

撮影位置の異なる複数の画像を用いた高解像仮想焦点面画像生成

池田 薫, 清水 雅夫, 奥富 正敏

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻
東京都目黒区大岡山 2-12-1

{kikeda, mas}@ok.ctrl.titech.ac.jp, mxo@ctrl.titech.ac.jp

概要 本論文では、多数の視点から撮影された画像を統合し、新たな画像を生成するための方法を提案する。提案手法では、まずステレオマッチングを行い、視差マップを取得する。次いで、ある指定された画像領域に対する視差空間中の平面を求め、それを元に、画像を合成するための変形パラメータを推定し、仮想焦点面画像を生成する。生成された画像は、空間中の任意の平面を仮想の焦点面とする画像に相当する。加えて、注目する領域ではノイズ低減や高解像度化など、高画質化の効果を得ることができる。合成画像および実画像を用いて実験を行い、手法の有効性を確認した。

Synthesizing High-Resolution Virtual-Focal-Plane Image from Multiple Images with Different View Points

Kaoru IKEDA, Masao SHIMIZU and Masatoshi OKUTOMI

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

Abstract This paper presents a new method to synthesize a virtual high-resolution image from multiple images with different view points. First, a disparity map of the captured scene for the reference image is obtained using the multiple stereo matching. Next, a virtual focal plane in the disparity space is estimated corresponding to a user-established rectangle area in the reference image. Finally, all images are warped into the virtual focal plane by using estimated homography warp parameters for each image. The synthesized virtual-focal-plane image is an in-focus, high-resolution and less-noisy image for the virtual focal plane. The paper also demonstrates experimental results using both synthetic and real images.

1 はじめに

多数のカメラを用いて撮影される多眼ステレオ画像は、1台のカメラで撮影された単眼画像と比べて多くの情報を有している。そこで、多眼画像を統合し、1台のカメラでは撮影できない性質を持った画像を生成することを考える。

複数の画像を組み合わせることで、1台のカメラで撮影できる画像よりも高画質な画像を生成する手法としては、わずかな位置ずれのある複数の画像を使った超解像処理 [8]、ステレオマッチングによって求められた視差を使って対応する画素を平均することでノイズを低減する方法 [5] などがある。

画質の向上だけでなく、1台のカメラでは撮影の困難な画像を合成する手法も検討されている。Wilburn ら

[3] は、カメラアレイによって撮影される画像を組み合わせることで、ダイナミックレンジの向上、視野角の広いパノラマ画像の生成、開口が大きく被写界深度の浅い画像の合成など、1台のカメラでは撮影が困難な画像を合成する手法を提案している。Vaish ら [2] は、同様にカメラアレイによって撮影された画像を組み合わせることで、単に被写界深度の浅い画像を合成するだけでなく、通常の光学系を持ったカメラでは撮影できない、カメラに正対しない平面に焦点が合った画像を合成する手法を提案している。しかしこの手法では、ユーザが焦点面を調節する必要がある。

本論文では、撮影位置の異なる複数の画像から、仮想焦点面画像を自動的に生成する手法について述べる。仮想焦点面画像は、画像に撮影されている任意の平面を仮

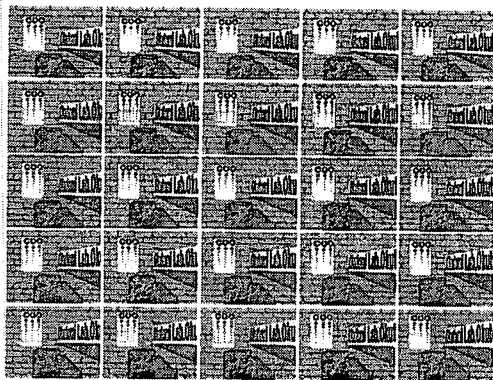


図 1. 多視点画像の例.

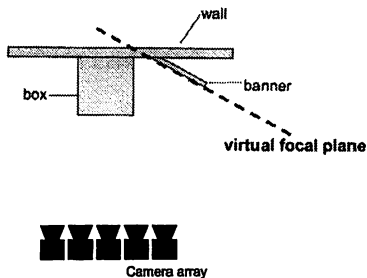


図 2. 物体および仮想焦点面の配置.

