

## 全方位画像による仮想都市空間の生成

池内 克史<sup>†</sup> 坂内 正夫<sup>†</sup> 川崎 洋<sup>†</sup>  
高橋 拓二<sup>†</sup> 村尾 真洋<sup>†</sup>  
佐藤 いまり<sup>†</sup> 甲 斐 郁代<sup>††</sup>

全方位画像は視点を中心として 360 度の範囲の画像が撮れる。この特徴を利用して、当研究室では仮想都市空間を効率的に生成する手法を開発している。本総合論文では、まずオムニ画像列から画像のみに基づくイメージベース法によるシステムを説明する。さらにこれにオムニ画像解析を行うことで得られる幾何情報を載せることで、シンボリックな情報との結合が可能にする。さらに新しい建物情報を既存の画像中に組み込む場合に必要となる光源環境測定をオムニ画像を用いて行う手法などについて説明する。

### Panoramic Image Analysis for Constructing Virtual Cities

KATSUSHI IKEUCHI,<sup>†</sup> MASAO SAKAUCHI,<sup>†</sup> HIROSHI KAWASAKI,<sup>†</sup>  
TAKUJI TAKAHASHI,<sup>†</sup> MICHIIHIRO MURAO,<sup>†</sup> IMARI SATO<sup>†</sup>  
and FUMIYO KAI<sup>††</sup>

Omni-directional cameras can acquire images with 360 degrees. We have been developing several methods by using this unique characteristic of omni-directional images. In this paper, first, we will explain the system to regenerate appearances of a virtual city based on the image-based rendering. Then, for connecting symbolic information, we consider how to add geometric information to the image-based system based on the analysis of an omni image sequence. Finally, in order to seamlessly combine a new building model on a virtual city, we will measure illumination distributions using an omni-directional camera.

#### 1. はじめに

都市空間表示システムは、今後の高度交通システムにとって、カーナビゲーションやショッピングガイドさらには都市交通計画といった目的のために非常に有用なツールである。都市空間表示システムは、大きくモデリング段階とレンダリング段階の 2 つに分けて考えることができる。モデリング段階では、なんらかの方法で仮想空間内に存在する建築物の 3 次元形状や表面材の色や反射率といった光学特性が与えられる。レンダリング段階では、これらの形状や光学情報を用いて、任意の光源方向における、任意の視線方向から見た都市空間画像が表示される。

本論文は、前半の仮想都市空間のモデル生成法に関

して考察を行う。多くのシステムでは、3 次元形状とそれの見えをモデルとして用意する。あらかじめ与えられた 3 次元形状に基づくモデルを用いたシステムをモデルベース法と呼ぶことにする。モデルベース法は、モデル表現がコンパクトになり、最近の計算機に備えられた画像処理レンダリングエンジンを使用することで高速にレンダリングできるなど有利な点が多々ある。

一方において、通常これらのモデルは人手により入力される。そのため特に光学特性に関しては、簡単な色と反射モデルを使用せざるをえない。このためどうしても見えが実空間に比較して乏しいという欠点がある。一般に、いまだ存在しない架空の仮想都市空間を建築計画などの目的で生成する場合は、こういった方法に頼らざるをえない。一方において、3 次元ナビゲーションなどの目的から、現在すでに存在している都市空間の仮想化を図るといった要求も多い。こういった場合、なんらかの手法で現在の都市空間の画像などからなんらかのモデルが自動的に得られれば大きな省力化

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

<sup>††</sup> 積水化学工業株式会社京都研究所  
Kyoto Research Laboratories, Sekisui Chemical Co.,  
Ltd.

が図れる。

現実中存在する都市空間からモデルを得る場合、画像から幾何形状データを得る部分と光学情報を得る部分に分割できる。幾何形状情報の取得法として航空写真によるもの<sup>1),2)</sup>、動画画像処理によるもの<sup>3)</sup>、レンジセンサによるもの<sup>4)</sup>などが提案されている。後半の光学情報取得に関しては、大半は正面からのテクスチャを手で貼り付けるものが多い<sup>5)</sup>。また、GPSなどのセンサを用いて自動化する試みも行われている<sup>6)</sup>。最近、グラフィックスの分野で、複数の入力画像列から対象となる物体上の点の色変化を解析し表面反射パラメータを求める手法が提案されている<sup>7)</sup>。しかし、これらの手法を実際の都市空間に適用するためには、屋外であるため太陽光などの影響の除去、都市空間に存在する複雑反射特性を持つ壁面や看板など表面反射パラメータの記述法など解決すべき問題が多い。

モデルベース法にともなう困難を回避する方法として、イメージベース法による仮想空間生成が考えられる<sup>8)~10)</sup>。イメージベース法は、モデルなどを適用せずにあらかじめ蓄えられた画像のみを用いてレンダリングを実現する。このため、対象物体の形状や反射特性を考慮する必要がなく、複雑な形状や反射率を有する物体に対しても適用できる。したがって、簡便に実際に近い見えが生成できる。

