行為主体感と環境実在感の両立に向けた マルチチャネル風覚提示システム「GLIDE」の提案

有竹祐樹[†1]　栗原渉[†1]　三上浩司[†1]

概要：VR やテレイグジスタンスにおいて，風の提示は没入感や自分が移動している感覚を向上させる重要な要素である．しかし，従来の提示手法の多くは，移動に伴う「相対風」と，空間に吹く「環境風」を単一の風源で合成して提示しており，これらを異なる情報として区別させることが困難であった．その結果，自身の移動に対する「行為主体感」と空間への「環境実在感」の両立が阻害されるという課題があった．そこで本研究では，HMD 搭載型ファンによる局所提示（Local）と外部設置型ファンによる広域提示（Global）を物理的に分離し，独立制御するマルチチャネル風覚提示システム「GLIDE (Global & Local Integrated Display Environment)」を提案する．本システムは，VR 空間内の対気速度と環境風場を個別に算出し，提示位置を物理的に分けることで，風の原因を自己運動か外部環境へ適切に帰属させることを目的とする．本稿では，GLIDE のシステム構成および実装について述べ，飛行シミュレーションを用いた予備的評価により，情報の分離提示が主体感と実在感の両立に寄与する可能性を示した．

1. はじめに

バーチャルリアリティ（VR）において，体験の質を高めるためには，視覚や聴覚に加え，ユーザを取り巻く空間の物理的な実在感を伝えることが求められている．この観点において，空気の流れ（風）は空間を満たす触覚的な媒体（Medium）として重要な役割を担う．例えば Moon らは，風の提示が無機質な VR 空間（vacuum）との対比において，空間を「居住可能（livable）」なものとして感じさせる効果を報告している[1]．このように，風はユーザが仮想世界を「物理的に存在する場所」として受け入れるための，主要な感覚の一つとして認識されている．

理想的な VR，あるいはテレイグジスタンス体験には，「行為主体感（Sense of Agency）」と「環境実在感（Sense of Presence）」の両立が不可欠である[2]．本研究では，風覚情報をこれら二つの要素に対応づけて整理する．第一は，ユーザ自身の移動操作に応じて生じる「相対風（Relative Wind）」である．これは自らの行為に対する即時的な身体フィードバックとして機能し，「自らが動いている」という主体感の形成に寄与する．第二は，仮想空間内の地形や気象条件に由来する「環境風（Environmental Wind）」である．これはユーザの行動とは独立した空間の情報であり，「その場所にいる」という環境実在感を支える．

現実世界において，例えば自転車の走行時には，自身の加速による風圧と環境由来の突風が物理的には一つの合成された風として体に当たる．しかし人間は，視覚情報や自身の運動指令（Efference Copy）と統合することで，その風の原因を「自己の運動」か「外部環境」かに文脈的に帰属（Attribute）させ，両者を区別して解釈していると考えられる．一方，従来の VR 風覚提示システムの多くは，単一または複数の送風機を用い，計算上で合成された一方向の風を提示する構成が主流であった[1, 3]．このような合成風のみを提示する手法では，風圧の変化が生じた際，その要因がユーザ自身の動作によるものか環境の変化によるものかが情報として区別しにくくなる．特に，霧や暗闇，均一な景色など視覚情報が限定的な環境下では，この判別が困難となり，感覚間の整合性を図るための認知的な負荷が没入感を阻害する要因となり得る[4]．また，風の提示は没入感の向上のみならず，速度制御や操縦のしやすさといったユーザのパフォーマンスを向上させることも示唆されている[5]．したがって，情報の混在を解消することは，体験の質のみならず操作の効率を確保する上でも重要な課題といえる．

以上の課題に対し，本研究では相対風と環境風を物理的に独立した経路で提示するマルチチャネル風覚提示システム「GLIDE (Global & Local Integrated Display Environment)」を提案する．本システムは，ヘッドマウントディスプレイ（HMD）に搭載したファンによる局所（Local）提示と，外部に設置したファンによる広域（Global）提示を組み合わせる．これにより，ユーザに対し「自らの運動状態」と「環境の状態」という性質の異なる二つの情報を，混同させることなく同時に提供することを目指す．本アプローチは，鳥類が翼上の異なる位置にある感覚受容器を用いて，対気速度や気流の乱れといった空気力学的状態を分散して検知している生態[6]に着想を得たものである．