想的な焦点面とする画像である。加えて提案手法では、仮想焦点面上に存在する画像上の点に対して、高画質化の効果を得ることができる。

本論文の構成を以下に述べる。第 2 章では、提案手法の概要について述べる。第 3 章では、仮想焦点面画像の合成手法について具体的に提案する。第 4 章では、実験結果を示す。第 5 章では、まとめと総括を行う。

2 提案手法の概要

提案手法では、複数の視点から撮影した多視点画像を射影変換により変形して統合することで、新たな画像を生成する。生成される画像は、ユーザが指定した領域に仮想的に焦点を合わせた画像である。本論文では、この画像を仮想焦点面画像と呼ぶ。なお、原画像の被写界深度は十分に大きく、レンズひずみが含まれていないものとする。

図 1 に、提案手法で入力として利用する、多視点画像の例を示す。ここでは、25 眼の格子状カメラ配置を想定した合成画像を示している。また、図 2 には、このシーンの物体の配置図を示す。提案手法では、このような多視点画像を用いて仮想焦点面画像を生成する。図 3 に、提案手法の概略を示す。ユーザが指定した矩形領域に対応する仮想焦点面を推定し、仮想焦点面画像を生成する。この例では、斜めに配置された横断幕上にユーザ

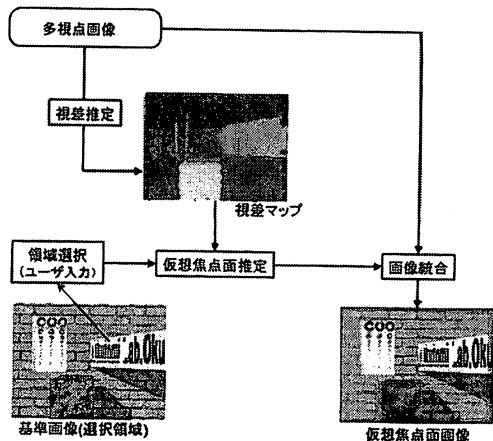


図 3. 処理の概略.

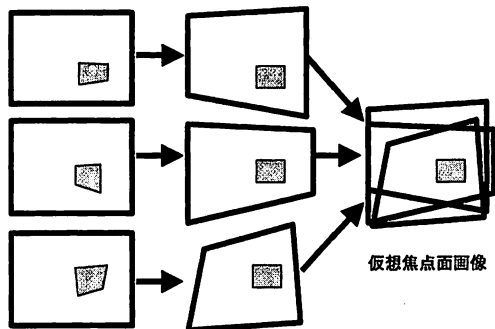


図 4. 画像統合処理. 各画像において指定された領域同士を重ね合わせるように、画像全体を射影的に変形し、一枚に統合する。

指定矩形領域を設定したため、仮想焦点面は図 2 中に破線で示されるような平面に対応する。

提案手法では、多視点画像をステレオマッチングすることによって得られる視差を元に、仮想焦点面を推定している。また、得られた仮想焦点面に対して画像同士が一致するような変形パラメータを求める。この変形パラメータを用いて多視点画像をすべて変形し、統合することで仮想焦点面画像を得ている。図 4 に、3 枚の画像を用いた場合の例を示す。得られる仮想焦点面画像は、注目する領域について複数の画像を合成していることからノイズ低減の効果があり、高画質な画像を得ることができる。また、このとき、画像同士の変形をサブピクセル単位で求めて統合することで、高解像度な仮想焦点面画像を得ることもできる。

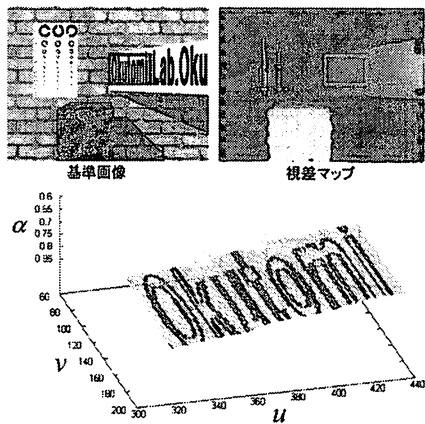


図 5. 視差推定結果の例。グラフは上図中の矩形領域に対応する視差（淡色部分）と、平面推定に使用するエッジ上の視差をプロットしたもの（濃色部分）。

3 多数の視点からの画像を用いた仮想焦点面画像生成処理

3.1 仮想焦点面推定

提案手法では、まず視差推定処理を行う。この視差推定処理は、マルチベースラインステレオ [1] により、すべての画像を同時に利用して、基準画像に対する視差を求める。また、キャリブレーションは 2 平面を用いたキャリブレーション [6] によって行い、視差は一般化された視差で求められる。このとき、一般化された視差を α で表せば、画像間の対応点同士の関係を記述する射影変換行列 H は、