イメージベース法の中心概念として光線空間<sup>17)</sup>がある。物体をある方向から見た場合の見えというのは、その物体が存在する空間内において物体表面から視点位置に到達する光線の束により構成される。その分布を表現する空間を光線空間と呼ぶ。入力画像をもとに、物体上の各々の光線の明るさや色を光線の方向を示すパラメータに基づき光線空間内に記録する。新たな視点からの画像を表示する際には、各画素の方向をパラメータ化し、そのパラメータに基づいて光線空間を参照し、そこで明るさや色を取り出し、これらを組み合わせることにより、あらたな視点における物体の画像を生成する。

光線空間を構成するためには、対象物体をあらゆる方向から撮影した画像が必要である。光線空間内で光線の分布を効率良く記述するため、光線空間法<sup>18)</sup>、Light Field Rendering<sup>19)</sup>、Lumigraph<sup>20)</sup>、Concentric Mosaics<sup>21)</sup>などが提案されている。これらの研究の主眼は記述法であり、入力方法についてはあまり考察されていない。すなわち、多数のカメラから得られる多数の画像列があるととして議論を進めている。これは対象とする物体が比較的小規模であったため、光線の取得法自体はそれほど検討する必要がなかったから

である。一方、我々が目的とする都市空間は、対象が非常に大きくかつ広域に分布する。このため効率的な光線情報収集の検討を欠かすことができない。本論文では、この点を全方向の画像が取り込める全方位カメラ画像を利用して解決を試みる。さらにカメラ画像を取り込む軌跡を直線とすることで情報収集の手間が大きく削減できることも示す。

イメージベース法による仮想都市空間作成法は、都市空間の建物などの造改築による仮想空間の変更が必要になった場合すべての情報を取り直す必要がある。この欠点を解決するため新しい建物情報を既存の画像列に埋め込むことを考える。この際、仮想物体の色や明るさや影などの光学条件が、背景シーンのそれらと同じでなければ合成画像に違和感が生じる。このような光学的整合性を実現するために、光線の分布を全方位画像を利用してサンプルする手法も提案する。

以下では、まず全方位カメラを利用したイメージベース法による都市空間の作成法について検討する。イメージベース法では、画像を合成するために視線方向すべての光線が必要であるため、一度の撮影で単一焦点で撮影点周囲の光線を獲得できる全方位カメラは、広域環境の光線空間データを現実的に構築するには最適である。

次に、その上に幾何情報を付加する手法について検討し、その結果を利用した任意視点からの交通流表示法について述べる。ここでは、回転体ミラー型の全方位カメラの光学特性を利用した3次元形状の獲得方法と、広視野角による建物側面や上方画像の取得方法についても述べる。

さらに、こういった仮想都市空間を変更する際に有用になる全方位カメラを使用した光源環境サンプル法についても述べる。これも、一度にカメラの全周囲の環境を撮影できる全方位カメラでなければ、時間的、空間的な整合性を保ちながら環境をサンプリングすることは困難である。

## 2. イメージベース法による都市空間の生成<sup>24)~26)</sup>

### 2.1 全方位画像の取得

都市空間をイメージベース法で記述するためには、膨大な入力画像が必要であり、そのため、どのようにして効率良く画像を取得するかが非常に重要である。この問題を解決するため、入力画像として全方位画像を使用する。全方位画像は画像撮影地点から全方位を撮影しているため、画像撮影地点において水平方向の360度すべての光線を持っている。

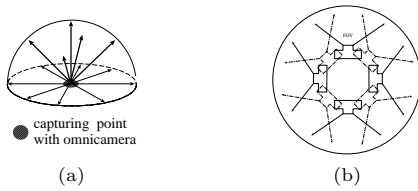


図1 (a) オムニカメラで撮影した画像の持つ光線 (b) 円筒状に配置されたカメラで全方位画像を撮影

Fig. 1 (a) Capturing with an omni-directional camera.  
(b) Configuration of cameras to obtain panoramic images.

