

光線追跡型ステレオマッチング法の 3眼ステレオ視への適用

Ray-tracing type Stereo Matching Method Using a Three-view Stereo

有村 浩一

金子 博

増田 功

Kouichi ARIMURA

Hiroshi KANEKO

Isao HASUDA

NTT 電気通信研究所

NTT Electrical Communication Laboratories

This paper describes a method for quantitative evaluation of the output of stereo-matching algorithms. Intermediate descriptions extracted from synthesized two and three-eyes stereo images using our ray-tracing type matching method are evaluated by the new method, and compared with the results of subjective evaluation. The comparison provided pertinence of the new evaluation method. The measure consists of three submeasures concerning correct description, false target, and missing data. This new measure can be applied to the intermediate output of real scene stereo images as well as synthesized images, and is a versatile mean to evaluate stereo-matching algorithms.

1. はじめに

画像から三次元位置情報を抽出するのは、コンピュータ・ビジョンの中心的課題の1つである。特に、両眼立体視法は画像からその三次元位置情報を復元する有力な手法で、多数研究がなされている[1]。

両眼立体視法で正確な三次元位置情報を抽出するにはステレオ画像間で対応する特徴点の対(対応点)を画面から正しく検出することが本質的である。従来研究でもこの処理に重点が置かれてきた。

対応点検出には主に2つの問題がある。一つはOcclusion Problemであり、他の一つは、False Target Problemである。これらの問題点が対応点検出を複雑にしている[1]。この問題を克服するため、従来より、ステレオ画像設定状況のモデル化[2]、対象物に依存した知識・制約[3]、投影像の幾何学的特徴に関する知識[4],[5]、多眼ステレオ視画像内の対応点をもつ冗長性[6],[7]、等を利用した対応点検出法が多数提案されてきた。

しかし、これら知識の積極的利用は、処理が複雑になるわりには効果的とはいえない。そればかりか手法の汎用性低下の危険性がある。そして、その利用効果の客観的評価も容易とはいえない。

したがって、両眼立体視法の原理に立ち返り、ステレオ画像内の投影像の投影位置情報だけで対象物の三次元位置情報がどれだけ抽出可能かを再検討することは十分意義があり、かつ知識利用等の効果評価の基準にもなる。

投影像の投影位置情報だけで対応点検出を行なえば、FALSE TARGET(偽対応点)の発生が予想される。しかし、FALSE TARGETが対象物の三次元位置情報の復元を妨げる致命的な要因とはならず、かつ、それが除去可能ならば、汎用性を犠牲にした知識等を利用した対応点検出より効果的であると考えられる。

以上の立場から、我々は光線追跡型ステレオマッチング法を提案した[8]。本稿では、光線追跡型ステレオマッチング法において未検討であった問題点、特に、中間記述の多義性の低減化、ステレオ能力の評価尺度について考察した結果、及び、それに関す

る計算機実験について述べる。

2. 光線追跡型ステレオマッチング法

Occlusion Problem と False Target Problem を避けるために従来の対応点検出法で使用される制約として、①最大視差差の限定[3]、②Monotonicity constraint [3],[9]、③基線比の小さいステレオ画像の利用、④対象物に関する知識の利用[10]等が挙げられる。光線追跡型ステレオマッチング法では、これらの制約を用いず、ステレオ画像上でステレオ

投影条件を満足する三次元空間中の点すべてを対象物の三次元位置情報の中間記述として抽出し、次にその中間記述を整理・統合し観測対象物の形状・配置情報の一部を復元する。

2.1 本手法における対応点検出法アルゴリズム

光線追跡型対応点検出法は、観測対象物の輪郭線や表面上のエッジ等が特徴点として投影された観測ステレオ画像から、特徴点の三次元位置情報を復元し、それを対象物形状情報等の中間記述とみなす特徴点ベースの三次元位置情報抽出法である。

