

単眼全方位カメラ搭載移動ロボットによる 3次元エッジ点からの平面推定に基づく静止障害物回避

○ 渡辺 和史 (静岡大学), 川西 亮輔 (静岡大学), 山下 淳 (東京大学),
金子 透 (静岡大学), 浅間 一 (東京大学)

Obstacle Avoidance Based on Plane Estimation from 3D Edge Point by Mobile Robot Equipped with Omni-directional Camera

○ Kazushi WATANABE (Shizuoka University), Ryosuke KAWANISHI (Shizuoka University),
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), Toru KANEKO (Shizuoka University),
Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract: In this paper, we propose a method for a mobile robot to avoid obstacles in its environment using an omni-directional camera. The method makes an environment map consisting of 3D edge points from omni-directional camera images and estimates the locations of planes by analysing these 3D edge points so that the robot can avoid walls as obstacles. The method has the advantage that it can generate a 3D map in environments constructed by textureless planes. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Navigation, Environment Recognition, Omni-directional Camera

1. 緒言

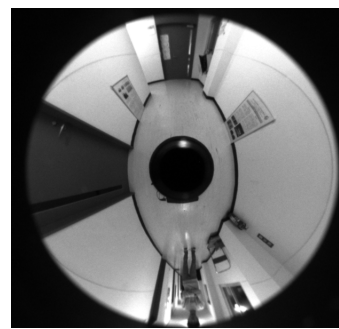
移動ロボットが自律的に活動する際に必要不可欠な機能として、目的地へ移動するための経路生成や環境中の自己位置推定などが挙げられる。未知環境においてロボットは環境地図を持たないため、ロボット自身が周囲環境を計測し、地図を生成する必要がある。一定以上の面積を持つ未知環境においては、ロボットは地図生成と生成された地図に基づく経路生成及び移動、自己位置推定を繰り返すことで広域に渡る環境地図を生成できる。よってロボットが未知環境で活動するためには、ロボットが自律的に走行しながら地図生成を行うための機能が必要である。

地図生成を目的とした環境計測を行うためのセンサとして、広い視野を持つ全方位カメラが考えられる(図1)。全方位カメラは、周囲360度を1枚の画像に撮像できるという特性により、環境計測に有効であることが示されている⁽¹⁾。

全方位カメラ搭載移動ロボットの未知環境における地図生成及び経路生成についての従来研究として、LRF, GPSなどのセンサを併用した手法がある⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。複数の



(a) Camera with a hyperboloid mirror.



(b) Acquired image.

Fig. 1 Omnidirectional camera and acquired image.

センサを併用して計測を行えば、全方位カメラのみを用いた場合と比較して精度良く密な計測結果を得ることができる。その結果、壁面や障害物を回避することができるため、未知環境で自律走行を行うことも可能である。しかし、複数のセンサを搭載するため、コストや重量が大きくなるというデメリットがある。

1台の全方位カメラだけをセンサに用いてロボットが未知環境を活動できれば、複数のセンサを併用した場合と比べてコストや重量といった面で大きなメリットがある。

実際に、地図生成及び経路生成に1台の全方位カメラ

のみを用いた手法も提案されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし1台の全方位カメラのみではテクスチャの少ない環境で密な環境地図を得ることが難しく、未知環境で自律的に走行することは困難であった。文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾でも、地図生成時におけるロボットの操作は手動で行っている。

ここで、テクスチャの少ない環境で得られた計測結果から密な3次元地図を復元する手法として、文献⁽⁷⁾がある。文献⁽⁷⁾では、ステレオカメラを利用した、高精度な3次元モデルを得ることを目的とした平面復元手法が提案されている。この手法では、画像エッジ点から復元された3次元エッジ点からなる環境地図を入力とし、その3次元エッジ点に矛盾なくフィットする平面群を求めることができる。しかしこの研究では、ロボットが平面推定の結果を利用して経路生成を行うことは想定されていない。

そこで本研究では、全方位画像列でエッジ点を追跡して生成した3次元地図から平面を復元することにより、ロボットの周囲に存在する特徴の少ない領域を3次元地図上で補完する。特徴の少ない領域を補完することで、テクスチャの少ない環境においても密な3次元地図を生成することができる。密な3次元地図を生成するため、ロボットは未知環境で事前に生成された地図を持たずに走行することができる。

