



全盲者のための立体音響提示によるクライミング支援 ～室内壁での晴眼者による検証～

政岡幹也¹⁾, 池田聖¹⁾

1) 龍谷大学 先端理工学部 知能情報メディア課程 (〒 520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1 番 5)

概要: 全盲者によるクライミングでは、通常、口頭でホールドの位置を伝える補助者が必要である。しかしながら、補助者の指示が、クライマーの自律感を損なわせるという問題がある。そこでスタンドアローン型の HMD を用いて、複数のホールド位置を視線や頭部位置に応じて立体音響により提示するシステムを試作した。本発表では、晴眼者の視界を遮断し、単一のホールド位置を順次提示する条件下で、平易な室内課題の登攀が可能であることを示す。

キーワード: パラクライミング, 拡張現実感, サイトガイド, 立体音響, 視線計測

1. はじめに

パラクライミングは身体に障害を持つ人々が行うクライミング競技であり、視覚障害・運動障害・切断など、障害の種類に応じてカテゴリが分かれている。2028 年ロサンゼルスで開催予定のパラリンピックに採用されるなど、注目されているスポーツである。クライミングでは、ホールドと呼ばれる掴んだり足を置く凸部が各ルートに設定されている。設定されたホールドを用いるのであれば、どのような順序でホールドを用いどのような姿勢（ムーブ）で登攀するかは自由に選択することができる。全盲者をはじめとする、視覚障害者がパラクライミングを行う際は、ホールドの位置を口頭で指示する役割のサイトガイドと呼ばれる補助者が必要である。サイトガイドは、次に取れそうなホールドの方向、距離、形をクライマーに伝えることで補助している。視覚障害クライマーは自律的にクライミングすることを望んでいる [1][2] ため、サイトガイドからの指示が細かすぎると、クライマーの自律感を損なわせるという問題や、登攀技術のレベルや性格などの相性のマッチングコストがかかるという問題もある。

これらの問題に対して、ロープを必要としない高さのボルダリングを対象としたクライマーの位置に応じた音声案内システムが提案されている [3]。このシステムでは、地上に設置した Web カメラでクライマーの位置を取得し、あらかじめ設定されたポイントに到達すると、次のホールドとその次のホールドの方向と距離をサイトガイドと同様の音声指示として、無線ヘッドホンを用いてクライマーに提示する。しかしながら、この音声指示自体が、事前に正解のムーブが設定されている前提であり、ホールドの選択やムーブを構築する機会を制限してしまう問題がある。このシステムでは、二つ先のホールドの提示方法については言及されておらず、クライマーがホールドやムーブを自由に選択できるとは言い難い。

