

符号化開口を用いたステレオ法の頑健化

武田 祐一^{†1} 日浦 慎作^{†2} 佐藤 宏介^{†1}

ステレオ法の計測精度は対応点探索の精度に大きく依存する。カメラの大きさに対し相対的に小さいシーンでは、被写界深度が浅くなるため、ぼけにより対応付けが不安定となる。そこで本研究ではレンズの開口を符号化することでぼけによるシーン情報の損失を抑制し、ノイズに対してより頑健なステレオ計測を行うことを目的とする。実験の結果、M系列を用いた符号化開口により対応付けを安定化できることが確認された。

Coded Aperture Stereo for Robust Depth Estimation

YUUCHI TAKEDA,^{†1} SHINSAKU HIURA^{†2}
and KOUKE SATO^{†1}

The accuracy of stereo depth estimation mainly depends on the accuracy of finding correspondence between two images. if we measure the relatively small scene to the camera, blurring effect make the correspondence unstable because we will have shallower depth of field. Therefore, in this paper, we propose a robust stereo measurement system with coded aperture by avoiding the loss of information due to the blur effect. Experimental results show that the aperture coded with MLS makes the stereo correspondence problem robust against the noise.

1. はじめに

カメラを利用した距離計測は工業や医療など、様々な分野で利用されている。画像から対

象物体までの距離を求める手法は数多く提案されているが、その中で視点の異なる2枚の画像から距離を復元する手法をステレオ法と呼ぶ。ステレオ法の計測に要する時間は画像を撮影する時間のみでよく、かつ画像のぼけ量から距離を計測する Depth From Defocus より精度が良いため様々な分野で応用されている。ステレオ法の高精度化や頑健化については様々な研究例があるが、その多くは撮影された画像の性質が理想化されたピンホールカメラモデルに従うことを前提としており、現実の光学系の特性に言及したものは少ない。

ところが実際には、カメラの開口の大きさが無視できないほど小さな物体を撮影するとき必然的に画像にぼけが生じてしまう。このぼけは奥行きに依存したぼけであり、このぼけが大きいと安定して距離計測を行うことができない。被写界深度を深くし、ぼけを小さく撮影するには、レンズのF値を大きくして撮影すればよい。しかしその場合、十分な露光量を得るためには露光時間を長くしなければならない。そのため動物体を撮影する場合やカメラが動く場合、モーションブラーが発生する。

ステレオ法では2枚の入力画像間で対応する点を探し、三角測量の原理により距離計測を行う。テンプレートマッチングは対応点探索の代表的な手法の一つである。この手法は、画像の一部を局所窓として取り出し、その局所窓をテンプレートとし、他の入力画像の局所窓との類似度を求め、最も類似度の高い箇所を対応点として決定する。そのため、局所窓内にテクスチャなどの情報が多く含まれている方がより安定してマッチングを行うことができる。ところが画像におけるぼけはテクスチャなどの情報を欠落させてしまうため、安定したマッチングの妨げとなる。そこで本研究は、ぼけの発生する状況下でも安定した対応点探索を行うことを目的とする。

2. 関連研究

1章で述べたように、ステレオ法は有用な距離計測手法であるため様々な研究がなされてきたが、特にマッチング精度の向上と高速化を目的とした研究が多くなされてきた。Stanら¹⁾はマッチングに動的計画法を用い、高精度化と高速化を実現した。Bleyerら²⁾はグラフカットをステレオ法に応用した。Scharstein³⁾は様々なステレオマッチングアルゴリズムを比較した。しかし、これらの多くはステレオマッチングのアルゴリズムに関するものであり、実際の光学系に言及したものは少なく、特に画像に含まれるぼけを考慮したものは少ない。

2.1 Coded Aperture

近年、コンピュータの計算能力は非常に高くなっている。そのため、画像を取得した後に

^{†1} 大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate school of Engineering Science, Osaka University