従来の対応点検出法では、対応点関係を一意に求めているが、これを誤りなく求めることは一般に難しい。

一方、光線追跡型ステレオマッチング法では、以下の3方針に基づき観測ステレオ画像から中間記述を抽出する。その方針は、

- ①この対応関係を無理に一意には求めず多義性をゆるし、観測ステレオ画像内の特徴点と矛盾しない点(以後、疑似対応点と呼ぶ)を三次元空間内で出来るかぎり抽出する。
- ②疑似対応点の集合である抽出結果は、対象物三次元位置情報の中間記述であるとみなし、その表現に柔軟性を持たせる。
- ③本対応点検出法以後の処理で対象物に依存しない知識や上位概念等を利用しこの中間記述の中から真の対象物三次元位置情報を選択する。

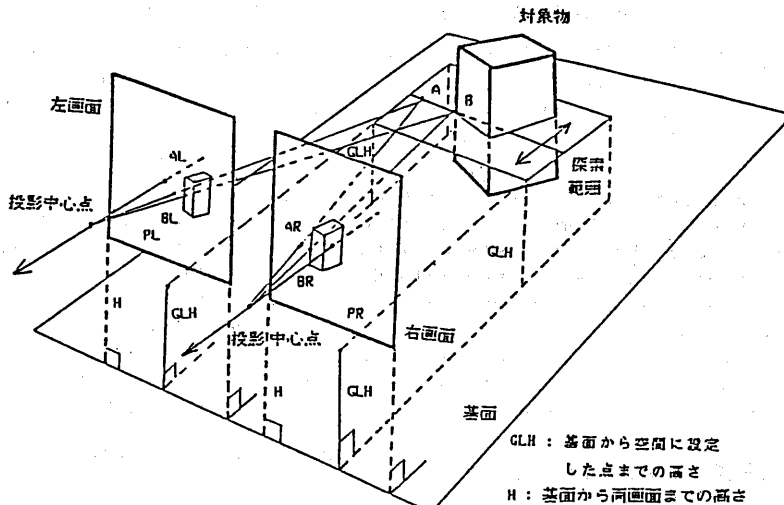


FIG.1 本手法による対象物上の着目点の三次元探索

次に、本対応点検出アルゴリズムを2眼ステレオ視の場合で説明する（FIG.1）。

ここで、前提条件として、左右の画面の位置関係や焦点距離等を示すカメラモデルは既知であること。又、Fig.1 のステレオ画面(PL,PR)には対象物（立方体）の三次元位置情報（輪郭像）が投影されているとする。手順としては、(1) 三次元空間の任意位置に着目してその三次元位置情報を担う着目点A（又はB）を設定する。(2) 着目点Aのステレオ画像(PL,PR)への投影位置(AL,AR)を計算する。同様に着目点Bの投影位置は(BL,BR)とする。(3) 着目点の投影像を観測ステレオ画像上で検出する。例えば、投影位置AL,ARは対象物の投影像の上には存在しない。この場合、着目点Aは対象物上には存在しないと判断する。一方、投影位置BL,BRは対象物の投影像（輪郭像）上に存在することから、対象物上の一部（この場合には輪郭部）がその位置に投影されたものと判断し、着目点Bは対象物上に存在しており、対象物の三次元位置情報を担っているものとみなす。このとき、着目点Bを疑似対応点と呼ぶことにする。(4) 三次元空間内で着目点を前後、上下、左右に任意に動かしながら三次元空間内を走査し、一連の処理を繰り返すことによって、対象物体上に位置する着目点の三次元位置情報を収集する。この収集した着目点を対象物の中間記述と呼ぶ。

ここで、着目点の担う三次元情報の種類について触れておく。着目点が対象物上に位置する時、その点は着目位置情報（存在情報）の他に、対象物の三次元形状に関連する情報を持つと考えられる。その例としては、例えば、濃淡情報、色情報、近傍領域の傾き情報等が挙げられる。着目位置情報やこれらの情報からは、それぞれの情報について着目点の投影像（以後、着目点予測投影像と呼ぶ）が予測できる。一方、注目する三次元情報と同一の情報を観測ステレオ画像上で抽出しておけば、着目点予測投影像との比較が可能であり、着目点の投影像の検出が可能である。今回は、対象物の輪郭情報のみに注目し疑似対応点を抽出することを考えた。つまり、観測ステレオ画像として、背景部の画素濃度がレベル0、対象物の輪郭部の画素濃度がレベル1となる2値画像をとった（FIG.1）。