全方位画像を簡単に撮影する手段としてオムニカメラ<sup>11)~15)</sup>の利用が考えられる。ここでオムニカメラとは通常のカメラの前に双曲線ミラーなどをおき、全方位画像が得られるようにしたものである。このオムニカメラで撮影した画像からは容易に透視変換画像を作ることができる。また、オムニカメラで撮影した画像は水平方向の360度すべての光線を含むだけではなく、その視点を中心とする片半球すべての方向を写し込んでいるため、図1(a)のように、画像撮影面より上側すべての光線を持っている。

一方においてオムニカメラは、全方位を1枚の画像中に写しこむため、画像精度が落ちるという欠点がある。画像精度を落とさず全方位画像を撮影するために、図1(b)のようにいくつかのカメラを、それらすべてのカメラの光軸が1点で交わるように円筒状に並べる。各々で撮影した透視変換画像を円筒座標系に投影することで、パノラマ画像を得ることができる<sup>16)</sup>。以降、全方位画像とはこれらのうちのどれかで撮影した画像を指すこととする。

## 2.2 既知の軌道上での全方位画像サンプル

本節では、既知の軌道上で全方位画像をサンプルする場合を議論する。議論を簡単にするため直線道路を走行しながら都市の全方位画像を撮影したとする。もちろん一般の軌跡であってもGPSなどで各々の撮像位置が既知ならば同じ議論が展開できる。これらの既知の位置から撮られた全方位画像列を用いて仮想都市空間の生成を考える。

実際の画像取得の際には、図2の車を使用する。この車には全方位画像が取得可能なカメラのほかに、differential GPS、ジャイロセンサ、スピードセンサなどが搭載されている。また光線空間法にあるように各光線を記述する必要があるため、車載されているD-GPSなどを使って各全方位画像の撮影した地点を画像とともに記録する。

## 2.3 任意視点の生成方法

前節で得られた全方位画像列を用いて任意視点から



図2 実世界での画像撮影用の車  
Fig. 2 Image data acquisition car.

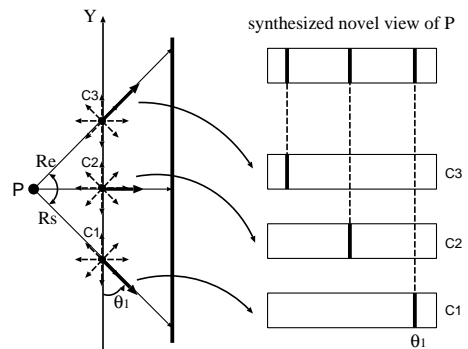


図3 画像の再構築方法  
Fig. 3 Reconstructing a novel view.

の任意方向の画像を生成する。図3のように、Y軸上を車で走りながら全方位画像を撮影し、点Pからの視界(仮想的には図の実線)を作ること考える。光線空間の考え方によれば、点Pまわりの $R_s$ から $R_e$ までの光線が必要となる。ここで図の $\theta_i$ について考える。Y軸上の任意の点で全方位画像を撮影しているので点 $C_1$ においても全方位画像が撮影されており、その全方位画像には点 $C_1$ まわりの全方向の光線が含まれていると考えられる。すなわち点 $C_1$ における全方位画像には図の $\theta_i$ なる光線が含まれていると考えられるので、この光線に関しては図3右側にあるように、点 $C_1$ で撮影した全方位画像から $\theta_i$ に相当するスリットを切り出すことになる。結局撮影した全方位画像列から、各光線に対応するスリットを切り出し、それらを並べ合わせることで、点Pからの視界を作成することができる。

## 2.4 実画像による実験結果

実際に街に出て道路を走りながら全方位画像を撮影し、その画像列を使って新しい画像を生成する実験を



図4 横浜で撮影した全方位画像

Fig. 4 Panoramic image in Yokohama city.



(a)



(b)



(c)



(d)

図5 仮想走行路からの眺め

Fig. 5 Synthesized image sequence from virtual camera.

行った。車の屋根の上に、図1(b)のように円筒状にカメラを複数台設置し、街中の道路を走りながら全方位画像を撮影をした。さらにそれらを円筒座標系に投影して、各撮影地点におけるパノラマ画像を作る。この実験では横浜市街を走行し、図4にあるような全方位画像を各撮影地点について作成し、全方位画像列を得た。

このようにして得られた全方位画像を使用して、新しい視点からの画像を生成した。図5が結果の画像列である。これらの新しく生成された画像列は、実際に画像を撮影するために走った経路に対して、平行に約2.5m離れた地点からのものであり、実際に走っていない仮想走行路からの視界である。この実験では、サンプリングが密であること、仮想視点の位置が実際の撮影経路からあまり離れていないこと、車体の揺れ

が少ない映像であったことなどから補正処理を行わなくても、複数画像をつなぎ合わせる際の継ぎ目に不連続が生じることはほとんどなかった。しかし、カメラの揺れが大きいときなど、条件の厳しい映像の場合には、補正処理が必要になると考えられる。

### 2.5 イメージベース法の検討

本節では全方位画像を用いた仮想空間の新しい生成方法を提案した。この手法は、撮影した全方位画像をもとにして任意地点から任意方向を向いた視界を作ることができ、特に街などの広域空間を生成することに適している。また手法自体も、道路をただ1回走りながら全方位画像列を撮影し、これから光線空間の考えに基づいて、新しい視点に対応した適切なスリットを切り出して合成するだけという、非常にシンプルなものである。そのためにリアルタイムレンダリングも可能である。この手法の応用として、ITS分野におけるドライビングシミュレータの背景画像作成などが考えられる。

