

# 任意視点シルエット画像を用いた三次元形状計測法\*

川末 紀功仁<sup>\*1</sup> , 田口 喜祥<sup>\*2</sup>

## Three-dimensional Measurement Using Silhouette Images From Random Angles

Kikuhito KAWASUE<sup>\*3</sup> , Nobuyoshi TAGUCHI

<sup>\*3</sup>Miyazaki University, Faculty of Engineering  
1-1, Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki, 889-2192, JAPAN

In general a three-dimensional measurement system is established by considering the geometric configuration of the system, such as CCD camera and structured light, etc., because the system measurement is based on the principle of triangulation. Once the configuration has been determined, it must be maintained until the measurements have been completed. The main disadvantage of such systems is the dead-angles that inherently exist in a single image taken from a fixed angle.

This paper proposes a new approach to three-dimensional reconstruction of an object shape using multiple silhouette images that are taken from arbitrary random angles. The technique can be realized by utilizing a magnetic sensor that is attached to the CCD camera. The distinctive feature of this system is that it reduces the limitation of the target in terms of size, shape and obstruction, etc. but more importantly it reduces the dead-angle problem of measurement.

Experimental results show the feasibility of our system.

**Key Words:** Image processing, Three-dimensional, silhouette, magnetic sensor

### 1 . 緒 言

画像処理による三次元計測は非接触かつオンラインの計測が可能のため、広く理工学の分野で利用され、設計や解析さらに生産効率の向上に大きく寄与している。

三次元形状計測の手法としては、レーザを利用したスリット光投影法や<sup>(1)(2)</sup>、2台以上のTVカメラを用いたステレオ法<sup>(3) (5)</sup>が主流である。スリット光投影法では、レーザスリット光を計測対象上で走査しながら、各走査時点で計測対象表面に現れる輝線を抽出し、三次元データを得ている。しかし、スリット光投影法では、レーザ光を吸収する表面色を持つ対象を計測できない。また、ステレオ法では、異なる角度に設置した複数台のCCDカメラ間で計測点の対応をとる際に対応処理が困難になる場合がある。

これらの手法に対し、計測対象のシルエットを基に

三次元形状を復元する視体積交差法がある。視体積交差法は、様々な方向から物体を撮影し、それぞれのシルエット画像から物体が存在する候補領域（視体積）を求め、この領域が交差する積領域を求めることで三次元形状計測を行う手法である。井口らが物体の立体形状を近似多面体として表現する場合の形状把握方法<sup>(6)</sup>として提案するなど、従来から多くの研究がなされている<sup>(6) (12)</sup>。この方法は対象の色に対するロバスト性が強く、ステレオ視のように画像間で対応点を見つける必要がない特徴がある。視角を減らすためには計測対象の全周にわたり、できるだけ多くの画像を撮影する必要がある。これまでに、キャリブレーションされた多数のカメラを計測対象の周囲に配置して計測を行う方法<sup>(9) (12)</sup>や対象を回転テーブルに乗せることで対象の全周を撮影する方法が提案されている<sup>(7) (8)</sup>。多数のカメラで一度に撮影する方法では動く対象の計測ができるメリットがあるが、設置できるカメラの個数には配置スペースや画像取り込み機器のチャンネル数などにより物理的な限界がある。また、いずれの方法も、カメラの配置を変更する度にキャリブレーションをやり直す必要がある。計測結果を見て、カメラの配置を変更することも多く、かなり面倒な作業になる。

\*原稿受付 年 月 日。

<sup>\*1</sup>正員, 宮崎大学工学部 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)。

<sup>\*2</sup>正員, 長崎県工業技術センター (〒856-0026 長崎県大村市池田2丁目1303-8)

E-mail: kawasue@computer.org

一方、レーザとCCDを備えた3Dセンサヘッドの位置を別途準備したステレオカメラで撮影することで3Dセンサヘッドを自在に移動可能としたシステムが提案されている<sup>(13)</sup>。カメラの移動を可能としたことで、計測の死角を大幅に削減できる。しかしながら、レーザスリット光を用いた手法であるため前述の通りレーザ光を吸収する表面色を持つ対象を計測できない問題がある。

