

三眼視の隠れエッジを利用したシーンの解釈

越後富夫

日本アイ・ビー・エム(株) 東京基礎研究所

ステレオによって得られた、シーンのエッジにおける疎らな三次元情報から、物体が存在することのない自由領域と、物体の可視面となる疑似平面を見出す方法を提案する。カメラから見て、三次元線分のどちら側に面が繋がるかは重要で、その問題の解決のため、ステレオにおける死角を利用する。三眼視では、三台のカメラから共通に見えるエッジと、少なくとも一台のカメラから隠れたエッジを選別することができる。本研究では、三眼視における隠れエッジを利用して、三次元線分の近傍に自由領域を見出し、三次元線分間が面で繋がらないことを明らかにする。また、その線分がカメラから見た境界線になることより、他方に面が存在する事を示す。

Inference of a 3D Scene Using Occluded Edges of Trinocular Stereo

Tomio Echigo

IBM Research, Tokyo Research Laboratory

5-19, Sanban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102, JAPAN

This paper describes a new approach in which a three-dimensional scene is segmented into free areas and object surfaces, using sparse data which are obtained from trinocular stereo and occluded edges which can not be seen from at least one of three cameras. The first step is to determine free areas in which there are no objects between the 3D edge segments and the cameras. In addition, the free areas can be expanded by using edges occluded from at least one of the three cameras. The second step is to determine object surfaces which can be inferred using occluded edges in trinocular stereo.

1. はじめに

物体認識や移動ロボットのナビゲーションにおいて、三次元情報は重要な手がかりである。三次元情報を得るために、ステレオ法は広く利用されているが、ステレオ法で得られるデータは、画像において明るさが急変するエッジから生成される三次元線分であり、シーンに紐状のデータが疎らに得られたに過ぎない。その線分は面に繋がるはずであるが、線分のどちら側が可視面であるか分からず、線分間の連結性も不明である。三次元線分は、(視点における)物体の境界線、面の接合線、物体の表面に描かれたマークと見なせるが、ステレオ法による疎らな三次元線分から、シーンを解釈するのは困難である。

RaoとNevatiaは [1],ステレオ法から得られた疎らな三次元線分の中から対称な組を見出し、一般化円錐を用いて、物体の量的な記述としてシーンを表現した。彼等の方法は、一般化円錐の母線となる三次元エッジを求めため、全てのエッジ線の対を作り、一般化円錐の母線として矛盾しないかを総当たりにチェックした。一般的なシーンでは、物体が重なり合っ見えることが多く、部分的に隠された物体の母線のエッジ線分の対を検出するのが困難である。Sugimoto等は [2],シーンの線分解を行い、閉ループを成すエッジ線分に向きを与えたとき、ステレオ法でオクルージョンを生じさせる境界線エッジを含むか否で物体面の解釈を行っている。しかし、彼等の方法は、閉ループを持つ完全な線画を必要とするため、実際の画像処理では適用が困難である。一方、Faugeras等は [3],移動ステレオで得られた疎らな三次元線分を、ドロネー網を用いて連結した。彼等の方法を用いると、自由空間と物体領域を知ることができ、しかも、ロボットが移動しながら獲得した新しい三次元情報を容易に更新できる。しかし、彼等の方法では、ロボットが細かく移動しデータを更新しながら、最終的に正確なシーンの再構成を行うことが本質的であるため、初期の結果では、連結不可能な三次元線分を連結することがある。

従来、シーンを解釈するアプローチは、三次元線分をどのように繋げるかに主眼が置かれていたが、本研究では、カメラと三次元線分の間どのような大きさの自由空間が広がっているかを探索する。次に、得られた自由空間を利用して、三次元線分に繋がる面がどちら側にあるか解釈している。三次元線分を得るために、本研究では、三眼視ステレオ法を用いた。二眼視ステレオは、対応点探索が重要な問題であるが、もう一台の(もう一方向からの)カメラを利用した三眼視では、冗長な幾何情報が、対応付けの必要条件として利用できるため、二眼視より対応決定に信頼性がある。さらに、三眼視の対応条件は三台のカメラから同時に見えるエッジだけに適用され、少なくとも一台のカ

