

## 片眼失明者に距離感を提供する片眼鏡の開発

豊浦 正広<sup>†</sup> 柏木 賢治<sup>†</sup>

片眼の視力を失った患者に距離感を提供する片眼鏡を提案する。片眼の視力を失った患者は、両眼による立体視ができなくなり、手元の細かい作業が困難になる。片眼鏡は2台のカメラとディスプレイを備えた眼鏡型の装置であり、患者の両眼の機能を代行するものである。2台のカメラで標的物までの距離を計算し、焦点ぼけによって距離を表現した映像を生成する。生成映像は健常な眼に提示される。

### Development of Mono-glass to provide a sense of distance for patients losing sight in one eye

Masahiro Toyoura<sup>†</sup> and Kenji Kashiwagi<sup>†</sup>

We propose *mono-glass* to provide a sense of distance for patients losing sight in one eye. The loss of sight disables patients to do binocular disparity processing. It makes short-range activities difficult. Our proposing mono-glass is a wearable device with two cameras and one display monitor. The two cameras reconstruct depth information on behalf of patient's eyes. Reconstructed depth is represented as blur for healthy eye.

#### 1. はじめに

疾患や外傷などによって片眼の視機能が消失もしくは著しく低下した患者は、両眼視機能を失うため、標的物の距離感を得ることができない。このことは、標的物を把持や裁縫などの手元の作業を困難にし、重篤な生活の質の低下を来す。手元の作業が困難になることで、それまでの仕事が続けられないこともある。

2010年時点での世界の失明患者は3900万人で、重篤な弱視患者は2億4600万人と推定されている[1]。日本の視覚障害者は視覚障害者数の30万人であり、その認定基準は「一眼の視力が0.02以下、他眼の視力が0.6以下のもので、両眼の視力の和が0.2を超えるもの」である。この基準に照らすと、片眼が失明していても他眼の視力

が良好な患者は障害者に該当しない。片眼失明は生活や職業上多くの問題を引き起こすが、視覚障害者として認定されなければ、仕事が続けられなくなっても生活の保障はされない。

両眼の視機能が良好な健常者は、①両眼の視角差を利用して標的物までの距離を獲得し、②標的物に焦点を合わせることで標的物以外ではぼけた画像を獲得している。焦点の合っていない領域の画像は脳内処理で抑制され、焦点の合った部分のみが強調されて見えている。片眼のみでは視角差がないため、標的物までの距離を獲得することができず、距離感を得ることはできない。

我々は、上記の①および②の両眼視機能を代行する片眼鏡を試作した。図1に片眼鏡の概要を示す。片眼鏡は2台のカメラとヘッドマウントディスプレイから成る。利用者の目線に取り付けた2台のカメラで得られる画像から、被写体までの距離を計算し、距離に応じて焦点ぼけを強調した画像を生成する。利用者は焦点ぼけの大きさによって、1枚の画像から距離感を得ることができるようにする。

片眼鏡は、手元の作業が必要となるときに利用することを想定して設計された。手元の作業をする仕事にある人が疾患や外傷によって片眼の視機能が失われた場合には、片眼鏡を用いることで社会復帰できることも期待できる。後天的に片眼失明となる患者は、首を振って視点を変えることで、両眼視差ではなく運動視差を利用した距離情報の把握ができるようになり、日常生活での支障は少なくなる。しかし、片眼失明直後の生活支援のためには、距離感を提示する片眼鏡はやはり有用であると考えている。

以降、まず片眼鏡の設計方法について述べる。次に、従来手法や従来製品の問題点について言及し、具体的な実装方法について検討を行う。また、試作した片眼鏡の有効性を健常者による被験者実験によって確かめる。最後に、まとめと今後の課題を示す。

#### 2. 関連研究

片眼への立体感提示を目指す研究および装置は、我々の知る限り、片眼鏡の他にはない。従来装置は、装置表面の凹凸や振動の強弱によって距離を表現するにとどまっておらず、距離情報(distance information)を提示するものであるといえる。これに対して片眼鏡は、健常者が距離を感じるのと同じ仕組みで距離を感じることができるように設計している。この意味において、片眼鏡は距離感(sense of distance)を提示する装置であるといえる。距離感の提示によって、すべての処理を計算機上で行うのではなく、患者の足りない部分だけを補うことで、支援の質を向上することができる。

<sup>†</sup> 山梨大学大学院医学工学総合研究部  
Interdisciplinary Graduate School of Medical and Engineering, University of Yamanashi



図1 片眼鏡の食事での利用例

距離情報提示装置として、赤外線カメラから距離情報を獲得し、基板上に配置された  $6 \times 6$  のピンの凹凸で表現するものが提案されている[2]。また、白杖の先に超音波センサを取り付け、振動によって障害物までの距離を提示する電子白杖[3]も開発されている。また自動車には、衝突防止センサがごく一般的に搭載されている[4]。いずれもカメラやセンサで最近傍物体までの距離を獲得し、視覚以外の情報に変換する方式を採用している。

