

ヒトに偏光知覚能力を付与するウェアラブルシステム

大城 亨太* 大西 鮎美* 寺田 努* 塚本 昌彦*

概要. 規則的に振動する光を偏光といい、これに対してあらゆる方向に振動する光を無偏光という。人間は偏光と無偏光が同じように見えるため偏光を知覚できない一方で、偏光を知覚し生活に活用する生物が存在する。このことから、人間も偏光を知覚することで得た情報を活用できる可能性がある。そこで本研究では、人間が偏光をどのように活用できるかを明らかにするため、人間に偏光を知覚させるウェアラブルデバイスを提案する。提案デバイスでは、偏光子を眼前で回転させ、偏光のみが明滅して見えるようにすることで偏光知覚を実現した。また、日常生活において偏光がどのように利用できるかを探索的なアプローチにより調査した結果、偏光は太陽の位置の推定や水たまりの検出等に役立てられることがわかった。

1 はじめに

人間は目や耳などの感覚器官を用いてさまざまな情報を知覚しており、情報技術による知覚拡張は日常生活の様々な面で有用である。例として、音の周波数を操作するウェアラブルデバイスにより、人間の聴力では従来聴こえなかった音を可聴化する研究がある [1]。このデバイスは、ガスの漏洩時に発生する高周波音を認識して異常機器を検出したり、電気自動車の走行時に発生するスイッチングノイズを認識して衝突事故を防いだりできる。また、ゴーグルに取り付けたシャッターを一定時間間隔で開くことで、ゴーグル着用者の視覚のフレームレートを下げる研究がある [2]。このゴーグルでは、高速に移動する物体の姿が鮮明に捉えられたり、回転するコインの表裏が見えたりと、通常では認識できない運動体の情報を認識できるようになる。これらのように、人間が知覚拡張によって通常では得られない情報を得られるようになると、それらの情報を生活に役立てられる可能性がある。

人間が周囲の環境などを認知する際に視覚は重要な役割を果たすが、人間が感知できる光の情報は一部である。本研究では、人間が通常では得られない情報として偏光を採り上げる。光は電磁波であり、光の進行方向に対して電場と磁場が互いに直交するように振動している。太陽光や蛍光灯の光などの一般的な光はあらゆる方向に振動しており、これを無偏光という。これに対して反射などの特定場面では、振動する方向が規則的な光が生じることがあり、これを偏光という [3]。本論文では、自身が見ている光が偏光か無偏光か判別できる状態を、偏光を知覚できる状態とする。人間は偏光に対する感覚器官をもっておらず、偏光と無偏光が同じ見え方をするため、一般には偏光を知覚できない [4]。一方で、いく

つかの生物は偏光を生活に活用している。ミツバチは、偏光の情報を利用して太陽の位置を検知することで方角を推定しており、偏光を巣に戻るためのナビゲーションとして活用している [5]。またハリガネムシは、宿主であるカマキリが偏光を知覚していることを利用し、カマキリが水面での反射の際に生じる偏光を目印にして水に飛び込むように操る [6]。これらの偏光を利用する生物のように、人間も偏光を知覚して生活に役立てられる可能性がある。

本研究の最終的な目的は、人間が適切な方法で偏光を知覚し、得た情報を自らの判断や行動に活かせるようにするデバイスの実装である。人間が偏光をどう活用できるのかがわかれば、偏光を知覚させる適切な方法が検討できる。しかし人間は自身の目では目に入った光が偏光であるかわからず、人間が偏光をどう活用できるのかは調査されていない。そこで本研究では、最終目的に向けた第一段階として、偏光を知覚できる状態を人間が体験できるようにするウェアラブルデバイスを提案する。また、デバイスを着用した状態で生活することで、生活の中で偏光が発生している場面を探索し、偏光を知覚して何に活用できるかを調査する。偏光知覚は、偏光と無偏光の見え方が異なるようにしたり、偏光であることを音で知らせたりすることで実現できる。今回は偏光子を眼前で回転させることで、偏光と無偏光の見え方を変えて偏光知覚を実現する。回転する偏光子を通して偏光を見たとき、偏光子が透過する光の振動方向は時間的に変化する。目に入る偏光の光量は周期的に変化する。そのため明滅して見えるものは偏光、見え方が変わらないものは無偏光と判別できる。

本研究では探索的なアプローチをとり、日常の中で偏光がどのように利用できるかを調査した。参加者は日常の中で偏光知覚デバイスを装着し、偏光が発生する場面を観察した。この実験により、提案デバイスが日常生活における偏光知覚を可能にすることが示された。さらに、観察された偏光に基づき、

Copyright is held by the author(s).

