

# 格子パターンを用いた3Dモデル構築システム

長谷川 辰雄, 土井 章男, 松田 浩一  
岩手県立大学ソフトウェア情報学部

本論文は、格子模様の網タイツや網目状のフィルムシートなどで物体を覆い、それを一般的なデジタルカメラで撮影し、ステレオ画像計測で3Dモデルを簡易的に構築するシステムを提案した。一般向けデジタルカメラは低価格で高解像度という特徴があるため、取り扱いが容易で画像処理精度を向上させることが可能である。格子模様の交差点をステレオ画像計測のマッチング点とし、2値化及び細線化によって交差点を抽出した。このとき、交差の角度が大きい箇所では、細線化によって歪みが生じるため、本論文では、それを修正するアルゴリズムを提案した。これらの処理によって、正確に抽出した交差点を元に、自動的に四角形ポリゴンの3Dモデルの構築が可能となり、また、ハードウェア構成が、デジタルカメラ、三脚、及びPCで構築できるため、システムの構築費が低価格で実現できた。

## The 3D model construction system using grid pattern

Tatsuo Hasegawa, Akio Doi, and Koichi Matsuda

Faculty of Software and Information Science Iwate Prefectural University

The 3D object was covered with film sheet of grid, or the grid net, and it took pictures of that with the general digital still camera, and the system that the model 3D was built easily with stereophonic image measurement was developed. The digital still camera for the general purpose is high resolution in the low price. And that handling was easy, and it could improve image management precision. The crossing point of the grid pattern was the matching point of the stereophonic image measurement, and the crossing point was extracted by binarization and thinning. At this time, the distortion occurs by thinning in the point that angle big. This research developed the algorithm which corrected the distortion. This research built the model 3D of the quadrangle polygon automatically by the crossing extracted precisely. And, the construction cost of the system was a low price because hardware configuration could be built with the digital still camera and the tripod and the PC.

### 1. はじめに

3次元モデルの構築は、CG用から産業用までその用途は幅広く、様々な「ものづくり」に応用されてきた。工業用途では、実物を計測して3Dモデルを作成し、製品設計に役立てる技術が盛んに行われている。これはリバース・エンジニアリングとも呼ばれ、対象物の構造解析にも応用されている。本論文では、能動的計測法として、格子パターンを用いて物体の3次元計測を行い、3次元CADモデルを安価に構築するシステムを提案した。本手法は、格子パターンの格子点(交差点)をステレオ画像計測のマッチング点とし、2値化及び細線化によって交差点を抽出した。このとき、交差の角度が大きい箇所では、細線化が原因で歪みが生じるため、それを修正するアルゴリズムを開発した。対象物の3次元情報を計測するための

手法は、能動的方法と受動的方法が一般的に知られており、能動的方法は、パターンや濃淡、スペクトルなどを照射して計測する方法であり、計測に関して意味のある照射は行わない計測方法が受動的方法である。計測に関わる情報量は、能動的方法が多く信頼性が高い。3次元物体の計測は、表面の反射特性や、模様の違い、形状によるオクルージョン(隠れ)など、そのままの状態では、満足な結果を得られることは少ない。さまざまな状況下で3次元計測するためには、単にカメラで入力する受動的な方法よりも、計測装置に制御された光を対象に投影して、その状態を計測するという能動的計測の方が、多くの面で有利である。能動的計測では、プロジェクト装置を必要とすることが問題点であるが、計測の空間分解能、計測時間、距離分解能など多くの点で優っている。