視覚情報に対する距離情報表現には、自動車の車庫入れのためのアラウンドビューモニターがある[5]。アラウンドビューモニターは、車体の周囲に取り付けたカメラの映像から、車体の真上からの映像を疑似的に表現するものであり、実車に搭載されて販売されている。同様の手法を片眼鏡として実現することも可能であるが、両眼視機能の代行という本研究の目的からは離れる。

焦点ぼけにより人間が距離を認知することは古くから知られている。視線位置を追跡し、視差や焦点ぼけを視線位置に合わせて強調することで、奥行き感や臨場感を強化する試みがなされている[6~7]。視線追跡した結果を映像に反映させる場合には、顔を固定する必要があり、片眼鏡のような移動装置を作ることは難しい。

また、映画作成を目的として、違和感を生じさせないような疑似的なぼけを後処理によって合成する研究も行われている[8]。この手法では、1枚の画像のみから焦点ぼけの度合いを変えた画像を生成することができるが、対象となる画像は風景画のような単純な三次元構造を持つものでなければよい結果が得られない。手元の物体を強調

する片眼鏡のためにこの手法を利用することはできない。図2に単純な疑似フィルタによる焦点ぼけ画像の生成例を示す。図2(a)の円形フィルタは、図2(b)のウサギの形状を強調するためのフィルタである。フィルタ画像の輝度値が低い領域ほど焦点ぼけの度合いを大きくして画像を生成したのが、図2(b)である。手前にあるパンフレットの文字がぼけてしまっている一方で、後方の本棚の本のタイトルはぼけないままになっている。この図から距離感を捉えることは難しい。図2(c)の線型フィルタによって生成される焦点ぼけ画像は図2(d)のようになるが、こちらも手前にあるパンフレットの一部がぼけ、奥にある本棚の本のタイトルの一部がぼかされないままになっている。このように、単純な疑似フィルタを生成するだけでは、室内や手元などの入り組んだ環境の距離感を表現することは難しい。

また、被写体以外のものをハードウェア的にぼかして撮影することで、被写体を強調する撮影法も注目されている。富士フィルム製 FinePix F300EXR[9]やパナソニック社製 LUMIX GF2[10]といった民生用のデジタルカメラでは、被写体以外に焦点ぼけを加えた1枚の画像を、焦点距離を変えて撮影した複数の画像から合成できる。LYTRO社製の Light Field camera[11]はカメラレンズアレイを使って、撮影後に焦点距離を変えた画像を得ることができる。また、研究段階ではあるが、液体レンズの焦点距離を高速に変化させて、全焦点画像を生成する試みもある[12]。これらはいずれも実際に得られるぼけ画像から合成画像を生成するので、任意にぼけを強調して距離を表現する片眼鏡のためには利用できない。焦点位置を変えた画像の取得のために、複数枚の

