

可変抵抗にクリック感と重みを付与する外骨格機構の提案

塚田 浩二^{1,a)} 新山 大翔^{1,b)} 沖 真帆^{1,c)}

概要：3D プリンタで造形可能な物理的な機構のみを利用して、可変抵抗（スライダー型／ダイヤル型）に触覚的なフィードバックを与える手法を提案する。本提案の特徴は、「一般的な可変抵抗に容易に脱着できる」、「クリック感と重みを個別に付与できる」、「低価格な FDM 式 3D プリンターで手軽に造形できる」、「視覚的手掛かりの有無を切替できる」の四点である。本稿では、スライダー型／ダイヤル型の 2 種類の可変抵抗を対象に実装した外骨格機構を中心に報告する。

1. 背景

スライダー型やダイヤル型の可変抵抗は、電子工作における汎用的な入力装置として一般的であり、オーディオ機器を中心とした家電製品にも幅広く利用されている。こうした可変抵抗の中には、クリック感等の触覚的な操作感を付与できるものがある。例えば、ダイヤル型では、デテントボリュームのように一定の間隔でクリック感を備えるものや、ストッパー付カバーのような摩擦で回転を抑止するストッパーを備えるものが存在する。こうした物理的な操作感を付与することは、操作を快適にしたり、過去のパラメーターを再現する際の手がかりとして有用である。一方、状況に応じて適したクリック間隔等は異なる可能性があり、既存の部品ではユーザが柔軟に調整することは困難であった。

そこで、本研究では、市販のスライダー型／ダイヤル型の可変抵抗に対して、クリック感と重みを個別に付与可能な外骨格機構を提案する（図 1）。

2. 関連研究

「機能を付与する機構設計」「3D プリンターを用いた制作支援」の観点から、関連研究事例を紹介する。

2.1 機能を付与する機構設計

独自の機能を持つ構造物や機構、およびその設計手法に関する研究が行われている。Ion らは、フレキシブル樹脂フィラメントを用いて 3D プリンターで造形したセル構造を持つオブジェクトを変形させることにより、ドアのロッ

ク機構やスイッチなどの作動機構 [1] や、圧力をかけることで変形し造形物の表面の質感を変化させる機構 [2] を作成している。新山らは、熱溶解積層方式（以下、FDM 方式）の 3D プリンターでの出力に適したジョイント機構 [3] や一体造形手法 [4] を提案した。Ogata は、永久磁石を用いた触力覚提示手法を提案し、応用例として触覚フィードバックを持つスライダーやダイヤル等の物理的なインタフェースを構築できることを示した [5]。Chang らは、切り紙や折り紙の構造をもとにして、触覚フィードバックをカスタマイズ可能な紙製ボタンの設計手法を提案した [6]。

本研究では、電子工作で多用される可変抵抗に対し、後から触覚フィードバックを付与するための外骨格機構を提案する。

2.2 3D プリンターを用いた制作支援

3D プリンターやその材料の特性を活かした制作支援に関する研究が行われている。高橋らは、3D プリンターの造形パラメータを制御するソフトウェアを開発し、造形物の表面に任意の模様を描画したり、複雑な質感や毛構造等を造形する手法を構築した [7][8]。本研究では、FDM 方式

