光線群による3次元空間情報の表現とその応用

正会員 藤井俊彰^{††}, 正会員 金子正秀[†], 正会員 原島博[†]Representation of 3 D Spacial Information by Rays
and Its ApplicationToshiaki Fujii^{††}, Masahide Kaneko[†] and Hiroshi Harashima[†]

Abstract In this paper, we propose a new framework of representing 3-D spacial information by using 'Rays'. We show that this data format includes all the information of the scene viewed from any direction, so that, one view image from an arbitrary viewpoint can be obtained by sampling ray data. We also introduce ray parameter space and examine its characteristics. We give a new definition of visual field and viewing zone and evaluate the amount of ray data in terms of ray parameter space. In addition, we show possible applications of this concept by presenting simulations, including generating an any-viewpoint image and a variable-focused image, synthesizing a real image and a computer-generated image, and compressing a hologram pattern.

1. ま え が き

近年、バーチャルリアリティでの始めとして3次元画像が注目を浴びており、3次元空間の情報を効率良く保持・伝送する技術や柔軟に処理を行う技術の確立が望まれている。具体的には、ステレオ画像、多眼画像、パノラマ画像、全周画像、ホログラフィなどの様々な3次元画像情報の圧縮や、それらの間のデータの相互変換法の確立、および仮想空間の構築手法の確立などが重要な課題として挙げられる。従来における3次元画像情報の圧縮手法として、波形符号化の観点から冗長性を除去しようとする「視差補償予測符号化」や、物体の3次元情報、表面テクスチャ、光源情

報を分析して符号化する「3次元構造抽出符号化」がある。特に、後者にはコンピュータビジョンの分野で蓄積された多くの研究があり、それらを利用することができる。例えば、等速運動するカメラで撮影した時空間画像の軌跡が直線となることを利用して物体の3次元構造を求める手法¹⁾や、エピソード平面画像(EPI)における軌跡を解析することにより物体の3次元構造を求める手法²⁾、因子分解法を用いて物体の3次元構造とカメラの回転パラメータを安定に求める手法³⁾などがある。また、単純な3次元構造モデルを利用して多眼画像の符号化を行った試みもある⁴⁾。これらは非常に有望な手法であるものの、撮影された自然のシーンを細部にわたり安定かつ正確に分析するの

キーワード：3次元空間情報、光線群表現、光線パラメータ空間

1994年10月17日、画像符号化シンポジウムで発表

1996年2月27日受付、1996年5月27日再受付

† 東京大学 大学院工学研究科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1, TEL 03-3812-2111)

†† 名古屋大学 大学院工学研究科 (〒464-01 名古屋市中千種区不老町, TEL 052-789-3628)

† Faculty of Engineering, The University of Tokyo (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan)

†† Graduate School of Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan)

は非常に困難であるという問題点があり、実用には至っていない。一方、少ない視差画像から補間処理により多眼画像を合成することにより、間接的にデータ量の削減を目指しているものもあるが⁵⁾⁶⁾、これらも先の2つの符号化手法に用いられている手法の範疇に含まれると考えられる。

このような現状を踏まえ、先に我々は3次元画像通信の将来像について検討し、入出力デバイスに依存しない中立的なデータフォーマットを規定する「3次元統合画像通信の構想」を提案した⁷⁾。そもそも3次元画像通信の目的は、3次元空間の情報を取り出して伝送し、受信側の観察者にあたかもその空間にいるかのような臨場感を与えることにある。本論文では、この原点に立ち返り、3次元空間情報を光線群により表現する手法を提案する^{8)~10)}。その基礎となる考え方を述べ、さらにその応用について言及する。

2. 光線群による3次元空間情報の表現

我々の目は光受容器であり、時々刻々変化する光の情報を基に3次元空間の認識を行っている。このことは、3次元空間中の光の情報を取り出し、それを正確に再現することができるならば、3次元空間を直接観察しているような状態を作り出すことができることを意味している。