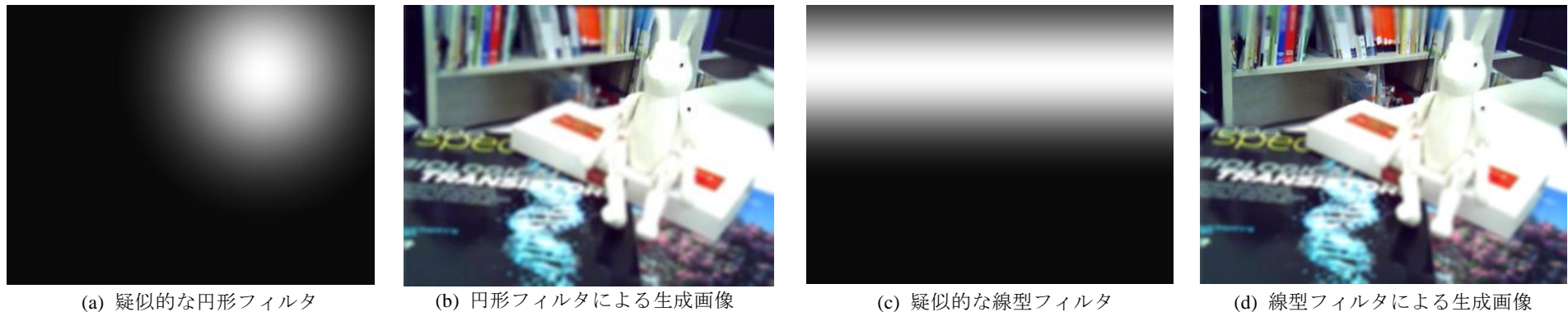


図2 疑似的な距離によるぼけ画像生成

画像取得が必要となるものもあり、処理の実時間性を確保できない問題もある。

我々は、距離計測にステレオカメラの画像から視差を計算する Wang らの手法[13]を採用した。この手法は対応点だけでなくその近傍も参照することで、求められる視差の精度を向上させるものであり、GPUを用いた高速計算が可能である。ステレオカメラ画像からの視差画像生成は、コンピュータビジョンの基礎的な問題であり、近年でも活発な議論が行われている分野である。種々の手法の比較については、[14]を参照されたい。Wang らの手法では視差を求めるのに DP マッチング[15]を用いているが、4 状態を持つ DP に拡張して隠蔽に対して頑健にする手法[16]や、実時間ではないものの信頼度伝搬によって視差の精度を向上させるもの[17]も提案されている。また、Kinect[18]のようなパターン照射型の装置を使った距離計測や、得られた距離情報を観測画像でさらに高精度化する手法[19]も利用できる可能性がある。符号化開口[20]を用いれば、単純なシーンに対する距離計算を1台のカメラで行うことも可能である。これらは装置の大きさの問題は残るものはあるが、高精度な視差画像の生成に貢献するものと考えられる。しかし、本研究の論点からは外れるので、ここでは Wang らのステレオカメラ画像から距離を計算する手法[13]を利用することとする。

### 3. 単画像での距離表現に関する検討

まず、1枚の画像に距離情報を重畳表示する方法について検討する。片眼鏡ででは距離に応じて焦点ぼけの大きさを変える方法を採用するが、他にも、図3(b)および図3(c)に示すような色画像重畳による表現や半透明画像重畳による表現が考えられる。これらの表現方法の利点と欠点について述べる。

#### 3.1 色画像重畳による表現

図3(b)に色画像重畳による距離表現の例を示す。例は、図3(a)に示す右画像に対して、左画像のRGBのうちRの信号のみを重ねて表示したものである。図4(a)のように2台のカメラの視線が平行としないようにすると、ある三次元位置にある物体は2台のカメラで同じ水平位置に映り、右画像と左画像で視差がなくなる。その位置よりも手前にあれば左画像は右にずれ、奥にあれば左画像は左にずれる。図3(b)では、コップの前面でずれのない領域が現れる。

利用者は作業をしたい三次元位置に左右のカメラ画像の中心位置を合わせる。その位置からのずれは、画像のずれとして表現される。赤色で左眼の画像を表現するこの方式では、画像全体が二重に見え、色も実際の物体とは異なって見えるために、利用者に違和感を与える。

#### 3.2 半透明画像重畳による表現

図3(c)に半透明画像重畳による距離表現の例を示す。例は、図3(a)に示す右画像に対して、左画像の輝度を落として重畳表示したものである。色画像重畳の場合と同様に、2台のカメラの視線が平行としないようにすると、ある三次元位置にある物体は2台のカメラで同じ水平位置に映り、その位置からずれると左画像が左右にずれる。図3(b)と同様に、コップの前面でずれのない領域が現れる。半透明画像を重畳表示する場合にも、生成される画像は普段では見ることのない映像となり、利用者に違和感を与える。

