

視覚障害者のための触れる視野ガイドと4台のカメラを用いた 3D プリントモデルの触察支援

吉年 杏将[†] 高橋 敬^{††} 南谷 和範^{†††} 渡辺 哲也^{††††} 岩村 雅一[†]

[†] 大阪公立大学大学院情報学研究科, 〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

^{††} 大阪府立大学大学院工学研究科, 〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

^{†††} 大学入試センター 研究開発部, 〒153-8501 東京都目黒区駒場 2-19-23

^{††††} 新潟大学工学部, 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

E-mail: [†]sd24070v@st.omu.ac.jp, ^{††}kei.takahashi.implab@gmail.com, ^{†††}minatani@rd.dnc.ac.jp,

^{††††}t2.nabe@eng.niigata-u.ac.jp, ^{†††††}masa.i@omu.ac.jp

あらまし 視覚障害者は、写真や図表といった視覚的表現へのアクセスが困難であるため、触察による形状および形態の理解は不可欠である。触覚グラフィックスや 3D プリントモデルは情報へのアクセスにおける代替手段を提供するものの、触察のみでは包括的な理解を得ることが困難な場合が多い。先行研究である Talkit は、スマートフォンと AR マーカーを用いて、ユーザーが 3D モデル上で触れている領域に対する音声説明を提供することを可能にした。しかし、Talkit には 2 つの重大な制約が存在する。すなわち、3D モデルがカメラの視野からはずれてしまうこと、および探索中にマーカーが隠れることにより、フィードバックの喪失とユーザーの混乱を招くという問題である。本研究では、折りたたみ式三脚に 4 台のカメラを設置することで、これらの課題に対処した改良システムを提案する。本システムにより、ユーザーは三脚の脚部に触れることでカメラの視野範囲を認識でき、また複数の視点から 3D モデルおよびユーザーの指先を捉えることで死角を低減できる。本システムは、3D プリントモデルのアクセシブルな探索を目的としたタッチベース音声注釈システムにおいて、堅牢性および操作性の向上を実現している。

キーワード 触察, コンピュータビジョン, 3D プリントモデル, 視覚障害者

Supporting Tactile Exploration of 3D Printed Models Using A Tactile Field-of-View Guide and Four Cameras for People with Visual Impairments

Kyosuke YODOSHI[†], Kei TAKAHASHI^{††}, Kazunori MINATANI^{†††}, Tetsuya WATANABE^{††††}, and
Masakazu IWAMURA[†]

[†] Graduate School of Informatics, Osaka Metropolitan University, 1-1 Gakuencho, Naka, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Naka, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

^{†††} Research Division, National Center for University Entrance Examinations, 2-19-23 Komaba, Meguro-ku, Tokyo
153-8501, Japan

^{††††} Faculty of Engineering, University of Niigata, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan

E-mail: [†]sd24070v@st.omu.ac.jp, ^{††}kei.takahashi.implab@gmail.com, ^{†††}minatani@rd.dnc.ac.jp,

^{††††}t2.nabe@eng.niigata-u.ac.jp, ^{†††††}masa.i@omu.ac.jp

Abstract Understanding shapes and forms through tactile exploration is essential for people with visual impairments, as visual representations such as photographs and diagrams are often inaccessible. While tactile graphics and 3D-printed models offer alternative means to access such information, tactile exploration alone is often insufficient for comprehensive understanding. Prior work, such as Talkit, enables users to receive verbal descriptions of the regions they are touching on 3D models using a smartphone and AR markers. However, Talkit suffers from two major limitations: the 3D model may move out of the camera's view, and the markers may be occluded during exploration, leading to loss of feedback and user confusion. In this research, we present an improved system that addresses these issues by mounting four cameras on a collapsible tripod. This configuration allows users to remain aware of the camera's field of view by touching the tripod legs and reduces blind spots by capturing the model and the user's fingers from multiple angles. The system improves the robustness and usability of touch-based verbal annotation systems for accessible exploration of 3D-printed objects.