一方においてイメージベース法は画像に基づくため建物、道路などのシンボリックな情報が入っていない。仮想都市空間の応用としては、単なるドライビングシミュレータの画像生成だけでなく、インタラクティブな3Dナビゲーションシステムなどへの応用も考えられる。こういったシステムでは画像の各部分がなんらかの幾何情報としてまとめられ、その上に属性のようなものが付属している必要がある。次章では、このイメージベース法で得られた画像に幾何情報を付加することを検討する。

## 3. イメージベース法に幾何形状付加した都市空間の生成<sup>27)</sup>

### 3.1 幾何情報取得のための全方位画像の使用

前章と同じセットアップで全方位画像列を収集し、この画像列から都市の幾何情報を得ることを考える。その際、3次元情報を獲得する方法として、ビデオ映像から得られる多くの画像列を利用することで安定して3次元情報が得られるEPI解析<sup>22),23)</sup>を利用する。本来、実世界におけるEPI解析は、振動、ノイズ、光源環境の変化などの影響を受けるため、正確な3次

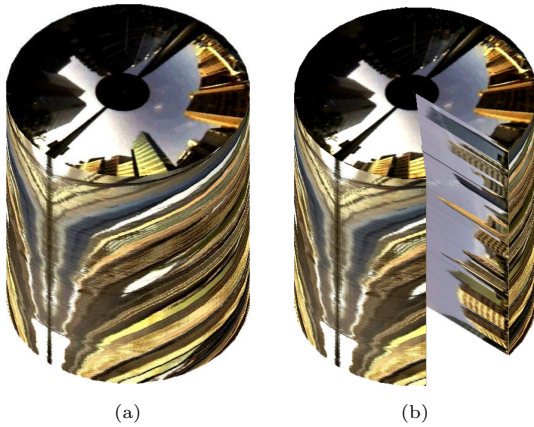


図 6 (a) 全方位カメラ時空間画像 (b) 半径方向切断面  
Fig. 6 (a) Omni spatio-temporal volume. (b) Radius cross section of spatio-temporal volume.

元情報を得ることが難しい。また、撮影経路は直線の必要性があるなど、拘束条件も多い。そこで本手法では、モデルから EPI を作成し EPI どうしを直接マッチングさせることで、従来の手法よりも拘束の少ないロバストな解析を実現した。また、本 EPI 解析を用いることで、実際の建物テクスチャ画像を使用した、現実感の高い 3 次元モデル地図を自動生成することができる。

この際、一般のカメラを用いて映像を取得したのでは、カメラの画角の制限などから、建物の上方や側面方向の画像の獲得が困難であり、都市の 3 次元モデルを生成することは現実には難しい。我々は、双曲回転体ミラーを用いたオムニカメラを用いることで、一度に建物すべてのテクスチャ情報を獲得し、建物の側面も含めた再構築を試みる。

### 3.2 オムニ時空間画像解析

オムニカメラによる時空間画像はオムニ画像を時間軸方向に積層することによって得ることができる(図 6(a))。通常の EPI は、この時空間画像を画像上のエピボール線(通常の画像では水平線、オムニ画像では流線形)に沿った切断面として得ることができる。しかし、この流線の形状は回転体ミラーに固有のものであり、かつ、このような流線形に沿って時空間画像を切断することは現実的には困難をとまうことが多い。そこで、本論文ではこのオムニ時空間画像を直線で切断することを検討する。

図 6(b) に、半径方向に切断した例を示す。図から明らかのように半径方向にはパノラマ画像が出現する。これはオムニ画像の各半径方向の切断線上の画像が通常のピンホールカメラの縦方向の切断線上の画像に対応し、これらを時系列方向につなぎ合わせればパノラ

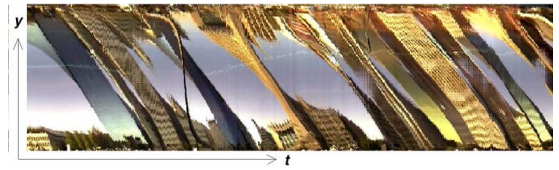


図 7 垂直方向切断面

Fig. 7 Vertical cross section of spatio-temporal volume.

