

## 動的な位置あわせメカニズムを持つ3次元モデル生成システム

日高正博<sup>†</sup>, 新屋貴史<sup>†</sup>, 田中雅博<sup>‡</sup>  
甲南大学大学院<sup>†</sup>, 甲南大学<sup>‡</sup>

通常, 対象物の3次元データを得る場合, センサを固定し, 複数回に分けてデータを取得する. しかし, センサを固定するための機材や準備時間などの制約, 足場の悪さからセンサの正確な固定角がわからない場合も存在する. そこで対象物を3次元データ化する手法のひとつとして, 距離画像センサを人が持ち歩き, 対象物をスキャンする方法が考えられる. この手法では高解像度の距離画像センサではデータ取得に時間がかかり過ぎるため, 低解像度であるが高速にスキャン可能な距離画像センサを利用する必要がある. 本手法では, はじめに距離画像とともに得たグレースケール画像を利用してKLT法によって特徴点を抽出する. 次に移動前後の特徴点を元に移動に伴う並進, 回転量の誤差を最小化して, 歩行にあわせて運動するセンサの姿勢を推定する.

### 3D Modeling System with Moving Range Sensor

In this report, we introduce a new idea of creating 3D data of an object by capturing its shape with a hand-held range sensor. Range sensor can get a rough data set by one scan. So, we intend to accumulate the range data from various positions by moving around the object. However, it is important to know the position of the camera to super-impose the accumulated data. In this report, we propose to use singular value decomposition to estimate the camera posture and its position from the observed feature points obtained by using KLT.

#### 1. はじめに

3次元モデルの生成問題は, コンピュータグラフィックス, 文化的・歴史的に重要な物体のデジタル記録[1,2], セキュリティ[3]などに生じる.

近年では, 3Dカメラやレーザースキャナが測定に使われることもある[4]. こうしたほとんどの問題においては, カメラやレーザースキャナの位置や姿勢は固定されている.

動態の追跡問題は, ステレオ視や距離画像処理[5]などで研究されており, 拡張カルマンフ

ィルタあるいはパーティクルフィルタなど非線形フィルタが, 3次元位置を推定するために使われている[6].

また, カメラやレーザースキャナ自体を移動させ, 動きながら測定を行う研究もなされている. 佐藤ら[7]はビデオカメラから取得した動画画像に対して, 初期数百フレームで特徴点を予め与え, 以後の追跡部を自動化することで, 建築物の3次元モデル生成を行っている.

阪野ら[2]は, 気球にレンジセンサを搭載して大型有形文化財の計測を行う方法を提案して

いる。カメラが動くという点では我々の問題と類似した問題設定となっている。

近年、リアルタイムで3次元物体のスキャンができるレーザースキャナが商品として発表されている。非常に高精度なデータが得られるが、レーザの照射範囲が狭く、大型の構造物の形をとるのには不向きである。また、このようなレーザースキャナを手で持ちまわって対象物の3次元モデルを取得するシステムでは、いずれも、レーザースキャナの姿勢を精密に測定する別のセンサを具備している。

本研究では、同様に距離画像センサを持ちながらデータ取得し、3次元モデルの生成、姿勢推定方法を考える。問題となるカメラの姿勢推定では特殊な機器を利用することなく、取得した濃淡画像、距離画像から姿勢の推定を行う。データの取得には120度ごとに3箇所から撮ればすむようにも思われるが、物体は一般に複雑な構造をしていることが多い。そのため、データが取れない部分が出てくること、また、手に持って部分的に接近して詳しく撮影するなどの方法が採れるという利点がある。

カメラの位置と姿勢のパラメータが正確にわかれば、撮影した3Dデータを用いることは容易である。つまり、本研究においては、カメラの位置と姿勢の推定が重要なポイントであると考えられる。カメラ姿勢の推定については、特徴点を複数個捉え、3次元座標の差異から移動量を算出する。画像上の特徴点はカメラの位置が変わると見えないものも出てくるので、前後で共通の特徴点を抽出してカメラ姿勢を推定する。

## 2. 使用機材

本研究では松下電工株式会社の距離画像センサ EKL3101K を用いた。このセンサはレーザ光を使用せず、近赤外 LED を照射して、特殊な CCD で画素ごとに反射光の到達時間を計測する。