ホログラフィは波面の制御によりこれを実現したものであるが、幾何光学的近似のもとで光の伝播する道筋に着目した「光線 (ray)」の考え方をを用いた場合でも十分な場合が多い。そこで本論文では、3次元空間内の光線の情報に着目し、光線の集まりとして3次元空間の情報を表す手法を検討する。

3次元空間中の光線情報は、位置 (x, y, z) における θ, ϕ の方向からの光線の光強度 (輝度情報) をすべて記述すればよく、 $f(x, y, z, \theta, \phi; t)$ の6次元空間のデータとして表される。

ある視点から観察した画像情報は、この6次元空間の部分空間に相当するデータとなる。例えば、撮像系としてピンホールカメラモデルを仮定した場合、一点を通過する光線群の情報がこれに相当している。この場合、視点 (x_0, y_0, z_0) から観察した画像情報は

$$f(\theta, \phi; t) | x=x_0, y=y_0, z=z_0 \quad (1)$$

と与えられる。これは $(\theta, \phi; t)$ の関数であり、2次元の動画像となる。

このように、3次元空間の情報を光線の情報で表現した場合、画像の撮影とは空間中の「光線情報のサンプリング」を行う操作であり、また任意視点画像の合成とは、「視点を通過する光線情報の取り出し」を行

って画像として表示することであるといえる。

さて、光線情報は時間的に不変であるものとし、静止情報について考えるものとする。また、光線が空間中を伝播する際の変化 (反射, 屈折, 減衰など) を無視し、光線は直進するものと仮定する。このような仮定をおくことにより、1次元的な直線としての「光線」として表すことができる。その結果、光線の情報を4次元のデータに減らすことができる。

以下では、これらの関係をさらに詳しく検討するため、光線のパラメータ表現を導入する。そして、光線パラメータ空間の観点から光線群データの性質を検討する。

3. 光線のパラメータ表現とその性質

3.1 光線パラメータの定義

空間中の光線を同定するパラメータは、目的に応じてさまざまに選ぶことができるが、ここではひとつの定義方法を示す。

図1に示すように、 (x, y, z) 空間中の光線 R を考える。まず、光線 R の進行方向を、極座標表示で θ, ϕ ($-\pi \leq \theta < \pi, -\pi/2 \leq \phi < \pi/2$) とパラメータ表現する。次に、この光線 R が平面 Q と交わる点を Q 上の座標で (ξ, η) とする。ここで、平面 Q は $y-z$ 平面を y 軸中心で時計回りに ϕ 回転させ、その後 z 軸中心に反時計回りに θ 回転させたものであり、 ξ 軸、 η 軸はそれぞれこの変換における y 軸、 z 軸の写像である。これら4つのパラメータ $(\xi, \eta, \theta, \phi)$ により、光線 R を方向も含めて一意に表すことができる。この光線 R の光強度を表す関数を f と定義すると、光線のパラメータ表現

$$f(\xi, \eta, \theta, \phi) \quad -\pi \leq \theta < \pi, \quad -\pi/2 \leq \phi < \pi/2 \quad (2)$$

$$-\infty < \xi, \quad \eta < \infty \quad (3)$$

を得る。以後、 (x, y, z) で表される空間を実空間、

図1 実空間 (x, y, z) と光線パラメータ ξ, η, θ, ϕ の関係
Relationship between real space (x, y, z) and ray parameters ξ, η, θ, ϕ .