* 神戸大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kobe University

それが人間にとってどのように役立つかを議論し、偏光を生活に活用できるようにするうえで適切な偏光知覚の方法を検討した。

2 関連研究

2.1 人間拡張に関する研究

情報技術を用いて人間の身体能力や知覚などの増強や拡張を行う技術を人間拡張という。近年、人間拡張についての研究は数多く行われている。人間拡張は大きく分けて身体拡張、認知拡張、知覚拡張の3つに分類できる [7]。本研究は知覚拡張に着目する。

Jain らは、ヘッドマウントディスプレイを用いて音を可視化する聴覚障害者向けのシステムを提案した [8]。このシステムでは、矢印などのアイコンによって音源の方向が示され、アイコンの大きさで音の大きさが示される。これにより聴覚障害者は、音を空間的に捉えることで視覚から音の情報を得られる。Watanabe らは、音の周波数を操作するウェアラブルデバイスにより聴力を自在化する手法を提案した [1]。この手法では、非可聴域の周波数を可聴域の周波数に変換することで、人間の聴力では聞こえない音を可聴化できる。このデバイスは、ガスの漏洩時に発生する高周波音を認識して異常機器を検出したり、電気自動車の走行時に発生するスイッチングノイズを認識して衝突事故を防いだりと、日常生活のさまざまな場面で汎用的に活用できる。Koizumi らは、レンズに取り付けたシャッターを一定時間間隔で開く Stop Motion Goggle を提案した [2]。このシステムは、ゴーグル着用者の視覚のフレームレートを下げることで、高速に移動する物体の姿が鮮明に捉えられたり、回転するコインの表裏が見えたりと、通常では認識できない運動体の情報を認識できるようになる。このゴーグルはスポーツ観戦に応用でき、ボールの動きが速すぎて目で追えない場合などに有用である。

これらの例から、人間が知覚拡張によって通常では得られない情報を得られるようになると、それらの情報を生活に役立てられる可能性がある。本研究では、偏光知覚を実現することで、人間が偏光を生活に役立てられることを目指す。

2.2 偏光を活用する生物に関する研究

偏光を生活に活用する生物が存在する。これらの生物による偏光の活用例を紹介する。ミツバチは、巣や餌場の位置を記憶するために方角を把握しながら飛行する。この習性について Rossel らは、青空の偏光パターンを提示した状態で、餌が置かれた場所に対してミツバチがどのように動くかを分析した [5]。その結果、ミツバチは青空の偏光を光の明るさや色の変化により知覚することで方角を認識することが解明された。カマキリを宿主とする寄生虫のハリガ

ネムシは、繁殖のためにカマキリが水に飛び込むように操る。この習性について Obayashi らは、光の条件が異なる2つのプールを用意し、ハリガネムシに寄生されたカマキリがどちらに飛び込むかを調査した [6]。その結果、ハリガネムシに寄生されたカマキリは、光強度に関わらず水面での反射により生じた水平方向の偏光を目印にして水に飛び込むことが明らかになった。また海底に生息するシャコは、円偏光を識別して偏光を獲物や捕食者の発見に活用している [9]。これらの活用例から、人間も偏光を知覚できれば生活に役立てられる可能性がある。

次に、生物が偏光を知覚する方法を紹介する。コオロギは青空の偏光を認識することで太陽の位置を把握する。Sakura らは、コオロギがどのように偏光の情報を得ているかを解明するため、偏光の方向を変化させたときにコオロギがもつニューロンの応答の変化を調査した [10]。その結果、コオロギは特定の向きの偏光に対して強い興奮性の応答を示す POL1 ニューロンを3種類もち、各ニューロンでの応答するニューロン数の比率により偏光の情報を得ている可能性が示唆された。しかし、偏光を感知する感覚器官をもつ生物とは異なり、人間にはそのような生物学的機構が存在しない。よって人間が偏光を知覚するには人工的な手段に頼らざるを得ない。

