全方位画像列の特徴点とエッジ情報を併用した カメラ運動推定による3次元環境計測*

川西 亮輔^{*1},山下 淳^{*2},金子 透^{*2}

Three-dimensional Environment Measurement by Estimating Camera Movement Using Feature Points and Edge Information in Omnidirectional Image Sequence

Ryosuke Kawanishi^{*3}, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko

^{*3}Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatu-shi, Shizuoka, 432-8561

Three-dimensional environment models are important for tasks of autonomous mobile robots. In this paper, we propose a method for 3D environment modeling based on structure from motion using an omnidirectional camera installed on a mobile robot. In order to measure environments, our proposed method uses edge information in addition to feature points in an omnidirectional image sequence. Edge information makes it possible to estimate camera movement effectively, and to measure environments densely. Our proposed method extracts and tracks feature points and edges along omnidirectional image sequence. It estimates camera movement by using both feature points and edges, calculates feature point coordinates, and edge positions and directions. Experimental results show the effectiveness of our proposed method.

Key Words: 3D Environment measurement, Edge information, Omnidirectional image

1. 緒 言

移動ロボットが自律的に活動する際に必要となる基本的な機能としては,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,ロボットの周囲環境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,地図情報としては3次元の幾何学的な情報を持つ環境地図が有効である.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,ロボット自身が常に周囲環境を計測し,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 膨大な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が考案されている.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 メラが有効である.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、1台のカメラを移動させながら撮影した画像列を用い、被写体の計測とカメラ運動(回転行列および並進ベクトル)の推定を同時に行うStructure from Motion の枠組みで環境計測を行う.我々は既に全方位カメラを用いたStructure from Motion による環境計測手法を提案している⁽⁸⁾⁽⁹⁾.しかし、計測に特徴点のみを用いていた我々の従来手法は、特徴点を抽出しやすいテクスチャ豊富な物体の計測には有効であったが、テクスチャに乏しい物体に対しては疎な計測結



(a) Mobile Robot (b) Acquired Image Fig. 1 Omnidirectional Camera

^{*}原稿受付 2009年10月23日

^{*1}学生員,静岡大学(〒432-8561静岡県浜松市中区城北3-5-1)

^{*2}正員,静岡大学

E-mail: f5945016@ipc.shizuoka.ac.jp

果しか得られなかった.そのため周囲環境によって は,その一部しか計測できないという問題があった.

我々の生活する環境には人工物が多数存在し,それ らの多くは直線的なエッジを持つ物体である.そのため, 自律移動ロボットが人間社会で活動する際には,環境 中の直線エッジを利用した計測手法が効果的であると 考える.エッジを用いた Structure from Motion⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ や SLAM⁽¹²⁾の研究はすでに行われている.しかし, これらの従来研究では,限定的な環境のみを対象とし ている⁽¹¹⁾,物体の直線エッジの両方の端点が常に見 えている必要がある⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾などの制約があるため,未 知環境における計測に有効な手法とはいえない.

今回,我々が提案する手法では,直線エッジを線分 ではなく無限長の直線として扱う計測原理⁽¹³⁾を適用 するため,直線エッジの端点が見えない状態でも計測 が可能である.しかし,直線エッジを利用した計測手 法は,人工物など直線エッジを持つ物体のみに有効で あり,自然物などのように直線エッジが得られにくい 物体に対しては計測が困難である.自然物などは特徴 点が得られやすいため,特徴点を利用した計測手法が 有効である.そこで提案手法では,直線エッジと特徴 点を併用することで,様々な物体が存在する環境の計 測を可能とする.

2. 処理の概要

提案手法では,ビデオ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.まず動画像を 取得する.最初の画像中から特徴点を抽出し,以後の



Fig. 2 Process

フレームで追跡を行うことで対応点が取得できる.取 得した対応点情報を用いてカメラ運動を推定する.こ のカメラ運動の推定結果はエッジベースの計測の際の 初期値として利用する.

