

深度と輝度に基づく 2.5D レリーフによる視覚障害者向け触覚写真の表現力拡張

高石 康世[†] 南谷 和範^{††} 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

E-mail: [†]sl227951@st.omu.ac.jp, ^{††}minatani@rd.dnc.ac.jp, ^{†††}masa.i@omu.ac.jp

あらまし 写真は物語を伝え、記憶を保存し、自己表現するための強力な手段である。しかし、視覚障害者は写真コンテンツへのアクセスに大きな困難を抱えている。最近では Be My AI のような生成 AI ツールにより画像の言語説明へのアクセスが容易になりつつあるが、言語情報だけでは写真の持つ豊かな情報を十分に伝えることは困難である。触覚的な表現がその代替手段として注目されるが、従来の触図（通常は 2D の輪郭に基づくもの）は、表現力に限界がある。そこで本研究は、深度推定と輝度情報の両方を統合した写真からの 2.5D レリーフ生成手法を提案する。この手法により、奥行きを連続的な高さとして豊かに表現しつつ、文字や模様などの輝度値に基づく特徴も凹凸として再現でき、より豊かな触覚的表現を実現する。私たちは、視覚障害のある 12 名の参加者（全盲 6 名、弱視 6 名）を対象にユーザスタディを実施した。比較したのは、①2D の触覚写真、②深度のみの 2.5D レリーフ、③深度と輝度を組み合わせた 2.5D レリーフの 3 種類の触覚モデルである。また、ユーザの好みを分析するために、5 つの評価基準に基づいて階層分析法（AHP: Analytic Hierarchy Process）を適用した。その結果、深度情報と輝度情報を組み合わせることの有効性が示され、さらに、写真に触れる際のユーザの動機や経験が触察の仕方にもどのように影響をもたらすかについて考察した。

キーワード 視覚障害者, 写真, 2.5D レリーフ, 深度推定, 触察, 輝度

Expanding the Expressive Potential of Tactile Photography for People with Visual Impairments through a Depth- and Luminance-Based 2.5D Relief

Kosei TAKAISHI[†], Kazunori MINATANI^{††}, and Masakazu IWAMURA[†]

[†] Graduate School of Informatics, Osaka Metropolitan 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

E-mail: [†]sl227951@st.omu.ac.jp, ^{††}minatani@rd.dnc.ac.jp, ^{†††}masa.i@omu.ac.jp

Abstract Photographs are powerful tools for storytelling, preserving memories, and self-expression. However, people with visual impairments (PVI) face significant challenges in accessing photographic content. Recently, generative AI tools such as Be My AI have made it easier to obtain verbal image descriptions, yet language alone cannot fully convey the rich visual information that photographs contain. Tactile representation offers an alternative means of access, but traditional tactile graphics—typically based on 2D contours—are limited in expressiveness. To address this limitation, we propose a novel method for generating 2.5D reliefs from photographs by integrating depth estimation and luminance information. This approach allows continuous representation of depth while reproducing luminance-based features such as text and patterns as tactile variations, thereby achieving richer tactile expression. We conducted a user study with 12 participants with visual impairments (six who are blind and six with low vision), comparing three types of tactile models: ①2D tactile photographs, ②depth-based 2.5D reliefs, and ③depth–luminance-based 2.5D reliefs. To analyze user preferences, we applied the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on five evaluation criteria. The results demonstrated the effectiveness of integrating depth and luminance information, and further provided insights into how users' motivation and prior experience influence their tactile exploration and understanding of photographs.

Key words people with visual impairments, photograph, 2.5D relief, depth estimation, tactile exploration, luminance — 1 —



図 1: Yoon らによる触図 [1]. 顕著なオブジェクトのみを取り出して、元画像を単純化している。



図 2: Pakenaite らによる触図 [2]. オブジェクトを単純な形のアイコンに置き換え、画像の各領域を違うテクスチャで表すことで、煩雑さを抑制した触覚表現を実現している。



図 3: 絵画とその 2.5D レリーフ [3].