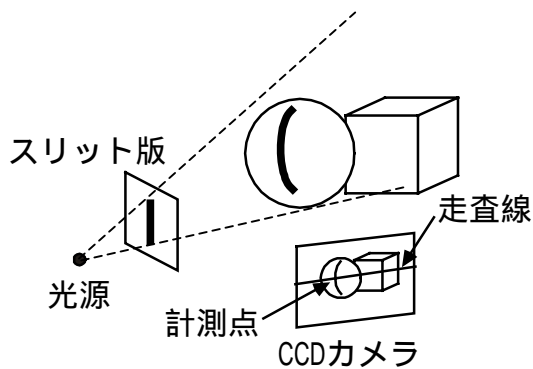


図1 光切断法

Fig. 1 The light-section method

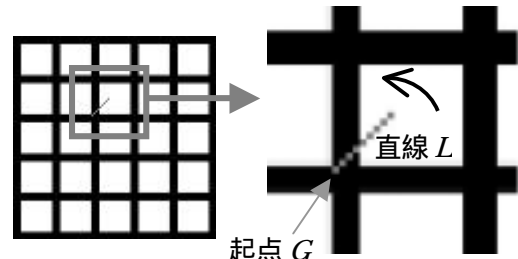
一般的な能動的計測法は、図1のように1本の線状のレーザ光（スリット光）を走査させ、それを CCD カメラで撮影することで3次元座標計算を行う光切断法であり、空間解像度は CCD の画素単位となる。このため、得られる計測値は、3次元座標点の集まり（点群）のスカラデータであり、CAD データとして利用するためには、ベクトル化が必要となる。この点群から自動的に、全体を1つのサーフェスデータとして生成するソフトウェアも実在するが、ある任意の部分の一つの独立した部品として取り扱いたい場合は、点群から手作業で部品のベクトル化を行わなければならない。計測値から工業製品の CAD 図面を作成する場合は、このベクトル化が必須となり多大の時間を要している。そこで、本論文は、格子パターンの格子点を計測点とし、その隣接する上下左右の関係を把握することで、自動的に格子点データのベクトル化を可能とした。また、対象物全体のデータ量を削減させることも可能となった。また、従来のスリット光の投影は、金属表面のように反射率が高い物質では、CCD カメラでスリットを撮影することができず計測できない箇所が発生する。また、物体表面に黒色などの光を吸収するような色が存在する場合、同様に計測することができない問題がある。本論文では、格子パターンを用いた3次元モデルの構築として、網タイツを利用した人体の足形状、格子状フィルムを利用した「金型」と「鬼の面」、液晶プロジェクタを利用した黒色の球物体の対象物について、3次元モデルの構築の結果について述べる。

## 2. 交差点の抽出方法

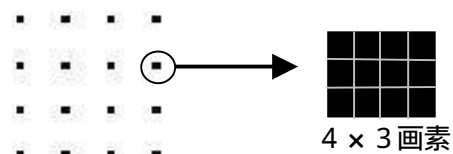
### 2.1 細線化

格子パターンの利点は、格子点の隣接関係を明確に捉えることが可能な点である。格子点同士が上下左右の四方に線で結ばれており、この線を追跡することで格子点同士の関係を把握することが容易となる。格子点の抽出方法において、過去の

研究<sup>1)</sup>では、図2のように起点を  $G$  とする長さ  $L$ 、傾き  $\theta$  の直線で、 $\theta$  を変化させながらパターン・マッチングで抽出する方法が提案されていた。しかし、2値化の格子画像は、ある程度の画素幅を持つため、これによって抽出した格子点像は広がりを持ち、ステレオ・マッチングの誤対応の原因となっていた。誤対応の解決方法も提案されているが、投影する格子幅が大きくなるにつれて、抽出される格子点像も大きくなり、誤対応が増加し、計測精度が悪化する問題を抱えている。



(a) 格子パターン原画 (b) 格子点拡大図



(c) 抽出格子点 (d) 格子点画素数

図2 直線  $L$  による格子点の抽出

Fig. 2 The Extraction of Grid Point with line  $L$

そこで、本論文は、画素幅のある格子パターン画像の中心骨格線を求めるために細線化を行った。細線化は、対象領域の中心部を求めるほかに、連結性が保持される特徴がある。連結性とは、元の画像の接続情報が保たれることである。この結果、画素の幅が1画素の格子画像を得ることができた。つまり、格子点の抽出が画素単位で行われるため、ステレオ・マッチングが正確に実行できることを意味する。細線化のアルゴリズムは、過去に多数提案されているが、本論文では、「ヒゲ」と呼ばれる細線化歪みが少ない  $3 \times 3$  のマスクパターンによる並列型アルゴリズムを適用した。