2.2 本対応点検出法の特長

2.2 本対応点検出法の特長

FIG.2 は、光線追跡型対応点検出法と従来手法との違いを示す概念図であり、図中の太線部分が本手法の中心部分である。

本対応点検出法の主たる特長は、①対応点探索戦略が三次元的であること。②検出結果に多義性を含むこと。③従来用いられる各種制約条件を用いず汎用的であること。④画像の多眼化によるアルゴリズム変更部分が少なく、多眼ステレオ視画像への適用が容易であること。⑤画面ごと、着目点ごとにステレオ投影条件判定に関する処理が独立で、並列処理が可能であること。⑥従来手法で行なわれているエッジの位置決めに関する配慮が不要であることが挙げられる。

対応関係を多義的に求める利点は、対象物の三次元位置情報の抽出に柔軟性を持たせ得ることである。対応点を一意に決定する方法の場合では、対応点検出でひとたび誤った対応点を検出すると以降の処理は結果的にすべて誤る。これに対して、三次元位置情報を多義的に抽出しておけば、正解が含まれる可能性が大きくなり、以後の処理で正しい形状情報が求めやすい。また、ステレオ画像に対して多義的に

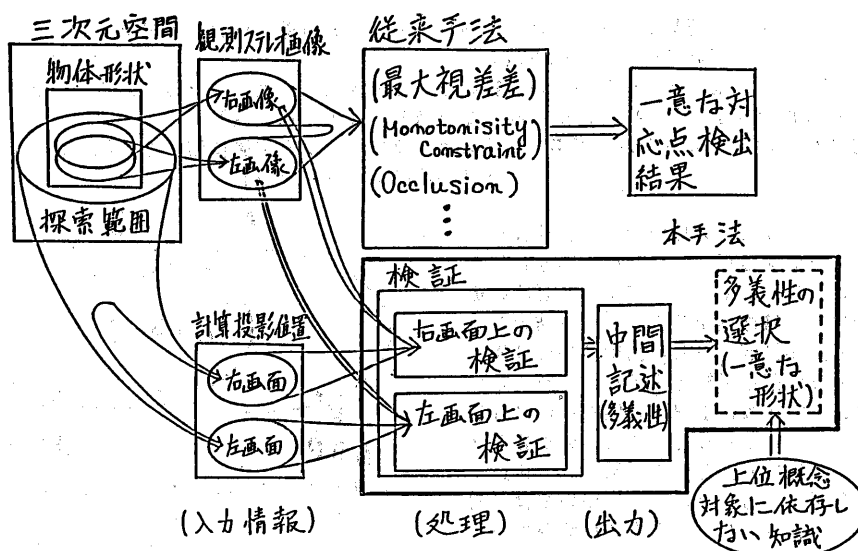


FIG.2 本手法と従来手法との違い

抽出されたすべての着目点は前述の投影像検出を満足している。この意味で、この着目点を対象物の三次元位置情報を担う可能性の点として、疑似対応点と呼ぶ。さらに、この多義的な抽出結果は対象物の三次元位置情報に関する中間記述であると解釈する。中間記述の多義性を整理しその曖昧性を除去する、または、真の対象物形状を特定する方法には、3眼ステレオ視[6],[7]の利用、対象物の知識の利用等が考えられる。

また、従来のエッジを用いた対応点検出法では、エッジ線上のエッジ位置の決定精度が、三次元位置情報の抽出精度に関係するため、エッジ位置決定の分析[7]、及び、高精度位置決め処理が必要である。一方、本手法では着目点投影位置でステレオ投影条件の判定を行ない、エッジ線は使用しない。したがって、上記エッジの位置決めに関する検討は不要となる。

3. 3眼ステレオ画像への適用

中間記述からその曖昧性(FALSE TARGET)を除去または対象物の真の形状を特定する方法には、対象物の知識を利用する方法、3眼ステレオ視を利用する方法などが考えられる。特に3眼ステレオ視は、従来からFALSE TARGET減少の現実的手段として知られる。

本手法では、着目点の投影像を画面上で検出する処理は画面ごと独立で、かつ同一手順である。したがって、アルゴリズムの主要部分を変えることなく観測ステレオ画像の画面枚数の変更に対応できる。