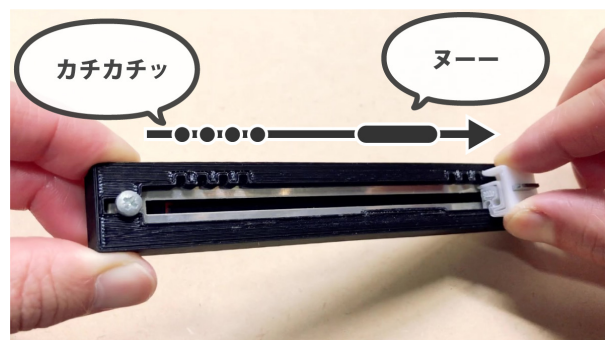


図 1 本研究のコンセプト

¹ 公立はこだて未来大学

a) tsuka@acm.org

b) niyama@fun.ac.jp

c) oki@fun.ac.jp

の 3D プリンターで造形することを前提とし、樹脂の弾性を活用した機構設計を行っている。FDM 方式の 3D プリンターで造形を行うと、サポートと呼ばれる補助パーツが生成される。これは造形物の形状を維持するために必要だが、除去に手間がかかるデメリットがある。そのため、少ないサポートで造形する手法 [10] や、ロボットアームで造形土台を動かすことでサポート無しで造形するシステム [9] が提案されている。Zhang ら [11] は、サポートを除去した際の残留物が造形物の美観を損ねる点に着目し、知覚的に重要な領域（例：顔）にサポートが配置されない印刷方向を決める手法やアルゴリズムを構築した。本研究においても、サポートの残留物があると機構のかみ合わせやクリック感に影響が及ぶため、サポート発生量を極力抑える形状になるよう配慮した。

3. 提案

本研究では、市販の可変抵抗に対して、クリック感と重みを個別に付与可能な外骨格機構を提案する。本章では、本研究のコンセプトと設計事例について紹介する。

3.1 コンセプト

本研究のコンセプトは、以下の 4 点である。

- 市販の可変抵抗に容易に脱着。
- 指定範囲にクリック感／重みを個別に付与。
- FDM 式 3D プリンターで手軽に造形。
- 視覚的手掛かりを任意に切替

1 点目は、市販の可変抵抗（スライダー型／ダイヤル型）に容易に取り付け／取り外し可能な外骨格機構を持つことである。可変抵抗の形状や抵抗値を用途に応じて選択することができる。

2 点目は、可変抵抗の指定範囲にクリック感／重みを個別に付与して設計できる点である。ここで、クリック感は、「カチッ」という明瞭な音と触覚フィードバックを、重みはスライダーなどの動作が「ヌッ」と重くなる触覚フィードバックを指す。詳細については、設計事例で述べる。

3 点目は、安価なシングルヘッドの FDM 式 3D プリンターで造形できる点である。各部品をサポート材がほぼ不要な形状で設計することで、手軽に造形できるように配慮する。

4 点目は、フィードバックのある箇所に対して視覚的手掛かり（目印）の有無を切り替えて造形できることである。クリック感／重みのフィードバックを外観には影響しない方法で実現することで、視覚的手掛かりが必要な場合／不要な場合の双方に対応できるように配慮している。

3.2 設計事例

提案機構の機能を把握しやすいように、スライダー型／ダイヤル型の設計事例を紹介する。

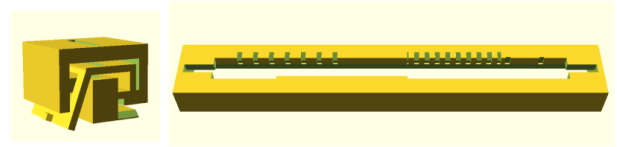


図 2 スライダー型外骨格機構の構成パーツ（左：ノブ部品、右：フレーム部品）

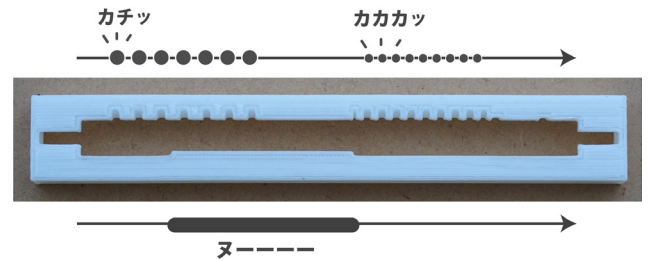


図 3 スライダー型外骨格機構の触覚例

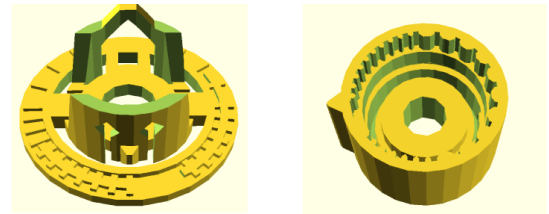


図 4 ダイヤル型外骨格機構の構成パーツ（左：土台部品、右：カバー部品）

スライダー型機構は、ノブ部品とフレーム部品から構成される（図 2）。詳細な構造は実装にて述べるが、ノブ部品はクリック感と重みを生み出すバネ機構を備え、フレーム部品はそれらの発生個所を調整する。図 3 にスライダー型機構のフレーム部品の造形例を示す。フレーム内部の上側でクリック感、下側で重みを表現する。機構をスライダーに取り付けてノブを左から右に動かすと、最初に「カチッカチッ」という強いクリック感が発生し、次に「ヌッ」とノブの動きが重くなる。さらに、中央を跨ぐと、「カッカッカッ」といった連続的なクリック感を発生する。

