

平面の検出に基づく室内の復元

星野 准一 植村 哲也 増田 功

セコムIS研究所

室内の枠組を構成する平面を簡便に検出することにより、3次元復元を行う手法を提案する。グリッド光の投影像から面の位置と傾きを計測し、投影像と室内画像との融合を行い平面の連続性を判定する。平面の隣接関係を、投影像から求めた不連続度と空間的な位置関係から分類し、階層的に管理されたグラフで記述することにより、ドアと壁面のような2次元的な関係と空間的な構造の区別を容易にする。本手法では、連続した大きな平面を基に復元を行うため信頼性が高まるとともに、各面を並列に計測できるため高速化が容易である。

Reconstruction of an Indoor Scene by Detecting Planar Surfaces

Jun'ichi Hoshino Tetsuya Uemura Isao Masuda

SECOM Intelligent Systems Laboratory

6-11-23, Shimorenjaku, Mitaka-shi, 181, Japan

A new technique is presented for the reconstruction of a 3D indoor scene by detecting planar surfaces. Stable planar surfaces are extracted by integrating the projection image of a grid and an indoor intensity image, and their positions and orientations in 3D space are measured. The detected planar surfaces are processed using the multi-layered graph, and the relations between the surfaces are described. Detection of the planar surfaces is easily executable in parallel, because of which rapid and reliable reconstruction of the indoor scene can be achieved.

1. はじめに

室内3次元モデルの自動作成は、各種シミュレーション、3次元CADの入力、移動ロボットの環境地図作成などへの応用が考えられるため、盛んに研究が行われている[1][2][3]。このような応用面からの要件として、復元の精度のみでなく、実際の室内の環境をできるだけ変えずに安定に復元を行うこと、高速化が容易であることが挙げられる。

3次元復元に関しては、エッジを検出して断片的な線画から立体を構成する手法がよく使われている。例えば室内に関しては、単眼で得た画像から構造線を検出して、モデルを当てはめる方法[2]、屋外ではステレオ写真を使った建造物の復元[5][6]などが提案されている。しかし通常の室内では、構造を決定する重要な境界線が、障害物のために遮られたり、壁面など同じ色の面で構成されているため画像からは検出できない場合が多い。また断片的なエッジにモデルを当てはめる場合でも、1シーン中の物体の数が増えるにしたがって組み合せの数が増大する。

我々は室内復元の信頼性を高め、簡易化、高速化を図る試みとして、室内の枠組を構成する平面を直接検出することを提案している[7]。室内を構成する平面を決定するためには、個々の点での奥行きや傾きだけでなく、空間内で孤立した面の領域も求める必要がある。アクティブセンシングによる計測では、time-of-flight法[4]、光切断法[17]が代表的であり[18][19]、各種の高速化手法[10][11]などが検討されているが、いずれも奥行きの計測に焦点が当てられている。面の領域を決定するには、まばらなデータの曲面近似やセグメンテーションを行うなどの処理が必要であり、後の処理の部分に負担がかかる。さらに、ドアや窓のように境界で奥行きの差がほとんどない面は検出できないという問題点がある。

本稿ではグリッド光による投影像を使い計測した平面のパラメーターと画像情報を融合し、平面検出の高速化を図るとともに、奥行きの変化がない平面も検出する。グリッド光を使った面の傾きの計測に関しては、グリッド光がカメラのYZ面に平行と限定した場合[8]、あるいは平行グリッド光でかつグリッドの間隔が既知の場合[9]について提案されているが、平行光源のためパターンを照射できる範囲が限定され広い室内をカバーするのは難しい。そこで、2.では任意の位置と傾きを持つスリット光で構成されたグリッド光を使い、平面の3次元空間内の位置と傾きを計測する手法について述べる。また3.で投影像と写真情報との融合による平面領域の決