このことから3眼ステレオ視の本手法への適用は、

中間記述の曖昧性除去に極めて有望と考えられる。その具体的な効果については、実験の項で述べる。

本手法の3眼視化の他の効果を述べる。第1、2画面で得た対応点検出結果を第3画面で正誤判定する従来の3眼ステレオ視法[6]では、第3画面の選択方法が抽出結果に与える影響の検討や第3画面の最適な選択方法の検討が不可欠だが現状では不十分である。しかし、3眼視化した本手法ではどの画面も同一に扱うため、この種の検討が不要である。

4. ステレオ法評価尺度

本章では、FALSE TARGETの出現状況と対象物の三次元位置情報欠落状況との2側面から抽出結果を客観的に評価するステレオ法評価尺度を提案する。

4.1 評価尺度に対する基本的考え方

カメラ等で撮影された観測ステレオ画像による対応点検出実験の評価では、観測対象物の輪郭と抽出結果との目視比較や、実測位置と抽出位置と位置ずれの平均値を示すことが多い。しかしこれらの評価結果は以下に挙げる各要因の重なった結果であり、アルゴリズムの客観的な抽出能力評価としては不適當である。その要因には、

- (1) カメラモデルパラメータの推定誤差
 - (2) 観測ステレオ画像内の三次元位置情報の質の良否(例: ノイズ、特徴点の位置精度、Occlusionの発生程度など)
 - (3) アルゴリズムのプログラムインプリメント上の諸問題(例: 閾値処理、数値演算誤差など)
 - (4) アルゴリズムの抽出能力
- 等が挙げられる。

$$\begin{aligned}
 [\text{抽出率1}] &= [\text{評価基準データに基づく対象物の三次元位置情報の抽出総点数}] / [\text{評価基準データ総点数}] \\
 [\text{抽出率2}] &= [\text{抽出結果に基づく対象物の三次元位置情報の抽出総点数}] / [\text{抽出総点数}] \\
 [\text{FALSE TARGET発生率}] &= [\text{FALSE TARGET総点数}] / [\text{抽出総点数}] \\
 [\text{対象物の三次元位置情報の欠落率}] &= [\text{欠落対象物の三次元位置情報の総点数}] / [\text{評価基準データ総点数}]
 \end{aligned}$$

このうち、アルゴリズムの抽出能力を計算機シミュレーションで評価する場合、(1)は別問題として扱って良い。(2)については従来では、恣意的に選んだ対象、前処理、特徴抽出等の総合的な結果として対応点検出能力が評価される。抽出結果の評価では、影響を与える要因を単純化することが望ましいが、抽出結果に反映された上記の要因を適切に分離することは難しい。したがって、これらの影響を抽出結果から除く具体的方法として、例えば、後述する合成画像の利用がある。又、(3)については、対象の変化に対するインプリメント上の影響を均一化することが望ましい。つまり具体的には、入力対象物ごとにプログラムの閾値調整等はむやみに行なわず、種々の観測ステレオ画像抽出実験を出来るだけ同一プログラム・同一で閾値設定で行なう必要がある。

4.2 評価尺度の要素

抽出状況の目視評価によれば、抽出結果評価には3側面からの検討が必要と考えられる。それらは、(1)対象物三次元位置情報の抽出状況、(2)FALSE TARGET出現状況、(3)対象物三次元位置情報欠落状況、である。

すなわち、(1)観測ステレオ画像内の対象物三次元位置情報のうち、どれだけ抽出され、(2)同時にどれだけFALSE TARGETが出現し、さらに(3)本来は観測ステレオ画像から抽出可能であるが、プログラムインプリメント上の諸問題の影響で抽出しそこねた三次元位置情報がどの程度か、等が抽出実験評価のパラメータと考えられる。

4.3 評価尺度の設定とその特長

抽出実験時に対象物の形状・配置情報と着目点の仮設定方法とが既知である場合、対象物輪郭上に存在する着目点の集合が得られる。これを評価基準データと呼ぶことにする。この時、評価基準データを集合A、抽出結果を集合Bとすれば、前節の評価項目(1)は $A \cap B$ 、評価項目(2)は $\bar{A} \cap B$ 、評価項目(3)は $A \cap \bar{B}$ 部分の評価に対応する(FIG.3)。