メラから隠れたエッジは三眼視の対応から除かれるため、全てのエッジを、三台のカメラから同時に見えるエッジとそうでない隠れエッジに、容易に分類できる。

自由領域は、初めに、三眼視で対応付けられた三次元線分から生成し、次に隠れエッジを利用して拡張を行う。また、物体面の決定では、まず三眼視から得られた三次元線分を、隠れエッジを利用して、カメラから見た物体の境界線か否に分類する。その結果、決定された境界線の片側に、物体の可視面の候補を見出すことができる。さらに、線分の端点で連結する境界線から疑似的可視平面を決定する。

本研究で決定された自由領域は、移動ロボットでは、ロボットが移動可能な領域となり、カメラから見える物体面は、移動ロボットの障害物となる。また、複数の物体がカメラから重なって見えていたとき、自由領域は、手前の部品を後ろの部品から分離して認識するのに役立つ。またカメラから見える物体面は、部品の位置・姿勢を知るのに役立つ。

2. 三眼視の隠れエッジ

図1は、三眼視の対応の様子を示す。従来の研究 [4][5]でも示されている様に、三眼視では、真に対応する三本の視線が、シーンの一点で交わる。対応探索の過程では、図1のL, Rのカメラから得た画像における対応候補の視線の交点を求め、それを第三のカメラCの画像に射影したとき、射影点上にカメラCの画像のエッジが存在しなければならない。これが三眼視における幾何学的拘束であり、三台のカメラの関係が明らかとなるとき、必ず生ずる拘束である。しかしこの拘束条件だけでは一意の対応が得られず、偽の対応候補を生ずるため、エッジ線分の連続性、エッジ近傍の相関を利用して真の対応が求められることが報告されている [5][6]。三眼視ではシーンの状態に依存しない幾

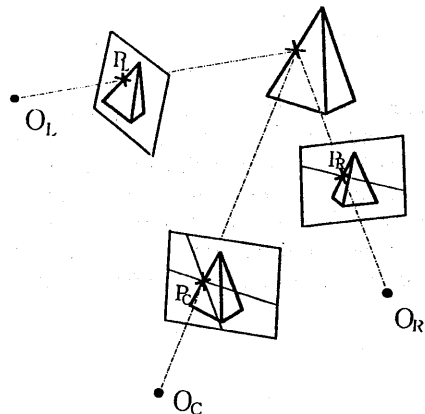


図1: 三眼視の幾何学的拘束

何学的拘束が利用できるので、二眼視より信頼性の高い対応関係を得ることができる。しかし、この拘束条件を利用できるエッジは三台のカメラから同時に見えるエッジだけであり、カメラから死角となる隠れエッジにはこの拘束は適用できない。即ち、多重対応を許さなければ、三台のカメラから同時に見えるエッジは、必ず三眼視の幾何学的拘束を満たさなければならない。したがって、全てのエッジから、三眼視の拘束で対応付けられたエッジを除くと、残りは少なくとも一台のカメラから見えない隠れエッジとなる。三台のカメラからは見えなくても、二台のカメラから見えるエッジは対応付けられると、三次元位置を求めることができるが、本研究では、これらのエッジも隠れエッジとして扱う。

3. 自由領域の決定

まず、三眼視で対応付けられたエッジ線分の三次元位置を求める。三台のカメラL, C, Rについて自由領域を決定する様子を図2に示す。カメラL, C, Rのレンズ中心 O_L, O_C, O_R は同一直線上にあるとし、3点を結ぶ基線を含む、任意のエピポーラ平面をシーンに生成する。エピポーラ平面と三次元エッジ線分の交点をA, Bとしたとき、カメラL, C, Rから見た像は、それぞれのエピポーラライン上に並び、それらを $\{a, b\}$, $\{a'', b''\}$ 及び $\{a', b'\}$ とする。この三枚の画像において、 $\{a, b\}$, $\{a'', b''\}$ 及び $\{a', b'\}$ がそれぞれ隣り合い(像a, bの間に三次元エッジが現れない)、かつ、その並ぶ順序が同じとき、それらの視線で囲まれる領域がエピポーラ平面上に得られる。