$$H_{\alpha} = (1 - \alpha)H_0 + \alpha H_1 \quad (1)$$

で表される。ただし、 H_0, H_1 はそれぞれ 2 つのキャリブレーション平面に対する射影変換を表す。この視差推定処理により、多眼画像を用いて画像上のすべての画素に対する密な視差マップを推定することができる。

仮想焦点面の推定処理では、基準画像上でユーザが領域を指定し、この領域内の点が存在する視差空間中の平面を求め、仮想焦点面とする。本論文では、ユーザの指定する領域を画像上の矩形範囲とし、領域内に存在する点は、実空間中ではほぼ一平面上に存在するものとする。ここで指定された領域と視差マップから、仮想焦点面を推定する。

図 5 は、視差推定結果の例である。図のように、指定領域内での視差マップは (u, v, α) 空間中のある平面上に存在する。 (u, v) は画像の 2 軸を表し、 α は視差である。このとき、実空間中の平面は視差空間においても平面となることが証明される（詳しくは付録において述べ

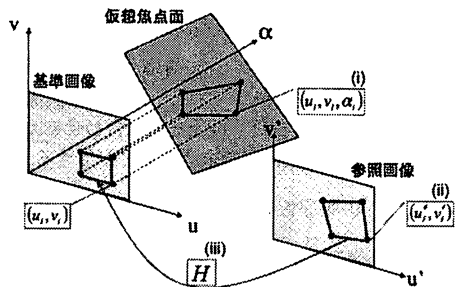


図 6. 射影変換行列推定。

る）。つまり、実空間中の注目平面に対応する視差空間中の領域も平面となるため、この領域を最良近似する平面を、視差空間中で最小二乗法を用いて次式のように推定することができる。 a, b, c は、それぞれ推定される平面パラメータである。

$$\alpha = au + bv + c \quad (2)$$

実際には、推定された視差マップからすべてのデータを用いると、テクスチャレス領域の視差推定ミスなどが推定結果に反映されてしまう。図 5 においても視差推定ミスが生じ、一部の点が平面から外れた値をとっている。そこで、画像上のエッジを抽出し、エッジの存在する部分で求められる視差のみを用いて平面を推定することで、視差推定ミスの影響を減らす。図 5 では濃色で示された点がこうしたエッジ上の視差である。

3.2 画像統合

仮想焦点面画像を合成するためには、仮想焦点面に対して基準画像とすべての参照画像を一致させるための変換を求める必要がある。このとき、仮想焦点面は (u, v, α) 空間中の平面として推定され、これは実空間中の平面と対応することから、平面同士を重ねるための変換は射影変換として表されることがわかる。そこで、次の手順により、この変換を与える射影変換行列 H を求める。

(i) 基準画像上の 4 点に対応する視差を求める

基準画像上において、矩形選択した領域の頂点 $(u_1, v_1), \dots, (u_4, v_4)$ を考える。このとき、 (u, v, α) 空間での仮想焦点面は、前節の処理によって図 6 のように求められている。よって、仮想焦点面を表す (2) 式より、各頂点 (u_i, v_i) に対応する視差 α_i を求めることができる。

(ii) 基準画像上の 4 点に対する対応点の座標を求める

(i) によって求められた視差 α_i から、(1) 式により各頂点 (u_i, v_i) に対する座標の変換を求めることができる。よって、視差 α_i から、基準画像上の 4

頂点 (u_i, v_i) に対応する参照画像上の 4 頂点 (u'_i, v'_i) への対応関係を 4 組求めることができる。

(iii) 4 点同士の対応関係から射影変換行列を求める

基準画像と参照画像の間に対応点同士の関係が 4 組求められることから、これらの組の対応関係を用いて、それぞれの対応点同士を重ね合わせるように変形する射影変換行列を求めることができる。