そこで、計測対象の表面色に対してロバストな視体積交差法の原理に基づき、CCDカメラの位置と姿勢を三次元磁気センサでリアルタイムに検出することで、任意視点からの計測ができるシステムを試作した。計測中、モニターで画像を確認しながら、手に保持したCCDカメラを撮影したい位置に自由に移動できる所に特徴を持つ。また、カメラの焦点からシルエット輪郭を通る直線群を三次元磁気センサのデータを用いて物体座標系に変換し、この直線群と地面に平行な任意平面  $z=z_i$  との交点群の座標を求めることにより、 $z=z_i$  断面の形状を効率よく算出するアルゴリズムを開発した。

本論文では、提案する計測器の応用例として、農産物の形状を計測した例を示す。

## 2. システム構成

図1に試作した計測システム構成を示す。使用する磁気センサ（Polhemus社 Fastrack）は磁気レーバと磁気トランスミッタから構成される。図2に磁気レーバを備えたCCDカメラ保持部を示す。CCD保持部は磁界に影響を与えないように木材で製作されている。磁気トランスミッタは、直交する3つのコイルから構成されており、これらのコイルの励磁により直交する3つの磁界ベクトルを発生する。磁気レーバは、半径約80cmの範囲内において、これらの磁界ベクトルを受信し、その強弱により磁気トランスミッタに対する相対的な位置（位置ベクトル）および姿勢の情報（ロール、ピッチ、ヨー）を120Hzで出力する。

コンピュータは、画像データと共に、撮影された時点でのカメラの三次元位置と姿勢データを取り込み、これらのデータを基に物体復元処理を行う。

図3に使用した座標系を示す。ディスプレイモニタ上でのカメラ座標系、磁気レーバの中心に原点を置いたレーバ座標系、物体が設置しているテーブル上に固定され磁気トランスミッタの中心を原点とした物体座標系で構成される。