### 2.2 細線化画像からの交差点抽出

格子点は、細線化画像から高精度にその位置を抽出される必要がある。そのため、格子パターン図形の「交差点」、「辺」、「端点」を区別するために細線化画像にフィルタ処理を行った。このフィルタ処理は式1で示される。このフィルタは、細線化画像の8近傍画素の和によって、重み付けを行い、格子パターン図形を、端点、線分、交差点に分類することができる。

$$g(x, y) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \delta(x+m, y+n) \dots \text{式 1}$$

ただし,

$$\delta(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > 0, \{(x, y) | (x, y) \in \{-1, 1\}\} \\ 0 & f(x, y) = 0 \text{ or } \{x = 0, y = 0\} \end{cases}$$

このフィルタは、8近傍に存在する画素数を出力する。このフィルタ処理によって、細線化画像に重み付けを行ったことになる。つまり、この重み情報によって格子点を特定することが可能となる。図3にフィルタ処理の結果を示す。図3(a)の細線化画像に対して、フィルタ処理を行うと図3(b)のような結果となる。この図から分かるように、格子点の抽出は、その画素値が3以上である箇所が格子点となる。このフィルタ処理を行った画像によって、表1に示すように、格子パターンの種別の特定が可能となる。しかし、図3(b)の例に示すように、格子点は画素値が3と4からなる3画素の集まりとして表され、画素の広がりとして存在する。これは、図2の直線による抽出結果に比べて画素の広がりが小さいが、同様にマッチング誤差を含む可能性がある。

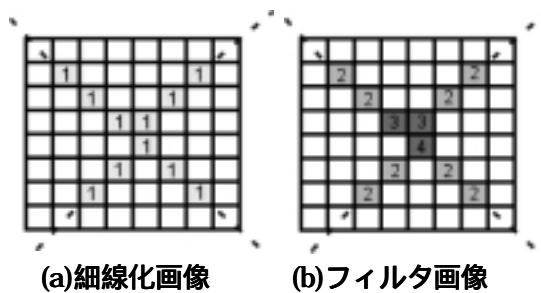


図3 フィルタ処理  
Fig. 3 Filter Processing

$g(x, y)$	連結タイプ
0	孤立点
1	端点
2	連結点
3	分岐点
4	交差点

表1 格子パターンの種別  
Table. 1 The Types of Grid Pattern

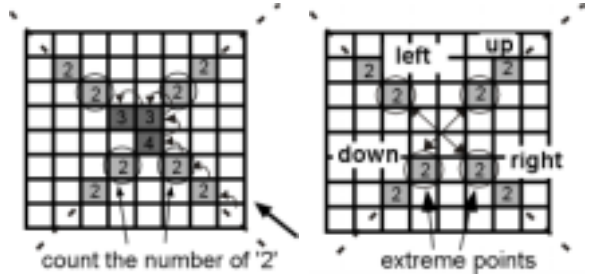
図3(b)で表された格子点(交差点)の画素の広がりから、1画素の交差点を抽出するアルゴリズムを以下に示す。

