色などのテキスト以外の入力を含むムードボード形式の生成 AI 支援のデザインツールである。制御感ではテキストの方が効果的な場合もある一方で、テキスト以外の入力手法があることは、直感的な作業におけるデザイナーと生成 AI との協業に有効な場合があることを指摘する。

一般に、マルチモーダル AI といった場合には、テキストだけでなく画像も含めて生成 AI と対話することを指す場合が多いが、それを物理空間まで拡張したのが SHAPE-IT[1] である。SHAPE-IT は、Python のバックエンドの LLM コードジェネレータと Javascript のシミュレーションソフトからなり、最終的に物理的なペンディスプレイに接続することで、テキスト入力による物理アクチュエーションの生成を可能にしている。Shape n'Swarm[2] は、toio ハードウェアを XY 座標の位置情報を LLM に伝送することで、音声入力によるテキストデータだけでなく、形状意識 (Shape-aware) により生成 AI と対話する双方向システムを提案している。toio ハードウェアの位置情報が犬の

フォーメーションを示している場合に、LLM がその状態を犬として認識するというケースが紹介されている。これらの研究は、これまでテキストや画像などのデスクトップ PC やスマートフォンを中心とした生成 AI との対話を、さらにマルチモーダルにする可能性のある実装である。

これらの研究と本研究との違いは、(1) 音声入力を使用せず、完全に非言語の身体インタラクションのみで生成 AI と対話するシステムになっていること、(2) シンプルなピンディスプレイや Swarm ロボットだけでなく、木材や紙、糸、針金、粘土などの複合材料に拡張していることである。

2.3 生成 AI と 3D プリント

3D プリントの研究では、ジェネレーティブデザインの手法の導入は比較的古くから続いてきた。プロダクトデザイナーは、はじめに目的と制約条件を決めて、3D デザインに取り組む場合が多いが、新しい計算ワークフローを採用することで、大規模なコレクションを探索することが可能になる。この計算ワークフローの1つの選択肢として大規模言語モデルを用いる研究は、2010 年代に遡って先行事例が存在する。DreamLens[17] は、モニタスタンドの設計タスクに対して、大規模言語モデルを使用して生成した 16,800 のデザインセットから 1,242 のデザインをフィルタリングする手法を提案している。一方で、一見すると「外れ値」と評価されるようなデザインが、一部のデザイナーにとって最も興味深いと評価されたことを指摘している。Exploring Challenges and Opportunities[18] は、Rhino3D[19] 上の機械学習駆動のシミュレーションソフトである SimuLearn[20] や Fusion360 などの AI 支援ツールを有する CAD ソフトウェアを使用して、エンジニアや建築家、プロダクトデザイナーの参加者が、どのような課題を感じているかをまとめている。多くの研究が指摘しているように、Prompt などのテキストベースの入力が CAD 操作の中で必要になることは、デザイナーにとって馴染みがない方式であり、非言語的なインタラクションの必要性を指摘している。

本研究が実装するリアルタイムの非言語のインタラクションによる生成 AI との対話システムは、このような工業向けの 3D 設計デザインにおける生成 AI の活用の研究領域とも相互に貢献し合うものである。

3. 実装

3.1 ソフトウェア

リアルタイム画像生成を実装するためのソフトウェアの選択肢には、LCM-LoRA[21] や Stream Diffusion などがある。LCM-LoRA は、画像生成におけるノイズ除去のステップ数を削減することで、生成時間を短縮する。Stream Diffusion は、1 枚ずつ生成するのではなく、複数の並列処

理をパイプラインとして設計することで、動画として滑らかな表現を提示するものである。これらのリアルタイム生成システムを動かすには、Stable Diffusion WEB UI や ComfyUI, Touch Designer[22] などのソフトを使う方法がある。本研究では、Stream Diffusion TD[23] という Stream Diffusion を Touch Designer で動作するように構築したパッケージを利用して、パラメータ設定をカスタマイズして実装している。重要なパラメータとして、タイムステップ・インデックス (Step schedule T index) は、ノイズ除去プロセスをどのような時間軸で実行するかを調整するものだが、一般的な数値である 30 以上に設定してしまうと、画質が安定してしまい、材料をそのまま認識してしまう。例えば、積み木であれば、積み木として認識される。また 20 以下に設定すると、構図や形状の認識が平面的になるため、25 前後を選択している。