2.3 特定の目的のために偏光を用いた研究

偏光を活用した研究は多く存在し、偏光を用いた様々な技術が提案されている。Umeyama らは、物体の表面での反射光である鏡面反射成分と、物体内部の色素粒子での散乱光である散乱反射成分とを分離する手法を示した [11]。この手法では、異なる方向の偏光子を通して撮影した画像を分析することで、偏光を含む鏡面反射光と無偏光である拡散反射光に分離できる。Wolff らは、偏光の情報を解析することで、物体表面の材質を推定する手法を提案した [12]。この手法では反射光の偏光特性の違いが用いられており、特に非導電体と高導電性の金属が判別できることが示された。さらに Cula らは、複数光源のもとで撮影された画像を、それぞれの光源1つで照らされた画像に分解する手法を提案した [13]。この手法では、偏光の情報をを用いて物体の表面での反射光がどの光源によるものかを分離できる。

このように、偏光を特定の目的に利用する研究は数多く存在する。しかし人間が自ら偏光を知覚することで得られる利点を明らかにした研究は存在せず、これらの他にも偏光の活用法が新たに見つかる可能性がある。そこで本研究では、人間が偏光を知覚できるデバイスを実装することで、偏光を知覚して生活に活用できる可能性を探索する。

3 提案デバイス

3.1 偏光知覚の定義

本論文では、視界中の各部分の光が偏光か無偏光か判別できる状態を、偏光を知覚できる状態とする。人間は偏光に対する感覚器官をもっておらず、偏光と無偏光が同じ見え方をするため偏光を知覚できない。よって人間が偏光を知覚するには人工的な手段を採る必要がある。具体的には、偏光と無偏光の見え方が異なるようにする方法や、偏光であることを音で知らせる手法が考えられる。偏光カメラを用いれば、偏光を検出してディスプレイ上で偏光を可視化することは可能であるが、ディスプレイ映像では光に対する知覚印象が実際の空間で感じるものと異なる[14]ことが懸念される。よって本研究では、人間が光そのものの変化を視覚的に感じられることを重視し、デジタル変換を介さずに偏光を直接知覚させる光学的手法を採用する。

3.2 偏光知覚を実現する手法

本論文では視覚から偏光を知覚させる。その方法はいくつか考えられるが、偏光を知覚する生物のように[10]、人間も異なる振動方向の偏光を比較して見ると偏光を知覚できる可能性がある。異なる振動方向の偏光を比較して見る方法としては、昆虫の複眼のように、視覚内で映像を複数並べるような比較方法も考えられるが、この方法では人間の普段の世界の見え方と大きく異なる。そこで本研究では、偏光子を眼前で回転させて時間的な変化により偏光を比較する手法を提案する。偏光子とは、入射光の振動方向によって透過光の強度を変化させる光学素子である。透過光の強度 I [W/m^2] はマリュスの法則により、入射光の強度 I_0 [W/m^2]、入射光の振動方向と偏光子の透過軸がなす角 θ を用いて、式(1)のように表される[15]。

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

よって偏光子を眼前で回転させると、特定の振動方向をもつ偏光は目に届く明るさが周期的に変化し、あらゆる振動方向をもつ無偏光は目に届く明るさが一定となる。本論文では、偏光子の回転により偏光が明滅するように見せることで偏光知覚を実現する。本手法は、回転する偏光子を通した光学的变化をそのまま提示することで、カメラや映像処理を介さずに光の偏光特性を直接知覚できることに特徴がある。すなわち、本手法は映像として再構成された偏光情報を見るのではなく、観察者が自らの視覚で偏光現象を体験的に捉えることを可能にする。

