多眼ステレオ法を用いた運動視差の再現可能な 3次元画像表示

— 表示画像の生成と評価 —

正会員 北 原 格[†], 正会員 佐 藤 清 秀[†], 正会員 大 田 友 一[†]

3D Image Display with Motion Parallax Using Camera Matrix Stereo – Evaluating Image Generation Algorithms –

Itaru Kitahara[†] Kiyohide Satoh[†] and Yuichi Ohta[†]

Abstract We propose a 3D display system which can present real scenes with realistic motion parallax. In the sensing part, a scene is observed by using a camera matrix. An excellent stereo algorithm SEA recovers the depth information of the scene with the density and the sharpness required for high quality image generation. In the display part, 2D images from the viewing position of the observer are generated and presented with proper motion parallax. A novel algorithm to determine the view parameters suitable for reproducing the motion parallax on a fixed screen and an image generation algorithm which can cope with arbitrary viewing positions are described. Evaluation of the proposed algorithms has been done by using the prototype system.

1. ま え が き

自然な3次元画像表示の実現には、運動視差と両眼視差の再現が必要である¹⁾。両眼視差の再現には、左右の眼にそれぞれ別個の画像を提示すればよく、色眼鏡やシャッタ付き眼鏡を用いて左右画像を分離する方式や、パララックスバリアやレンチキュラシートを用いて空間的に左右画像を配置する方式が提案され、実用化されつつある。しかし、両眼視差によって表示された立体像は観察者の瞳位置の移動にともない歪むため、固定位置からの観察しか許されない。人は詳細な観測を行う場合には、瞳位置を移動して対象物体の見え方を変化させて視覚データを蓄積するため、観察者

の瞳位置の移動にともなう運動視差の再現は、自然な観察を可能にする3次元画像表示では、両眼視差の再現よりも本質的な要求と考えられる²⁾³⁾。

運動視差を再現する方式は、大きく受動的的方法と能動的方法とに分類される。受動的的方法とは、光学技術や写真技術によって、撮影した3次元シーンと同じ光線状態を観察空間に再現したり、多数の見え方を同時に観察者の空間に配置することで運動視差を再現する方法であり、前者ではホログラフィ⁴⁾、後者では多視点レンチキュラ方式⁵⁾などが研究されている。しかし、前者では動画やカラーの再現、後者では隣接する見え方画像間のクロストークなど、光学方式に起因すると思われる問題を抱えている。

キーワード：3次元画像表示、運動視差、多眼ステレオ法、画像生成、主観評価

1996年2月28日受付、1996年6月6日再受付

[†] 筑波大学 電子・情報工学系画像情報研究室(〒300つくば市天王台1-1-1, TEL 0298-53-6556, <http://www.image.esys.tsukuba.ac.jp>)

[†] Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba (1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305, Japan)

図1 3次元画像表示方式
3D display system with motion parallax.

能動的方法とは、観察者の瞳位置の移動に応じて、その位置で観察されるべき適切な見え方画像を電子的なディスプレイ上に提示し、運動視差を再現する方法である。左右両眼のための2枚の画像を同時に提示することで、両眼視差の再現も可能である。通常の2次元ディスプレイとの親和性が良く、瞳位置に応じた適切な画像の生成が可能であるかぎり、観察者の視域への制限も少ない3次元画像表示が実現できる。高速なデジタル画像処理機能が必要になるが、これは今後のマルチメディア技術の発展の自然な延長線上にあると思われる。