Key words tactile exploration, computer vision, 3D printed models, visual impairments

1. はじめに

形状や形態は、言語のみでは完全に伝達することが困難な非言語情報の一種である。晴眼者は写真や図表を利用してこうした情報を理解するが、これらの視覚的表現は視覚障害者にとってアクセスが難しい場合が少なくない。これに対処するため、触覚グラフィックス (例：[1]～[7]) や 3D モデル (例：[8]～[10]) が、触覚を通じた形状情報への代替的なアクセス手段として広く用いられている。

特に、近年の 3D プリント技術の進歩と普及により、視覚障害者が 3D プリントモデルを触って理解することが容易になってきた [11], [12]。しかし、触覚で得られる情報が限られるため、対象物のより包括的な理解を促進するためには、音声説明による補完が不可欠である。触覚中のユーザーの質問に晴眼者が答える場合は、適切な音声説明が得られるかもしれないが、そのような支援が常に利用可能とは限らず、また視覚障害者が独立性の観点からは他者に頼らずに触覚できることが望ましい。そのため、触覚中に音声情報を提供することで自律的な探索を支援するシステムが提案されてきた (例：[13]～[15])。

その中から、本研究では Shi らが提案した Talkit [13], [14] に注目する。これは、3D プリントモデル上で触れている領域の説明を音声で読み上げるスマートフォンベースのアプリケーションである。Talkit は、ユーザーがスマートフォンのカメラの前で触察すると、3D モデルに取り付けられた AR マーカーによってモデルの姿勢を推定するとともに、赤色の指先マーカーによって指がモデルに触れている位置を検出する。ユーザーが赤色マーカーを装着した指で 3D モデル上の注釈付き領域に触れると、対応する説明が音声で読み上げられる。Talkit と併せて、3D モデリングソフトウェアである Blender^(注1)を用いて 3D モデルにテキスト説明を注釈付けするツールとして Markit が提案された。これらの注釈は Talkit によって音声で読み上げることが可能であり、アクセシブルな 3D モデル探索の障壁を低減している。

しかしながら、Talkit には 2 つの主要な制約が存在する。第一に、スマートフォンのカメラの画角の狭さから、探索中に 3D モデルが意図せずカメラの視野から外れる場合がある。カメラの視野範囲を知覚することが困難な視覚障害者にとっては、原因が分からないまま何も読み上げられない状態が続くため、ユーザーインターフェースに課題がある。第二に、3D モデル上の AR マーカーや指先マーカーが、ユーザーの手や 3D モデル自体によって遮蔽され、カメラに写らない場合がある。この場合も、ユーザーはその原因を認識できないまま何も読み上げられない状態が続く、不要な混乱を招く。

これらの課題に対処するため、本稿では、Talkit の制約を克服する改良システムを提示する。図 1 に示すように、本システムは三脚に 4 台のカメラを設置し、その脚部で囲まれた領域内での触察を支援する。Talkit の第一の課題に対しては、三脚を導入することで、視覚障害者が探索中に手や腕で三脚の脚部に



図 1: 提案手法の概要。本システムの目的は、視覚障害者が触察のみでは理解困難な情報を補完する音声説明を取得し、対象物への理解を深めることを可能にすることである。本システムは三脚に 4 台のカメラを設置し、三脚の脚部で囲まれた領域内での触察を支援する。ユーザーは探索中に手や腕で脚部に触れることで、カメラの視野範囲を認識することができる。

触れることにより、カメラの視野範囲を知覚可能とした。Talkit の第二の課題に対しては、4 台のカメラを用いることで死角を最小化し、指先の遮蔽が生じる可能性を低減した。なお、三脚は折りたたみ式であり、未使用時にはコンパクトに収納可能である。

2. 実装

2.1 設定

提案システムは、PC と 4 台のカメラを搭載した三脚で構成される。PC には MacBook Pro を使用した。Talkit ではスマートフォンを用いていたが、スマートフォンでは 4 台のカメラを同時に接続できないため、PC に変更した。三脚には、Amazon Basics の製品を使用し、カバーを取り外した 4 台のウェブカメラ (EMEET 社製 HD Webcam eMeet C960) を取り付け付けた。三脚の高さは 77 cm、脚部間の距離は底面で約 57 cm である。4 台のカメラはすべて PC に接続されている。