(iv) (ii),(iii) の処理をすべての参照画像に対して行う

(v) 各参照画像を基準画像へと変形し、統合処理を行う

求められた射影変換行列によって、それぞれの参照画像上の注目する領域を、基準画像上の注目する領域に重ねるようにして変形することができる。このとき、この変形を用いて画像全体を変形して統合することで、注目領域同士は重なり、それ以外の領域にはぼけの生じた画像を合成することができる。合成された画像が、仮想焦点面画像となる。

特に、提案手法では画像全体を射影変換で変形するため、各画像の画素は基準画像上のサブピクセル位置に対応して変形される。図 7 はこれを模式的に表した図であり、仮想焦点面画像の実線の格子は、原画像での画素の大きさを表す。このとき、図中の破線のように画素を区切りなおすことで、任意の解像度の仮想焦点面画像を得ることができる（図では縦横にそれぞれ 3×3 倍の解像度）。それぞれの画素の値は、格子内に含まれる射影された画素値を平均化することで求められる。射影された画素が含まれない格子については、補間を用いて画素値を割り当てる。

4 実験結果

4.1 合成ステレオ画像を用いた実験

図 1 に示した 25 眼合成画像に白色ノイズを加えた画像を入力画像とし、実験を行った。図 8 は、実験に用いた画像のうち基準画像を示したものである。図 9 および図 10 に、合成画像を用いた実験の結果を示す。

図 9 および図 10 の上段は、それぞれ実験によって生成された仮想焦点面画像であり、生成に利用した指定領域は図 9 では奥の壁面上に、図 10 では斜めに配置された横断幕上に設定されている。それぞれ、指定領域の存在する平面上に焦点が合った仮想焦点面画像が合成されていることがわかる。また、図 8 と比較することにより、生成される仮想焦点面画像では、原画像に含まれるノイズが低減されていることも確認できる。

図 9, 10 の中段、下段には、指定領域内の基準画像を単純拡大した画像と、同様の領域に対して合成した、高解像度な仮想焦点面画像が示されている。図 9 では、文字やランドルト環（視力検査で使われる図形）の分解

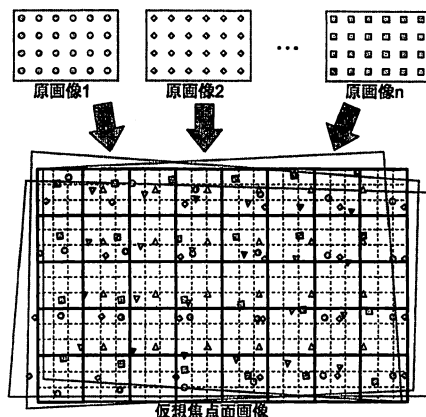


図 7. 画像の組み合わせによる高解像度化。

能が向上し、注目した領域で画像の解像度が向上していることがわかる。一方、図 10 では、文字のエッジ部分が滑らかになっていることから、同様に解像度が向上していることが確認できる。

4.2 多眼実画像を用いた実験

図 11 に、実験に用いた 25 枚の実画像を示す。この画像は、1 台のカメラを平行移動ステージに固定し、 5×5 の 25 眼格子状配置のカメラを想定して撮影した画像である（カメラ間隔は 3cm）。カメラは Bayer カラーパターンを用いた単板 CCD カメラであり、レンズ歪みは 2 平面によるキャリブレーションとは別にキャリブレーションを行った上で、Bilinear 補間法を用いて補正した。図 12 に、基準画像および視差マップを示す。基準画像上の領域 1 と 2 は、それぞれ実験の入力に用いられた指定領域である。

図 13(a) に、図 12 上の領域 1 に対する仮想焦点面画像の生成結果を示す。この仮想焦点面画像では、本の表紙上のタイトル文字部分に指定領域が設定されている。そのため、この表紙部分を含む平面を仮想焦点面とした画像が得られる。図 13(a) では、表紙部分と、その延長上にある壁面や床面上に焦点が合っていることがわかる。また、この平面から遠ざかるにつれて、画像のぼけが大きくなっていることもわかる。図 13(b) は指定領域内の基準画像を拡大したものであり、図 13(c) は、同様の領域において高解像度化された仮想焦点面画像を生成した結果である。これらの画像を比較することにより、文字の解像感が向上し、高解像度化の効果が得られていることがわかる。