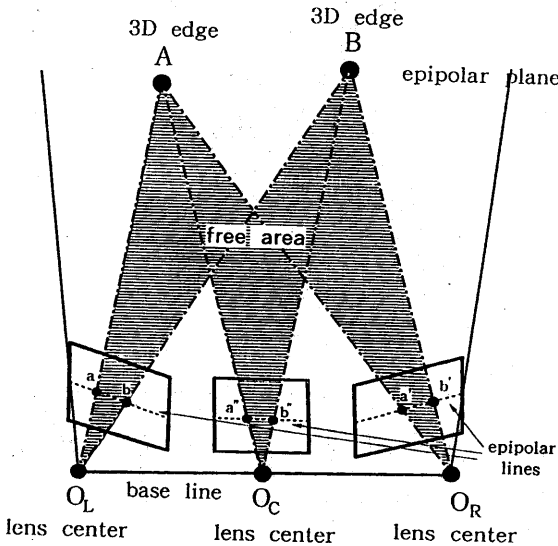


図2: 三次元エッジからエピポーラ平面上の自由領域の決定

(定理1) 三次元エッジA, B間に隠れエッジがない(A, Bを各カメラに射影した点の間に、他のエッジが存在しない)場合、自由領域として

$$\frac{(\Delta ABO_L \cup \Delta ABO_C \cup \Delta ABO_R) \cap (\Delta ABO_L \cap \Delta ABO_C \cap \Delta ABO_R)}{(\Delta ABO_L \cap \Delta ABO_C \cap \Delta ABO_R)}$$

が得られる。

〔証明〕カメラLにおいて、視線 $O_L A, O_L B$ に挟まれた領域に面が存在すると仮定する。カメラLから見た面の境界はエッジとなるため、三次元エッジA, Bの射影点間にエッジがない条件を満たすには、面の境界はカメラLの視線が挟む領域の外になければならない。そのため、視線 $O_L A, O_L B$ を横切らないためにはエッジA, Bを繋ぐ面より後方になければならない。したがって仮想面ABより前方は自由領域となる。

同様にして、カメラC, Rでも仮想面ABより前方は自由領域である。ただし、仮想面ABがとる限界は、視線 $O_L B, O_R A$ を接線とする曲面である。

次に、一台のカメラLから見た三次元エッジA, Bの射影点間に隠れエッジXが存在する場合について考える。

(図3) エッジXは三眼視の対応が得られていないので、少なくとも他の一台のカメラから見えないエッジである。対応するシーンの実エッジXは、カメラLの中心 O_L とエ

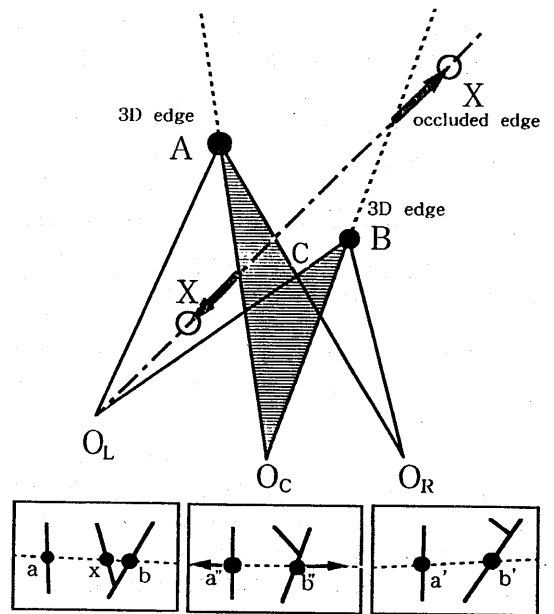


図3: 隠れエッジの位置推定と隠れエッジのないカメラの自由領域

ジXを結ぶ O_LX の延長線上に存在する。このとき、カメラC, Rでは三次元エッジA, Bの射影点間にエッジが現れないので、実エッジXは、視線 O_CA, O_CB ,および O_RA, O_RB の延長線が囲む領域の外側になければならない。実エッジXに繋がる面は、視線を横切って存在しないので、