^{†2} 広島市立大学情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Hiroshima University

所望の画像に修正することが可能となってきた。このような画像撮影後の演算を前提とした画像の取得法に関する研究は Computational Photography と呼ばれ近年盛んに研究が行われている。

その中でカメラの開口部(絞り)を符号化することで、一般的な絞りを用いて撮影した際に欠損してしまう情報を保存する手法を符号化開口(Coded Aperture)と呼ぶ。

ある奥行きから出た光は、レンズで屈折して撮像素子に集光する。その概念図を図1に示す。撮像素子上の1点で観測される輝度値 y のぼけモデルは畳み込みとして式(1)のよう

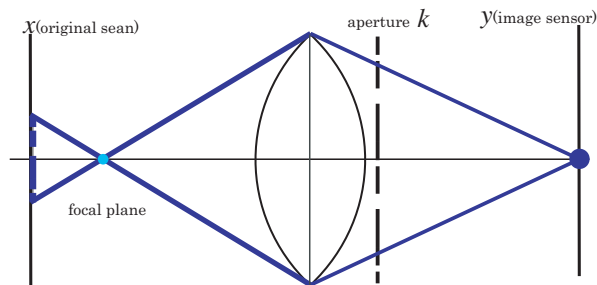


図1 素子1点への集光:素子上の点へ集光する光は、元シーンの複数の点からの影響を受け、カーネルとの畳み込みで表現される

に表現される。

$$y = k * x \quad (1)$$

ここで x はぼけのない元シーンを、 k はぼけカーネルをそれぞれ表す。空間周波数領域では

$$Y(\omega) = K(\omega) \cdot X(\omega) \quad (2)$$

となり、ぼけの光学伝達関数はぼけカーネルの周波数特性となる。このフィルタを所望の周波数特性に設計することにより、観測画像に表れるぼけを制御することができる。

Levin ら⁵⁾ は、Coded Aperture を利用し1枚の画像から奥行き推定とぼけ除去の両方を行った。奥行きごとのカーネルをあらかじめ用意しておき、それにより復元した画像が画像に関する先験的知識を最も良く満たすようなカーネルを選ぶことで奥行きを推定した。さらにこれにより求めたカーネルと観測画像の逆畳み込みによりぼけ除去を行った。画像に関する先験的知識としては、画像の勾配の分布がガウス分布に従うと仮定している。しかし、原画像がこの過程を満たさない場合には奥行き推定が正しく行われぬ。また、画像だけから

では距離推定が必ずしも正しく行えないため、手動により荒く奥行きを与えておく必要があることが指摘されている。Zhou ら⁶⁾ は、同一視点から、異なるコードを用いて2枚画像を撮影し、ぼけ除去と奥行き推定を行った。Liang ら⁷⁾ は、液晶シャッタを用いて絞りの形状を変化させた。形状を順次変えてシーンを撮影し、ライトフィールドの取得、奥行き推定、リフォーカシングを行った。

また、Levoy ら⁸⁾ は、顕微鏡にレンズアレイを挿入した光学系を用いた Light Field Microscopy を提案した。この手法ではシーンの撮影後に合焦面の変更や視点の変更などが可能である。しかし奥行き推定は行っていない。

2.2 本研究の位置付け

ステレオ法を用いた距離計測の精度は、対応点探索の精度に大きく依存する。そのため、対応点探索の精度向上を目的とした研究が数多くなされてきた。ところがその対応点探索手法の多くは撮影した画像にぼけがないことを前提としており、ぼけを含む画像での距離計測はあまり問題とされてきていない。また、ぼけ除去に関する研究としては Coded Aperture があり、その過程で距離計測を行っている研究も多い。しかしそれらの研究における距離計測手法は Depth From Defocus で用いられているような、空間周波数解析や逆畳み込み演算に基づく手法であり、視差は明示的には利用されていない。Depth From Defocus の距離計測精度はレンズの口径の大きさに制約されるため、一般に精度はステレオ法に劣ることが問題として挙げられる。

