



ボルダリングにおける登攀上達を支援する投影情報の検討

浜本 多聞^{*1}

浦西 友樹^{*1*2}

Photchara Ratsamee^{*1*2}

東田 学^{*1*2}

劉 暢^{*3}

山本 豪志朗^{*3}

Abstract — スポーツクライミングの一種目であるボルダリングは全身の正確な動作を要求される競技であるため、ルートの下見段階から事前に最適な登攀方法を考え、覚えながら登攀しなければならない。しかし、初心者においては下見段階で適切な登攀方法を考えることは難しく、また登攀中の身体的疲労も相まって事前に考えた登攀方法を実践することは困難である。そのため、下見段階および登攀時に情報を与え、登攀を支援することが期待されている。登攀者に支援情報を与え上達を支援する研究もあるが、最適な支援情報についての検討はなされていない。本稿では、ボルダリングウォール上に登攀上達を支援する情報を直接投影する際に適切な投影像はどのようなものか、被験者実験の結果をもとに検討した結果について報告する。

Keywords : ボルダリング, 登攀支援, 投影型拡張現実

1 はじめに

ボルダリングはスポーツクライミングの一種目であり、高さ4メートル程度の壁に取り付けられたホールドと呼ばれる突起物を、安全確保のためのロープなしで登攀する競技である。登攀するルートはルートセッターと呼ばれるルートの制作者によって設定され、ルートごとに使用可能なホールドが指定される。登攀者はスタートからゴールまで指定されたホールドのみを用いて登攀する。ボルダリングは筋力に加え、登攀中のバランスやホールドを保持する技術が重要となる競技である。また、設置されたホールドの種類や角度、ホールド同士の位置からルートの特徴を捉え、そのルートに適した動きを選択する思考力が必要な競技でもある。

ボルダリングは登攀に全身の複雑な動きを要求され、登攀中は身体が疲弊するため、登攀しながら最適な身体の動きを考えるのは困難である。そのため、ボルダリングにはオブザベーションという段階が存在する。オブザベーションにおいては、登攀者は登攀する前に使用するホールドを観察し、ゴールまでの手順や難所などを把握する。オブザベーション段階ではホールドの配置や向きから登攀時の動作を予測しなければならず、初心者において適切な動作を把握するのは難しい。また、一般的なボルダリングウォールにおいては決められたルート以外のホールドも設置されており、ルートとして使用するホールドの把握は難しく、初心者においてはオブザベーションに時間がかかってしまったり、登攀時にホールドを見失ってしまい事前に考えた登攀方法を実践できなかったりする。そのため、オブザベーション時および登攀時に支援情報を与えること

で、登攀に適切な動作の把握を促し、ホールドの視認性を向上させることが期待されている。

そこで本研究では、プロジェクションマッピングを用いてボルダリングウォール上にルートの視認と登攀手順の把握を促す支援情報を投影することで、ボルダリングにおける登攀の上達を支援することを目的とする。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、2節で関連研究について述べ、次に3節でシステム構成および支援情報について述べる。続いて4節でシステム実装について述べ、5節で支援情報を用いた被験者実験について述べる。最後に6節でまとめと今後の課題について述べる。

2 関連研究

本節では、ボルダリングにおける登攀支援に関連する研究について紹介し、本研究の位置付けを述べる。

2.1 ボルダリングの登攀支援に関する研究

Wiehrらは、クライミングのための協調訓練を支援するためのプロジェクタカメラシステムであるbetaCubeを提案した[1]。移動可能なプロジェクタカメラユニットにプロジェクタカメラ自己較正インタフェースを備えており、任意のボルダリングウォールに投影可能である。また、専用のアプリケーションを用いてスマートフォンの背面カメラの画像から任意のホールドを選択し、ボルダリングウォールから対応するホールドを検出しハイライトする機能や、ボルダリングウォールから登攀者を抽出し、登攀動作を記録および再生する機能を実装している。このシステムを用いることで、ルートや実物大の登攀動作を壁面に直接投影できる。Kosmallaらは、プロジェクタまたはヘッドマウントディスプレイを用いたクライミングのためのビデオ記