マ画像になることに対応する。

縦方向に切断した例を図 7 に示す。ただし、時空間画像の座標系を  $(x, y, t)$  で表すものとし、進行方向をオムニ画像の鉛直上方向 ( $y$  軸上向) とする。回転体ミラーにおいては垂直な構造物はミラーの中心に向かって写り込むため、実世界中の  $(X_0, Y_0)$  にある特徴物体は、オムニ画像上では、直線

$$y = \frac{Y_0}{X_0} \cdot x \quad (1)$$

上にある。ここで、カメラが一定速度  $v$  で動いているとすると、 $x = k$  のときの特徴物体の  $y$  座標は、

$$y = k \frac{Y_0}{X_0} - k \frac{v}{X_0} \cdot t \quad (2)$$

となり、この特徴点の時間微分は、

$$\frac{dy}{dt} = -k \frac{v}{X_0} \quad (3)$$

である。したがって、縦方向の切断面 ( $x = k$  における  $y-t$  平面) においては軌跡が直線となり、またこの直線の傾きが奥行き情報 ( $X_0$ ) を表していることが分かる。

### 3.3 3次元情報の獲得

式 (3) により、縦方向の切断面から直線を検出し傾きを求めることで実世界の構造物の奥行き情報が得られる。そこで、推定した奥行き情報を利用して、2次元デジタル地図から得られたモデルと実世界の全方位映像をマッチングすることで、より正確なモデルの再構築が可能となる。このように、映像上に射影された 2次元画像と、建物の 3次元モデルとが正しく対応付けられていれば、建物正面だけでなく側面などのテクスチャも取得可能である。本手法により構築した 3次元都市の例を図 8, 図 9 に示す。全方位カメラ映像から 3次元情報が得られた結果、建物側面のテクスチャが正しく取得できていることが確認できる。

### 3.4 交通状況の視覚化<sup>28)</sup>

以上により得られる幾何情報付きの IBR システムの応用として、ITS (高度交通システム) の一環としてのドライバーに対する安全運転支援のために、道路や周辺車両の状況をドライバーに視覚的に提供するシステムを開発した。まず前節まで述べたような手法で仮想



図8 奥行き情報を利用した3次元都市  
Fig. 8 Virtual city map.

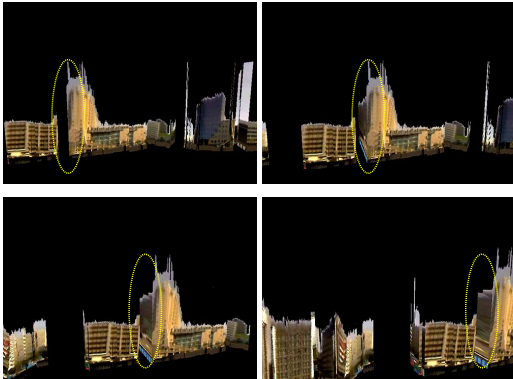


図9 獲得できた側面の例  
Fig. 9 Example of side view image.



図10 ITS安全支援システム  
Fig. 10 Enhanced navigation system.

都市空間を生成する。さらにこのシステムは、路側に設置されている視覚センサから得られた映像をもとに、各車両の位置を追跡し、車両の移動軌跡を得る。この軌跡に基づき仮想都市空間内に車のモデルを走らせる。このシステムは、時々刻々と変化する道路状況を仮想空間の中に再現し、実時間でドライバに提示する。建物形状や車両軌跡などの幾何情報を持っているため、ドライバは任意視点からの仮想都市空間の映像を見ることが可能である。図10に鳥瞰図を選択した場合のシステムの表示例を示す。

### 3.5 手法の検討

本章ではオムニ画像を用いた時空間解析手法について述べた。特にオムニ画像に特殊な変換を施すことなく、パノラマ画像や奥行き情報の獲得が可能となる

EPIに類似した切断面を得る手法を示した。その結果、オムニ画像から3次元情報に基づいたテクスチャ画像の獲得が可能となり3次元都市を半自動的に構築することが可能となった。さらに、実際のアプリケーションとしてITSにおける安全支援システムを紹介した。

ここまで検討してきた仮想都市空間生成法は、すべてのデータを一気に取得する。このため景観の変更のためにはすべてのデータを撮り直す必要がある。一方、都市空間では新しい建物の建築後の画像といったようにそのすべての景観が変化するのではなく、部分情報の更新だけでよい場合もある。こういった場合、既存のデータの上に新しいデータを重ね合わせる方が効率が良い。

一部修正のためには、新しい建物の位置が正確であるという幾何学的整合性が必要なのは自明である。ただし、これまでの研究よりこの幾何学的整合性だけでは不十分で、影などが正しく表示されるための光学的整合性が人間の視覚のためには非常に重要であることが分かっている。次章ではこの光学的整合性を実現するための手法を検討する。ここでも、オムニ画像を利用し都市空間の光源環境を直接測定し、新しい建物を背景画像に重ね込む。

## 4. オムニ画像を利用した都市空間光源環境測定法<sup>29)</sup>

本章では、複合仮想都市画像生成のため、全方位画像により光源方向を推定する手法について述べる。まず、全方位カメラのペアを用意し、全方位画像ステレオを構成する。これは、撮影場所に不変な光源環境を得るためである。これにより3次元空間における光源輝度分布を生成する。次に、この光源輝度分布を利用して任意の場所での仮想物体表面の陰影や仮想物体が実物体へ投げる影の強さを計算する。

