

任意形状物体をハンディカメラで撮影した画像列からの 実光源環境の推定

井口 博史[†] 斎藤 英雄[†]

[†]慶應義塾大学大学院理工学研究科

本稿では、形状が未知な物体を撮影した画像列から光源環境を推定する手法を提案する。従来手法として、形状が既知な参照物体が落とす影の画像中での輝度値を解析して推定を行うものがあるが、事前に物体の情報が必要であるため複雑な形状の物体を使用できず、適用できる環境が制限される。本手法では、1台のハンディカメラで任意形状物体を撮影し、物体の特徴点を因子分解法を用いることで3次元復元することにより、光源からの光が物体によって遮蔽される領域を推定することで、事前に物体の形状情報を知ることなく光源環境を推定する。本手法によって光源環境を推定できることを実験によって示す。

Estimation of Illumination Distribution from Image Sequences of Arbitrary Shape Objects taken with a Handy Video Camera

Hiroshi IGUCHI[†] and Hideo SAITO[†]

[†]Graduate School of Science and Technology, Keio University

In this paper, we propose a method for estimating the illumination distribution of a scene from image sequences of any arbitrary object in the scene. For estimating the illumination distribution of a scene, a method employing pixel values inside shadows cast by an object of known shape onto another object surface has been proposed. The method, however, requires the shape and size of the object, so it cannot be applied in wide field. In our method, first, we take an arbitrary object with a handheld camera and 3D reconstruct feature points of the object by factorization. Then, we estimate occluded areas of rays from light sources. As a result, we estimate the illumination distribution without the object of known shape. Experimental results show that our method can estimate the illumination distribution of a scene.

1. はじめに

仮想世界の像(仮想物体)と実世界の像(実画像)とを融合させる複合現実感(AR)は、現実世界へ付加情報を与えることができる技術として近年注目を集めている[1][2]。また、複合現実感(AR)は、すべてコンピュータグラフィックスで構成される仮想現実感に対し、合成画像の一部に実画像を利用するため、より現実感の高い画像が生成できるという点においても、様々な分野でその応用に期待が高まっている[3]。

この複合現実感において、現実と仮想の両世界を違和感なく融合させるためには、現実、仮想の両世界の間に以下の3つの整合性を実現させることが重要である。

1. 正しい位置合わせのための幾何学的整合性
2. 違和感ない陰影を実現するための光学的整合性
3. 動きを一致させるための時間的整合性

幾何学的整合性、時間的整合性に関しては画像中のマーカや特徴点を利用した手法や、磁気センサやジャイロなどを用いた手法などが提案され、カメラの位

置・姿勢をリアルタイムで計測し、仮想物体を重畳表示するなど様々な手法が提案されてきている[1][4][5]。

一方、光学的整合性の実現に関する主な手法としては、Debevecによる鏡面球における反射光を測定する手法[6]や、佐藤らによる魚眼レンズで撮影したステレオ全方位画像を用いて3次元光源分布を計測する手法[7]などがある。しかしながら、これらの手法は鏡面球や、魚眼カメラという特殊なデバイスを必要としており、機材を持ち込むことが不可能な場合には適用できないという欠点があった。

それらに対して、佐藤らは既知の形状を持った物体が床に落とす影を利用して光源環境を推定する手法[8]を提案している。この手法は、特殊な撮影機材を必要とせず、通常のビデオカメラを用いて撮影された画像を基に光源環境を安定に推定することができる優れた手法である。

しかしながら、この手法では形状が既知な参照物体を利用しているため、事前に参照物体の形状・大きさなどの情報が必要となりそのような情報が得られないような場合においては適用することができない。

そこで、本稿では実環境中に存在する任意の物体を撮影した画像からその環境中の光源環境を推定する手法を提案する。本手法では、実世界の光源環境を多様な放射強度をもつ多数の点光源の集合と近似しておく。そして、1台のハンディカメラを滑らかに動かしながら任意形状の物体を撮影した画像列から、因子分解法[9]により参照物体の一部を3次元特徴点群として復元し、その結果を基に光源と物体との間の遮蔽関係を推定してから佐藤らの手法[8]を利用することで光源環境を推定する。