*1 大阪大学大学院情報科学研究科

*2 大阪大学サイバーメディアセンター

*3 京都大学医学部附属病院

録と再生システムを提案した [2]. インストラクタの実物大の登攀映像をプロジェクタにより投影する手法, インストラクタの登攀時の 3 人称視点映像をプロジェクタにより投影する手法, インストラクタの登攀時の 3 人称視点映像を Google Glass により提示する手法を比較する実験を行った結果, 実物大の映像投影が最も好まれることを明らかにした. Liljedahl らは, 半透明のホールドに手や足が触れると反応するセンサと LED が取り付けられ, さらに音声による情報提示も可能となる Digiwall を開発し, このウォールをインタフェースとして用いたゲームを応用例として挙げている [3].

2.2 関連研究のまとめと本研究の位置付け

Wiehr らにより提案された betaCube は, システムを用いた訓練の効果については述べられていない. 一方で Kosmalla らは, 複数種類のデバイスによる登攀映像提示を比較した結果, 実物大の映像を投影する手法が最も好まれたと述べている. これらとは異なるアプローチとして Liljedahl らにより提案された Digiwall は, クライミングウォールやホールドそのものにセンサや提示装置を設置する必要があるため, 既存のクライミングウォールおよびルートに適用するのは困難である. そこで本研究では, プロジェクションマッピングを用いた三種類のハイライト手法を提案し, これらの手法を比較検討することで, 登攀支援における最適な可視化方法を明らかにする.

3 システム構成および支援情報

本節では, プロジェクションマッピングを用いたボルダリング支援システムと, 提示される支援情報の詳細について述べる.

3.1 プロジェクションマッピングによる支援

本研究では, プロジェクションマッピングを用いて登攀を支援するための情報を提示する. そこで, ボルダリングウォールへ支援情報を投影する提案システムの概念図を図 1 に示す. 本システムでは, 任意のボルダリングウォールへのプロジェクションマッピングを行うために, RGB カメラおよび深度センサを用いて投影情報の位置に対する校正を行う.

3.2 登攀を支援するための情報の可視化方法

本稿では, プロジェクタにより提示される支援情報として, 以下に示す三種類の可視化方法を用いた.

- 円状投影物によるホールドハイライト
- 線状投影物によるホールドハイライト
- 上記二種のハイライトの併用

それぞれの詳細について以下に述べる.

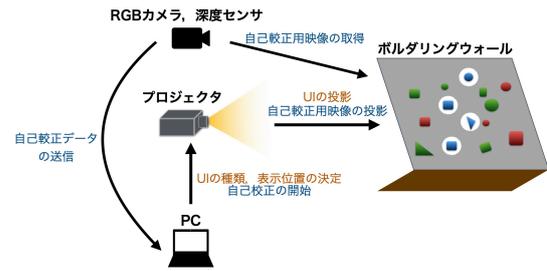


図1 システム概念図

円状投影物によるホールドハイライト 円状の投影物によるホールドのハイライト (以下, 円状ハイライト) の例を図 2(a) に示す. ルートで使用するホールドを白色の円状ハイライトにより強調することで, オブザベーション時にホールドを把握し, 登攀時にもホールドを見失う事象を減らすことができると考える.

線状投影物によるホールドハイライト 線状の投影物によるホールドのハイライト (以下, 線状ハイライト) の例を図 2(b) に示す. ルートのホールドを登攀者が使用する四肢に対応した四色の線で結んでいる. 使用するホールドの明確化に加え, どのような動きで登攀するかを示している.