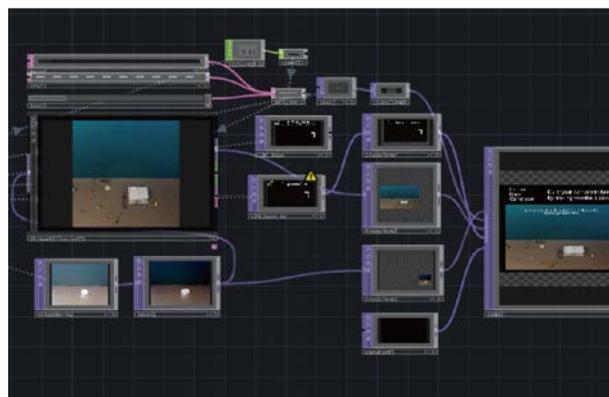


図 3 Touch Designer

生成結果は、ワークショップ会場の照明に影響することが大きく、カメラからの入力画像を見ながら、Brightness と Contrast, Black level を調整している。白飛びすることで、白い線が特定の物体として検出されて、生成結果に影響を与えるため、Brightness は 0.8 未満の低い値、Black level を会場の明るさに応じて白飛びが一切なくなるまで絞る調整をしている。Contrast は、Black level の調整によるトーンカーブの影響を考慮して、最終調整している。

3.2 ハードウェア

ハードウェアは、カメラと NVIDIA Graphic Board を搭載した PC が必要になる。GPU は、RTX3080 以下の場合には動作が安定しなかった。ディスプレイは、モニタかプロジェクタによる投影などの選択肢があるが、ワークショップ会場に合わせて比較的自由に設定した。ゲーミング PC のようにモニタが小さい場合でも、ユーザ調査は問題なく実施することができた。Toio ハードウェアは、5つ使用して、ユーザが自由にコントロールできる Javascript のソフトウェアを Web サイトとして公開した。

3.3 複合マテリアル

複合マテリアルとしては、木材や紙、糸、針金、粘土、3Dプリンタ造形物などを準備した。ユーザが初めに手に取るのは、ラッカスプレで着色した木材の積み木ブロックである。Ground color board は、反射が少ない茶色の紙などを設置した。背景となるボードは、白飛びを防ぐため、Black board になっている。黒以外の色の場合は、生成が安定しない場合がある。小型のポケットライトを照明として使用した。

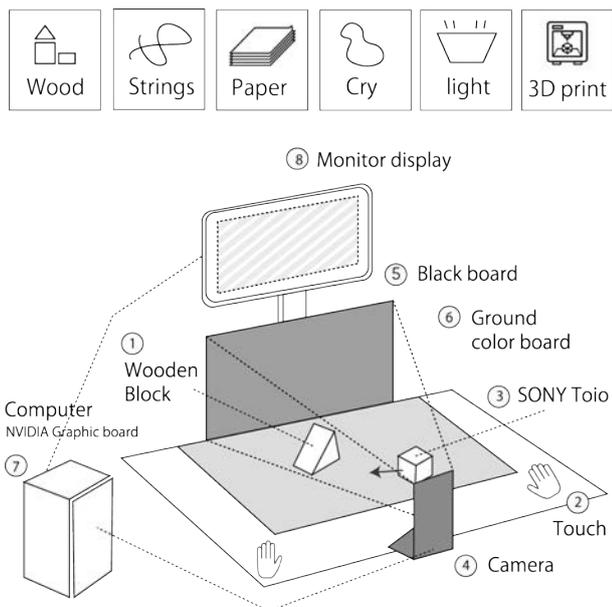


図 4 設置図

3.4 システムのウォークスル

初期的なユーザ調査として、月面基地を設計するワークショップを行っている。ユーザは、小中学生の子どもが多く、積極的に言語を話すことが得意ではない未就学児も対象となる。以下では、ユーザがこのワークショップを受けられる場合の操作について解説する。

STEP 1. ユーザは、その場にある複合マテリアルを使用して、カメラ映像を見ながら、さまざまなマテリアルを設置しながら、生成結果を実験する。カメラの位置などが直感的に理解できないユーザがいる場合は、調査員が無言で手をカメラ前に差し出すことで、9割以上のユーザがインタラクションの内容を理解することができた。

STEP 2. 一部の積極的なユーザは、木材の積み木ブロック以外の複合マテリアルを試してみることを主体的に行った。一方、半数近くのユーザは、積み木ブロックを上積み上げるだけの実験で終わることも多い。その場合、調査員が無言でポケットライトを逆光位置に置くことで、ユーザは生成結果の変化を体感する。変化の体感によって、多くのユーザがマテリアルとの試行錯誤を開始する。