最後に本稿の構成について述べる。まず、2章で物体が落とす影を利用した光源環境推定の原理について述べ、3章では形状が未知な物体で実現するための提案手法について述べる。そして、実験結果を4章で示し、5章で結ぶ。

2. 影を利用した光源環境推定

環境中の光源環境を多数のサンプリング方向の点光源の集合と近似することで、観測点 \mathbf{x} における画像中の輝度値 $I(\mathbf{x})$ は以下のように表せる。

$$I(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \rho L_{P_i} S(\mathbf{x}, P_i) \cos \theta_i \quad (1)$$

ここで、 ρ はBRDFであり、 L_{P_i} は、点光源 P_i のもつ光源輝度である。 $S(\mathbf{x}, P_i)$ は、点光源 P_i が観測点 \mathbf{x} を照らしているかどうかを表す遮蔽係数であり、光源からの光線が物体により遮蔽される場合は0、遮蔽されない場合は1となる。また、 $\cos \theta_i$ は点 \mathbf{x} から光源 P_i を見た方向ベクトルと点 \mathbf{x} における法線ベクトルがなす角の余弦である。

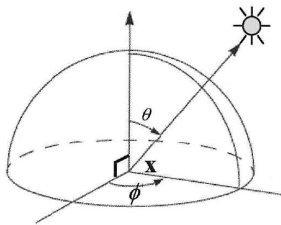


図1 光源のサンプリング

以上のことから、M個の観測点について対応する画像の輝度値を調べれば、以下のような連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} I(\mathbf{x}_1) \\ I(\mathbf{x}_2) \\ \vdots \\ I(\mathbf{x}_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \cdots & K_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{P_1} \\ L_{P_2} \\ \vdots \\ L_{P_N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、係数 K_{mn} は、 $\rho S(\mathbf{x}_m, P_n) \cos \theta_n$ を表す。 $S(\mathbf{x}_m, P_n)$ 、 $\cos \theta_n$ は、光源、遮蔽物体、観測点との間の幾何学的な情報がわかっているならば、計算することができる。また、 ρ もあらかじめ与えられているとすれば、 L_{P_i} が未知なとき、十分な数の画素($M \geq N$)を選定することにより、(2)式を L_{P_i} について解くことができる。このようにして、未知数であるN個の光源輝度値 L_{P_i} を推定することにより、実環境における光源輝度分布をNサンプリング方向の光源輝度として近似することができる。

3. 提案手法

本章では、形状が未知である物体によって生じる影を利用することで光源環境を推定する手法について述べる。

本手法の全体の流れを図2に示す。入力画像はフリーハンドカメラで形状・大きさの情報が未知である物体の周りを1/4~1/3周ほど撮影した画像列とする。また、物体は平面上に立っているとする。本手法では、まず入力画像列に対して特徴点の追跡を行い、因子分解法[9]を用いることで物体の一部を3次元特徴点群として復元し、その結果とあらかじめ仮定しておいた光源分布との位置関係から光源と物体との間の遮蔽関係を推定する。最後に推定した遮蔽関係を用いて(2)式を立て、未知である光源輝度値について解くことで光源輝度分布を得る。以下に各処理の詳細を述べる。

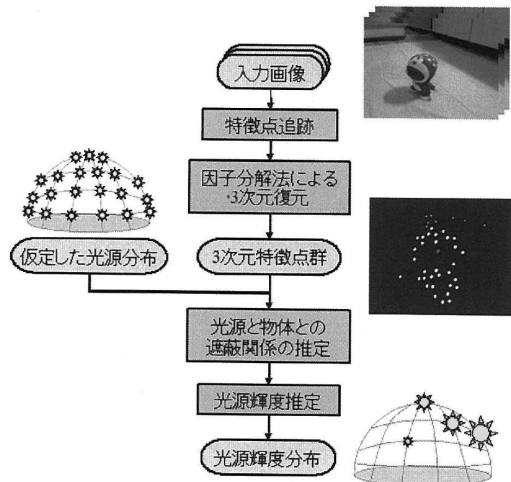


図2 処理の流れ

3.1 特徴点追跡と3次元復元

前述のとおり入力画像列において特徴点を検出し、全フレームにわたって追跡を行い、因子分解法[9]を用いて特徴点の3次元復元を行う。因子分解法とは、ビデオ画像上で追跡した特徴点の軌跡からシーンの3次元形状とカメラ運動を復元する手法である。この手法において、より正しく復元するためには、追跡した特徴点軌跡が正しく、また途中で途切れていないことが必要である。