2. 処理の概要

本研究で使用する全方位カメラは、ビデオカメラの前方に双曲面ミラーを取り付けたものを用いる (図 1(a))。このカメラで撮影した画像を図 1(b)に示す。カメラの内部パラメータおよびレンズの歪曲収差は、あらかじめキャリブレーションによって求める。

まず、3次元計測手法について概要を述べる (図 2)。全方位カメラは車輪型移動ロボットに搭載する。ロボットは常に移動し、同時にカメラは全方位画像列を取得する。一定距離移動した時点でロボットは移動と撮影を一時停止する。このとき提案手法によりカメラ運動の推定と3次元計測を行う。

次に、3次元計測結果からロボットの周囲に存在する平面領域を推定する。平面推定の結果から、ロボットから見て平面の存在しない方向を算出する。ロボットを算出した方向に転換させ、移動及び撮影を再開する。

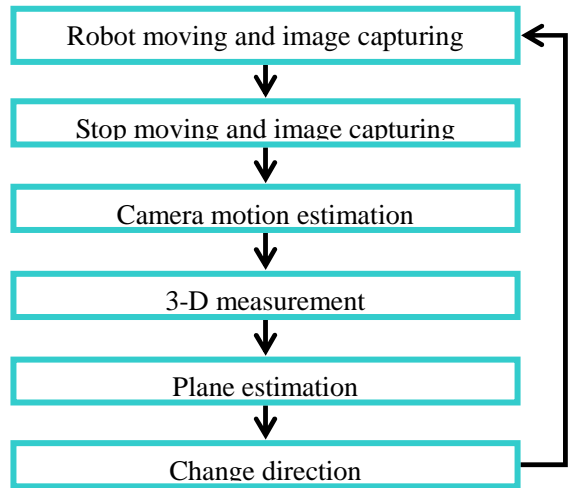


Fig. 2 Procedure of our proposed method.

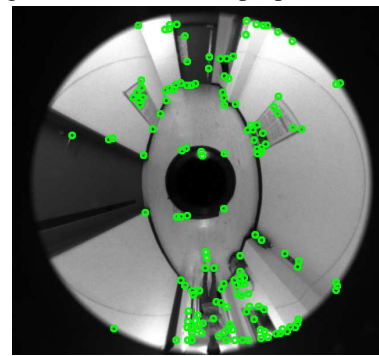


Fig. 3 Feature detection result.

上記の行動を繰り返すことにより、ロボットはテクスチャの少ない未知環境であっても自律的に移動、地図生成を行うことができる。

3. 環境計測手法

文献⁽⁸⁾の手法に基づき、1台の全方位カメラを搭載した移動ロボットを用いて Structure from Motion の枠組みにより環境計測を行う。

3.1 カメラ運動推定 本研究では取得した画像間で追跡された特徴点 (図 3) の対応関係を用いて 8 点法によるカメラ運動推定を行う。特徴追跡には KLT 法を用いる⁽⁹⁾。同時に RANSAC⁽¹⁰⁾により誤対応と判断される点を除去する。最終的にバンドル調整⁽¹¹⁾により再投影誤差を最小化する。このとき用いる画像対は、基点で取得した移動前画像と現在地点で取得した移動後画像である。

3.2 3次元計測手法 3次元計測では、推定されたカメラ運動を用いて追跡されたエッジ点の3次元計測を行う手法を用いる⁽¹²⁾。

エッジの追跡には、Canny オペレータ⁽¹³⁾によるエッ

ジ点検出を利用する。また、本手法は全方位画像を使用するため、エッジの追跡には全方位画像をパノラマ展開したものをを用いる。カメラから3次元空間中の点に向かう光線を光線ベクトル $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ とする。本研究で用いる全方位カメラはカメラ前方に双曲面ミラーを装着したものである。光線ベクトル \mathbf{r} は、双曲面のミラー側の焦点から3次元空間中の点へ向かう光線が双曲面上で反射する点へのベクトルで表せる(図4)。エッジ点の画像座標 $[u, v]^T$ から式(1), (2)により \mathbf{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 はレンズの焦点距離である。同じ追跡されたエッジ点について、2つのカメラからの光線ベクトルを算出し、交わる点を計測結果とする。