$$\Delta ABC = \Delta ABO_L \cap \Delta ABO_C \cap \Delta ABO_R$$

とすると、カメラCから得られる自由領域は、

$$\Delta ABO_C \cap \overline{\Delta ABC}$$

また、カメラRから得られる自由領域は、

$$\Delta ABO_R \cap \overline{\Delta ABC}$$

となる。

【系1】三次元エッジA, Bの画像上の射影点が、すべてのカメラにおいて隣り合い、同じ順序にあるとき、任意のカメラ i における三次元エッジの射影点間にエッジが存在しなければ、自由領域が得られ、

$$\Delta ABO_i \cap \overline{\Delta ABC}$$

となる。ただし、 ΔABC は各々のカメラの中心 O_i と三次元エッジA, Bが作る三角形の共通領域で

$$\Delta ABC = \bigcap_i ABO_i$$

である。

カメラLから見える隠れエッジXの実エッジXの位置は、前述したように、視線 O_CA, O_CB ,および O_RA, O_RB の延長線が囲む領域の外側で O_LX の延長線上にあるが、さらに次の二通りの場合が考えられる。

1) 図4の $\Delta O_L O_C C_1$ または $\Delta O_C O_R C_2$ に三次元エッジが存在する場合。

この三次元エッジに繋がる面がカメラCまたはRの視線を遮ることより、実エッジXが $\Delta A O_L C_1$ に存在する可能性もあるので、 $\Delta A O_L C_1$ は自由領域とは見なされない。

2) 図4の $\Delta O_L O_C C_1$ と $\Delta O_C O_R C_2$ に三次元エッジが存在しない場合。

カメラCまたはRから実エッジXの視線を遮る面がこの領域にあると仮定すると、その面のエッジもこの領域にしなければならない。三台のカメラの基線長に比べ、対象シーンまでの奥行き距離は長いので、三台のカメラの共通視野領域にあり、カメラから最も前面に位置する面に繋がるエッジは、全てのカメラから見えなければならない。全てのカメラから見える三次元エッジが領域内に存在しない

ので、それに繋がる面も存在しない。これは、カメラCまたはRから実エッジXの視線を遮る面がこの領域にあるとした仮定に矛盾する。

したがって、2)の場合、実エッジXが $\Delta A O_L C_1$ にあると仮定すると、他の二台のカメラからも見えなければならない。よって、実エッジXは $\Delta A O_L C_1$ にはなく、 $\Delta A O_L C_1$ は自由領域であると決定できる。

さらに、実エッジXの位置は、視線 O_CB より離れた位置にあると推定できる。このとき隠れエッジXの視線 O_LX を利用して自由領域を拡張することができる。

(定理2) 隠れエッジXの実エッジXが、視線 O_CB の延長線より外側(カメラLから離れた位置)にあるとき、 O_CB の延長線と O_LX で挟まれた領域が自由領域となる。(図4の格子領域)

【証明】カメラCから見た三次元エッジA, Bの射影点間にエッジが存在しないことから、図4の格子領域にエッジがないことは明らかである。一方、 O_CB の延長線より外側にあるエッジに繋がる面が格子領域に存在すると仮定する。この面が視線 O_LX を横切ると、実エッジXが O_CB の外側にあるという条件に矛盾する。 O_CB の延長線を二度通る面および格子領域内で閉じた面は、カメラ