この時、ステレオ法評価尺度を上掲の式で定義する。

評価項目(1)の評価尺度は、対象物三次元位置情報抽出率1、2で、評価項目(2)の評価尺度は、FALSE TARGET発生率で、評価項目(3)の評価尺度は、

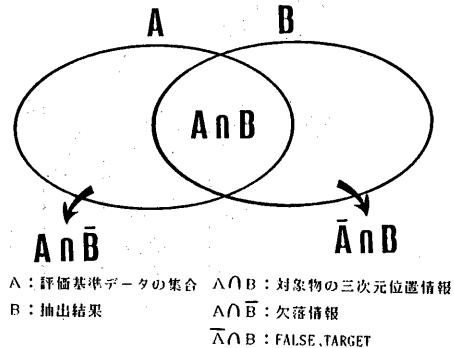


FIG.3 評価すべき情報の種類

対象物の三次元位置情報の欠落率である。

この評価尺度は、アルゴリズムの三次元位置情報抽出能力の実験的確認のために使用される。さらに、この抽出結果の分類方法、または、評価尺度は、次の応用的側面も併せ持つ。

- (1)FALSE TARGET や対象物三次元位置情報等に分類された結果は、本手法以降の中間記述の多義性の整理や輪郭情報復元処理等の検討で有効なツールとなる。
- (2) 実験観測ステレオ画像による抽出実験でも、対象物の実測値から評価基準データの作成が可能である。したがって、実験観測ステレオ画像による抽出実験データにも本評価方法は適用可能である。
- (3) 評価基準データと抽出結果とが三次元座標値の集合として与えられさえすれば、本評価方法で、他のアルゴリズムと本手法との抽出能力の比較も可能である。

5. 実験結果および考察

手法の検証にはコンピュータ内部で発生させた三次元空間モデル内の物体を対象として用いた。これにより、各種実験条件の設定が容易になり、又、結果の評価を客観化できる。

実験1 2眼ステレオ視画像による抽出実験

実験1は、対象物をスプライン曲面とした2眼ステレオ視抽出実験である。FIG.4は合成2眼ステレオ画像の一部である。このステレオ画像は、三次元空間に任意位置、任意方向に設置したスプライン曲面の3眼ステレオ視画像への投影像で、各画面が直角三角形の各頂点に配置されている。合成した3画

