

## 誤差分布と物体形状を考慮した深度センサの計測精度向上

Improving Measurement Accuracy of Depth Sensor  
Using Error Distribution and Object Shape豊福 高史<sup>†</sup> 中村 和晃<sup>†</sup> 新田 直子<sup>†</sup> 馬場口 登<sup>†</sup> 田中 宏徳<sup>‡</sup> 安達 馨<sup>‡</sup>Takashi TOYOFUKU<sup>†</sup> Kazuaki NAKAMURA<sup>†</sup> Naoko NITTA<sup>†</sup> Noboru BABAGUCHI<sup>‡</sup>Hironori TANAKA<sup>‡</sup> and Kaoru ADACHI<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

工場等では様々な加工部品の品質検査の一つとして歪みの計測が必要となる。歪みは一般に微小であるため、非常に高精度な計測が要求されるが、現在この精度を満たす三次元測定器は高価かつ計測に時間がかかる。本研究は、精度は劣るが、安価かつ手軽にセンサから計測対象までの距離である深度値を計測できる深度センサ Kinect v2 に対し、計測精度の向上を目指す。

従来手法として、深度センサに内蔵されている赤外線カメラの焦点距離や赤外線カメラと赤外光プロジェクタの幾何学的関係[1]、物体表面の法線マップ[2]、複数視点からの計測結果[3]等を利用する手法が提案されている。これらの手法では計測対象を任意形状の物体としているが、加工部品の品質検査では、計測対象が同種の物体であり、かつ物体やセンサの位置を制御することが可能である。そこで本研究では、このような制限された環境において、計測対象物体の各点に対して取得される計測値の誤差分布、および計測対象物体の概形を事前知識として用いることにより、より簡便に精度向上を実現する手法を提案する。

## 2. 計測精度向上手法

提案手法では、深度センサと計測対象物体は固定位置に設置されると仮定する。計測対象物体の計測値として得られる $I$ 個の三次元座標の集合 $P = \{p_i \in \mathbb{R}^3 | i = 1, \dots, I\}$ から誤差を軽減した補正值の集合 $S = \{s_i \in \mathbb{R}^3 | i = 1, \dots, I\}$ を得ることを目的とする。ここで、上記の仮定より、計測値としては対象物体上のほぼ同じ点の三次元座標が常に得られる、つまり、計測値 $p_i$ に対応する物体上の点は常にほぼ同一であると期待される。また、計測値の誤差は、センサから計測対象までの距離やセンサに対する計測対象面の角度に依存するため、計測対象の各点に対し、誤差の出方は異なると考えられる。そこであらかじめ、三次元座標の真値 $G = \{g_j \in \mathbb{R}^3 | j = 1, \dots, J\}$ が既知の計測対象を用いて計測対象の各点に対する誤差分布を取得する。この誤差分布に加え、計測対象物体の概形を事前知識として用い、信頼度の低い計測値に対しより大きな補正をかけた上で、計測された三次元座標集合をその概形に近づけるような最適化問題を解くことにより、計測値の誤差を軽減する。提案手法は図 1 に示すように、以下の 2 ステップにより構成される。ただし、計測対象物体は平面に限定する。

## 2.1 誤差分布の取得

真値 $G$ が既知の物体に対し、 $M$ 回の計測により三次元座標 $Q_m = \{q_{mi} \in \mathbb{R}^3 | i = 1, \dots, I\}$  ( $m = 1, \dots, M$ ) を取得する。各 $Q_m$ と $G$ を ICP アルゴリズム[4]により位置合わせし、各点

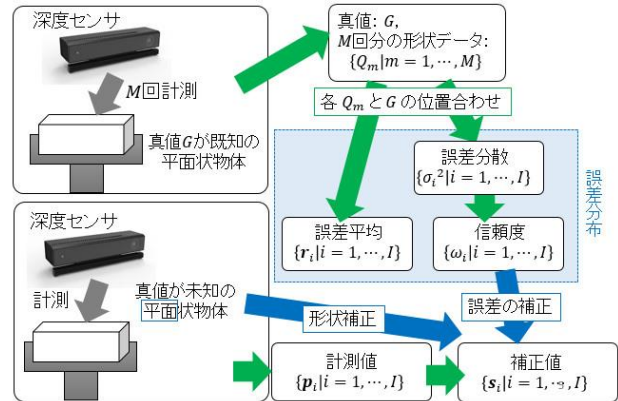


図 1 概要図

の誤差分布から、真値と計測値の誤差の平均 $r_i$  ( $i = 1, \dots, I$ )、及び誤差の分散 $\sigma_i^2$  ( $i = 1, \dots, I$ )により決定される計測値の信頼度 $\omega_i$  ( $i = 1, \dots, I$ )を求める。信頼度 $\omega_i$ は、誤差の分散 $\sigma_i^2$ が大きいかほど 0 に、小さいほど 1 に近づくよう次式により決定する。ただし、 $\bar{\sigma}$ は $\sigma_i$ の平均値である。

