

# 光線情報に基づく3次元空間記述と空間共有通信

原島 博・苗村 健

## 1. 3次元統合画像通信の構想

ここ数年来、立体感を与える3次元画像表示方式として、両眼ステレオ方式、レンチキュラスクリーン方式、パララックスバリア方式、ホログラフィー方式などが、実用レベルで相次いで開発されている。

このような3次元画像技術は、大きく分けて2通りの方向を目指している。その1つは、コンピュータグラフィックス技術を用いた仮想空間の構築である。最近注目されているバーチャルリアリティ技術やインターネット上のVRML (virtual reality modeling language) 技術がその代表である。そしていまひとつが、実空間を対象とした3次元画像通信の実現である。この両者は最終的には、3次元統合情報環境として融合することが期待されている。

ところがこのうち後者の3次元画像通信の実現を目的とした研究を振り返ってみると、その大部分が画像表示デバイスを中心とするハードウェア技術であって、システムの検討はほとんど行われていないことに気づく。

そのひとつの理由は、上記のように数多く提案されている3次元画像技術のどれが本命になるかが、まだ見えていないからであろう。本命が見えない段階では、応用システムをイメージすることも難しい。

では、今後どれが本命になるのであろうか。そもそもあるひとつの方式のみが主流になるのであろうか、あるいは目的に応じて使い分けることになるのであろうか。

筆者らは先に、この後者の考え方に立って、「3次元統合画像通信」(integrated 3-D visual communication)

の提案を行った<sup>1)</sup>。

すなわち、少なくとも現状を見る限り、3次元画像表示方式にはそれぞれ一長一短があり、ひとつの方式のみが主流になるように思われぬ。むしろ応用あるいは目的に応じて、技術の棲み分けができつつあるように見える。

このように複数の方式の共存を前提とすれば、それぞれ全く別々のシステムとして存在するのではなく、当然それぞれの間のデータの交換、共有、さらにはネットワーク化が必要になってくる。

さらには、通常の2次元画像システムとの両立性も重要である。将来において3次元画像技術が進歩しても、画像通信の基本は2次元動画であって、必要に応じて2次元に1次元を追加される形になることが望ましい。

これが筆者らが構想している3次元統合画像通信の基本的な考え方である。本稿では、このような3次元統合画像通信において、3次元統合符号化方式の導入が必須であることを述べ、そのためには従来のような画像符号化ではなく、「空間符号化」の研究開発が新たに必要になることを指摘する。さらに、この空間符号化へ向けて、筆者らが現在進めている「光線情報による空間記述」の研究を紹介することとしたい。

## 2. 3次元統合符号化と空間符号化

### 2.1 3次元統合符号化の要請

「3次元統合画像通信」では、入力デバイス、出力デバイスに依存しない中立的な情報記述が必要になる。

すなわち、複数通りの3次元画像方式が共存している環境下で、それぞれのデータ交換を個別に行うと、組み合わせの数だけの交換方法が必要になり、実用的でない。

東京大学工学部電子情報工学科 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: hiro@hc.t.u-tokyo.ac.jp