STEP 3. 紙や粘土などのゼロベースのクリエイションを主体的に行うユーザは、クリエイタ経験のある一部のユーザのみであった。一方、調査員が、糸などを使って、浮遊する積み木を物理的に動かしてみせると多くのユーザが興味をもった。特に、糸と積み木ブロックの相性はよく、照明位置の変更と合わせて、さまざまな創作がみられた。

STEP 4. 特に、このシステムを気に入ったユーザらは、カメラの至近距離におけるレンズ効果に注目する。透明な3Dプリンタ造形物をカメラ前に置いたり、カメラ自体に工夫する創作があった。被写界深度を活かした前景、中景、背景の重なりを利用するトライアルをするユーザは多かった。

STEP 5. ユーザは気に入った配置で、Enter キーを押すことで、絵コンテのように状態を記録するシステムになっている。多くのユーザは1-2回程度 Enter キーを押した。ごく一部のユーザが5回以上 Enter キーを押した。Enter キーを押すことで、PCには自動で複数カメラからの入力映像と生成結果が保存される。生成結果は、Bluesky に n8n を通じて自動投稿され、img-to-text により、物語のテキストが自動生成される。一部のユーザは SNS で他者の作品のアイデアをみることで、別の実験を行う。ユーザは SNS を通じて、別の日のワークショップ会場で再来することができるほか、コメントを残すこともできる。

STEP 6. prompt に入力するテキストは、「宇宙基地」「夜の動物園」「京都駅の夜景」などの複数の候補をあらかじめ設定して、調査員によりキーで切替可能にしている。背景のボードは白飛び回避のため、黒いので、prompt に設定できるシチュエーションは限定される。

STEP 7. ユーザが動画生成 AI を用いたクリエイタの場合は、その後、詳しく介入セッションを行った。当システムを映像制作の観点からみた場合の課題などについて収集した。

3.5 初期的なユーザ調査の結果

月面基地の設計を通じた初期的なユーザ調査でえられた生成結果は以下である。木材の積み木のみを使ったユーザでは、色の違いに注目した建築の設計や黒を使うことにより Black board と同化させて空中浮遊させる事例が複数回みられた。調査員の糸などを使用した誘導によって、様々な複合マテリアルを使うことを検討した事例では、テープのような薄い素材や糸のような長い素材がブロック型のものとは異なる表現として注目された。特にクリエイティブ経験があるユーザ層では、折り紙の仕組みを使った高度な創作がみられた。調査員が照明位置を変えることで誘導を起こしたケースにおいては、光を当てる位置により、物体の表面のテクスチャが変わることに注目する事例がみられた。そのほかユーザ自身の持ち物をカメラの前に持つていくことに許可を取る事例も複数回みられた。同様に、ユー