特徴点の検出には、KLT Feature Tracker[10]を用いた。KLT Feature Trackerとは画像中の明度変化の大きい点を検出し、追跡する手法であるため、物体と背景の境目や、物体のテクスチャ変化のある部分で特徴点を検出されやすい。そのため、任意形状物体の外形を得やすい。しかしながら、KLT Feature Trackerのみでは、同じ特徴点を最初から最後まで見失わずに、また誤対応を起こすことなく追跡し続けることは難しい。そこで、本手法ではKLT Feature Trackerで追跡に失敗した特徴点のみ手動で修正を加えることで、初期フレームで検出された特徴点を最終フレームまでもれなく追跡する。

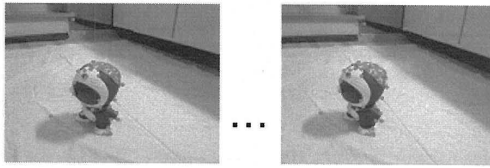


図3 特徴点追跡

このようにして追跡した特徴点の軌跡を入力として因子分解法を用いることで特徴点の3次元復元を行う。

以上により、シーンに存在する特徴点の3次元座標を得ることができる。しかしながら、物体が床に落ちず影を利用して光源推定を行うためには、物体が立っている床を推定する必要がある。そこで、画像中で床上にある特徴点を3点以上選択しておき、それらの3次元特徴点に最小二乗法により平面をフィッティングすることで3次元空間中の床とみなす。また、このとき基準となる座標系を推定した床上に設定しておく。

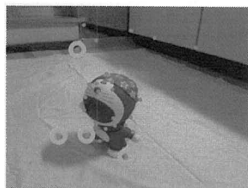


図4 床上の点の選択

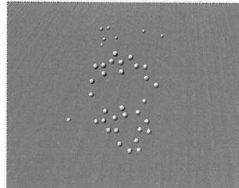


図5 3次元復元結果

3.2 光源と物体との遮蔽関係の推定

空間中の光源環境を図6のように空間的にサンプリングされた各方向からの光源の集合と仮定する。仮定した各光源方向から3.1章で得られた3次元特徴点群のうち参照物体上の特徴点群のみへと直線を伸ばし、床面との交点をすべて算出する。それらの点は、各光源からの光が物体によって遮られる点とみなすことができる。次に、図7に示すように各光源から床に投影された点に対して、ドローネー網[11]を生成する。

生成されたドローネー網の内部の領域を、その光源からの光が遮蔽されている領域とみなすことで、形状・大きさが未知な物体が床に落ちず影となり得る領域を推定する。

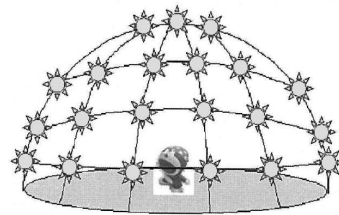


図6 仮定した光源分布の例

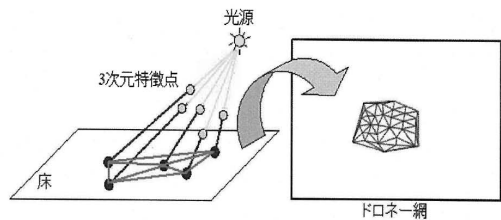


図7 光源からの光が遮蔽される領域の推定

3.3 光源輝度推定

本章では、3.2章で推定した光源と物体との間の遮蔽関係を利用し、実際に画像中の画素の輝度値をサンプリングすることで仮定した光源分布の各光源輝度値を推定する。実際に輝度値をサンプリングする画像は、入力画像中の初期フレームの画像を用いる。サンプリングする画素位置は、3.2章で算出した特徴点を通る光線と床との交点を画像に再投影したときの画素位置とする。しかしながら、それらの交点をそのまま画像中に投影してしまうと、参照物体上や、床以外の領域にも投影されてしまうので、図8のように画像を領域分割して領域を限定してから投影する。