定について、4.で平面の空間的な関係の分類と、管理方法について述べる。最後に、本手法を用いて室内の復元を行った例を示す。

2. 平面の計測

グリッド光を投影したときの交点近傍の領域について、空間内での位置と傾きを計測する。また、画像面内で多数の平面を効率よく検出するための手法について述べる。

2-1. 位置と傾きの計測

グリッド光を投影し、投影像を光源とは別の位置から一台のカメラで観測する。ある交点の近傍領域 Γ を取り出したときの幾何学モデルを図1に示す。カメラの座標系を oxy とし、カメラに対する位置と傾きが既知であるグリッド光の光源の座標系を $o'x'y'z'$ とする（座標系 $o'x'y'z'$ は直交座標系とは限らない）。グリッド光の垂直面の法線を x' 、水平面の法線を y' とし、これらの投影像をそれぞれ $L1, L2$ とする。 P は Γ 上にある $L1$ と $L2$ の交点、 N は P における Γ の法線である。 U, V を画像平面上に投影された $L2, L1$ の各単位方向ベクトル、 W を画像面上の交点方向の単位ベクトルとすると、 N は次式で表される。

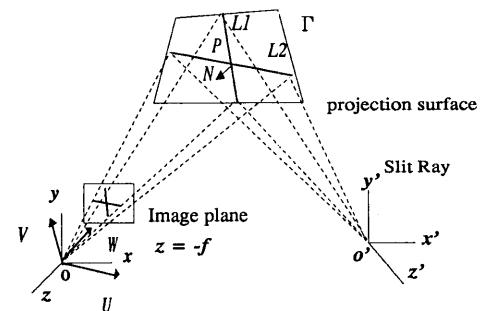
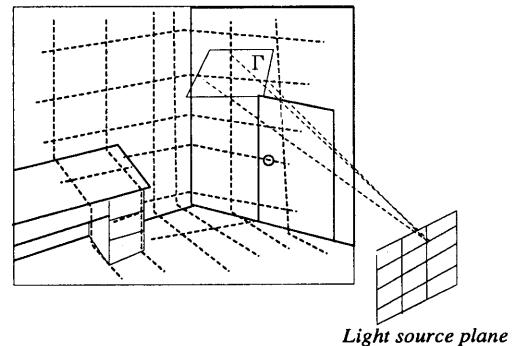


図 1 幾何学モデル

$$N // \{x' \times (V \times W)\} \times \{y' \times (U \times W)\}$$

$$= \{(x' \cdot W)V - (x' \cdot V)W\} \times \{(y' \cdot W)U - (y' \cdot U)W\} \quad (1)$$

ただしグリッド光がカメラのレンズ中心 o を通る場合を除く。
(証明) $L1, L2$ を $L1, L2$ に沿った単位方向ベクトルとすると,
 $N \perp L1, L2$ かつ, $L1 \perp x'$, $(V \times W)$, $L2 \perp y'$, $(U \times W)$ より.

また交点 P は kW と置いて、縦方向のグリッド光の方程式、

$$x' \cdot (p - o') = 0 \quad (2)$$

$$p = (x, y, z)$$

に代入して求めると

$$P = ((x' \cdot o') / (x' \cdot W))W \quad (3)$$

である。

2-2. グリッド光の構成

室内に n, m 本の縦、横方向のスリット光で構成されたグリッド光を投影したとする。 $n \times m$ 個の交点近傍の領域に対して、上記の手法で面の位置 P 、法線 N を求める。