ダイヤル型機構は、土台部品とカバー部品から構成される（図 4）。こちらも詳細は後述するが、土台部品はクリック感を生み出す機構を備え、カバー部品は重みを発生する環状のバネ機構を備えつつ、クリック感と重みの発生個所を調整する。図 5 にダイヤル型機構の土台部品／カバー部品を可変抵抗に取り付けた例を示す。可変抵抗の軸を 12 時位置から時計回りに回すと、最初は「ヌー」と軸が重い状態で回り、次に「カチッカチッ」という強いクリック感が発生し、7 時方向を過ぎると「カッカッカッ」という連続的なクリック感を発生する。

4. 実装

ここでは、スライダー型／ダイヤル型の可変抵抗に取り付ける外骨格機構の実装について述べる。全ての部品は

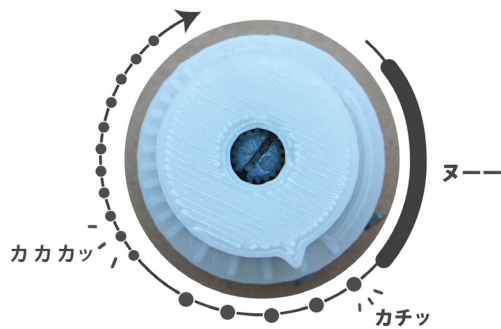


図 5 ダイアル型外骨格機構の触覚例

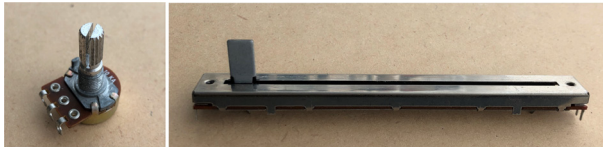


図 6 実装に用いた可変抵抗。(ダイアル型/スライダー型)

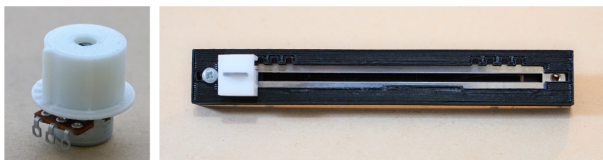


図 7 可変抵抗に外骨格機構を装着した例。(ダイアル型/スライダー型)

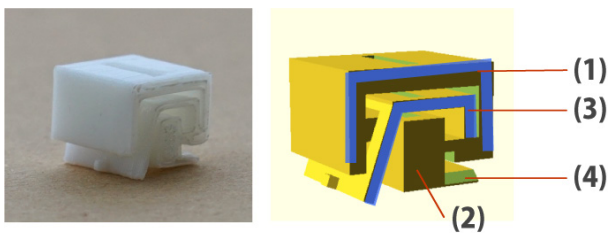


図 8 スライダー:ノブ部品の構造

OpenScad を用いて設計／実装した．使用した可変抵抗を図 6 に，各可変抵抗に外骨格機構を装着した例を図 7 に示す．

4.1 スライダー型

スライダー型の外骨格機構は，ノブに固定する部品（ノブ部品）とスライダーの外装に固定する部品（フレーム部品）の二点から構成される（図 8，図 9）．

4.1.1 ノブ部品

ノブ部品は，クリック感と重みを生み出すバネ機構を備える．ノブ部品の構造は，(1) ユーザが把持する外装部に加えて，(2) ノブを保持するための固定部，(3) クリック感を出すための板バネ部，(4) 摩擦を出すためのガイド部を中心に構成される（図 8）．