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

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

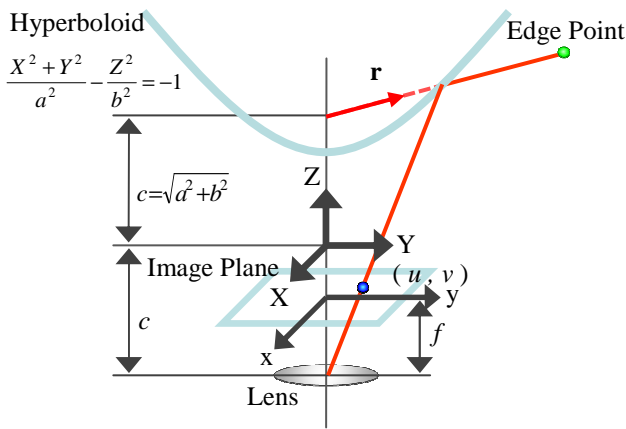


Fig. 4 3D measurement.

4. 平面推定手法

平面を推定する手法には文献⁽⁷⁾を用いる。文献⁽⁷⁾では、画像上に配置した多数の点がどの平面仮説に属するかを決めることで3次元平面を復元する。

はじめに、計測されたエッジ点のみからなるエッジ検出画像上に多数の点を配置する。画像上に配置した点をシード点と呼び、各シード点から全方向に伸ばした直線とエッジ点の交差する点をサポートエッジ点と呼ぶ。サポートエッジ点から3点をランダムに選択する

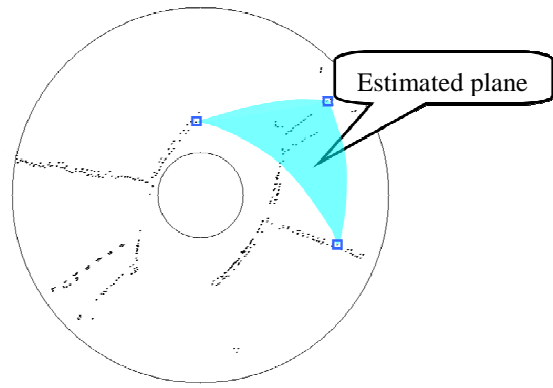


Fig. 5 Measured edge points and estimated plane.⁽⁷⁾

ことで、シード点ごとに平面仮説を多数生成する。多数の平面仮説をクラスタリングし、可視制約を適用することで実環境に矛盾する位置に存在する平面仮説を除外する。最後に、シード点ごとに残った平面仮説の中でエッジ点が最も多くフィットするものを1つずつ選択する(図5)。

このとき全方位画像を用いたことにより、3次元地図中でロボット自身を横断するような平面仮説が推定されることがある。また、ロボットが実際に移動した経路上に平面仮説が推定されることがある。しかし、上記のような平面仮説は可視制約によって除外されるため、問題とはならない。また、平面を構成する三点を選出する際には、全方位画像の歪みを考慮せずにシード点から直線を伸ばしている。しかし可視制約は3次元的に適用されるため、全方位画像の歪みを考慮して平面仮説を生成する必要はない。

5. 静止障害物の回避

ロボットは移動と撮影を同時に行い、一定の距離間隔で停止し、3次元計測と平面推定を行う。生成された3次元地図を用いて、ロボットから見て障害物が存在しない方向を算出する。

空き領域の算出には平面推定の結果のみを用いる。3次元地図上には誤検出された計測点が存在することがあり、誤った計測点を空き領域の算出に用いれば障害物の存在する方向を間違えて算出する恐れがある(図6)。そこで、本研究では計測結果から推定した平面のみを対象にして空き領域の検索を行う。

誤検出点は、正しく検出できた点と比較して3次元地図中で散在する。よって、誤検出点を含む平面仮説に

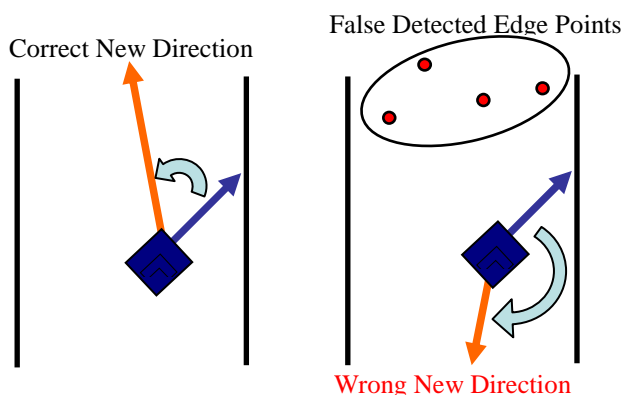


Fig. 6 Calculate wrong direction.