提案システムのソフトウェアは、Talkit のソースコードを参照しつつ、Python で新規に実装した。AR マーカーの検出には、OpenCV が提供する ArUco マーカーを使用し、指先の検出には MediaPipe を採用した。再実装に伴い 3D モデルへの再注釈付けが必要となったが、Markit は我々の環境では期待通りに機能しなかったため、[15] の著者のご厚意により、注釈付けツールを提供していただいた。

2.2 複数のカメラによるタッチ検出

図 2 はシステム動作中のスクリーンショットであり、4 台のカメラで撮影された画像で構成される。検出された右手人差し

(注1) : <https://www.blender.org/>

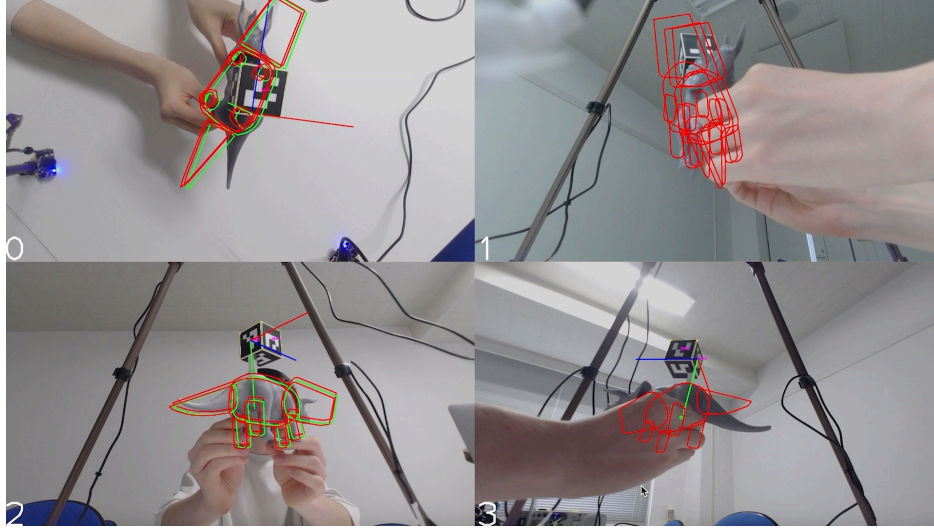


図 2: 4 台のカメラで撮影された画像から構成される本システムのスクリーンショット。検出された右手人差し指の指先は緑色の円で示される。緑色で輪郭が描かれた領域は、当該カメラによって直接推定された注釈付き領域を示す。一方、赤色で輪郭が描かれた領域は、他のカメラによって推定され、当該カメラの映像に投影された注釈付き領域を示す。

指の指先は、緑色の円で示される。緑色と赤色の形状は、検出された AR マーカーの姿勢に基づいて計算された 3D モデル上の注釈付き領域の輪郭を表す。指先がこれらの輪郭領域のいずれかの中にあると判断されると、システムは対応する注釈への接触として認識し、関連付けられた音声説明を読み上げる。指先が複数の注釈付き領域と重なる場合、システムは z 軸の値に基づいてカメラに最も近い領域を選択する。

赤色で輪郭が描かれた領域は、他のカメラによって推定され、現在のカメラの視野に投影されたものである。この投影は、カメラ間の相対位置を維持することで実現される。すなわち、AR マーカーが複数のカメラで検出された場合、それらの相対的な姿勢が計算され保持される。その結果、指先と 3D モデルが異なるカメラに写っている場合でも、システムは接触を検出することが可能となり、遮蔽による悪影響が軽減される。これは複数カメラ間の外部パラメータ（すなわち回転と並進）を計算しておくことで実現した。AR マーカーの姿勢推定にはフレーム間の変動があり、モデルの位置姿勢が正しく求まらないことが少なくない。そのため、複数フレームにわたる推定パラメータの中央値を採用することで安定性を向上した。カメラ間キャリブレーションにおいても同様に、複数フレームにわたる外部パラメータの中央値を採用することで安定化を図った。