次に画像中からエッジを抽出し,画像列で追跡を行う.点ベースの計測で推定されたカメラ運動を用いて エッジの方向と位置の初期値を算出する.エッジの方 向とカメラの回転運動を最適化計算で推定し,次にエッ ジの位置とカメラの並進運動を最適化計算で推定する.

提案手法ではカメラの回転運動はエッジの方向に依存し,カメラの並進運動はエッジの位置に依存するため,それぞれ独立に計算できる.カメラ運動や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,多自由度の非線形問題となるため,提案手法では初期値を与えることで計算コストを削減する.

3. 環境計測

3.1 特徴点追跡 カメラの移動前後の2画像間 における対応点を取得するため,移動前の画像から特 徴点を抽出,移動後の画像まで追跡する.本手法で は,KLTトラッカ⁽¹⁴⁾を用いる.

3-2 点ベースの計測

r

3.2.1 光線ベクトルの算出

提案手法では全方位カメラとして,ビデオカメラ先 端に双曲面ミラーを取り付けたものを用いる.3次元 空間中のある1点からビデオ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レンズ中心を通過し て画像平面に向かう.このとき,3次元点とミラー上 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を, 双曲面の焦点から3次元点に向かう光線ベクトル $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ に変換する(図3).

特徴点の画像座標 [*u*,*v*]^{*T*} から式 (1)(2) により r を求 める.ここで*a*,*b*,*c* は双曲面のパラメータであり, *f* は焦点距離である.

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

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

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rを単位ベクトルに変換し,正規化する.



Fig. 3 Calculation of Ray Vector

3.2.2 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⁽⁹⁾によっ てカメラ運動を推定する.特徴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 てカメラ運動を推定する手法である.特徴点フローモ デルの詳細に関しては参考文献⁽⁹⁾を参照されたい.

3.3 エッジ追跡 提案手法では画像間で直線 エッジの対応付けをする.

3.3.1 エッジ点検出

まず, Cannyのオペレータ⁽¹⁵⁾によってエッジを検 出する(図4).

3.3.2 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.コーナー点を除去することで,直



Fig. 4 Edge Point Detection

線エッジ同士を分離できる(図4右上).

3.3.3 直線エッジの抽出

ここで,前述したとお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をなす.提案 手法では,分離された各エッジに向かう光線ベクトル のなす最小二乗平面を算出することで直線エッジを抽 出する(図5左上).

3.3.4 直線エッジの統合

提案手法では,3次元空間中で同一の直線である場合にも,エッジの途中にコーナー点が含まれていると分離されることがある.そこで,抽出された各直線エッジの周囲に存在する直線エッジを探索し,それらが同一エッジであるとみなされた場合には1つのエッジに統合する(図5右上).

3.3.5 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.直線エッジ上の点をサンプリングし,隣接フ レーム間でエッジ点の対応付けをする.ここで,エッ ジ点の対応付けには開口問題⁽¹⁶⁾があるが,本手法で はエッジ点同士の厳密な対応付けを必要としていない ため問題とならない.また複数のエッジが隣接してい ても,マッチングを行うテンプレートのサイズをを十 分に大きくすることで,誤対応の発生頻度を低減でき る.直線エッジの対応点座標を用いて,再び直線エッ ジの抽出を行う.追跡後に直線であると判定されな



Fig. 5 Straight Edge Extraction

かったものは追跡失敗したエッジであると判断し,破 棄する.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.

3.4 エッジベースの計測 次に,各画像間の対応エッジ情報を用い,直線エッジおよびカメラ運動を 推定する.

3.4.1 直線エッジの表現

提案手法では, ある単位球を定義する.光線ベクト ルは単位球の中心を始点とする単位ベクトルとし, 画 像中の直線エッジは単位球の中心を通る単位円として 扱う.このとき, いずれのエッジも3次元空間中の無 限長の直線エッジであると仮定している.無限長の直 線エッジに向う光線ベクトルの集合は単位球の中心を 通る平面をなしており,単位球中では半円である.し かし,1枚の画像中のエッジだけではエッジの方向に 関する情報を得られないため,半円を円に拡張して直 線エッジを表現する.3次元エッジはこの単位円の延 長上に存在し,その位置姿勢は3自由度(平面上の並 進2自由度,平面に垂直な軸を中心とした回転1自由 度)である.