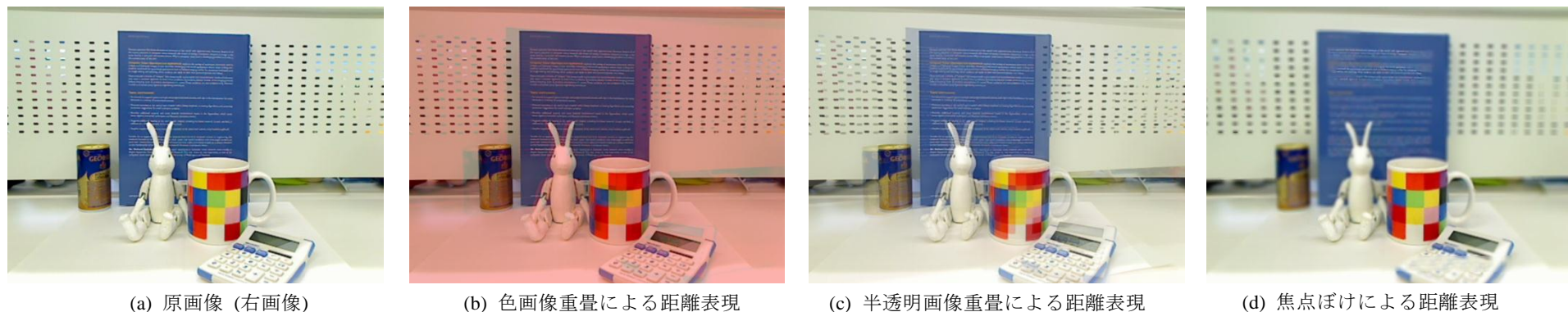


図3 異なる情報による距離表現

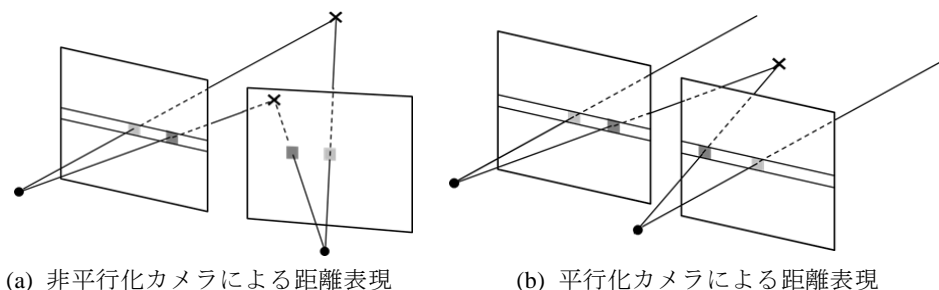


図4 非平行化および平行化カメラによる1枚の画像での距離表現

### 3.3 距離に応じた焦点ぼけによる表現

図3(d)に焦点ぼけによる距離表現の例を示す。例は、右画像に対して、左右の画像から距離画像を生成し、距離に応じた焦点ぼけを加えたものである。例では、図3(b)や図3(c)の生成に利用した左右画像が一致する奥行き位置で焦点ぼけを0とし、その位置から離れるほどに焦点ぼけを大きくして画像を生成している。図3(d)では、コップの前面で焦点ぼけのない領域が現れる。

色画像重畳や半透明画像重畳と比較すると、焦点ぼけによる表現は、利用者が違和感を生じにくい表現であると考えられる。人間は普段から焦点ぼけのある画像を見ていることから、焦点ぼけ表現が人間にとって自然なものとなるためである。視野の中心では高解像度の画像を観測できるが、それ以外の領域では中心よりも低解像度の画像しか観測できない。これは、中心窩と呼ばれる網膜の中心に視細胞が密

集しており、標準化間隔の小さな画像を観測できるのに対して、その他の領域では視細胞の数が少なく、標準化間隔が大きいことによるものである。極端に言えば、人間の眼は視野中心以外ではぼけた画像を観測しているといえる。

色画像重畳や半透明画像重畳が視差や距離の計算を必要としないのに対して、距離に応じた焦点ぼけによる表現は、視差や距離の計算を必要とする。このことは、焦点ぼけによる距離表現の欠点として挙げられる。視差や距離の計算は、対象物体に色特徴がなかったり、鏡面反射物体であったりするときには、精度が悪くなる。また、高精度に視差や距離を計算するためには、高い計算能力や大きな処理時間が求められる。4.に示す実現手法の説明では、これらの問題に対する対処について検討し、その解決策を示す。

一方で、標準となる奥行き位置はソフトウェア的に変更でき、これは焦点ぼけによる表現の利点である。細かなハードウェア的な調整は、一般の利用者には難しい。また、ハードウェア的な実装では距離に応じて画像のずれの度合いを調整することができないが、ソフトウェア的な実装では焦点ぼけの大きさを自由に調整することができる。

なお、ステレオ画像から距離を計算するときには、図4(b)に示すように視線を平行にし、左右画像間の水平方向が一致するような変換をあらかじめ求めておくのが一般的である[21]。この処理は、ステレオ画像の平行化(rectification)と呼ばれる。

## 4. 片眼鏡の実現手法

片眼鏡を実現するために必要な距離計算と焦点ぼけ画像生成の実現手法について説明する。

左画像の位置 $(x,y)$ の輝度値 $p(x,y)$ とし、右画像の位置 $(x,y)$ の輝度値を $q(x,y)$ とする。図4(b)に示すようにステレオ画像の平行化(rectification)[21]が行われていれば、左画像の位置 $(x,y)$ に写る物体は、右画像では位置 $(x+d,y)$ に写ることになる。このときの $d$ が視差である。ステレオ画像の平行化は、ステレオカメラでチェス模様のキャリブレーションボードを観測し、多く対応点を与えることで計算ができる。詳細は文献[21]を参照されたい。

左画像の位置 $(x,y)$ に写る物体が右画像の位置 $(x+d,y)$ に対応するときの対応コストを $C(x,y,d)$ とすると、この対応コストは以下の式で計算できる。

$$C(x, y, d) = |p(x, y) - q(x + d, y)| \quad (1)$$

対応コストを画像全体に対して足し合わせた値は、データ項 $E_{data}(d)$ と見ることができる。

$$E_{data}(d) = \sum_{(x,y)} C(x, y, d) \quad (2)$$

さらに、位置 $(x,y)$ での視差と位置 $(x+1,y)$ での視差は大きく変わらないことが多いので、これを平滑化項 $E_{smooth}(d)$ として定義する。

$$E_{smooth}(d) = \sum_{(x,y)} |d(x, y) - d(x + 1, y)| \quad (3)$$

データ項と平滑化項を重み付けした和であるエネルギー $E(d)$ が最小となるような視差の値は、画像全体で最適な視差の値となる。

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda E_{smooth}(d) \quad (4)$$