3.3 提案デバイスの構成

提案デバイスを装着したときの様子を図1に示す。提案デバイスは眼鏡フレーム、マイコン、サーボモータ、偏光子、プーリーとベルトからなる回転機構で

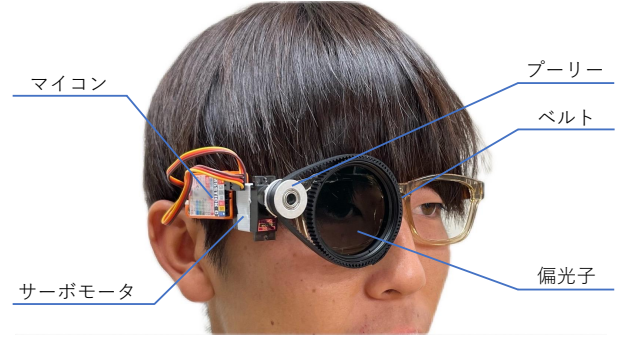


図 1. 提案デバイスを装着したときの様子

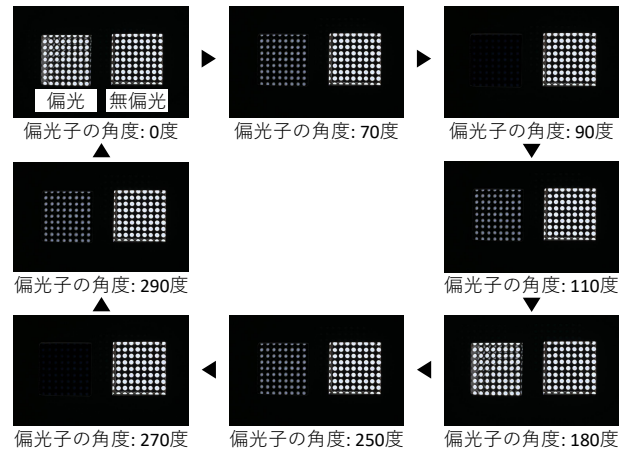


図 2. 提案デバイスを通した偏光と無偏光の見え方

構成される。サーボモータに取り付けたプーリーからベルトを通して偏光子に力を伝え、偏光子を回転させる。回転機構の動力源はサーボモータで、マイコンがモータの回転速度を制御する。また、マイコンの電源としてモバイルバッテリーを使用している。マイコンは M5Stack Technology 社製の M5StickC である。サーボモータは梅本社製の MG90D で、同一方向に連続回転できる。偏光子はマルミ工機社製で、直径は 49 [mm] である。

偏光子の回転が遅いと明滅がわかりにくくなり、偏光が知覚しにくくなる可能性がある。逆に、偏光子の回転が速いと偏光が激しく明滅し、デバイス使用者にストレスを与える可能性がある。第一著者がいくつかの回転速度で試した結果、1.4 秒に 1 回程度の明滅が妥当であったため、提案デバイスでは偏光子が約 2.8 秒で一回転するように設計した。また装着時の負荷を考慮して軽量に設計し、デバイスの総重量は 75.0 [g] に抑えた。このように、日常的な使用を想定し、偏光子の回転速度や装置重量を調整して知覚の明瞭さと装着快適性の両立を図った。

3.4 提案デバイスを通したときの見え方

提案デバイスを通した偏光と無偏光の見え方を図2に示す。各画像の左側の光は LED に偏光子を固



図 3. 液晶ディスプレイでの偏光



図 4. 青空での偏光



図 5. ガラス面での偏光

定して被せているため偏光で、右側の光は何も被せていない LED であるため無偏光である。偏光の振動方向を 0 度とすると、これらの画像は左上の画像から時計回りに、提案デバイスの偏光子の角度がそれぞれ 0 度、70 度、90 度、110 度、180 度、250 度、270 度、290 度の画像である。提案デバイスを通すと無偏光は常に明るく見え、見え方に変化はない。一方で偏光は明滅して見えている。よって、提案デバイスによって偏光と無偏光が判別できる。

4 実験

本章では、提案デバイスを用いて偏光が日常のどのような場面で発生しているかを探索する実験について述べる。その後、実験により見つかった偏光とその活用例について述べる。なお本実験は、神戸大学大学院工学研究科人を直接の対象とする研究倫理審査委員会の承認(承認番号 05-55)を得て行ったものである。