3.4.2 カメラ運動とエッジ円の見かけの動き

カメラが並進のみを行う場合,エッジを表す単位円 (以後はエッジ円と呼ぶ)の見かけの動きは,単位球の 中心を通る1軸周りの回転運動となる.また,その回転 軸の方向はエッジの方向と一致する(図6).これは, カメラが並進運動のみをする場合には単位球の座標系 に対するエッジ円の傾きが変化しないことと,エッジ 円が常に単位球の中心を通ることからも自明である.

カメラが回転運動のみを行う場合,単位球中心から エッジに下ろした垂線を軸とした回転の成分がある場 合と,エッジ方向を軸とした回転の成分がある場合に, エッジ円がそれぞれの軸周りの回転運動をする.

カメラ運動とエッジ円の見かけの動きの関係は,前述 したエッジの取り得る位置姿勢の自由度と対応している.



Fig. 6 Edge Circle Movement at Translation Only

3.4.3 前提条件

エッジ円の見かけの動きのみからエッジ方向と位置 およびカメラ運動を推定する場合,少なくとも3枚の 異なる地点で撮影された画像が必要である.また,少 なくとも3本の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. 紙面のスペースの関係上,今回はこれらの条件に関す る詳細な記述や証明は省き,エッジベースの計測に関 する具体的手法のみを解説する.

3.4.4 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 で得られたカメラ回転運動 \mathbf{R}_m から算出する.具体的に は各エッジiに関して以下の式(3)を最小二乗法で解く.

$$\sum_{m} \left| (\mathbf{R}_{m}^{-1} \mathbf{n}_{i,m})^{T} \mathbf{e}_{i} \right|^{2} \to \min$$
(3)

ここで*m* は画像取得を行ったカメラの観測点番号, **n**_{*i,m*} は直線エッジ*i* の観測点*m* におけるエッジ円の法 線方向ベクトルであり, **n**_{*i,m} は単位球中心を始点とす る単位ベクトルである.</sub>*

(3) 式中の $\mathbf{R}_m^{-1}\mathbf{n}_{i,m}$ は,回転行列 \mathbf{R}_m の初期値に含ま れる誤差の影響で,必ずしもエッジ方向 \mathbf{e}_i に対して最 適ではない.そこで,エッジ方向 \mathbf{e}_i と各観測点間 mにおけるエッジ円の法線ベクトル $\mathbf{n}_{i,m}$ の関係が最適に なる回転行列 \mathbf{R}_m を算出する.回転行列 \mathbf{R}_m の誤差は, 2 つのベクトル \mathbf{e}_i と $\mathbf{R}_m^{-1}\mathbf{n}_{i,m}$ からなる平面の法線ベク トルを回転の軸とした

$$\theta_{i,m} = \cos^{-1} \left((\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{i,m})^T \mathbf{e}_i \right)$$
(4)

の回転角で表せる.観測点ごとにすべての直線エッジ との回転角誤差を算出し,その平均をとる.こうして 得られた回転量を初期の回転行列 R_mにかけることで, 直線エッジ*i*に対する各観測点における回転行列 R_m を最適化する.

以上の2式の用い,エッジ方向 e_i と回転行列 R_mの 誤差が収束するまで最適化計算を繰り返す.

3.4.5 カメラの並進ベクトルとエッジ位置の推定

次に,カメラの並進ベクトルt_mとエッジの3次元 位置 p_iを推定する.