この最適化問題は、DP マッチングで解くことができる[15]。ある行 $y$ に対して、 $x$ と $d$ をインデックスに持つ行列 $M$ を作り、 $d$ 行 $x$ 列の要素 $M(x,d)$ を $C(x,y,d)$ とする。 $E(d)$ を最小とするような視差は、 $M$ を以下のように更新して、DP として解くことで求められる。

$$M(x, d) \rightarrow M(x, d) + \min(M(x - 1, d - 1) + \lambda, M(x - 1, d), M(x, d + 1) + \lambda) \quad (5)$$

一般的なステレオ距離計測手法ではさらに、対応コストを近傍のコストの値も考慮した $C'(x,y,d)$ として与える。

$$C'(x, y, d) = \sum_{(x',y') \in \Omega(x,y)} C(x', y', d) \quad (6)$$

ただし、 $\Omega(x,y)$ は $(x,y)$ の近傍画素の集合である。これに対し、Wang ら[13]は近傍画素との輝度値の差 $c(x,y,x',y')$ およびユークリッド距離 $g(x,y,x',y')$ を考慮した重み $w(x,y,x',y')$ を定義した。

$$w(x, y, x', y') = \exp\left(-\left(\frac{c(x, y, x', y')}{\gamma_c} + \frac{g(x, y, x', y')}{\gamma_g}\right)\right) \quad (7)$$

ただし、 $\gamma_c$ および $\gamma_g$ は輝度値と距離に重みを与えるための定数である。このとき、重み $w(x,y,x',y')$ を用いて、新しい対応コストは以下のように書き表される。

$$C'(x, y, d) = \frac{\sum_{\substack{(x',y') \in \Omega(x,y), \\ (a',b') \in \Omega(a,b)}} w(x, y, x', y') w(a, b, a', b') C(x, y, d)}{\sum_{\substack{(x',y') \in \Omega(x,y), \\ (a',b') \in \Omega(a,b)}} w(x, y, x', y') w(a, b, a', b')} \quad (8)$$

これにより、近傍画素の色および距離を考慮した視差の計算が可能になる。また、これはDPによる全体最適化は引き続き利用でき、GPUによる高速化が可能な定式化となっている。

我々はさらに処理を高速化するために、画像を縮小して視差を計算する。視差を求めるためにかかる処理時間は、(5)式で求められる行列 $M$ のサイズに大きく依存する。画像の高さや幅が半分になれば、行列 $M$ の数とサイズはそれぞれ単純に半分となる。また、視差計算においては、画像に含まれるノイズを取り除くために前処理として画像平滑化が行われることが多い。画像の縮小は平滑化と同じ効果がある。実験では、幅および高さを1/4にして視差画像を生成した。

画像を縮小して求められた視差画像は、元のサイズに拡大され、距離を計算する。視差 $d$ に対して、ステレオカメラ間の基線長 $T$ 、焦点距離 $f$ とすると、距離 $z$ は以下のように計算される[22]。