これまでに利用されている能動的方法は、以下の3種類に分類できる。

- (1) 3次元モデルによる方法⁶⁾
- (2) 2次元画像セットによる方法⁷⁾
- (3) オンラインカメラによる方法

(1)は、仮想現実感システムで一般に用いられており、3次元モデルが与えられさえすれば、任意の瞳位置からの見え方画像の提示が可能である。しかし、実際の情景の3次元モデルを自動的に獲得することは困難であり、計算機内部で合成した3次元モデルを用いるものがほとんどである。一方、(2)は、あらかじめ様々な視点からシーンを撮影した多数枚の2次元画像を用意しておき、観察者の瞳位置に応じて適当な画像を順次切替えて表示する。実際に撮影した画像を用いるため現実のを表示できるが、データ量が膨大となるため画像枚数の点から視域が限定される。(3)は、観察者の瞳移動にあわせて、画像を撮影しているカメラをオンライン制御して適切な見え方を撮影/表示する方式であり、ロボットの遠隔操作などを目的としたテレプレゼンスシステムに用いられている。しかし、これは観察者とカメラ間に1対1の対応を持つことが前提であり、しかも、観察者と同時進行で起こっている事象しか扱えない。

最近、シーンを撮影した画像からその3次元モデルを自動的に構築し、上記の(1)と(2)の利点を統合した3次元画像表示を実現しようとする試みが活発に研究されている^{8)~11)}。この方法では、画像から復元する3次元情報の精度を向上させることと、自動獲得の結果として必然的に低下する3次元情報の質を考慮した上で、いかに高画質の見え方画像を生成し提示するかが課題となる。これまでの報告では、3次元画像表示を目標に挙げていても、画像からの3次元情報の復元に主眼がおかれたものが殆どであり、画像の提示部分までを含めて3次元画像表示システム全体として検討・評価したものは見当たらない。

本論文では、我々が提案してきたカメラマトリクスによる多眼ステレオ法を用いた3次元画像表示において、ステレオ法によって得られた視差情報からの見え方画像生成法、観察者とスクリーンの配置による適切な視差の再現法について述べ、実際に構成したシステムを用いた評価実験の結果を示す。

2. 3次元画像表示方式

本論文で提案する3次元画像表示方式は、図1に示すように、撮影部と表示部によって構成される。

2.1 撮影部

撮影部は、平面上の等間隔な格子点上にカメラを配置したカメラマトリクスと、撮影された画像からシーンの3次元情報を復元する3次元情報復元部によって構成される。

(1) カメラマトリクスの幾何学的関係

図2に、本論文で用いるカメラマトリクスの、シーン座標系における配置を示す。中心となるカメラを定め、そのレンズ中心をシーン座標系の原点とする。奥行き $Z=0$ 平面上の間隔 b の格子点上にレンズ中心がくるように、 $(M+2) \times (N+2)$ 台のカメラを配置する。この時、各カメラの光軸はシーン座標系の Z 軸と、画像

(a) 入力画像

(b) 視差画像

図3 入力画像と視差画像の例
Example of input image and its disparity map.

図2 カメラマトリクスの座標系
Coordinate system of camera matrix.

座標系の x, y 軸は X, Y 軸とそれぞれ平行になるようにする. 各カメラの位置を $V^{m,n} = V(mb, nb, 0)$ とし, その位置で撮影される画像を $I^{m,n} = I^{V(mb, nb, 0)}$ と表

記する ($m = -\frac{(M-1)}{2} - 1, \dots, 0, \dots, \frac{(M-1)}{2} + 1; n = -\frac{(N-1)}{2} - 1, \dots, 0, \dots, \frac{(N-1)}{2} + 1$).

(2) 3次元情報復元部

シーンの3次元情報は, 撮影された画像それぞれに多眼ステレオ法 SEA (Stereo by Eye Array) を適用することで, 各画像中の各点の視差情報を表す視差画像として受動的に復元される*. SEA は, 注目する参照画像 $I^{m,n}$ の視差推定を, 8枚の周辺画像 $I^{m+k, n+l}$ ($k, l = -1, 0, 1$) との間で構成される8組のステレオ画像対を用いて行う多眼ステレオ法である¹²⁾. 視差推定は1組の画像対があれば理論的には可能である. しかし, 8組の画像対によって与えられる冗長性を利用することで, Multiple-Baseline Stereo¹³⁾と同様に, 誤対応による推定精度の低下を防ぎ, 密で空間解像度の高い視差情報の推定が可能となる. さらに, 参照画像を取り囲む8枚の画像を利用するため, 参照画像上の注目点に隠れが生じる場合でも, 幾つかの周辺画像上では対応点が観測されている状態を確保できる. 隠れの検出を行い, 観測されている対応点だけを用いた視差推定を行うことで, 隠れによる誤対応の影響を除去し, 対象物体の輪郭部分が鮮明な視差画像の生成が可能である. 図3に入力画像と推定された視差画像の例を示す.

