

全方位画像列からの特徴点および直線エッジ情報を併用した Structure from Motion による 3 次元環境モデル生成

非会員 川西 亮輔* 正員 山下 淳**
非会員 金子 透**

Three-dimensional Environment Modeling Based on Structure From Motion
with Feature Point and Edge Information in Omnidirectional Image Sequence

Ryosuke Kawanishi*, Non-member, Atsushi Yamashita**, Member, Toru Kaneko**, Non-member

Map information is important for path planning and self-localization when mobile robots execute autonomous tasks. In an unknown environment, mobile robots should measure the environment and construct its map by themselves. Then, we propose a modeling method of 3D environment. To realize wide-ranging environment measurement, we use an omnidirectional camera. We can measure environments efficiently by using the camera, because it has a 360-degree horizontal field of view. Our proposed method is based on structure from motion. A measurement method using feature points is effective in an environment including textured objects. Conversely, if environments mostly have non-textured objects, it is difficult to estimate camera movement and construct its environment model precisely. However, non-textured objects often have straight-line edges. Edge information is available for modeling of environments including non-textured objects. Against complex environments including both textured objects and non-textured objects, we should utilize both feature point and edge information for 3D environment modeling. Our proposed method constructs a 3D environment model by using both feature point and edge information. Experimental results show the effectiveness of our proposed method.

キーワード：直線エッジ情報，Structure from Motion，全方位カメラ，3 次元環境モデル

Keywords: Edge Information, Structure from Motion, Omnidirectional camera, 3D environment model

1. 序 論

移動ロボットが自律的に活動する際に必要不可欠な機能として、目的地へ移動するための経路生成や環境中の自己位置同定などが挙げられる。経路生成や自己位置同定を行うためには、ロボットの周囲に存在する物体の形状や位置を把握できる地図が必要となる。このとき、地図が持つべき情報としては、3次元の幾何学的な情報やテクスチャ情報が考えられる。しかし、ロボットが常に環境の3次元地図を持っているとは限らない。また、自律的に活動するロ

ボットは環境の変化に対応できることが望まれる。したがって、ロボット自身が周囲環境を計測し地図を生成する必要がある。

地図生成にはカメラによって視野内の物体の計測を行うアプローチがある⁽¹⁾。しかし、一般的な視野のカメラを用いてロボットの周囲 360°の計測を行うには非常に多くの撮影回数が必要である⁽²⁾⁽³⁾。

そこで、広い視野を持つ撮像センサを用いることが考えられる。これには魚眼レンズを用いたカメラによる計測⁽⁴⁾や周囲 360°の視野を持つ全方位カメラによる計測⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。ロボットに搭載することを考慮すると、ロボットの前後左右を一度に撮影できる全方位カメラが適している。全方位カメラは広い視野を有するという特徴により周囲環境の計測や認識に有効であることが示されている⁽⁷⁾。

本研究では、Structure from Motion の枠組みで環境計測を行う。Structure from Motion は、1 台のカメラを移動させながら撮影した画像列から、被写体の計測とカメラ運動（カメラの回転行列および並進ベクトル）推定を同時に

* 静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻
〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561
** 静岡大学工学部機械工学科
〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561

行う。我々はすでに全方位カメラを用いた Structure from Motion による環境モデリング手法を提案している⁽⁸⁾。しかし我々の従来研究では、計測結果として得られるのは環境に対して疎な点群であり、ロボットの周囲環境をモデル化するのに十分な情報量とはいえなかった。

我々の従来手法における問題点の1つとして、環境計測のために画像から抽出する特徴が、物体のコーナー点など周囲の輝度変化の大きい点(特徴点)のみであったことが挙げられる。特徴点を用いた計測手法はテクスチャに富んだ環境には非常に有効である。しかし、人間の生活環境をはじめとする多くの環境には人工物が多数存在している。人工物はテクスチャに乏しくかつ直線的なエッジを持つ物体であることが少なくない。

そこで、特徴点だけでなく環境中の直線エッジも同時に利用し、テクスチャの豊富な物体とそうでない物体の両方が含まれる、より一般的な環境に対応した手法を構築する必要がある。エッジを用いた計測の従来研究としては、ステレオカメラを用いることでエッジ上の点を計測し環境中の物体のエッジを密に復元する手法⁽⁹⁾や、画像間の対応エッジを用いた Structure from Motion⁽¹⁰⁾やSLAM⁽¹¹⁾など、数多くの手法が提案されている。その他にも多くの研究者によってエッジ情報を利用することの有効性が示されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかし、これらのエッジを利用した従来研究は、ステレオカメラの狭い共通視野内のエッジしか計測できない⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾、限定的な環境を想定している⁽¹²⁾⁽¹³⁾など、未知環境の広範囲にわたるセンシングには有効な手法ではない。また、エッジが点集合あるいは線分として扱われる⁽⁹⁾⁽¹²⁾、物体の直線エッジの端点が常に見えている必要がある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾などの原因により、利用できるエッジが限られるという問題がある。

そこで我々は、未知環境を1台の全方位カメラで撮影した画像列から、カメラ運動の推定と特徴点および直線エッジの計測を同時に行う手法を提案する。提案手法では直線エッジを、線分や点集合ではなく、無限長の直線として扱う計測原理⁽¹⁵⁾を適用している。そのため、エッジ上の点対応をとる必要がなく、エッジ端点が見えない場合にも計測が可能である。また、オクルージョンによって隠れたエッジの一部や、ある1フレームでのみ観測されたエッジ部分

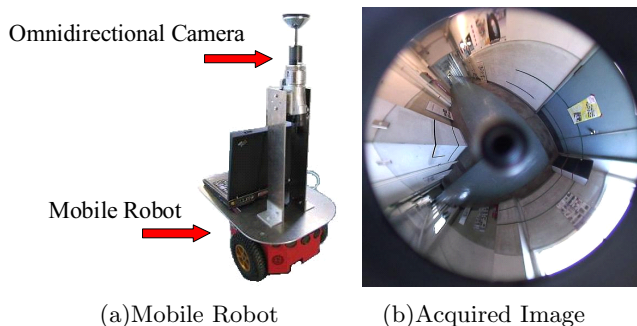


Fig. 1. Omnidirectional Camera

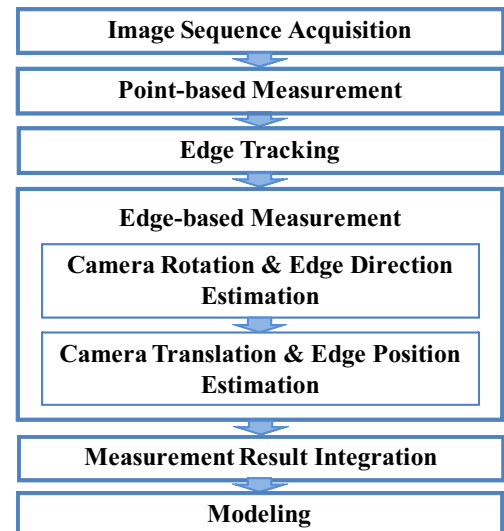


Fig. 2. Process

も復元することができるため、広範囲の複雑環境下の計測に有効である。さらに、特徴点と直線エッジの両方の計測を行うことで、計測対象のテクスチャの多寡に影響されずに環境をモデル化できることを示す。