そこで本研究では、クライマー自身の視線や頭部の姿勢

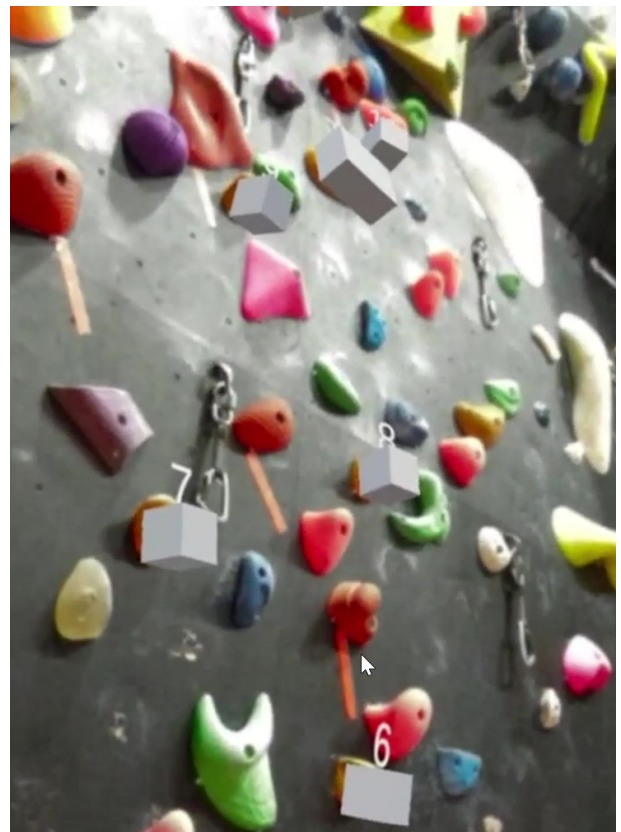


図 1: ホールド上に登録された音源用の仮想物体

により変化する立体音響によりホールド位置を提示するシステムを試作し実用可能性を調査する。本システムでは、図 1 のように予め各ホールドの位置と概形状をもつ仮想的な音源を配置しておく。クライマーが登攀する際には、3 次元的な位置姿勢の計測と視線計測、立体音響の提示が可能なヘッドマウントデバイス (HMD¹) を装着することにより、ホールドが音源となって何らかの立体音響が提示され、その音

¹全盲者には視覚ディスプレイは必要無いが、実装上の簡便さからヘッドマウントディスプレイを用いるので略して HMD とする

源を空間的に定位することでホールド位置を把握することができる。本研究では、立体音響だけでは正確なホールド位置の把握が困難であることも想定している。立体音響提示による空間定位精度の不足を補うために、頭部正面方向もしくは視線方向が対象となるホールドに対してどれだけずれているのかを、音により提示する方法も検討に加える。幼少期を晴眼者として過ごし、後天的に失明した全盲者は、眼球を晴眼者と同じように動かすことができる [4][5] ことから、眼球や頭部が第三の手のような役割を果たし、自らの意思でホールド位置を探索できる可能性を追求する意図がある。

本稿では、視覚障害者の自律的登攀支援の実現に向けた第一段階として、晴眼者を対象として試作システムにより実際に、平易な屋内クライミングウォールの登攀可能性を示す実験について報告する。

2. 立体音響提示によるクライミング支援

2.1 試作システムの概要

試作システムでは、予め課題上の複数のホールドの位置と概形状を表す直方体の仮想物体を配置しておく。ホールドの仮想物体には、予め定めた順序を設定しておく。登録されたホールドの位置には仮想的な音源が配置され、本システムの利用者は立体音響によりホールドを空間定位できる。具体的には、音源からの両耳までの時間差と位相差を再現し、頭部伝達関数については平均的なものが使用される。加えて、より正確な定位を支援するため、システムはユーザーの頭部正面方向または視線方向に仮想的な光線を投射し、光線と現在の探索対象ホールド方向の間のなす角に比例した頻度で短い音を繰り返し提示する。光線が探索対象正しく捉えた際には、ヒット音で通知することで区別する。

2.2 試作システムの実装

本システムの HMD として、Meta Quest Pro 本体と付属するハンドコントローラを用いた。ハンドコントローラは、ユーザーが任意のホールドを探索対象として登録する際の入力デバイスとして使用する。立体音響フィードバックの提示には、Bluetooth ヘッドホン Bose QuietComfort Headphones を用いた。ソフトウェアは、ゲームエンジン Unity 2022.3 を用いて開発した。ホールド登録時にはビデオ透過型の拡張現実感により登録されたホールド位置や姿勢を確認し、実験時にはブラックアウトして全盲者に近い状況で登坂できるようにした。頭部位置や光線と仮想ホールドとの角度などの時系列データは HMD 本体に記録した。実験参加者が現在の探索対象ホールドに触れたことを目視で確認したのち Bluetooth キーボードにより対象ホールドをインクリメントした。

3. 実験

本実験の目的は、視覚障害者を想定した状況において、立体音響によるクライミング支援がユーザーの空間認識や探



図 2: 実験に使用したクライミングウォール。中央の薄いオレンジ色のホールドが今回使用したグレード 5.8 の課題。

索行動に与える影響を検証することである。音の提示方法の違いによる探索効率の変化を確かめる。クライミング中は一部の状況で、身体のバランスを保つために頭部の向きがある程度固定される。一方、眼球は比較的自由に動かすことが可能である。そこで、視線の向きに応じてピッチが変化する方法が、効率的に対象位置を探索できるという仮説を立てた。