1. ま え が き

写真家 Destin Sparks は、“Photography is the story I fail to put into words”（「写真は私が言葉にできなかった残りの物語だ」）と述べている [4]。この言葉は、写真が言語を用いずに意味や感情を伝える、ユニークかつ強力な表現手段であることを端的に示している。写真は単なる視覚的記録にとどまらず、人が出来事や感情を共有するための重要な媒体として機能している。私たちの日常生活においても、写真は情報を伝え、思い出を残し、自己を表現し、他者と結び付くための欠かせない手段である。さらに、写真は時間の経過とともに記憶を呼び起こす手がかりとなり、懐かしさを喚起するだけでなく、個人が過去の出来事を思い返しながら自分の人生を振り返る助けとなる。また、デジタル化の進展によって、写真の社会的な役割はさらに大きなものとなっている。SNS やオンラインの交流の場を通じて写真を共有することは、自己を表現し、他者との関わりを築く上で重要になりつつある。人々は写真を介して自分の経験を他者と共有し、地理的な距離を越えて人とのつながりを広げ、関係を

深めている。しかし、このように写真が重要な役割を果たす一方で、写真が本来持つ豊かな情報を理解することは、視覚障害者にとって容易ではない。視覚障害者が写真にアクセスするための支援技術として、近年では、Be My AI [5] に代表される、生成 AI を用いて写真の内容を言葉で説明する技術が登場しているが、十分とは言えない。はじめに触れた Destin Sparks の言葉の通り、写真を言葉によって完全に説明することには難しい部分がある。言葉による説明だけでは、写真の中に含まれる質感や空間の奥行き、光の表情などの繊細な視覚情報を十分に伝えることは難しい。さらに、言葉での描写は情報を単純化してしまったり、説明者の主観が入り込んだりする可能性があり、視覚障害者が写真を深く理解し、楽しむ上での妨げとなることがある。

言葉による説明だけで写真を理解することが難しいのであれば、それを触覚的な情報で補うことは自然な発想である。その代表的な方法として図 1 や図 2 のような「触覚写真 (tactile photograph, 以下 TP)」が挙げられる^(注1)。これは、物体の輪郭など輝度の変化が大きい領域を紙面上で隆起させることにより、触覚的に形状を認識できるようにしたものである [1], [2], [6]～[9]。しかし、このような紙状の触覚媒体は平面上で一定の高さしか表現できないため、表現力に限界がある。その結果、これまでの研究では、視覚情報を単純化し、情報量を意図的に減らす方向に焦点が置かれてきた [1], [2], [8], [9]。実際、北米点字委員会 (BANA) の指針 [10] や Edman の代表的著書「Tactile Graphics」 [11] においても、情報量の多い写真は触覚表現の実用的範囲を超えると指摘されている。

TP に代わる手法として、本研究では図 3 のような 2.5D レリーフに注目する。2.5D レリーフとは、各領域の高さを奥行きに応じて変化させたものであり、観察者に近い部分を高く、遠い部分を低く表現する。例えば、米国 25 セント硬貨に刻まれたジョージ・ワシントンの浮き彫りがその例である。この手法は、二次元の TP と三次元モデルの中間に位置する表現形式である [12]。TP が形状を一定の高さの輪郭線などで表すのに対し、2.5D レリーフは高さの連続的な変化によって空間的な奥行きや細部を表現できる [13]。一方で、完全な三次元復元モデルのように見えない部分を推定することはなく、元の画像が持つ視覚的な制約を保ったまま立体化できる点が特徴である。これまで、2.5D レリーフは視覚障害者による美術作品の理解支援などに利用されてきたが [3]、従来の制作方法は多大な労力と費用がかかるため、その利用は限られていた。また、陰影の手がかりに基づく半自動生成手法 [14] も提案されているが、照明条件が一定でない写真に対しては精度が低く、信頼性に欠けるといった課題がある。このため、写真が社会的・個人的なコミュニケーションにおいて重要性を増しているにもかかわらず、2.5D レリーフの活用は依然として限定的である。