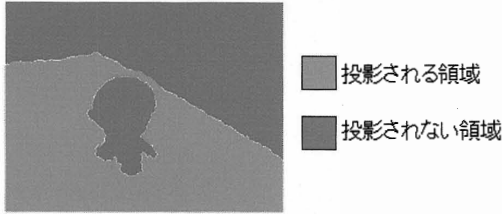


図 8 領域分割による投影される領域の限定

投影された点における輝度値を(2)式の左辺とし、その点が 3.2 章で生成した各光源によるドロネー網の内部か否かを判定することで、遮蔽係数 $S(\mathbf{x}_m, P_n)$ を決定し、係数 K_{mm} を算出することができる。これにより、(2)式を未知数 L_{P_i} について解くことができ、環境中の光源輝度分布を得ることができる。なお、本手法においては、光源輝度 L_{P_i} の R,G,B の 3 バンドを各色について独立に推定する。



図 9 投影された点の例

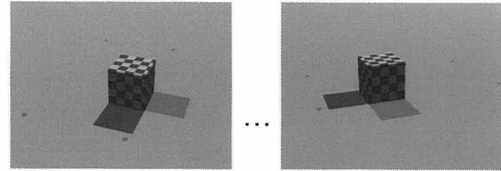
4. 実験と結果

本手法の有用性を示すために、CG で作成した画像列と、実環境中の任意形状物体を撮影した画像列の 2 つの場合に対して本手法を適用し光源環境を推定した。

4.1 CG 画像列での実験

実験に使用した入力画像列を図 10 に示す。今回の実験では、特徴点を取りやすいようチェッカーパターンの立方体を参照物体とし、床面は白色で完全 Lambertian 面とした。また、光源として強度が 2:1 の白色光源を 2 個設置した。

本手法により推定した床面上の原点を中心とした半球状に図 11 のように光源が分布していると仮定して、サンプリング間隔を変化させながら推定を行った。本手法により推定された光源輝度分布を同じ CG 物体の周りに設置し直した結果を、仮定した光源数と共に図 12 に示す。



(a) 第 1 フレームの画像 (b) 最終フレームの画像

図 10 入力画像列

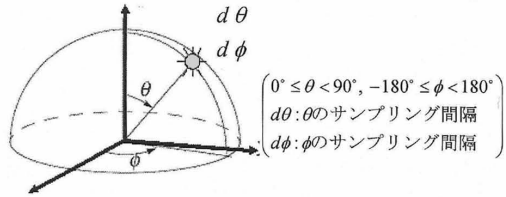
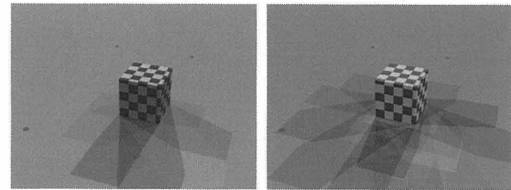
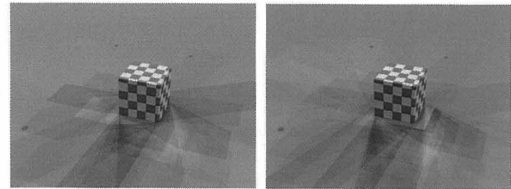


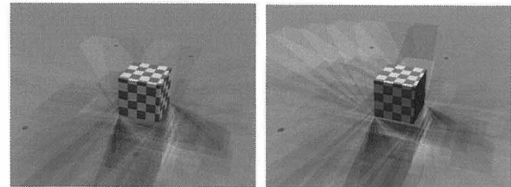
図 11 仮定した光源分布



(a) 光源数 9($d\theta = 45^\circ, d\phi = 45^\circ$) (b) 光源数 25($d\theta = 30^\circ, d\phi = 30^\circ$)



(c) 光源数 61($d\theta = 15^\circ, d\phi = 30^\circ$) (d) 光源数 121($d\theta = 15^\circ, d\phi = 15^\circ$)



(e) 光源数 181($d\theta = 15^\circ, d\phi = 10^\circ$) (f) 光源数 289($d\theta = 10^\circ, d\phi = 10^\circ$)