まず,推定された回転行列 R_mとエッジ方向ベクトル e_iおよび初期値として与えられているカメラの並進ベク トルt_mを用い,エッジ位置 p_iを算出する.具体的には 各エッジ*i*に関して以下の式(5)を最小二乗法で解く.

$$\sum_{m} \left| (A_{i,m} \mathbf{g}_{i,m} + \mathbf{t}_m) - (B_{i,m} \mathbf{e}_i + \mathbf{p}_i) \right|^2 \to \min$$
 (5)

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る. $A_{i,m}$, $B_{i,m}$ は $\mathbf{g}_{i,m}$, $\mathbf{R}_{m}^{-1}\mathbf{n}_{i,m}$, \mathbf{t}_{m} から算出される定数である.(5)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t_mとg_{i,m}の間には偏差が生じている.そこで,各観 測点における並進ベクトルt_mとg_{i,m}の誤差を最小化す る.この誤差は

$$\mathbf{d}_{i,m} = (A_{i,m}\mathbf{g}_{i,m} + \mathbf{t}_m) - (B_{i,m}\mathbf{e}_i + \mathbf{p}_i)$$
(6)

と表される.各観測点ごとにすべての直線エッジで誤 差ベクトルd_{i,m}を算出し,その平均をとる.こうして 得られたベクトルの成分を初期の並進ベクトルに加え ることで,直線エッジiに対する各観測点の並進ベク トルt_mを最適化する.

以上の2式を用い,エッジ位置 **p**_iと並進ベクトル t_mの誤差が収束するまで最適化計算を繰り返す.

3.4.6 エッジの3次元計測

推定されたエッジの方向 e_i と位置 p_i からエッジの3 次元計測を行う.エッジ推定の段階では,直線エッジ は無限長であると仮定していたが,3次元計測では長 さも考慮する.

まずエッジ方向 e_iと位置 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 エッジ点と再投影エッジ点の画素距離が十分に小さい と判断された場合,そのエッジ点の3次元座標をエッ ジ(の一部)として3次元空間に投影する.この処理 により,提案手法ではオクルージョンなどで追跡途中 にエッジの一部が隠れてしまった場合にも,隠れた エッジ間で含めた3次元復元が可能である.したがっ て提案手法は,従来までの点ベースの計測手法と比 ベ,オクルージョンに対してロバストである.

3.4.7 アウトライア除去

提案手法では上記の各処理(3.4.4項-3.4.6項)に おいて,誤対応しているエッジの影響を取り除くた め,RANSAC⁽¹⁷⁾に基づくアウトライア除去手法を適 用している.また,3.4.6項では計測精度が期待でき ないエッジを除外して3次元計測を行っている.計測 精度の評価方法は我々の従来手法⁽⁹⁾に基づいている.

3.5 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.まず,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.

計測結果としてエッジだけでなく特徴点も用いるの は,提案手法で復元できるエッジは直線に限られるか らである.提案手法ではエッジとKLTによる特徴点 の計測データの両方を用いることで,より密な計測を 実現する.

4. 実 験

屋内環境(図7:廊下)で計測を行った.全方位カメ ラを搭載した移動ロボットを約10cm/sの速度で走行さ せながら撮影を行い,フレームレートは10fpsとした. 入力画像(図8)のサイズは1920×1080pixelsである.

計測に用いた画像列は61枚で,ロボットの移動距 離は約60cmである.観測点としたのは第0,10,20, 30,40,50,60フレームである.したがって1回あ たりの計測の基線長は約10cmとなる.すべてのフ レームで追跡が行えたエッジと特徴点のみを用いて計 測を行った.

まず,比較のために我々の従来手法⁽⁹⁾の結果を図9 に示す.廊下の概観が分かる程度には計測されている が,計測密度は疎であり,ロボットの活動に十分な情 報を与えられるとはいえない.

次に,提案手法によるエッジ計測の結果を図10に 示す.環境中の直線エッジが計測されているため,廊 下の大まかな構造が把握できる.しかし,テクスチャ が豊富で直線エッジを抽出するのが困難な部分におい ては計測ができていない.点とエッジ両方の計測デー



Fig. 7 Actual Image (Passageway)



Fig. 8 Input Image (Passageway)





(b) Top

Fig. 9 Measurement Results of Passageway (Point-based)







Fig. 10 Measurement Results of Passageway (Edge-based)



(a) Bird's-Eye View



(b) Top Fig. 11 Combination Results of Passageway

タを統合した結果を図11に示す.環境中の直線エッ ジと、テクスチャ豊富な点が両方とも計測できている ことが分かる.今回はロボットを廊下の長手方向に直 進させたため、ロボットの移動方向と平行なエッジが 復元されなかった.この問題に対しては、直線エッジ 同士の連結性を考慮する、環境中の直線エッジの方向 から計測に最適なロボットの移動経路を算出するなど の解決方法が考えられる.