近年のコンピュータビジョン技術の進展により、写真から精

(注1)：本研究における触覚写真 (TP) とは、北米点字委員会 (BANA) の指針に定義された触図に必ずしも準拠しないものを含み、触察のために表面の一部を離散的に隆起させた写真を指す。

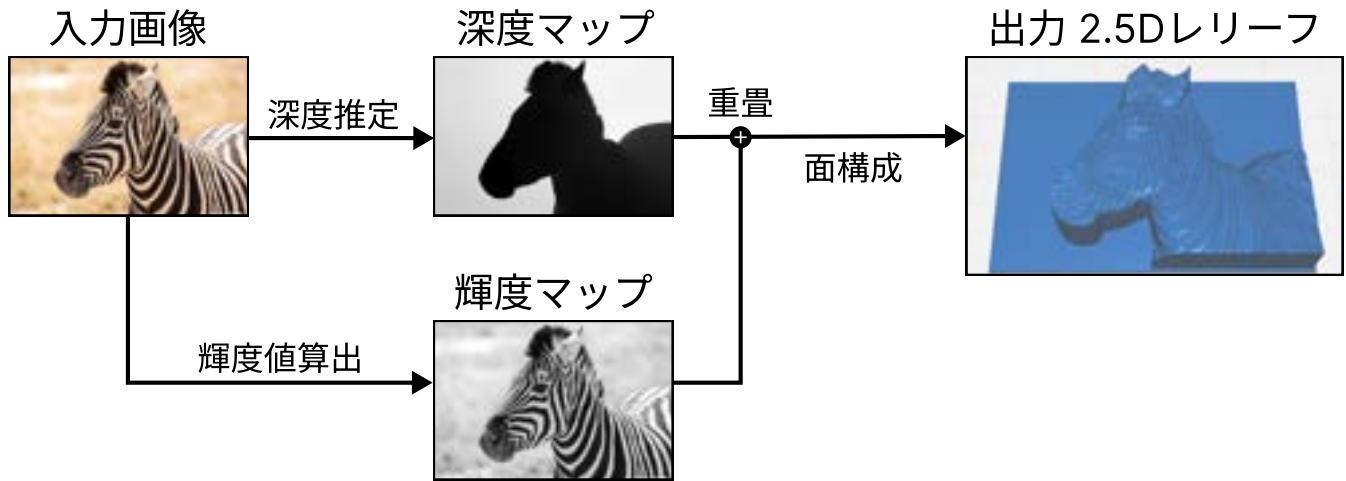


図4: 本研究における提案手法のパイプライン. 画像から深度推定、輝度値算出を行い、各結果を重畳して得た値から2.5Dレリーフを構成する.

度の高い深度マップを生成することが可能になっている [15]. 本研究では、これを応用することで、一枚の写真から図5(c)のような2.5Dレリーフを作成できることに着目した. この応用によって、従来に比べて2.5Dレリーフの制作の時間やコストが大幅に削減され、視覚障害者が自分の写真に日常的に触れて楽しむことが、より現実的になりつつあると考えられる. しかし、深度情報のみに基づく生成手法では、文字や模様のような平面的な細部が触察可能な状態にならないという問題がある. そこで本研究では、図4に示しているように、深度情報に加えて輝度情報を統合することで、より豊かで情報量の多い触覚表現を生成する手法を提案する.

本論文の貢献を以下にまとめる.

(1) 視覚障害者のために、深度と輝度の両情報を統合して写真を2.5Dレリーフとして表現する手法を初めて提案した. 本手法は、従来の触覚写真の表現力を拡張し、二次元の視覚情報を触覚情報へと変換することで、視覚障害者による写真理解を促進する.

(2) 提案手法である深度および輝度に基づく2.5Dレリーフを、深度のみを用いた2.5Dレリーフおよび触覚写真と比較評価するために、視覚障害者12名(全盲6名、弱視6名)を対象としたユーザ調査を実施した. また、5つの評価基準に基づき客観的に分析するため、階層分析法(AHP)を用いて評価した.