3. 予備実験

3.1 実験概要

本研究では、複数人の視覚障害者を招いて提案手法を評価する実験が時間的に実施できなかったため、盲目の著者を実験参加者として実験 1 および実験 2 を予備実験として実施した。本実験の目的は以下の 3 点である。第一にカメラの視野範囲の認識を補助する枠組みとしての三脚の有用性の検証、第二に死角を低減するための複数カメラの効果の検証、第三に視覚障害者が本システムを単独で使用可能であるかの検証である。

3.2 実験 1

3.2.1 方法

表 1 に示す 3 つの手法を用いて 3D モデルの触察を行った。手法 1 は Talkit の機能を Web カメラで再現した擬似 Talkit である。3D モデルは一度触察すると形状を理解してしまうため、同じモデルを 2 回以上使用することは避け、手法毎に異なるモデルを用いる事とした。本実験で使用した 3D モデルは、手法 1 では戦車（図 4(a)）、手法 2 では恐竜（図 4(b)）、手法 3 ではカタツムリ（図 4(c)）であった。実験開始前に、各手法の使用方法について説明を行った。各手法の実験前には、3D モデルの形状理解に関する 3 つの質問を行い、参加者には触察時の音声説明の中からその回答を得るように依頼した。触察時間は最大 3 分としたが、途中で質問の回答が分かった場合はそこで触察を終了してもらった。

各手法の評価として、全フレーム中における指と 3D モデルの両方を捉えることができたフレームの割合を算出し、三脚の有用性および複数カメラの効果を検証した。さらに手法 3 では、指と 3D モデルが捉えられているフレームのうち、それらが別々のカメラに写っているフレームの割合を算出することで、複数カメラによる効果を別の観点から評価した。触察終了後、各 3D モデルに関する 3 つの質問を行い、参加者の 3D モデルに対する理解度を評価した。

3.2.2 結果

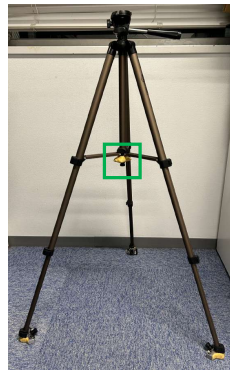
各手法における指と 3D モデルの検出状況を表 2 に示す。検出状況として以下の 5 つの項目を算出した。全フレームを母数とする指標として、(1) 指のみが検出されたフレームの割合、(2) 3D モデルのみが検出されたフレームの割合、(3) 指と 3D モデルの両方が検出されたフレームの割合を算出した。さらに手法 3 では、指と 3D モデルの両方が検出されたフレームを母数として、(4) 指と模型が同一カメラに写っているフレームの割合、(5) 指と模型が別々のカメラに写っているフレームの割

表 1: 実験で用いた 3 つの手法

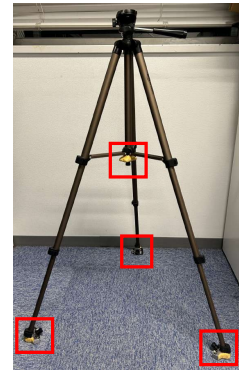
手法の種類	三脚の有無	Web カメラの個数
手法 1: 擬似 Talkit (図 3(a))	なし	1
手法 2: 三脚一体型擬似 Talkit (図 3(b))	あり	1
手法 3: 三脚一体型 4 カメラ触察支援システム (提案手法) (図 3(c))	あり	4



(a) 手法 1: 擬似 Talkit

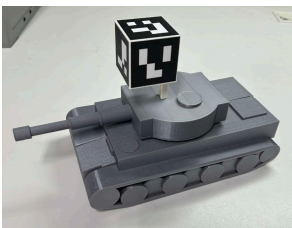


(b) 手法 2: 三脚一体型擬似 Talkit (緑枠のカメラ)