$$\omega_i = \exp(\sigma_i^2 / 2\bar{\sigma}^2) \quad (1)$$

## 2.2 誤差の補正

真値が未知の計測対象物体に対する計測値 $P$ から補正值 $S$ を推定する問題は、各点の計測値の誤差の出方を表す $r_i$ 、 $\omega_i$ 、及び物体形状が平面であるという 2 つの事前知識を用いて以下の最適化問題に帰着できる。

$$s_i = \operatorname{argmin}_{s_i} \sum_{i=1}^I \omega_i \|s_i - (p_i - r_i)\|^2 + \sum_{i=1}^I \lambda \left\| s_i - \frac{1}{|N_i|} \sum_{k \in N_i} s_k \right\|^2 \quad (2)$$

ただし、 $\lambda$ は第 1 項と第 2 項のバランスを決定するパラメータ、 $N_i$ は $i$ 番目の点の近傍点のインデクスの集合である。式(2)の第 1 項は計測値と補正值の差を最小化するための項で、信頼度の高い位置に対する補正量が誤差平均となるよう制約を設け、第 2 項は、補正された三次元座標集合が計測対象物体の形状である平面に近づくよう、近傍の補正值の差を最小化するための項である。

ここで、 $i$ 番目の点と $k$ 番目の点の近傍関係を表す行列 $L$ を次式で定義する。

$$L_{ik} = \begin{cases} -1 & (i = k) \\ -1/n_i & (i \neq k \text{ かつ } i \text{ と } k \text{ が近傍関係にある}) \\ 0 & (i \neq k \text{ かつ } i \text{ と } k \text{ が近傍関係にない}) \end{cases} \quad (3)$$

ただし $L_{ik}$ は $L$ の $i$ 行 $j$ 列成分、 $n_i$ は $i$ 番目の点における近傍点の数を表す。これに加え、 $p_i$ 、 $s_i$ 、 $r_i$ をそれぞれ縦に並べた $I \times 3$ 行列 $P = (p_1 \dots p_I)^T$ 、 $S = (s_1 \dots s_I)^T$ 、 $R = (r_1 \dots r_I)^T$ 、及び $\omega_i$ を対角成分とする $I \times I$ 対角行列 $W$ を利用すると、式(2)の右辺は、次式で表される。

$$W \|S - (P - R)\|^2 + \lambda \|LS\|^2 \quad (4)$$

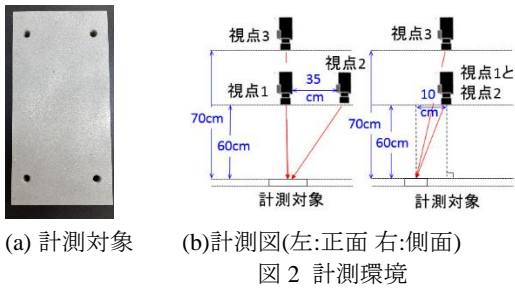


表 1 真値との平均誤差(mm)

	近傍	$\lambda$	誤差分布有り	誤差分布無し	補正無し
視点1	4	1	0.392	0.592	0.612
		10	0.403	0.564	
	24	1	0.382	0.573	
		10	0.395	0.534	
視点2	4	1	0.388	0.533	0.55
		10	0.402	0.506	
	24	1	0.381	0.514	
		10	0.405	0.485	
視点3	4	1	0.292	0.43	0.443
		10	0.307	0.41	
	24	1	0.285	0.419	
		10	0.305	0.395	

これを最小化する最適な補正值 $\hat{S}$ は式(5)により求まる.

$$\hat{S} = (W + \lambda L^T L)^{-1} W(P - R) \quad (5)$$

### 3. 評価実験

図 2(a)に示す長辺 20cm, 短辺 10cm, 高さ 2.5cm の直方体の無光沢の金属物体を計測対象として準備した. 計測対象面の三次元座標の真値は GOM 社製の三次元測定器である ATOS により計測した. 平面度は 0.08mm 以下であり, 平面とみなすことができる. この物体を深度センサ Kinect v2 を用いて図 2(b)に示す位置関係で三視点から計測した. ただし図 2(a)に示す穴の部分の三次元座標点は人手で除去した.