(3) 本研究は、視覚障害者が写真からどのように触覚情報を獲得するののかに関する知見を提供する. その結果、触覚情報の理解は過去の視覚経験によって異なることが明らかになった. また、色彩・遠近法・見切れといった視覚的概念が、(特に先天性の)視覚障害者の触覚的理解において認知的負荷をもたらすことが示された. さらに、ユーザの動機づけの違いが、どの触覚モデルを好むかという選好にも影響することが分かった.

2. 手 法

本研究では、3種類の触覚モデルを作成した. それぞれ、深度情報のみに基づく2.5Dレリーフ(DR)、深度情報と輝度情報を

組み合わせた2.5Dレリーフ(DLR)、そして触覚写真(TP)である. 本節では、これら各モデルの作成手順について詳述する.

2.1 ベースライン手法: 深度情報に基づく2.5Dレリーフ(DR)

ステップ1: Marigoldによる深度推定: Marigold [15]^(注2)に入力画像を与えることで、深度マップ D を生成する. 各画素値は、シーン内でのカメラからの推定距離を表す.

ステップ2: 2.5Dレリーフの生成: 得られた深度マップ D を所定の範囲 $[D_{near}, D_{far}]$ に正規化し、この範囲外の値は近い側の境界値に揃える. この範囲外の値を持つ領域はマスク領域 M として扱う. その後、深度値をMin-Maxスケールリングによって $[0, 1]$ の範囲に再スケールリングし、ノイズ低減のためにメディアンフィルタを適用する. この処理後のマップを D_{DR} と呼ぶ. 最後に、 D_{DR} に基づいて面を構築し、2.5Dレリーフの3Dモデルを生成する.

2.2 提案手法: 深度および輝度に基づく2.5Dレリーフ(DLR)

ステップ1: 輝度との統合: 元のRGB画像をグレースケール化して得られた輝度値 L を、 $[0, 1]$ の範囲に正規化し L' とする. マスク領域(セクション2.1で得られた M)外の画素にのみ輝度情報を反映させるため、以降の計算では $L'M$ を用いる. 最終的な高さ値 D_{DLR} は、 D_{DR} と $L'M$ の線形結合として次式により計算される: $D_{DLR} = (1 - \alpha)D_{DR} + \alpha L'M$. ここで、重み係数 α は輝度の寄与度を制御するパラメータである. これにより、視覚的なコントラストを触覚的な凹凸として表現できる.

ステップ2: 2.5Dレリーフの生成: 輝度と深度を統合したマップに対してメディアンフィルタを適用し、局所的なノイズや過剰な凹凸表現を低減する. その後、このフィルタ処理後のマップを再び $[0, 1]$ の範囲に正規化し、最終的な2.5Dレリーフモデルを生成する.

2.3 ベースライン手法: 触覚写真(TP)

ステップ1: 輪郭検出: PythonのPillowライブラリを用いて輪郭を検出し、グレースケール(画素値0~255)の輪郭画像を

(注2): <https://marigoldmonodepth.github.io/>

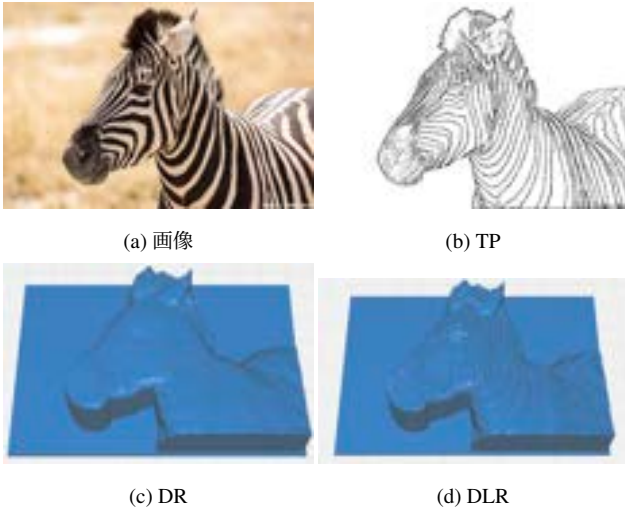


図 5: ユーザスタディで使用した画像と各モデルの例 (シマウマ). 左上から順に, 元の画像, 触覚写真 (TP), 深度に基づく 2.5D レリーフ (DR), および深度と輝度に基づく 2.5D レリーフ (DLR).