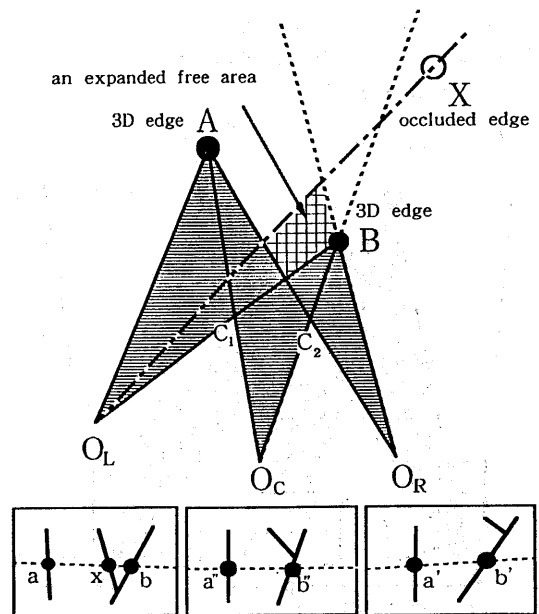


図4: 隠れエッジを利用した自由領域の拡張

Cから必ずエッジとして見えるので、この様な面は存在せず、仮定が矛盾する。したがって格子領域では、エッジ・面が存在することがないので自由領域となる。

図4では、カメラRからも隠れエッジを利用して自由領域を拡張することができるが、カメラRにおいて拡張した自由領域は、図4の格子領域に含まれている。

隠れエッジを利用して決定した自由領域は、大きさで比較すると、三次元エッジから決定した自由領域より小さな面積しか得られないが、重要な意味を持つ。すなわち、この拡張した自由領域により、三次元エッジA, B間は、なめらかな面で連結されないことが分かる。したがって、A, B間は移動可能な領域であり、 $A \cdot B$ に繋がる面の推定に役立つ。

以上は、一枚のエピポーラ平面について処理を行ったが、カメラL, C, Rの基線を軸として、エピポーラ平面を回転し、生成することで、シーン全体の自由空間を得ることができる。

4 物体の疑似的可視平面の決定

画像におけるエッジは、シーンにおいては、面の向きが急に変化する場所、面の向きがカメラが見る方向に対し 90° 以上になる境界線、あるいは面上に描かれたマークや傷である。三眼視で対応付けられ三次元エッジとして表現された全ての線分を、物体の境界線、境界線でない面の接合線、または物体の表面のパターンと考える。全てのエッジは単独で存在することはなく、必ずその近傍には面が存在している。(ただし、線状物体のように、面が得られない物は除く。)カメラから見た境界線では、その線分の片側だけに面が見え、線分の両側に面はない。境界線でないエッジ線分では、線分の両側に面が見える。したがって、三次元エッジの片側に、可視面が繋がっていないとき、その線分は境界線であると見なすことができる。三眼視で得られた結果では、線分の位置が分かるだけで、そのどちら側に面があるか分からない。本手法では、物体の可視面を決定するため、片側に明らかに面がない境界線を見いだす。それによって、カメラから見た線分のもう一方の側には必ず面があることが分かるからである。

図5に示すように、カメラLからは見えるが、カメラCからは見えない隠れエッジXについて考察する。

(定理3) シーンにおいて三次元エッジに接する自由領域があり、カメラCから三次元エッジBへの視線が分割する近傍領域の片側が自由領域であるとき、そのエッジは境界線である。そしてその反対側は可視面である。