円状ハイライトと線状ハイライトの併用 円状ハイライトと線状ハイライトの併用によるホールドのハイライトの例を図 2(c) に示す. 円状ハイライトによりホールドの視認性を上げるとともに, 線状ハイライトにより登攀動作の把握がしやすくなると考える.

4 システム実装

本節では提案する支援情報の評価のために実装したシステムについて述べる.

4.1 プロジェクタカメラシステム

実装したシステムを図 3 に示す. 幅 40cm, 高さ 20cm, 奥行き 30cm のオープンラックを 2 段積み重ねて固定し, オープンラックの下部にプロジェクタ (BenQ MW632ST), 上部に RGB カメラおよび深度センサ (Microsoft Kinect V2) を固定した. 下側のオープンラックには 3D プリンタで制作した土台を取り付け, プロジェクタの投影角度を調整した.

4.2 プロジェクタカメラキャリブレーション

プロジェクタカメラキャリブレーションには Microsoft RoomAlive toolkit [5] を使用した. これは, 水平方向と垂直方向のグレイコードパターンをプロジェクタから投影し, パターンを RGB カメラで撮影することでプロジェクタカメラを校正するツールである [4]. キャリブレーション精度を評価するため, 再投影誤差を計測した. 深度センサにより観測されたボルダリン

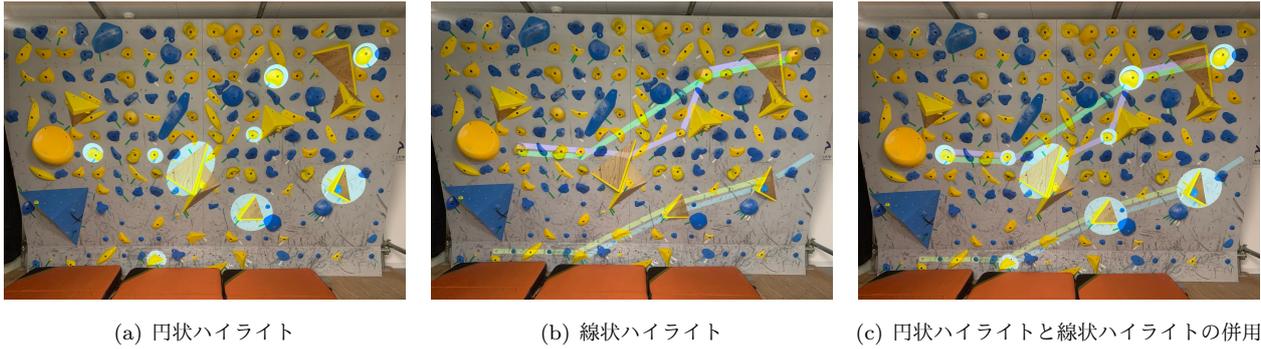


図2 提案する支援情報



図3 プロジェクタカメラシステム

グウォール上のボルト穴の位置に × 印を投影し、鮮明に投影された × 印と実際のボルト穴の距離を計測した。計測を2回行って得られた平均誤差は5.64mm、標準偏差は2.95mmであった。この精度は、実験に用いられるルートに設置された直径105mm程度のホールドに直径155mmの支援情報を投影するために十分な精度と考えられる。

4.3 プロジェクションマッピング

プロジェクションマッピングにはUnityおよびMicrosoft RoomAlive toolkit[5]を使用した。Microsoft RoomAlive toolkit および深度センサを用いて、ホールドを含めたボルダリングウォール全体の三次元形状モデルを取得する。その後、前述のキャリブレーション結果をもとにUnityにボルダリングウォールの三次元形状モデルを配置する。Unityに配置されたボルダリングウォールの三次元形状モデルの支援情報を投影したい位置に支援情報を配置することで、現実のボル