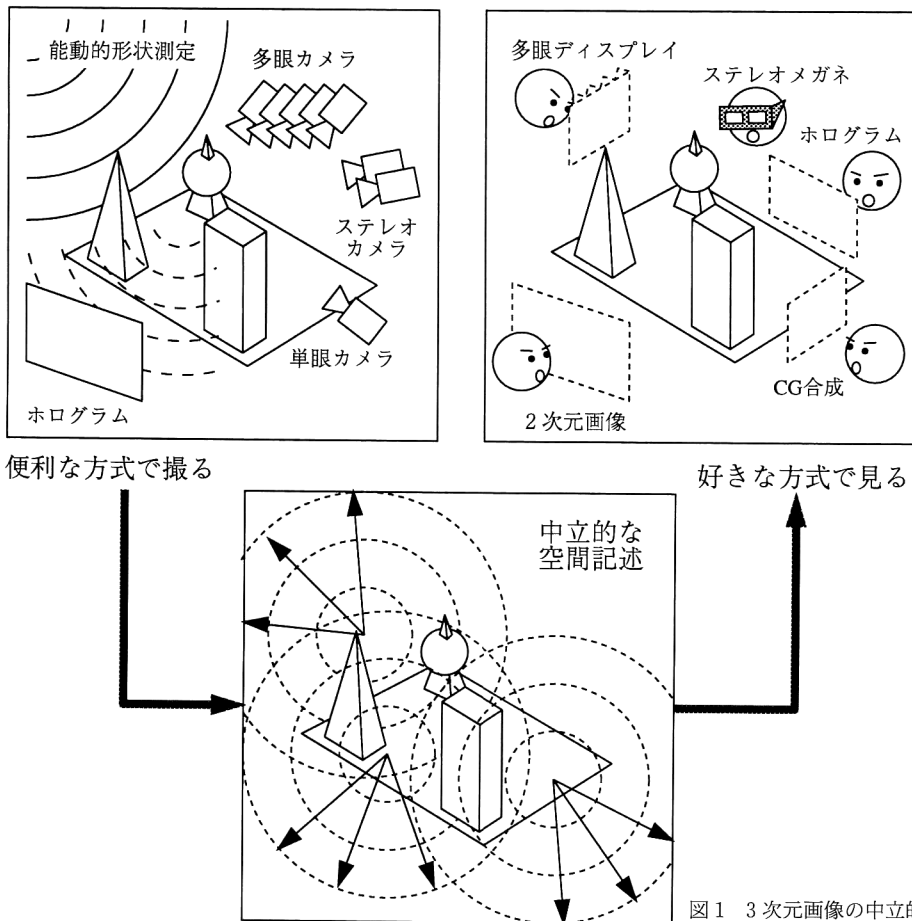


図1 3次元画像の中立的記述。

これに対して、ネットワークにおいて、図1に示すように「3次元画像に対する個別の入出力方式に依存しない中立的な記述方式」、すなわち3次元統合符号化方式を規定しておけば、方式相互のデータ交換方法をすべて考える必要はなく、より統合的なネットワーク環境が実現できよう。

また従来の3次元技術では、画像の入力方式と出力方式が原則として対応していたが、中立的な画像記述を導入すれば、3次元画像の入力方式と出力方式（表示方式）を独立に規定することも可能になる。そうなれば、入力方式は、画像表示方式とは無関係に、状況に応じて最も入力が容易な方式（例えば多眼カメラ入力）を採用することができる。一方、画像出力すなわち表示方式は、その利用法に応じて最適なものを選べばよい。

## 2.2 画像符号化から空間符号化へ

それでは、この中立的な記述法、すなわち3次元の統合符号化法とは、どのような形になるのであろうか。

筆者らは、先に、画像符号化ではなく「空間符号化」なる新しい概念を提唱した。

考えてみれば、われわれが観測している「画像」はすべて、ある特定の撮像デバイスの出力として得られるものであって、基本的には入力デバイス依存である。したがって、画像に固執している限り、真に中立的な記述は得られない。

むしろ、本質的に重要なのは「3次元空間そのものの情報」であって、その空間の情報を空間符号化という形で具体的に記述することができれば、それは真に中立的な3次元記述方式となろう。

この立場からは、3次元統合画像通信が目指すものは、様々な3次元画像に個別に対応するシステムではなく、むしろ空間そのものを対象とした通信システムであると考えられる。画像通信から空間共有通信へと発想を転換することにより、今後も新たな研究パラダイムが提起されてくることが期待される。

### 2.3 空間符号化の2通りの考え方

現在、空間共有通信の実現に向けた、3次元空間符号化の具体的な方式として、

- (1) 物体の構造モデルによる記述
- (2) 空間の光線モデルによる記述

の2つの検討を行っている。

- (1) 物体の構造モデルによる記述

3次元入力画像から被写体の構造を推定し、その構造モデルを使って空間の記述を行う。構造モデルの推定には、CV (computer vision) の技術が利用される。一方、出力側ではCG (computer graphics) 技術を用いて画像を合成する。このような、CVとCGを組み合わせるといふ考え方は、画像符号化分野における「分析合成符号化」の概念に相当する。

実空間における被写体の構造抽出は簡単ではないが、従来の2次元画像に比べれば、3次元情報を含んだ入力を対象とすることによって、より安定にモデル推定を行うことができる。図2に、実際に多眼画像から推定された構造モデル(ポリゴンモデル)の例を示す。このモデルは、筑波大学多視点画像データベースの中で提供されている多眼画像を領域分割して、各領域ごとに再構成画像のSNRが最大になるようにポリゴン形状と表面テクスチャーを最適化したものである<sup>2)</sup>。