$$z = \frac{fT}{d} \quad (9)$$

焦点ぼけを0とする標準奥行き位置を $z_0$ とすると、距離 $z$ における焦点ぼけ半径 $\sigma$ は次の式で計算できる。

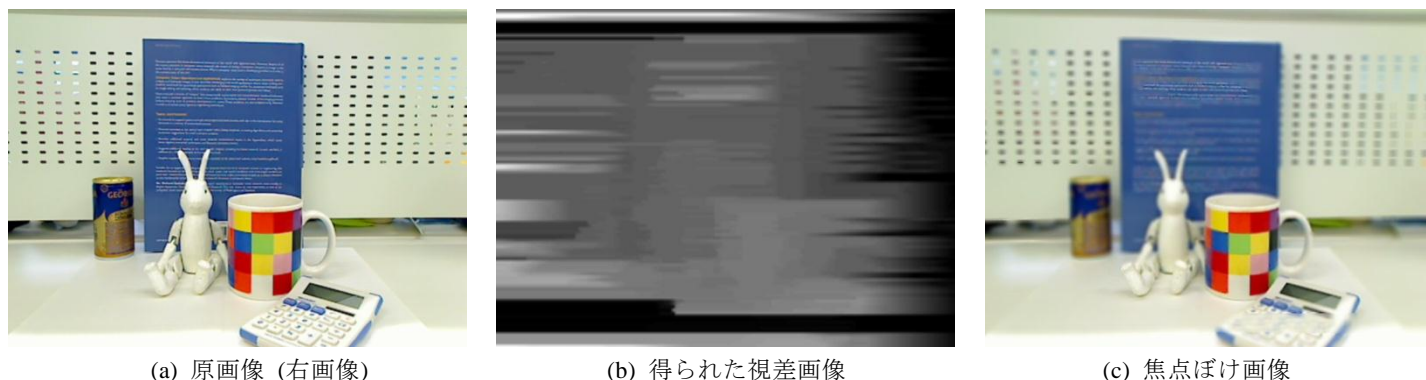


図5 焦点ぼけ画像生成結果

$$\sigma = \alpha \left( \gamma \frac{|z - z_0|}{z_0} + \delta \right)^\beta \quad (10)$$

ただし、 $\alpha, \beta, \gamma$ は任意の定数であり、 $\delta$ は $\sigma$ を正の値とするための微小な定数である。与えられた焦点ぼけ半径  $\sigma$ から焦点ぼけ画像の各位置での画素値を計算する。原画像の位置 $(x,y)$ での画素値を  $I(x,y)$ とすると、焦点ぼけ画像の位置 $(x,y)$ での画素値  $I_\sigma(x,y)$ は以下の式で求められる。

$$I_\sigma(x,y) = \frac{\sum_{(x',y') \in \Omega(x,y)} I(x,y) \exp(-g(x,y,x',y')^2 / \sigma^2)}{\sum_{(x',y') \in \Omega(x,y)} \exp(-g(x,y,x',y')^2 / \sigma^2)} \quad (11)$$

ただし、原画像  $I(x,y)$ にも最初から焦点ぼけが含まれることに注意されたい。(11)式ではこのことに関する考慮はないが、実際に観測される焦点ぼけよりもずっと大きな焦点ぼけを与える場合には、それほど問題とはならない。焦点ぼけが0となる距離  $z_0$ で焦点ぼけのない画像を生成するためには、原画像を取得するときのカメラの焦点距離を  $z_0$ に合わせておくことが有用である。

## 5. 実験

実験は Vuzix 製 3D ヘッドマウントディスプレイ WrapAR920 で行った。Wrap920AR

は左右独立のディスプレイと目線位置に取り付けられた2台のカメラを持つ。利用者の目線相当部取り付けカメラの観測画像を取得し、いったんコンピュータに入力し、距離検出および焦点ぼけ画像生成を行い、左右のディスプレイに提示することができる。片眼しか見えない利用者を想定して、左右のどちらかのディスプレイに生成されたぼけ画像を提示することにする。

処理するコンピュータは OS: Windows7 64bit, CPU: Intel Corei7-2620M 3.4GHz, GPU: NVidia NVS 4200M 1GB, MM: 8GB であった。実装には Microsoft Visual Studio 2010, CUDA4.0 および OpenCV2.3 を用いた。

ステレオカメラの基線長は 60mm であった。カメラの焦点距離は各々400mm とし、標準奥行き距離  $z_0$  も 400mm とした。(10)式に示した焦点ぼけ生成のための定数は  $\alpha=1.0, \beta=2.0, \gamma=1.0, \delta=0.01$  とした。

### 5.1 焦点ぼけ画像生成

生成結果の例を図5に示す。図5(b)に示す距離画像の精度はそれほど高くなく、横方向のアーティファクトが確認されるが、図5(c)に示す生成画像にはそれほど違和感はないことがわかる。これは、視差の計算が模様のないところで視差計算の精度が低下する一方で、模様のないところでは焦点ぼけの大小によってそれほど見た目が変わらないことによる。また、距離画像の精度を向上させるためには、画面上に模様のある物体を配置することが一般的に行われるが、片眼鏡の目的を鑑みると、これは適切ではない。

1枚あたりの処理時間は平均で 215ms であり、4.6fps の焦点ぼけ画像生成を行うこ

とができた。実時間とは言えないものの、ゆっくりした手元の動作のためには利用可能な処理速度を確保できた。

多くの処理時間は、視差画像生成の際の DP マッチングによる視差計算に費やされている。この部分については、GPU による並列計算ができなかったためである。水平方向(x 軸方向)の DP マッチングの計算は、原理的に並列化ができない。また、垂直方向(y 軸方向)の計算は原理的には並列化が可能であるが、行列  $M$  の大きさが GPU のスレッドのメモリサイズを越えているために、やはり並列化ができなかった。

## 5.2 被験者実験による性能評価

被験者は 30 代男女各 1 名とし、右眼が利き目であり、右眼の視力はいずれもの被験者も 1.2 であった。ヘッドマウントディスプレイの左眼には、映像を提示しなかった。男性(以下、被験者 A)は普段からヘッドマウントディスプレイを用いており、取り扱いに慣れていた。女性(以下、被験者 B)は、ヘッドマウントディスプレイを使うのは実験が初めてであった。