ダリングウォールに支援情報を投影することが可能となる。

5 実験

本節では提案手法の有用性を検討するために行った被験者実験の結果について述べ、結果に対して考察する。

5.1 実験内容

本実験は、提案する三種類の可視化方法について効果を比較することを目的として行った。実験に用いられるボルダリングウォールは研究施設の室内に設営された。

支援情報の可視化方法として、前述の通り円状ハイライト、線状ハイライトおよび円状ハイライトと線状ハイライトの併用の三種類に、対照実験として支援なしを加えた計四種類を使用し実験を実施した。ルートとしてAからDの4種類を用意した。なお、各ルートはルート間での難易度の差が生じないように専門家により設定された。また、ルール確認用のルートはこれらとは別に用意した。

5.2 被験者

被験者は18歳から25歳の男女32名であり、内訳は男性23名、女性9名であった。被験者の身長は146cmから175cmの範囲に分布し、ボルダリング経験は1回目(本実験が初めての経験)が20名、2回目が4名、3回目が2名、4回以上が6名であった。

5.3 実験手順

最初に被験者は実験内容について説明を受け、さらにボルダリングの基本的なルールの説明、オブザベーションについての説明、本実験で使用するハイライト手法について説明を受けた。その後、被験者はルール確認用のルートを登攀し、ボルダリングのルールを確認した。被験者はボルダリングのルールを十分把握した後で、ルートAからルートDの4種類のルートそれぞれに対して、「登攀」と「休憩」を行った。なお、公平性を保つため、各手法を適用するルートはラテン

方格を用いて設定された。「登攀」においては、被験者はオブザベーションと登攀を3分間自由に行えるが、最初の登攀前のオブザベーションだけはハイライトが視認できるように、実験者が指定した位置に立って行うこととした。

「休憩」においては、被験者は直前の「登攀」で用いた手法についてアンケートに回答した。これらを交互に繰り返し、全4回の「登攀」を終えた後に実験後アンケートに回答し、実験終了とした。

5.4 アンケートの質問項目

各ルート登攀直後に実施したアンケートの質問項目を表1に示す。被験者は質問項目それぞれについて、全く賛成できないを1、非常に賛成できるを5とした5段階のリッカート尺度に基づいて回答した。Q1-1からQ1-4までは全登攀時、Q1-5からQ1-8はハイライトを使用して登攀した場合に回答した。

実験後アンケートの質問項目を表2に示す。被験者はQ2-1については全く賛成できないを1、非常に賛成できるを5とした5段階のリッカート尺度に基づいて回答した。また、Q2-2およびQ2-3については、1位から4位まで完全順位法で回答した。

5.5 実験結果

各ルート登攀直後に実施したアンケートの結果を図4に示す。Q1-1からQ1-4に対しWilcoxonの順位和検定を行った結果、全ての項目において支援なしとその他の支援情報に有意差が認められた($p < .01$)。また、Q1-1については円状ハイライトと線状ハイライト($p < .01$)、併用と線状ハイライト($p < .05$)に有意差が認められた。Q1-3については、円状ハイライトと線状ハイライトに有意差が認められた($p < .05$)。Q1-4については、併用と円状ハイライトに有意差が認められた($p < .05$)。Q1-5からQ1-8に対しWilcoxonの順位和検定を行った。Q1-5については円状ハイライトと線状ハイライト($p < .01$)、併用と線状ハイライト($p < .01$)に有意差が認められた。Q1-6については円状ハイライトと線状ハイライトに有意差が認められた($p < .01$)。

実験後アンケートの結果を図5、6および7に示す。Q2-1については1名が無回答であった。Q2-2の回答

表1 各ルート登攀直後のアンケートの質問項目

Q1-1	オブザベーション時にホル드의把握がしやすかった
Q1-2	登ってる最中に、次に使用するホル드의把握がしやすかった
Q1-3	登ってる最中にホルドを見失うことはなかった
Q1-4	どうしたら登れるのかわかりやすかった
Q1-5	エフェクトを使用することにより、ホルドが見やすかった
Q1-6	エフェクトの色は視認しやすかった
Q1-7	エフェクトにより楽に登れたと感じた
Q1-8	将来的に使ってみたいと感じた