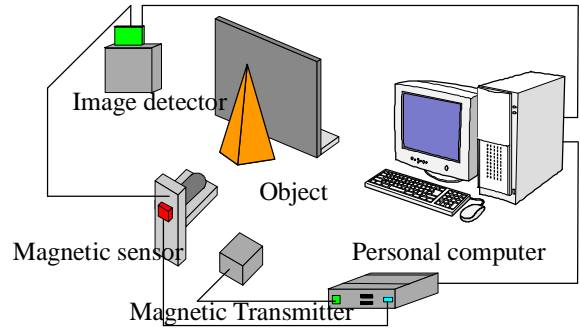


Fig.1 system setup

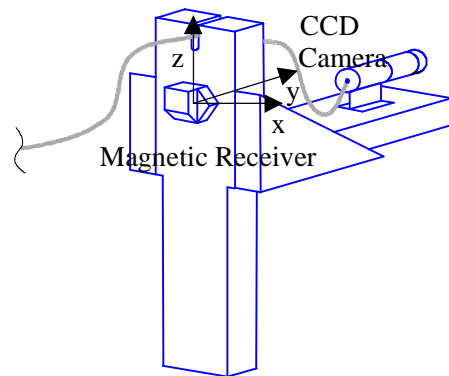


Fig.2 Handheld camera with magnetic sensor

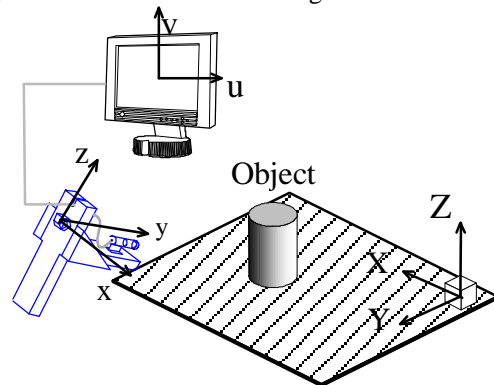


Fig.3 Coordinates

## 3. 計測原理

図4にシルエット像と視体積領域を示す。撮影される対象のシルエット像から、このシルエット形状を断面にもつ視体積領域が決定される。この視体積領域は、カメラの焦点を起点とし、カメラの視野角に応じた広がりをもつ。CCDカメラに取り付けた磁気レーバの情報により、この視体積領域を計測物体に固定した物体座標系（磁気トランスミッタ座標系）に変換する。図5のように計測対象を様々な方向から撮影し、それぞれの位置における視体積領域を算出する。また、図6のように物体座標系上で算出された視体積の積領域を求めることで、最終的な物体形状が算出される。

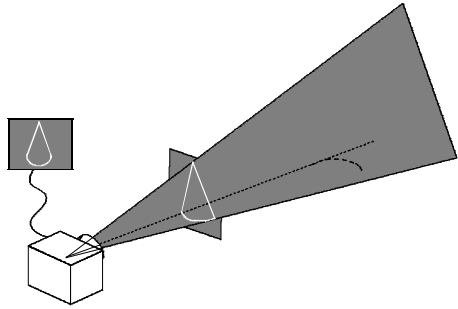


Fig.4 Silhouette and estimated volume that the object exists

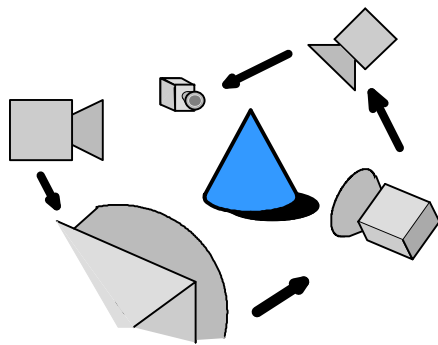


Fig.5 Image capturing from random angle.

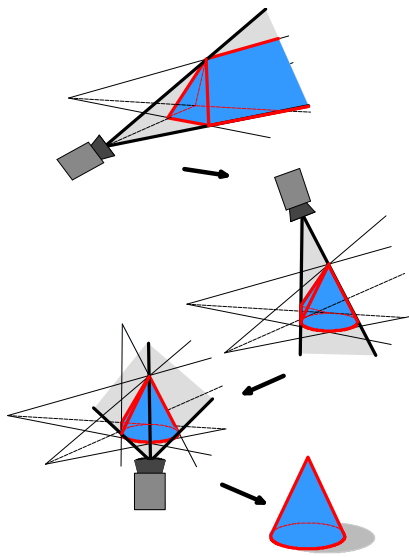
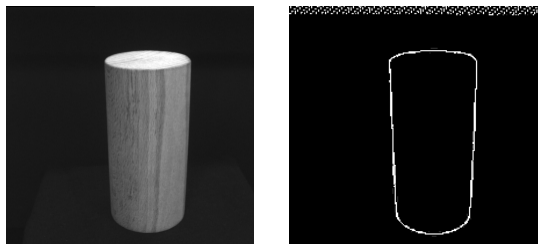


Fig. 6 Extraction of final volume



Original Image

Extracted edge

Fig.7 Edge extraction

#### 4. シルエット画像を用いた三次元復元処理

撮影された画像は、二値化およびエッジ検出処理を施されあと、三次元復元処理に利用される。検出された輪郭画像の例を図7に示す。図2のようにCCDカメラ保持部に固定された磁気センサ座標系(x,y,z)とカメラ座標系(u,v)の関係は、磁気レーザに対するカメラ位置、姿勢、画角などを考慮し、以下の式で表される。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、この式は以下の2式に展開される。

$$\begin{cases} u = k_{11}x + k_{12}y + k_{13}z + k_{14} - k_{31}ux - k_{32}uy - k_{33}uz \\ v = k_{21}x + k_{22}y + k_{23}z + k_{24} - k_{31}vx - k_{32}vy - k_{33}vz \end{cases} \quad (2)$$