まず,  $M = 100$ として誤差分布を取得した後, 同じ物体を同じ視点から別に取得した 10 回の計測値それぞれに対して, 式(5)を用いた補正を行った. ただし, センサと計測対象物体の位置関係などに依らず計測値に含まれるランダムノイズの影響を低減するため, 連続して取得した 500 フレームの計測結果を平均したものを 1 回の計測値とした. 実験では, 誤差分布を利用しない場合 ( $\omega_i = 1, r_i = 0$  ( $i = 1, \dots, I$ )) の補正結果と比較し, 誤差分布の有用性を評価した. いずれの場合も $\lambda = 1, 10$ とし, 近傍点は 4 近傍, 24 近傍の 2 種類を用いた.

表 1 に, 補正値を真値と位置合わせし算出した, 真値と補正値の平均誤差を示す. 表 1 から, いずれの視点においても, 誤差分布を考慮しない場合は, 近傍点が多く $\lambda$ が大きいとき最も正しく補正され, 平均 12%誤差が軽減した. これは式(2)の第 2 項の概形への近似の効果と考えられる. 一方, 誤差分布を考慮する場合, 近傍点が多く $\lambda$ が小さいとき最も正しく補正され, 平均 35%誤差が軽減した. 図 5 に誤差が最も軽減した視点 1 の誤差のヒストグラムを示す. 誤差分布を考慮しない場合, 誤差 0.9mm 以上の点が 13.5%, 0.3mm 以下の点が 10.8%であるのに対し, 誤差分布を考慮する場合, それぞれ 0.9%, 32.9%となり, 概形への近似の

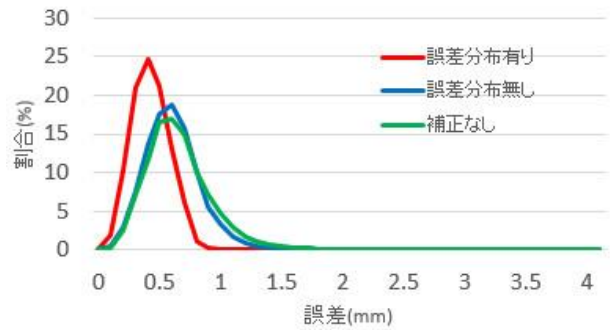


図 5 真値との誤差のヒストグラム

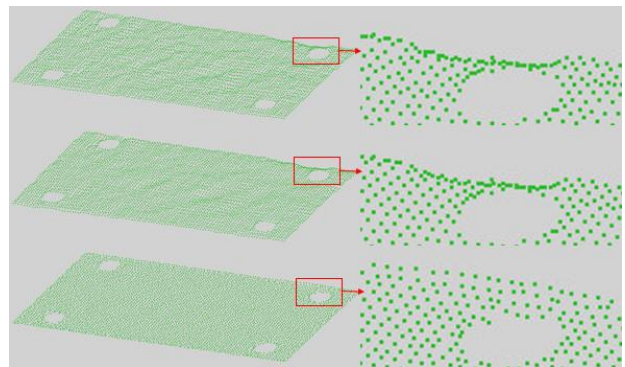


図 6 点群(上から補正無し, 誤差分布無し, 誤差分布有り)

際, 信頼度の高い点の補正量を制限することにより, より多くの点が正しく補正されたことが分かる. 図 6 にこのとき得られた点群を示す. 誤差の大きい赤枠の部分のように, 誤差分布を考慮しない場合と比べ, 考慮する場合は, 信頼度の低い点が他の点より多く補正され, 形状が平面に近づいており, 誤差のばらつきが小さい点を信頼した平滑化が, 深度センサの精度向上に有効であることが示された.

### 4. おわりに

本研究では, 制限された計測環境において, 深度センサにより得られる計測値の誤差分布の, 精度向上への有効性を検証した. さらに, 誤差分布の取得時に用いた物体と同種の異なる物体を用いた補正結果の評価により, 誤差分布の汎用性を検証する必要がある.

#### 参考文献

- [1] K. Khoshelham, et al., "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications," Sensors, Vol.12, No.2, pp.1437-1454 (2012).
- [2] A. Kadambi, et al., "Polarized 3D: High-Quality Depth Sensing with Polarization Cues," Proc. Int'l Conf. on Computer Vision, pp.3370-3378 (2015).
- [3] R. A. Newcombe, et al., "KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking," Proc. Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.127-136 (2011).
- [4] S. Rusinkiewicz, et al., "Efficient Variants of the ICP Algorithm," Proc. Int'l Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.145-152 (2001).

† 大阪大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka University

‡ (株)小松製作所 Komatsu Ltd