平面の位置と傾きを計測するためには、投影像からグリッ

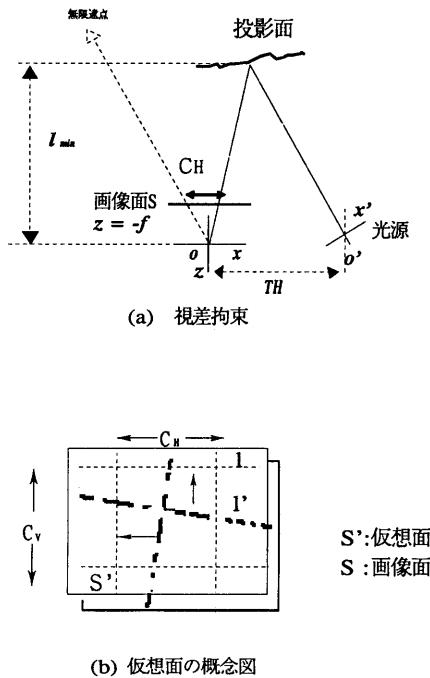


図2 グリッドの管理

ドを構成する各線分の区別を行うとともに、画像面上での交点の位置を求める必要がある。一般的に線分を区別するためには符号化[8][14][15]を利用してラベル付けを行い、画面上をサーチして交点を見つける[9]などの作業が必要である。しかし、これらは計算時間の増大の原因となるだけでなく[13]、ノイズの為に交点の近傍がつながっているとは限らないため信頼性に欠ける。

この問題を画像面 S とおなじ位置に仮想的な面 S' を考え、 S' 上で投影像を管理することにより解決する。仮想面 S' 上で各スリット光の無限遠点での位置を予め計算しておく。投影像の変位は、図2(a)のように投影面までの最短距離を l_{min} 、各スリット光の座標系原点までの距離を T_H, T_V 、焦点距離を f とすると、エピポーラ線上での最大幅 C_H, C_V は視差拘束により

$$C_H = f T_H / l_{min} \quad (4)$$

$$C_V = f T_V / l_{min} \quad (5)$$

と限定される。よって画像面 S 上の投影像の点列は、図2(b)のような幅が C_H, C_V の S' の格子上の各点に一对一に写像することができる。 S' 上の各点が、対応する S 上の点の位置を持つことにより、ラベル付けを行うことなく投影像を区別でき、複数のプロセッサの割り当ても容易になる。交点の正確な位置は直線を当てはめて計算から求める。

3. 平面領域の抽出

交点近傍の領域を考えたとき、通常の室内ではパターン光の投影像と室内画像のどちらか片方では、連続した平面か判定できない場合が多い。例えばドアと壁面のように奥行きの変化がほとんどない、あるいは壁面のように同じ色の面から構成されていて明度の変化がほとんど認められない領域がある。本稿では、グリッドの投影像から計算した不連続度と画像の両方から平面の連続性を判定して領域を決定する。

3-1. 投影像を使った不連続の定量化

グリッドを構成する線分 $L1, L2$ の画像面 S 上での形状は、グリッドの近傍領域 Γ が平面のとき直線となり、空間的な不連続があったとき折れ曲がるか切断される。2次元平面上で直線を

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (6)$$

で表し、直線パラメータ ρ 、 θ から面の連続性を間接的に判定する。この判定の基準は、ざらざらした面にパターン光

が当った場合の細かい揺らぎ、あるいは突発的なノイズに左右されない必要がある。

領域 Γ 内で L_1 を構成する各点から2点 (x_i, y_i) , (x_j, y_j) を取りだし $\{\rho_{ij}\}$, $\{\theta_{ij}\}$ を求める

$$\rho_{ij} = (x_i y_j - x_j y_i) / \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7)$$

$$\theta_{ij} = \tan^{-1}((x_i - x_j) / (y_i - y_j)) \quad (8)$$

となる。 $\{\rho_{ij}\}$, $\{\theta_{ij}\}$ のヒストグラムをそれぞれ作り、各ヒストグラムを2つのクラスに分けたときの分離度を λ_1 , λ_2 とする(図3)[20]。そのときに、投影像から求めた領域 Γ の不連続度を d を、

$$d = 1 - \lambda_1 \cdot \lambda_2 \quad (9)$$

とする。以上の処理を画像面 S 内の $m \times n$ 個のグリッドの交点近傍の領域の集合 $R_d = \{r_k | k=0, 1, \dots, n \times m - 1\}$ についてについて行った結果を d_k とする。以上で R_d 内の領域は、属性として不連続度 d_k に加えて、3次元空間内での法線 N_k , 位置 P_k を持っている。