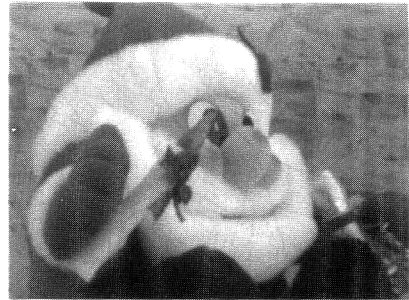
しかし、一般に、構造モデルを推定するプロセスには多くの技術課題が残されており、あらゆる被写体に対して十分に安定な構造推定方式はまだ開発されていない。

- (2) 空間の光線モデルによる記述

空間の視覚的な伝送のみを目的とする場合は、必ずしも「空間中にどのような構造があるのか」をシステムが認識しておく必要はない。むしろ「観察者の目にどのように見えるのか」を最優先に考えることが望ましい。そのためには、被写体の構造を推定するよりも、目に飛び込んでくる「光線」そのものを記述したほうが、より直接的に視覚的情報通信システムの目的を達成することができる。

上で述べた物体の構造モデルによる記述が、あらゆる被写体に対して安定な構造推定法の実現を必要不可欠としているのに対して、空間の光線モデルによる記述は、むしろ信号レベルの記述であり、必ずしも構造推定を要しないという特徴がある。

次章では、このような立場から進めてきた「光線記述に基づく空間符号化」の研究について説明する。



(a)



(b)

図2 多眼画像からの構造モデルの推定。(a)原画像の一部、(b)仮想的な視点位置から眺めた構造モデル。

### 3. 光線情報に基づく空間記述

視覚情報とは実空間中の光線によって与えられる情報であるので、「実空間内のすべての光線情報を伝送」することによって「実空間の視覚的伝送」が達成されることになる。

#### 3.1 光線情報の定義

空間における光を、その波動性などは無視して、単に空間内のある点から別の点へ向かう光線として考えよう。すると、3次元空間中の光線は、その通過位置( $X, Y, Z$ )と方向( $\theta, \phi$ )ごとに区別して扱うことができるから、色や輝度などの光線情報(ray data)は、以下のように5つのパラメーターを有する関数値(5次元データ)として定義することができる<sup>3,4)</sup>。

$$\text{ray data} = f(X, Y, Z, \theta, \phi)$$

ここに方向( $\theta, \phi$ )としては、例えば極座標系を考えればよい。

このように3次元空間の光線情報を記述するためには、静止空間の場合で5次元のパラメーター情報が必要

になる。時間とともに変化する動空間の場合は、時間変数  $t$  を加えて、6次元のデータ  $f(X, Y, Z, t, \theta, \phi)$  として扱えばよい。

### 3.2 光線情報空間のサンプリングとしての画像

このようにして多次元の光線情報空間を定義すると、通常の撮像デバイスによる画像の撮影は、光線情報空間の部分空間のサンプリングとして位置づけられる。

たとえばカメラによる撮像は、簡単のためにピンホールカメラで近似すると、そのピンホールに入る光線を集めたものが記録された画像になる。ピンホールに入る方向は  $(\theta, \phi)$  の2つの変数をもつから、画像は当然ながら2次元になる。

より厳密には、位置  $P(X_0, Y_0, Z_0)$  を固定した2次元の部分空間

$$f(\theta, \phi)|_{X=X_0, Y=Y_0, Z=Z_0} \quad (1)$$

は、その視点位置における全周のパノラマ画像に相当する。したがって、 $P$  の位置にピンホールカメラを置いて実空間中の物体や環境を撮影した画像は、式(1)の部分空間中に記録すればよい。逆に、表示系において観察者の視点位置が  $P$  にある場合は、式(1)の部分空間中の光線情報を読み出して画像を合成すればよい。このように、画像の撮影は「光線情報のサンプリング」、画像の合成は「5次元情報空間からの光線情報の読み出し」と捉えることができる。