図 14(a) は図 12 中の領域 2 に対する仮想焦点面画像を生成したものである。手前に配置された花に焦点が合い、また、斜めになった花の延長上の壁面や床面にも焦点が合っていることが確認できる。また、図 14(c) は、高解像度化された仮想焦点面画像を生成した結果であ

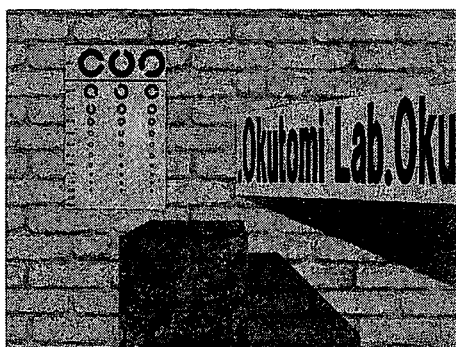
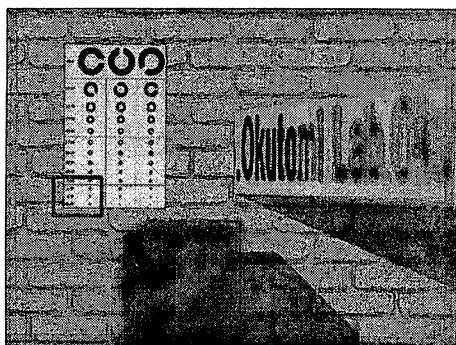
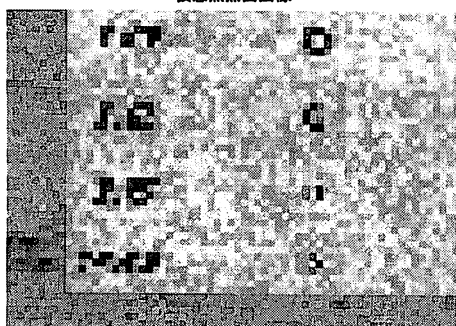


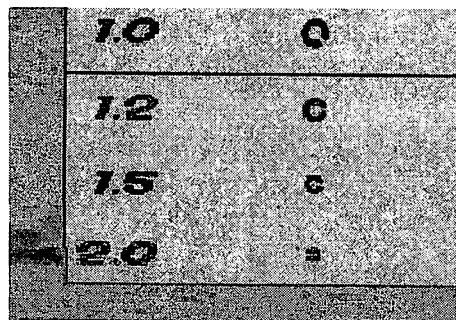
図 8. 合成画像実験基準画像.



仮想焦点面画像

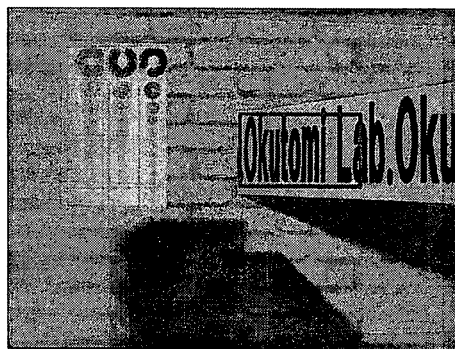


基準画像(3x3)

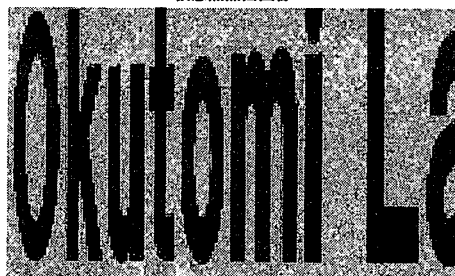


仮想焦点面画像(3x3)

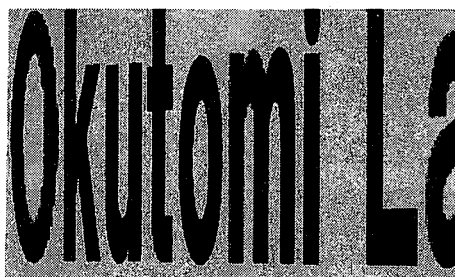
図 9. 合成画像実験結果.