2. 処理の概要

提案手法では、カメラに双曲面ミラーを取り付けた全方位カメラ(図1(a))を使用する。このカメラで撮影した画像を図1(b)に示す。

提案手法の処理手順(図2)に示す。まず、動画像中から抽出した特徴点の対応関係を用いた計測(点ベースの計測)手法⁽⁸⁾によりカメラ運動を推定する。この推定結果は直線エッジの対応関係を用いた計測(エッジベースの計測)における初期値として利用する。

次に、動画像中から直線エッジを抽出し、追跡を行う。点ベースの計測で得られたカメラ運動を初期値とし、カメラの回転運動と直線エッジの方向、およびカメラの並進運動と直線エッジの位置の関係をそれぞれ最適化するエッジベースの計測を行う。

提案手法では、カメラの回転運動は、3次元空間中の直線エッジの方向と各観測点におけるエッジの見かけの傾きに依存している。カメラ運動や直線エッジの方向と位置の初期値が与えられない場合にも計測は可能だが、提案手法では点ベースの計測を併用して初期値を得ることで、計算コストの大幅な削減を実現している。

最後に、特徴点と直線エッジの計測結果を統合し、統合後の計測結果から環境の多面体モデル(三角網)を構築する。構築された三角網にテクスチャを貼り付けることで、テクスチャ情報を持った3次元環境モデルを生成する。

3. 点ベースの計測

提案手法では、直線エッジの対応関係からカメラ運動を推定する。しかし、直線エッジのみからカメラ運動を推定

する場合に3枚以上の画像が必要なため⁽¹⁵⁾、推定するカメラ運動は11自由度以上となり、計算コストが非常に大きくなる。そこでカメラ運動の初期値を与えることで計算コストを低減する。提案手法では、特徴点の対応情報を用いた点ベースの計測により推定したカメラ運動を初期値として利用する。ここで、 n 観測点間のカメラ運動の同時推定では、あるカメラ位置を基準にしたとき他のカメラの位置ごとに自由度が6あり、さらに Structure from Motion は全体のスケール情報が不定であり1自由度少なくなるため、推定するカメラ運動は $6 \times (n - 1) - 1$ 自由度となる。

3.1 特徴点追跡 画像列中の特徴点の対応関係を得るため、画像から特徴点を抽出し、その後の画像列中で追跡する。本手法では、特徴点追跡には KLT トラッカ⁽¹⁶⁾を用いる。

3.2 光線ベクトルの算出 提案手法では、カメラ先端に双曲面ミラーを取り付けた全方位カメラを用いる。双曲面ミラーを用いた全方位カメラでは、3次元空間中のある1点からカメラのレンズに向かう光線は、双曲面ミラー上で反射している。このとき、3次元点と双曲面ミラー上の反射点を結ぶ直線は、必ず双曲面の焦点を通ることが知られている。そこで、提案手法では画像座標 (u, v) から、双曲面の焦点から3次元点に向かう光線ベクトル $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ を算出する(図3)。

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$s = \frac{a^2 \left(f\sqrt{a^2 + b^2} + b\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} \right)}{a^2 f^2 - b^2(u^2 + v^2)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで a, b, c は双曲面のパラメータであり、 f はカメラの像距離である。そして、後の演算で特徴点ごとの偏差を生じさせないように $\mathbf{r}$ を単位ベクトルに変換し、正規化する。

3.3 カメラ運動の推定 我々の従来手法である特徴点フローモデル⁽⁸⁾によってカメラ運動を推定する。特徴

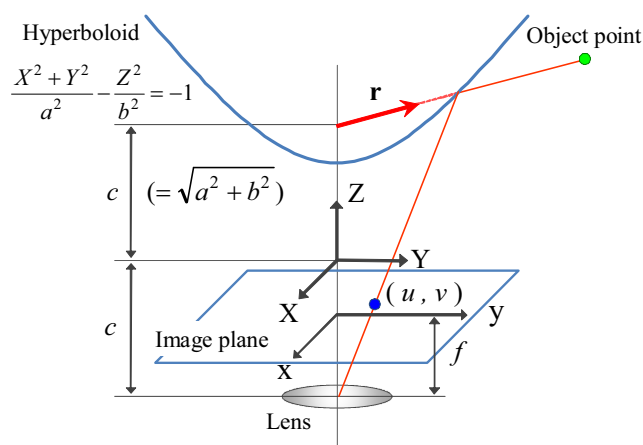
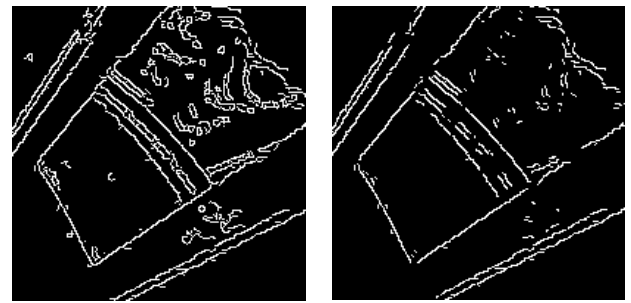


Fig. 3. Calculation of Ray Vector



(a) Extracted Edge Point (b) Edge Point without Corner

Fig. 4. Edge Point Detection

点フローモデルは全方位画像中の特徴点の流れの幾何学的な拘束条件を用いてロバストにカメラ運動を推定する手法である。

4. 直線エッジ追跡

提案手法では、画像から直線エッジを抽出し、その後の画像列で追跡することによって、異なる画像間の直線エッジの対応付けをする。本研究では以下のアルゴリズムを考案した。