そこで本研究では Coded Aperture を用いたステレオ法を提案する。レンズの開口部を符号化することで、ぼけによる画像の情報の損失を抑えて撮影することが可能となる。情報の損失の少ない画像を入力することで、より安定したステレオマッチングを行うことが可能であると考えられる。

3. 提案手法

本稿で提案するシステムでは、符号化開口を用いて撮影した画像組を入力画像としてステレオマッチングを行う。符号化開口を用いることでぼけの光学伝達関数が広帯域化する。画像の高周波数成分を残すことにより情報の損失を避けることができるので、ステレオマッチングの安定性を向上させることができる。

本システムでは、ステレオマッチングにおける類似度の評価基準に正規化相関を用いた。正規化相関は、各テンプレート間の画素値をベクトルとした時、二つのベクトルの方向余弦を求めていることに等しく、撮影された2枚の画像間の平均明度の違いの影響の少ない方法

である。

3.1 ステレオ法に適したコード

カメラに対して相対的に小さな物体を撮影するとぼけの影響を無視することができないため、ステレオマッチングに影響が生じる。このぼけの影響を抑えることのできるコードについて述べる。本論文では視点の異なる2枚の画像の撮影に同一のコードを用いる。

左に設置したカメラの位置から見られる元シーンとそのカメラにより撮影された観測画像をそれぞれ x_L, y_L とし、同様に右に設置したカメラから見られる元シーンとそのカメラにより撮影された観測画像をそれぞれ x_R, y_R とする。このときのぼけカーネルを k とすると、元シーンと観測画像の関係は式(1)で示したように畳み込みみであるので

$$\begin{aligned} y_L &= k * x_L \\ y_R &= k * x_R \end{aligned} \quad (3)$$

となる。周波数領域では

$$\begin{aligned} Y_L(\omega) &= K(\omega) \cdot X_L(\omega) \\ Y_R(\omega) &= K(\omega) \cdot X_R(\omega) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

また、二つの関数 $g(x), h(x)$ の相関は $r_{g,h}(\tau) = \int g(t) \cdot \overline{h(\tau-t)}$ であり、周波数領域における表現 $G(\omega), H(\omega)$ を用いて書くと

$$r_{g,h}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int G(\omega) \cdot \overline{H(\omega)} e^{j\omega\tau} d\omega \quad (5)$$

となる。そのため、観測画像 y_L, y_R の相関は

$$\begin{aligned} r_{y_L, y_R}(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int Y_L(\omega) \cdot \overline{Y_R(\omega)} e^{j\omega\tau} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int K(\omega) \cdot X_L(\omega) \cdot \overline{K(\omega) \cdot X_R(\omega)} e^{j\omega\tau} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int |K(\omega)|^2 X_L(\omega) \cdot \overline{X_R(\omega)} e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \quad (6)$$

と書ける。ここで、ステレオマッチングにおいてぼけの影響が抑制されているということは、観測画像 x_L, y_R の相関が元シーン x_L, x_R の相関に等しくなることであると言える。そのとき、ぼけカーネルに求められる条件は

$$|K(\omega)|^2 = 1 \quad (7)$$

となる。

式(7)の条件を満たすコードの例として、ディラックのデルタ関数があげられる。これは

光学系としてはピンホールカメラを意味する。しかしコードは光を遮断・通過するマスクによって実現され、マスクの透過率は完全な遮断 ($k=0$) から完全な透過 ($k=1$) の範囲に限定されるため、 $\delta(0) \rightarrow \infty$ となるデルタ関数は用いることができない。そこでパワースペクトルが一律で $|k| \leq 1$ の条件を満たすコードとして M 系列を用いたコードを提案する。