### 4.1 輝度分布マップの生成

全方位ステレオにより生成された3次元空間のうえに輝度情報を付加する。現実空間において、大部分の光は蛍光灯や窓といった直接光源からの光であり、残りの部分は壁や天井からの反射などの間接光源からの光である。そのため、直接光源からの光による影響が大きいために、これら直接光源の3次元位置を正確に求める必要がある。幸いなことに、蛍光灯や窓といった直接光源は、先の全方位画像上で際立った特徴点として観察されるのが普通である。そこでまず、全方位画像中のこれらの特徴点の2次元位置を特徴点抽出オペレータを利用して求める。各特徴点を求めた後、通常のステレオ法と同様に対応する特徴点の組を求める。

画像の各点の空間への視線は魚眼レンズの特性から分かるので、求められた特徴点の組を用いて直接光源の3次元位置が三角測量の原理で決定される。

間接光源からの光の影響は、直接光源からの光からの影響に比べて比較的小さいが、現実物体と仮想物体の間の光学的整合性を正確に実現しようとする、間接光源についても光源輝度分布を表現する必要がある。間接光源は各部分の輝度自体はそれほど大きくないが、面光源としての寄与は大きい。大部分の間接光源は乱反射面によるものが多い。こういった乱反射による面光源はその実際の位置には無関係に、光を受ける点から見た場合の光源の空間角が重要になる。

間接光源も光源構造に含めるため、先の特徴点を利用して空間メッシュを生成する。まず、2次元画像上で対応のとれた特徴点のみを利用して2次元のメッシュ構造をドローン三角メッシュ法で生成する。次に、各頂点の3次元座標を利用して、これを3次元メッシュとする。生成された3次元構造は細部においては実際と多少異なっているものの、壁や天井といった間接照明がなす空間角を近似する構造となっている。このようにして3次元構造を得た後、間接照明の輝度を計算するため、対応する2次元メッシュ内の明るさ(照度)を3次元メッシュ上に輝度に変換しながら貼り付ける。これにより、光源構造を表すメッシュが得られる。このようにして求められた現実空間における光源輝度分布を表現するメッシュ構造を輝度分布マップと呼ぶ。

#### 4.2 ソフトシャドウの生成

仮想物体を現実画像に重ね合わせるためには、求められた輝度分布マップを利用して、仮想物体表面上の各点での照度分布を求める。実画像中の仮想物体が投げた影に関しては、まず仮想物体の形状を考慮してどの程度実物体表面上の照度が変化するかを計算する。この値を用いて実画像の輝度を減少させ、仮想物体の周辺に影を生成させる。仮想物体はつねにカメラの実物体の間に存在し、仮想物体が存在する周辺の実環境(たとえば道路平面)の3次元形状も分かるものとした。

まず、カメラ投影中心から入力画像の各画素を通して実空間に伸びる視線を定義し、この視線が仮想物体と交差するか否かを調べる。もし仮想物体と交差すれば、物体表面上点となる。視線が仮想物体と交差しなかった場合には、仮想物体から現実物体表面に落とされる影を計算することになる。まず、既知の実物体の3次元形状より交差点の3次元座標を計算する。次に、この点において仮想物体が存在しないとした場合のこの点の照度  $E_1$  を先の輝度分布マップを利用して計

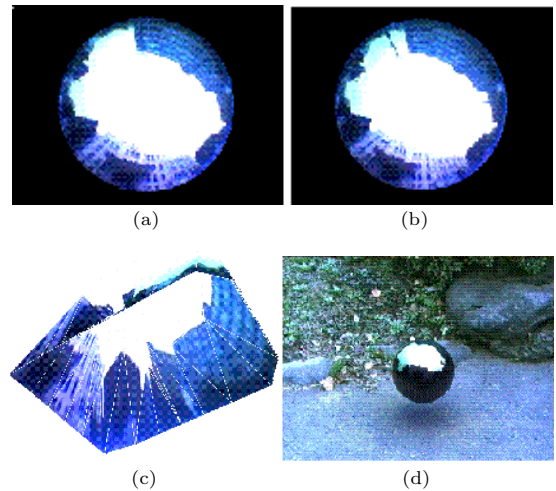


図 11 実光源輝度分布の推定

Fig. 11 Image synthesis based on real illumination distribution.