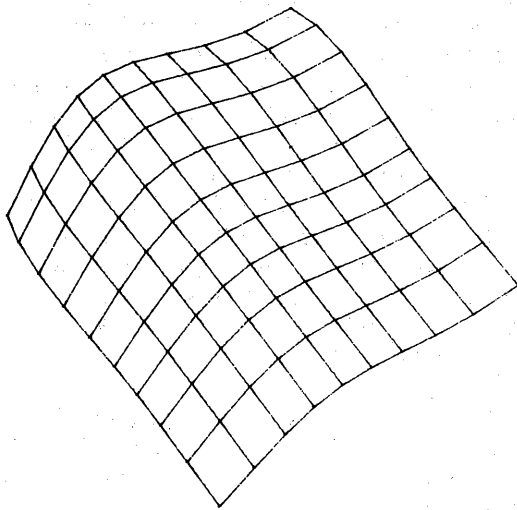


FIG.4 スプライン曲面の合成ステレオ画像（左画面）

面は実験3で使用するが、実験1ではこの画面のうち左右の合成画面を観測ステレオ画像とした。

スプライン曲面を対象物としたのは、これが多面体よりも多様な方向の線分群から構成されているため、一般的方向線分の抽出実験例として適当と考えられるためである。

FIG.5 は、対象物を含む様に定めた走査範囲内で、着目点を上下、左右、前後に一定間隔に、かつ、この3方向の間隔をすべて同一に設定して走査した時、

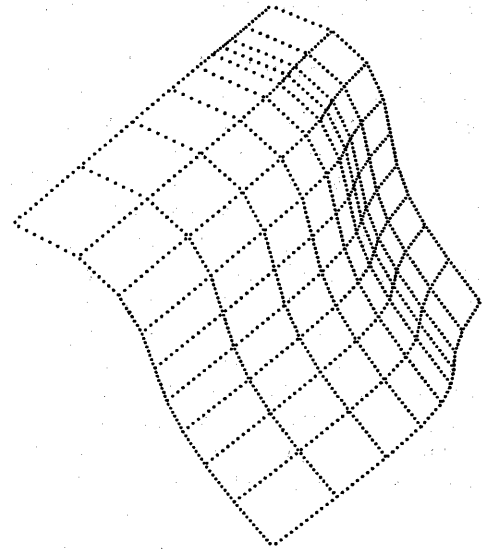


FIG.5 スプライン曲面の評価基準データ

対象物の輪郭であると判断された着目点の集合を示す。これらの点を抽出結果を比較するときの評価基準データとした。FIG.6 は、FIG.5 抽出時に使用したのと同じの着目点仮設定範囲・仮設定間隔による抽出結果である。評価基準データがすべて抽出されているが、FALSE TARGETもかなり出現していることが目視評価より判明する。

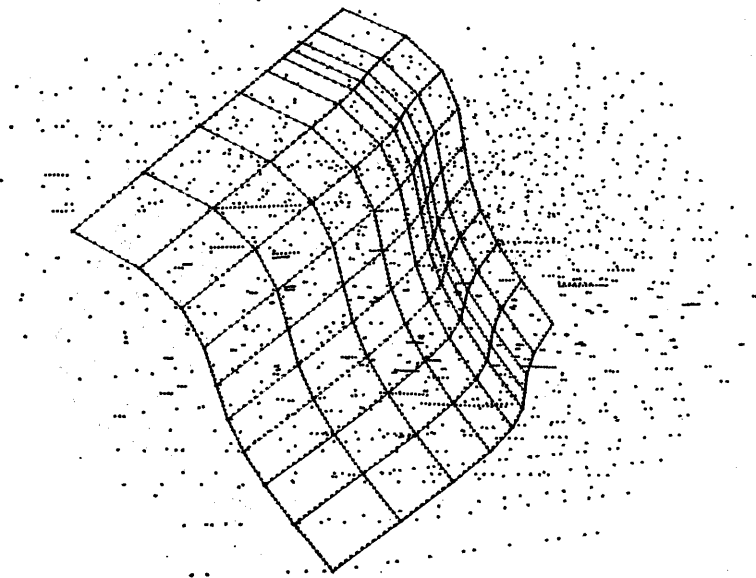


FIG.6 2眼ステレオ視による抽出結果

実験2 着目点走査範囲の変更に対するFalse target出現状況

抽出状況が基線比変化に影響されにくいことが本手法の特長であることは実験例で既に示した[8]。その実験では、対象物が着目点の走査範囲内に存在するように、仮設定範囲をうまく決定した。もし、対象物の存在位置からずれた走査範囲で対応点検出を実行した場合は、すべての抽出結果がFALSE TARGETとなる。この場合の抽出状況と対象物の三次元位置情報が抽出された場合の抽出状況との比較についてはまだ未検討であった。そこで、実験2では、実験1と同一の合成2眼ステレオ視画像を使用し、着目点の走査範囲を対象物存在範囲の前後にずらした場合のFALSE TARGET出現状況の検討を行なった。ただし、着目点の走査間隔は、実験1の場合と一致させた。抽出総点数を表1に、探索範囲を後部にずらした場合のFALSE TARGET出現状況をFIG.7に示す。

着目点設定範囲	抽出点数
対象物の前部	23個
対象物の後部	369個

表1 着目点設定範囲の変更に対する抽出点数の変化

この実験例では、FALSE TARGET点数は多いが、仮設定範囲に均一に、かつ、孤立点状に分布し、FIG.6の対象物三次元位置情報を含む抽出結果の分布とは明らかに異なる。