EKL3101K の主な仕様は以下のとおりである。

- ・ 解像度：水平 128pix 垂直 123pix
- ・ 画角：水平 60° 垂直 45°
- ・ 検出距離範囲：1.2m～7.5m

- ・ 応答速度：15 フレーム/秒
- ・ 距離分解能： $\sigma=6\text{cm}$ (typ. 距離 3m)
- ・ 出力形式  
距離データ：11 ビット  
濃淡データ：8 ビット
- ・ 使用周囲照度：蛍光灯 3000 lx 以下

メーカーが提示する用途例としてモーションキャプチャの入力装置、ロボットの視覚センサ、人体検知等がある。

本研究では可搬性に優れているという特徴に着目し、容易に持ち運べる EKL3101K を用いてカメラの位置推定を行い、対象物の3次元モデル生成への応用を考える。

## 3. 機器特性

前述の通り、EKL3101K の距離分解能は公称値  $\sigma=6\text{cm}$  であるが実環境において、どの程度の誤差を含むかを確認する。

今回、想定する用途で、もっとも利用されやすい近・中距離において誤差の測定を行った。条件はすべて同じとなるよう注意を払い、一般的な白色蛍光灯下の状況で白色の壁面(室内)を撮影した。また、できるかぎり壁に向かって機材が平行になるように設置している。

一回の計測で使用したサンプル数は 10 秒、150 フレームとした。

表 1 距離画像センサの測定誤差

中心部直線距離	中心 25 画素の標準偏差
1.0m	$\sigma=5.16\text{cm}$
1.5m	$\sigma=7.66\text{cm}$
2.0m	$\sigma=10.53\text{cm}$
3.0m	$\sigma=6.21\text{cm}$
4.0m	$\sigma=10.90\text{cm}$

測定の結果、距離によって誤差の分散に差があることがわかった。全体的に分解能が低いのが、特に 2.0m, 4.0m 付近では誤差が大きく、問題となる可能性が高い。CCD の中心部と周辺部、レンズ歪みなど、距離以外の要素による誤差の違いは認められなかった。

同様に画角についても 3次元化する際の重要な情報となるため、検証を行った。仕様では

水平方向 60 度, 垂直方向 45 度の両角を持つと記載されており, それぞれを 128 点および 123 点で測定している. したがって, 距離画像左下を原点とすると, 縦方向が  $i=1, 2, \dots, 123$ , 横方向が  $j=1, 2, \dots, 128$  となる. カメラ座標の  $(i, j)$  において, 距離  $d(i, j)$  に物体があったとすると, その物体のカメラ座標は以下のように計算される.

$$\begin{aligned} x &= d(i, j) \cos(\alpha_i) \sin(\beta_j) \\ y &= d(i, j) \sin(\alpha_i) \cos(\beta_j) \\ z &= d(i, j) \cos(\alpha_i) \cos(\beta_j) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに,

$$\begin{aligned} \alpha_i &= 0.3689(i-1) - 22.5 \quad (i=1, 2, \dots, 123) \\ \beta_j &= 0.4724(j-1) - 30.0 \quad (j=1, 2, \dots, 128) \end{aligned}$$

である.

式(1)を用いて壁を変換した結果を図 1 に示す.

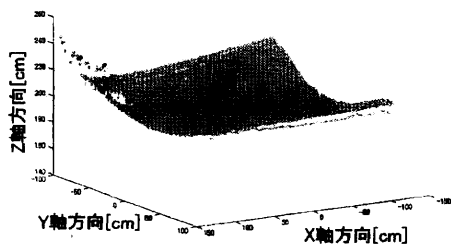


図 1 距離画像の 3 次元座標変換例

図 1 では依然, 湾曲が残っているのが見て取れる. これは画角の設計値と実際の製品の間に誤差があること, さらに搭載されているレンズ固有の歪みがあるためと考えられる(著者らの知らない変換処理があらかじめ仕込まれている可能性もある).

正確な測量機がなかったため, この特性の補正は簡易な方法を試みた. まず補正值設定用として, できるだけ正確に壁と垂直をとるようにカメラを設置し, 平面のデータを取得する. 壁を平面のモデルとして利用する. 計測したデータの歪みを直せば簡易ながら平面に補正できる. 計測した距離画像で 3 次元上での対象物の

座標と原点を通る直線式を求める. 奥行 (Z 軸方向) をある値で固定し, X, Y 値を再計算して平面を再構築する. 補正值を用いた補正結果を図 2 に示す. 図の濃い灰色の曲面が補正前, 下側の薄い灰色の平面が補正後の例である.