以上述べた性質から、5次元の光線情報空間には「無数の視点位置  $(X, Y, Z)$  においてピンホールカメラで撮影されたパノラマ画像  $(\theta, \phi)$ 」が格納されていることがわかる。一般に、カメラの光軸方向、もしくは観察者の視線方向が与えられれば、パノラマ画像と平面画像の相互変換が実現される。したがって、この5次元情報空間には、任意の視点位置・任意の視線方向に対応する画像情報が、光線情報として埋め込まれていることになる。

なお、通常のカメラでレンズの絞りを開くと、レンズの焦点距離に応じて画面の一部がボケてくる。これは、レンズを通過する光線が積分されて画像面に投影されるためである。

### 3.3 多眼カメラ、ホログラムと光線情報空間

以上述べたように、視点位置  $(X_0, Y_0, Z_0)$  で撮影された画像情報は、2次元の情報空間

$$f(\theta, \phi)|_{X=X_0, Y=Y_0, Z=Z_0}$$

に対応している。この位置から、カメラを水平方向 ( $X$  軸方向) に無数に並べると、このカメラアレイからは、3次元の情報空間

$$f(X, \theta, \phi)|_{Y=Y_0, Z=Z_0}$$

に対応した光線の情報が入力されることになる。

ステレオ画像やレンチキュラー方式のディスプレイなど、水平方向の視差を実現する方式では、このような3次元の情報空間を扱っていることに相当する。つまり、2次元画像情報から、情報空間の次元を1つ増やすことによって、水平方向の視差が実現されるのである。

次に、カメラを2次元の平面  $Z=Z_0$  上に無数に配置した場合には、

$$f(X, Y, \theta, \phi)|_{Z=Z_0}$$

なる4次元情報空間が議論の対象となる。ここでは、水平方向だけでなく垂直方向の視差も実現される。

同様の考え方で、ホログラムから得られる情報も光線情報空間の部分空間として位置づけられることもわかる。すなわち、ホログラムは、ある面を通過する光線を記録したものであるから、光線が通過する面の位置  $(X, Y)$  と光線の方向  $(\theta, \phi)$  の4変数をもつ4次元データになる。通常の2次元画像データに対して、ホログラムの有する情報量がきわめて多いことが、これからわかる。

ただし、ここでは光を光線としてモデル化しているため、厳密には、その伝搬過程における光波の位相成分に関する情報が欠落している。このため、位相情報付き多眼画像という側面をもつホログラムを含めた完全な3次元情報の記述にはなっていない。これを行うためには、位相成分も考慮した方式を開発する必要があるが、次世代視覚メディアにおいて、光の位相成分がどれほど重要な役割を果たし得るのかについては議論の余地が残されている。

### 3.4 光線情報空間の冗長性と圧縮

以上述べたように、3次元統合画像通信においては空間そのものを直接記述する空間符号化が要請され、それは空間における光線情報を記述することにより可能になる。したがって、3次元統合画像通信の最終的な目標は、この光線情報の伝送・共有にあると考えてよい。この場合には、もはや3次元「画像」を伝送しているというよりは、3次元「空間」そのものを伝送しているというほうが適切な表現となる。

しかしながら、5次元（動空間の場合は6次元）の光線情報は、そのままでは膨大なデータ量となる。実用に供するためには、光線情報データの圧縮が必須である。

幸い光線情報にはきわめて多くの冗長性が含まれており、その冗長性を利用した情報圧縮が可能である。たとえば、光の伝搬にともなう干渉や減衰が無視できる場合

は、光線が進行する方向には値の変化はなく、それはすべて冗長である。また多くの場合、物体上の同じ点から（反射などによって）発した光は、向きが違って光線の値が似通っており、かなりの冗長性が含まれている。

これに加えて、物体表面の明るさや色そのものに空間的な（画像的と呼んでもよいかもしれない）冗長性がかなりあることはいうまでもない。

このような冗長性を積極的に利用することにより、光線情報の効果的な圧縮が可能になる。

たとえば、光線に干渉や減衰がなく、図3のように被写体が存在する空間（記述する空間）と、観察者の視点がある空間が分けられる場合は、この両者の空間の境界面Sを通過する光線だけを考えればよい。これによって、5次元光線データは、4次元情報空間に射影され、次元を1つ減らすことができる。

この境界面は、空間を表示するときの一種のスクリーンであると考えてもよい。このとき、境界面によって分けられる空間のどちら側を「記述する空間」と定めるかによって、4次元の情報空間には図4のように2通りの

