

HaPresense : 振動の時間差で空間境界を表現する VR 触覚デバイス

坂倉琢徒^{†1} 松河剛司^{†1}

概要 : VR 空間における環境情報の提示, 特に風や不可視の空間領域 (結界等) の表現は, 体験の没入感を高める上で重要である. しかし, 従来の物理的な送風機を用いる手法は装置が大型化しやすく, 設置環境に制約があった. そこで本研究では, M5StickC と複数の小型振動ユニットを用いた軽量のウェアラブルハプティクスシステム「HaPresense」を提案する. 本手法は, 身体に装着した複数の振動源に対し, 駆動タイミングを同期, あるいは時間的な位相差を与えて制御することで, ファントムセンセーションや仮現運動を生起させるものである. これにより, 物理的な気流や壁が存在しない状況下でも, 振動の時空間的なパターンによって「領域境界の通過」といった連続的な空間知覚を擬似的に提示する. プロトタイプを用いた検証の結果, 振動パターンの制御により境界認識が可能であることが示唆され, 省スペースかつ安価な環境提示手法としての有効性を示した.

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 技術の急速な普及に伴い, ユーザは視覚や聴覚を通じて, あたかも仮想空間内に自身が存在するかのような体験が可能となった. 現実の身体運動に追従して視聴覚情報が変化することで生じるこの感覚は「没入感」や「実在感 (Presence)」と呼ばれ, ゲームやエンターテインメント, 訓練シミュレーションにおいて, 体験の質を決定づける重要な要素となっている. より高度な没入感を実現するためには, 視覚と聴覚に加え, 触覚への刺激提示が不可欠である. VR 空間における触覚提示の役割は, 大きく二つに分類できる. 一つは, 風や水流といった現実世界に存在する物理現象の再現であり, もう一つは, ゲームやアニメーション作品における「領域の境界 (結界)」や「オーラ」のような, 物理的には存在しない仮想的な空間情報の提示である. 前者の風覚提示に関しては, 送風機を用いた手法が一般的であるが, 装置の大型化や設置場所の制約が課題となる. 後者の非実在的な空間情報の提示に関しては, 視覚エフェクトに依存する場合が多く, 身体的な実感を伴う提示手法は確立されていない.

これらの感覚提示における共通の課題は, 情報の空間的な広がりや連続性をいかに表現するかにある. 既存の VR システムで一般的なハンドコントローラによる振動提示は, 手元の局所的な「点」の刺激に留まり, 風が身体を撫でる感覚や, 身体全体で領域を通過する際の「面」の刺激を表現することは困難である. 皮膚上の機械受容器は, 時空間的に制御された複数の振動刺激に対して, 実際には刺激源がない位置に感覚を知覚する (ファントムセンセーション) などの特性を持つことが知られている. これを利用すれば, 物理的な送風や壁が存在しなくとも, 振動パターンの制御によって環境情報を身体に提示できると考えた.

そこで本研究では, マイクロコンピュータと複数の小型振動ユニットを用いたウェアラブルデバイス, およびゲームエンジン Unity 上で動作する VR アプリケーションによ

る連携システム「HaPresense」を提案する. 本システムは, 身体に配置した複数の振動源の駆動タイミングを同期, あるいは時間的にずらして制御することで, 空間領域の境界といった「面」的な触覚情報を, 擬似的に生成・提示することを目的とする.

2. 関連研究

本章では, 本研究の背景となる VR 空間における触覚提示技術, 風覚提示に関する従来研究, およびウェアラブルデバイスを用いた触覚フィードバックの動向について述べる.

2.1 VR における触覚フィードバック技術

VR システムにおいて, 視覚と聴覚に次ぐ第三の要素として触覚 (Haptics) の重要性が高まっている. 触覚フィードバックは, ユーザと仮想物体とのインタラクションをより現実的なものにし, 没入感を向上させるために不可欠である. 触覚提示技術は, 皮膚の機械受容器を刺激する手法によって分類される. 主な手法として, 空気圧やモータを用いる機械的振動, 皮膚に電流を流す電気刺激, 誘電エラストマーアクチュエータなどが挙げられる. 中でも機械的振動を用いたフィードバックは, 安全性や制御の容易さから広く普及している. 例えば, Yu ら[1]は皮膚に追従する柔軟な無線振動インタフェースを開発し, プログラム可能な振動パターンによって, ソーシャルメディアでのインタラクションや義手のフィードバックとして活用できることを示している. 本研究でも, システム構成の簡便さと装着性の観点から, 機械的振動 (小型振動モータ) を用いた手法を採用する.