3-2. 画像情報との融合

1) まず、室内画像を小領域に分割したときの、小領域内の階調値の分散を σ_k とする。しきい値を th とするとき、 $\sigma_k < th$ の領域を面とみなし領域分割を行った結果、領域の集合 $R_o = \{r'_k\}$ を得る。

2) 投影像から求めた領域の集合 R_d と R_o を重ね合わせる。 R_o 内のある領域 r'_k 内の不連続度 d_k が観測誤差以上の場合、3次元内では違う面から構成されていると考えられる。 d_k は交点近傍での領域に関して求めているので、境界の位置は正確には求らない。そこで、空間内で交線を求めて透視変換を行い、 R_d 内で不連続と判断する領域のみを強制的に切断する

(図4)。 R_o を初期値として全ての領域についてこの操作を行い得られた領域の集合を $R = \{r_i\}$ とする。

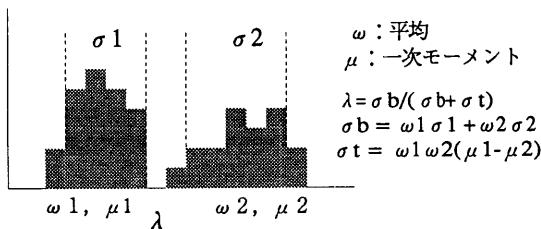


図3 不連続の定量化[20]

4. 室内構造の復元

領域の集合 R_i を組み合せて局所3D空間の復元を行う。まず、画像面上での R_i の隣接関係を求め、面の位置関係を基に分類する。結果を階層的に管理されたグラフで表現し、構造線の復元を行う。

4-1. 2次元平面上の隣接関係

画像面 S 上の領域 $r_i \in R_i$ とある点 p に対して、最短距離 $d(p, r_i)$ を

$$d(p, r_i) = \min d(p, q) \quad q \in r_i \quad (10)$$

と定義する。そのとき r_i のボロノイ領域は、

$$V(r_i) = \{p \in S | d(p, r_i) < d(p, r_j) \quad \forall j \neq i\} \quad (11)$$

である(図5)。全ての領域に関してボロノイ領域を求めた結果、境界線を共有する2つの領域を、隣接していると見なす[16]。隣接している2つの領域 r_i, r_j の関係を枝 e_{ij} で表し、枝の集合を $E = \{e_{ij}\}$ とするとき、領域 R_i の隣接関係は平面グラフ $G = (R_i, E)$ で表すことができる。

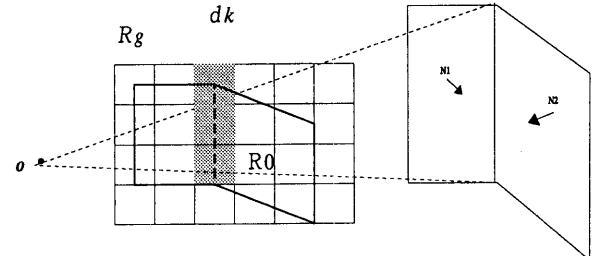


図4 領域の切断

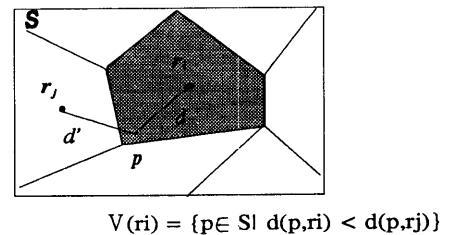


図5 ボロノイ図の定義

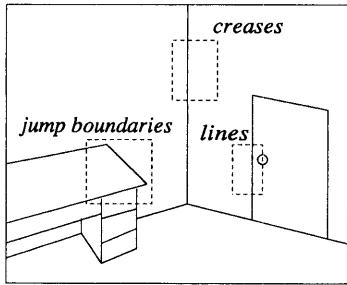


図6 隣接関係の分類(1)