4.1 エッジ点検出 まず、Canny のオペレータ⁽¹⁷⁾によってエッジを検出する(図4(a))。

4.2 コーナー点の除去 次に各エッジを分離するため、Canny のオペレータによって検出したエッジ点の中からコーナー点と思われる点を除去する。コーナー点の判定のため、エッジ点の周囲の輝度の2次微分からなるヘッセ行列の2つの固有値を計算し、値の大きな固有値を値の小さな固有値で除算することで2つの固有値の比を算出する。この比が1に近ければ近いほどコーナー点らしいといえるため、この比が一定の値以下であるエッジ点をコーナー点であると判定し、除去する。コーナー点を除去することで、直線エッジ同士を分離できる(図4(b))。

4.3 直線エッジの検出 前述の通り、光線ベクトルは双曲面ミラーの焦点から3次元点に向かうベクトルである。したがって、空間中の直線エッジ上に向かう光線ベクトルの集合は、ミラー焦点を通るある平面(以下、エッ

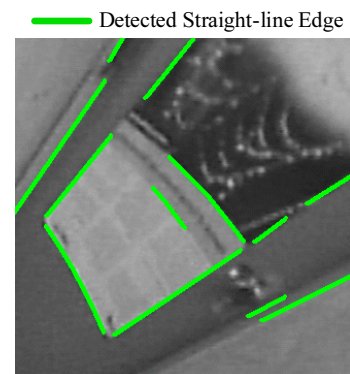


Fig. 5. Straight-line Edge Detection

ジ平面)をなす。この性質を利用することで、全方位カメラによって撮影された湾曲している画像でも直線エッジを検出することが可能である。まず、分離された各エッジ上の点に向かう光線ベクトルのなす最小二乗平面を算出する。そして、光線ベクトルと算出された平面とのなす角度の二乗誤差和が十分に小さいとみなされたエッジを直線エッジとする(図5)。

4.4 隣接した画像間の対応付け 直線エッジを画像間で対応付け、画像列中で追跡を行う。まず、現画像から検出されたエッジ i 上の点を一定間隔でサンプリングする。サンプリング点と対応する次画像での点(以下、対応点)の座標を KLT トラッカにより取得する。次に、次画像のエッジ点を抽出、コーナー点を除去する。次画像中で対応点とのユークリッド距離が最も短いエッジ点(以下、対応エッジ点)を探索する。対応エッジ点を含む次画像のエッジ j に、対応点の現画像におけるエッジのラベル i を投票する。すべてのサンプリング点の投票が終了したときの最多投票数の現画像のエッジ i を次画像のエッジ j との対応エッジであるとみなす。これを画像列で繰り返すことで物体の直線エッジを追跡することができる。

ここで、一般に直線エッジ上での対応付けには開口問題があるため、画像間で厳密な対応付けをするのは難しい。しかし提案手法では、直線エッジの計測を行うために、各観測点におけるエッジ平面の傾きのみを用いるため、直線エッジ上での点対点の厳密な対応をとらずに計測を行うことができる。また、対応付けはエッジそのものに対する投票によって行われるため、画像間の対応付けの際に、KLT トラッカによって対応付けられた点が同一エッジ上でずれていても問題は生じない。また、エッジ点はさまざまなノイズの影響で不安定であるが、提案手法では直線エッジは多数のエッジ点から算出されるため、結果的にノイズの影響は軽減される。

5. エッジベースの計測

対応づけられた直線エッジを用い、カメラ運動および直線エッジを推定する。なお、提案手法はカメラの3次元運動に対応している。

5.1 直線エッジの表現 提案手法では、直線エッジの方向および位置を推定する際に、3次元空間中の無限長の直線であると仮定する。したがって、直線エッジはその方向を表すベクトル e と位置を表すベクトル p を用いて $p + \alpha e$ と表現される。ここで、 α は定数である。5章では、カメラ運動とともにエッジの方向ベクトル e と位置ベクトル p を推定する、エッジベースの計測手法を提案する。

5.2 世界座標系とカメラ座標系 提案手法における世界座標系と第 m 番目の観測点におけるカメラ座標系の関係は図6のようにになっている。最初のカメラ座標系の原点を世界座標系の原点としている。各カメラ座標系の原点はその観測点における双曲面ミラーの焦点の位置と一致している。カメラモデルとして半径1の単位球を用いている。

また、エッジ平面の法線ベクトル n とエッジの方向ベクトル e は単位ベクトルとして扱う。

5章に記述された数式はすべて世界座標系を基準にした記述となっている。ここで、エッジ i の方向ベクトル e_i および位置ベクトル p_i は世界座標系を基準としており、観測点 m において算出されるエッジ平面の法線ベクトル $n_{i,m}$ は第 m 番目の観測点のカメラ座標系を基準としている。直線エッジとエッジ平面の法線ベクトルの関係を図7に示す。

5.3 前提条件 エッジ平面の法線ベクトルのみから直線エッジの方向と位置およびカメラ運動を推定する場合、3枚以上の異なる地点で撮影された画像が必要である。また、3本以上の異なる直線エッジが得られ、それらのエッジのうち少なくとも1本は互いに平行でない必要がある。これらの条件に関する詳細な記述や証明は参考文献⁽¹⁵⁾に示されている。

5.4 カメラの回転行列とエッジ方向の推定 まず、エッジ i の方向ベクトル e_i を、点ベースの計測で得られた観測点 m におけるカメラ回転運動 R_m から算出する。

各カメラ座標系において、エッジ平面は直線エッジを含む平面として算出される(4.3節)。したがって、エッジ平面の法線ベクトルは、エッジの方向ベクトルに対して垂直なベクトルとなる。これら2つのベクトルは世界座標系において以下に示す関係式が成り立つ。

$$(R_m^{-1}n_{i,m})^T e_i = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

この関係式から分かるように、直線エッジの方向ベクトルはカメラの並進運動に依存せず、カメラの回転運動と各観測点で得られたエッジ平面の傾きに依存する。各直線エッジ i に関して以下の式を最小二乗法で解くことで、直線エッジの方向ベクトル e_i を算出する。