算する。さらに、仮想物体が存在する場合にどの程度の光が隠蔽されるかということ considering 部分照度  $E_2$  を計算する。

$$E_1 = \sum_{i=1}^N (2\pi/N) L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (4)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^N (2\pi/N) S_i L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (5)$$

ここに  $S_i = 0$  は仮想物体が光源  $L(\theta_i, \phi_i)$  を隠蔽した場合、 $S_i = 1$  はそうでない場合である。

現実画像の画素値にこの照度の比  $E_2/E_1$  を掛け合わせるにより、実画像上の点の輝度を減少させる。この操作を仮想物体の周辺の各画素で繰り返し、仮想物体から落とされる影を生成する。

#### 4.3 合成画像の生成

本手法を実画像に適用した例を図 11 に示す。図 11 (a), (b) は現実の都市空間において、全方位カメラで情景を上向きに撮影した2枚の全方位画像である。ここで、輝度の高い部分として空が見てとれる。これらの2枚の画像から本章で述べた手法により、光源輝度マップを求めた結果が (c) に示されている。最終的に、求められた光源輝度マップを用いて、合成画像 (d) を得た。同様の手法を実際の公園の画像に適用したものが、図 12 である。図 12 (a) は入力画像、図 12 (b) は、合成結果である。仮想物体表面の陰影が生成され、仮想建物から実地上面に自然な影が落とされている様子が分かる。



(a)



(b)

図 12 実光源輝度分布に基づく公園画像合成

Fig. 12 Synthesized image of virtual building in real scene.

## 5. む す び

本論文では、全方位画像を利用した都市空間作成の手法について、現在までの当研究室での開発例を紹介した。イメージベース法によるもの、イメージベース法と幾何情報を組み合わせる手法、さらにこれらの画像と新しい建物像を組み合わせるための全方位画像による光源環境推定法である。これらの手法において、全方位画像を利用することで、画像のサンプリングの効率化が図れ、各種の利点があることが分かった。

今後の課題としては、全方位画像を利用する際につねに問題となる低解像度をソフト、ハードの両面から改善することや、イメージベース法で必要となる膨大な画像データを圧縮することなどがあげられる。また、周囲の環境を一度に取得できるという全方位画像の光学的特性を生かすには、ダイナミックレンジの改善も重要な課題であろう。

今後はこれらの課題を克服し、モデルベース、イメージベース両手法の利点を取り入れながら、大規模

な都市空間を、計算機内に光学的、空間的、時間的整合性を保ちつつ構築する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Kamei, K., Hoy, W., Tamada, T. and Seo, K.: Modeling of urban scenes by aerial photographs and simply reconstructed buildings, *MVA*, pp.224–227 (Nov. 1998).
- 2) Ogawa, Y., Iwamura, K. and Kakumoto, S.: A map-based approach for extracting object information from aerial images, *MVA*, pp.220–223 (Nov. 1998).
- 3) 納富幹人, 小澤史朗, 全 炳東: 移動体観測による都市モデルの構築, 電子情報通信学会論文誌, J81-D-II, pp.872–879 (May 1998).
- 4) Zhao, H. and Shibasaki, R.: Reconstruction textured urban 3d model by fusing ground-based laser range image and ccd image, *MVA*, pp.232–237 (Nov. 1998).
- 5) Debevec, P.E., Taylor, C.J. and Malik, J.: Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry-and image-based approach, *Proc. ACM SIGGRAPH 96*, pp.189–198 (1996).
- 6) Li, S.: Localization along routes based upon panoramic view and GPS in large-scaled outdoor environments, *4th Asian Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp.11–16 (2000).
- 7) Sato, Y., Wheeler, M. and Ikeuchi, K.: Object Shape and Reflectance Modeling from Observation, *Proc. ACM SIGGRAPH 97*, pp.379–387 (1997).
- 8) Lippman, A.: Movie-Maps. An Application of the Optical Videodisc to Computer Graphics, *Proc. ACM SIGGRAPH '80*, pp.32–43 (1990).
- 9) Chen, S.E.: QuickTime VR—An image-based approach to virtual environment navigation, *Proc. ACM SIGGRAPH '95*, pp.29–38 (1995).
- 10) 加藤浩仁, 石黒 浩, マシューパース: Town Digitizing—全方位カメラと GPS による実時間モデリング, 情報処理学会研究報告, CVIM-125, pp.111–118 (2001).
- 11) Onoue, Y., Yamasawa, K., Takemura, H. and Yokoya, N.: Telepresence by real-time view-dependent image generation from omnidirectional video streams. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.71, No.2, pp.154–165 (1998).
- 12) Yagi, Y. and Kawato, S.: Panorama scene analysis with conic projection, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.181–187 (July 1990).
- 13) Yamasawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: New