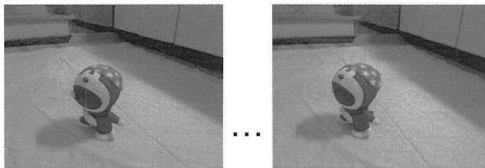
図 12 推定した光源輝度分布を基に生成した CG 画像

図 12 の結果を見てみると、仮定する光源数が多くなるにつれ、物体が床に落とす影の濃い部分と薄い部分とがはっきりと区別できるようになってきており、影の位置や形が収束してきていることがわかる。その影の領域は光源数が多くなるにつれ、入力画像(図 10(a))のような 2 つの領域へと近づいていることがわかる。非常に大まかではあるが、本手法により光源環境を推定することができたことが確認できる。入力画

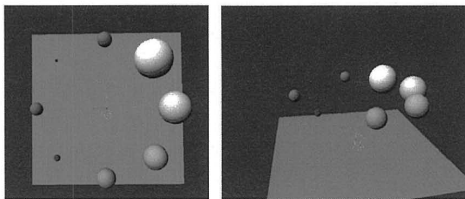
像(図 10(a))に比べると影の伸びる方向や長さが若干異なっているが、この原因は、本手法によって推定した 3 次元空間中における光源分布を、CG の空間中へと座標変換をする際に生じる誤差が大きいことが考えられる。

4.2 実画像列での実験

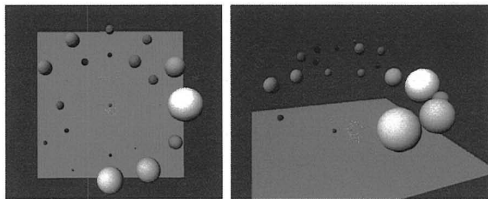
実験に使用した入力画像列を図 13 に示す。今回の実験では、床面に白い布を敷き、完全 Lambertian 面と仮定して行った。CG のときと同様に、仮定する光源数を変化させながら推定を行った。推定結果を 3 次元モデルで表したものを図 14 に示す。図 14 の球体の位置は仮定した光源方向を示し、色と大きさは、光源の色と強さをそれぞれ表わしている。



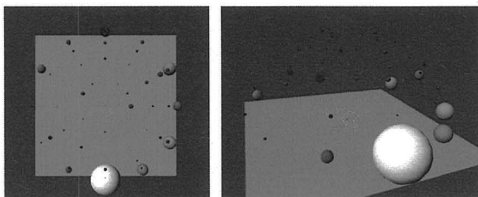
(a) 第 1 フレームの画像 (b) 最終フレームの画像
図 13 入力画像列



(a) 光源数 9 ($d\theta = 45^\circ, d\phi = 45^\circ$)



(b) 光源数 25 ($d\theta = 30^\circ, d\phi = 30^\circ$)

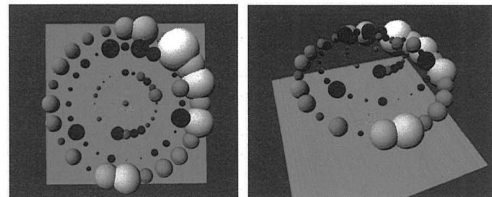


(b) 光源数 61 ($d\theta = 15^\circ, d\phi = 30^\circ$)

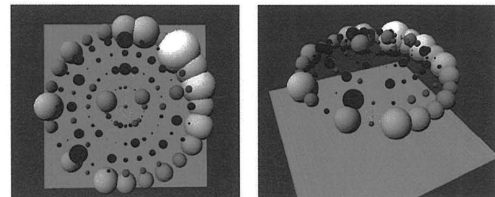
図 14 推定した光源輝度分布 ($0^\circ \leq \theta < 90^\circ, -180^\circ \leq \phi < 180^\circ$)

図 14 の結果を見てみると光源数を増やすに従って、大きい輝度値が現れる方向が手前側へと変化してしまい安定していない。特にサンプリング角度 θ が大きくなるにつれ(低い位置に仮定した光源が現れるにつれ)、その傾向が見られる。これは、低い位置や手前側にある光源からの光が物体によって遮蔽される領域が、図 8 に示した「投影される範囲」内にほとんど存在していないことが原因と考えられる。これはつまり、推定のためにサンプリングされるほとんどの画素位置において(2)式の係数 K の値が 0 にならないことを示すため、(2)式の解が非常に不安定になってしまうからである。