M 系列とは $\{0, 1\}$ の値を持つ二値符号で $2^p - 1$ の周期符号である。パワースペクトルは周波数によらずほぼ均一である。カメラの開口部に挿入するコードは、1枚の紙に印刷し切り出して作成する。そのため切り出したコードの内部にどの箇所ともつながっていない部分があってはならない。ところが2眼ステレオではマッチングの探索方向は1次元に限定されるため、探索方向のぼけの影響を抑制することでマッチングの安定化を行うことが可能である。M 系列を用いたコードを図2(a)に示す。

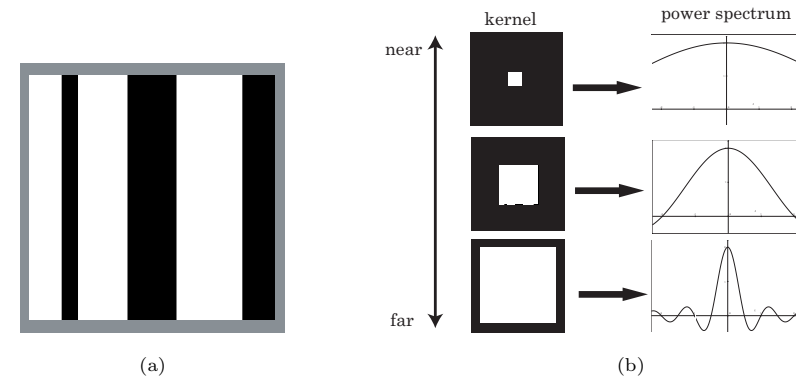


図2 (a)M 系列コード (b) ぼけカーネルのスケールリングと通過周波数特性

1章で述べた様に、既存の光学系では焦点ぼけを避けることはできない。これはコード化を行った場合も同様である。合焦面上に無い点から出た光は、開口部をスケールリングした図形として撮像素子上にあらわれる。そのため、式(1)のぼけカーネルは、開口形状をスケールリングさせたものとして考えることができる。ぼけカーネルの大きさは、合焦面に近いところのものほど小さく、合焦面からの距離が大きくなると大きくなる。カーネルのスケールリングと周波数特性の概念図を図2(b)に示す。