図 6 に示す環境で実験を行った。机の上に置いた箱に図 6(b)に示すような直径 2.5cm の穴を左右に 2 つ開けた。これらの穴に直径 2cm、高さ 8.5cm の円柱を差し込んでもらう。円柱の一方には、焦点ぼけが生じたときに視認できるような模様のついたテープを巻いた。被験者には、円柱のもう一方を持つように指示した。また、箱にも罫線のついた紙を貼りつけ、焦点ぼけが視認できるようにした。

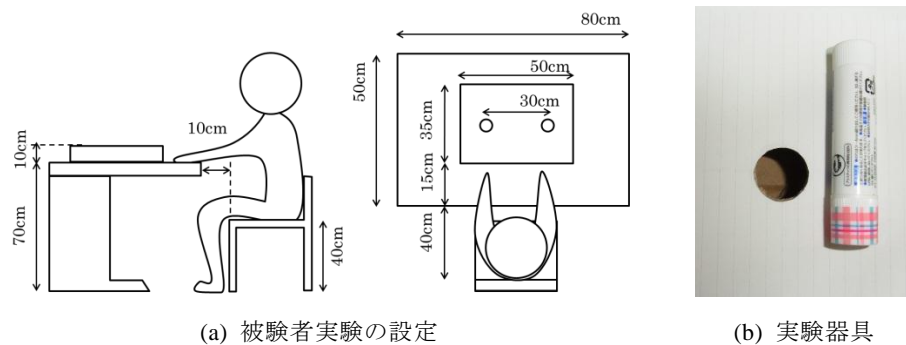


図 6 被験者実験の環境

被験者には、①手元に円柱を置く、②右の穴に円柱を差し込む、③前方を見る、④左の穴に円柱を差し込む、⑤手元に円柱を置く、を 1 セットとし、これを 20 セット繰り返してもらった。このタスクは、穴と円柱の距離関係がわからないと達成できないように設定している。被験者には、箱の上を滑らせて穴に入れるのではなく、円柱を

空中に浮かせて穴との位置関係を合わせるように指示した。被験者には、焦点ぼけのある映像で穴と円柱の様子がぼけないようにすれば、タスクを実行できるとの説明をした。

タスク実行中には、焦点ぼけあり、および、焦点ぼけなしの 2 種類の映像をそれぞれの被験者に提示し、タスク実行に要する時間を計測した。実験の前には、慣れるための時間を十分に取り、自由に練習してもらった。また、2 種類の映像提示の間には十分な休憩時間を置いた。

表 1 に結果を示す。t 検定で各被験者の焦点ぼけの有無によるタスク実行時間の差を調べたところ、被験者 A では有意水準 1% で焦点ぼけがある場合にタスクの実行時間が短くなったことが確かめられた。被験者 B では、有意な差は確かめられなかった。被験者 A については、焦点ぼけを映像に加えることで、穴と円柱の距離関係がわかりやすくなったといえる。

表 1 焦点ぼけの有無とタスク実行時間 (sec)

	焦点ぼけなし		焦点ぼけあり	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
A	13.60	1.83	11.50	1.16
B	23.53	12.87	19.99	7.43

被験者 B からは、タスク実行中にヘッドマウントディスプレイが視線方向とずれる感覚があったと報告があった。また、両被験者から、映像生成の遅さによって、タスク実行が妨げられたとの意見も受けた。一方で、両被験者とも、焦点ぼけを加えた映像では、穴と円柱の様子がくっきりするところで位置が合うことは理解でき、被験者 B からは、ゲームしているように感じたとの感想も得た。

## 6. まとめ

我々は片眼失明者に距離感を提供する片眼鏡を開発した。単画像で距離感を表現するための手法について検討し、距離に応じて焦点ぼけを重畳した画像を生成する手法を提案した。ステレオカメラ付きヘッドマウントディスプレイにこの方式を実装し、GPU を用いることで 4.6fps の焦点ぼけ映像生成を実現した。また、被験者実験によって、単に観測した画像を提示するよりも、距離に応じて焦点ぼけを重畳した映像を提示したときの方が、一部の被験者には距離感を表現できることを確認した。

今後の課題として、処理速度の向上を挙げる。GPU を用いた並列処理によって、高速で高精度なステレオ距離計測を実現したが、まだ十分ではない。この距離計測の部分に処理時間の多くが費やされているので、この部分についての改良が求められる。また、距離感を表現するのに最適な焦点ぼけの設定についても検討を進めたい。被験