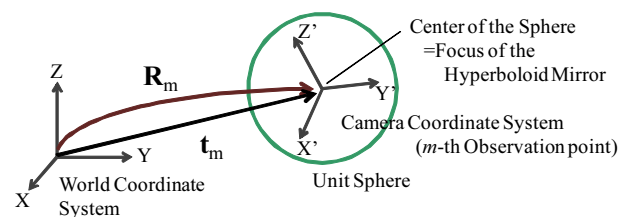


Fig. 6. Coordinate Systems

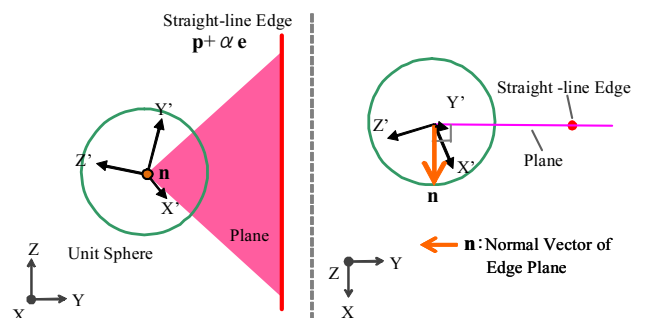


Fig. 7. Normal Vector of Plane

$$\sum_m |(\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{i,m})^T \mathbf{e}_i|^2 = 0 \dots \dots \dots (4)$$

点ベースの計測手法によって得られた回転行列 $\mathbf{R}_m$ には誤差が含まれており、必ずしも直線エッジの方向ベクトル $\mathbf{e}_i$ に対して最適ではない。そこで、直線エッジの方向ベクトル $\mathbf{e}_i$ に対して最適な回転行列 $\mathbf{R}_m$ を算出する。

理想的には、2つのベクトル $\mathbf{e}_i$ と $\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{i,m}$ は垂直に交わるが、直線エッジの対応付けの誤差などさまざまな要因で必ずしも垂直には交わらない(図8)。このときの誤差を以下の式に示す回転角 θ_i で表すことができる。

$$\theta_{i,m} = \pi/2 - \cos^{-1} ((\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{i,m})^T \mathbf{e}_i) \dots \dots \dots (5)$$

観測点 m ごとにすべての直線エッジ i との回転角 $\theta_{i,m}$ を算出し、その偏差が最小となる回転行列を算出する。以上の処理を誤差が収束するまでを繰り返すことにより、直線エッジの方向ベクトル $\mathbf{e}_i$ と回転行列 $\mathbf{R}_m$ を最適化する。

5.5 カメラの並進ベクトルとエッジ位置の推定 次に、カメラ運動の並進ベクトル $\mathbf{t}_m$ とエッジの位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ を推定する。推定された回転行列 $\mathbf{R}_m$ と直線エッジの方向ベクトル $\mathbf{e}_i$ および初期値として与えられているカメラ運動の並進ベクトル $\mathbf{t}_m$ を用い、直線エッジの位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ を算出する。直線エッジ i とカメラ運動のパラメータには以下の関係式が成り立つ。

$$(\mathbf{A}_{i,m} \mathbf{g}_{i,m} + \mathbf{t}_m) - (\mathbf{B}_{i,m} \mathbf{e}_i + \mathbf{p}_i) = 0 \dots \dots \dots (6)$$

ただし、ベクトル $\mathbf{g}_{i,m}$ は $\mathbf{g}_{i,m}^T \mathbf{e}_i = 0$ かつ $\mathbf{g}_{i,m}^T (\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{i,m}) = 0$ の単位ベクトルであり、各観測点 m と直線エッジ i との最短距離を結ぶベクトルの方向と一致している(図9)。定数 $\mathbf{A}_{i,m}$ 、 $\mathbf{B}_{i,m}$ は各パラメータ $\mathbf{g}_{i,m}$ 、 $\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{i,m}$ 、 $\mathbf{t}_m$ から算出される。各直線エッジ i に関して以下の式を最小二乗法で解くことで、直線エッジの位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ を算出する。

$$\sum_m |(\mathbf{A}_{i,m} \mathbf{g}_{i,m} + \mathbf{t}_m) - (\mathbf{B}_{i,m} \mathbf{e}_i + \mathbf{p}_i)|^2 = 0 \dots (7)$$

(7) 式を解くことは、3次元空間中の直線エッジを各画像に再投影した画像エッジと、元の画像エッジとの再投影誤差を最小化することと同義である。

回転行列の推定時と同様に、各観測点の並進ベクトル $\mathbf{t}_m$ と直線エッジの位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ の間には偏差が生じている。このときの並進ベクトルの誤差は以下の式で示すベ

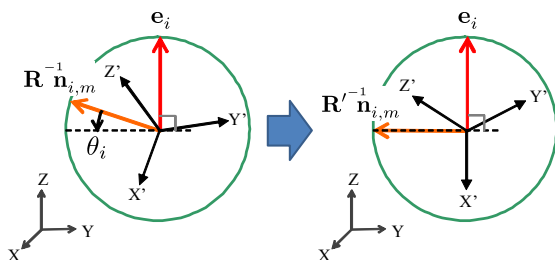


Fig. 8. Angle Error θ between $\mathbf{R}$, $\mathbf{n}$ and $\mathbf{e}$

トル $\mathbf{d}_{i,m}$ で表される。

$$\mathbf{d}_{i,m} = (\mathbf{A}_{i,m} \mathbf{g}_{i,m} + \mathbf{t}_m) - (\mathbf{B}_{i,m} \mathbf{e}_i + \mathbf{p}_i) \dots \dots (8)$$

観測点 m ごとにすべての直線エッジ i で誤差ベクトル $\mathbf{d}_{i,m}$ を算出し、その偏差が最小となる並進ベクトルを算出する。以上の処理を誤差が収束するまでを繰り返すことにより、直線エッジの位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ と並進ベクトル $\mathbf{t}_m$ を最適化する。

原理上では、カメラ運動の初期値が与えられない場合においてもカメラ運動とエッジ方向と位置を推定することが可能である。しかし提案手法では、信頼できる初期値を点ベースのカメラ運動推定で得ることによって計算コストを大幅に低減している。なお上記では、すべての観測点 m においてカメラ運動の初期値が与えられている場合の解説をしたが、最初の3観測点で初期値が与えられれば、その後の観測点でのカメラ運動は式(4)、(7)において未知パラメータをそれぞれ回転行列と並進ベクトルとすることでカメラ運動を算出することが可能である。

5.6 直線エッジの3次元計測 推定された直線エッジの方向ベクトル $\mathbf{e}_i$ と位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ から直線エッジの3次元計測を行う。前述の段階では、直線エッジは無限長であると仮定していたが、最終的な3次元計測結果としては任意の間隔でサンプリングしたエッジ点群で表現する。