本手法では3次元データの統合を行わず, 各入力画像 $I^{m,n}$ とその視差画像 $D^{m,n}$ ($m = -\frac{(M-1)}{2}, \dots, \frac{(M-1)}{2}; n = -\frac{(N-1)}{2}, \dots, \frac{(N-1)}{2}$) すべてを3次元シーン表現として表示部へ伝送する.

* 本稿では, 「ステレオ画像対における対応点の画面上でのずれ量」を「視差」と呼ぶ.

図4 見え方画像 $I^{m+k,n}$ の生成
Image interpolation at viewing position $I^{m+k,n}$.

2.2 表示部

表示部は、観察者の瞳位置移動の検出を行うセンサと、瞳位置移動に対応した見え方画像を生成する見え方画像生成部によって構成される。撮影部から伝送されてきた3次元シーン表現をもとに、センサにより検出した瞳位置に対応する見え方画像を3章で述べる手法によって生成し、さらに4章で述べる幾何学的補正を加え正確な運動視差が再現されるようにする。このようにして生成された見え方画像を、観察者が見ているスクリーンに表示する。

3. 見え方画像の生成

本章では、3次元空間中の任意の位置に配置した仮想カメラで撮影される画像を、3次元シーン表現をもとに生成する手法を述べる。

3.1 カメラマトリクス平面上の画像生成

カメラマトリクス平面 ($Z=0$ 平面) 上の任意のカメラ位置からの見え方画像生成は、入力画像の内挿処理によって行われる。ここではその最も単純な例として、カメラ位置 $V^{m,n}$, $V^{m+1,n}$ の2台のカメラによって撮影された画像 $I^{m,n}$, $I^{m+1,n}$ とその視差画像 $D^{m,n}$, $D^{m+1,n}$ を用いて、仮想カメラ位置 $V^{m+k,n}$ ($0 < k < 1$) で撮影される画像 $I^{m+k,n}$ を生成することを考える。

入力画像 $I^{m,n}$ 上の点 $I^{m,n}(x,y)$ の視差が d のとき、この点は生成する画像上の点 $I^{m+k,n}(x-k \times d,y)$ に写像される。この関係にもとづき、入力画像 $I^{m,n}$ 上の各点の輝度値を画像 $I^{m+k,n}$ へ写像する。図4に示すように、このようにして生成された画像 $I^{m+k,n}$ には、輝度値の欠落した部分が生じるため、画像 $I^{m+1,n}$ と生成する画像との間の同様な関係を利用して、入力画像 $I^{m+1,n}$ からの写像によって欠落部分の補完処理を行う。画像 $I^{m+k,n}$ で観測されるシーン中の点において隠れが生じる場合、以上で述べた手法ではこの点

の輝度値を定めることができない。この場合は、近傍の輝度値から注目点の輝度値を推定して補完する。隠れによる影響は生成画像の画質を劣化させる主たる要因となると考えられる。

複数の点が同一点に写像される場合には、視差の大きい点ほど手前にある物体と判断し、大きい視差を持つ点の輝度値を採用する。また、異なる入力画像から等しい視差を持つ点が写像された場合には、それらを同一点と判断し、仮想カメラ位置からの距離に反比例した加重和によって輝度値を求める。撮影位置が近い入力画像上の輝度値を優先的にあてはめることで、カメラ位置によって同一点の輝度値が変化する場合でも自然な見え方の変化が再現できる。さらに、仮想カメラ位置が入力のカメラ位置と一致する場合には、合成による画質の劣化の全くない画像が生成可能である。

以上では、 x 方向の1次元のカメラ位置変化の場合について説明したが、このアルゴリズムは容易に2次元に拡張可能であり、カメラマトリクス平面上の任意のカメラ位置で撮影された画像の生成が可能である。