2. 関連研究

VR における風覚提示の研究は，その目的と実装方法に応じて，「相対風（主体感の提示）」と「環境風（環境の再現）」の二つの軸で整理できる．しかし，既存研究の多くはいずれか一方に焦点を当てるか，あるいは両者を合成して提示しており，両者を独立した情報として共存させるシス

†1 東京工科大学

© 2026 Information Processing Society of Japan.

テムについての報告は少ない．

2.1 環境風による空間的実在感の提示

仮想空間の属性としての風を再現する研究は，没入感の向上を主目的として発展してきた．Moon らは，ユーザを取り囲むように配置した 8 つのファンを用いて，3 次元空間内での任意方向への風ベクトル提示を実現した[1]．この研究は多方向提示の可能性を示したが，ユーザ自身の急激な速度変化に即応した風圧調整には，ファンの物理的な応答速度に課題が残されていた．

より詳細な環境風のシミュレーションとして，Tolley らの「WindyWall」がある[7]．これは多数の小型ファンアレイを用いて複雑な気流パターンを作り出すシステムであり，環境風の表現力を追求している．しかし，その構成は設置スペースを要し，個人の移動体験に即応することを主眼とした設計ではなかった．

また，ウェアラブルデバイスによる環境提示も研究されている．Ranasinghe らの「Ambiotherm」は，HMD に取り付けたファンと温度制御素子を用い，環境条件の再現を試みた[8]．この研究は機動性と没入感の両立を図っているが，単一の仕組みで環境と移動の両方の風を表現しようとする際，両者の情報が混ざってしまうという課題を含んでいる．

2.2 相対風による行為主体感の強化

ユーザ自身の移動に伴う相対風を提示することは，速度感の伝達や行為主体感の強化に寄与する．この分野では，風提示が操作パフォーマンスの向上に繋がることが報告されている．Deligiannidis らは，スクーターの運転シミュレーションにおいて風のフィードバックを加えることで，速度制御精度や走行パフォーマンスが向上することを示した[5]．これは，風が速度知覚の重要な手がかりとなり，精密な操作を支援することを示唆している．風の知覚メカニズムに関して，D’Amato らは視覚的な移動速度と知覚される風速の対応関係を定量化した[9]．彼らはユーザが視覚と風速を一致していると感じるためのモデルを構築しており，提示システムの設計における数値的な指針を提供している．

また，高い行為主体感を追求した事例として「Birdly」が挙げられる[10]．このシステムは大型の装置と強力な送風機を組み合わせ，鳥としての飛翔体験を身体的に再現する．高い没入感を実現している一方で，専用の設備規模を要するため，普及のしやすさにおいては課題がある．

2.3 既存アプローチの課題と本提案の位置付け

提示デバイスの形態に関して，Lehmann らは固定式ファンと頭部搭載式ファンの比較を行い，固定式の方が高いプレゼンスをもたらす傾向にあると報告した[3]．この研究は，単一の風源を用いる場合には設置形態によって得られる効果に差が生じることを示唆している．また，VaiR は，HMD に 4 つのファンを搭載し，VR 空間内の風向をシミュレートするシステムで風向の再現に成功したと報告した[11]．しかし，その風が「環境風」なのか「相対風」なのかの区別はシステムの設計段階ではなされておらず，両者が混在する状況での提示は未解決の課題として残る．

以上の関連研究を総括すると，既存手法には以下の課題が認められる．

- 環境風または相対風のいずれか一方に特化しており，他方の情報提示が限定的である．
- 単一の提示系で双方の情報を混在させて提示するため，情報の発生源に関する区別がしにくい．
- 異なるデバイス形態の比較はなされているが，それらを役割分担に基づいて統合する手法は提案されていない．