まず方向ベクトル $\mathbf{e}_i$ と位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ を用いて、任意のサンプリング間隔で、3次元エッジ上の点の座標を取得画像列に再投影する。いずれかの画像上で、対応する元の画像エッジ点と再投影したエッジ点の距離が十分に小さいと判断された場合、そのエッジ点を3次元空間中に投影する。すなわち、方向および位置ベクトルが推定されたエッジであれば、画像列中で追跡されたエッジのすべての位置の3次元座標が算出可能であるということになる。したがって、もし追跡中のエッジの一部(画像端で見え隠れするエッジ部分などがこれにあたる)が1つの画像にしか撮像されていなかったとしても、撮像された部分のエッジの3次元座標は算出できることになる。また、追跡途中でエッジの一部が他の物体に隠れてしまうような場合にも、追跡過程で一度でも撮像された部分であれば計測できるため、オクルージョンにロバストな計測が期待できる。

なお、エッジの計測結果は世界座標における3次元座標

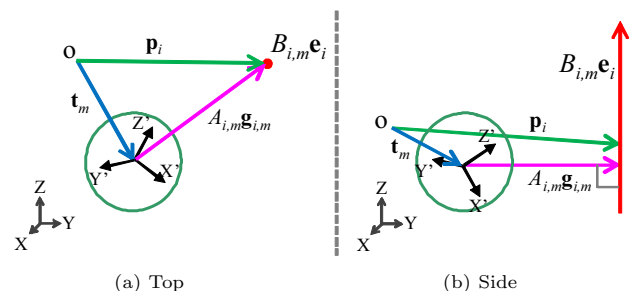


Fig. 9. Relationship between $\mathbf{t}_m$ and $\mathbf{p}_i$

が算出される．また提案手法では，エッジが追跡されたすべての観測点のデータを用いて3次元座標を算出できる(5.4節(4)式および5.5節(7)式)．そのため，各観測点間の計測結果の統合処理は不要である．新しい観測点のデータが得られた場合は，それまでに取得されたすべてのデータを用いて再計測され，計測結果が更新される．

5.7 アウトライア除去 なお，提案手法では上記の各処理(5.4節–5.6節)において，誤対応している直線エッジの影響を取り除くため，RANSAC⁽¹⁸⁾に基づくアウトライア除去手法を適用している．また，5.6節では計測精度が期待できないエッジ点を除外して3次元計測を行っている．計測精度の期待値は，計測点が追跡された観測点におけるカメラ運動とその観測点における計測点の画像座標との関係から計測誤差を推定する手法⁽⁸⁾をエッジに応用して算出し，一定以下の計測精度と判定されたエッジ点を除去する．

6. 点データとエッジデータの統合

最後に，エッジの3次元座標データと特徴点の3次元座標データを統合する．エッジベースの計測によって最適化されたカメラ運動を用い，画像列で追跡を行った特徴点の3次元座標を算出する．そして，エッジと特徴点の計測データを重畳する．提案手法では直線エッジと特徴点の計測データの両方を用いることで，さまざまな物体が存在する環境のモデル化を実現する．

7. モデリング

得られた計測点群から3次元のドロネー分割により三角網を構築する．しかし，ドロネー分割によって得られる多面体構造は計測対象の形状を考慮していないため，物理的な辺に矛盾する三角網が生成されることがある．そこで提案手法では，計測対象の物理的な形状に適合するように三角網を最適化する手法⁽¹⁹⁾を適用することで，より実際の環境を忠実に再現したモデルを生成する．さらに，各観測点で撮影した画像のテクスチャを三角網の各面に貼り付けることで，モデルに色情報を付加する．

8. 実験

全方位カメラを人が手で持って移動しながら撮影した画像

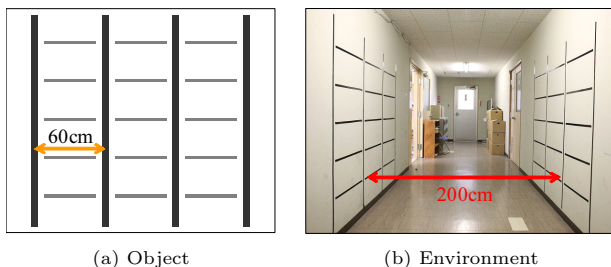


Fig. 10. Measurement Object (Edge-based Measurement)

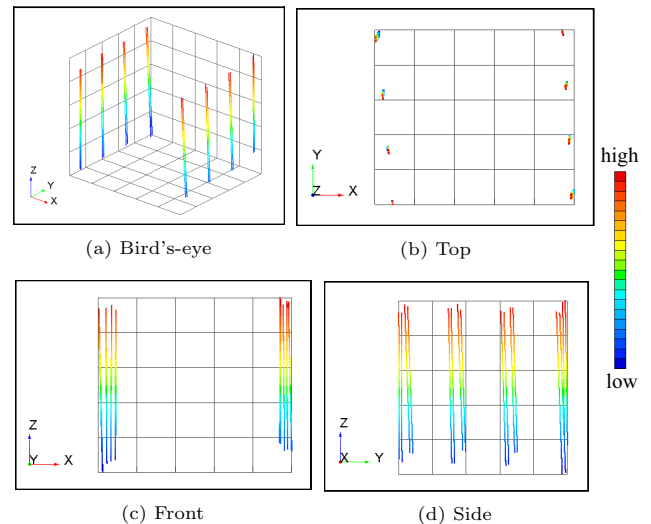


Fig. 11. Results of Edge-based Measurement

列を用いて実験を行った．入力画像のサイズは2496×1664ピクセルである．

8.1 エッジの計測結果 まず，本研究で提案するエッジベースの計測の精度評価を行った．計測対象は平行に配置した直線である(図10(a):縦方向の直線)．ただし提案手法では，抽出された直線がすべて平行である場合にはカメラ運動を決定することができない．そのため，計測対象に対して垂直な直線も適宜配置した(図10(a):横方向の直線)．計測は廊下の左右壁面に図10(b)のように直線を配置した環境で行った．カメラの移動距離は約180cmとし，移動中に取得した60枚の全方位画像を用いた．廊下の幅は約200cmである．本実験では床面に垂直な直線の計測結果のみを評価対象とする．