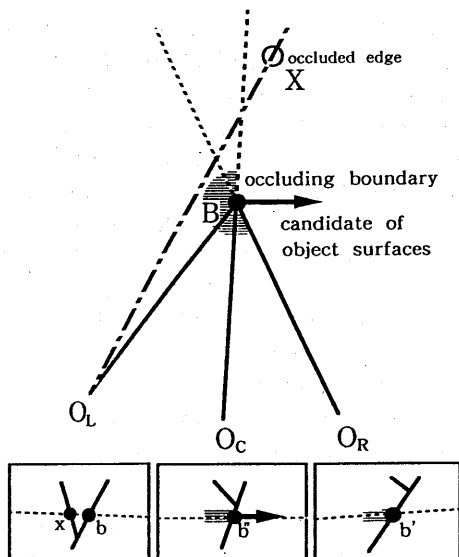


図5: 隠れエッジを利用した境界線の分類

[証明] 前章で、視線 $O_C B$ と $O_L B$ に挟まれた領域が自由領域であり、さらに、隠れエッジ x を利用して、 $O_C B$ と $O_L x$ が挟む領域も自由領域に決定された。したがって、三次元エッジBの近傍で、カメラCからBへの視線が分割する領域の片側は自由領域で囲まれた。よって、自由領域がある側には、三次元エッジBに繋がる面は存在しえない。エッジBが、単独で存在することはないので、視線が分割した反対側の領域には、Bに繋がる面が存在しなければならない。そして、この面は必ずカメラCから見える。もしこの面を隠す他の面があると仮定すると、その面のエッジが視線 $O_C B$ 上になければならない。三眼視の対応付けにおいて、多重対応はないとしたので、仮定に矛盾する。したがってエッジBに繋がる面は、必ずカメラCから見える。以上より、エッジBは、カメラCから片側だけが見える境界線であり、自由領域の反対側に可視面が存在する。

以上は、カメラCに対する考察であったが、カメラRに対しても同様の操作を適用することができる。

境界線の決定は、可視面の存在を明らかにするが、一本の境界線だけでは、疑似的可視平面を決定することができない。二本の三次元エッジ線分が各々の端点で繋がっており、その一本が境界線に分類されているとき、他の一本が境界線か否にかかわらず、疑似的可視平面の位置と方向を決定することができる。これを実行するには、境界線として決定できたカメラが得る画像において、境界線であるエッジ線分の端点で、可視面の候補として選ばれた方向に

従い、最も見え角が小さく、一方の端点がLまたはY接合になっており、三次元的に両線分の端点が繋がったエッジ線分を選択する。境界線が決定できても、必ずしも可視面が決定できるとは限らない。境界線の両端で頂点のないT接合のときは、可視面は決定できない。可視面が決定できるのは、境界線の一端で面の頂点が見えるときに限る。

さらに、決定した物体の疑似的可視平面を用いて、三次元エッジ線分を見出すことができる。たとえば、図6に示すように、境界線に分類されていない三次元エッジ線分と、既に決定された疑似的可視平面が、画像では繋がっているが、シーンでは離れた状態にあるとき、その三次元エッジ線分を境界線と決定できる。

シーンに物体が重なり合っていて置かれているとき、その外形線は容易に境界線に分類できるが、その他で境界線に分類されるエッジ線分は、初期の処理では数少ない。しかし、生成した疑似的可視平面を利用し、境界線を見出す操作を繰り返すことより、最終的には、広い範囲で疑似的可視平面が決定できると考えられる。

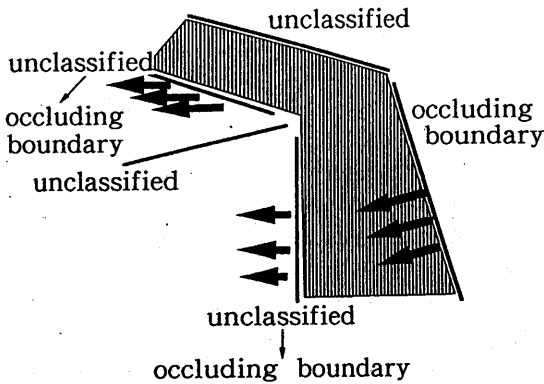
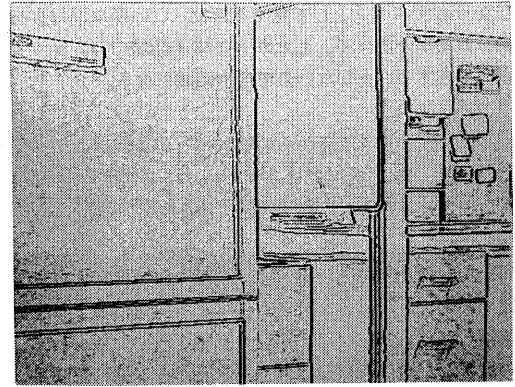