$(\xi, \eta, \theta, \phi)$ で表される空間を光線パラメータ空間と呼ぶことにする。

3.2 一点を通る光線群の軌跡

実空間中の一点を通る光線群は、その点から観察した画像情報に相当するという重要な性質がある。ここでは、一点を通る光線群が光線パラメータ空間内で描く軌跡を求めておく。

実空間内の一点 V の座標を極座標表示で $V(r, \alpha, \beta)$ とする。また、点 V から平面 Q に下ろした垂線の足を $H(\xi, \eta)$ とする。この時、 ξ, η を $r, \alpha, \beta, \theta, \phi$ で表すと

$$\begin{aligned}\xi &= -r \cos \beta \sin(\theta - \alpha) \\ \eta &= -r \{ \cos \beta \sin \phi \cos(\theta - \alpha) - \sin \beta \cos \phi \}\end{aligned}\quad (4)$$

となる（付録参照）。特に、縦方向の視差を無視した場合、 $\beta = \phi = 0$ を代入することにより

$$\xi = -r \sin(\theta - \alpha) \quad (5)$$

を得る。この場合、実空間の一点を通る光線群は光線パラメータ空間内で $\sin$ カーブを描くことがわかる（図2）。原点から点 V までの距離 r が振幅を、 OV と x 軸との角度 α が位相を規定している。

3.3 画像の取得と合成

ある視点からカメラを用いて画像情報を取得することは、光線パラメータ空間の全データのうち、部分空間のデータをサンプリングして記録することである。実際の撮影において記録される画像と光線パラメータ空間データの関係は次の通りである。カメラモデルとして、視点が V にあるピンホールカメラを仮定する。また、 V を通る光軸とそれに垂直な画像面 P を仮定する。画像面 P に記録される光線情報は（4）式に沿った光線群のデータとなるが、一般にカメラは有限の画角を持っているので、角度のパラメータに定義域 ϕ がつくことになる。したがって（4）式のデータのうち、 $(\theta, \phi) \in \phi$ を満たすデータが画像面に記録される。

簡単のため、2次元の場合についてこれを示したのが図3である。視点を $V(r, \alpha)$ とし、原点を通る光軸と垂直に画像面 P をとる。また、視点と画像面との距離を F とし、画像面に沿って p 軸をとる。撮影される1次元画像を $I(p)$ とすると、 $I(p)$ は画像面

上の座標 p の位置に記録される光線の輝度情報であるから

$$I(p) = f(\xi, \theta) \quad (6)$$

ただし、 $\xi = -r \sin(\theta - \alpha)$

$$p = F \tan(\theta - \alpha)$$

$$\theta \in \phi$$

と与えられる。このようにして、光線情報の観測データとして画像 $I(p)$ が得られる。

一方、任意視点画像の合成は、光線パラメータ空間の全データを保持しておき、（6）式の光線データに相当するデータを取り出して表示することにより実現される。またこの考え方を応用して、後に示すような可変焦点画像を合成することもできる。

3.4 光線表現のデータ量

光線表現のデータ量は、光線パラメータ空間の観点から見通し良く定義することができる。その際に必要となるのは、視野と視域の概念と、光線パラメータ空間の離散化である。以下にこれを説明する。

（1）視野と視域の定義

3次元画像を論じる際に重要な概念である「視野」と「視域」の概念¹¹⁾を光線パラメータ空間で捉え直し、新たな定義を与える。

・視野とは、ある視点 V から観察した画像に記録

図2 点 $V(r, \alpha)$ を通る光線群の軌跡（2次元の場合）
The trajectory of rays which traverse the point $V(r, \alpha)$. (2-D case)

図3 光線データからの画像情報の取得
Acquisition of a view image from ray data.

される光線の方向 (θ, ϕ) の範囲 ϕ と定義する．

- ・視域とは，視点 V の移動が許される実空間内の領域 D と定義する．

例を挙げると，パノラマ画像の視野 ϕ は光線パラメータ空間において全方向 $-\pi \leq \theta < \pi$ であり，視域 D は実空間内の一点である．また，物体を全周から撮影した画像の場合，視点 $V(r, \alpha, \beta)$ における視野 ϕ は $\theta = \alpha$ を中心とするある角度の範囲であり，視域 D は実空間内で視点が存在する円周上の点である．