3.1 実験環境

本実験の被験者は、クライミンググレード 5.8 を登攀することのできる政岡とクライミンググレード 5.10 を登攀することのできる池田が行った。両者とも視力は 1.0 程度で、晴眼者である。また、HMD に搭載された視線追跡機能の精度を確保するため、キャリブレーションを、Meta Quest Pro に標準搭載されている視線追跡の設定手順に従って行った。

実験は、京都府京田辺市のクライミングジム「ロックオンザビーチ」に設定された、ルートグレード 5.7 の壁面を用いて実施した。初心者～中級者向けのルートに相当し、全体構成は図 1 中央に示されている。フットホールドと呼ばれる、足を乗せるためのホールドは、掴みづらく、今回の実験の妨げになるため、探索の対象から除外した。ホールド

の総数は 25 個であり、スタートホールドは 5 番目のホールドである。そのため、探索対象のホールドは 20 個である。図 2 に、仮想オブジェクトがホールド位置に設置された後の様子を示す。また、安全性確保のため、登攀はトップロープ方式で行った。

実験の前に、探索対象となるホールドに対し、事前にコントローラを用いて仮想オブジェクトを一つずつ設置し、その探索順序を設定した。

3.2 実験条件

この環境下で、被験者には音響フィードバックのみを頼りに指定された 20 個のホールドを探索する課題が与えられた。その際、音の提示方式を変化させた、以下の三条件を設定した。

立体音響 ホールドから立体音響が適応された音が鳴り、空間的位置に基づいて提示する方式。

立体音響+正面軸 立体音響に加え、正面軸とホールドのなす角によってピッチを変化させ、向きが完全に一致した際には明確なヒット音が鳴る。ここでの正面軸とは、人間が自然に立った姿勢から顔の前方方向に、地面と水平に伸びる線を指す。

立体音響+視線 条件 2 の方式を基に、ピッチ変化の基準をユーザーの視線方向へと変更した。

実験はクライマーと補助者の二つの役割がある。クライマーがスタートホールドを掴み、補助者はそれを確認し、画面を暗転させ次のホールドへと探索対象を移した。ここでは、視覚障害者のクライミングを模擬するため、Meta Quest Pro の画面を意図的に暗転させている。探索中にクライマーがホールドを認識しつかんだ時、補助者はその正誤を口頭でクライマーに伝え、キーボードを操作する。このキーボード操作により探索対象のオブジェクトが次のホールドへと移るようになっている。この一連の流れを、設定された全ホールドで繰り返した。

本実験では、提示条件ごとに、各ホールドの探索に要した時間を計測し比較した。クライマーがホールドの方向を特定しホールドをつかんだ時に、補助者の操作によって探索対象が次のホールドに移った時点で探索終了とし、その時間を記録した。

3.3 実験結果

政岡は条件 1 で 18 番目のホールドにて落下し、そこで、実験を終了した。また、条件 2 では、23 番目、条件 3 では 18 番目で落下し、実験を終了した。池田は全ての条件でルート最後まで登攀することができた。実験データの解析にあたって、操作誤りによる時間記録上の外れ値を除外した。各ホールドの探索時間の平均値を図 3 に示す。条件 1 における平均探索時間は 14.47 秒、条件 2 は 15.18 秒、条件 3 は 17.20 秒であった。条件 1 が最も平均探索時間が短い結果だった。一方条件 3 は最も探索効率が悪い結果を示した。図 4 に政岡、図 5 に池田について、条件 2 で最初の 3 ホールドを探索した際の角度変化を示す。また、図 6 に政岡、図