本研究の「GLIDE」システムは，これらの課題に対する解決策を提示する．HMD 搭載ファンを相対風提示のための専用チャネルとし，固定式ファンを環境風提示のために併用する．この物理的な分離により，先行研究において対立的に扱われてきた提示手法や情報の種類を補完的に統合することを目指す．

3. 提案システム：GLIDE

VR 空間における「行為主体感（Sense of Agency）」と「環境実在感（Sense of Presence）」の両立を目的とした，マルチチャネル風覚提示システム「GLIDE」の概念および構成について述べる．本研究では，Global な環境風と Local な相対風を独立提示するシステム「GLIDE」を提案する．

3.1 システムコンセプト：情報の分離と独立提示

現実空間において，移動に伴う風（相対風）と，気象現象としての風（環境風）は物理的に異なる要因で発生しており，人間はそれらを文脈や身体部位ごとの知覚差によって区別していると考えられる．しかし，従来の単一ファンによる提示手法では，これらが合成された状態で提示されるため，ユーザは風圧の変化が「自らの加速によるものか」あるいは「環境の変化によるものか」を直感的に判別することが困難であった．そこで本システムでは，以下の 2 つの独立した風覚チャネルを定義し，物理的に異なる発生源から提示するアプローチをとる（図 1）．

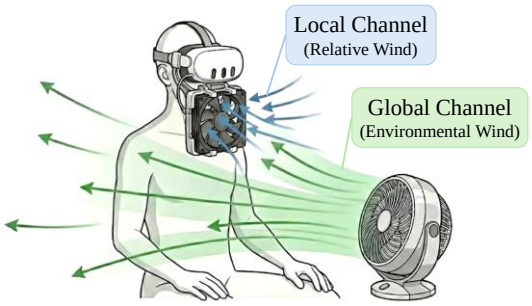

図 1　GLIDE システムコンセプト

Local Channel (相対風提示)

ユーザの顔面に対し局所的な風を提示する役割を担う．これは VR 空間内での移動速度（対気速度）に対応して

© 2026 Information Processing Society of Japan.

おり，「自分の行動によって風が生じた」という因果関係を明確にすることで，行為主体感を増強することを目的としている．

Global Channel (環境風提示)

ユーザの身体全体あるいは側面に対し，広域的な風を提示するものである．ここには空間内の風場（Wind Field）や高度による風速差（ウィンドシアー）などの情報を反映させ，空間そのものの性質を身体で感じさせることで，環境実在感および空間認識能力の向上を図る．

3.2 システム構成

本システムの全体構成を図 2 に示す．システムは情報の流れに基づき，入力部（Input Unit），処理部（Processing Unit），制御部（Control Unit），提示部（Display Unit）の 4 つのモジュールから構成される．

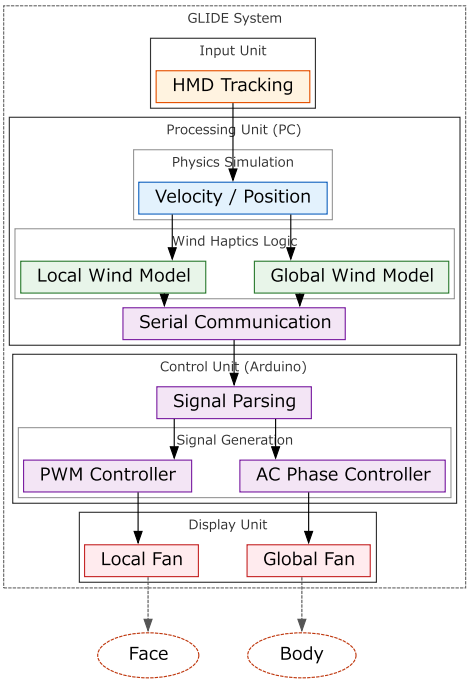

図 2　システム構成図

Input Unit (入力部)

体験者の頭部位置および回転情報を取得する役割を担う．VR ヘッドマウントディスプレイ（HMD）のトラッキング機能を用い，リアルタイムに体験者の挙動を計測する．

Processing Unit (処理部)