図 6: ユーザスタディの様子

生成する. 次に, 閾値 T を用いてこの輪郭画像を二値化する.
ステップ 2: マスキングと最終生成: セクション 2.1 と同様に, 比較の公平性を保つため, マスク領域 (M) 内の画素値を 255 に設定する. 得られた線画をもとに, 最終的な TP を生成する.

ここで注意すべき点として, 本研究で使用した TP は, 情報の簡略化を重視する北米点字委員会 (BANA) のガイドラインに必ずしも厳密には従っていない. 情報の適切な簡略化や触図化には専門的な知識が必要であり, 特に個人写真の触覚化には困難が伴う. したがって, 本手法は, 専門技術を必要とせず, 日常的に写真を触って鑑賞できる自動的な方法として採用した.

3. ユーザスタディ

3.1 実験設計

本研究のユーザスタディには, 視覚障害のある 12 名の参加者 (全盲 6 名, 弱視 6 名, 平均年齢 49.75 歳) が参加した. 実験には, 物体の種類や空間構成の複雑さが均衡するように選定した 10 枚の写真を使用した. 選定基準は, 以下の 3 種類である. (1) 単一かつ明確な被写体を持つ写真 (壺, 書籍, 時計), (2) 単一だが構造が複雑な被写体を含む写真 (シマウマ, トラ, 若い女性, 影, 老女), (3) 複数の複雑な被写体を含む写真 (部屋, 壁) である. 各写真に対して, 言葉による説明文 (GPT-4o を用いて生成) と 3 種類の触覚モデル (TP, DR, 提案手法 DLR) を作成した. 例を図 5 に示す. 説明文は「視覚障害者に写真の内容を説明する専門家として, この写真の内容を文章で説明してください。」というプロンプトに基づいて作成した.

公平な比較のため, 10 枚中 6 枚の写真では背景を一定の深度閾値 (D_{near}, D_{far}) で除去した. DLR においては輝度の重み α (通常 0.05 または 0.1) を手動で調整し, TP では二値化の閾値 $T = 235$ を用いた. DR および DLR には 5×5 のメディアンフィルタを適用した. すべての 2.5D レリーフは 3D プリンタで出力し (最大サイズ 10cm, 奥行き 2cm), TP は同サイズで PIAF プリンタ [16] を用いて熱を加えると膨らむスウェルペーパーに印刷した.

本実験は, 事前インタビュー・ユーザ評価・事後インタビューの三段階で構成された. ユーザ評価の段階では, 参加者は各写真の説明文を音声で聞いた後, ランダムな順序で 3 種類の触覚モデルを触察した. 図 6 にその様子を示す. 必要に応じて, 説明文やモデルを再確認することも許可した. 各写真の触察後, 参加者は理解のしやすさに基づいて 3 つのモデルを順位付けした. この手順を 10 枚すべての写真について繰り返した. 事後インタビューでは, モデル間の一対比較を行い, AHP 分析 [17], [18] を用いて評価した. 評価基準は, 物体理解, 空間理解, 場面理解, 利用意欲, および認知的負荷の 5 項目とした. これらの基準は, 本研究の目的と範囲に基づいて著者らが設定した. AHP により, 各モデルの優先度 (重み係数) が算出され, 値が大きいほど参加者に好まれたことを示す. さらに, 参加者の印象や好みに関する自由記述のフィードバックも収集した.

