

懐中電灯型プロジェクタカメラ系による視覚補助に関する研究

A study on a flashlight-like projector camera system for visual assistance

2031001



研究代表者

和歌山大学 システム工学部

准教授

天 野 敏 之

[研究の目的]

2007年にWHOが発表した“Vision 2020: The Right To Sight”^[1]によると、全世界で1億5300万人が白内障や緑内障などの視覚障害を患っており、矯正不可能な遠視や近視などの屈折異常を含めると、3億1400万人が視覚障害による問題を抱えている。このような視覚障害は治療により回復することができない場合も多い。

視覚障害を克服する手段として、弱視レンズや拡大機能を有する情報機器など、弱視者が保有する視機能を有効活用するための視覚補助具が用いられている。視覚補助具としては、ルーペや単眼鏡だけでなく、ビデオカメラとモニターテレビを組み合わせた機器もある。また、視覚補助のための画像処理の研究も行われている。

Peliら^[2]は中心暗点や白内障のための視覚補助技術として、デジタル画像強調技術を提案している。また、Wolffsohnら^[3]は汎用的な画像処理によるエッジ検出とビデオ合成によってテレビ視聴の視認性を向上させる方法を提案している。画像処理による視覚補助の研究は視覚障害に限らず、二色性色覚のための補助についても行われている。例えば、Jeffersonら^[4]は、LMS色空間において二色性色覚のシミュレーション^[5]を行い、色彩の線形変換によって混同色の問題を解決する手法を提案している。

これらの画像処理手法を視覚補助器具に搭載することで、視認性を向上させることができる。それだけでなく、色彩デザインの不備によって二色性色覚では識別が困難な図表の理解を補助することもできる。しかし、利用者の視線はモニタに拘束されるため、新聞や書籍、写真などを直接見ることができないという問題がある。

画像処理による視覚補助はスマートフォンなどのカメラ付きの携帯端末やヘッドマウントディスプレイを用いて行うことも可能であり、これらの機器に視覚補助アルゴリズムを実装すれば、視線やサイズ不一致の問題を軽減することはできる。しかし、解像度は著しく低下し、視野角も制限される。それだけでなく、実物が目の前に存在するにも関わらず直接見ることができないというフラストレーションが生じる。

そこで、我々はこのような問題を解決する方法として、プロジェクタカメラ系を用いた光投影による視覚補助技術を提案している。本研究課題では、プロジェクタとカメラをコンパクトな手持ち式の筐体の実装し、利用者が視認困難な場所へ懐中電灯のように照らす方法を提案した。これによって見かけを変化させ、視覚能力を補助する技術について研究した。このような光投影による補助は、利用者に特別な装置の装着や目の前にある実物体のモニタ越しでの観察も要求しないため自然であり、人間と機械の調和の促進に大きく貢献することが期待できる。

[研究の内容, 成果]

1. プロジェクタカメラ系を用いた視覚補助

図1に示すモデル予測制御を用いた見かけの制御では、投影画像とキャプチャ画像のある対応する画素において、 $\mathbf{I}_0, \mathbf{I}_P \in \mathbb{R}^3$ をRGBのカラーベクトルとして表現された環境照明と投影光とする。このとき、物体表面で反射され、カメラに入射される光を

$$\mathbf{I}_C = K(\mathbf{I}_P + \mathbf{I}_0) \quad (1)$$

として表現する。ただし、 $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は物体表面の反射率であり、対角行列で表現する。また、撮影画像 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^3$ とプロジェクタからの投影画像 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ $\mathbf{C} \propto \mathbf{I}_C$, $\mathbf{P} \propto \mathbf{I}_P$ と仮定する。ただし、プロジェクタとカメラの色空間は事前に較正を行い、色混合行列によって整合がとれているものとする。

目標画像の生成部 (Generator of Reference) では、物体の反射率を

$$\hat{K} = \text{diag}(\mathbf{C} ./ (\mathbf{C}_{full} - \mathbf{C}_0) \odot \mathbf{P} + \mathbf{C}_0) \quad (2)$$