また、カーネルの大きさごとの M 系列コードと一般的な開口の通過周波数特性を示した

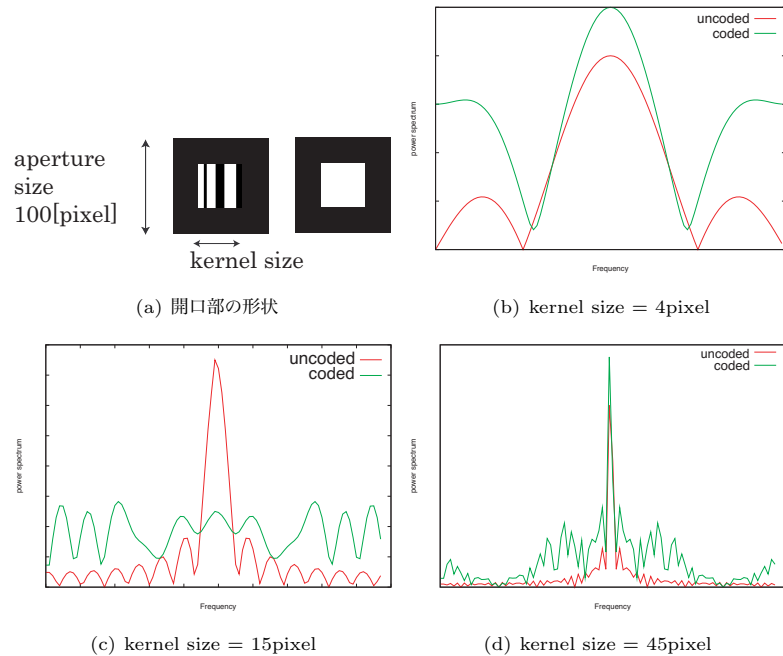


図 3 開口部の大きさとその通過周波数特性のグラフ。赤が矩形開口、緑がコード化した開口を表す

図を図 3 に示す。各スケールにおいて、M 系列コードを用いた開口の方が一般的な開口より広帯域となるため、式 (7) に近い条件を満たしていることがわかる。

4. 実 験

M 系列コードを用いることでステレオマッチングが安定化されることを確認するため

4.1 提案システムの実装

実験で用いたカメラは NIKON D200, レンズは SIGMA EX 30mm F1.4 EX DC である。1 台のカメラをスライド上に設置し、左右に平行移動させて画像を撮影した。M 系列コードは図 2(a) のものを普通紙に印刷し、切り出して作成した。M 系列の周期は 15 である。実験においては、すべて 8 ビットの画像を用いた。

4.2 探索範囲内における類似度評価値の比較

縞模様を配置したシーンで、対応点探索の評価関数の値を探索範囲内で求め、コードあり、コードなしで比較した。合焦点はレンズからおおよそ 50[cm], F 値は共に 1.4 である。露光時間はコードあり 1/40[sec], コードなし 1/100[sec] である。図 4(a), 4(b) はコードあり、

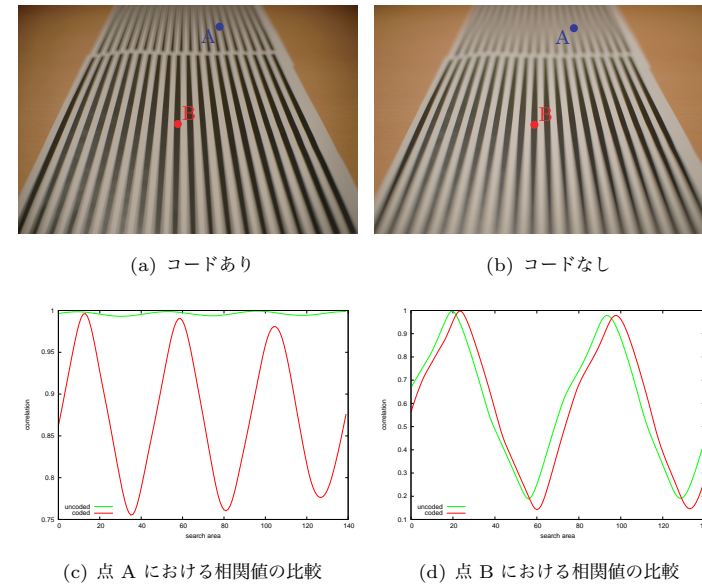


図 4 探索範囲内における相関値の比較実験

(a),(b) はそれぞれ撮影した入力画像を, (c),(d) はそれぞれ相関値のグラフを表す。

コードなしの入力画像をそれぞれ表し、この入力画像の点 A および B における相関値を比較した。グラフはそれぞれ図 4(c), 4(d) である。

図 4(a), 4(b) の点 B はともにあまりぼけておらず、コード化を行った場合と行っていない場合で評価関数のグラフに顕著な差はなく安定したマッチングを行うことができた。点 A は合焦点からの距離が大きく、コードなしの評価関数の値は対応する点と対応しない点における相関値にあまり差がない。しかしコード化を行った場合、対応する点と対応しない点における相関値に大きな差がある。この急峻さによりぼけを含むシーンにおいても安定した

マッチングが可能であると考えられる。

4.3 ノイズ耐性に関する実験

提案手法がノイズの多い画像に対しても安定したマッチングが可能であることを示すため次の実験を行った。

ランダムドットを印刷した紙をテーブルに配置し、コードあり、コードなしでそれぞれ撮影した(図 5(a),5(b))。露光時間はコードあり 1/30[sec]、コードなし 1/125[sec] である。撮影した画像と、画像を右に 30 ピクセル水平移動した画像にノイズをそれぞれ付加し、これらを入力画像としてステレオマッチングを行った。付加したノイズは平均 0 分散 5、平均 0 分散 10 のホワイトノイズ 2 種類である。ステレオマッチングを行った画像の一部を切り取り、視差の真値 (30 ピクセル) との絶対差総和 (SAD) を求めグラフにプロットした (図 5(c), 5(d))。SAD の平均値は表 1 のようになる。