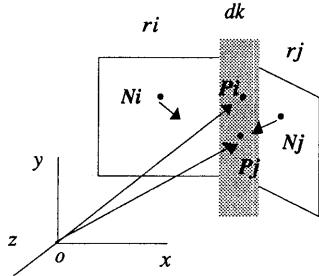


図7 隣接関係の分類(2)

4-2. 隣接関係の分類

r_i 内の全ての領域 r_i に関して、 r_i と隣接した領域に対して不連続度と平面の位置、傾きから境界の種類を判定する。本稿では、室内を構成する平面の隣接関係を図6のように3種類に分類する。

A) 折れ目 (Creases)

壁面と床の境界など、連続しているが面の方向が不連続になっている部分。

B) 段差境界 (Jump boundaries)

机と床の境界など、面の奥行きが不連続になっている部分。

C) 面内境界 (Lines)

奥行きや傾きの不連続はないが、画像からは境界としてみとめられる部分。ドアと壁面の境界など、室内を構成する単位としては違う面と考える。

r_i と r_j の境界 $e(r_i, r_j)$ において、その近傍領域のグリッド像から判定した不連続度を d_k とする。図7に示すように、隣

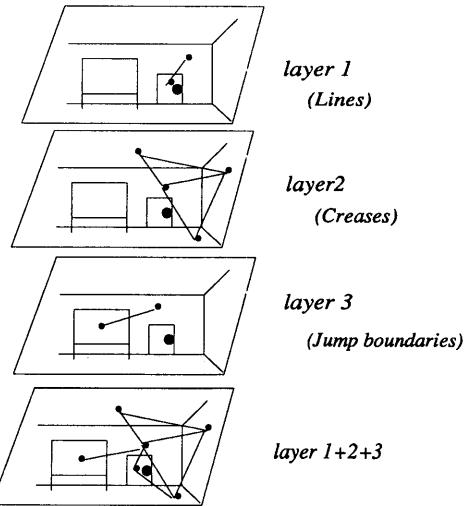


図8 隣接関係をLayerを使って表した例

接した領域の境界付近の位置 P_i , P_j , 法線 N_i , N_j と、位置、傾き計測の誤差分布関数 f_{ϵ_1} , f_{ϵ_2} を使い、2つの平面の位置と傾きの一一致度 ϵ_1 , ϵ_2 を求める。

$$\epsilon_1 = f_{\epsilon_1}(l_z \cdot (P_i - P_j)) \quad (12)$$

$$\epsilon_2 = f_{\epsilon_2}(N_i \cdot N_j) \quad (13)$$

ϵ_1 , ϵ_2 と投影像から判定した不連続度 d_k から、隣接関係が折れ目(creases), 段差(jumps), 面内境界(lines)である確率 $P(A/X)$, $P(B/X)$, $P(C/X)$ を次のように求める。

$$P(\omega/X) = \frac{P(X/\omega)}{P(X/A) + P(X/B) + P(X/C)} \quad (14)$$

$$P(X/A) = d_{ij} \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) \quad (15)$$

$$P(X/B) = d_{ij} (1 - \epsilon_1) (1 - \epsilon_2) \quad (16)$$

$$P(X/C) = (1 - d_{ij}) \epsilon_1 \epsilon_2 \quad (17)$$

ただし、 $\omega = \{A, B, C\}$ である。

4-3. 平面の管理

グラフ G は壁面、床などの面の関係のほかに、壁面とドアなどの2次元平面上の関係も表している。室内環境の認識やナビゲーションの際には段差境界(jump)や面内境界(line)のような情報が必要であるが、3次元の構造を復元するときに面の交線として計算できるのは折れ目(crease)しかない。こ