- real-time omnidirectional image sensor with hyperboloidal mirror, *Proc. 8th Scandinavian Conf. on Image Analysis*, pp.1381–1387 (May 1993).
- 14) Zheng, J.Y. and Tsuji, S.: Panoramic representation of scenes for route understanding, *International Conference on Pattern Recognition*, pp.161–167 (June 1990).
  - 15) Nayar, S.K.: Omnidirectional Video Camera, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition '97*, pp.482–488 (1997).
  - 16) Hirose, M. and Takaaki, E.: Building a Virtual World from the Real World, *Proc. International Symposium on Mixed Reality*, pp.183–197 (Mar. 1999).
  - 17) Adelson, E.H. and Bergen, J.: The Plenoptic function and the elements of early vision, *Computational Models of Visual Processing*, pp.3–20, MIT Press, Cambridge, MA (1991).
  - 18) Naemura, T., et al.: Ray-Based Creation of Photo-Realistic Virtual World, *Virtual Reality and MultiMedia (VSMM'97)*, pp.59–68 (1997).
  - 19) Levoy, M. and Hanrahan, P.: Light field rendering, *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, pp.31–42 (1996).
  - 20) Gortner, S.J., Grzeszczuk, R., Szeliski, R. and Cohon, M.F.: The lumigraph, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.43–54 (1996).
  - 21) Shum, H.-Y. and He, L.-W.: Rendering with Concentric Mosaics, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.299–306 (1999).
  - 22) 山本正信: 連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出, *信学論(D)*, Vol.J-6 9, No.11, pp.1631–1638 (1986).
  - 23) Bolles, R., Baker, H. and Marimont, D.: Epipolar plane image analysis: An approach to determining structure from motion, *Int. J. Computer Vision*, Vol.1, pp.7–55 (1987).
  - 24) Takahashi, T., Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Arbitrary View Position and Direction Rendering for Large-Scale Scenes, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf.* (2000).
  - 25) Takahashi, T., Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Expanding Possible view point of Virtual Environment Using Panoramic Images, *Proc. IAPR 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2000)*, Barcelona, Spain (Sep. 2000).
  - 26) Takahashi, T., Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Virtual Driving System with Real-World Image, *7th World Congress on Intelligent Transport Systems* (2000).
  - 27) Kawasaki, H., Yatabe, T., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Construction of a 3d city map using epi analysis and dp matching, *Asian Conference on Computer Vision 2000* (2000).
  - 28) Kawasaki, H., Murao, M., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Enhanced navigation system with real images and real-time information, *8th World Congress on Intelligent Transport Systems* (2001).
  - 29) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.5, No.1, pp.1–12 (1999).

(平成 13 年 7 月 30 日受付)

(平成 13 年 9 月 12 日採録)

(担当編集委員 八木 康史)



池内 克史 (正会員)

1973 年京都大学工学部機械工学科卒業。1978 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。MIT 人工知能研究所、電総研を経て 1986 年 CMU 計算機科学科およびロボティクス学科研究教授 (Principle Research Scientist)。1996 年より東京大学生産技術研究所教授。人間の視覚機能、明るさ解析、物体認識、人間による組み立て作業の自動認識等の研究に従事。論文賞 (ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, ロボット学会誌-97, IEEE R&A 誌-98, 平成 11 年度日本パーソナルリアリティ学会論文誌) 等受賞。人工知能学会、日本ロボット学会、日本パーソナルリアリティ学会、OSA, IEEE 各会員 (Fellow)。



坂内 正夫 (正会員)

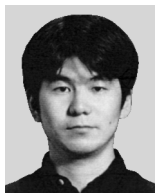
1975 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年東京大学工学部電気工学科専任講師、その後、横浜国立大学工学部情報工学科助教授を経て、現在、同大学生産技術研究所教授。1998 年より同大学生産技術研究所所長。マルチメディアデータベース等の研究に従事。工学博士。



川崎 洋 (学生会員)

1994年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。現在、同大学院博士課程在学中。主として画像処理、3次元モデリング、CGに関する研究に従事。

元モデリング、CGに関する研究に従事。



高橋 拓二

1999年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2001年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。現在、東京ガス勤務。主として画像処理、イメージベース

トレンダリングに関する研究に従事。



村尾 真洋

1999年広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科卒業。2001年東京大学大学院新領域・環境学専攻修了。現在、新日鉄ソリューションズ(株)勤務。主として空間情報

解析、ITSに関する研究に従事。



佐藤いまり (正会員)

1994年慶應義塾大学総合政策学部卒業。1992年8月～1993年8月CMU, Center for Machine Translation, Research Assistant, 1994

～1996年CMU, The Robotics Institute, Visiting Scholar。1997年より東京大学生産技術研究所にてコンピュータビジョン、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。東京大学大学院学際情報学府修士課程に在学中。



甲斐 郁代

1992年佐賀大学理工学部情報科学卒業。1992年4月～1994年10月積水化学工業(株)京都技術センターFA技術推進センターにて工場

の生産ラインの運用シミュレーションおよび生産システムの開発。1994年11月～1996年3月同社京都技術センター技術企画室にてマネージャ向けの技術情報管理システム・技術情報収集システムの開発。1996年4月～1998年3月同社京都技術センターCAE研究室にて、設計システムの開発に従事。1998年より同社京都研究所CAEグループにて、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。