2.2 物理的な風源を用いた風覚提示

VR 空間内の環境情報として「風」を提示する試みは数多く行われている. これらは主に, ファンやエアコンプレッサーを用いて物理的な気流を生成する手法である. 鈴木ら[2]は, ユーザの周囲に配置した気流ディスプレイを用いて, VR 空間での巡回移動に合わせて風を提示することで, VR

^{†1} 愛知工業大学大学院経営情報科学研究科

酔いが軽減され、旋回感覚（ベクション）が増強されることを報告している。また、Ito ら[3]は「AlteredWind」において、視覚刺激（流れる粒子）と聴覚刺激（立体音響）を物理的な風と組み合わせるクロスモーダル効果により、限られた数のファンで多様な風向を知覚させる手法を提案している。ウェアラブルなアプローチとしては、Sun ら[4]が手首に装着したノズルの向きをサーボモータで制御し、エアポンプからの空気を当てることで、3次元的な方向性を持つ気流感を提示するデバイスを開発している。しかし、これらの物理的な送風を用いる手法は、装置が大型化しやすく、静音性や消費電力、可搬性の面で課題が残る。特に、ユーザが自由に動き回るルームスケール VR においては、設置型のファンでは局所的な風の表現が難しく、ウェアラブルな送風装置ではエアチューブやポンプの取り回しがユーザの動作を阻害する可能性がある。

2.3 振動刺激による環境・境界情報の提示

振動刺激を用いて風や空間情報を代替的に提示するアプローチも検討されている。人間の皮膚には、パチニ小体（FA-II）などの振動を検知する機械受容器が存在し、これらを適切に刺激することで、擬似的な触覚を生起させることが可能である[1]。振動刺激の時空間的なパターン制御は、実際には刺激源がない位置に感覚を知覚させるファントムセンセーションや、刺激が皮膚上を移動しているように感じる仮現運動を引き起こすことが知られている。Lee ら[5]は、空気圧を用いた非接触の触覚ディスプレイにおいて、2次元的な気流パターンが情報の伝達に有効であることを示唆している。また、VR空間における「領域」や「境界」の認識に関しては、壁や物体への接触時の反力提示が一般的であるが、本研究が対象とするような「風が吹き抜ける感覚」や「不可視の領域（結界など）を通過する感覚」といった、流体的かつ空間的な広がりのある事象を、複数の振動モータの同期制御によって表現する試みは、物理的な送風装置を代替する新たな環境提示手法として有用であると考えられる。

本研究では、これらの知見を踏まえ、M5StickCと複数の小型振動ユニットを用いた軽量なウェアラブルシステムにより、物理的な風源を用いずに、振動のタイミング制御（位相差）によって風の流れや空間領域の境界を認識させる手法を提案する。

3. HaPresence

本章では、提案システム「HaPresence」の実装詳細について述べる。本システムは、ユーザのアバタを制御し、仮想物体との接触判定を行い、対応するデバイスの情報を送信する「VRアプリケーション」と、情報を受信し、触覚提示を行う「ウェアラブルデバイス」の2つの主要素から構成される。第1節では、まずVRアプリケーションの実装について述べ、第2節でウェアラブルデバイスのハードウエ

ア構成および制御プログラムの実装について詳述する。

3.1 VRアプリケーションの実装

本節では、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）およびコントローラのトラッキング情報に基づき、ユーザのアバタを制御し、仮想物体との接触判定を行って振動制御信号を生成・送信するVRアプリケーションの開発環境およびプログラムの詳細について述べる。