表 1 SAD の平均値

付加したノイズの分散	コードあり	コードなし
5	1780.5525	3322.9002
10	2685.6706	3124.4114

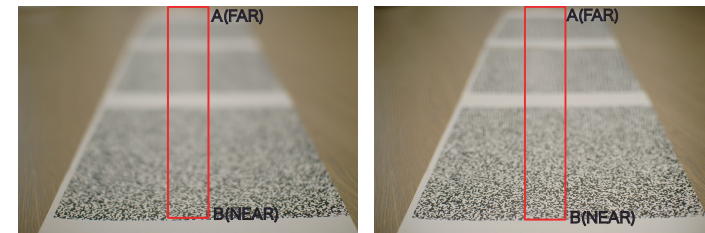
いずれのノイズの場合も、コードありの方が、コードなしに対し残差総和は小さくなっており、正確なマッチングを行っていることを表し、ノイズの多い状況下でも安定したマッチングが可能であることを示す。

4.4 一般的なシーンにおける実験

ぼけを含む一般的なシーンにおいても安定したマッチングが可能であることを示すために、次の実験を行った。

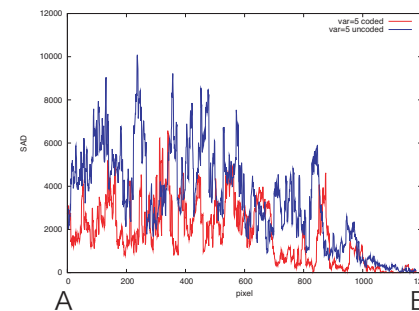
図 6(a),6(b) のようなシーンでステレオマッチングを行った。合焦位置は手前の緑の箱上で、レンズからの距離はおよそ 30[cm] である。露光時間は共に 1/15[sec]、コード化を行っていないものでは F=2.2 で撮影した。マッチング結果の視差マップを図 6(c), 6(d) に示す。

実験シーンの縦縞を配置した箇所 (図 6(c), 6(d) の領域 B) 付近では、奥行きは撮影した点から見てほぼ一定であるため、視差はほぼ一定となるはずである。コードありの視差の方がコードなしのものより一様であると言える。また、図 4.8,4.9 の領域 A も同様に一様な視差となるべき箇所であるがコードなしでは一様となっていない。これはぼけにより安定な

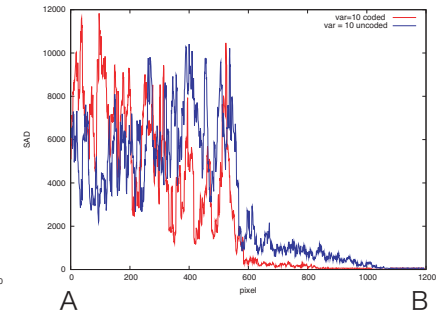


(a) コードなし

(b) コードあり



(c) 付加ノイズが平均 0 分散 5 におけるマッチングエラー



(d) 付加ノイズが平均 0 分散 10 におけるマッチングエラー

図 5 ノイズの耐性に関する実験

マッチングができていないことを示すが、一方でコード化したものでは視差が一様となっているため、安定したマッチングができていていると言える。

5. まとめと今後の展望

カメラの大きさを無視できないような状況下では、撮影される画像によるぼけの影響を無視することができない。このぼけは奥行きに依存して大きくなり、ぼけによりテクスチャ情報が損失するためステレオ法におけるマッチングの精度は低下してしまう。