PC ワークステーション上で動作するモジュール群である．まず物理シミュレーション（Physics Simulation）において，入力部からのデータを基に VR 空間内でのプレイヤーの移動速度，位置などを計算する．次に風覚算出ロジック（Wind Haptics Logic）が，それらの物理パラメータから「顔面に当てるべき風速（Local）」と「環境として吹くべき風速（Global）」を個別の計算モデルに基づいて算出する．

Control Unit (制御部)

処理部から送信された風速指令値を受信し，ハードウェアを駆動するための電気信号に変換する．具体的には，シリアル通信解析およびファン制御信号（PWM および AC 位相制御）の生成を行う．

Display Unit (提示部)

電気信号を物理的な空気の流れ（風）に変換し，体験者の顔（Face）と身体（Body）へフィードバックを行う．本ユニットは，顔面近傍に配置され局所的な風を生成する「Local Fan」と，外部に設置され身体全体を包む風を生成する「Global Fan」によって構成される．

4. 実装

第 3 章で提案した構成に基づき，プロトタイプシステムの実装を行った．本章では各部の詳細な仕様および実装手法について述べる．

4.1 ハードウェア実装

各モジュールのハードウェア構成について述べる．入力部においては，HMD として「Meta Quest 3」を使用した．提示部は，HMD に搭載する Local Fan および外部に設置する Global Fan の 2 つのファンで構成される．Local Channel の実装では，HMD 前面下部に 120mm 径の PWM 制御対応 DC ファン（5V 駆動）を装着した．その固定には，T1MAT1C 氏による“Quest 3 Facial Tracker Mount”[12]を改変した専用アタッチメントを 3D プリンタで出力し使用した（図 3）．一方，Global Channel の実装では，ユーザの右斜め前方に業務用 AC 扇風機を設置し，環境風の提示源とした．制御部には，マイコンボードとして「Arduino Uno R3」を選定した．AC 扇風機の制御には，RobotDyn 社の AC Dimmer モジュール（8A-400V）を使用しており，ゼロクロス検知を用いた位相制御によって出力を調整する回路を構築した．

図 3　実装した HMD 搭載型ファン（Local Fan）

4.2 ソフトウェア実装

処理部は「Unreal Engine 5 (UE5)」を用いて構築した．VR 空間の描画および物理演算は常時 90fps 以上を維持するよう最適化を行い，高いリアルタイム性を確保している．

© 2026 Information Processing Society of Japan.

4.2.1 風速算出ロジックの実装

UE5 上の Blueprint において，以下の 2 つのモデルを用いて目標風速を算出した．なお，計算には UE5 の単位系（100 Unreal Units = 1m）を用いている．

Local Channel (相対風) の制御モデル

仮想空間内における対気速度 $v_{virtual}$ [m/s] に対し，Local Fan の出力風速 v_{local} [m/s] を式 1 に示す線形モデルで制御する．

$$v_{local} = \alpha \cdot v_{virtual} + \beta \qquad \text{—(式 1)}$$

ここで，α は仮想速度と物理風速の比を示す係数，β は定数項である．本実装では，Cai ら[4]など先行研究の知見および予備実験に基づき，仮想速度をダイレクトにフィードバックするため $\alpha = 1,\ \beta = 0$ と設定した．

Global Channel (環境風) の制御モデル

高度による風速変化（ウィンドシアー）を再現するため，Global Fan の出力風速 v_{global} は式 2 に示す対数則モデルを用いて算出する．

$$v_{global} = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \qquad \text{—(式 2)}$$

ここで，h は海面からの高度[m]，u^* は摩擦速度，κ はカルマン定数（≈ 0.41），z_0 は地表粗度（海上を想定し 0.0002）である．

4.2.2 信号処理と通信

算出された v_{local} および v_{global} は，0〜255 の整数値（1 バイト）に正規化され，USB 接続によるシリアル通信（ボーレート：9600 bps）を通じて Arduino へ送信される．Arduino 側では，受信したパケットを解析し，意図した風速が出力されるようそれぞれのファンの回転数を独立して制御する．Local Fan に対しては analogWrite() による PWM デューティ比の変更を行う． Global Fan に対してはタイマ割り込みを用いたトライアックの点弧角制御を行う．