板バネ部は，外装部の内側に沿うように配置しており，先端に突起部を備えている．この突起部がフレーム側の窪みとかみ合うことでクリック感を生む．板バネの傾斜を 0

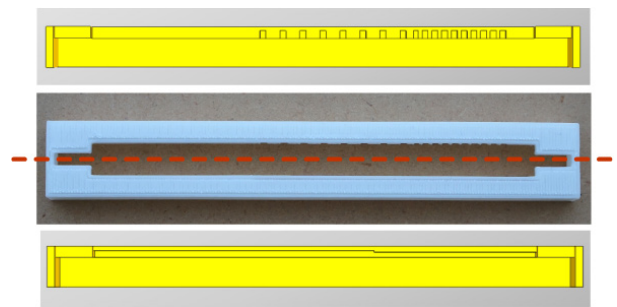


図 9 スライダー:フレーム部品の内部構造

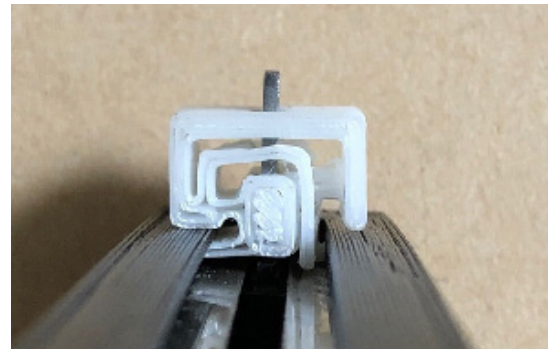


図 10 スライダーに装着したノブ部品の側面図．

度から 20 度まで変化させることで，クリック感の強さを調整することができる．

固定部は，外装部と板バネ部の中央の矩形の穴を通して，スライダーのノブを差し込んで固定する．外装部と板バネ部の穴の位置を少しずらすことで，ノブを通す際に板バネが少し引っ張られて抜けにくくなるように配慮した（図 10）．

ガイド部は，摩擦を出すために必要となるばね機構を省スペースで実現するために，固定部を中心とした板バネ機構として実装した．ガイド部の先端は，摩擦範囲への進入時の引っ掛かりを抑えるために，45 度程度の傾斜をつけている．また，過度な力を固定部と外装部を結ぶ細い箇所から逃がすことで，固定部の破損を避けるよう配慮した．

最後に，これらの部品は原則二次元図形から押し出した形状とすることで，サポート材無しでも安定して出力できるように工夫した．

4.1.2 フレーム部品

フレーム部品は可動部を持たず，ツールの設定に応じてフレーム内側の構造を調整・造形することで，クリック感と重みの発生個所を指定する（図 9）．

クリック感は，フレーム内側に任意の間隔で設けた窪みが，ノブ部品の板バネの突起とかみ合うことで発生する（図 9 上）．重みは，フレーム内側（窪みの逆側）に設けたふくらみが，ノブ部品のガイド部を押し込むことで発生する（図 9 下）．なお，クリック感／重みは同時に発生させることができる．

さらに，ツールの設定に応じて，クリック感／重みの発

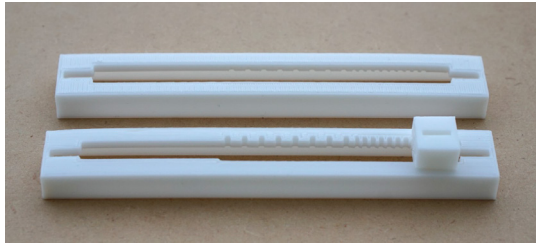


図 11 スライダー:フレーム部品の視覚的手がかりが有る例（下）と無い例（上）。

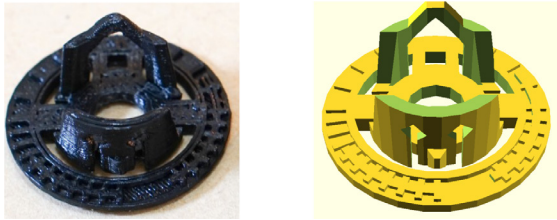


図 12 ダイアル:土台部品の構造

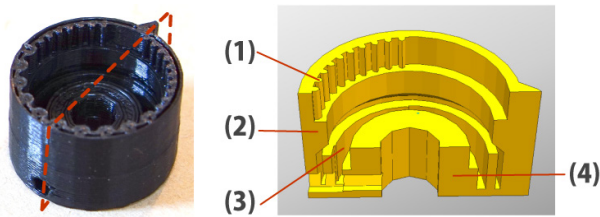


図 13 ダイアル:カバー部品の内部構造

生個所のフレーム表面に窪みをつけて、視覚的手掛かりを付加することができる（図 11）。フィードバック自体はフレーム内側の下側（外観に影響しない位置）で発生させており、任意に視覚的手がかりの有無を選択できる点が特徴である。