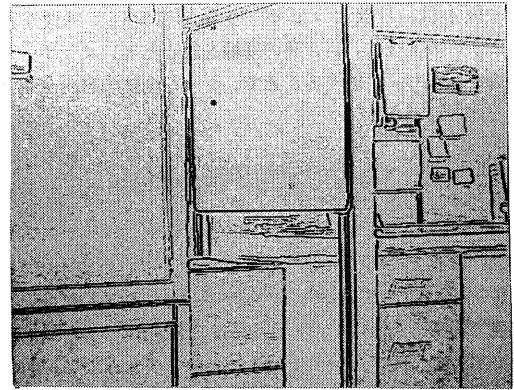
図6: 算出した疑似的可視平面を利用した境界線の決定

5. 実験と結果

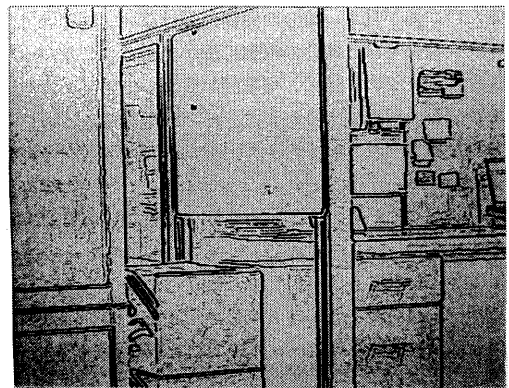
実験は、机、本棚、衝立が立ち並ぶ事務室のシーンに対して行った。一台のカメラを、光軸に対し垂直に移動し、3地点からの画像を得た。図7の(a), (b), (c)はカメラL, C, Rからシーンを眺めた画像に、Nevatia and Babuのエッジオペレータ [7]を適用して、エッジ抽出と細線化を行った結果である。全てのカメラから見えるエッジを、三眼視の幾何的拘束と局所領域における相関およびエッジ線分の連続性に基づいて、対応付けた。少なくとも一台のカメラから見えなかったエッジは、図7のエッジ画像から、三眼視で対応付けたエッジを除いた残りとした。図8は、カメラRから見えるエッジのうち、他の少なくとも一方のカメラから見えないエッジである。3地点で



(a) カメラL



(b) カメラC



(c) カメラR

図7: 三地点のカメラから見たシーンのエッジ像

カメラは光軸が平行になっているので、エピポーララインが水平になるので、画像に現れる水平なエッジは、対応付けされていない。理想的な状態では、図8における水平なエッジ以外の全てのエッジは、隠れエッジになるはずであるが、実際には、シーンの明るさのコントラストの違いや、エッジ抽出の誤差により、隠れエッジ以外の対応付けられていないエッジも含んでいる。

次に、図9に示すエピポーラ平面上の自由領域を求める。そのとき、カメラLとRのエピポーララインを図(a)、(b)に示す。このエピポーラライン上で5点のエッジが、三眼視の拘束で対応付けられ、三次元エッジとして求められた。これら5点のエッジは、画像(a)、(b)間で順序の変更がなく、各々が隣り合うので、図(c)の斜線を施した領域が自由領域となった。また、このエピポーラライン上でカメラRから見えるが、対応付けられていないエッジが隠れエッジであるので、カメラRから隠れエッジへの視線を利用して、自由領域が拡張された。その結果、拡張した自由領域の両側の三次元エッジは、繋がらないことが明らかになった。図9(c)で、左端の三次元エッジは、エッジの右側が自由領域で囲まれるので、このエッジは、カメラLから見た境界線であることが分かる。実験では、シーンの水平エッジが、三次元線分として得られなかったため、可視平面は決定できなかった。