この式は、 $(k_{11}-k_{33})$ の計11個の係数(カメラパラメータ)を含んでいる。この係数は、(2)式にあらかじめ座標が既知である(x,y),(u,v)の組み合わせを6組以上代入し、連立方程式を解くことで決定される。図8にこのキャリブレーションに用いるシステムを示す。レーザ座標のx-y平面に対し平行に設置した目盛り板をCCDカメラで撮影し、画像をコンピュータディスプレイ上に表示する。コンピュータマウスでディスプレイ上に表示された目盛りをクリックすることで、カメラ座標(u,v)を入力すると共に、目盛り板から読みとれる座標(レーザ座標: x,y,z)をキーボードから入力する。これを、目盛り板の位置zを変えながら複数回繰り返す。キャリブレーションによって算出されたカメラパラメータ $(k_{11}-k_{33})$ を用い、(2)式を以下のように変形する。

$$\begin{cases} (k_{11} - k_{31}u)x + (k_{12} - k_{32}u)y + (k_{13} - k_{33}u)z - u = 0 \\ (k_{21} - k_{31}v)x + (k_{22} - k_{32}v)y + (k_{23} - k_{33}v)z - v = 0 \end{cases} \quad (3)$$

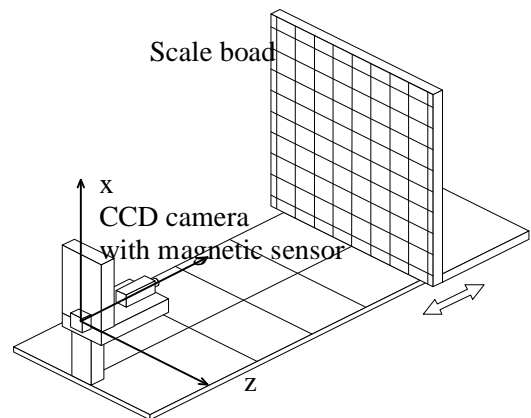


Fig.8 Calibration setup

(3)を満たすものは2平面の交線を示し、カメラの焦点を通る。この式に計測対象の輪郭上の点(u,v)を代入するとカメラの焦点からカメラ受像面上の輪郭上の点(u,v)および計測対象の表面を通る式が算出される。算出される直線群を図9に示す。

(3)式の平面の法線ベクトルの外積bを求めることにより、交線は、レシーバ座標上で以下のように表される。

$$r(t) = a + tb \quad (4)$$

ここで、aは交線の位置ベクトルである。

また、この直線は磁気センサから検出されるセンサの位置ベクトル  $w : (w_x, w_y, w_z)$  および姿勢情報  $RPY(\Psi, \Theta, \Phi)$  (ロール・ピッチ・ヨー) により、物体座標系では以下の式で表される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = RPY(\Psi, \Theta, \Phi) \cdot r(t) + w \quad (5)$$