4.1 実験の概要

本実験の目的は、偏光が日常のどのような場面で発生しているかを探索することである。被験者は、提案デバイスの装着により偏光が知覚できる状態で同伴者と自由に歩行し、ものが明滅して見えたときに同伴者に逐次報告した。同伴者は被験者からの報告を受け、偏光が発生している場面や、どのような見え方であったかを被験者から聞き取り記録した。被験者は 20 代から 50 代の男女 7 名で、実験時間は 1 人あたり約 1 時間である。実験場所は神戸大学キャンパス周辺や住宅地であり、屋内外両方で探索を行った。また実験は晴天時と雨天時に行った。

4.2 見つかった偏光とその活用例

実験で見つかった偏光の例を図 3 から図 12 に示す。これらはすべて提案デバイスを通して撮影した。左右の画像では偏光子の角度が 90 度異なり、各場面における明滅の最も明るい状態と暗い状態の画像である。

液晶ディスプレイの見え方

図 3 は、液晶ディスプレイで発生していた偏光の見え方である。提案デバイスを通すと液晶ディスプレイが明滅して見え、液晶ディスプレイから出ている光が偏光であるとわかる。対して右上の LED ライ

トの明るさは変化せず無偏光だとわかる。液晶ディスプレイは 2 枚の偏光子を利用しており、電圧により偏光の振動方向を制御することで液晶ディスプレイの明るさが調整できる [16]。よって液晶ディスプレイの光は偏光であり、提案デバイスを通すと偏光子の角度によって液晶ディスプレイの明るさが違って見え、特定の角度では消灯しているように見えた。よって偏光が知覚できると液晶ディスプレイの映像と他の映像を区別できる。

青空の見え方

図 4 は、青空で発生していた偏光の見え方である。この画像は太陽と反対方向の青空を撮影しており、強く明滅して見えた。一方で、太陽付近の青空はほとんど見え方が変わらなかった。光の強度に占める偏光の強度の割合を偏光度といい、青空では太陽からの距離が離れるにしたがって偏光度が大きくなり、一定の距離を超えるとまた小さくなる [17]。また青空において偏光の振動方向は太陽を中心とした同心円を形成している [18]。図 4 は太陽と反対方向の青空であり偏光度が大きかったため、青空が強く明滅していたと考えられる。

よって偏光度や偏光の振動方向がわかると、太陽の位置が推定できるようになる可能性がある。人間は太陽の位置で方角を推定できるが、街中などで視界が遮られ、太陽の位置がわからない場合でも太陽の位置を偏光から推定できる可能性がある。太陽の位置が常に知覚できると、時間がわかりやすくなることや、方向感覚が付くことで地図が読みやすくなることなどが期待できる。また地図アプリを使用中に GPS の不調などにより方向がわからなくなることがあるが、青空での偏光から方角を知ることによってナビゲーションに偏光を活用できる可能性がある。

ガラスへの映り込みの見え方

図 5 は、ガラス面で発生していた偏光の見え方である。ガラスへの映り込みが明滅して見えたが、ガ



図 6. 石垣と路面での偏光

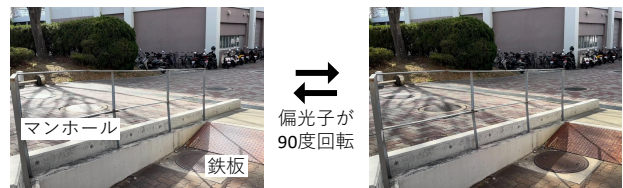


図 8. 晴れた日の路面での偏光



図 7. 自動車の車体での偏光

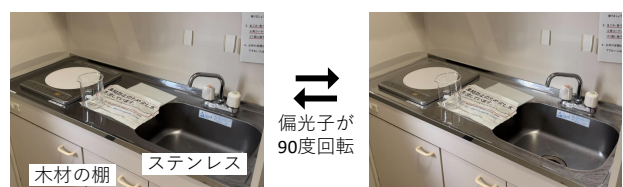


図 9. シンクでの偏光

ラス背後の実物体は明滅していなかった。つまり、ガラスでの反射光は偏光，ガラス背後からの透過光は無偏光だとわかった。

よって偏光はガラスへの映り込みとガラス背後の実物体を分離して知覚させられる可能性がある。通常はガラスへの映り込みとガラス背後の実物体が重なって見えるためこれらを判別できず，ガラスの扉での出会い頭の衝突などが発生することがある。しかし，偏光知覚によりこれらを分離して認識できると，ガラスの手前側と奥側の双方の状況を同時に把握できるようになる。一方で，ガラスを正面から見た場合には偏光が発生しておらず，ガラスを見る角度によって明滅の強さが異なっていた。これは反射角によってガラスでの反射光の偏光度が異なるためである。よってガラスへの映り込みとガラス背後の実物体を分離して認識するには，ガラスを斜めから見た視点が必要であることを考慮しなければならない。