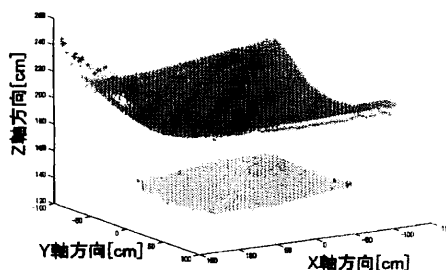


図 2 距離画像の補正例

#### 4. 位置推定手法

カメラの位置, 姿勢を推定するために被測定物の特徴点を抽出する. 今回用いた距離画像センサでは距離画像と濃淡画像を同時に取得できるため, 本研究では濃淡画像に対して KLT 法[8] を適用して物体の特徴点を抽出する.

位置, 姿勢推定にはフレーム間で対応する特徴点を用いる. なお, 対応する特徴点の数は画像によって変化するため, 一定ではない.

次に物体の移動量を推定する. 移動前の特徴点の集合と移動後の対応する特徴点の集合について, 回転行列  $R$  を特異値分解による解法[9, 10]を用いて求める.

移動前の特徴点ベクトルを  $p_k(x_k, y_k, z_k)$ , 移動後の対応する特徴点ベクトルを  $p'_k(x'_k, y'_k, z'_k)$  とする.

ここで  $k=1, 2, \dots, n$  は特徴点の個数である.

次に移動前の特徴点の集合を  $A$ , 移動後の特徴点の集合を  $B$  としたとき,

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_k \\ y_1 & y_2 & \dots & y_k \\ z_1 & z_2 & \dots & z_k \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} x_1' & x_2' & \cdots & x_k' \\ y_1' & y_2' & \cdots & y_k' \\ z_1' & z_2' & \cdots & z_k' \end{bmatrix}$$

とあらわせる。このとき、対象物の移動量は以下の式で与えられる。

$$A = RB + t \quad (2)$$

$R$ は $3 \times 3$ の回転行列、 $t$ は平行移動ベクトル  $t = [x, y, z]^T$ である。

平行移動ベクトル  $t$ は以下のように求まる。

$$t = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (p_k - p_k') \quad (3)$$

ここで  $A$  から平行移動ベクトルを取り除いた  $p_k - t$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )を  $A$  と置きなおして、回転行列を求める。回転前の特徴点ベクトルと回転後の特徴点ベクトルを用いて、回転移動量を表現する。

$$p_k = Rp_k', \quad k=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

それぞれのベクトルには誤差を含むため、下記の評価関数を最小化する  $R$ を求める[10]。

$$C = \sum_{k=1}^n \|Rp_k' - p_k\|^2 \quad (5)$$

$C$ の最小化は

$$C' = \sum_{k=1}^n p_k^T R p_k' \quad (6)$$

の最大化に等しく、さらに式(6)は以下のように変形できる。

$$C' = \text{trace} \left( R^T \sum_{k=1}^n p_k p_k'^T \right) \quad (7)$$

ここで

$$\sum_{k=1}^n p_k p_k'^T = U \Sigma V^T \quad (8)$$

のように特異値分解を行い、回転行列  $R$  を

決定する。

ここに、 $U, V$ は直交行列、特異値対角行列  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ である。

手法をまとめると以下ようになる。

1. 前後の濃淡画像から KLT 法を用いて、特徴点の座標を検出
2. 特徴点と対応した距離画像上の 3 次元座標を求める
3. 移動前と移動後の特徴点の 3 次元座標から回転行列および平行移動量を算出
4. 1~3 をデータ取得中、繰り返す

本研究で用いる距離画像センサは毎秒 15 フレームと高速にデータを取得できる。しかし、測定誤差が大きいため誤差の中にカメラの移動量が埋もれてしまう可能性が高い。そこで今回はカメラの位置推定の検証に焦点を当て、離散的な点の上を移動するものとする。

検証のため定点間の回転角度、距離は既知として、正しくカメラの回転・移動が推定できているかを比較確認する。各定点では 150 フレーム分の距離画像を取得して平均距離画像を作成している。実験には定点ごとに作成した平均距離画像、および平均濃淡画像を定点の代表画像として扱っている。