者実験では、単一の設定による評価を行ったが、最適な設定は環境や個人によって異なると考えられる。これらの設定を柔軟にできるように機器の設計を進めるとともに、標準的な設定について被験者実験を行って、さらに検討を深めたい。また、実際の片眼失明者を被験者とした評価実験を行いたい。実用のためには、今回のような負担の大きい短時間のタスクだけでなく、負担は小さいものの時間の長いようなタスクにも利用できるようにしなければならない。作業が持続可能な装置となるように、手法の改良を進めていきたい。

提案手法の応用先として、3D ステレオ画像の単画像化も検討を進めている。近年では3D ステレオ映像が数多く作られるようになってきたが、提示装置はまだまだ3D ステレオ表示に対応していないものが多い。また、紙面に印刷する需要は今後もなくなるので、距離感を保存した単画像化は今後も必要であると考えられる。

**謝辞** 本研究の一部は、平成 23 年度独立行政法人科学技術振興機構研究成果最適展開支援事業 (A-STEP) 探索タイプ、および、平成 23 年度中島記念国際交流財団日本人若手研究者研究助成金の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- 1) Pascolini, D., and Mariotti, S. P.: Global estimates of visual impairment: 2010, BJO Online First (2011).
- 2) Okayasu, M.: The development of a visual system for the detection of obstructions for visually impaired people, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.23, No.10, pp.2776–2779 (2009).
- 3) Okayasu, M.: Newly developed walking apparatus for identification of obstructions by visually impaired people, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.24, No.6, pp.1261–1264 (2010).
- 4) 深谷友次: 自動車用センサの技術動向, *デンソーテクニカルレビュー*, Vol.11, No.1, pp. 92–99 (2006).
- 5) NISSAN, Around View Monitor, Available online at: <http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/avm.html> (accessed 29-12-2011).
- 6) 岡谷 貴之, 石澤 昂, 出口 光一郎: 被写界深度ぼけの提示により奥行感を強化する注視 反応型ディスプレイ, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.92, No.8, pp.1298–1307 (2009).
- 7) 折笠 達郎, 鈴木 孝明, 岡谷 貴之, 出口 光一郎: 注視反応ディスプレイによる両眼視差 とボケの同時提示, *情報処理学会研究報告 CVIM*, Vol.2011, No.40, pp.1–8 (2011).
- 8) Held, R.T., Cooper, E.A., O'Brien, J.F. and Banks, M.S.: Using Blur to Affect Perceived Distance and Size, *ACM Transactions on Graphics*, Vol.29, No.2, pp. 1–16 (2010).
- 9) FujiFilm, FinePix F300EXR, Available online at: [http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr\\_0414.html](http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr_0414.html) (accessed 29-12-2011).
- 10) Panasonic, LUMIX GF2, Available online at: <http://panasonic.jp/dc/gf2/> (accessed 29-12-2011)
- 11) LYTRO, Light Field camera, Available online at: <https://www.lytro.com/camera> (accessed 29-12-2011).
- 12) 奥 寛雅, 石川貴彦, 石川正俊: 光学系と画像処理系の速度を整合した高速フォーカ スビジョン, *日本ロボット学会誌*, Vol.27, No.7, pp.739–748 (2009).
- 13) Wang, L., Liao, M., Gong, M., Yang, R. and Nister, D.: High-quality Real-time Stereo using Adaptive Cost Aggregation, *International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT)* (2006).
- 14) Gong, M., Yang, R., Wang, L. and Gong, M.: A Performance Study on Different Cost Aggregation Approaches used in Real-time Stereo Matching, *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol.75, No.2, pp.283–296 (2007).
- 15) Sven, F., 加納 裕, 大谷 淳, Sven, T., Alfred, S.: 動的計画法による実時間ステレオ, *電子情報通信学会技術研究報告 PRMU*, Vol.103, No.453, pp.103–108 (2003).
- 16) Criminisi, A., Blake, A., Rother, C., Shton, J. and Torr, P.: Efficient dense stereo with occlusions for new view-synthesis by four-state dynamic programming, *International Journal of Computer Vision*, Vol.71, No.1, pp.89–110 (2007).
- 17) Yang, Q., Wang, L. and Ahuja, N.: A constant-space belief propagation algorithm for stereo matching, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.1458–1465 (2010).
- 18) Microsoft Corp, Kinect for Xbox 360, Available online at: <http://www.xbox.com/kinect/> (accessed 29-12-2011).
- 19) Yang, Q., Yang, R., Davis, J. and Nister, D.: Spatial-depth super resolution for range images, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.1–8 (2007).
- 20) Zhou, C., Lin, S. and Nayar, S.: Coded aperture pairs for depth from defocus, *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, pp.325–332 (2009).
- 21) Jean-Yves Bouguet, "The Camera Calibration Toolbox for Matlab," Available online at: [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/) (Accessed 29-12-2011).
- 22) Pentland, A.: A New Sense for Depth of Field, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.9, No.4, pp.523–531 (1987).