計測結果を図11に示す．直線エッジの計測結果が廊下床面に対して高いほど赤く，低いほど青く表示されている．配置した各直線の両端のエッジが計測されているため，廊下の各壁面に $4 \times 2 = 8$ 本，両壁面合わせて16本のエッジの計測結果が得られた．ここで横方向の計測結果が得られなかったのは，横方向のエッジの実空間中の位置とカメラの移動方向とがほぼ一平面上に存在しており，計測精度が低いと推定され(5.7節)，横方向のエッジの計測点がすべて除去されたためと考えられる．

計測結果の評価を表1に示す．評価するのは各エッジの平行度，エッジの壁面に対する奥行き誤差および両壁面の角度誤差である．平行度として，各エッジの方向ベクトル

Table 1. Evaluation of Measurement Accuracy

	Angle (Direction) [deg]	Angle (Plane) [deg]	Depth [mm]
Standard Deviation	1.2	–	2.3
Maximum	1.9	1.5	7.5

の平均値からの標準偏差および最大誤差を算出した．奥行き誤差として，1 壁面上の 8 本のエッジの計測結果と算出した最小二乗平面との距離の標準偏差および最大誤差を算出した．両壁面の角度誤差として，各壁面の最小二乗平面の法線ベクトルの角度誤差を算出した．ここで提案手法では，カメラ運動に対する相対的な距離が計測結果として得られるため，カメラの移動距離を 180cm としてスケーリングした結果を示している．実験結果から，提案手法は距離約 100cm 離れた直線エッジに対し奥行き誤差 7.5mm，角度誤差 1.9deg 以内で計測が可能である．

上記の実験では，画像中で十分な長さが得られるエッジの計測精度を評価した．しかし，一般に双曲面ミラーを用いた全方位カメラは視野が広い反面，解像度が低く，特に画像中心付近でそれが顕著である．したがって，計測対象が小さく，かつ画像中心付近に結像される場合には，画像中で短いエッジしか得られないことが想定される．そこで，解像度の低下による計測精度への影響を検証する．空間中で同じ長さの直線を，双曲面ミラーの軸に対して異なる高さで壁面に配置し，それらの直線を同時に計測した．空間中で同じエッジ長さを持つ物体でも，全方位画像の解像度の違いにより画像中で異なるエッジ長さに結像される．これにより，解像度の低下による計測精度への影響が検証できる．

計測対象は，床面に対して垂直で同じ高さにある 4 本の直線を 1 組とし，異なる高さで 3 組配置した計 12 本の直線である（図 12）．1 本の縦のエッジの長さは約 30cm である．前述の実験と同様に，縦方向のエッジの計測結果のみを評価対象とし，カメラの移動距離と対象までの距離は

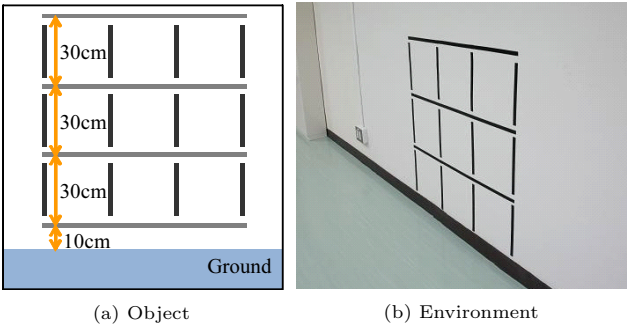


Fig. 12. Measurement Object (Short Line)

Table 2. Evaluation of Measurement Accuracy (Short Line)

		Angle (Direction) [deg]	Depth [mm]
Top	Standard Deviation	0.8	2.2
	Maximum	1.0	4.2
Middle	Standard Deviation	1.2	2.0
	Maximum	1.5	4.4
Bottom	Standard Deviation	1.4	2.9
	Maximum	1.8	5.9

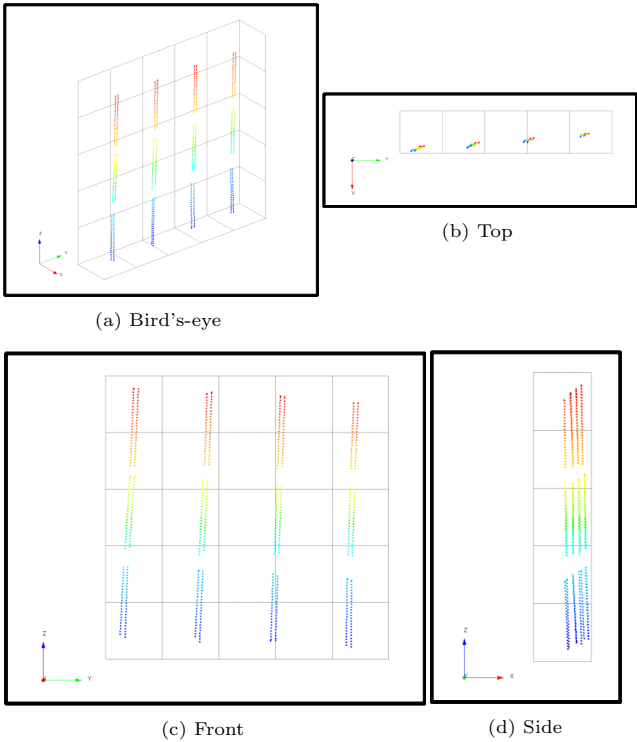


Fig. 13. Results of Edge-based Measurement (Short Line)

それぞれ約 180cm，約 100cm とした．入力画像として移動中に取得した 105 枚の全方位画像を用いた．

計測結果を図 13 に示す．下，中，上段に配置したそれぞれ 4 本の直線の両端にエッジが検出され，1 組あたり縦方向のエッジが 8 本ずつ計測されている．ここで評価するのは各段ごと 8 本のエッジの平行度および壁面に対する奥行き誤差である．下段のエッジの長さは，カメラが最も接近したときに画素距離で約 30pixel であり，中段は約 50pixel，上段は約 80pixel であった．前述の実験ではエッジの長さは最長で約 500pixel であった．

計測結果の評価を表 2 に示す．画像中でのエッジ長さが小さくなるほど（下段に近づくほど）計測精度が低下することが分かる．しかし，最も短い下段のエッジであっても 5.9mm 以内の奥行き誤差であることから，一般的に生活環境に存在する机や椅子などの物体の回避には十分な精度が得られたといえる．また，これらの短いエッジが前述の長いエッジと同程度もしくはそれ以上の精度で計測されているのは，全方位画像では長いエッジはそのエッジ上で解像度が変化することがあるため，抽出および対応付けに誤差が発生したからであると思われる．