また、フレーム部品はスライダーに被せてからネジ止めで固定する仕様とした。フレーム部品自体の幅／長さもツールで設定可能であり、汎用的なスライダーに適用できるように配慮した。

最後に、フレーム部品は上下逆にして出力することで、サポート材無しでも安定して出力できるように工夫した。

4.2 ダイアル型

ダイアル型の外骨格機構は、可変抵抗の土台に取り付ける部品（土台部品）と、軸に付ける部品（カバー部品）の二点から構成される（図 12、図 13）。

4.2.1 土台部品

土台部品は、クリック感を生み出すトーションスプリング（ねじれ）的な機構を備える。土台部品は、視覚的手がかりを提示する外周部、可変抵抗を固定する中央部、クリック感を発生させるトーションスプリング部、及び上側に高く伸びた摩擦突起部から構成される（図 12）。

トーションスプリング部は半円状の壁にスリットを刻ん

でトーションバーの役割を持たせ、先端にクリック感を出すための台形の突起部を配置した。ダイヤルを回転させて突起部に力がかかると、トーションバー部が奥方向にねじれるように動作して力を適度に逃がすことで、部品の強度を高めつつ、突起部の摩耗を抑えることができる^{*1}。なお、スリットの溝の長さによってクリック感の強さを調整できる。

摩擦突起部は、半円状の壁の上部に三角形の突起を設けた。カバー部品内の環状のばねを押し込むことで、重みを発生させる。突起部を三角形にすることで、摩擦熱を抑えつつ意図した位置に摩擦（重み）を発生させることができるよう配慮した。また、先端が細いことから、最初の部品取り付け時にカバー部品と干渉しにくく、スムーズに組み込むことができる。なお、トーションスプリング部と摩擦突起部の備える半円状の壁は、可変抵抗の軸が長い（カバー部品を固定する位置が高い）場合に、根元がぐらつかないようにガイドとして使えるように設計した。

中央部には、可変抵抗を固定するための軸穴と、回転防止用の機構を用意した。回転防止機構は可変抵抗の固定方法により異なるため、可変抵抗の突起をはめ込む穴と、可変抵抗の溝にはめ込むための突起の両方を配置した。

外周部では、クリック感／重みの視覚的手掛かりを任意に付加することができる。クリック感は放射状の線、重みは環状の線として表現され、可変抵抗の回転時に干渉しないように配慮した。ただし、スライダー機構と異なり実際のフィードバックの発生個所はカバー部で決定されるため、最初に位置合わせを行う必要がある。

最後に、土台部品は 3D プリンタでの出力時にサポート材ができるだけ付かないように傾斜を多用して設計した。一方、トーションスプリング部の突起下部等にわずかにサポート材が付着するため、この部品のみ除去作業が必要である。

4.2.2 カバー部品

カバー部品は、重みを生み出す環状のバネ機構を備え、ツールの設定に応じてクリック感と重みの発生個所を調整する。カバー部品は、(1) 任意の間隔でクリック感を提示する溝部、(2) 可変抵抗の軸プレを抑えるためのガイド受け部、(3) 摩擦力を出すための環状のバネ部、(4) 可変抵抗の軸受け部、から構成される（図 13）。

(1) の溝部は、安価な FDM 式の 3D プリンターでは溝の先端形状が安定しにくいとため、先端を太くして側面の傾斜によって突起部を保持するように工夫した。

(3) のバネ部は、土台部品に設けた摩擦突起部が間に入り込んで押し広げることで摩擦を発生させる。部分的に厚みを調整することで摩擦を調整できるが、0.1mm 程度の単

^{*1} 当初は板バネを用いて設計したが、3D プリンターで（サポート材をできるだけつけずに）出力する際の積層方向の問題等から耐久性が低かったため本文のように改良した。