仮想焦点面画像



基準画像(3x3)



仮想焦点面画像(3x3)

図 10. 合成画像実験結果.

る。この領域においても同様に、高解像度な仮想焦点面画像を合成できていることが確認できる。

図 15 は、同様のカメラ配置を用いて、CIPA DC-003 規格に基づく解像度測定 [4] を行った実験結果である。この規格はデジタルカメラで撮像された ISO 12233 標準解像度測定チャート (図 16) 上のくさびの解像本数を求めることにより、デジタルカメラの有効解像度を算出するものである。図 15 に示すように、原画像よりも 2×2 倍、 3×3 倍の画像の方が、それぞれ解像度が向上している。また、図 17 は、縦軸に解像度測定法を用いて測定された解像度を、横軸に倍率を示したものである。破線で示される原画像の解像度に比べ、仮想焦点面画像の解像度が大きく向上していることがわかる。

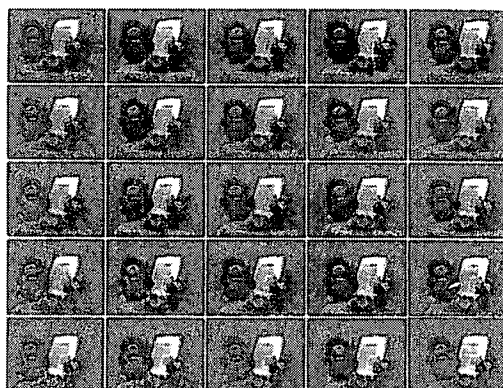
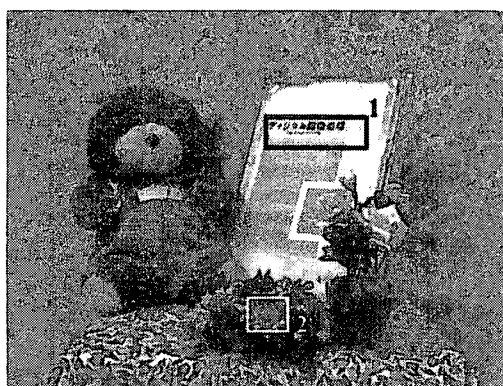
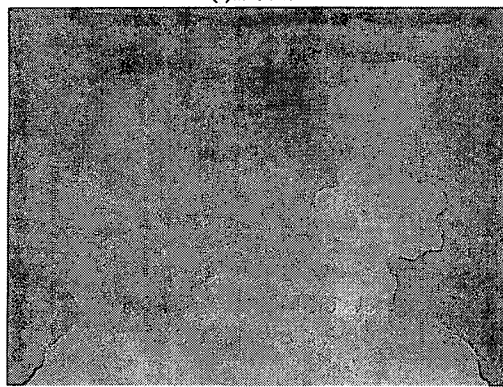


図 11. 25 眼実画像.



(a)基準画像



(b)視差マップ

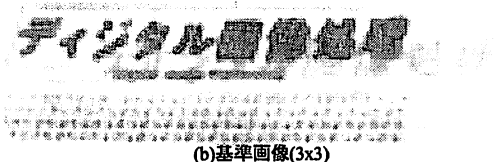
図 12. 基準画像および視差マップ.

5 おわりに

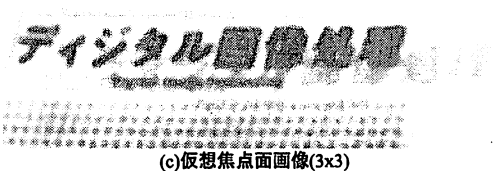
本論文では、ユーザの指定する画像領域に対して、自動的に仮想焦点面を推定し、仮想焦点面画像を合成するための手法を提案した。さらに、提案手法によって合成される仮想焦点面画像は、高解像度化など、高画質化の効果を得ることができる。合成画像および実画像を用いた実験で、手法の有効性を確認した。



(a)仮想焦点面画像

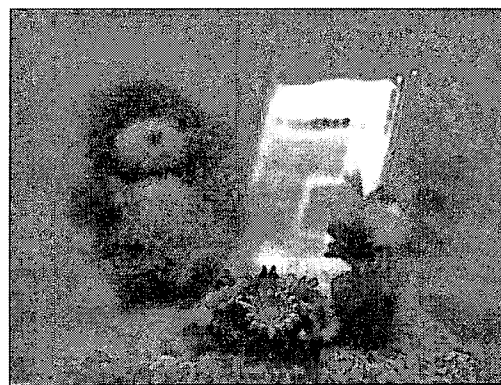


(b)基準画像(3x3)



(c)仮想焦点面画像(3x3)

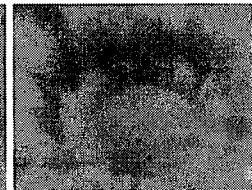
図 13. 実画像実験結果.