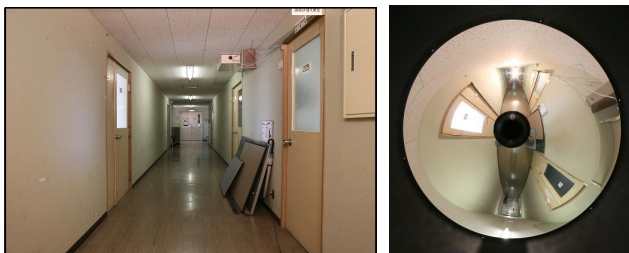
病院や工場内など屋内環境の通路でのナビゲーションを考えた時，そのような環境では扉や曲がり角などから十分な長さの直線エッジを取得することは容易である．そのため，本実験の結果に近い精度での計測が実現可能だといえる．よって，実用上の観点からも，提案手法は屋内通路でのナビゲーション用途に対して十分な精度が得られているといえる．また室内環境においても，一般的な机や椅子な

どの大きさの物体の回避のために十分な計測精度が得られた。しかし、部屋の中には机や椅子よりも小さな物体（本や食器など）が多く存在していることが予想される。全方位カメラは小さな物体の撮像に適していないため、そのような小さな物体が障害物、あるいは目標物となるようなタスクへの応用に対しては、レーザーやステレオカメラなど、他のセンサの搭載を検討する必要がある。

8.2 テクスチャレス環境のモデリング結果 次に、エッジベースの計測がテクスチャレスな物体が多く存在する環境において有効であることを示すために、図14(a)に示す屋内環境のモデリングを行った。カメラを移動させながら取得した40枚の全方位画像（図14(b)）を入力とし、40枚の全方位画像列で特徴追跡を行った。画像列中から10枚おきに計5枚の画像を取り出し、それら5枚の画像から得られる特徴の対応関係を用いて計測を行った。特徴点の計測結果と直線エッジの計測結果を図15に示す。計測結果が廊下床面に対して高いほど赤く、低いほど青く表示されている。青点はカメラの位置を示している。計測環境はテクスチャに乏しいため、特徴点の計測結果は疎であるが（図15(a)）、提案手法により直線エッジが密に計測されているため（図15(b)）、環境の3次元構造が把握できる。それぞれの計測結果からモデリングを行った結果を図16に示す（図15中の紫矢印の視点）。特徴点の計測結果のみから生成したモデル（図16(a)）は環境のごく一部しかモデル化できていない。それに対し、直線エッジの計測結果から生成したモデル（図16(b)）はテクスチャに乏しい環境においてもモデル化が可能である。

8.3 さまざまな物体が存在する環境のモデリング結果 最後に、テクスチャ豊富な物体やテクスチャレスな物体の両方が含まれる複雑な環境（屋外：図17）で実験を行った。カメラを移動させながら取得した60枚の全方位画像（図17(b)）を入力とし、15フレームおきに計測を行った。

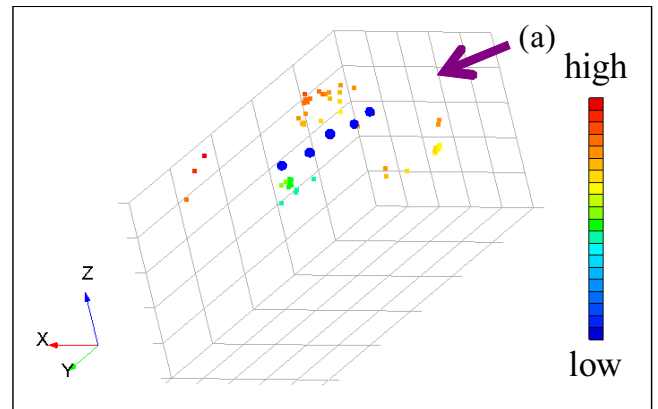
計測結果を図18に示す。樹木などのテクスチャが豊富な物体に関しては特徴点が多く計測されており、建築物など直線エッジが得られやすい物体に関しては直線エッジが計測されていることが分かる。この結果から、特徴点と直線エッジの両方を計測する提案手法の有効性が示された。また、建物の直線エッジの計測結果の上部は特定の1フレームでのみ撮像されていたが、提案手法により復元することができている。この環境のモデリング結果を図19に示す。



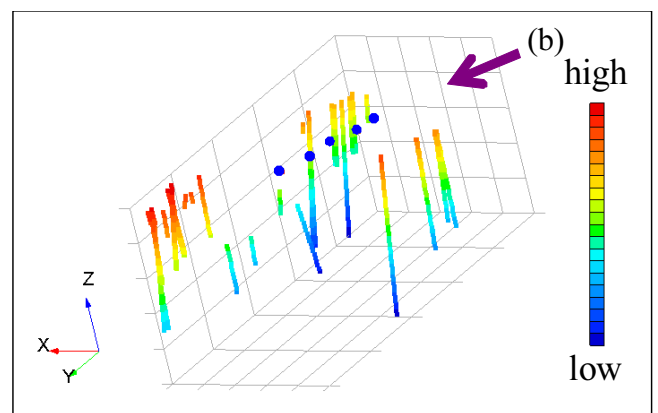
(a) Environment (b) Input Image

Fig. 14. Indoor Environment

さまざまな物体が存在する複雑な環境においてもモデル化ができていることが分かる。



(a) Feature Points



(b) Straight-line Edges

Fig. 15. Measurement Result of Indoor

9. 結 論

本研究では、全方位カメラを用いた3次元環境計測において、従来の点ベースの計測に加えエッジベースの計測手法を併用することを提案した。エッジベースの計測手法では、直線エッジを無限長のエッジと仮定した計測手法を適用することで、エッジの情報を劣化させない計測を実現することができた。また、直線エッジだけでなく特徴点の計測結果も併用することで、テクスチャの豊富な物体とテクスチャレスな物体の両方が存在する複雑な環境をモデル化することができた。実験結果から、提案手法の有効性が示された。

今後の課題として、エッジベースの計測結果と点ベースの計測結果の定量的な比較・評価を行う必要がある。そのほかの課題として、エッジ追跡の精度向上や、エッジの位置が滑らかに変化する柱状物体などから得られる直線エッジへの対応などが挙げられる。さらに、生成した環境モデルを用いたロボットのナビゲーションへの発展が考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省 科学研究費補助金 若手研



(a) Feature Points



(b) Straight-line Edges

Fig. 16. Modeling Result of Indoor

究 (B) 20700184 の補助を受けた .