これらの概念を光線パラメータ空間の観点から考え，保持すべき全光線を求める．1つの視点 V とその視点における視野 ϕ_v を決めると，その視点において記録される光線の集合 S_v が定められる．これは光線パラメータ空間 U の部分空間 $S_v \subset U$ となる．また，別の視点 V' における視野 $\phi_{v'}$ を決めると，別の部分空間 $S_{v'} \subset U$ が定められる．この時，これら2視点からの画像を再構成するために必要な光線群は，光線パラメータ空間内における S_v と $S_{v'}$ の和集合で与えられる．このように考えていくと，視域 D 内の任意視点からの画像を再構成するために保持すべき全光線 A はすべての $V \in D$ における S_v の和集合で与えられ

$$A = \bigcup_{V \in D} S_v \quad (7)$$

となる．

(2) 光線パラメータ空間の離散化

今，実空間中にある光線の密度を考えるため，単位長さあたりの光線の本数 m ，単位角度あたりの光線の本数 n を導入する．これを光線パラメータ表現で考えると， ξ 軸に沿って単位長さあたりの光線の本数が m ， θ 軸に沿って単位長さあたりの光線の本数が n として離散化することになる．したがって，光線パラメータ空間内において， $d\xi, d\theta$ に含まれる光線の本数は

$$(md\xi) \cdot (nd\theta) \quad (8)$$

と与えられる．

例として，半径 r の円の内部にある物体を光線群表現するために必要な光線の本数を求める．視野と視域の和集合を考えると，保持すべき全光線 A は半径 r の円の内部を通る光線群であることがわかる．この光線群は，図4に示すように光線パラメータ空間内で $-r < \xi < r$ および， $-\pi \leq \theta < \pi$ の範囲内にある．したがって，この領域を通る光線の本数は

$$N_{ray} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-r}^r md\xi nd\theta = 4\pi r m n$$

$$(9) \quad \text{The trajectory of rays which traverse the internal point of a circle with radius } r.$$

である．半径 r の内部にある物体を表現するためには，これだけの量の光線情報が必要であるということになる．

以上のように定義した量を用い，光線表現のデータ量を定めることができる．光線表現のデータ量は，光線パラメータ空間における標本点数 N と，輝度情報に割り当てるビット数 B とを用いて $N \times B$ と定められる．ここで，標本点数 N は，視野と視域により決まる光線パラメータ空間の大きさ A ，および離散化のパラメータ m, n に依存して定められるものである．

数値例を挙げると，画像サイズ 512×512 pixelで1度ごとに全周のデータを輝度8ビットの情報量で保持する場合，縦方向の視差を無視した場合でも94 MB必要となる．このように，光線表現は非常に多くの情報量を必要とする．しかし，このデータは多くの場合，非常に冗長である．

4. 光線群表現の応用

光線群表現を用いた，いくつかの応用例を示す．

4.1 任意視点・焦点の画像生成

任意視点画像の合成は，光線パラメータ空間内のデータのうち，(4)式に沿ったデータを読み出して並べることにより実現されることについては先に説明した．同様の考え方を用いて可変焦点の画像を合成することも可能である．そのためには，有限の大きさを持ったレンズを通して撮影するカメラモデルを想定し，幾何光学の理論に基づいて再生像を生成すればよい．

図5，図6は，光線パラメータ空間のデータから再構成したステレオペア画像と可変焦点画像の例である．光線パラメータ空間のデータは，計算機シミュレーションにより生成したものをを用いた．被写体としては， xy 平面上に原点中心の同心円の模様が描かれた背景を置き，その手前 $z=50$ mmの位置に板状の3Dの文字を配置したものを用いた．また，光線パラメー

図4 半径 r の円の内部の点を通る光線群の軌跡

図5 光線パラメータ空間データから取り出されたステレオペア画像 (視点位置 (x, y, z) : 左 $(-30, 0, 500)$, 右 $(30, 0, 500)$ (mm))

Stereopair images extracted from ray parameter space data. (viewpoint (x, y, z) : (left $(-30, 0, 500)$, right $(30, 0, 500)$ (mm)).