図10のように、対象の輪郭上の点すべてについて、焦点と輪郭を結ぶ直線の式を算出し、この直線群と地面と平行な任意平面  $z = z_1$  との交点を求める。

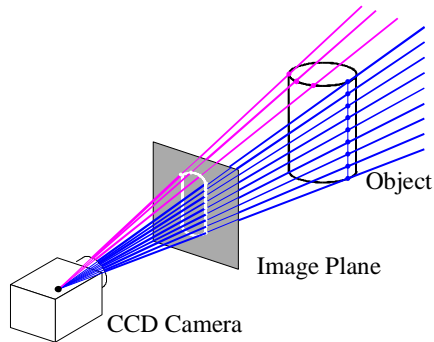


Fig.9 Lines pass the outline and Focus point

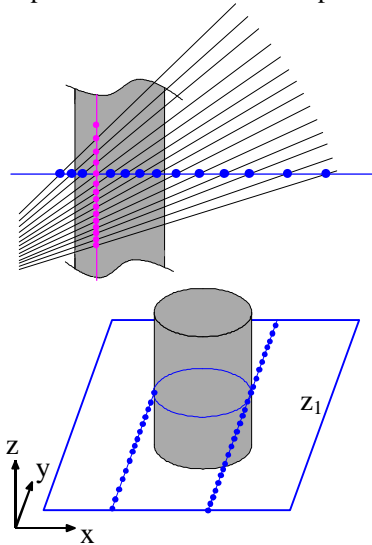


Fig.10 Determination of the cross-section of estimate volume

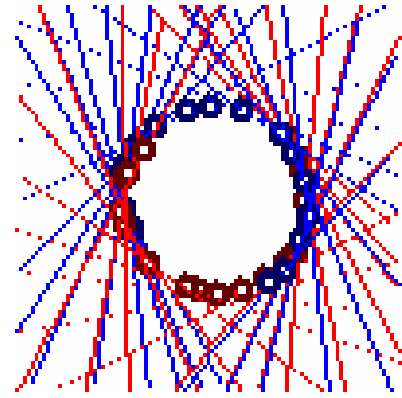


Fig.11 The estimated cross-section of the cylinder

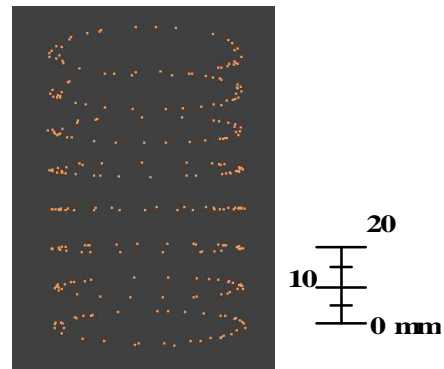


Fig.12 Whole volume of cylinder

この時の交点群が、視体積の境界となる。様々な方向から撮影した画像を基に算出した視体積を  $z = z_1$  面上に表すと図11のようになる。図中の小丸は、視体積境界の交点を示す。このようにして求めた各視体積断面を重ね図12のように対象全体を再生する。

## 5. 磁気センサデータの補正

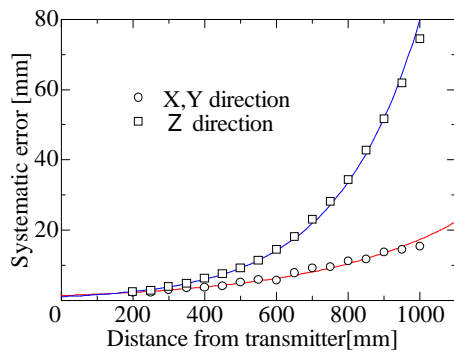
磁気センサは、計測器の周りにある金属の影響を受けやすく、可能な限り周辺にある金属を取り除いた状態で計測を行うことが望ましい。しかしながら、床下の構造用金属など周辺から完全に金属を取り除くことが難しい場合も少なくない。システム周辺に金属が存在する場合、特に磁気レシーバの絶対座標データが変化する。しかし、生じる誤差は系統的で、あらかじめその傾向を調べることで補正できる。使用した実験室では、床下に構造用金属あり、位置検出においてz方向に比較的大きな誤差が生じることを確認している。図13 a,bにそれぞれ磁気レシーバ位置(分解能  $5 \times 10^{-3}$  [mm])の系統誤差および偶然誤差、また、図14 a,bにそれぞれ磁気レシーバ回転角(方位角、分解能  $1.7 \times 10^{-4}$  [rad])の系統誤差および偶然誤差を示す。図14 bの角度の検定では、磁気トランスミッタからの距離が約400[mm]以下のところでは、ばらつきが磁気セ

ンサの角度分解能以下に納まるため、偶然誤差は0となる．系統誤差を考慮した補正は以下の式のようになる．

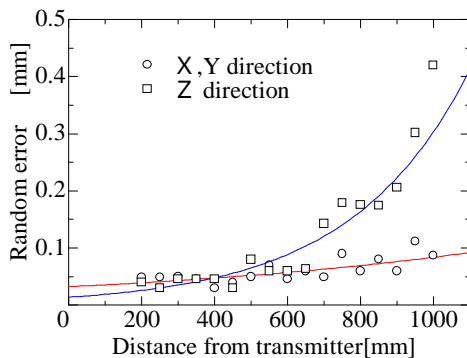
$$\begin{cases} x' = x + f(D) \\ y' = y + g(D) \\ z' = z + h(D) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $D$ は磁気センサのデータに基づく磁気トランスミッタから磁気レシーバまでの距離、 $f, g, h$ は、系統誤差の近似関数である．