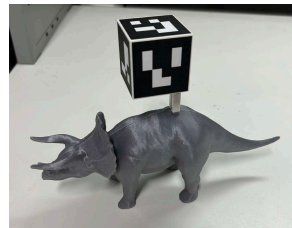


(c) 手法 3: 三脚一体型 4 カメラ触察支援システム (提案手法) (赤枠のカメラ)

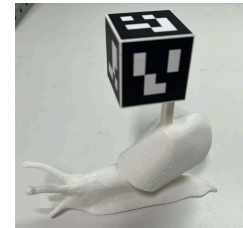
図 3: 実験で用いた 3 つの手法



(a) 戦車



(b) 恐竜



(c) カタツムリ

図 4: 実験で用いた 3D モデル

表 2: 各手法における指および 3D モデルの検出状況. 全フレームを母数とする指標として, (1) 指のみが検出されたフレームの割合, (2) 3D モデルのみが検出されたフレームの割合, (3) 指と 3D モデルの両方が検出されたフレームの割合を算出した. さらに手法 3 では, 指と 3D モデルの両方が検出されたフレームを母数として, (4) 指と模型が同一カメラに写っているフレームの割合, (5) 指と模型が別々のカメラに写っているフレームの割合を算出した.

手法 (3D モデル)	(1) 指のみ (%)	(2) 3D モデルのみ (%)	(3) 指と 3D モデルの両方 (%)	(4) 同一カメラ (%)	(5) 別カメラ (%)
手法 1 (戦車)	88.68	100.00	88.68	-	-
手法 2 (恐竜)	99.87	100.00	99.87	-	-
手法 3 (カタツムリ)	74.66	97.18	71.85	87.31	12.69

合を算出した.

手法 1 では指と 3D モデルの両方を検出した割合が 88.68 %, 手法 2 では 99.87 %, 手法 3 では 71.85 % であった. また, 手法 3 において, 別々のカメラに写っているフレームの割合は 12.69 % であった. また, 触察後に行った 3D モデルに関する質問への回答結果は, すべての手法において 3 問すべてに正答した. これにより, いずれの手法でも 3D モデルの特徴を十分に把握できたことが示された.

3.3 実験 2

3.3.1 方法

日常使用における実用性を評価するため, 三脚の収納性・展

開性の評価を行った. 参加者には三脚の展開作業 (収納状態から展開状態への移行) および収納作業 (展開状態から収納状態への移行) を実際に行ってもらい, 各作業に要する時間を計測した. これにより, 三脚を用いた手法が日常的な使用場面においてどの程度の時間的・身体的負担を伴うかを定量的に評価した.

3.3.2 結果

三脚の展開作業に要した時間は 35 秒, 収納作業に要した時間は 39 秒であり, 一連の作業全体では 74 秒 (1 分 14 秒) を要した. 本実験で使用した三脚は実験 1 で使用したものと異なり, 4 つのカメラとそのコードが付いていなかった. 今回実験参加者は三脚を回転させながら三脚の展開と収納を行ったが,

コードがある場合はこの方法では困難な可能性がある。そのため、本実験を行う際には、実験1で使用したのと同じ三脚を利用することが望ましい。

4. 考 察

手法1と手法2の比較から、三脚を用いることで指と3Dモデルの両方を検出できたフレームの割合が88.68%から99.87%へと大幅に向上した。手法1の検出率が88.68%と比較的高い値を示した要因として、手法1で使用したWebカメラの視野範囲がスマートフォンのカメラよりもかなり広いため、Talkitで想定されていた視野範囲の制約が本実験では顕在化しにくく、正面からの固定視点でも十分に指と3Dモデルを捉えることができていた可能性がある。これにより、手法1では想定よりも良好な結果が得られたと推測される。手法2を用いる事で手法1より検出率が向上した理由は、手法2では三脚の脚部によって囲まれた領域内で触察を行うことで、実験参加者は脚部に触れることでカメラの視野範囲を認識でき、フレームアウトを回避しながら安定した触察が可能になったことと考えられる。この結果は、三脚がカメラの視野範囲の認識を補助することで、検出率の向上に有効であることを示している。