図6 焦点を変えたもの (左: 背景に焦点を合わせたもの, 右: 文字に焦点を合わせたもの)

Variable-focused images (left: focused on the background, right: focused on the object).

タとして背景上の各点を横切る光線の位置と方向を採用した。パラメータの定義域は、 $-35.8 < x < 35.7$ (mm), $-32.6 < \theta < 32.4$ (degree) である。光線パラメータ空間の離散化は、 x 方向に 1024 サンプル、 θ 方向に 256 サンプルとした。図5は、視点位置を $(x, y, z) = (\pm 30, 0, 500)$ (mm) として再構成した場合のステレオペア画像である。また図6は、レンズ口径を 5 mm とし、焦点を背景に合わせた場合 (focus=0

mm) と前景に合わせた場合 (focus=50 mm) の再構成画像である。

このように、光線パラメータ空間のデータを基に任意視点・焦点の画像の合成が可能である。

4.2 CG と実写の合成

CG と実写の合成は、光線群表現を用いて容易に行うことができる。

まず、カメラにより実物体の光線データを取得し、光線パラメータ空間のデータとして記録する。一方、CG モデルデータをコンピュータグラフィックスの手法により光線パラメータ空間のデータへと展開する。これら 2 つの光線データを前後関係に注意して重ね合わせることで実写と CG 合成を行う。

なお、ここで合成される複数の物体の前後関係に注意をする必要がある。物体がレイヤ状であると仮定する場合には遠くのレイヤから上書きしていけばよいが、複数の物体が入り組んでいる場合のオクルージョンの関係を正しく表現するためには、その光線が発生する座標値を与える必要がある。その場合には光線パラメータ表現に加え、物体の 3 次元構造情報が必要となる。

4.3 3次元統合画像通信における共通データ形式

現在用いられている 3 次元ディスプレイの多くは、表示面が 3 次元空間内の曲面 (平面, 円筒面, 球面など) の形状をしている。そして、表示面上において光の射出方向に依存して異なる強度の光を発することのできる機構を持っている。したがって、このようなディスプレイにおいて表示に必要なデータとは、表示面上の各点において、その点を通る光線データである。先に見たように、本論文で導入した光線群表現のデータはこれらのデータをすべて含んでいる。すなわち、光線群表現は様々な 3 次元表示方式に必要なデータを含む、統一的なデータ表現であるといえる。

図7～図9に、代表的な 3 つの座標系、球面座標

図7 球面座標系
Spherical coordinate system.

図8 円柱座標系
Cylindrical coordinate system.

図9 平面座標系
Plane coordinate system.

表 1 各種 3 次元ディスプレイ用データへの変換式
Transformation from ray data into the data
required for various 3-D displays.

座標系	交換式
球面座標	$\xi = -r \cos \beta \sin (\theta - \alpha)$ $\eta = -r [\cos \beta \sin \phi \cos (\theta - \alpha) - \sin \beta \cos \phi]$
円筒座標	$\xi = -r \sin (\theta - \alpha)$ $\eta = z$
平面座標	$\xi = y \cos \theta$ $\eta = z$

系，円柱座標系，平面座標系を示す．そして，2 章で用いたパラメータ表現から，これらの形状をもつ 3 次元ディスプレイ用のデータに変換する式を表 1 に与える．表 1 は，表示面上の点を通る光線群がパラメータ空間内での描く軌跡を示したものである．この式に沿ったデータを読み出し，ディスプレイに表示すればよい．

このように，光線群表現はさまざまな 3 次元ディスプレイに共通なデータ形式を与えるものであり，3 次元統合画像通信における中核的データ表現として非常に有望である．

4.4 ホログラムパターンの情報圧縮

ホログラムは理想的な 3 次元画像として知られているが，他の 3 次元画像方式に比べて情報量がさらに膨大になるという問題点がある．これを解決すべく，情報圧縮の研究も精力的になされている¹²⁾¹³⁾．