4.3 動作検証と遅延に関する考察

実装したシステムを用いて動作検証を行ったところ，VR 空間内での急加速や高度上昇に対し，意図した通りに個別のファンが応答することを確認した．システム全体の遅延（Latency）については，描画フレームレート（90fps 以上）およびシリアル通信速度（9600bps）から算出される情報伝達遅延は数 ms オーダーであり，人間の知覚閾値に対して十分に小さい．一方で，物理的なファンが回転数を変化させ，実際に風がユーザに到達するまでには，流体力学的な慣性による一定のタイムラグが生じる．しかし，実際の風環境においても，風速の変化は瞬時ではなく連続的・過渡的に発生するものであるため，この物理的遅延は体験の自然さを損なうものではなく，むしろリアリティの一部として受容されうると考えられる．

5. 予備的評価および考察

5.1 予備的評価の概要

本システムの有効性を確認するため，研究室内のメンバー数名を対象としたデモンストレーションを行い，体験中に簡易的なヒアリング調査を実施した（図 4）．実験用コンテンツとして，広大な海原の上空をダイナミック・ソアリングのように海面近くまで急降下・風上での旋回・急上昇・風下での旋回を繰り返して飛び続けるシミュレーション環境を構築した．ユーザは HMD を装着して回転椅子に座り，頭部の傾きによって仮想空間内を旋回・加減速しながら移動する．本実験では，Local Fan による局所提示（相対風）と，右前方 45 度に設置した Global Fan による大域提示（環境風）を独立に動作させた．

図 4　実装したデバイスと体験の様子

5.2 独立提示による知覚的効果

体験後のフィードバックより，相対風と環境風を物理的に分離して提示することについて，以下の知覚的な利点が確認された． 第一に，自己運動に対する行為主体感の向上が見られた．体験者からは「降下時に顔面に風が当たることで空気を切り裂く感覚が得られる」「視覚情報が乏しい状況（空しか見えない時など）でも顔面の風の変化で加減速が直感的にわかる」といった意見が得られた．これは，Local Fan がユーザの操作に即応する「運動のフィードバック」として正しく機能していることを示唆している．第二に，環境実在感の補強が確認された．「移動していない時でも体を撫でる緩やかな風があることで，そこに立っていると感じる」「横風が場所の気候を想起させる」といったコメントは，Global Fan による提示がユーザの行動とは独立した「自律的な世界」の存在を裏付けていることを示している．

5.3 情報の分離と認知的負荷に関する考察

既存の合成風提示（単一のファンによる提示）との比較において，「向かい風が体全体で来るので，風が強くなっても『自分が加速した』のではなく『外の風が強くなった』ことがわかる」という意見が得られた．また，「顔にあたる風は小さな速度の変化がわかりやすい」との報告もあった．これは，顔面（Local）と体全体（Global）という受容野の

© 2026 Information Processing Society of Japan.

違いが，脳内における発生源の帰属（Source Attribution）を助け，どちらの風であるかを判断する認知的な負荷を軽減している可能性を示唆している．

5.4 課題と改善の展望

一方で，いくつかの課題も明らかとなった．まず，物理的な干渉に関する指摘として「強い向かい風（環境風）の際に，相対風が遮断されて感じにくくなる」という意見があった．これは，Global Fan の風圧が Local Fan の局所的な気流を乱していることが原因と考えられ，今後は風向の動的な制御や, 両ファンの出力バランスの調整が必要である．また，システム面では「ファンの駆動音」や「HMD の重量増加」といった装着感への影響が挙げられた．これらはデバイスの小型軽量化や静音設計によって改善の余地がある．

なお，Global Fan の物理的な慣性による遅延については，体験者から大きな違和感としての報告は少なかった．自然界においても環境の風速変化は瞬時ではなく連続的であるため，物理的な遅延がむしろ自然な挙動として受容された可能性がある．