開口部を符号化することにより、撮影する画像の周波数成分を変化させることができ、一般的な開口よりぼけ発生時の情報の損失を小さくすることができる。符号化開口を用いてステレオ法を行うことでぼけを含む状況下でも安定したマッチングが可能であると考えられる。符号化系列には M 系列を用いた。実験を通して、M 系列コードを用いて開口部を符号化することで安定したマッチングが可能であることが示された。

画像の奥行きが既知の場合、逆畳み込みでぼけ除去を行うことができる。今後はぼけを含む情報を積極的に利用しステレオ法と depth from defocus を融合し、より高精度なステレオ法の実現を目指す。

参考文献

- 1) Stan, B. and CARLO T. , "Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo ", International Journal of Computer Vision 35(3), 269-293 (1999)
- 2) Michael Bleyer and Margrit Gelautz "Graph-based surface reconstruction from stereo pairs using image segmentation", Proceedings of SPIE, vol. 5665, Videometrics VIII, January 2005, pp. 288-299. 2005
- 3) D. Scharstein, "A Taxonomy and Evaluation Of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms ", IJCV 2002
- 4) Chia-Kai Liang , Tai-Hsu Lin , Bing-Yi Wong , Chi Liu , Homer H. Chen, "Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition", ACM Transactions on Graphics (TOG), v.27 n.3, August 2008
- 5) Anat Levin, Rob Fergus, Fr ´edo Durand, William T. Freeman , "Image and Depth from a Conventional Camera with a CodedAperture ", ICCV 2009
- 6) Changyin Zhou, Stephen Lin, and Shree Nayar "Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus", IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2009
- 7) Chia-Kai Liang, Tai-Hsu Lin, Bing-Yi Wong, Chi Liu, Homer Chen, "Programmable Aperture Photography: Multiplexed Light Field Acquisition", SIGGRAPH 2008.

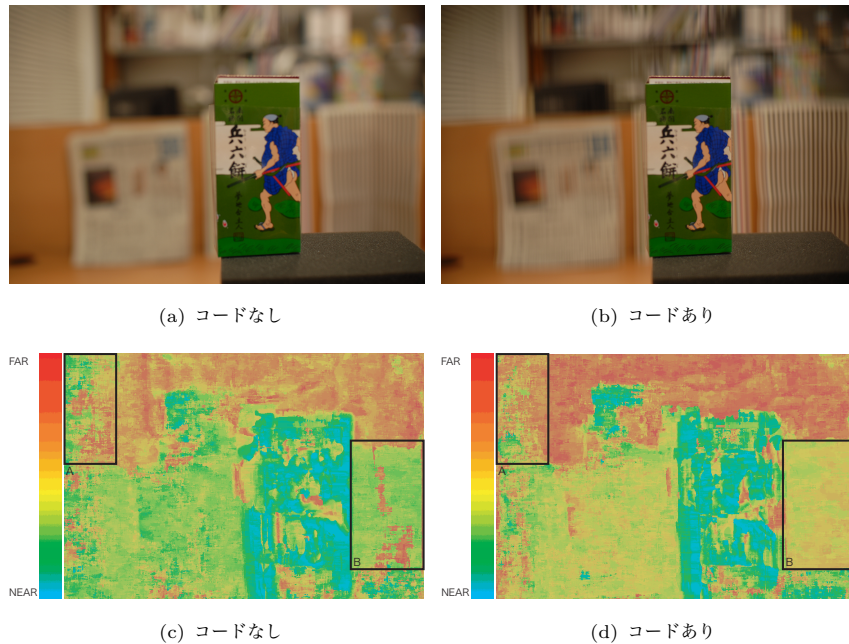


図 6 一般的なシーンにおける実験
上段は入力画像、下段は視差マップである。

- 8) Marc Levoy, Ren Ng, Andrew Adams, Matthew Footer, Mark Horowitz "Light Field Microscopy" ACM Transactions on Graphics 25(3), Proc. SIGGRAPH 2006