(平成 21 年 12 月 25 日受付, 平成 22 年 3 月 18 日再受付)

文 献

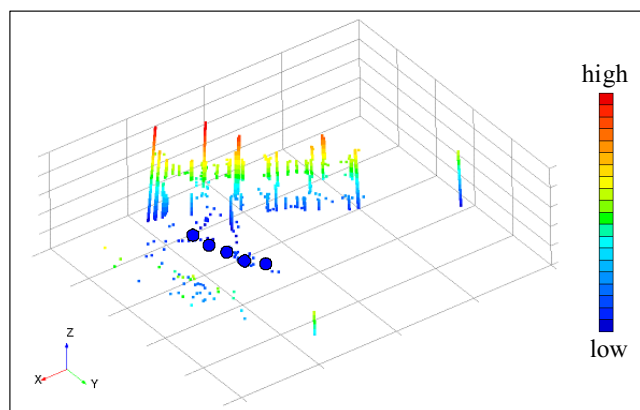
- (1) A. J. Davison: "Real-Time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera", *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1403-1410, 2003.
- (2) H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji: "Omni-Directional Stereo", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 257-262, 1992.
- (3) A. Rachmielowski, D. Cobzas and M. Jagersand: "Robust SSD Tracking with Incremental 3D Structure Estimation", *Proceedings of the 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, 12, pp. 1-8, 2006.
- (4) T. Nishimoto and J. Yamaguchi: "Three dimensional Measurement using Fisheye Stereo Vision", *Proceedings of the Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference 2007*, 3A05-1, pp. 2008-2012, 2007.
- (5) R. Bunschoten and B. Krose: "Robust Scene Reconstruction from an Omnidirectional Vision System", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 2, pp. 351-357, 2003.
- (6) C. Geyer and K. Daniilidis: "Omnidirectional Video", *The Visual Computer*, Vol. 19, No. 6, pp. 405-416, 2003.
- (7) J. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-motion and Omnidirectional Cameras", *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 999-1005, 1998.



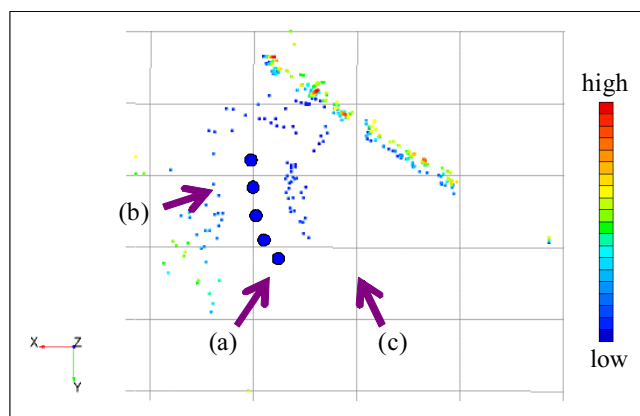
(a) Environemnt

(b) Input Image

Fig. 17. Outdoor Environment



(a) Bird's-eye



(b) Top

Fig. 18. Measurement Result of Outdoor

- (8) R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko: "Estimation of Camera Motion with Feature Flow Model for 3D Environment Modeling by Using Omni-Directional Camera", *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3089-3094, 2009.
- (9) M. Tomono: "3D Object Mapping by Integrating Stereo SLAM and Object Segmentation Using Edge Points", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5875, pp. 690-699, 2009.
- (10) A. Bartoli and P. Sturm: "Multi-View Structure and Motion from Line Correspondences", *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 207-212, 2003.
- (11) P. Smith, I. Reid and A. Davison: "Real Time Monocular SLAM with Straight lines", *Proceedings of British Machine Vision Conference*, pp. 17-26, 2006. Vol. 1,
- (12) G. Schindler, P. Krishnamurthy and F. Dellaert: "Line-Based



(a) Front



(b) Left Angle



(c) Right Angle

Fig. 19. Modeling Result of Outdoor

- Structure from Motion for Urban Environments”, *Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 846-853, 2006.
- (13) G.L. Mariottini and D. Prattichizzo: “Uncalibrated video compass for mobile robots from paracatadioptric line images”, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 226-231, 2007.
- (14) M. Chandraker, J. Lim and D. Kriegman: “Moving in Stereo: Efficient Structure and Motion Using Lines”, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1741-1748, 2009.
- (15) L. A. Spacek: “Edge Detection and Motion Detection”, *Image and Vision Computing*, Vol. 4, Issue 1, pp. 43-56, 1986.
- (16) J. Shi and C. Tomasi: “Good Features to Track”, *Proceedings of the 1994 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.593-600, 1994.
- (17) J. F. Canny: “A Computational Approach to Edge Detection”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679-698, 1986.

- (18) M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.
- (19) A. Nakatsuji, Y. Sugaya, and K. Kanatani: “Optimizing a Triangular Mesh for Shape Reconstruction from Images”, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E88-D, No. 10, pp. 2269-2276, 2005.

川 西 亮 輔（非会員）2006年3月静岡大学工学部機械工学科卒業。2008年3月静岡大学工学研究科修士課程修了，現在，同大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士後期課程在学中。2008年8月 Third Asia International Symposium on Mechatronics にて Best Student Paper Award，2009年10月 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award を受賞，全方位カメラを用いた環境モデル生成に関する研究に従事。



山 下 淳（正員）1996年3月東京大学工学部卒業，1998年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了，2001年3月同博士課程修了。2001年4月静岡大学工学部機械工学科助手，2006年11月～2007年12月カリフォルニア工科大学客員研究員，2008年4月静岡大学工学部機械工学科准教授，現在に至る。1996年日本機械学会畠山賞，2001年総合研究奨励会石井学術奨励賞，2004年映像情報メディア学会研究奨励賞，2005年日本機械学会ロボメカ部門ベストプレゼンテーション表彰，2006年電気学会優秀論文発表賞，日本ロボット学会研究奨励賞など受賞。画像処理，コンピュータビジョン，ロボットの知能化などの研究に従事。博士（工学）。



金 子 透（非会員）1974年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1974年4月日本電信電話公社（現 NTT）入社。1997年4月静岡大学工学部機械工学科教授，現在に至る。画像処理，ロボットビジョンの研究に従事。工学博士。