面方向が異なる物体の見え方

図 6 は，石垣と路面で発生していた偏光の見え方である。石垣と路面での反射光はともに明滅して見え，偏光が発生しているとわかった。石垣と路面では明滅するタイミングが異なっており，石垣が明るいときに路面が暗く，石垣が暗いときに路面が明るく見えた。図 7 は，自動車の車体で発生していた偏光の見え方である。自動車のボディ面での反射光が明滅して見えたが，面によって明滅するタイミングが異なっていた。これらのことから，提案デバイスでは，物体の面方向の違いによって生じる偏光の振動方向の差は，明滅するタイミングの違いによって知覚できることがわかった。

よって明滅のタイミングの違いによって偏光の振動方向がわかると，物体の面方向の推定に活用できる可能性がある。物体の面方向が推定できると，物体の形状を把握し面の歪みなどを認識することに役立てられる。特に自動車においては，ボディ面の面方向を推定して傷やへこみを認識できる可能性がある。

材質が異なる物体の見え方

図 8 は，晴れた日の路面で発生していた偏光の見え方である。日向の路面が全体的に明滅して見えたが，特にマンホールやスロープの鉄板で強く明滅していた。図 9 は，シンクで発生していた偏光の見え方である。ステンレスの部分が明滅して見えたが，木材で作られた棚の部分は見え方がほとんど変わらなかった。図 10 は，植木で発生していた偏光の見え方である。やわらかい葉をもつ右手前の植木 A は弱く明滅して見え，硬くて艶のある葉をもつ左奥の植木 B は強く明滅して見えた。これらにおいて，強く明滅していたのはマンホールやスロープの鉄板，ステンレス，および硬くて艶のある葉をもつ植木 B であった。これは，光沢のある物体は偏光である反射光を生じやすいためだと考えられる。

よって偏光度がわかると物体の材質の推定に役立てられる可能性がある。人間の肌は皮脂によるてかりが生じたり，乾燥して肌の光沢が失われたりすることがあり，偏光を知覚できると肌の状態を推定できるようになる可能性がある。

濡れた路面や水たまりの見え方

図 11 は，路面が湿った箇所が発生していた偏光の見え方である。路面は全体的に明滅して見えたが，湿った箇所では周囲と比較して強く明滅して見えた。図 12 は，雨天時の路面で発生していた偏光の見え方である。雨により路面が湿った箇所が強く明滅して見えた。また，水たまりとなった箇所でも偏光が発生していたが，周囲の路面が濡れた箇所と比較すると明滅が弱く感じられた。よって，乾いた路面や水たまりと比較して，湿った路面では偏光が発生しやすいことが確認できた。これは，湿った路面では偏光である反射光が発生しやすいためだと考えられる。

このことから，偏光を知覚できると路面の濡れや水たまりを検出できるようになる可能性がある。雨天時には，どこに水たまりがあるか把握して避けな



図 10. 植木での偏光



図 12. 雨天時の路面での偏光

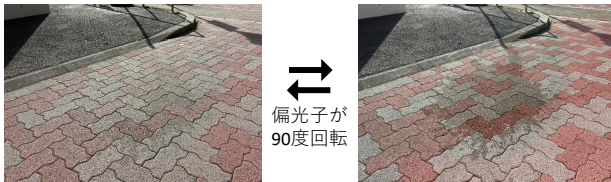


図 11. 湿った路面での偏光

がら歩行するが、誤って水たまりを踏んでしまうことがある。そこで、偏光知覚により水たまりを検出できると水たまりを避けやすくなる可能性がある。また濡れた路面は滑りやすく、特に自動車の運転時には注意する必要があるが、偏光知覚により路面状況を把握しやすくなり安全性が高まる可能性がある。