ホログラムの情報圧縮の難しさは，2 次元画像や他の 3 次元画像と比較して，ホログラムパターンの中に冗長性が陽に現れていないことにある．しかし，ホログラムパターンはすべての光線情報を有しているので，光線表現の持つ冗長性があるはずである．そこで，ホログラムパターンを光線群データへ変換し，そのデータに対し圧縮を行うことが有効であろう．ここでは，ホログラムパターンから光線群データへの変換のひとつの試みを示す¹⁴⁾．

ホログラムデータとして，ホログラム面より手前 20 cm の付近に 3 つの点光源を想定し，サンプリング間隔 500 nm で大きさ 13.1 cm の範囲にわたって複素振幅をコンピュータシミュレーションにより計算したものをを用いた．ホログラム面上の標本点数は 2^{18} である．シミュレーションに用いた光学系を図 10 に示す．また，得られたホログラムパターンの振幅分布を図 11 に示す．

次に，得られた複素振幅分布から離散フレネル変換¹⁵⁾を用いて擬似的な回折像を求める．このように

図 10 シミュレーションに用いた光学系
Optical configuration for computer simulation.

図 11 ホログラムの干渉縞 (上: $x=0$ cm 付近,
下: $x=6$ cm 付近)

Fringe pattern generated by computer (above: $x=0$ cm, below: $x=6$ cm).

図 12 ホログラムから変換した光線パラメータ空間
の水平断面図 (横軸: x , 縦軸: $u=\tan \theta$)
Horizontal section image of ray parameter space
data transformed from the hologram pattern.

して得られた光線パラメータ空間の水平断面図を図 12 に示す．

逆に，光線パラメータ空間からホログラムへの逆変換は上記手順の逆を行えばよいが，光線空間が持つて

いる情報は光強度分布のみであって、位相情報は失われている。このように、光強度を定義とした光線表現からのホログラムへの変換は、ホログラフィックステレオグラムと等価な手法となる。完全な逆変換を可能とするためには、光線表現に位相情報を含めた形で保持しておく必要がある。

5. む す び

3次元空間の情報を光線群により表現する手法を提案し、その性質および応用について述べた。本手法は、カメラ配置やディスプレイの種類などに依存せず3次元空間情報を統一的に取り扱うことができるという特長を有するほか、3次元空間情報を取り扱う上で従来ネックとなっていた、3次元情報獲得のための分析処理を必要としないという利点を有する。このため、臨場感通信はもとより、自然シーンを対象としたバーチャルリアリティなどへの応用が期待される。

今後はまず、光線群データの持つ冗長性についてさらに検討を重ね、効率的な圧縮法を見いだすことが課題である。そのためには、CVやCGの分野で用いられている反射、透過、屈折モデルを仮定し、3次元物体の形状と光線群データの冗長性の関係を明らかにしていくことが必要となるであろう。

本論文をまとめるにあたり、有意義な討論をして頂いた谷本正幸名古屋大学教授に感謝いたします。

＜付 録＞

点 $P(x, y, z)$ から平面 Q へ下ろした垂線の足を H とおく。また、 z 軸中心 $(-\theta)$ 回転を表す変換を $R_z(-\theta)$ 、 y 軸中心 ϕ 回転を表す変換を $R_y(\phi)$ 、 yz 平面への正射影を表す変換を P_{yz} とおく。この時、 H の座標 (ξ, η) は合成変換 $P_{yz}R_y(\phi)R_z(-\theta)$ による $P(x, y, z)$ の像の (y, z) 座標に等しいので

$$\begin{pmatrix} * \\ \xi \\ \eta \end{pmatrix} = P_{yz}R_y(\phi)R_z(-\theta) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