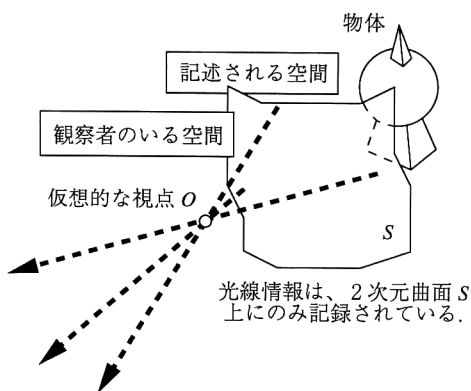


図3 2次元曲面上の光線情報による視覚効果。

利用法が考えられる<sup>5)</sup>。すなわち、(a)囲まれた領域の中にある物体を外から眺めるための物体記述と、(b)領域内の観察者が外の環境を眺めるための環境記述である。それぞれの記述法は、原理的には同じアルゴリズムで扱えるものであるが、その特徴を生かした処理に関しては今後の研究が期待されるところである。

### 3.5 光線記述に基づく空間符号化システムの構成

以上述べた光線情報記述に基づいて、様々な入出力方式を統合的に扱う、次のような「空間符号化システム」が構成できる。

- (1) 各種3次元画像入力を光線情報に分解し、4次元情報空間に格納する
- (2) 4次元情報空間を圧縮して伝送する
- (3) ディスプレイ方式に応じて4次元情報空間から適切な光線情報を読み出し、表示する

一般に、4次元情報空間を密に充填するのに十分な光線情報を実際の撮像系で取得することは難しい。すなわち、3次元画像入力を光線情報に分解しただけでは、4次元情報空間の中に隙間ができてしまう。このため、隙間を埋める処理として、光線情報を補間合成する手法が必要になる<sup>6)</sup>。実際に撮影された光線情報に、仮想的に補間合成された光線情報が加えられ、密に充填された4次元情報空間が生成される。

(2)の4次元情報空間の情報圧縮手法に関する研究はまだ始まったばかりである。規則的な構造性と高い冗長性を有する情報空間が対象となるため、今後、効果的な圧縮手法の開発が進むものと期待される。

### 4. 光線記述された実空間と仮想空間の融合

光線情報に基づく3次元実空間の記述は、コンピューターグラフィックス (CG) による仮想空間構築技術と組み合わせることにより、さらに広範囲な応用が期待で

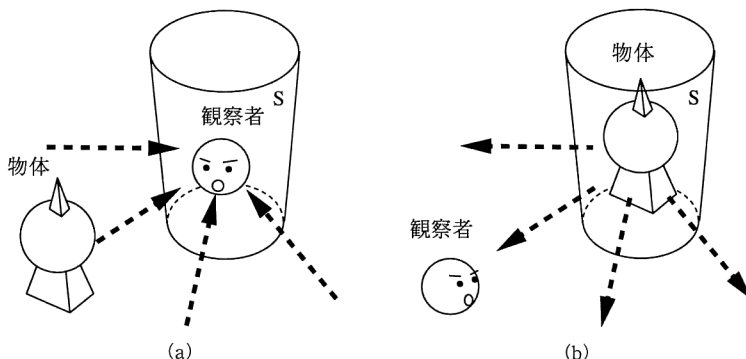


図4 4次元情報空間の利用法。(a)3次元物体の記述、(b)3次元環境の記述。

きる。たとえば、ポリゴンなどの幾何モデルを用いて生成した仮想空間を自由に歩き回るアプリケーションは、バーチャルリアリティー技術が注目を集める中で飛躍的に進歩し、現在では様々な用途で利用されている。

しかし、ポリゴンモデルでリアルな空間、物体を記述するためには、莫大な労力を必要とするだけでなく、どうしてもCGらしさが残ってしまうという問題点がある。CGらしさを完全に払拭することも重要であるが、一方でCGでも十分な部分と、リアルさを極限まで追究すべき部分が存在するのも事実である。

一例として、仮想空間におけるショッピングモールを考えてみよう。展示してある商品は、ポリゴンモデルの偽物では困るが、店構えまで本物に近付ける必要はない。仮想空間の利点を生かして、広々とした商店の中で、リアルな商品を展示できれば十分なのである。