## 5. 実験

実験環境は背面が壁に囲まれており、手前に机を設置した。机の上にはダンボールを置き、位置推定実験を行った。

今回、利用する定点は 9 箇所、それぞれ基準点(図 2 における机手前の足を基準とした)より半径 2m に位置し 10 度刻みで計測している。

また特徴点の抽出例を図 3 に示す。図は初期位置の濃淡画像に対して KLT 法によって抽出された特徴点を白い点で表示している。

特徴点の数は 1 枚の濃淡画像に対して上位 50 個を上限として抽出しているが、位置推定に用いる特徴点は移動前後の濃淡画像で KLT 法により対応がわかっている特徴点のみを用いた。

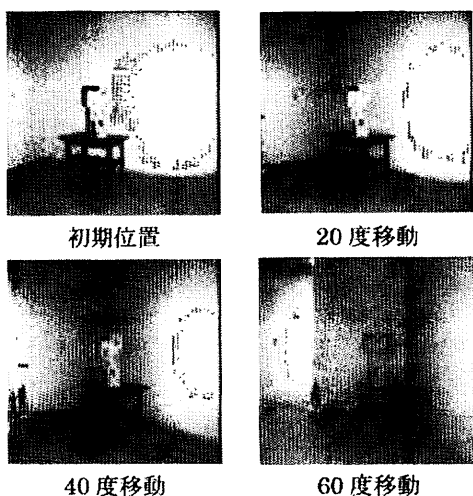


図 2 観測位置の例

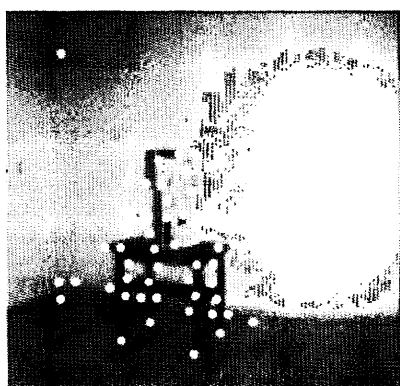


図 3 初期位置における特徴点(50個)

次に初期位置で取得した距離画像を式(1)により3次元座標に変換して補正を行った。3次元変換例を図4に示す。見易さから点群を色分けして図示している。色の薄い部分が床、色の濃い点群が背面の壁である。また中央部には机が濃い点群で表されている。

得られたカメラの移動量を次ページの図5に示す。図5はXZ平面の俯瞰図で、点群が得られた3次元モデル、薄い灰色の矩形が理想的なカメラ位置、濃い灰色の矩形が実際に推定したカメラ位置を示す。番号は定点の位置を表す。この図から理想的なカメラ位置と、推定されたカメラ位置が徐々に離れていく様子がみてとれる。これは誤差を蓄積しながら位置推定を行

っているため、ある点を境に大きく推定値がずれているものの、短期的には、ほぼ正確に推定している。

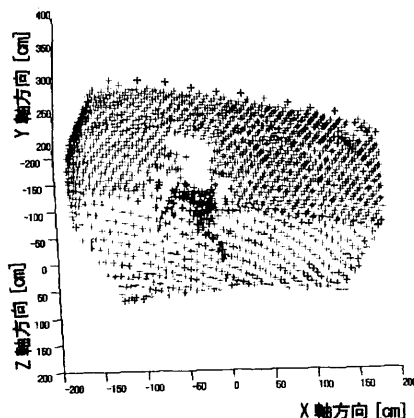


図 4 初期位置の3次元座標変換

## 6. おわりに

本研究ではカメラの位置、姿勢の推定を試みた。誤差の蓄積が大きな問題となるが機器の高速計測の特徴を生かして数フレームごとに3次元モデルを統合するなど工夫を行うことで広域な3次元モデルの作成が可能と考えられる。平均距離画像を使ったにも関わらず、誤差が大きかったことについて、検証を行った結果、利用したセンサの精度および特性に由来していたことがわかった。

この距離画像センサの特性として、物体のかどや、とがった箇所が多くで実際の座標と異なる大きな誤差が含まれている。KLT法は特徴点がエッジ部分に集中しているため、特徴点を3次元座標に変換した際、誤差の影響を強く受けてしまう。対処法として、平面部または模様を特徴点として利用することや、濃淡画像を用いず、距離画像の中から安定的な特徴点を抽出すること、推定部分をカルマンフィルタやパーティクルフィルタなど誤差に対してロバストな手法に改良する方法が考えられる。