(a)仮想焦点面画像



(b)基準画像(3x3)



(c)仮想焦点面画像(3x3)

図 14. 実画像実験結果.

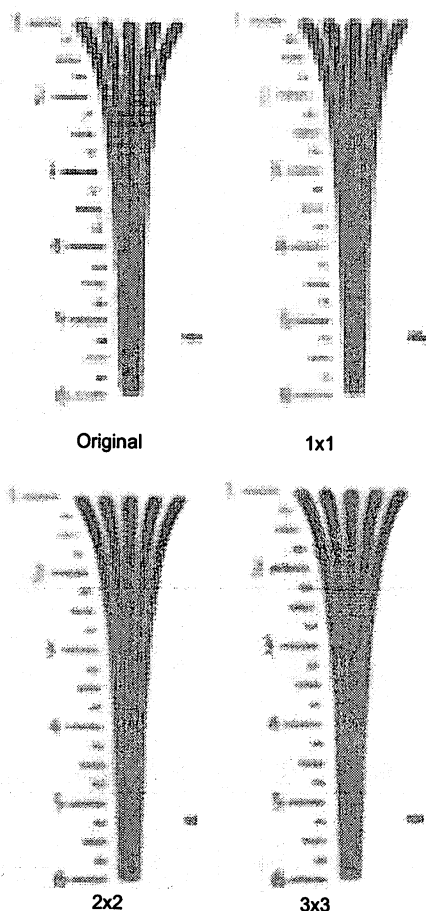


図 15. 実画像実験結果.

現在の手法では、カメラ台数が有限であるために、撮影対象までの距離とカメラ配置やカメラ台数によってはアーティファクトが生じ、滑らかな画像を生成できない場合がある。これに対して、滑らかな画像を生成する手法を検討することが今後の課題である。

参考文献

- [1] Masatoshi Okutomi and Takeo Kanade. A multiple-baseline stereo. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.
- [2] Vaibhav Vaish, Gaurav Garg, Eino-Ville Talvala, Emilio Antunez, Bennett Wilburn, Mark Horowitz, and Marc Levoy. Synthetic aperture focusing using a shear-warp factorization of the viewing transform. *CVPR*, Vol. 3, pp. 129–129, June. 2005.

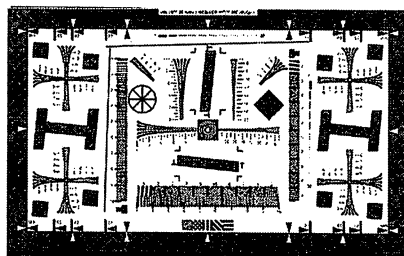


図 16. ISO12233 解像度チャート.

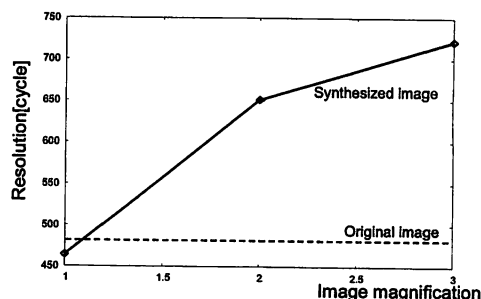


図 17. 実画像実験結果. グラフの横軸は拡大倍率, 縦軸は解像度を表す.