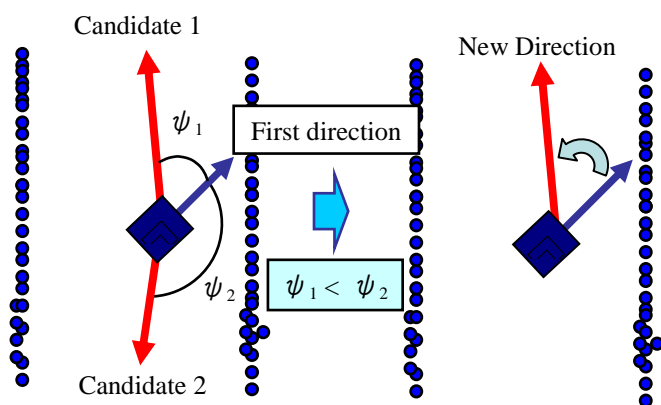


Fig. 7 Select a new direction from candidates.



(a) Experiment environment. (b) Mobile robot.

Fig. 8 Experiment environment and mobile robot.

フィットする計測点の数は、正しく計測できた点のみで構成される平面仮説にフィットする計測点の数より少なく、平面仮説として採用されにくい。平面推定の結果のみから空き領域を算出することで、誤検出された計測点を障害物の一部であると判定することを防止する。手順は以下の通りである。

地図上に出力された平面データは 3 辺を点群で表された三角形となっている。ここでは、まず推定された平面の辺を構成する点群全てに対してロボットの現在地から線分を結ぶ。このとき、点群の高さ方向のデータは考慮せず水平な 2 次元平面上で線分を結ぶ。2 次元

平面上で各線分ごとに両隣に存在する線分との角度を算出する。その中で、閾値以上の角度を持った角の二等分線を伸ばした方向を、空き領域の存在する方向であると判定する。もし平面の存在しない空き領域が複数存在する場合、全ての中心部についてロボットからの方向を算出し、現在の進行方向に一番近い方向を新たな進行方向として定める (図 7)。一定の距離間隔で停止する度に新たな進行方向を検討することで、ロボットと障害物との衝突を回避しながら未知である環境の地図生成を行うことができる。

6. 実験

実験は屋内の廊下で行った (図8(a))。実験に用いた全方位カメラ搭載移動ロボットを図8(b) に示す。実験で使用した車輪移動ロボットには全方位カメラを1台搭載し、行動パターンは前進 (直線運動)、旋回の2種類である。ただし、旋回は進行方向に障害物が存在すると判断したときの方向転換に用いるのみであり、前進は直線運動のみで行う。

実験環境 (図8(a)) における3次元計測結果を図9に示す。図中、三角形で表されている箇所がロボットの初期位置である。初期位置の三角形と線分でつながれた四角形が、移動後のロボットの位置を表すものである。その周囲に存在する点群が計測されたエッジ点を表すものである。

実験環境 (図8(a)) とエッジ点の計測結果 (図9) を比較してみると、計測データは実際の環境における一部しか復元できていないことがわかる。仮にエッジ点のみのデータを用いて5章の手法を適用したとすれば、本来平面が存在する領域も空き領域であると判定され、ロボットが壁面と衝突するような方向に向きを変えてしまうことも考えられる。

図10では、図9の計測結果を用いてロボット周囲の平面を推定した結果と、推定した平面から算出したロボットの進行方向を表す。平面はそれぞれが各辺を点群で描いた三角形で表されている。図中、黄色で表された点群が三角形の集合になっており、平面の位置を示している。四角形から伸びる矢印が、平面の位置から算出したロボットの進行方向である。

図10より、図9のエッジ点データから平面を復元した

結果として密な3次元地図を得られていることがわかる。計測結果における側面からので表されたロボットの移動後の視点(図10(c))が, 図8(a)の実験環境とほぼ同じアングルである。図10より, 実際の環境と近い部分で壁面を復元できていることがわかる。密な3次元地図を得ることができたため, 壁面と衝突しないような方向にロボットが方向を転換できている。これにより, テクスチャの少ない環境でもロボットは自律的に地図を生成し, それを用いて壁面との衝突を回避しながら移動することができる。