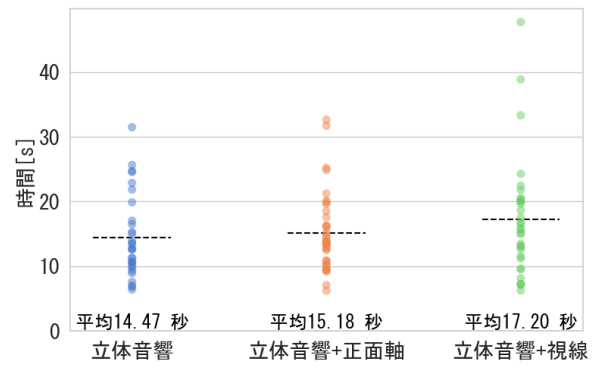


図 3: 各ホールドの探索時間

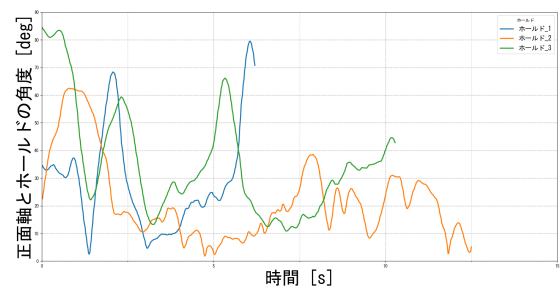


図 4: ホールド探索時の正面軸の時系列変化の例 (政岡)

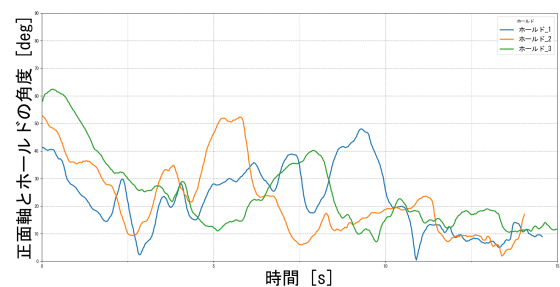


図 5: ホールド探索時の正面軸の時系列変化の例 (池田)

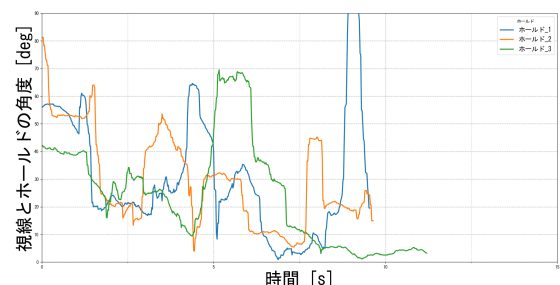


図 6: ホールド探索時の視線の時系列変化の例 (政岡)

7 に池田について、条件 3 で最初の 3 ホールドを探索した際の角度変化を示す。いずれの図も探索対象が変更された時点を時間 0 として揃えている。

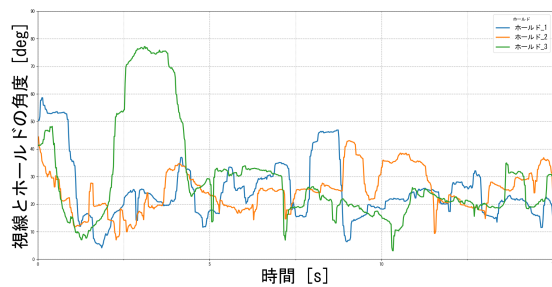


図 7: ホールド探索時の視線の時系列変化の例 (池田)

4. 考察と今後の展望

4.1 考察

探索時間や探索における姿勢には条件間で差異が見られたものの、いずれの提示方法においても池田は完登を達成したことから、どの方法も本実験で用いたものと同程度の平易な課題であれば、登攀は可能であると考えられる。