しかしながら、本研究の主要な提案手法である手法3では、指と3Dモデルの両方が検出されたフレームの割合が71.85%と、手法1の88.68%および手法2の99.87%と比較して最も低い結果となった。この結果には、いくつかの要因が考えられる。第一に、本実験では各手法で使用した3Dモデルが異なっており（手法1：戦車、手法2：恐竜、手法3：カタツムリ）、この影響が検出率に反映されている可能性が考えられる。すなわち、3Dモデルの形状、サイズ、複雑さなどの違いにより、触察時の手の動きや指の位置が変化し、結果として検出率に差が生じた可能性である。本来であれば、複数の実験参加者に対して手法と3Dモデルの組み合わせを変えて、3Dモデルの違いによる影響を平準化する必要がある。しかし、今回は1名の参加者による予備実験であるため、3Dモデルの違いによる影響が直接的に結果に表れている可能性がある。したがって、手法間の検出率の差を純粋に手法の効果として解釈することには注意が必要である。第二に、手法3では4台のカメラを同時に起動させているため、システムの処理負荷が高く、動作が重くなった可能性である。これにより、処理遅延が生じ、特に動きの速い指の検出に失敗したフレームが増加した可能性が考えられる。第三に、手法1および手法2ではカメラが1台のみであるため、実験参加者がカメラに指や3Dモデルが写るように意識的に触察していた可能性がある。このような適応行動により、結果的に高い検出率が達成された可能性が考えられる。一方、手法3では三脚の脚部と複数カメラによって視野範囲が保証されているという安心感から、実験参加者がより自由に触察を行い、結果として手法3では一部のカメラで検出に失敗する場面が増加した可能性もある。

これらの要因を踏まえると、手法3の検出率の低さは複数カメラの効果そのものを否定するものではなく、システムの実装上の課題や実験条件の違いに起因すると考えられる。実際に、

手法3において指と3Dモデルが別々のカメラに写っているフレームが12.69%存在したことは、複数カメラが死角の補完に機能していることを示している。これは、単一カメラの視点では、手や指によって3Dモデルが遮蔽される場面において、複数カメラが補完的に機能していることを意味する。したがって、Talkitの第二の課題である遮蔽の問題に対し、複数カメラによる多角的な視点の確保は依然として有効な手段であると考えられる。

理解度の観点からは、すべての手法において質問に全問正答したことから、いずれの手法でも3Dモデルの形状や形態を十分に理解できたことが示された。これは、検出率に差があったにもかかわらず、最終的な理解度には大きな影響を与えなかったことを意味する。この結果は、ある程度の検出率が確保されていれば、視覚障害者は断片的な情報からも全体像を構築できる可能性を示唆している。

さらに、視覚障害者による単独使用の可能性についても検証できた。実験参加者は各手法の説明を受けた後、単独で触察を実施し、すべての質問に正答した。また、実験2では三脚の展開・収納作業を合計74秒で単独で完了できた。これらの結果から、適切な説明があれば、視覚障害者が本システムを単独で使用可能であることが示された。

ただし、本実験は1名の参加者による予備実験であり、結果の一般化には慎重を要する。特に、各手法で使用した3Dモデルが異なることによる影響を排除できていないため、手法の効果と3Dモデルの特性を分離して評価することができていない。

5. 結 論

本稿では、視覚障害者のための触察を支援する新規システムを提案した。本システムは、先行手法であるTalkitの2つの主要な制約、すなわち（1）触察中に3Dモデルをカメラの視野内に保持することの困難性、および（2）ARマーカーや指先マーカーの遮蔽による適切なフィードバックの阻害に対処するものである。第一の課題に対しては、カメラ構成を安定化させるだけでなく、ユーザーがカメラの視野範囲を知覚するための触覚的な手がかりとしても機能する三脚を導入した。第二の課題に対しては、三脚に4台のカメラを設置することで死角を低減し、3Dモデルとユーザーの指が異なるカメラに写っている場合でも接触検出を可能とした。