(1) 開発環境とアバタの制御

VRアプリケーションの開発には、ゲームエンジンであるUnityを使用した。HMDおよびハンドコントローラの位置・回転情報の取得には、UnityのパッケージであるXR Interaction Toolkit (XR Origin/XR Rig)を使用した。仮想空間上においてユーザの身体となる人型3Dモデルには、VRoid Studioで作成したVRM形式のモデルを採用した。VRMは人型アバタのフォーマットとして定義されており、汎用性が高く取り扱いが容易であるため採用した。なお、Unityへの取り込みにはUniVRMを使用した。アバタの動作生成においては、HMDとコントローラ（3点トラッキング）の位置情報から全身の姿勢を推定するために、IK（インバースキネマティクス）技術を用いた。IKの実装にはAnimation Riggingパッケージを使用し、ユーザの現実の身体の動きにアバタを自然に追従させる処理を行っている。

(2) 接触判定と振動データの生成

風や境界の知覚に必要な振動刺激を生成するため、アバタの体表面には、振動対象オブジェクトとの接触を判定するための「マーカーオブジェクト（以下、マーカー）」を配置した。図1にマーカーオブジェクトを装着したアバタの様子を示す。マーカーは現実の振動モータと同程度の大きさを持つ箱型のコライダーであり、各マーカーには個別の識別番号（1,2,3,4,...）と、送信用の制御値として2のべき乗の値（ $2^0, 2^1, 2^2, \dots$ すなわち 1,2,4,8,...）が割り振られている。接触判定のロジックは以下の通りである。マーカーがVR空間内の振動対象オブジェクト（境界壁など）に接触すると、送信データとなる変数に対し、当該マーカーの値を加算する。反対に、マーカーが対象から離れると、その値を減算する。これにより、複数の箇所が同時に接触している場合でも、ビットフラグ形式で複数の振動部位の状態を単一の整数値として管理することが可能となる。図2に振動対象オブジェクトを通過する様子を示す。

(3) データ管理と通信処理

多数のマーカーを効率的に管理するため、UnityのScriptableObject (CreateAssetMenu属性)を利用したデータベース構造を構築した。各マーカーのプレハブ（3Dモデルやスクリプトを含むテンプレート）と、割り当てられた制御値を定義するクラスを作成し、これらをリスト形式で保持するデータアセットとして管理している。これにより、マーカーの追加やパラメータの調整をインスペクター上で視覚的に行うことが可能となった。ウェアラブルデバイス

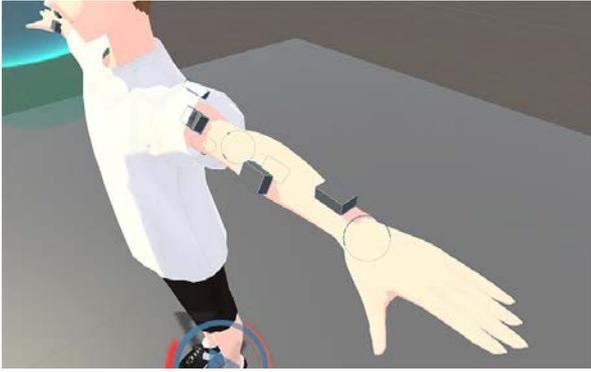


図1 マーカーオブジェクトを装着したアバタの様子



図2 振動対象オブジェクト（図中オレンジ色）を通過する様子

へのデータ送信には UDP 通信を採用した。事前に登録したホスト名に対し、毎フレーム、生成された送信値を送信し続ける仕様とした。また、実験における条件統制（モータの個数や配置による知覚の変化の検証）を容易にするため、各マーカーの稼働・非稼働をキー入力によって動的に切り替えられるデバッグ機能を実装した。ブール値のリストにより各マーカーの有効状態を管理し、無効化されたマーカーは接触判定を行わない仕組みとなっている。

3.2 ウェアラブルデバイスの実装

本節では、VR アプリケーションから情報を受信し、ユーザに触覚刺激を提示するウェアラブルデバイスのハードウェア構成および制御プログラムについて述べる。

3.2.1 ハードウェア構成

ウェアラブルデバイスは上半身（腕および胴体）への装着を想定して設計した。振動刺激の生成には、制御用マイコンとして「M5StickC Plus2」を、アクチュエータとして小型の DC モータを採用した。身体部位ごとのユニット構成は以下の通りである。図3に腕部ユニット、胴体ユニットを示す。

- ・腕部ユニット: 左右の腕に各 1 セット装着する。各ユニットはマイコン 1 基、I2C ハブ (PbHub)、および複数の DC モータ (最大 6 個) で構成される。
- ・胴体ユニット: 胸部および背部に各 1 セット装着する。