3.2 結果

3.2.1 事前インタビュー

ここでは, 参加者に触察経験および写真との関わりについて尋ねた. 多くの参加者は触図を日常的には使用しておらず, 写真を触覚的に理解しようとした経験もなかったが, 写真の内容を理解したり鑑賞したりしたいという関心を強く示した. 彼らの写真鑑賞体験は主に言葉による説明に依存しており, 言葉による説明は雰囲気や感情を伝えるのに有効である一方で, 触察はより直感的な理解を得られる点で価値があると考えていた. また, 多くの参加者が, 現状では触覚的に写真を理解する手段が限られているにもかかわらず, 将来的にそのようなツールを利用したいという意欲を示した.

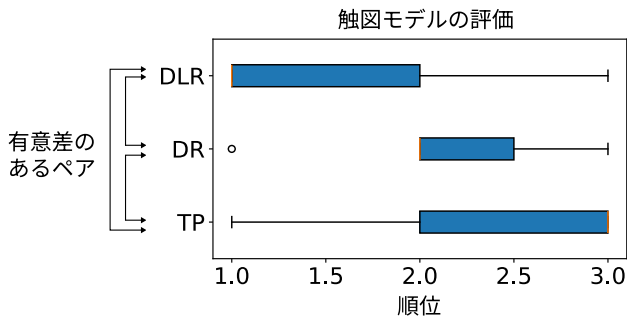


図 7: 各触覚モデルに対して参加者が付与した順位の箱ひげ図を示す。矢印は、ウィルコクソンの符号付き順位検定において有意差が認められた組み合わせを示している。オレンジの線は、各箱ひげ図における中央値を表す。

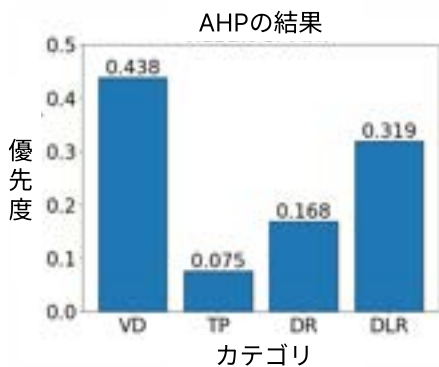


図 8: AHP の結果を示した棒グラフ。VD は言語による説明 (Verbal Description) を意味する。優先度が大きいほど、その選択肢がユーザに好まれたことを表す。

3.2.2 ユーザ評価

三つの触覚モデルについて、同率を許して順位をつけてもらった結果を示す。全体として、DLR が最も高く評価され (中央値 = 1)、次いで DR (中央値 = 2)、TP が最も低い評価となった (中央値 = 3)。統計的検定としてフリードマン検定を実施した結果、有意差が確認された ($p < 0.01$)。さらに各モデル間について、ボンフェローニ補正を適用したウィルコクソンの符号付き順位和検定を行ったところ ($p < 0.0033$)、統計的に有意な差が見られた。結果を図 7 に示す。また、12 名中 11 名の参加者が、DLR を他の手法と比較して同等またはそれ以上に優れていると評価した。

3.2.3 事後インタビュー

AHP の結果: AHP の結果を図 8 に示す。言葉による説明がカテゴリとして最も好ましいと評価され、その選択肢がユーザに好まれたことを表す「優先度」は 0.438 であった。これに次いで、DLR が 0.319、DR が 0.168、TP が 0.075 の順であった。触覚モデルの中では DLR が最も好まれ、言葉による説明に迫る優先度を示した。単純な一対比較の結果においても同様の傾向が見られ、言語説明が最も高いスコア (0.588) を示し、続いて DLR (0.247)、DR (0.108)、TP (0.058) となった。注目すべき点として、この順位傾向はすべての AHP 評価基準に

おいて一貫しており、中でも「物体の理解」が最も高い重みを示した。また、一対比較行列における整合性指標 (Consistency Index: CI) はすべて 0.1 未満であり、結果に十分な整合性があることを示している。これにより、AHP および一対比較の結果が論理的に信頼できることが確認された。