3.2 カメラマトリクス平面外の画像生成

片山らは、奥行き $Z=0$ 平面上の任意のカメラ位置で撮影された画像を入力として、前後に位置を移動した仮想カメラで撮影される画像を生成する手法を提案した⁹⁾。前節で述べた手法により、 $Z=0$ 平面上の任意のカメラ位置で撮影される画像の生成が可能であるので、この手法によって、3次元空間中の任意のカメラ位置 $V(X,Y,Z)$ で撮影される画像の生成が可能となる。

4. 運動視差の再現

本章では、3次元画像表示に、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) のように瞳位置移動に伴って表示スクリーンも移動する移動式スクリーンを用いる場合と、壁掛ディスプレイのように瞳位置移動に関係なく固定されている固定式スクリーンを用いる場合において、運動視差を正確に再現するための幾何学的補正法について述べる。本章の説明は、簡単のため縦方向を表す Y 軸方向を除いた2次元平面において行うが、3次元空間への拡張は容易に可能である。

正確な運動視差の再現とは、正確な見え方の再現である。シーン中の点 $P(X_p, Z_p)$ をカメラ位置 $V(X, Z)$ で撮影した画像を、瞳位置 $V'(X, Z)$ の観察者が見ているスクリーンに投影する場合を考える。その点のスクリーンへの投影点が結ぶ像を P' とすると、撮影部での視線 VP と、表示部での視線 $V'P'$ が平行にな

図5 移動式スクリーンにおける正確な運動視差の再現
Motion parallax on HMD.

図6 固定式スクリーンにおける正確な運動視差の再現
Motion parallax on fixed screen.

ることで、正確な見え方が再現される。

以下では、この条件を満たすような幾何学的補正について考える。ここで撮影部で用いるカメラの撮像面の大きさを s 、焦点距離を f 、スクリーンに表示される画像の大きさを l と表記する。

4.1 移動式スクリーン

図5に観察者と移動式スクリーンの位置関係を示す。観察者の瞳位置が $V'(X, Z)$ のとき、スクリーンは Z 軸と垂直に、中心が $S(X, Z+a)$ となるように移動するものとする。

シーン中の点 $P(X_p, Z_p)$ はカメラ位置 $V(X, Z)$ で撮影された画像上の点 $p(x)$ として観測される。 $p(x)$ のシーン座標は次式によって与えられる。

$$p \left(X + \frac{(X_p - X)}{(Z_p - Z)} \times f, Z + f \right) \quad (1)$$

この点を位置 $V'(X, Z)$ からスクリーン上に投影すると、点 P はスクリーン上での座標 $p'(\frac{l}{s} \times x)$ に投影される。点 p' のシーン座標は次式によって与えられる。

$$p' \left(X + \frac{(X_p - X)}{(Z_p - Z)} \times \frac{l}{s} f, Z + a \right) \quad (2)$$

視線 VP と視線 $V'P'$ を平行にするためには、視線 $V'p'$ と視線 Vp を平行にするような幾何学的補正を加えればよい。その関係は、(1)、(2)式より次のように与えられる。

$$a = \frac{l}{s} \times f \quad (3)$$

この式より、移動式スクリーンでは、観察者とスクリーンまでの距離 a または、表示される画像の大きさ l を調節し、撮影時の視野角と観察者の視野角を等しくすることで、正確な運動視差が再現されることがわかる。

4.2 固定式スクリーン

図6に観察者と固定式スクリーンの位置関係を示す。スクリーン位置は、(3)式によって求められた a を用いて、中心が $S(0, a)$ となるように固定する。固定式スクリーンを用いる場合は、観察者とスクリーンとの相対的位置関係にもとづいた幾何学的補正が必要である。

(3)式により撮影時と観察時の視野角を等しくする補正を加えた場合、点 P の投影像のスクリーン上での座標は $p'(\frac{a}{f} \times x)$ となる。このとき、点 p' のシーン座標は次式によって与えられる。

$$p'(X_{p'}, Z_{p'}) = p' \left(\frac{X_p - X}{Z_p - Z} \times a, a \right) \quad (4)$$