についてWilcoxonの順位和検定を行った結果、各手法において有意差が認められた($p < .01$)。またQ2-3の回答についてもWilcoxonの順位和検定を行ったところ、ルートAとルートC($p < .05$)、ルートAとルートB($p < .01$)およびルートAとルートD($p < .01$)において有意差が認められた。

5.6 考察

まず、被験者からのコメントについて述べる。円状ハイライトと線状ハイライトの併用について、「どのようなルートで登ったら良いのか全くわからなかったので、円状と線状両方のハイライトがあるのはわかりやすかった」「どのホールドをどんなふうに使えば良いのかがわかるので円状+線状が1st」「円状のハイライトと線状のハイライトがあると使うホールドだけでなく道筋もわかった」「円状のと線状のハイライトの組み合わせは双方のいいとこ取りをしていたので一番よかった」といったコメントがあり、分かりやすさを評価する被験者が目立った。一方で円状ハイライトと線状ハイライトの併用については、「ごちゃごちゃしていた感じがした」「少し分かりづらかった」といったような、視認性の悪さを指摘するコメントもあった。

次に、円状ハイライトについては、「円状のエフェクトはオブザベーションでも実践中も見やすかった」「円状のものが一番脳で理解しやすく円状のホルドの位置情報だけでかなり難易度が下がったように感じた」「円状のハイライトは使用できるホルドの視認性が良く、ホールドを見失うことはなかった」等、ホルドの把握しやすさについて多く言及されていた。

最後に、線状ハイライトについては、「線状のハイライトは、色が似ていて手足の識別が難しかった」「線状のハイライトの色がもう少し濃く、色の違いが分かりやすかったらより見やすいと感じた」「線状より円状の方が良いと感じた理由は、線の場合は何本もあってすこしごちゃごちゃしたから」と、視認性の悪さを指摘するコメントが見られた。また、「円状ハイライト以外は使用ホールド以外もライトアップされており、使用ホールドを認識しづらかった」「線状だけだと線上のどのホルドが使えるか分かりにくかった」「線状だけだと線上にある他のホルドと混じって分かりにくかった」というように、線状のハイライトが線の上のホルドもハイライトしてしまう結果、使用するホルドの理解を妨げているというコメントもあった。さらに、「ハイライトが自分の影と重なって見づらい」