盲目の著者を実験参加者とした予備実験により、三脚によるカメラの視野範囲の認識の補助が検出率の向上に有効であること、複数カメラが死角の補完に機能すること、視覚障害者が本システムを単独で使用可能であることが示された。一方で、システムの処理性能や実験条件の不完全さによる影響も明らかになった。

今後の課題として、より多くの視覚障害者を対象としたユーザースタディを実施することで、本システムの効果をより正確に評価する必要がある。加えて、可搬性を向上させるため、現在の実装をMacBook ProからMac Miniへ移行することを計画している。

謝辞 3D モデルへの注釈付けツールを提供していただいた日本科学未来館の王 溪月博士に感謝いたします。本研究は、JST RISTEX「SDGsの達成に向けた共創的研究開発プログラム（ソリューション創出フェーズ）」JPMJRX21I5 の補助を受けて実施した。

文 献

- [1] Braille Authority of North America (BANA): “Tactile Graphics Standards and Guidelines 2022”, Braille Authority of North America (BANA) (2022). Accessed on 2025-06-24.
- [2] T. Way and K. Barner: “Automatic visual to tactile translation - part i: Human factors, access methods, and image manipulation”, *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, **5**, pp. 81 – 94 (1997).
- [3] T. Way and K. Barner: “Automatic visual to tactile translation. ii. evaluation of the tactile image creation system”, *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, **5**, pp. 95 – 105 (1997).
- [4] T. J. Ferro and D. T. V. Pawluk: “Automatic image conversion to tactile graphic”, *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS ’ 13*, ACM, pp. 1–2 (2013).
- [5] H. Yoon, B.-H. Kim, M. Mukhriddin and J. Cho: “Salient region extraction based on global contrast enhancement and saliency cut for image information recognition of the visually impaired”, **12**, 5 (2018).
- [6] A. Abdusalomov, M. Mukhiddinov, O. Djuraev, U. Khamdamov and T. K. Whangbo: “Automatic salient object extraction based on locally adaptive thresholding to generate tactile graphics”, **10**, 10, p. 3350 (2020).
- [7] K. Pakenaite, E. Kamperou, M. J. Proulx, A. Sharma and P. Hall: “Pic2tac: Creating accessible tactile images using semantic information from photographs”, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI ’ 24*, ACM, pp. 1–12 (2024).
- [8] T. Poon and R. Ovidia: “Using tactile learning aids for students with visual impairments in a first-semester organic chemistry course”, **85**, 2, p. 240.
- [9] A. C. Rule: “Tactile earth and space science materials for students with visual impairments: Contours, craters, asteroids, and features of mars”, **59**, 4, pp. 205–218.
- [10] A. C. Rule, G. P. Stefanich, R. M. Boody and B. Peiffer: “Impact of adaptive materials on teachers and their students with visual impairments in secondary science and mathematics classes”, **33**, 6, pp. 865–887.
- [11] E. Buehler, S. K. Kane and A. Hurst: “Abc and 3d: opportunities and obstacles to 3d printing in special education environments”, *Proceedings of the 16th international ACM SIGACCESS conference on Computers and Accessibility - ASSETS ’ 14*, ASSETS ’ 14, ACM Press, pp. 107–114.
- [12] S. K. Kane and J. P. Bigham: “Tracking @stemxcomet: teaching programming to blind students via 3d printing, crisis management, and twitter”, *Proceedings of the 45th ACM technical symposium on Computer science education, SIGCSE ’ 14*, ACM, pp. 247–252.
- [13] L. Shi, Y. Zhao and S. Azenkot: “Markit and talkit: A low-barrier toolkit to augment 3d printed models with audio annotations”, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM.
- [14] L. Shi, Z. Zhang and S. Azenkot: “A demo of talkit++: Interacting with 3d printed models using an ios device”, *Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ACM.
- [15] X. Wang, S. Kayukawa, H. Takagi and C. Asakawa: “Touchpilot: Designing a guidance system that assists blind people in learning complex 3d structures”, *The 25th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS ’ 23*, ACM, pp. 1–18.