一方、瞳位置 $V'(X, Z)$ を通り視線 Vp に平行な視線とスクリーンとの交点 p'' のシーン座標は次式によって与えられる。

$$p''(X_{p''}, Z_{p''}) = p'' \left(X + \frac{X_p - X}{Z_p - Z} \times (a - Z), a \right) \quad (5)$$

(4)、(5)式によって与えられる点 p', p'' のシーン座標より、観察者の瞳位置と同一のカメラ位置で撮影された画像を(3)式による補正を加えて表示しても、正確な見え方を再現できないことがわかる。両式の比較により、正確な見え方を再現するための幾何学的補正式が、次のように与えられる。

$$X_{p''} = \frac{a - Z}{a} \times X_{p'} + X \quad (6)$$

この式より、固定式スクリーンでは、視野角を調節するだけではなく、提示画像に $\frac{a-Z}{a}$ だけ拡大/縮小を施した後、 X だけ平行移動させることで、正確な運動視差が再現されることがわかる。

5. 実験と評価

運動視差の再現可能な3次元画像表示システムを実際に構築し、本論文で提案した画像生成手法の有効性、および、運動視差再現におけるいくつかのパラメータが観察者の得る臨場感に与える影響を評価した。

5.1 構築した3次元画像表示システム

本論文で構築した3次元画像表示システムの構成について述べる。XY軸方向に移動可能なステージに1台のカメラを取り付け図3に示すようなシーンを撮影した。それらの入力画像に多眼ステレオ法SEAを適用し、3次元シーン表現を生成した。

観察者の瞳位置検出は、頭部に装着した磁気センサ(Flock of Birds)により行う*。この磁気センサは、磁場発生装置から半径約100 cmの球内の観察者の瞳位置(x, y, z 各座標)を、0.01 cmの精度で毎秒120回の検出が可能である。見え方画像は、4.2節で述べた手法により平面の固定式スクリーン上で正確な運動視差が再現されるように補正を加えたものを、ビデオプロジェクタによって投影した。本システムにおいて、観察者が瞳位置を移動してから見え方画像が切り替わるまでに必要な処理時間は約0.02秒である。

5.2 カメラ配置と生成画像の画質

シーンを撮影するカメラ間隔が、生成される見え方画像の画質に及ぼす影響を評価した。一定の視域(観察者の移動可能範囲)を撮影するとき、カメラ間隔を大きくし撮影カメラ台数を減らすことによって、入力情報が減少し生成される見え方画像の画質は一般に低下する。

図7に示すように、カメラ間隔を、240 mm, 120 mm, 60 mm, 30 mm, 15 mm(被写体の基準位置, すなわち、石膏像の位置から2つのカメラを見込む角度による表示では、それぞれ、 5.76° , 2.88° , 1.44° , 0.72° , 0.36°)とした5通りについて、SEAによって視差画像を求めて内挿画像を生成した。図7中の□が各カメラ位置に対応しており、■のカメラ位置において視差画像を求めた。内挿画像の生成は、いずれの場合も図中に矢印で示した240 mmの範囲で、3 mm 間隔(角度では 0.07°)の仮想カメラ位置で行った。生成した内挿画像と、そのカメラ位置から実際にシーンを撮影して得られる実写画像との差分を求めることによって、

図7 実験に用いたカメラ配置
Arrangements of camera.

図8 カメラ間隔と生成画像の画質:客観評価
Interpolated image quality vs. baseline-length:
Objective evaluation.

生成画像の画質の客観評価を行った。図8にその結果を示す。図の横軸が生成画像のカメラ位置、縦軸が差分値の画素あたりの平均値を表している。この実験で用いた撮像系では、全く同じシーンを2回撮影して得られた2枚の画像間の差分値(すなわち、撮像系の雑音レベル)は6程度であり、カメラ間隔60 mmまでは、おおむね、この2倍程度の差分値に収まっているが、それ以上のカメラ間隔では画質の劣化が大きくな

* 本実験では、固定式スクリーンを用いているので、観察者は常にスクリーン方向を向いている。したがって、頭部の回転による見え方の変化は考慮していない。ただし、磁気センサは3次元の回転角を計測できるので、瞳位置を正確に求めることは可能である。

表1 主観評価実験の環境
Condition of subjective evaluation.