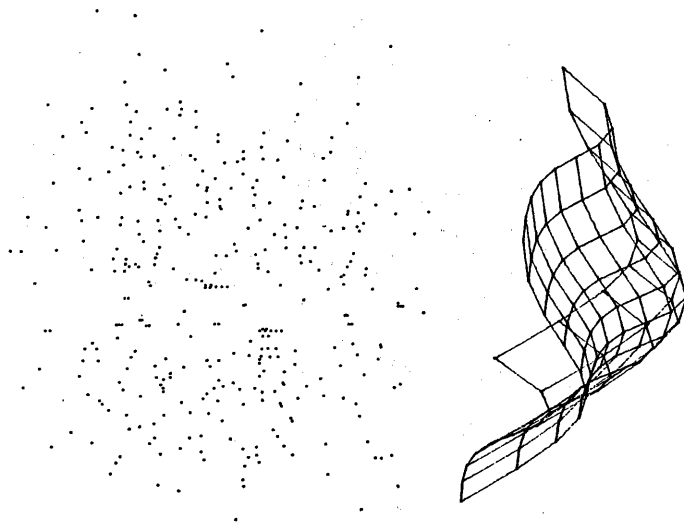


FIG.7 走査範囲を対象物後部にずらした場合の抽出結果

実験3 3眼ステレオ視画像による抽出実験

実験1で合成した3眼ステレオ視画像を使用し、着目点仮設定範囲、仮設定間隔も一致させた場合の抽出実験を行なった。実験3と実験1との抽出結果比較から本手法を3眼視化して得られた効果の実験的比較が可能である。FIG.8にスプライン曲面の3眼ステレオ視画像による抽出結果を示す。

目視評価より、3眼視化ではFALSE TARGETが効果的に減少するが、同時に対象物三次元位置情報の欠落が見られる。分析によれば、この欠落は、仮設定着目点投影像の投影位置の数値演算誤差と、対象物投影像の投影位置ずれとによるステレオ投影条件の誤判定が原因である。

実験4 ステレオ法評価尺度による客観的評価

客観的評価にあたり、最初に、抽出結果の分類を以下の様に行なった。評価基準データは、次の手順で作成する。

- (1) 画面ごとに対象物投影像が異なるため、コンピュータグラフィックスの隠面消去法を応用し、画面上の投影像に対応した対象物輪郭（視点からみえる部分、対象物可視輪郭部分と呼ぶ）を求める。
- (2) 仮設定着目点のうち、設定位置(X,Y,Z)が対象物可視輪郭部分に十分近い着目点を評価基準データとする。

分類は、抽出結果の三次元座標値と評価基準データの三次元座標値とを比較し、その値が十分一致する抽出結果を対象物三次元位置情報とし、残りをFALSE TARGETとする。欠落対象物三次元位置情報は、対象物三次元位置情報と評価基準データとの座標値

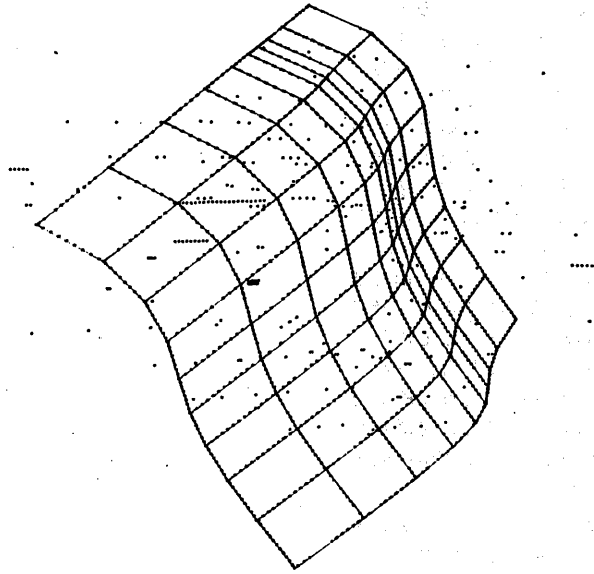


FIG.8 3眼ステレオ視による抽出結果

対象物	画面数	抽出率 1	抽出率 2	False Target率	欠落率
スプライン曲面	2枚	1413/1413	3476/5362	1886/5362	0/1413
	3枚	1260/1413	2851/3174	323/3674	153/1413
平面	2枚	1480/1500	1233/1330	97/1330	20/1500
	3枚	1465/1500	1183/1201	18/1201	35/1500