条件 1 において最も短い平均探索時間が得られ、当初の仮説であった、視線の向きを用いた提示が最も有効であるという仮説とは異なる結果となった。条件 1 の平均探索時間が最も短くなった理由として、立体音響のみでは情報が方向という大まかなものに限定されることが挙げられる。正確な空間定位ができない為に、手を用いて触覚での探索を行ったことが、時間短縮に繋がったと考えられる。しかしながらこれは、手にしたホルルドが正解かどうかを教えてくれる補助者がいることが前提の探索方法であり、自律的なシステムとは言い難い。また被験者である我々の体験として、腕で体を引き上げ音源に顔を近づけていく際の音質の変化を利用し、能動的に距離情報を取得していたことが確認できた。今回の実験で用いたルートは容易であり、そのような探索が可能であったが、足を置く位置の関係から、腕を伸ばさなくてはならないような高難易度のルートでは、この探索方法をそのまま適用することは難しいと考えられる。

一方、条件 2 及び 3 では探索時間が条件 1 よりも長くなった。条件 2, 3 はヒット音が鳴る条件が、それぞれ頭部の向き、あるいは視線が目標に一致した時であったため、ユーザーはまず位置合わせを完了させることを優先した。このようなタスクが、条件 1 で方向を大まかに定位するまでよりも長く、平均時間に影響したと考えられる。しかしながら、条件 1 で見られたような無理な姿勢をとる必要はなく、腕を伸ばした安定した状態でホルルドを探索することが可能であった。この安定した姿勢が保てるという利点から、条件 1 よりも幅広いルートで有効活用できる可能性が示唆される。

被験者が探索開始と同時に目標ホルルドを即座に定位できていたならば、角度は探索開始時から単調に収縮すると予想される。しかし、図 4～7 が示すように、実際には探索

初期に一度角度が増大していた。この初期的な角度増大は、目標に対してレイがヒットせず、一度ホルルドを通り過ぎてから修正するという過程を反映していると考えられる。そして、緩やかなピッチの変化を感じ取ることが出来ず、動かす中で大きくピッチが変わったときに、別の方向にあると被験者は知覚したと考えられる。また、一つのホルルドの探索が終了してから次のホルルドが探索対象となる際に、時間差が存在した。補助者がクライマーの到達を確認してから次のターゲットを設定するまでの操作遅延があり、特にルート上部ではクライマーと補助者の距離が長くなり、補助者からホルルドが認識しづらく、時間差が大きくなった。図 4～7 中のグラフ後半部分では、角度差が大きくなっており、既に次のホルルドへと正面軸や視線を向けていた可能性が考えられる。

4.2 今後の展望

今回の実験結果と考察を踏まえ、今後の展望を述べる。今回の考察で明らかになった探索初期にターゲットを通り過ぎてしまう問題と緩やかなピッチ変化の知覚の困難さを解決するため、目標との角度差に応じて段階的に区別できるピッチ変化を今後実装する。これにより、明確な変化が感じ取れやすくなると考えられる。段階的な変化と緩やかな変化のどちらが探索において良いのか実験する予定である。

ホルルド到達の確認を補助者ではなく、自身で判定できるようにすることが、実験の精度を高める上でも、より自律的なシステムにするためにも必要であると考えられる。その為の解決策として、HMD によるハンドトラッキングを実装し、目標のホルルド座標に到達しつかむ動作を検知した時点で、システムが自動で到達成功と判断する機能が必要である。

参考文献

- [1] 佐藤建. 日本におけるパラクライミングの発展過程と現状について. Vol. 39, pp. 85–90.
- [2] 會田祥, 田中星司. パラクライマー會田祥のトレーニングとサイドガイドの役割について. Vol. 39, pp. 37–44.
- [3] Makoto Kobayashi. A basic inspection of wall-climbing support system for the visually challenged. In Klaus Miesenberger, Joachim Klaus, Wolfgang Zangler, and Arthur Karshmer, editors, *Computers Helping People with Special Needs*, pp. 332–337, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer Berlin Heidelberg.
- [4] D. Kömpf and H.-F. Piper. Eye movements and vestibulo-ocular reflex in the blind. Vol. 234, No. 5, pp. 337–341.
- [5] R J Leigh and D S Zee. Eye movements of the blind. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 328–331, 03 1980.