- Step1: 画素値 '2' を追跡し、'3' 以上の画素値を検索する。
- Step2: '3' 以上が見つかったら、'3' 以上の

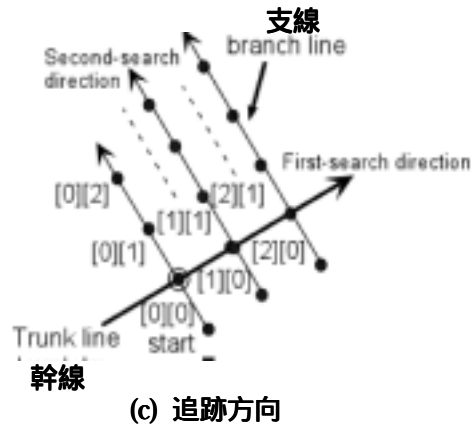
画素のみを検索する。このとき周囲の '2' をカウントする。図4(a)参照。

Step3: '2' が4個ある場合、その4端点が交差するような2端点を決定する。図4(b)参照。

Step4: 幹線を第一番目の追跡方向とし、二番目に支線方向を追跡し、2次元配列を作成する。図4(c)参照。



(a)画素2のカウント (b)交差する2端点の決定



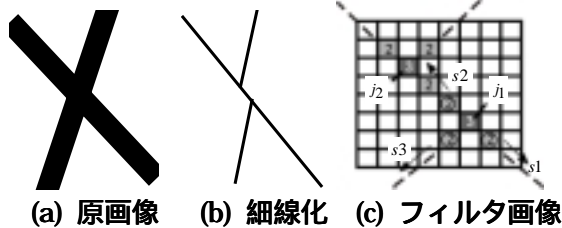
(c) 追跡方向  
図4 交差点抽出アルゴリズム

Fig. 4 The algorithm of extraction of intersection

### 2.3 交差点の歪み修正

細線化アルゴリズムは、定常領域では、安定した結果を得ることができるが、特異領域では、不安定な結果が得られる<sup>2)</sup>。ノイズが大きい格子画像や、交差する線分の角度が大きき場合は、特異領域となり歪み発生する。角度が大きくなる理由としては、カメラの撮影位置による視差が考えられる。斜め角度の大きい交差点は、視差を利用するステレオの左右画像では起こりやすい現象である。図5に交差点の歪みの例を示す。図5(a)の原画像に対して細線化処理を行った結果画像が、図5(b)の細線化画像である。原画像では交差点を意味しているが、細線化画像では、交差点とは特定できない画像である。本論文では、この歪みを正しく修正するアルゴリズムを提案した。正常の交差点は4つの支線が存在するのに対し、歪み交差点は3つの支線となる。このことから、歪み交差

点は、3つの支線を持つ接続点が2つ隣接して存在すると定義することができる。



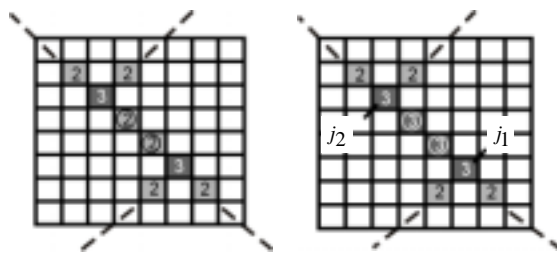
(a) 原画像 (b) 細線化 (c) フィルタ画像

図5 交差点歪み

Fig. 5 The distortion of intersection

歪み修正アルゴリズムを以下に示す。

- Step1:画素値「3」以上を探索する。
- Step2:画素値「3」以上の周りの、画素値「2」(支線)の個数が3個の場合、歪み交差点の候補とする。
- Step3:3個の支線をそれぞれ追跡し、画素値「3」以上で支線が3個の箇所を検索する。
- Step4: Step3の処理で支線個数が3個の箇所が2つ隣接して存在する場合、その箇所を歪み交差点とする。図6(a)参照。
- Step5:2つの隣接する箇所は、接続を意味する画素値「2」でつながっており、この間の画素値「2」を画素値「3」で置き換える。図6(b)参照。
- Step6:歪み交差点は画素値「3」以上の交差点として認識される。