各ユニットはマイコン 1 基と振動モジュール (Vibration HAT) で構成される。

各コンポーネントを固定するマウントは 3D プリンタを用いて製作した。マウント底面には面ファスナー (フック面) を貼付しており、全面が面ファスナー (ループ面) で構成された市販のモーションキャプチャ用スーツと組み合わせることで、振動ユニットの配置や個数を自由に変更可能な仕様とした。これにより、提示したい感覚の解像度や身体のサイズに合わせた柔軟なレイアウトが可能である。図4に装着の様子を示す。

3.2.2 制御プログラムの実装

マイコンのファームウェア開発には Arduino IDE を使用した。各マイコンは Wi-Fi 経由で常に UDP パケットを監視し、VR アプリケーションから送信される制御値に基づいてモータを駆動させる。

(1) ネットワーク設定と保守性

運用時の利便性を高めるため、Wi-Fi の SSID やパスワード等の接続情報は、コードへのハードコーディングではなく、Preferences ライブラリを用いてマイコンの不揮発性メモリ (NVS) に保存する仕様とした。これにより、接続先ネットワークが変更となった場合でも、設定用プログラムを介して情報の書き換えが可能であり、プログラム全体の可読性と保守性を向上させた。また、各デバイスの IP アドレス管理の煩雑さを避けるため、mDNS (Multicast DNS) および LLMNR (Link-Local Multicast Name Resolution) を用いてホスト名による名前解決を実装した。これにより、DHCP 環境下で IP アドレスが変動しても、事前に設定したホスト名 (例: device_left_arm 等) に基づいて通信が可能となっている。

(2) 振動制御ロジック

Unity 側からは、全振動モータの ON/OFF 状態を集約した short 型 (16 ビット整数) の値がブロードキャスト送信される。各デバイスは受信した値を以下のビット演算アルゴリズムを用いて解析し、自身の担当するモータの駆動を決定する。

1. デバイス識別: 事前に登録されたホスト名リストと自身のホスト名を照合し、自身がシステム全体で何番目のデバイスか (デバイス ID) を特定する。
2. ビットシフトとマスキング: 受信したデータに対し、「デバイス ID × 最大モータ個数」分のビット右シフト演算を行う。シフト後の最下位ビット (LSB) と 1 との論理積 (AND 演算) をとることで、対象モータの ON/OFF 状態を判定する。
3. PWM 制御: 判定結果が ON であれば、PbHub を介して PWM 信号を出力し、モータを振動させる。その後、データをさらに 1 ビット右シフトし、同様の判定を接続されたモータの個数分繰り返す。

この処理により、単一の整数データ送信のみで、複数の

デバイスにまたがる多数の振動モータの同期制御を低遅延で実現している。

4. 考察と今後の展望

本章では、実装したシステム「HaPresense」の動作検証に基づく使用感の評価、および提案手法の有効性に関する考察を述べる。また、現状のシステムにおける課題と、将来的な展望について議論する。

4.1 システムの動作検証と使用感一般的な注意事項

第3章で述べたシステム構成に基づき、装着者の腕および胴体に対して振動刺激を提示する実験を行った。まず、システム全体の応答性についてである。Unity 上のアバタが仮想空間上の振動対象オブジェクト（直方体や球体の境界）に接触してから、実際の振動モータが駆動するまでの遅延は、体験において違和感のないレベルに抑えられていた。これは、通信プロトコルに UDP を採用し、かつ制御データをビットフラグ形式の軽量な整数値（short 型）として送信し、デバイス側でビット演算処理を行うという実装手法が、リアルタイム性の確保に寄与したと考えられる。

次に、触覚提示の質についてである。複数の振動モータを皮膚上に配置し、それらを時間差で駆動させる（あるいは同期させる）ことで、単一の振動刺激では得られない「広がり」や「移動感」を知覚できることが確認された。具体的には、以下の2点の感覚生成において一定の成果が得られた。

1. 領域境界の認識: 胴体や腕の複数のモータを同時に、あるいは空間的な配置に従って駆動させることで、点としての刺激ではなく、面としての「壁」や「場」に触れている感覚（ファントムセンセーション）が示唆された。
2. 領域の通過感: 胴体や腕の複数のモータを同時に、あるいは空間的な配置に従って駆動、停止させることで、領域内を通過するような移動感覚（仮現運動）が得られた。