6 おわりに

本研究は、ステレオ法で得られた疎らな三次元情報から、シーンを解釈するため、シーンに物体が存在することのない自由領域と、物体の疑似的可視平面を見出だ

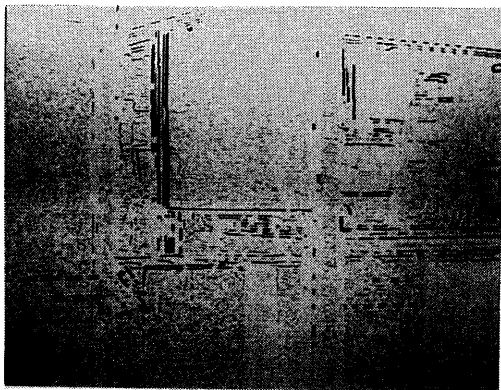
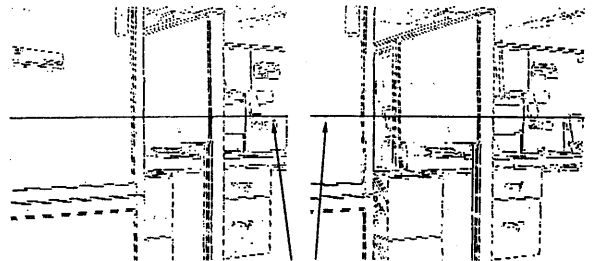


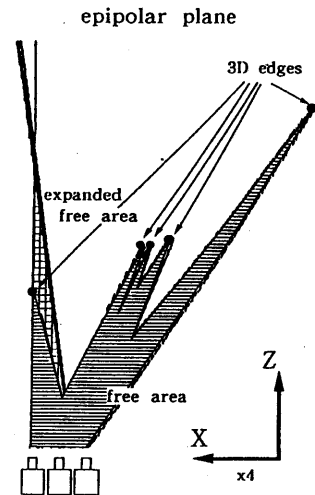
図8: 三眼視で対応付けられなかったカメラRから見たエッジ

す方法を提案した。そのために、あるカメラからは見えるが、他のカメラからは見えない隠れエッジが有効である。本研究では、隠れエッジを見出すために三眼視を用いた。三眼視は、二眼視より対応付けにおいて信頼性があるだけでなく、三眼視で対応付けられないエッジが、少なくとも一台のカメラから見えない隠れエッジとして利用できた。ただし、物体と背景の明るさの差が小さいため、見えているエッジが検出できなかったり、エッジ抽出の誤差の為、対応付けはしないエッジが対応付けられずに残るような場合に対する処理が今後の課題である。

隠れエッジを利用して拡張された自由領域は、面積としては小さいが、対応のとれた三次元エッジだけを用いて決定した自由領域に比べ、三次元エッジ間に面が存在するか、空間があるかを知るための重要な情報である。本研究では、隠れエッジを知るために三眼視を用い、信頼性の高い三次元エッジを軸に自由領域を拡張したが、本手法は二眼視にも応用できる。二眼視に応用すると、対応付けられ



(a) カメラL (b) カメラR



(c) Combined free areas

図9: 自由領域の決定

た結果から自由領域、物体の可視面を生成することで、二眼視の対応付けが矛盾しないか否かの確認に役立つと考えられる。

文献

[1] K. Rao and R. Nevatia: Computing Volume Descriptions from Sparse 3-D Data. *Int'l J. Computer Vision*. vol. 2, pp. 33-50, 1988

[2] K. Sugimoto, M. Takahashi, and F. Tomita: Scene Interpretation Based on Boundary Representation of Stereo Images. *ICPR*. pp. 155-159, 1988

[3] J. D. Boissonnat, O. D. Faugeras, and E. Le Bras-Mehlman: Representing Stereo Data with the Delaunay Triangulation. *ICRA*. pp. 1798-1803, 1988

[4] M. Itho and A. Ishii: Three-View Stereo Analysis. *PAMI-8*. pp. 524-532, 1986

[5] 北村, 来海, 谷内田: エッジの連続性と画面の局所的性質を利用した三眼視. *信学論D*. vol. J70-D, no.9, pp. 1757-1764, 1987

[6] N. Ayache and F. Lustman: Fast and Reliable Passive Trinocular Stereovision. *ICCV*. pp. 422-427, 1987

[7] R. Nevatia and K. R. Babu: Linear Feature Extraction and Description. *CGIP*. vol. 13, pp. 257-269, 1980