5 議論

5.1 明滅による偏光提示手法の妥当性と限界

提案デバイスを用いた実験では、偏光子の回転によって偏光が明滅して見えることで偏光を視覚的に知覚できた。明滅の強さや光の強度から偏光度をおおよそ推定できることが確認された一方で、偏光の振動方向については明滅のタイミングの違いから相対的な差異を把握できるのみであり、偏光がどの方向に振動しているかは直接的には知覚できなかった。被検者からは装着時に大きな違和感や不快感は報告されず、おおむね自然な装着感で偏光を観察できた。また、無偏光の部分は見え方が変わらないため、基本的には普段通りの生活ができたとの評価を得た。一方で、長時間装着した際の疲労感や集中力への影響は今後の評価が必要である。よって明滅による偏光の提示手法は、偏光を知覚できる状態を体験する初期段階としては妥当であると評価できる。一方で、偏光の特性をより深く理解して応用へとつなげるためには、偏光度や偏光の振動方向といった複数の要素を同時に提示することで、偏光をより総合的に知覚できるデザインへと発展させる必要がある。

5.2 汎用的活用に向けた偏光提示手法の検討

実験では、偏光の活用例ごとに必要な情報が異なり、提案デバイスでは偏光を活用するうえで十分な情報が得られない場面があった。そこで本節では、実験で得られた知見をもとに、偏光という新たな視覚情報を人間が自然に理解し、日常生活の中で偏光を汎用的に活用できるようにするための提示手法に

ついて検討する。

探索的実験の結果、提案デバイスには主に次の二つの課題があることが明らかになった。第一に、偏光の振動方向がわからないという課題である。提案デバイスでは明滅の強さから偏光度を推定できたが、偏光の振動方向については明滅のタイミングの違いから相対的な差異を把握できるのみであった。これに対しては、偏光子の透過軸を視野内に表示し、偏光の振動方向を直接的に把握できるようにすることが有効であると考えられる。このような機能の導入により、太陽の位置や物体の面方向の推定といった場面でも、より正確に偏光の情報を活用できるようになることが期待される。第二に、偏光が遮断される時間が短いという課題である。特に、ガラスへの映り込みとガラス背後の実物体を分離する場面においては、ガラス面での反射光が遮断される時間が短く、ガラス背後の実物体を十分に視認できないという問題があった。これに対しては、ユーザが状況に応じて偏光子の回転速度を調整できる制御機能を追加し、明滅の速さを自ら操作できるようにすることが有効であると考えられる。