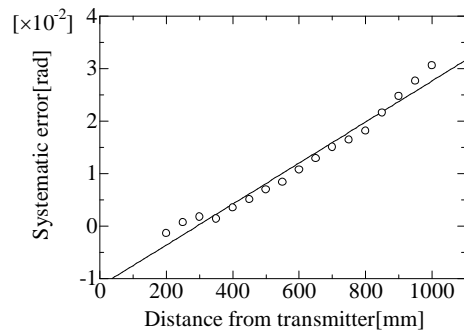
偶然誤差に関しては、ランダムに発生し、補正することができないため最終的な計測結果に影響する．したがって、システムの最終的な誤差は補正後の磁気センサデータと画像処理における誤差を含めたものとなる．磁気センサの計測範囲内（約半径80cm）において、径が既知の円柱を計測した結果、最終的な誤差は約1.5mmであった．



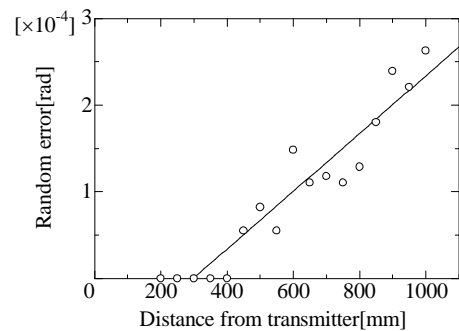
a. Systematic error on positional measurement.



b. Random error on positional measurement.  
Fig. 13 Positional measurement



a. Systematic error of orientational measurement



b. Random error of orientational measurement  
Fig.14 Orientational measurement

## 6. 農作物の品質評価への応用

農業分野においては、色、形状、傷などの品質評価の自動化が期待されている．例えば形状計測の場合、作物ごとに決められた標準出荷規格表を基に検査員の目視による3段階程度の評価がなされている．図15は、宮崎県とよのかイチゴ標準出荷規格である<sup>(14)</sup>．3段階の等級区分がなされており、円すい形に近いほど高等級である．一般的には、Aランク以外のイチゴが市場に出回することは少ない．目視による評価では、作業者によって個人差があり、公平に評価されていないことが問題視されている．そのため、コンピュータによる定量的な評価が期待されている．図16に提案するシステムによる計測結果をもとにイチゴの三次元形状を再現したものを示す．3千点程度の座標データから三次元的な形状が確認できる．

図17aは上記標準出荷規格の内、Aランクのいちごの形状を二値画像で示したもので、白点はその重心を示す．また、図17bは、図16の三次元形状からイチゴの頂点を通りもっとも面積が大きい断面の輪郭を抽出したもので、黒点はその重心を示す．計測画像と、断面積を等しくした標準規格画像間で重心を一致させた後、画像相関を取ることで形状の定量的な評価を行うことができる．図17の画像間においては、標準規格画像の面積に対し93%の一致率を示した．

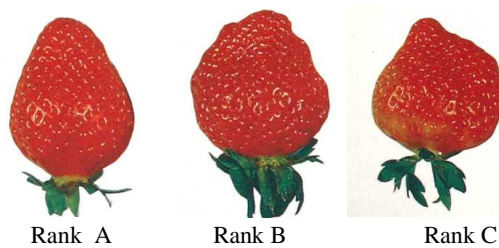


Fig.15 Standard of strawberry for the sorting

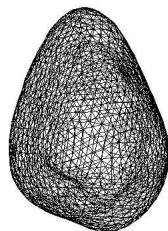
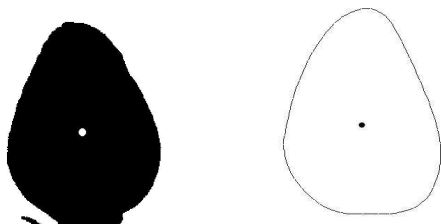


Fig.16 Reconstructed image on computer display.



a. Standard image      b. Measured image

Fig.17 Evaluation of strawberry using a cross section.