これらの区別を容易にするために, *Layer*という概念を導入する。グラフ G において各ノードは属性として位置 P を持ってい る。ある領域 r_i ($i=0, 1, \dots, I$) 内にあるノードによる, G の部分グラフを G_i とするとき, *Layer*を次のように表す。

$$\text{layer} = (\sum G_i, P) \quad (20)$$

layer1,2,3 にそれぞれ面内境界(*lines*), 折れ目(*crease*), 段差境界(*jumps*)を割り当て, 上位の *layer*にあるノードを下位の *layer*に継承するときに G^i をマージする。例えば図9で *layer1* で r_1 と r_2 の境界が, 面内境界であると判断された場合, *layer2* では r_1 と r_2 をマージして新しく r_1' を生成する。このとき r_1' の隣接する面は r_1, r_2 を部分グラフとするカットセットから求めることができる。これらの処理の結果, *layer2* は壁面と床などの室内の枠組を構成する面の, 3次元空間内での連結関係を示している。また, *layer3* に表れているノードは, 机, 黒板など単体で存在し, 周囲とのつながりを持たない平面を示している。

構造線を復元する場合は, *layer2* の上にある面の境界を計算により交線を求め, その他の *layer* の境界は画像中の領域の境界を近似して求める。このときに3つの線分が交わっている交点は, 誤差のため必ずしも一点で交わらない。そこで図11のように, ある3つのノードをとったときに, *layer2* 上で閉曲線をなしているところに交点があることを利用して一致させる。

5. 実験

パターン光の光源としてHe-Neレーザーを使用する。投影像はCCDカメラを使って撮影され, 512×512画素, 256階調に量子化される。各スリット光の位置, 角度の読み取り精度はそれぞれ1mm, 0.1度である。ピークを検出して2値化を行い, Hough変換を使って仮の直線を当てはめた後に, 近傍の点列について最小2乗近似を使い正確な直線を当てはめる。

まず, 平面計測の原理の確認を行うために, あらかじめ位置と傾きが既知である面に投影して計測を行った。投影面までの距離を4m一定に保ち, -61~+61度の範囲でz軸となす角度を変化させて測定を行った結果を図11に示す。誤差の平均は0.81度, 標準偏差は0.43度である。また投影面の角度を一定に保ち, z軸方向に2.9~4.7mまで30cmづつ移動させて測定を行ったときの結果を図12に示す。誤差は0.4~2.3%, 平均1.2%, 標準偏差は6.63cmである。誤差の要因は面の実測の誤差, カメラと光源の設定誤差よるところが大きいが, その

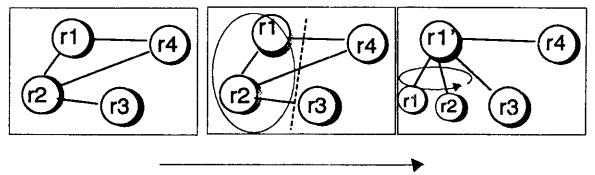


図9 グラフの変換の例

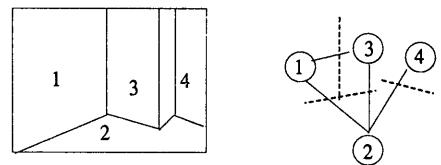


図10 Layer2上のグラフとエッジの関係

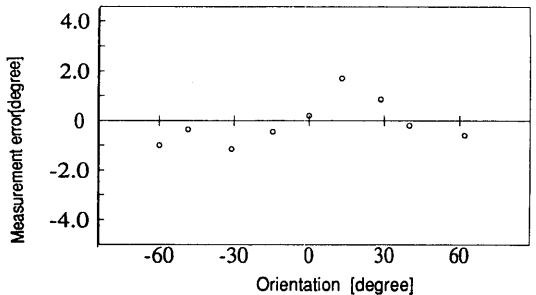
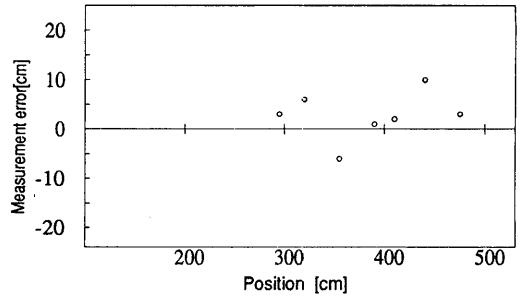