4.2 考察

本研究の目的は、大掛かりな装置や現実における直接的な送風などを用いずに、ウェアラブルな振動刺激によって風や空間境界を知覚させることであった。実装および予備的な体験の結果から、以下の点が考察される。

(1) 時空間的なパターン制御による感覚補完の有効性

従来のコントローラ振動のような「点」の刺激とは異なり、本システムでは身体の広範囲に配置した振動源を連携させることで、「面」や「流れ」といった高次の環境情報を提示可能であることが示唆された。特に、VR 空間内の「見えない境界」を通過する際、身体の部位が順次振動していくフィードバックは、視覚情報だけでは得られない「空間に侵入する」という身体的実感を強化する効果が見られた。

(2) ウェアラブルデバイスとしての優位性

従来の風覚提示研究では、大型のファンやエアコンプレッサーを用いる手法が主流であった。これらは強力な風圧

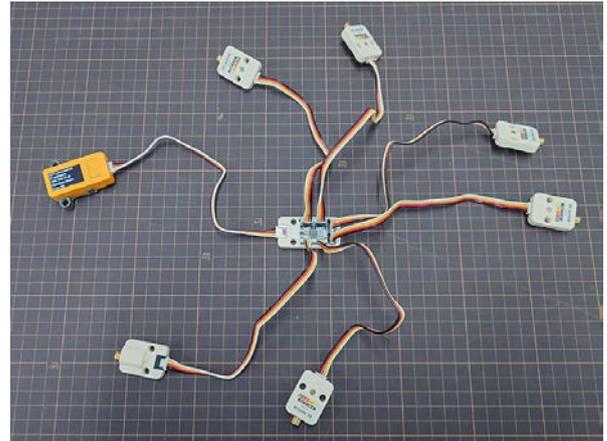


図3 腕部ユニット（上）と胴体ユニット（下）

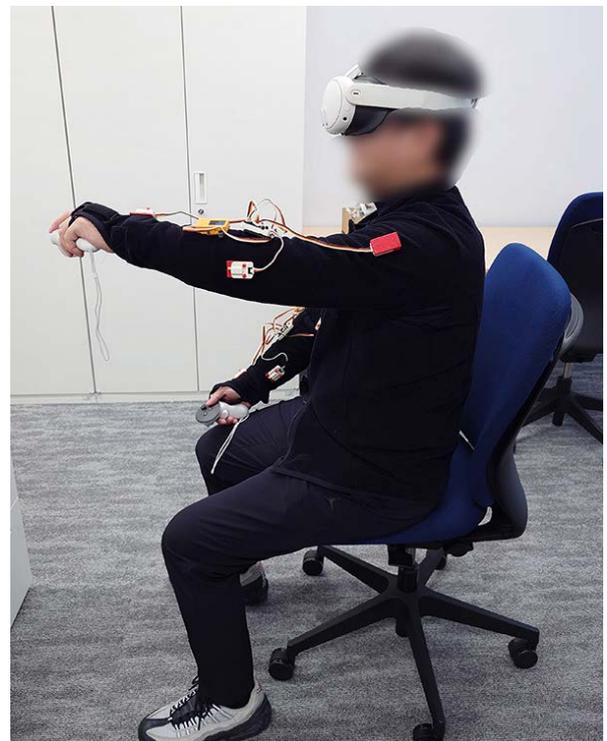


図4 モーションキャプチャスーツに自作マウントによって装着した様子

を提示できる反面、装置の規模が大きくなり、設置環境が限定される課題があった。本研究で実装した M5StickC と小型 DC モータによるシステムは、軽量かつ安価であり、市販のトラッキングスーツと面ファスナーを用いることで装着位置の自由度も高い。これにより、VR 体験の没入感を損なうことなく、簡易に環境情報を付加できる手法として、家庭用 VR や小規模な展示における有用性が高いと考えられる。

(3) 通信・制御ロジックの効率性

多数のアクチュエータを個別に制御する場合、通信帯域や処理負荷が課題となることが多い。本研究では、各モータの ON/OFF 状態をビット列にエンコードし、受信側（マイコン）でビットシフト演算を用いて高速にデコードする手法を採用した。このアプローチは、多チャンネルの触覚ディスプレイを低遅延で制御する上で、計算リソースの限られたマイコン環境において効率的であり、今後アクチュエータ数を増加させる場合にも拡張性を持つと考えられる。