今後はこれらの機能を導入することで、人間が偏光を自然に理解し、日常生活の中で活用できるようになる汎用的な偏光知覚デバイスの実現を目指す。

6 まとめ

本論文では、人間が偏光を知覚して生活に活用できるようにするための第一段階として、偏光を知覚できる状態を人間に体験させるウェアラブルデバイスを提案した。提案デバイスは偏光子の回転により偏光を明滅させることで偏光知覚を実現しており、明滅するものを偏光、明るさが一定であるものを無偏光と判別できる。実験では、提案デバイスを着用した状態で自由に生活させ、どのような場面で偏光が発生しており、偏光を知覚して何に活用できそうか探索した。実験の結果、偏光は太陽の位置の推定や水たまりの検出等に役立てられる可能性が示唆された。またこれらの活用例に基づき、偏光を活用するうえで必要な機能を整理し、適切な偏光提示手法を検討した。今後はこれらの機能を導入することで、人間が適切な方法で偏光を知覚し、得た情報を生活に活用できるようにするデバイスを実装する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (A) (25H01157) の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] H. Watanabe and T. Terada: Manipulatable Auditory Perception in Wearable Computing, *Proc. of the Augmented Humans International Conference 2020 (AHS '20)*, pp. 9:1–9:12, (Mar. 2020).
- [2] N. Koizumi, M. Sugimoto, N. Nagaya, M. Inami, and M. Furukawa: Stop Motion Goggle: Augmented Visual Perception by Subtraction Method Using High Speed Liquid Crystal, *Proc. of the 3rd Augmented Human International Conference (AH '12)*, pp. 1–7 (Mar. 2012).
- [3] J. J. Foster, S. E. Temple, M. J. How, I. M. Daly, C. R. Sharkey, D. Wilby, and N. W. Roberts: Polarization Vision—Overcoming Challenges of Working with a Property of Light We Barely See, *The Science of Nature*, Vol. 105, pp. 1–26 (Mar. 2018).
- [4] S. E. Temple, J. E. McGregor, C. Miles, L. Graham, J. Miller, J. Buck, N. E. Scott-Samuel, and N. W. Roberts: Perceiving Polarization with the Naked Eye: Characterization of Human Polarization Sensitivity, *Proc. of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 282, No. 1811 (July 2015).
- [5] S. Rossel and R. Wehner: How Bees Analyse the Polarization Patterns in the Sky, *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 154, pp. 607–615 (Sep. 1984).
- [6] N. Obayashi, Y. Iwatani, M. Sakura, S. Tamotsu, M. C. Chiu, and T. Sato: Enhanced Polarotaxis Can Explain Water-Entry Behaviour of Mantids Infected with Nematomorph Parasites, *Current Biology Magazine*, Vol. 31, No. 12, pp. 777–778 (June 2021).
- [7] S. Villa, J. Niess, T. Nakao, J. Lazar, A. Schmidt, and T. Machulla: Understanding Perception of Human Augmentation: A Mixed-Method Study, *Proc. of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. 65, pp. 1–16 (Apr. 2023).
- [8] D. Jain, L. Findlater, J. Gilkeson, B. Holland, R. Duraiswami, D. Zotkin, C. Vogler, and J. E. Froehlich: Head-mounted Display Visualizations to Support Sound Awareness for the Deaf and Hard of Hearing, *Proc. of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*, pp. 241–250 (Apr. 2015).
- [9] N. W. Roberts, T.-H. Chiou, N. J. Marshall, and T. W. Cronin: A Biological Quarter-Wave Retarder with Excellent Achromaticity in the Visible Wavelength Region, *Nature Photonics*, Vol. 3, No. 11, pp. 641–644 (Nov. 2009).
- [10] M. Sakura, D. Lambrinos, and T. Labhart: Polarized Skylight Navigation in Insects: Model and Electrophysiology of e-Vector Coding by Neurons in the Central Complex, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 99, No. 2, pp. 667–682 (Feb. 2008).
- [11] S. Umeyama and G. Godin: Separation of Diffuse and Specular Components of Surface Reflection by Use of Polarization and Statistical Analysis of Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 5, pp. 639–647 (May 2004).
- [12] L. B. Wolff and T. E. Boulton: Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 7, pp. 635–657 (1991).
- [13] O. G. Cula, K. J. Dana, D. K. Pai, and D. Wang: Polarization Multiplexing for Bidirectional Imaging, *Proc. of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '05)*, Vol. 2, pp. 1116–1123 (June 2005).
- [14] A. Çevik, Z. T. Kazanasmaz, G. Tambellini, G. Salvadori, and F. Leccese: Perception of Light in Museum Environments: Comparison between Real-Life and Virtual Visual Experiences, *Sustainability 2022*, Vol. 14, No. 14288 (Nov. 2022).
- [15] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza, and A. C. Martí: The Polarization of Light and Malus' Law Using Smartphones, *The Physics Teacher*, Vol. 55, No. 5, pp. 264–266 (May 2017).
- [16] J. Xiong and S. T. Wu: Planar Liquid Crystal Polarization Optics for Augmented Reality and Virtual Reality: from Fundamentals to Applications, *ELight*, Vol. 1, No. 3, pp. 1–20 (June 2021).
- [17] M. L. Brines and J. L. Gould: Skylight Polarization Patterns and Animal Orientation, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 96, No. 1, pp. 69–91 (Feb. 1982).
- [18] T. Ma, X. Hu, L. Zhang, J. Lian, X. He, Y. Wang, and Z. Xian: An Evaluation of Skylight Polarization Patterns for Navigation, *Sensors*, Vol. 15, No. 3, pp. 5895–5913 (Mar. 2015).