図11 傾き計測の実験結果



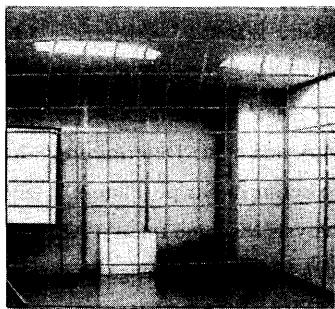


図13 室内の情景と投影像



図14 平面を検出した結果

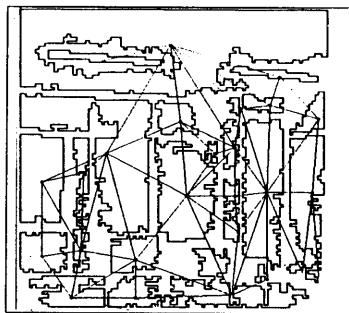


図15 2次元の隣接関係を求めた結果

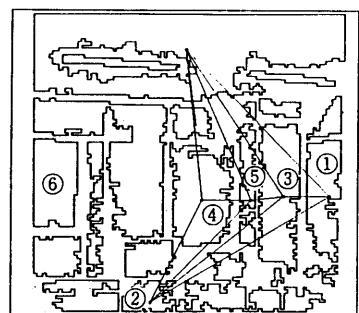


図16 Layer2のみを表示した結果

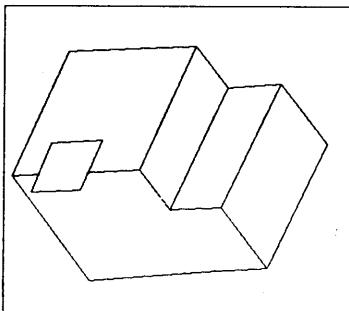


図17 構造線を復元した結果

ほかに画像面上の歪みなども考えられる。

次に、室内にグリッド光を投影し、復元を行った例を示す。便宜的に、通常の照明環境のもとで室内画像を撮影し、同じカメラの位置で、室内を暗くして投影像の撮影を行った。図13に室内画像と投影像を重ね合わせたところ、図14に平面を検出した結果を重ね合わせたところを示す。奥行きの変化がない面も検出できていることが分かる。図15,16,17に隣接関係を求めた結果、layer2のみを表示した結果、構造線を復元

した結果を示す。室内の枠組を復元するために、面積の大きい領域のみを使用して構造線を求めた。図16のlayer2では床②に対して壁面①③④⑤が連結している。⑥と④の面は空間的に平行なため連結されていない。また、図17から障害物が多い場合でも室内の構造を復元できることが分かる。

6. おわりに

本稿では、平面の簡易検出に基づく、室内の局所3次元復元について述べた。グリッド光の投影像と室内画像を融合し、壁面、床などの室内の枠組を構成する平面を検出するとともに、検出した面の空間的な関係を使い、室内構造の復元を行った。本手法は次のような利点を有する。

- 1) 任意の傾きを持った光源で構成されたグリッド光を使い平面の計測を行うため、室内の広い空間でも測定を行うことができる。
- 2) 投影像を仮想面で管理するため、投影像のラベルづけや、交点を見つけるためのサーチが不要である。
- 3) 安定な平面だけを使うことができるため、照明などのノ