成熟したポリゴンモデル技術を最大限に利用しながら、本稿で述べてきた光線記述によるリアルな物体表現を組み込んでいくことができれば、上記の要求を満たすことができるものと考えられる。

図5にその実現例を示す。ポリゴンで描かれた店内にウサギの縫いぐるみや洋服が実写のクオリティーで展示されている<sup>7)</sup>。CyberMirageと名付けられたこのシステムでは、3次元の情報空間を用い、視差は水平方向に限定しているが、リアルタイムでの動作を実現している。なお、CyberMirageは以下のURLから入手できる。

<http://www.x-zone.canon.co.jp/CyberMirage/>

<http://www.hc.t.u-tokyo.ac.jp/3D/CyberMirage/>

一方で、周囲の環境も含めてすべてを光線情報記述した空間をリアルタイムで表示するシステムの実現へ向けた検討も進めている<sup>8)</sup>。

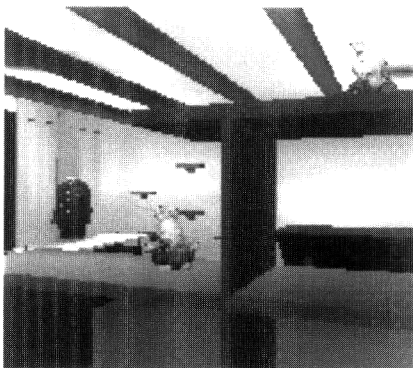


図5 幾何モデルの中に配置された光線記述プロジェクト、CyberMirage。

本稿では、3次元画像を統合的に扱うことを謳った「3次元統合画像通信」の構想について述べ、その技術的課題として「3次元画像に対する個別の入出力方式に依存しない中立的な記述方式」の確立が必要であることを指摘した。また、その具体的な手法として空間の光線モデルによる記述法を紹介した。

視覚情報とは実空間中の光線によって与えられる情報である。したがって、「実空間内のすべての光線情報を伝送」することによって「実空間の視覚的伝送」が達成される。3次元空間の光線情報を記述するためには、静止空間の場合で5次元の情報空間が必要になるが、実質的には4次元の情報によって、視点位置・視線方向などへの対応が可能になる。また、将来の更なる情報圧縮の可能性について述べた。

3次元空間共有通信の研究は、本格化してまだ日の浅い分野ではあるが、デジタル信号処理技術の発達した今日において、その発展には目覚ましいものがある。光線記述によるアプローチは、その中であって有力な方式のひとつである。空間そのものを伝送し共有したいという人類の大きな夢が実現されるまで、今後も活発な研究が行われ、技術が進歩し続けることを願いたい。

本稿で述べた光線記述のアイデアは名古屋大学藤井俊彰博士(当時東京大学大学院生)によるものである。また、本研究に対して日頃から有益なるご討論を頂いている東京大学金子正秀助教に深謝する。

## 文 献

- 1) 原島 博, 藤井俊彰, 苗村 健: “三次元統合画像通信の構想”, 信学技報, HC 92-58 (1993).
- 2) 苗村 健, 柳澤健之, 金子正秀, 原島 博: “領域分割に基づく多眼画像の3次元レイヤ表現”, テレビ誌, 50 (1996) 1335-1344.
- 3) 藤井俊彰, 原島 博: “構造抽出に基づく三次元画像符号化”, 画像符号化シンポジウム (PCSJ 94) (1994) pp. 23-24.
- 4) 藤井俊彰, 金子正秀, 原島 博: “光線群による3次元空間情報の表現とその応用”, テレビ誌, 50 (1996) 1312-1318.
- 5) 苗村 健, 柳澤健之, 金子正秀, 原島 博: “光線情報による3次元実空間の効率的記述へ向けた光線空間射影法”, 信学技報, IE 95-119 (1996).
- 6) 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “実空間光線情報に基づくリアルな仮想空間の生成”, 日本バーチャルリアリティー学会第1回大会 (1996) pp. 35-38.
- 7) 内山晋二, 片山昭宏, 田村秀行, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線空間理論に基づく実写データのCGモデルを融合した仮想環境の実現”, 3次元画像コンファレンス '96 (1996) pp. 13-18.
- 8) 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線情報に基づく3次元空間記述—物体の記述と空間の記述—”, 画像符号化シンポジウム (PCSJ 96) (1996) pp. 47-48.

(1997年4月2日受理)