表2 実験後アンケートの質問項目

Q2-1	部屋の暗さは気にならなかった
Q2-2	体験した手法について、良かった順に教えて下さい
Q2-3	課題の難易度を難しかった順で教えてください

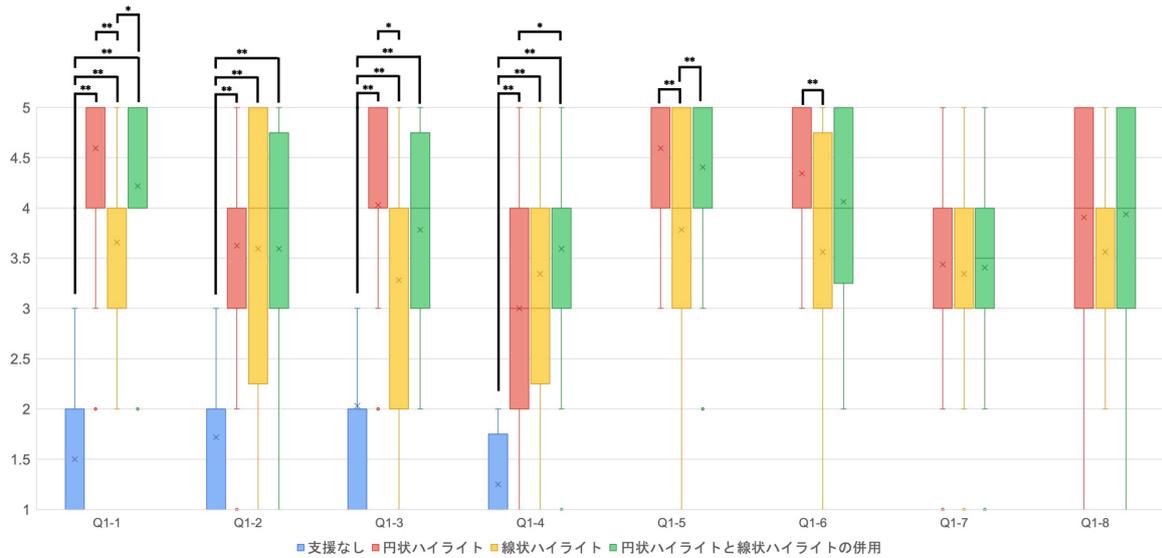


図4 各ルート登攀直後のアンケート結果

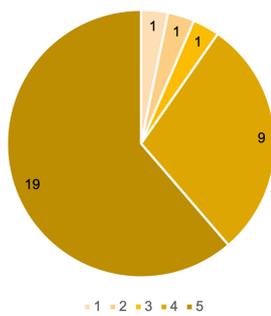


図5 Q2-1のアンケート結果

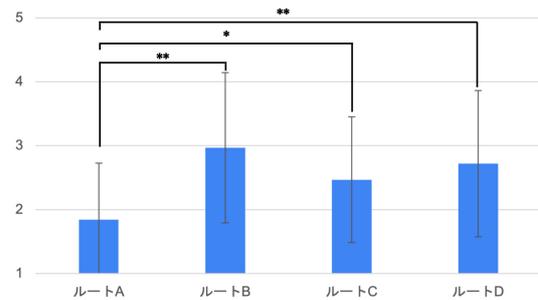


図7 Q2-3のアンケート結果

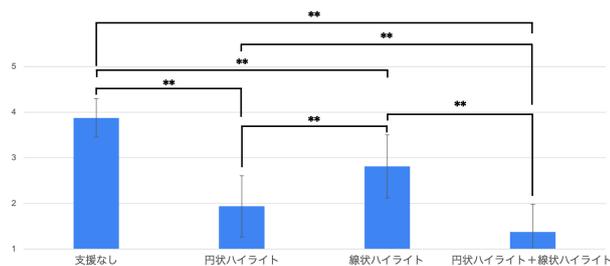


図6 Q2-2のアンケート結果

「ハイライトが自身の影で登り始めると隠れてしまい困った」「線状のハイライトで順序も大体わかるが、自分の影で線が途切れるので、円状のハイライトよりは見にくく感じた」「線状のハイライトは導線が分かりやすかったが線が自分の体で隠れてしまうことがあり、たびたびホールドを見失う事があった」、エフェクトが被験者の身体で遮蔽される点を指摘するコメントも複数あった。

続いて、実験結果から明らかになった支援情報の改善点について述べる。Q2-2の結果、円状ハイライト

と線状ハイライトの併用が有意に好まれていることがわかった。一方で、視認性の悪さについても指摘された。これについては、線状ハイライトの視認性の悪さに起因するものも多いとコメントから考えられる。また、Q1-5においても、線状ハイライトは他の2つの手法と比べ有意に低い結果となっている。線状ハイライトの視認性を低下させる原因と指摘されている、線状ハイライトの色の分かりにくさについては、解決策として登攀環境の照明を暗くすることが挙げられる。Q2-1のアンケート結果では平均4.4という評価になっているが、これは登攀時の安全性の観点から好ましくない。より現実的な解決策として、輝度の高いプロジェクタを使用することが挙げられる。実験で使用したプロジェクタの輝度は3200 lmであるが、より輝度の高いプロジェクタを使用することで線の色の視認性が上がる可能性がある。また、線状ハイライトにおいて使用可能なホールドが分かりにくい問題については、線を直線ではなく曲線にすることや、線の形を矢印形や三角形にして線の始点と終点を明確にすることで、使用可能なホールドを明確にできる可能性がある。