(a) 歪み交差点の探索 (b) 歪み修正

図6 交差点歪みの修正

Fig. 6 The correction of the intersection

## 2.4 歪み修正の実験結果

開発した歪み修正アルゴリズムを用いて、歪み交差点の抽出実験を行った。図7に交差点の4端点を抽出した結果を示す。丸印の交差点は歪みが発生した箇所であるが、修正アルゴリズムが有効に働いて、交差点の4端点が正確に、抽出されていることが分かる。計測点の交差中心点(1画素)は、この4端点が交差する交点として求めた。

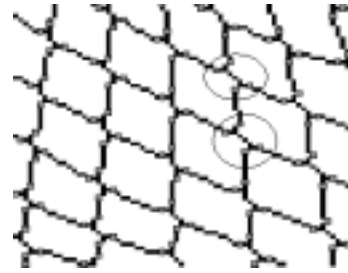


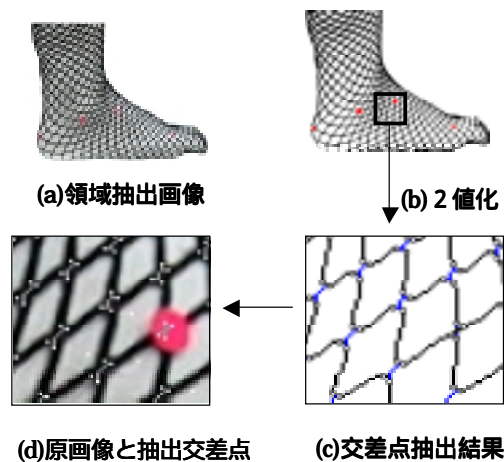
図7 歪み交差点の修正結果

Fig. 7 The result of correction of distortion

## 3. 実験結果

### 3.1 交差点の抽出

石膏の足型に網タイツを被せて交差点を抽出した結果を図8に示す。図8(a)は撮影画像の背景を除去し、必要領域のみを抽出した原画像である。この原画像に、2値化を行った画像が図8(b)である。格子線とマーカが抽出されていることが分かる。図8(c)は、細線化、画像フィルタ及び、交差点抽出アルゴリズムを適用して交差点を抽出した結果である。図8(d)は、原画像と抽出した交差点を重ね合わせて表示した図である。この実験結果から、歪みを含んだ交差点を良好に抽出することができた。



(a) 領域抽出画像

(b) 2値化

(d) 原画像と抽出交差点

(c) 交差点抽出結果

図8 交差点抽出実験結果

Fig. 8 The result of extraction of intersection

### 3.2 3次元モデルの構築

3次元のモデル化は、射影幾何学のカメラモデルを用いた。カメラの内部・外部パラメータは、寸法が既知の物体を撮影して求めた。カメラパラメータが求まると、 $3 \times 4$ 行列で表される射影行列が求まり、連立方程式を解くことで格子点の空間座標値を計算することができる。射影幾何学は、非線形の透視投影を、線形に近似して計算が行われる。このため、連立方程式の解法は、一般化逆行列を用いた最小二乗法による近似解で計算した。

### 3.3 計測システム

計測システムは、デジタルカメラ8台と専用のカメラスタンド及びPCによって構成した。図9にシステムの外觀図を示す。8台のカメラはUSB Hubを経由してPCへ接続されており、PCからのシャッター制御により撮影を行う。足の裏は鏡を利用して撮影した。

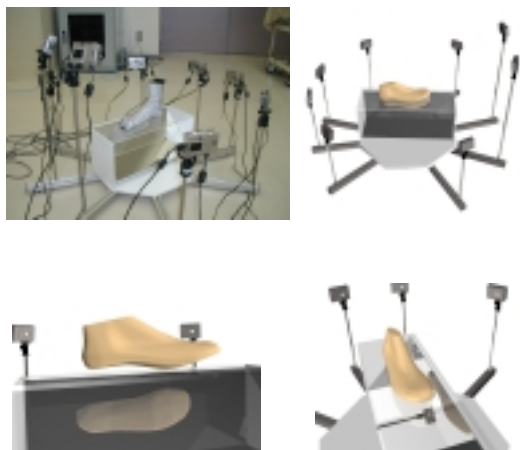


図9 計測システム外觀図  
Fig. 9 The external view of the system

計測システムによって、網タイツを被せた足の交差点を抽出し、ステレオ・マッチングによってモデル化した結果を図10に示す。格子矩形をそのまま四角形ポリゴンで表示し、格子パターンに基づいてベクトル化を行った。そのデータをCADに取り込んだ結果を図11に示す。