被験者数	画像処理の知識のある者 10 名
被験者の姿勢	椅子に座った状態
被験者への指示	無作為に瞳位置を動かすこと
観察距離	240 cm
平面/立体画像	平面画像
提示画像	実験室のシーン画像 (図 3 参照)
提示画像サイズ	119 × 159 cm
撮影画像解像度	240 × 320 pixel
生成画像解像度	238 × 318 pixel
瞳位置移動 可能範囲	左右・前後・各 48 cm (上下移動の追従なし)

ることがわかる。

5.3 主観評価実験環境

本論文で行った主観評価実験の実験環境を表 1 に示す。

提示画像の自然さの評価を行う場合、評価基準の曖昧性を除去するために、物理的な刺激に対する観察者の主観的な感覚を定量的に一尺度にあてはめる必要がある。以下、5.4、5.6 節では、被験者には言葉による表現で評価を行わせるため、心理尺度の構成に系列範疇⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を用いている。実験結果を示す図中の縦軸は、系列範疇法によって観察者の評価を数値化したもので、単位は標準偏差 σ である。その横の目盛は評価実験時のカテゴリーを示す。また、間隔尺度の 95%信頼限界も図上に示している。

5.4 生成画像の画質の主観評価

5.2 節で生成した内挿画像を用いて運動視差を再現し、画質の主観評価を行った。以下では、自然な運動視差が感じられる度合いを、臨場感という言葉で表している。各々のカメラ配置によって生成された内挿画像に対して被験者が感じた臨場感の評価値を図 9 に示す。

図 9 において、臨場感の評価値は、カメラ間隔が約 1.44° になるまではカメラ間隔が大きくなるにともない直線的に減少し、カメラ間隔が 1.10° のとき 0 になる。その後も 2.88° になるまでは減少を続け、カメラ間隔が約 2.88° に達した後はほとんど変化がなくなる。見え方画像の画質と撮影時のカメラ間隔の関係は、対象物体の形状や配置に大きく依存するため、この主観評価実験の結果だけに一般化を求めることは困難であるが、本研究で撮影した 3 次元シーンでは、観察者に与える臨場感を損なわないためには、カメラ間隔を約 1.10° 以下に設定する必要があることがわかる。

図 9 カメラ間隔と生成画像の画質：主観評価
Interpolated image quality vs. baseline-length:
Subjective evaluation.

図 10 物体までの目測距離
Distances by eye measurement.

5.5 幾何学的補正の有効性の評価

4 章で提案した固定式スクリーン上での運動視差再現のための幾何学的補正の有効性を評価した。被験者から 240 cm の距離においたスクリーン上に投影した幾何学的補正を加えた画像と補正を加えない画像の 2 つの場合について、運動視差を手がかりに画像中の物体までの距離を目測させた。各被験者からの報告データを、実験開始前に当該被験者にスクリーンまでの距離を目測させた値で正規化することにより、目測の個人差を吸収するようにしている。実験結果を、図 10 に示す。図中の A は補正を加えた場合、B は補正を加えなかった場合である。目測距離の平均値と測定結果の 95%信頼限界を示した。図中の横軸に平行な破線は各物体までの本来の距離を表している。図からわかるよ

図 11 空間サンプリング間隔と臨場感
Space sampling interval vs. sensation of presence.