- [3] Bennett Wilburn, Neel Joshi, Vaibhav Vaish, Eino-Ville Talvala, Emilio Antunez, Adam Barth, Andrew Adams, Mark Horowitz, and Marc Levoy. High performance imaging using large camera arrays. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 765–776, Jul. 2005.
- [4] カメラ映像機器工業会標準化委員会. デジタルカメラの解像度測定方法. CIPA DC-003.
- [5] 池田薫, 清水雅夫, 奥富正敏. ステレオ画像を用いた画質と視差推定精度の同時改善. 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 47, No. SIG9 (CVIM 14), pp. 111–114, 2006.
- [6] 蚊野浩, 金出武雄. 任意のカメラ配置におけるステレオ視とステレオカメラ校正. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-D-II, No. 11, pp. 1810–1818, Nov. 1996.
- [7] 片山保宏, 奥富正敏. ステレオ対応度空間からのオクルージョンを考慮した表面抽出の試み. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J82-D-II, No. 4, pp. 780–789, 1999.
- [8] 杉本茂樹, 奥富正敏. 画像の超解像度化処理. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 33–37, April. 2005.

付録 A 実空間と視差空間の関係

[7] には、光軸が互いに平行なカメラ配置により生成された視差空間で、視差空間中の平面が実空間においても平面となることが示されている。提案手法では、カメラ同士の光軸が平行とは限定していないため、この場合における視差空間上の平面が、実空間上で平面をとることを証明する。なお、ここではキャリブレーション平面がカメラの光軸とそれぞれ直交する場合について考える。

視差空間中で平面として求められた視差は、(2) 式のように表される。このとき、実空間 (X, Y, Z) 上において、視差空間 (u, v, α) 上の平面が、どのような分布を取るのかについて考える。

視差空間において視差 α をとる点の奥行き Z_w は、次の式で与えられる。

$$Z_w = \frac{Z_0 Z_1}{\alpha Z_0 + (1 - \alpha) Z_1} \quad (3)$$

ここで Z_0, Z_1 は、基準カメラからキャリブレーション平面 Π_0, Π_1 までの距離である。一方、図 18 のような幾何学的な関係を考えることにより、ある奥行き Z_w に存在する点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ の X 座標 X_w について、 $x : f = X_w : Z_w$ の関係が成り立つ。このとき、 x は画像平面上の点であるから、 $x \propto u$ と考えてよい。また、これらの関係は Y 座標に関しても同様であるため、 k_1, k_2 をある定数とすることで、次の式が得られる。

$$\begin{cases} X_w = k'_1 u \cdot Z_w \\ Y_w = k'_2 v \cdot Z_w \end{cases} \quad (4)$$

ここで、(3) 式に (2) 式を代入して α を消去すると、

$$Z_w = \frac{Z_0 Z_1}{a(Z_0 - Z_1)u + b(Z_0 - Z_1)v + c(Z_0 - Z_1) + Z_1} \quad (5)$$

となり、これに (4) 式を代入することで、最終的に次の関係式を得ることができる。

$$\begin{aligned} Z_w &= \frac{Z_0 Z_1 - ak_1(Z_0 - Z_1)X_w - bk_2(Z_0 - Z_1)Y_w}{c(Z_0 - Z_1) + Z_1} \\ &= a_1 X_w + a_2 Y_w + a_3 \end{aligned} \quad (6)$$

この式は、 Z_w が (X, Y, Z) 空間中において平面に分布することを表している。すなわち、視差空間中において平面に分布する点は、実空間中においても平面をとることが示される。

このことから、視差空間において仮想焦点面を推定することは、実空間における仮想焦点面を推定することと一致する。提案手法では、画像の変形パラメータを推定するが、このパラメータは視差空間中で画像間の関係を求めることで得られる。よって、提案手法では視差空間中の仮想焦点面を求めている。

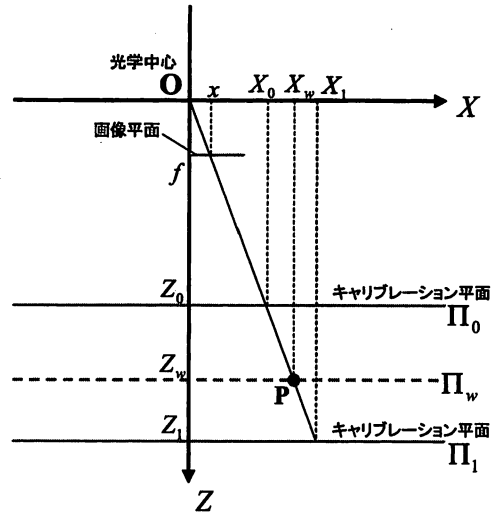


図 18. 実空間での幾何的關係。