本研究の一部は日本文部科学省のオープン・リサーチ・センター整備事業による私学助成を得て行われた(平成16年度・20年度)。

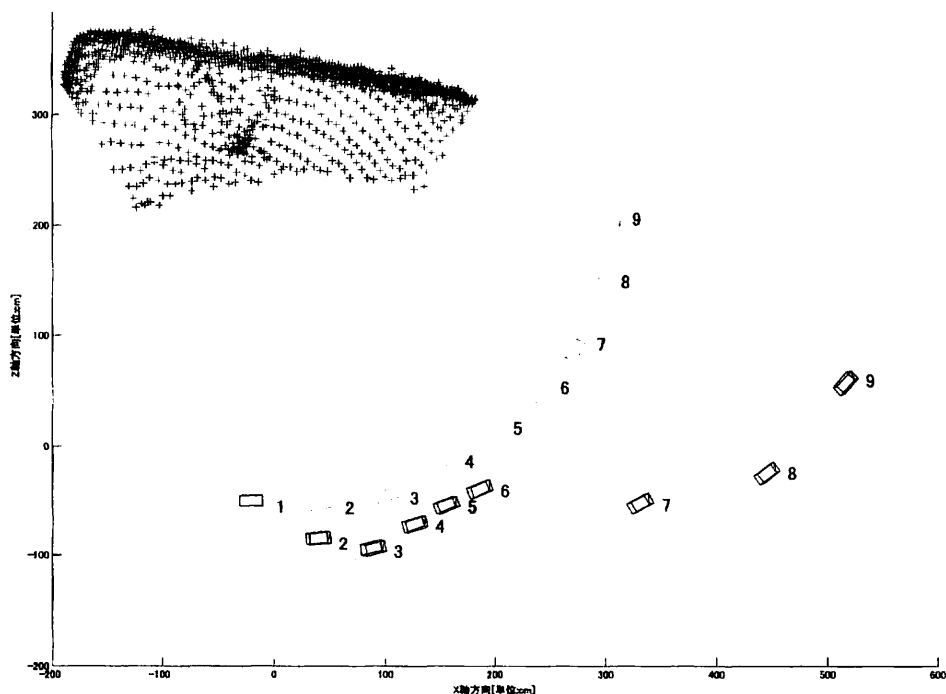


図 5 カメラ位置推定の結果

## 参考文献

- [1] J. A. Beraldin et al., "Virtual Reconstruction of Heritage Sites: Opportunities and Challenges Created by 3D Technologies", *International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*, Ascona, Switzerland. (Invited). May 22-27, 2005.
- [2] 阪野貴彦他, "大型有形文化財計測のための気球搭載型レンジセンサ", 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告, Vol.2005 No.18, pp.213-220, 2005.
- [3] C. Cheng, C.-H. Chen, D. Page, A. Koschan, M. Abidi, "Modular Sensor Processing for Robotics-Based Security in Hazardous Environments," *1st Joint Emr. Prep. & Resp./Robotic & Remote Sys. Top. Mtg.*, Salt Lake City, UT, Feb. 2006.
- [4] B. Ristic, S. Arulampalam and N. Gordon, *Beyond the Kalman Filter - Particle Filters for Tracking Applications*, Artech House, 2004.
- [5] E. Meier and F. Ade, "Tracking Cars in Range Image Sequences", *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 105-110, 1997.
- [6] 岡 兼司他, "適応的拡散制御を伴うパーティクルフィルタを用いた頭部姿勢推定システム", 電子情報通信学会論文誌, Vol.88, No.8, pp.1601-1613, 2005
- [7] 佐藤 智和他, "マルチベースラインステレオ法を利用した動画像からの屋外環境の三次元モデル化", 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 275-282, June 2002.
- [8] Jianbo Shi and Carlo Tomasi, "Good Features to Track", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 593-600, 1994.
- [9] K.S. Arun, T.S.Huang, and S.D.Blostein, "Least-squares fitting of two 3-D point sets", *IEEE Trans. PAMI*, 9 (5), pp.698-700, September 1987.
- [10] 徐剛, 写真から作る3次元CG イメージ・ベースド・モデリング&レンダリング, 近代科学社, 2001.