うに、補正を加えた場合の方が実距離に近い目測値が得られ、被験者間のバラツキも小さい。なお、壁までの距離は補正ありの場合にも正しい目測値が得られていないことは興味深い問題であり、今後の検討課題である。

5.6 表示環境のパラメータの評価

表示部における以下のパラメータを変化させたとき、観察者が感じる臨場感の変化を調べた。

- 空間サンプリング間隔
- 遅延時間
- 運動視差利得

空間サンプリング間隔とは、瞳位置が移動した時に、ある見え方から隣接する見え方に画像が切り替わるまでの空間間隔のことである。遅延時間とは、観察者が瞳位置を移動させてから、見え方画像が変化するまでにかかる時間である。運動視差利得とは、網膜上の見え方の変化を瞳位置の移動量に換算した値を θ_r 、実際の観察者の移動量を θ_e とした場合、次式により与えられる値である¹⁶⁾。

$$G_m = \frac{\theta_r}{\theta_e} \quad (7)$$

(1) 空間サンプリング間隔

空間サンプリング間隔を 0.07, 0.22, 0.36, 0.50, 0.72° と設定した場合の臨場感の実験結果を図 11 に示す。

図 11 において被験者が得た臨場感、空間サンプリング間隔が 0.50° になるまではほぼ直線的に減少し、それ以降は減少率が飽和している。Pastoor は両眼/運動視差を再現した 3 次元画像表示を用いて、空間サンプリング間隔の評価を行い、滑らかな運動視差を再現するには、約 0.33° の空間サンプリング間隔が必要であると述べている³⁾。本実験結果においても、空間サンプリング間隔が 0.36° よりも大きくなると観察者は提示画像から自然さを感じなくなることから、3 次元画像表示方式を観察する場合、臨場感を損なわないような運動視差を再現するには、最低約 0.36° 以下の間隔で見え方画像を切り替える必要があることがわかる。

図 12 遅延時間と臨場感
Delay time vs. sensation of presence.

(2) 遅延時間

遅延時間を 0.02, 0.05, 0.08, 0.11, 0.13 秒と設定した場合の臨場感の実験結果を図 12 に示す*

図 12 において被験者が得た臨場感、遅延時間が 0.02~0.05 秒までの間は大きな変化を見せず、0.05~0.11 秒にかけて大きく減少する。星野らは、観察者が遅延時間を検知できる下限は約 0.06 秒、遅延を許容できる上限は約 0.13 秒であると報告している¹⁶⁾。本研究で行った主観評価でも、遅延時間が 0.05 秒より大きくなると観察者の感じる臨場感が急激に損なわれており、観察者は約 0.05 秒の遅延時間が生じたとき表示の遅延を知覚しているものと思われる。また、遅延を許容できる上限を著しく不自然さを感じない程度とすると、上限は約 0.07 秒となる。構築したシステムの遅延時間は検知限界以下であり、速度的に十分な性能を有しているといえる。

(3) 運動視差利得

運動視差利得を 1, 3, 5, 7, 10 と設定した場合の臨場感の実験結果を図 13 に示す。

図 13 において被験者が得た臨場感、当初は運動視差利得の増加とともに大きくなり、運動視差利得が

* 実際に観察者に提示される遅延時間は、NTSC 表示系のフレーム間隔により遅延が最大で 0.03 秒加わり、表記の遅延時間 d に対して $[d, d+0.03]$ の範囲となる。

図 13 運動視差利得と臨場感
Motion parallax gain vs. sensation of presence.

約 2 のときに最大となる。その後は運動視差利得の増加とともに減少する。仮想現実感を与えるための表示システムでは、観察者の移動感を高めるために運動視差利得を 1 以上に設定する場合がある。本研究で行った評価実験においても、運動視差利得を 1 に設定し正確な視差を再現する場合より、適度に運動視差利得を大きく設定した場合の方が高い評価値が得られた。運動視差利得を 1 とした場合、観察者からは「移動感がない」というコメントが多数得られた。正確な 3 次元シーンの再現を目的とする場合には運動視差利得は常に 1 とする必要があるが、アミューズメント目的などの場合には、適度な運動視差利得を設定することで観察者に与える臨場感を高めることが有効と思われる。