質的評価: 参加者からは有益な意見が多数寄せられた。言葉による説明については、写真の雰囲気、細部、および色彩を伝えられる点が高く評価された。一方で、触覚モデルは形状、大きさ、位置関係、および構図を理解する上で優れているとされた。一般的に、2.5D レリーフは TP よりも奥行きや空間の把握、物体の識別に有効であると評価されたが、TP は細かい模様や質感の把握、さらには弱視者における視覚的補助として有用である場合もあった。多くの参加者は、DLR における輝度情報が物体の識別や理解を助け、シマウマの縞などの模様に対する理解を深めたと述べたが、一部の参加者は、情報量が増えすぎて複雑に感じると指摘した。総じて、多くの参加者は TP よりも 2.5D レリーフを好み、輝度情報の付加によって理解の容易さと情報の豊かさが向上したと報告した。さらに、多くの参加者が今後も写真を触覚したいという意欲を示した。

4. 議 論

本研究のユーザスタディから、視覚障害者が写真の触覚表現にどのように関わるかについて、いくつかの傾向が示唆された。参加者が情報を得る際の方略は、過去の視覚経験によって異なる傾向が見られた。例えば、中途失明の参加者の中には、言葉による説明を聞いた上で、得られた触覚と過去の視覚記憶とを結びつけて理解する者がいた。一方で、先天性視覚障害の参加者は、これまでの触覚経験に基づいて場面を想像すると述べた。さらに本研究では、触察による表現の限界も明らかになった。特に、色、遠近法、見切れといった視覚的に特有の要素を伝えることは難しいことが分かった。中途失明の参加者の中には、色を感じ取ることができないことに対してもどかしさを表明する者がいた一方で、先天性視覚障害の参加者は、そもそも「色」という概念を理解すること自体が難しいと述べた。同様に、見切れや遠近法による歪曲、固定された画角といった写真特有の要素について、先天的な視覚障害者は感覚的な理解の難しさを訴え、この要素が認知的負荷を高めるとの意見を得た。この点について、参加者の動機づけも触覚モデルの好みに影響を与えた可能性がある。参加者の中には、一部が写真に写っている物体が何かを認識することを重視する一方で、一部は構図全体の印象や元の写真に対する 2.5D レリーフの忠実さを重視していた。物体の認識を重視した参加者が見切れなどの写真特有の要素を嫌った一方、構図全体の印象や忠実さを重視する参加者は、それらの認知的負荷を高める要素についても、写真を理解する上で重要なものであると考えていた。これらの結果は、触覚モデルの設計を利用者の背景、目的、および理解の方略に応じて柔軟に調整することが有益である可能性を示唆している。また、写真の忠実な表現を求める参加者に対しては、写真特有の要素自体に対する理解も重要であると考えられる。しかし、先述の通り、先天的な視覚障害者はこれらの要素の感覚的な理

解について難しさを抱える。今後、写真の触覚的表現方法を探索する上で、これらの要素についての触覚によるわかりやすいアプローチや、リテラシーを身につけるための教材の作成などについての議論が重要性を持つ可能性がある。

また、本研究にはいくつかの限界が存在する。まず、本研究における実用性の評価は、低コストな手法との比較のみに基づいており、より多様な条件での検証が今後の課題である。また、AHP分析で用いた評価基準は参加者ではなく著者側で定義したものであり、今後はユーザ主体での指標設計を検討する必要がある。さらに、提案手法自体にもいくつかの課題がある。本手法では一部のパラメータを手動で調整する必要があり、完全な自動化には至っていない。また、輝度情報を高さ変化として加えることで、実際の物体の形状と輝度に由来する凹凸とを区別しづらくなる場合がある。このあいまいさは画像の内容や文脈に依存する傾向がある。今後の研究では、パラメータ調整の自動化に加え、より多様なコンテンツ（例えば集合写真や動画のキーフレームなど）への拡張を進める予定である。また、鑑賞者の経験や好み、動機などに沿ったよりパーソナライズされた写真の触覚モデルの設計も、今後の重要な研究課題と位置づけられている。