として反射率を推定する。ただし、 $\mathbf{C}_{full}$, $\mathbf{C}_0 \in \mathbb{R}^3$ は最大および最小の輝度の光がプロジェクタから投影されたときに撮影された画像、 $./$ と $\odot$ は要素毎の除算と積算を意味する。そして、この $\hat{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ と白色基準面に白色光を投影したときに取得される画像 $\mathbf{C}_{white} \in \mathbb{R}^3$ を用いて、白色照明下での物体の見え

$$\mathbf{C}_{est} = \hat{K} \mathbf{C}_{white} \quad (3)$$

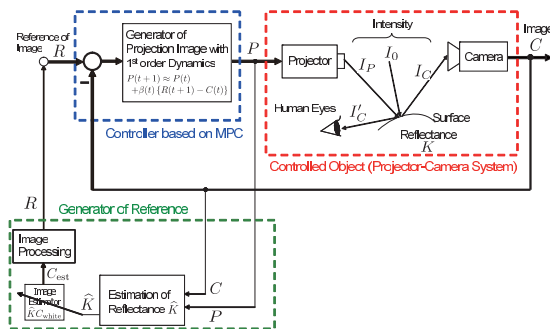


図1 見かけの制御の処理ダイアグラム

を推定する。制御のための目標画像 $\mathbf{R}$ は、 $\mathbf{C}_{est}$ に二色性色覚や白内障などに対する視覚補助のための画像処理を適用して得る。そして、この $\mathbf{R}$ をモデル予測制御の目標値として入力し、生成された投影画像 $\mathbf{P}$ をプロジェクタより投影することで、光投影による視覚補助を実現する。ただし、モデル予測制御では

$$\mathbf{P}(t+1) \approx \hat{K}(t)^{-1} (1-\alpha) \{\mathbf{R}(t+1) - \mathbf{C}(t)\} ./ (\mathbf{C}_{full} - \mathbf{C}_0) + \mathbf{P}(t) \quad (4)$$

によって投影画像を更新する。

2. 視覚補助のための画像処理

2.1 白内障のためのエッジ強調

Peli らの方法による視覚補助では、入力画像 $I_{in}(x, y)$ の低周波数成分 $I_L(x, y)$ と高周波成分 $I_H(x, y)$ を用いて出力画像

$$I_{out}(x, y) = g_h I_H(x, y) + g_l I_L(x, y) \quad (5)$$

を得る。ただし、 g_h, g_l はそれぞれ、高周波成分と低周波成分の重みであり、 g_h を大きくすることでエッジが強調される。また、低周波数成分 $I_L(x, y)$ は入力画像 $I(x, y)$ とガウシアンカーネル

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

との畳み込み積分で得る。また、高周波数成分は、 $I(x, y)$ から $I_L(x, y)$ を減算することで得た。この画像処理をプロジェクタカメラ系に実装してエッジ強調を行った結果を図2に示す。

Wolffshon らの方法による視覚補助では、Sobel オペレータで抽出したエッジを緑色の光彩として入力画像に足し合わせることで出力画像を得た。

2.2 二色性色覚のための補助

Jefferson らの手法による視覚補助では、まず RGB 色空間で表現された入力画像 $\mathbf{I}_{RGB}(x, y)$ の色彩表現を生理学的色空間である LMS 色空間で表された画像 $\mathbf{I}_{LMS}(x, y)$ に変換する。 $\mathbf{I}_{LMS}(x, y)$ の成分 L, M, S は、網膜上の L 錐体、



(a) 白色照明下の見かけ



(b) 光投影によるエッジ強調結果

図2 Peli らの方法を用いた視覚補助

M 錐体, S 錐体の刺激値に対応している。

二色性色覚は L, M, S のうちの一つを欠落させることで表現でき, Jefferson らの手法ではこの欠落により失われた成分を, 知覚可能な成分に反映させる。そして, 混同色によって知覚が困難なパターンの色彩を知覚可能な色調の画像に変換する。

本研究ではこの画像処理アルゴリズムを見かけの制御に実装し, 光投影による二色性色覚のための視覚補助を実現した。

3. 手持ち式のプロジェクタカメラ系

本研究ではプロジェクタとカメラをコンパクトな手持ち式の筐体の実装し, 利用者が視認困難な場所へ懐中電灯のように照らすことによって見かけを変化させ, 視覚能力を補助する技術の実現を試みた (図3)。具体的には, 手持ち式のプロジェクタカメラ系の実現では以下の2点について研究を行った。