6. む す び

本論文では、シーンを撮影した画像にもとづいて 3 次元情報を復元し、運動視差を再現した 3 次元画像表示を行う方式を提案した。撮影部により得られた 3 次元シーン表現にもとづいた見え方画像生成手法を述べ、固定スクリーン上で正確な運動視差を再現するための幾何学的補正法を提案した。さらに、実際に構築した 3 次元画像表示システムを用いて主観評価実験を行い、正確な運動視差再現の有効性を確認した。また、3 次元画像表示により観察者が感じる臨場感と表示環境を変化させる各種パラメータの関係を考察した。人間の知覚特性を考慮した画像生成法の改良、撮影部のシステムの高速化による動画像への対応、冗長な 3 次元シーン表現の圧縮などが、今後の重要な課題である。

〔参 考 文 献〕

- 1) 浜崎：“三次元画像表示技術の現状と動向”，ディスプレイアンドイメージング，SCI, 3, pp.255-267 (1995)

- 2) A. Börner: “Autostereoscopic 3D-Imaging by Front and Rear Projection and on Flat Panel Displays”, Displays, 14, 1, pp.39-46 (Apr. 1993)
- 3) S. Pastoor: “Human Factors of 3D Displays in Advanced Image Communications”, Displays, 14, 3, pp.150-157 (Apr. 1993)
- 4) 本田：“ホログラフィック・ステレオグラムによる立体表示技術”，ディスプレイアンドイメージング，SCI, 3, pp.277-286 (1995)
- 5) 磯野：“多眼式メガメなし 3 次元画像ディスプレイ”，ディスプレイアンドイメージング，SCI, 3, pp.309-321 (1995)
- 6) N. Thalman, D. Thalman (eds.): “Communicating with Virtual Worlds”, Springer-Verlag (1993)
- 7) A. Lippman: “Movie-Maps: An Application of the Optical Videodisc to Computer Graphics”, Acm Computer Graphics, 14, 3, pp.32-42 (1980)
- 8) K. Satoh, Y. Ohta: “Passive Depth Acquisition for 3D Image Displays”, IEICE Trans. on Information and Systems, E-77-D, 9, pp.949-957 (1994)
- 9) 片山, 田中ら：“多視点画像データの補間処理による視点追従型立体画像表示”，3 次元画像コンファレンス'94, pp.7-12 (July 1994)
- 10) T. Kanade, P.J. Narayanan, P.W. Rander: “Virtualized Reality: Concepts and Early Results”, IEEE Workshop on Representation of Visual Scenes, pp.69-76 (July 1995)
- 11) R. Jain, K. Wakimoto: “Multiple Perspective Interactive Video”, In Proceedings of IEEE Conf. on Multimedia Systems (May 1995)
- 12) K. Satoh, Y. Ohta: “Occlusion Detectable Stereo Using A Camera Matrix”, Proc. 2nd Asian Conf. on Computer Vision, pp.331-335 (Dec. 1995)
- 13) M. Okutomi, T. Kanade: “A Multiple-Baseline Stereo”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., 15, 4, pp.353-363 (1993)
- 14) Guilford, J.P., “Psychometric Methods”, McGraw-Hill Book Company (1954)
- 15) 宮川, “テレビジョン画像の評価技術”，テレビジョン学会編，コロナ社 (1986)
- 16) 星野ら：“運動視差を変化させたときの視覚効果”，信学論，J-73-D-II, 2, pp.224-231 (Feb. 1990)

おおた ゆういち

大田 友一 1977 年，京都大学大学院博士課程修了。京都大学情報工学科助手，筑波大学電子・情報工学系講師，カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員，筑波大学電子・情報工学系助教授を経て，1992 年，同教授。工学博士。画像処理，コンピュータビジョンの研究に従事。正会員。

さとう きよひで

佐藤 清秀 1991 年，筑波大学情報学類卒業。1993 年，同大学大学院修士課程理工学研究科修了。同年より，キャノン(株)情報メディア研究所勤務。バーチャリアリティの研究に従事。工学博士。正会員。

きたはら いたる

北原 格 1994 年，筑波大学情報学類卒業。1996 年，同大学大学院修士課程理工学研究科修了。同年より，シャープ(株)映像メディア研究所勤務。動画像圧縮伸長技術の研究に従事。正会員。