7. 結言

本論文では, 単眼全方位カメラ搭載車輪移動ロボットによるテクスチャの少ない未知環境での静止障害物の回避手法及び密な3次元計測手法を提案した。提案手法により, 従来は1台の全方位カメラのみでは困難であったテクスチャの少ない未知環境におけるロボットの自律走行が可能である。

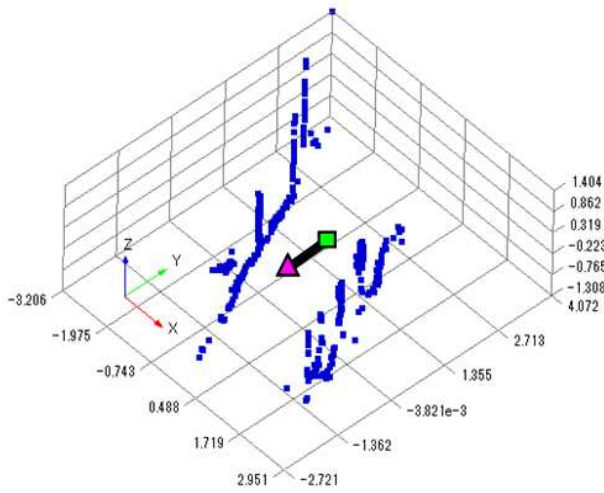
今後の課題としては, 動物体が存在する環境でのナビゲーションや, 平面以外で構成された障害物の回避が挙げられる。

謝辞

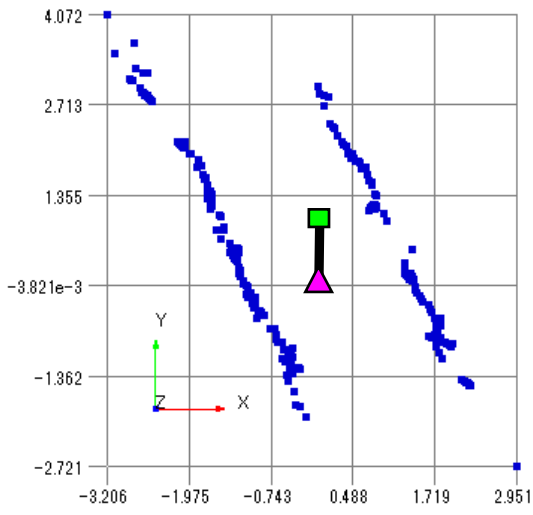
本研究の一部は, 科研費若手研究(A)22680017の助成を受けたものである。

参考文献

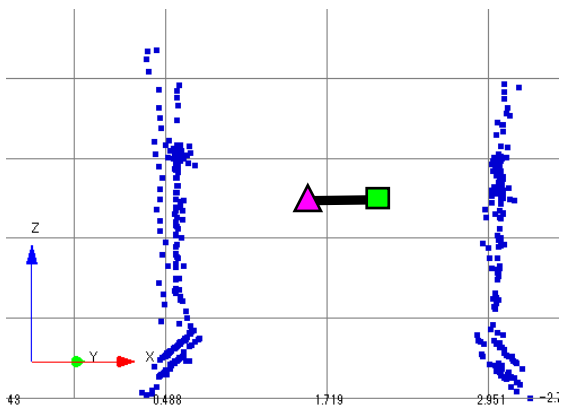
- (1) C. Geyer and K. Daniilidis: "Omnidirectional Video", *The Visual Computer*, Vol. 19, No. 6, pp. 405-416, 2003.
- (2) C. Wang and C. Thorpe: "Simultaneous Localization and Mapping with Detection and Tracking of Moving Objects", *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2918-3004, 2002.
- (3) 三浦純, 白井良明: "不確かさを考慮した移動ロボットのための視覚とそのプランニング", 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, CVIM 8, pp. 37-50, 2003.
- (4) 荒木天外, 竹村憲太郎, 怡土順一, 松本吉央: "汎用三次元環境地図を用いた移動ロボットナビゲーションのための地図生成", 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 1, pp. 106-111, 2010.
- (5) 森岡博史, 李想揆, N. Tongprasit, 長谷川修: "人の多い混雑な環境下でのSLAMによる移動ロボットのナビゲーション", 第28回日本ロボット学会学術講演会, 1Q3-6, pp. 1-4, 2010.
- (6) 岩佐英彦, 栗飯原述宏, 横矢直和, 竹村治雄: "全方位画像を用いた記憶に基づく位置推定", 電気情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J84-D-II, No. 2, pp. 310-320, 2001.
- (7) 友納正裕: "テクスチャの少ない環境におけるステレオカメラによる平面復元", 第16回ロボティクス・シンポジウム予稿論文集, pp. 463-468, 2011.
- (8) R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko: "Three-Dimensional Environment Model Construction from an Omnidirectional Image Sequence", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 21, No. 5, pp. 574-582, 2009.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: "Bundle Adjustment - A Modern Synthesis", *Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice*, Springer-Verlag LNCS 1883, pp. 298-372, 1999.
- (12) M. Tomono: "Dense Object Modeling for 3-D Map Building Using Segment-based Surface Interpolation", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2609-2614, 2006.
- (13) 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.