表2 2眼ステレオ視の3眼視化の効果

を比較し、十分近い位置にある評価基準データを除いた残り部分とする。

実験1、3で抽出した三次元位置情報(FIG.6, FIG.8)をステレオ法評価尺度で評価した結果が表2である。表2にはスプライン曲面の他に6本の等間隔垂直線をもつ平面を対象物にした2、3眼ステレオ視画像抽出実験結果も併せて示す。

表2により例えば、スプライン曲面が対象物の場合、3眼視化によりFALSE TARGET出現総数が約1/6に減少し、同時に対象物三次元位置情報が約1/10欠落したことが判明する。この評価は先の目視評価の傾向と一致する。

6. おすび

本稿では、先に提案した光線追跡型ステレオマッチング法において従来未検討であった問題点、(1) 一般的曲面に対する抽出能力、(2) 三次元探索範囲

変更に伴うFALSE TARGET出現状況の変化、(3) 中間記述の多義性整理、(4) ステレオ法評価尺度、について検討した結果を述べた。又、合成ステレオ画像を対象にした計算機実験により考察結果を検証した。

光線追跡型ステレオマッチング法の特徴は、対象物三次元位置情報の中間記述を求めるところにある。従来手法では、対応関係に関する様々な知識・制約等を利用し一意な対応点を検出する。これらの方法の欠点は、一意に抽出した対応点に誤りが含まれる時、以後の処理でその修正が困難になることである。さらに、対象物三次元位置情報が不明な場合、恣意的な制約を用いて一意に対応点検出処理を行なうのは論理的に問題である。

これに対し、光線追跡型ステレオマッチング法では正しい対象物三次元位置情報抽出の可能性を増加させるために、ステレオ画像で中心投影を満足する対応点を多義的に抽出して、対象物三次元位置情報

の中間記述を得る方法である。しかも、この方法は本稿の実験が示すように一般図形にも適用可能であり、パラメータの変更に対してもロバストである。最終的な三次元位置情報の復元を考えた場合、本手法においては中間記述における多義性をいかに低減させるかが最も重要な問題である。本稿では3眼ステレオ視を用いてこの解決を図った。実験の結果、三眼ステレオが多義性低減に極めて有効であることが確認された。

さらに、本稿では抽出状況評価のための評価方法を示した。実験の結果、この評価方法による評価結果は目視評価結果と評価傾向が良く一致しており、抽出状況評価の有効な評価方法であると考えられる。この評価方法は、自然ステレオ画像による光線追跡型ステレオマッチング法評価の場合にも、特徴点ベースな従来手法による抽出結果評価にも適用可能である。

今後はこの評価方法をもとに光線追跡型ステレオマッチング法の三次元位置情報抽出能力の検討および中間記述の除去、及び、解釈に関する多義性整理の検討をすすめていく。

謝辞

日頃御指導頂く、畔柳情報通信基礎研究部長、塚本統括役に感謝致します。また、熱心に御討論頂いた情三室室員諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] S.T.Barnard, M.A.Fischler: Computational Stereo, ACM computing surveys, vol.14, no.4, DEC, 1982
- [2] H.A.Moravec: Robot Rover Visual Navigation, UNI Research press, 1981
- [3] W.E.L.Gimson: From Images to surfaces, MIT Press, 1981
- [4] 富田: ステレオ画像の領域の輪郭線セグメントに基づく対応、情処会、コンピュータビジョン研究会資料38-1, SEP, 1985
- [5] 関、関口: ステレオビジョンのためのエッジ抽出法、信学会、PRL84-74, JAN, 1985
- [6] 伊藤、石井: 3眼立体視による多面体形状計測、信学会、PRL85-21, JULY, 1985
- [7] 渡辺他: 3眼ステレオ視による位置決め改善とオクルージョン処理、情処会、コンピュータビジョン研究会資料38-2, SEP, 1985
- [8] 有村他: 3次元探索による奥行情報抽出と合成による検証、信学会、PRL85-12, JUN, 1985
- [9] H.H.Baker: Depth from edge and intensity Based Stereo, STAN-CS-82-930, SEP, 1982
- [10] Y.Ohta, T.Kanade: Stereo by Intra- and Inter-scanline Search Using Dynamic Programing, CMU-CS-83-162, OCT, 1983