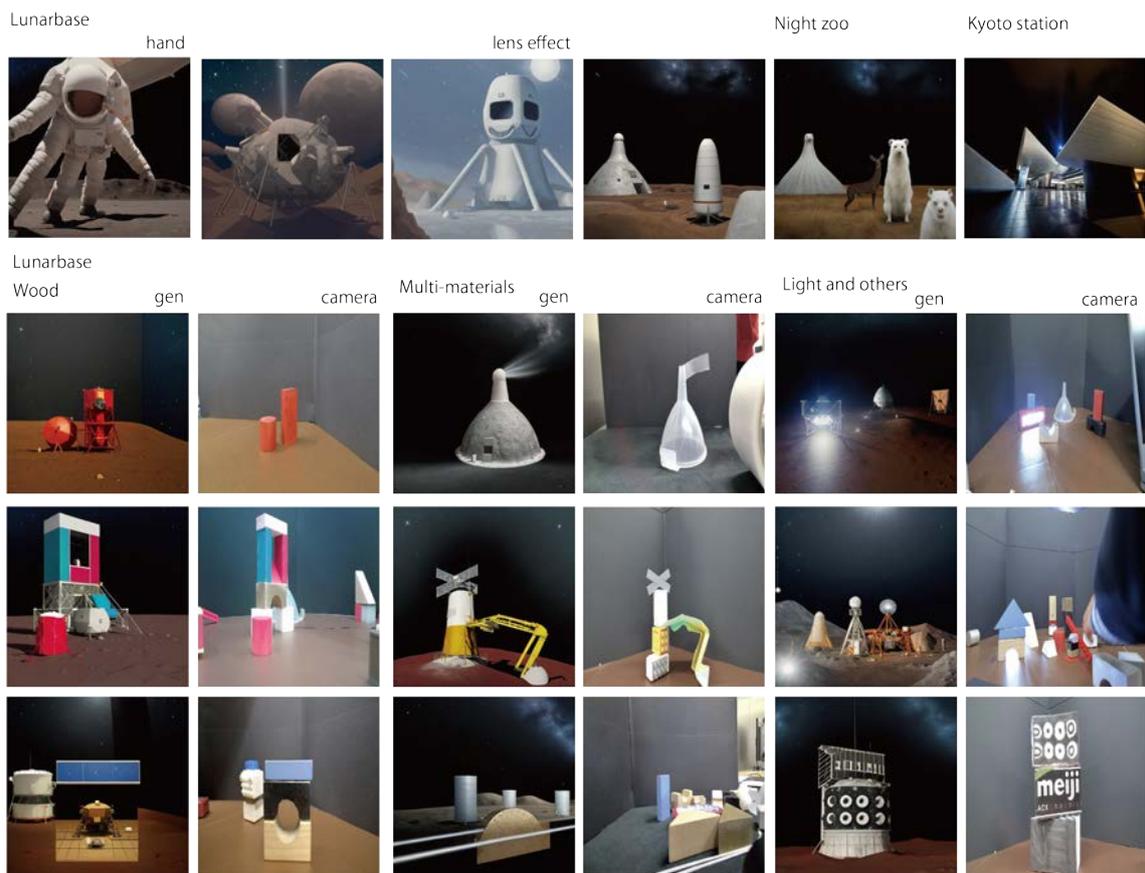


図 5 初期的なユーザ調査結果

ザ自身の身体をカメラ前に出して、生成 AI との相互作用を探索するユーザも多くみられた。夜の動物園や京都駅などの prompt では、ユーザは宇宙基地の場合と異なる形状意識でマテリアルと向き合っていることが観察された。

4. 想定される社会での応用可能性

4.1 映像制作現場

映像制作現場では、ロケハン前のプリプロダクションにおいて、制作部や演出部、俳優部、美術、撮影照明部などの各部の意思疎通を行うことがある。このシステムがあることで、撮影照明部は、演出上で想定されるカット割の確認やカメラと照明が逆光になる場合のフィルライトの要否など、事前準備をすることができる。美術は、カメラに映らない舞台セットをコスト削減できる可能性があり、動的な舞台セットの導入を提案できるチャンスを生む。特撮 CG については、撮影に入る前から CG 制作に取り組むことで、映像制作の納期を短縮できる可能性がある。俳優部は、演出や撮影がどのような意図でシーンを構成したいと考えているか、位置関係とともに理解できる可能性がある。キーとなるショットで絵コンテを切ることで、シナリオの再稿にも役に立つ可能性がある。

4.2 動的なデジタルサイネージ広告

複合マテリアルによるリアルタイムの画像生成変化は、広告表現として利用できる可能性がある。多くのデジタルサイネージ広告は、静止画を中心に運用されており、タッチ操作などの限定的なインタラクションしか実装されてこなかった。このシステムは、デジタルサイネージ広告の周りで、カメラによる位置情報を把握し、街のひとが物体の位置を変えることにより、動的に変化するデジタルサイネージ広告の応用例を実装できる可能性がある。

4.3 街作りのチームアイデア会議

建築や街作りのアイデア会議において、ビジュアルイメージを介したコミュニケーションは、議論を活性化させる可能性がある。特に、複合マテリアルを自由に用いて、将来像としての街のあり方を住民と検討するワークショップを開催することで、これまで議論が及ばなかった創造的なアイデアが出る可能性がある。

5. 議論と今後の展望

議論としては、Toio ハードウェアの活用と AI 生成物のディスプレイ方式がある。Toio ハードウェアの台数を増やして、XY 座標の位置情報やロボット衝突判定を活用すれば、もっと多様なインタラクションを実装できる可能性が

ある。また現在は、モニタかプロジェクタを使用しているが、より安定駆動するプロジェクション方式を検討していく。今後の展望として、前セクションに記載した社会実装による拡大を考えている。