Fig. 18 Horizontal cross section

ケーキ等に利用されるイチゴでは、どの方向から見ても均整の取れた形状を持つ必要がある。図18は、計測したイチゴの横断面形状を示したもので、この真円度を求めることで、イチゴの多視点から見た場合のバランスを定量的に評価できる。このように、提案した手法を用いることにより、従来行われている規格表に基づいた二次元的な評価よりも、高度な形状評価が可能となる。

農産物の計測では、工場製品と比較してばらつきがある対象を、口バストかつ簡単に計測することが重要である。光切断法などによる三次元計測手法も考えられるが、農作物では、黒など光計測が苦手とする色のものが多く、汎用性をもたせるには本論文で提案する

シルエット画像による計測方法が有効である。

## 7. 結言

三次元磁気センサをカメラに取り付けることで、自由なアングルから撮影したシルエット画像を基に三次元形状計測を行うシステムを試作した。手に保持した CCD カメラを対象の形状に合わせて自由に移動できるため、対象の形状に制限が少なく汎用性が高いシステムである。一般的な画像計測装置で、面倒な作業となるキャリブレーションも、レンズなどカメラの仕様を変更しない限り、再度行う必要が無い。初心者でも数分程度で計測を行うことができる。誤差は、磁気センサが有効な計測領域内（半径 80 cm）では、1.5mm 程度であり、本論文で紹介した農産物の品質評価など簡易的な三次元形状計測器としては十分である。

## 文献

- (1) 牛島省：レーザーライトシートスキャニングシステムを用いた三次元画像処理流速計測法，機論，62-596，B(1996),pp.1414-1419
- (2) 井口征士，佐藤宏介，三次元画像計測，昭晃堂,1990
- (3) 徐 剛，辻 三郎：三次元ビジョン，共立出版，(1998)
- (4) E.R.Davies: Machine Vision: Theory algorithms, Practicalities, Academic press, (1990)
- (5) Carme Torras:Computer Vision: Theory and Industrial Applications, Springer-Verlag,( 1992)
- (6) 三宅哲夫，土井淳多：立体形状の多面体近似システム，情報処理学会論文誌，Vol.25, No.5(1984), pp.745-754
- (7) X. Sun, T. Ishimatsu: Three-dimensional measurement using profile information, Proc. of JSSUME'95 (1995), pp.179-182
- (8) Jian Yu Zheng: Acquiring 3D models from sequences of contours, IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence, 14(2),(1992), pp.157-173
- (9) X. Sun, T. Ishimatsu: Reconstruction of three-dimensional shape of huege rock using vision, Proc. of 15th IASTED(1997), 259-262
- (10) K. Fujimoto, T. Ishimatsu, S. Nagata: 3-D measurement and computer graphics of huge rock, Journal of robotics and mechatronics, 9(6), (1997),490-495

- ( 1 1 ) 上田悦子, 松本吉央, ほか 2 名: 多視点シルエット画像を用いた手の形状推定, CVIM-128-4(2001)
- ( 1 2 ) ウ小軍, 延原章平, 和田俊和, 松山隆司: 多視点映像からの実時間 3 次元形状復元とその高精度化, 情報処理学会研究会資料, CVIM-131-9(2001)
- ( 1 3 ) 藤田日出人, 他 3 名: 2 段階の能動ステレオ画像計測法を用いたハンドヘルド型 3 D スキャナ, システム制御情報学会論文誌, Vol.15, No.4(2002), pp.213-219
- ( 1 4 ) 宮崎県経済連・農業共同組合: 宮崎いちご標準出荷規格表