1) 小型軽量な同軸光学系の実現

装置と投影対象物体の距離が変化する状況で,

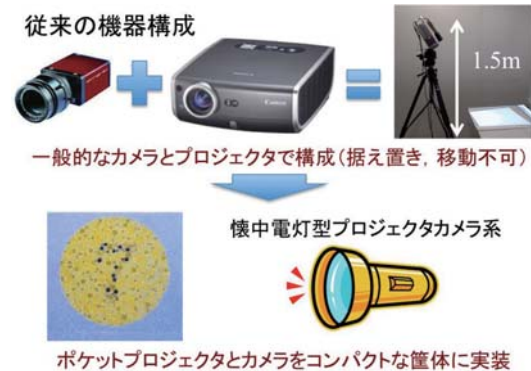


図3 手持ち式プロカム系による視覚補助

ずれなく光を重畳するためには, プロジェクタとカメラを同軸上に配置した光学系が必要となる。本研究では, この光学系を小型化し, 手持ち式装置としての実装を試みた。

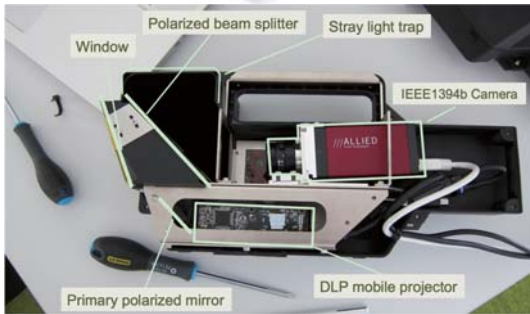
2) 投影光の手振れ補償技術の確立

見かけの制御はプロジェクタカメラフィールドバックにより実現されるが, 短くても 1/30 秒程度の投影遅延が生じる。手持ち式にすると, ユーザの手振れを避ける事はできない。そのため, 投影の画像がずれるという問題がある。本研究では手持ち式のプロジェクタカメラ系での手振れ問題の解決も試みた。

3.1 小型軽量な同軸光学系の実現

近年では, ポケットサイズのプロジェクタがいくつか発売されているが, 室内照明環境下で用いるには照度は十分ではない。そこで, LED 光源を採用したモバイルプロジェクタを用いて, 図4に示す手持ち式の同軸プロジェクタカメラ系を試作した。

この装置では, LED 光源を採用した小型の DLP プロジェクタ (DELL M115HD) と高速 IEEE1394b カメラ (Applied Vision Technology Pike F-100B) を採用した。これらの機器の投影中心は偏光ビームスプリッタ (Polarized beam splitter) によって光学的に同じ位置に配置されている。DLP プロジェクタからの投影光は偏光ミラー (Primary polarized mirror) と偏光ビームスプリッタで反射させてシーンに投影する。



このようにプロジェクタとカメラを同軸に配置すると、ビームスプリッタで反射されずに装置内部で拡散するプロジェクタからの投影光（迷光）の処理が問題となる。この迷光はビームスプリッタを透過してカメラで観察されることによって撮影画像を白濁させ、制御性能を低下させるためである。そこで、本研究では偏光を用いた光学系を採用し、迷光の発生を抑制することでこの問題を解決した。

研究の結果、デジタルビデオカメラで用いられる一般的な手振れ補償技術を、プロジェクタカメラ系に応用することで、投影光のブレ補償を行うことは困難であることが明らかになった。

The diagram illustrates a closed-loop control system for a projector-camera system. The system is divided into three main functional blocks:

- Controller based on MPC (Blue dashed box):** Receives a **Reference Image R** and the **Image C** from the camera. It contains a **Generator of Projection Image with 1^{st} order Dynamics** block, which uses the model $P(t+1) \approx P(t) + \beta(t)\{R(t+1) - C(t)\}$. The controller outputs a signal P to the projector.
- Controlled Object (Projector-Camera System) (Red dashed box):** The **Projector** receives signal P and emits light of intensity I_P . The **Camera** receives light of intensity I_C and outputs the **Image C** . A **Surface Reflectance** block is shown, receiving incident light I_0 and reflecting it as I'_C towards the camera. The label **Controlled Object (Projector-Camera System)** is written below this section.
- Generator of Reference (Green dashed box):** This block generates the **Reference Image R** . It includes an **Image Processing** block that takes C_{ext} as input and outputs R . It also contains an **Estimation of Reflectance $\hat{K}$** block, which receives the **Image C** and outputs $\hat{K}$ to the **Image Processing** block. A **Lag Module Z^{-T_d}** receives $P(t)$ and outputs $P(t-T_d)$ to the **Estimation of Reflectance $\hat{K}$** block.

らである。つまり、ビデオカメラの振れ補償が現在と過去の画像から現在の画像を補償する問題であることに対し、プロジェクトカメラ系では過去と現在から現在の観測画像の補償だけでなく、未来における適切な投影画像の予測も要求される問題だからである。

具体的には、図5に示すように見かけの制御ダイアグラムにスミスの補償器を実装した。スミスの補償器では、撮影画像の遅延と同じだけ過去の投影画像を用いて反射率推定を行う。このように撮影画像の遅れを補償すると収束速度が改善されることから手振れに対する追従性が向上する。

本助成によって、完成度の高い手持ち式プロジェクタカメラのプロトタイプを製作することができた。また、偏光を用いた同軸光学系やスミス補償器を用いたむだ時間補償による手振れ問題の改善方法は、本研究課題のためだけに限定されない成果であり、プロジェクタカメラ系のための新たな基盤技術が得られたと言える。

しかし、研究期間内に試作した装置を用いた視覚補助の評価実験は実施できなかった。

そこで、今後の研究ではまず被験者実験を実施し、製作した装置や手法の有効性を検証したい。また、評価実験では視覚補助に必要な最低照度を割り出し、利用を断念したポケットプロジェクタによる視覚補助の可能性についても検討したい。ポケットプロジェクタの光量で十分な視覚補助が出来るのであれば、装置を大幅に小型化できるからである。さらに、デスクライト型のプロジェクタカメラ系など、違う形での実装についても試み、日常生活のシーン適した、「プロジェクタカメラ系による視覚補助」のあり方を模索する予定である。

[参考文献]

- [1] VISION 2020: The Right to Sight, Global initiative for the elimination of avoidable blindness: Action Plan 2006-2011. World Health Organization, 2007.
- [2] E. Peli, E. Lee, C. L. Trempe and S. Buzney: Image enhancement for the visually impaired: the effects of enhancement on face recognition, J. Opt. Soc. Am. A, 11(7), pp. 1929-1939, 1994.
- [3] J. S. Wolffsohn, D. Mukhopadhyay and M. Rubinstein: Image enhancement of real-time tele-

vision to benefit the visually impaired, American Journal of Ophthalmology, 144(3): 436-440, 2007.

- [4] L. Jefferson and R. Harvey: An interface to support color blind computer users, Proc. of the SIGCHI conf. on Human factors in computing systems, pp. 1535-1538, 2007.
- [5] H. Brettel, F. Vieénot and J. D. Mollon: Computerized simulation of color appearance for dichromats, J. Opt. Soc. Am. A, 14(10), pp. 2647-2655, 1997.

[成果の発表, 論文等]

1. 河野邦起, 牛田俊, 天野敏之: 現実の環境に適した見かけの制御アルゴリズムの提案, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, 計測自動制御学会, 2015.
2. 笠谷昇平, 天野敏之, 大槻正樹: ピクセルマップ更新による動的な投影ずれ補償, 情報処理学会 CVIM 研究会講演論文集, CVIM-191(22), 2014.
3. 川口敬宏, 天野敏之, 大槻正樹: モバイルプロジェクタカメラ系のためのオンライン光学補償, 情報処理学会 CVIM 研究会講演論文集, CVIM-191(21), 2014.
4. (招待講演) 天野敏之: プロジェクタカメラ系による実世界の見かけ操作, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会論文集, pp. 371-372, 2013.
5. 天野敏之: プロジェクタカメラシステムへの誘い, 電子情報通信学会誌, Vol. 96, no. 6, pp. 435-440, 2013.