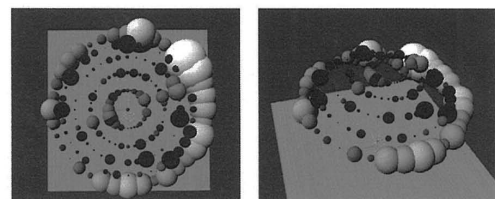
以上のことを踏まえて、仮定する光源分布を $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ, -180^\circ \leq \phi < 180^\circ$ の範囲に限定した上で光源数を変化させ推定を行った。推定結果を図 15 に示す。また、推定された光源輝度分布の中で上位 3%以上の輝度値をもつ光源によって投影される点を示した画像を図 16 に示す。



(a) 光源数 73 ($d\theta = 15^\circ, d\phi = 15^\circ$)



(b) 光源数 121 ($d\theta = 9^\circ, d\phi = 15^\circ$)



(c) 光源数 181 ($d\theta = 9^\circ, d\phi = 10^\circ$)

図 15 推定した光源輝度分布 ($0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ, -180^\circ \leq \phi < 180^\circ$)



(a) 光源数 73

(b) 光源数 121

(c) 光源数 181

図 16 大きい輝度値が得られた光源によって画像中に投影される点(その光源によってできる影となり得る点)

仮定する光源分布の範囲を限定したことにより、光源数を増やしても大きい輝度値が現れる方向が安定したことがわかる。また、図 16 に示すように、大きい輝度値をもつ光源によって投影される点が物体の落とす影の位置付近にいずれも存在していることがわかる。このことにより、本手法によって任意形状物体が床に落とす影となり得る位置を概ね正しく推定できていることがわかる。

5. おわりに

本稿では、任意形状物体を 1 台のハンディカメラで撮影した画像列から光源環境を推定する手法を提案した。具体的には、因子分解法により形状が未知な物体の大まかな形を推定し、光源との位置関係を利用して物体が落とす影となり得る領域を推定することで光源輝度分布の推定を行った。CG 画像列と実環境を撮影した画像列に対して本手法を適用することで、事前に参照物体の形状がわかっていなくても光源環境が推定可能であることを示した。

今後は、実環境を撮影した画像中に仮想物体を重畳し、本手法により推定した光源環境を用いることで違和感のない影付けが実現できるかどうかを確認し、さらなる精度の向上に努めたい。また、テクスチャのある床面においても推定ができるように本手法を拡張する予定である。

参考文献

- [1] Azuma, Ronald T “A Survey of Augmented Reality”. In Presence:Teleoperators and Virtual Environments, Vol.6, No.4, pp.355-385, 1997.
- [2] H.Tamura et al. “Mixed reality:Feature dreams seen at the border between real and virtual worlds”. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol21, No.6, pp.64-70, 2001.
- [3] Hiroyuki Yamamoto “Case studies of producing mixed reality worlds”. Carnegie Mellon University IEEE SMC’99, vol.6, pp.42-47, 1999.
- [4] 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行 “複合現実感における位置合わせ手法”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.8 no.2, pp.171-180, 2003.
- [5] Andrei State, Gentaro Hirota, David T. Chen, William F. Garrett, Mark A.Livingston “Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking”. Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996, pp.429-438, August 1996.
- [6] Paul Debevec “Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and imagebased graphics with global illumination and high dynamic range photography”. Proc. ACM SIGGRAPH 98, pp.189-198, 1998.
- [7] Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi “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.
- [8] Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi “Illumination from shadows”. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, No.3, pp.290-300, 2003.
- [9] 金谷健一, 菅谷保之 “因子分解法の完全レシピ”. 電子情報通信学会技術報告 PRMU2003-118(2003-10), pp.19-24, 2003.
- [10] Carlo Tomasi, and Takeo Kanade “Detection and Tracking of Point Features”. Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132, 1991.
- [11] M. de Berg, et al. “Computational Geometry: Algorithm and Applications”. Springer, 2000.