位で知覚可能な変化が起こるため、微調整は難しい。

(4) 軸受け部は、可変抵抗の回転軸を差し込んで固定する。円状／半円状の軸に対応しており、M3 のネジを横から留めることで強固に固定することもできる。

最後に、カバー部品は筒状の形状でサポート材の除去が難しいため、サポート材無しで造形できるように傾斜等を工夫して設計した。

5. 議論

ここでは、クリック感と重みの機能性について議論する。

スライダー／ダイヤルの操作に対してクリック感を与えることで、「一定間隔での離散的な操作」や「前回の入力の再現」が容易になる。例えば、10～20 段階程度の離散的な数値入力を行ったり、クリック数を頼りに前回のパラメーター（例えばエアコンの温度）の再現を行うことに適すると考える。一方、クリック感を付与することでスライダーの連続的な操作性に制約を与えてしまう問題があるが、本提案では外骨格型の機構で脱着／交換を容易とすることで、この制限を抑えるよう配慮している。

次に、スライダー／ダイヤルの操作に対して重みを与えることで、「正確に入力すべき範囲」や「限界範囲」を指定できる。例えば、オーディオ機器でよく利用する音量付近だけダイヤルを重くすることで微調整を容易にしたり、逆に一定以上の音量に上げてくくして耳を保護したりといった用途に活用できる可能性がある。

また、直接的な機能性とは異なるが、明瞭なクリック感は心地よい操作性に、重みのあるスライダーは高級感のある操作性等、主観的な操作感の向上に繋がる可能性もあると考える。

6. まとめと展望

本稿では、市販のスライダー型／ダイヤル型の可変抵抗に対して、クリック感と重みを個別に付与可能な外骨格機構を提案／試作した。

今後は、オーディオ機器や家電機器の操作等を事例とした応用例を実装する。また、クリック感／重みのそれぞれについて、造形可能な最小間隔やフィードバックの強さ、耐久性等を調査する。さらに、複数のスライサー／3D プリンターでの造形テストを通して、広くプロトタイピングに利用可能なツールとして整備していきたい。

謝辞 本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofer, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, and Patrick Baudisch. Metamaterial Mechanisms. In Proceedings of UIST '16, pp.529-539. 2016.
- [2] Alexandra Ion, Robert Kovacs, Oliver S. Schneider, Pedro Lopes, and Patrick Baudisch. Metamaterial Textures. In Proceedings of CHI '18. Paper 336, 12 pages, 2018.
- [3] 新山 大翔, 沖 真帆, 塚田 浩二. 3D プリンターの特性に配慮した汎用ジョイント機構の提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2016 論文集, pp.252-258, Nov, 2016.
- [4] 新山 大翔, 沖 真帆, 塚田 浩二. 3D プリンターによる一体造形式回転機構の提案, WISS2019 論文集, pp.31-36, 2019.
- [5] Masa Ogata. Magneto-Haptics: Embedding Magnetic Force Feedback for Physical Interactions. In Proceedings of UIST '18. pp.737-743, 2018.
- [6] Zekun Chang, Tung D. Ta, Koya Narumi, Heeju Kim, Fuminori Okuya, Dongchi Li, Kunihiro Kato, Jie Qi, Yoshinobu Miyamoto, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara. Kirigami Haptic Swatches: Design Methods for Cut-and-Fold Haptic Feedback Mechanisms. In Proceedings of CHI '20. pp.1-12, 2020.
- [7] 高橋治輝, 宮下芳明. 熱溶解積層方式 3D プリンタを用いた表現と造形手法のデザインのためのパラメータ探索手法, インタラクション 2018 論文集, pp.135-144, 2018.
- [8] Haruki Takahashi and Homei Miyashita. Expressive Fused Deposition Modeling by Controlling Extruder Height and Extrusion Amount. In Proceedings of CHI 2017, pp.5065-5074, 2017.
- [9] Chengkai Dai, Charlie C. L. Wang, Chenming Wu, Sylvain Lefebvre, Guoxin Fang, and Yong-Jin Liu. Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 1, 13 pages, 2018.
- [10] Vanek, Juraj, Jorge A. Garcia Galicia, and Bedrich Benes. Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. Computer graphics forum. Vol. 33. No. 5. 2014.
- [11] Xiaoting Zhang, Xinyi Le, Athina Panotopoulou, Emily Whiting, and Charlie C. L. Wang. Perceptual models of preference in 3D printing direction. ACM Trans. Graph. 34, 6, Article 215, 12 pages. 2015.