最後に、支援情報が身体で遮蔽される問題については、いくつかの解決策を提案している研究が存在している。Kajastilaらは、遮蔽による問題は足元のホールドが悪く、一般的に横向きや下向きに登るときのみ起こると報告している [7]。また、この問題について複数のプロジェクタを使用して遮蔽部分にもエフェクトを投影する、遮蔽された領域を検出し遮蔽外へ避けさせるような表示を投影する、投影物を手にのみ使用するという解決策を提案している。また、エフェクト遮蔽時に視覚以外のインタラクションを用いる方法が考えられる。視覚以外のインタラクションを用いる例として、クライミングシューズに装着したデバイスから足にかかる圧力を測定し、一定値を下回ると足に触覚フィードバックを与えるシステム [8] や、手首に装着し、振動、聴覚、視覚フィードバックを与えるシステム [9] などが挙げられる。

6 おわりに

本研究ではボルダリングにおける登攀上達のために、プロジェクションマッピングを用いたシステムを提案した。また、支援情報の可視化方法として、円状ハイライト、線状ハイライト、円状ハイライトと線状ハイライトの併用を提案し、実験により比較した。その結果、円状ハイライトと線状ハイライトの併用が有意に好まれていることがわかった。一方、支援情報の視認性の悪さや、投影が身体に遮蔽されるなどの問題があることがわかった。

今後の課題として、視認性を向上させるために、線状ハイライトの形状の改善が挙げられる。また、身体による投影の遮蔽を解決するために、複数台のプロジェクタによる支援情報の投影や、聴覚情報や触覚情報といった視覚以外の情報を用いた支援などが考えられる。

参考文献

- [1] Frederik Wiehr, Florian Daiber, Felix Kosmalla, Antonio Krüger: betaCube – Enhancing Training for Climbing by a Self-Calibrating Camera-Projection Unit; Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 1998–2004 (2016.may)
- [2] Felix Kosmalla, Florian Daiber, Frederik Wiehr, Antonio Krüger: ClimbVis — Investigating In-situ Visualizations for Understanding Climbing Movements by Demonstration; Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, 270–279 (2017.october)
- [3] Mats Liljedahl, Stefan Lindberg, Jan Berg: Digi-wall: an interactive climbing wall; Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology, 225–228 (2005.june)
- [4] Brett Jones, Rajinder Sodhi, Michael Murdock, Ravish Mehra, Hrvoje Benko, Andrew Wilson, Eyal Ofek, Blair MacIntyre, Nikunj Raghuvanshi, Lior Shapira: Roomalive: Magical experiences enabled by scalable, adaptive projector-camera units; Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, 637–644 (2014.october)
- [5] GitHub - microsoft/RoomAliveToolkit. <https://github.com/microsoft/RoomAliveToolkit>, (Accessed on 12/15/2021)
- [6] クライミング人気、急上昇 愛好者 60万人 東京五輪も後押し (1/2 ページ) - 産経ニュース . <https://www.sankei.com/article/20190527-3LU6MJVLGBIZTPVYDS2ZRADRM/>, (Accessed on 12/16/2021)
- [7] Raine Kajastila, Perttu Hamalainen: Augmented climbing: interacting with projected graphics on a climbing wall, CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 1279–1284 (2014.april)
- [8] Corinna Feeken, Merlin Wasmann, Wilko Heuten, Dag Ennenga, Heiko Müller, Susanne Boll: ClimbingAssist: direct vibro-tactile feedback on climbing technique; Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, 57–60 (2016.september)
- [9] Felix Kosmalla, Frederik Wiehr, Florian Daiber, Antonio Krüger, Markus Lochtefeld: ClimbAware: Investigating Perception and Acceptance of Wearables in Rock Climbing; Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1097–1108, (2016.may)