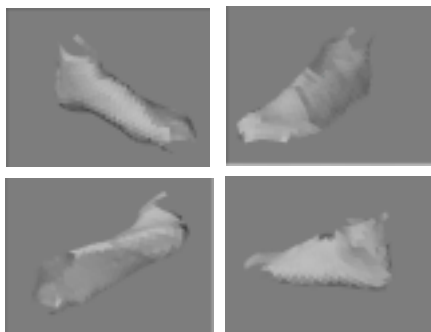


図10 足の3次元モデル構築結果  
Fig. 10 The result of 3D model of foot

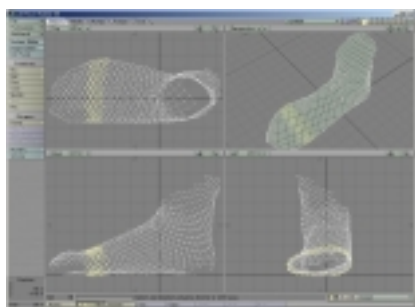


図11 CADへのデータ入力  
Fig. 11 The input data of the CAD

### 3.4 金属と黒色球のモデル化

反射率が高い金属物質の3次元モデル化は、光を反射するために、レーザ光などの投光装置が使用できない。金型部品は曲面が含まれることが多いため、光を乱反射する領域が多く十分な計測ができない。本実験では、1本のレーザ線を走査させ、その投影線を CCD で捉えて計測する市販の3次元計測器と、本論文で提案した手法とを比較した。図12は、実験する計測対象サンプルを示しており、曲面を含む金型部品と、無線アンテナのカバーであり、黒色の球状部品である。

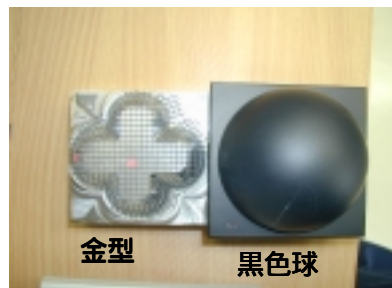


図12 金型と黒色球  
Fig. 12 The mold and black sphere

図13に市販計測器で計測した結果を示す。黒色球は先端の一部分しか計測されておらず、金型部品の大部分は計測できなかった。これは、レーザ光の大部分が反射により CCD カメラで捉えられなかったことが原因である。

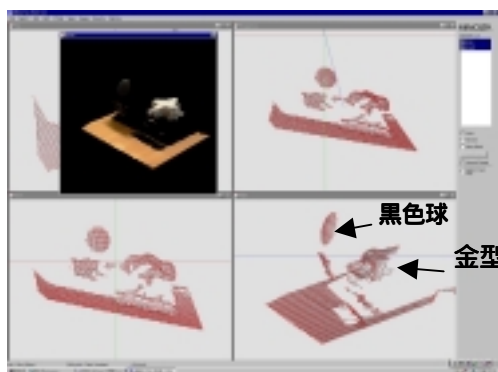


図13 市販計測器による計測結果  
Fig. 13 The result of commercial device

図14に提案手法による金型部品のモデル化実験の結果を示す。裏面がシールの薄いフィルムを格子状にカットし、それを金型部品に貼り付けて計測を行った。4方向からの撮影を行い、2値化、細線化、交差点抽出の処理によって、正確なステレオ・マッチングが可能となった。この格子点の正確な抽出によって、市販計測器では大部分がモデル化(計測)できなかった箇所を、良好な形状モデルとして構築することができた。