イズや、細かい障害物に強い復元が可能である。

4) 投影像と室内画像の利点を融合することにより、写真から検出できない面の不連続と、ドアなど奥行きの変化がない面の不連続の検出を行う。

5) Multi-layerによる平面の管理を行っているため、平面の関係を容易に記述できる。

今後は、投影像の取り込みの高速化を行うとともに、計測精度を更に高めていく予定である。

謝辞 日ごろ御指導いただきセコムIS研究所橋本新一郎所長に感謝致します。

参考文献

- [1] T.Uemura, A.Suizu, M.Drumm, I.Masuda: "An approach for Floor plan Generating System from Multiple Stereo Image", Proc. of Intl.Workshop on the Ind. Appl.of Machine Intl. and Vision pp.106-111,1989
- [2] T.Tsukiyama, J.Sato: "Incremental Reconstruction of a Scene Model for Mobile robots from a Sequence of Monocular Images", Proc. IEEE Int. Workshop Intell. Robots and Systems, pp.665-670, 1988
- [3] N.Ayache,O.D.Faugeras:"Maintaining representations of the Environment of a Mobile Robot", IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.5 No.6 pp.804-819,1989
- [4] M.Hebert et al:"3D Vision Techniques for Autonomous Vehicles",Technical report CMU-RI-TR-88-12,Carnegie Mellon University, 1988.
- [5] M.Herman, T.Kanade: "Incremental Reconstruction of 3D Scenes from Multiple Complex Images", Artificial Intelligence 30, pp.289-341, 1986
- [6] E.L Walker, M.Herman:" Geometric Reasoning for constructing 3D Scene Descriptions from image", Artificial Intelligence 37, pp.275-290, 1988
- [7] 星野, 植村, 増田：“平面の検出による局所3D空間の再構成”，電子情報通信学会春季全国大会，D-573, 1990
- [8] 葉, 藤村, 山田：“直交格子光源の光源による鏡面多面体の形状測定”，計測自動制御学会論文集, Vol.25,No.11, pp.97-99, 1989
- [9] N. Shrikhande, G. Stockman:"Surface Orientation from a Projection Grid",IEEE Trans.Pattern Analysis. Machine Intell., PAMI-11-6, pp.650-655, 1989
- [10] T.Kanade et al:"A VLSI Sensor Based Rangefinding System", 5th Int. Symp. Robotics Res.,pp.28-31,1989
- [11] T. Yoshimi, M. Oshima: "Multi Light Sources Range Finder System",Proc.IAPR Workshop on C.V., pp.245-248, 1988
- [12] 森田、佐藤他：“多値M配列パターン投影法を用いた3次元物体形状の再構成について”,第4回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.247-252,1988,
- [13] M.Asada et al:"Determining Surface Orientation by Projecting a Stripe Pattern", IEEE Trans. Pattern Analysis. Machine Intell.,PAMI-10-5,pp.749-753,1988
- [14] 田島：“Rainbow Range Finderによる距離画像取得”，情処研報 CV44-3, 1986
- [15] K.L.Boyer, A.C.Kak:"Color-Encoded structured Light for Rapid Active Ranging", IEEE Trans. Pattern Analysis. Machine Intell., PAMI-9-1, pp.14-28,1987
- [16] 間瀬, 鳥脇, 福村：“拡張されたデジタルボロノイ線図とその画像処理への応用”,信学論(D), 1981, J64-D, No.11,pp. 1029-1036
- [17] Y.Shirai, M.Suwa:"Recognition of Polyhedrons with a range finder",Proc. 2nd Joint Conf. on Artifical Intell.,pp.80-87,1971
- [18] J.L.C.Sanz et al: "Advances in Machine Vision", Springer-Verlag,1988
- [19] 井口：“最近の三次元画像センシング技術の動向”，第4回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集,pp.201-210, 1989
- [20] N.Otsu:" A thresold selection method from gray-level histograms",IEEE Trans. Sys.,Man & Cybern., SMC-9, p.62,1979