5. 結 論

写真は日常生活において重要な役割を果たしているが、視覚障害者はその内容に十分にアクセスすることが難しい。本研究は、その格差を埋めることが目的である。我々は、単一の写真から深度推定と輝度情報を組み合わせて2.5Dレリーフを生成する新たな手法を提案した。このモデルは、従来のTPよりも豊かな触覚表現を実現し、深度情報のみを用いる手法では失われがちな模様などの視覚的特徴を保持することができる。現時点では一部手動での調整を必要とするものの、処理の大部分は自動化されており、拡張性にも優れている。本研究では、視覚障害者12名（全盲6名、弱視6名）を対象としたユーザスタディを実施し、TP、DR、および提案手法DLRを比較した。結果として、DLRは全体的に最も高く評価され、多くの点でTPおよびDRを上回った。AHP分析の結果、写真の閲覧手法として最も好まれたのは言葉による説明であり、次いでDLR、DR、TPの順となった。さらに事後インタビューでは、視覚障害者が情報を取得する際の方略が過去の視覚経験によって異なることが明らかとなった。また、色や遠近法、見切れといった視覚的概念は認知的な困難を伴うことが示唆された。これらの写真特有の要素について手引きすることが、視覚障害者の写真へのアクセシビリティを高めるために重要となる可能性がある。さらに、利用者の動機づけが触覚モデルの好みに影響を与えることが示唆され、個々の背景や目的に応じたパーソナライズされた写真の触覚モデル設計が効果的である可能性に言及した。今後の課題としては、手動調整の自動化、多様なコンテンツ（例：集合写真や動画のキーフレームなど）への適用が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、キヤノン財団の助成を受けて実施された。

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] S. Ouchi and N. I. of Special Needs Education (NISE): “[research on the three-dimensional adaptation of two-dimensional images using 3d cad for visual impairment education] (shikaku shougai kyouiku no tame no 3-jigen cad o katsuyou shita 2-jigen gazou no rittai-teki honan ni kansuru kenkyu)”, Technical report, National Institute of Special Needs Education (NISE), Yokosuka, Kanagawa, Japan (2008). In Japanese, Final Research Report (F-149).
- [4] D. Sparks: “Destin sparks — quotes “photography is the story i fail to put into words””, <https://www.destinsparks.com/links/photography-quotes/>. Accessed: 2025-08-13.
- [5] (2023).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Braille Authority of North America (BANA): “Tactile Graphics Standards and Guidelines 2022”, Braille Authority of North America (BANA) (2022). Accessed on 2025-06-24.
- [11] P. Edman: “Tactile graphics”, American Foundation for the Blind. Includes bibliographical references (p. 498-500) and index.
- [12] M. Neumüller and A. Reichinger: “From stereoscopy to tactile photography”, **19**, pp. 59–63 (2013).
- [13] S. Ouchi and N. I. of Special Needs Education (NISE): “Evaluation of tactile teaching materials for visual impairment education using 3d printing technology (3d zokei sochi o mochiita shikaku shogai kyoiku-yo rittai kyoza no hyoka ni kansuru kenkyu)” (2014). In Japanese.
- [14] R. Furferi, L. Governi, Y. Volpe, L. Puggelli, N. Vanni and M. Carfagni: “From 2d to 2.5d i.e. from painting to tactile model”, Graphical Models, **76**, 6, pp. 706–723 (2014).
- [15] B. Ke, A. Obukhov, S. Huang, N. Metzger, R. C. Daudt and K. Schindler: “Repurposing diffusion-based image generators for monocular depth estimation”, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2024).
- [16] HARPO: “Piaf (pictures in a flash) — piaf tactile by harpo”, <https://piaf-tactile.com/piaf/>. Accessed: 2025-08-13.
- [17] T. L. Saaty: “A scaling method for priorities in hierarchical structures”, Journal of Mathematical Psychology, **15**, 3, pp. 234–281 (1977).
- [18] T. L. Saaty: “The analytic hierarchy process (ahp)”, The Journal of the Operational Research Society, **41**, 11, pp. 1073–1076 (1980).