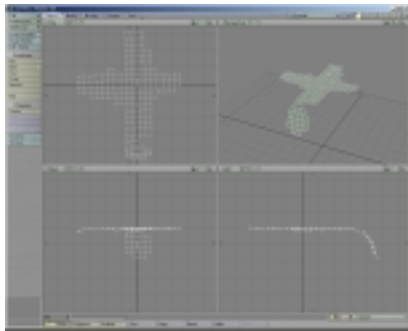
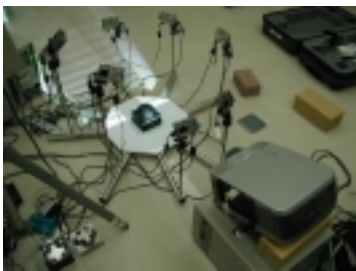


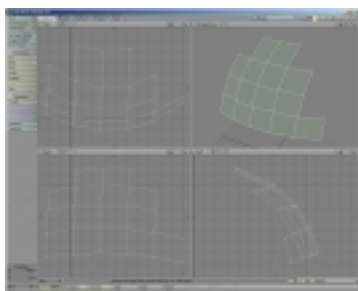
図 14 提案手法による金型のモデル化  
Fig. 14 Modeling of mold with proposal method

### 3.5 液晶プロジェクタによるモデル化

図 15 に、液晶プロジェクタで格子パターンを投影し、モデル化を行った様子を示す。格子の単位矩形は約 50×50mm で、対象物は黒色のため、格子パターンが明確に浮き出るように、PC の描画ソフトウェアにより、黒色の格子模様を色反転して白色の格子パターンが投影されるように作成した。



(a) プロジェクタの格子パターン投影



(b) 黒色球のモデル化

図 15 液晶プロジェクタによるモデル化  
Fig. 15 Modeling of black sphere with projector

### 3.6 鬼の面のモデル化

鬼面のモデル化の場合、市販計測器で計測できなかった「目」と「鼻」と「あご」に、格子状の薄いフィルムを対象物に貼附して実験を行った。図 16 (a) は開発したソフトウェアで、入力画像に 2 値化を行った結果を示している。本実験で使用した格子状フィルムは、7mm 角と 3mm 角の 2 種類を用意し、曲面の勾配が滑らかな「目」と「あご」に大きめの 7mm 角を貼り、勾配が急な「鼻」

に細かい 3mm 角を貼って計測した。これは、形状の起伏によって、解像度の変更が可能であることを示しており、ユーザは自由に目的に合う柔軟な計測が可能である。図 16 (b) に鬼の「目」、「鼻」、「あご」の形状のモデル化を示す。



(a) 開発プログラム



(b) 鬼の目、鼻、あごのモデル化

図 16 鬼の面のモデル化  
Fig. 16 Modeling of face of ONI

## 4. おわりに

本論文では、格子パターンを活用した 3 次元モデルの構築方法を提案した。網タイツや格子状のフィルムシールを使うことで、プロジェクタのような大がかりな装置が無くても 3 次元モデルを安価に構築することが可能となった。また、計測精度(単位: mm)は、誤差平均: 0.597, 標準偏差: 0.224, 最小誤差: 0.323, 最大誤差: 0.962 であった。計測データは、そのまま使われることは少なく、再度、CAD を使ってモデルの再構築が行われることが多く、簡易的な用途では十分な精度を実現した。本手法は細線化に時間を要しているため、今後は高速化を検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 青木, 谷内田, 辻: パターン投影法と 2 台のカメラを用いた 3 次元物体の計測, 信学論, Vol. J68-D, No. 3, pp. 384-391(1985).
- 2) Rocha, J., Bernardino, R.: Singularities and Regularities on Line Pictures via Symmetrical Trapezoids, IEEE Trans, Vol. 20, No. 4, pp.391-395(1998)