参考文献

- [1] Wanli Qian, Chenfeng Gao, Anup Sathya, Ryo Suzuki, and Ken Nakagaki. Shape-it: Exploring text-to-shape-display for generative shape-changing behaviors with llms. In *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [2] Matthew Jeung, Anup Sathya, Wanli Qian, Steven Arellano, Luke Jimenez, and Ken Nakagaki. Shape n' swarm: Hands-on, shape-aware generative authoring with swarm ui and llms. In *Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [3] Sony Group Corporation. toio™: A new platform for creativity and play, 2024. Accessed: 2025-04-10.
- [4] Vivian Liu, Jo Vermeulen, George Fitzmaurice, and Justin Matejka. 3dall-e: Integrating text-to-image ai in 3d design workflows. In *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '23, p. 1955–1977, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [5] Hongbo Zhang, Pei Chen, Xuelong Xie, Chaoyi Lin, Lianyan Liu, Zhuoshu Li, Weitao You, and Lingyun Sun. Protodreamer: A mixed-prototype tool combining physical model and generative ai to support conceptual design. In *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [6] Inc. Autodesk. Fusion360, 2024. Accessed: 2025-04-10.
- [7] Akio Kodaira, Chenfeng Xu, Toshiki Hazama, Takanori Yoshimoto, Kohei Ohno, Shogo Mitsuhori, Soichi Sugano, Hanying Cho, Zhijian Liu, Masayoshi Tomizuka, and Kurt Keutzer. Streamdiffusion: A pipeline-level solution for real-time interactive generation, 2025.
- [8] Hiroki Kaimoto, Kyzyl Monteiro, Mehrad Faridan, Jiatong Li, Samin Farajian, Yasuaki Takehi, Ken Nakagaki, and Ryo Suzuki. Sketched reality: Sketching bi-directional interactions between virtual and physical worlds with ar and actuated tangible ui. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [9] Boyu Li, Linping Yuan, Zhe Yan, Qianxi Liu, Yulin Shen, and Zeyu Wang. Anicraft: Crafting everyday objects as physical proxies for prototyping 3d character animation in mixed reality. In *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [10] Kyung Yun Choi and Hiroshi Ishii. Therms-up!: Diy inflatables and interactive materials by upcycling wasted thermoplastic bags. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [11] Jiaji Li, Shuyue Feng, Maxine Perroni-Scharf, Yujia Liu, Emily Guan, Guanyun Wang, and Stefanie Mueller. Xstrings: 3d printing cable-driven mechanism for actuation, deformation, and manipulation. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [12] AUTOMATIC1111. Stable diffusion web ui, 2024. Accessed: 2025-04-10.
- [13] Yue Zhu, Zhiyuan Zhou, Jinlin Miao, Haipeng Mi, and Yijie Guo. Tangiblenegotiation: Probing design opportunities for integration of generative ai and swarm robotics for imagination cultivation in child art education. In *Companion of the 2024 on ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '24, p. 66–70, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [14] comfyanonymous. Comfyui, 2024. Accessed: 2025-04-10.
- [15] Zihan Yan, Chunxu Yang, Qihao Liang, and Xiang 'Anthony' Chen. Xcreation: A graph-based crossmodal generative creativity support tool. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [16] Xiaohan Peng, Janin Koch, and Wendy E. Mackay. Designprompt: Using multimodal interaction for design exploration with generative ai. In *Proceedings of the 2024 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '24, p. 804–818, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [17] Justin Matejka, Michael Glueck, Erin Bradner, Ali Hashemi, Tovi Grossman, and George Fitzmaurice. Dream lens: Exploration and visualization of large-scale generative design datasets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [18] Frederic Gmeiner, Humphrey Yang, Lining Yao, Kenneth Holstein, and Nikolas Martelaro. Exploring challenges and opportunities to support designers in learning to co-create with ai-based manufacturing design tools. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [19] Robert McNeel Associates. Rhino3d, 2024. Accessed: 2025-04-10.
- [20] Humphrey Yang, Kuanren Qian, Haolin Liu, Yuxuan Yu, Jianzhe Gu, Matthew McGehee, Yongjie Jessica Zhang, and Lining Yao. Simulearn: Fast and accurate simulator to support morphing materials design and workflows. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, p. 71–84, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [21] Simian Luo, Yiqin Tan, Suraj Patil, Daniel Gu, Patrick von Platen, Apolinário Passos, Longbo Huang, Jian Li, and Hang Zhao. Lcm-lora: A universal stable-diffusion acceleration module, 2023.
- [22] Derivative Inc. Touchdesigner, 2024. Accessed: 2025-04-10.
- [23] @dotssimulate. Stream diffusion2d, 2024. Accessed: 2025-04-10.