4.3 課題と今後の展望

本システムの発展に向けて、以下の課題が挙げられる。

(1) 複数の振動対象の検証

現在は直方体や球体を用いた現実には存在しない仮想物体を空間領域の対象として実装を行ったが、ここに実在するものの情報を付加する（水のテクスチャやしぶきのエフェクトをつける、風の音をつけるなど）ことでどのような違いが発生するかを検証する。

(2) 振動パターンの解像度と質の向上

現在は DC モータによる単純な ON/OFF 制御（あるいは PWM による強度制御）が主であるが、風の「質感」や境界の「硬さ」を表現するには、より細やかな周波数制御や波形制御が必要となる。リア共振アクチュエータ（LRA）やボイスコイルモータ（VCM）などの応答性の高いアクチュエータへの換装や、テクスチャ感を表現するための振動波形の生成が今後の検討課題である。

(3) 定量的な評価実験の実施

現段階では開発者による定性的な評価に留まっている。今後は、被験者を用いた評価実験を行い、「オブジェクトの通過方向の識別精度」や「境界通過の検知率」、「VR 酔いの軽減効果」などを定量的に検証する必要がある。特に、振動のタイミング（位相差）と移動感覚の強さの相関を明らかにすることで、より効果的な振動パターンを導出できると考えられる。

(4) コンテンツとの統合

本システムは汎用的な仕組みであるため、具体的な VR コンテンツ（ゲームやシミュレーション）への統合を進める。例えば、魔法やオーラといったファンタジー要素の表現や、危険区域への侵入警告といった産業用途など、視覚・聴覚と触覚が密接に連携したマルチモーダルな体験（クロスモーダル効果の活用）を設計し、その有効性を実証していく予定である。

5. おわりに

本研究では、VR 空間における風や領域境界の知覚を、大掛かりな装置や現実における直接的な送風などを用いずにウェアラブルな振動刺激によって提示するシステム「HaPresense」を開発した。M5StickC と複数の小型振動モータを身体に装着し、Unity 上の接触判定に基づいて振動のタイミングやパターンを制御する手法を実装した。

プロトタイプを用いた検証の結果、複数の振動点における駆動タイミングの同期や遅延（位相差）によって、身体がオブジェクトを通過する感覚や、空間的境界に触れる感覚を擬似的に生成可能であることが示唆された。本手法は、従来の大型な風覚提示装置と比較して、省スペースかつ安価に環境情報を提示できる利点がある。

今後は、被験者を用いた定量的な評価実験を通じて振動パターンと知覚精度の関係を明らかにするとともに、より多様なテクスチャ表現の実装や、具体的な VR コンテンツへの応用を目指す。

参考文献

- [1] Yuxiang Shi and Guozhen Shen. Haptic Sensing and Feedback Techniques toward Virtual Reality. National Natural Science Foundation of China. 2024, vol. 7, <https://spj.science.org/doi/10.34133/research.0333> (参照 2025-12-01)
- [2] 鈴木勇仁, ヤムヴィボル, 広田光一, 雨宮智浩, 北崎充晃, 池井寧. VR 空間中の巡回移動のための気流提示手法に関する研究. 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019, <https://conference.vrsj.org/ac2019/program/common/doc/pdf/4B-07.pdf> (参照 2025-12-01)
- [3] Kenichi Ito, Yuki Ban, Shinichi Warisawa. AlteredWind: Manipulating Perceived Direction of the Wind by Cross-Modal presentation of Visual, Audio and Wind Stimuli. SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3355049.3360525> (参照 2025-12-01)
- [4] Yuxuan Sun, Yuta Sugiura. Wrist-worn Haptic Design for 3D Perception of the Surrounding Airflow in Virtual Reality. The 16th Asia-Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality, 2024, <https://ceur-ws.org/Vol-3907/paper8.pdf> (参照 2025-12-01)
- [5] J. Lee, G. Lee. Designing a non-contact wearable tactile display using airflows. Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16, Association for Computing Machinery, 2016, p. 183–194.