(a) Bird's eye view.

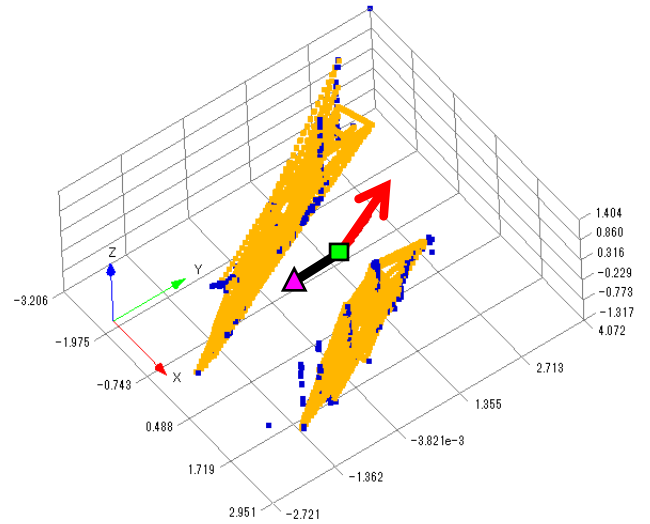


(b) Top view.

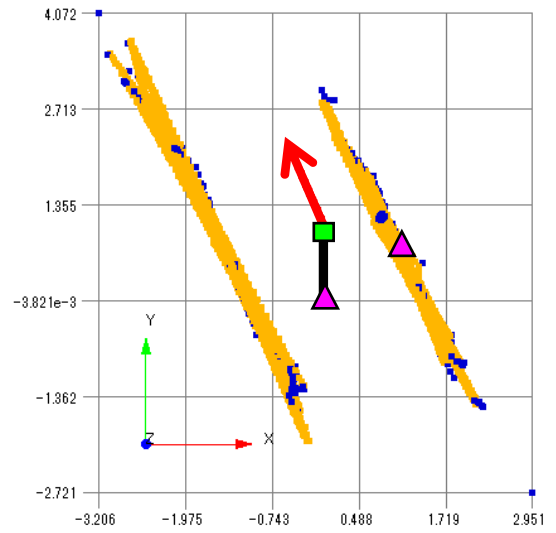


(c) Side view.

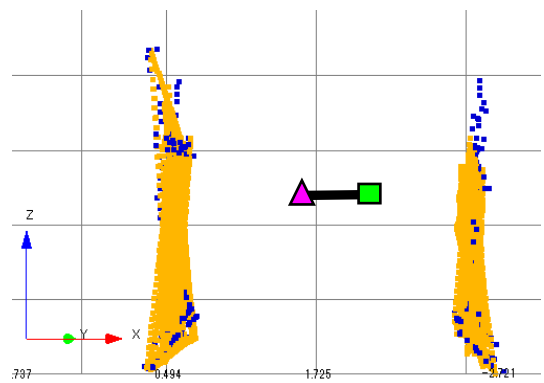
Fig. 9 Measuring result (straight path).



(a) Bird's eye view.



(b) Top view.



(c) Side view.

Fig. 10 Result of plane estimation and calculated direction (straight path).