屋外環境(図12:建物の中庭)においても実験を 行った.この実験では,人が全方位カメラを手に持っ て移動しながら撮影した画像列(図13)を用いる. 計測に用いた画像列は61枚で,人の移動距離はおよ そ3mほどである.従来手法⁽⁹⁾による結果を図14に示 す.特徴点の計測結果のみでは疎な点群しか得られて いないため,この結果のみから建物の位置や形状を把 握することはできない.提案手法によるエッジ計測を 行った結果を図15に示す.エッジが計測されることに よって建物の位置や形状を大まかではあるが把握でき る.また,建物のように大きな物体の場合,物体の持つ 直線エッジの端点が画像内に収まらないことがある. しかし提案手法では,直線エッジの端点が見えない場 合にも計測が可能であるため,その一部のみが見えて いたエッジに関しても復元できている.点とエッジ両 方の計測データを統合した結果を図16に示す.建物

など,直線エッジが得られやすい物体の計測に関して は提案手法によるエッジ計測が有効であることが分か る.逆に,芝など,地面にある程度テクスチャがある ところに関しては点ベースの計測が有効に働いている. したがって,点ベースの計測とエッジベースの計測を 併用することを提案した本手法の有用性が示された.

5. 結 語

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.直線エッジの 端点を必要としない計測原理を適用することで,画像 上すべての直線エッジが計測可能となり,効率的な環 境計測が実現できた.実験結果から,テクスチャの豊 富な物体(自然物など)とテクスチャに乏しい物体 (人工物など)の両方が含まれるような一般的な環境 において,点ベースの計測とエッジベースの計測を併 用する提案手法の有効性が示された.

今後は,カメラ運動推定および計測結果の定量的評価,点ベースのみの計測手法との比較評価を行う必要がある.また,計測結果にテクスチャ情報を付加し,より情報量の多い3次元環境地図を構築することが考えられる.そのほかの課題としては,エッジ追跡の精度向上や,エッジ情報とテクスチャ情報を利用して物体認識などに発展させることなどが考えられる.

謝 辞

本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金若 手研究 (B) 20700184 の補助を受けた.

文 献

- 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 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.



Fig. 12 Actual Image (Outdoor)



Fig. 13 Input Image (Outdoor)



(a) Bird's-Eye View



(b) Top

Fig. 14 Measurement Results of Outdoor (Point-based)



(a) Bird's-Eye View



(b) Top

Fig. 15 Measurement Results of Outdoor (Edge-based)

- (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.
- (8) T. Harada, A. Yamashita and T. Kaneko: "Environment Observation by Structure from Motion with an Omnidirectional Camera", *Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology 2006*, pp. 169-174, 2006.
- (9) 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.
- (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) G. Schindler, P. Krishnamurthy and F. Dellaert: "Line-Based Structure from Motion for Urban Environments", *Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 846-853, 2006.
- (12) P. Smith, I. Reid and A. Davison: "Real Time Monocu-



(a) Bird's-Eye View



(b) Top

Fig. 16 Combination Results of Outdoor

lar SLAM with Straight lines", *Proceedings of the 17th British Machine Vision Conference*, pp. 17-26, 2006.

- (13) L. A. Spacek: "Edge Detection and Motion Detection", *Image and Vision Computing*, Vol. 4, Issue 1, pp. 43-56, 1986.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) K. Nakayama and G. Silverman: "The Aperture Problem

 II. Spatial Integration of Velocity Information Along Contours", *Vision Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 747-753, 1988.
- (17) 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.