となる。これから

$$\xi = -x \sin \theta + y \cos \theta$$

$$\eta = -x \cos \theta \sin \phi - y \sin \theta \sin \phi + z \cos \phi$$

を得る。さらに、 $V(r, \alpha, \beta)$ の直交座標表示

$$(x, y, z)$$

$$= (r \cos \alpha \cos \beta, r \sin \alpha \cos \beta, r \sin \beta)$$

を代入することにより

$$\xi = -r \cos \beta \sin(\theta - \alpha)$$

$$\eta = -r \{\cos \beta \sin \phi \cos(\theta - \alpha) - \sin \beta \cos \phi\}$$

を得る。

（参 考 文 献）

- 1) 山本：“連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出”，信学論，**J69-D**, 11, pp.1631-1638 (Nov. 1986)
- 2) R.C. Bolles, H.H. Baker, and D.H. Marimont: “Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion”, International Journal of Computer Vision, 1, pp.7-55 (1987)
- 3) 金出, コンラッド, ボールマン, 森田: “因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元”, 信学論, **J76-D-II**, 8, pp.1497-1505 (Aug. 1993)
- 4) T. Fujii and H. Harashima: “Data Compression and Interpolation of Multi-View Image Set”, IEICE Trans. Inf. and Syst., **E77-D**, 9, pp.987-995 (1994)
- 5) 片山, 田中, 小野, 瓜阪, 田村: “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(2)”, 3次元画像コンファレンス'95, pp.184-189 (1995)
- 6) 高橋, 本田ほか: “ホログラフィックステレオグラムにおける視差画像の補間”, 光学, **22**, 11 (Nov. 1993)
- 7) 原島, 藤井, 苗村: “3次元統合画像通信の構想”, 信学技報, **HC92-58**, pp.1-9 (1993)
- 8) 藤井, 原島: “構造抽出に基づく3次元画像符号化”, 1994年画像符号化シンポジウム, pp.23-24 (1994)
- 9) 藤井: “3次元統合画像符号化の基礎検討”, 東京大学工学部電子工学科博士論文 (1994)
- 10) 藤井, 木本, 谷本: “3次元空間情報の光線パラメータ表現”, 信学技報, **CS95-149**, pp.13-18 (1995)
- 11) 大越孝敬: “三次元画像工学”, 朝倉書店 (1991)
- 12) 佐々木, 丹治, 吉川: “ホログラフィック3次元画像の情報圧縮”, テレビ誌, **48**, 10, pp.1238-1244 (1994)
- 13) 吉川, 龜山, 長尾: “動画画像圧縮法のホログラフィック3次元画像への適用”, 3次元画像コンファレンス'95, pp.1-6 (1995)
- 14) 藤井, 木藤, 金子, 原島: “3次元統合画像通信を目指したホログラムと光線空間の相互変換”, 3次元画像コンファレンス'95, pp.220-225 (1995)
- 15) 小林, 本田, 塩見, 岡田: “フレネル回折像からの計算機による像再生”, 1994年第25回画像工学コンファレンス, 6-6, pp.141-144 (1994)

ふじ い としあき
藤井 俊彰 1990年、東京大学工学部電子工学科卒業。1992年、同大学院修士課程修了。1995年、同大学院博士課程修了。現在、名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻助手。工学博士。正会員。

かね こ まさひで
金子 正秀 1976年、東京大学工学部電子工学科卒業。1981年、同大学院博士課程修了。同年、国際電信電話(株)入社。1994年より、東京大学工学部助教授。画像符号化、3次元統合画像通信、マルチメディア情報処理、ヒューマンコミュニケーション等の研究に従事。工学博士。正会員。

はら し ま ひろし
原島 博 1968年、東京大学工学部電子工学科卒業。1973年、同大学院博士課程修了。同年、東京大学工学部専任講師。1975年、同助教授。1991年、同教授。通信理論、信号処理、マルチメディアと知的通信の融合、感性コミュニケーションに関連する研究に従事。工学博士。正会員。