6. 今後の展望

本研究では，VR 空間における相対風と環境風の知覚的分離を目指し, HMD 搭載型ファンによる局所提示（Local）と外部設置型ファンによる広域提示（Global）を独立制御するマルチチャネル風覚提示システム「GLIDE」を提案・実装した．従来の風覚提示手法の多くは，複数の風速ベクトルを物理的に合成して提示していたため，情報の発生源が曖昧になり，行為主体感と環境実在感がトレードオフの関係に陥るという課題があった．これに対し，本システムは「自己の運動フィードバック（Local）」と「空間の属性提示（Global）」を物理的に異なる発生源および身体部位へ分離して提示する設計を採用した．予備的な評価実験の結果，ユーザは「顔面への風」から自らの移動状態を，「身体全体への風」から環境の状況を，それぞれ独立した情報として直感的に受容できることが示唆された．これにより，感覚入力の原因を自己または外部環境へ適切に帰属させることが可能となり，認知的負荷を抑えつつ，主体感と実在感を両立できる可能性を示した．

本研究はプロトタイプによる予備的な知見の報告に留まっており，解決すべき課題も残されている．今後は，第 5 章で明らかとなったファン同士の物理的干渉を解消するための気流制御アルゴリズムの最適化や，回転椅子と連動した環境風の方向制御機構の実装を進める必要がある．また，定量的な評価実験を通じて，人間がどの程度の精度で二つの風を分離・判別できるのかを検証していく予定である．

参考文献

[1] Moon, T. and Kim, G. J.. Design and evaluation of a wind display for virtual reality. Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology (VRST '04), 2004, p. 122‑128. https://doi.org/10.1145/1077534.1077558, (参照 2025-12-22).

[2] 舘 暲. テレイグジスタンス. 日本ロボット学会誌, 2015, vol. 33, no. 4, p. 215-221. https://doi.org/10.7210/jrsj.33.215, (参照 2025-12-22).

[3] Lehmann, A., Geiger, C., Woldecke, B. and Stocklein, J.. Poster: Design and evaluation of 3D content with wind output. 2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 2009, p. 151-152. https://doi.org/10.1109/3DUI.2009.4811231, (参照 2025-12-22).

[4] Giraldo, G., Servières, M. and Moreau, G.. Perception of Multisensory Wind Representation in Virtual Reality. 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2020, p. 45-53. https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00024, (参照 2025-12-22).

[5] Deligiannidis, L. and Jacob, R. J. K.. The VR Scooter: Wind and Tactile Feedback Improve User Performance. 3D User Interfaces (3DUI'06), 2006, p. 143-150. https://doi.org/10.1109/VR.2006.131, (参照 2025-12-22).

[6] Brown, R. E. and Fedde, M. R.. Airflow Sensors in the Avian Wing. Journal of Experimental Biology, 1993, vol. 179, no. 1, p. 13-30. https://doi.org/10.1242/jeb.179.1.13, (参照 2025-12-22).

[7] Tolley, D. et al.. WindyWall: Exploring Creative Wind Simulations. Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '19), 2019, p. 635‑644. https://doi.org/10.1145/3294109.3295624, (参照 2025-12-22).

[8] Ranasinghe, N. et al.. Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions. Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17), 2017, p. 1731–1742. https://doi.org/10.1145/3025453.3025723, (参照 2025-12-22).

[9] Cai, Y. et al.. Measuring Human Perception of Airflow for Natural Motion Simulation in Virtual Reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2025, vol. 31, no. 5, p. 2943-2953. https://doi.org/10.1109/TVCG.2025.3549552, (参照 2025-12-22).

[10] Rheiner, M.. Birdly an attempt to fly. ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies (SIGGRAPH '14), 2014, Article 3, 1p. https://doi.org/10.1145/2614066.2614101, (参照 2025-12-22).

[11] Rietzler, M. et al.. VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality. Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17), 2017, p. 5669‑5677. https://doi.org/10.1145/3025453.3026009, (参照 2025-12-22).

[12] “Quest 3 Facial Tracker Mount (No Glue)”. https://www.thingiverse.com/thing:6780933, (参照 2025-11-10).

© 2026 Information Processing Society of Japan.